Aix-Marseille Université
École Doctorale 251 Sciences de l'environnement

THÈSE DE DOCTORAT
Géosciences de l'environnement

présentée par

Jean ODRY

Prédétermination des débits de crues extrêmes en sites non jaugés

Régionalisation de la méthode par simulation SHYREG

Thèse préparée au sein de l'équipe Risques Hydrométéorologiques (RHAX)
Unité de recherche Risques, Écosystèmes, Vulnérabilité, Environnement (RECOVER)
Irstea, Aix-en-Provence

Soutenue publiquement le 14 décembre 2017, à Aix-en-Provence
devant le jury composé de :

M. **MOUSSA** Roger	Directeur de Recherche, INRA	**Rapporteur**
M. **OUDIN** Ludovic	Maître de Conférences, UPMC	**Rapporteur**
M. **BOUVIER** Christophe	Directeur de Recherche, IRD	**Examinateur**
M. **BRIGODE** Pierre	Maître de conférences, Université Nice Sophia Antipolis	**Examinateur**
Mme **FAVRE** Anne-Catherine	Professeur, ENSE^3 – Grenoble INP	**Examinateur**
M. **ARNAUD** Patrick	Ingénieur de Recherche, Irstea	**Directeur de thèse**

Numéro national de thèse/suffixe local : 2017AIXM0424/036ED251

Résumé

L'estimation de l'aléa hydrologique en sites non jaugés présente un enjeu important pour la gestion des risques. La complexité du phénomène réside à la fois dans la nécessité d'avoir une approche multivariée (estimation de caractéristiques multiples des crues : durées, périodes de retour) qui propose une extrapolation raisonnable des événements. SHYREG est une méthode basée sur la simulation de scénarios de crues, qui présente ces avantages. Évaluée lors du projet ANR ExtraFlo, elle présente de bonnes performances en justesse et en stabilité lorsqu'elle est calée sur des données locales de débits. Cette méthode vise à estimer des débits de crue en tout point du territoire. Elle doit donc pouvoir être appliquée en site non jaugés.

Le travail de thèse présenté ici se focalise sur le transfert de la méthode vers le non jaugé en s'intéressant aux valeurs des débits simulés mais aussi à leur cohérence. Tout d'abord, une révision du calage a permis de s'assurer de la cohérence des débits simulés le long d'un cours d'eau. Ensuite, l'application d'un large panel de méthodes de régionalisation a permis de déterminer que la régionalisation devait s'appuyer à la fois sur la structure spatiale et sur les caractéristiques physiographiques des bassins. Finalement, une méthode qui régionalise SHYREG simultanément à son calage a été retenue. Une comparaison avec d'autres approches régionalisées a mis en évidence la qualité du modèle développé.

Mots-clés : Hydrologie, Analyse fréquentielle des crues, Non jaugé, Régionalisation, SHYREG

Abstract

Flood hazard estimation in ungauged sites presents a major challenge for risk management. The complexity of the phenomenon arises from both the need for a multivariate approach (estimation of different flood characteristics: peak flow, volume, duration ...), and for an approach which offers a reasonable extrapolation of extreme events. The SHYREG method is based on the simulation of flood scenarios and presents these benefits. It has been evaluated during the ANR ExtraFlo project. It showed good performance in both accuracy and stability when calibrated against local discharge data. However, weaknesses have been identified when implemented in ungauged sites.

The objective of the present thesis is to develop the method in order to improve the SHYREG performances in ungauged sites. Two kinds of modifications were implemented. First, the calibration of the method in gauged sites was reviewed. The main idea was to integrate more data and to take more into account the coherence between simulated discharges in different sites. Then, diverse regionalisation schemes extracted from the scientific literature were considered. Their application demonstrated the necessity to exploit information from nearby sites and the physical properties of the catchments. Finally, a version which realises the regionalisation simultaneously to the calibration has been selected. Its comparison with other method showed the quality of this new version of SHYREG.

Keywords: Hydrology, Flood Frequency Analysis, Ungauged, Regionalisation, SHYREG

Remerciements

Après trois années passées sur un projet qui constitue une aventure tant professionnelle que personnelle, la liste des gens que je voudrais remercier pour leur soutien direct ou indirect est nécessairement assez longue. Je m'excuse donc par avance si certains noms venaient à manquer.

Comme une évidence, en tout premier lieu je tenais sincèrement à remercier Patrick Arnaud pour avoir proposé ce sujet de thèse, pour m'avoir sélectionné et surtout pour m'avoir encadré pendant ces trois années. Je ne pourrais pas compter le nombre de fois où je suis venu frapper à ta porte avec quelques graphiques et beaucoup de questions. Je n'aurais pas pu rêver d'un directeur de thèse plus disponible et patient que tu ne l'as été. Je ne me suis jamais senti idiot de poser toutes les questions naïves que peut avoir un débutant en hydrologie. Pour toute ta pédagogie et pour avoir toujours considéré mon travail comme une priorité, je t'adresse un grand merci. Grâce à toi j'ai beaucoup appris.

Puisque préparer un doctorat c'est aussi être évalué, je tiens à remercier tout particulièrement messieurs Roger Moussa et Ludovic Oudin d'avoir accepté d'être les rapporteurs de mon travail, ainsi que madame Anne-Catherine Favre et messieurs Christophe Bouvier et Pierre Brigode pour avoir accepté de faire partie du jury. Je tiens également à remercier tous les membres de mon comité de pilotage (Yoann Aubert, Emmanuel Paquet, Michel Lang, David Nerini, Benjamin Renard et Ludovic Oudin) pour le temps passé et les conseils délivrés pour aiguiller ma thèse.

Je remercie également la Direction Générale de la Prévention des Risques du ministère en charge de l'environnement pour avoir financièrement soutenu mon travail de thèse.

Un projet de thèse se murit dans le temps. Dans mon cas, la graine a été plantée en 2014 au cœur d'un jardin à l'anglaise. J'ai envié et admiré mes amis doctorants Ally, Felix et John qui m'ont inspiré et ont accepté de partager leur expérience pour m'aider à prendre ma décision. Je me dois aussi de citer Gisli et Pablo, mes camarades doctorisants de l'époque. Nous semblions de tempérament bien différent et pourtant l'émulsion fut grisante et si enrichissante. Dans notre Europe à nous les débats étaient sans fin, les crises se produisaient mais il en sortait toujours quelque chose de beau. Cette fine équipe ne saurait être complète sans ajouter Liz, merci d'avoir était une perle de folie dans notre bulle académique. Enfin, merci à tous mes camarades de *Hatfield College* pour avoir été un cercle universitaire aussi stimulant pendant une année de master incroyable. Sans toutes ces personnes je n'aurais probablement pas envisagé de préparer une thèse.

Puisque j'en suis à remercier les gens qui m'ont accompagné avant ma thèse, je tiens à saluer les enseignants qui m'ont aidé par leurs conseils, encouragements et recommandations : Louise Bracken, Sim Reaney et Jean- François Hetet. Merci de m'avoir aidé à m'orienter.

Quand je suis arrivé pour la première fois dans les locaux d'Irstea à Aix en Provence, j'avais un peu peur de me retrouver au milieu d'un laboratoire de vieux chercheurs en blouse blanche. Et puis j'ai découvert que la recherche pouvait aussi être réalisée par des équipes jeunes et dynamiques. Un peu trop dynamique et mouvante pour que je puisse tous les citer, désolé pour les oublis.

Au sein de l'équipe RHAX, merci à Patrick (encore), Nathalie, Pierre et Catherine, nos chercheurs temps plein, pour les moments à échanger autour d'un café, et pour toutes vos remarques qui ont permis de faire avancer mon travail. Merci aussi à Mathieu, qui m'a aidé plus d'une fois à me vider la

tête grâce à nos sorties trail sur la Sainte-Victoire entre midi et deux. Merci à Philippe d'avoir partagé son bureau pendant plus de deux ans. Merci à Stéphane et Antony, nos joyeux drilles qui savaient toujours égayer les journées moroses (aussi rares soient-elles en sous le soleil d'Aix). Merci à tous les stagiaires qui ont apporté un peu de fraicheur au cœur de la saison estivale : Amina, Aurore, Boe, Medhi, Maxime, Pierre, Guillaume et Thibault. Avec un merci tout particulier à Lucas que j'ai eu le plaisir d'encadrer pendant six mois. *Last but not least*, comment ne pas citer mes camarades doctorantes (et mêmes docteurs), mes trois drôles de dames à moi : Angelica, Clotilde et Florine. Merci à toutes les trois pour les moments échangés, les aventures en conférences, les soirées en centre-ville, les repas, les coups de gueules, le soutien et tous les bons moments. Angelica, tu as été un véritable rayon de soleil, pleine de surprises et de générosité, ta bonne humeur contagieuse me manque depuis que tu es retournée dans ta contrée lointaine. Mais ce n'est pas un petit océan de rien du tout qui va nous empêcher de venir te voir. Florine, comment oublier nos escapades (et escalopes) viennoises. Tu as toujours fait partager tes expériences et tes conseils pour essayer d'aider. Et bien sûr Clotilde, colocataire, géographe, secouriste, pâtissière, couturière, cavalière, elle sauve le monde le samedi et vous prépare un *carrot cake* à tomber le dimanche. Toujours disponible pour rendre service ou partager les bons ou les mauvais moments. J'espère que les mois à venir nous réserverons encore pleins de voyages, moments exaltants et chatons en tout genre. Bon courage pour ta dernière année, je sais qu'elle sera couronnée de succès. Merci à vous tous, ces trois années n'auraient pas été les mêmes sans vous.

J'ai également une pensée amicale pour les autres employés ou ex-employés du centre d'Aix. Un grand merci à tous les doctorants (ou ex-doctorants) que j'ai pu croiser. Bon courage notamment à Juliet et Laetitia mes camarades de « promo », vous y êtes presque ! Sans tous les citer, merci à tous les adeptes du lundredi, du Kerry, du Sully ou de la cantine le midi. Tous ces moments partagés rendent les journées de travail tellement plus attirantes. Je ne les ai même pas vu passer.

D'un point de vue plus personnel, je tiens à remercier mes colocataires du *Bonheur des Dames,* qui ont su rendre ma dernière année, et surtout les mois de rédaction bien plus agréables et simples qu'ils n'auraient pu l'être. Merci donc à Clo encore une fois, à Gauthier notre aspirant charcutier mais squatteur confirmé et même à Nonoc, un exemple à suivre pour une vie sans stress. Merci également à Jérémy qui a non seulement réussi le challenge de me sortir la tête de la rédaction et qui a aussi accepté de jouer le relecteur non spécialiste.

Pour terminer, je ne peux pas omettre de remercier les membres de ma famille pour leur soutien. Je remercie bien sûr mes parents qui ont soutenu tous mes choix tout au long de ma scolarité. Cette fois papi ça y est, je vais enfin finir l'école. Merci aussi à ma sœur qui a toujours été présente. De Provence en Gironde et de New York en Australie, nos escapades sont les coupures annuelles dont j'ai besoin pour me ressourcer. Je pense également à ma grand-mère qui nous a quitté pendant ma première année et aurait été très fière.

J'ai beau l'avoir répété déjà vingt-six fois, je vais le refaire une dernière fois : merci à tous et à tous les autres.

Table des matières

Introduction 1

Partie I : La méthode SHYREG 5

Chapitre 1 : La prédétermination des crues 7

1.1. Contexte 9

1.2. La prédétermination des crues 12

1.3. Exemples d'approches de prédétermination régionalisées 24

1.4. Positionnement du travail de thèse 31

1.5. Conclusion du chapitre 33

Chapitre 2 : Principe de la méthode SHYREG 35

2.1. Introduction 37

2.2. Le générateur de pluie horaire 38

2.3. La modélisation hydrologique 50

2.4. Conclusion et critique 62

Chapitre 3 : Application de SHYREG en sites jaugés 65

3.1. Introduction 69

3.2. Données hydrologiques 70

3.3. Cadre de comparaison 76

3.4. Comparaison de différentes versions de SHYREG 83

3.5. Performances de la version choisie 93

3.6. Conclusion 97

Chapitre 4 : Désagrégation spatiale du calage 99

4.1. Introduction 103

4.2. Problématique de la cohérence spatiale des débits 105

4.3. Cartographie du paramètre 110

4.4. Introduction à la régionalisation simultanée 119

4.5. Conclusion 122

Partie II : Régionalisation de SHYREG 125

Chapitre 5 : Méthodes de régionalisation 127

5.1. Introduction 131

5.2. État de l'art 132

5.3. Présentation de méthodes testées....145
5.4. Conclusion....158
Chapitre 6 : Données pour la régionalisation....161
6.1. Introduction....165
6.2. Jeux de données....166
6.3. Découpage du territoire en régions....176
6.4. Étude du paramètre S0/A....178
6.5. Conclusion....183
Chapitre 7 : Performances de régionalisation....185
7.1. Introduction....189
7.2. Cadre de comparaison....190
7.3. Résultats de post-régionalisation....193
7.4. Résultats de régionalisation simultanée....209
7.5. Conclusion....214
Partie III : Évaluation de la méthode SHYREG....217
Chapitre 8 : Évaluation de la méthode SHYREG....219
8.1. Introduction....223
8.2. Vers une cartographie de l'aléa crue....224
8.3. Confrontation à d'autres approches....232
8.4. Conclusion....244
Conclusion....247
Bibliographie....251

Table des figures

Figure 1-1 : Modèle PAR (Blaikie et coll., 2014) 9
Figure 1-2 : Répartition du nombre d'années d'observation par station de mesure du débit en France 14
Figure 1-3 : Étapes associées à l'ajustement d'une loi de probabilité (Arnaud, 2015) 16
Figure 2-1 : Détail de l'analyse d'un évènement pluvieux du générateur SHYREG (Arnaud et Lavabre, 2010) 39
Figure 2-2 : Organisation des tirages aléatoires des différentes variables pour la construction de hyétogrammes simulés (Arnaud et Lavabre, 2010) 41
Figure 2-3 : Répartition géographique des pluviographes utilisés pour développer le générateur de pluies. 42
Figure 2-4 : Localisation des 11 zones homogènes pour la cartographie des paramètres journaliers (Arnaud et Lavabre, 2010) 45
Figure 2-5 : Cartographie des paramètres journaliers de SHYREG 46
Figure 2-6 : Cartes des quantiles de pluie SHYREG en mm 48
Figure 2-7 : Structure du modèle GR3H simplifié, d'après Aubert (2012) 51
Figure 2-8 : Carte de la capacité du réservoir de production A (en mm) 52
Figure 2-9 : Évolution des coefficients d'abattement avec la surface en France 54
Figure 2-10 : Écoulements moyens saisonniers (en mm) d'après le modèle LOIEAU 55
Figure 2-11 : Synthèse schématique du calage de la méthode SHYREG 57
Figure 2-12 : Principe de la procédure « sup »pour la cartographie de S0/A de bassins emboités (Aubert, 2012) 59
Figure 2-13 : Classes hydrogéologiques (Aubert, 2012) 60
Figure 2-14 : Cartes de S0/A régionalisé pour les saisons hiver et été 60
Figure 3-1 : Débits maximums médians par rapport à la surface des bassins 73
Figure 3-2 : Caractéristiques des bassins versants sélectionnés. 74
Figure 3-3 : Localisations des stations de l'échantillon de travail et de l'échantillon de validation finale 75
Figure 3-4 : Evolution des critères sur les débits de calage avec l'introduction d'une erreur sur le paramètre de S0/A 77
Figure 3-5 : Interprétation graphique du critère FF, d'après (Renard et coll., 2013) 79
Figure 3-6 : Valeurs des critères sur la reproduction des débits de calage pour différentes combinaisons de poids de calage 86
Figure 3-7 : valeurs des critères sur la reproduction des rapports entre les quantiles de différentes durées caractéristiques 86
Figure 3-8 : Évolution du rapport de quantiles biennaux de pointes sur les quantiles journaliers par rapport à la surface des bassins 87
Figure 3-9 : Score FF et biais FF pour différentes combinaisons des poids de calage 88
Figure 3-10 : Critères de stabilité pour les différentes combinaisons de poids 89
Figure 3-11 : Critère de « régionalisabilité » du modèle selon les différentes combinaisons de poids de calage 90
Figure 3-12 : Critères d'évaluation de SHYREG en hiver avec B=50mm. 91
Figure 3-13 : Performances de restitution des quantiles de calage de SHYREG selon le type de station de mesure 93

Figure 3-14 : Performances en extrapolation de SHYREG selon le type de station de mesure..... 95
Figure 4-1 : Débits de pointe décennaux le long du Loing, simulés par SHYREG avec un paramétrage global 107
Figure 4-2 : Schéma de la cohérence des débits introduite par la cartographie du paramètre S0/A 108
Figure 4-3 : Schéma de définition des complémentaires de bassins..... 111
Figure 4-4 : Distribution du critère ERQ pour les différentes méthodes de calage..... 114
Figure 4-5 : Distributions d'ERQ par classe de surface pour les différentes méthodes de calage a) Saison hiver ; b) saison été..... 115
Figure 4-6 : Critères sur la restitution des rapports QP/QJ..... 115
Figure 4-7 : Distribution des critères FF pour les différentes méthodes de calage Débits de pointe : (a) et (b). Débits journaliers : (c) et (d). Saison hiver : (a) et (c). Saison été : (b) et (d). 116
Figure 4-8 : Critères de stabilité pour les différentes méthodes de calage..... 117
Figure 4-9 : Critères d'explicabilité de S0/A pour les différentes méthodes de calage..... 118
Figure 4-10 : Principe de la méthode de régionalisation simultanée de SHYREG 120
Figure 5-1 : Schéma du flux d'information sur le débit au sein de la méthode SHYREG..... 133
Figure 5-2 : Schéma illustrant les principaux types de transfert dans la régionalisation 141
Figure 5-3 : Classement de méthodes de régionalisation selon le type de transfert et la nature de la similarité..... 143
Figure 5-4 : Exemple simple d'un arbre de régression 150
Figure 6-1 : Descripteurs climatiques saisonniers issus de SAFRAN..... 169
Figure 6-2 : Descripteur de l'aridité 169
Figure 6-3 : Descripteurs de l'humidité des sols..... 170
Figure 6-4 : Descripteurs topographiques 172
Figure 6-5 : Descripteur de la densité de drainage..... 172
Figure 6-6 : Principales zones d'occupation du sol..... 173
Figure 6-7 : Classes de capacité d'infiltration des sols..... 174
Figure 6-8 : Classes hydrogéologique à fonctionnement particulier..... 174
Figure 6-9 : Carte de la réserve utile potentielle en eau 175
Figure 6-10 : Regroupement en dix régions des hydro-écorégions..... 177
Figure 6-11 : Grands bassins hydrographiques..... 177
Figure 6-12 : Cartes des valeurs de S0/A calées 178
Figure 6-13 : Test de randomisation sur les valeurs de S0/A..... 179
Figure 6-14 : Résultat de l'analyse en composantes principales pour la saison hiver..... 181
Figure 6-15 : Résultat de l'analyse en composantes principales pour la saison été..... 182
Figure 7-1 : Principe de la validation croisée..... 190
Figure 7-2 : Principe de l'échantillonnage pour la calcul du score SPAN..... 191
Figure 7-3 : Impact de la taille du voisinage sur la méthode d'inverse de la distance 194
Figure 7-4 : Impact de la taille du voisinage sur les méthodes de krigeage 195
Figure 7-5 : Variogrammes expérimentaux et modélisés utilisés pour le krigeage ordinaire à 50 voisins..... 196
Figure 7-6 : Impact du nombre de descripteurs sur la méthode de régression linéaire 197
Figure 7-7 : Impact du nombre de descripteurs sur la méthode de régression linéaire par région 198

Figure 7-8 : Impact du nombre de descripteurs sur la méthode de régression linéaire avec interpolation spatiale des résidus 201
Figure 7-9 : Impact du nombre de descripteurs sur la méthode de krigeage à dérive externe avec interpolation spatiale des résidus 201
Figure 7-10 : Variogrammes expérimentaux et modélisés utilisés pour le krigeage à dérive externe à 50 voisins 202
Figure 7-11 : Impact du nombre de descripteur sur la méthode de régression à erreur spatiale 203
Figure 7-12 : Impact du nombre de descripteurs sur les performances de la méthode par groupement de bassins 204
Figure 7-13 : Comparaison synthétique des différentes méthodes de régionalisation 206
Figure 7-14 : Comparaison des critères FF des différentes méthodes de régionalisation 206
Figure 7-15 : Distributions du critère ERQ sur les sites de validation avec différents jeux de descripteurs 210
Figure 7-16 : Comparaison des méthodes de post-régionalisation et de régionalisation simultanée 212
Figure 7-17 : Distribution des valeurs de FF avec les méthodes de post-régionalisation et régionalisation simultanée 212
Figure 7-18 : Cartes de S0/A régionalisé obtenue sur les Vosges pour la saison hiver 213
Figure 8-1 : *Schéma des cas de construction de la cartographie de S0/A* 225
Figure 8-2 : Carte de S0/A issues des différents scénarios sur le département des Vosges pour la saison hiver 227
Figure 8-3 : Distribution des critères ERQ sur des bassins donneurs et receveurs selon les différents scénarios de cartographie 229
Figure 8-4 : Courbes de distribution de FF selon les différents cas de cartographie de S0/A régionalisé. 230
Figure 8-5 : Distribution des critères FF en sites jaugés 236
Figure 8-6 : Valeurs des critères SPAN en sites jaugés 237
Figure 8-7 : Distribution des critères ERQ entre quantiles régionalisés et estimés localement.. 238
Figure 8-8 : Distribution des critères FF sur les 400 sites de validation considérés non jaugés.. 239
Figure 8-9 : Valeurs des critères SPAN sur les 400 bassins de l'échantillon de validation considérés non jaugés 240
Figure 8-10 : Valeurs du critère R^2 sur l'erreur de régionalisation sur les 400 bassins de l'échantillon de validation considérés non jaugés 241

Liste des tableaux

Tableau 1-1 : Résumé des méthodes probabilistes de prédétermination régionalisées utilisées dans divers pays. 25
Tableau 2-1 : Lois de probabilité associées à chaque variable, d'après Arnaud et Lavabre (2010) 40
Tableau 2-2 : Valeurs des coefficients de la FTS 54
Tableau 2-3 : Poids relatifs sur les différents quantiles pour la calage de SHYREG 56
Tableau 3-1 : *Nombre de bassins sélectionnés selon les critères automatiques ou manuels* 71
Tableau 3-2 : *Récapitulatif des différents critères* 82
Tableau 3-3 : *Poids de calage utilisés dans les différents essais* 85
Tableau 3-4 : *Critères de « régionalisabilité » selon le type de station de mesure* 96
Tableau 4-1 : *Corrections sur S0/A associées aux classes d'erreur sur les débits de calage* 111
Tableau 5-1 : *Différents types de mises en régions possibles et correspondance avec la nature de la similarité* 140
Tableau 5-2 : *Classification de méthodes de régionalisation issues de la littérature scientifique* 144
Tableau 6-1 : *Résumés des différentes données physiographiques* 167
Tableau 7-1 : *Récapitulatif des différents critères* 191
Tableau 7-2 : *Comparaison des types de calcul de la distance dans la méthode de l'inverse de la distance* 194
Tableau 7-3 : *Modèles de régressions associés aux différentes régions* 199
Tableau 7-4 : *Impact de la mise en région sur les performances des arbres de régression* 200
Tableau 7-5 : *Modèles de régressions obtenus avec la méthode de géorégression* 201
Tableau 7-6 : *Descripteurs sélectionnés par la méthode de krigeage à dérive externe* 202
Tableau 7-7 : *Modèles de régressions spatiales sélectionnés* 203
Tableau 7-8 : *Apport de l'interpolation spatiale sur les valeurs du critère ERQ des différentes régions* 211
Tableau 7-9 : *Modèles linéaires à l'échelle des pixels associés à chacune des régions* 211
Tableau 8-1 : *Récapitulatif des critères utilisés* 227
Tableau 8-2 : *Récapitulatif des critères utilisés pour la comparaison des méthodes* 232
Tableau 8-3 : *Résumé des différentes méthodes comparées* 235
Tableau 8-4 : *Énumération du nombre d'incohérences introduites par chaque méthode sur les 400 bassins de validation considérés non jaugés* 242

« Les risques désignent un futur qu'il s'agit d'empêcher d'advenir.»
(Beck, 2001, p161)

Introduction

En France métropolitaine les inondations demeurent les catastrophes naturelles les plus dommageables. Les inondations représentent deux tiers des catastrophes naturelles graves survenues en France entre 1950 et 2012 (Service de l'observation et des statistiques, 2014)**.** Des évènements récents peuvent confirmer ce constat. On peut, par exemple, citer les inondations dans les Alpes-Maritimes, les 3 et 4 octobre 2015, qui ont causées 20 décès et quelques 600 millions d'euros de dommages en biens assurés (Préfet des Alpes Maritimes, 2016). Autre exemple, les fortes précipitations et les débordements de cours d'eau sur les bassins moyens de la Seine et de la Loire entre le 28 mai 2016 et le 8 juin 2016 sont à ce jour la seconde catastrophe naturelle la plus coûteuse de l'histoire française, juste après la tempête Xynthia, avec des dommages en biens assurés estimés autour d'un milliard d'euros (Perrin et coll., 2017).

L'origine et la nature des inondations peuvent être diverses. On peut parfois trouver une origine anthropique, comme par exemple une rupture d'ouvrages hydrauliques comme des barrages (on retient l'exemple de Malpasset en 1959) ou des digues (comme à Arles en 2003), mais elles sont souvent associées à des aléas naturels. Plusieurs phénomènes peuvent être identifiés : le ruissellement de surface (Paris en 2017), les submersions marines (tempête Xynthia sur la côte Atlantique en 2010), les remontées de nappe (la Somme en 2001), les débordements à cinétiques lentes (crues de la Seine en 1910 ou 2016) et les débordements à cinétiques rapides ou crues éclairs (Vaison la Romaine 1992, Gard 2002, Alpes-Maritimes 2015). Dans les deux derniers cas on parle de de crues ou de débordements de cours d'eau. On définit une crue comme « un écoulement relativement fort tel qu'il est mesuré par la hauteur d'eau ou le débit » (WMO et UNESCO, 2012).

En France, 17,1 millions d'habitants et 9 millions d'emplois sont exposés aux conséquences des inondations par débordement de cours d'eau (Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2016).

La réglementation française pour la protection et la prévention des inondations est généralement basée sur la connaissance préalable de différents niveaux d'intensité des crues qui permettent, par exemple, de dimensionner les ouvrages ou de définir des zones inondables. Ces niveaux sont définis à partir de la probabilité qu'ils ont d'être dépassés chaque année. Il est donc nécessaire de disposer d'outils permettant d'estimer la relation entre l'intensité et la fréquence des crues.

De nombreux outils, plus ou moins complexes, existent. Néanmoins, tous reposent sur l'utilisation de données collectées lors d'évènements passés. La difficulté tient dans le fait que ces données sont limitées à la fois temporellement et spatialement. En effet, comment estimer le débit d'une crue dont le temps de retour moyen est bien supérieur à la longueur de la période d'observation ? Dans ce cas, il est probable que le niveau de la crue que l'on cherche à estimer n'ait jamais été mesuré. En outre, on ne dispose que d'un nombre limité de sites d'observations du débit, alors que les estimations des crues peuvent être nécessaires en tout point.

Pour surmonter ces écueils, Irstea a développé un outil permettant de caractériser la relation intensité-probabilité d'occurrence à la fois des pluies et des crues extrêmes sur l'ensemble du territoire français. Cet outil, baptisé SHYREG, associe un générateur aléatoire de pluies horaires et un modèle de transformation de la pluie en débit (Arnaud et Lavabre, 2010 ; Aubert et coll., 2014 ; Arnaud, 2015). Le générateur est capable de simuler une multitude d'évènements pluvieux de caractéristiques réalistes par rapport aux observations, et le modèle pluie-débit peut les transformer en évènements de crues. À partir de ces longues séries d'évènements simulés on peut extraire une distribution de fréquence empirique de l'occurrence des pluies, et des débits de crue.

Entre 2009 et 2013, le projet Extraflo (Renard et coll., 2013 ; Lang et coll., 2014) a permis une comparaison des méthodes d'estimation des pluies et crues extrêmes employées en France, parmi lesquelles SHYREG. La méthode a été évaluée comme performante pour l'évaluation des pluies extrêmes tant en site jaugé (Neppel et coll., 2014) que non jaugé (Carreau et coll., 2013), ainsi que pour l'évaluation des débits de crues en site jaugé (Kochanek et coll., 2014 ; Arnaud et coll., 2016a). Néanmoins, aucune des méthodes testées n'a pu atteindre un niveau de performance satisfaisant pour l'estimation des crues en l'absence de données de débits (Kochanek et coll., 2014).

L'objectif du travail présenté ici est donc de proposer des modifications de la méthode SHYREG pour améliorer l'estimation des crues extrêmes en sites non jaugés. Pour cela deux axes principaux sont traités.

Le premier axe repose sur la révision de certaines hypothèses faites dans le développement de la méthode. On s'autorise tout d'abord à modifier les valeurs de certains paramètres imposés a priori dans la modélisation pluie-débit SHYREG en observant leur impact sur les débits simulés.

Le second axe porte sur la comparaison de diverses approches utilisées pour permettre l'estimation des paramètres de SHYREG en tout point du territoire français. En effet, de nombreuses études ont porté sur le transfert de modèles hydrologiques de bassins jaugés vers des bassins non jaugés. Ces travaux permettent de mettre en évidence des méthodes aussi nombreuses que diverses. On se propose donc de mettre en œuvre un panel de ces méthodes, parmi celles qui sont les plus utilisées, et de comparer leurs performances dans le cadre de SHYREG.

Pour l'ensemble de cette étude, on s'est basé sur un large échantillon de bassins versants jaugés, répartis sur l'ensemble du territoire métropolitain français et représentant sa diversité hydrologique (diverses zones climatiques, différents types de réponses). L'évaluation des différents modèles envisagés sera effectuée à travers des procédures de calage et validation qui consistent à écarter certaines données lors du développement d'une méthode afin de ne les utiliser que pour sa validation. On s'assure ainsi de la capacité de la méthode à fonctionner avec d'autres données (d'autres périodes, d'autres sites).

Ce mémoire s'organise autour de trois grandes parties, dont les deux premières reprennent les deux axes principaux de recherche. Chaque partie étant composée de plusieurs chapitres.

La **partie I** s'organise autour de la méthode SHYREG en présentant les grands principes et un état de l'art de la prédétermination des crues. On s'intéressera ensuite à la structure de départ de la méthode SHYREG avant d'analyser ses performances sur notre jeu de bassins et d'envisager des modifications de la méthode.

La **partie II** est orientée sur le transfert en sites non jaugés des modèles pluie-débit. On s'intéressera donc tout d'abord à présenter les méthodes existantes et celles utilisées dans cette étude, puis on présentera les données disponibles pour les mettre en œuvre. Enfin, les différentes approches seront comparées de manière à sélectionner le modèle le plus performant dans le cas de la méthode SHYREG.

Enfin, la **partie 3** cherchera à prendre du recul sur la méthode développée pour la comparer à d'autres approches de prédétermination des crues en sites non jaugés. On cherchera également à discuter de la pertinence de la méthode SHYREG pour un transfert vers le domaine opérationnel.

.

Partie I : La méthode SHYREG

« A propos d'une inondation, d'un orage, etc., les vieillards
du pays ne se rappellent jamais en avoir vu un de semblable.»
(Flaubert, 1910)

Chapitre 1 : La prédétermination des crues

1.1. Contexte 9
1.1.1. Catastrophes, risques et aléas naturels 9
1.1.2. Exemples dans la réglementation française 10
1.2. La prédétermination des crues 12
1.2.1. Définition 12
1.2.2. Un système déterministe complexe 12
1.2.3. Les modèles simplifiés 13
1.2.4. Limite spatiale et extrapolation vers le non jaugé 20
1.3. Exemples d'approches de prédétermination régionalisées 24
1.3.1. Vue d'ensemble pour divers pays 24
1.3.2. Au Royaume-Uni 26
1.3.3. En Espagne 27
1.3.4. Aux États-Unis 28
1.3.5. En France 28
1.4. Positionnement du travail de thèse 31
1.5. Conclusion du chapitre 33

1.1. Contexte

1.1.1. Catastrophes, risques et aléas naturels

Une catastrophe naturelle peut être conceptualisée comme la concomitance d'un évènement naturel déclencheur, survenant sur un territoire dans un état de faiblesse relative appelé vulnérabilité. S'il apparait difficile d'éviter la réalisation d'un phénomène naturel, les catastrophes peuvent être évitées ou atténuées par des mesures de protection, de prévention ou plus généralement par des politiques de réduction de la vulnérabilité. La vulnérabilité peut être définie de manière assez générale comme l'ensemble des « caractéristiques d'une personne, ou d'un groupe et de leur situation qui influencent leur capacité à anticiper, faire face, résister et à se rétablir des impacts d'un évènement naturel » (Blaikie et coll., 2014, p11, trad.). Cette définition assez large souligne que la conceptualisation d'une catastrophe ne permet pas de totalement séparer le phénomène naturel de la vulnérabilité humaine. En effet, les différentes caractéristiques de la vulnérabilité apparaissent dépendantes de celles du phénomène : les capacités d'anticipation, de résistance et de résilience dépendent évidemment de la nature du phénomène (crue, éruption volcanique, séisme…), mais aussi de son intensité et de sa localisation. Ces considérations simples amènent à la conclusion que la connaissance des phénomènes naturels qui menacent un territoire est un prérequis nécessaire (bien que non suffisant) pour assurer la protection des biens et des personnes contre la survenue d'une catastrophe.

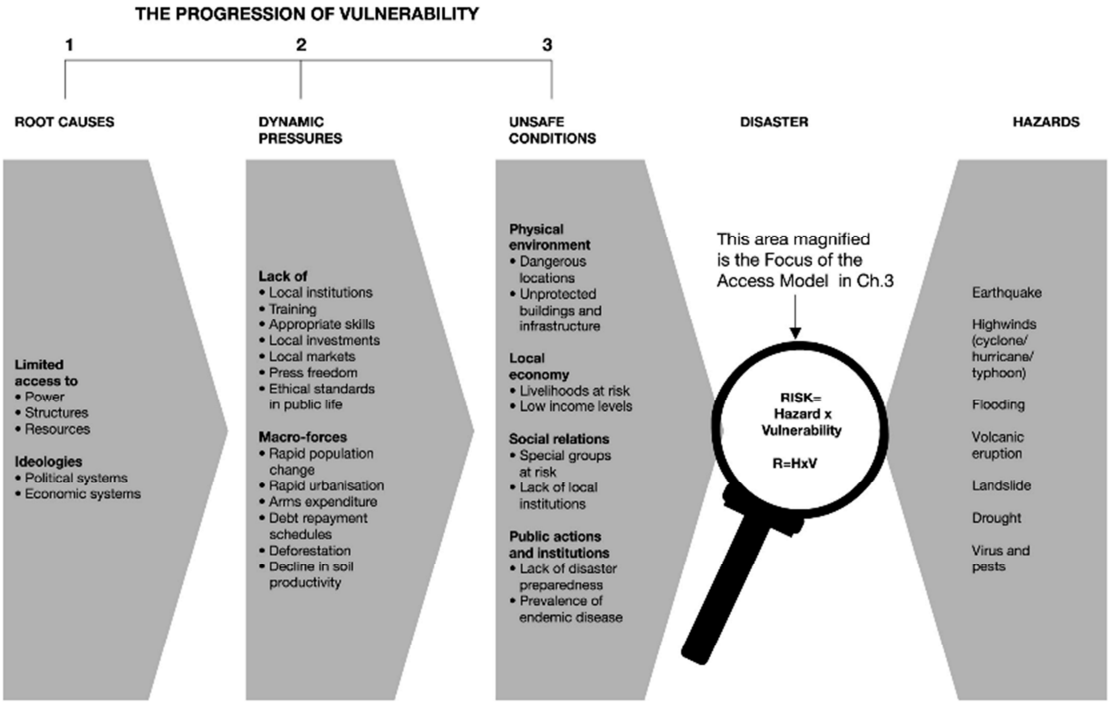


Figure 1-1 : *Modèle PAR (Blaikie et coll., 2014)*

Cette idée de menace sur un territoire permet de passer du concept de catastrophe (qui réfère à un évènement qui s'est déroulé dans le passé) à celle de risque. Le risque représente donc une catastrophe possible, qui pourrait se réaliser dans le futur. Le risque est donc formé d'un territoire à la vulnérabilité existante, menacé par un phénomène naturel qui pourrait survenir. On dénomme aléa naturel cet évènement possible, associé à sa probabilité d'occurrence sur le territoire étudié. La réalisation de l'aléa constitue l'élément déclencheur qui convertit le risque en catastrophe tel que décrit par le modèle PAR (*Pressure and Release)* de Blaikie et coll. (2014) présenté figure 1-1. La caractérisation de l'aléa constitue donc un des premiers défis de la prévention des risques naturels. Cette caractérisation doit permettre, pour un type de phénomène naturel (crues, séisme…) d'associer un niveau d'intensité à une probabilité d'occurrence pour un lieu précis.

Dans le cas du risque inondation, on cherche à qualifier l'aléa « crue » en déterminant en un point d'une rivière des débits de référence qui sont associés à des probabilités d'occurrence. Ces probabilités sont souvent exprimées en période de retour (les crues décennales, centennales…). Une période de retour T est en fait associée à un débit qui a une probabilité 1/T d'être au moins atteinte chaque année. Ainsi, une crue dite « centennale », ou de période de retour 100 ans, est une crue dont l'intensité a une chance sur cent d'être atteinte ou dépassée chaque année. En pratique, on cherche à déterminer les débits (notés Q et exprimés en m^3/s) associés à des périodes de retour données (notées T, exprimées en années) en un site donné. C'est ce que l'on appelle la prédétermination des crues. Ces débits peuvent éventuellement être convertis, a posteriori, des hauteurs d'eau ou des champs d'inondation en considérant les caractéristiques hydrauliques et topographiques d'un site.

1.1.2. Exemples dans la réglementation française

Dans la législation française, plusieurs types de réglementations s'appuient sur la connaissance de l'intensité des aléas naturels. Par exemple, le code des assurances reconnait comme effet de catastrophes naturelles les dommages occasionnés par « l'intensité anormale d'un agent naturel » (Code des assurances, 2007). Ainsi, dans la loi française, la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle ne dépend pas des dommages subis mais uniquement de l'intensité du phénomène qui les engendre. En outre, il ne s'agit pas de définir un seuil absolu d'intensité, mais de pouvoir justifier qu'un évènement a été plus violent que d'ordinaire. Légalement, la qualification d'un évènement en tant que catastrophe naturelle nécessite donc de savoir quelle était sa probabilité d'occurrence d'un évènement qui s'est réalisé. Cependant, la loi ne précise pas à partir de quelle période de retour un évènement peut être considéré comme étant d'intensité anormale. Néanmoins, la jurisprudence indique « qu'un phénomène qui n'est constaté qu'une fois, en moyenne tous les dix ans, peut être regardé comme ayant eu une intensité anormale » (Cours d'Appel Administrative de Bordeaux, 2010). Ainsi, dans le cas de débordements de cours d'eau les demandes de classement sous l'état de catastrophe naturelle comporte des rapports techniques précisant les caractéristiques des évènements : les périodes de retours associées, le niveau décennal de la crue (débit ou hauteur d'eau) ainsi que des précipitations (Ministère des finances et des comptes publics et coll., 2014).

Les PPRI (Plan de Prévention du Risque Inondation) sont un autre exemple de l'utilisation des crues de référence. Ces documents constituent un outil privilégié en matière de gestion du risque

inondation qui vise à réduire les dommages imputables à ces dernières. Ils cartographient les zones à risque et s'imposent légalement à l'urbanisme pour y interdire ou y contraindre les constructions. Les zones inondables sont délimitées en se basant sur une crue de référence qui correspond à la plus forte crue connue ou au moins au débit centennal (Ministère de l'équipement des transports et du tourisme et coll., 1994).

La conception d'ouvrages hydrauliques ou en bordure de rivière repose également sur le choix d'une crue de projet correspondant à une période de retour. Dans le cas des grands barrages, ceux en béton doivent pouvoir résister à une crue millénale. Ceux en remblais qui présentent davantage de risques de rupture en cas de submersion doivent pouvoir contenir une crue décamillénale (Comité Français des barrages et réservoirs, 2012). D'après les règles de l'Autorité de Sûreté Nucléaire (1984), les centrales nucléaires françaises ont pour obligation de pouvoir résister à la hauteur d'eau engendrée par une crue millénale majorée de 15% ainsi qu'à la conjonction d'une crue centennale (ou de la plus forte crue connue si elle est plus importante) et de l'onde de crue résultant de la rupture de l'ouvrage de protection.

À travers ces exemples, on peut constater que la législation française pense les risques au moyen de probabilités. C'est-à-dire que les diverses réglementations ne fixent pas de seuil limite sur l'intensité d'un phénomène mais sur sa probabilité de non-dépassement. Cette façon de faire oblige à prendre en compte les deux facettes d'un aléa que sont son intensité et sa probabilité d'occurrence, mais également à considérer des seuils d'intensité qui varient d'un point à un autre du territoire. Il est donc nécessaire d'être capable en un point quelconque d'une rivière de pouvoir évaluer la relation entre la valeur du débit et sa probabilité de dépassement.

1.2. La prédétermination des crues

1.2.1. Définition

En général, l'hydrogramme de crue est caractérisé de façon simplifiée par une seule variable (débit de pointe, volume de crues…) qui est assimilée à une variable aléatoire. On appelle prédétermination des crues, le domaine de l'hydrologie qui cherche à associer une probabilité de non-dépassement à une valeur d'intensité de crue, c'est-à-dire à un débit appelé quantile, à partir d'un jeu de données observées (Gaume, 2002). On cherche donc à décrire au mieux l'occurrence des crues. L'usage en gestion du risque veut que l'on caractérise les probabilités de dépassement en termes de période de retour.

La détermination des débits de crues, comme celle de toute grandeur caractéristique de débit (débits moyens, débits d'étiages…), se fait en un point donné le long d'un cours d'eau. L'eau qui s'écoule en ce point a été drainée en amont par la rivière et ses affluents sur une surface que l'on appelle bassin versant dont le point constitue l'exutoire. De manière simplifiée, l'eau de pluie qui tombe sur un bassin versant s'infiltre dans le sol ou ruisselle, rejoint les cours d'eau et finit par s'écouler au niveau de l'exutoire. On peut définir une infinité de bassins versants différents le long d'un cours d'eau en déplaçant le point exutoire vers l'amont ou l'aval. Le bassin défini pour un exutoire à l'amont étant inclus dans un bassin dont l'exutoire est plus à l'aval.

1.2.2. Un système déterministe complexe

Puisque l'on cherche à déterminer l'intensité des crues pouvant avoir lieu à l'exutoire d'un bassin versant donné, il semble logique de vouloir prendre en compte les phénomènes physiques qui les causent, notamment les précipitations et la réponse du bassin versant. Ce système apparait à première vue comme étant déterministe et régi par les lois de la physique. Cependant, il n'existe pas de théorie ou d'équation universelle qui décrivent les écoulements à l'échelle du bassin versant (Dooge, 1986). De telles équations, comme la loi de Darcy (1856) qui lie le débit d'un fluide circulant dans un milieu poreux au gradient de pression de ce fluide, sont applicables à petite échelle mais difficiles à mettre en œuvre à l'échelle d'un bassin versant (Dooge, 1986 ; Blöschl, 2006).

Certaines approches, qualifiées de newtoniennes car elles sont basées sur les équations de la physique newtonienne ou de la mécanique (Blöschl et coll., 2013), tentent de résoudre ce problème d'échelle en divisant les bassins versants en unités géométriques de tailles suffisamment petites pour que l'on puisse y appliquer les équations de la physique déterministe, il suffit ensuite d'assembler les petits éléments. Bien que séduisantes en théorie, les approches newtoniennes se heurtent à plusieurs sévères limites (Blöschl et coll., 2013) :

- Ces équations nécessitent la connaissance de certains paramètres physiques comme la conductivité hydraulique (qui décrit la capacité d'un matériau à laisser circuler l'eau) dont il est impossible de déterminer la distribution spatiale (en trois dimensions) à une résolution suffisamment fine à l'échelle d'un bassin versant. En outre, du fait de la

sensibilité des écoulements estimés à ces paramètres, une forte incertitude sur leur répartition dans l'espace rendrait le système chaotique.

- Même en supposant la connaissance de tous les paramètres des équations, plusieurs milliards d'éléments ponctuels (et autant de systèmes d'équations) devraient être pris en compte, ce qui nécessiterait une puissance de calcul indisponible à ce jour.
- Bien que les phénomènes d'écoulement soient régis par les lois de la physique, ils sont en réalité influencés par d'autres procédés chimiques ou biologiques qui ne sont pas décrits par les équations.

Bien que d'apparence simple, les bassins versants sont en fait des systèmes trop complexes et trop hétérogènes pour que l'on puisse y appliquer les théories de la physique pour déterminer les débits à leurs exutoires.

1.2.3. Les modèles simplifiés

Une solution logique face à la trop grande complexité des processus hydrologiques à l'échelle d'un bassin versant est donc de chercher à utiliser une description simplifiée du système, que l'on appelle un modèle. Ces modèles sont construits dans un but précis et leur principe, nature et complexité dépendent de leurs objectifs. On n'abordera ici que certains types de modèles destinés à la prédétermination des débits de crue.

Malgré la grande diversité des approches, un point commun entre tous les modèles doit être souligné. Puisque l'ensemble de ces modèles ne repose pas sur des lois physiques réelles, ils ne peuvent pas être intrinsèquement justes : ils sont même intrinsèquement faux puisqu'il s'agit de modèles. Leur aptitude à fournir les bons débits doit donc être entrainée, c'est-à-dire qu'il faut confronter les modèles à des valeurs mesurées de la variable que l'on cherche à estimer, de manière à déterminer les paramètres de ces modèles. Il s'agit de la phase de calage des modèles. Concrètement, les estimations de débits faites par le modèle sont comparées à des mesures de la même variable et le modèle est réglé pour minimiser l'écart entre les deux. On parle de « méthode inverse » (WMO et UNESCO, 2012) pour qualifier cette phase durant laquelle des valeurs mesurées de la variable que l'on veut estimer servent de point de départ pour construire le modèle d'estimation.

Cette approche inverse peut sembler paradoxale : pourquoi construire et caler un modèle parfois complexe pour estimer une valeur de débit que l'on peut mesurer ? Parce que la mesure d'une grandeur est toujours limitée à la fois dans le temps et dans l'espace. En général les périodes d'observations varient de quelques années à quelques dizaines d'années. La répartition du nombre d'années d'observation des stations françaises de la banque HYDRO (Ministère de l'Écologie du Développement Durable et de l'Energie, 2017) est présentée figure 1-2. Au total la banque HYDRO rassemble les données de plus de 3 200 stations de mesures, dont la moitié comptabilise moins de 25 ans de données. La station la plus profonde est celle de la Loire à Montjean-sur-Loire (Maine-et-Loire) qui comptabilisait 144 années de mesures en 2015.

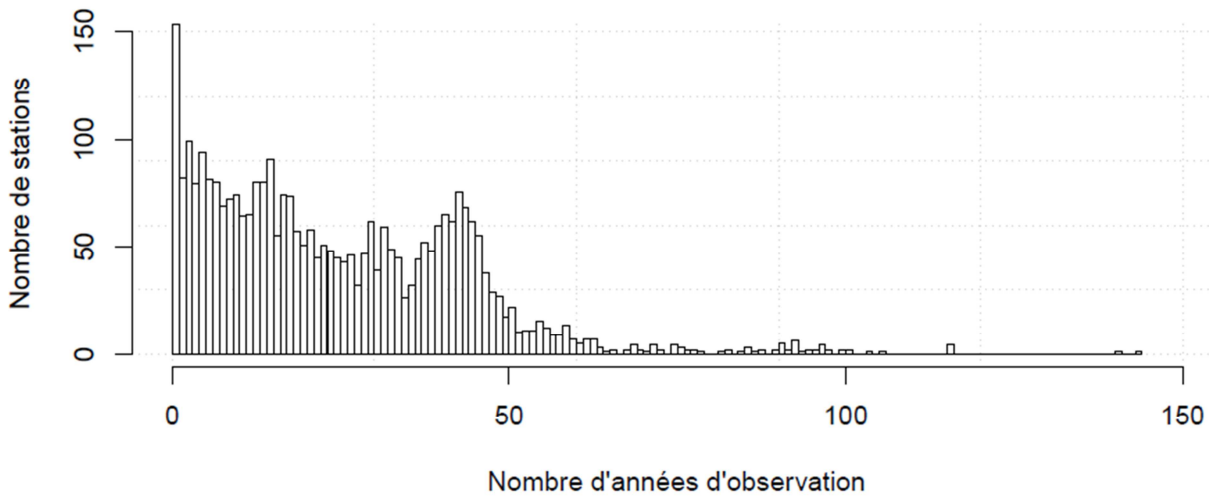


Figure 1-2 : *Répartition du nombre d'années d'observation par station de mesure du débit en France*

Tout l'enjeu de la prédétermination des crues est donc d'exploiter ces chroniques de débit pour arriver à estimer les débits de crues dont la période de retour est bien supérieure à la longueur de la période d'observation. C'est-à-dire que lorsque l'on cherche à estimer des crues rares et extrêmes, de période de retour plus que centennale, il est probable qu'aucun phénomène aussi intense n'ait jamais été observé sur la station. Statistiquement, la probabilité d'observer au moins une crue centennale au cours d'une période d'observation de 25 ans est de 0,222 et celle d'une millénale d'à peine 0,025. Les méthodes de prédétermination des crues en site jaugé sont donc des méthodes d'extrapolation « fréquentielle » qui visent à estimer l'intensité de crues rares à partir des crues couramment observées. Dans le cas de sites non jaugés, l'enjeu est également d'estimer l'intensité des crues courantes.

Il existe un tel nombre d'approches et de variantes qui visent à mettre en œuvre cette extrapolation fréquentielle qu'il est impossible d'en dresser une liste exhaustive. On peut néanmoins citer certains travaux qui ont tenté de dresser un inventaire de ces méthodes. Par exemple, le projet ANR EXTRAFLO (Renard et coll., 2010 ; Lang et coll., 2013) a permis d'entreprendre une comparaison des méthodes de prédétermination des pluies et des débits extrêmes employées en France. Le projet Européen FloodFreq (Castellarin et coll., 2012 ; Willems et coll., 2012) cherche à établir un inventaire des méthodes de prédétermination des crues employées dans les différents pays européens. Dans ce contexte on distingue deux grands types de modèles : les modèles probabilistes directs et les modèles basés sur les processus.

1.2.3.1. Les modèles probabilistes directes

Les méthodes de prédétermination dites « probabilistes » cherchent à déterminer explicitement la loi de probabilité qui régit l'occurrence d'un phénomène, ici les crues, représenté par une variable caractéristique de ce phénomène. Elles s'appuient sur la théorie des valeurs extrêmes (Gumbel, 1958). Cette théorie étudie la manière avec laquelle la valeur maximale d'une série de données évoluent avec le nombre d'observations. Elle a permis le développement de lois de probabilités paramétrées (Jenkinson, 1955) aptes à décrire des phénomènes comme l'occurrence des crues ou des précipitations extrêmes. L'identification et le calage de ces modèles de lois passent par plusieurs étapes :

- **L'identification de la variable étudiée.** Dans le cadre de la prédétermination des crues on choisit généralement un débit à un certain pas de temps (instantané, sur quelques heures, journalier…).
- **L'échantillonnage de la variable aléatoire** vise à sélectionner les évènements de crue et donc à passer d'une série temporelle de débits à une série de valeurs maximales de crues. L'objectif de cette échantillonnage est d'extraire un jeu de valeurs que l'on suppose indépendantes et appartenant à une même population. C'est cette variable aléatoire qui est décrite par la loi de probabilité. En général deux types d'échantillonnages peuvent être employés : le maximum par bloc ou les valeurs supérieures à un seuil. L'échantillonnage par maximum par bloc divise la période d'observation en sous-périodes régulières comme des années et retient la valeur maximale sur chacun de ces dernières. La faiblesse de cette approche est qu'elle peut ignorer certaines crues lorsque plusieurs phénomènes se déroulent au sein du même bloc. L'échantillonnage par valeurs supérieures à un seuil filtre la chronique pour ne retenir que les valeurs dépassant une valeur seuil à déterminer. La difficulté de cette approche réside dans le choix du seuil. Considérer que les crues en un point sont des variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées est une hypothèse forte qui peut être remise en question en considérant les alternances des années sèches et humides ou des processus saisonniers (fonte des neiges…). Dans ce cas, la chronique doit être divisée en sous-chroniques et différentes lois doivent être établies pour chaque sous-périodes avant d'être combinées (Garavaglia et coll., 2011). Une hypothèse de stationnarité des processus est également souvent faite, ce qui est bien sûr critiquable en contexte de changement climatique. C'est cette étape d'échantillonnage qui permet de passer du domaine temporel au domaine fréquentiel.
- **Le choix de la loi de probabilité.** Ce choix va dépendre du type d'échantillonnage. Dans le cas d'un échantillonnage par maximum par bloc, la distribution de la variable aléatoire suit une loi de type GEV (Fisher et Tippett, 1928) aussi appelée loi d'extremums généralisée formulée par Jenkinson (1955) pour synthétiser les lois de Fréchet (1927), Gumbel (1935) et Weibull (1951). Dans le cas d'un échantillonnage par valeurs supérieures à un seuil, c'est la loi de Pareto généralisée qui est employée (Pickands, 1975). D'autres lois de probabilité peuvent également être employées comme la loi log-Pearson de type III (Bobee, 1975) ou la loi kappa (Hosking, 1994).
- **Le choix de la méthode d'estimation des paramètres.** L'ajustement du modèle de loi de probabilité théorique aux données observées passe par l'estimation de ses paramètres. Différentes techniques sont employées. On peut citer les méthodes du maximum de vraisemblance qui cherche à maximiser les probabilités de réalisation des phénomènes observés (Prescott et Walden, 1980 ; Aldrich, 1997 ; Martins et Stedinger, 2000), les méthodes des moments qui cherchent à faire correspondre les moments estimés grâce aux données et ceux de la distribution théorique (Hosking et coll., 1985b), des L-moments qui sont des combinaisons linéaires des statistiques d'ordre (Hosking, 1990) ou encore les méthodes d'inférence bayésienne qui permettent d'introduire une connaissance a priori sur la distribution des paramètres (Kuczera, 1999).

Les différentes étapes de mise en œuvre des méthodes probabilistes directes pour la prédétermination des crues sont synthétisées sur la figure 1-3. Étant donné les variantes possibles au

sein de chaque étape de la méthode d'ajustement, on peut imaginer la diversité des approches probabilistes directes de prédétermination. Des synthèses des différentes approches existantes et des exemples d'application peuvent être trouvés dans les ouvrages de Beirlant et coll. (2006), Coles (2001) ou dans la revue de littérature proposée par Castellarin et coll. (2012).

Dans tous les cas, l'ajustement d'une loi de probabilité directement sur les données issues d'un site unique demeure extrêmement sensible à la présence ou à l'absence de phénomènes extrêmes pendant la période d'observation. En effet, la présence d'une crue particulièrement forte pendant une courte période d'observation peut influencer le comportement asymptotique de la loi de probabilité, notamment dans le cas où l'on détermine un paramètre de forme. En général, il n'est pas conseillé d'utiliser ce genre d'approche pour une station seule (Lang et coll., 2013). Cette limitation peut être levée en enrichissant les données disponibles avec d'autres sources comme :

- Des données historiques (Benito et coll., 2004). Dans certains cas on peut trouver des traces de crues antérieures à la période d'estimation et ainsi enrichir la série de données avec davantage de crues fortes.
- D'autres variables caractéristiques. On peut, par exemple, utiliser les informations disponibles à différents pas de temps grâce aux approches multi-durées (Javelle, 2001) pour contraindre l'estimation des crues.
- Les chroniques issues d'autres sites de mesures.

C'est notamment ce dernier point qui nous intéressera car il permet également de faire un pas vers l'estimation des crues en site non jaugé.

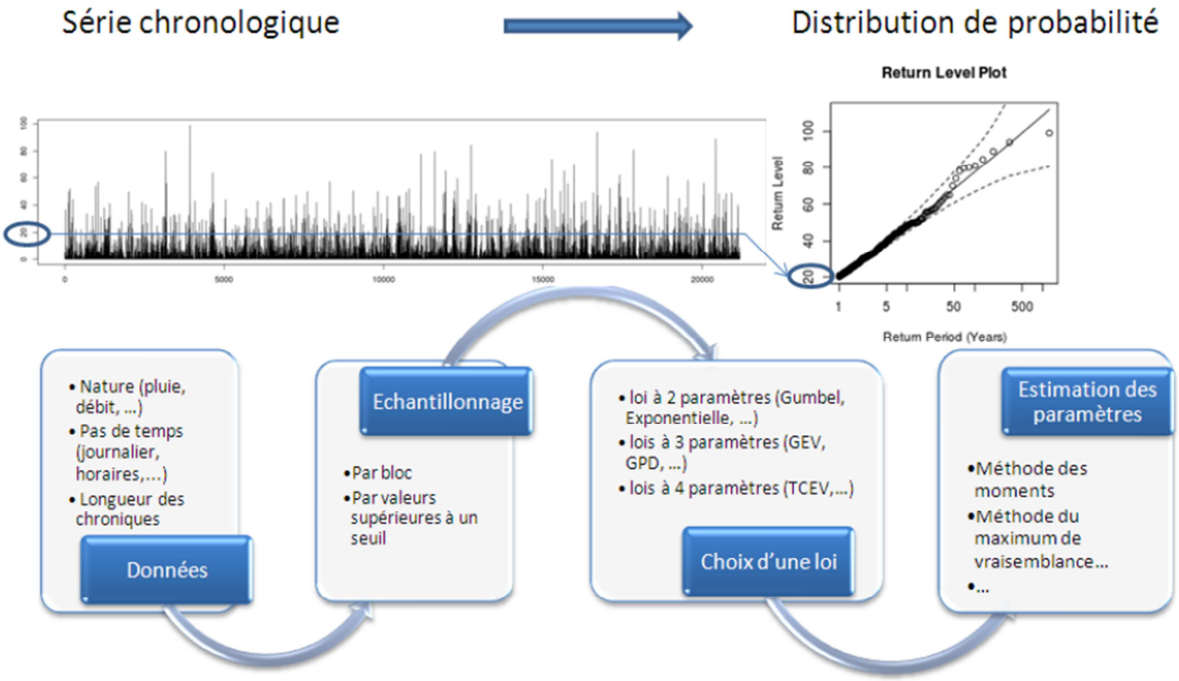


Figure 1-3 : *Étapes associées à l'ajustement d'une loi de probabilité (Arnaud, 2015)*

1.2.3.2. Apport de l'information régionale

De manière à limiter l'impact des valeurs extrêmes sur l'ajustement de lois de probabilité, il est possible d'enrichir l'information issue de la station d'intérêt en utilisant les mesures effectuées sur d'autres stations proches ou similaires. De manière générale, on qualifie de « régionale » une approche qui exploite les données issues d'autres sites que celui d'étude. On peut enrichir la chronique en réalisant l'ajustement non plus sur les données d'un seul site mais sur celles d'une région (Dalrymple, 1960 ; Hosking et Wallis, 1997 ; Ribatet et coll., 2007), ou encore contraindre le calage de la loi statistique par de l'information régionale (Stedinger et Lu, 1995 ; Renard, 2011 ; Kochanek et coll., 2014). On cherche ici à substituer le temps par l'espace.

La mise en commun des données d'une région se fait de manière générale à partir de la méthode de l'indice de crue (Dalrymple, 1960). L'hypothèse sous-jacente de cette méthode est que, sur une région homogène, l'ensemble des crues indépendantes de l'ensemble des sites sont des réalisations d'une même loi de probabilité à un facteur multiplicatif près appelé indice de crue. L'application de cette méthode se fait en plusieurs étapes :

- **Estimation locale.** En chaque site, l'indice de crue est estimé à partir de la chronique de débits. Cet indice représente l'information locale qui prend en compte l'effet de la taille et des particularités du bassin. Cet indice est souvent choisi comme étant la moyenne (ou la médiane) des crues échantillonnées (Castellarin et coll., 2012).
- **Indentification des régions homogènes**. Il s'agit probablement de l'étape la plus délicate car c'est celle qui permet de se placer dans le cadre de l'hypothèse énoncée ci-avant. C'est généralement les indices d'homogénéité et de discordance d'Hosking et Wallis (1993) qui sont employés pour tester des régions. Ces régions peuvent être définies comme des zones géographiques délimitées sur une carte ou par l'approche de la région d'influence où, pour chaque site d'étude, on détermine une région qui lui est propre et pas nécessairement continue dans l'espace (Burn, 1990b).
- **Ajustement de la loi régionale**. Les débits de crues échantillonnés en chaque site sont adimensionnés par les indices de crue et mis en commun sur les différentes régions. On s'assure de l'indépendance des crues. Par rapport à une estimation sur un seul site, bien plus de données sont disponibles pour l'ajustement de la loi ce qui permet l'utilisation de lois plus paramétrées (loi kappa…). Les méthodes d'ajustement sont identiques à celles énoncées en 1.2.3.1.
- **Estimation des quantiles de débit en chaque site**. La distribution de probabilité des crues en chaque site est obtenue en multipliant la loi régionale par l'indice de crue du site.

L'utilisation de méthodes dérivées de l'indice de crue est assez courante dans le monde (Hosking et coll., 1985a ; Stedinger et Lu, 1995 ; Chebana et Ouarda, 2009 ; Gaume et coll., 2010 ; Latt et coll., 2014 ; Basu et Srinivas, 2016 ; Requena et coll., 2016 ; Hailegeorgis et Alfredsen, 2017), mais demeure limitée en France. On retiendra une application sur le département du Var (Aubert, 2012), ainsi qu'une application dans une petite région de 14 stations sur des affluents de la Loire et du Rhône (Ribatet et coll., 2007).

L'information régionale peut également être prise en compte en cherchant à encadrer le calage d'un modèle sur des données issues d'un site. Dans ce cas il n'y a pas de mise en commun des données, les informations issues du site d'intérêts et des autres sont traitées séparément. Ce type d'approche part du constat que le calage d'une loi de probabilité, telle qu'une loi GEV, sur les données d'un site seul peut parfois conduire à des distributions de probabilité aberrantes. Pour pallier à ce problème, Martins et Stedinger (2000) proposent un calage bayésien d'une loi GEV en contraignant le paramètre de forme dans une gamme crédible grâce à une distribution à priori de ce paramètre issue d'une synthèse bibliographique et d'un avis d'expert. Ribatet et coll. (2007) utilisent également un modèle bayésien. Cependant, ils emploient une information régionale issue d'une procédure d'indice de crue pour définir les distributions a priori des paramètres d'une loi de Pareto généralisée et constatent une amélioration par rapport à une procédure d'indice de crue classique. Les approches bayésiennes sont également utilisées par (Nguyen, 2012) et (Gaume et coll., 2010) pour considérer des évènements de crues exceptionnels ponctuellement estimés en sites non jaugés.

1.2.3.3. Les modèles basés sur les processus

La prédétermination des débits peut également être entreprise en étudiant l'occurrence des précipitations et en transformant ces dernières en débits grâce à une modélisation hydrologique (Arnaud, 2015). Cette approche permet de faire porter l'extrapolation vers les fréquences rares sur la pluie et non sur le débit. Le comportement asymptotique des pluies extrêmes apparait moins complexe à estimer que celui des débits. En effet, on peut supposer que les pluies « courantes » et les pluies « extrêmes » sont issus du même processus et appartiennent donc à la même population statistique. L'extrapolation fréquentielle d'une loi de probabilité décrivant l'occurrence des pluies est donc possible. Dans le cas des débits, il existe une non-linéarité des processus due notamment à l'infiltration et au stockage de l'eau dans le sol qui varient au cours de la crue et donc en fonction de l'intensité des événements. Cette non-linéarité pose problème lors de l'extrapolation fréquentielle vers les crues les plus rares. Une approche basée sur les processus peut permettre de prendre explicitement en compte cette non-linéarité dans la relation entre la pluie et le débit (Singh, 1988). De plus, les chroniques de données sont souvent plus longues pour les pluies, avec moins de problèmes de mesure (pas de courbe de tarage, de problèmes de laminages, pas de stations détruites…).

La mise en œuvre de ces approches peut se faire de différentes manières. La première étape à mettre en œuvre est de déterminer la pluie que l'on veut transformer. Cette pluie peut se présenter sous différentes formes ce qui a bien sûr un impact sur la manière de la transformer en débit.

Les approches les plus simples, que l'on peut qualifier de rationnelles (Beven, 2001) proposent une équation empirique qui permet de lier un débit de référence (quantile, valeur maximale…) à une grandeur caractéristique de la pluie (quantiles, pluie moyenne…) en considérant un certain nombre de caractéristiques du bassin versant (surface de drainage, pente, longueur de chenal….). Ces formulations, initiées dès 1851 avec l'équation de Mulvaney (Beven, 2001) sont extrêmement nombreuses et diverses selon les usages et les lieux d'application (Dooge, 1957) et demeurent fortement utilisées dans le monde opérationnel (Hromadka et Whitley, 1994). En France, on peut citer la formulation CRUPEDIX (CTGREF et coll., 1980-1982 ; Cipriani et coll., 2012) qui permet d'estimer le débit de pointe décennal à partir de l'intensité de pluie décennale journalière, de la surface du bassin versant et d'un coefficient correctif régional.

Une approche plus complète consiste à construire une pluie de projet et à la transformer en débit (Arnaud, 2015). La première possibilité est d'appliquer une approche maximaliste, c'est-à-dire de tenter de déterminer la plus forte précipitation physiquement possible sur un territoire (Hershfield, 1961). Ce genre d'approche ne permet pas de déterminer de crues associées à des probabilités intermédiaires mais seulement d'estimer l'évènement le plus intense possible. Une solution alternative est de déterminer une pluie de projet en effectuant une analyse probabiliste directe des précipitations en un site (Sighomnou et Desbordes, 1988). Cette analyse doit prendre en compte les différents aspects qui font un évènement pluvieux : son intensité, sa durée, sa forme… La transformation en débit s'effectue alors avec l'un des nombreux modèles pluie-débit existants, qu'il s'agisse de modèles linéaires basés par exemple sur un hydrogramme unitaire ou de modèles conceptuels non linéaires composés de réservoirs multiples s'écoulant les uns dans les autres (Singh, 1988).

En outre, certaines méthodes cherchent à établir la distribution de fréquences des crues à partir de celle des pluies. C'est le cas de la méthode du GRADEX (Guillot et Duband, 1967) qui suppose que le comportement asymptotique des pluies, c'est-à-dire l'allure de la distribution de fréquences pour les évènements les plus rares, peut être transposé aux crues dès lors que l'on a atteint la saturation du sol. Cela revient à supposer que dans un graphique de Gumbel la courbe de distribution de fréquences des débits devient parallèle à celle des pluies à partir d'un certain point pivot qui représente le point de saturation du sol. On peut citer des extensions de la méthode du GRADEX comme la méthode AGREGE (Margoum et coll., 1994) qui prévoit des variations progressives du comportement asymptotique de la distribution de fréquences des débits, ou encore la méthode SPEED (Cayla, 1993) qui considère une estimation de la capacité d'infiltration du sol.

Cependant, de manière générale ces méthodes reposent sur l'établissement de la distribution de fréquences des précipitations ce qui, comme dans le cas des débits, pose des problèmes d'extrapolation de la distribution vers les évènements les plus rares. En effet, on continue à avoir des problèmes liés à la longueur des chroniques, aux limites des appareils de mesures (pluviomètre qui déborde lors d'évènements particulièrement intenses par exemple), et les méthodes statistiques demeurent sensibles à la présence ou à l'absence de valeurs extrêmes parmi les observations (Arnaud, 2015).

Les travaux initiés par Eagleson (1972) sur l'association de générateurs de pluie couplés à des modèles pluie-débit ont permis de surmonter partiellement ces difficultés. Ce type d'approche repose donc principalement sur deux modèles couplés (Arnaud, 2015) :

Partie I : Un modèle de pluie possédant une composante stochastique permettant de simuler de longues séries de pluies ;

Partie II : Un modèle hydrologique qui transforme une pluie simulée ou pluie de projet en crue.

De cette manière, les longues séries de pluies simulées peuvent être transformées en longues séries de débits simulés, et les distributions de fréquence des débits de crues peuvent être étudiées de manière empirique directement sur ces séries. Il n'y a plus besoin de passer par un modèle de loi de probabilité si les évènements simulés sont assez nombreux. On parle alors de méthode par simulation des processus.

Ce type d'approche est devenu de plus en plus courant au fil des années et a été appliqué à travers divers pays. En France, deux approches abouties existent : la méthode SHYPRE/SHYREG (Arnaud et Lavabre, 2002 ; Aubert et coll., 2014) d'Irstea et la méthode SCHADEX (Garavaglia, 2011 ; Paquet et coll., 2013) développée par EDF. Dans les autres pays, diverses approches ont été développées comme au Royaume Uni (Kjeldsen, 2007b), en Grèce (Loukas, 2002), en République Tchèque (Blazkova et Beven, 2002) ou en Slovaquie (Hlavčová et coll., 2004).

1.2.4. Limite spatiale et extrapolation vers le non jaugé

1.2.4.1. La régionalisation

Comme évoqué ci-avant, les données servant à caler les modèles de prédétermination sont limitées non seulement dans le temps, mais aussi dans l'espace. En effet, une station de mesure du débit ne peut fournir d'information que sur l'endroit où elle se trouve. Ce simple constat amène à s'interroger sur la densité des réseaux de mesure du débit. Par exemple, en France, il existe environ 3200 stations dont une part non négligeable est non utilisable (stations fermées et remplacées, périodes de mesure trop courtes, problème de qualité, mauvais référencement…). Bien que le réseau français puisse être considéré comme dense, il est insuffisant pour couvrir l'ensemble des linéaires des rivières du territoire français. À titre de comparaison, la Base Nationale des Bassins Versants (notée BNBV) regroupe près de 140 000 exutoires de bassins en France métropolitaine. Cette base de bassins tracés à partir de directions d'écoulement à une résolution de 50 m réalise un échantillonnage relativement exhaustif du réseau hydrographique français, en plaçant des exutoires en amont et en aval des confluences et des zones urbaines, au niveau des stations de mesure du débit, et régulièrement le long du linéaire du cours d'eau (tous les quatre kilomètres au minimum). La prédétermination des crues aux seuls points de mesure du débit est donc clairement insuffisante puisque les données de débits sont manquantes sur une grande majorité de sites. On qualifie de « non jaugé » un bassin versant ne disposant pas de station de mesure du débit ou de la hauteur d'eau à son exutoire.

Le principe sous-jacent à l'utilisation d'une quelconque approche dirigée par des données en site non jaugé est que ces données existent en d'autres sites similaires (Blöschl et coll., 2013). L'idée est donc de procéder à un transfert d'information depuis un bassin vers un autre, ce transfert est appelé régionalisation (Blöschl et Sivapalan, 1995). Oudin et coll. (2010) définissent la régionalisation comme l'ensemble des méthodes qui permettent le transfert d'informations hydrologiques depuis des sites jaugés vers des sites non jaugés. Néanmoins, en pratique, lors du développement et de la validation des méthodes de régionalisation on peut les appliquer entre bassins jaugés. Aussi, pour éviter toute ambiguïté, on préfère définir la régionalisation comme l'ensemble des méthodes permettant un transfert d'information hydrologique depuis des sites donneurs, jaugés, où cette information est connue vers un ou plusieurs sites receveurs où cette information est voulue.

La première étape de toute méthode de régionalisation est d'identifier l'information à transférer. Dans le cas de la prédétermination des crues, la régionalisation peut chercher à transférer :

Partie III : Les paramètres de modèles calés en sites jaugés à partir des données. Ces paramètres peuvent être de nature variée comme les paramètres de lois statistiques (Micevski et coll., 2015), des paramètres de modèles pluie-débit (Parajka et coll., 2005 ; Zvolenský et coll., 2008), ou même des grandeurs caractéristiques de l'écoulement comme l'indice de crue (Kjeldsen et coll., 2008 ; Gaume et coll., 2010).

Partie IV : La grandeur recherchée, comme les valeurs des quantiles de débits déterminés en sites jaugés, par l'application complète d'une méthode de prédétermination des crues (Merz et Blöschl, 2005 ; Haddad et coll., 2012).

Il convient ensuite d'identifier les bassins donneurs. En effet, pour qu'un transfert d'information entre bassin ait du sens, il est nécessaire que ces bassins soient hydrologiquement similaires (Blöschl et coll., 2013). Cette similarité s'exprime à travers une proximité de certaines caractéristiques en lien avec l'information à transférer. Néanmoins, la similarité demeure difficile à établir car il faut décider quelles caractéristiques sont nécessaires pour la quantifier (Oudin et coll., 2010 ; Blöschl et coll., 2013). Les mesures de similarité doivent permettre d'identifier au mieux les bassins donneurs, cela revient en fait à déterminer des régions ou groupes de bassins possédant des caractéristiques communes. Plusieurs stratégies peuvent être mises en place :

Partie V : S'appuyer sur des régions préexistantes en supposant qu'au sein des territoires définis les processus sont homogènes. On peut citer par exemple les territoires hydrologiques du Royaume-Uni définis dans le *Flood Studies Report (NERC, 1975)* ou les hydro écorégions françaises (Wasson et coll., 2002) utilisées notamment par Cipriani et coll. (2012) pour proposer une actualisation de la méthode CRUPEDIX ou par Ribatet et coll. (2007) pour mettre en œuvre une procédure inspirée de l'indice de crue.

Partie VI : Déterminer une mesure de la similarité ou de la dissimilarité qui permette pour un bassin quelconque de déterminer parmi les bassins jaugés, les donneurs les plus similaires. C'est le concept de la « région d'influence » (Burn, 1990a ; Kjeldsen et coll., 2008). Cette mesure de la similarité peut s'appuyer sur des caractéristiques physiques (Parajka et coll., 2005) ou sur de la proximité spatiale (Vandewiele et Elias, 1995). Des comparaisons entre ces approches sont proposées par Oudin et coll. (2008) ou Merz et Blöschl (2005).

Enfin, la méthode de transfert de l'information est également à déterminer. On peut classer ces méthodes en deux grandes familles :

Partie VII : Les méthodes de transfert direct transposent les valeurs des sites donneurs vers les sites receveurs en les combinant éventuellement, souvent par combinaison linéaire comme dans les approches par krigeage (Skøien et coll., 2006).

Partie VIII : Les méthodes explicatives, ou cartographiques (Blöschl et coll., 2013), utilisent les bassins donneurs pour déterminer une relation qui lie les valeurs de l'information à transférer à des covariables disponibles sur tous les bassins. La relation ainsi établie peut être transmise aux bassins receveurs similaires pour y estimer l'information voulue. On cherche ici à expliquer comment la variable étudiée varie avec les caractéristiques de bassins versants (NERC, 1975 ; Jennings et coll., 1993 ; Sefton et Howarth, 1998 ; Seibert, 1999 ; CEDEX et DGA, 2011 ; Cipriani et coll., 2012).

Nous pouvons constater qu'il existe une très grande variabilité des méthodes de régionalisation. Blöschl et coll. (2013) estiment à plusieurs centaines le nombre d'approches existantes. Une description des méthodes de régionalisation les plus employées est proposée au chapitre 5.

1.2.4.2. Vocabulaire autour du mot « région »

Lorsque l'on tente de dresser un tableau assez large des principes et méthodes de la prédétermination des crues en sites non jaugés, des difficultés de vocabulaire surgissent immanquablement. En effet, différentes notions sont construites autour du mot « région » et leur sens n'est ni-intuitif, ni totalement unique dans la littérature. Pour lever ces difficultés, nous proposons quelques réflexions autour des notions de région, de régionalisation et d'approche régionale en hydrologie de manière à adopter un cadre lexical plus strict.

Dans le langage commun, une **région** est un « territoire dont l'étendue variable est déterminée soit par une unité administrative ou économique, soit par la similitude du relief, du climat et de la végétation » (Larousse). Cette définition renvoie à deux caractéristiques principales : une étendue spatiale et une similarité. En hydrologie, la notion de similarité est prépondérante lors du transfert en site non jaugé. Cette similarité peut bien sûr se baser sur des caractéristiques topographiques, climatiques, d'occupation du sol ou sur d'autres caractéristiques physiques comme la géologie, l'hydrologie, les régimes des cours d'eau… La création de régions repose également souvent en partie sur des critères administratifs (frontières des pays…). Néanmoins, le concept de région d'influence développé par Burn (1990a) selon lequel une région peut être définie comme étant un groupe de bassins versants sélectionnés pour leur similarité avec le site d'étude, s'affranchit de la contrainte d'étendue spatiale. Les régions utilisées en hydrologie ne possèdent donc pas nécessairement de continuité spatiale et ne sont pas nécessairement préétablies. Le concept de régions en hydrologie repose donc sur l'idée d'une certaine similarité entre les sites qui la composent. L'origine de cette similarité peut être la proximité spatiale (nous aurons alors des régions continues dans l'espace) ou la ressemblance physique, de même que les sites considérés peuvent être des lieux isolés ou l'ensemble des points de l'espace (ou discrétisés à une certaine résolution). Une région sera donc définie comme un groupe de bassins ou un territoire présentant une certaine homogénéité qui permet de supposer l'existence d'une similarité entre les bassins le constituant. Une approche par région consiste donc à diviser un territoire ou un jeu de bassins en régions et à les considérer séparément.

L'adjectif « **régional** » renvoie à tout ce qui a trait à la région. On définit par analyse régionale « toute analyse pour laquelle l'estimation d'une caractéristique en un point utilise l'information disponibles en d'autres points » (Javelle, 2001, p140), ces autres points formant une région. Ce type d'analyse se différencie d'une étude dite « locale » qui exploite exclusivement les informations issues du site d'étude. Dans la littérature on parle souvent de *Regional flood frequency analysis* ou RFFA pour évoquer les méthodes régionales de prédétermination des crues (Stedinger, 1983 ; Hosking et coll., 1985a ; Cunnane, 1988). Deux types d'applications doivent être différenciés :

Partie IX : On dispose de données de débits pour le site d'intérêt (il est donc jaugé). Dans ce cas, la méthode régionale peut permettre d'améliorer l'estimation des quantiles de crues

notamment pour les quantiles les plus rares. On parle parfois d'analyse locale-régionale pour décrire ce genre d'approche (Javelle, 2001 ; Kochanek et coll., 2014).

Partie X : On ne dispose pas des données de débit pour le site d'intérêt. Dans ce cas l'analyse est parfois qualifiée de purement régionale (Javelle, 2001) dans le sens où elle ne peut exploiter que les données des autres sites de la région. Notons que dans ce cas une étape de régionalisation est nécessaire.

Le concept de « **régionalisation** » a déjà été défini dans le paragraphe 1.2.4.1 comme une étape de transfert d'information depuis un ou plusieurs sites jaugés vers un site non jaugé ou cette information est voulue. On qualifiera donc de « **régionalisée** » une méthode pour laquelle une procédure de régionalisation permet l'application en sites non jaugés. Notons qu'une méthode régionalisée est par essence régionale puisqu'elle exploite des informations venues d'autres sites. Néanmoins, une approche régionale n'a pas toujours vocation à être appliquée en sites non jaugés et peut donc ne pas être régionalisée.

1.3. Exemples d'approches de prédétermination régionalisées

On se propose dans cette section de réaliser un tour d'horizon de méthodes de prédétermination des crues en sites non jaugés employées dans le monde. De manière à limiter le nombre de cas, on se focalisera sur les approches employées dans le domaine opérationnel.

1.3.1. Vue d'ensemble pour divers pays

En consultant les guides de bonnes pratiques ou les recommandations officielles de divers pays en matière de prédétermination des crues, on se rend compte que dans la majorité des cas ce sont des méthodes probabilistes qui sont employées ou recommandées. À titre illustratif le tableau 1-1 présente un résumé des méthodes probabilistes préconisées dans plusieurs pays européens (Castellarin et coll., 2012), aux États-Unis (USGS, 1982 ; Jennings et coll., 1993) et en Australie (Ball et coll., 2016). On s'est focalisé ici sur des pays où des méthodes de prédéterminations des crues étaient conseillées à l'échelle nationale (ou fédérale) et pour lesquelles le couplage avec une méthode de régionalisation pour l'application en non jaugé était également décrit. On peut voir dans ce tableau que bien que toutes ces approches appartiennent à la famille des approches probabilistes directes, il y a une grande diversité dans les types de lois statistiques utilisées, dans les méthodes d'ajustement et dans l'utilisation de l'information régionale. En ce qui concerne les méthodes de régionalisation, des approches explicatives par régression sont utilisées la plupart du temps (à l'exception de l'Autriche et de la Pologne). Néanmoins, les méthodes varient beaucoup d'un pays à un autre du fait du type de régressions employées, des descripteurs utilisés, de la nature de la variable régionalisée ou du découpage en sous-régions (donc de la similarité supposée).

Toutefois, des méthodes de prédétermination des crues ou d'estimation de crues de projet par simulation des processus sont également opérationnelles et présentes dans les guides de recommandations du Royaume-Uni (Kjeldsen, 2007a ; Calver et coll., 2009), de la Norvège (Willems et coll., 2012) ou de l'Australie (Ball et Weinmann, 2016). Dans ces trois cas, ces méthodes apparaissent en plus de méthodes probabilistes, notamment pour les cas où des hydrogrammes de crue de projet sont nécessaires comme pour l'étude de la sécurité des barrages. En France, bien qu'aucune recommandation de méthode n'ait été publiée, deux approches par simulation des processus existent et sont d'ores et déjà employées dans le domaine opérationnel :

Partie XI : La méthode SHYREG (Aubert, 2012 ; Arnaud et coll., 2016a) produite par Irstea qui permet l'estimation des quantiles de crues pour plusieurs périodes de retour et durées caractéristiques. Ces quantiles sont fournis sur l'ensemble des 140 000 exutoires de la BNBV et sont accessibles via un portail internet (www.shyreg.irstea.fr) dont l'accès est gratuit pour les services de l'État français et les bureaux d'études agréés pour le contrôle des ouvrages hydrauliques.

Partie XII : La méthode SCHADEX (Paquet et coll., 2013 ; Penot, 2014) développée par EDF pour qui elle est la méthode de référence pour l'estimation des crues de projet pour le dimensionnement des évacuateurs de crue des barrages.

Tableau 1-1 : *Résumé des méthodes probabilistes de prédétermination régionalisées utilisées dans divers pays.*
Sources : (USGS, 1982 ; Jennings et coll., 1993 ; Kjeldsen et coll., 2008 ; CEDEX et DGA, 2011 ; Castellarin et coll., 2012 ; Haddad et coll., 2012 ; Ball et coll., 2016)

	Méthode de Prédétermination Sites jaugés			**Régionalisation Transfert vers le non jaugé**		
Pays	**Type de loi**	**Ajustement**	**Information régionale**	**Valeur transférée**	**Mise en région**	**Méthode de transfert**
Allemagne : Bavière, Hesse et Schleswig-Holstein	GEV	L-moments	Oui : analyse de cluster	Indice de crue	États	Régression
Allemagne : Bade-Wurtemberg	Selon site	Selon site	Non	Quantiles	Non	Régression
Australie	Log-Pearson III	Bayésien	Possible (information a priori)	Paramètre de loi	10 plus proches voisins	Régression
Autriche	GEV	Moments	Oui : bassins voisins	Quantiles	Bassins voisins	Krigeage topologique
Belgique : Flandres	GPA*	Régression sur graphe des quantiles	3 régions basées sur les caractéristiques de débits	Indice de crue	3 régions basées sur les caractéristiques de débits	Régression avec la surface du bassin seule
Espagne	Gumbel, GEV, TCEV**	Moments pondérés	Oui : régions géographiques basées sur hydrologie, climat, topographie	Quantiles	36 régions géographiques basées sur hydrologie, climat, topographie	Régression
États-Unis	Log-Pearson III	Moments	Oui : bassins voisins	Quantiles	États ou sous régions géographiques	Régression
Italie	TCEV**	Maximum de vraisemblance	Oui : régions basées sur climat, topographie…	Indice de crue	Régions basées sur climat, topographie…	Régression
Norvège	GEV	Moments pondérés	Si moins de 30 ans de données : bassins voisins	Indice de crue	Analyse de cluster sur climat	Régression
Pologne	Log-Pearson III	Déciles ou maximum de vraisemblance	Non	Quantiles	4 régions géographiques	Transfert direct de quantiles avec correction par la surface
Royaume-Uni	GLO***	L-moments	Oui : région d'influence selon indice de similarité	Indice de crue	Correction selon Similarité physique	Régression puis correction

* GPA : *Generalized Pareto distribution*. **TCEV : *Two Components Extreme Value distribution.*
****GLO : Generalized Logistic Distribution*

Les sections suivantes proposent une vision plus détaillée des approches utilisées au Royaume-Uni, en l'Espagne, aux États-Unis et en France. Ces pays sont choisis à la fois parce que leurs

procédures sont précisément décrites et publiquement disponibles mais aussi pour donner une vision sur un panel de méthodes différentes.

1.3.2. Au Royaume-Uni

Le Royaume-Uni est probablement l'un des pays proposant les procédures d'étude des crues les plus poussées. Ces procédures unifiées sur l'ensemble du pays apparaissent dès 1975 avec le *Flood Studies Report* (NERC, 1975) et sont réactualisées avec le *Flood Estimation Handbook (Centre for Ecology & Hydrology, 1999)*. Les procédures décrites dans ce dernier ouvrage continuent à être mises à jour (Kjeldsen, 2007a ; Kjeldsen et coll., 2008 ; Stewart et coll., 2013). Les méthodes statistiques de prédétermination des crues sont notamment décrites dans le troisième volume de l'ouvrage (Robson et Reed, 1999) et des améliorations ont été proposées par Kjeldsen et coll. (2008). La procédure décrite est une méthode hybride entre les méthodes de l'indice de crue (Dalrymple, 1960) et de la région d'influence (Burn, 1990a). Elle repose sur un jeu de 602 bassins versants jaugés, naturels, répartis sur l'ensemble du pays et se focalise sur les débits de pointe. La prédétermination des débits de crues d'un bassin non jaugé se déroule en deux étapes : la détermination de la loi régionale adimensionnée, puis la régionalisation de l'indice de crue.

Pour un bassin non jaugé donné, les bassins jaugés les plus similaires sont identifiés grâce à une métrique de dissimilarité basée sur la distance euclidienne entre un indice d'atténuation des crues due à des lacs ou réservoirs, l'étendue de la zone d'expansion des crues , le logarithme de la surface de drainage et le logarithme des précipitations moyennes interannuelles. Cette métrique a été développée en identifiant les descripteurs de bassins qui expliquaient le mieux la variabilité des L-moments des différents sites jaugés. Sur chacun de ces sites, les crues maximales annuelles sont extraites, leur valeur médiane est calculée et est utilisée comme indice de crue pour adimensionner les données. La médiane est utilisée comme indice de crue car elle est supposée plus robuste aux problèmes d'échantillonnage des données, notamment sur les séries courtes, que la crue maximale moyenne (Kjeldsen et coll., 2008). Les données de débits adimensionnées sont mises en commun, et un modèle de probabilité (loi logistique généralisée) y est ajusté par la méthode des L-moments. On a bien affaire à une approche par région d'influence puisque pour chaque site d'intérêt on détermine un jeu de bassins donneurs différent.

L'estimation de l'indice de crue pour le site non jaugé se fait également en deux étapes. La première est une méthode de régionalisation explicative. Un modèle de régression reliant la crue maximale médiane à des descripteurs de bassins a été développé grâce aux bassins jaugés. La régression est linéaire, mais des transformations (logarithmique, inverse, carré) de certains descripteurs permettent de prendre en compte des liens non-linéaires. Les descripteurs inclus sont la surface de drainage, la précipitation moyenne annuelle, un indice d'atténuation des crues due aux lacs et réservoirs et un débit de base estimé à partir de la classification hydrogéologique HOST (Boorman et coll., 1995). Cette régression permet d'estimer une première valeur de l'indice de crue au site d'intérêt. Cette première estimation est ensuite multipliée par un facteur correctif qui prend en compte l'erreur de régression sur le site jaugé le plus proche. C'est la valeur corrigée de la valeur de la crue médiane au site cible qui est multipliée à la loi régionale adimensionnée pour estimer les quantiles de crue en ce site.

La méthode présentée dans le *Flood Estimation Handbook* est une approche probabiliste directe régionale associée à une méthode de régionalisation qui exploite à la fois la proximité spatiale et la ressemblance physiographique des bassins. Cette méthode de régionalisation est à la fois explicative (régression) et basée sur un transfert direct (facteur correctif).

D'un point de vue pratique, *le Flood Estimation Handbook* fixe un cadre méthodologique pour la détermination des débits de crues au Royaume Uni mais ne constitue pas une cartographie de ces débits.

1.3.3. En Espagne

La *Mapa de Caudales Máximos (*cartographie des débits maximaux) ou CAUMAX (CEDEX et DGA, 2011) espagnole repose sur différentes approches selon la taille des bassins versants. L'objectif étant de cartographier les quantiles de débit de pointe sur l'ensemble du réseau hydrographique espagnol pour différentes périodes de retour. Préalablement le territoire espagnol a été divisé en 36 régions géographiques continues, supposées homogènes, basées sur les bassins hydrographiques et des caractéristiques climatiques et topographiques.

Pour les plus petits bassins versants on emploie une méthode rationnelle qui prend en compte la surface de drainage du bassin versant, le quantile d'intensité de pluie de même période de retour, un coefficient de ruissellement et un temps de concentration. Un coefficient correctif est calibré par région en utilisant 185 sites jaugés sur l'ensemble du territoire espagnol.

Dans le cas des bassins de plus grande taille, les quantiles de crue aux sites jaugés sont estimés par une méthode probabiliste directe localement puis régionalisés par régression. En chaque site jaugé ces quantiles sont évalués en ajustant une loi de probabilité de type GEV, Gumbel ou *Two Components Extreme value* grâce à la méthode des moments pondérés. Une information régionale est incluse pour l'estimation du coefficient d'asymétrie. Lorsqu'elles sont disponibles, des informations sur des crues historiques sont incluses pour limiter les incertitudes sur l'ajustement de la loi. Les quantiles de débit ainsi estimés aux sites jaugés peuvent être régionalisés. Sur chacune des régions homogènes, des jeux d'équations permettent de relier les quantiles de débit de pointe des différentes périodes de retours aux quantiles de précipitations, à la surface des bassins versants et à éventuellement d'autres descripteurs. Ces équations ont été établies en calant des régressions log-linéaires sur les bassins jaugés de chaque région. Il faut noter que les descripteurs employés dans les régressions peuvent changer d'une région à une autre. Cependant, de manière à garantir la croissance des débits avec la période de retour pour une région donnée, les différentes équations utilisent les mêmes descripteurs pour les différentes périodes de retour. En outre, dans le cas des fleuves principaux, les régressions n'utilisent que la surface de drainage comme variable explicative.

La CAUMAX est disponible directement sous la forme d'une cartographie des débits de crue. Elle est basée sur une méthode de prédétermination probabiliste directe régionale et par région associée à une méthode de régionalisation explicative. La similarité entre les bassins est établie sur des régions hydrographiques géographiquement continues.

1.3.4. Aux États-Unis

Les États-Unis disposent d'une procédure de prédétermination des débits de crues en site jaugé assez riche (USGS, 1982), néanmoins les recommandations n'incluent pas les procédures de transfert en site non jaugé. Ce transfert a été réalisé état par état en inférant directement les quantiles de débit de pointe avec des descripteurs de bassins (Jennings et coll., 1993).

La méthode de prédétermination des crues en site jaugé employée aux États-Unis consiste à ajuster une loi de type log-Pearson III sur les crues maximales annuelles (USGS, 1982). Pour limiter la sensibilité de la loi aux problèmes d'échantillonnage, le coefficient d'asymétrie peut être déterminé en employant des données issues des sites voisins. Le bulletin 17B (USGS, 1982) prévoit également des procédures pour l'intégration de données historiques, ou pour gérer des cas particuliers : talweg secs, années manquantes, présence de valeurs aberrantes… Il faut également noter que dans trois états (Alaska, Idaho et Rhode Island) une procédure d'indice de crue peut être employée (Jennings et coll., 1993).

Le transfert vers les sites non jaugés a été réalisé de manière indépendante sur chacun des états américains (Jennings et coll., 1993). Dans tous les cas il s'agit d'un transfert direct des quantiles par régression. C'est-à-dire que l'on dispose par état d'une série d'équations reliant un quantile de débit d'une certaine période de retour à des descripteurs des bassins. Dans certains cas, les états sont découpés en plusieurs sous-régions géographiquement continues et supposées homogènes, mais des équations différentes peuvent exister pour les zones urbaines et rurales. Il faut également noter que pour une région donnée, les mêmes descripteurs sont employés pour déterminer tous les quantiles, et que les coefficients de régression sont monotones de manière à garantir une croissance des débits avec la période de retour. Notons que dans certains cas (Rhode Island, Idaho…) les quantiles les plus forts sont déterminés en multipliant les quantiles plus courants par une constante.

La législation américaine peut demander l'estimation de quantiles de crues pour des périodes de retour allant jusqu'à 500 ans (Jennings et coll., 1993). Néanmoins de nombreux états ne proposent pas d'équation permettant d'inférer directement ces quantiles. Dans ce cas, la procédure est de déterminer les quantiles plus courants grâce aux équations disponibles, de déterminer la loi log-Pearson III qui décrit au mieux la distribution de fréquences ainsi obtenue et de l'utiliser pour extrapoler vers les périodes de retour les plus rares (Jennings et coll., 1993).

La méthode employée est donc une approche probabiliste directe locale-régionale, associée à une régionalisation explicative des quantiles de débits basée sur une similarité par régions continues dans l'espace. Les gestionnaires du risque inondation peuvent accéder aux différentes valeurs de quantiles de crues en sites non jaugés à l'aide d'un logiciel regroupant l'ensemble des régressions pour l'ensemble des états (Ries III et Crouse, 2002).

1.3.5. En France

En France, aucun guide de procédure pour la détermination des débits de crues n'a été publié. De telles recommandations existent uniquement pour la prédétermination des pluies extrêmes (Arnaud et Lavabre, 2010). Les méthodes employées sont donc nombreuses (Gillet, 2017). Bien souvent, une approche probabiliste directe locale est choisie pour la prédétermination en sites

jaugés. Dans le cas de sites non jaugés, les études hydrologiques emploient souvent des méthodes rationnelles (Bernard, 1938), CRUPEDIX (CTGREF et coll., 1980-1982), SCS (SCS, 1986) ou de type GRADEX (Guillot et Duband, 1967), SPEED (Cayla, 1993) ou AGREGEE (Margoum et coll., 1994).

Le projet ANR Extraflo (Renard et coll., 2013 ; Lang et coll., 2014) a permis d'entreprendre une comparaison des méthodes de prédétermination des pluies et des crues en France. Ses conclusions recommandent l'utilisation de statistiques régionales ou de méthodes basées sur la simulation des processus (Kochanek et coll., 2014 ; Lang et coll., 2014). Néanmoins, ces méthodes demeurent peu présentes dans le domaine opérationnel. On trouve surtout deux approches de prédétermination des pluies et des débits par simulation des processus : les approches SHYREG (Organde et coll., 2013 ; Aubert et coll., 2014) et SCHADEX (Paquet et coll., 2013).

La méthode SCHADEX (Paquet et coll., 2013) est développée par EDF pour l'estimation des crues de projet centennales à décamillénales. Elle est appropriée pour la prédétermination des débits de crues sur des bassins montagneux avec des superficies allant de quelques kilomètres carrés à plusieurs milliers. Cette méthode consiste en l'association d'un générateur de pluie et d'un modèle hydrologique. Elle travaille à un pas de temps proche de la durée caractéristique des crues du bassin étudié.

Les évènements de pluie générés par la méthode SCHADEX sont considérés homogènes sur tout le bassin versant et sont définis sur trois pas de temps : une pluie centrale plus forte et deux pluies adjacentes. La simulation de la pluie centrale est réalisée grâce au modèle MEWP (*Multi-exponential weather pattern*), (Garavaglia et coll., 2010). Dans cette approche, les pluies calculées sur le pas de temps caractéristique de l'étude sont réparties par saison (généralement deux) et par type de situation atmosphérique synoptique (Huit « types de temps » sont définis pour la France). Des lois exponentielles sont calées sur chacun de ces échantillonnages, puis recombinées pour obtenir une loi de probabilité composite (loi MEWP) des pluies centrales. La pluie centrale MEWP est complétée par une table de contingence décrivant la dépendance entre la pluie centrale et les pluies adjacentes.

La modélisation hydrologique de la méthode SCHADEX est assurée par le modèle pluie-débit MORDOR (Mathevet, 2005). Il s'agit d'un modèle conceptuel global à réservoirs, forcé par des données de pluie de bassin et de température. Ce modèle prend en compte les principaux phénomènes hydrologiques de bassins de montagne : évapotranspiration, écoulements, infiltrations, accumulation et fonte de la neige. Les paramètres du modèle sont calés pour chaque bassin versant de manière à reproduire la saisonnalité des débits, la partie haute de la distribution des débits et les principaux évènements de crues.

Sur une période d'au moins quinze ans, le modèle MORDOR simule les écoulements du bassin versant, permettant de prendre en compte ses différents états hydriques (Paquet et coll., 2013). Chacun de ces états hydriques est considéré et est artificiellement arrosé par un évènement pluvieux généré qui est transformé en évènement de crue par le modèle MORDOR. Cette opération est répétée plusieurs fois pour chaque état hydrique du bassin. Cela permet d'obtenir un grand nombre d'évènements de débits résultants de la conjonction de divers états hydriques du bassin avec des évènements pluvieux de natures différentes. La distribution des débits de crues sur le pas de temps de l'étude peut alors être estimée. Le débit maximum instantané est estimé à partir du débit de crue au pas de temps du modèle grâce à un coefficient multiplicatif (le coefficient de forme).

La régionalisation de l'approche SCHADEX n'a pas été mise en œuvre dans le domaine opérationnel et se heurte notamment au problème de la complexité du modèle MORDOR. Cependant ce point fait toujours l'objet de recherches (Penot, 2014).

La méthode SHYPRE (Simulation d'hydrogrammes pour la prédétermination) ou SHYREG pour sa version régionalisée (Aubert, 2012), repose sur l'association d'un générateur stochastique de pluies horaires et d'un modèle pluie-débit conceptuel à réservoirs qui transforme les évènements de pluies en évènements de crues. Cette méthode vise à fournir une base de quantiles de crues du biennal au millénal sur l'ensemble du territoire français (échantillonné par la BNBV) pour des bassins versants de 5 km² à 10 000 km². Cette méthode est d'ores et déjà déployée sur l'ensemble du territoire français à travers un portail en ligne[1] qui permet d'accéder à une base de quantiles de débits pour des périodes de retour de 2 à 1000 ans et des durées caractéristiques de 1 à 72h sur environ 140 000 bassins versants de France métropolitaine.

Une description complète du fonctionnement de la méthode SHYREG est donnée au chapitre 2.

[1] https://shyreg.irstea.fr

1.4. Positionnement du travail de thèse

La prédétermination des crues en sites non jaugés repose donc sur le couplage de deux types d'approches :

Partie XIII : Un modèle de prédétermination qui permet d'évaluer la fréquence des crues en site jaugé grâce à un calage effectué avec les données ;

Partie XIV : Une méthode de régionalisation qui permet de transférer soit les informations nécessaires à l'application du modèle soit directement les quantiles de crues vers les sites non jaugés.

L'aperçu de ces deux éléments donnés dans ce chapitre n'a pas vocation à être exhaustif (une revue bibliographique plus détaillée des méthodes de régionalisation est proposée au chapitre 5), mais plutôt à énoncer les grands principes et les familles de méthodes existant pour la prédétermination en contexte non jaugé. Cet aperçu est néanmoins suffisant pour commencer à envisager le nombre considérable de méthodes que l'on peut développer en associant les multiples possibilités à la fois de modèles de prédétermination des crues et de méthodes de régionalisation.

La diversité des approches suffit à elle seule à montrer que la question de la prédétermination des crues extrêmes en sites non jaugés demeure ouverte. Certains pays (comme le Royaume-Uni, l'Australie ou les États-Unis) ont développés des cadres méthodologiques très complexes pour standardiser les procédures utilisées sur leur territoire. Ce qui n'empêche bien sûr pas la recherche de continuer à développer des approches alternatives. En France, de tels cadres méthodologiques n'existent pas, et un gestionnaire du risque se retrouvant face à un problème d'estimation des crues en site non jaugé se retrouve confronté à la question du choix de la méthode.

La méthode SHYREG possède un certain nombre d'avantages. Tout d'abord, son fonctionnement au pas de temps horaire lui permet de fournir des quantiles de crues à des pas de temps fins (de 1h à 72h) (Arnaud et coll., 2016a). En outre, la méthode est également capable de fournir des hydrogrammes correspondant aux évènements de crue, ce qui peut permettre la création de « catalogues » de crues qui peuvent permettre le dimensionnement des évacuateurs de crues (Carvajal et coll., 2009). Le modèle a également été calé pour certains territoires français d'outre-mers (Arnaud et coll., 2006 ; Fine et coll., 2006) montrant sa bonne adaptabilité à différents climats. En outre, une application en contexte de changement climatique est également possible en intégrant des projections climatiques dans le calage du générateur de pluie (Cantet, 2009). La méthode a été évaluée et comparée à d'autres approches de prédétermination utilisées en France dans le cadre du projet ANR EXTRAFLO (Lang et coll., 2013 ; Renard et coll., 2013). Elle a été classée parmi les plus justes et les plus robustes lorsqu'elle est recalée localement (Kochanek et coll., 2014 ; Arnaud et coll., 2016a), et bien que limitées, ses performances en site non jaugé demeurent parmi les meilleures de méthodes testées (Kochanek et coll., 2014). Enfin, la méthode SHYREG a été développée pour être régionalisée : le générateur de pluie est déjà utilisable sur l'ensemble du territoire, et la régionalisation du modèle pluie-débit repose uniquement sur l'estimation d'un unique paramètre. Ces nombreux avantages nous amènent à envisager SHYREG comme une réponse à la question de la

méthode de prédétermination à utiliser en France. Néanmoins, il apparait nécessaire de revoir et d'approfondir la régionalisation de la méthode. L'objectif opérationnel du travail présenté ici est donc de développer une nouvelle version de SHYREG applicable en sites non jaugés.

Pour cela on se propose d'organiser la réflexion en trois axes principaux. Une première partie se centrera sur la méthode SHYREG : sa description, son évaluation et son adaptation aux objectifs. Cette partie sera également l'occasion d'introduire les données utilisées pour caler la méthode. Un second axe se focalisera sur les méthodes de régionalisation et leurs applications au paramètre hydrologique de SHYREG dans le but de développer une version de l'approche applicable en non jaugé. Enfin, un troisième axe s'intéressera davantage à la pertinence de la cartographie de l'aléa crue proposée par SHYREG en la comparant à d'autres approches de manière à évaluer ses forces et ses faiblesses.

1.5. Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre sur l'état de l'art de la prédétermination des crues, on a pu établir que l'estimation de l'aléa crue en France constitue une nécessité tant du point de vue de la dangerosité et de la gravité des inondations par débordement de cours d'eau que du point de vue de la législation. Ces procédures légales imposent d'ailleurs de pouvoir estimer plusieurs niveaux d'aléa en fonction de seuils définis par la probabilité d'occurrence des phénomènes (Parlement Européen, 2007). La détermination des débits associés à ces probabilités est appelée la prédétermination des crues.

On a également pu voir que la résolution des équations de la physique qui régissent les écoulements était trop complexe pour être entreprise à l'échelle des bassins versants. Pour cela l'utilisation de modèles simplifiés apparait nécessaire. Ces modèles doivent s'appuyer sur des données de débits observés qui ne sont disponibles que sur un nombre limité de sites et sur des périodes relativement restreintes pour l'étude des valeurs extrêmes. Les modèles simplifiés doivent donc pouvoir extrapoler leurs estimations dans le temps et dans l'espace. Une revue des grandes familles de méthodes existantes a permis d'établir leur grande variété mais aussi de poser un cadre sémantique strict.

La très grande diversité des méthodes existantes a également été établie. Cette diversité est une difficulté pour les gestionnaires du risque inondation qui doivent faire un choix entre ces méthodes. De nombreux pays ont adopté des procédures standardisées pour mettre en œuvre la prédétermination des débits de crue. La France ne fait pas partie de ces pays même si elle possède plusieurs outils d'ores et déjà opérationnels et performants en sites jaugés. Néanmoins, le transfert des débits de crues en sites non jaugés où aucune mesure de débit n'existe demeure problématique. Le travail proposé ici est donc l'adaptation et la modification de la méthode de prédétermination SHYREG, déjà employée sur l'ensemble du territoire, pour permettre l'évaluation de l'aléa crue en tout point du territoire français.

« Are no probabilities to be accepted, merely because they are no certainties? » (Austen, 1811, p41)

Chapitre 2 : Principe de la méthode SHYREG

2.1. Introduction 37
2.2. Le générateur de pluie horaire 38
2.2.1. Principe 38
2.2.2. Calage du générateur horaire 38
2.2.3. Régionalisation 42
2.2.4. Présentation et validation de la base SHYREG pluie 47
2.3. La modélisation hydrologique 50
2.3.1. Modélisation au pixel 50
2.3.2. Modèle hydrologique employé 51
2.3.3. Agrégation aux exutoires des bassins 52
2.3.4. Prise en compte du débit de base 54
2.3.5. Détermination du paramètre de calage 55
2.3.6. Synthèse du calage 56
2.3.7. Régionalisation 58
2.4. Conclusion et critique 62

2.1. Introduction

La méthode SHYREG est développée par Irstea depuis de nombreuses années (Cernesson, 1993). Elle a fait l'objet de nombreux développements jusqu'à une version opérationnelle mise en œuvre sur l'ensemble du territoire français depuis 2012. C'est cette dernière version de la méthode qui est présentée dans ce chapitre à travers une synthèse bibliographique. Cette version constitue le point de départ du travail de thèse présenté ici. Dans les chapitres suivants, on envisagera des modifications de la méthode pour améliorer certaines de ses composantes.

La méthode SHYREG (Simulation d'hydrogrammes pour la prédétermination des crues dans sa version régionalisée) repose sur l'association de deux modèles :

- Un générateur stochastique de pluies horaires ;
- Un modèle pluie-débit évènementiel.

Cette association permet la génération de nombreux évènements pluvieux et leur transformation en évènements de crues sur l'ensemble du territoire français. Cette méthode permet donc à la fois la prédétermination des pluies extrêmes et celle des débits.

Dans ce chapitre on s'attache à décrire successivement les deux modèles en mettant en évidence leur principe de fonctionnement et les hypothèses sur lesquels ils reposent. La structure du générateur de pluie étant très largement détaillée dans le guide pratique de Arnaud et Lavabre (2010), on cherche ici à résumer son principe de fonctionnement tout en prenant en compte quelques modifications intervenues depuis la parution du guide, notamment le travail de Cantet et Arnaud (2012).

2.2. Le générateur de pluie horaire

2.2.1. Principe

L'originalité du générateur de pluie de la méthode SHYREG est de se baser sur l'analyse descriptive du signal de pluie au pas de temps horaire (Arnaud, 2015). Cette analyse permet de définir des variables mesurables sur les hyétogrammes horaires qui sont modélisées par des lois de probabilité. Le principe de la simulation de pluie est donc de tirer aléatoirement chacune de ces variables à partir de ces lois de probabilité pour générer des averses artificielles.

Deux phases principales peuvent être distinguées dans le développement et l'utilisation du générateur de pluie : tout d'abord l'analyse des évènements pluvieux et le calage du générateur au pas de temps horaire, et ensuite la paramétrisation des variables horaires par l'information journalière et la régionalisation du générateur.

2.2.2. Calage du générateur horaire

Le générateur de pluie de la méthode SHYREG a été développé notamment par Cernesson (1993) et modifié par Cantet (2009). Il s'agit d'un modèle événementiel, c'est-à-dire qu'il génère des évènements de pluies de façon indépendante. On ne génère donc pas des séries de pluies continues dans le temps mais des évènements discontinus indépendants. Néanmoins, le nombre d'évènements par année correspond à la réalité, ce qui permet de mettre en œuvre une analyse fréquentielle des pluies alors que l'on ne dispose pas de chroniques complètes. On retiendra également que la saisonnalité des pluies est prise en compte grâce à un calage distinct sur deux saisons : l'hiver (de décembre à mai) et l'été (de juin à novembre). Cette distinction saisonnière permet de différencier des pluies plutôt courtes et intenses en été et plus longues et moins intenses en hiver (Arnaud et Lavabre, 1999).

2.2.2.1. Analyse descriptive des hyétogrammes

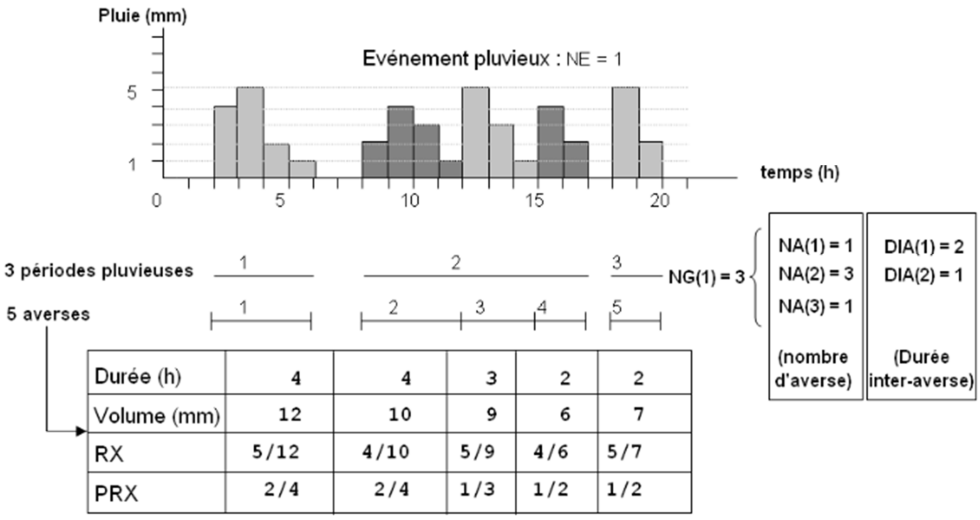
L'objectif du générateur de pluie est l'estimation des précipitations extrêmes, il convient donc de filtrer les évènements pluvieux les plus forts. Pour la France métropolitaine, un évènement de pluie est défini comme une succession de pluies journalières de plus de 4 mm avec au moins un cumul journalier de 20 mm ou plus. On définit alors la variable ***NE*** comme le nombre d'évènements pluvieux par saison. On peut alors décrire chaque évènement séparément.

Chaque évènement est composé d'une ou plusieurs périodes pluvieuses séparées les unes des autres par des pas de temps sans pluies. On définit les variables ***NG*** et ***DIA*** comme étant respectivement le nombre de ces périodes pluvieuses par évènement et la durée (sèche) entre ces périodes pluvieuses. Enfin, chaque période pluvieuse est divisée en averses successives. Une averse est une succession de pluies horaires ne possédant qu'un maximum local et une décroissance des

pluies autour de ce maximum. On définit alors ***NA***, le nombre d'averses par période pluvieuse. Chaque averse est alors caractérisée par quatre variables :

- Sa durée en heure, notée ***DA*** ;
- Son volume en millimètres, noté ***VOL*** ;
- Le rapport entre sa pluie horaire maximale et son volume, noté ***RX*** ;
- La position relative de la pluie horaire maximale dans l'averse : notée ***RPX***.

Un exemple d'extraction des variables à partir du hyétogramme horaire d'un évènement pluvieux est présenté figure 2-1.



Durée (h)	4	4	3	2	2
Volume (mm)	12	10	9	6	7
RX	5/12	4/10	5/9	4/6	5/7
PRX	2/4	2/4	1/3	1/2	1/2

Figure 2-1 : *Détail de l'analyse d'un évènement pluvieux du générateur SHYREG (Arnaud et Lavabre, 2010)*

La division des hyétogrammes en averses présentent plusieurs avantages. Tout d'abord, cela permet de prendre en compte implicitement l'autocorrélation entre les pas de temps successifs d'un hyétogramme (Arnaud, 2015). En outre, pour chaque année d'observation on dispose alors de plusieurs évènements, chacun séparé en plusieurs périodes pluvieuses, elles-mêmes divisées en averses. On dispose donc d'un grand nombre d'observations des variables descriptives des averses ce qui permet d'augmenter la robustesse du calage. En effet, un nombre important d'observation permet de limiter la sensibilité à la présence d'avènements extrêmes.

L'étude de la typologie des averses a conduit à identifier deux groupes : les averses, dites principales, qui apportent la plus grande quantité d'eau et les averses ordinaires. Pour prendre en compte cette distinction, on définit la variable ***NAVP*** qui correspond au nombre d'averses principales dans un évènement. Ce nombre est de 1 au minimum, et il est incrémenté pour chaque jour où le cumul de pluie dépasse 50 mm.

On dispose donc de neuf variables descriptives de la pluie au pas de temps horaire pour chacune des deux saisons. L'analyse des chroniques de pluie horaire issue d'un pluviographe horaire fournit une série de valeurs pour chacune de ces variables. Une étude statistique permet de modéliser l'occurrence de chacune de ces variables par une loi de probabilité. La nature des lois employées est la même pour tous les postes, néanmoins, les paramètres de ces lois sont calés en chaque site. Un résumé des types de lois utilisées est fourni dans le tableau 2-1. La mise en œuvre du générateur de

pluie SHYREG nécessite donc la détermination de vingt paramètres caractérisant les différentes lois de probabilité, pour chacune des deux saisons. La détermination de ces vingt paramètres permet de simuler les neufs variables descriptives de la pluie de manière stochastique pour chacune des deux saisons, et donc de générer des années d'évènements pluvieux.

Tableau 2-1 : *Lois de probabilité associées à chaque variable, d'après Arnaud et Lavabre (2010)*

Variable	Description	Loi de probabilité	Nombre de paramètres
NE	Nombre d'évènements pluvieux par saison	Loi de Poisson	1 par saison
NG	Nombre de période pluvieuse par évènement	Loi géométrique	1 par saison
DIA	Durée sèche entre les périodes	Loi géométrique (DIA<12h)	1 par saison
		Loi uniforme (DIA>12h)	1 par saison
NA	Nombre d'averses par période	Loi géométrique	1 par saison
DA	Durée de chaque averse	Loi de Poisson (DA faible)	1 par saison et par type d'averse
		Loi uniforme (DA fort)	1 par saison et par type d'averse
VOL	Volume de chaque averse	Loi exponentielle	3 par saison et par type d'averse
RX	Ratio maximum horaire / volume de l'averse	Loi uniforme	1 par saison et par type d'averse
RPX	Position du maximum horaire dans l'averse	Loi normale	2 par saison
NAVP	Nombre d'averses principales	Loi Exponentielle	1 par saison

2.2.2.2. Simulation des évènements

La simulation des évènements se fait en tirant aléatoirement des valeurs des différentes variables descriptives au moyen des lois de probabilités ajustées. La procédure de simulation est présentée figure 2-2. Par exemple, pour générer un équivalent d'un siècle d'évènements il faut tirer cent valeurs de NE pour la saison été et autant pour l'hiver. La somme de ces 200 valeurs donne le nombre total d'évènements à générer. Pour la simulation de chacun de ces évènements il faut alors tirer un nombre de périodes pluvieuses NG. Pour chacune de ces périodes il faut tirer le nombre d'averses la composant et la longueur de la période sèche qui la sépare de la période pluvieuse suivante. On tire donc NG valeurs de NA et NG-1 valeurs de DIA. On peut alors tirer le nombre d'averses principales qui est borné par le nombre d'averses de l'évènement. Pour chaque averse, les valeurs de sa durée DA et de son volume VOL sont générées ce qui permet de répartir les averses dans le temps et de connaitre le volume total de l'évènement. Les valeurs de RX et de RPX sont également tirées pour chaque averse en distinguant les types d'averses, ce qui permet de positionner le maximum horaire de chaque averse. Le volume restant est alors réparti aléatoirement sur les pas de temps humides en respectant une décroissance autour des maximums.

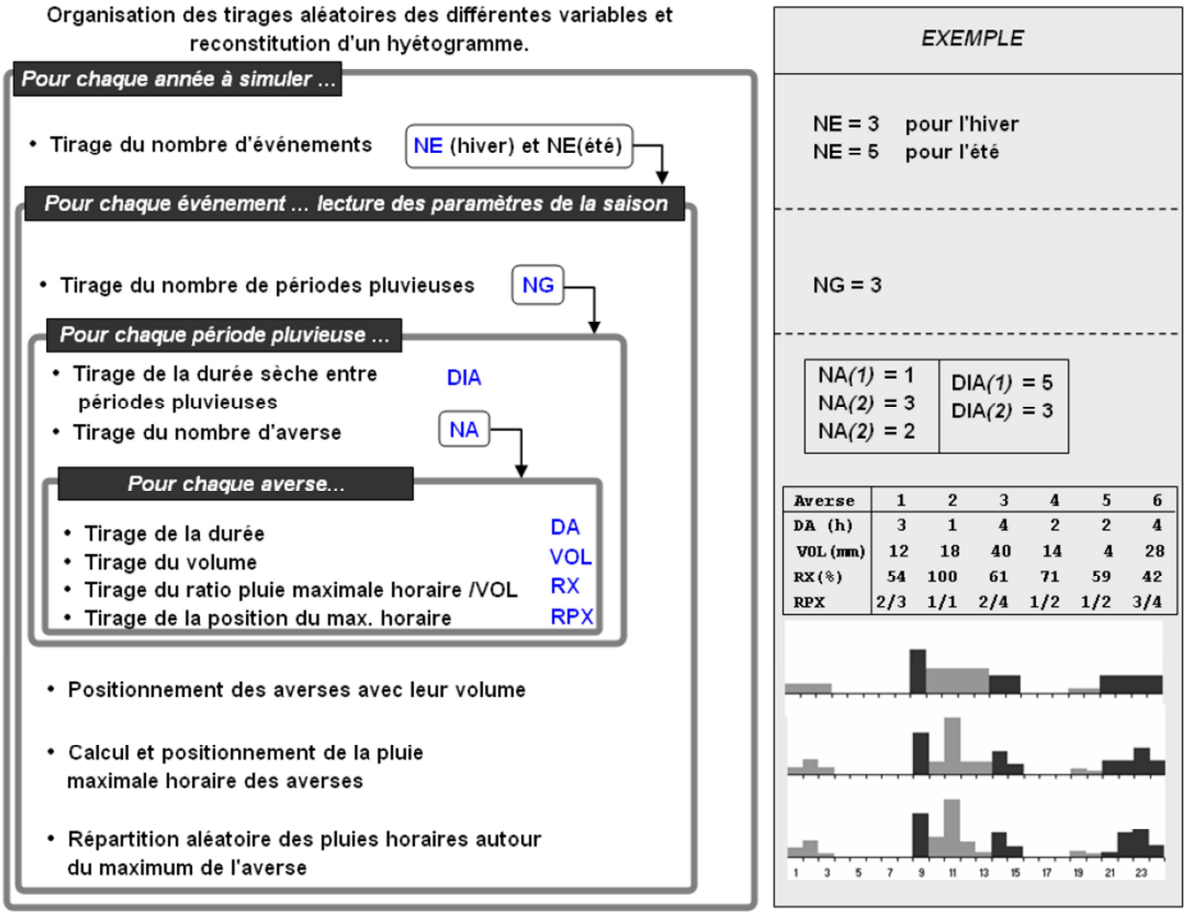


Figure 2-2 : *Organisation des tirages aléatoires des différentes variables pour la construction de hyétogrammes simulés (Arnaud et Lavabre, 2010)*

2.2.2.3. Étude de la dépendance des variables

Des études ont montré qu'il existait une dépendance, que l'on nomme persistance, entre les différentes réalisations de la variable « volume des averses principales » (Arnaud et Lavabre, 1999). En effet, on observe une tendance de cette variable à être plus élevée lorsqu'il y a plus d'une averse principale dans l'évènement. En outre, lorsqu'une averse principale est très forte, on a également tendance à observer plusieurs averses principales caractérisées par un grand volume. Cette persistance des averses principales est modélisée par des copules (Cantet, 2009). Les copules sont des outils mathématiques destinés à prendre en compte la dépendance entre des variables aléatoires indépendamment de leur distribution marginale (Nelsen, 1999 ; Genest et Favre, 2007 ; Salvadori et coll., 2007). Dans le cas de la persistance, des copules dites de Gumbel (Gumbel, 1961) sont employées pour modéliser une dépendance asymptotique des variables. Des copules ont également été employées pour modéliser la dépendance entre la durée et le volume des averses principales (Cantet et Arnaud, 2014).

Dans tous les cas, les copules sont considérées comme des composantes régionales du modèle. C'est-à-dire qu'elles sont calées sur des valeurs adimensionnelles que sont les fréquences de lois

marginales, qui peuvent être agglomérées sur plusieurs postes. Les paramètres des copules sont donc fixés sur l'ensemble du territoire.

2.2.2.4. Application

La structure du générateur de pluie SHYREG a été calée sur 217 postes pluviographiques en France métropolitaine (voir figure 2-3). Ces postes sont répartis à travers les différentes zones climatiques du territoire métropolitain : zone alpine, méditerranéenne et tempérée. Une application en climat tropical est également mise en œuvre grâce à 34 postes de la Martinique et de la Réunion. La validation est basée sur l'analyse des courbes de fréquences de différentes durées (courbes IdF). Ces courbes sont extraites des hyétogrammes simulés de la même façon que des hyétogrammes observés. Au final, les comparaisons montrent que « le générateur de pluie permet d'obtenir des chroniques de pluies horaires statistiquement équivalentes aux pluies observées, et cela sous différents types de climat » (Arnaud et coll., 2007).

Le générateur de pluie décrit ici nécessite des chroniques de pluie horaires pour être recalé. Il conduit en outre à un paramétrage élevé avec une quarantaine de paramètres à déterminer. Cependant, la structure du modèle reste toujours la même.

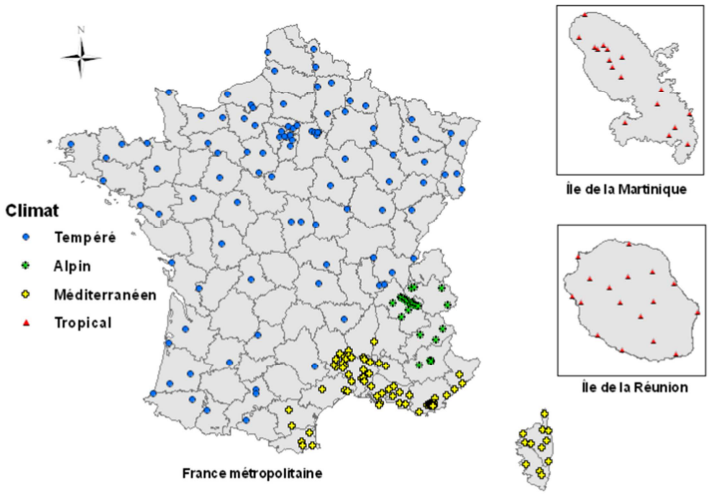


Figure 2-3 : *Répartition géographique des pluviographes utilisés pour développer le générateur de pluies.*

2.2.3. Régionalisation

L'objectif de la régionalisation est ici de pouvoir activer le générateur de pluie en tout point du territoire y compris en l'absence de pluviographe horaire. On a vu en 2.2.2 que le générateur de pluie s'adapte à chaque site à travers le calage de certains paramètres. Ce calage peut se baser sur une information purement locale issue d'une chronique de pluie au pas de temps horaire (c'est le cas des paramètres des lois de probabilités), ou être régional, c'est-à-dire être déterminé pour une région donnée (paramètres des copules, seuils de détection des évènements…). L'activation du générateur nécessite donc une information de pluie au pas de temps horaire pour déterminer les différents paramètres. Cependant, la mesure de la pluie au pas de temps horaire ne s'effectue qu'en quelques

points du territoire (voir figure 2-3), trop peu nombreux pour espérer cartographier les 40 paramètres du modèle horaire. Toutefois, la mesure de la pluie au pas de temps journalier est bien plus répandue avec 3 424 postes disponibles (Arnaud et Lavabre, 2010). En outre, les chroniques au pas de temps journaliers sont généralement bien plus longues. Une simplification du modèle et une paramétrisation de l'information horaire par l'information journalière a donc été mise en place.

2.2.3.1. Simplification de la paramétrisation

Une étude de sensibilité du modèle aux différents paramètres (20 par saisons) calés pour les 217 postes horaires a permis d'en fixer 15 à leur valeur médiane pour chacune des deux saisons sur l'ensemble du territoire (Arnaud, 1997). En effet, ces paramètres étaient souvent peu variables ou seulement dans des gammes où le modèle n'était pas sensible. Il faut noter que les paramètres sont fixés à des valeurs différentes en France métropolitaine et en outre-mer. On a ici affaire au type de régionalisation le plus simple qui consiste à choisir une valeur unique de la valeur d'intérêt sur une région. Cette simplification ne dégrade pas les performances du modèle (Arnaud et Lavabre, 2010).

Les cinq paramètres restant, sensibles et ne pouvant être fixés sont :

- le nombre d'évènements moyen par saison (qui est le paramètre de la loi de Poisson décrivant NE),
- le volume moyen des averses principales (qui est l'un des trois paramètres de la loi exponentielle décrivant VOL pour les averses principales),
- le volume moyen des averses ordinaires (qui est l'un des trois paramètres de la loi exponentielle décrivant VOL pour les averses ordinaires),
- le nombre moyen de périodes pluvieuses (qui est l'inverse du paramètre de la loi géométrique décrivant NG),
- le nombre moyen d'averses principales (qui est le paramètre de la loi exponentielle décrivant NAVP).

De manière à expliquer ces paramètres horaires, trois paramètres « journaliers » ont été définis à partir de chroniques au pas de temps journalier :

- **µNE** est le nombre moyen d'évènements analysés par saison. Il correspond à l'un des cinq paramètres horaires que l'on cherche à expliquer, mais il peut directement s'estimer à partir de l'information journalière car un évènement de pluie est défini à partir de seuils journaliers.
- **µPJMAX** (en mm) est la moyenne des pluies journalières maximales de chaque évènement pluvieux d'une saison. Ce paramètre est lié à l'intensité pluviométrique et sert à expliquer les volumes moyens des averses ordinaires et principales.
- **µDTOT** (en jour) est la moyenne des durées des évènements pluvieux d'une saison. Ce paramètre est lié à la durée des pluies et sert à expliquer le paramètre horaire décrivant le nombre de périodes pluvieuses.

Des régressions linéaires liant les paramètres horaires aux paramètres journaliers sont établies. Le nombre d'évènements moyen par saison est directement mesurable à partir de l'information journalière (µNE). Bien que le nombre moyen d'averses principales puisse être estimé à partir de l'information journalière, on lui trouve également une très forte corrélation avec µPJMAX et on

l'estime donc par régression linéaire exploitant cette corrélation de manière à lui laisser un caractère lié à la génération d'évènements persistants (Arnaud et Lavabre, 2010). Les volumes moyens des averses sont estimés par régression avec le paramètre journalier µPJMAX. De plus, les deux autres paramètres de la loi décrivant le volume des averses principales sont également corrélés à µPJMAX. Cette corrélation est donc exploitée pour améliorer le modèle journalisé. Enfin, il apparait que le nombre d'averses par évènement (NA x NG) est corrélé au paramètre journalier µDTOT. Le nombre moyen d'averses pluvieuses est donc défini à partir de µDTOT et de la valeur de NA fixée sur tout le territoire, cette façon de faire permet de compenser l'erreur introduite en fixant NA à une valeur unique.

À ce stade l'ensemble des 20 paramètres des lois de probabilité décrivant l'occurrence des 9 variables descriptives de la pluie horaire peuvent être estimés à partir de trois paramètres issus de chroniques de pluies journalières. La plus grande disponibilité de ces chroniques journalières permet d'envisager une cartographie de ces trois paramètres.

2.2.3.2. Régionalisation des paramètres journaliers

La cartographie des paramètres journaliers a été réalisée par Météo-France par la méthode Aurelhy (Benichou et Le Breton, 1987) à partir des valeurs estimées sur 2 812 pluviomètres (Sol et Desouches, 2005). Tout d'abord, la France a été divisée en 11 zones (voir figure 2-4) supposées homogènes. Sur chacune de ces zones, des régressions linéaires multiples ont été établies entre les différents paramètres journaliers (trois paramètres pour chacune des deux saisons) et des covariables permettant de caractériser les différents sites. La fonction mathématique reliant un paramètre journalier à différentes covariables est appelée fonction géographique. Au niveau des frontières entre les régions, des zones de chevauchement d'une trentaine de kilomètres sont prévues pour assurer une continuité spatiale des paramètres journaliers estimés.

Les covariables employées pour l'établissement des fonctions géographiques sont :

- L'altitude moyenne sur une maille de 5x5 km ;
- Des variables définissant les distances aux mers, océans, grands fleuves et crêtes importantes (Cévennes…) ;
- Des composantes principales du relief qui permettent de décrire le paysage relatif autour d'un point. Ces composantes permettent de caractériser la présence de cuvettes, de monticules, de vallées, l'orientation des pentes…

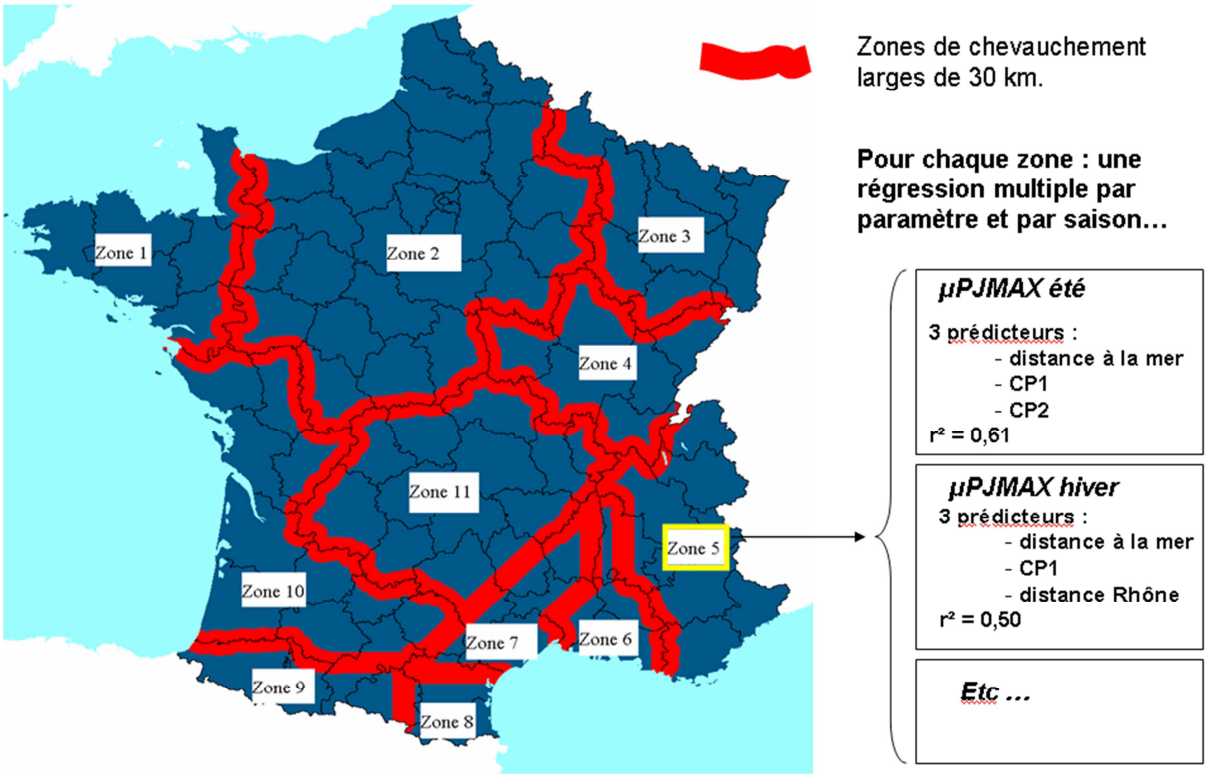


Figure 2-4 : *Localisation des 11 zones homogènes pour la cartographie des paramètres journaliers (Arnaud et Lavabre, 2010)*

Les résidus des différentes régressions sont interpolés dans l'espace grâce à un krigeage simple. Ces résidus krigés sont alors ajoutés aux estimations faites par la fonction géographique. Cette interpolation spatiale des résidus permet à la fois de prendre en compte des effets locaux non décrits par la fonction géographique (par exemple des liens non linéaires, ou des effet non décrits par les covariables), et également de proposer une méthode de régionalisation exacte, c'est-à-dire qui retrouve les valeurs mesurées au niveau des points de calage. On obtient ainsi une cartographie des différents paramètres à une résolution de 1 km représentés figure 2-5.

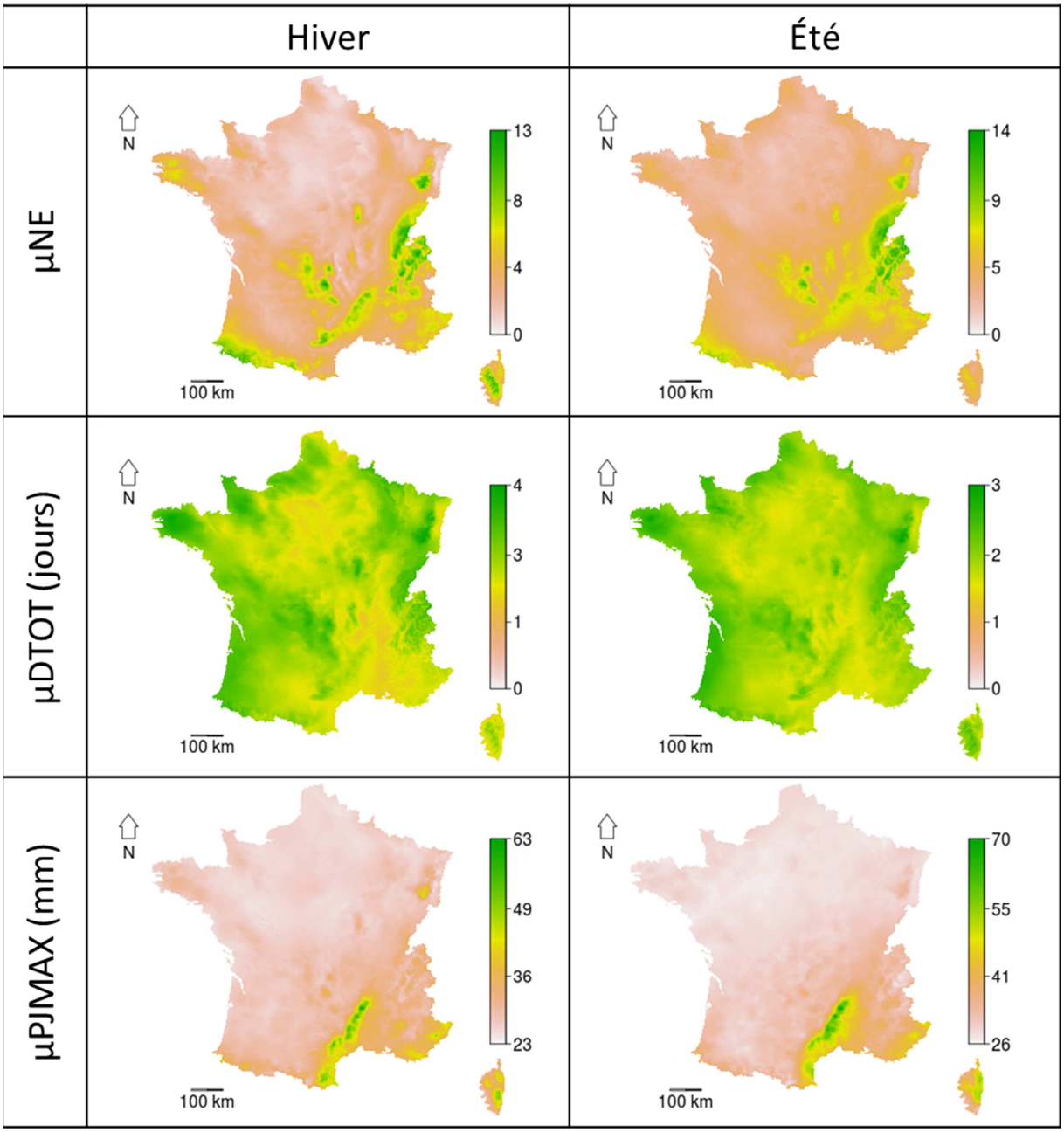


Figure 2-5 : *Cartographie des paramètres journaliers de SHYREG*

Sur la figure 2-5 on peut observer la variabilité spatiale et saisonnière des trois paramètres journaliers. Dans l'ensemble des cas, les allures spatiales sont similaires en été et en hiver même si la gamme de valeurs peut changer. Le paramètre µNE représente l'occurrence des évènements pluvieux les plus forts, c'est-à-dire supérieurs à 20 mm. On remarque que ces évènements sont plus courants en été qu'en hiver de manière générale et surtout présents sur les zones montagneuses (Alpes, massif Central, Pyrénées, Jura, Ballon des Vosges). Néanmoins, la corrélation avec l'altitude n'explique pas tout car les zones côtières sont caractérisées par des valeurs de µNE plus fortes que les plaines centrales. Le paramètre µDTOT représente la durée des évènements pluvieux. Cette durée est en général plus grande en hiver qu'en été et plus importante sur la côte ouest du pays et sur certains reliefs (Vosges, Alpes du nord, Ardennes). Au contraire les évènements les plus courts se trouvent dans la vallée du Rhône et sur les côtes de la Méditerranée. Enfin, le paramètre µPJMAX représente l'intensité de la pluviométrie. Ses valeurs sont plus importantes pour la saison été (à part

sur les sommets des Vosges) qui est bien caractérisée par des orages plus intenses. Les précipitations les plus intenses se rencontrent sur le pourtour méditerranéen notamment sur les Cévennes et la côte est de la Corse qui sont bien des régions connues pour être sujettes à des épisodes pluvieux particulièrement intenses.

Les six cartes de paramètres journaliers régionalisés présentées sur la figure 2-5, ainsi que les valeurs des paramètres fixés uniformément sur la France ou par région, permettent d'activer le générateur de pluie SHYREG en tout point du territoire français.

2.2.4. Présentation et validation de la base SHYREG pluie

Le générateur de pluie SHYREG peut être activé en n'importe quel pixel d'un maillage de résolution kilométrique, il peut alors fournir des années d'évènements pluvieux ce qui permet de disposer d'un catalogue de hyétogrammes d'évènements intenses (transformables en évènement de crue comme cela sera montré dans la partie 2.3), et aussi de déterminer des quantiles de pluies pour plusieurs périodes de retour et durées caractéristiques sur l'ensemble du territoire. À titre illustratif, les cartes de quantiles de pluies décennales et centennales pour des durées caractéristiques de 1, 6 et 24 heures sont fournies sur la figure 2-6. Comme on pouvait s'y attendre, c'est surtout l'arc méditerranéen, et notamment les Cévennes, qui est caractérisé par les quantiles de pluies les plus forts, quelles que soient la période de retour et la durée caractéristique considérée.

L'évaluation du générateur de pluie de la méthode SHYREG dans sa version régionalisée s'est déroulée en plusieurs phases. Tout d'abord 612 pluviomètres ont été gardés à des fins de validation (en plus des 2 812 utilisés pour mettre en œuvre la régionalisation des paramètres journaliers). Ces postes supplémentaires ont pu être utilisés pour valider la régionalisation des paramètres journaliers. En outre, ils permettent d'évaluer les quantiles de pluies fournis par la méthode sur des sites non utilisés pour le calage ou la régionalisation en les comparant à ceux estimés à partir des données de pluies au sol.

La comparaison des paramètres journaliers estimés par la régionalisation et calculés à partir des observations sur les postes de validation conduit à des valeurs de coefficients de détermination supérieurs à 0,85 pour µNE et µPJMAX (même supérieurs à 0,90 sur la saison été) et autour de 0,75 pour µDTOT (Arnaud et Lavabre, 2010). Ces résultats permettent de justifier la méthode de régionalisation employée. La plus faible performance sur la régionalisation de µDTOT demeure acceptable, d'autant plus que ce paramètre a moins d'impact sur la restitution des quantiles de pluies (Arnaud et Lavabre, 2010).

La comparaison des quantiles de pluies journalières « SHYREG » avec ceux issus de l'ajustement d'une loi de probabilité en chacun des 612 postes de validation conduit à des écarts inférieurs à 20% pour 95% des postes pour les quantiles biennaux et inférieurs à 20% pour 90% des postes pour les quantiles décennaux. Ces écarts sont notamment dus à la journalisation du modèle SHYREG, à la régionalisation (les estimations SHYREG sont faites sans utiliser les mesures faites sur les 612 postes) et aux écarts dus à l'emploi de deux méthodes différentes (Arnaud et Lavabre, 2010).

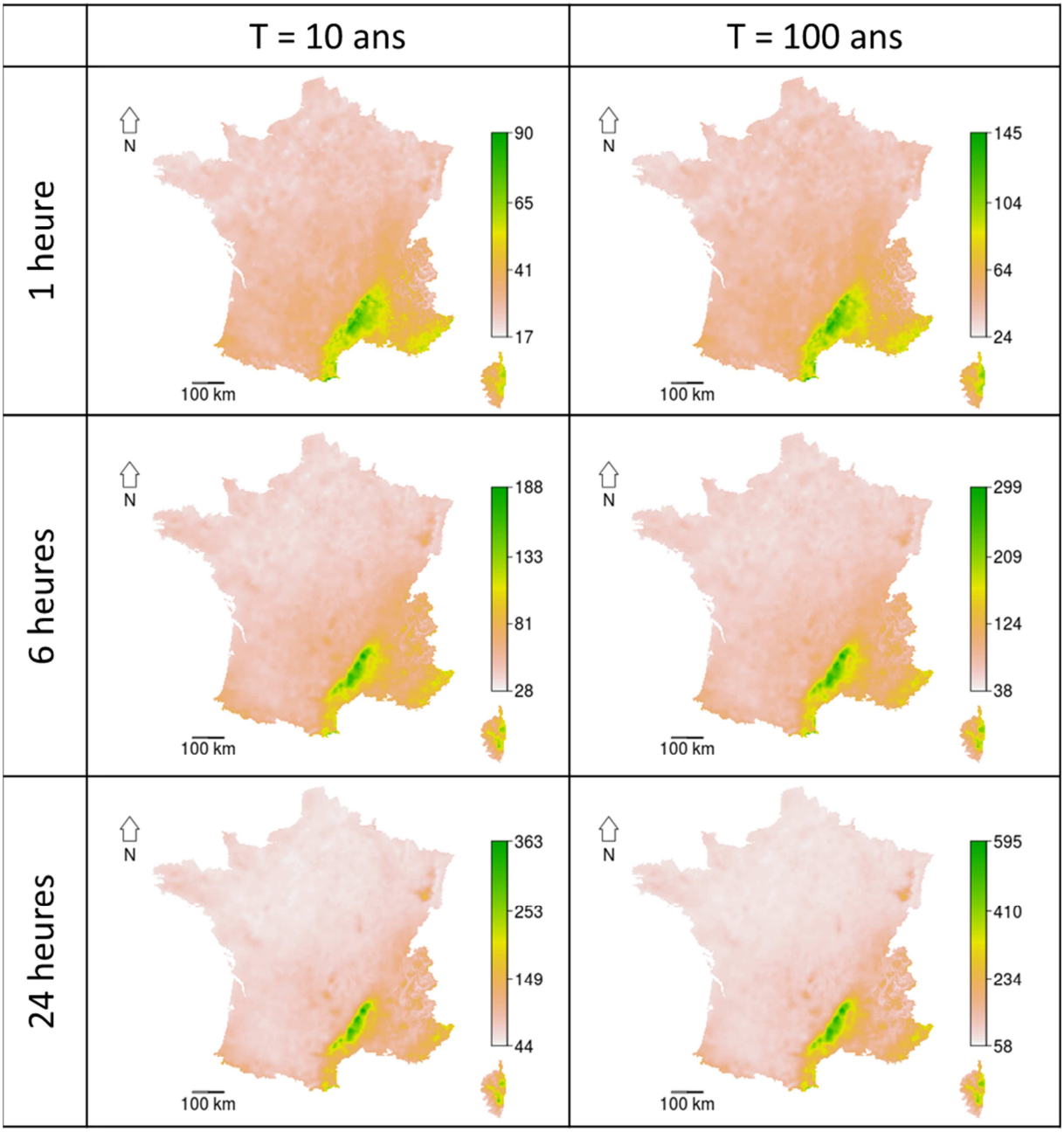


Figure 2-6 : *Cartes des quantiles de pluie SHYREG en mm*

Une deuxième phase de validation a été réalisée dans le cadre du projet ANR Extraflo (Lang et coll., 2013 ; Renard et coll., 2013). Ce projet a permis de comparer plusieurs approches de prédétermination des pluies extrêmes : des approches purement locales mais aussi des approches régionales. Le projet a pu conclure que l'emploi de méthodes probabilistes directes utilisées en version purement locale était à proscrire comparé à des approches à composantes régionales ou à des modèles par simulation des processus (Neppel et coll., 2014). En outre, des méthodes entièrement régionalisées ont été comparées sur leurs performances en sites non jaugés. Une méthode basée sur l'interpolation des paramètres d'une loi GEV a conduit à des performances inférieures à l'approche SHYREG et à une méthode basée sur des lois statistiques régionales (Carreau et coll., 2013).

On dispose donc d'un générateur de pluie entièrement régionalisé pouvant être employé sur l'ensemble du territoire français. Ce modèle est validé et qualifié de juste et robuste (Carreau et coll., 2013). Ici, la robustesse correspond à la capacité de la méthode à être peu sensible à des variations des données d'entrée. Il est, en outre, capable de fournir des quantiles de pluies de différentes périodes de retour et durées caractéristiques mais aussi des séries de hyétogrammes de formes cohérentes avec les observations de pluies.

2.3. La modélisation hydrologique

L'objectif du modèle hydrologique SHYREG est de convertir les évènements de pluies issus du générateur stochastique pour les transformer en évènements de débits que l'on peut agréger à l'exutoire d'un bassin versant. Cette modélisation doit permettre une évaluation des débits de crues sur l'ensemble du réseau hydrographique.

2.3.1. Modélisation au pixel

À terme, le modèle pluie-débit doit être régionalisé. Parmi la multitude de modèles existants il parait nécessaire d'en choisir un qui soit à la fois performant et peu paramétré. Au sein des modèles utilisés dans des méthodes de prédétermination par simulation des processus, on peut citer le modèle MORDOR utilisé dans SCHADEX (Paquet et coll., 2013) ou encore TOPMODEL (Blazkova et Beven, 2004). Dans le cas de l'approche SHYREG, les modèles conceptuels de la classe GR (IRSTEA, 2017) semblent appropriés. En effet, ces modèles ont été développés pour les bassins français et présentent un bon compromis entre performance et parcimonie (Perrin et coll., 2001). On doit ici transformer des hyétogrammes d'évènements pluvieux horaires, il est donc nécessaire d'utiliser un modèle fonctionnant sur le même pas de temps.

Les évènements pluvieux sont convertis en débits par un modèle inspiré de GR3H (Yang, 1993). Ce modèle fonctionne au pas de temps horaire et est composé de deux réservoirs et de deux hydrogrammes unitaires. Il possède trois paramètres liés à sa structure et deux paramètres liés à son initialisation. Les paramètres d'initialisation ont peu d'importance lors d'une simulation en continu du modèle puisque l'on peut généralement permettre une période de chauffe. Néanmoins, le générateur de pluie, qui produit des évènements pluvieux discontinus, impose une version événementielle du modèle pluie-débit. Cette utilisation nécessite donc le calage des cinq paramètres (Arnaud, 2015). Une étude de sensibilité a permis de réduire ce nombre à trois paramètres (Arnaud et Lavabre, 2000).

Cette approche dite « SHYPRE local » possède des avantages notamment en termes de robustesse vis-à-vis de la présence d'évènements extrêmes (Arnaud et Lavabre, 2002). Cela s'explique par une utilisation étendue de l'information pluviométrique par le générateur de pluie. L'approche locale peut par exemple être utilisée pour le dimensionnement d'ouvrages hydrauliques, ce qui évite l'emploi de pluies et de crues de projets uniques en proposant la simulation d'une multitude d'évènements (Carvajal et coll., 2008 ; Carvajal et coll., 2009) .

L'emploi du générateur de pluie régionalisé permet la simulation d'évènements de pluies en sites non instrumentés. Néanmoins, il est important de rappeler que bien que ce générateur fonctionne sur l'ensemble du territoire français, les simulations de pluies se font indépendamment en chaque pixel d'un maillage kilométrique. On génère donc des pluies ponctuelles et pas des pluies de bassins. Ces pluies de bassins ont des caractéristiques plus lissées que les pluies ponctuelles. Le passage de l'une à l'autre au pas de temps horaire se heurte notamment à la faible densité du réseau de mesure qui ne permet pas d'apprécier la variabilité des pluies horaires à une résolution suffisamment fine. Pour pallier à cette difficulté, le choix a été fait de transformer les pluies

ponctuelles en crues sur les mailles de calculs kilométriques. On extrait alors de ces crues les quantiles de débits associés à un kilomètre carré et assimilables à des débits spécifiques qui sont ensuite agglomérés à l'échelle des bassins versants en prenant en compte à la fois l'abattement spatial de la pluie et celui des débits (Arnaud, 2015). De fait, la modélisation hydrologique se réalise alors en chaque pixel de 1 km², avec la pluie locale, ce qui permet de simplifier le modèle hydrologique.

2.3.2. Modèle hydrologique employé

La simplification du modèle GR3H pour la méthode SHYREG a été réalisée sur des petits bassins versants présents sous différents climats (Graff, 2004 ; Arnaud, 2005 ; Fine et coll., 2006 ; Folton et coll., 2007). Le modèle simplifié est dénommé GRsimple et sa structure est présentée figure 2-7. Ce modèle est constitué d'un réservoir de production de capacité A et d'un réservoir de transfert de capacité B. À chaque pas de temps t, la pluie P(t) est répartie entre les deux réservoirs selon le remplissage du réservoir de production S(t) (le taux de remplissage est logiquement noté S(t)/A). On peut noter qu'en cas de saturation du réservoir de production, toute la pluie est envoyée vers le réservoir de transfert dont le niveau de remplissage est noté R(t). On considère alors que toute l'eau de pluie ruisselle. Les valeurs initiales de S(t) et R(t) sont respectivement notées S0 et R0. Les principales simplifications par rapport à GR3H sont :

- La suppression des deux hydrogrammes unitaires (Arnaud, 2005) ;
- La taille du réservoir de transfert B est fixée à 50 mm en été et 100 mm en hiver (Graff, 2004) ;
- Le remplissage initial du réservoir de transfert avant chaque évènement R0 est fixé à 30% de la capacité du réservoir (Graff, 2004) ; c'est-à-dire R0/B = 0,3 ;
- La capacité du réservoir de production A est fixée notamment selon des classes hydrogéologiques (Aubert, 2012), la carte des valeurs de A au pixel est présentée figure 2-8 ;
- Le taux de remplissage initial du réservoir de production S0/A demeure le seul paramètre de calage (Arnaud, 2005).

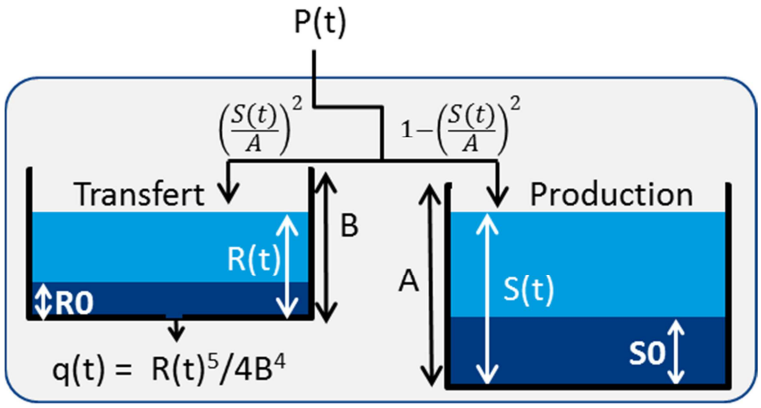


Figure 2-7 : *Structure du modèle GR3H simplifié, d'après Aubert (2012)*

Le modèle proposé est relativement simple par rapport au modèle GR3H initial, néanmoins toutes les erreurs dues à la simplification de la méthode sont reportées sur le seul paramètre S0/A.

Si l'on dispose d'une valeur du paramètre S0/A, ce modèle permet de convertir les évènements pluvieux issus du générateur de pluie en évènements de crues (à l'échelle du pixel). Le calage de ce paramètre est réalisé par méthode inverse et est détaillé dans le paragraphe 2.3.5. Une analyse fréquentielle peut alors être mise en œuvre pour déterminer des quantiles de débits ponctuels en chaque pixel. Ce sont ces quantiles que l'on va chercher à agglomérer à l'échelle des bassins versants.

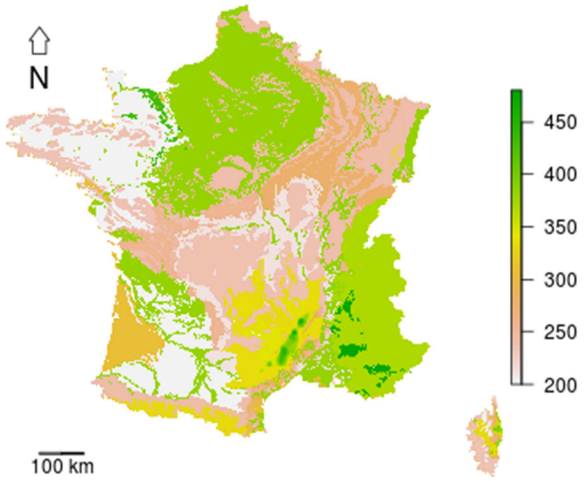


Figure 2-8 : *Carte de la capacité du réservoir de production A (en mm)*

2.3.3. Agrégation aux exutoires des bassins

À la sortie du modèle hydrologique et après analyse fréquentielle, on dispose en chaque pixel d'une base de quantiles de débits « spécifiques » pour différentes périodes de retour et différentes durées. On cherche donc à agréger ces quantiles sur des bassins versants. Néanmoins, il ne s'agit pas de sommer les quantiles estimés sur chaque pixel. En effet, les quantiles de débits à l'exutoire d'un bassin sont nécessairement plus faibles que la somme des quantiles ponctuels du fait de deux phénomènes d'abattement :

- **L'abattement spatial de la pluie**. Lors d'un phénomène pluvieux seule une certaine étendue spatiale est affectée par la pluie. Deux pluviomètres séparés par une distance D ne sont pas forcément arrosés par les mêmes évènements, et c'est d'autant plus vrai que D est grand. Cependant, si les deux postes sont soumis aux mêmes conditions climatiques, les quantiles de pluies qui les caractérisent seront probablement très proches. On peut avoir la même probabilité qu'une certaine pluie s'abatte sur chacun des pluviomètres, indépendamment l'un de l'autre, néanmoins la probabilité qu'un même évènement arrose les deux pluviomètres est d'autant plus faible que D est grand. Cette idée peut être étendue à tous les pixels d'un bassin versant : la probabilité qu'un évènement d'intensité donnée affecte un point du bassin est forcément plus élevée que la probabilité que cet évènement les affecte tous, d'autant plus que le bassin est grand. Dans la mesure où la pluie SHYREG est générée indépendamment en chaque pixel, il est nécessaire de prendre en compte un abattement spatial pour considérer leur agrégation sur un bassin.
- **L'abattement des débits**. L'ensemble d'un bassin versant n'est pas nécessairement affecté par des phénomènes de crues, et même si c'est le cas, les pics de crues ne sont généralement pas synchronisés. Il faut également prendre en compte le phénomène de

laminage qui tend à aplatir les hydrogrammes de crue d'amont en aval alors que le volume de crue peut rester constant. Ces phénomènes sont d'autant plus importants que le bassin est grand. Ainsi, lors d'un épisode de crue, la valeur du débit maximal à l'exutoire du bassin n'est pas la somme des débits maximaux sur chacun des pixels du bassin.

Dans la méthode SHYREG, l'agrégation des quantiles de débits à l'exutoire de bassins versants se fait par l'intermédiaire d'une fonction mathématique appelée FTS (fonction de transfert statistique). Cette fonction poursuit deux objectifs :

- Agréger les quantiles spécifiques sur les bassins tout en corrigeant les éventuels écarts entre le nombre de pixels qui compose un bassin dans SHYREG et la surface réelle du bassin.
- Prendre en compte les deux types d'abattement grâce à un coefficient multiplicatif dépendant de la surface du bassin et de la durée caractéristique du débit.

L'agglomération des débits SHYREG repose sur plusieurs hypothèses (Fouchier, 2010 ; Aubert, 2012):

- La fonction d'abattement des quantiles de débit ne dépend que de la surface des bassins versants et de la durée caractéristique du débit.
- Pour toute durée caractéristique supérieure ou égale à 24h, la formulation de l'abattement est la même.
- Pour une durée infra-journalières d, on suppose une décroissance du ratio débit de pointe sur débit de durée d, et ce ratio est borné à 1 pour une surface infinie.
- On suppose que l'abattement ne varie pas avec la période de retour.

Ces postulats sont en partie supportés par l'observation sur des bassins issus de climats divers (Aubert, 2012).

$$abat_x = \frac{1 + \mathrm{b}_x}{1 + \mathrm{b}_x \, \mathrm{S}^{0.5\mathrm{K}_x\left(1-\frac{1}{S^{a_x}}\right)}} \quad (1)$$

Pour d ≥ 24h :

$$\mathrm{Q(d,T)} = \sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}} \frac{\mathrm{q_i(d,T)}}{\mathrm{n}} \mathrm{S} \times abat_j \quad (2)$$

Pour $\mathrm{d} < 24h$:

$$\mathrm{Q(d,T)} = \mathrm{Q(d = 24h,T)} + \left[\sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}} \frac{\mathrm{q_i(d,T)}}{\mathrm{n}} - \sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}} \frac{\mathrm{q_i(d = 24h,T)}}{\mathrm{n}}\right] \mathrm{S} \times abat_p \quad (3)$$

La FTS de SHYREG a été formulée par Fouchier (2010), puis modifiée par Aubert (2012) en s'inspirant de la loi d'abattement des pluies proposée par Neppel et coll. (2003). La formulation des coefficients d'abattement est fournie par l'équation (1), et la formulation complète de la FTS par les équations (2) et (3). Dans ces équations on note Q(d, T) le quantile de débit de durée caractéristique d et de période de retour T. $q_i(d,T)$ est le quantile spécifique pour le $i^{ème}$ pixel du bassin (qui en compte n). S est la surface du bassin. a, b et K sont des paramètres de la fonction d'abattement. Ces paramètres varient selon la localisation des bassins et la durée caractéristique considérée.

Tableau 2-2 : *Valeurs des coefficients de la FTS*

	d ≥ 24h	**d < 24h**
France continentale	a_j = 0,01 b_j = 0,5 K_j = 5	a_p = 0,25 b_p = 10 K_p = 0,9
Corse	a_j = 0,01 b_j = 0,5 K_j = 5	a_p = 0,25 b_p = 0,3 K_p = 0,9

Les valeurs de ces paramètres sont fournies dans le tableau 2-2. Ces valeurs ont été déterminées pour la France métropolitaine afin de permettre un compromis entre une première version de la FTS établie sur les petits bassins (Fouchier, 2010) et une version plus orientée vers les grands bassins (Aubert, 2012). L'évolution des coefficients d'abattement avec la surface des bassins de France continentale (c'est-à-dire hors Corse) est fournie figure 2-9. Les valeurs des coefficients de la FTS pour la Corse ont fait l'objet d'une étude séparée (Aubert, 2014).

L'application de la FTS permet de convertir une base de quantiles de débits ponctuels en quantiles de débits de bassins.

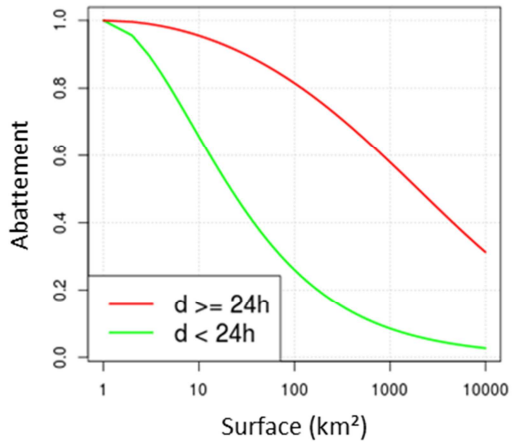


Figure 2-9 : *Évolution des coefficients d'abattement avec la surface en France*

2.3.4. Prise en compte du débit de base

L'approche SHYREG est basée sur une transformation événementielle de la pluie en débit. C'est-à-dire que chaque évènement de pluie est transformé en évènement de crue. Cette simplification extrême ne tient donc pas compte du débit s'écoulant déjà dans la rivière avant l'épisode pluvieux et des apports d'eau non dus à la pluie. De manière à relâcher cette hypothèse peu réaliste, un « débit de base » constant est ajouté aux débits simulés. Ce débit de base représente donc un écoulement moyen ne résultant pas de l'évènement de pluie considéré. Il est évalué à partir du modèle régionalisé LOIEAU (Aubert, 2012).

Le modèle LOIEAU est un modèle conceptuel qui simule des débits mensuels à partir de données de pluie, de neige, d'évapotranspiration et de température (Folton et Lavabre, 2006) (Folton et Lavabre, 2007 ; Folton et Arnaud, 2009). Il est alimenté à partir des données météorologiques spatialisées SAFRAN (Vidal et coll., 2010). Il est utilisé sur le territoire français pour l'évaluation de la ressource en eau et la caractérisation des étiages.

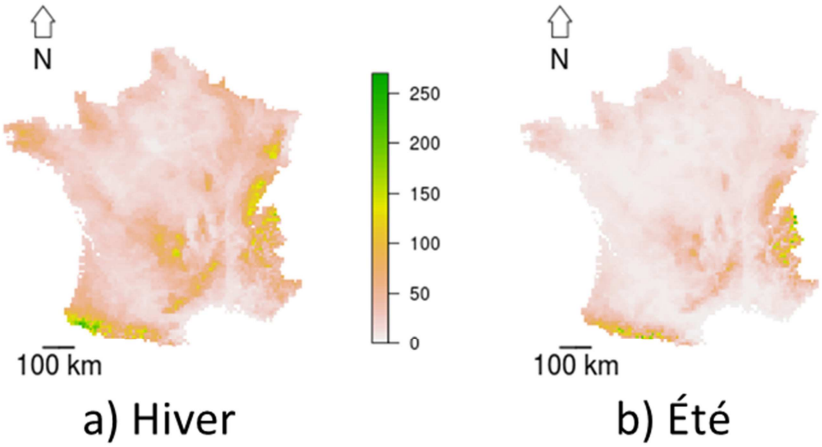


Figure 2-10 : *Écoulements moyens saisonniers (en mm) d'après le modèle LOIEAU*

L'estimation du débit de base SHYREG est réalisée à partir des écoulements mensuels LOIEAU moyennés sur chacune des deux saisons (Aubert, 2012). La cartographie de ces écoulements saisonniers est présentée figure 2-10. Dans l'ensemble, ces écoulements sont plus importants en hiver qu'en été à l'exception de certaines zones des Alpes et des Pyrénées où les écoulements sont alimentés par la fonte des neiges. De même, on observe des valeurs plus fortes sur les zones à forts reliefs comme les Alpes, les Pyrénées, le Massif Central, le Jura et les Vosges. La modélisation LOIEAU n'étant pas disponible sur la Corse, on fait l'hypothèse d'un débit de base nul (ou du moins négligeable par rapport aux débits de crues causés par les pluies). Cette hypothèse parait cohérente étant donné les très faibles débits de base obtenus sur le reste du pourtour méditerranéen.

Les valeurs des écoulements saisonniers LOIEAU sont moyennées sur les bassins versants, convertis en débits et ajoutés aux débits résultants de la pluie SHYREG.

2.3.5. Détermination du paramètre de calage

À ce stade on est capable, à condition de connaitre le paramètre S0/A, de simuler des quantiles de débits à l'exutoire d'un bassin versant à partir du générateur de pluie. Le paramètre S0/A est calé par méthode inverse, c'est-à-dire qu'il est choisi pour minimiser l'erreur entre les quantiles simulés par SHYREG et les mêmes valeurs estimées à partir d'observations de débits. Les débits observés par les stations hydrométriques correspondent bien sûr à des débits à l'exutoire de bassins versants. Il est donc nécessaire de procéder à l'ensemble de la modélisation hydrologique de SHYREG pour procéder au calage. Ces calculs peuvent se révéler très couteux en puissance de calcul. Pour éviter cet écueil, on procède par pré-simulation : on simule l'ensemble des débits spécifiques pour toute une gamme de valeurs de S0/A. Les quantiles de débits sont agglomérés aux exutoires des bassins de calage et le débit de base est ajouté. On dispose donc des quantiles de débits simulés pour toute une gamme de S0/A.

Les quantiles issus de l'observation (que l'on appelle parfois abusivement quantiles « observés ») ne sont pas directement mesurés, mais estimés par une méthode probabiliste directe à partir des chroniques de débits issus de stations de mesure. On a vu au chapitre 1, que les approches probabilistes directes appliquées localement étaient inefficaces pour estimer les quantiles de crues

de grande période de retour du fait de périodes d'observations trop courtes. L'originalité de SHYREG est de ne se caler que sur des quantiles de crues courantes, de période de retour inférieures à 10 ans, sur des séries de données d'au moins 10 ans.

La méthode SHYREG étant multi-durées, le modèle est calé en utilisant à la fois des débits journaliers et des débits de pointe. Les quantiles de périodes 2, 5 et 10 ans pour ces deux durées sont utilisés. Les valeurs dites « observées » de ces quantiles sont estimées en calant une loi de type GEV sur les débits observés échantillonnés par la méthode des maximums par bloc (sur les saisons SHYREG). On utilise des stations de mesure possédant au moins 10 années de mesures. On sait que le paramètre de forme de la GEV est particulièrement sensible à la présence éventuelle d'évènements extrêmes sur la période d'observation. On contraint donc ce paramètre de forme à prendre des valeurs comprises entre 0 et 0,4, ce qui semble être une gamme raisonnable pour les bassins français. Ce bornage du paramètre de forme permet d'éviter d'obtenir des modèles GEV clairement aberrants.

Un écart relatif entre les valeurs des quantiles simulés et « observés » est calculé, en pondérant les différents quantiles selon les poids présentés dans le tableau 2-3**.**

Ces écarts relatifs peuvent être calculés pour toutes les valeurs de S0/A. Pour les valeurs de S0/A intermédiaires aux valeurs de pré-simulations, des interpolations linéaires sont pratiquées pour estimer les débits correspondant. Il suffit alors de déterminer la valeur de S0/A conduisant au plus faible écart relatif. On détermine ainsi la valeur optimale de S0/A sur chacun des bassins jaugés. Notons, que les valeurs de S0/A sur certains pixels « spécifiques » sont a priori imposées. Ces pixels sont définis d'après une information de l'occupation du sol issue de la base *Corine Land Cover* (European Union SOeS, 2012). Ce traitement concerne les pixels à majorité urbaine, semi-urbaine ou les plans d'eau. À l'exception de ces pixels, on fait l'hypothèse que les valeurs de S0/A sont supposées homogènes sur chaque bassin versant, lors que la phase de calage.

Tableau 2-3 : *Poids relatifs sur les différents quantiles pour la calage de SHYREG*

	Débits de pointe	**Débits journaliers**
T = 2 ans	2	1
T = 5 ans	4	2
T = 10 ans	4	2

On peut donc déterminer une valeur de S0/A en chaque bassin jaugé sur lequel on dispose d'au moins 10 années d'observation des débits de pointe et journalier. Par la suite on notera $S0/A_{loc}$ les valeurs de S0/A issues de cette méthode de calage purement local.

2.3.6. Synthèse du calage

Un schéma synthétique des différentes étapes de la modélisation hydrologique SHYREG est proposé figure 2-11. Sur ce schéma, la méthode inverse employée pour caler le paramètre S0/A est mise en évidence par la ligne pointillée rouge.

La méthode SHYREG est par essence une approche distribuée : la génération de la pluie et sa transformation en débit se font en chaque pixel d'un maillage kilométrique. Néanmoins, le calage de

S0/A se réalise de manière globale sur chaque bassin versant. Ce principe repose sur une hypothèse très forte d'homogénéité du paramètre au sein des bassins (hormis les pixels « spécifiques » déterminés a priori selon l'occupation du sol). Cette hypothèse ne peut être vérifiée. Au contraire, lorsque l'on dispose de plusieurs bassins jaugés emboités les uns aux autres, on se rend compte qu'un même pixel appartenant à plusieurs bassins de calage peut se voir attribuer plusieurs valeurs de $S0/A_{loc}$. Dans le cas d'une hypothèse d'homogénéité de S0/A sur les bassins, le paramètre ne doit pas être vu comme une caractéristique de chaque pixel mais bien comme une valeur agglomérée à l'échelle du bassin. Ce principe pose des problèmes pour la régionalisation (voir paragraphe 2.3.7.1), et sera à nouveau abordé dans des chapitres ultérieurs (notamment au chapitre 4).

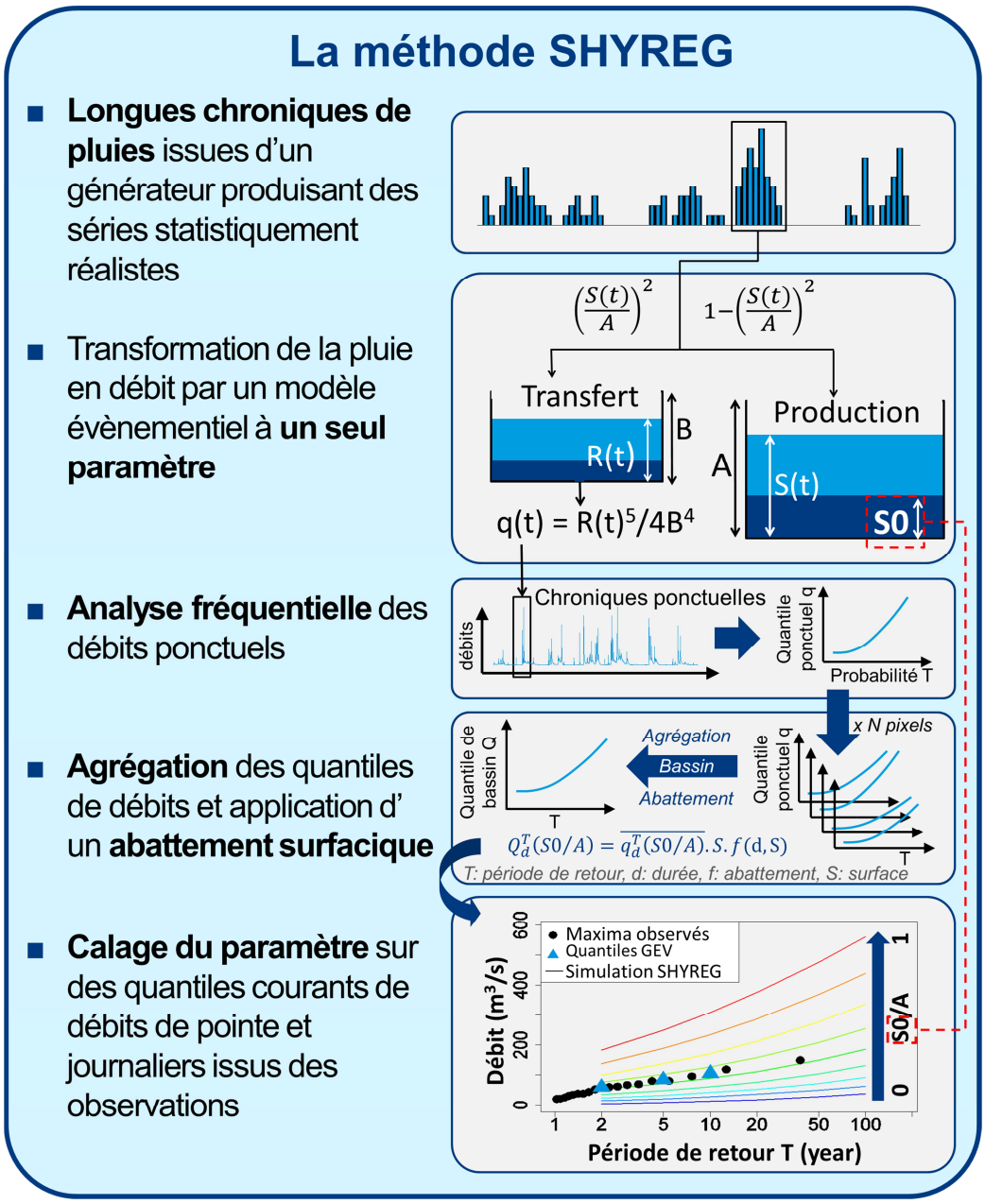


Figure 2-11 : *Synthèse schématique du calage de la méthode SHYREG*

2.3.7. Régionalisation

Le générateur de pluie de la méthode SHYREG est entièrement régionalisé. L'ensemble des paramètres nécessaires à la modélisation hydrologique sont connus sur l'ensemble du territoire à l'exception de S0/A. Par conséquent, la régionalisation de ce dernier paramètre permettrait d'estimer les quantiles de débits de crues en n'importe quel point du territoire français. La régionalisation de la version initiale de SHYREG (Organde et coll., 2013) a été faite suivant plusieurs étapes présentées dans les paragraphes suivants :

- Cartographie de S0/A optimal ;
- Établissement d'une fonction géographique par régression linéaire multiple reliant S0/A à des covariables connues sur l'ensemble du territoire ;
- Correction des valeurs estimées grâce à un facteur multiplicatif évalué par grande zone hydrogéologique ;
- Interpolation spatiale des erreurs de régression par méthode de l'inverse de la distance pondérée ;
- Lissage sur l'ensemble du territoire.

2.3.7.1. Cartographie de S0/A optimal

La réalisation d'une carte de paramètres possède plusieurs avantages. Tout d'abord, lorsque l'on souhaite appliquer une méthode à l'ensemble d'un vaste territoire, il est plus aisé de lire les paramètres sur une carte pour chaque bassin que de l'estimer bassin par bassin à partir d'une fonction géographique. En outre, dans le cadre de la méthode SHYREG, si l'on attribue une valeur unique de S0/A à chaque pixel, ce pixel produit alors les mêmes débits, quel que soit le bassin considéré. Si l'on considère deux bassins emboités successifs le long d'un cours d'eau alors les débits produits par leurs pixels communs seront les mêmes. De cette manière, on assure une évolution cohérente des débits le long des cours d'eau. On peut noter que de nombreuses méthodes de régionalisation proposées dans la littérature ne cherchent pas à cartographier des paramètres mais les évaluent bassin par bassin (voir par exemple les différentes méthodes comparées par (Parajka et coll., 2005) et (Oudin et coll., 2008)). Cette façon de faire ne permet pas de s'assurer d'une évolution cohérente des débits le long des rivières. Ces notions seront abordées plus en détails dans le chapitre 4. Pour ces deux raisons (praticité de la simulation et cohérence des débits), le choix a été fait de procéder par cartographie du paramètre S0/A optimal.

À l'issu du calage on dispose d'une valeur de S0/A optimale et homogène pour chacun des bassins de calage. Dans le cas de bassins de calage emboités, lorsqu'un pixel appartient à plusieurs bassins, il peut être associé à plusieurs valeurs du paramètre. Ce problème doit être traité dès lors que l'on souhaite effectuer une cartographie du paramètre. Cela nécessite donc de lever les ambiguïtés introduites par le calage homogène de S0/A pour les bassins emboités. Dans le cas de deux bassins emboités, la solution retenue actuellement, dénommée procédure « sup », consiste à attribuer la valeur de $S0/A_{loc}$ du petit bassin aux pixels du petit bassin, et les valeurs de $S0/A_{loc}$ du grand bassin aux autres pixels. On appelle $S0/A_{sup}$ les valeurs de S0/A issues de ce traitement. Au final, les valeurs de $S0/A_{loc}$ et $S0/A_{sup}$ moyennes sur le grand bassin diffèrent. La procédure « sup » introduit donc une erreur sur les valeurs du paramètre optimal cartographié, surtout sur les grands

bassins. Un exemple schématique de la procédure « sup » sur deux bassins emboités est proposé figure 2-12.

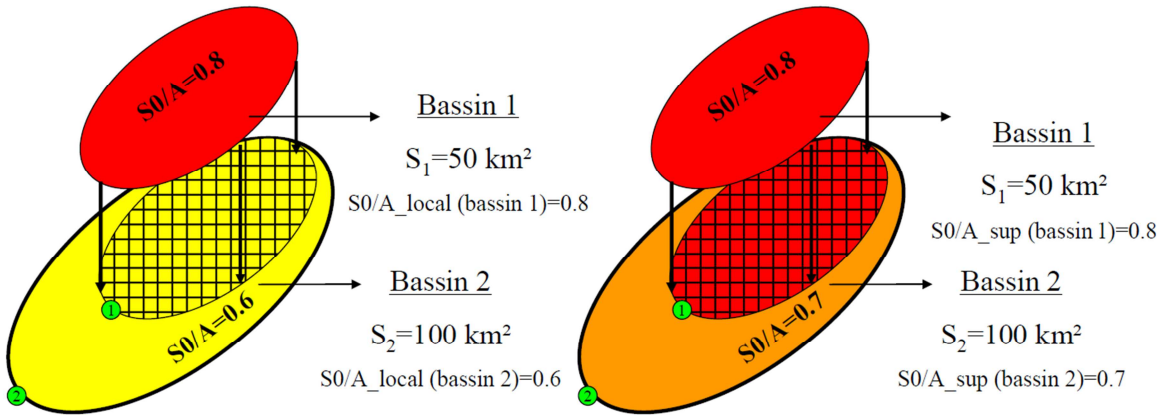


Figure 2-12 : *Principe de la procédure « sup »pour la cartographie de S0/A de bassins emboités (Aubert, 2012)*

2.3.7.2. Fonction géographique

L'objectif de la fonction géographique est de déterminer une relation explicative entre la variable d'intérêt (ici S0/A) et des variables descriptives connues sur tous les pixels du territoire. Une présentation des données disponibles sur le territoire français est faite au chapitre 6. Les variables explicatives employées dans la régionalisation initiale de la méthode SHYREG (Organde et coll., 2013) sont :

- Des variables pluviométriques ; ce sont les paramètres SHYREG-pluie journaliers régionalisés (Sol et Desouches, 2005) ;
- Des indices de bilan hydrique estimés en fonction du remplissage moyen du réservoir de production d'un modèle GR journalier (Perrin et coll., 2003) alimenté par les données SAFRAN (Vidal et coll., 2010) ;
- Des variables morphométriques : altitude et pente moyenne ;
- Un indice de drainage correspondant au pourcentage de pixel 100mx100m traversé par un cours d'eau, estimé à partir de la base Carthage (IGN et ONEMA, 2013) ;
- L'occupation du sol caractérisé par la base *Corine land Cover* (European Union SOeS, 2012).

Des régressions linéaires entre les valeurs de $S0/A_{sup}$ et trois de ces descripteurs moyennés sur les bassins versants sont établies. La meilleure régression, au sens du coefficient de détermination, est choisie. On notera également que les valeurs de S0/A estimées par régression pour la saison été sont utilisées dans la régression de la saison hiver.

La fonction géographique déterminée à l'échelle des bassins versants est alors appliquée à chacun des pixels du territoire français. On obtient alors une première cartographie de S0/A.

2.3.7.3. Correction par l'hydrogéologie

Une carte de zones hydrogéologiques (Margat, 1978) a été simplifiée pour proposer 18 classes (voir figure 2-13) pertinentes pour la régionalisation de modèles hydrologiques dont SHYREG

(Moulard, 2010). Sur chacune de ces 18 classes, un coefficient correcteur est estimé en comparant les valeurs de S0/A_{sup} et celles issues de la fonction géographique. Ces corrections sont appliquées à l'ensemble des pixels de chaque zone. On obtient une nouvelle cartographie corrigée du paramètre S0/A.

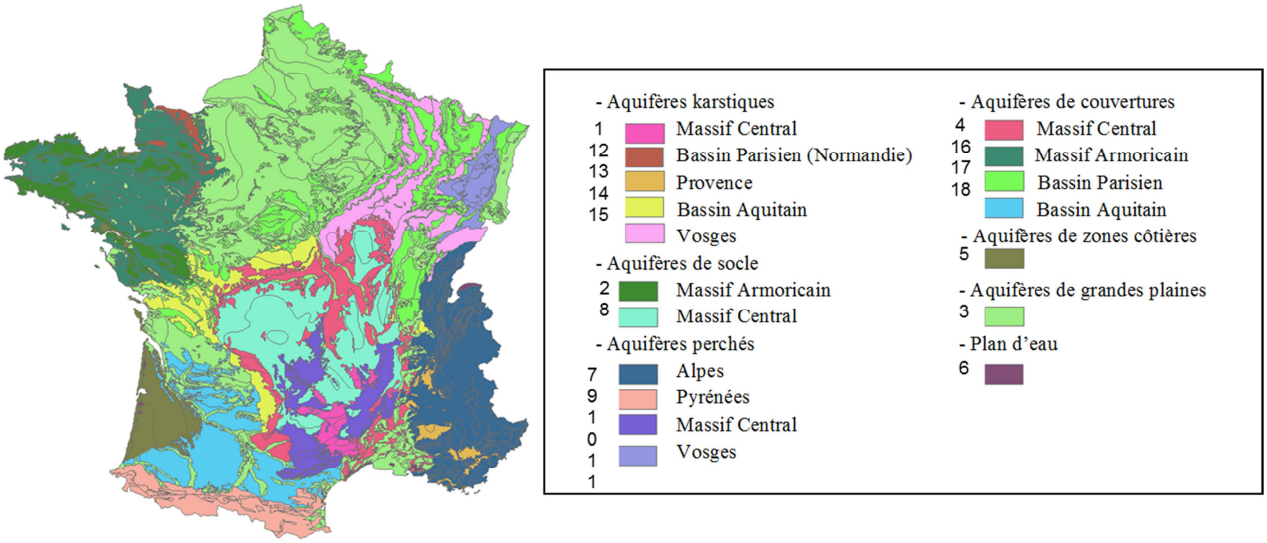


Figure 2-13 : *Classes hydrogéologiques (Aubert, 2012)*

2.3.7.4. Cartographie des résidus

Pour chaque bassin, les valeurs moyennes de la cartographie corrigée de S0/A sont extraites. L'erreur par rapport aux valeurs de S0/A_{sup} est calculée. Cette erreur est attribuée à l'exutoire de chaque bassin. Une cartographie des erreurs est réalisée par la méthode de l'inverse de la distance pondérée. On obtient alors une cartographie de l'erreur de régionalisation. La carte finale de S0/A régionalisé est estimée en sommant la carte corrigée et la carte des erreurs puis en procédant à un lissage.

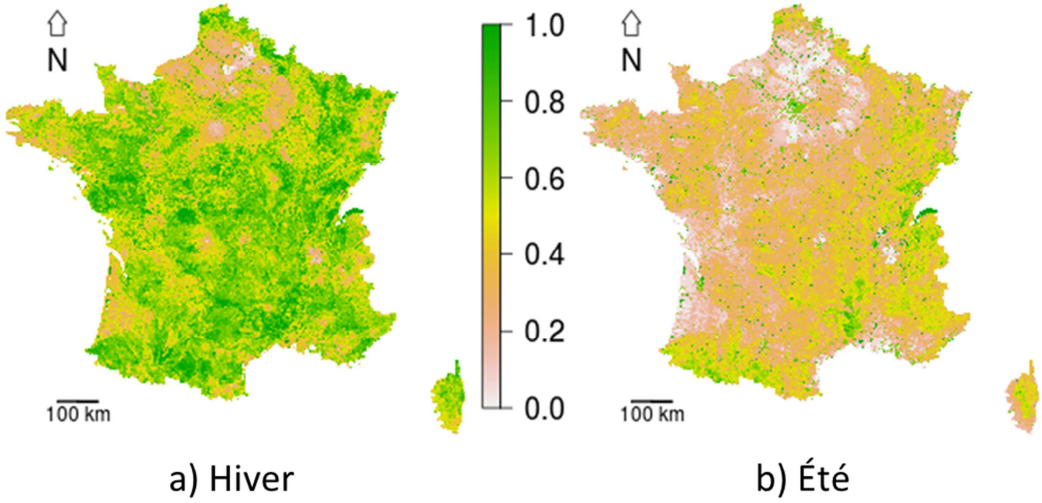


Figure 2-14 : *Cartes de S0/A régionalisé pour les saisons hiver et été*

2.3.7.1. Cartographie de S0/A et base nationale SHYREG

Les cartes finales pour les saisons hiver et été sont fournies figure 2-14. À partir de ces cartes, il est possible de procéder à la simulation des quantiles de crues SHYREG en n'importe quel point du réseau hydrographique français. Cela a été mis en œuvre sur l'ensemble des 140 000 exutoires de la BNBV pour aboutir à la création de la base nationale SHYREG débit[2].

[2] Accessible en ligne : https://shyreg.irstea.fr

2.4. Conclusion et critique

La mise en œuvre de la méthode SHYREG a nécessité la conception et la régionalisation de deux modèles combinés. Tout d'abord, un générateur stochastique d'évènements de pluie capable de générer de longues séries d'évènements réalistes a été développé en se basant sur une description de la pluie au pas de temps horaire. Ce générateur a ensuite été régionalisé en paramétrisant l'information horaire par une information journalière plus largement disponible. Cette régionalisation a nécessité la cartographie de trois paramètres (pour deux saisons). L'application du générateur de pluie en tout pixel d'un maillage de résolution kilométrique couvrant le territoire français a conduit à la création de la base nationale « SHYREG pluie » qui regroupe des quantiles de pluies pour plusieurs durées caractéristiques (de 1h à 72h) et plusieurs périodes de retour (de 2 à 1000 ans).

D'autre part, une modélisation hydrologique simple a été développée pour convertir ces évènements de pluies en évènements de crues qui permettent d'estimer des quantiles de crues sur des mailles de 1 km² qui s'assimilent à des débits spécifiques. Les quantiles de crues à l'exutoire des bassins versants sont obtenus par agrégation des quantiles de débits spécifiques moyennant un abattement spatial lié à la surface du bassin et la durée caractéristiques du débit. Le modèle hydrologique est calé à partir de quantiles courants (période de retour inférieures à 10 ans) extraits de chroniques de débits observés. Ce modèle ne dispose que d'un seul paramètre de calage dont la régionalisation permet d'aboutir à l'utilisation de la méthode sur l'ensemble du réseau hydrographique. On aboutit ainsi à la base nationale « SHYREG débit » qui rassemble, pour tous les exutoires de la BNBV des quantiles de crues pour les mêmes durées et mêmes périodes de retour que la base de pluie.

L'évaluation des diverses composantes de la méthode a entre autres été effectuée dans le cadre du projet ANR Extraflo (Lang et coll., 2013 ; Renard et coll., 2013) qui a conclu aux bonnes performances du générateur de pluie dans sa version locale et régionale (Carreau et coll., 2013 ; Lang et coll., 2013 ; Neppel et coll., 2014). Les performances de SHYREG pour l'évaluation des quantiles de crues en site jaugé ont également été reconnues (Aubert, 2012 ; Aubert et coll., 2014 ; Kochanek et coll., 2014 ; Arnaud et coll., 2016a), mais la version totalement régionalisée demeure insatisfaisante bien qu'équivalente ou supérieure aux autres méthodes comparées (Kochanek et coll., 2014).

La régionalisation de la partie modélisation hydrologique de SHYREG demeure donc perfectible. La méthode SHYREG a été conçue au cours de nombreuses études, en développant et validant successivement chacune des étapes : simulation de la pluie en site jaugé (Cernesson, 1993), régionalisation du générateur (Arnaud, 1997), modélisation des débits en site jaugés (Fouchier, 2010 ; Aubert, 2012), et finalement régionalisation du modèle pluie-débit (Aubert, 2012 ; Organde et coll., 2013). Ainsi, les hypothèses faites et les versions de modèles retenus l'ont été sans nécessairement tester leur impact sur les performances de la méthode totalement régionalisée. On se propose donc de revoir certaines hypothèses pour tenter d'aboutir à une méthode davantage « régionalisable » (chapitre 3). Ce travail sera également utile pour permettre l'évaluation des performances de la méthode en sites jaugés.

En outre, plusieurs hypothèses dans la méthode de régionalisation décrite dans le paragraphe 2.3.7 sont à revoir. Par exemple, l'hypothèse d'homogénéité du paramètre S0/A sur les bassins versants montre des limites dès lors que l'on considère des bassins emboités. La méthode de gestion de ces bassins emboités doit donc également être revue. De plus, lors des différentes étapes de régionalisation, on utilise une information globale, à l'échelle des bassins versants, pour optimiser la régionalisation : fonction géographique, coefficient correcteur, valeurs de résidus. Ces informations sont ensuite directement transférées aux pixels sans contrôler l'impact de ce changement d'échelle. Le chapitre 4 se focalisera sur la comparaison de méthodes de calage permettant de lever ces difficultés en relâchant l'hypothèse d'homogénéité du paramètre S0/A sur les bassins versants. Enfin, diverses approches de régionalisation seront présentées et testées dans la partie II pour tenter d'améliorer les performances de SHYREG pour la simulation des débits de crues extrêmes en sites non jaugés.

« With a large enough sample,
any outrageous things is likely to happen. »
Law of truly large numbers (Everitt et Skrondal, 2010, p244)

Chapitre 3 : Application de SHYREG en sites jaugés

3.1. Introduction 69
3.2. Données hydrologiques 70
3.2.1. Constitution de l'échantillon de bassins versants 70
3.2.2. Caractérisation du jeu de bassins 72
3.2.3. Échantillon de travail 74
3.3. Cadre de comparaison 76
3.3.1. Restitution des quantiles de calage 76
3.3.1. Rapports des débits de différentes durées caractéristiques 78
3.3.2. Extrapolation vers les extrêmes 78
3.3.3. Stabilité par rapport à l'échantillonnage 80
3.3.4. « Régionalisabilité » 81
3.3.5. Récapitulatif 82
3.4. Comparaison de différentes versions de SHYREG 83
3.4.1. Degrés de libertés utilisés 83
3.4.2. Comparaison des différentes versions 84
3.5. Performances de la version choisie 93
3.6. Conclusion 97

Résumé du chapitre

Dans ce chapitre on cherche à évaluer les performances de la méthode SHYREG dans l'estimation des quantiles de crues, lorsque l'on dispose de données de débits pour caler le modèle pluie-débit.

Dans un premier temps, on présente l'échantillon de bassins versants utilisé. Il compte 1935 postes de mesure du débit, dont 400 sont écartés pour permettre une validation finale du modèle. Les principales caractéristiques de ces bassins versants permettent de montrer que l'échantillon est bien représentatif des bassins versants français.

Une seconde partie permet de présenter les différents critères d'évaluation utilisés pour juger les performances de la méthode SHYREG. Ces critères permettent de tester la qualité du calage du modèle, sa capacité d'extrapolation, sa stabilité et son aptitude à être régionalisé. De manière à illustrer l'utilisation de ces critères, on propose une comparaison entre différentes versions de SHYREG en faisant varier la capacité du réservoir de transfert et les poids attribués aux différents quantiles de débits qui servent à calculer la fonction objectif de calage. Finalement, on retient une version qui assure un compromis entre les différents critères. Dans cette version, la taille du réservoir de transfert reste fixée par saison, les poids de calage sont identiques pour les débits de pointe et journaliers mais décroissent avec la période de retour.

En définitive, les performances de la version choisie de SHYREG sont étudiées de manière plus détaillées, en les différenciant selon la longueur des chroniques de données mais aussi selon les codes de confiances SHYREG qui traduisent les limites d'utilisation de la méthode. Des différences de qualité d'estimation des quantiles apparaissent entre les différents sous-échantillons. Néanmoins, les performances restent suffisamment élevées pour valider l'utilisation de stations de mesure peu profondes ou en limite de méthode.

3.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'évaluer les performances de la méthode SHYREG en sites jaugés. On se place donc, ici, uniquement dans une configuration où l'on dispose de données de débits sur les bassins versants d'étude et on s'autorise à les utiliser pour le calage du modèle. Ce chapitre est organisé en trois parties.

Dans un premier temps, on introduira les bassins versants jaugés utilisés. On s'intéressera au processus de sélection qui a conduit à retenir près de 2 000 bassins versants français. On cherchera également à mettre en avant diverses caractéristiques de ce jeu de bassins de manière à montrer qu'il représente bien toute la diversité du paysage hydrologique de France métropolitaine. Ce même jeu de bassins est également utilisé dans les chapitres suivants.

La seconde partie permet de présenter le cadre d'évaluation de la méthode. On va chercher à évaluer dans quelle mesure la méthode SHYREG permet de reproduire les données utilisées pour le calage, et également quelles sont les capacités d'extrapolation de la méthode vers les extrêmes. En outre, bien que ce chapitre se limite au cas de bassins jaugés, on va également évaluer la capacité du paramètre calé à être régionalisé.

Enfin, la dernière partie a pour but de tester certaines hypothèses faites sur le paramétrage du modèle. En effet, on a vu dans le chapitre précédent que le modèle hydrologique de SHYREG ne possède qu'un seul paramètre de calage, les autres paramètres ont été imposés dans des études précédentes de manière à optimiser certaines caractéristiques de la méthode (capacité d'extrapolation, sensibilité…). On va donc revoir certaines hypothèses de manière à tester leur validité dans le cadre de la préparation de la régionalisation de la méthode.

Le travail présenté dans ce chapitre ne constitue pas une innovation en lui-même. Toutes les étapes mises en œuvre l'ont déjà été dans des études passées. Néanmoins, chacune de ces études visait à remplir un objectif et ne considérait pas nécessairement les performances du modèle final. L'originalité du travail présenté ici est donc d'avoir une vision globale sur l'ensemble de la chaine de calcul de SHYREG et de se focaliser sur l'objectif final de la méthode : la prédétermination des débits de crues en sites non jaugés. Ce chapitre constitue une première étape dans le travail puisqu'il cherche à identifier la meilleure version de la méthode qui sera utilisée par la suite.

D'un point de vue plus concret, ce chapitre permet :

Partie XV : L'introduction d'un nouveau jeu de bassins versants jaugés, et donc de nouvelles données par rapport aux études précédentes ;
Partie XVI : La présentation d'un cadre d'évaluation multicritère ;
Partie XVII : La sélection d'une version de la méthode qui apparait comme la plus apte à être régionalisée.

3.2. Données hydrologiques

3.2.1. Constitution de l'échantillon de bassins versants

Comme détaillé dans le chapitre 2, le calage de la méthode SHYREG cherche à minimiser l'erreur entre les quantiles de crues simulés par la méthode, et ceux évalués en chacun des sites jaugés en calant une loi de type GEV (dont le paramètre de forme est borné) sur les données observées. Ce calage ne considère que des quantiles « courants » dont la période de retour est inférieure à dix ans. En outre, le calage considère à la fois des débits de pointe et des débits journaliers. Les bassins jaugés sélectionnés doivent donc permettre l'estimation de ces quantiles par une méthode statistique. Dans le cadre de la méthode SHYREG, on utilise généralement des bassins possédant au minimum dix années d'observation à la fois pour les débits de pointe et les débits journaliers sur chacune des deux saisons considérées.

En France, les données hydrométriques sont centralisées au sein de la banque HYDRO (Ministère de l'Écologie du Développement Durable et de l'Energie, 2017). Les débits échantillonnés par maximum par blocs sur les deux saisons utilisées dans SHYREG sont extraits de cette base. Ce sont ces valeurs qui sont utilisées. Les débits extraits couvrent une période s'étendant jusqu'en 2013 inclus, l'année 2014 n'était pas encore achevée au moment de l'initiation de ce travail. Les débits maximaux sont extraits pour les saisons hiver (de décembre à mai) et été (de mai à novembre) de SHYREG. On obtient un jeu de 3221 stations de mesures métropolitaines qui présentent des données à la fois pour les débits de pointe et les débits journaliers, néanmoins toutes ne sont pas utilisables.

La sélection des stations s'effectue en deux phases. La première est une phase automatique, c'est-à-dire que l'on fixe un certain nombre de critères, le non-respect de l'un au moins des critères entraine une élimination directe du bassin. Ces critères automatiques sont :

1. Une localisation correcte de la station de mesure ;
2. L'existence réelle de la station (la base comporte quelques stations fictives à des fins de formation des utilisateurs ou pour reconstituer certaines chroniques) ;
3. La station est unique : dans certains cas le remplacement de la station entraine la création d'une deuxième entrée dans la base. Dans le cas de stations doublons, on garde celle avec la plus longue chronique ;
4. La connaissance du contour du bassin versant ;
5. La connaissance de la surface théorique du bassin et sa cohérence avec le contour associé ;
6. Une surface comprise entre 1 et 10 000 km² (limites d'application de SHYREG) ;
7. Une profondeur de station supérieure ou égale à 10 ans pour chacune des saisons pour les débits de pointe et journaliers. Les années de mesure en pointe et en journalier doivent être les mêmes.
8. La présence d'au moins 50% de la surface du bassin versant sur le territoire français (le générateur de pluie SHYREG n'étant pas calé hors des frontières). Pour calculer ce critère on

doit disposer de l'étendue spatiale du bassin versant (critère 4), par conséquent, si le critère 4 n'est pas vérifié, le critère 8 ne l'est pas non plus.

Le nombre de stations écartées pour chacun de ces critères automatiques est fourni dans le tableau 3-1.

Tableau 3-1 : *Nombre de bassins sélectionnés selon les critères automatiques ou manuels*

Critère	Nombre de bassin acceptés	Nombre de bassins rejetés
Coordonnées	3217	4
Station non fictive	3212	9
Station non remplacée	2634	587
Contour de bassin disponible	2704	517
Surface connue et fiable	2527	694
Surface < 10 000 km²	3086	135
Surface > 1 km²	3142	79
Plus de 10 années d'observations	2377	844
Bassin majoritairement en métropole	2688	533 (dont 517 à cause de l'absence de contour)
Vérification manuelle	Pas tous considérés	111
Total	**1935**	**1286**

La seconde phase est une sélection manuelle. On extrait ou on calcule différents indices de qualité. Le dépassement de valeurs seuils de ces indices entraine un contrôle manuel des données et des autres indices. La décision d'éliminer ou non la station de mesure est prise au cas par cas. Dans certains cas, on a aussi pris la décision de supprimer certaines années de mesures. Les critères manuels utilisés sont :

Partie XVIII : La saisonnalité des écoulements selon les coefficients de Pardé (Pardé, 1933). On contrôle l'allure des graphes de Pardé par rapport aux régimes types établis en France par Sauquet (2006a), ainsi que la répartition dans l'espace de ces différents régimes.

Partie XIX : La qualité de l'ajustement d'une loi GEV dont le paramètre de forme est borné, évaluée grâce à la p-value du test de Kolmogorov-Smirnov (Smirnov, 1948 ; Massey Jr, 1951).

Partie XX : La valeur du paramètre de forme d'une loi GEV (non bornée) ajustée sur les données.

Partie XXI : Les codes qualité associés à la station dans la banque HYDRO (qualité générale de la station et influence en hautes eaux)

Partie XXII : Un indice de cohérence spatiale : l'écart relatif entre, d'une part, le ratio du débit de pointe décennal issu de l'ajustement d'une loi GEV bornée et celui obtenu avec la méthode CRUPEDIX, et d'autre part, la moyenne de ce même ratio sur les quatre plus proches voisins. L'idée n'est pas de qualifier les différences entre débits GEV et débits CRUPEDIX mais d'utiliser la méthode régionale CRUPEDIX pour adimensionner les débits avec une tendance régionale pour détecter les fortes disparités entre bassins voisins.

Lorsque ces critères atteignent certains seuils (dans tous les cas les bassins caractérisés par les valeurs les plus extrêmes sont investigués), les différentes informations dont on dispose sont analysées : valeurs des maximums par bloc, chronique de débits, commentaires des gestionnaires, codes de confiance SHYREG (qui traduisent les limites d'utilisation de la méthode sur les différents bassins (Caruso et coll., 2013))… Finalement, un choix expertisé est fait pour éliminer ou non la

station. Comme le montre le tableau 3-1, 111 stations sont éliminées suite à ce tri manuel. L'échantillon final comporte alors 1935 stations de mesures.

On peut aisément critiquer la constitution de cet échantillon. En effet, le nombre de stations rend quasiment impossible la vérification manuelle de toutes les données. Néanmoins, le choix est fait de ne pas durcir d'avantage le processus de sélection des postes de mesure. Ce choix peut se justifier par la nécessité de disposer d'un maximum de points de mesure possible pour pouvoir caler le modèle sur plus de sites de manière à disposer d'un échantillon à la fois divers et couvrant un large territoire pour pouvoir procéder à la régionalisation. On suppose également qu'une information, même douteuse, peut être préférable à une absence d'information.

3.2.2. Caractérisation du jeu de bassins

On cherche ici à caractériser les différents bassins de l'échantillon. Les informations présentées ici sont utiles pour illustrer la diversité des comportements hydrologiques et des paysages de France métropolitaine.

Dans un premier temps, on s'intéresse aux caractéristiques hydrologiques des bassins versants. On choisit comme valeur représentative la médiane des débits maximaux (c'est-à-dire la médiane des crues échantillonnées par maximum par bloc sur chacun des bassins), et on représente cette valeur en fonction de la surface du bassin versant pour les deux saisons et les deux durées caractéristiques dont on dispose. Ces graphes sont fournis sur la figure 3-1 et permettent d'apprécier à la fois la distribution des crues maximales médianes et celle des surfaces de bassins dans l'échantillon. On peut voir que la majorité des bassins sélectionnés possèdent une surface de drainage intermédiaire entre 10 et 1000 km². Au contraire, on dispose de peu de petits bassins (moins de 10 km²) dans notre échantillon alors que les bassins de 5 à 10 km² représentent 41% des entrées de la base nationale des bassins versants. Ces chiffres montrent un biais dans la manière dont les bassins sont instrumentés et illustrent l'intérêt de la prédétermination en sites non jaugés notamment pour les petits bassins. Les petits bassins sont aussi ceux présentant la plus forte variabilité dans les valeurs du débit maximum médian. De même, la saison « été » est caractérisée par une plus grande variabilité des débits de crue. Cette variabilité est également plus forte sur les débits de pointe que sur les débits journaliers.

En outre, d'après la figure 3-1, quelle que soit la saison ou la durée caractéristique considérée, on peut voir que la surface des bassins permet d'expliquer une partie de la variabilité des crues puisqu'une relation log-linéaire entre les deux variables apparait nettement. Néanmoins, la surface n'explique pas tout : pour une surface donnée, les valeurs de débits peuvent varier d'un facteur 100 d'un bassin à un autre.

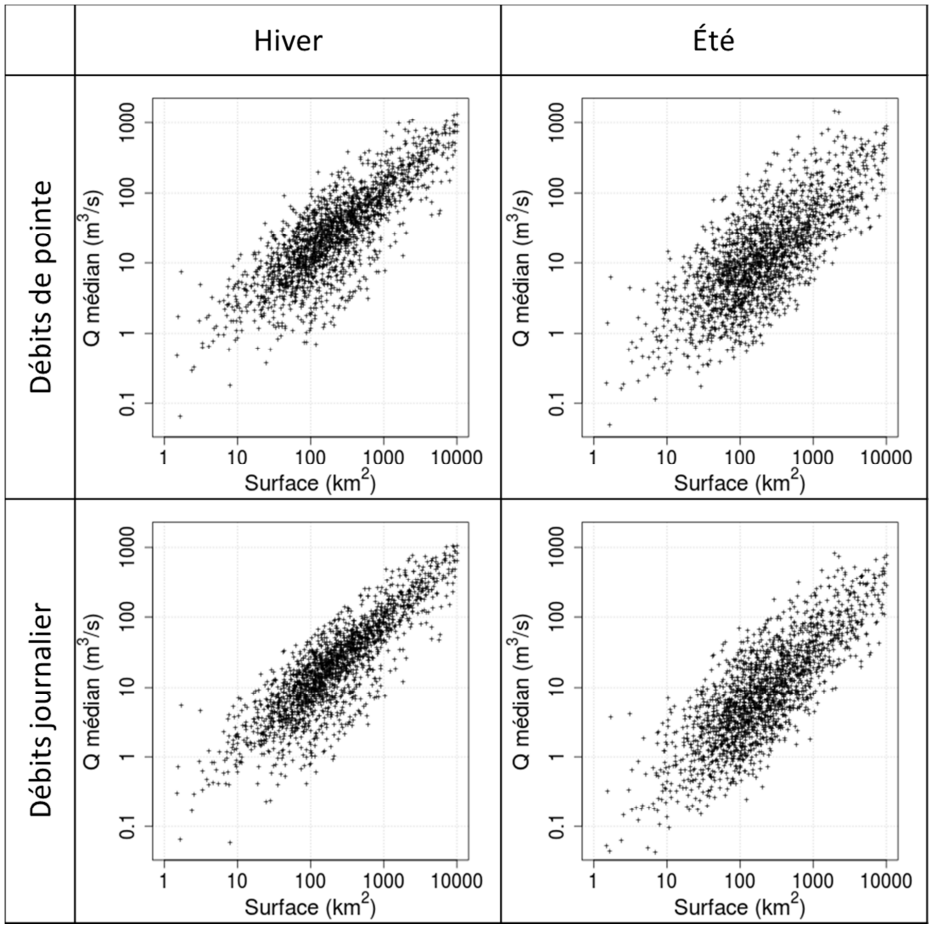


Figure 3-1 : *Débits maximums médians par rapport à la surface des bassins*

La figure 3-2 fournit les distributions de certaines caractéristiques des bassins versants jaugés qui constituent l'échantillon. Le graphique a) montre la distribution du nombre d'année de mesure par station : on peut voir que la plupart des stations comportent entre 10 et 50 années d'observations avec une médiane à 33 ans et un maximum de 120 ans. Le graphique b) renseigne sur les cumuls annuels de précipitations liquides et solides ainsi que sur le cumul de l'évapotranspiration moyenne sur les bassins de l'échantillon. On peut noter que la plupart des bassins sont faiblement influencés par la neige : plus de 75% d'entre eux sont caractérisés par un cumul annuel moyen inférieur à 100 mm. Les bassins à régimes hydrologiques influencés par la neige sont également ceux situés en zone montagneuses, et sont également caractérisés par une altitude moyenne forte (la répartition de l'altitude moyenne est fournie sur le graphique c). Enfin, le graphique d) fournit la distribution de la couverture des bassins par quatre principales classes d'occupation du sol. On peut voir que les bassins sont principalement occupés par trois classes que sont les prairies ou zones à végétation basse, les forêts et surtout les zones agricoles (cultures cycliques). Les zones urbaines ne sont présentes que sur un faible nombre de bassins. On compte seulement 10% des bassins avec plus de 10% de leur surface en zone urbaine.

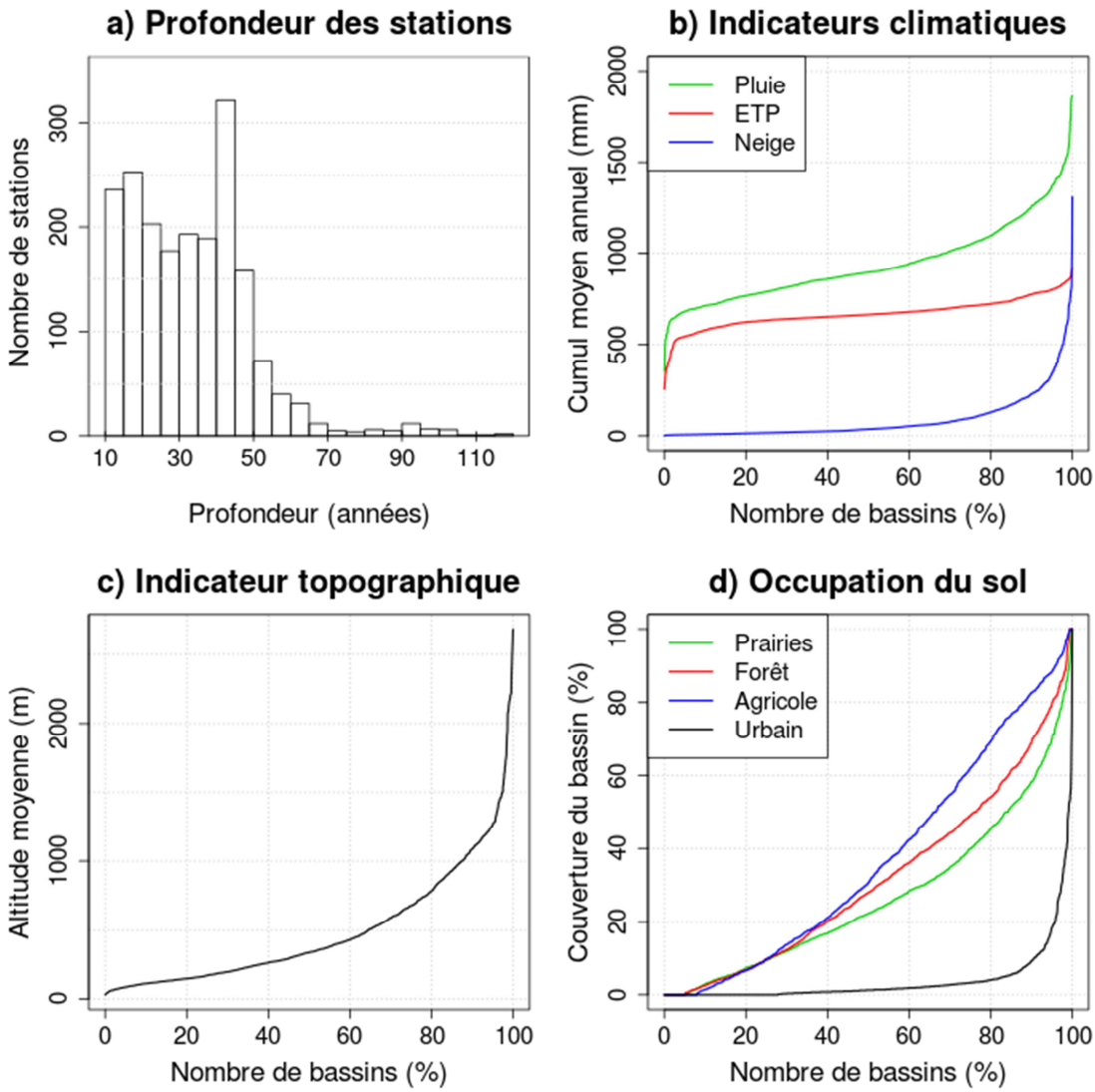


Figure 3-2 : *Caractéristiques des bassins versants sélectionnés.*
a) *Distribution de la profondeur des stations ; b) distribution d'indicateurs climatiques ; c) distribution de l'altitude moyenne ; d) distribution de grandes classes d'occupation du sol.*

3.2.3. Échantillon de travail

Tout au long du développement de la méthode SHYREG, et notamment en ce qui concerne la régionalisation, on procède par calage et validation. C'est-à-dire que l'échantillon est divisé en plusieurs sous-groupes dont les données peuvent être utilisées pour caler le modèle, ou uniquement pour le tester dans une configuration qui s'assimile à du non jaugé. Ces opérations sont répétées plusieurs fois, et au final l'information des bassins de validation est utilisée pour prendre des décisions sur le modèle. Par conséquent, l'information de validation est utilisée à plusieurs reprises pour comparer différentes versions de modèle. La réutilisation de cette information pour procéder à une validation finale est donc critiquable. Pour s'assurer d'une véritable validation de SHYREG on sépare notre échantillon de bassins en deux parties :

Partie XXIII : un jeu de 1535 bassins jaugés, appelé échantillon de travail, sera utilisé au cours des différentes étapes de développement et de test de la méthode ;

Partie XXIV : les 400 stations restantes, que l'on regroupe sous l'appellation « échantillon de validation finale », ne sont jamais utilisées pour le développement de la méthode. On utilisera les données issues de ces bassins uniquement pour procéder à une ultime validation dans le dernier chapitre.

Les 400 bassins de l'échantillon de validation finale sont tirés au sort parmi les 50% de stations qui ont les chroniques les plus courtes. Ce choix se justifie de manière à conserver les chroniques les plus longues et les plus riches d'informations pour caler la méthode au mieux. En outre, on espère ainsi sélectionner davantage de « nouvelles » stations qui n'avaient pas été utilisées dans les précédentes études faute d'une profondeur suffisante. Les échantillons de travail et de validation finale sont localisés sur la figure 3-3.

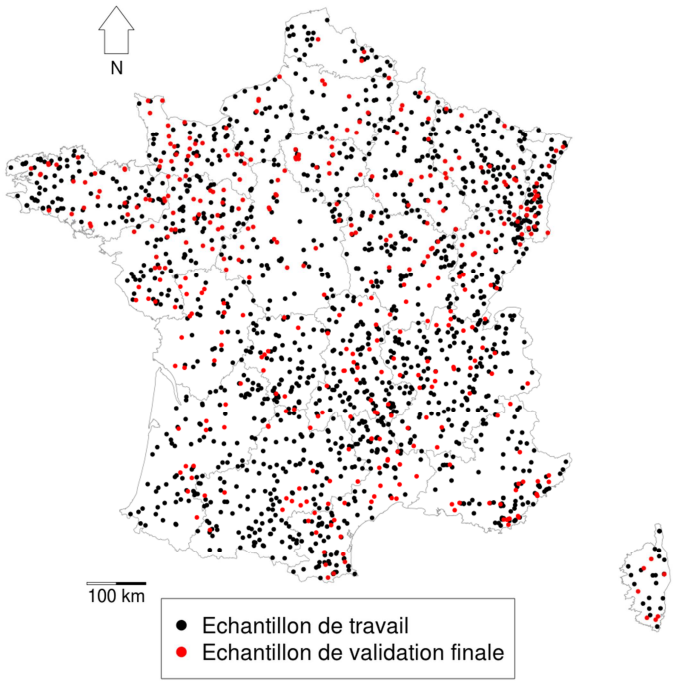


Figure 3-3 : *Localisations des stations de l'échantillon de travail et de l'échantillon de validation finale*

3.3. Cadre de comparaison

Dans cette partie on présente les différents critères utilisés pour l'évaluation du modèle.

3.3.1. Restitution des quantiles de calage

L'efficacité de Nash-Sutcliffe (Nash et Sutcliffe, 1970) ou critère de Nash (notée NSE) est un critère couramment utilisé pour évaluer la performance des modèles hydrologiques. Il permet de comparer une série observée à la même série simulée par un modèle. Le mode de calcul de ce critère est rappelé par l'équation (4). Dans cette équation, Q_i renvoie à la i^{ème} valeur de débit d'une série de n valeur et les exposants *obs* et *sim* représentent respectivement les valeurs observées et simulées. Une valeur de 1 indique que le modèle reproduit parfaitement les observations. Une valeur nulle indique que le modèle est aussi juste que la moyenne des valeurs observées alors qu'une valeur négative indique un modèle qui introduit plus d'erreur que si l'on représentait toute la série par la valeur moyenne des observations.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left[Q_i^{obs} - Q_i^{sim}\right]^2}{\sum_{i=1}^{n}\left[Q_i^{obs} - \overline{Q^{obs}}\right]^2} \quad (4)$$

La série de valeurs peut varier selon les applications. L'efficacité de Nash-Sutcliffe est souvent utilisée pour évaluer des modèles continus, dans ce cas on l'applique sur la série temporelle des débits observés et simulés. Dans le cas de l'évaluation de SHYREG on sera amené à l'utiliser de deux façons différentes :

- Une série spatiale : dans ce cas on modélise une valeur unique en différents sites et on la compare aux valeurs mesurées sur ces mêmes sites. On parle alors parfois de critère de Nash spatial ou de critère R^2 (Blöschl et coll., 2013) ou encore d'indice d'erreur spatial (Garcia et coll., 2017). Ce type de critère peut se calculer sur un quantile de débit ou sur une valeur de paramètre. On obtient alors une valeur de critère pour chaque variable simulée.
- Une série de quantiles : dans ce cas on se place en un site particulier et on compare des jeux de quantiles estimés par différentes méthodes. Les jeux de quantiles sont formés par plusieurs périodes de retour ou durées caractéristiques. On obtient une valeur de critère pour chaque site d'étude. Dans ce cas, on peut être tenté de calculer la moyenne du critère de manière à synthétiser les valeurs de l'ensemble de l'échantillon. Néanmoins, le critère de Nash ayant une borne supérieure mais pas de borne inférieure, une valeur moyenne peut être très fortement influencée par la présence d'une valeur très négative. Dans ce cas, on peut préférer l'utilisation d'une version bornée du critère que l'on appelle C2M (Mathevet et coll., 2006), également dénommé NSE* en anglais dont le calcul est rappelé par l'équation (5).

$$C2M = \frac{NSE}{2 - NSE} \quad (5)$$

Dans le cas de l'évaluation du calage de la méthode SHYREG, on cherche à déterminer si le modèle reproduit les six quantiles de débits sur lesquels le paramètre est calé (les débits de pointe et journaliers de périodes de retour 2, 5 et 10 ans). On peut donc calculer un critère de Nash spatial (R^2) pour chacune de ces six valeurs. Dans ce cas, pour limiter les effets de taille de bassins versants, on préfère utiliser les quantiles de débits spécifiques qui sont les débits rapportés à la surface.

Une seconde possibilité est de synthétiser l'information sur chaque bassin en calculant un critère C2M sur ces six quantiles pour caractériser l'écart entre les quantiles dits « observés » et ceux simulés par SHYREG. On notera ce critère ERQ (efficacité de restitution des quantiles). On peut s'intéresser à la distribution de ce critère sur l'ensemble de l'échantillon de travail ou de manière plus synthétique à sa valeur moyenne $\overline{\mathrm{ERQ}}$. Ce critère est exigeant et bien plus sensible que ne le sont chacun des critères C2M. À titre d'exemple, on trace l'évolution de $\overline{\mathrm{ERQ}}$ conjointement avec les C2M calculés pour chacun des six quantiles lorsque l'on ajoute une erreur sur le paramètre de SHYREG. Ces courbes sont représentées sur la figure 3-4. Sur cette figure, on voit que le critère $\overline{\mathrm{ERQ}}$ (en noir) décroit bien plus vite que les critères C2M calculés sur chacun des quantiles (en couleurs). On peut aussi noter qu'une valeur nulle de $\overline{\mathrm{ERQ}}$ ne correspond pas à un critère C2M de 0. On voit ici que le critère $\overline{\mathrm{ERQ}}$ s'annule pour des valeurs de C2M autour de 0,8. Cet exemple est seulement un cas fictif ou numérique servant uniquement à illustrer l'intérêt du critère $\overline{\mathrm{ERQ}}$, plus exigeant que les autres critères. Notons que l'on emploie ici des C2Mxxx pour chacun des quantiles par mesure d'homogénéité sur la figure. Cependant, on aurait pu employer un critère de Nash spatial non borné puisque l'on ne cherche pas à calculer des statistiques sur les critères.

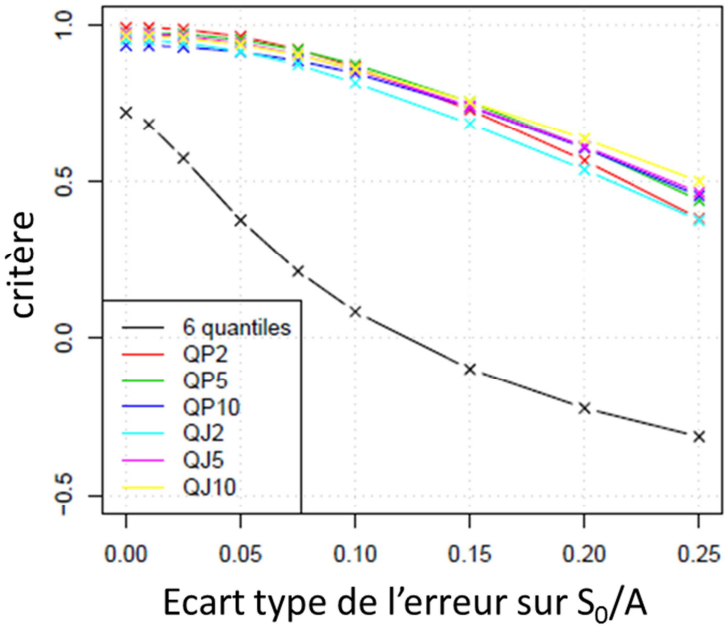


Figure 3-4 : *Evolution des critères sur les débits de calage avec l'introduction d'une erreur sur le paramètre de S0/A*

3.3.1. Rapports des débits de différentes durées caractéristiques

La méthode SHYREG permet de simuler des quantiles de différentes durées caractéristiques. On doit donc s'intéresser au rapport entre ces différentes valeurs. Pour cela, on s'intéressera au rapport entre les quantiles de débits de pointe et journaliers que l'on note rapport QP/QJ. Dans la réalité, ce rapport possède une borne inférieure à 1, mais un modèle pourrait potentiellement conduire à des valeurs plus faibles, ce qui serait physiquement incohérent. Pour évaluer la manière dont ce rapport est restitué par le modèle, on calcule une efficacité de Nash-Sutcliffe sur les rapports des quantiles de pointe et journaliers pour des périodes de retour allant jusqu'à 10 ans. Le critère est calculé en comparant les valeurs simulées par le modèle, et les valeurs utilisées pour le calage de SHYREG, à savoir celles issues de l'ajustement d'une loi GEV dont le paramètre de forme est borné sur les données de débits locales. On considère ces quantiles issues d'une loi statistiques comme fiables pour de faibles périodes de retour, mais on ne calcule pas le critère au-delà des quantiles décennaux. On cherche ici à évaluer la restitution par des rapport QP/QJ par rapports aux valeurs observées sur les données.

On notera ce critère RPJ (rapport pointe-journalier).

3.3.2. Extrapolation vers les extrêmes

Pour évaluer la pertinence d'un modèle de prédétermination des crues, prouver qu'il reproduit correctement des valeurs de quantiles estimés à partir d'une loi GEV n'est pas pertinent. En effet, dans de nombreux cas, la loi GEV n'est elle-même pas pertinente pour évaluer les quantiles de grande période de retour. De manière à évaluer la justesse d'un modèle pour des quantiles de forte période de retour, on adopte le score FF présenté par Renard et coll. (2013). Pour calculer ce score on s'intéresse à la probabilité, notée p_{max}, associée par le modèle à la plus forte valeur de débit observée en un site. Sous hypothèse de justesse (c'est-à-dire si la courbe de fréquence proposée par le modèle décrit bien l'occurrence des crues au site d'étude), Renard et coll. (2013) démontre que cette probabilité est une variable aléatoire qui suit une loi de Kumaraswamy de paramètre (0, n) où n est le nombre d'années d'observation disponible pour le site considéré. On peut également montrer que cette probabilité élevée à la puissance n, que l'on note FF, est une variable aléatoire qui suit une loi uniforme entre 0 et 1 sous hypothèse de justesse. Comme on dispose d'un grand nombre de sites d'études, on peut apprécier la façon dont la distribution empirique de p_{max} s'écarte de la loi uniforme.

En fait, ce critère permet d'évaluer, de manière globale sur l'ensemble de l'échantillon de bassins, si le modèle a tendance à fournir à des probabilité d'occurrence trop faibles ou trop fortes au plus fort débit observé par rapport au nombre d'années d'observation. Par exemple, imaginons une situation où l'on disposerait de 100 stations ayant chacune 10 années d'observations. La probabilité d'observer un évènement millénal sur une période d'observation de 10 ans est d'environ 0.01. La probabilité d'en observer sur plusieurs sites est donc encore plus faible. Un modèle qui associe tous les records observés à une période de retour de 1000 ans sous-estime très probablement le quantile millénal. La distribution de FF permet donc d'analyser si, de manière

générale sur l'ensemble des sites, les probabilités associées par le modèle aux différents records sont représentatives de ce à quoi on peut s'attendre d'après la profondeur des stations. On trace cette distribution dans un graphique de type «probabilité-probabilité ». Sous hypothèse de justesse du modèle, la distribution théorique est une distribution uniforme entre 0 et 1, c'est-à-dire la première bissectrice du graphique. L'écart à l'hypothèse de justesse est donc représenté par l'écart entre les courbes. L'interprétation graphique de ces courbes est détaillée par Renard et coll. (2013) et rappelée sur la figure 3-5.

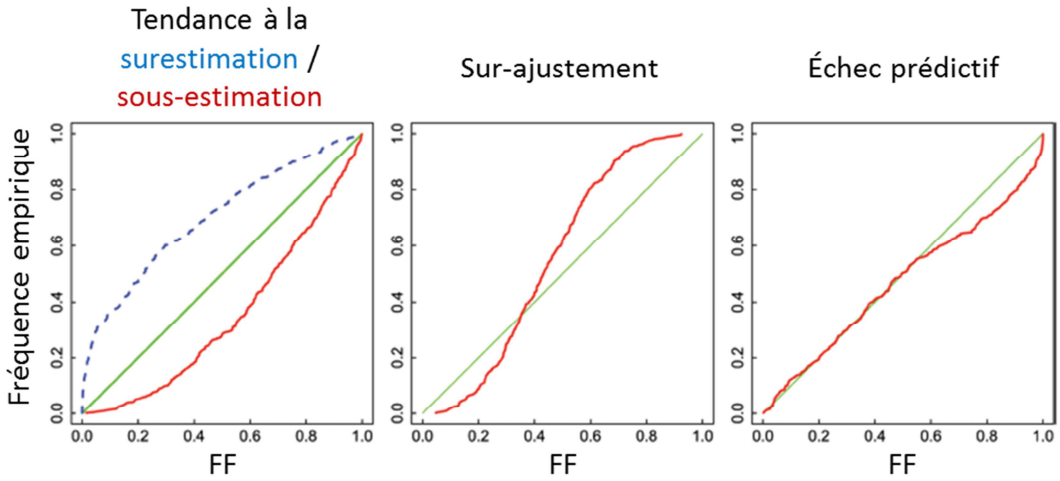


Figure 3-5 : *Interprétation graphique du critère FF, d'après (Renard et coll., 2013)*

Les bornes de FF sont également intéressantes. Pour un bassin donné, on obtient une valeur de FF de 1 si la loi de probabilité proposée n'atteint jamais la valeur du record observé. Dans ce cas, le modèle estime que la crue maximale observée n'est pas possible, ce qui constitue clairement un cas d'échec prédictif (à droite sur la figure 3-5). À l'inverse, une valeur de FF nulle correspond à un cas où la loi de probabilité est intégralement supérieure à la valeur du record observé. C'est-à-dire si le modèle estime que le plus fort débit observé est un évènement courant dont la période de retour est inférieure à 1 an (c'est à dire un évènement que l'on ne sélectionne même pas lors de l'échantillonnage par bloc).

La lecture de la distribution de FF est donc riche d'information, néanmoins lorsque l'on dispose de nombreux modèles à comparer, elle peut être difficile à analyser de manière systématique. On propose donc d'utiliser deux métriques qui permettent de synthétiser une partie de l'information présente sur les courbes :

Partie XXV : Le score FF (Renard et coll., 2013) est défini comme 1 moins l'aire entre la distribution empirique de FF et la distribution théorique sous hypothèse de justesse (représentée par la première bissectrice). Ce score est borné entre 0 et 1, et prend la valeur 1 pour un modèle parfaitement juste. Il représente la proximité à l'hypothèse de justesse, cependant il ne permet pas de refléter d'information sur la tendance du modèle.

Partie XXVI : Le biais FF doit permettre d'identifier des tendances. On le construit en comptant d'une part le nombre de points np de la courbe empirique situés au-dessus de la première bissectrice avec un écart supérieur à 0,02 et d'autre part le nombre de points nm situés en dessous de la courbe avec un écart identique. Le calcul du biais FF est présenté par l'équation (6) dans laquelle nbv représente le nombre de bassins considérés. Une

comparaison des graphiques et des valeurs du biais nous montre qu'un biais supérieur à 0,5 est associé à un modèle avec une tendance à la surestimation alors qu'un biais inférieur à -0.5 est associé à une tendance à la sous-estimation des quantiles.

$$\text{biais FF} = \frac{\text{np} - \text{nm}}{\text{nbv}} \quad (6)$$

Les biais et scores FF peuvent permettre une lecture rapide des principales capacités d'un modèle à extrapoler la distribution de probabilité des crues vers les extrêmes, par exemple en plaçant ces deux valeurs dans un graphique à deux dimensions où chaque point représente un modèle. Néanmoins, pour un nombre réduit de modèle, on préfèrera utiliser les distributions complètes de FF qui demeurent plus riches en information.

On se place ici dans le cas de bassins jaugés, on peut donc caler le modèle grâce aux données de débits disponibles à l'exutoire du bassin d'étude. Pour évaluer la capacité d'extrapolation du modèle, on le cale sans utiliser la plus forte crue. La valeur de FF en chaque site est alors calculée en utilisant la loi de probabilité ainsi simulée (sans le record), et la valeur observée du débit de la plus forte crue. On teste donc bien la capacité d'extrapolation du modèle, puisque la donnée utilisée pour la validation (non utilisée lors du calage) est la valeur de la plus forte crue observée sur le site.

3.3.3. Stabilité par rapport à l'échantillonnage

On définit la stabilité d'un modèle comme sa capacité à produire les mêmes sorties (ici les quantiles de débits) lorsque les entrées changent. La stabilité d'un modèle est une qualité importante. Dans le cas d'un modèle calé sur des observations, la stabilité permet de s'assurer que les prédictions du modèle ne changent pas si l'on modifie les données en entrées, par exemple, dans le cas d'introduction de nouvelles observations. Un modèle stable permet également de limiter les problèmes d'échantillonnage des données. Dans ce cas, la présence ou l'absence d'évènements extrêmes dans la période d'observation n'a qu'un impact limité sur les sorties du modèle. Lorsque l'on s'intéresse aux problématiques de régionalisation, la stabilité d'un modèle est également essentielle. En effet, la régionalisation d'une information est toujours entachée d'erreurs, mais un modèle stable doit pouvoir limiter les effets de ces erreurs. Néanmoins, la stabilité d'un modèle n'est pas une caractéristique suffisante puisqu'elle ne traduit pas la justesse des estimations. On peut dire que la stabilité est liée à la variabilité de la sortie d'un modèle, et à sa sensibilité aux données de calage.

Dans le cas présent, on évalue la stabilité des différents quantiles de débits fournis par le modèle. Pour cela on va comparer deux estimations réalisées à partir de deux jeux de données différents. On quantifie la stabilité du modèle à partir du score SPAN (Renard et coll., 2013) dont le calcul est décrit par l'équation (7). Dans cette équation, e1 et e2 sont les deux sous échantillons de données qui servent chacun à faire des estimations, $SPAN_T$ est le score SPAN associé aux quantiles de périodes de retour T, et $Q_i^T(ek)$ est le quantile de période de retour T estimé sur le $i^{ème}$ site à partir de l'échantillon de données ek (k peut prendre la valeur 1 ou 2). La fonction *mean*, correspond à la moyenne arithmétique des valeurs sur tous les sites d'étude.

$$SPAN_T = 1 - mean\left(2\frac{\left|Q_i^T(e1) - Q_i^T(e2)\right|}{Q_i^T(e1) + Q_i^T(e2)}\right) \quad (7)$$

Le score SPAN prend la valeur 1 lorsque les deux estimations sont identiques (modèle parfaitement stable) et ne possède pas de borne inférieure.

Dans le cas d'une application en sites jaugés, on sépare aléatoirement les maximums annuels observés en deux sous-ensembles de même taille. Le calage est alors réalisé sur chacun de ces deux sous échantillons de données.

3.3.4. « Régionalisabilité »

On définit la « régionalisabilité » d'un modèle comme sa capacité à être régionalisé. On cherche ici à évaluer dans quelle mesure on peut expliquer le ou les paramètres du modèle de manière à pouvoir en faire une estimation sur un autre site. La « régionalisabilité » est donc liée à la méthode de régionalisation employée. Un état de l'art de ces méthodes est proposé au chapitre 5. Néanmoins, on sait que ces méthodes exploitent généralement deux types d'information : la corrélation de la valeur d'intérêt avec des covariables externes ou la structure spatiale de la variable d'intérêt.

On décide d'évaluer la « régionalisabilité » en mettant en œuvre une méthode de régionalisation simple, basée sur une régression linaire et une interpolation spatiale des résidus. Cette méthode doit permettre d'estimer dans quelle mesure les covariables externes dont on dispose et la corrélation spatiale permettent d'expliquer la variabilité du paramètre. Pour simplifier la procédure on impose :

Partie XXVII : Une régression linéaire ajustée par la méthode des moindres carrés ordinaire ;
Partie XXVIII : Un nombre maximal de 3 covariables sélectionnées automatiquement parmi toutes celles présentées au chapitre 6 ;
Partie XXIX : La possibilité de transformer de manière logarithmique certaines covariables pour maximiser la corrélation avec la variable d'intérêt ;
Partie XXX : Une interpolation spatiale entre les valeurs des résidus de régression des 10 plus proches voisins en pondérant les valeurs par l'inverse de la distance au carré.

On évalue alors la « régionalisabilité » par un critère $\overline{ERQ}$ calculé entre les débits de calage et ceux estimés par le modèle régionalisé.

3.3.5. Récapitulatif

On récapitule les différents critères utilisés dans le tableau 3-2.

Tableau 3-2 : *Récapitulatif des différents critères*

Type de critère	Notation	Nature	Forme	Critères synthétiques
Restitution des quantiles de calage	R^2	NSE spatial sur un quantile	1 valeur par quantile	
	ERQ	C2M sur les 6 quantiles de calage	1 valeur par poste Courbe de distribution sur l'échantillon de postes	$\overline{ERQ}$: moyenne sur l'échantillon
Restitution des rapports des quantiles	RPJ	NSE sur les rapports des quantiles de pointe et journaliers	1 valeur par période de retour	
Extrapolation vers les extrêmes	FF	Probabilité de non dépassement associé par le modèle au record de débit	1 valeur par poste et par durée caractéristique Distribution sur l'ensemble de l'échantillon	*Score FF* : aire entre la courbe et la première bissectrice *Biais FF* : indicateur du sens de l'écartement par rapport à la première bissectrice
Stabilité par rapport à l'échantillonnage	SPAN	Écart relatif entre deux estimations du même quantile	1 valeur par quantile	
« Régionalisabilité »	ERQregio	Critère ERQ calculé entre les quantiles locaux et les quantiles régionalisés	1 valeur par poste Courbe de distribution sur l'échantillon de postes	$\overline{ERQ}$: moyenne sur l'échantillon

3.4. Comparaison de différentes versions de SHYREG

Dans cette partie, on se propose de remettre en question certaines hypothèses sur des paramètres préalablement fixés de SHYREG. L'objectif est multiple. Tout d'abord, l'idée est d'illustrer la mise en œuvre du modèle SHYREG en sites jaugés avec les données et les critères d'évaluation développés ci-avant. Ensuite, il s'agit de réévaluer l'ensemble de la chaine de calcul SHYREG pour s'assurer que les hypothèses faites lors d'études précédentes sont bien les plus intéressantes pour la mise en œuvre de SHYREG en sites non jaugés.

3.4.1. Degrés de libertés utilisés

La chaine de calcul SHYREG est relativement longue et complexe. Par conséquent, on peut envisager de tester l'impact de nombreux changements. Néanmoins, on décide de n'apporter aucune modification au générateur de pluie. Ce choix repose sur plusieurs raisons :

Partie XXXI : Le travail présenté ici porte essentiellement sur la transformation pluie-débit. Il apparait donc plus pertinent de se focaliser sur le modèle hydrologique.

Partie XXXII : Les performances locales et régionales du modèle de pluie ont déjà été éprouvées et validées (Carreau et coll., 2013 ; Neppel et coll., 2014).

Pour ces raisons, on ne remet pas en question la simulation de la pluie, et on fait l'hypothèse de la justesse du générateur.

Au niveau de la transformation pluie-débit on dispose de différents leviers que l'on peut aisément modifier :

Partie XXXIII : Les valeurs des paramètres A et B (capacités des deux réservoirs) ;

Partie XXXIV : Les paramètres de la FTS ;

Partie XXXV : Les poids appliqués à chacun des quantiles lors du calage ;

Partie XXXVI : Les valeurs de débit de base.

Ces différents paramètres ont des impacts de nature et de forme différentes à la fois sur les quantiles simulés mais surtout sur la valeur du paramètre de calage S0/A. En effet, on sait que ce dernier paramètre est capable de compenser en partie les erreurs de modélisation. Des tentatives de modifications des différents paramètres énumérés plus haut ont été initiées. Les résultats préalables, ainsi que l'analyse des études qui ont permis de les fixer nous ont amené à considérer davantage les valeurs de B et des poids de calage. Les autres paramètres ont été écartés pour diverses raisons :

Partie XXXVII : La valeur de A a un impact important sur l'estimation des quantiles de débits les plus rares. Cependant, ce paramètre a déjà fait l'objet d'une étude poussée (Aubert, 2012). Le paramètre A a finalement été cartographié par classe hydrogéologique ce qui semble cohérent avec le rôle de stockage du réservoir de production.

Partie XXXVIII : L'introduction d'un débit de base dans la méthode SHYREG est également un résultat de l'étude sur la capacité d'extrapolation vers les valeurs extrêmes du modèle (Aubert, 2012). Non seulement il s'agit d'un des développements les plus récents du modèle, mais le fait d'estimer les écoulements hors crues à l'aide d'estimation des débits mensuels semble pertinent.

Partie XXXIX : La FTS a déjà fait l'objet de nombreux développements. Néanmoins, on observe toujours des problèmes dans la capacité du modèle à gérer les rapports entre débits de faible et de forte durée caractéristique. Ce problème semble pouvoir être traité par la FTS. Cependant, les essais préliminaires menés pour tenter de caler la FTS par grande région ou de lier sa forme à des valeurs d'abattements de la pluie (estimés grâce aux données de pluies spatialisées SAFRAN (Vidal et coll., 2010)) n'ont conduit à aucune amélioration des performances du modèle. Aucune modification de la FTS n'a donc été introduite. Toutefois, des pistes d'amélioration persistent et pourraient être suivies dans l'avenir.

À l'opposé, les valeurs de B ont été décidées suite à des études relativement anciennes (Graff, 2004). Ce paramètre a été fixé à 50 mm en été et 100 en hiver, mais n'a pas été revu suite aux modifications de valeur de A et à l'introduction du débit de base. On peut donc légitimement s'interroger sur la pertinence de ces valeurs dans le modèle actuel. Les valeurs des poids à utiliser lors du calage ont été modifiées plusieurs fois au cours du développement de SHYREG et continuent à soulever des questions : faut-il mettre plus de poids sur les quantiles les plus rares pour accompagner le modèle, ou au contraire, le laisser plus libre en extrapolation ? Faut-il favoriser la reproduction des débits de pointe plus difficiles à simuler par rapport aux débits journaliers ?

3.4.2. Comparaison des différentes versions

On envisage différentes combinaisons de poids sur les débits de calage variant entre 1 et 4. En mettant davantage de poids sur les débits les plus forts (débits décennaux, débits de pointe) on a tendance à augmenter les débits simulés, notamment les débits de fréquence rare, puisque le paramètre S0/A compense cet effet. Par la suite, on envisagera de modifier le paramètre B qui peut servir à ajuster les rapports entre les débits de différentes durées caractéristiques.

Pour déterminer la meilleure combinaison de poids, on calcule les différents critères présentés en 3.3. Cette comparaison concerne ici l'application locale de la méthode, c'est-à-dire en site jaugé, en utilisant les données de débits disponibles.

3.4.2.1. Impact des poids de calage

Dans cette partie, on détaille la procédure qui permet de sélectionner la meilleure combinaison de poids associés aux quantiles de calage. L'objectif est à la fois de déterminer la meilleure version de SHYREG mais aussi d'exposer l'application la procédure de comparaison présentée en 3.3.

On définit 8 combinaisons possibles de poids de calage. Les noms des essais sont construits selon un codage donnant la valeur du paramètre B utilisé (ici « Bsai » pour un B saisonnier comme

présenté au chapitre 2) et les six poids comme décrits dans le tableau 3-3. Notons que l'essai Bsai_442221 correspond à la version initiale du modèle.

Tableau 3-3 : *Poids de calage utilisés dans les différents essais*

essai	Poids					
	QP2	QP5	QP10	QJ2	QJ5	QJ10
Bsai_111111	1	1	1	1	1	1
Bsai_123123	1	2	3	1	2	3
Bsai_321321	3	2	1	3	2	1
Bsai_221221	2	2	1	2	2	1
Bsai_441441	4	4	1	4	4	1
Bsai_221442	2	2	1	4	4	2
Bsai_442221	4	4	2	2	2	1
Bsai_331221	3	3	1	2	2	1

a. Reproduction des quantiles de calage

De manière à mieux visualiser l'impact des poids, on choisit de calculer des critères R^2 de Nash spatiaux quantiles par quantile plutôt qu'un critère ERQ synthétique. La figure 3-6 fournit les valeurs des critères de Nash spatiaux sur la reproduction des différents débits de calage pour les deux saisons et les différentes combinaisons de poids. De manière générale, notons tout d'abord que dans presque tous les cas on obtient des critères supérieurs à 0,85, ce qui est une performance acceptable, surtout lorsque l'on compare des débits spécifiques. Ce résultat signifie que la méthode est capable de reproduire les quantiles de crues courants en pointe et en journalier, avec le calage d'un seul paramètre.

De plus, on peut voir que le modèle reproduit mieux les débits journaliers que les débits de pointe. En outre, l'allure des courbes est très proche quelle que soit la saison. En comparant les résultats obtenus pour les différentes combinaisons de poids, on peut confirmer certains résultats attendus. Par exemple, le fait de mettre davantage de poids sur les débits de pointe (Bsai_442221 et Bsai_331221) conduit à une meilleure estimation de ces débits. Inversement si l'on pondère davantage les débits journaliers (Bsai_221442), les débits journaliers sont mieux restitués. Ces constats nous amènent à penser qu'il est probablement préférable d'accorder le même poids aux débits de différentes durées. De même, la meilleure reproduction des débits décennaux est obtenue lorsque ceux-ci sont plus pondérés que les autres (Bsai_123123). Cependant, les débits décennaux utilisés pour le calage sont plus incertains que les débits biennaux ou quinquennaux, il peut donc être dangereux de trop les pondérer. En outre, lorsque l'on fait seulement varier les poids entre les quantiles de différentes périodes de retour, les différences entre les courbes restent assez faibles. On favorise donc les cas où les pondérations sont identiques sur les deux durées caractéristiques, et moins importantes sur le quantile décennal.

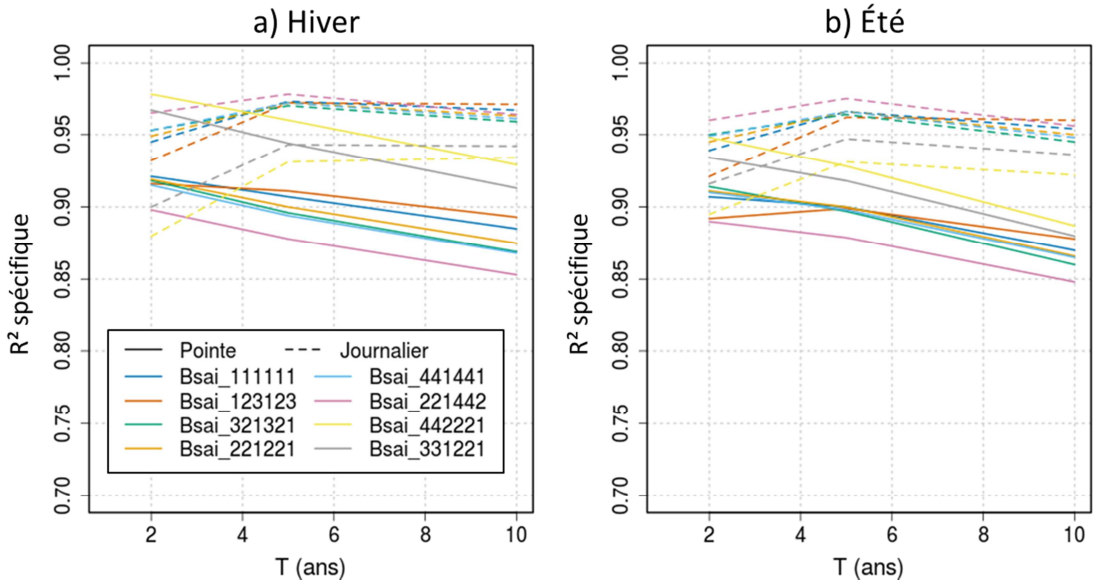


Figure 3-6 : *Valeurs des critères sur la reproduction des débits de calage pour différentes combinaisons de poids de calage*

b. Rapport des débits de différentes durées caractéristiques

La figure 3-7 représente les valeurs du critère sur la reproduction des rapports entre les débits de calage. On peut voir que ces rapports sont assez pauvrement reproduits par le modèle puisque les valeurs de Nash sont généralement comprises entre 0 et 0,2. Néanmoins, un critère de Nash nul reflète un modèle qui a des performances similaires à une simple moyenne arithmétique de la valeur étudiée. SHYREG modélise donc mieux les rapports entre les quantiles de débits de pointe et journaliers que si l'on avait fixé ce rapport à une valeur fixe.

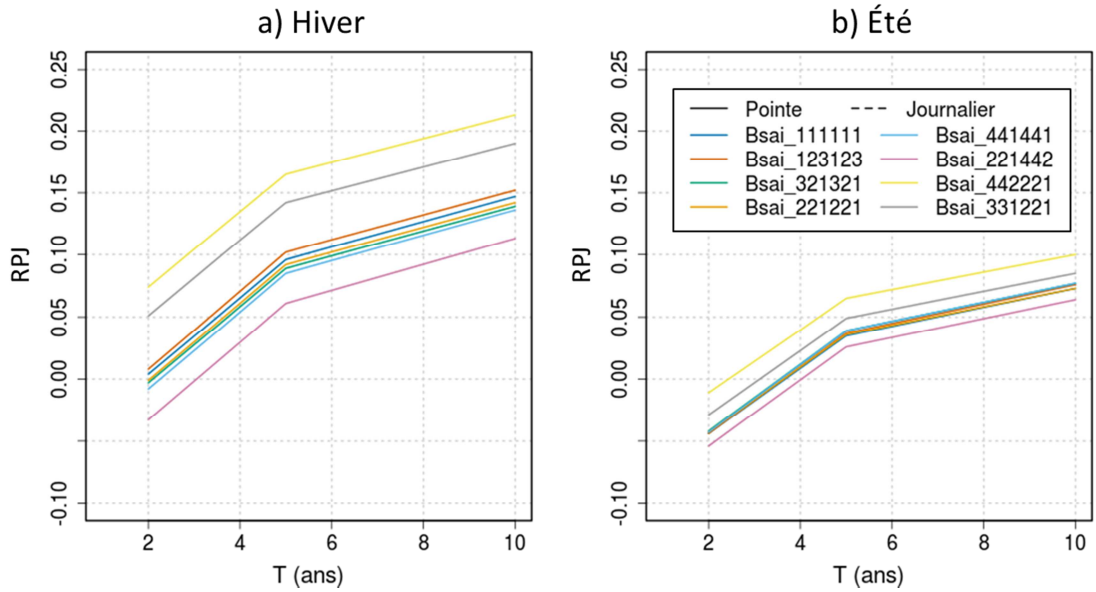


Figure 3-7 : *valeurs des critères sur la reproduction des rapports entre les quantiles de différentes durées caractéristiques*

En outre, les rapports apparaissent mieux restitués sur la saison hiver, mais davantage impactés par la variation de poids de calage. On observe également une croissance du critère avec la période de retour des quantiles. Les combinaisons de poids qui fonctionnent le mieux sont celles qui pondèrent davantage les débits de pointe (Bsai_442221 et Bsai_331221). À l'inverse, le fait de trop pondérer les débits journaliers nuit à la reproduction des rapports des quantiles (Bsai_221442). Les autres combinaisons de poids sont davantage semblables les unes aux autres et atteignent des performances intermédiaires.

De manière générale, les résultats sur la restitution des rapports entre quantiles de pointe et journaliers sont assez faibles. De manière à mieux identifier ce problème, on décide de tracer l'évolution de ce rapport avec la surface des bassins versants pour les quantiles observés et simulés. On ne représente que les résultats obtenus avec la version Bsai_123123 pour les quantiles biennaux qui sont ceux pour lesquels la restitution est la moins bonne. Les résultats sont présentés sur la figure 3-8. On peut voir que les rapports simulés ne permettent pas de représenter toute la gamme des rapports observés. Notamment, les rapports QP/QJ issus de SHYREG ne reproduisent que les valeurs les plus faibles des rapports issus de l'observation. En outre, on voit clairement sur les graphiques l'absence de tendances dans les rapports QP/QJ pour les bassins de faible surface.

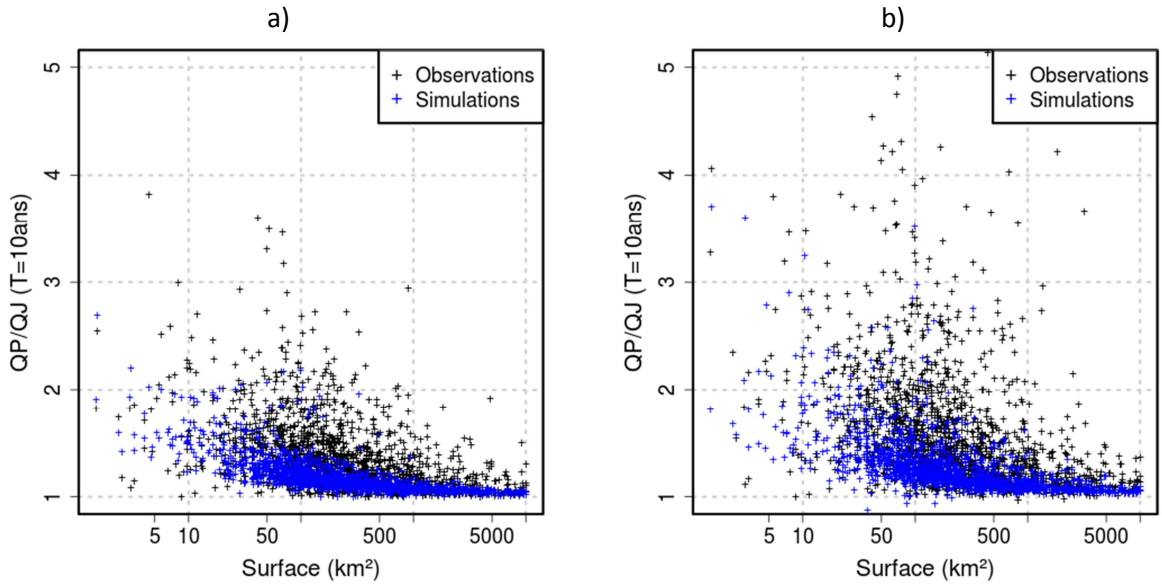


Figure 3-8 : *Évolution du rapport de quantiles biennaux de pointes sur les quantiles journaliers par rapport à la surface des bassins*
a) *saison hiver ; b) saison été*

Une solution envisageable (mais non traitée dans le cadre de cette thèse) pour améliorer la restitution des rapports sur les quantiles serait de modifier la formulation de la fonction de transfert statistique utilisée pour agréger les quantiles à l'échelle de bassins versants. On pourrait notamment chercher à augmenter les valeurs des rapports QP/QJ de manière générale, ou utiliser une formulation différente selon des zones géographiques. Cette deuxième piste pourrait permettre d'élargir la gamme des valeurs de rapports QP/QJ simulés par SHYREG.

c. Extrapolation vers les extrêmes

La figure 3-9 fournit les valeurs des scores et biais FF pour les différents essais. L'analyse de cette figure conduit à plusieurs constats généraux. Sur la saison été, les scores FF sont quasiment toujours supérieurs à 0,9 ce qui démontre de très bonnes performances en extrapolation. Cependant, on peut également voir que le modèle a une légère tendance à la sous-estimation, notamment pour les débits journaliers. Les résultats de la saison hiver sont plus mitigés. Le modèle extrapole très bien les débits de pointe, on remarque néanmoins des performances moindres et une tendance à la surestimation des débits journaliers pour cette saison.

De manière plus détaillée, on peut voir sur la figure 3-9 que les débits les plus sous-estimés (points les plus à gauche) sont obtenus lorsque l'on met davantage de poids sur les débits décennaux (Bsai_123123), davantage de poids sur le journalier (Bsai_221442) ou que tous les poids sont égaux (Bsai_111111). Les affirmations contraires semblent également vérifiées. Le calage de SHYREG cherche à reproduire le début de la courbe de fréquence de deux grandeurs, l'une (les débits journaliers) plus faible que l'autre (les débits de pointe). Si l'on met plus de poids sur les débits journaliers, il semble logique de penser que l'on va diminuer les valeurs de l'ensemble de la courbe de fréquence, probablement en choisissant de valeurs de S0/A plus faibles. Si on choisit des poids identiques, les débits de calage les plus forts ont implicitement une plus grande incidence puisque leurs valeurs sont plus grandes. Cela explique que ce type d'essai conduise à des résultats comparables à ceux obtenus en mettant davantage de poids sur les débits décennaux. En favorisant des quantiles plus forts, on force probablement les courbes de fréquences simulées à passer le plus exactement possible par les quantiles décennaux observés, ce qui empêche vraisemblablement de sélectionner un paramètre conduisant à une courbe simulée avec une queue de distribution suffisamment lourde.

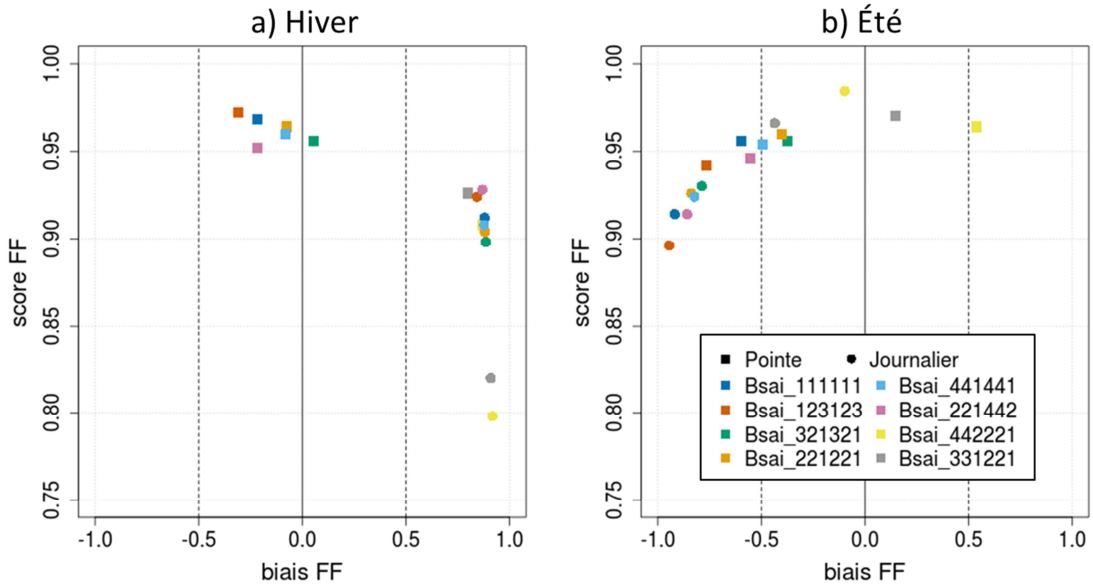


Figure 3-9 : *Score FF et biais FF pour différentes combinaisons des poids de calage*

On parvient donc à relier les variations des poids de calage à leur impact sur la queue de distribution des crues. Néanmoins, le choix d'une combinaison de poids demeure problématique puisque les tendances sont différentes selon la saison et les critères. Le modèle surestime en hiver et

sous-estime en été. Le seul paramétrage qui diffère en été et en hiver est la capacité du réservoir de transfert B. On peut envisager de modifier la valeur de B en hiver pour l'aligner sur celle de l'été. On espère ainsi diminuer l'écart entre les courbes de fréquences simulées. On aurait également pu envisager d'autres pistes de travail comme la modification de la FTS, en faisant varier, par exemple, ses coefficients par région.

d. Stabilité aux données de calage

La figure 3-10 fournit les différentes valeurs des critères de stabilité vis-à-vis des poids de calage pour différents quantiles simulés par SHYREG. Une lecture rapide des graphiques conduit à plusieurs constats. Tout d'abord, dans tous les cas, la stabilité des quantiles augmente avec la période de retour. Ce phénomène est lié à la structure du modèle SHYREG. Le paramètre calé du modèle pluie-débit correspond au remplissage en début d'évènement du réservoir de production. Lors d'un évènement pluvieux ce réservoir se sature. Plus un évènement a un cumul pluviométrique important et moins ce paramètre aura d'impact sur les débits simulés. Ainsi, les quantiles de plus forte période de retour sont peu sensibles aux variations du paramètre calé et sont majoritairement contrôlés par le générateur de pluie. Ensuite, les quantiles journaliers sont plus stables que les quantiles de pointe. Enfin, les quantiles de la saison hiver sont plus stables que ceux de la saison été.

Si on compare les courbes de stabilité obtenues avec les différentes combinaisons de poids de calage, on peut voir qu'elles sont relativement proches les unes des autres. On peut néanmoins établir une hiérarchie entre les différents essais. Les essais pour lesquels on met davantage de poids sur les quantiles décennaux conduisent à des estimations moins stables que celles où l'on pondère davantage les quantiles de faibles périodes de retour. Cela peut s'expliquer par le fait que les débits « observés » qui servent à caler SHYREG sont en fait estimés à partir d'un modèle GEV, et l'on peut imaginer que l'estimation des quantiles décennaux est moins stable que celle des quantiles biennaux ou quinquennaux, surtout dans le cas où on n'utilise pas toutes les données disponibles pour le calage comme c'est le cas pour l'estimation de la stabilité. Néanmoins, on voit bien que la stabilité des estimations est peu sensible au choix des poids de calage.

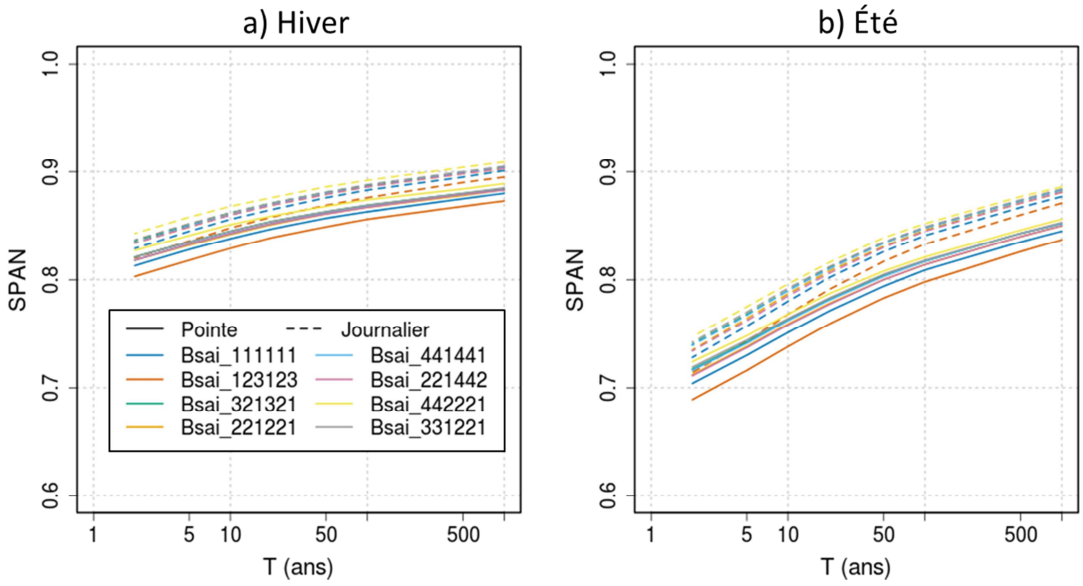


Figure 3-10 : *Critères de stabilité pour les différentes combinaisons de poids*

e. « Régionalisabilité »

La figure 3-11 représente les valeurs du critère de « régionalisabilité » de SHYREG pour les différentes combinaisons de poids de calage. On voit tout d'abord que, dans tous les cas, le paramètre calé pour la saison été est plus explicable que celui de la saison hiver. Bien que l'on observe quelques variations du critère, celles-ci demeurent assez faibles et on peut supposer que l'explicabilité du paramètre calé est peu sensible aux poids de calage.

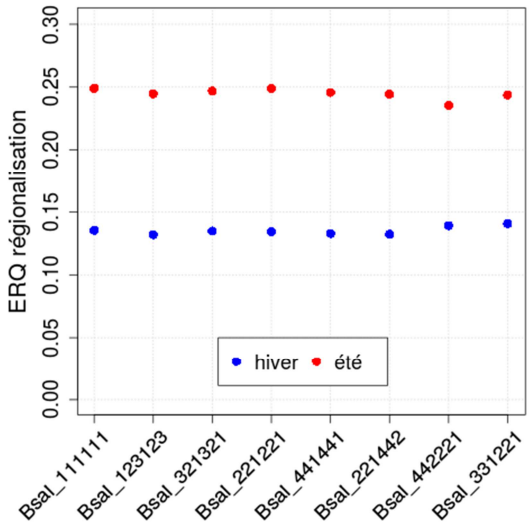


Figure 3-11 : *Critère de « régionalisabilité » du modèle selon les différentes combinaisons de poids de calage*

f. Bilan sur les poids de calage

Les différents critères présentés dans cette partie ont permis d'identifier l'impact d'un changement des poids de calage. Tout d'abord, et de manière logique, en mettant davantage de poids lors du calage sur un type de quantiles, on améliore la restitution de ces quantiles par le modèle. Néanmoins, cela n'est vrai que sur les quantiles de calage, et pas sur les valeurs extrêmes. Dans ce dernier cas, le modèle est performant pour l'estimation des quantiles de débits de pointe, mais a tendance à sous-estimer les quantiles journaliers en été et à les surestimer en hiver. En outre, on a pu voir que la restitution des rapports entre débits de différentes durées pouvait être améliorée. Ces constats nous amènent à vouloir essayer de modifier le paramétrage du réservoir de transfert. En effet, ce réservoir a un impact important sur la forme des crues et donc sur les rapports en débits de différentes durées.

À ce stade, on retient la version Bsai_123123, mais on envisage uniquement de modifier la valeur du paramètre B pour la saison hiver. En effet, c'est cette saison qui présente les plus faibles performances en termes d'extrapolation vers les extrêmes et d'explicabilité du paramètre calé.

3.4.2.2. Modification de B hiver

On envisage comme unique cas alternatif celui où la taille du réservoir de transfert est fixée uniformément à 50 mm en hiver comme en été. Cela ne constitue un changement que sur la saison

hiver. Les valeurs des différents critères dans le cas où B=50 mm en hiver sont représentés sur la figure 3-12. On ne représente ni les critères de la saison été qui ne subissent pas de changement par rapport aux paragraphes précédents, ni les critères de stabilité qui n'évoluent quasiment pas par rapport à ceux présentés sur la figure 3-10.

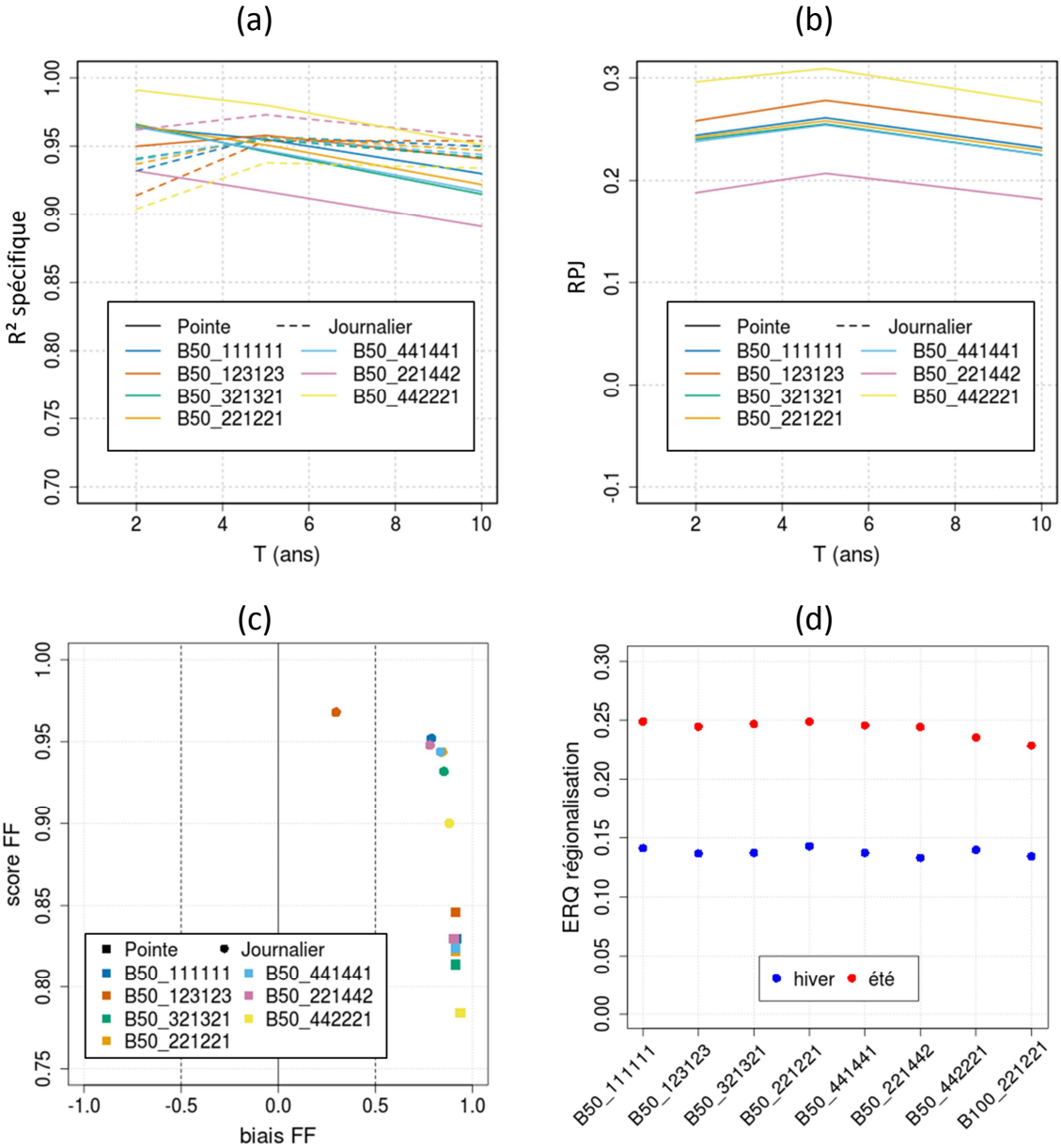


Figure 3-12 : *Critères d'évaluation de SHYREG en hiver avec B=50mm.*
(a) Reproduction des quantiles de calage ; (b) Reproduction du rapport QP/QJ ; (c) Extrapolation vers les extrêmes ; (d) « Régionalisabilité » du paramètre calé

(b) La figure 3-12 (a) nous montre que la réduction de la valeur de B permet une meilleure restitution des débits de calage, notamment en pointe. Ce résultat se transmet naturellement à la reproduction des rapports QP/QJ qui est également notablement améliorée comme le montre la figure 3-12 (b). On peut également observer une sensible augmentation de la « régionalisabilité » du paramètre de calage, quelle que soit la combinaison de poids de calage, visible sur la figure 3-12 (d). La figure 3-12 (c) illustre les performances en extrapolation du modèle et on peut voir que la diminution de la valeur de B

a conduit à des résultats sensiblement meilleurs pour l'extrapolation des débits journaliers puisque le score FF augmente. Néanmoins, on observe également une forte dégradation du score FF et du biais FF sur les débits de pointe. En fait, les estimations des quantiles les plus rares des débits journaliers sont désormais un peu moins surestimées, mais les estimations sur les débits de pointes ont également fortement augmenté, ce qui conduit à une forte tendance à la surestimation qu'aucune combinaison de poids ne permet de compenser.

(c) On peut également voir sur la figure 3-12 que la comparaison des différentes combinaisons de poids de calage entre elles n'est pas impactée par la modification de la valeur du paramètre B.

(d) La diminution de la valeur de B sur la saison hiver conduit à des améliorations notables, notamment en termes de restitution des quantiles de calage et de « régionalisabilité ». Néanmoins, elle entraine également une forte diminution de performances en termes d'extrapolation vers les extrêmes des débits de pointe. Cette dernière caractéristique étant probablement la plus importante (estimer les débits de période de retour élevée est le premier objectif de toute méthode de prédétermination des crues), on ne peut pas accepter la modification de paramétrage. On conserve donc une valeur de B de 100 mm en hiver et 50 mm en été.

3.4.2.3. Synthèse

Les comparaisons entreprises dans cette partie ont permis à la fois d'illustrer la mise en œuvre de la méthode SHYREG débit, d'évaluer ses performances au sein d'une analyse multicritère, et de procéder à l'analyse de l'impact des poids de calage sur les performances de la méthode.

En considérant les résultats précédents, on choisit de conserver la version Bsai_321321 de la méthode. Dans cette version, le paramètre B est fixé à 100mm en hiver et 50mm en été et les poids de calage sont ceux décrits par le tableau 3-3. Ce choix vise à trouver un équilibre entre les différents critères.

3.5. Performances de la version choisie

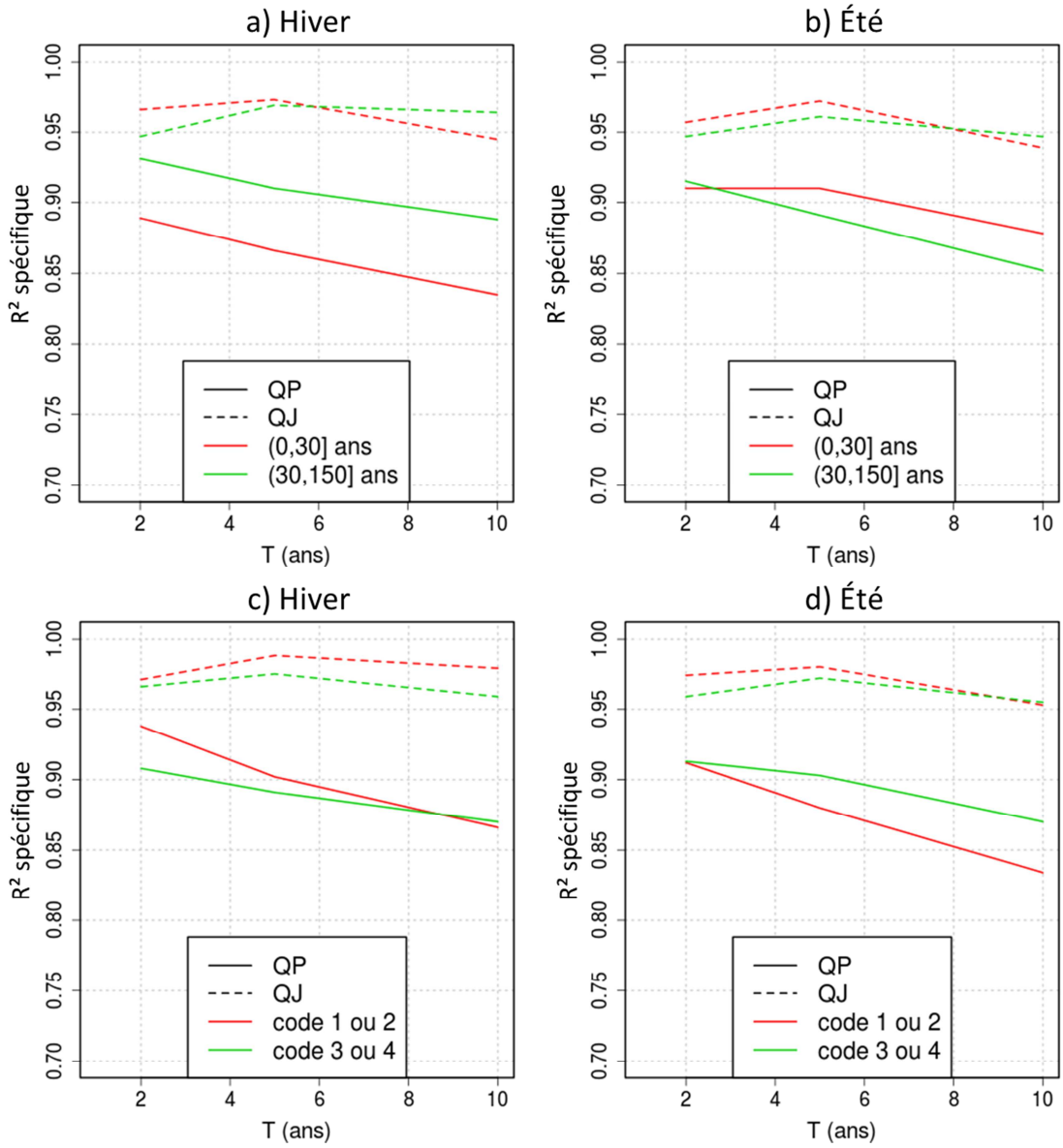


Figure 3-13 : *Performances de restitution des quantiles de calage de SHYREG selon le type de station de mesure*
a) et b) selon la profondeur de la station ; c) et d) selon le code de confiance SHYREG associé ; a) et c) saison hiver ; b) et d) saison été

Dans cette partie, on se propose d'illustrer les performances de la version choisie de SHYREG en nuançant davantage les résultats selon les bassins présents dans l'échantillon de travail. On se propose d'étudier la variation des critères d'évaluation de la méthode selon la profondeur des stations et selon son code de confiance SHYREG minimum. On présentera uniquement les résultats en termes de restitution des quantiles de calage et d'extrapolation vers les extrêmes.

La figure 3-13 fournit les valeurs des critères sur la restitution des quantiles de calage différenciés selon deux classes de profondeur de station et également selon les codes de confiance SHYREG associés aux bassins. On peut voir que la profondeur des stations n'a qu'un faible impact sur la qualité de la restitution des quantiles journaliers. Néanmoins, il semble que le calage pour la saison hiver soit un peu moins performant lorsque les stations possèdent moins d'années de mesure. En outre, on voit sur les figures 3-13 b et c que le code de confiance sur l'utilisation de SHYREG dans les bassins ne semble pas avoir un impact important sur la qualité du calage. On rappelle que ces codes varient de 1 à 4, un code de 4 indiquant une absence de contre-indication de la méthode. On retiendra toutefois que les écarts sont plus importants sur les débits de pointe que sur les débits journaliers. Les résultats présentés par la figure 3-13 nous permettent de valider le choix fait de conserver des stations de faible profondeur et de ne pas systématiquement écarter les stations associées à de faibles codes de confiances. Cependant, ces résultats montrent seulement que le modèle arrive à se caler de manière similaire sur les différents types de bassins : pour juger de la qualité des estimations il faut utiliser d'autres critères.

La figure 3-14 montre les critères d'extrapolation vers les extrêmes de SHYREG, en différenciant les résultats selon deux classes de profondeur de station et de codes de confiance. On voit clairement sur les figures a) et b) que les courbes de distribution de FF associées aux stations les plus profondes sont situées au-dessus de celles des autres stations. On peut estimer ce phénomène par deux explications. Tout d'abord, il faut rappeler que les valeurs de FF sont calculées à partir de la plus forte valeur de débit observée. Logiquement, ces valeurs tendent à être plus extrêmes sur des chroniques plus longues. Par conséquent, on ne valide pas la même partie de la courbe de fréquence lorsque l'on utilise des chroniques plus ou moins longues. Une deuxième explication : peut-être que lorsqu'il est calé à partir de chroniques plus longues, et donc comportant probablement davantage d'évènements forts, SHYREG tend à augmenter la valeur de ses quantiles. Néanmoins, le phénomène reste limité puisque les courbes demeurent relativement proches de la première bissectrice. On notera tout de même que les quantiles de la saison été semblent davantage impactés par la longueur des chroniques que ceux de la saison hiver.

Les graphiques c et d de la figure 3-14 permettent de comparer les performances en extrapolation de SHYREG pour les bassins associés à de faibles ou de forts codes de confiance. On peut voir que cette différenciation n'a qu'un faible impact sur l'allure des distributions du critère FF. Ces résultats montrent que SHYREG parvient à correctement extrapoler les débits extrêmes même sur les bassins en limite d'application de la méthode. Ce constat confirme celui obtenu avec la figure 3-13 sur le calage du modèle. On peut supposer que le paramètre de calage est capable de compenser les phénomènes non modélisés et évalués par les codes de confiance.

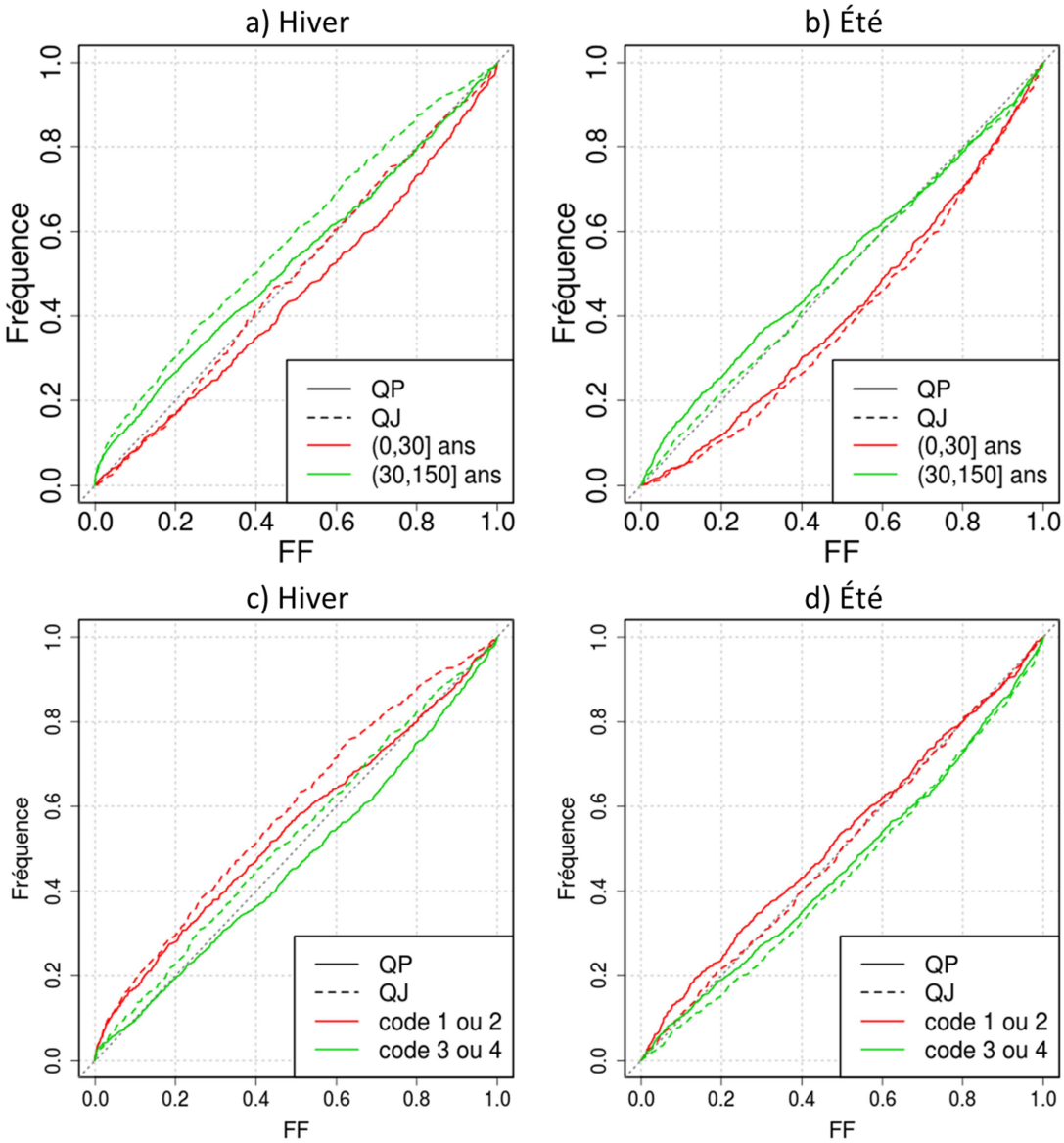


Figure 3-14 : *Performances en extrapolation de SHYREG selon le type de station de mesure* a) *et b) selon la profondeur de la station ; c) et d) selon le code de confiance SHYREG associé ; a) et c) saison hiver ; b) et d) saison été*

On s'interroge alors sur l'impact des types de station de mesure sur la « régionalisabilité » du paramètre S0/A. On représente le critère de régionalisabilité selon différents jeux de stations dans le tableau 3-4. On peut voir que l'utilisation de stations plus profondes conduit à une nette augmentation du critère de « régionalisabilité ». La discrimination selon les codes qualité par SHYREG conduit à des tendances moins nettes. Dans le cas de la saison hiver, on obtient la plus forte valeur de « régionalisabilité » pour les bassins ne possédant pas de contre-indication à l'utilisation de SHYREG alors que le critère varie peu pour la station été.

Tableau 3-4 : *Critères de « régionalisabilité » selon le type de station de mesure*

Jeu de bassins		« Régionalisabilité » hiver	« Régionalisabilité » été
Profondeur de station	≤ 30 ans	0,09	0,21
	> 30 ans	0,16	0,28
Code SHYREG	1	0,08	0,27
	2	0,15	0,26
	3	0,12	0,25
	4	0,19	0,26

3.6. Conclusion

Dans ce chapitre, on a cherché à appliquer localement différentes versions de la méthode SHYREG. Pour cela, on a tout d'abord introduit et présenté l'échantillon de bassins versants jaugés qui est utilisé dans l'ensemble des chapitres suivants. Ensuite, on a présenté un cadre de comparaison comportant différents critères qui évaluent différentes performances de la méthode appliquée localement. Ces différents critères sont également réutilisés dans la suite, éventuellement avec des échantillonnages différents.

Les différentes versions de SHYREG testées sont basées sur différentes combinaisons des poids attribués aux différents quantiles qui servent à caler la méthode. On envisage également une modification de la taille du réservoir de transfert. Les changements observés sont notamment visibles sur le critère qui évalue la capacité d'extrapolation vers les quantiles de forte période de retour, mais aussi sur les critères de reproduction des quantiles de calage dans le cas de la modification du paramètre B. Finalement, la version retenue présente à notre sens un compromis satisfaisant entre les différents critères. Cette version conserve un paramètre B fixé à 100 mm en hiver et 50 mm en été et ses poids de calage sont identiques pour les débits de pointe et journaliers, et sont plus importants sur les débits de plus faibles périodes de retour.

Enfin, on a entrepris d'observer les performances de la méthode choisie en séparant l'échantillon de bassins versants selon la profondeur des stations mais aussi selon les codes de confiances définis selon les limites d'utilisation de la méthode SHYREG. Bien que certaines diminutions de performances soient visibles, on peut conclure que les résultats demeurent proches quels que soient les sous-échantillons étudiés, surtout du point de vue de la capacité d'extrapolation du modèle. Ce constat permet de prouver les bonnes performances de la méthode SHYREG lorsqu'elle est calée sur des données locales.

« La vérité scientifique a pour signe la cohérence et l'efficacité.
La vérité poétique a pour signe la beauté.»
(Césaire, 1945, p170)

Chapitre 4 : Désagrégation spatiale du calage

4.1. Introduction....103
4.2. Problématique de la cohérence spatiale des débits....105
4.2.1. SHYREG : une méthode distribuée ? 105
4.2.2. Un exemple d'incohérence spatiale.... 106
4.2.3. La cartographie du paramètre pour reconnecter les bassins versants.... 108
4.3. Cartographie du paramètre....110
4.3.1. Méthodes de calages semi-distribués.... 110
4.3.2. Résultats 113
4.3.3. Synthèse.... 118
4.4. Introduction à la régionalisation simultanée 119
4.5. Conclusion....122

Résumé du chapitre

Dans ce chapitre on s'intéresse à la problématique de la cohérence des débits simulés par SHYREG et à la manière de gérer les bassins emboités dans le calage de la méthode. En effet, il apparait que lorsque l'on cherche à simuler des débits à une résolution spatiale fine le long d'un cours d'eau, des diminutions de débits incohérentes peuvent apparaitre. Ce problème peut être attribué à des erreurs de régionalisation. Néanmoins, on peut montrer que cette incohérence prend son origine dans le calage de la méthode SHYREG en sites jaugés, notamment lorsque l'on fait l'hypothèse d'homogénéité du paramètre sur chaque bassin. En outre, les limites de cette hypothèse apparaissent clairement dès lors que l'on considère le calage de bassins emboités. Dans ce cas, les pixels communs aux deux bassins peuvent se voir attribuer des valeurs différentes selon que l'on considère un bassin ou l'autre.

Ce chapitre permet de montrer l'existence de ce problème sur un exemple concret. Il propose en outre de le solutionner en tentant de prendre en compte la structure en réseau des cours d'eau à la fois dans le calage et dans la régionalisation. Deux solutions sont proposées. La première consiste à utiliser l'hypothèse d'homogénéité sur les sous bassins définis par les exutoires d'intérêt. Ce sont les valeurs sur ces complémentaires de bassins qui sont alors calées et régionalisées. On présente deux algorithmes de calage permettant de mettre cette idée en pratique. On montre que les performances en calage sont quasi équivalentes à celles obtenues avec un calage fait indépendamment sur chaque bassin. Finalement, on opte pour un calage de SHYREG par sous bassins selon un algorithme itératif qui s'autocorrige à chaque itération. La seconde solution, consiste à déterminer les valeurs du paramètre à régionaliser (S0/A) directement en chaque pixel en présupposant une relation entre le paramètre et des descripteurs. Il s'agit en fait d'effectuer directement le calage d'une méthode de régionalisation sans déterminer explicitement les valeurs du paramètre. Les performances de cette seconde approche seront étudiées dans le chapitre consacré à la régionalisation.

4.1. Introduction

Comme décrit lors de la présentation de la méthode SHYREG (chapitre 2) et de son application en sites jaugés (chapitre 3), le calage du modèle SHYREG s'effectue indépendamment en chaque bassin jaugé. C'est-à-dire que pour chaque site, on détermine la valeur du paramètre S0/A qui permet d'optimiser le critère de calage. Ce calage repose sur une hypothèse d'homogénéité du paramètre sur l'ensemble du bassin versant. Néanmoins on peut rappeler que la transformation hydrologique est effectuée sur chaque pixel de taille kilométrique composant le bassin, avec une pluviométrie spatialement variable, liée à chaque pixel du bassin. On a pu voir dans le chapitre 3 que cette méthode de calage assure une bonne restitution des six quantiles de calage et de bonnes performances en terme de justesse et de stabilité de l'ensemble de la distribution de fréquences.

Dans ce chapitre on s'interroge sur la cohérence spatiale des débits simulés par SHYREG, c'est-à-dire sur leur croissance le long des cours d'eau. Lorsque l'on cale le modèle sur des stations jaugés, une bonne performance du calage assure cette croissance à partir du moment où les débits observés qui servent au calage sont bien croissants. En outre, pour un paramétrage identique, les quantiles SHYREG croissent nécessairement avec la surface du bassin considéré. Comme les stations de calage sont relativement éloignées les unes des autres, deux stations consécutives sont généralement de tailles assez différentes ce qui suffit à obtenir des quantiles croissants. En site non jaugé, on ne dispose plus de données pour recaler le modèle. En outre, on peut s'intéresser à deux bassins consécutifs très proches. Dans ce cas, comment assurer la cohérence spatiale des débits simulés ? On verra que l'on peut introduire cette cohérence de manière structurelle dans le modèle en passant par une phase de cartographie du paramètre à l'échelle du pixel. Bien que le problème d'incohérence n'apparaisse que pendant la phase de régionalisation du modèle, il est lié à la manière dont on procède au calage et devrait être réglé avant toute tentative de régionalisation.

On a vu dans le chapitre 2 que le calage de SHYREG était basé sur une hypothèse d'homogénéité du paramètre sur les pixels de chaque bassin. Cette hypothèse est incompatible avec une cartographie du paramètre. En effet, si l'on considère deux stations situées à l'aval l'une de l'autre, chacune sera probablement caractérisée par un paramètre S0/A de valeur différente et supposée homogène sur chacun des bassins correspondants. Cependant, ces deux bassins sont emboités l'un dans l'autre : les pixels du bassin amont sont inclus dans le bassin aval. L'hypothèse d'homogénéité revient à considérer les bassins versants de manière globale, alors que la cartographie du paramètre nécessite de pratiquer une descente d'échelle pour déterminer une variabilité du paramètre au sein des bassins versants.

L'objectif de ce chapitre est d'apporter une réponse au problème posé par la gestion des bassins emboités. Ce problème est intimement lié à la question de la cohérence spatiale des débits simulés. On se demande donc comment peut-on assurer une évolution réaliste des débits le long des cours d'eau ?

Dans un premier temps, on s'attachera à décrire les problèmes de cohérence spatiale et de gestion des bassins emboités de manière à identifier leur origine. On proposera ensuite un calage semi-distribué de SHYREG capable de prendre en compte la structure emboitée des bassins versants de l'échantillon de travail. On cherchera alors à comparer différents algorithmes de calage et à

sélectionner le plus performant. Néanmoins, ce type de calage semi-distribué ne constitue qu'un pas dans la descente d'échelle. On introduira donc une méthode de calage régionale de SHYREG permettant son calage à l'échelle du pixel.

4.2. Problématique de la cohérence spatiale des débits

Dans cette partie on cherche à mettre en évidence le problème d'incohérence spatiale de SHYREG qui peut apparaitre au moment de la régionalisation. On peut montrer ce problème à la fois d'un point de vue pratique (par l'exemple) ou d'un point de vue théorique en identifiant les raisons structurelles qui entrainent les incohérences. Enfin, on montrera de manière théorique que la cartographie de S0/A peut résoudre le problème d'incohérence. La mise en pratique de cette solution sera présentée dans les parties suivantes.

Ce problème est peu traité dans la littérature liée à la régionalisation. En général, on s'intéresse à l'estimation de quantiles de débits sur un nombre limité de bassin versants. Dans ce cas, il n'est pas illogique de considérer les bassins de manière indépendante car le problème de cohérence est limité. Néanmoins lorsque l'on cherche à créer une base de débits de crues à une résolution spatiale suffisamment fine plusieurs solutions sont employées. La première est de régionaliser directement les quantiles en les explicitant avec des relations soigneusement choisies (dépendance à la surface des bassins, coefficients contraints selon les quantiles) (Jennings et coll., 1993 ; CEDEX et DGA, 2011). Une deuxième approche peut être de régionaliser en pondérant davantage parmi les donneurs les bassins emboités (Skøien et coll., 2006), mais ceci ne permet pas de garantir la cohérence spatiale.

4.2.1. SHYREG : une méthode distribuée ?

Pour bien comprendre le problème d'incohérence spatiale de SHYREG il est nécessaire de revenir à des considérations sur la structure du modèle. Pour cela, on utilise une classification classique des modèles hydrologiques proposée par Beven (2011) :

- Un **modèle global** considère un bassin versant comme une entité unique sur laquelle toutes les grandeurs et phénomènes sont moyennés. On a donc besoin d'un unique jeu de paramètre de calage pour l'ensemble du bassin.
- Un **modèle distribué** se base sur la discrétisation du bassin versant en éléments de petites tailles (des mailles ou pixels). Les grandeurs et phénomènes sont moyennés sur chacun de ces éléments, et on a besoin d'un jeu de paramètre pour chacun d'entre eux.
- Un **modèle semi-distribué** est un modèle intermédiaire dans lequel le bassin versant est découpé en plusieurs sous-bassins de taille macroscopique. Chacun de ces sous-bassins est représenté de façon globale, et on doit caler un jeu de paramètre pour chacun.

Par essence SHYREG est une approche distribuée. En effet, les évènements pluvieux sont générés sur chaque pixel d'une grille kilométrique. La transformation en débit est également effectuée à l'échelle de cette grille grâce à un modèle qui fonctionne indépendamment en chaque pixel (par exemple le paramètre A peut varier d'un pixel à un autre). On ne considère véritablement les bassins versants qu'à partir de la phase d'agrégation et de réduction par la fonction d'abattement, la FTS (voir chapitre 2). Néanmoins, le calage de S0/A s'effectue de manière homogène pour chaque bassin versant. En effet, les données de débit sur lesquelles le modèle est

calé sont uniquement mesurées à l'exutoire des bassins et représentent l'évolution du débit généré par le bassin complet. La transition entre la modélisation à l'échelle du pixel et le calage du modèle à l'échelle du bassin s'effectue d'une part grâce à la FTS mais aussi grâce à l'hypothèse d'homogénéité de S0/A sur chaque bassin. Les seules exceptions à cette homogénéité sont les pixels dont la valeur du paramètre est fixée a priori selon l'occupation du sol (zones urbaines, péri-urbaines et plans d'eau) mais leur impact est mineur sur les débits simulés.

SHYREG repose donc sur une modélisation distribuée mais dont le calage est global. Le paramètre S0/A est donc bien un paramètre homogène qui représente une productivité moyenne du bassin versant.

4.2.2. Un exemple d'incohérence spatiale

On propose d'illustrer le problème d'incohérence spatiale de SHYREG au moyen d'un exemple. On utilise ici les résultats d'une ancienne version de SHYREG qui travaille en considérant le paramètre S0/A de manière homogène sur chaque bassin. C'est-à-dire que l'on cale une valeur homogène de S0/A pour chaque bassin versant jaugé. La régionalisation vise alors à évaluer une valeur homogène de S0/A sur d'autres bassins (les bassins cibles). Pour cela on met en œuvre la méthode de régionalisation évoquée au chapitre 2 (voir chapitre 5 pour les détails de mise en œuvre). C'est-à-dire que l'on établit une relation linéaire entre les valeurs calées du paramètre et des covariables externes moyennées sur les bassins de calage (mais connues sur l'ensemble du territoire). Cette relation est ensuite appliquée aux différents bassins non jaugés qui nous intéressent. Une interpolation spatiale des résidus est également appliquée par méthode de l'inverse de la distance au carré à partir des résidus de régression calculés sur les sites de calage. Il s'agit donc d'une régionalisation exacte qui retrouve les valeurs calées au niveau des sites jaugés. Toutes les grandeurs mises en œuvre dans la régionalisation correspondent bien à des grandeurs globales, moyennées sur chaque bassin.

Pour illustrer le problème d'incohérence spatiale, on extrait les quantiles de débits simulés le long d'un cours d'eau français, par SHYREG régionalisée par la méthode décrite. La résolution spatiale de la modélisation étant kilométrique on obtient des estimations de débits tous les kilomètres. Le jeu de bassins cibles est donc constitué des bassins successifs le long d'une rivière avec des exutoires espacés de 1 km. La majorité de ces bassins sont donc non jaugés. De manière arbitraire, on choisit le Loing, affluent en rive sud de la Seine, caractérisé par un bassin versant de 4 182 km². Cette rivière est notamment connue pour sa crue de 2016 qui a causé d'importants dégâts sur les villes de Montargis et Nemours (Perrin et coll., 2017). Les estimations SHYREG du débit décennal de pointe le long de cette rivière sont représentées sur la figure 4-1. Cette figure représente également les principaux affluents du Loing.

Sur la figure 4-1, on voit que, dans l'ensemble, le débit décennal simulé sur le Loing dans sa moitié sud croit d'amont en aval (du sud au nord). On observe assez logiquement de brusques augmentations du débit au niveau des confluences avec certaines affluents, notamment l'Ouanne qui est le plus important. Le débit atteint au maximum 140 m^3/s. Cependant on observe également une décroissance du débit sur la partie nord de la rivière. Le débit est minimal au niveau de la confluence avec le Lunain, avec une valeur d'environ 50 m^3/s, puis raugmente. Une telle diminution du débit n'est pas cohérente et ne peut pas être due à des phénomènes naturels. En fait, il s'agit d'un artefact

lié à la méthode de régionalisation choisie pour cet exemple. En effet, on dispose de plusieurs stations de calage au sein de ce bassin versant (sur le Loing ou ses affluents). L'une d'entre elles est située sur le Lunain à proximité de la confluence. Lors du calage, le bassin correspondant est affecté d'une valeur très faible de S0/A. La méthode de régionalisation choisie ne considère pas la structure en réseau des bassins, et lors de la phase d'interpolation spatiale elle attribue des valeurs de S0/A faibles aux bassins dont les exutoires sont situés à proximité de la station du Lunain. Ainsi, les bassins non jaugés du Loing dont l'exutoire est proche de la confluence avec le Lunain sont caractérisés par des valeurs de S0/A bien plus faibles que les bassins plus à l'amont. Cette différence de paramétrage est suffisamment importante pour ne pas être compensée par l'augmentation de la taille des bassins et aboutit à la décroissance observée des débits modélisés.

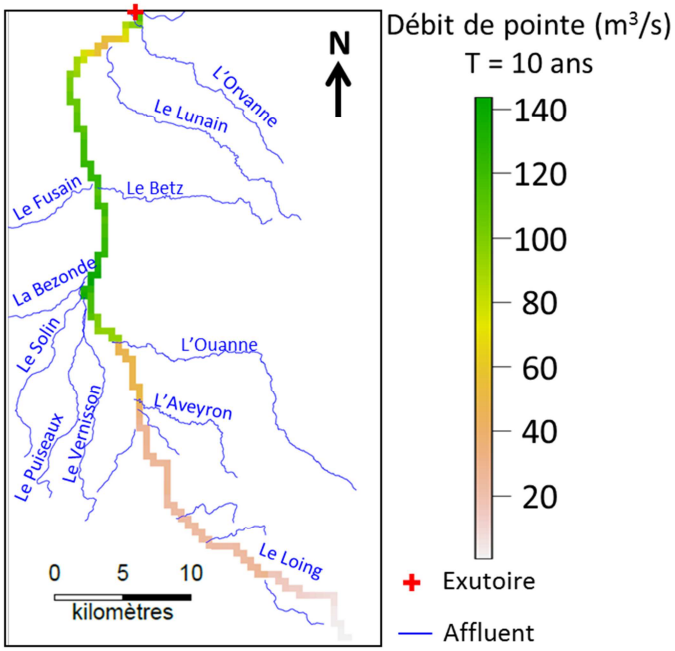


Figure 4-1 : *Débits de pointe décennaux le long du Loing, simulés par SHYREG avec un paramétrage global*

Dans le cas du Loing l'incohérence spatiale peut être attribuée à une station calée à une valeur très basse du paramètre. Mais cette valeur n'est pas nécessairement incohérente, il s'agit d'un petit bassin qui peut très bien être caractérisé par une productivité plus faible que ses voisins. On peut également attribuer l'incohérence à la méthode de régionalisation qui ne considère pas la structure en réseau des rivières. Une solution pourrait donc être d'utiliser une méthode d'interpolation qui prenne en compte les connexions entre les bassins. De telles méthodes existent et reposent généralement sur la géostatistique (Sauquet, 2006b ; Skøien et coll., 2006 ; Garreta et coll., 2010). Ces méthodes sont basées sur des combinaisons linéaires des valeurs connues, mais les poids ne sont plus fixés uniquement selon la distance entre les points, mais prennent en compte le réseau, donnant ainsi plus de poids aux bassins situés à l'amont ou à l'aval du site d'intérêt (Skøien et coll., 2006). Néanmoins de telles méthodes sont lourdes à mettre en œuvre et ne garantissent pas totalement la cohérence des débits : dans une situation où aucune station de calage n'est disponible à proximité à l'amont ou à l'aval du site d'intérêt un poids important est toujours donné à une station proche mais non connectée.

En outre, il semblerait maladroit de vouloir introduire la prise en compte de la structure spatiale des bassins uniquement dans la dernière étape de la méthode (la régionalisation) alors que les bassins sont considérés indépendamment les uns des autres dès le calage. Comme expliqué plus haut, mis à part les données de débits, aucun élément ne considère les relations amont-aval entre les bassins dans la modélisation SHYREG. Traiter le problème d'incohérence uniquement à travers la méthode de régionalisation ne permet pas non plus de prévenir des problèmes lors du calage comme des erreurs dans les données qui pourraient aussi bien mener à des incohérences spatiales. Comme expliqué au chapitre 3, l'échantillon de stations utilisées pour le calage de SHYREG est trop vaste pour pouvoir garantir une fiabilité totale des débits mesurés (surtout en crue). L'idée la plus appropriée semble donc d'imposer la cohérence spatiale des débits dans la structure même de SHYREG dès le calage.

4.2.3. La cartographie du paramètre pour reconnecter les bassins versants

L'idée la plus simple pour reconnecter les bassins au sein de la chaîne de calcul SHYREG est de ne plus faire l'hypothèse d'homogénéité de S0/A sur les bassins versants. On cherche une méthode de calage qui permette d'attribuer une valeur unique de S0/A à chaque pixel. Le paramètre représente alors la productivité hydrologique du pixel quel que soit le bassin considéré. Par conséquent, si l'on considère deux bassins emboités les débits simulés sur les pixels du bassin amont sont utilisés lors des simulations des deux bassins. On force ainsi une croissance des débits le long des cours d'eau quelles que soient les valeurs des paramètres attribuées aux différents pixels. La connexion entre les bassins est également rétablie : les débits simulés à l'amont participent à la simulation de l'aval.

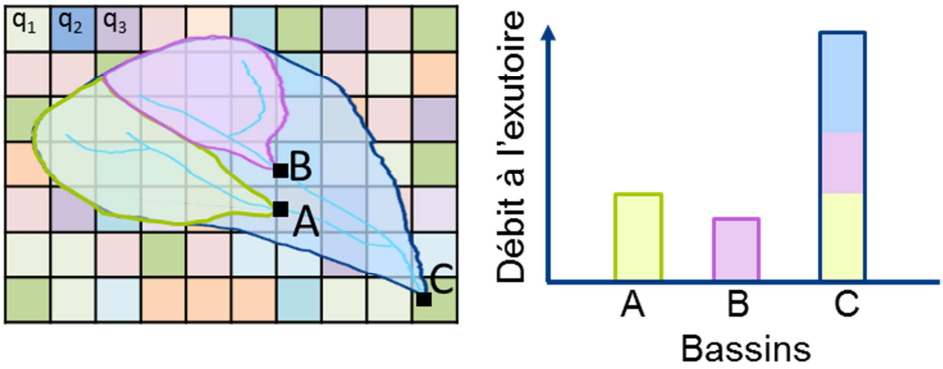


Figure 4-2 : *Schéma de la cohérence des débits introduite par la cartographie du paramètre S0/A*

Le principe de cohérence est décrit de manière schématique sur la figure 4-2. Dans ce schéma tous les pixels se sont vus attribuer une valeur de S0/A ce qui entraine une valeur unique des débits simulés en chaque pixel. Lorsque l'on considère les bassins A, B et C les valeurs des différents pixels sont agrégées pour conduire à un certain débit estimé aux exutoires. Néanmoins, le bassin C étant à l'aval des bassins A et B, on peut également considérer que le débit à l'exutoire de C est formé des débits aux exutoires de A et B et de ceux produits par les pixels n'appartenant ni à A ni à B. Cette vue est schématique et on rappelle que la phase d'agrégation des quantiles comporte une étape d'abattement (voir chapitre 2) qui n'est pas représentée ici.

Outre le fait d'assurer une croissance des débits le long des rivières, la cartographie du paramètre permet qu'un même pixel soit caractérisé par une unique réponse à un même évènement pluvieux, ce qui apparait assez satisfaisant.

Sur le principe, l'introduction de la cohérence spatiale dans SHYREG est assez simple : il suffit de cartographier le paramètre (c'est-à-dire attribuer une valeur unique du paramètre à un pixel). Cependant, en pratique, la mise en œuvre est plus délicate. En effet, les données de calage ne sont disponibles qu'à l'échelle des bassins versants. On ne sait donc rien sur la variabilité des débits et du paramètre S0/A à l'intérieur des bassins. C'est pour cette raison que l'on fait une hypothèse d'homogénéité sur chaque bassin. On pourrait, dans un premier temps, vouloir simplement cartographier les valeurs homogènes ainsi calées. Toutefois, la présence de bassins emboités au sein de l'échantillon de calage rend cette étape impossible. Par exemple, si on se place dans le cas figure 4-2, on cale une valeur homogène de S0/A sur chacun des trois bassins, on obtient alors trois valeurs différentes de paramètre. Si on essaie de cartographier ces paramètres, quelle valeur attribue-t-on aux pixels du bassin A qui appartienne aussi au bassin C ? Si on attribue la valeur calée sur le bassin C, alors les simulations à l'exutoire de A seront dégradées par rapport au calage. Si on attribue la valeur calée pour le bassin C, ce sont les simulations en A qui sont dégradées. En fait, il n'existe pas de solution dans le cadre de l'hypothèse d'homogénéité.

4.3. Cartographie du paramètre

Dans cette partie, on s'intéresse à des solutions pour pouvoir cartographier le paramètre S0/A. Dans tous les cas, on ne fait plus l'hypothèse d'homogénéité de S0/A sur les bassins versants mais sur des entités de taille plus faible. On cherche donc à intégrer une variabilité spatiale du paramètre au sein des bassins versants. De manière abusive on parlera de descente d'échelle spatiale pour caractériser cette opération.

4.3.1. Méthodes de calages semi-distribués

4.3.1.1. Principe

On envisage toujours le cas des trois bassins de la figure 4-2. On ne fait plus l'hypothèse d'homogénéité sur chaque bassin. On ne dispose d'aucune information sur l'hydrologie à l'intérieur des bassins A et B. Néanmoins, on possède des informations à l'intérieur du bassin C : les données issues des stations aux exutoires amont (A et B). On se propose donc de faire varier la valeur du paramètre à l'intérieur du bassin C en prenant en compte la présence des bassins jaugés A et B. Comme on ne dispose d'aucune autre information, on fait l'hypothèse d'homogénéité sur les bassins A et B, ainsi que sur la zone de C non incluse dans A et B (zone bleue sur la figure 4-2).

En généralisant, l'idée décrite précédemment à tous les bassins de notre échantillon, on obtient une méthode de calage semi-distribuée, dans laquelle les entités calées sont définies par la présence de stations hydrométriques. En pratique, on pourrait qualifier ce genre d'approche de « calage régional » dans la mesure où le calage s'effectue en exploitant les données de plusieurs sites d'une région (ici un grand bassin versant), mais ce terme est généralement réservé aux méthodes qui combine calage et régionalisation en une seule étape (Fernandez et coll., 2000 ; Parajka et coll., 2007).

On propose deux types d'approches : l'approche dite « sup » et l'approche dite « complémentaire » (pour laquelle on testera différents algorithmes de calage).

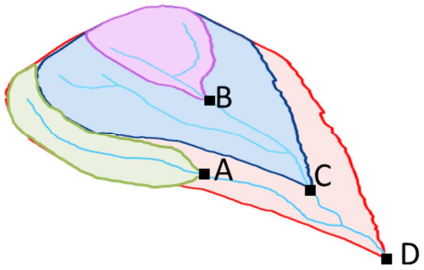
4.3.1.2. Approche « sup »

L'approche dite « sup » est une solution extrêmement simple pour cartographier le paramètre S0/A dans le cas de bassins emboités. Elle ne nécessite pas de recaler la méthode par rapport au cas global, elle se contente de combiner les valeurs calées pour chaque bassin. Dans cette approche, la priorité est donnée au bassin supérieur (c'est-à-dire le plus à l'amont). Si on considère deux bassins emboités, la valeur du paramètre du bassin amont est attribuée aux pixels du bassin amont, et la valeur du paramètre du bassin aval est attribuée aux autres pixels. On a donc, nécessairement, une dégradation des performances du bassin aval par rapport au cas global.

Plusieurs autres méthodes de recombinaison ont été testées, comme donner la priorité au bassin inférieur, utiliser une valeur moyenne ou médiane du paramètre (Aubert, 2012), mais c'est

l'approche « sup » qui a finalement été conservée. C'est cette approche qui a été employée pour la mise en œuvre de la base de données SHYREG-débit de 2012 (Arnaud et coll., 2012).

4.3.1.3. Approche « complémentaire »



Bassin	Complémentaire
A	A
B	B
C	C-B
D	D-(C+A)

Figure 4-3 : *Schéma de définition des complémentaires de bassins*

Dans l'approche complémentaire, on procède à un véritable calage du paramètre attribué à chaque entité spatiale que l'on appelle un complémentaire de bassin. Un exemple de découpage en complémentaires est présenté sur la figure 4-3. Le calage s'effectue en utilisant les mêmes données (quantiles de pointe et journaliers de faibles périodes de retour) et la même fonction objectif (erreur relative pondérée sur les quantiles) que dans le cas global. Néanmoins les bassins ne peuvent plus être calés indépendamment les uns des autres et l'attribution d'un paramètre à un complémentaire peut affecter le calage d'un autre complémentaire. On définit des groupes de bassins (deux groupes de bassins ne peuvent pas être emboités) et chaque groupe peut être calé indépendamment l'un de l'autre. Du fait de la grande interconnexion des bassins entre eux, le problème d'optimisation peut devenir complexe avec beaucoup de variables liées les unes aux autres. En outre, le calcul de la fonction objectif nécessite la création d'une carte de S0/A, l'extraction des débits SHYREG correspondant à chaque pixel, l'application de la FTS et la prise en compte du débit de base. Ce procédé est couteux en temps de calcul. Aussi il est difficile de réaliser l'optimisation en une seule étape, ou de parcourir toute la gamme de valeur possible de S0/A.

Tableau 4-1 : *Corrections sur S0/A associées aux classes d'erreur sur les débits de calage*

Classe de er	δS0/A
]-∞ ; -1]	+0.1
]-1 ; -0.5]	+0.05
]-0.5, -0.1]	+0.02
]-0.1 ; -0.02]	+0.01
]-0.02 ; 0.02[	0
[0.02 ; 0.1[	-0.01
[0.1 ; 0.5[	-0.02
[0.5 ; 1[	-0.05
[1 ; +∞[	-0.1

Pour permettre un calage relativement rapide, on exploite la relation monotone (et croissante) qui existe entre le paramètre à caler et les débits simulés. Si les débits sont trop forts, on sait qu'il faut diminuer le paramètre. On procède donc par itérations successives en corrigeant à chaque pas les valeurs de S0/A. On propose plusieurs algorithmes pour effectuer ce calage. Pour cela, on définit une table de correction : à toute valeur de l'erreur relative sur les six débits de calage (er), on associe une correction à appliquer sur le paramètre δS0/A (en pratique on définit des classes d'erreur et des

corrections associées). Si la valeur de la fonction objectif est trop faible, on augmente le paramètre et inversement. Il faut évidemment qu'une erreur nulle (ou suffisamment faible) soit associée à une correction nulle. La table de correction utilisée est fournie dans le tableau 4-1.

a. Algorithme descendant

Dans cet algorithme, on considère que les débits d'un bassin ne peuvent être corrigés que par la valeur du paramètre attribuée au complémentaire le plus à l'aval du bassin (celui où se trouve la station de mesure). Ce complémentaire n'appartient qu'à un seul bassin versant, c'est donc le levier privilégié pour corriger les débits simulés sur ce bassin. Tout se passe donc comme si on calait les complémentaires successifs de l'amont vers l'aval.

0. Initialisation : on affecte une valeur de S0/A (celle calée avec la méthode globale) à tous les complémentaires (cette valeur initiale impacte davantage le temps de calcul que ses résultats).
1. On procède à la simulation SHYREG et on évalue la fonction objectif sur chaque bassin.
2. Une valeur de correction est attribuée à chaque bassin en fonction de la valeur de la fonction objectif et du tableau 4-1.
3. La correction est appliquée à la valeur de S0/A du complémentaire le plus à l'aval, du bassin.
4. On répète les étapes 1, 2, 3, et 4 jusqu'à stabilisation des valeurs de S0/A.

Cet algorithme possède l'avantage de la simplicité. Au fur et à mesure des itérations les complémentaires les plus à l'amont des rivières atteignent rapidement leur valeur optimale et ne sont plus modifiés par la suite. Ainsi, la stabilité de S0/A se propage de l'amont vers l'aval assez rapidement. On aurait pu envisager de véritablement caler les complémentaires de l'amont vers l'aval, cependant cela aurait nécessité de pratiquer autant de simulation qu'il y a de bassins de calage (1 535 dans le cas de l'échantillon de travail), ce qui est beaucoup moins rapide que l'algorithme proposé.

Néanmoins, on peut facilement imaginer que les résultats se dégradent d'autant plus que l'on descend les rivières. En effet, au fur et à mesure que l'on se déplace vers l'aval, le calage des complémentaires devient de plus en plus contraint par ce qui a été calé à l'amont. On peut même arriver à des situations où les complémentaires de l'aval se mettent en borne pour compenser des valeurs calées à l'amont, dans ce cas les débits simulés à l'aval sont généralement de piètre qualité.

b. Algorithme autocorrectif

Dans cet algorithme, on considère que l'ensemble des complémentaires inclus dans un bassin versant doivent être corrigés lorsque les simulations sur ce bassin sont insatisfaisantes. Puisque certains complémentaires appartiennent à plusieurs bassins, il faut leur attribuer une valeur qui permette de corriger au mieux les débits de tous ces bassins. Pour tout groupe de bassins jaugés l'algorithme de calage est le suivant :

0. Initialisation : on affecte une valeur de S0/A (celle calée avec l'approche globale) à tous les complémentaires.
1. On procède à la simulation SHYREG et on évalue la fonction objectif sur chaque bassin.

2. Une valeur de correction est attribuée à chaque bassin en fonction de la valeur de la fonction objectif et du le tableau 4-1.
3. On calcule une correction pour chaque complémentaire. Pour un complémentaire donné, on calcule la moyenne des corrections associées aux bassins dont le complémentaire fait partie, pondérée par la part du bassin occupé par le complémentaire.
4. On somme la valeur de S0/A de chaque complémentaire avec la correction.
5. On répète les étapes 1, 2, 3, 4 et 5 jusqu'à stabilisation des valeurs de S0/A.

On conçoit sans trop de difficulté que cet algorithme est nécessairement plus long à converger que l'algorithme descendant puisque les valeurs de tous les complémentaires peuvent être modifiées à chaque étape. Néanmoins, cet algorithme devrait permettre de ne pas pénaliser les bassins les plus en aval.

4.3.2. Résultats

Pour comparer les résultats des différentes approches de calage, on réutilise la méthodologie de comparaison présentée au chapitre 3. On s'intéresse toujours aux performances locales (en sites jaugés) de la méthode. On compare les versions de SHYREG suivantes :

-« glob ». Il s'agit de la version de SHYREG employant un calage homogène par bassin. Elle considère chaque bassin indépendamment des autres et fait l'hypothèse d'homogénéité de S0/A. La cohérence spatiale des débits n'est pas assurée. Il s'agit de la version sélectionné en fin de chapitre 3.

-« sup ». Il s'agit de l'approche décrite au paragraphe 4.3.1.2.

-« complem0 ». Il s'agit de l'approche « complémentaire » calée avec l'algorithme descendant (paragraphe 4.3.1.3.a)

-« complem1 ». Il s'agit de l'approche « complémentaire » calée avec l'algorithme autocorrectif (paragraphe 4.3.1.3.b).

4.3.2.1. Restitution des quantiles de calage

Pour comparer les capacités de restitution des quantiles de calage des différentes versions, on trace les distributions du critère ERQ. Ces distributions sont présentées sur la figure 4-4. Les mêmes allures de distributions sont observées pour les deux saisons. Tout d'abord on peut logiquement voir, que la méthode sup conduit à une dégradation du critère ERQ par rapport à l'approche glob. Ce résultat était attendu puisque l'approche « sup » consiste à modifier a posteriori les valeurs du paramètre calé avec la méthode « glob », de manière à pouvoir le cartographier. Les méthodes « complémentaires » (complem0 et complem1) conduisent à des distributions de ERQ quasi semblables et légèrement supérieures à celles de la méthode « glob ». Ce résultat tend à prouver la pertinence de caler S0/A à une échelle inférieure à celle du bassin. On rappelle que la méthode « glob » ne permet pas d'assurer la cohérence des débits contrairement aux trois autres approches.

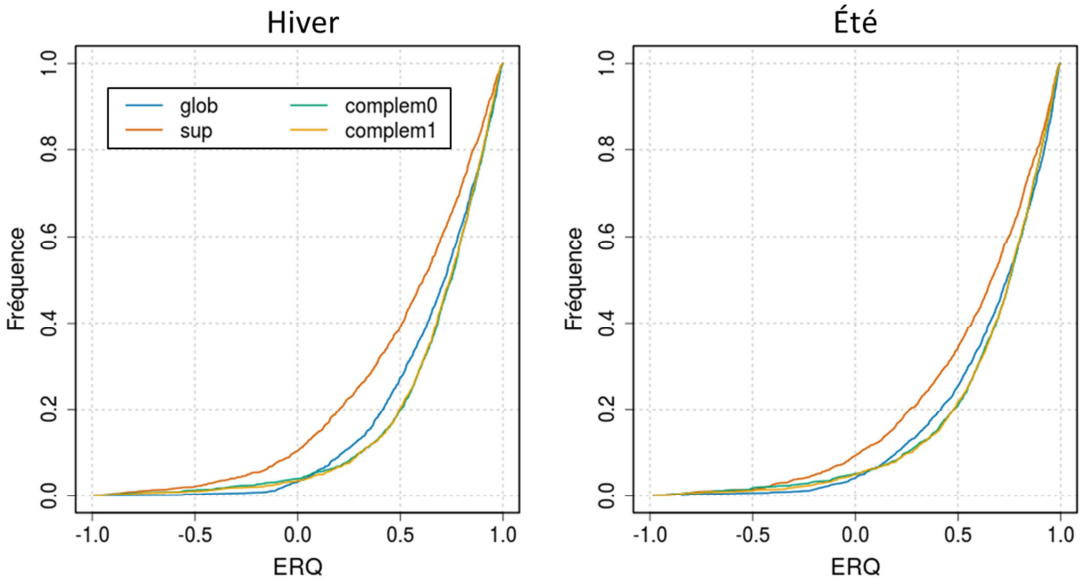


Figure 4-4 : *Distribution du critère ERQ pour les différentes méthodes de calage*

Pour tenter de différencier les approches « complémentaires », on représente également les distributions d'ERQ sous la forme de diagrammes en boites pour différentes classes de surfaces des bassins. Ces diagrammes sont présentés sur la figure 4-5. Encore une fois les allures sont assez proches entre les saisons hiver et été. On remarque que plus les bassins considérés sont grands, plus les performances de l'approche sup sont dégradées par rapport à celles de l'approche « glob ». Ce résultat correspond bien au fait de conserver la valeur calée de l'approche « glob » sur les bassins en amont, et de successivement dégrader le paramètre au fur et à mesure que l'on avance vers l'aval. Les performances des approches « complémentaires » sont supérieures à celle de la méthode globale (« glob ») sur les plus petits bassins (inférieurs à 1000 km²), mais la méthode globale reprend le dessus pour les plus grands bassins. On peut également voir que les deux méthodes « complémentaires » se comportent de manière similaire sur les plus petits bassins, mais la méthode complem1 (par algorithme autocorrectif) surpasse légèrement la méthode descendante sur la plus grande classe de surfaces (bassins supérieurs à 5000 km²). Ce résultat illustre que le problème d'optimisation par complémentaire devient particulièrement complexe sur les plus grands bassins. En effet, dans le cas de l'algorithme descendant, les valeurs des débits simulés sur les plus grands bassins sont extrêmement contraintes par les valeurs calées sur les sous bassins amont, et il devient difficile de compenser certains effets avec le seul complémentaire aval. L'algorithme autocorrectif s'en sort mieux car il est capable de modifier les valeurs calées à l'amont si les débits simulés à l'aval sont trop biaisés. Néanmoins, les corrections sont pondérées par les recouvrements entre les bassins et les « complémentaires », il est donc possible que l'effet d'autocorrection soit trop ténu pour permettre un calage satisfaisant sur les grands bassins. Cependant, en augmentant l'effet autocorrectif on risque de dégrader les performances des bassins en amont. Avec l'approche SHYREG on porte plus d'attention aux simulations sur les petits bassins (majorité des bassins non jaugés) que sur les grands bassins. On n'envisage donc pas de réajustement de l'algorithme autocorrectif dans le cadre de ce travail.

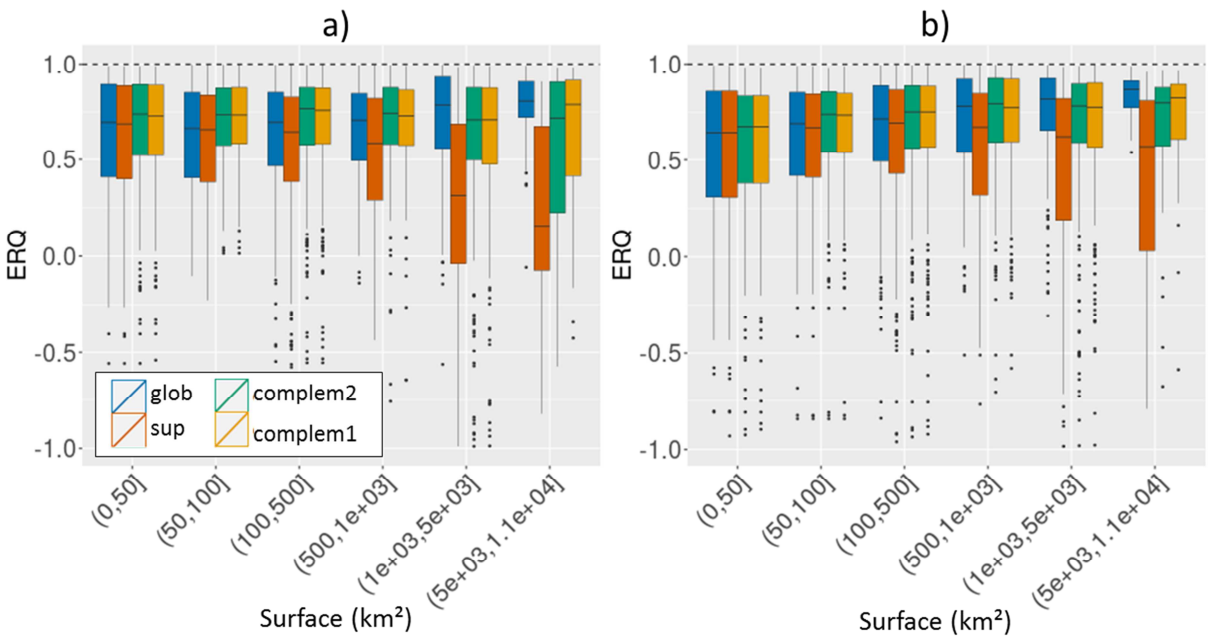


Figure 4-5 : *Distributions d'ERQ par classe de surface pour les différentes méthodes de calage a) Saison hiver ; b) saison été*

4.3.2.2. Restitution des rapports des rapports QP/QJ

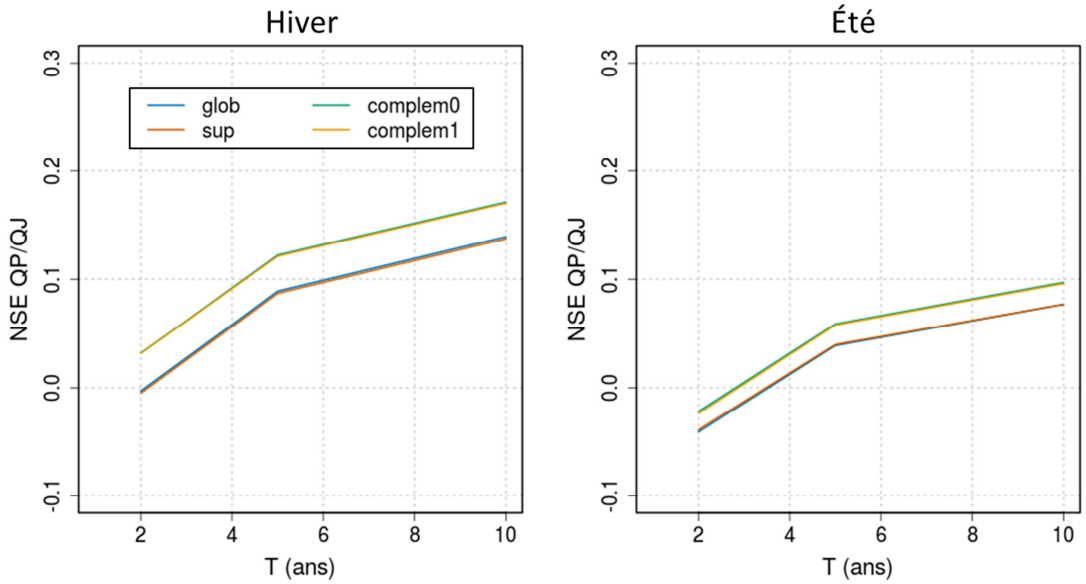


Figure 4-6 : *Critères sur la restitution des rapports QP/QJ*

Les critères sur la restitution des rapports entre quantiles de pointe et journaliers sont fournis sur la figure 4-6. On y voit nettement deux groupes de méthodes : les méthodes «glob» et sup d'une part et complem0 et complem1 conduisent à des résultats très similaires. C'est notamment étonnant dans le cas de la méthode sup qui conduit à une bien moins bonne restitution des quantiles que les autres. On peut supposer que les rapports entre les quantiles infra-décennaux sont peu impactés par la dégradation des performances observés ci-avant. On peut également voir que les méthodes

« complémentaires » conduisent à une meilleure restitution des rapports QP/QJ que l'approche globale.

4.3.2.3. Extrapolation vers les extrêmes

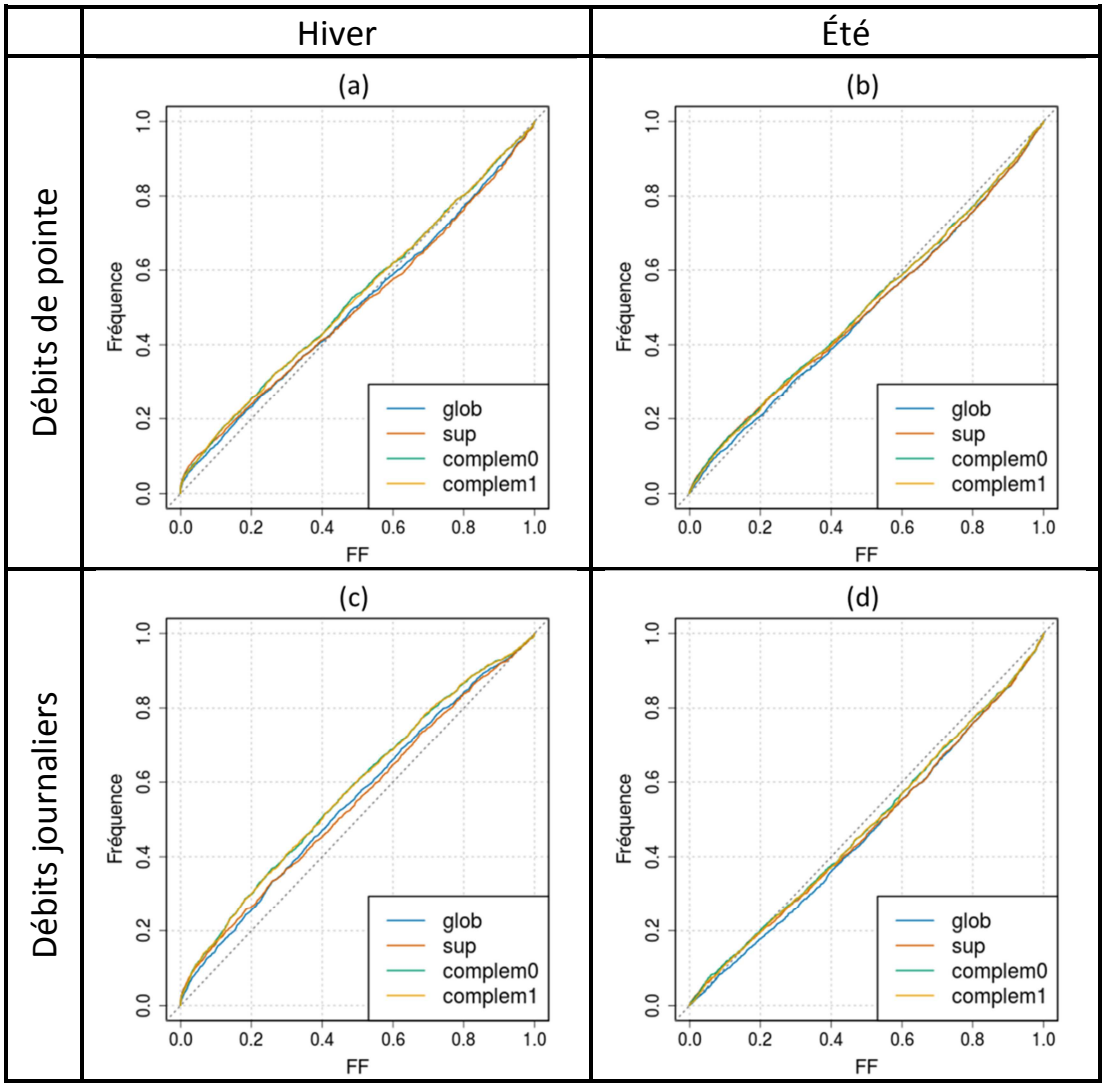


Figure 4-7 : *Distribution des critères FF pour les différentes méthodes de calage*
Débits de pointe : (a) et (b). Débits journaliers : (c) et (d). Saison hiver : (a) et (c). Saison été : (b) et (d).

Les distributions du critère FF sur les capacités d'extrapolation des versions de SHYREG calées avec les différentes méthodes sont présentées sur la figure 4-7. On peut voir que les quatre méthodes conduisent à de bonnes performances en extrapolation. Des différences sont surtout notables sur la saison hiver : dans le cas des débits journaliers, les deux méthodes de calage par complémentaire semble aggraver la tendance à la surestimation du modèle observée au chapitre 3. Dans le cas des débits de pointe, on a également apparition d'une très légère tendance à la surestimation des quantiles avec les méthodes par complémentaire, mais les courbes restent proches de la distribution théorique sous hypothèse de justesse. Dans le cas de la saison estivale, les différentes distributions sont plus semblables les unes aux autres et également très proche de la première bissectrice ce qui démontre de bonnes capacité d'extrapolation.

4.3.2.4. Stabilité vis à vis des données de calage

Les critères SPAN de stabilité sont fournis sur la figure 4-8. Les allures des courbes sont identiques à celles obtenues au chapitre 3. On peut retenir que toutes les approches par calage semi-distribué conduisent à des estimations plus stables que celles obtenues avec le calage global. C'est l'approche sup qui apparait comme la plus stable, suivie par les deux approches « complémentaires ». L'algorithme descendant semble conduire à des valeurs légèrement plus stables que l'algorithme autocorrectif en hiver, alors que l'inverse est observé en été.

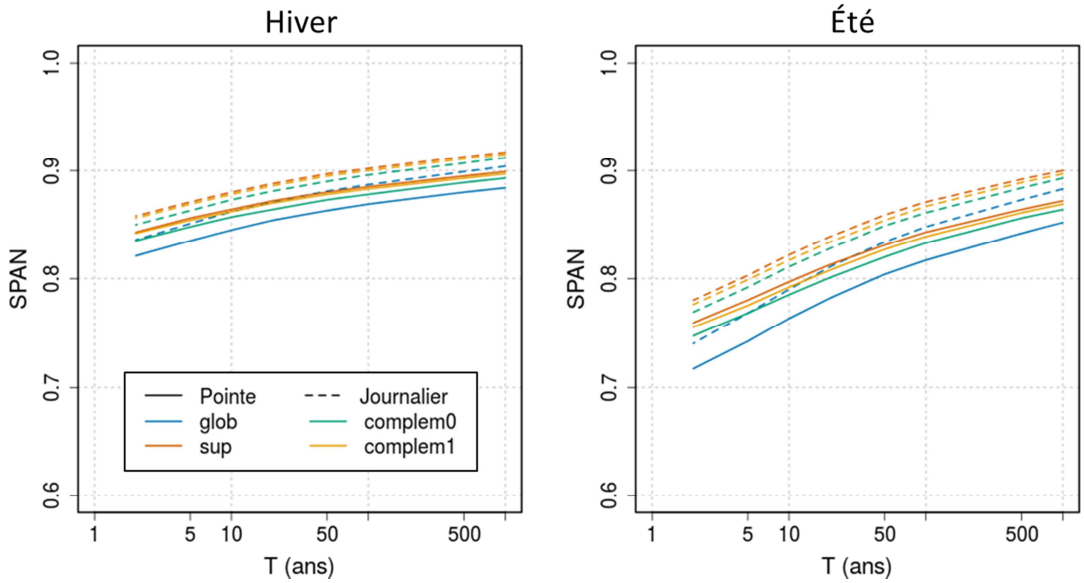


Figure 4-8 : *Critères de stabilité pour les différentes méthodes de calage*

4.3.2.5. Régionalisabilité

Les valeurs des critères de régionalisabilité du modèle selon les méthodes sont présentées sur la figure 4-9. On peut voir que les meilleures performances sont atteintes avec le modèle global. Ensuite les méthodes complem1 et sup semblent atteindre des niveaux comparables (avec un classement différent selon la saison) alors que la méthode complem0 est celle conduisant à la plus faible valeur du critère de régionalisabilité. Dans le cas de la méthode complem0 on attribue ce résultats aux complémentaires les plus à l'aval qui prennent des valeurs aberrantes pour tenter de corriger les erreurs introduites plus à l'amont.

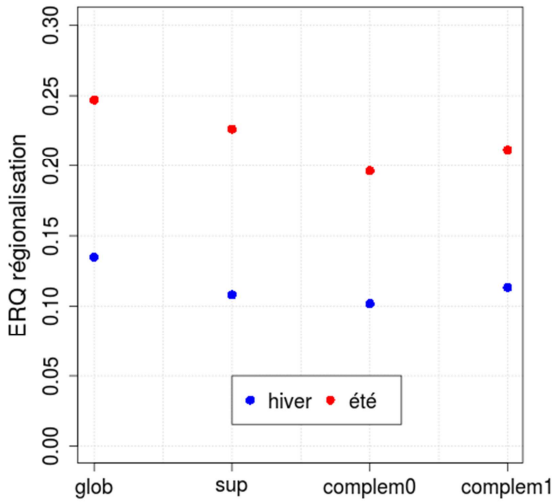


Figure 4-9 : *Critères d'explicabilité de S0/A pour les différentes méthodes de calage*

4.3.3. Synthèse

La méthode globale atteint de meilleures performances que les autres en termes de régionalisabilité. Cependant, on ne peut pas totalement la comparer aux autres dans la mesure où elle n'assure pas la cohérence spatiale des débits (elle dispose donc d'une contrainte en moins par rapport aux autres).

Les différents résultats présentés démontrent que l'approche sup, méthode initialement utilisée pour la régionalisation de SHYREG, est clairement surpassée par les méthodes de calage par complémentaire. Ce résultat semble logique puisque l'approche sup ne constitue pas une méthode de recalage des différents sous bassins mais seulement une règle de cartographie du paramètre calé avec l'approche globale. On est donc amené à préférer l'une des deux approches par calage complémentaire. Ces deux méthodes conduisent à des performances très similaires du point de vue de la plupart des critères (restitution des quantiles et des rapports QP/QJ, stabilité et extrapolation vers les extrêmes), néanmoins le critère de régionalisabilité, et l'étude de la restitution des quantiles de calage par classe de surface des bassins semblent indiquer que l'algorithme de calage autocorrectif est plus intéressant bien que plus lourd à mettre en œuvre.

Le passage d'une méthode de calage qui n'assure pas la cohérence spatiale des débits à une méthode qui le fait, est un avantage certain pour une méthode qui vise à estimer des quantiles de crues à une résolution spatiale très fine. On choisit donc de travailler dorénavant avec un calage par complémentaire via un algorithme autocorrectif.

4.4. Introduction à la régionalisation simultanée

Les méthodes de calage semi-distribuées par complémentaire permettent de caler S0/A à une échelle spatiale inférieure à celle du bassin. Cette étape permet donc de connaitre le paramètre à une échelle plus fine et donc possiblement de mieux identifier ses variations locales. Néanmoins, le découpage en complémentaires pose des problèmes. En effet, les entités spatiales utilisées sont définies selon les bassins de calage utilisés et n'ont pas de raison d'être hydrologiquement plus homogènes que les bassins versants (à part le fait d'être plus petits). De plus, l'utilisation d'un calage complémentaire pose des questions lorsque l'on envisage la régionalisation : comment intégrer les bassins cibles dans le découpage défini par les bassins de calage ? On peut par exemple :

- Considérer que les bassins cibles définissent un nouveau découpage en complémentaires. La régionalisation permet de transférer les valeurs de S0/A des complémentaires des bassins donneurs à ceux des bassins receveurs. On obtient alors une carte de S0/A pour les bassins de calage et une pour les bassins cibles.
- Directement lire les valeurs des paramètres pour les bassins cibles sur la carte des complémentaires des bassins donneurs. Dans ce cas, la régionalisation ne sert qu'à combler les zones où on ne dispose d'aucun bassin de calage.

Dans tous les cas, certains problèmes se posent. Par exemple, si l'on considère que le jeu de bassins cibles est formé par tous les bassins de la BNBV (140 000 exutoires), alors le découpage en bassins receveurs est nécessairement beaucoup plus fin que celui de bassins donneurs ce qui pose un problème de changement d'échelle lors de la régionalisation.

Pour limiter ces problèmes de changement d'échelle, on propose un calage de S0/A directement à l'échelle du pixel. Dans ce cas, il parait évident que le nombre de degrés de liberté est beaucoup trop grand par rapport à la quantité de données disponibles. Il est donc nécessaire de rajouter des contraintes sur les valeurs de S0/A. Pour cela on choisit d'imposer S0/A comme une combinaison linéaire de différentes variables externes connues à l'échelle du pixel. Le rôle du calage est alors de définir au mieux les poids de cette relation linéaire pour retrouver les quantiles de calage.

En fait, cette méthode revient à procéder en même temps au calage et à la régionalisation. Jusqu'ici, on procédait par post-régionalisation. C'est-à-dire que l'on cherchait tout d'abord la valeur optimale du paramètre S0/A (phase de calage), puis on cherchait à expliquer la variabilité de ce paramètre pour pouvoir l'estimer en d'autres sites (phases de régionalisation). Ici, l'idée est de directement chercher à trouver la meilleure façon d'expliquer la variabilité de S0/A qui permette d'optimiser la fonction objectif de calage. Cette relation est bien sûr développée sur les sites de calage, puis peut être appliquée à d'autres bassins. On parle alors de régionalisation simultanée.

Le principe de la méthode itérative de calage et régionalisation simultanés est présenté sur la figure 4-10. On y voit que S0/A est définit à l'échelle d'une grille kilométrique comme une combinaison linéaire de p covariables préalablement sélectionnées. À partir de cette grille, on peut appliquer la relation pluie-débit de SHYREG en chaque pixel, puis agréger et réduire les quantiles

ponctuels simulés grâce à la FTS pour obtenir des quantiles aux exutoires de bassins jaugés. En comparant ces valeurs aux quantiles estimés avec une loi de type GEV dont le paramètre de forme est borné, on peut calculer la valeur de la fonction objectif du calage de SHYREG en chaque site. On utilise une fonction objectif globale qui considère tous les sites à la fois. On choisit simplement de sommer les fonctions erreurs relatives calculées sur chacun des sites. Cette erreur globale est associée au vecteur des coefficients utilisés dans la combinaison linéaire des covariables externes. On cherche donc à trouver le vecteur qui doit permettre de minimiser l'erreur de calage. La relation entre le vecteur de coefficients et la fonction objetif n'est pas linéaire, on utilise donc une méthode d'optimisation non linéaire. On choisit une méthode de quasi-Newton de type L-BFGS-B (Byrd et coll., 1995) qui est couramment employés pour résoudre des systèmes d'équations-non linéaires en imposant des bornes inférieures et supérieures aux paramètres. L'algorithme de quasi-Newton utilisé est celui de la fonction *optim* de la bibliothèque *stats* du logiciel R (R Core Team, 2016). On notera que les pixels dont la valeur est imposée a priori selon des classes d'occupation du sol (zones urbaines, périurbaines et plans d'eau) ne participent pas à l'optimisation.

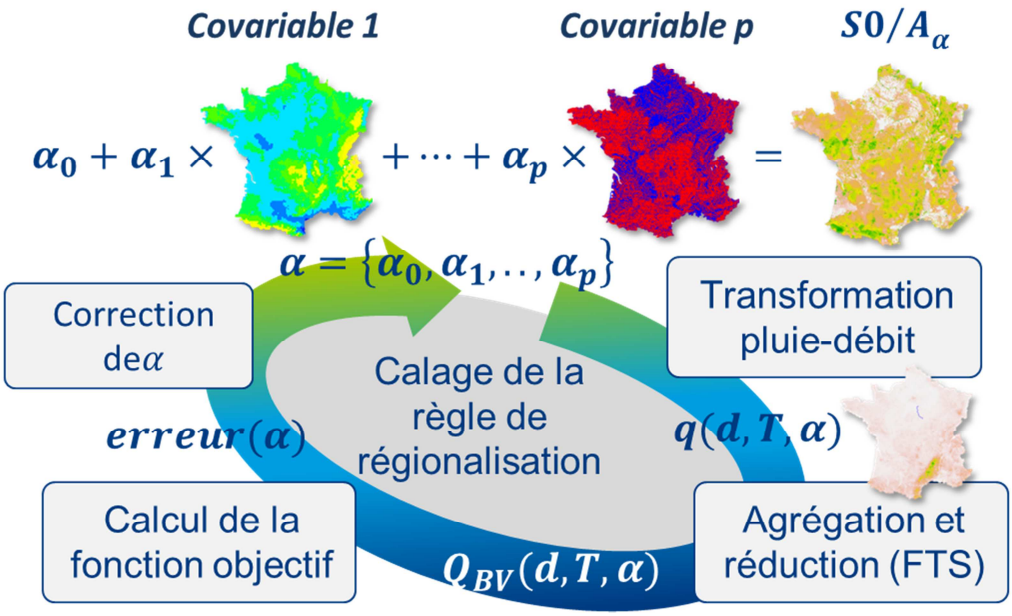


Figure 4-10 : *Principe de la méthode de régionalisation simultanée de SHYREG*

Une fois les paramètres de la combinaison linéaire identifiés, on peut créer une carte du paramètre S0/A à une résolution kilométrique. On peut tenter de corriger cette cartographie en procédant à une correction spatiale. On considère l'erreur sur la valeur de S0/A moyenne en chaque bassin et on la compare à la valeur optimale obtenue lors du calage de S0/A bassin par bassin. À partir de ces deux valeurs on calcule une erreur moyenne sur le bassin que l'on applique au pixel centroïde du bassin versant considéré. On peut alors procéder à une interpolation spatiale pour créer une grille correctrice que l'on peut sommer à la grille de S0/A. Ce procédé permet de corriger certaines tendances spatiales non considérées par la régression.

Cette régionalisation simultanée possède plusieurs avantages. Tout d'abord, le fait de procéder au calage et la régionalisation en une seule étape permet de simplifier la chaine de calcul en limitant le nombre d'étapes consécutives. Ensuite, la méthode permet de s'assurer de la cohérence spatiale des débits sans procéder à un découpage arbitraire des bassins versants en sous-bassins. Enfin, la

méthode propose une variabilité du paramètre de S0/A à l'échelle kilométrique, ce qui constitue une importante étape dans le sens de la désagrégation spatiale de la méthode SHYREG. On peut bien sûr s'interroger sur la pertinence de la variabilité à l'intérieur des bassins versants (on ne peut pas valider ce qui se passe à l'intérieur des bassins, mais seulement le résultat simulé à l'exutoire des bassins), néanmoins ce genre de cartographie de S0/A peut-être une première étape intéressante si l'on souhaite adapter SHYREG pour l'évaluation de l'aléa hydrologique à une échelle fine.

Cependant, la méthode simultanée possède quelques limites. Tout d'abord, elle conduit directement à une version régionalisée de la méthode. On ne dispose pas d'estimation « locale des quantiles ». Si l'on souhaite caler SHYREG à partir de données issues d'une station il est préférable d'utiliser l'une des approches de calage par bassin ou par complémentaire. Ensuite, l'optimisation conduite est très couteuse en termes de temps de calcul, plusieurs heures sont en effet nécessaire pour la détermination d'une régression à trois descripteurs. De ce fait, il semble délicat de procéder à une sélection automatique des covariables externes, ce qui nécessiterait de multiplier le nombre de simulations à réaliser lors du calage. Il est donc nécessaire d'estimer les covariables à utiliser a priori. Il est donc nécessaire d'avoir une bonne connaissance de la variabilité du paramètre S0/A.

Pour ces deux raisons, les résultats de la régionalisation simultanée de SHYREG ne sont pas présentés dans ce chapitre. En effet :

- Bien qu'il s'agisse d'une méthode de calage, les résultats produits constituent une base de débits régionalisés, ils ne sont pas comparables à débits « locaux » présentés dans les autres parties de ce chapitre. Les résultats de la méthode de régionalisation simultanée seront donc présentés dans le chapitre 7 consacré aux résultats de l'application de méthodes de régionalisations de SHYREG.
- Le paramètre S0/A n'est pas une grandeur physique. La connaissance de sa variabilité ne peut pas provenir de mesures directes ou de connaissances a priori sur les bassins versants. De manière à se forger un a priori fiable sur les covariables à utiliser pour expliquer la variabilité de S0/A il apparait nécessaire de travailler tout d'abord à une échelle plus grande que celle du pixel. En effet, en cherchant à expliquer S0/A à l'échelle des complémentaires et/ou des bassins versants, on peut employer des méthodes de sélections automatiques des descripteurs. La multiplication des tests, permet alors de réduire considérablement le nombre de covariables candidates pour expliquer la variabilité de S0/A.

Pour pouvoir correctement appliquer la méthode de régionalisation simultanée et évaluer sa pertinence par rapport aux approches par calage et post-régionalisation, il est donc nécessaire de travailler d'abord à la régionalisation des méthodes par calage global ou complémentaire.

4.5. Conclusion

Dans ce chapitre on s'est intéressé principalement à la manière de s'assurer de la cohérence spatiale des débits simulés par SHYREG et à la façon de gérer les bassins emboités. On a pu identifier deux types d'approches :

- Une approche par calage semi-distribuée dans laquelle le paramètre S0/A est calé sur des sous-bassins dont le contour est défini par les différents sites utilisés.
- Une approche par calage distribuée dans laquelle le paramètre S0/A est calé et régionalisé simultanément pour aboutir à la création d'une carte de paramètre à une résolution kilométrique.

La première méthode a pu être comparée à l'approche classique dans laquelle chaque bassin est calé de manière indépendante et a montré ses bonnes capacités de calage en plus de sa capacité à assurer la cohérence spatiale des débits simulés.

La seconde méthode conduit directement à une base de débits régionalisés. En outre, elle repose sur une sélection a priori de variables externes qui doivent permettre d'expliquer la variabilité de S0/A à l'échelle de pixel. Pour pouvoir procéder à une comparaison qui ait du sens, mais aussi pour construire cette connaissance déterministe, la mise en œuvre de cette approche distribuée en sera mise en œuvre que dans le chapitre consacrée à la régionalisation de SHYREG (voir partie II).

Partie II : Régionalisation de SHYREG

« The parameter is an unknown constant
and no probability statement concerning its value may be made »
(Neyman, 1937, p349)

Chapitre 5 : Méthodes de régionalisation

5.1. Introduction....131
5.2. État de l'art....132
5.2.1. Généralité et définitions....132
5.2.2. Une classification à trois dimensions....134
5.3. Présentation de méthodes testées....145
5.3.1. Méthodes à similarité géographique....145
5.3.2. Méthodes à similarité physiographiques....148
5.3.3. Méthodes à similarité mixte....152
5.3.4. Méthodes non testées....156
5.4. Conclusion....158

Résumé du chapitre

Ce chapitre se focalise sur les aspects théoriques de la régionalisation. Il tente de réaliser un panorama des différentes méthodes existantes tout en proposant une conceptualisation et une simplification des grands principes sous-jacents. Les principaux apports de ce chapitre sont :

- La présentation d'une classification des méthodes qui permette d'intégrer l'ensemble des méthodes de régionalisation employée pour la prédétermination des crues en sites non jaugés.
- La sélection et la présentation d'un large panel de techniques que l'on envisage pour la régionalisation de la méthode SHYREG.

5.1. Introduction

On rappelle que dans le cadre de l'hydrologie on définit la régionalisation comme un transfert d'information depuis un site jaugé où cette information est connue vers un site non jaugé où cette information est nécessaire. Une méthode de régionalisation permet l'estimation d'une variable sur un site et à une échelle donnée.

La régionalisation constitue donc une étape clé pour la prédétermination des crues (ou plus généralement pour l'ensemble des estimations en hydrologie) en sites non jaugés. Pour cette raison, une littérature abondante a été publiée sur le sujet. Le premier objectif de ce chapitre est donc de tenter d'établir un état de l'art de ces méthodes et de proposer une classification des techniques existantes de manière à les conceptualiser et à simplifier notre approche.

Dans un deuxième temps, on se placera dans le cadre de la classification présentée en première partie pour introduire et décrire plus en détails un panel de méthodes de régionalisation dont on envisage l'application dans le cadre de l'utilisation de SHYREG. Dans ce cas, l'objectif de la régionalisation est d'estimer le paramètre S0/A pour n'importe quel bassin de France métropolitaine.

5.2. État de l'art

5.2.1. Généralité et définitions

On a vu au chapitre 1, que l'application de méthodes de prédétermination en site non jaugé devait passer par une phase d'estimation d'une information appelée régionalisation. En effet, en hydrologie la plupart des modèles d'estimation utilisés nécessitent une phase de calage qui se nourrit de données mesurées *in situ*. Ce calage permet de déterminer les valeurs de certains paramètres des modèles et ainsi les adapter au site d'étude. En l'absence de mesures, il est nécessaire d'estimer ces paramètres. Si on regarde uniquement ce qui se passe au niveau d'un site non jaugé, la régionalisation se substitue au calage pour déterminer les valeurs de paramètres du modèle. En pratique, le calage et la régionalisation sont deux étapes nécessaires de la modélisation des crues en site non jaugé qui permettent un flux d'information depuis des sites jaugés, vers le site non jaugé d'étude.

Dans le cadre de la méthode SHYREG on peut schématiser ce flux d'information par la ***figure 5-1***. On peut voir que sur les sites jaugés, on dispose de mesures du débit qui permettent d'estimer les quantiles « observés » par application d'une loi GEV dont le paramètre de forme est borné. Ces quantiles sont nécessaires pour procéder au calage du modèle pluie-débit. Cette étape permet d'estimer la valeur du paramètre S0/A en chaque site jaugé. Grâce à ce paramètre on peut estimer les quantiles de débits de différentes périodes de retour et durées caractéristiques. La régionalisation est l'étape qui permet le passage du domaine jaugé au domaine non jaugé, grâce à un transfert d'information sur S0/A. On obtient alors une estimation de S0/A régionalisée qui permet de procéder à la simulation SHYREG et d'obtenir les quantiles de débits de périodes de retour et de durées caractéristiques voulues sur le site non jaugé étudié.

Ce type de flux d'information est très courant dans le cadre de la prédétermination des crues en sites non jaugés. On parle de post-régionalisation, car la phase de régionalisation intervient après la phase de calage. Néanmoins, on peut envisager d'autres architectures de flux d'information, comme régionaliser les données servant au calage, puis caler le modèle en site non jaugé (on peut alors parler de pré-régionalisation).

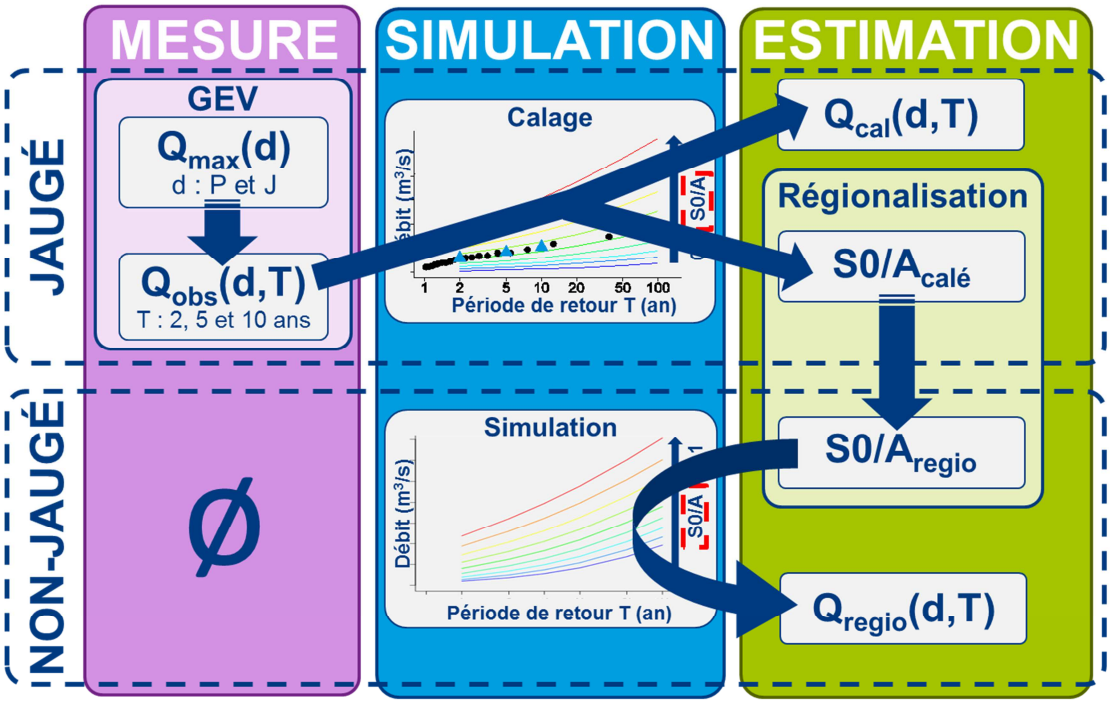


Figure 5-1 : *Schéma du flux d'information sur le débit au sein de la méthode SHYREG*

À ce stade on définit deux types de bassins :

Partie XL : Un bassin donneur est nécessairement jaugé. C'est un bassin à partir duquel on pratique le transfert d'information.

Partie XLI : Un bassin receveur est un bassin sur lequel on cherche à faire une estimation, il s'agit de la cible du transfert. Selon les cas, un bassin receveur peut être non jaugé (on cherche donc à y estimer les débits de crues) ou jaugé. Dans le second cas on peut utiliser ses données à des fins de validation.

La régionalisation utilise donc une information connue sur un site donneur pour en faire une estimation sur un receveur (Blöschl et Sivapalan, 1995). Cette simple assertion permet de souligner l'hypothèse principale derrière toute méthode de régionalisation : la similarité (Blöschl et coll., 2013). Pour pouvoir utiliser une information issue d'un bassin pour estimer cette même information sur un autre bassin, il faut que les deux informations soient similaires. Dans notre cas, on cherche à transférer des paramètres de modèles hydrologiques. Ces paramètres sont sensés refléter les spécificités hydrologiques des différents bassins versants. On parlera donc de similarité hydrologique entre les bassins donneurs et les bassins receveurs.

Cette similarité peut prendre diverses formes. On peut tenter de caractériser la similarité entre les bassins par l'allure de la distribution de fréquences des crues. C'est le travail effectué par les méthodes de statistiques régionales qui estiment la similarité grâces aux principaux moments des distributions des différents sites (Hosking, 1990 ; Hosking et Wallis, 1993 ; Hosking et Wallis, 1997). Cette approche a, bien sûr, du sens dans le cas de l'étude des crues, néanmoins elle se heurte au problème du non jaugé : la distribution de fréquence des crues est inconnue en l'absence de station hydrométrique. Dans ce cas on peut chercher à estimer la similarité hydrologique de bassins en se basant sur des critères physiographiques (Burn et Boorman, 1992). Il est également possible de faire l'hypothèse que la proximité spatiale est un bon indicateur de similarité (Vandewiele et Elias, 1995).

La régionalisation a fait l'objet d'études précoces (Nash, 1960 ; Manley, 1978), néanmoins l'évolution technique des dernières années (tant sur le plan de la puissance de calcul et du développement des systèmes d'information géographique que sur celui de la disponibilité des données) a permis un développement plus intense et varié des méthodes. Ce développement a notamment eu lieu dans le cadre de la décennie *Prediction in Ungauged Basins* (prédiction en bassins non jaugés) de l'Association Internationale des Sciences Hydrologiques dont le thème central était la régionalisation (Sivapalan et coll., 2003 ; Hrachowitz et coll., 2013).

Les techniques de régionalisation présentent une très grande diversité dont un large aperçu peut être consulté dans Blöschl et coll. (2013). Parmi ces méthodes on peut noter, de manière non exhaustive, les régressions entre les paramètres de modèles et des variables physiographiques (Sefton et Howarth, 1998 ; Seibert, 1999 ; Kokkonen et coll., 2003) qui demeure certainement la méthode la plus utilisée, la méthode des plus proches voisins (Vandewiele et Elias, 1995), les approches par similarité physiographique (McIntyre et coll., 2005), les méthodes géostatistiques (Skøien et coll., 2006), les réseaux de neurones artificiels (Dawson et coll., 2006), le calage régional (Fernandez et coll., 2000), l'analyse fréquentielle régionale (Dalrymple, 1960 ; Stedinger, 1983 ; Hosking et Wallis, 1993)…

Rien qu'en évoquant les grands principes de la régionalisation en hydrologie, on parvient à apercevoir la grande diversité des approches qui existent. Lister l'ensemble des méthodes ou applications est impossible. Néanmoins, dans le cas d'une telle diversité il semble intéressant de classifier les approches de manière à identifier de grandes familles de méthodes ainsi que leurs hypothèses fondamentales. Une telle classification peut ensuite permettre d'identifier des méthodes clefs dans chaque catégorie et de les appliquer dans le cadre de la méthode SHYREG. À défaut d'être complètement exhaustive, une telle approche permet de considérer un large panel de méthodes de régionalisation.

5.2.2. Une classification à trois dimensions

Étant donnée la diversité des méthodes de régionalisation et de leurs applications il parait difficile d'établir une classification simple pour laquelle chaque méthode pourrait être intégrée dans une seule catégorie. On propose ici une classification à trois dimensions qui permet de mettre en valeur les principales caractéristiques de la méthode étudiée :

Partie XLII : L'architecture de la méthode (son articulation avec le calage) ;
Partie XLIII : La nature de la similarité ;
Partie XLIV : La technique de transfert.

Dans chacun de ces modes de classifications on peut établir plusieurs catégories. On peut alors qualifier une méthode de régionalisation de manière assez précise en explicitant comment la méthode s'inscrit dans chacune de ces dimensions. En plus de cette classification, il apparait nécessaire de qualifier la nature de la variable que l'on cherche à régionaliser.

5.2.2.1. Architecture de la méthode

Ce niveau de classification n'est pertinent que dans le cas de la régionalisation de modèles pluie-débit. Ici, on ne s'intéresse pas spécifiquement au transfert d'information du jaugé vers le non jaugé mais plutôt à savoir comment ce transfert s'articule avec le calage du modèle. Ce niveau de classification est inspiré des classes présentées par Samaniego et coll. (2010) et Singh et coll. (2014).

a. Post-regionalisation (calage local puis régionalisation)

Il s'agit de l'approche la plus courante, mais aussi la plus naturelle. Le modèle est calé localement sur chacun des sites jaugés indépendamment les uns des autres de manière à obtenir le meilleur jeu de paramètre (ou distributions de paramètres dans un contexte bayésien) au sens d'une fonction objectif. Dans un deuxième temps, on utilise les résultats de ce calage pour alimenter le transfert. On a donc ici un calage du modèle suivi de la régionalisation à proprement parler. C'est l'approche utilisée dans la version de base du modèle SHYREG, le flux d'information correspondant est présenté sur la ***figure 5-1***.

L'intérêt principal de cette approche est sa simplicité de mise en œuvre : le modèle est optimisé sur les sites de calage (sans rien changer à la méthode de calage par rapport à une approche classique en site jaugé), et l'information hydrologique est ensuite transférée dans l'espace vers le site cible. Néanmoins, on doit faire face aux difficultés liées à la nature des résultats d'un calage de modèle : les incertitudes et l'équifinalité (Beven et Binley, 1992 ; Beven et Freer, 2001). Lors du calage d'un modèle conceptuel pluie-débit, on recherche une performance optimale au sens d'une fonction objectif, souvent liée ou inspirée du critère de Nash-Sutcliffe (Nash et Sutcliffe, 1970). Néanmoins l'existence d'incertitudes sur les données d'entrées, les erreurs de structure du modèle (qui n'est pas une représentation physique de la réalité), et la possibilité que plusieurs jeux de paramètres (parfois très différents) puissent conduire à des performances très similaires au sens de la fonction objectif rend difficile l'identification d'un jeu de paramètres unique et optimal, qui pourrait en plus préserver le sens physique du modèle (Wagener et Wheater, 2006). Le concept d'équifinalité renvoie à l'impossibilité d'obtenir un tel jeu de paramètres et donc à la nécessité de travailler avec un ensemble de jeux de paramètres permettant d'obtenir des distributions de grandeurs simulées. Il est ainsi possible de tenir compte des incertitudes liées au calage (Beven et Binley, 1992).

Il est possible de régionaliser des distributions où des ensembles. On peut citer notamment le travail sur des ensembles de McIntyre et coll. (2005) ou des méthodes bayésiennes (Bates et Campbell, 2001). Néanmoins, il a été suggéré que la régionalisation de paramètres de modèles conceptuels puisse être impossible en raison de l'absence d'un jeu de paramètre unique dû au calage du modèle mais aussi de la forte corrélation existant entre les différents paramètres (Kuczera et Mroczkowski, 1998). Le principe des deux approches suivantes est donc de limiter le nombre de jeux de paramètres plausibles en faisant intervenir l'étape de régionalisation simultanément au calage (régionalisation simultanée), ou avant celui-ci (calage contraint par une pré-régionalisation).

b. Syn-régionalisation (régionalisation et calage simultanés)

Le principe d'une régionalisation simultanée est de prendre en compte les performances de régionalisation lors du calage. Une première approche peut être d'utiliser une fonction objectif qui combine les performances de la méthode en chaque site mais aussi la qualité du transfert (Fernandez et coll., 2000 ; Parajka et coll., 2007). Dans ce cas, on cherche à départager divers jeux de paramètres équifinaux du point de vue du calage en choisissant celui qui se régionalise le mieux. Néanmoins, faire intervenir à la fois les performances de la méthode de calage et de la méthode de régionalisation peut paraitre redondant dans le sens où les paramètres du modèle pluie-débit calé sont utilisés pour le calage de la méthode de régionalisation (Samaniego et coll., 2010).

Une seconde idée peut donc être de caler directement la méthode de régionalisation en comparant les débits régionalisés à ceux observés. C'est-à-dire que l'on cale en même temps le modèle de prédétermination et la méthode de régionalisation. Ce genre d'approche se base sur un a priori fort sur la méthode de régionalisation (Samaniego et coll., 2010). Par exemple Szolgay et coll. (2003) suppose l'uniformité des paramètres du modèle sur des régions formées sur la base de similarités physiques et cale ensuite le modèle à l'échelle de la région. Hundecha et Bárdossy (2004) définissent a priori une relation entre les paramètres et des variables physiographiques et cale directement les paramètres de cette relation plutôt que ceux du modèle.

La première difficulté liée à cette approche est la puissance de calcul nécessaire : on augmente drastiquement le nombre de paramètres mis en jeu lors du calage par rapport à une approche par calage local (Fernandez et coll., 2000). Pour limiter ce problème, Parajka et coll. (2007) propose une calibration régionale itérative basée sur la corrélation spatiale entre les paramètres du modèle. Néanmoins, beaucoup de choix et d'hypothèses sont faits a priori (Szolgay et coll., 2003 ; Hundecha et Bárdossy, 2004 ; Pokhrel et coll., 2008) : notamment celui de la technique de transfert des paramètres ou de la nature de la similarité entre les bassins. Il y a donc une certaine part de subjectivité dans ces méthodes ce qui peut être risqué dans le sens où on accepte de diminuer les performances locales (en site jaugé) du modèle pour améliorer la cohérence d'une loi régionale souvent choisie a priori. En outre, les résultats sur des bassins de validation (non utilisés dans aucune étape du calage régional) montrent qu'obtenir une méthode de transfert performante ne suffit pas à assurer de bonnes performances hydrologiques du modèle régionalisé (Fernandez et coll., 2000).

Dans le cas de la régionalisation simultanée on peut parler de calage régional. En effet, il s'agit d'un calage exploitant des données issues de divers sites d'une région.

c. Pré-régionalisation (calage contraint par la régionalisation des données)

La troisième approche consiste à procéder au transfert de l'information hydrologique avant de caler le modèle. Il ne s'agit donc plus de transférer des paramètres de modèle, mais des variables hydrologiques synthétisant le comportement du bassin. De très nombreux exemples de ces variables hydrologiques existent dans la littérature, notamment pour la classification des écoulement pour l'écologie (voir Olden et Poff (2003) pour une revue de ces indices). Ces signatures hydrologiques

sont calculées à partir des séries temporelles de mesures hydrologiques (débit, précipitation, évapotranspiration..) des sites jaugés et sont ensuite estimées sur le site cible à partir d'une méthode de régionalisation classique (comparables à celles utilisées pour la régionalisation des paramètres de modèles). Le transfert d'information reposant toujours sur la similarité entre les bassins donneurs et le receveur (Blöschl et coll., 2013).

Le calage du modèle peut ensuite être effectué (ou au moins contraint) directement pour le site non jaugé de manière à ce que les signatures calculées à partir des résultats de simulations soient cohérentes avec les signatures régionalisées (Yu et Yang, 2000 ; Yadav et coll., 2007).

L'avantage immédiat de cette méthode est que la régionalisation porte sur des variables physiques et mesurables ce qui est un avantage puisque l'on peut plus facilement les relier à des caractéristiques environnementales. En outre, l'interprétation des résultats de la régionalisation est plus simple, et la pertinence de la méthode peut être évaluée (au moins qualitativement). Le problème d'équifinalité du calage peut également être pris en compte, la concordance entre les signatures simulées et régionalisées (à l'incertitude de régionalisation près) permet d'identifier un certain nombre de jeux de paramètres comme possibles, et l'ensemble des simulations obtenues à partir de ces paramètres permet d'apprécier les incertitudes de simulation et de régionalisation (Yadav et coll., 2007).

Le calage contraint présente également un avantage (lié au précédent) sur le plan méthodologique, en effet il permet d'utiliser l'ensemble des méthodes de régionalisation y compris l'analyse fréquentielle régionale (Dalrymple, 1960 ; Hosking et Wallis, 1993) qui par nature ne peut s'utiliser que sur des grandeurs pouvant être décrites par des lois statistiques (et donc issues de séries temporelles), ce qui n'est bien sûr pas le cas des paramètres de modèles.

5.2.2.2. Nature de la similarité

La notion de similarité est omniprésente dès que l'on parle de régionalisation (Blöschl et coll., 2013). C'est l'hypothèse de base qui permet de justifier que l'on peut procéder au transfert d'information d'un site à un autre. En l'absence d'une certaine similarité des processus hydrologiques, le transfert n'a tout simplement pas de sens. L'hypothèse de similarité hydrologique pose deux problèmes majeurs.

Tout d'abord, comment peut-on caractériser et mesurer cette similarité ? La réponse dépend bien sûr de la variable que l'on cherche à transférer. Dans le cas de l'utilisation de modèles conceptuels, ces processus sont représentés de manière simplifiée et schématique, parce que justement les phénomènes réels sont difficiles à caractériser et à représenter, surtout à l'échelle macroscopique d'un bassin versant. Pour synthétiser le comportement d'un bassin versant on peut utiliser des signatures hydrologiques (Oudin et coll., 2010 ; Blöschl et coll., 2013 ; Singh et coll., 2014). Certaines de ces signatures sont très synthétiques (une valeur comme l'écoulement moyen interannuel), d'autres sont plus complexes comme l'hydrogramme complet, la courbe des débits classés, la distribution de fréquences des crues. Par exemple, les analyses fréquentielles régionales, comme la méthode de l'indice de crues (Dalrymple, 1960), se base sur l'analyse des principaux moments de la loi de distribution des crues en chaque site pour identifier les bassins dont les crues peuvent être considérées comme issues du même processus aléatoire (Hosking, 1990 ; Hosking et

Wallis, 1993 ; Hosking et Wallis, 1997). L'idée est donc dans ce cas de regrouper des bassins similaires au sens de l'occurrence des crues.

Néanmoins, et c'est la deuxième difficulté, les signatures hydrologiques ne sont pas connues en sites non jaugés. En fait, ce sont généralement ces grandeurs que l'on cherche à estimer par les méthodes de régionalisation. Estimer directement la similarité hydrologique entre un bassin non jaugé et un autre est donc impossible. La solution apportée à ce problème est de supposer que la similarité hydrologique entre deux bassins est très fortement liée à certaines caractéristiques non liées aux débits des bassins versants (Gaume et coll., 2010 ; Oudin et coll., 2010). Les bassins non jaugés, peuvent donc être rattachés à des groupes (aussi appelés régions) de bassins jaugés similaires au sens de ces caractéristiques.

On différencie ici les méthodes selon l'hypothèse qu'elles font pour supposer qu'il existe une similarité pertinente entre les bassins donneurs et receveurs. Les deux types d'hypothèses que l'on peut faire sont : une similarité basée sur la proximité et une similarité basée sur la ressemblance physiographique.

a. La proximité ou similarité géographique

Dans le cas de similarité géographique, on suppose que deux bassins seront d'autant plus similaires du point de vue de leur comportement hydrologique qu'ils sont proches. Il s'agit d'une application de la première loi de la géographie de Tobler. Cette loi, qui dépasse le contexte de l'hydrologie, peut être énoncée de manière assez simple : « tout est relié à tout, mais les choses proches le sont davantage que les choses distantes » (Tobler, 1970, p. 236, traduction). En termes mathématiques, la similarité géographique est basée sur l'autocorrélation spatiale de la variable à transférer, c'est-à-dire sur une concordance entre la similarité des valeurs et leur localisation sans contrainte de direction (Le Gallo, 2002). Cette autocorrélation spatiale est mesurable, notamment grâce aux outils de la géostatistique ou de la statistique spatiale (Aubry, 2000). On peut donc justifier de la pertinence de l'hypothèse d'une similarité géographique en prouvant l'existence d'une autocorrélation spatiale.

En pratique, la dissimilarité entre deux bassins est mesurée par la distance euclidienne entre leur centroïde ou leur exutoire, mais le recours à d'autres formes de distance est possible (Gottschalk et coll., 2011). On peut par exemple chercher à intégrer la structure en réseau des cours d'eau dans le calcul de la distance entre les bassins au moyen de matrices de voisinages (Aubry, 2000).

Bien que relativement simple à mettre en œuvre (très peu de données nécessaires), et conduisant souvent à de bonnes performances dans les études comparatives (Parajka et coll., 2005 ; Oudin et coll., 2008), l'utilisation de similarité géographique pose un problème conceptuel : il n'y a pas de raison physique expliquant pourquoi les comportements hydrologiques de deux bassins voisins devraient être comparables mis à part le fait que les caractéristiques physiques (géologie, climat…) de ces bassins sont souvent similaires car assez continues dans l'espace. La localisation pourrait donc être vue comme une synthèse de l'ensemble de ces caractéristiques physiques. Néanmoins, la proximité ne garantit pas la ressemblance, tout comme deux bassins éloignés peuvent se ressembler du point de vue de l'hydrologie. Par exemple, deux bassins frontaliers sont proches mais déconnectés alors que des bassins emboités possèdent un lien (le bassin aval étant une partie intégrante du bassin amont) qui n'est pas nécessairement reflétée par la distance. Aussi, l'hypothèse

d'un lien entre proximité et similarité n'est pas toujours vérifiée et permettrait d'avantage de tenir compte de la continuité spatiale de certains phénomènes (en l'absence de connaissances les caractérisant) plutôt que de les expliciter. De ce point de vue, la proximité spatiale est vue comme une variable proxy de la similarité plutôt que comme une mesure de celle-ci.

On parlera de « voisins » pour qualifier deux bassins géographiquement proches.

b. La ressemblance ou similarité physiographique

La similarité physique est caractérisée par la ressemblance entre deux bassins au sens de variables environnementales (climat, topographie, géologie…). On cherche ici, à identifier les phénomènes à l'origine de la similarité hydrologique dans un contexte de coévolution des bassins versants (Blöschl et coll., 2013). On suppose alors que les mêmes causes conduisent aux mêmes conséquences et que les bassins caractérisés par les mêmes grandeurs environnementales sont similaires du point de vue de l'hydrologie. Cette ressemblance physiographique est en fait une sorte de proximité dans l'espace (de dimension p) définie par ces variables. D'ailleurs, en pratique, la dissimilarité est souvent mesurée par la distance euclidienne entre deux bassins dans un tel espace (Bayliss, 1999 ; Oudin et coll., 2010 ; Blöschl et coll., 2013).

Toute la difficulté réside dans la sélection des variables caractérisant la similarité (Oudin et coll., 2010). Cette sélection peut se faire de manière subjective (Seibert, 1999), se baser sur des algorithmes pas-à-pas et des tests statistiques sur la corrélation avec la variable d'intérêt (Sefton et Howarth, 1998), sur la réalisation d'analyses en composantes principales (Sefton et Howarth, 1998) ou canoniques (Ouarda et coll., 2001). Certains auteurs ont recourt à des méthodes de classification des bassins versants comme les arbres de décisions (Laaha et Blöschl, 2006 ; Singh et coll., 2014) ou les réseaux de neurones artificiels (Saliha et coll., 2011 ; Latt et coll., 2014). Il peut également être tenté d'établir la correspondance entre la similarité hydrologique (au sens de la transférabilité des paramètres d'un modèle, par exemple) et la similarité physique (Oudin et coll., 2010 ; Singh et coll., 2014). Dans tous les cas, la mesure de la similarité physique est limitée par la disponibilité des données sur le domaine d'étude.

On peut parler de « cousins » pour qualifier deux bassins physiquement semblables (Oudin et coll., 2010).

c. Une similarité mixte ?

Bien qu'assez aisée à définir, la différenciation entre les similarités géographique et physiographique n'est pas essentielle d'un point de vue méthodologique. En effet, dans les deux cas, la dissimilarité peut être mesurée par une distance (souvent euclidienne) dans un espace. De fait, il est possible d'utiliser la localisation des bassins (latitude et longitude) comme descripteur de l'environnement physique (Sefton et Howarth, 1998). Cela peut permettre de prendre en compte une variabilité spatiale non représentée par les variables physiographiques utilisées. L'association des deux types de similarité peut également être mise en œuvre de manière plus distincte en couplant plusieurs méthodes de régionalisation de nature différente (Merz et Blöschl, 2005 ; Organde et coll., 2013). Et il est également possible d'utiliser des modèles de régression qui intègrent

une composante spatiale dans la structure du résidu (Ahn et Palmer, 2016). En outre, même lorsque la proximité géographique n'est pas explicitement prise en compte dans une étude de similarité, elle peut l'être de manière implicite lorsque la régionalisation est effectuée sur un domaine restreint. La différenciation entre les deux types de similarité est donc parfois très floue.

d. Similarité et mise en région

Chercher à identifier les bassins donneurs qui soient similaires au bassin cible c'est créer une région. Ces régions peuvent donc être basées sur un découpage géographique (basée sur de la proximité), dans ce cas la région est continue dans l'espace, ou sur un découpage physiographique qui n'est pas nécessairement continu dans l'espace (il s'agit plutôt d'une classification des bassins). Burn (1990a) introduit le concept de région d'influence qui tranche avec l'idée de région prédéfinie ou de classification des bassins. Dans cette approche, pour chaque bassin cible on détermine les bassins donneurs les plus similaires (selon l'hypothèse faite sur la nature de la similarité). Un même bassin donneur peut donc appartenir à différentes régions définies autour de différents sites. Dans le cas de la région d'influence il n'est pas possible de cartographier les régions, ni d'établir une classification des bassins. La méthode de la région d'influence revient à sélectionner tous les bassins donneurs situés dans un certain rayon autour du bassin cible soit dans l'espace géographique, soit dans l'hyperespace défini par diverses variables. L'intérêt d'une telle approche est de disposer de régions personnalisées autour de chaque bassin cible et de limiter les effets de bords que l'on rencontre avec des régions prédéfinies. De fait, on peut définir quatre types de régions, selon qu'elles soient d'influence ou prédéfinies, et selon leur continuité dans l'espace. Ces différents types sont détaillés dans le tableau 5-1.

Tableau 5-1 : *Différents types de mises en régions possibles et correspondance avec la nature de la similarité*

Région	**Continue dans l'espace**	**Discontinue dans l'espace**
Propre à chaque cible (région d'influence)	**Voisinage** Donneurs situés dans un rayon défini autour de la cible ou faisant partie de ses plus proches voisins **→ Similarité géographique**	**Cousinage** Donneurs possédant un certain degré de similarité avec la cible ou faisant partie de ses plus proches cousins **→ Similarité physique (ou mixte)**
Prédéfinie	**Zonage** Découpage géographique du domaine selon des critères, l'appartenance de la cible à une zone est définie par sa position géographique **→ Similarité mixte**	**Groupement** Regroupement des donneurs selon leurs caractéristiques physiques, l'appartenance de la cible à l'un des groupes est définie par rapport à sa similarité physique avec le groupe **→ Similarité physique (ou mixte)**

Pour définir totalement la nature de la similarité utilisée dans une méthode de régionalisation il faut donc préciser à la fois sur quel type de grandeur on base la mesure de la similarité et le type de mise en régions que l'on utilise.

5.2.2.3. La technique de transfert

La technique de transfert est l'élément qui permet effectivement de faire l'estimation en site non jaugé. Il s'agit généralement d'une méthode d'inférence statistique (régression, arbres de décision, réseau de neurones…) ou d'interpolation spatiale (krigeage, inverse de la distance,….). Les alternatives sont bien sûr nombreuses et diverses, on propose de différencier deux familles : les approches par combinaison et les approches explicatives.

a. Méthodes par combinaison

Dans le cas d'une méthode par combinaison, on suppose que la variable d'intérêt connue sur les sites donneurs peut être considérée comme valable au site receveur (non jaugé). On réalise un transfert direct de la variable. Dans le cas où l'on a identifié plusieurs bassins donneurs, on peut envisager de combiner ces différentes variables, généralement grâce à une combinaison linéaire. C'est le cas des méthodes de krigeage ou de celles basées sur l'inverse de la distance (Vandewiele et Elias, 1995). On peut également considérer que les différentes valeurs de variables sur les sites donneurs sont autant de candidats possibles qui forment donc un ensemble de variables au site receveur. Les variations au sein de cet ensemble traduisent l'incertitude de régionalisation (McIntyre et coll., 2005). On peut également envisager de rééchelonner la variable d'intérêt pendant son transfert. Par exemple, lors de la régionalisation de variables en unités de débits, le transfert s'effectue plutôt avec des débits spécifiques ou pseudo spécifiques pour éliminer l'effet de taille des bassins versants (Skøien et coll., 2006 ; Gaume et coll., 2010).

Dans le cas de la régionalisation de modèles hydrologiques, l'intérêt de ce genre de transfert est qu'il permet très simplement de transférer des jeux de paramètres complets (McIntyre et coll., 2005) au lieu de considérer les paramètres indépendamment les uns des autres. Un transfert indépendant des différents paramètres peut être problématique étant donné les corrélations pouvant exister entre ces paramètres et l'équifinalité.

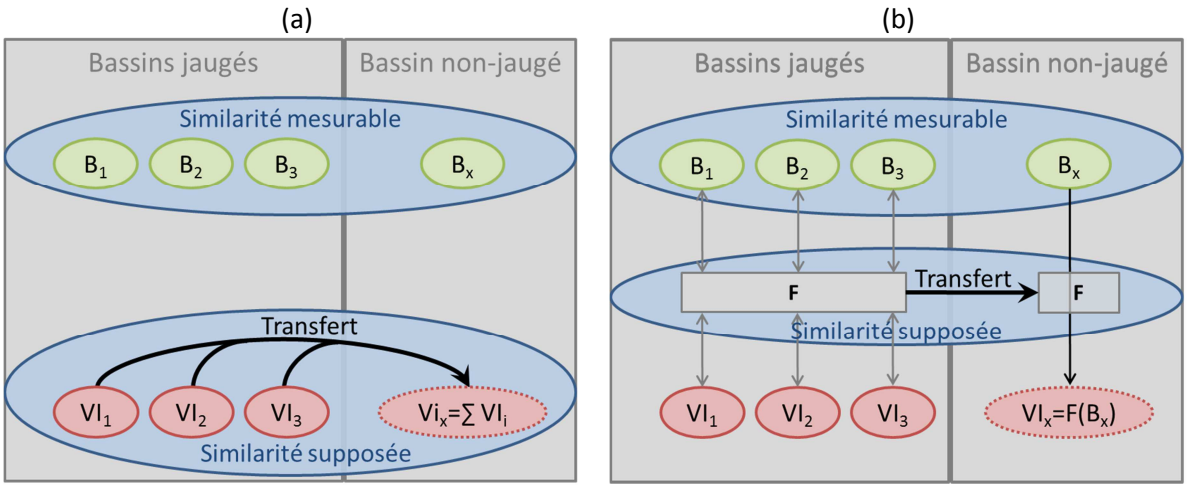


Figure 5-2 : *Schéma illustrant les principaux types de transfert dans la régionalisation (a) Transfert par combinaison ; (b) Transfert explicatif*

L'hypothèse sous-jacente à ce genre de transfert est que la similarité établie entre les bassins donneurs et le receveur conduit à une similarité « hydrologique » sur la variable d'intérêt. Dans le cas

du transfert de paramètres, on considère que la similarité établie entre les bassins permet de supposer qu'ils peuvent être modélisés avec le même jeu de paramètres. La ***figure 5-2*** (a) schématise le transfert d'une variable d'intérêt (**VI**) à partir d'une similarité mesurée sur des bassins (**B**). On obtient alors une variable d'intérêt estimée au site cible ($\mathbf{Vi_x}$) qui est une combinaison des variables sur les sites jaugés ($\mathbf{\sum VI_i}$). On peut voir que l'estimation de la variable d'intérêt n'est pas directement reliée aux caractéristiques du bassin non jaugé ($\mathbf{B_x}$). Il faut aussi garder à l'esprit que ce que l'on dénomme « variable d'intérêt » peut être de nature vectorielle (typiquement un jeu de paramètres).

b. Méthodes explicatives

Dans le cas d'une méthode explicative, la variable d'intérêt est définie à partir d'une relation mathématique établie sur les sites donneurs, et c'est cette relation qui est transférée vers le site receveur. On cherche en fait à expliquer les valeurs de la variable d'intérêt sur les sites donneurs pour pouvoir estimer cette variable sur d'autres sites. Cette explication s'établit à partir de variables externes, connues sur tous les sites jaugés ou non, que l'on appelle des descripteurs. La relation reliant la variable d'intérêt aux descripteurs est parfois appelée fonction de transfert (Samaniego et coll., 2010), néanmoins dans le cas de SHYREG pour éviter toute confusion avec la FTS, on préférera la nommer fonction géographique (Blöschl et coll., 2013).

Les méthodes employées sont généralement des techniques d'inférence statistiques comme les méthodes de régression, souvent linéaire (Sefton et Howarth, 1998 ; Seibert, 1999 ; Kokkonen et coll., 2003), voire multilinéaire dans le cas de la régionalisation de plusieurs variables (Tung et coll., 1997). On peut également envisager l'usage de réseaux de neurones artificiels (Heuvelmans et coll., 2006 ; Bastola et coll., 2008 ; Wallner et coll., 2013).

Par similarité, on suppose que la relation établie sur les sites donneurs reste valable pour les sites receveurs d'une même région. L'avantage théorique de cette approche est que les bassins (donneurs et receveurs) n'ont pas nécessairement besoin de se ressembler. Au contraire il est même nécessaire de disposer d'un large éventail de bassins donneurs de manière à obtenir une relation généralisable. Néanmoins, il est difficile d'identifier des bassins présentant une similarité au niveau de la relation entre leurs caractéristiques et la variable d'intérêt puisque cette relation est a priori inconnue (sans oublier que la variable d'intérêt peut être incertaine même sur les sites donneurs surtout dans le cas de paramètres de modèles). Dans la plupart des cas une similarité géographique par zone est employée soit en établissant des relations sur des zones restreintes (NERC, 1975), soit en considérant que les lois établies sont valables sur l'ensemble du domaine d'étude (Sefton et Howarth, 1998 ; Fernandez et coll., 2000). Il faut néanmoins noter que les régressions établies à grande échelle sont souvent associées à de mauvaises performances (Oudin et coll., 2008), (Parajka et coll., 2005).

La figure 5-2 (b) schématise l'établissement d'une fonction géographique (**F**) explicitant la relation entre des descripteurs des bassin jaugés ($\mathbf{B_i}$) et les variables d'intérêt sur ces bassins ($\mathbf{VI_i}$) et l'utilisation de cette loi sur un bassin non jaugé pour estimer la variable d'intérêt ($\mathbf{VI_x=F(B_x)}$) à partir des caractéristiques de ce bassin ($\mathbf{B_x}$).

c. Méthodes mixtes

On peut évidemment construire des méthodes qui mêlent les deux types de transfert. Cela peut être fait en appliquant successivement deux méthodes de types différents. C'est le cas des géorégressions (Merz et Blöschl, 2005 ; Organde et coll., 2013) qui déterminent tout d'abord une fonction géographique par régression (souvent linéaire) avant d'utiliser une interpolation spatiale sur les résidus de régressions par krigeage ou inverse de la distance. La méthode Aurelhy (Benichou et Le Breton, 1987) utilisée notamment pour la régionalisation des paramètres du générateur de pluie de SHYREG (Sol et Desouches, 2005) est également de ce type. Certaines méthodes intègrent directement les deux types de transfert, comme les approches par krigeage à dérive externe (Merz et Blöschl, 2005 ; Cantet, 2017).

5.2.2.4. Synthèse

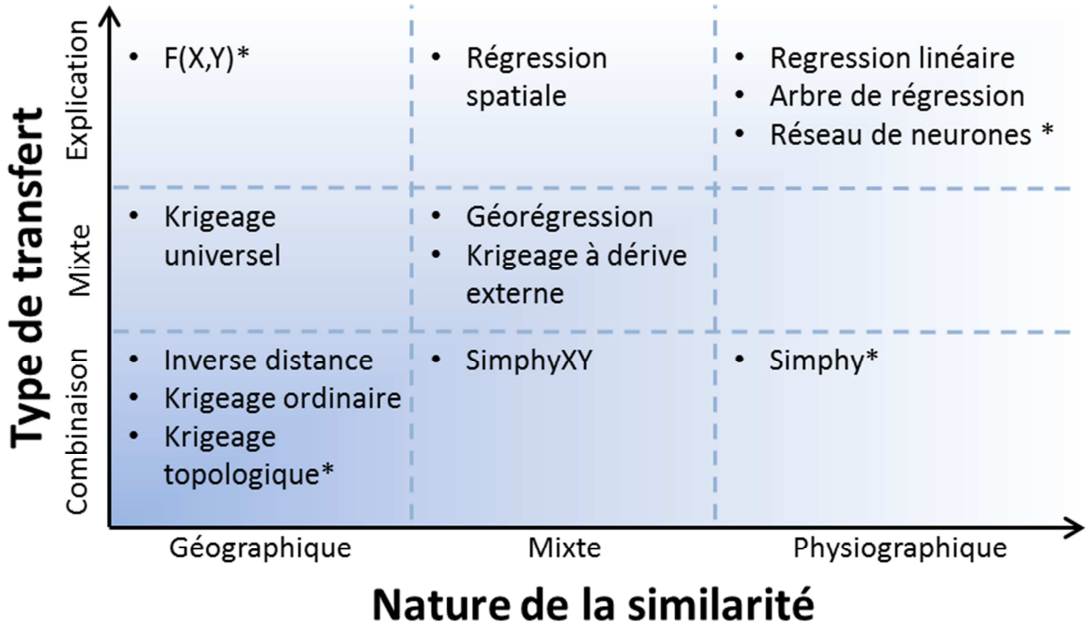


Figure 5-3 : *Classement de méthodes de régionalisation selon le type de transfert et la nature de la similarité*
** méthode non implémentée dans le cadre du travail décrit ici*

La classification à trois dimensions présentée ci-avant, associée à la présentation de la (ou des) variable à régionaliser permet de qualifier une méthode de régionalisation de manière assez précise. Précisons que le premier niveau de la classification concerne l'architecture globale de l'approche mise en œuvre (la méthode de prédétermination avec son calage et la méthode de régionalisation) alors que les deux suivantes sont liées à la nature de la régionalisation et aux hypothèses qui y sont liées. Une technique de régionalisation donnée peut être utilisée dans plusieurs architectures de méthode, mais repose sur les mêmes hypothèses de similarité et le même type de transfert. On propose une classification des techniques de régionalisation les plus courantes selon ces deux dernières dimensions sur la figure 5-3. Sur cette figure on note F(X,Y) une fonction géographique qui n'utilise que la latitude et longitude des différents sites comme descripteurs. La méthode « Simphy » (similarité physiographique) est une méthode basée sur des régions d'influence dans laquelle on

identifie les bassins donneurs grâce à une distance euclidienne dans un hyperespace défini par des descripteurs de bassins. La méthode « SimphyXY » est une variante dans laquelle les coordonnées spatiales des sites sont également utilisées comme descripteurs.

Notons que la nature de la similarité peut toujours être modifiée en limitant la sélection des bassins donneurs à une certaine région. En fait, le seul fait de définir une zone d'étude revient à utiliser une certaine similarité géographique entre les sites.

On propose dans le tableau 5-2 une classification de méthodes de régionalisation rencontrées dans la littérature selon les trois niveaux de classification présentés ci-avant. La sélection proposée n'est bien sûre pas exhaustive mais permet de voir que l'on trouve une forte diversité de méthodes dans les applications de méthodes de régionalisation.

Tableau 5-2 : *Classification de méthodes de régionalisation issues de la littérature scientifique*

	Transfert direct	**Transfert de loi**
Post-régionalisation	**Voisinage :** • Vandewiele et Elias (1995), moyenne sur la région et krigeage • Skøien et coll. (2006), krigeage topologique **Groupement :** • Burn et Boorman (1993) et Saliha et coll. (2011), moyenne sur la région **Cousinage :** • McIntyre et coll. (2005), transfert d'ensembles • Szolgay et coll. (2003), paramètre uniforme sur la région	**Zonage :** • Seibert (1999), Sefton et Howarth (1998) et Kokkonen et coll. (2003), régressions linéaires • Ahn et Palmer (2016), régressions spatiales • Heuvelmans et coll. (2006), réseaux de neurones artificiels
Syn-régionalisation	**Voisinage :** • Parajka et coll. (2007), krigeage	**Zonage :** • Fernandez et coll. (2000) ; Hundecha et Bárdossy (2004), régressions linéaires • Bastola et coll. (2008) et Wallner et coll. (2013), réseaux de neurones
Pré-régionalisation		**Zonage :** • Yadav et coll. (2007), régressions linéaires

5.3. Présentation de méthodes testées

On sélectionne un nombre important d'approches que l'on souhaite mettre en œuvre dans le cadre de la régionalisation de SHYREG. La majorité de ces méthodes s'inscrivent dans le cadre d'un calage avec post-régionalisation, mais on envisage tout de même une régionalisation simultanée dans laquelle la valeur du paramètre est estimée à l'échelle d'une grille de résolution kilométrique par géorégression (voir chapitre 4). Cette modification de l'alternative de calage a été introduite pour permettre une cartographie de S0/A à l'échelle des pixels et ainsi imposer une croissance des débits le long des rivières de manière structurelle (voir chapitre 4).

Puisque SHYREG est calé sur six valeurs de quantiles de débits de période de retour inférieures à 10 ans, on pourrait tout à fait envisager une méthode par pré-régionalisation dans laquelle on estimerait les débits nécessaires au calage sur les sites non jaugés. Bien qu'intéressante cette approche a été écartée car elle pose des problèmes de cohérence spatiale des débits. En effet, il faudrait s'assurer de la cohérence des quantiles de calage entre eux.

Dans cette partie, on présente les diverses méthodes pour une application dans le cadre d'une post-régionalisation d'une variable d'intérêt. Néanmoins, les éléments théoriques peuvent être transposés à d'autres types d'architecture. On fait le choix de présenter les méthodes selon l'origine de la similarité qu'elles exploitent.

5.3.1. Méthodes à similarité géographique

5.3.1.1. Inverse de la distance pondérée

La régionalisation par méthode de l'inverse de la distance pondérée consiste à estimer la valeur d'une entité cible en combinant les valeurs connues sur les sites jaugés les plus proches (i.e. spatialement). Dans le cadre de la régionalisation de variables ou de paramètres hydrologiques il s'agit d'une méthode couramment utilisée et semblant offrir de bonnes performances dans le cas de travail sur de grands échantillons (Vandewiele et Elias, 1995 ; Parajka et coll., 2005 ; Oudin et coll., 2008). Lors de l'application de cette méthode sur de grands jeux de bassins et de la comparaison avec des méthodes physiques, l'approche des plus proches voisins géographiques s'est souvent distinguée par de meilleur performances par rapport à des approches basées sur la similarité physique (Merz et Blöschl, 2005 ; Parajka et coll., 2005 ; Oudin et coll., 2008).

Il s'agit d'une méthode dite ROI (*Region Of Influence*, (Burn, 1990a)) dans laquelle l'estimation de chaque site est faite à partir d'un jeu de sites donneurs (son voisinage) qui lui est propre.

En termes mathématiques, cette méthode de régionalisation ne peut fonctionner qu'en présence d'une certaine autocorrélation spatiale de la variable d'intérêt dont l'existence peut être prouvée grâce à un test de randomisation spatiale (Aubry, 2000).

La méthode des voisins géographiques peut se résumer sous la forme de l'équation (8). Avec VI_j^{regio}, l'estimation du paramètre du modèle pluie-débit au site receveur j, VI_i^{cal} la valeur calée du paramètre au site donneur i, d_{ij} la distance entre les sites i et j, n_vois le nombre de voisins considérés et α la puissance sur l'inverse de la distance.

$$VI_j^{regio} = \sum_{i=1}^{n\_vois} \left(\frac{1}{{d_{ij}}^{\alpha}} VI_i^{cal} \right) \Big/ \sum_{i=1}^{n\_vois} \frac{1}{{d_{ij}}^{\alpha}} \quad (8)$$

On retiendra de la formulation (8) que l'on n'autorise pas un bassin à faire partie de son propre voisinage (c'est-à-dire que i et j ne peuvent pas être égaux). En effet cela engendrerait l'utilisation de distances nulles et donc de poids infinis. Cela signifie que lorsque l'on utilise la méthode pour estimer la valeur de VI sur un site donneur, on n'utilise pas la valeur de VI calée est connue en ce site. On procède donc naturellement à une sorte de validation croisée parmi les sites donneurs. Le fait de connaitre la valeur optimale du paramètre peut donc nous permettre de calculer une erreur d'estimation et donc d'optimiser les paramètres de la régionalisation (notamment la structure du voisinage).

Une des questions qui se pose est la façon de calculer la distance d_{ij}, en effet les bassins ne sont pas des objets ponctuels mais des surfaces, la notion de distance n'est donc pas triviale. On propose ici de tester quatre méthodes de calcul de la distance :

- La distance euclidienne entre les centroïdes des bassins (Oudin et coll., 2008);
- La distance euclidienne entre les exutoires des bassins ;
- Une combinaison linéaire entre les deux distances précédentes : un poids de 0,8 est attribué à la distance entre les centroïdes et un poids de 0,2 sur celle entre les exutoires (Lebecherel, 2015) ;
- La distance dite de Ghosh qui correspond à la moyenne des distances entre chacun des points du premier bassin et tous ceux du second (on considérera ici un maillage régulier carré de 1 km). Cette distance permet de prendre en compte les emboitements des bassins (Gottschalk et coll., 2011). Il faut tout de même noter que la distance de Ghosh d'un bassin à lui-même est non nulle.

Les degrés de libertés de cette méthode de régionalisation sont donc : le mode de calcul des distances entre les bassins, le nombre de voisins à sélectionner (n_vois), la puissance utilisée dans le calcul des pondérations (α). Le meilleur mode de calcul peut être déterminé par essais successifs, les valeurs de n_vois et de α peuvent être optimisées automatiquement pour minimiser l'erreur de régionalisation. Par la suite on cherchera à fixer le paramètre n_vois.

De manière à disposer de plus de souplesse vis-à-vis des options testées et des tests de validation croisée à implémenter, l'algorithme d'implémentation de la méthode d'inverse de la distance a été entièrement codée en langage R (R Core Team, 2016) dans le cadre de ce travail.

5.3.1.2. Krigeage ordinaire

Le krigeage est une méthode d'interpolation spatiale qui estime la valeur d'intérêt en un site comme une combinaison linéaire des variables connues sur les sites donneurs. L'approche est donc semblable à la méthode de l'inverse de la distance, la différence réside dans les poids attribués aux

différents donneurs. Le krigeage ordinaire constitue le meilleur estimateur linéaire non-baisé. Le terme « meilleur » signifie ici que le krigeage détermine les poids de la combinaison linéaire pour minimiser l'erreur de la variance d'estimation.

Dans le cas du krigeage ordinaire on suppose que les variables d'intérêts observées aux différents sites sont des réalisations indépendantes d'un même champ aléatoire z(x) qui ne dépend que de la position x. On suppose que la moyenne du phénomène aléatoire est indépendante de la position, et que la variance entre deux points ne dépend que de la distance qui les sépare. Cette variance est utilisée comme mesure de la similarité spatiale entre deux points. On définit l'estimateur $z^*(x_0)$ de la variable d'intérêt en x_0 comme une combinaison linéaire des valeurs de z sur les n sites donneurs, comme représenté par l'équation (9). Les valeurs des poids de krigeage λ sont obtenus en minimisant la variance de l'erreur de krigeage, ce qui conduit à résoudre le système d'équations (10), dans lequel les inconnus sont les n poids λ et le coefficient de Lagrange L. γ_{ij} est la demi-variance entre les points i et j obtenue à partir d'un modèle de variogramme.

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i z(x_i) \text{ avec } \sum_{i=1}^{n} \lambda_i = 1 \tag{9}$$

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{n} \lambda_j \gamma_{ij} + L = \gamma_{0i} \text{ pour } i = 1, \dots, n \\ \sum_{i=1}^{n} \lambda_i = 1 \end{cases} \tag{10}$$

L'estimation de la valeur $z^*(x_0)$ repose donc sur la connaissance de la semivariance entre deux points. On a supposé que cette semivariance ne dépendait que de la distance entre les points. En pratique, on construit un modèle de variogramme qui reproduise au mieux le variogramme expérimental estimé à partir des sites donneurs.

Le krigeage est un estimateur linéaire sans biais qui minimise la variance de l'erreur d'estimation. Il s'agit d'une méthode d'interpolation exacte (qui retrouve les valeurs mesurées au niveau des sites de calage) qui tient compte de la position relative des points les uns par rapport aux autres et pas uniquement de leur distance. Le krigeage possède donc des avantages par rapport à une simple approche par inverse de la distance, néanmoins, il peut être plus complexe à mettre en œuvre. Notamment, il nécessite de faire plusieurs hypothèses sur la distribution spatiales des grandeurs (stationnarité d'ordre 2), ainsi que sur l'allure du variogramme qui régit la dépendance spatiale entre les points.

L'application des méthodes de krigeage pour la régionalisation en hydrologie est assez courante. Vandewiele et Elias (1995) proposent une comparaison des méthodes de régionalisation de paramètres de modèles hydrologiques par krigeage et par combinaison des paramètres des bassins voisins. Les méthodes sont comparées sur un jeu de 75 bassins belges, et l'approche par krigeage surpasse très largement l'autre. Parajka et coll. (2005) ont étudié la régionalisation de paramètres d'un modèle hydrologique pour un jeu de plus de 300 bassins versants autrichiens et ont montré qu'une régionalisation par krigeage conduit à de meilleures performances qu'une approche par inverse de la distance pondérée, ou sélection des bassins les plus proches.

Pour l'application envisagée ici, la détermination du modèle de variogramme et son ajustement sont conduits de manière automatique grâce aux méthodes de la bibliothèque *automap* (Hiemstra et coll., 2009) du logiciel R. Cette méthode d'ajustement considère tour à tour des modèles de type sphérique, exponentiel, gaussien et de Matern et sélectionne celui qui correspond le plus aux données. L'implémentation des méthodes de krigeage est effectuée avec la bibliothèque *gstat* (Pebesma, 2004 ; Gräler et coll., 2016) du logiciel R.

5.3.1.3. Krigeage universel

Le krigeage universel est semblable au krigeage ordinaire, néanmoins, on suppose une variabilité spatiale de la moyenne du champ aléatoire z(x) (Cantet, 2017). On suppose alors que cette moyenne varie linéairement avec les coordonnées spatiales. On généralise alors l'équation (9) par l'équation (11), où μ(x) est l'espérance du champ z en x. Dans le cas du krigeage ordinaire où l'on suppose μ(x) constante pour tout x, on retrouve alors bien l'équation (9). Pour le krigeage universel, on évalue μ(x) en établissant une régression linéaire entre la variable d'intérêt aux sites donneurs et les coordonnées spatiales de ces sites. On utilise ensuite cette régression pour évaluer μ en tout point. On introduit ainsi un terme de tendance spatiale.

$$z^*(x_0) = \mu(x_0) + \sum_{i=1}^{n} \lambda_i (z(x_i) - \mu(x_i)) \text{ avec } \sum_{i=1}^{n} \lambda_i = 1 \qquad (11)$$

L'utilisation d'une méthode de krigeage universelle permet de relâcher une des hypothèses du krigeage ordinaire sur la distribution spatiale de la variable d'intérêt. Cette hypothèse est d'autant peu réaliste que l'on considère un domaine grand et diversifié.

5.3.2. Méthodes à similarité physiographiques

5.3.2.1. Régressions linéaires

L'approche de régionalisation la plus simple et la plus courante consiste à établir une régression linéaire multiple aux moindres carrés ordinaires entre le paramètre à régionaliser et les variables descriptives. Cette méthode est probablement la plus courante parmi toutes les approches de régionalisation de modèles hydrologiques que l'on peut trouver dans la littérature (Sefton et Howarth, 1998 ; Seibert, 1999 ; Kokkonen et coll., 2003 ; Merz et Blöschl, 2004 ; Oudin et coll., 2008). Ce type de modèle est employé pour la régionalisation de quantiles de crues (Thomas et Benson, 1970 ; Haddad et coll., 2012 ; Ahn et Palmer, 2016), de paramètres de distributions statistiques (Merz et Blöschl, 2005 ; Haddad et coll., 2012 ; Ahn et Palmer, 2016), de paramètres de modèles hydrologiques (Sefton et Howarth, 1998 ; Seibert, 1999 ; Oudin et coll., 2008), ou d'indice de crue (NERC, 1975 ; Gaume et coll., 2010).

La fonction géographique suit la forme de l'équation (12), dans laquelle VI_j^{regio} est l'estimation de la variable d'intérêt au site j, n_descri est le nombre de descripteurs utilisés, β est un vecteur de

n_descri+1 paramètres à déterminer, X_k^j est la valeur du k^{ième} descripteur au site j, et ε_j est le résidu de régionalisation au site j.

$$VI_j^{regio} = \beta_0 + \sum_{k=1}^{n\_descri} \beta_k X_k^j + \varepsilon_j \quad (12)$$

Les paramètres de la fonction géographique sont déterminés par la méthode des moindres carrés ordinaux qui consistent à minimiser la somme des carrés des erreurs sur les différents sites d'études. La formulation du modèle montre que l'on suppose une relation linéaire entre la variable d'intérêt et les descripteurs, et une non-colinéarité des descripteurs. En outre, on fait également l'hypothèse que les résidus de régressions sont indépendants et identiquement distribués selon une loi normale centrée en zéro. Ici, on opte pour une sélection automatique des descripteurs selon un algorithme pas à pas à double sens (*stepwise bothward*), qui teste successivement l'ajout et le retrait des différents descripteurs. Un descripteur est ajouté (ou retiré) si cette opération conduit à une diminution du critère d'information d'Akaike (Akaike, 1974), noté AIC. Ce critère tient à la fois compte de l'erreur d'estimation sur les postes donneurs mais aussi de la complexité de l'approche (nombre de descripteurs).

De nombreuses variantes de l'approche par régression ont été développées et proposées au cours du temps. On peut citer la transformation de variables pour introduire des relations non linéaires (Thomas et Benson, 1970), l'application des régressions sur des sous-régions du domaine d'étude (Tasker et coll., 1996), des modèles multiples pour prendre en compte les dépendances entre variables d'intérêts (Tung et coll., 1997), des modèles généralisés qui permettent de relâcher l'hypothèse de normalité des résidus (Stedinger et Tasker, 1985), des régressions sur les composantes principales des descripteurs pour limiter les problèmes de colinéarité entre descripteurs et maximiser la quantité d'information disponible avec un nombre limité de covariables (Sefton et Howarth, 1998), des modèles spatiaux qui considèrent une dépendance spatiale des sites ou des résidus (Ahn et Palmer, 2016),… Les possibilités sont trop nombreuses pour pouvoir êtes envisagées, néanmoins on a testé :

- Une possible transformation logarithmique des descripteurs : pour chaque descripteur on utilise cette transformation si elle permet de renforcer le lien linéaire avec la variable d'intérêt.
- Des régressions différentes sur des sous zones (voir chapitre 6)
- Une application dans laquelle les covariables utilisées sont les composantes principales des descripteurs ;
- L'application d'un modèle de régression spatiale qui prenne en compte la corrélation spatiale des résidus (voir 5.3.3.3).

Il va donc falloir déterminer quel type de régression est le plus approprié pour la régionalisation du paramètre S0/A. En outre, étant donné la taille de l'échantillon de bassin, le critère AIC apparait trop permissif pour limiter la sélection des descripteurs, et il faudra déterminer un nombre maximal de descripteurs à utiliser. L'ajustement des modèles de régression linéaire a été effectuée en utilisant les fonctions disponibles dans la bibliothèque *stats* du logiciel R (R Core Team, 2016). Néanmoins,

l'algorithme pas à pas proposé dans cette bibliothèque (fonction *step*) ne permet pas de d'imposer un nombre maximal descripteur, le code a donc été modifié pour permettre cette option.

5.3.2.2. Arbres de régression

Les arbres de régression (Breiman et coll., 1984) sont des modèles explicatifs ou prédictifs non linéaires qui permettent de relier une variable d'intérêt quantitative à un jeu de descripteurs qualitatifs ou qualitatifs.

Un arbre de régression est constitué d'une succession de nœuds. Un nœud est caractérisé par une condition binaire sur l'une des variables explicatives qui induit une division en deux classes. Ces deux classes donnent naissances à deux nouveaux nœuds. À chaque nœud on peut donc associé un sous ensemble de l'échantillon d'individus (le nœud initial étant associé à l'ensemble des individus). Les nœuds terminaux sont appelés des « feuilles » et ils sont associés à une valeur de la variable d'intérêt. Un exemple simple d'arbre de régression est fourni sur la figure 5-4. Dans ce cas une variable d'intérêt est expliquée par deux descripteurs A et B.

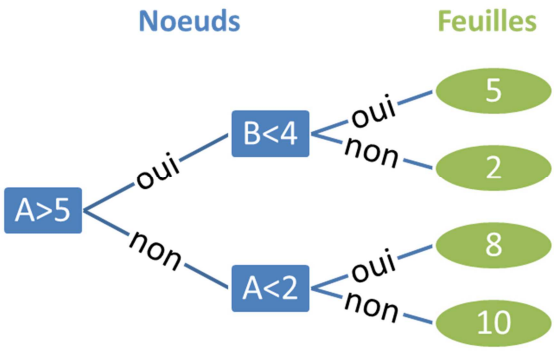


Figure 5-4 : *Exemple simple d'un arbre de régression*

Par rapport à une approche par régression linéaire, les arbres présentent plusieurs avantages (Wikistat, 2016) :

- Ils ne nécessitent aucune hypothèse sur la distribution des variables ;
- La sélection des variables est intégrée à l'algorithme de construction de l'arbre, les interactions entre variables sont donc considérées, ce qui rend les arbres adaptés aux cas où les descripteurs sont nombreux ;
- Du fait de l'invariance des divisions par transformation monotone des descripteurs, les arbres sont robustes vis-à-vis des valeurs atypiques ou des distributions fortement asymétriques.
- Il est possible de les représenter graphiquement de manière très simple.

En hydrologie, les arbres de régression sont couramment utilisés pour la classification de bassins (Nathan et McMahon, 1990), (Laaha et Blöschl, 2006) dans le but de créer des régions. Mais on trouve également des applications pour l'inférence de variables hydrologiques (Detenbeck et coll., 2005).

La construction d'un arbre de régression se déroule en deux phases : il faut d'abord construire l'arbre maximal et ensuite l'élaguer pour obtenir un arbre réduit. Cette construction se déroule en

utilisant les informations disponibles sur un jeu d'apprentissage qui correspond à l'échantillon de bassins donneurs.

1. Construction de l'arbre maximal

La construction de l'arbre maximale se déroule par scindements successifs de l'échantillon d'apprentissage en deux sous échantillons. Une division doit permettre de séparer le jeu de bassins donneurs en deux sous échantillons les plus homogènes possibles au sens de la variable d'intérêt. Pour cela on définit un critère d'hétérogénéité d'un nœud qui prend une valeur nulle si et seulement si tous les individus attribués au nœud ont la même valeur de la variable d'intérêt, et une valeur d'autant plus grande que les valeurs de la variable sont très dispersées. En pratique l'hétérogénéité d'un nœud est définie par la variance de la variable d'intérêt des individus du nœud. Pour chaque nœud on introduit donc la division qui conduit à la plus forte diminution de l'hétérogénéité des deux nœuds fils. On calcule une hétérogénéité des deux nœuds fils en moyennant la variance de chacun pondérée par leur effectif. On peut dire que la division choisie est celle qui maximise la significativité du test de Fisher (aussi appelé analyse de variance) (Wikistat, 2016).

On arrête de diviser un nœud lorsqu'il devient homogène, ou qu'aucune division n'est plus admissible. Les nœuds terminaux deviennent automatiquement des feuilles.

2. Élagage de l'arbre

L'arbre maximal pose clairement des problèmes de sur-ajustement, il est en effet possible de diviser les nœuds jusqu'à obtenir une feuille par valeur unique de la variable d'intérêt. On va garder un arbre plus parcimonieux en supprimant des branches : c'est l'élagage.

Soit A, un arbre comportant K_A feuilles, numérotés de 1 à k. K_A représente la complexité de l'arbre. On calcule D(A) la qualité d'ajustement de l'arbre par l'équation (13), dans laquelle D_k représente l'hétérogénéité du nœud terminal k. L'équation (14) définit C(A) une qualité d'ajustement qui est pénalisée par la complexité de l'arbre avec γ un coefficient de complexité.

$$D(A) = \sum_{k=1}^{K_A} D_k \tag{13}$$

$$C_\gamma(A) = D(A) + \gamma K_A \tag{14}$$

On fait croitre γ et on identifie au fur et à mesure le sous arbre qui minimise C_γ. On obtient donc une série de valeurs du coefficient de complexités associée à une série d'arbres emboités. Par validation croisée sur les bassins donneurs on identifie la valeur de γ qui permet d'aboutir aux meilleures performances prédictives, et on conserve le sous arbre associé.

La construction et l'utilisation des arbres de régression est réalisée grâce à la bibliothèque *rpart* (Therneau et coll., 2015) du logiciel R.

5.3.3. Méthodes à similarité mixte

5.3.3.1. « SimphyXY »

L'approche « simphyXY » est semblable à l'approche de l'inverse de la distance pondérée mais au lieu de se placer dans l'espace géographique, elle considère des distances euclidiennes dans un hyperespace à p dimensions définies par p descripteurs des bassins versants (parmi lesquels les coordonnées spatiales du centroïde du bassin).

Les mêmes problèmes que ceux de l'approche géographique vont se poser : choix de la métrique de distance, poids de la combinaison linéaire, taille du voisinage…. La question la plus épineuse étant bien sûr celle des variables descriptives à utiliser. Bien que ce type d'approche soit occasionnellement utilisé dans la littérature, aucune métrique générale n'a émergé et le choix des variables est donc souvent laissé à appréciation d'expert et varie d'une application à une autre selon les données disponibles, les régions, les auteurs… On peut citer des formulations extrêmement simples n'utilisant que l'altitude moyenne des bassins (Kokkonen et coll., 2003). McIntyre et coll. (2005) profitent de la disponibilité du *Baseflow Index* sur l'ensemble du territoire britannique pour proposer un indice utilisant cette information hydrologique (en plus de la surface des bassins et de la précipitation moyenne interannuelle). On peut également trouver des indices de similarité combinant un très grand nombre de descripteurs : comme Parajka et coll. (2005) qui élaborent un indice de similarité basé sur l'altitude moyenne, la densité de drainage, un indice de présence de lacs, la proportion d'aquifères poreux, d'occupation du sol, de nature du sol et des unités géologiques, ou encore Beck et coll. (2016) qui combinent l'indice d'aridité, les moyennes interannuels de précipitation, d'évapotranspiration, de température, la couverture forestière, la couverture neigeuse, la pente et la présence de sols argileux.

De manière à ne pas faire d'a priori sur le choix des variables, on introduit ici un algorithme de sélection des variables descriptives inspiré de l'algorithme pas à pas (*stepwise*) de sélection des variables pour une régression linéaire. Cet algorithme est basé sur la minimisation de l'erreur de régionalisation évaluée au sens du critère RMSE, comme définit par l'équation (15) dans laquelle VI_i^{cal} est la variable d'intérêt connue au site donneur i, et VI_i^{reg} est son estimation par la méthode de régionalisation.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(VI_i^{cal} - VI_i^{reg}\right)^2} \qquad (15)$$

On dispose de n bassins donneurs pour lesquels on connaît la valeur optimale du paramètre S0/A à régionaliser ainsi que p variables descriptives. On impose a priori le nombre de voisins (n_vois) à inclure, la puissance sur l'inverse de la distance dans la combinaison linéaire (α) et un nombre maximal de variables à inclure dans le calcul de la distance. L'algorithme est alors le suivant :

1) On définit nvar=0 (nombre de variable dans le modèle), RMSE = + ∞, et un critère de tolérance sur la variation relative du RMSE δ (ici δ=0.01).

2) Pour chaque variable v_i candidate (i entre 1 et p) on calcule la matrice de distance (euclidienne) entre les n bassins dans l'espace définis par les nvar variables déjà incluses et v_i (définition de p métriques)
3) Pour chaque bassin on identifie les n_vois bassins les plus proches selon chacune des p métriques.
4) Pour chacun des n bassins et chacune des p métriques on calcule une estimation de VI_i^{reg} par combinaison linéaire des valeurs de VI_i^{cal} calée sur les bassins voisins (méthode de l'inverse de la distance pondérée à la puissance α) ainsi que l'erreur associée.
5) Pour chacune des p métriques on calcule un critère $RMSE_i$. On identifie la variable v_{min} qui conduit à la plus faible erreur : $\min(RMSE_i)$
6) Si $\min(RMSE_i) < (1- \delta)*RMSE$:
   - la variable v_i est incluse dans le modèle
   - nvar = nvar+1
   - $RMSE = \min(RMSE_i)$

   Sinon on arrête la procédure.
7) Si nvar >2, on teste le retrait de chacune des variables déjà sélectionnées. On définit donc nvar métriques qui conduisent à nvar estimations de VI_i^{reg} sur chaque bassin et donc à nvar valeurs de $RMSE_j$ (j entre 1 et nvar). Si $\min(RMSE_j) \leq (1+ \delta)*RMSE$:
   - la variable v_j est retirée du modèle
   - nvar = nvar-1
   - $RMSE = \min(RMSE_j)$
8) Si nvar est égale au nombre max de variable à inclure on arrête la procédure, sinon on retourne à l'étape 2.

Cette procédure est donc basée sur la minimisation de l'erreur d'estimation sur les bassins donneurs. C'est-à-dire qu'encore une fois, on cherche à optimiser la méthode en exploitant l'information qui est connue sur les donneurs, puis à appliquer l'approche « optimale » sur les bassins receveurs. La procédure aboutit à la sélection des variables pour définir la métrique de distance à utiliser. Notons que toutes les variables doivent préalablement être rééchelonnées (centrées et réduites). On retiendra également qu'une variable peut être sélectionnée plusieurs fois par l'algorithme pour permettre une certaine pondération. Le temps de calcul nécessaire à la sélection des descripteurs étant important, on décide de fixer la valeur de la puissance α à 2. Il reste à déterminer les nombres de descripteurs et de voisins à prendre en compte par essais successifs

On peut ensuite utiliser la métrique identifiée pour procéder à la régionalisation des bassins de validation.

La mise en œuvre de la méthode « simphyXY » a été réalisée grâce à un programme en langage R développé dans le cadre de cette thèse. L'algorithme fait appel à celui de la méthode de l'inverse de la distance (section 5.3.1.1), en s'appuyant sur une matrice de distance différente.

5.3.3.2. Géorégression

La géorégression (Merz et Blöschl, 2005 ; Parajka et coll., 2005) est une façon simple de prendre en compte la dépendance spatiale des résidus de régression linéaire. Il s'agit en fait de l'association de deux méthodes de régionalisation :

- La variable d'intérêt est expliquée par régression linéaire (voir 5.3.2.1) ;
- Les résidus de la régression sont ensuite cartographiés à l'aide d'une interpolation spatiale (voir 5.3.1) comme un krigeage ordinaire (Merz et Blöschl, 2005) ou une méthode basée sur l'inverse de la distance (Organde et coll., 2013).

La variable d'intérêt régionalisée est donc la somme de la valeur estimée par régression et du résidu estimé par interpolation spatiale. Cette association est la base de la régionalisation de SHYREG utilisée pour la production de la base de débits de 2012 (Arnaud et coll., 2012 ; Organde et coll., 2013).

5.3.3.3. Régression spatiale

L'interpolation spatiale des résidus n'est possible qu'en présence d'autocorrélation spatiale de ces valeurs. Il y a donc non indépendance entre les résidus de la régression ce qui va à l'encontre d'une des hypothèses nécessaires à la réalisation de la régression. Par conséquent, l'interpolation spatiale des résidus peut paraitre une bonne solution puisqu'elle permet de corriger les estimations de la variable d'intérêt, généralement avec un gain manifeste (Parajka et coll., 2005 ; Organde et coll., 2013), néanmoins, elle fait douter quant au modèle de régression sélectionné. On propose donc ici de tenter d'utiliser un modèle de régression adapté pour le travail sur les variables spatialement autocorrélées : les modèles autorégressifs spatiaux. Ces modèles appartiennent au domaine de l'économétrie spatiale (Le Gallo, 2002).

Ahn et Palmer (2016) proposent une application de modèles autorégressifs dans le contexte de la prédétermination des crues en les appliquant de manière comparative sur des quantiles de crues issus d'un ajustement local et sur les paramètres de ces ajustements. L'application de ces modèles sur 237 bassins versants du nord-est des États-Unis a conduit à une amélioration des performances de régionalisation par rapport à des modèles de régressions classiques.

Bien que d'autres modèles (plus complexes) existent, on se contentera des deux utilisés par Ahn et Palmer (2016) : le modèle à décalage spatiale (LAG) et le modèle à erreur spatiale (SEM). Dans tous les cas, ces modèles reposent sur une matrice de voisinage W sensée décrire la structure spatiale et les liens existants entre les différents individus. L'équation (16) présente la structure du modèle LAG et les équations (17) et (18) celle du modèle SEM. Dans ces équations, Y est la variable d'intérêt (vecteur de longueur n, avec n le nombre d'individus), X est la matrice des descripteurs (de dimension n*p avec p le nombre de descripteurs), ε représente l'erreur aléatoire (vecteur de longueur n, suivant une loi normale centrée en 0), W la matrice de voisinage, β le vecteur des coefficients de régression (de longueur p) et ρ et λ les coefficients à déterminer.

$$Y = \rho WY + X\beta + \varepsilon \quad (16)$$

L'équation (16) montre que dans le cas d'un modèle LAG, la spatialité est attribuée à la variable d'intérêt. Ainsi, en chaque site l'estimation de cette variable est réalisée comme la somme de trois termes : une combinaison des variables d'intérêt sur les sites voisins (le signal), une combinaison linéaire des descripteurs (la tendance), auxquels s'ajoute une erreur aléatoire (le bruit). L'idée est donc de prendre en compte et de modéliser la dépendance spatiale de la variable d'intérêt pour ne pas perturber la régression.

Dans le cas du modèle SEM, l'équation (17) est identique à celle d'une régression linéaire classique, sauf que le terme d'erreur μ, n'est pas une erreur aléatoire mais possède une corrélation spatiale décrite à partir de l'équation (18). C'est donc le résidu de la régression qui porte la structure spatiale. En ce sens, le modèle SEM se rapproche de la méthode de géorégression (voir 5.3.3.2), sauf que les deux étapes sont réalisées simultanément pour neutraliser la dépendance spatiale.

$$Y = X\beta + \mu \quad (17)$$
$$\mu = \lambda W\mu + \varepsilon \quad (18)$$

Thomas-Agnan et coll. (2013) soulignent la difficulté de réaliser des prédictions « tendance-signal » hors échantillon de calage avec un modèle de type LAG (mais le souci est le même pour un modèle SEM) puisque la variable d'intérêt est généralement inconnue en dehors des sites donneurs. Le problème est partiellement levé dans le cas d'une prédiction en un site unique. En effet, la matrice de voisinage W étant généralement construite avec une diagonale nulle, la valeur y au point de prédiction importe peu puisqu'elle est multipliée par un 0 sur la diagonale de W. De manière à réaliser nos tests de calage-validation on étend ce concept en imposant des valeurs nulles dans la matrice de voisinages sur les colonnes correspondants aux sites receveurs. Ainsi, les valeurs de la variable d'intérêt Y des sites receveurs sont multipliées par un coefficient nul issu de la matrice de voisinage. Cette astuce est en fait strictement équivalente au fait de ne pas sélectionner les sites receveurs (de validation) dans les approches de voisinages des paragraphes précédents. Le même raisonnement peut se faire sur les valeurs des résidus de régression pour le modèle SEM.

Une difficulté manifeste à l'usage de ces modèles est celle de la construction de la matrice de voisinage W. On décide d'utiliser uniquement une matrice très simple. Soit W la matrice de voisinage composée des coefficients w_{ij} avec i et j entre 1 et n (le nombre total de bassins) respectivement le numéro de ligne et le numéro de colonne. On a :

- $w_{ii} = 0$ (un bassin ne peut être sélectionné comme donneur pour sa propre estimation)
- $w_{ij} = 0$ si le $j^{ème}$ bassin est un site receveur (un bassin receveur n'est jamais considéré comme donneur)
- $w_{ij} = 0$ si le $j^{ème}$ bassin n'est pas parmi les n_vois plus proches voisins du $i^{ème}$ bassin (les bassins éloignés ne sont pas corrélés)
- Sinon, $w_{ij} = \frac{1}{n\_vois}$

On pourrait envisager d'inclure des pondérations dans la matrice de voisinage pour faire décroitre le poids des bassins les plus éloignés ou pour attribués des liens plus forts aux bassins emboités. Néanmoins, les modèles spatiaux sont particulièrement longs et couteux (en termes de temps de calcul) et on n'étudiera qu'une construction simple de matrice de voisinage.

Pour la sélection des variables on utilise un algorithme similaire à la procédure pas à pas employée pour la régression linéaire classique, le terme spatial étant considéré comme une variable explicative pouvant être ajoutée ou retirée à chaque itération (en considérant à chaque fois les modèles SEM et LAG comme des alternatives).

L'implémentation des méthodes basées sur les régressions spatiales ont été réalisées à partir de la bibliothèque *spdep* (Bivand et coll., 2013 ; Bivand et Piras, 2015) du logiciel R (R Core Team, 2016).

L'algorithme de sélection des variables descriptives utilisé a été programmé en langage R en s'inspirant de celui employé pour la méthode de régression linéaire (section 5.3.2.1).

5.3.3.4. Krigeage à dérive externe

Le krigeage à dérive externe est semblable dans sa formulation au krigeage universel (voir 5.3.1.3). Néanmoins, le terme de tendance n'est pas défini uniquement à partir des coordonnées spatiales mais à partir d'un jeu de variables explicatives. On considère donc que l'espérance du champ aléatoire z(x) varie linéairement selon un ou plusieurs descripteurs. On estime la variation de μ en établissant une relation de régression linéaire entre la variable d'intérêt et ces descripteurs aux sites donneurs.

La sélection des variables explicatives est réalisée grâce à une méthode de sélection pas à pas décrite par Cantet (2017). Cette méthode est semblable à celle utilisée pour la sélection des descripteurs utilisés dans la méthode de régression linéaire. La différence est qu'ici, l'ajout d'un descripteur est permis s'il permet d'améliorer les performances prédictives de l'ensemble de la méthode de krigeage (et pas seulement de la régression). Cette performance prédictive est évaluée en validation croisée parmi les sites donneurs. La mise en œuvre d'une telle méthode de sélection sur un large échantillon de bassins versants peut donc être couteuse en temps de calcul.

Merz et Blöschl (2005) ont comparé l'utilisation de différents types de krigeage dont le krigeage à dérive externe pour la régionalisation de paramètres d'une distribution statistique des crues sur 575 bassins autrichiens. Ils démontrent que les méthodes de régionalisation exploitant à la fois les similarités physiographiques et géographiques sont plus efficaces, néanmoins, ils obtiennent de meilleures résultats par géorégression que par krigeage à dérive externe.

La mise en œuvre de méthode de krigeage à dérive externe est réalisée grâce à la bibliothèque *gstat* (Pebesma, 2004 ; Gräler et coll., 2016) du logiciel R (R Core Team, 2016). L'algorithme de sélection des variables explicatives est celui employé par Cantet (2017), adapté dans le cadre de cette thèse.

5.3.4. Méthodes non testées

La très grande diversité des méthodes et approches empêche de pouvoir toutes les tester. On doit donc se limiter à un échantillon de techniques. On a tenté lors de notre sélection de privilégier les méthodes les plus courantes (méthodes par régression linéaire, inverse de la distance, krigeage), ainsi que des méthodes qui permettent de représenter la plupart des catégories que l'on a identifiées dans ce chapitre. On a donc choisi de laisser de côté certaines approches pour pouvoir se consacrer sur d'autres. Sur la figure 5-3 on peut voir certaines de ces approches. On peut justifier leur élimination :

Partie XLV : Méthode F(X,Y) : la création d'une fonction géographique uniquement basée sur les coordonnées spatiales des sites ne paraissait pas appropriée pour une zone d'étude aussi large que la nôtre. En outre, la distribution spatiale des valeurs de S0/A calées aurait impliqué une fonction de forme complexe et difficile à construire.

Partie XLVI : Méthode « Simphy » : l'approche « Simphy » est très proche de l'approche « SimphyXY » qui est étudiée ici. La mise en œuvre de l'algorithme de sélection des descripteurs que l'on utilise dans le cadre de ces deux méthodes est très couteuse en temps de calcul, on a donc favorisé l'approche « SimphyXY » qui exploite davantage d'informations.

Partie XLVII : Inférence par réseau de neurones : la construction d'un réseau de neurone nécessite un certain nombre de décisions a priori ou de tests sur la taille et l'architecture du réseau. Le temps nécessaire au développement et à l'appropriation d'une telle approche semblait trop important, alors que l'on dispose déjà de plusieurs autres méthodes d'inférence entre la variable d'intérêt et des descripteurs de bassins.

5.4. Conclusion

Dans ce chapitre, on a tenté de conceptualiser les différentes méthodes de régionalisation rencontrées dans la littérature scientifique de manière à mettre en évidence les principales hypothèses sous-jacentes à chacune. On a ainsi pu proposer une classification de ces méthodes qui prenne en compte à la fois des différences en terme d'hypothèses (nature de la similarité) de techniques mathématiques d'estimation (méthode de transfert) et de mises en œuvre dans le cadre de la régionalisation de modèles hydrologiques (architecture de calage).

Cette classification permet d'identifier de grandes familles de méthodes et d'orienter la décision de les tester ou non. On a ainsi pu présenter les principales caractéristiques des méthodes qu'il va ensuite falloir appliquer dans le cadre de la méthode SHYREG. On a tenté de mettre en valeur les différences théoriques entre les méthodes, mais on a peu insisté sur leur capacité en termes de performances. En effet, les différentes études comparatives de méthodes de régionalisation peuvent conduire à des résultats contradictoires (Merz et Blöschl, 2005 ; Parajka et coll., 2005 ; Oudin et coll., 2008) (Blöschl et coll., 2013), ce qui laisse entendre que les performances des différents modèles dépendent des applications (domaine d'étude, objectif, modèle…).

« If you torture the data enough, nature will always confess »
(Coase, 1982, p27)

Chapitre 6 : Données pour la régionalisation

6.1. Introduction....165
6.2. Jeux de données....166
6.2.1. Caractéristiques des bassins....166
6.2.2. Caractéristiques physiographiques....166
6.3. Découpage du territoire en régions....176
6.3.1. Découpage par hydro-écorégion....176
6.3.2. Grands bassins hydrographiques....177
6.4. Étude du paramètre S0/A....178
6.4.1. Caractéristiques spatiales de S0/A....178
6.4.2. Analyse en composantes principales....180
6.5. Conclusion....183

Résumé du chapitre

Ce chapitre permet d'introduire et de présenter les données non hydrométriques qui seront par la suite utilisées pour la mise en œuvre des méthodes de régionalisation. Ces données regroupent des caractéristiques des bassins (position, taille,…), des informations climatiques (pluie, neige, évapotranspiration, …), morphologiques (densité de drainage), topographiques (altitude, pente), hydrogéologiques (classes, réserve en eau,…), ou d'occupation du sol. Ce chapitre présente également deux découpages par hydro-écorégions et par grands bassins hydrographiques.

Dans une dernière partie on tente d'établir des liens entre S0/A et les données introduites. Tout d'abord, on démontre l'existence d'une autocorrélation spatiale du paramètre hydrologique de SHYREG. Ce résultat permet de justifier l'emploi de méthodes de régionalisation basées sur une similarité spatiale des bassins versants. Dans un second, temps une analyse en composante factorielle permet de caractériser la variabilité du jeu de variables descriptrices. Néanmoins, cette analyse met en évidence le peu de corrélation entre S0/A et les différents descripteurs, notamment pour la saison hiver. Ce résultat présage de faibles performances des méthodes de régionalisation basées uniquement sur la similarité physiographique.

6.1. Introduction

Par définition un bassin non jaugé est un bassin versant pour lequel on ne dispose pas de mesure hydrométrique au niveau de son exutoire. Par conséquent, la régionalisation va chercher à exploiter d'autres types de données :

- Des informations hydrométriques, ou déduites de données hydrométriques, sur d'autres sites ;
- Des données non liées à l'hydrométrie.

Dans ce chapitre on va principalement s'intéresser à la deuxième catégorie de données. L'objectif est ici de dresser un inventaire des données que l'on considère connues sur l'ensemble du territoire, et qui sont par conséquent utilisables pour la caractérisation des bassins non jaugés. Ces données sont nombreuses et diverses, une sélection a dû être mise en œuvre de manière à limiter leur nombre. On introduira également plusieurs découpages du territoire français en sous-zones qui seront utilisées pour certaines méthodes de régionalisation. Enfin, on cherchera à étudier les éventuels liens entre les données inventoriées et le paramètres S0/A que l'on cherche à régionaliser.

6.2. Jeux de données

6.2.1. Caractéristiques des bassins

Les premières données que l'on est amené à utiliser sont liées aux bassins versants. Qu'ils soient jaugés ou non, on peut déterminer un certain nombre d'informations de nature géographique sur ces bassins. On peut notamment utiliser :

- La position de l'exutoire du bassin ;
- Le contour du bassin topographique ;
- La surface du bassin topographique ;
- La position du centroïde du bassin.

Ces différentes informations sont estimées à partir de la position de l'exutoire et d'un modèle numérique de terrain. Ces données sont essentielles. En effet, la surface du bassin versant est le premier facteur expliquant l'amplitude des débits à un exutoire. De plus, le contour est indispensable pour connaitre l'emprise spatiale du bassin et donc étudier ses caractéristiques physiographiques. Enfin, la position du centroïde apporte une information supplémentaire par rapport à celle de l'exutoire. Si on souhaite résumer la position du bassin à un unique point on peut :

- Utiliser l'exutoire si l'on cherche à caractériser un phénomène qui s'accumule d'amont en aval dans le bassin comme les débits ou la surface de drainage ;
- Utiliser le centroïde si on cherche à représenter un phénomène moyen.

6.2.2. Caractéristiques physiographiques

Une fois que l'on connait l'emprise spatiale des bassins versants, on peut chercher à étudier les caractéristiques physiographiques de chacun d'entre eux. Ces caractéristiques sont de différentes nature : climatique, topographique, morphologique…. Ces variables sont résumées dans le tableau 6-1. Plus de détails sur chacune de ces variables sont fournis dans les parties suivantes.

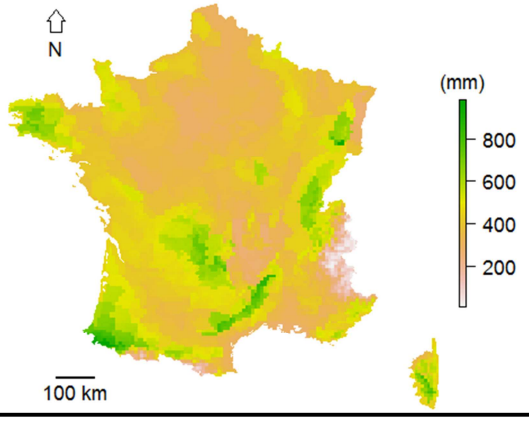
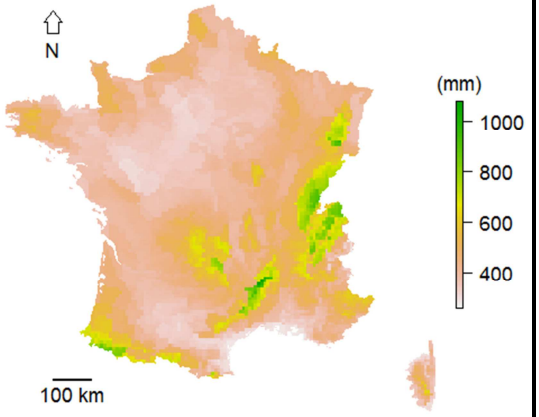
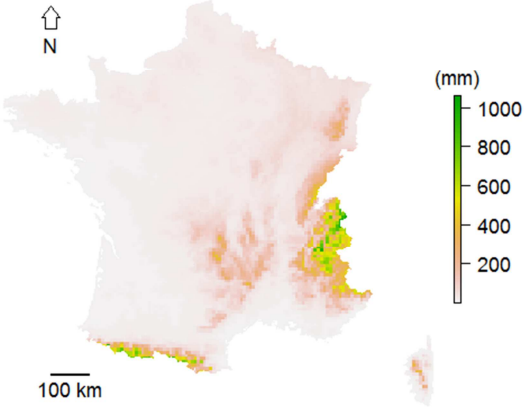
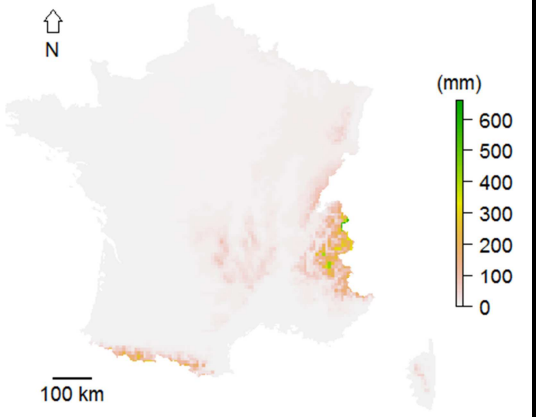
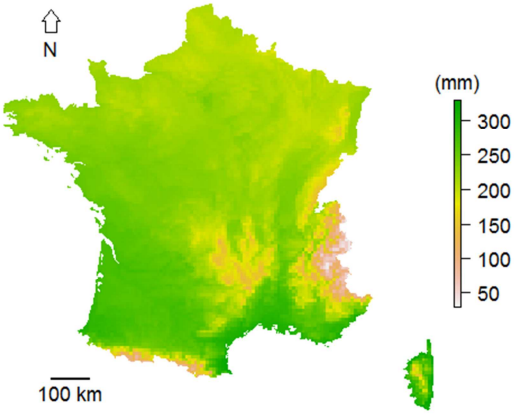
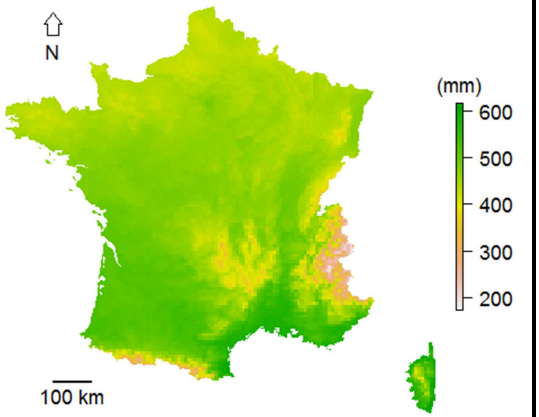
Tableau 6-1 : *Résumés des différentes données physiographiques*

Type	Source	Variable	Nom	Unité
Climat	SAFRAN (Vidal et coll., 2010) Formule de Budyko (Budyko, 1958)	Indice d'aridité	Arid	/
	SAFRAN (Vidal et coll., 2010)	Évapotranspiration	ETP	mm
		Cumuls de précipitations solides	Neige	mm
		Cumuls de précipitations liquides	Pluie	mm
		Température	T	°C
	SAFRAN (Vidal et coll., 2010) et Aubert (2012)	Humidité du sol moyenne	SAJ	/
		Humidité du sol moyenne avant un évènement pluvieux (>20mm)	SAJ20	/
	Caractéristiques de pluie SHYREG (Sol et Desouches, 2005)	Durée moyenne des évènements	DT	h
		Nombre moyen d'évènements par saison	NE	/
		Intensité moyenne des évènements	PJ	mm
Morphologie	(Organde et coll., 2013) à partir de la base Carthage (IGN et ONEMA, 2013)	Densité de drainage	DDr	/
Topographie	Copernicus(European Union Agency, 2016)	Altitude	Alt	m
		Pente	Pente	%
Hydrogéologie	Aubert (2012) à partir de Margat (1978)	Capacité du réservoir de production SHYREG	AHg	mm
	(Poncelet, 2016) à partir de European Soil Database (Finke et coll., 1998)	Réserve utile potentielle en eau	RUP	mm
	European Soil Database (Finke et coll., 1998)	Présence de couches sableuses	HGsand	%
		Présence de couche rocheuse	HGrock	%
		Sol à faible capacité d'infiltration	LOWcapa	%
		Sol à capacité d'infiltration moyenne	MEDcapa	%
		Sol à forte capacité d'infiltration	HIGHcapa	%
Occupation du sol	*Corine Land Cover* (European Union SOeS, 2012)	Couverture forestière	Forest	%
		Couverture agricole	Arable	%
		Couverture herbacée ou à végétation basse	Grassland	%

La distribution spatiale de ces descripteurs est connue à une certaine résolution. Néanmoins on souhaite utiliser ces descripteurs pour caractériser une entité spatiale qui correspond à notre échelle de modélisation (bassin versant, complémentaires ou pixel selon l'application). Pour cela, les informations sont toutes rééchelonnées sur une grille de résolution kilométrique. L'objectif est de

faire correspondre l'échelle des données et celle de la modélisation. Dans les cas où l'on souhaite caractériser une entité de plus grande taille (par exemple un bassin), on peut calculer une moyenne spatiale des différentes valeurs sur l'entité.

6.2.2.1. Données climatiques

	Hiver	Été
Précipitations liquides		
Précipitations solides		
Évapotranspiration potentielle		

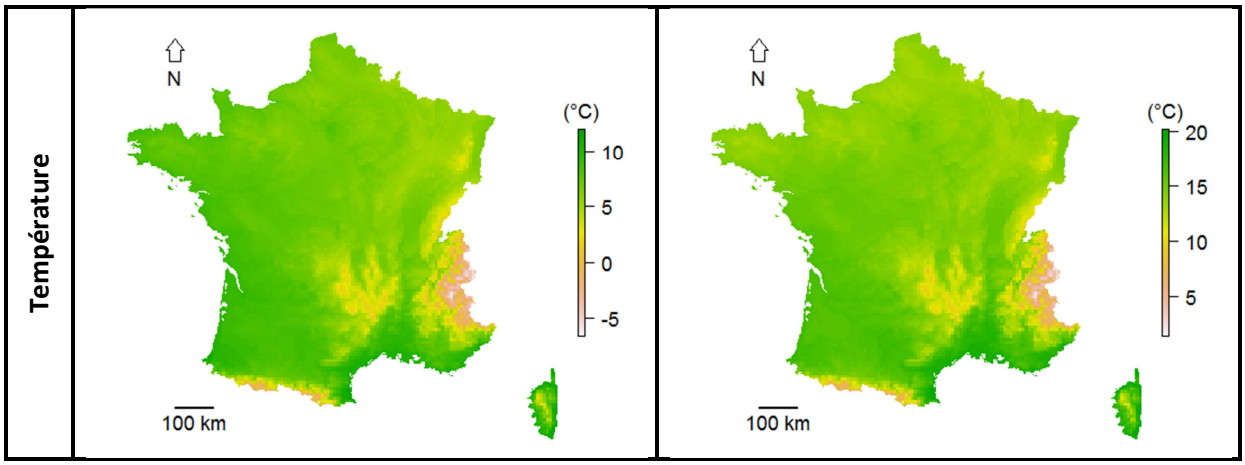


Figure 6-1 : *Descripteurs climatiques saisonniers issus de SAFRAN*

On caractérise le climat français à partir des données SAFRAN (Vidal et coll., 2010). La base SAFRAN utilisée rassemble des données météorologiques diverses au pas de temps journalier. Les données remontent jusqu'en 1958. Les données sont interpolées spatialement à partir des mesures issues de stations météorologiques au sol. La résolution spatiale est de 8 km. Le principal avantage de cette base de données est la longueur de la période couverte qui permet d'établir des statistiques robustes.

Dans le cadre de la régionalisation, on s'intéresse à la variabilité spatiale du climat. On doit donc synthétiser l'information temporelle. Pour cela, on calcule les cumuls de précipitations (solides ou liquides) et d'évapotranspiration potentielle (calculée par la formule d'Oudin) sur chacune des deux saisons SHYREG de chaque année. Ces cumuls saisonniers sont ensuite moyennés sur l'ensemble des années disponibles. On calcule également une température moyenne pour chacune des saisons. Les différentes cartes obtenues sont présentées sur la figure 6-1.

En outre, on crée un descripteur de l'aridité en employant la formule de Budyko (1958). Dans ce cas, l'aridité est définie comme le rapport de l'évapotranspiration sur les précipitations. On utilisera uniquement un indice annuel, présenté sur la figure 6-2.

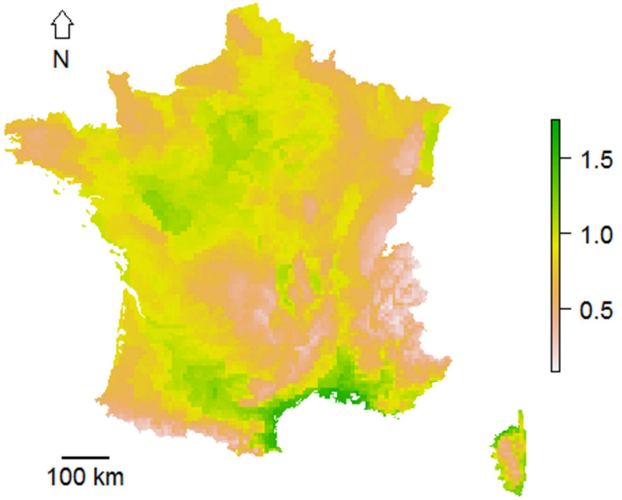


Figure 6-2 : *Descripteur de l'aridité*

Grâce aux données SAFRAN on calcule également un indice d'humidité des sols. Cet indice est calculé en alimentant un modèle hydrologique avec les chroniques de pluie observée. De manière à ce que cet indice corresponde au mieux à SHYREG, on calcule cette humidité grâce au modèle hydrologique GR simplifié utilisé dans SHYREG (voir chapitre 2). On définit deux indices compris entre 0 et 1 :

- SAJ est le taux de remplissage moyen du réservoir de production A lorsque le modèle est alimenté par la chronique de pluie SAFRAN ;
- SAJ20 est le taux de remplissage moyen du réservoir de production A avant un évènement pluvieux ayant au moins un cumul journalier de 20 mm ou plus. Ce seuil correspond au seuil de définition et d'analyse des évènements pluvieux SHYREG en France métropolitaine.

Ces indices sont calculés pour chacune des deux saisons. Les cartes résultantes sont présentées sur la figure 6-3.

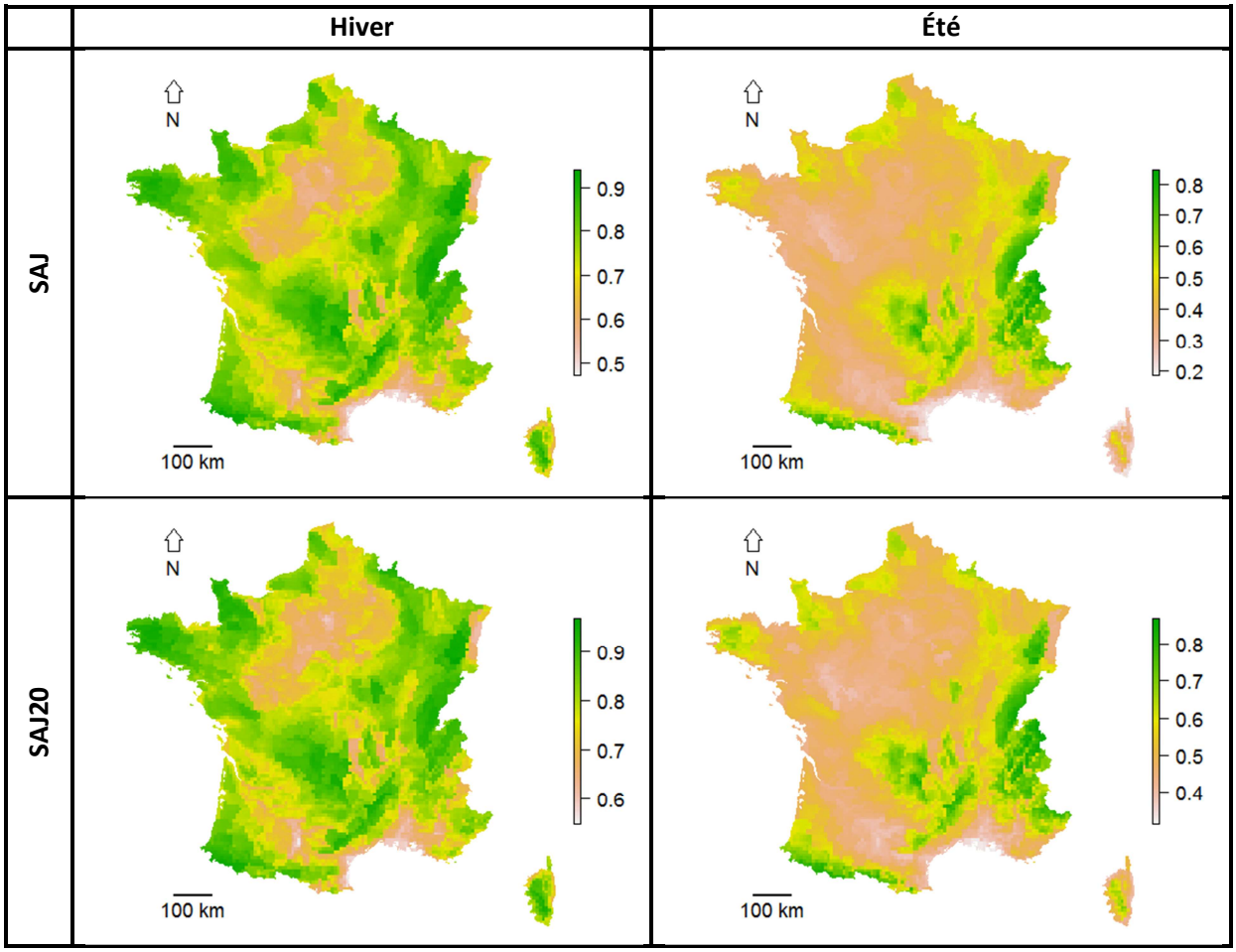


Figure 6-3 : *Descripteurs de l'humidité des sols*

Enfin, de manière à caractériser la pluie par d'autres caractéristiques que le cumul saisonnier, on peut considérer les paramètres du générateur de pluie de la méthode SHYREG (Sol et Desouches, 2005). Ces grandeurs permettent de caractériser les évènements pluvieux en termes d'intensité, de durée et de nombre d'occurrences. Elles sont estimées à partir de données pluviométriques issues de pluviomètres au sol au pas de temps journalier, et sont régionalisées sur une grille de résolution

kilométrique en utilisant des informations sur la topographie. Les cartographies de ces descripteurs sont présentées au chapitre 2.

6.2.2.2. Données topographiques

On caractérise la topographie des bassins versants à l'aide de deux descripteurs : l'altitude et la pente. Ces deux données sont directement extraites des bases de données du programme européen Copernicus (European Union Agency, 2016). On dispose alors d'un modèle numérique de terrain fournissant l'altitude moyenne à une résolution de 25 m. Cette information est dégradée à une résolution kilométrique et la pente correspondante est dérivée. Ces descripteurs sont représentés sur la figure 6-4.

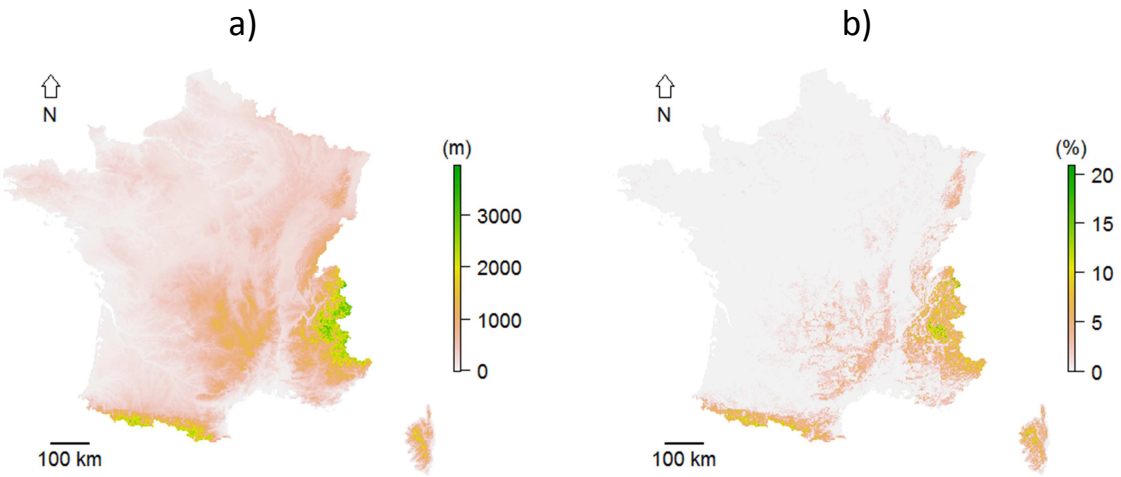


Figure 6-4 : *Descripteurs topographiques*
a) Altitude ; b) Pente

6.2.2.3. Données morphologiques

La morphologie des bassins versants est représentée par un indice de densité de drainage qui décrit la présence de drains par unité de surface. Ce descripteur est issu du travail de (Organde et coll., 2013) à partir de la base de données Carthage (IGN et ONEMA, 2013) qui recense les cours d'eau français. En chaque pixel de résolution kilométrique, la densité de drainage est évaluée comme le nombre de sous-pixels de résolution 100 m traversés par un cours d'eau naturel. Ce descripteur est représenté sur la figure 6-5.

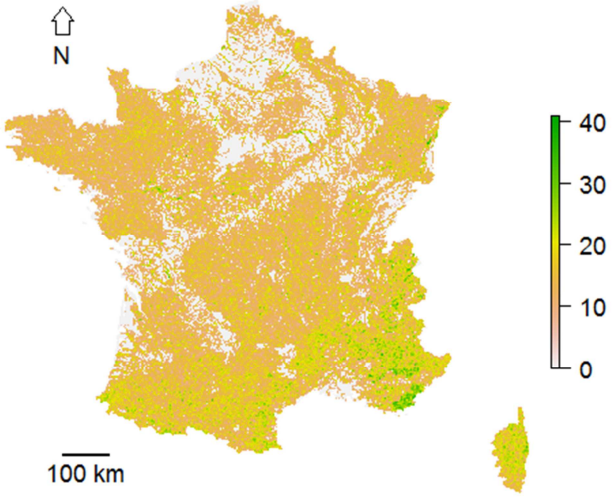


Figure 6-5 : *Descripteur de la densité de drainage*

6.2.2.4. Données d'occupation du sol

L'occupation du sol est estimée à partir de la base de données *Corine Land Cover* (European Union SOeS, 2012). Cette base européenne cartographie l'information d'occupation du sol à une résolution de 20 à 25 m sous forme de polygones. Cette information est dégradée à une résolution kilométrique en considérant la classe majoritaire sur chaque pixel. On retient ensuite trois principaux

types d'occupation du sol : les milieux forestiers, les milieux agricoles, et les milieux à végétation basse ou herbacés. Les autres classes d'occupation du sol (zones urbaines, humides, rocheuses…) sont minoritaires (6% du territoire) et considérées comme négligeables. On notera que les trois classes majoritaires sont définies du point de vue de la végétation, la zone agricole est donc caractérisée par des cultures annuelles, les pâturages et zones d'élevages étant rattachés à la classe « prairie ». La cartographie de ces zones d'occupation du sol est fournie sur la figure 6-6.

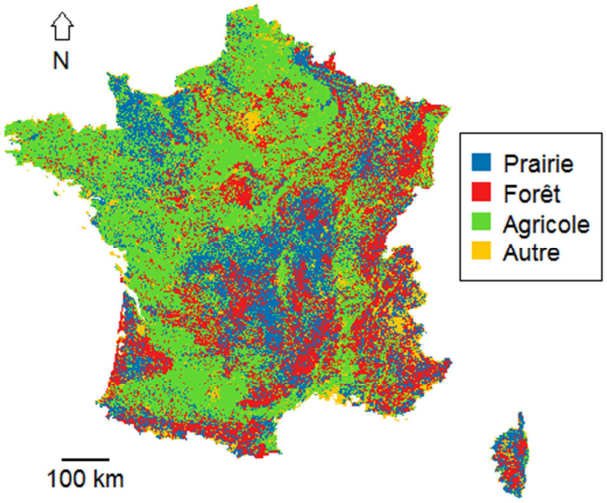


Figure 6-6 : *Principales zones d'occupation du sol*

L'information sur l'occupation du sol est de nature qualitative en chaque pixel. Pour caractériser l'information d'un bassin versant on peut créer trois descripteurs quantitatifs correspondant au pourcentage de pixels du bassin versant attribué à chacune des trois classes d'occupation du sol.

6.2.2.5. Données hydrogéologiques

Dans le modèle SHYREG, l'hydrogéologie est prise en compte pour déterminer la capacité maximale du réservoir de production A (Aubert, 2012). Le paramètre à régionaliser correspond au taux de remplissage avant chaque évènement de ce réservoir. De manière à détecter une éventuelle corrélation entre ces variables, on utilise la capacité de ce réservoir comme descripteur de l'hydrogéologie. La cartographie du paramètre A est fournie au chapitre 2.

Les autres descripteurs de l'hydrogéologie sont issues de l'*European Soil Database* (Finke et coll., 1998). Cette base rassemble de nombreux descripteurs souvent qualitatifs sur la géologie, la pédologie, l'occupation des sols ou l'hydrogéologie en Europe à une résolution kilométrique. L'avantage de cette base de données, par rapport à d'autres comme la base de données LISA (BRGM, 2015) tient principalement à sa simplicité d'utilisation et à sa résolution kilométrique identique à celle à laquelle on travaille. On utilise l'ESDB pour créer plusieurs descripteurs.

Tout d'abord, on crée un descripteur qualitatif de la capacité d'infiltration des sols. On regroupe les différentes classes disponibles en trois niveaux (faible, moyen et fort), le descripteur résultant est présenté sur la figure 6-7.

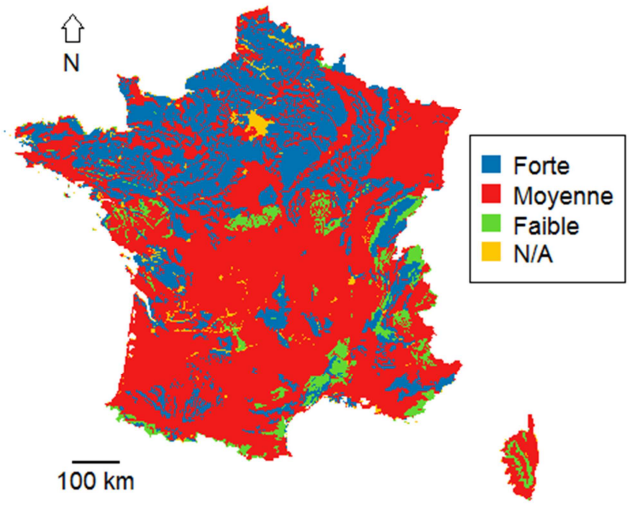


Figure 6-7 : *Classes de capacité d'infiltration des sols*

L'ESDB contient également des classes de comportement hydrogéologique que l'on exploite pour identifier des fonctionnements particuliers. On retient quatre classes reflétant la présence de couches rocheuses, sableuses, peu perméables ou fortement humides. La répartition spatiale de ces différentes classes est présentée sur la figure 6-8.

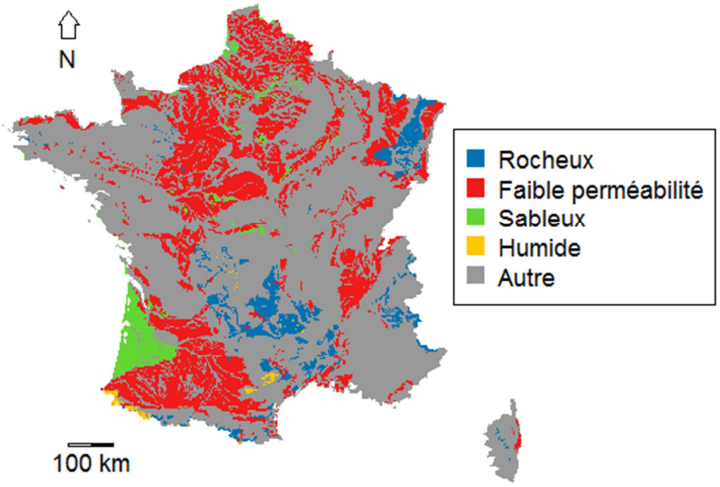


Figure 6-8 : *Classes hydrogéologique à fonctionnement particulier*

Les variables qualitatives présentées précédemment peuvent être transformées en variables quantitatives pour chaque bassin en considérant le pourcentage de chaque bassin occupé par les différentes classes.

Enfin, on utilise une estimation de la réserve utile potentielle en eau issue du travail de Poncelet (2016). La réserve utile potentielle en eau (en millimètres) correspond au produit de la profondeur du sol par la somme des réserves utiles superficielles et profondes (en millimètre par unité de profondeur). La cartographie résultante est présentée sur la figure 6-9. On peut voir que la réserve utile potentielle se recoupe avec les classes de capacité d'infiltration de la figure 6-7, mais il s'agit cette fois d'une variable quantitative.

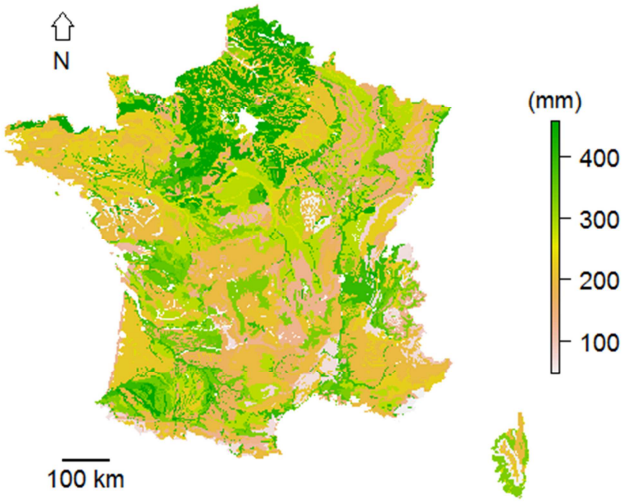


Figure 6-9 : *Carte de la réserve utile potentielle en eau*

6.3. Découpage du territoire en régions

La mise en œuvre des méthodes de régionalisation peut se faire à l'échelle de l'ensemble du territoire français, ou de manière indépendante sur des sous-zones. L'idée d'un travail par région est de limiter la sélection des bassins donneurs à un sous-échantillon supposé plus similaire. On souhaite tester l'apport d'une régionalisation par grandes zones géographiques par rapport à une application nationale. Cette approche correspond donc à un zonage comme décrit au chapitre 5. On justifie ce type d'approche par sa simplicité. Il est en effet plus aisé de se baser sur des régions préexistantes puisque le découpage en région doit se faire a priori. En outre, un travail par région ne signifie pas que tous les bassins d'une région vont être utilisés pour estimer la valeur d'intérêt sur chaque bassin cible de la même région. En effet, certaines méthodes de régionalisation (les méthodes par combinaison) procèdent à une sélection des bassins donneurs parmi ceux disponibles. Le découpage en régions permet seulement de limiter cette sélection, et de séparer des types de fonctionnement différents.

On propose deux découpages en régions comme alternatives à un travail à l'échelle nationale.

6.3.1. Découpage par hydro-écorégion

Les Hydro-écorégions (Wasson et coll., 2002), aussi notée HER, constituent une typologie des cours d'eau sur des bases géographiques. Ces régions ont été développées dans le cadre de la directive cadre européenne sur l'eau pour définir des conditions biologiques, physico-chimiques et hydro-morphologiques de référence des cours d'eau. Ces régions ont donc été créées pour le domaine de l'écologie et définissent des zones dans lesquelles les écosystèmes aquatiques présentent des caractéristiques communes. Néanmoins, le découpage des HER est basé sur la géologie, le relief et le climat, et leur portée va donc au-delà de l'écologie. Les hydro-écorégions sont régulièrement utiliser en hydrologie. Par exemple, Ribatet et coll. (2007) utilise une hydro-écorégion qu'il suppose homogène pour l'application de la méthode de l'indice de crue en France métropolitaine. Garcia (2016) utilise des régions basées sur les hydro-écorégions pour régionaliser les paramètres d'un modèle pluie-débit continu sur l'ensemble du territoire. Cipriani et coll. (2012) établit des relations entre le débit décennal de pointe et des descripteurs de bassins, ses équations varient selon des régions établis à partir des hydro-écorégions.

La typologie HER possède deux niveaux. Le niveau le moins détaillé comporte 22 régions. Certaines régions étant de taille réduite, on dispose de peu de stations dans certaines de ces régions ce qui est gênant pour l'implémentation et l'évaluation des méthodes de régionalisation. On procède donc à un regroupement de certaines zones. Ces regroupements sont basés sur la proximité des régions dans un espace défini par les composantes principales calculées sur les différentes variables descriptrices décrites plus haut. On prend également soin de regrouper en priorité des régions proches voire attenantes. Enfin, on stoppe les regroupements lorsque le nombre de station par région apparait satisfaisant. On définit ainsi les 10 régions HER présentées sur la figure 6-10.

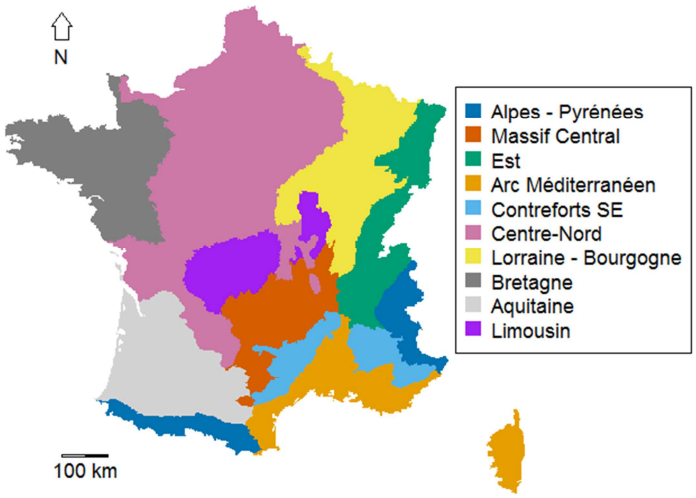


Figure 6-10 : *Regroupement en dix régions des hydro-écorégions*

6.3.2. Grands bassins hydrographiques

On définit un découpage selon les grands bassins hydrographiques français. Ces régions correspondent aux bassins versants des grands fleuves français ou à des rassemblements de bassins de fleuves côtiers ou frontaliers plus modestes. Ces grands bassins ont été définis lors de la création de la Base Nationale des Bassins Versants. Il résulte un découpage en 12 régions présentées sur la figure 6-11. Le principal avantage de ce découpage est qu'un bassin versant n'appartient qu'à une seule région.

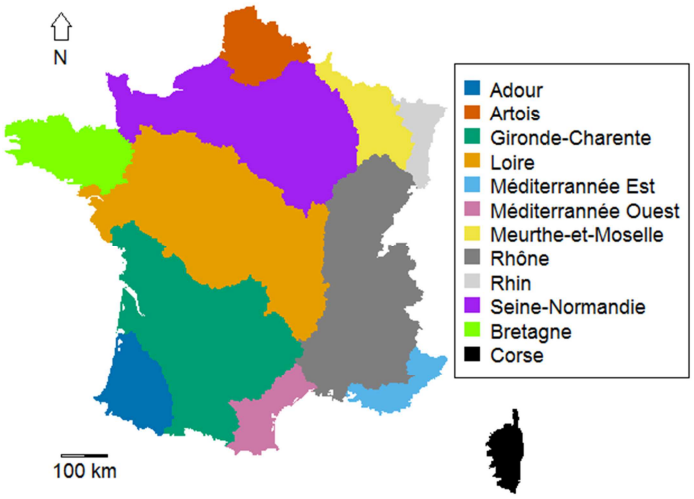


Figure 6-11 : *Grands bassins hydrographiques*

6.4. Étude du paramètre S0/A

Le principal objectif de cette partie est de présenter les principales caractéristiques du paramètre S0/A calé par la méthode identifiée au chapitre 3, lorsque l'on le met en relation avec les différentes données présentées dans les parties précédentes.

6.4.1. Caractéristiques spatiales de S0/A

On représente la distribution spatiale des valeurs de S0/A sur la figure 6-12. Sur ces cartes les valeurs calées en chaque complémentaire de bassin sont représentées au point centroïde des complémentaires. On peut y voir que les valeurs du paramètre sont globalement plus faibles en été qu'en hiver, ce qui est logique la saison été étant plus sèche. On remarque également une certaine organisation spatiale des valeurs du paramètre avec des zones où, quelle que soit la saison, les valeurs sont plus faibles (bassins parisien, bassin rhénan, Landes) ou plus fortes (sud du Massif Central, Franche Comté, Lorraine).

Les cartes de S0/A laissent supposer l'existence d'une forte autocorrélation spatiale que l'on cherche à prouver au moyen d'un test de randomisation (Aubry, 2000 ; Cantet, 2009). L'intérêt principal de ce test est de permettre de ne pas faire d'hypothèse a priori sur la structure spatiale de la variable étudiée (Aubry, 2000).

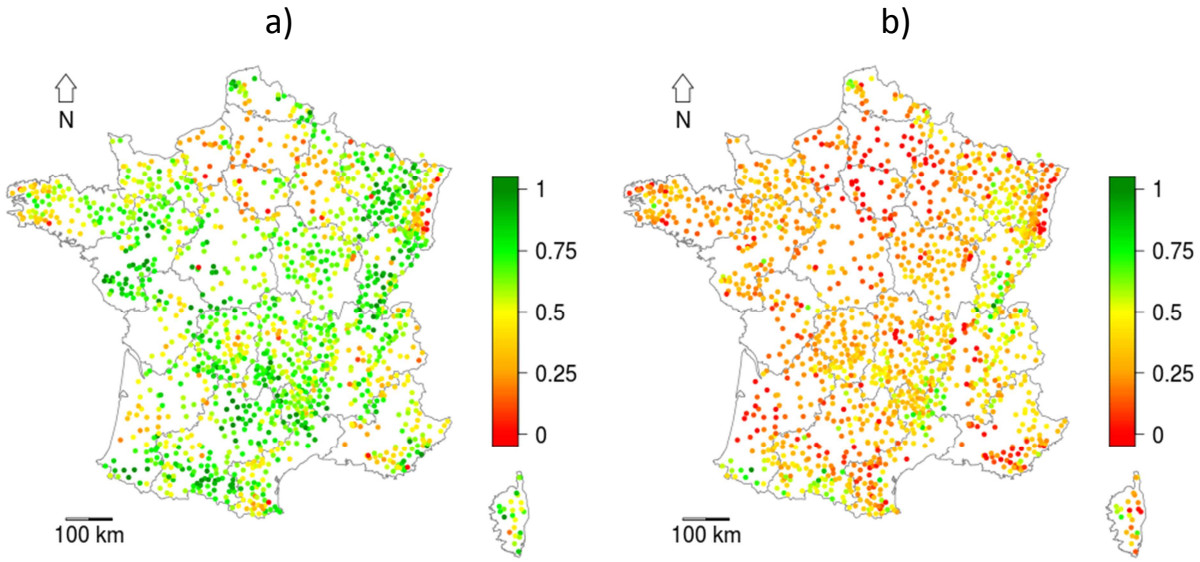


Figure 6-12 : *Cartes des valeurs de S0/A calées*
a) saison hiver ; b) saison été

Le test de randomisation se base sur N (choisi grand) rééchantillonnages aléatoires des valeurs observées. L'idée est d'attribuer aléatoirement chacune des valeurs observées à l'un des points d'observation. On obtient donc N jeux de variables sur lesquels on peut supposer qu'il y a indépendance spatiale. On compare alors le variogramme expérimental issu du vrai jeu de données à ceux des N jeux rééchantillonnés. Le passage du variogramme expérimental à l'intérieur du faisceau des variogrammes rééchantillonnés indique une absence de corrélation spatiale à la gamme de

distance considérée. Un positionnement à l'extérieur du faisceau indique la présence d'autocorrélation. Notamment, un variogramme en dessous du faisceau indique une autocorrélation spatiale positive, c'est-à-dire que la corrélation croit lorsque la distance diminue. On peut estimer des intervalles de confiance en considérant un faisceau contenant un certain pourcentage des variogrammes rééchantillonnés autour de la médiane. Ce procédé permet donc à la fois de tester la présence d'autocorrélation spatiale d'un jeu de données sans faire d'hypothèse a priori sur la structure spatiale de cette autocorrélation mais aussi d'en estimer (grossièrement) la portée.

L'expérience semble montrer que N=500 rééchantillonnages aléatoires sont suffisants pour obtenir une stabilisation des résultats. En outre le pas du variogramme est choisi à 20 km, cette distance est choisie en considérant une répartition uniforme des postes sur l'ensemble des 550 000 km² du territoire français. De manière à garder les calculs simples, on utilise la distance euclidienne entre les centroïdes des complémentaires de bassins comme métrique des distances entre les bassins. Les variogrammes issus de ces tests sont présentés sur la figure 6-13. Les résultats des tests montrent clairement l'existence d'une autocorrélation spatiale positive pour une gamme de distance allant jusqu'à environ 300 km quelle que soit la saison. On peut considérer qu'au-delà de cette distance, les valeurs des paramètres sont indépendantes deux à deux. Au contraire, en deçà de 300 km plus les bassins sont proches plus on peut considérer que les valeurs du paramètre sont similaires. On peut également voir que les valeurs de S0/A pour la saison été sont plus homogènes spatialement que celles de la saison hiver puisque les valeurs de demi-variance sont globalement plus faibles. On pouvait suspecter ce résultat à partir des cartes de la figure 6-12. En effet, la carte de S0/A calé en hiver semble plus « rugueuse » que celle de l'été.

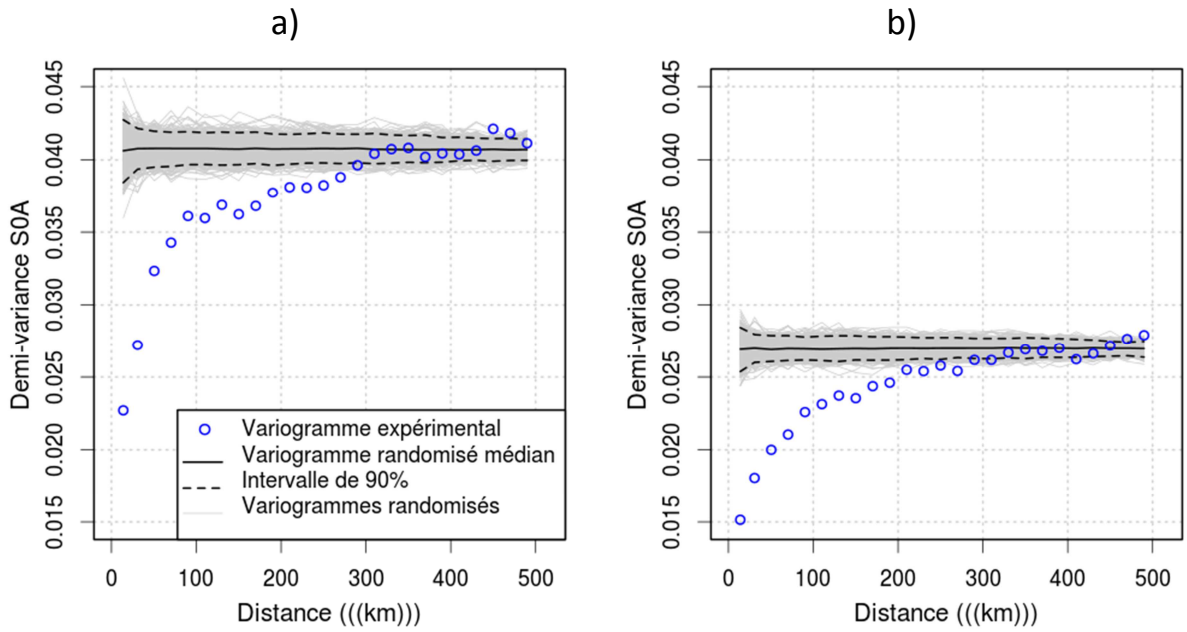


Figure 6-13 : *Test de randomisation sur les valeurs de S0/A*
a) saison hiver ; b) saison été

L'existence d'une autocorrélation spatiale positive permet de justifier l'emploi de méthodes de régionalisation utilisant la proximité spatiale comme mesure de la similarité entre les sites d'étude.

6.4.2. Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales est une méthode d'analyse des données multivariées. Elle se base sur un jeu de données possiblement corrélées, et crée un nombre réduits de variables décorrélées appelées composantes principales. L'objectif est de synthétiser au maximum la variabilité du jeu de variables initiales pour en faciliter l'analyse. D'un point de vue géométrique, on peut voir une analyse en composantes principales comme un changement de repère. Initialement, Les variables sont représentés par un nuage de n points (n étant le nombre d'individus, par exemple les bassins versants), dans un espace à p dimensions (p étant le nombre de descripteurs). On cherche alors à déterminer un repère orthogonal de dimension inférieure à p dans lequel le nuage de point est le mieux représenté. Pour cela on détermine successivement des axes orthogonaux entre eux de manière à maximiser la variance des valeurs projetées sur chacun de ces axes.

On va ici appliquer une analyse en composantes principales sur le jeu de variables descriptrices (en séparant les variables saisonnières). Cette analyse va permettre d'identifier des variables très corrélées. On va également représenter le vecteur de valeurs de S0/A sur les axes principaux, mais sans utiliser ses valeurs pour déterminer ces axes, de manière à détecter d'éventuelles corrélations.

La figure 6-14 représente le cercle des corrélations entre les différentes variables sur les deux premières dimensions pour la saison hiver. Ces deux dimensions ne représentent que 46% de la variabilité du jeu de données (dont 29% pour la première dimension). Les sept premières dimensions représentent 75% de cette variabilité. Trente variables différentes étant inclues dans l'analyse on peut tout de même dire que les composantes principales permettent de bien synthétiser l'information. Néanmoins, il est tout de même nécessaire d'utiliser un nombre assez important de dimensions pour correctement représenter le jeu de données ce qui montre la diversité des descripteurs inclus.

La figure 6-14 montre que l'on ne décèle pas de corrélation entre les valeurs de S0/A en hiver et les différentes composantes principales ce qui illustre la difficulté d'expliquer la variabilité du paramètre d'un bassin à un autre. Ce résultat est généralisable aux composantes non représentées sur le cercle. On peut tout de même chercher à interpréter les composantes principales. Pour cela, pour chaque dimension on identifie les variables qui contribuent le plus.

La première dimension est caractérisée par des complémentaires de bassins à forte altitude et pente, présentant de forts cumuls de précipitations liquides et solides et de faibles températures et cumuls d'évapotranspiration. Logiquement, cette dimension est caractérisée par une faible aridité. Cette dimension est plutôt liée à une couverture forestière et par l'absence de cultures agricoles. Ces caractéristiques semblent plutôt liées aux zones montagneuses. On peut donc dire que la première source de variabilité au sein de notre jeu de descripteur est liée au relief.

La seconde dimension est liée à l'humidité des sols qui sont caractérisés par de fortes capacités de stockage. La dimension est corrélée négativement avec l'évapotranspiration et la température. Elle est caractérisée par des averses longues mais peu intenses. Les bassins sont faiblement drainés. Cette dimension semble établir une différence entre des bassins du nord et du sud, la corrélation étant positive avec l'augmentation de la latitude. Cette dimension semble capable de différencier les

bassins à faible ruissellement (faible densité de drainage, forte capacité d'infiltration, pluies longues et peu intenses…) plutôt situés dans le nord du pays.

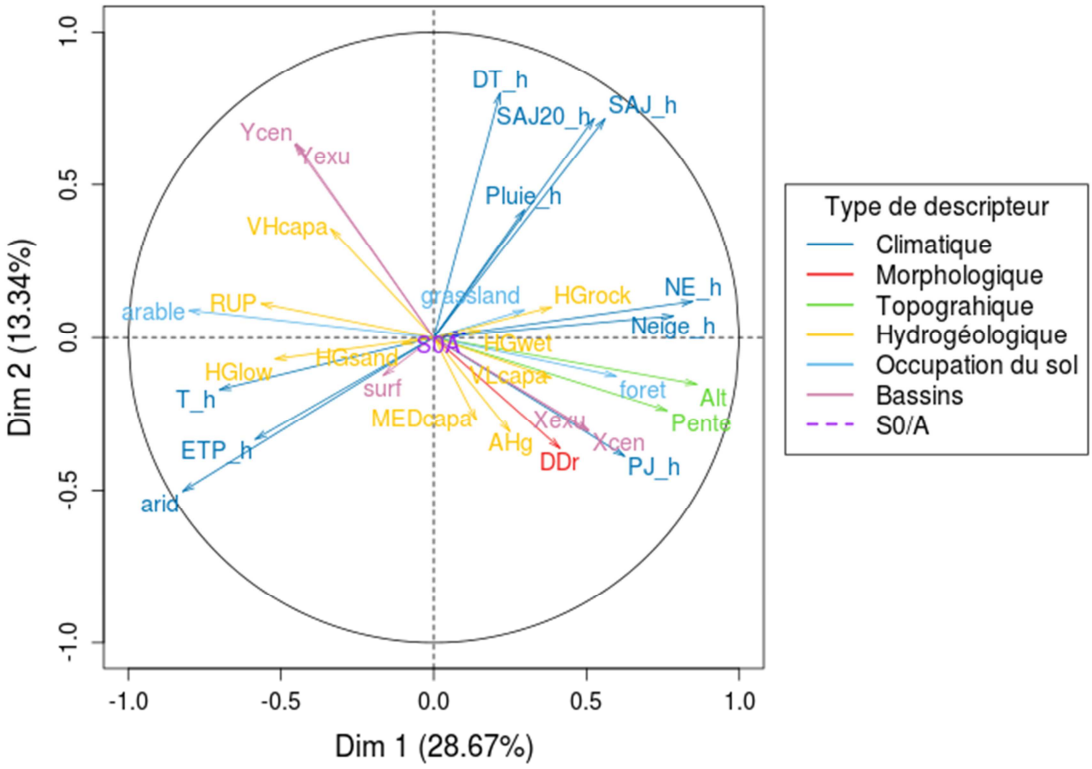


Figure 6-14 : *Résultat de l'analyse en composantes principales pour la saison hiver*

Les résultats de l'analyse en composantes principales pour la saison été sont représentés sur la figure 6-15. Dans l'ensemble les résultats sont assez proches de ceux de la saison hiver. Notons tout de même une corrélation positive de S0/A relativement importante avec la première dimension. Cette dimension peut toujours être attribuée au caractère montagneux des bassins. Cette corrélation peut se vérifier sur la carte de la figure 6-12 b), sur laquelle on peut voir que les valeurs de S0/A semblent plus fortes sur les Alpes, les Pyrénées, le sud du Massif Central et les Vosges.

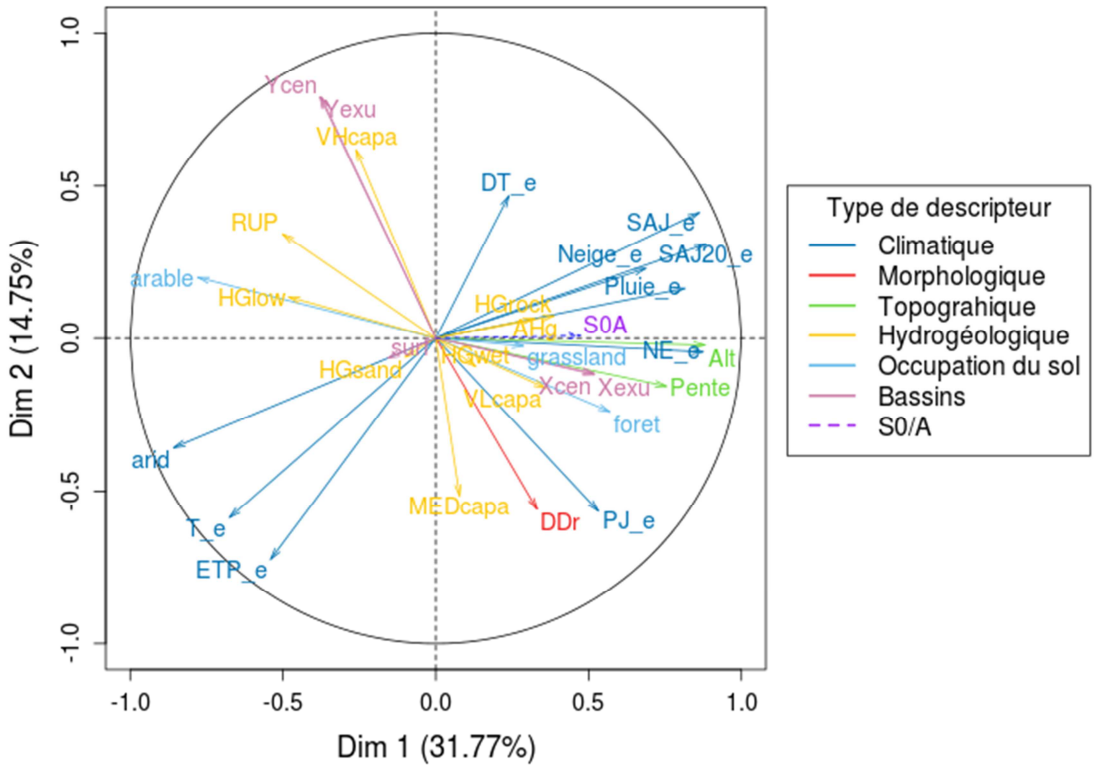


Figure 6-15 : *Résultat de l'analyse en composantes principales pour la saison été*

L'application d'une analyse en composantes principales sur le jeu de variables descriptrices permet d'appréhender ces données et d'étudier leurs relations. On peut par exemple voir des corrélations fortes entre les coordonnées des exutoires et des centroïdes des complémentaires de bassins, ainsi qu'entre les deux indicateurs d'humidité des sols et entre la température, l'évapotranspiration, l'aridité et le cumul neigeux (dans le dernier cas la corrélation est négative). Les indicateurs de pente et d'altitude sont également logiquement très proches. On notera également une corrélation entre l'indicateur d'intensité des averses et la densité de drainage, dans ce cas on peut supposer une relation de cause à effet, les pluies fortes étant plus susceptibles de créer des thalwegs par des ruissellements intenses. Enfin on peut remarquer, l'absence de corrélation entre l'indicateur de réserve utile et la taille du réservoir de production SHYREG, ce qui peut indiquer que bien que le réservoir A soit fixé par zone hydrogéologique, sa taille n'est pas nécessairement liées aux caractéristiques de ces zones.

6.5. Conclusion

Ce chapitre s'est focalisé sur l'étude des données non hydrométriques dont on dispose sur les bassins versants jaugés ou non. Il a permis une présentation de chacun des descripteurs qui seront utilisés dans les différentes méthodes de régionalisation, ainsi que deux découpages en sous-zones. Après ces étapes descriptives, on a pu procéder à une analyse des différentes données en lien avec le paramètre S0/A à régionaliser. Ces analyses ont permis de démontrer l'existence d'une autocorrélation spatiale dans la répartition du paramètre dans l'espace. Cette autocorrélation permet de justifier l'emploi de méthodes de régionalisation à base spatiale. Enfin, une analyse en composantes principales a permis d'étudier plus en détails les différents descripteurs et leurs interrelations. Cette analyse a permis de détecter une corrélation positive entre le paramètre S0/A de la saison été et le caractère montagneux des bassins. Néanmoins, aucune explication de la variabilité du paramètre de la saison hiver n'a pu être identifiée. Ces résultats laissent présager de faibles capacités prédictives des modèles de régionalisation explicatifs, notamment pour la saison hiver. Néanmoins, le fondement théorique de ces méthodes par rapport aux méthodes spatiales nous pousse à tout de même vouloir tester des méthodes à bases physiographiques.

Il semble que la perfection soit atteinte non quand il n'y a
plus rien à ajouter, mais quand il n'y a plus rien à retrancher.»
(De Saint Exupéry, 1939, chap. 3)

Chapitre 7 : Performances de régionalisation

7.1. Introduction 189
7.2. Cadre de comparaison 190
7.2.1. Validation croisée 190
7.2.2. Critères 191
7.3. Résultats de post-régionalisation 193
7.3.1. Méthodes à similarité géographique 193
7.3.2. Méthodes à similarité physiographique 196
7.3.3. Méthodes mixtes 200
7.3.4. Comparaison 205
7.3.5. Bilan 207
7.4. Résultats de régionalisation simultanée 209
7.4.1. Construction du modèle de régression 209
7.4.2. Apport d'une correction spatiale 210
7.4.3. Comparaison avec la post-régionalisation 211
7.5. Conclusion 214

Résumé du chapitre :

Ce septième chapitre constitue le point de jonction entre la méthode de prédétermination présentée et modifiée dans la partie I, les méthodes de régionalisation décrites au chapitre 5 et les données non hydrométriques introduites au chapitre 6. On implémente ici dix méthodes de post-régionalisation, ainsi qu'une approche de régionalisation simultanée pour tester les performances de la méthode SHYREG en sites non jaugés. L'ensemble de ces méthodes est évaluée au moyen d'un cadre de comparaison unique qui inclut différents critères et des procédures de validation croisée pour se placer dans une configuration non jaugée.

La comparaison de méthodes de post-régionalisation permet de montrer que les approches basées sur une similarité géographique surpasse les approches purement physiographiques. Néanmoins, les méthodes exploitant les deux types de similarité sont généralement plus performantes. Ce constat conduit à sélectionner une approche de krigeage à dérive externe pour la post-régionalisation de SHYREG.

Le développement de la méthode de régionalisation simultanée conduit à des conclusions similaires sur la nature de la similarité à employer pour la régionalisation. Le modèle construit conduit à des performances similaires voire légèrement supérieures à la méthode de post-régionalisation sélectionnée.

7.1. Introduction

Dans ce chapitre on met en œuvre la régionalisation de la méthode SHYREG. Dans un premier temps on cherche à régionaliser la version de SHYREG sélectionnée au chapitre 4, c'est à dire un calage par complémentaire de bassins grâce à un algorithme descendant. Les méthodes testées sont celles décrites dans le chapitre 5, et on utilise les données présentées au chapitre 6.

Les différentes méthodes sont évaluées à l'aide des critères présentées au chapitre 3. De manière à pouvoir évaluer les aptitudes des différentes méthodes à travailler en sites non jaugés, on procédera par validation croisée. La plupart des méthodes que l'on souhaite testées doivent elles-mêmes être calées. Leur comparaison aura donc lieu en deux étapes. Tout d'abord on optimisera les différentes méthodes en étudiant seulement leur capacité à correctement estimer les valeurs du paramètre S0/A sur les sites de validation. Ensuite, on comparera les différentes méthodes entre elles au moyen de critères sur les valeurs des quantiles de débits estimés. L'objectif étant d'identifier la méthode de regionalisation la performante pour l'application de SHYREG en non jaugé.

Dans un second temps, on s'intéressera à la méthode de régionalisation simultanée de SHYREG introduite au chapitre 4. On s'attachera à déterminer les descripteurs les plus aptes à expliquer la variabilité du paramètre S0/A à l'échelle des pixels et à tester l'intérêt de la prise en compte d'une correction par interpolation spatiale. Les performances de cette approche seront également comparées à celles de la méthode de post-régionalisation qui aura été choisie.

Les méthodes comparées ici ont été présentées au chapitre 5. Ces méthodes ont été choisies de manière à couvrir un large panel de toutes les méthodes existantes. À titre de rappel, on implémente :

- Les méthodes à similarité géographique :
    - Inverse de la distance pondérée ;
    - Krigeage ordinaire ;
    - Krigeage universel ;
- Les méthodes à similarité physiographique :
    - Régression linéaire ;
    - Arbre de régression ;
- Les méthodes à similarité mixtes :
    - Géorégression ;
    - Krigeage à dérive externe ;
    - Régression spatiale ;
    - Regroupement de bassins.

7.2. Cadre de comparaison

7.2.1. Validation croisée

De manière à pouvoir comparer l'ensemble des méthodes de régionalisation, on doit disposer d'un cadre de comparaison unique. Des critères identiques doivent donc être calculés sur des jeux de bassins identiques. De manière à se placer dans une configuration de sites non jaugés, on adopte une méthode de validation croisée dans laquelle on considère que certains bassins de notre échantillon de travail sont non jaugés. Ce travail est répété plusieurs fois en changeant le sous échantillon de validation. Le concept de la validation croisée est schématisé sur la figure 7-2.

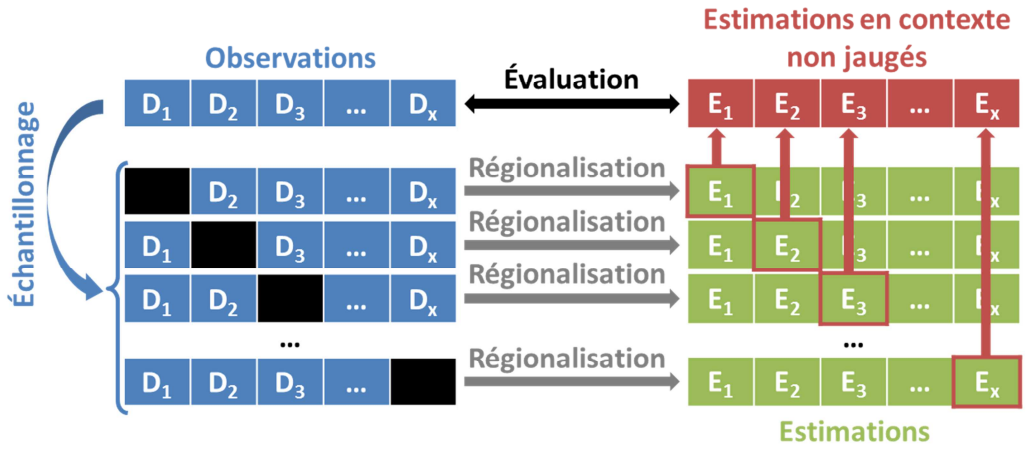


Figure 7-1 : *Principe de la validation croisée*

On propose deux échantillonnages qui seront utilisés pour le calcul de critères différents :

- Dans le premier cas on sépare aléatoirement notre échantillon de bassins en 10 sous échantillons de tailles identiques. La méthode de régionalisation est appliquée en considérant que les bassins du premier sous échantillon sont les bassins cibles et les autres les bassins donneurs. On obtient alors des estimations des paramètres S0/A et des quantiles de débits sur les bassins du premier sous échantillon en configuration non jaugée. On répète alors l'opération en considérant un autre sous échantillon comme jeu de bassins cibles. Après 10 itérations, on obtient des estimations en configuration non jaugée pour chacun des bassins de l'échantillon de travail. Dans tous les cas, ces estimations sont obtenues en utilisant 90% de l'information disponible. On peut calculer différents critères en comparant les valeurs estimées en configuration non jaugée et les données observées. Cet échantillonnage est utilisé pour le calcul de l'ensemble des critères sauf le score SPAN (voir section 7.2.2). Cette approche est plus exigeante pour le modèle qu'une validation croisée de type « *leave-one-out* » généralement employée dans les études de régionalisation.
- Dans le second cas, on sépare aléatoirement l'échantillon de bassins en trois sous échantillons de même taille. Chaque sous échantillon est tour à tour utilisé comme jeu de bassins donneurs. Après trois applications de la méthode de régionalisation, on dispose pour chaque bassin de deux estimations du paramètre S0/A et des différents quantiles de débit

en configuration non jaugée. On utilise alors ces deux estimations pour évaluer la stabilité de l'approche (score SPAN, voir section 7.2.2). Le calcul de ce critère est illustré sur la figure 7-2.

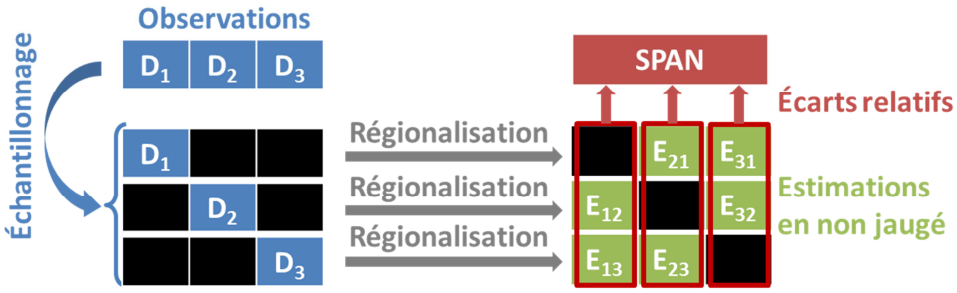


Figure 7-2 : *Principe de l'échantillonnage pour la calcul du score SPAN*

7.2.2. Critères

On doit ici comparer un grand nombre de méthodes de régionalisation. En outre, chacune de ces méthodes comporte des variantes qu'il convient d'explorer. On procède donc en deux temps. Tout d'abord, on s'intéresse à chacune des méthodes indépendamment des autres. On cherche à déterminer la configuration optimale qui permette de mieux retrouver les valeurs du paramètre S0/A préalablement calé. Dans un second temps on compare l'ensemble des méthodes, dans leur configuration optimale, de manière à déterminer la plus efficace pour la régionalisation de SHYREG. Dans le second cas, on inclut alors des critères sur la fiabilité des quantiles de débits simulés. L'ensemble des critères utilisé est synthétisé dans le tableau 7-1.

Tableau 7-1 : *Récapitulatif des différents critères*

Type de critère	Notation	Nature	Forme	Critères synthétiques
Restitution de S0/A	R^2	NSE entre les valeurs de S0/A estimées par le calage et celles restituées en régionalisation	1 valeur par poste	
Restitution des quantiles de calage	ERQ	C2M sur les 6 quantiles de calage	1 valeur par poste Courbe de distribution sur l'échantillon de postes	$\overline{ERQ}$: moyenne sur l'échantillon
Restitution des rapports des quantiles	RPJ	NSE sur les rapports des quantiles de pointe et journaliers	1 valeur par période de retour	
Extrapolation vers les extrêmes	FF	Probabilité de non dépassement associé par le modèle au record de débit	1 valeur par poste et par durée caractéristique Distribution sur l'ensemble de l'échantillon	*Score FF* : aire entre la courbe et la première bissectrice *Biais FF* : indicateur du sens de l'écartement par rapport à la première bissectrice
Stabilité par rapport à l'échantillonnage	SPAN	Écart relatif entre deux estimations du même quantile	1 valeur par quantile	

À l'exception du score SPAN, l'ensemble des critères est calculé en comparant les débits (ou le paramètre S0/A) estimés lorsqu'un bassin est utilisé comme cible, avec les données observées (ou la valeur calée dans le cas de S0/A). On a donc bien une évaluation des performances du modèle en site (supposé) non jaugé. Le score SPAN est calculé en comparant deux estimations des quantiles de débits lorsque le bassin est en configuration non jaugé, il n'utilise pas de données observées.

7.3. Résultats de post-régionalisation

Dans cette section, on détaille et compare les performances obtenues en post-régionalisant SHYREG avec les différentes méthodes présentées au chapitre 5.

7.3.1. Méthodes à similarité géographique

7.3.1.1. Inverse de la distance pondérée

La méthode de l'inverse de la distance est une approche par combinaison. On établit une combinaison linéaire des valeurs aux sites donneurs les plus proches. On s'interroge ici sur deux points :

Partie XLVIII : Comment calculer la distance entre les bassins ?

Partie XLIX : Quel voisinage prendre en compte ? On s'interroge notamment sur le nombre de voisins à considérer et sur la manière de les pondérer. On rappelle que les poids de la combinaison linéaire correspondent à l'inverse de la distance au site cible, élevée à une puissance notée α.

a. Nature de la distance

Une des questions qui se pose avec la méthode de l'inverse de la distance est celle du calcul de la distance entre les bassins. On considère ici quatre métriques différentes :

- La distance euclidienne entre les centroïdes des bassins (Oudin et coll., 2008);
- La distance euclidienne entre les exutoires des bassins ;
- Une combinaison linéaire entre les deux distances précédentes : un poids de 0,8 est attribué à la distance entre les centroïdes et un poids de 0,2 sur celle entre les exutoires (Lebecherel, 2015) ;
- La distance dite de Ghosh qui correspond à la moyenne des distances entre chacun des points du premier bassin et tous ceux du second (on considérera ici un maillage régulier carré de 1 km). Cette distance permet de prendre en compte les emboitements des bassins (Gottschalk et coll., 2011). Il faut noter que la distance de Ghosh d'un bassin à lui-même est non nulle.

Lebecherel (2015) a comparé ces différents calculs de la distance sur un jeu de 609 bassins versants français. Sa conclusion est que la régionalisation par inverse de la distance pondérée était peu sensible à la variation du calcul de la distance, tout en préconisant l'utilisation de la distance combinée. Néanmoins, il apparait logique que la nature du résultat puisse varier avec la structure spatiale de la variable régionalisée, il apparait donc nécessaire de tester les différentes distances dans le cadre de la méthode SHYREG.

De manière à déterminer la meilleure façon de calculer la distance entre les bassins, on considère pour le moment une optimisation automatique de la structure du voisinage. Le nombre de

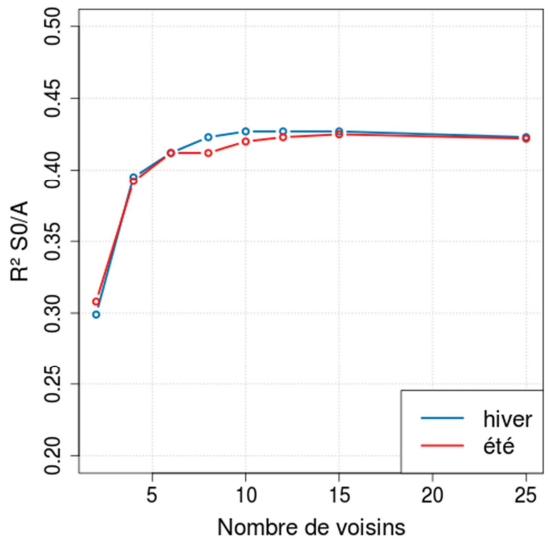
voisins à considérer ainsi que la valeur de α sont automatiquement choisis en procédant à une validation croisée parmi les bassins donneurs. Les résultats obtenus sur la restitution du paramètre S0/A sur les bassins receveurs sont présentés dans le tableau 7-2. On peut voir que les performances sont quasiment identiques d'une saison à l'autre. La distance entre les exutoires est celle qui restitue le moins bien les valeurs, alors qu'une combinaison des distances entre les centroïdes et entre les exutoires fonctionne un peu mieux que les autres approches. Néanmoins, les quatre types de calcul de distance conduisent à des résultats assez similaires, ce qui rejoint les résultats de Lebecherel (2015). Dans la suite du travail, on emploie une distance combinée entre les exutoires et les centroïdes.

Tableau 7-2 : *Comparaison des types de calcul de la distance dans la méthode de l'inverse de la distance*

Distance	R^2 S0/A hiver	R^2 S0/A été
Entre les centroïdes	0.419	0.415
Entres des exutoires	0.396	0.392
Combinaison	0.428	0.423
Ghosh	0.417	0.411

b. Nombre de voisins

a)



b)

n_vois	α (hiver)	α (été)
2	0,5	0,1
4	0,9	0,6
6	1,2	0,9
8	1,3	1,1
10	1,4	1,3
12	1,5	1,4
15	1,7	1,5
25	2	1,8

Figure 7-3 : *Impact de la taille du voisinage sur la méthode d'inverse de la distance*
a) Valeur de R^2 en validation croisée ; b) valeur optimisée de α lorsque tous les bassins sont utilisés

Le fait d'utiliser à la fois le nombre de voisins et la valeur de α comme paramètre de régionalisation est un peu redondant. En effet, ces deux paramètres peuvent se compenser : une forte valeur de α revient à réduire les poids attribués aux bassins les plus éloignés. Par conséquent, α peut compenser un trop grand nombre de voisins. Il apparait plus aisé d'avoir un a priori sur le nombre de voisins, on décide donc de fixer le nombre de voisins utilisés à différentes valeurs et de considérer α comme un paramètre de régionalisation qui est optimisé à chaque application de la méthode. Les valeurs du critère R^2 sur la restitution de la variable régionalisée sont fournies sur la figure 7-3. On peut voir que la performance de régionalisation augmente avec le nombre de voisins puis se stabilise à partir d'une dizaine de voisins. La figure 7-3 b) montre bien que α augmente

lorsque l'on augmente la taille du voisinage, donc la stabilisation de R^2 peut bien être associée à l'effet compensateur du paramètre α. On considère donc qu'un voisinage d'une dizaine de bassins est suffisant. Utiliser un voisinage plus large n'améliorerait pas les performances de la régionalisation et entrainerait son alourdissement.

7.3.1.2. Krigeage

La régionalisation par krigeage est également une approche combinatoire. Les poids de la combinaison linéaire sont optimisés pour minimiser la variance de l'erreur d'estimation. On envisage ici deux types de krigeage :

- Le krigeage ordinaire (KO) qui repose sur l'hypothèse que toutes les variables du domaine sont des réalisations du même champ aléatoire (de moyenne uniforme) ;
- Le krigeage universelle (KU) qui permet de faire varier la moyenne du champ de manière linéaire par rapport aux coordonnées des bassins.

On propose également d'observer l'impact du nombre de bassins voisins inclus dans le krigeage.

Les valeurs du critère R^2 sur la restitution de S0/A dans les différents cas sont fournies sur la figure 7-4. On peut voir que la taille du voisinage semble peu importante dans le cas du krigeage ordinaire (figure a). L'approche par krigeage universelle (figure b) est moins apte à régionaliser les valeurs de S0/A lorsque l'on considère des voisinages de faible taille. On peut supposer que pour de grands voisinages, la méthode ne parvient pas à identifier de relation linéaire entre S0/A et les coordonnées géographiques, le champ aléatoire est donc simulé avec une moyenne uniforme (comme dans le cas du krigeage ordinaire). Dans le cas de plus faibles voisinages, des relations artefacts peuvent être identifiées ce qui conduit à une décroissance des performances. Au vu de ces résultats. On décide de conserver la méthode par krigeage ordinaire avec un voisinage de 50 bassins.

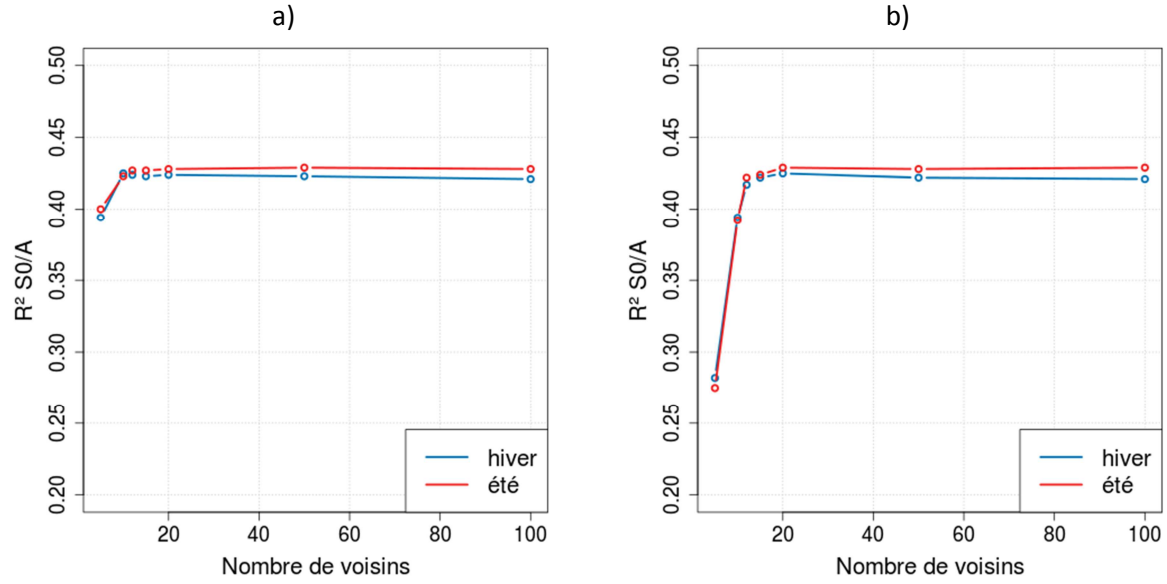


Figure 7-4 : *Impact de la taille du voisinage sur les méthodes de krigeage a)krigeage ordinaire ; b) krigeage universel*

Les variogrammes expérimentaux et modélisés dans le cas du krigeage ordinaire avec un voisinage de 20 sites sont représentés sur la figure 7-5. On retrouve les allures présentées lors de l'étude de l'autocorrélation spatiale du paramètre S0/A calé présentée au chapitre 6. Néanmoins, on peut voir que les portées estimées sont bien inférieures à la limite d'autocorrélation spatiale que l'on avait alors estimée autour de 300 km. Cela pourrait s'expliquer par l'existence d'une divergence des variogrammes empiriques. Bien que les modèles de variogramme proposés semblent assez bien s'ajuster sur les données expérimentales, on peut supposer que cette divergence pourrait être liée à une dérive spatiale de la moyenne du champ aléatoire. Le krigeage universel proposé plus haut ne semble pas à même d'expliquer cette dérive. On tentera de modéliser cette dérive à l'aide de descripteurs physiographiques à la section 7.3.3.2. Notons également la présence d'un effet de pépite qui traduit du bruit dans le champ aléatoire.

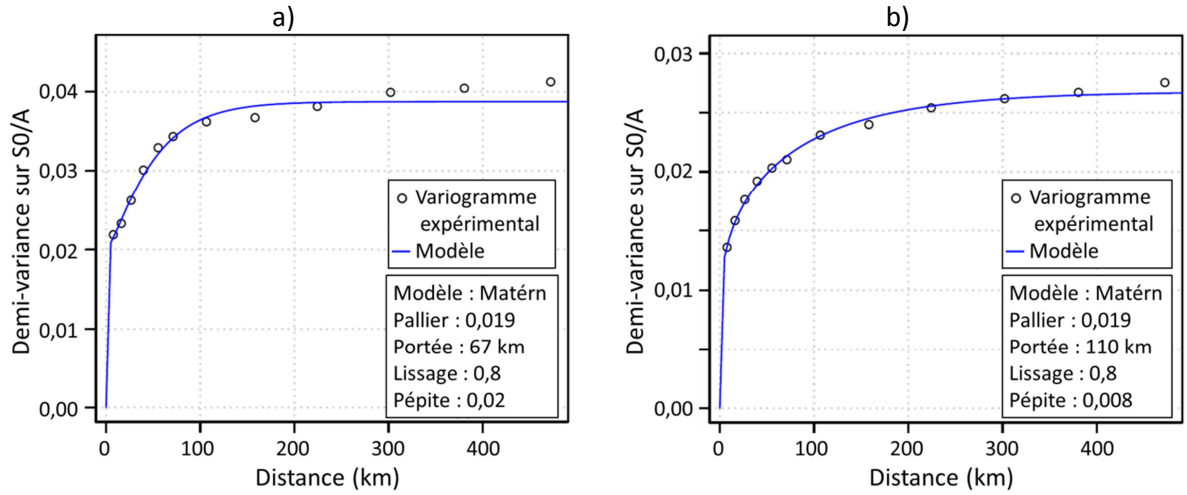


Figure 7-5 : *Variogrammes expérimentaux et modélisés utilisés pour le krigeage ordinaire à 50 voisins a)hiver ; b) été*

7.3.2. Méthodes à similarité physiographique

7.3.2.1. Régression linéaire

La méthode par régression linéaire est une méthode explicative qui consiste à établir une relation (linéaire) entre la variable à régionaliser et des descripteurs de l'environnement. La sélection des descripteurs est assurée par l'algorithme, néanmoins on réalise rapidement que le modèle tend à sélectionner un nombre très élevé de variables du fait du grand nombre de bassins donneurs. On cherche donc à limiter le nombre de variables à inclure dans le modèle de régression. On envisage également de déterminer différents modèles de régressions pour diverses régions.

a. Réduction du nombre de descripteurs candidats

Pour réduire le nombre de descripteurs à inclure dans le modèle on envisage deux pistes : une limitation stricte du nombre de variables que le modèle de régression peut inclure, ou une diminution du nombre de variables candidates par analyse des composantes principales. Sur la figure 7-6, on représente l'évolution du critère de reproduction de S0/A dans les différents cas. On peut tout d'abord voir que les régressions sont bien plus explicatives dans le cas de la saison été que pour la saison hiver. Ce résultat confirme les conclusions de l'analyse en composante principale du chapitre 6. Notamment, la saison été bénéficie d'un premier descripteur très explicatif, il s'agit du descripteur d'humidité moyenne des sols avant un évènement pluvieux fort (SAJ20). La comparaison des figure 7-6 a) et b) montre également que pratiquer la régression en utilisant les composantes principales des descripteurs ne permet pas d'améliorer les performances de la méthode sur les sites de validation (pour un nombre de covariables donné). Ce résultat peut également être rapproché des conclusions de l'analyse en composante principale des descripteurs au chapitre 6. Cette analyse montrait que le paramètre de la saison hiver n'était que faiblement corrélé avec les différents axes principaux, alors que celui de la saison été était lié au premier axe (lui-même corrélé avec le descripteur d'humidité des sols).

D'après l'allure de la figure 7-6, on peut supposer qu'un nombre de descripteurs limité à 4 est suffisant pour maximiser les performances de la régression. L'ajout d'un cinquième descripteur ne semble pas apporter d'avantage d'information. Notons, qu'un nombre de descripteurs élevé entraine une diminution de la stabilité de la méthode, du fait d'un plus grand nombre de paramètres de régression à déterminer. Considérer plus de quatre descripteurs est également dangereux, on a tendance à observer des problèmes de colinéarité entre les covariables lorsque l'on en inclut davantage.

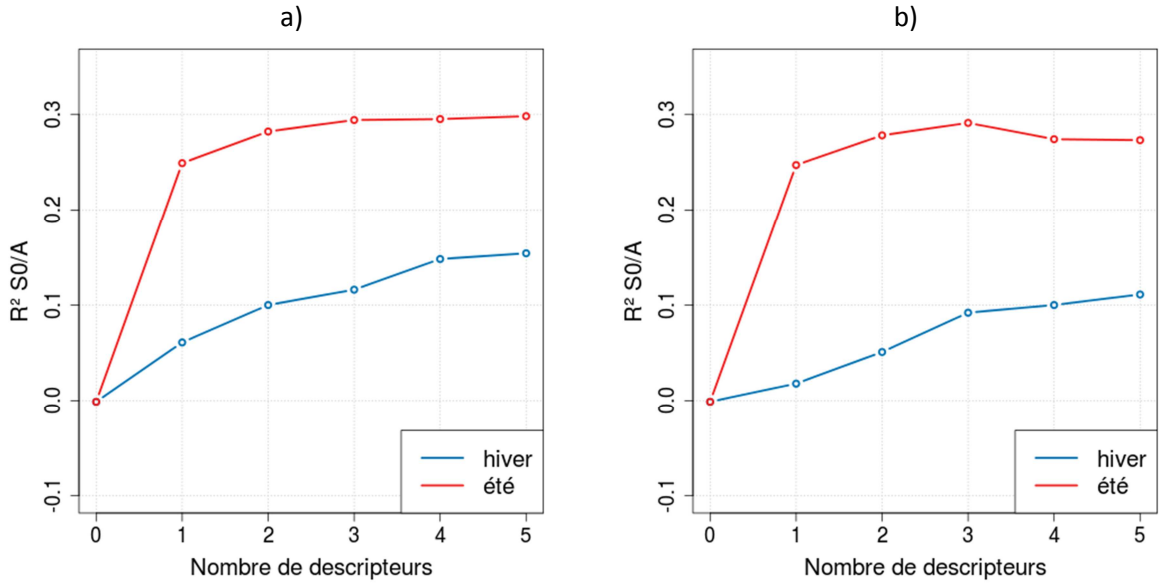


Figure 7-6 : *Impact du nombre de descripteurs sur la méthode de régression linéaire a) Descripteurs bruts ; b) composantes principales des descripteurs*

b. Apport du travail par région

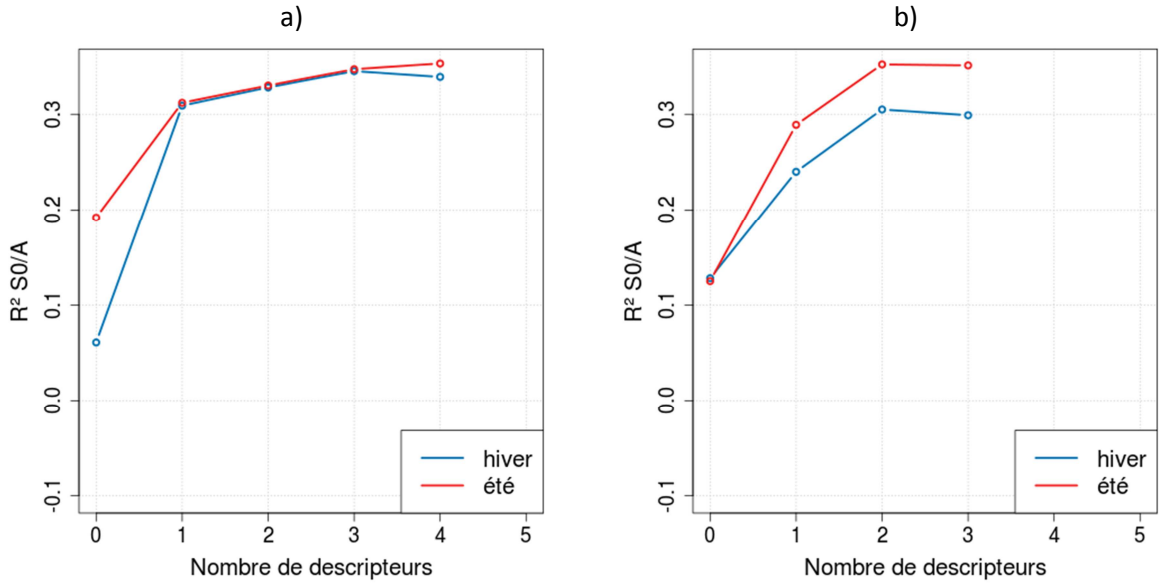


Figure 7-7 : *Impact du nombre de descripteurs sur la méthode de régression linéaire par région a) hydro-éco régions ; b) grands bassins hydrographiques*

Comme vu au chapitre 5, en appliquant la méthode de régression linéaire à l'échelle nationale on suppose que les phénomènes qui expliquent la transformation de la pluie en débit sont les mêmes sur l'ensemble du territoire. De manière à relâcher cette hypothèse, on décide d'appliquer la méthode de régression linéaire par régions en utilisant les deux découpages (en hydro-écorégion et en grands bassins) présentés au chapitre 6. On présente les résultats des régressions linéaires pour ces deux découpages sur la figure 7-7. On peut voir que dans le cas d'un découpage en région on observe une augmentation de la performance de régionalisation. Cette progression doit être rattachée à une multiplication du nombre de paramètres de régression par 10 ou 12 selon le découpage. Le choix du nombre maximum de descripteurs à sélectionner est plus délicat, en effet ce nombre peut dépendre des régions. On peut néanmoins voir que dans l'ensemble les régressions nécessitent moins de descripteurs (trois pour le découpage HER, et seulement deux dans le cas du découpage en grands bassins).

Les deux découpages proposés conduisent à des performances de régionalisation quasi identiques pour le paramètre de la saison été ($R^2 \approx 0{,}35$), néanmoins le découpage en HER semble plus favorable à l'estimation du paramètre de la saison hiver (le critère vaut 0,34 pour les HER et 0,30 pour le découpage en grands bassins). En outre le découpage en HER comporte deux zones de moins. On choisit donc de travailler avec des régressions par HER.

On présente les modèles de régressions et les valeurs de R^2 calculés en validation croisée sur les postes receveurs, dans le tableau 7-3.

Tableau 7-3 : *Modèles de régressions associés aux différentes régions*

Région	Hiver		Été	
	Équation	R^2	Équation	R^2
National	0,029 + 0,19grassland + 0,0092DDr −0,00043AHg + 0,087log(Pluie)	0,148	−0,23 + 0,74SAJ20 + 0,0063DDr + 0,093grassland −0,16HGsand	0,295
Alpes-Pyrénées	4,3 −0,19log(AHg) −0,78log(PJ) + 0,032T	0,609	0,18 + 0,00052Pluie	0,047
Massif Central	0,77 −0,28foret	0,138	0,28 + 0,0039Neige	0,064
Est	−0,86 −0,22MEDcapa + 2,7log(SAJ)−0,034Pente	0,209	2,8 + 0,066NE −0,82log(PJ)	0,268
Arc Médit.	0,57	-0,033	0,26	-0,018
Contreforts SE	0,68 −0,21VHcapa	0,019	0,44 + 0,021DDr −0,68log(arid)	0,148
Centre-Nord	0,11 + 0,043DDr	0,469	0,79 + 0,018DDr −1,2log(arid)	0,364
Lorraine-Bourgogne	0,26 + 0,029DDr + 0,3grassland	0,369	1,4 + 0,018DDr −1,3log(arid) −0,022PJ + 0,17grassland	0,275
Bretagne	−2,3 + 1,6log(arid)+ 0,18log(Al) + 0,0053ETP	0,373	0,2 + 0,0005Alt	0,036
Aquitaine	0,67 −0,31HGsand	0,281	4,1 + 0,079log(Alt) −1,3log(PJ) + 0,089NE+ 0,17arable	0,398
Limousin	3 −0,18log(Alt) −0,046PJ −1,3HGsand	0,365	0,3	-0,019

7.3.2.2. Arbre de régression

Les arbres de régression sont des méthodes explicatives. L'échantillon de bassins est successivement divisé en deux sous-échantillons selon des conditions binaires déterminées pour optimiser la variance intra-classe de la variable à régionaliser. Par rapport à une approche par régression, les arbres permettent de s'affranchir de certaines hypothèses (linéarité de la relation, normalité des résidus, non-colinéarité des covariables). On adopte ici une approche simple dans laquelle la taille de l'arbre est automatiquement déterminée. On étudie seulement l'impact d'une application sur l'ensemble du territoire ou sur les deux découpages en régions. Les critères R^2 sur la restitution du paramètre S0/A dans les différents cas sont regroupés dans le tableau 7-4. Ces résultats montrent que l'approche par arbre est moins performante qu'une approche par régression sur des régions. Ce constat pourrait s'expliquer par la règle d'ajustement automatique de la taille de l'arbre (règle du « 1-SE ») qui pourrait être ajusté manuellement comme dans le cas des régressions.

Le tableau 7-4 nous montre que le travail par région se justifie d'avantage dans le cas de la saison hiver que de la saison été comme c'était le cas avec les régressions. Dans le cas où l'on travaille en considérant l'ensemble du territoire, les arbres de régression expliquent mieux la variabilité du paramètre S0/A de la saison hiver que la méthode par régression. Or on sait que ce paramètre s'explique mieux par région. On voit ici l'un des intérêts d'une approche par arbre : les premières scissions de l'échantillon peuvent jouer le rôle d'une mise en région optimisée des bassins versants. Il pourrait donc être envisageable de coupler les deux méthodes explicatives en utilisant un arbre pour répartir les bassins en groupes (on parle alors d'arbre de classification), puis d'utiliser une approche par régression sur chacun de ces groupes. Néanmoins, on voit ici que l'application d'un arbre de régression par grand bassin hydrographique ou surtout par hydro-éco région conduit tout

de même à une amélioration de la régionalisation de S0/A. Ce résultat semble justifier l'emploi des régions utilisées.

Étant donné les résultats observés, on conserve une approche par arbre de régression par zone HER.

Tableau 7-4 : *Impact de la mise en région sur les performances des arbres de régression*

Mise en région	R^2 S0/A hiver	R^2 S0/A été
France entière	0,196	0,273
Hydro-écorégions	0,26	0,303
Grands bassins hydrographiques	0,24	0,293

7.3.3. Méthodes mixtes

7.3.3.1. Géorégression

On cherche ici à utiliser une méthode purement spatiale pour cartographier les résidus d'une approche par régression linéaire. L'idée est d'utiliser l'interpolation spatiale pour estimer la part de S0/A non expliquée par la régression linéaire. Dans la mesure où les approches par krigeage ordinaire et par inverse de la distance conduisent aux mêmes résultats, on décide d'utiliser la seconde méthode, ce qui permet d'économiser l'ajustement d'un modèle de variogramme. On fixe le voisinage à 10 bassins selon les résultats obtenus avec la méthode de l'inverse de la distance L'inclusion de plus de voisins n'a pas permis d'améliorer les résultats. En effet on peut penser que la portée des résidus est plus faible que celle des valeurs brutes ce qui rend inutile de considérer davantage de voisins. On analysera donc l'impact du nombre de descripteurs que l'on intègre dans la régression et on verra si le découpage en région HER permet d'améliorer les performances comme dans le cas de l'approche par régression simple.

La figure 7-8 a) montre l'évolution du critère R^2 sur la restitution de S0/A lorsque l'on inclut de plus en plus de descripteurs dans une régression unique à l'échelle nationale. On peut voir, que l'ajout des deux premiers descripteurs permet d'améliorer la régionalisation de 0,03 à 0,04 selon la saison. Néanmoins, une interpolation spatiale seule (cas à 0 descripteur) permet déjà d'obtenir de valeurs de R^2 autour de 0,42. L'interpolation spatiale est donc plus explicative que la régression. On peut cependant conclure que la combinaison d'une régression et d'une interpolation spatiale est un peu plus performante que chacune des deux méthodes séparées.

La comparaison des modèles nationaux et par HER nous montre qu'il n'y a pas de réel intérêt à faire varier le modèle par région. Les méthodes purement spatiales n'ont pas de grand intérêt à être appliquées par régions puisqu'elles consistent en la sélection d'un voisinage. Ici, la correction spatiale permet de prendre en considération les effets locaux alors que la régression considère uniquement des tendances à grande échelle. On conserve donc le modèle de géorégression national en utilisant 3 descripteurs.

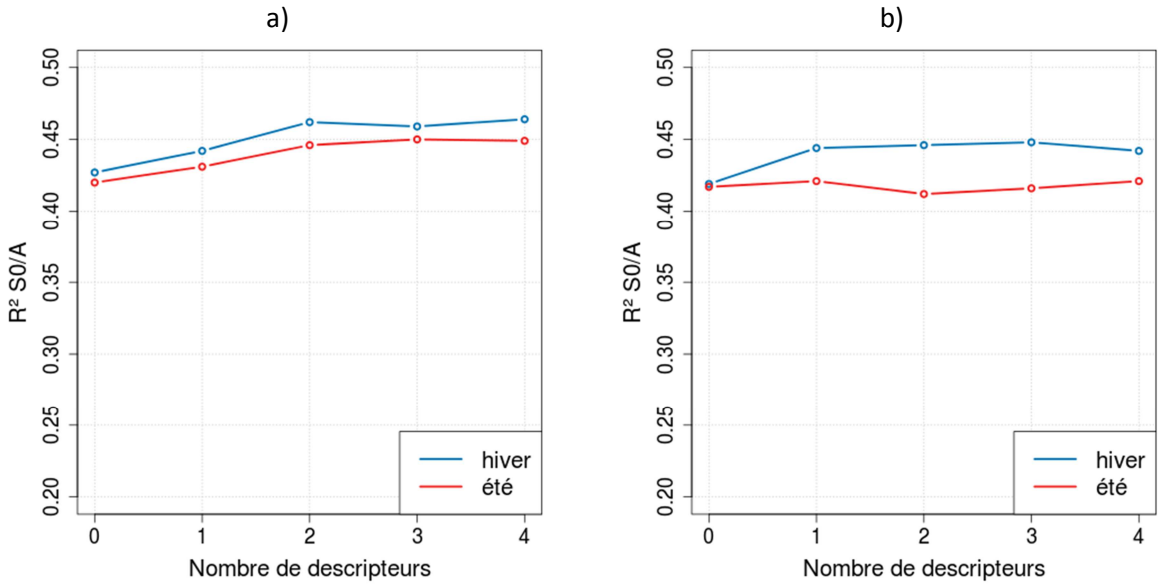


Figure 7-8 : *Impact du nombre de descripteurs sur la méthode de régression linéaire avec interpolation spatiale des résidus*
a) *régression nationale ; b) régression par HER*

Les modèles de régressions nationaux obtenus en utilisant tous les bassins versants de l'échantillon de travail sont présentés dans le tableau 7-5.

Tableau 7-5 : *Modèles de régressions obtenus avec la méthode de géorégression*

Saison	Modèle de régression
Hiver	0,58 + 0,19grassland + 0,0097DDr – 0,00052AHg
Été	−0,25 + 0,76SAJ20 + 0,0067DDr + 0,089grassland

7.3.3.2. Krigeage à dérive externe

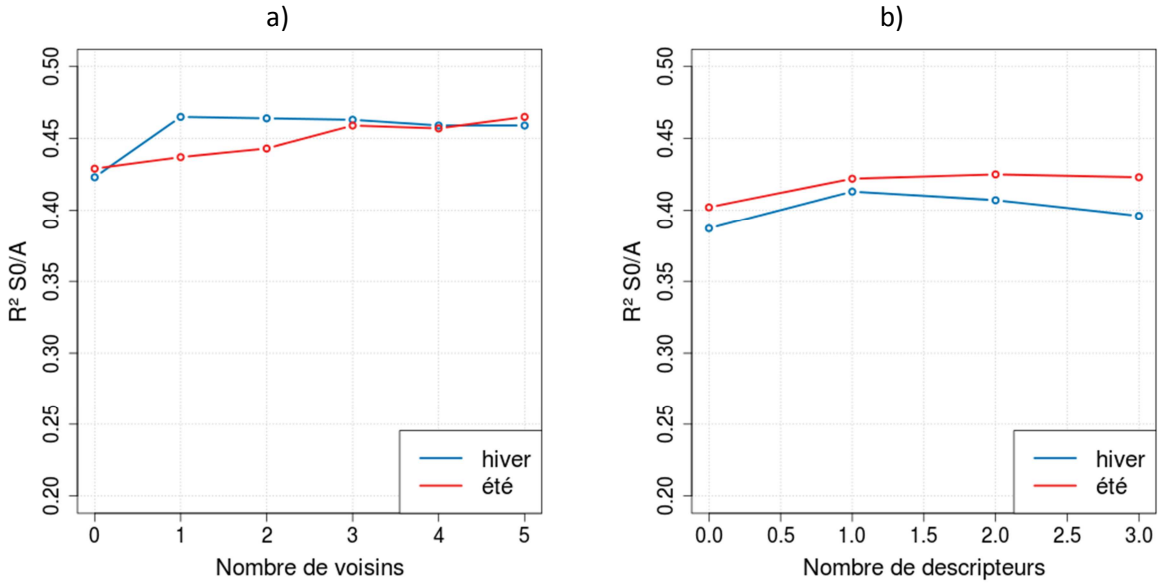


Figure 7-9 : *Impact du nombre de descripteurs sur la méthode de krigeage à dérive externe avec interpolation spatiale des résidus*
a) application nationale ; b) application par HER

Le krigeage à dérive externe est une méthode de krigeage qui considère que la variable est issue d'un champ aléatoire dont la moyenne varie linéairement avec des variables extérieurs, les dérives externes. Suite aux travaux sur les méthodes de krigeage ordinaire, on fixe la taille du voisinage à 50 bassins.

Ici, on teste toutes les dérives externes dont on dispose et on inclut celles qui conduisent aux meilleures performances de régionalisation en procédant à une validation parmi les bassins donneurs. On présente les critères R^2 sur la restitution du paramètre S0/A sur les sites de validation pour une application nationale et par HER sur la figure 7-9.

Comme dans le cas de la méthode par géorégression, on peut voir qu'un modèle sans aucun descripteur (c'est-à-dire un modèle de krigeage ordinaire), conduit à des valeurs de R^2 qui sont seulement légèrement plus faibles que celles de modèles avec descripteurs. Ce résultat traduit le fait que c'est l'interpolation spatiale qui apporte le plus d'information. La comparaison des figures a) et b), indique que l'application du krigeage à l'échelle nationale est plus performante qu'une application par région. Ce résultat semble surtout dû à une moins bonne interpolation spatiale entre les bassins d'une région. Cela peut être dû à des régions comportant trop peu de bassins par rapport à la taille du voisinage.

Tableau 7-6 : *Descripteurs sélectionnés par la méthode de krigeage à dérive externe*

Saison	1er descripteur	2nd descripteur	3e descripteur
Hiver	DDr	SAJ20	arid
Été	DDr	arid	grassland

L'évolution de la courbe de R^2 pour le modèle national nous conduit à choisir un modèle à trois descripteurs, bien qu'un seul semble suffisant pour la régionalisation du paramètre de la saison hiver. Les descripteurs sélectionnés sont fournis dans le tableau 7-6.

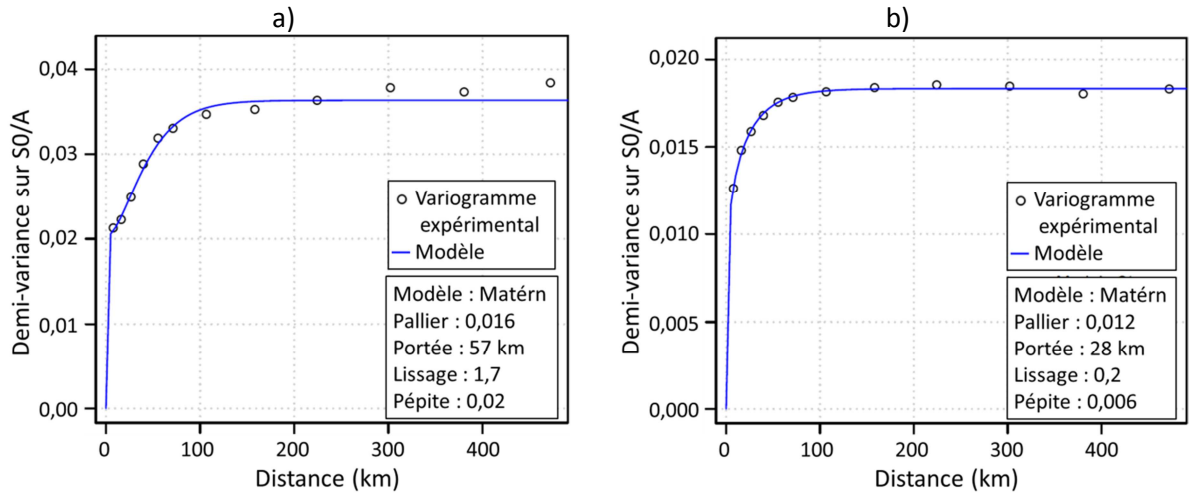


Figure 7-10 : *Variogrammes expérimentaux et modélisés utilisés pour le krigeage à dérive externe à 50 voisins*
a)hiver ; b) été

Les modèles de variogrammes employés lorsque tous les bassins jaugés de l'échantillon sont utilisés comme donneurs sont présentés sur la figure 7-10. On peut voir notamment que les variogrammes divergent moins, notamment celui associé à la saison été.

7.3.3.3. Régression spatiale

Les régressions spatiales sont des modèles de régression linéaire qui incluent un terme de dépendance spatiale entre les différents sites. Dans notre cas, on a envisagé deux modèles spatiaux. L'un qui faisait porter la dépendance sur la variable d'intérêt et l'autre sur les résidus. En considérant les résultats obtenus avec les méthodes d'inverse de la distance et d'interpolation spatiale des résidus, on considère un voisinage de 10 bassins. La sélection des descripteurs se fait selon le même principe que celui de la relation linéaire.

L'application de ce genre d'approche pour la régionalisation du paramètre S0/A a conduit à sélectionner systématiquement le modèle à erreur spatiale qui considère des dépendances entre les résidus de régressions. Les performances de ce modèle selon le nombre de descripteurs inclus sont présentées sur la figure 7-20. On peut constater que les valeurs du critère R^2 sont bien supérieures à celles obtenues avec une régression linéaire simple. Encore une fois, ce résultat met en valeur l'apport de l'information géographique. Néanmoins les performances observées sont comparables avec celles obtenues avec une méthode purement spatiale. Cette différence de performance pourrait être due à une matrice de voisinage mal construite. Dans le cas du modèle à erreur spatiale, des poids unitaires sont affectés à chacun des dix plus proches voisins. Dans le cas de la méthode par inverse de la distance, les valeurs des dix plus proches voisins sont pondérées par l'inverse de la distance. On pourrait donc envisager de construire une matrice de voisinage qui utilise des poids décroissants avec la distance.

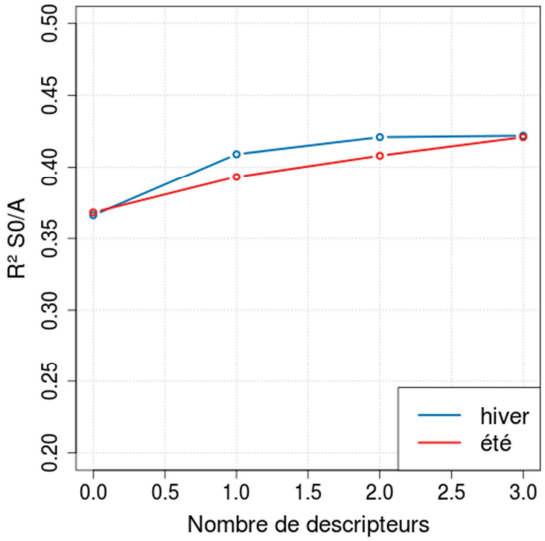


Figure 7-11 : *Impact du nombre de descripteur sur la méthode de régression à erreur spatiale*

Les modèles de régressions employés sont présentés dans le tableau 7-7. Ces modèles sont obtenus lorsque l'on utilise les 1535 bassins de l'échantillon de travail comme bassins donneurs.

Tableau 7-7 : *Modèles de régressions spatiales sélectionnés*
Werr : matrice de voisinage

Saison	Modèle de régression	Terme spatial
Hiver	1,2 + 0,017DDr + 0,17grassland – 0,27log(PJ)	0,74Werr
Été	0,45 – 0,53log(arid) +0,009DDr + 0,095grassland	0,62Werr

7.3.3.4. Regroupement de bassins

La méthode de regroupement est une approche combinatoire qui cherche à déterminer les descripteurs physiographiques qui permettent de décrire au mieux la similarité des bassins au sens du paramètre à régionaliser. On construit une métrique de distance dans l'hyperespace défini par ces descripteurs, et on détermine les bassins les plus proches de la cible. On considère ici une méthode basée à la fois sur la similarité physiographique et géographique, c'est-à-dire que les coordonnées spatiales des bassins font parties des descripteurs potentiels.

La sélection des descripteurs se fait de manière automatique, néanmoins on cherche à vérifier si le nombre de descripteurs maximum que l'on autorise a un impact sur la qualité de l'estimation. En se basant sur les résultats obtenus par la méthode de l'inverse de la distance, on décide de fixer la taille du voisinage à 10 bassins. Les valeurs du critère de restitution du paramètre S0/A sont fournies sur la figure 7-12. On peut voir que la méthode semble inadaptée pour estimer les valeurs de S0/A sur la saison hiver. L'algorithme ne sélectionne qu'un seul descripteur (*HGsand*) qui conduit à une valeur de R^2 légèrement négative. Le modèle performe donc moins bien qu'une simple moyenne arithmétique des valeurs calées. Cependant, dans le cas de la saison été, l'algorithme parvient à identifier jusqu'à 4 descripteurs qui parviennent à différencier les bassins. La valeur de R^2 obtenue est alors comparable avec celle obtenue grâce à l'approche de l'inverse de la distance. On notera cependant que les descripteurs sélectionnés varient avec l'échantillonnage employé. Dans tous les cas, les coordonnées géographiques de bassins sont sélectionnées, les deux autres descripteurs les plus couramment retenus sont *grassland* (couverture herbacée ou de végétation basse) et *Pluie* (cumul estival moyen des précipitations liquides).

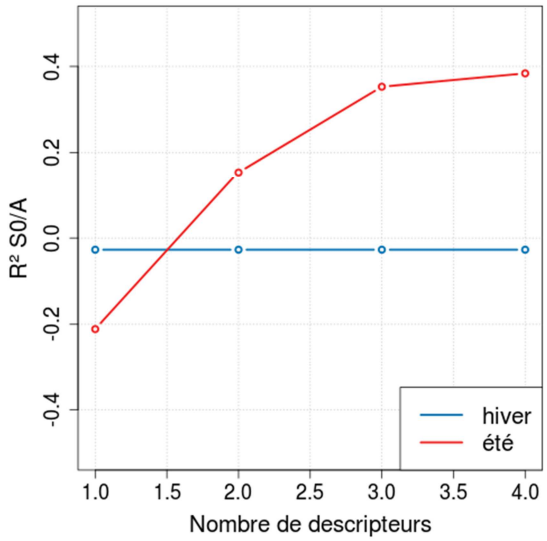


Figure 7-12 : *Impact du nombre de descripteurs sur les performances de la méthode par groupement de bassins*

Bien que la méthode apparaisse insuffisante dans le cas de la saison hiver, on retient la version à 4 descripteurs à des fins de comparaison.

7.3.4. Comparaison

Pour chacune des méthodes testées, on a retenu une version en se basant sur sa capacité à restituer les valeurs du paramètre S0/A. On peut donc comparer ces différentes méthodes en incluant des critères sur les débits. On propose une première comparaison synthétique sur la figure 7-13 qui rassemble les scores associés à tous les critères utilisés. De manière à augmenter la lisibilité des résultats on rééchelonne les valeurs des critères entre 0 et 1. Une valeur nulle correspond donc à la plus faible valeur obtenue pour un critère donné quels que soient la saison et le quantile considéré (i.e. la plus faible valeur au sein de chaque bloc de couleur sur la figure 7-13).

Le critère R^2 sur la restitution de S0/A correspond aux valeurs déjà analysées dans les parties précédentes. Il montre néanmoins une hiérarchie des méthodes. Les approches par géorégression et krigeage à dérive externe sont plus performantes, suivies par les méthodes purement spatiales (inverse de la distance et krigeage ordinaire) et la méthode de régression spatiale. Ensuite viennent les méthodes purement physiographiques : la régression linéaire et l'arbre de régression par région. Les performances de la méthode par groupement des bassins varient selon les saisons : elles sont très faibles en hiver et plus élevées en été mêmes si elles demeurent en dessous des autres approches mixtes ou purement spatiales.

Les critères de restitution des quantiles de calage (ERQ) et des rapports entre ces quantiles (RPJ) montrent la même hiérarchie des approches. Les critères SPAN permettent de dire que l'approche par groupement est la plus stable sur la saison été mais la moins stable sur l'hiver. On peut également voir que les méthodes par régression spatiale et par krigeage ordinaire sont plus stables que les autres. Les valeurs des scores FF sur la justesse en extrapolation sont assez proches quelles que soient les méthodes ce qui montre une certaine stabilité de quantiles extrêmes estimés par SHYREG vis-à-vis de la régionalisation. Ce résultat est à relier à la nature du paramètre S0/A qui influe surtout sur les quantiles de faible période de retour. On peut néanmoins voir que les méthodes par groupement et par arbre de régression conduisent à des scores un peu plus faibles que les autres. Les méthodes par krigeage à dérive externe ou par géorégression semblent être le plus performantes. Une représentation plus détaillée de ces critères est fournie sur la figure 7-14.

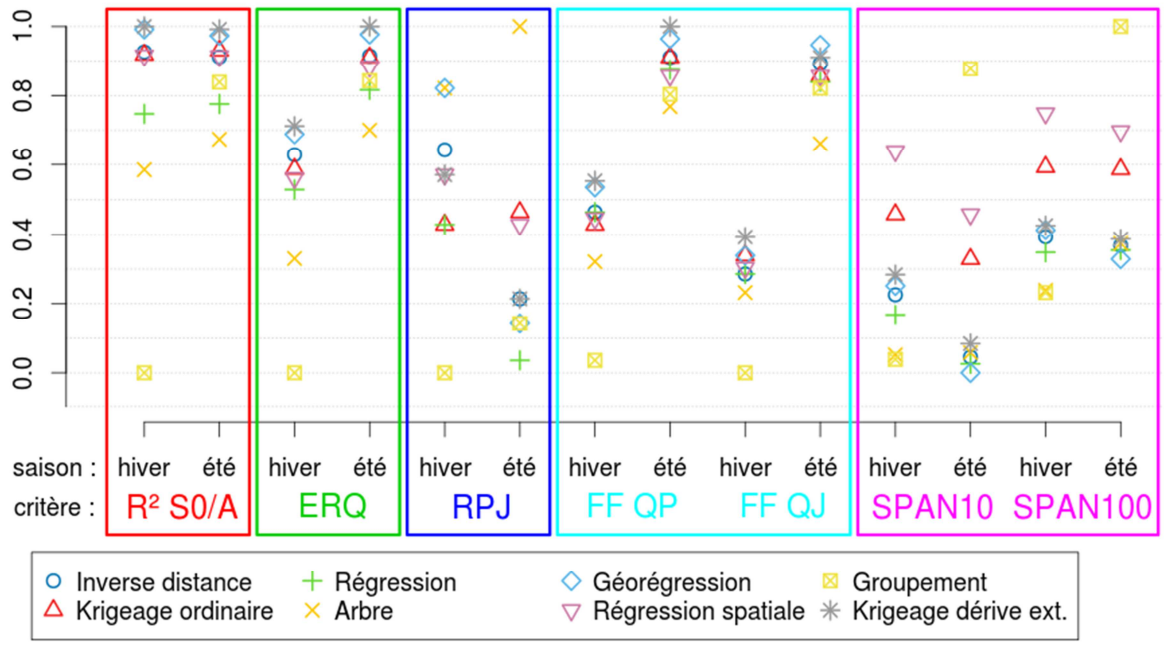


Figure 7-13 : *Comparaison synthétique des différentes méthodes de régionalisation*

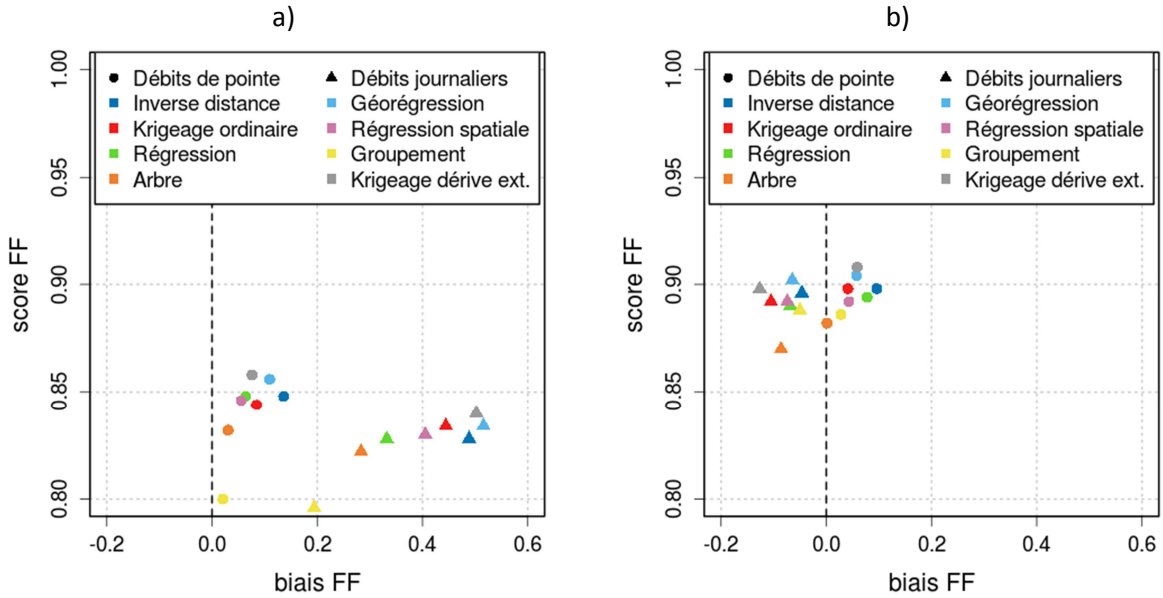


Figure 7-14 : *Comparaison des critères FF des différentes méthodes de régionalisation*

La figure 7-14, nous renseigne sur les valeurs des scores FF (proximité à l'hypothèse de justesse) et de biais FF (tendance). On peut voir que l'ensemble des méthodes à une tendance à la surestimation des débits extrêmes pour la saison hiver, notamment dans le cas des débits journaliers. Une manière de corriger ces biais serait de modifier la formulation de la fonction d'agrégation de SHYREG en utilisant par exemple des coefficients différents selon les saisons. Au contraire les débits de la saison été sont peu biaisés et présentent également des scores FF plus élevés. La comparaison des méthodes nous montre que la régionalisation par groupement ou arbre de régression conduit aux plus faibles valeurs du score FF. Au contraire les méthodes par géorégression ou krigeage à dérive externe permettent de maximiser ce score.

Cette comparaison synthétique permet de voir que les méthodes basées sur la similarité physiographique sont moins performantes que celles basées sur la similarité spatiale. En outre, les méthodes exploitant les deux types de similarité (à l'exception de la méthode de groupement présentée ici) sont généralement préférables. On retrouve ici les conclusions de l'étude comparative de Merz et Blöschl (2004).

Parmi ces méthodes à similarité mixte on retient particulièrement les approches par géorégression et par krigeage à dérive externe qui se classent presque systématiquement comme les deux meilleures méthodes (à l'exception des critères de stabilité). Ces deux méthodes sont caractérisées par des critères extrêmement proches. On décide de conserver l'approche par krigeage à dérive externe. Ce choix repose sur le fait que les valeurs des critères sont généralement très légèrement supérieures avec cette méthode (bien que l'écart ne soit pas nécessairement significatif). En outre la méthode de régression repose sur une hypothèse d'indépendance des résidus qui n'est clairement pas respectée ici. Le krigeage à dérive externe apparait donc plus cohérent pour prendre en compte l'autocorrélation spatiale des valeurs de S0/A que ne l'est la géorégression.

7.3.5. Bilan

Le développement des différentes méthodes de régionalisation nous a permis de percevoir que l'utilisation d'une méthode exploitant la similarité géographique rend le travail par grande région inutile. Cependant seules des régions continues dans l'espace ont été testées, et le constat fait ici est très certainement lié à cette caractéristique des régions. Un découpage en région basées sur une méthode par arbre peut être une piste intéressante dans la mesure où cette méthode explicative purement physiographique performe mieux que les méthodes de même catégorie à l'échelle nationale.

Finalement, la comparaison des différentes méthodes de régionalisation implémentées nous a conduits à préférer une approche de post-régionalisation de SHYREG basée sur un krigeage à dérive externe à trois descripteurs, avec un voisinage de 50 bassins. La densité de drainage moyenne ainsi que l'indice d'aridité sont utilisés comme descripteurs pour expliquer les paramètres des deux saisons. L'indicateur d'humidité des sols avant les évènements pluvieux les plus fort est également utilisé sur la saison été, alors que le taux de végétation herbacée ou basse permet d'expliquer S0/A en hiver. La plupart de ces descripteurs étaient également retenus par les autres méthodes de régionalisation exploitant la similarité physiographique (régression spatiale, géorégression, régression nationale). Le choix de ces descripteurs n'est pas illogique :

- Une densité de drainage élevée caractérise des zones où l'on trouve de nombreux cours d'eau. Ce genre de paysage peut être lié à d'un fort ruissellement pluvieux. Le paramètre S0/A permet d'ajuster la quantité de ruissellement simulée par le modèle pluie-débit. On peut donc justifier une corrélation positive entre S0/A et la densité de drainage.
- L'indice d'aridité permet de caractériser un état de sécheresse moyen dans le temps et l'espace. Le réservoir A du modèle pluie-débit utilisé dans SHYREG représente la capacité de stockage du sol, sa taille est liée à l'hydrogéologie. Le taux de remplissage initial de ce réservoir correspond donc à un état de sécheresse moyen que l'on peut logiquement vouloir caractériser de manière climatique avec l'indice d'aridité.

- Le descripteur SAJ20 représente le remplissage moyen du réservoir de production A avant un évènement pluvieux (tel que défini dans la simulation SHYREG) lorsque l'on utilise le modèle pluie-débit de manière continue en le forçant avec des données de pluies observées. SAJ20 est en théorie le descripteur qui se rapproche le plus d'une valeur observée de S0/A.
- L'utilisation de certaines caractéristiques du couvert végétal pour l'estimation de l'humidité des sols ou de paramètre de modèles pluie-débit conceptuel n'est pas nouvelle en hydrologie (Sriwongsitanon et coll., 2015). On peut en effet supposer que le développement de la végétation est intimement lié à la disponibilité de l'eau dans le sol. Un taux important de couverture par la végétation basse pourrait donc indiquer des zones où l'eau est généralement disponible à faible profondeur, ce qui est cohérent avec une corrélation positive avec le paramètre S0/A.

7.4. Résultats de régionalisation simultanée

Dans cette section on décrit la construction de la méthode de régionalisation simultanée de SHYREG et on compare ses performances avec celles de la méthode de post-régionalisation sélectionnée à l'issue de la section précédente.

7.4.1. Construction du modèle de régression

La méthode de régionalisation simultanée décrite au chapitre 3 se base sur une régression linéaire entre le paramètre S0/A et des variables descriptives à l'échelle des pixels. L'originalité est que cette régression est ajustée à partir d'une fonction objectif sur la qualité des débits simulés. L'optimisation des paramètres de régression nécessite donc de procéder à un grand nombre de simulation des débits ce qui rend la méthode assez lourde à mettre en œuvre. Pour cette raison, il n'est pas possible de mettre en œuvre une sélection automatique des descripteurs qui multiplierait le nombre de simulation à réaliser. On se base donc sur les résultats obtenus avec les différentes méthodes de post-régionalisation pour identifier des descripteurs candidats. On exploite ces résultats de deux façons différentes pour sélectionner des jeux de variables descriptrices que l'on peut tester dans le modèle de syn-régionalisation :

- On identifie les descripteurs (indépendamment les uns les autres) qui paraissent avoir un rôle explicatif sur S0/A à l'échelle nationale ou par région. On applique alors la méthode de régionalisation simultanée en utilisant chacun de ces descripteurs.
- On extrait les descripteurs qui ont été successivement sélectionnés lors de l'application de la méthode de régression linéaire par hydro-éco région. On identifie ainsi quatre modèles de régressions pour chacune des régions (avec 1, 2, 3 ou 4 ou descripteurs à chaque fois) que l'on peut utiliser dans le cadre de la régionalisation simultanée.

Dans chaque cas la méthode de syn-régionalisation est appliquée dans un cadre de validation croisée qui permet d'estimer ses performances en sites non jaugés. Les échantillonnages utilisés sont identiques à ceux présentés à la section 7.2.1. On utilise le critère ERQ sur la restitution des quantiles servant au calage de SHYREG pour comparer les performances associées aux différents jeux de descripteurs. On rappelle que ce critère est borné entre 0 et 1 et qu'il est optimal en 1. Les premiers résultats indiquent rapidement qu'une approche par hydro-écorégion est préférable à une approche nationale, on se contentera de présenter ce premier cas.

En analysant les critères ERQ sur chacune des régions et chacune des saisons pour les différents jeux de descripteurs, on identifie les descripteurs les plus pertinents. On teste alors plusieurs combinaisons de ces descripteurs sur chacune des régions par essais successifs. Les distributions cumulées de ERQ dans les différents cas sont présentées sur la figure 7-15. On y voit assez nettement une progression des performances depuis les modèles à un descripteur (courbes grises) et les jeux de

descripteurs issus des régressions (courbes oranges et jaunes) jusqu'aux combinaisons proposées (courbes bleues). La courbe rouge représente un cas où une valeur homogène de S0/A est calée sur chacune des régions HER. Elle représente un cas témoin qui permet d'apprécier l'apport des descripteurs. On peut voir que certains modèles sont moins performants que ce modèle témoin. Il s'agit en général de modèle à un descripteur unique (courbes grises) qui n'apportent aucune information pour l'explication de S0/A au niveau national. Néanmoins dans certains cas un descripteur peut être explicatif sur une région et ne rien apporter sur les autres.

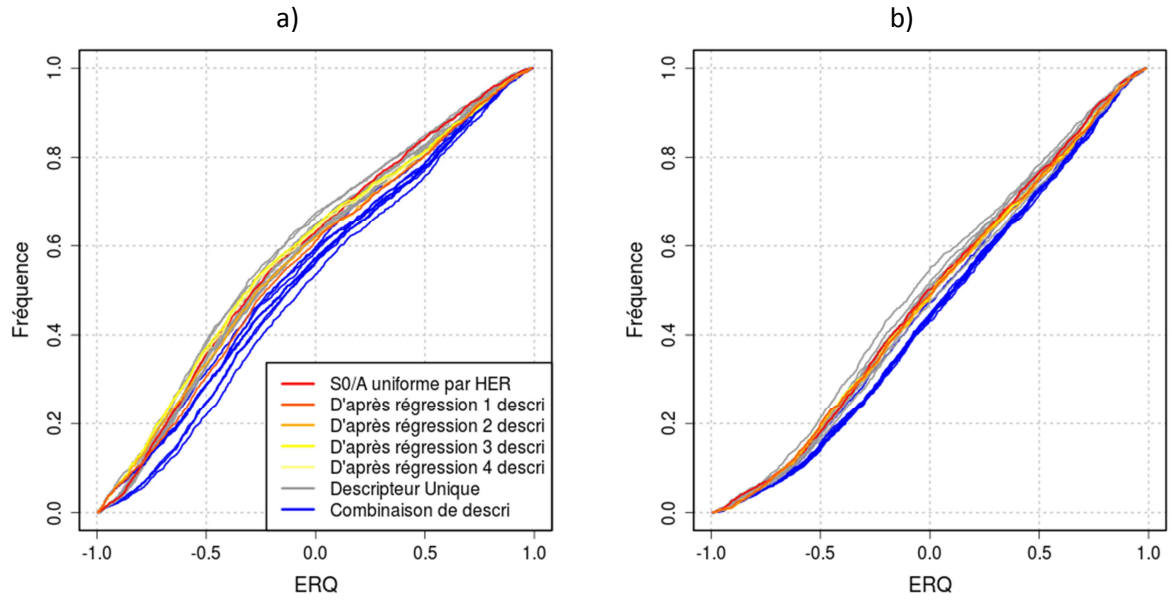


Figure 7-15 : *Distributions du critère ERQ sur les sites de validation avec différents jeux de descripteurs*
a) saison hiver ; b) saison été

7.4.2. Apport d'une correction spatiale

On considère ensuite la prise en compte d'une correction spatiale. Un résidu théorique est calculé en comparant la valeur de S0/A moyenne sur un bassin et la valeur calée avec l'hypothèse d'homogénéité sur chaque bassin. Ce résidu est attribué au centroïde de chaque bassin. On applique alors une méthode d'interpolation spatiale pour cartographier le résidu sur l'ensemble du territoire à une résolution kilométrique. En se basant sur les résultats de post-régionalisation présentés dans la partie 7.3, on choisit d'effectuer l'interpolation spatiale par méthode d'inverse de la distance en considérant les 10 plus proches voisins. Une interpolation par krigeage aurait également pu être employée. Néanmoins, cette approche est plus couteuse en termes de temps de calcul, et des résultats préliminaires n'ont pas permis de présager de meilleures performances.

Le tableau 7-8, présente les valeurs synthétiques du critère ERQ sur chacune des régions obtenues avec les descripteurs seuls, l'interpolation seule (à partir du cas où S0/A est homogène par HER) et les deux méthodes combinées. On peut voir que l'inclusion de la correction spatiale entraîne une hausse sensible des valeurs de ERQ sur l'ensemble des régions. Cette hausse montre encore une fois l'intérêt de méthodes de régionalisation basées sur la proximité spatiale. L'utilisation combinée de descripteurs physiographiques et de la correction spatiale ne conduit pas systématiquement à une hausse du critère par rapport au cas spatial pur. On diminue donc, le nombre de descripteurs utilisés

dans les régions où on n'observe pas d'amélioration des performances et on développe le modèle présenté dans le tableau 7-9. La correction spatiale présentée est utilisée dans chacune des régions.

Tableau 7-8 : *Apport de l'interpolation spatiale sur les valeurs du critère ERQ des différentes régions*

Région	Descripteurs seuls *(hiver / été)*	Interpolation seule *(hiver / été)*	Descripteurs + interpolation *(hiver / été)*
Alpes-Pyrénées	-0,071 / 0,133	0,178 / 0,266	0,194 / 0,27
Massif Central	0,233 / 0,266	0,263 / 0,359	0,295 / 0,359
Est	-0,113 / -0,075	0,044 / 0,095	0,042 / 0,105
Arc Médit.	0,034 / 0,1	0,131 / 0,135	0,182 / 0,128
Contreforts SE	0,103 / 0,154	0,248 / 0,294	0,242 / 0,31
Centre-Nord	-0,214 / 0,029	-0,162 / 0,117	-0,172 / 0,107
Lorraine-Bourgogne	-0,084 / 0,048	0,012 / 0,248	0,039 / 0,235
Bretagne	0,086 / 0,183	0,216 / 0,262	0,209 / 0,261
Aquitaine	-0,016 / -0,027	0,125 / 0,192	0,11 / 0,2
Limousin	0,125 / 0,363	0,214 / 0,422	0,228 / 0,446
National	**-0,009 / 0,108**	**0,098 / 0,229**	**0,105 / 0,230**

Tableau 7-9 : *Modèles linéaires à l'échelle des pixels associés à chacune des régions*

Région	Hiver	Été
Alpes-Pyrénées	0,032 + 0,026T + 0,11log(PJ) + 0,032SAJ	0,405
Massif Central	0,53 −0,2foret + 0,188log(DT) − 0,338HGwet	0,326
Est	0,012 + 0,076log(Pluie)	0,006 + 0,041NE
Arc Médit.	0,001 + 0,022DDr	0,118
Contreforts SE	0,567	0,335 − 0,278VHcapa
Centre-Nord	0,352	0,173
Lorraine-Bourgogne	0,683 − 0,202VHcapa	0,294
Bretagne	0,559	0,246
Aquitaine	0,315 + 0,296SAJ20	0107 + 0,127arable + 0,037SAJ20 − 0,093HGsand
Limousin	0,404 − 0,189foret + 0,379arid	0,002 + 0,021DDr

7.4.3. Comparaison avec la post-régionalisation

De manière à comparer l'approche de post-régionalisation sélectionnée et l'approche de régionalisation simultanée, on présente les valeurs des critères d'évaluation synthétiques sur la figure 7-16. On trace ici les valeurs non transformées de ces critères (contrairement à ce qui a été fait sur la figure 7-13). Les valeurs du critère R^2 sur la restitution du paramètre S0/A ne sont pas connues dans le cas de la seconde approche puisque S0/A n'est pas directement calée et varie pour chaque pixel. On peut voir que la syn-régionalisation permet une nette amélioration de la reproduction des quantiles de calage (critère ERQ) et de leurs rapports (critère RPJ). La stabilité des deux approches au sens des critères SPAN est quasi identique. Les critères FF sur la justesse en extrapolation du modèle sont légèrement meilleurs dans le cas de l'approche simultanée. De manière à mieux différencier les méthodes, on trace les courbes complètes de distribution de FF sur la figure 7-17.

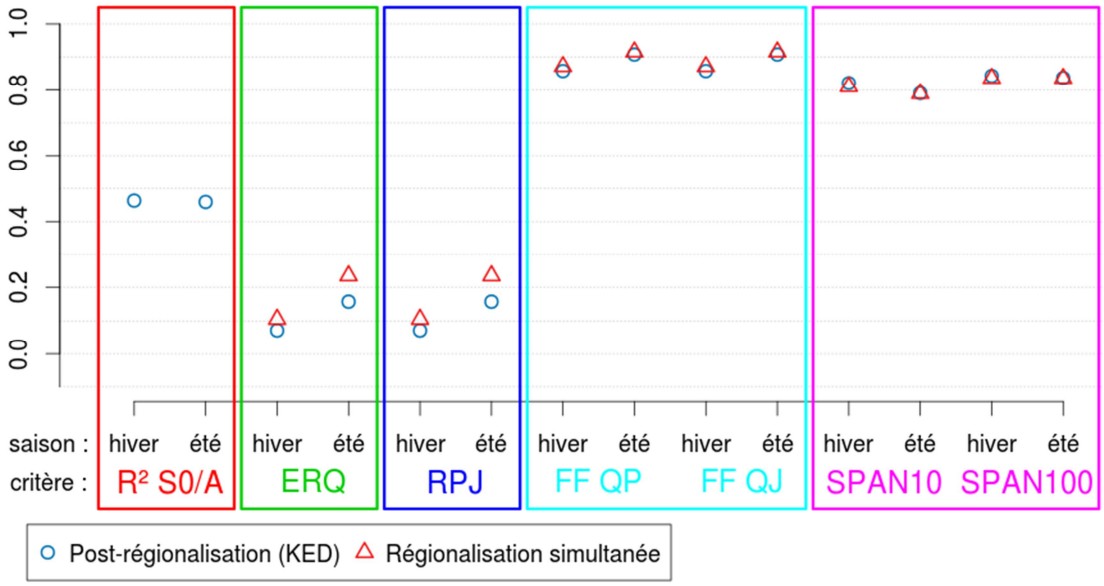


Figure 7-16 : *Comparaison des méthodes de post-régionalisation et de régionalisation simultanée*

Les courbes de distribution de FF de la figure 7-17 confirme que les deux approches conduisent à des performances en extrapolation assez similaires. Sur la saison hiver on peut observer une tendance à la surestimation des quantiles de crue, notamment sur les débits journaliers. Ce résultat était déjà observé au niveau du calage de la méthode. Les distributions de la saison été ne montrent aucune tendance. Dans l'ensemble, on peut confirmer que l'approche par régionalisation simultanée est légèrement plus proche de la distribution théorique sous hypothèse de justesse. Au vu des différents critères d'évaluation, on estime que l'approche par calage régionale est préférable à celle par post-régionalisation. Néanmoins, cette approche possède des désavantages, notamment celui de ne pas fournir d'estimation « non régionalisées » des quantiles de crue. À titre comparatif on conserve les deux approches pour la suite du travail, mais on retient une préférence pour le calage au pixel.

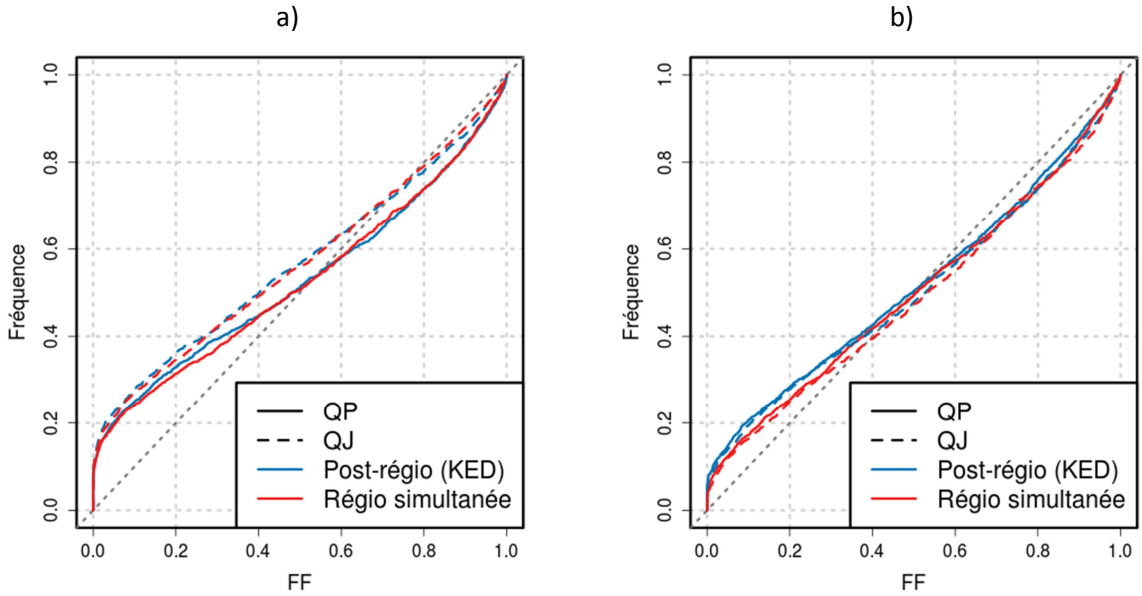


Figure 7-17 : *Distribution des valeurs de FF avec les méthodes de post-régionalisation et régionalisation simultanée*
a) Saison hiver ; b) saison été

De manière à illustrer la différence dans la variabilité spatiale introduite par chacune des deux méthodes on trace les cartographies de S0/A obtenues en utilisant l'information des 1 535 bassins jaugés. On réalise ici un zoom sur le département des Vosges (choisi de manière arbitraire) pour la saison hiver que l'on présente sur. Les deux cartes conduisent à identifier les mêmes zones de fortes ou de faibles valeurs de S0/A. On voit clairement que la variabilité spatiale de S0/A déterminé par post-régionalisation est liée à la structure des complémentaires des bassins versants. La carte réalisée avec la syn-régionalisation est plus continue à l'exception des frontières des régions HER, néanmoins cette continuité semble largement due à la correction spatiale employée.

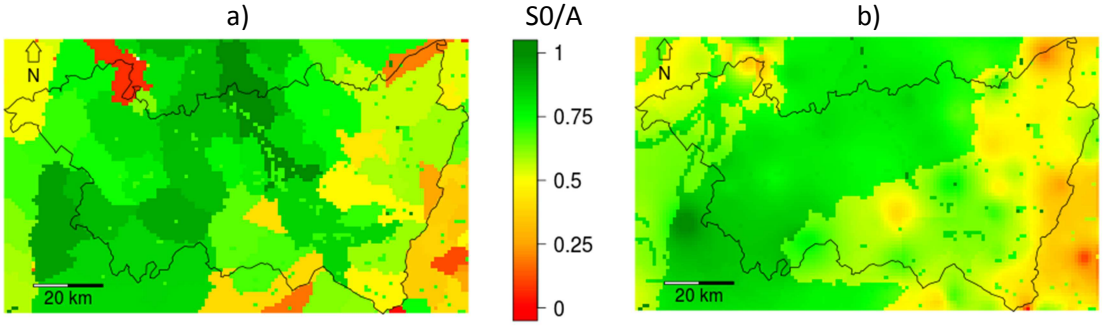


Figure 7-18 : *Cartes de S0/A régionalisé obtenue sur les Vosges pour la saison hiver a) Post-régionalisation ; b) Syn-régionalisation*

7.5. Conclusion

Ce chapitre constitue le point de convergence entre la méthode SHYREG décrite dans la partie I, les techniques de régionalisation présentées au chapitre 5 et les données non hydrométriques introduites dans le chapitre 6. On a ici confronté SHYREG à chacune des méthodes de régionalisation envisagées. Dans un premier temps, on s'est attaché à étudier chacune des méthodes de manière à déterminer la configuration la plus apte pour la régionalisation de SHYREG. Dans un second temps, les meilleures configurations ont été confrontées les unes aux autres dans un cadre de comparaison unique. Ce cadre repose sur une évaluation multicritère. Des procédures de validation croisées ont été mises en œuvre de manière à évaluer l'ensemble des critères dans un contexte non jaugé.

L'implémentation et la comparaison des différentes méthodes a permis de tirer des enseignements sur l'hypothèse de similarité utilisée dans les méthodes de régionalisation.

- Les méthodes de régionalisation basées sur une similarité purement géographique se comportent en général mieux que celles basées sur une similarité purement physiographique.
- Les méthodes exploitant les deux types de similarité de manière combinée conduisent à de meilleurs résultats.

Ces résultats tendent à soutenir l'hypothèse que la similarité géographique permet de prendre en compte des phénomènes non identifiés à partir de jeu de variables descriptrices.

On a également pu voir que dans le cas d'une approche à base purement physiographique, un découpage préalable en grandes zones permettait d'augmenter sensiblement les performances de régionalisation. Néanmoins, si l'on considère une méthode avec une composante spatiale, un travail à l'échelle de toute la France apparait satisfaisant. Ce constat permet de confirmer que la méthode de régionalisation à sélectionner doit être capable de prendre en compte des effets locaux ou régionaux.

Les techniques de géorégression et de krigeage à dérive externe sont apparues comme celles qui permettaient d'obtenir les meilleures performances dans le cas d'une approche par post régionalisation. La méthode de krigeage à dérive externe est finalement retenue car elle permet de mieux combiner les composantes spatiales et physiographiques.

Dans la dernière partie, on s'est attaché à développer et à évaluer une approche de régionalisation simultanée de SHYREG. La conclusion quant à la nature de la similarité à utiliser demeurent les mêmes que dans le cas de la post-régionalisation, c'est-à-dire que la similarité géographique conduit à de meilleures performances. L'approche développée ici se comporte au moins aussi bien que les méthodes de post-régionalisation pour l'ensemble de critères et elle les surpassent même en ce qui concerne la restitution des critères de calage et de leurs rapports. On obtient en outre une variabilité de S0/A plus continue dans l'espace qu'en utilisant une méthode de post-régionalisation.

À ce stade, la régionalisation simultanée de SHYREG apparait donc comme la solution la plus appropriée pour l'application de SHYREG en sites non jaugés. On rappelle que cette approche permet

directement d'obtenir une cartographique du paramètre S0/A à l'échelle de modélisation, elle ne pose donc pas de problème d'incohérence spatiale des débits. Néanmoins, on décide de conserver les deux types d'approche (régionalisation simultanée et post-régionalisation par krigeage à dérive externe) pour les comparer dans un cadre plus « opérationnel ». Dans la dernière partie, on va s'intéresser à l'estimation de débits de crues sur l'ensemble du territoire français.

Partie III : Évaluation de la méthode SHYREG

« Essentially, all models are wrong, but some are useful. »
(Box et Draper, 1987, p424)

Chapitre 8 : Évaluation de la méthode SHYREG

8.1. Introduction....223
8.2. Vers une cartographie de l'aléa crue....224
8.2.1. Problématique....224
8.2.2. Méthodologie....227
8.2.3. Résultats....228
8.2.4. Bilan....230
8.3. Confrontation à d'autres approches....232
8.3.1. Objectif et méthodes....232
8.3.2. Autres approches comparées....233
8.3.3. Résultats....235
8.3.4. Bilan....243
8.4. Conclusion....244

Résumé du chapitre

Dans ce chapitre on cherche à évaluer la méthode SHYREG développée dans les parties I et II. Pour cela on va s'intéresser aux propriétés attendues de la méthode : fournir une information juste et pertinente de l'aléa hydrologique en sites non jaugés, en particulier sur les petits bassins versants où l'information n'est pas disponible. Pour cela, on va chercher à évaluer le comportement de SHYREG sur des sites non jaugés situés à l'amont des stations de calage. Les résultats de ces tests nous conduisent à choisir une régionalisation simultanée de SHYREG pour une application en sites non jaugés. Néanmoins, un calage faisant l'hypothèse d'homogénéité apparait préférable lorsque l'on s'intéresse à un site jaugé. Cette évaluation permet de confirmer le bien fondé de SHYREG pour la création d'une base nationale de débits de crues en sites non jaugés, à une résolution spatiale fine.

Dans un second temps, on cherche à évaluer les performances de SHYREG en les comparant à celles d'autres méthodes de prédétermination. On implémente trois approches statistiques que l'on transfert en sites non jaugés par régionalisation de leurs paramètres. Les quantiles évalués par SHYREG en sites jaugés sont également régionalisés. L'évaluation en sites jaugés sur l'échantillon total de 1935 stations montre que SHYREG dispose de meilleures performances en termes de justesse et de stabilité des quantiles estimés. L'évaluation en site non jaugé se déroule en estimant les débits de crues sur les 400 bassins de l'échantillon de validation finale en n'utilisant que les données des autres stations. Les résultats montrent de bonnes performances de SHYREG, la méthode demeure bien plus stable et un peu plus juste que les méthodes statistiques régionalisées. En outre, SHYREG permet de s'assurer de la cohérence des débits simulés entre eux, ce qui n'est pas le cas des autres méthodes.

8.1. Introduction

Le développement de la méthode SHYREG a toujours été orienté vers une mise à disposition de ses résultats pour le monde opérationnel. Depuis 2012, la base de données SHYREG débit[3] permet aux utilisateurs d'accéder aux estimations de quantiles de débits de crues sur l'ensemble des exutoires de la base nationale des bassins versants (Arnaud et coll., 2012 ; Arnaud et coll., 2016b). Les développements de la méthode présentés dans cette thèse doivent permettre de mettre à jour cette base de données, en incluant plus de stations de calage et en améliorant la méthode de régionalisation. Cet objectif opérationnel implique certaines particularités de la méthode, notamment pour permettre la simulation de débits cohérents le long d'un cours d'eau.

Ce dernier chapitre vise à évaluer la cohérence des résultats de la méthode SHYREG et de sa capacité à répondre au besoin d'une information en sites non jaugés. On rappelle que les bassins jaugés ne représentent pas un échantillonnage représentatif de l'ensemble de bassins versants. Par exemple, seuls 3% des bassins de la banque hydro font moins de 10 km² alors qu'ils représentent 40% des bassins de la base nationale de bassins versants. On doit donc étudier la capacité de SHYREG à faire des estimations sur ces petits bassins tout en étant calé sur des bassins de plus grande taille. Cette étude doit nous permettre de confirmer le choix fait en fin de chapitre 7 d'utiliser la méthode de régionalisation simultanée de SHYREG plutôt qu'une approche de post-régionalisation.

Dans un second temps on s'attachera à procéder à une validation « finale » des débits simulés par la méthode SHYREG en sites jaugés, puis en sites non jaugés. Cette étape exploitera les 400 bassins versants de l'échantillon de validation finale mis de côté depuis le chapitre 3. Cet échantillon n'a jamais été inclus dans les travaux de développement ou de test de la méthode implémentés dans le cadre de cette thèse. De manière à donner plus de relief à cette validation, on procédera en outre à une comparaison des performances avec d'autres méthodes de prédétermination couramment utilisées en sites jaugés ou non jaugés.

[3] https://shyreg.irstea.fr

8.2. Vers une cartographie de l'aléa crue

8.2.1. Problématique

Au chapitre 4 on a montré que considérer les bassins indépendamment les uns des autres pouvait entrainer l'apparition d'incohérences spatiales. La solution retenue pour prendre en compte la structure en réseau des cours d'eau est de cartographier le paramètre S0/A, c'est-à-dire attribuer une valeur unique du paramètre à chaque pixel d'une carte. Pour cela on dispose de deux approches alternatives :

Partie L : Un calage de la méthode SHYREG par complémentaire des bassins versants suivi d'une post-régionalisation du paramètre S0/A par krigeage à dérive externe ;

Partie LI : Une régionalisation simultanée de SHYREG qui détermine directement le paramètre S0/A à l'échelle des pixels.

En termes de performances en sites non jaugés, la seconde approche dispose d'un léger avantage (voir chapitre 7). Néanmoins, la méthode conduit directement à des valeurs régionalisées de S0/A. On ne peut donc plus accéder à des valeurs « locales » de SHYREG, c'est-à-dire aux estimations de débits de crues lorsque la méthode est calée sur des observations de débits.

Dans le chapitre 7, on a évalué les performances des méthodes de régionalisation en considérant un jeu de bassins receveurs choisi parmi l'échantillon de travail. Les complémentaires des bassins donneurs et receveurs étaient alors a priori comparables en terme de taille. Dans le cas où l'on veut appliquer SHYREG à l'ensemble de la BNBV, on doit considérer 140 000 bassins receveurs alors que l'on ne dispose que d'à peine 2 000 bassins donneurs. En outre, la proportion de petits bassins est bien plus importante dans la BNBV que dans le jeu de bassins jaugés. Cette différence d'échelle pose des problèmes. Tout d'abord, le découpage de la BNBV en complémentaires est difficile et lourd à mettre en œuvre. En outre, les complémentaires receveurs seraient alors de taille bien inférieure à ceux des donneurs. Cette descente d'échelle spatiale doit être testée pour vérifier son impact sur les performances de régionalisation.

Pour tester à la fois cette descente d'échelle spatiale, et simplifier l'utilisation de la base nationale on souhaite aboutir à la création d'une carte complète de S0/A sur l'ensemble du territoire. Pour cela on envisage quatre scénarios que l'on schématise sur la figure 8-1:

Partie LII : « Régio simultanée » : la carte de S0/A est celle produite par l'approche de régionalisation simultanée. L'intérêt de cette approche est justement de conduire directement à une connaissance de S0/A à l'échelle des pixels.

Partie LIII : « Post régio » : la carte finale de S0/A est créée à partir des complémentaires des bassins receveurs. Le modèle pluie débit est calé de manière homogène sur les complémentaires de bassins donneurs. La post-régionalisation permet de transférer S0/A depuis les complémentaires des donneurs vers ceux des receveurs. C'est le

scénario utilisé jusqu'au chapitre 7. La variabilité spatiale de la carte finale dépend donc des receveurs utilisés.

Partie LIV : « Post-régio lecture » : on utilise la carte de S0/A obtenue en calage sur les complémentaires des bassins donneurs. La méthode de régionalisation est uniquement employée pour faire des estimations dans les zones où on ne dispose d'aucun complémentaire de donneur (on utilise alors un découpage selon les complémentaires des receveurs). On considère ici que la méthode de régionalisation est inadaptée pour pratiquer une descente d'échelle et on conserve la variabilité spatiale de S0/A introduite par le calage.

Partie LV : « Post régio grille » : la méthode de régionalisation est calé à partir des complémentaires des bassins donneurs et appliquée à chaque pixel kilométrique de la carte. On considère ici une « désagrégation spatiale » assez extrême dans laquelle chaque pixel serait équivalent à un complémentaire de bassin receveur. On utilise ici la méthode de post-régionalisation pour pratiquer la descente d'échelle depuis les complémentaires donneurs vers les receveurs.

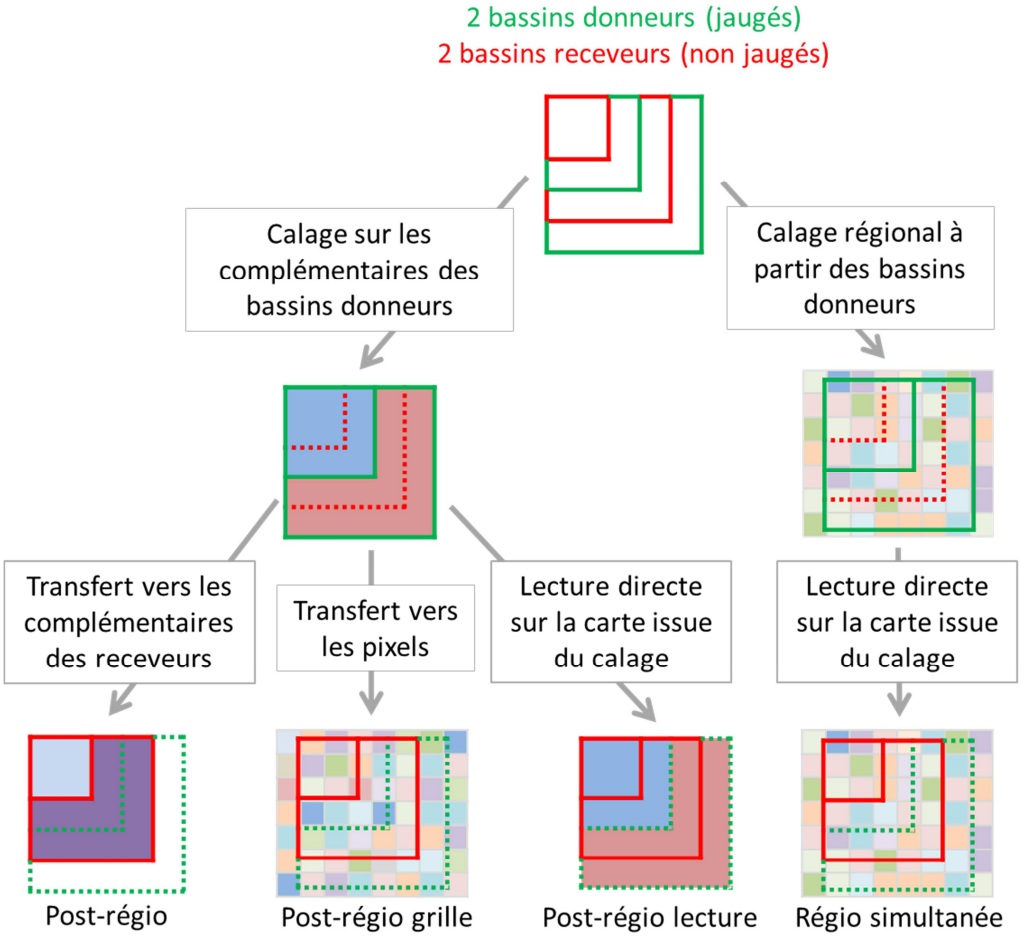


Figure 8-1 : *Schéma des cas de construction de la cartographie de S0/A*

En fait, on s'intéresse ici à la variabilité spatiale introduite par les différents scénarios de régionalisation, notamment à l'intérieur de bassins de calage. La figure 8-2 présente les cartes de S0/A issues des différents scénarios sur le département des Vosges pour la saison hivernale. On peut y voir l'existence de tendances similaires avec des valeurs de S0/A plus faibles sur l'ouest de la zone

par exemple. Néanmoins, on peut clairement distinguer que les approches « Post-régio grille » et « Régio simulatné » conduisent à une variabilité à l'échelle des pixels qui n'existe pas avec les autres méthodes. Dans le cas de la régionalisation, l'interpolation spatiale pratiquée conduit à une plus grande continuité spatiale, les démarcations visibles sont principalement dues aux frontières entre les hydro-écorégions.

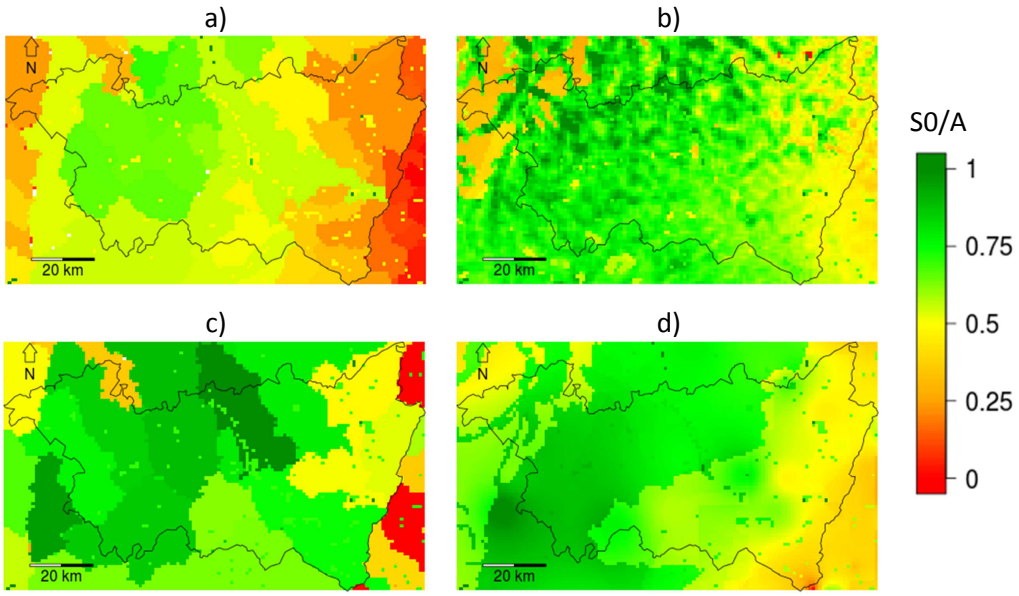


Figure 8-2 : *Carte de S0/A issues des différents scénarios sur le département des Vosges pour la saison hiver*
a) Post-régio : b) Post-régio grille ; c) Post-régio lecture ; d) Régio simultanée

8.2.2. Méthodologie

Pour tester la pertinence de la désagrégation spatiale introduite par chacun des scénarios, on met en place deux tests. Dans les deux cas, on sépare l'échantillon de bassins versants en deux : un jeu de bassins donneurs et un jeu de bassins receveurs. Lors du premier test, les deux sous échantillons sont tirés aléatoirement, mais on impose que tout bassin receveur soit emboité dans au moins un bassin donneur. Ce test permet d'évaluer la pertinence de la variabilité de S0/A interne aux bassins donneurs.

Dans le second test on considère comme jeu de bassins receveurs tous les bassins dont la surface est inférieure à 100 km qu'ils soient inclus dans un bassin donneur ou isolés. Tous les autres bassins sont utilisés comme donneurs. Le but de ce test est d'évaluer la capacité de la méthode à procéder à une descente d'échelle, c'est-à-dire à évaluer les débits de petits bassins lorsqu'elle est calée sur des entités plus grandes.

Tableau 8-1 : *Récapitulatif des critères utilisés*

Évaluation	Critère	Forme du critère	Présentation du critère	Optimal
Reproduction des quantiles courants sur les sites donneurs	ERQ	1 valeur par site	Distribution cumulée	1
Reproduction des quantiles courants sur les sites receveurs (supposés non jaugés)	ERQ	1 valeur par site	Distribution cumulée	1
Justesse des évaluations sur les sites receveurs (supposés non jaugés)	FF	1 valeur par site	Distribution cumulée	Bissectrice

Dans les deux cas, on considère que l'échantillon de validation est non jaugé. On utilisera donc les débits observés sur ces sites que pour le calcul des critères. On attend des résultats assez

similaires sur les deux tests dans la mesure où les petits bassins jaugés sont souvent emboités dans de plus grands.

Pour évaluer les différents scénarios on calcule certains des critères présentés au chapitre 3 sur les bassins de l'échantillon de validation. On résume ces critères dans le tableau 8-1.

8.2.3. Résultats

Les distributions des critères ERQ pour les différents scénarios, les différents tests et les différents échantillonnages sont présentées sur la figure **8-3**. La comparaison de ces distributions entre les bassins donneurs et receveurs permet d'apprécier les limites des méthodes de régionalisation employées. Les différences entre les approches sont très faibles dans le cas de bassins receveurs mais assez importantes sur les bassins donneurs. Dans ce second cas, on notera que les scénarios « Post-régio » et « Post-régio lecture » sont strictement équivalents. Ces deux scénarios surpassent nettement les deux autres. On rappelle que la méthode de régionalisation utilisée est une méthode exacte qui retrouve donc les valeurs de S0/A calées pour ces sites donneurs. L'application de cette même méthode de régionalisation à chacun des pixels de 1 km² entraine une importante diminution des valeurs de ERQ ce qui traduit que la variabilité spatiale de S0/A introduite à l'échelle des pixels n'est pas pertinente. Cette approche n'est pas conservative : la moyenne des S0/A sur un complémentaire n'est pas égale à la valeur calée, on perd donc le caractère exact d'une régionalisation par krigeage. Les valeurs de ERQ obtenues avec la méthode de régionalisation simultanée sont intermédiaires. On pouvait s'attendre à une diminution du critère sur les sites donneurs par rapport au cas de post-régionalisation. En effet, dans le cas de la régionalisation simultanée, on cale uniquement les paramètres de régression (quelques dizaines de paramètres pour l'ensemble du territoire) alors que l'on cale un paramètre par bassin donneur et les paramètres de régionalisation dans le cas de l'approche par post-régionalisation. En outre, la méthode de régionalisation simultanée conduit à de meilleures performances que l'application de la méthode de post-régionalisation à la grille. Ce résultat traduit une variabilité de S0/A à l'échelle des pixels plus pertinente grâce à la régionalisation simultanée.

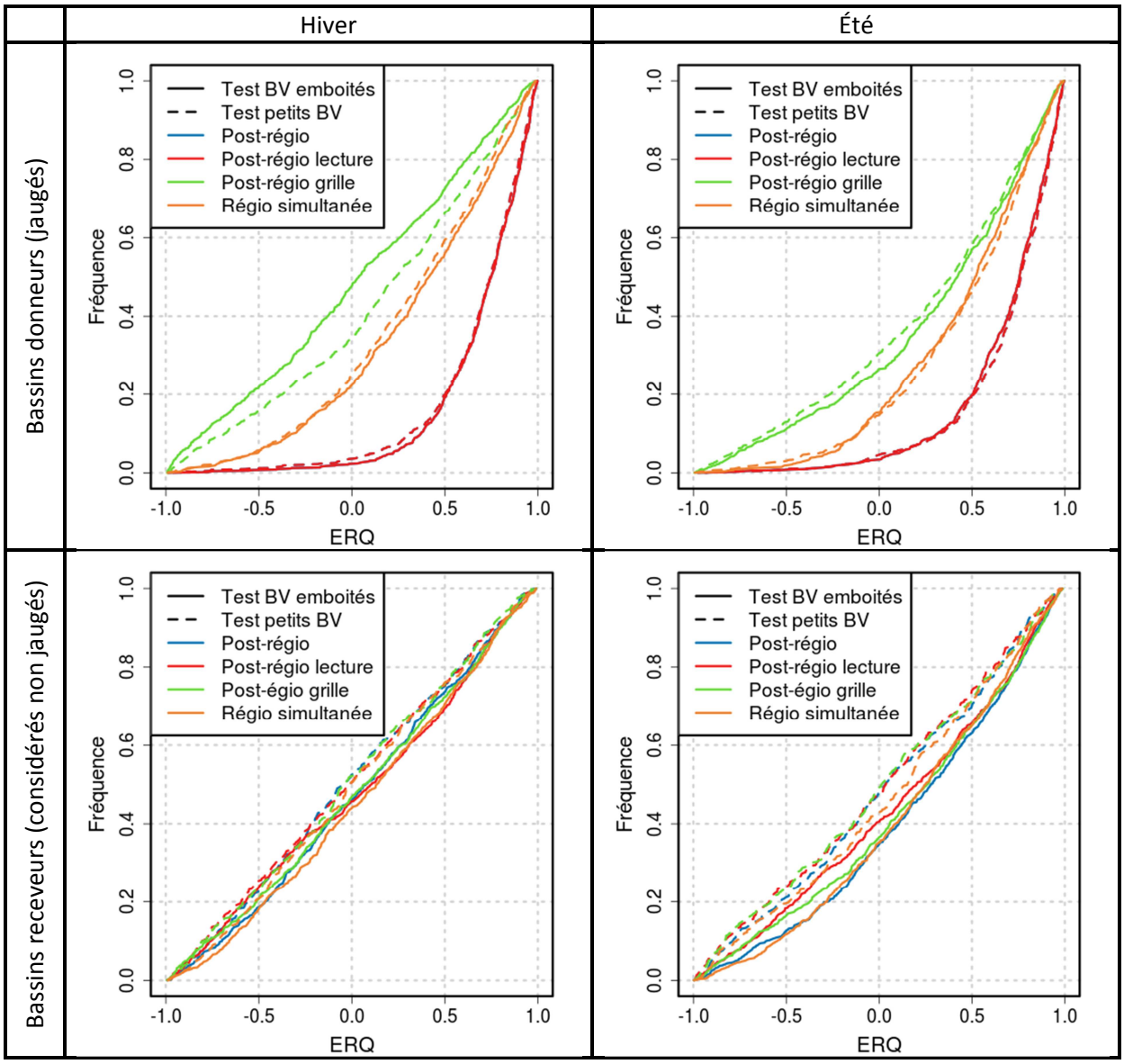


Figure 8-3 : *Distribution des critères ERQ sur des bassins donneurs et receveurs selon les différents scénarios de cartographie*

Les distributions de ERQ pour les bassins receveurs sur la figure 8-3, montre que les trois approches conduisent à des performances similaires sur les bassins de validation. Les erreurs introduites par la régionalisation gomment probablement les différences observées sur les bassins donneurs. On peut noter, que la validation sur de petits bassins conduit à des performances plus faibles que la validation sur des bassins emboités. Ce résultat pourrait s'expliquer par une plus grande variabilité des quantiles de débits sur les bassins de faible taille ou pourrait être attribué aux petits bassins non emboités dans des bassins donneurs puisqu'ils ne disposent d'aucune information calée. L'approche de régionalisation simultanée conduit à des valeurs moyennes de ERQ légèrement plus importantes, notamment dans le cas de la validation sur petits bassins.

Le critère ERQ ne porte que sur les quantiles de faible période de retour, pour vérifier l'impact des types de cartographie sur les quantiles extrêmes, on trace les distributions du critère FF sur la figure 8-4.

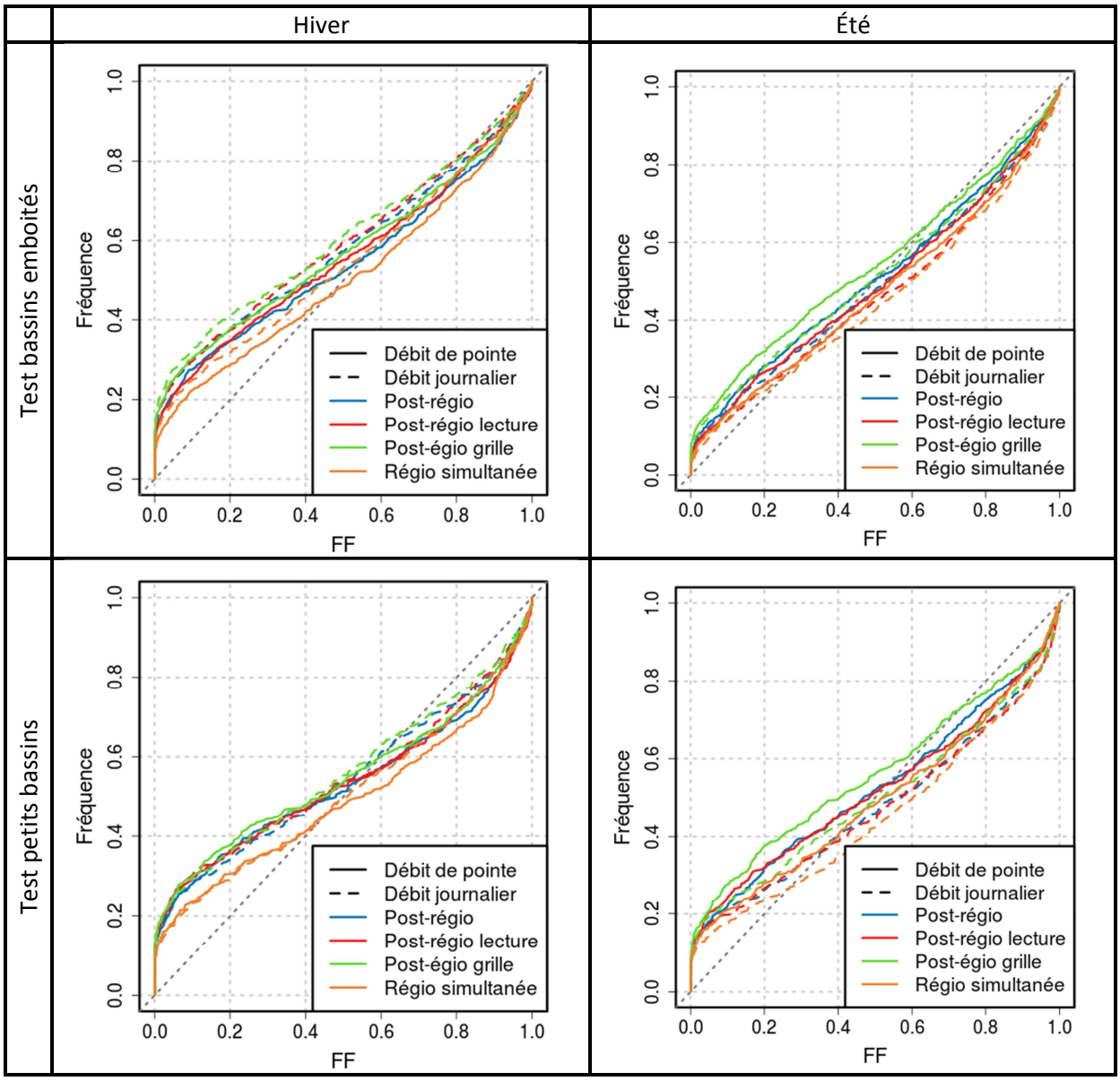


Figure 8-4 : *Courbes de distribution de FF selon les différents cas de cartographie de S0/A régionalisé.*

La figure 8-4, montre que les estimations des quantiles rares par SHYREG sont relativement stables vis-à-vis des cas des scénarios cartographiques envisagés. Cela s'explique par la nature du paramètre S0/A qui impacte davantage les quantiles courants que les quantiles rares. Un calcul du score FF indique que la méthode de régionalisation simultanée est légèrement meilleure que les autres.

8.2.4. Bilan

Dans cette partie on s'est intéressé aux capacités de SHYREG régionalisé à travailler sur des entités spatiales de petite taille. L'intérêt est double. Les bassins de petites tailles sont généralement non jaugés, il est nécessaire de vérifier que SHYREG est capable de faire des estimations sur ces sites alors que la méthode est calée grâce à des bassins de taille supérieure. Ensuite, l'échantillonnage des rivières françaises par la BNBV conduit à considérer des complémentaires de bassins de tailles bien

plus réduites que ceux utilisés pour le calage. On doit donc vérifier la capacité du modèle à s'appliquer sur de plus petits bassins.

On a ici testé la capacité du modèle à faire des estimations sur des petits bassins en utilisant les grands bassins pour le calage ou sur des bassins emboités dans les bassins de calage. On a pu voir que dans le cas d'une post-régionalisation, faire réaliser la descente d'échelle via la méthode de régionalisation conduisait à une diminution des performances sur les sites donneurs. Dans le cas où l'on souhaite disposer d'une cartographie de S0/A à l'échelle du pixel, la régionalisation simultanée apparait comme la meilleure solution. Néanmoins, il faut avoir conscience que cette approche ne fournit pas d'estimations « optimales » des quantiles au niveau des sites donneurs. Pour disposer de ces valeurs il est nécessaire de procéder à un autre calage.

Étant donné les résultats mis en évidence ici, on peut arrêter la version finale de régionalisation de SHYREG que l'on souhaite implémenter pour la création d'une base nationale de débits de crue. Le nombre d'exutoires de la BNBV et les outils opérationnels utilisés pour sa création rendent préférable l'utilisation d'une carte dont l'allure ne dépend pas des bassins versants pris en compte. On sélectionne donc la méthode de régionalisation simultanée pour l'évaluation des débits de crues en sites non jaugés. Dans le cas où l'on souhaiterait appliquer la méthode en site jaugé, il apparait préférable de réaliser un calage de la méthode plus que de considérer les valeurs régionales.

8.3. Confrontation à d'autres approches

8.3.1. Objectif et méthodes

Une version de SHYREG régionalisée a été développée et testée. On cherche désormais à démontrer l'intérêt de l'utilisation de SHYREG par rapport à d'autres méthodes de prédétermination. Pour cela on va caler et régionaliser d'autres méthodes classiques de prédétermination. L'ensemble des méthodes seront comparées à l'aide de critères présentés au chapitre 3. Pour mettre en œuvre cette comparaison on utilise pour la première fois la totalité des stations de mesure sélectionnées au chapitre 3.

Tableau 8-2 : *Récapitulatif des critères utilisés pour la comparaison des méthodes*

	Évaluation	Critère	Échantillonnage	Forme du critère	Présentation du critère	Optimal
Jaugé	Justesse en extrapolation	FF	Calcul sur 1935 sites. Méthodes calées sans utiliser le débit record.	1 valeur par site	Distribution cumulée	Bissectrice
	Stabilité par rapport à l'échantillonnage	SPAN	Calcul sur 1935 sites. Méthodes calées deux fois avec à chaque fois 50% des années d'observation.	1 valeur par quantile	SPAN en fonction de T	1
Non jaugé	Reproduction des quantiles courants	ERQ	Calcul sur 400 sites. Méthodes calées et régionalisées à partir des 1535 autres sites.	1 valeur par site	Distribution cumulée	1
	Justesse des estimations	FF	Calcul sur 400 sites. Méthodes calées et régionalisées à partir des 1535 autres sites.	1 valeur par site	Distribution cumulée	Bissectrice
	Stabilité par rapport à l'échantillonnage des donneurs	SPAN	Calcul sur 400 sites. Méthodes calées et régionalisées deux fois à partir de 50% des 1535 autres sites.	1 valeur par quantile	SPAN en fonction de T	1
	Erreurs de régionalisation	R^2	Calcul sur 400 sites. Méthodes calées et régionalisées à partir des 1535 autres sites.	1 valeur par quantile	R^2 en fonction de T	1

Pour démontrer la capacité des différentes méthodes à estimer les débits de crues en sites jaugés, on calcule les critères de justesse en extrapolation FF et de stabilité SPAN dans la même configuration que celle du chapitre 3. Pour évaluer la justesse, on cale les méthodes sans utiliser la valeur de la plus forte crue observée, et on calcule le critère FF par rapport à cette valeur. Pour

estimer la stabilité, on cale les méthodes deux fois avec 50% des données disponibles à chaque station et on compare les deux estimations. Ces critères sont calculés sur les 1935 stations dont on dispose. Dans le cadre de cette évaluation en sites jaugés on utilise un calage par complémentaire de SHYREG.

Pour comparer les performances des méthodes en site non jaugés, on cale les méthodes à l'aide de toutes les données des 1535 stations de l'échantillon de travail, et on estime les débits sur les 400 postes de l'échantillon de validation finale. On rappelle que ces 400 stations n'ont jamais été utilisées dans les chapitres précédents. Dans le cadre de cette évaluation en sites non jaugés on utilise la régionalisation simultanée de SHYREG.

Les critères utilisés dans cette section sont résumés dans le tableau 8-2. La formulation et le mode de calculs des critères peuvent être consultés au chapitre 3.

8.3.2. Autres approches comparées

À titre de comparaison avec SHYREG on utilise trois approches :

Partie LVI : L'ajustement local et la régionalisation des paramètres d'une loi de type Gumbel ;
Partie LVII : L'ajustement local et la régionalisation des paramètres d'une loi de type GEV ;
Partie LVIII : La méthode de l'indice de crue.

Ces trois méthodes peuvent être utilisées en sites jaugés ou non jaugés. On considérera également une régionalisation des quantiles SHYREG. Cette approche consiste à caler le modèle SHYREG sur chacun des sites donneurs, puis à transférer directement les quantiles de débits évalués sur chacun de ces sites vers les receveurs.

Ces approches (régionalisation des paramètres de lois statistiques, indice de crue, régionalisation de quantiles) sont parmi les plus utilisées pour la prédétermination des crues en sites non jaugés (voir chapitre 1).

On retiendra que la méthode SHYREG développée permet de garantir une croissance des débits le long des cours d'eau. Ce n'est le cas d'aucune des autres méthodes présentées ici.

8.3.2.1. Ajustement local et régionalisation de lois statistiques

Dans cette approche on utilise les lois statistiques issues de la théorie des valeurs extrêmes (Gumbel, 1958) pour modéliser le comportement fréquentiel des crues. On parle d'analyse fréquentielle des crues. Dans le cas d'un échantillonnage de données de type maximum saisonnier, on utilise un modèle de loi de type GEV. Ce type de distribution possède trois paramètres que l'on doit déterminer à l'aide des débits maximums saisonniers observés en chaque station.

Ici on travaille avec un échantillon de bassins versants large, mais contenant de nombreuses stations peu profondes. On sait que l'ajustement d'une loi à trois paramètre de type GEV sur une chronique de données assez courte (10 ans au minimum) peut s'avérer très sensible à la présence

d'évènements extrêmes. On envisage comme alternative l'ajustement d'une loi de Gumbel qui ne comporte que deux paramètres. La loi de Gumbel est un cas particulier de la loi GEV dans lequel le paramètre de forme est fixé à 0. Ces deux types de lois sont ajustées sur chaque poste par la méthode des L-moments (Hosking, 1990).

De manière à faire des estimations en sites non jaugés, les paramètres de ces lois sont régionalisés par krigeage à dérive externe (suivant la méthode décrite au chapitre 5). On notera que les paramètres de position et d'échelle sont log-transformés avant leur régionalisation et que les coordonnées des centroïdes et le logarithme de la surface des bassins sont utilisés comme variables explicatives possibles.

La régionalisation des paramètres de lois statistiques est une pratique courante en analyse fréquentielle des crues en site non jaugé (Rahman et coll., 2012 ; Micevski et coll., 2015).

8.3.2.2. Indice de crue

La méthode de l'indice de crue (Dalrymple, 1960) est une méthode régionale de prédétermination couramment employée, notamment au Royaume-Uni (Kjeldsen et coll., 2008) et dans d'autres pays européens (Castellarin et coll., 2012). Elle consiste à rassembler les données de bassins que l'on considère issues d'une même loi d'occurrence des crues. Les débits de l'ensemble des stations sont adimensionnés par un « indice de crue ». Ces débits sont alors utilisés pour ajuster une loi adimensionnelle régionale. La distribution de fréquences des crues en chaque site peut être retrouvée en multipliant la loi régionale par l'indice de crue du site en question. La mise en œuvre en site non jaugé consiste donc à rattacher le site d'intérêt à une région et à estimer l'indice de crue.

Pour notre application, on considère les régions supposées homogènes issues du travail de Mertz (2017). Ce découpage comporte neuf régions établies à partir de découpages et fusion des régions HER et des grands bassins hydrographiques pour maximiser l'homogénéité des stations jaugées au sens du test d'homogénéité d'Hosking et Wallis (1993). L'indice de crue est choisi comme la médiane des crues maximales saisonnières (Kjeldsen et coll., 2008), et les lois statistiques régionales sont ajustées par la méthode des L-moments régionaux (Hosking et Wallis, 1993).

Les indices de crues sont régionalisés par krigeage à dérive externes (voir chapitre 5). On notera que les indices de crues sont log-transformés avant leur régionalisation et que les coordonnées des centroïdes et le logarithme de la surface des bassins sont utilisés comme variables explicatives possibles.

8.3.2.3. Régionalisation des quantiles SHYREG

La méthode SHYREG figure parmi les méthodes de prédétermination les plus justes et les plus stables lorsqu'elle est appliquée en sites jaugés (Kochanek et coll., 2014 ; Arnaud et coll., 2016a). Au lieu de vouloir estimer le paramètre S0/A sur les sites non jaugés, on peut envisager de directement régionaliser les quantiles SHYREG. Comme on l'a vu au chapitre 1, la régionalisation de quantiles estimés localement est une des méthodes de prédétermination des crues les plus utilisées au monde, notamment en Espagne (CEDEX et DGA, 2011) ou aux États-Unis (Jennings et coll., 1993).

Ici, les quantiles de débits sont log-transformés et estimés par krigeage à dérive externe. Les coordonnées des centroïdes des bassins et le logarithme de la surface sont utilisés comme variables explicatives possibles. On peut noter que l'on ne cherche pas à contraindre la méthode de régionalisation pour garantir la cohérence entre les débits régionalisés.

8.3.2.4. Récapitulatif

On résume les méthodes comparées dans le tableau 8-3. On fait le choix de régionaliser l'ensemble des méthodes en utilisant la même technique que SHYREG. Néanmoins, un travail préliminaire, non présenté, sur la régionalisation de ces différentes approches a permis de s'assurer que les résultats présentés ici sont réalistes notamment par rapport à une régionalisation par géorégression.

Tableau 8-3 : *Résumé des différentes méthodes comparées*

Nom	Information régionale pour le calage	Nombre de variables à régionaliser	Nature des variables à régionaliser	Cohérence des débits le long des cours d'eau
SHYREG	Oui (calage par complémentaire)	1	Paramètre de modèle pluie-débit	Oui
GEV	Non	3 par durée caractéristique	Paramètres de loi statistique	Non
Gumbel	Non	2 par durée caractéristique	Paramètres de loi statistique	Non
Indice de crue	Oui	1 par durée caractéristique	Débits maximaux médians	Non
Quantiles SHYREG	Idem SHYREG	1 par durée caractéristique et par période de retour	Quantiles de débits	Non

8.3.3. Résultats

8.3.3.1. En sites jaugés

a. Justesse des estimations

La principale qualité que l'on attend d'une méthode de prédétermination des crues en sites jaugés est sa capacité à extrapoler la distribution de fréquence des crues au-delà du domaine des observations. On évalue cette capacité grâce à la distribution du critère FF. Sous hypothèse de justesse, ce critère est uniformément distribué entre 0 et 1 sur l'ensemble de l'échantillon (Renard et coll., 2013). Ce critère est lié à la probabilité de non dépassement attribuée par le modèle au plus fort débit observé. Pour tester la capacité d'extrapolation du modèle, on cale les différents modèles sans utiliser la valeur du plus fort débit et on calcule le critère FF par rapport à cette valeur. On a donc bien un critère de validation. Les distributions de FF obtenues avec les différentes méthodes sont tracées sur la figure 8-5.

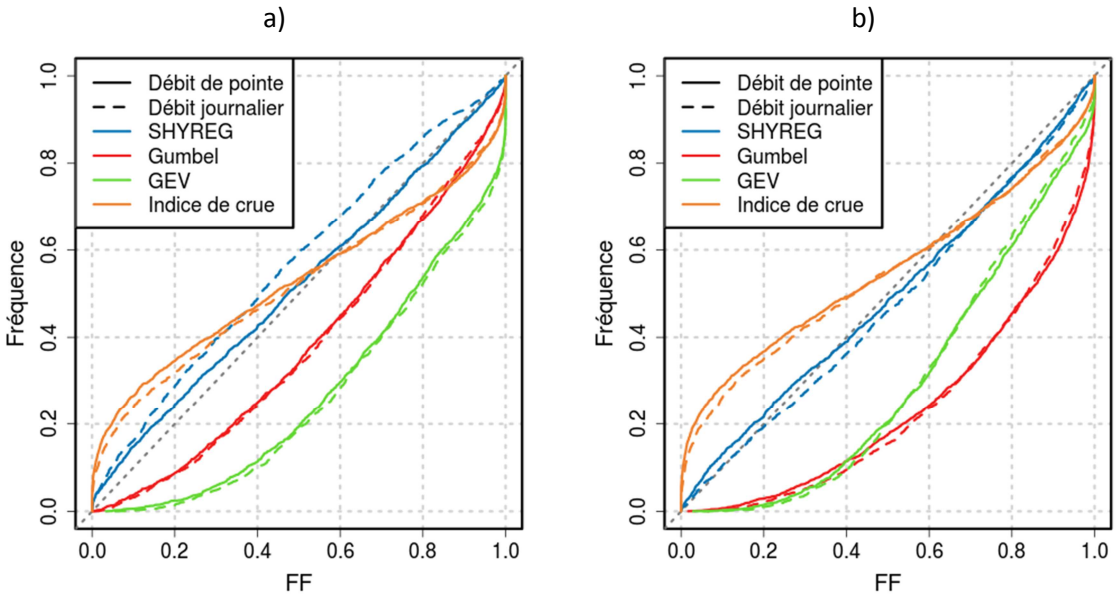


Figure 8-5 : *Distribution des critères FF en sites jaugés*
a) *saison hiver ; b) saison été*

On voit sur la figure 8-5 que la méthode SHYREG est nettement celle qui se rapproche le plus de l'hypothèse de justesse malgré une légère tendance à la surestimation des débits journaliers hivernaux. La méthode SHYREG est suivie par la méthode de l'indice de crue (« Index Flood ») et par les deux ajustements statistiques locaux qui sont caractérisés par une nette tendance à la sous-estimation des quantiles de crue. Cette sous-estimation peut être attribuée à la nécessité des méthodes de statistiques locales d'être calé avec le record de crue pour pouvoir l'estimer, ces méthodes ont donc des capacités d'extrapolation limitées. Notons que, dans le cas, de la loi de Gumbel cette sous-estimation est davantage marquée en été. Ce résultat peut s'expliquer par une incapacité d'une loi de Gumbel à représenter le régime d'occurrence de crues créées par des orages d'été (notamment les phénomènes méditerranéens). Les bassins qui connaissent ce genre de phénomènes sont généralement caractérisés par des distributions à queue très lourde qui ne peuvent pas être modélisées par une loi de Gumbel. Ces distributions fortement asymétriques peuvent être représentées par des lois GEV avec un paramètre de forme assez fort. On notera également que toutes les méthodes, sauf SHYREG, conduisent à des valeurs de FF de 1 sur certains bassins. Cette valeur représente un cas où le modèle estime que la plus forte crue observée n'est pas possible (i.e. associée à une probabilité de d'occurrence nulle).

On peut donc dire que la méthode SHYREG est plus juste que les autres méthodes lorsqu'elle est recalée sur des données locales. Ce résultat avait déjà était démontré par Kochanek et coll. (2014) et Arnaud et coll. (2016a). Alternativement, une méthode de statistique régionale de type indice de crue apparait préférable à une méthode d'ajustement de loi locale.

b. Stabilité par rapport à l'échantillonnage

La stabilité correspond à la capacité d'une méthode à fournir les mêmes sorties lorsque l'on fait varier ses entrées. Il s'agit ici de tester la sensibilité du calage aux données. Un modèle stable est peu sensible à l'échantillonnage des données. On évalue la stabilité des modèles grâce au critère SPAN. Ce critère est lié à l'écart relatif entre deux estimations d'un même quantile faites avec deux jeux de

données différents. Ici on sépare les données de débits de chaque site en deux jeux indépendants de même taille et on procède deux fois au calage. Les valeurs des critères SPAN associées à différentes périodes de retour sont présentées sur la figure 8-6. On rappelle qu'une valeur SPAN de 1 correspond à un modèle parfaitement stable.

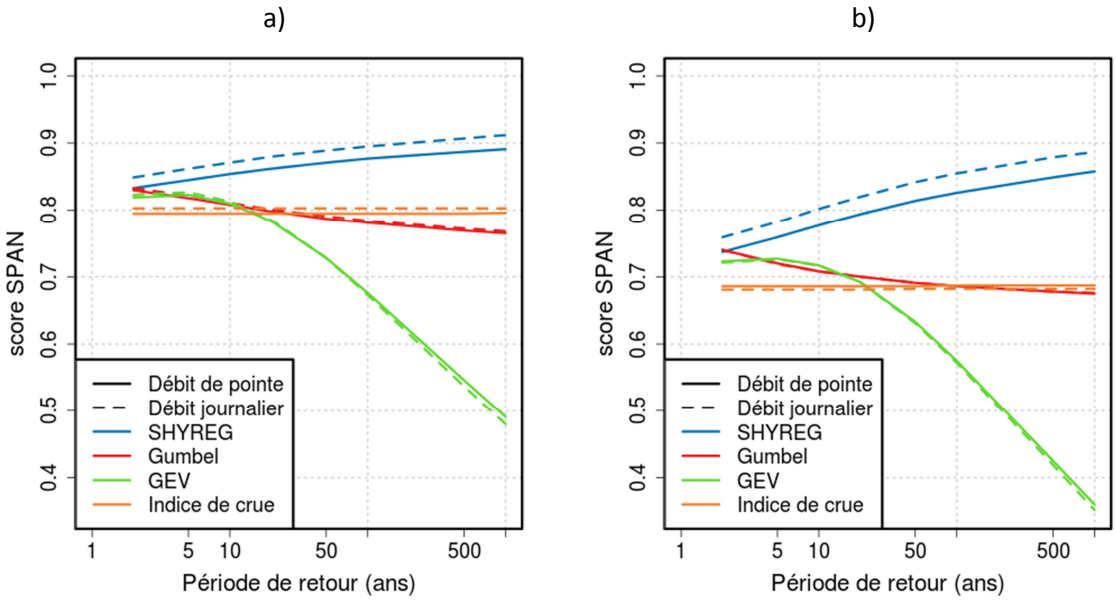


Figure 8-6 : *Valeurs des critères SPAN en sites jaugés*
a) *saison hiver ; b) saison été*

La figure 8-6 montre que non seulement SHYREG est plus stable que les autres méthodes, mais en plus sa stabilité augmente avec la période de retour. Cette caractéristique de SHYREG est liée à la nature du paramètre S0/A. En effet, ce paramètre correspond au remplissage initial du réservoir de production en début d'évènement. Pour les évènements les plus intenses, ce réservoir se sature. Les crues les plus rares sont donc peu impactées par la valeur calée du paramètre d'où cette augmentation de la stabilité. La stabilité de la méthode de l'indice de crue n'évolue pas avec la période de retour. La loi régionale fait que le SPAN n'évolue pas avec la période de retour. Par contre l'indice de crue est instable et est responsable de la valeur du SPAN de 0.8 et 0.7 (à travers les débits qu'il impacte directement). Les estimations faites avec une loi de Gumbel demeurent relativement stable avec la période de retour, alors que la stabilité de la loi GEV chute fortement pour les crues les plus rares. Ce résultat illustre la grande sensibilité à l'échantillonnage des données de la loi GEV, notamment pour la détermination du paramètre de forme qui contrôle l'asymétrie de la distribution.

On peut donc conclure que la méthode SHYREG est plus stable que les autres méthodes en sites jaugés. En outre, l'impact du paramètre S0/A diminue quand la période de retour augmente. Alternativement, l'utilisation d'une loi régionale ou d'une loi de Gumbel peut conduire à des résultats relativement stables. L'utilisation d'une loi GEV à trois paramètres libres doit être cantonnée aux cas où l'on dispose de beaucoup de données, en effet la queue de cette distribution est très sensible à l'échantillonnage des données. On retrouve ici les conclusions de Kochanek et coll. (2014) et Arnaud et coll. (2016a).

8.3.3.2. En sites non jaugés

L'évaluation des différentes méthodes en sites non jaugés s'effectue en analysant les valeurs de débits estimés sur l'échantillon de validation finale (400 bassins versants) supposé non jaugé lorsque les différentes méthodes sont calées et régionalisées à partir de l'échantillon de travail (1535 bassins).

a. Reproduction des quantiles courants

On compare maintenant les quantiles courants régionalisés avec ceux estimés à partir des données locales de chacun des 400 sites de validation. La comparaison de ces valeurs est effectuée grâce à un critère ERQ. Les distributions de ces critères sont présentées sur la figure 8-7.

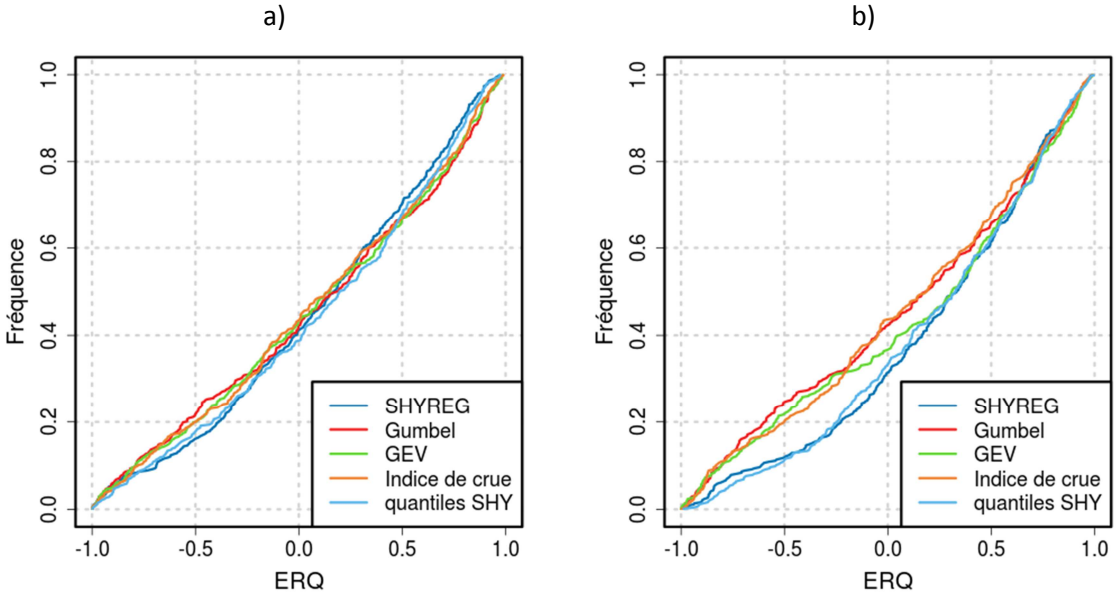


Figure 8-7 : *Distribution des critères ERQ entre quantiles régionalisés et estimés localement a) saison hiver ; b) saison été*

Les distributions de la figure 8-7 montrent que l'ensemble des méthodes testées conduit aux mêmes performances, limitées, sur la reproduction des quantiles hivernaux. Dans le cas de la saison été, les deux méthodes issues de SHYREG montrent de meilleures performances, suivies par la régionalisation de la loi GEV. Les méthodes Gumbel et Indices de crues sont les moins performantes.

Le critère ERQ présenté ici ne permet d'évaluer que le début de la distribution de fréquence et présente donc un intérêt limité. Néanmoins, on peut distinguer un léger avantage de la méthode SHYREG.

b. Justesse en extrapolation

On évalue la justesse en sites non jaugés des différentes méthodes en calculant la valeur de FF sur chacun des 400 sites receveurs. Les données de ces sites n'ont pas été utilisées ni pour caler les méthodes ni comme donneur pendant la régionalisation. Les distributions de ces valeurs de FF sont fournies sur la figure 8-8.

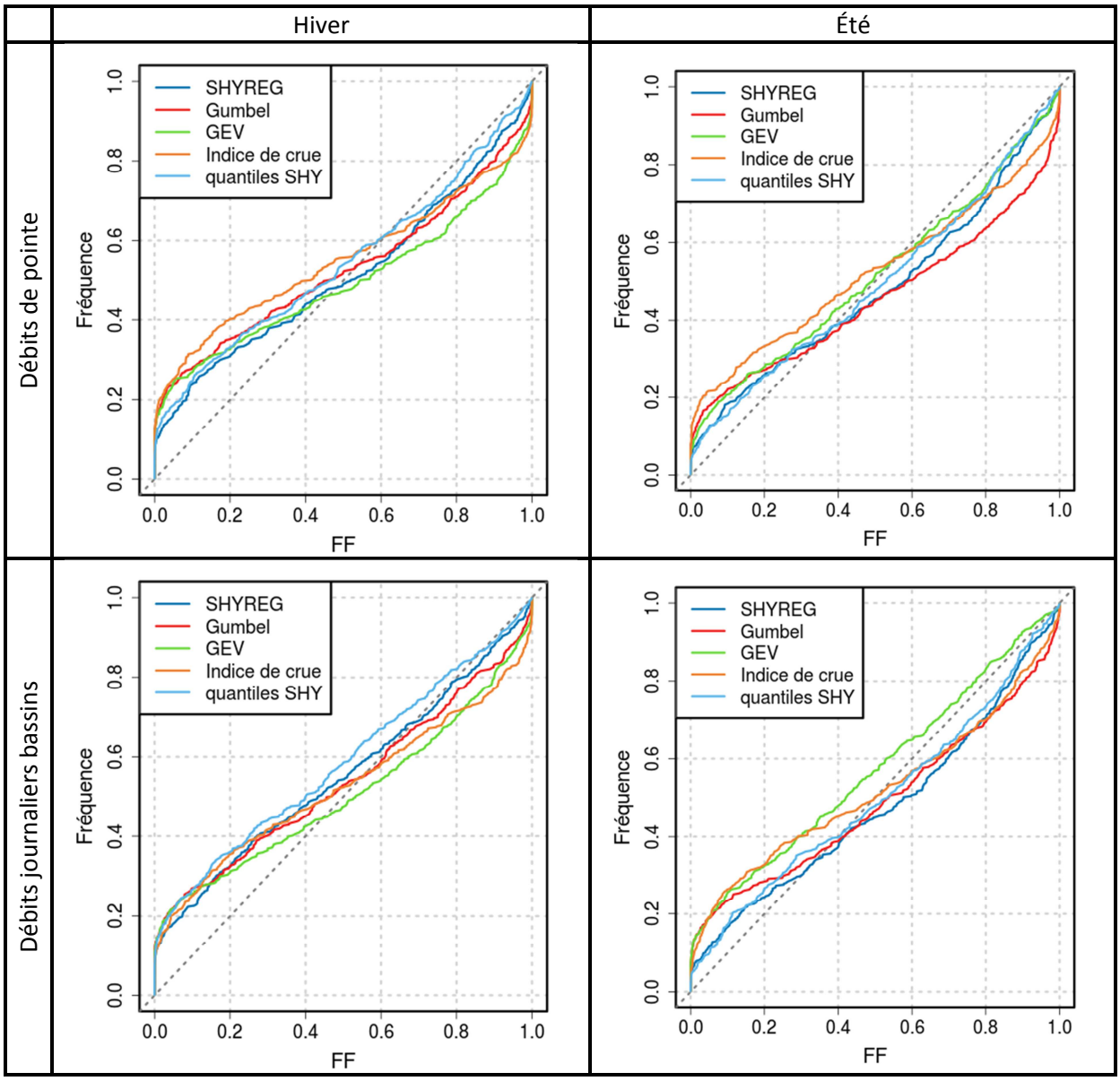


Figure 8-8 : *Distribution des critères FF sur les 400 sites de validation considérés non jaugés*

Les distributions de FF présentées sur la figure 8-8 peuvent paraitre étonnamment proches de la bissectrice par rapport à celles obtenues en sites jaugées (figure 8-5). Dans ce dernier cas, on testait le « pouvoir prédictif » de la méthode en la calant sans utiliser le record observé. Ici on regarde la justesse des distributions régionalisées. En outre, les échantillons de stations sont différents.

La comparaison des courbes entre elles montre un comportement satisfaisant des deux méthodes issues de SHYREG (régionalisation de S0/A ou régionalisation des quantiles). Dans presque tous les cas, ces deux distributions sont les plus proches de la première bissectrice. En outre, les autres approches ont tendance à attribuer des probabilités de non dépassement de 1 à des évènements déjà observées (valeur de FF de 1). Ce comportement est un avantage important de la méthode SHYREG qui permet des estimations plus sûres

On peut dire que la régionalisation du paramètre SHYREG, ou des quantiles SHYREG estimés localement conduisent à une plus grande justesse d'extrapolation du modèle en sites non jaugés par rapports aux approches statistiques régionalisées.

c. Stabilité par rapport aux donneurs

Pour évaluer la stabilité des méthodes en sites non jaugés, on effectue deux estimations des quantiles de crue sur les bassins de l'échantillon de validation finale. Dans les deux cas on utilise 50% des stations de l'échantillon de travail pour caler les méthodes et effectuer les régionalisations. On compare alors les deux estimations sur les 400 bassins de validation grâce à un critère SPAN. Les valeurs de ces critères sont présentées sur la figure 8-9.

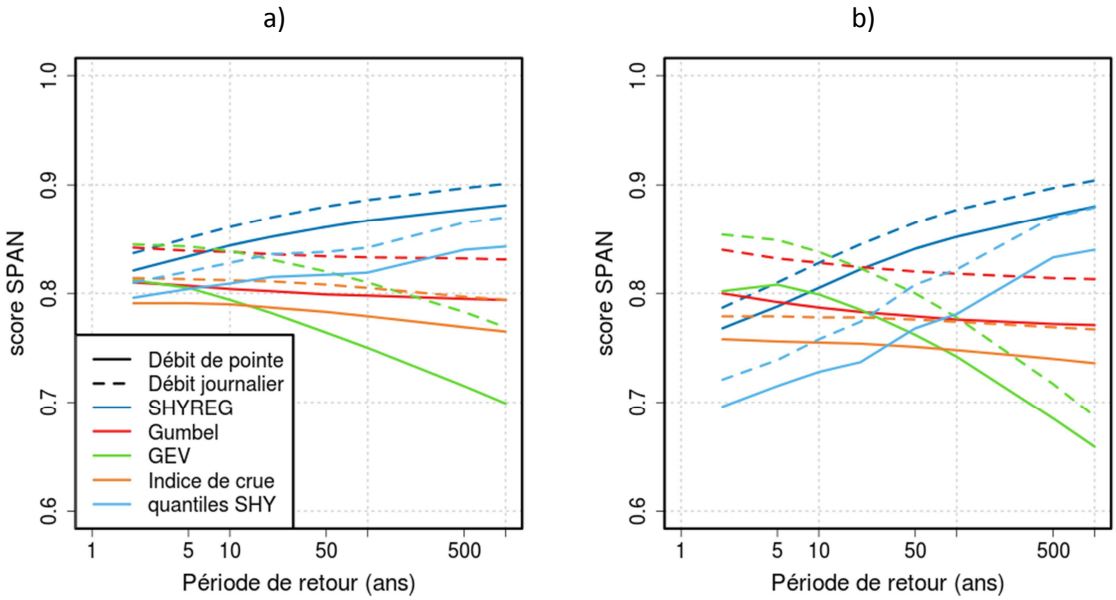


Figure 8-9 : *Valeurs des critères SPAN sur les 400 bassins de l'échantillon de validation considérés non jaugés*
a) *saison hiver ; b) saison été*

Globalement, les valeurs de SPAN présentées sur la figure 8-9 présentent les mêmes allures qu'en sites jaugés. Les quantiles journaliers sont toujours plus stables que les quantiles de pointes. On peut voir que la méthode SHYREG est moins sensible aux donneurs de régionalisation que les autres approches, notamment pour les grandes périodes de retour. Encore une fois, les débits extrêmes simulés par SHYREG sont peu impactés par le paramètre S0/A et donc par les erreurs de régionalisation, ils sont estimés grâce à une information de pluie bien connue. Les autres méthodes utilisent l'information de pluie uniquement comme variable explicative de la régionalisation. La régionalisation des quantiles SHYREG présente une bonne stabilité pour les grandes périodes de retour mais une stabilité parmi les plus faibles sur les quantiles courants. Au contraire, la stabilité associée avec la méthode GEV chute quand la période de retour augmente. Dans la mesure où la stabilité de la méthode Gumbel est peu impactée par la période de retour, on peut associer cette chute au paramètre de forme qui est plus difficile à régionaliser que les autres paramètres. Cette difficulté de régionalisation peut être liée à la grande sensibilité de ce paramètre à l'échantillonnage des données qui le rend difficile à estimer.

On peut déduire de cette analyse que la méthode SHYREG proposée est plus stable que les autres pour l'estimation de quantiles de crues en sites non jaugés.

d. Erreurs de régionalisation

On souhaite comparer les erreurs de régionalisation effectuées avec les différentes approches. On estime ces erreurs en comparant les estimations faites par chacune des méthodes appliquées en sites jaugés (en utilisant les données locales) et celles effectuées par la méthode régionalisée lorsque les données locales ne sont pas utilisées. On quantifie l'erreur avec un critère R^2 calculé sur chacun des quantiles. On calcule le critère sur les 400 bassins de l'échantillon de validation finale. Les valeurs du critère sont présentées sur la figure 8-10.

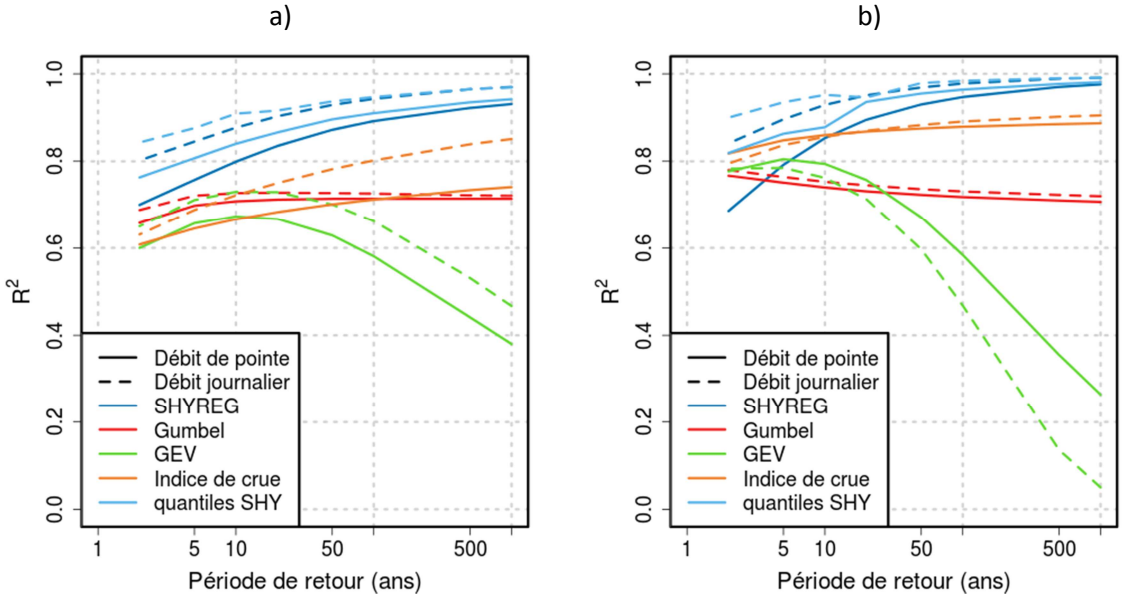


Figure 8-10 : *Valeurs du critère R^2 sur l'erreur de régionalisation sur les 400 bassins de l'échantillon de validation considérés non jaugés*
a) *saison hiver ; b) saison été*

On peut voir sur la figure 8-10 que pour les méthodes SHYREG, indices de crue et la régionalisation des quantiles SHYREG, les erreurs de régionalisation concernent essentiellement les quantiles de faibles périodes de retour. Dans le cas des méthodes basées sur SHYREG on arrive quasiment à retrouver les valeurs estimées en sites jaugés des quantiles les plus extrêmes. La méthode GEV apparait clairement comme la méthode la plus impactée par les erreurs de régionalisation, notamment pour les plus forts quantiles. Ce résultat est à lier au manque de stabilité de la méthode.

Le faible impact des erreurs de régionalisation sur les estimations des quantiles de crue par SHYREG ne doit pas être lié à une régionalisation plus performante que pour les autres méthodes. En effet, dans la modélisation SHYREG les plus forts débits sont principalement impactés par la génération de la pluie et presque pas par le paramètre S0/A. Les quantiles estimés par SHYREG sont donc robustes à la régionalisation car la pluviométrie est connue de la même manière dans les deux cas (« local » et « régional »). Les autres méthodes ne dispose pas d'autres informations que celles apportées par la régionalisation, elles sont plus sensibles aux erreurs d'estimations de leurs paramètres.

e. Cohérence des débits simulés

On souhaite dénombrer les incohérences entre les débits, introduites par chacune des méthodes. Parmi les 400 bassins de validation finale, on dénombre le nombre de sites où chacune des méthodes a :

Partie LIX : conduit à une décroissance de la loi de fréquence

Partie LX : proposé une estimation de quantiles journaliers supérieurs aux quantiles de pointes.

On rassemble le nombre d'incohérences dans le tableau 8-4. On peut voir que la méthode SHYREG n'introduit aucune incohérence. En effet, sa structure assure une croissance des lois de fréquences et une bonne cohérence entre les quantiles de différentes durées. Les méthodes statistiques (GEV, Gumbel et Indice de crue) n'introduisent aucune incohérence sur les périodes de retour. En effet, ces méthodes sont régionalisées en estimant les paramètres de ces lois. En chaque site non jaugé on obtient donc une loi de fréquence croissante. Des incohérences sur les périodes de retour sont introduites par la méthode de régionalisation des quantiles SHYREG. En effet, dans ce cas on a estimé les différents quantiles indépendamment les uns des autres ce qui ne permet pas de garantir la croissance des courbes de fréquences estimées. Ce résultat est valable quelle que soit la méthode ayant permis de calculer les quantiles qui ont subi la régionalisation. La régionalisation de quantiles est généralement réalisée par régression linéaire multiple en contraignant le choix des descripteurs et les coefficients associés pour garantir la croissance des débits avec la période de retour. Des exemples peuvent être trouvés dans (CEDEX et DGA, 2011) et (Jennings et coll., 1993).

Tableau 8-4 : *Énumération du nombre d'incohérences introduites par chaque méthode sur les 400 bassins de validation considérés non jaugés*

Incohérences	**SHYREG** (hiver /été)	**Gumbel** (hiver /été)	**GEV** (hiver /été)	**Indice de crue** (hiver /été)	**Quantiles SHY** (hiver /été)
Périodes de retour (en pointe)	0 / 0	0 / 0	0 / 0	0 / 0	15 / 13
Périodes de retour (en journalier)	0 / 0	0 / 0	0 / 0	0 / 0	23 / 13
Durées caractéristiques	0 / 0	14 / 8	43 / 67	15 / 10	12 / 24

Les méthodes statistiques ne considèrent pas en même temps les débits de différentes durées caractéristiques. Il faut donc ajuster et régionaliser les lois plusieurs fois, ce qui ne garantit pas leur cohérence. De manière à solutionner ce problème on pourrait envisager d'introduire une dépendance entre les lois associées aux différentes durées, par exemple avec des copules (Requena et coll., 2016). On pourrait également envisager des approches multidurées comme l'approche QdF dérivée de l'indice de crue (Javelle et coll., 2002).

En plus des incohérences énumérées ici, on pourrait s'intéresser à la croissance des débits le long des cours d'eau. Néanmoins ce genre d'incohérence est surtout visible lorsque l'on simule des quantiles régulièrement le long d'une rivière comme on l'a vu au chapitre 4. Le problème serait moins visible sur un jeu de seulement 400 stations. On peut rappeler que la méthode SHYREG développée dans cette thèse garantit une évolution cohérente des quantiles le long des cours d'eau, ce qui n'est pas le cas des autres approches utilisées ici.

La méthode SHYREG est donc la seule à garantir la cohérence des débits simulés. À l'opposé une méthode basée sur la régionalisation de quantiles risque d'introduire de nombreuses incohérences dès lors que l'on s'intéresse à plusieurs périodes de retour ou à plusieurs durées caractéristiques. Dans ce cas un travail supplémentaire doit être effectué pour garantir cette cohérence.

8.3.4. Bilan

Les résultats montrés dans cette section permettent clairement de démontrer les qualités de la méthode SHYREG par rapport à d'autres approches. Que cela soit en sites jaugés ou en sites non jaugés, la méthode montre de meilleures performances que les autres en termes de justesse et de stabilité.

Il est évident que SHYREG a bénéficié de bien plus de travail de développement que les autres méthodes. Néanmoins, les bonnes performances de la méthode doivent également être associées à des caractéristiques intrinsèques de l'approche :

Partie LXI : On a pu voir que SHYREG était assez peu sensible aux erreurs de régionalisation, notamment en ce qui concerne les quantiles extrêmes. Pour les valeurs de débits les plus fortes, c'est l'information apportée par le générateur de pluie régionalisé qui est le principal contrôle des débits. Ce générateur a fait l'objet de nombreux travaux de développement (Cernesson et coll., 1996 ; Arnaud, 1997 ; Arnaud et coll., 2005 ; Cantet et Arnaud, 2012) et ses performances en sites non jaugés ont été validées (Carreau et coll., 2013). Ainsi SHYREG dispose d'une information pluviométrique juste et robuste en plus de l'information apportée par la régionalisation du modèle pluie-débit.

Partie LXII : La structure de SHYREG assure la cohérence des quantiles en termes de périodes de retour, de durées caractéristiques et aussi d'évolution le long des cours d'eau. Cette cohérence résulte d'une prise en compte de l'ensemble de ces caractéristiques en une unique modélisation, ce qui n'est pas le cas des autres méthodes qui doivent être appliquées plusieurs fois.

8.4. Conclusion

Dans ce chapitre on s'est tout d'abord intéressé à la pertinence de la méthode SHYREG pour la création d'une base nationale de débits de crue. Des tests de descente d'échelle spatiale ont permis de tester la pertinence de la variabilité spatiale de S0/A introduite lors du calage de la méthode. Les résultats nous ont amené à préférer l'approche de régionalisation simultanée de SHYREG pour une application en site non jaugé. Cette façon de faire permet de créer une carte de paramètre qui peut être facilement utilisée pour la simulation de quantiles de crues en n'importe quel point du réseau hydrographique. En outre cette approche est celle qui conduit aux meilleures performances en termes de justesse.

Dans une deuxième partie on s'est attaché à tester les performances de l'approche sélectionnée en sites jaugés, mais aussi en sites non jaugés en l'appliquant sur un jeu de 400 bassins non encore utilisés jusqu'à présent. La méthode a été comparée à d'autres approches plus simples, mais couramment employées. La méthode SHYREG s'est caractérisée par de bonnes performances en justesse et en stabilité que cela soit en sites jaugés ou en sites non jaugés. Ces performances de SHYREG sont à associer à une faible dépendance des quantiles de forte période de retour au paramètre S0/A qui est régionalisé. En effet, ces quantiles sont principalement contrôlés par l'information fournie par le générateur de pluie. SHYREG dispose donc d'une information régionale supplémentaire par rapport aux autres méthodes. Cette information supplémentaire la rend préférable pour l'estimation de débits de crues extrêmes.

« The eternal mystery of the world is its comprehensibility. »
(Einstein, 1936, p351)

Conclusion

Le travail de thèse présenté ici a visé à appliquer la méthode SHYREG en sites non jaugés. L'objectif principal est de pouvoir utiliser cette méthode pour prédéterminer des débits de crues sur l'ensemble du territoire français. Par définition, les sites non jaugés ne disposent pas des données hydrométriques nécessaires à l'évaluation de quantiles de crues estimés. Tout au long de cette thèse on a donc travaillé avec un jeu de 1 935 bassins versants jaugés répartis sur l'ensemble du territoire. Selon les objectifs, on a mis en œuvre différents tests de calage et validation qui consistent à masquer une partie des données pendant le calage des modèles et à ne les utiliser que pour la validation des estimations.

SHYREG est une méthode de prédétermination des crues qui associe un générateur de pluie stochastique totalement régionalisé et un modèle pluie-débit simple. Ce dernier dispose d'un unique paramètre de calage « S0/A ». L'estimation de ce paramètre sur un site non jaugé permet donc l'application de la méthode.

Les développements de la méthode SHYREG présentés dans cette thèse s'orientent autour de deux axes principaux :

- La révision des hypothèses de calage pour prendre en compte la structure en réseau des cours d'eau et imposer une cohérence des débits simulés d'amont en aval ;
- L'étude de différentes méthodes de transfert des valeurs de S0/A depuis les sites de calage vers des sites non jaugés.

Le premier axe a permis de passer d'une méthode de calage qui considérait des bassins homogènes indépendamment les uns des autres à une méthode qui tient compte des relations d'emboitements entre les bassins. Ce développement possède trois avantages :

- Il permet de gérer les bassins emboités de manière plus satisfaisante que la première version de SHYREG.
- Il permet de cartographier le paramètre S0/A en attribuant une valeur unique à chaque pixel appartenant aux sites de calage. Cette cartographie permet d'assurer une croissance des débits le long des cours d'eau.
- Il s'affranchit de l'hypothèse d'homogénéité des bassins versants pour la faire sur des entités de tailles plus réduites, ce qui permet d'effectuer un pas dans la direction de la descente d'échelle, c'est-à-dire vers une connaissance du paramètre S0/A à une résolution fine (i.e. la résolution kilométrique de la modélisation).

Deux algorithmes de calages différents ont été testés pour mettre en œuvre ce calage qualifié de « complémentaire ». Ces algorithmes entrainent une augmentation de la complexité du calage en intégrant davantage de contraintes par rapport à la précédente version de SHYREG. Néanmoins, la

nouvelle méthode de calage retenue n'a pas entrainé de perte de performance. Ce type de calage peut être utilisé pour l'application de la méthode SHYREG en sites jaugés.

Le second axe consistait à implémenter et tester différentes méthodes de régionalisation pour l'estimation de S0/A en tout site du territoire français. L'étude et la conceptualisation des méthodes de régionalisation existantes a permis de sélectionner un jeu de méthodes diverses, tant du point de vue des techniques utilisées que de celui des hypothèses sur lesquelles elles reposent. Des tests comparatifs ont permis de conclure que les meilleures méthodes de régionalisation sont celles qui exploitent à la fois les caractéristiques physiographiques des bassins versants, mais aussi leur proximité spatiale. Ces comparaisons ont conduit à sélectionner une méthode de krigeage à dérive externe qui peut être utilisée pour l'estimation de S0/A sur un ou plusieurs sites non jaugés.

En outre, ce travail sur la régionalisation a permis de développer une connaissance sur les principaux contrôles qui influencent le paramètre S0/A (structure spatiale, variables physiographiques, découpage en régions). Cette connaissance dont on ne disposait pas, a priori, s'est révélée nécessaire pour le développement d'une méthode de régionalisation simultanée qui réalise en même temps le calage et la régionalisation de SHYREG en proposant une cartographie du paramètre S0/A à l'échelle des pixels. Cette cartographie s'avère être un outil nécessaire pour la création de la base nationale SHYREG. La comparaison de cette carte avec celle obtenue en appliquant la méthode de post-régionalisation précédemment sélectionnée à chacun des pixels de 1 km² du territoire permet de souligner la plus grande pertinence de la régionalisation simultanée.

Finalement, la comparaison du modèle obtenu avec d'autres approches de prédétermination des crues a permis de montrer sa pertinence. On a pu montrer la justesse et la stabilité des quantiles estimés par SHYREG lorsque la méthode est recalée en site jaugé. Dans le cas d'estimations en sites non jaugés, une étude comparative sur 400 bassins versants non utilisés pour le développement de SHYREG souligne les intérêts de la méthode :

- La simulation de débits associés à différentes périodes de retour et différentes durées caractéristiques au moyen d'une modélisation (calage et régionalisation) unique qui garantit leur cohérence.
- Une plus grande stabilité des débits simulés vis-à-vis des données et une meilleure justesse des estimations.
- Des résultats peu impactés par les erreurs de régionalisation, notamment pour les quantiles de forte période de retour. Ce résultat tient à la nature du paramètre S0/A qui contrôle davantage le début de la courbe de fréquences et à l'apport d'une information de pluie pertinente par le générateur stochastique.

Néanmoins, malgré les qualités de la méthode développée, certains travaux doivent toujours être entrepris.

- Tout au long de cette thèse, on a simulé des quantiles de crues saisonnières qui correspondent aux saisons de fonctionnement du générateur de pluie. Un travail de synthèse doit être entrepris pour estimer des quantiles annuels qui sont ceux utilisés en pratique.
- Certains biais systématiques de la méthode SHYREG ont été identifiés. Leur correction peut notamment passer par une révision de la fonction de transfert statistique qui

permet d'agréger l'information depuis l'échelle de modélisation vers les bassins versants. Actuellement, cette fonction pratique des abattements qui ne dépendent que de la surface des bassins versants et de la durée caractéristique considérée. Une variabilité des coefficients de la fonction par région ou par saison devrait être envisagée.

- La méthode de régionalisation simultanée proposée n'est pas parfaite. Il s'agit d'une première solution, assez simple pour réaliser le calage et la régionalisation en une seule étape. Notamment, les estimations en sites jaugés demeurent de moindres qualités que celles issues d'un calage seul. D'autres types de régionalisation simultanée pourraient être implémentés et testées. Les pistes de développement sont multiples : modifications des grandes régions, autres méthodes de correction spatiale, autres hypothèses sur la relation entre S0/A et les descripteurs physiographiques…
- Le développement d'une cartographie de S0/A à l'échelle de pixels kilométriques permet également d'envisager une application de SHYREG pour l'estimation de l'aléa à échelle d'espace très fine. Néanmoins, ce genre d'approche pose des problèmes de disponibilité des données de validation.

Les travaux de développement de la méthode présentés ici vont servir à la mise en place d'une seconde version de la base de données SHYREG-débit. Cette base est disponible en ligne pour les gestionnaires du risque inondation.

Bibliographie

AHN, K. H. et PALMER, R. 2016. Regional flood frequency analysis using spatial proximity and basin characteristics: Quantile regression vs. parameter regression technique. *Journal of Hydrology,* 540**,** 515-526.

AKAIKE, H. 1974. A New Look at the Statistical Model Identification. *IEEE Transactions on Automatic Control,* 19**,** 716-723.

ALDRICH, J. 1997. RA Fisher and the making of maximum likelihood 1912-1922. *Statistical Science,* 12**,** 162-176.

ARNAUD, P. 1997. *Modèle de prédétermination de crues basé sur la simulation. Extension de sa zone de validité, paramétrisation du modèle horaire par l'information journalière et couplage des deux pas de temps.* PhD, Université Montpellier II.

ARNAUD, P. 2005. Simplification de GR3H pour la prédétermination des crues. Applications sur des petits bassins versants. Aix en Provence: Cemagref, Note interne.

ARNAUD, P. 2015. *L'aléa hydrométéorologique : estimation régionale par simulation stochastique des processus.* HDR, Aix Marseille Université.

ARNAUD, P., CANTET, P. et AUBERT, Y. 2016a. Relevance of an at-site flood frequency analysis method for extreme events based on stochastic simulation of hourly rainfall. *Hydrological Sciences Journal,* 61.

ARNAUD, P., CANTET, P. et ODRY, J. 2016b. SHYREG, a national database of flood frequency estimation. *E3S Web Conf.,* 7**,** 01004.

ARNAUD, P., EGLIN, Y., JANET, B. et PAYRASTRE, O. 2012. Notice utilisateur. Bases de données SHYREG-débit. Méthodes - Performances - Limites. Aix en Provence: Irstea, Ministère de l'Écologie du Développement durable des Transports et du Logement,.

ARNAUD, P., FINE, J. A. et LAVABRE, J. 2007. An hourly rainfall generation model applicable to all types of climate. *Atmospheric Research,* 85**,** 230-242.

ARNAUD, P. et LAVABRE, J. 1999. Using a stochastic model for generating hourly hyetographs to study extreme rainfalls. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques,* 44**,** 433-446.

ARNAUD, P. et LAVABRE, J. 2000. La modélisation stochastique des pluies horaires et leur transformation en débits pour la prédétermination des crues. *Revue des sciences de l'eau,* 13**,** 441-462.

ARNAUD, P. et LAVABRE, J. 2002. Coupled rainfall model and discharge model for flood frequency estimation. *Water Resources Research,* 38**,** 111-1111.

ARNAUD, P. et LAVABRE, J. 2010. Estimation de l'aléa pluvial en France métropolitaine. QUAE, Paris. Update Sciences & Technologies.

ARNAUD, P., LAVABRE, J., FINE, J.-A. et BRISSON, A. 2006. Estimation des débits de référence de crues à la Martinique. Phase 1 : La pluviométrie. 1.2. Modèle SHYPRE. Régionalisation et pixellisation des courbes intensité-durée-fréquence des pluies.

ARNAUD, P., LAVABRE, J., SOL, B. et DESOUCHES, C. Cartographie de l'alea pluviographique de la France. SIRNAT, 2005 Montpellier 2005. Actes du Colloque, 16 p.

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.* PhD, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI).

AUBERT, Y. 2014. Création d'une base de données SHYREG-débit sur la Corse. Rapport d'étude convention DGPR/BRM - IRSTEA 2013.

AUBERT, Y., ARNAUD, P., RIBSTEIN, P. et FINE, J. A. 2014. The SHYREG flow method-application to 1605 basins in metropolitan France. *Hydrological Sciences Journal,* 59**,** 993-1005.

AUBRY, P. 2000. *Le traitement des variables régionalisées en écologie : apports de la géomatique et de la géostatistique.* PhD, Université Claude Bernard - Lyon 1.

AUSTEN, J. 1811. *Sense and Sensibility, volume 1,* London: T. Egerton.

AUTORITÉ DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE 1984. Règle fondamentale de sûreté relative à la prise en compte du risque d'inondation (n°I.2.e). Paris: ASN.

BALL, J. et WEINMANN, E. 2016. Flood Hydrograph estimation. *In:* BALL, J., BABISTER, M., NATHAN, R. J., WEEKS, W., WEINMANN, E., RETALLICK, M. & TESTONI, I. (eds.) *Australian Rainfall and Runoff: A Guide to Flood Estimation, Commonwealth of Australia.*

BALL, J., WEINMANN, E. et KUCZERA, G. 2016. Peak Flow Estimation. *In:* BALL, J., BABISTER, M., NATHAN, R. J., WEEKS, W., WEINMANN, E., RETALLICK, M. & TESTONI, I. (eds.) *Australian Rainfall and Runoff: A Guide to Flood Estimation, Commonwealth of Australia.*

BASTOLA, S., ISHIDAIRA, H. et TAKEUCHI, K. 2008. Regionalisation of hydrological model parameters under parameter uncertainty: A case study involving TOPMODEL and basins across the globe. *Journal of Hydrology,* 357**,** 188-206.

BASU, B. et SRINIVAS, V. V. 2016. Evaluation of the index-flood approach related regional frequency analysis procedures. *Journal of Hydrologic Engineering,* 21.

BATES, B. C. et CAMPBELL, E. P. 2001. A Markov chain Monte Carlo scheme for parameter estimation and inference in conceptual rainfall-runoff modeling. *Water Resources Research,* 37**,** 937-947.

BAYLISS, A. 1999. *Procedures for flood freequency estimation, Volume 5: Catchment descriptors,* Wallingford: Institute of Hydrology.

BECK, H. E., VAN DIJK, A. I. J. M., DE ROO, A., MIRALLES, D. G., MCVICAR, T. R., SCHELLEKENS, J. et BRUIJNZEEL, L. A. 2016. Global-scale regionalization of hydrologic model parameters. *Water Resources Research,* 52**,** 3599-3622.

BECK, U. 2001. *La société du risque: Sur la voie d'une autre modernité,* Paris: Aubier.

BEIRLANT, J., GOEGEBEUR, Y., SEGERS, J. et TEUGELS, J. 2006. *Statistics of extremes: theory and applications*: John Wiley & Sons.

BENICHOU, P. et LE BRETON, O. 1987. AURELHY: une méthode d'analyse utilisant le relief pour les besoins de l'hydrométéorologie. *Deuxièmes journées hydrologiques de l'ORSTOM.* Montpellier: ORSTOM.

BENITO, G., LANG, M., BARRIENDOS, M., LLASAT, M. C., FRANCÉS, F., OUARDA, T., THORNDYCRAFT, V., ENZEL, Y., BARDOSSY, A. et COEUR, D. 2004. Use of systematic, palaeoflood and historical data for the improvement of flood risk estimation. Review of scientific methods. *Natural Hazards,* 31**,** 623-643.

BERNARD, M. 1938. Modified rational method of estimating flood flows. *Low dams, app. A, Nat. Resources Comm*.

BEVEN, K. et BINLEY, A. 1992. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes,* 6**,** 279-298.

BEVEN, K. et FREER, J. 2001. Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology. *Journal of Hydrology,* 249**,** 11-29.

BEVEN, K. J. 2001. *Rainfall-runoff modeling: The Primer,* Chichester: John Wiley & Sons Ltd.

BEVEN, K. J. 2011. *Rainfall-Runoff Modelling: The primer*: Wiley-Blackwell.

BIVAND, R., HAUKE, J. et KOSSOWSKI, T. 2013. Computing the Jacobian in Gaussian spatial autoregressive models: an illustrated comparison of available methods. *Geographical Analysis,* 45**,** 150-179.

BIVAND, R. et PIRAS, G. Comparing implementations of estimation methods for spatial econometrics. 2015. American Statistical Association.

BLAIKIE, P., CANNON, T., DAVIS, I. et WISNER, B. 2014. *At risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters,* London: Routledge.

BLAZKOVA, S. et BEVEN, K. 2002. Flood frequency estimation by continuous simulation for a catchment treated as ungauged (with uncertainty). *Water Resources Research,* 38**,** 141-1414.

BLAZKOVA, S. et BEVEN, K. 2004. Flood frequency estimation by continuous simulation of subcatchment rainfalls and discharges with the aim of improving dam safety assessment in a large basin in the Czech Republic. *Journal of Hydrology,* 292**,** 153-172.

BLÖSCHL, G. 2006. On the Fundamentals of Hydrological Sciences. *Encyclopedia of Hydrological Sciences.* John Wiley & Sons, Ltd.

BLÖSCHL, G. et SIVAPALAN, M. 1995. Scale issues in hydrological modelling: a review. *Hydrological Processes,* 9**,** 251-290.

BLÖSCHL, G., SIVAPALAN, M., WAGENER, T., VIGLIONE, A. et SAVENIJE, H. 2013. *Runoff prediction in ungauged basins: Synthesis across processes, places and scales*.

BOBEE, B. 1975. The log Pearson type 3 distribution and its application in hydrology. *Water resources research,* 11**,** 681-689.

BOORMAN, D., HOLLIS, J. M. et LILLY, A. 1995. *Hydrology of soil types: a hydrologically-based classification of the soils of United Kingdom,* Wallingford: Institute of Hydrology.

BOX, G. E. et DRAPER, N. R. 1987. *Empirical model-building and response surfaces*: Wiley New York.

BREIMAN, L., FRIEDMAN, J., STONE, C. J. et OLSHEN, R. A. 1984. *Classification and regression trees*: CRC press.

BRGM 2015. Le référentiel hydrogéologique français BDLISA. Vincennes: ONEMA.

BUDYKO, M. I. 1958. *The heat balance of the earth's surface,* Washington: U.S. Dept. of Commerce, Weather Bureau.

BURN, D. H. 1990a. An appraisal of the "region of influence' approach to flood frequency analysis. *Hydrological Sciences Journal/Journal des Sciences Hydrologiques,* 35**,** 149-165.

BURN, D. H. 1990b. Evaluation of regional flood frequency analysis with a region of influence approach. *Water Resources Research,* 26**,** 2257-2265.

BURN, D. H. et BOORMAN, D. B. 1992. Catchment classification applied to the estimation of hydrological parameters at ungauged catchments. *Report - UK Institute of Hydrology,* 118.

BURN, D. H. et BOORMAN, D. B. 1993. Estimation of hydrological parameters at ungauged catchments. *Journal of Hydrology,* 143**,** 429-454.

BYRD, R. H., LU, P., NOCEDAL, J. et ZHU, C. 1995. A limited memory algorithm for bound constrained optimization. *SIAM Journal on Scientific Computing,* 16**,** 1190-1208.

CALVER, A., STEWART, E. et GOODSELL, G. 2009. Comparative analysis of statistical and catchment modelling approaches to river flood frequency estimation. *Journal of Flood Risk Management,* 2**,** 24-31.

CANTET, P. 2009. *Impacts du changement climatique sur les pluies extrêmes par l'utilisation d'un générateur stochastique de pluies.* PhD, Université Montpellier II.

CANTET, P. 2017. Mapping the mean monthly precipitation of a small island using kriging with external drifts. *Theoretical and Applied Climatology,* 127**,** 31-44.

CANTET, P. et ARNAUD, P. 2012. Gains from modelling dependence of rainfall variables into a stochastic model: application of the copula approach at several sites. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions,* 9**,** 11227-11266.

CANTET, P. et ARNAUD, P. 2014. Extreme rainfall analysis by a stochastic model: impact of the copula choice on the sub-daily rainfall generation. *Stochastic environmental research and risk assessment,* 28**,** 1479-1492.

CARREAU, J., NEPPEL, L., ARNAUD, P. et CANTET, P. 2013. Extreme rainfall analysis at ungauged sites in the South of France: comparison of three approaches. *Journal de la Société Française de Statistique,* 154**,** 119-138.

CARUSO, A., GUILLOT, A. et ARNAUD, P. 2013. Notice sur les indices de confiance de la méthode SHYREG-débit : Définitions et calculs. Aix en Provence: IRSTEA, Convention DGPR/SNRH 2013.

CARVAJAL, C., PEYRAS, L., ARNAUD, P., BOISSIER, D. et ROYET, P. 2008. Assessment of Hydraulic Load Acting on Dams including Filling Variability and Stochastic Simulations. *Accepted in European Journal Of Environmental and Civil Engineering*.

CARVAJAL, C., PEYRAS, L., ARNAUD, P. et ROYET, P. 2009. Probabilistic Modelling of Flood Water Level for Dam Reservoirs. *Journal of Hydrologic Engineering,* 14**,** 223-232.

CASTELLARIN, A., KOHNOVÁ, S., GAÁL, L., FLEIG, A., SALINAS, J. L., TOUMAZIS, A., KJELDSEN, T. R. et MACDONALD, N. 2012. Review of applied-statistical methods for flood-frequency analysis in Europe: WG2 of COST Action ES0901. European Cooperation in Science and Technology.

CAYLA, O. Probabilistic Calculation of Design Floods—SPEED. Engineering Hydrology, 1993. ASCE, 647-652.

CEDEX et DGA 2011. Mapa de caudales máximos : Memoria técnica. Madrid: Ministerio de Fomento, Ministerio de Medio Ambiante y Medio Rural y Marino.

CENTRE FOR ECOLOGY & HYDROLOGY 1999. *Flood Estimation Handbook,* Wallingford: Institute of Hydrology.

CERNESSON, F. 1993. *Modèle simple de prédetermination des crues de fréquences courantes à rares sur petits bassins versants méditéranéens.* PhD, Université Montpellier II.

CERNESSON, F., LAVABRE, J. et MASSON, J. M. 1996. Stochastic model for generating hourly hyetographs. *Atmospheric Research,* 42**,** 149-161.

CÉSAIRE, A. 1945. Poésie et connaissance. *Tropiques,* 12**,** 157-170.

CHEBANA, F. et OUARDA, T. B. M. J. 2009. Index flood-based multivariate regional frequency analysis. *Water Resources Research,* 45.

CIPRIANI, T., TOILLIEZ, T. et SAUQUET, E. 2012. Estimating 10 year return period peak flows and flood durations at ungauged locations in France. *Houille Blanche***,** 5-13.

COASE, R. H. 1982. *Essays on Economics and Economists,* Washington, DC: American Enterprise Institute.

CODE DES ASSURANCES 2007. Article L152-1 (V). modifié par LOI n° 2007-1824 du 25 décembre 2007. Journal Officiel de la République Française.

COLES, S. 2001. *An introduction to statistical modeling of extreme values,* Heidelberg: Springer.

COMITÉ FRANÇAIS DES BARRAGES ET RÉSERVOIRS. 2012. *Crues* [En ligne]. CFBR. Disponible sur: http://www.barrages-cfbr.eu/Crues.html [Consulté le 19/05/2017 2017].

COURS D'APPEL ADMINISTRATIVE DE BORDEAUX 2010. Décision du 13/07/2010 n°09BX02583.

CTGREF, SRAE et S.-H, D. 1980-1982. Synthèse nationale sur les crues des petits bassins versants. Fascicule 3 : la méthode Crupedix. *Information technique n°8-2 (juin 1980)*.

CUNNANE, C. 1988. Methods and merits of regional flood frequency analysis. *Journal of Hydrology,* 100**,** 269-290.

DALRYMPLE, T. 1960. *Flood-frequency analyses, Manual of Hydrology: Part 3,* Washington: United States Government Printing Office.

DARCY, H. P. G. 1856. *Dètermination des lois d'ècoulement de l'eau à travers le sable*.

DAWSON, C. W., ABRAHART, R. J., SHAMSELDIN, A. Y. et WILBY, R. L. 2006. Flood estimation at ungauged sites using artificial neural networks. *Journal of Hydrology,* 319**,** 391-409.

DE SAINT EXUPÉRY, A. 1939. *Terre des hommes,* Paris: Gallimard.

DETENBECK, N. E., BRADY, V. J., TAYLOR, D. L., SNARSKI, V. M. et BATTERMAN, S. L. 2005. Relationship of stream flow regime in the western Lake Superior basin to watershed type characteristics. *Journal of Hydrology,* 309**,** 258-276.

DOOGE, J. C. 1957. The rational method for estimating flood peaks. *Engineering,* 184**,** 311-313.

DOOGE, J. C. I. 1986. Looking for hydrologic laws. *Water Resources Research,* 22**,** 46S-58S.

EAGLESON, P. S. 1972. Dynamics of flood frequency. *Water Resources Research,* 8**,** 878-898.

EINSTEIN, A. 1936. Physics and reality. *Journal of the Franklin Institute,* 221**,** 349-382.

EUROPEAN UNION AGENCY 2016. European Digital Elevation Model (EU-DEM). 1.0 ed.: Copernicus.

EUROPEAN UNION SOES 2012. CORINE Land Cover (CLC) 2012. *In:* EEA (ed.). Service de l'Observation et des statistiques (SOeS) du Commissariat Général au Développement Durable du MEDDE.

EVERITT, B. S. et SKRONDAL, A. 2010. *The Cambridge dictionary of Statistics,* Cambridge: Cambridge University Press.

FERNANDEZ, W., VOGEL, R. M. et SANKARASUBRAMANIAN, A. 2000. Regional calibration of a watershed model. *Hydrological Sciences Journal,* 45**,** 689-707.

FINE, J.-A., LAVABRE, J. et ARNAUD, P. 2006. Prédétermination des débits de crue sur l'île de la Réunion par la méthode SHYPRE. Choix du modèle pluie-débit et examen des résultats. .

FINKE, P., HARTWICH, R., DUDAL, R., IBANEZ, J., JAMAGNE, M., KING, D., MONTANARELLA, L. et YASSOGLOU, N. 1998. Geo-referenced soil database for Europe. Manual of procedures, version 1.0.

FISHER, R. A. et TIPPETT, L. H. C. Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample. Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 1928. Cambridge University Press, 180-190.

FLAUBERT, G. 1910. Dictionnaire des idées reçues. *In:* BOUVARD & PÉCUCHET (eds.) *Oeuvres complètes de Gustave Flaubert.* Paris: L. Connard.

FOLTON, N. et ARNAUD, P. 2009. Portage national du modèle GR LOIEAU sur les bassins jaugés. Analyse des premiers résultats. Aix en provence: Cemagref.

FOLTON, N., ARNAUD, P. et LAVABRE, J. 2007. Cartographie des débits de crues sur la région Bretagne. Détermination des débits de crues de référence par l'application de la méthode SHYPRE régionalisée sur la région Bretagne. . *Etude DPPR 2006.*

FOLTON, N. et LAVABRE, J. 2006. Regionalization of a monthly rainfall-runoff modelling approach in the southern half of France. *IAHS-AISH publication,* 3**,** 64-70.

FOLTON, N. et LAVABRE, J. 2007. Approche par modélisation pluie-débit pour la connaissance régionale de la ressource en eau: application à la moitié du territoire français. *Houille-Blanche,* n° 03-2007**,** 64-70.

FOUCHIER, C. 2010. *Développement d'une méthodologie pour la connaissance régionale des crues.* PhD, Université Montpellier II.

FRÉCHET, M. 1927. Sur la loi de probabilite de l'ecart maximum. *Ann. Soc. Math. Polon.,* 6**,** 93-116.

GARAVAGLIA, F. 2011. *Méthode SCHADEX de prédétermination des crues extrêmes: Méthodologie, applications, études de sensibilité.* PhD, Université de Grenoble.

GARAVAGLIA, F., GAILHARD, J., PAQUET, E., LANG, M., GARẠON, R. et BERNARDARA, P. 2010. Introducing a rainfall compound distribution model based on weather patterns sub-sampling. *Hydrology and Earth System Sciences,* 14**,** 951-964.

GARAVAGLIA, F., LANG, M., PAQUET, E., GAILHARD, J., GARÇON, R. et RENARD, B. 2011. Reliability and robustness of rainfall compound distribution model based on weather pattern sub-sampling. *Hydrology and Earth System Sciences,* 15**,** 519-532.

GARCIA, F. 2016. *Amélioration d'une modélisation hydrologique régionalisée pour estimer les statistiques d'étiage.* PhD, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI).

GARCIA, F., FOLTON, N. et OUDIN, L. 2017. Which objective function to calibrate rainfall–runoff models for low-flow index simulations? *Hydrological Sciences Journal,* 62**,** 1149-1166.

GARRETA, V., MONESTIEZ, P. et VER HOEF, J. M. 2010. Spatial modelling and prediction on river networks: up model, down model or hybrid? *Environmetrics,* 21**,** 439-456.

GAUME, E. 2002. *Un parcours dans l'étude des phénomènes extrêmes en hydrologie.* HDR, AgroParisTech.

GAUME, E., GAÁL, L., VIGLIONE, A., SZOLGAY, J., KOHNOVÁ, S. et BLÖSCHL, G. 2010. Bayesian MCMC approach to regional flood frequency analyses involving extraordinary flood events at ungauged sites. *Journal of Hydrology,* 394**,** 101-117.

GENEST, C. et FAVRE, A.-C. 2007. Everything you always wanted to know about copula modeling but were afraid to ask. *Journal of hydrologic engineering,* 12**,** 347-368.

GILLET, M. 2017. *Mise en place d'une méthode d'analyse de la cohérence d'études hydrologiques.* Master, Université Grenoble Alpes, Irstea.

GOTTSCHALK, L., LEBLOIS, E. et SKØIEN, J. O. 2011. Distance measures for hydrological data having a support. *Journal of Hydrology,* 402**,** 415-421.

GRAFF, B. 2004. *Prédétermination des débits de crue des petits bassins versants torrentiels.* PhD, Université Montpellier II.

GRÄLER, B., PEBESMA, E. et HEUVELINK, G. 2016. Spatio-temporal interpolation using gstat. *R Journal,* 8**,** 204-218.

GUILLOT, P. et DUBAND, D. 1967. La méthode du Gradex pour le calcul de la probabilité des crues à partir des pluies. *I.A.S.H., Publication,* 84.

GUMBEL, E. J. 1935. Les valeurs extrêmes des distributions statistiques. *Ann. Inst. Henri Poincaré,* 5**,** 115-158.

GUMBEL, E. J. 1958. *Statistics of extremes,* New York: Columbia University Press.

GUMBEL, E. J. 1961. Bivariate logistic distributions. *Journal of the American Statistical Association,* 56**,** 335-349.

HADDAD, K., RAHMAN, A. et STEDINGER, J. R. 2012. Regional flood frequency analysis using Bayesian generalized least squares: A comparison between quantile and parameter regression techniques. *Hydrological Processes,* 26**,** 1008-1021.

HAILEGEORGIS, T. T. et ALFREDSEN, K. 2017. Regional flood frequency analysis and prediction in ungauged basins including estimation of major uncertainties for mid-Norway. *Journal of Hydrology: Regional Studies,* 9**,** 104-126.

HERSHFIELD, D. M. 1961. Estimating the probable maximum precipitation. *Journal of the Hydraulics Division,* 87**,** 99-116.

HEUVELMANS, G., MUYS, B. et FEYEN, J. 2006. Regionalisation of the parameters of a hydrological model: Comparison of linear regression models with artificial neural nets. *Journal of Hydrology,* 319**,** 245-265.

HIEMSTRA, P. H., PEBESMA, E. J., TWENHÖFEL, C. J. et HEUVELINK, G. B. 2009. Real-time automatic interpolation of ambient gamma dose rates from the Dutch radioactivity monitoring network. *Computers & Geosciences,* 35**,** 1711-1721.

HLAVČOVÁ, K., KOHNOVÁ, S., SZOLGAY, J. et ZVOLENSKÝ, M. 2004. Estimation of rainfall flood risk on the Torysa River. *Journal of Hydrology and Hydromechanics,* 52**,** 141-155.

HOSKING, J. R. 1990. L-moments: analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)***,** 105-124.

HOSKING, J. R. 1994. The four-parameter kappa distribution. *IBM Journal of Research and Development,* 38**,** 251-258.

HOSKING, J. R. M. et WALLIS, J. R. 1993. Some statistics useful in regional frequency analysis. *Water Resources Research,* 29**,** 271-281.

HOSKING, J. R. M. et WALLIS, J. R. 1997. *Regional frequency analysis: an approach based on L-moments,* Cambridge: Cambridge University Press.

HOSKING, J. R. M., WALLIS, J. R. et WOOD, E. F. 1985a. An appraisal of the regional flood frequency procedure in the UK Flood Studies Report. *Hydrological Sciences Journal,* 30**,** 85-109.

HOSKING, J. R. M., WALLIS, J. R. et WOOD, E. F. 1985b. Estimation of the generalized extreme-value distribution by the method of probability-weighted moments. *Technometrics,* 27**,** 251-261.

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,* 58**,** 1198-1255.

HROMADKA, T. et WHITLEY, R. 1994. The rational method for peak flow rate estimation. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association,* 30**,** 1001-1009.

HUNDECHA, Y. et BÁRDOSSY, 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**,** 281-295.

IGN et ONEMA. 2013. *BD Carthage* [En ligne]. Disponible sur: http://professionnels.ign.fr/bdcarthage.

IRSTEA. 2017. *Catchment hydrology research group* [En ligne]. Disponible sur: https://webgr.irstea.fr/.

JAVELLE, P. 2001. *Caractérisation du régime des crues: le modèle débit-durée-fréquence convergent. Approche locale et régionale.* PhD, Grenoble INP.

JAVELLE, P., OUARDA, T. B., LANG, M., BOBÉE, B., GALÉA, G. et GRÉSILLON, J.-M. 2002. Development of regional flood-duration–frequency curves based on the index-flood method. *Journal of Hydrology,* 258**,** 249-259.

JENKINSON, A. F. 1955. The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,* 81**,** 158-171.

JENNINGS, M. E., THOMAS, W. O. et RIGGS, H. C. 1993. Nationwide Summary of U.S. Geological Survey Regional Regression Equations for Estimating Magnitude and Frequency of Floods for Ungaged Sites. Reston: United States Geological Survey.

KJELDSEN, T. R. 2007a. Flood Estimation Handbook Supplementary Report No. 1: The revitalised FSR/FEH rainfall-runioff method. Wallingford: Centre for Ecology & Hydrology.

KJELDSEN, T. R. 2007b. *The revitalised FSR/FEH rainfall-runoff method - a user handbook,* Wallingford: Centre for Ecology ans Hydrology.

KJELDSEN, T. R., JONES, D. A. et BAYLISS, A. C. 2008. Improving the Floof Estimation Handbook (FEH) statistical procedures for flood frequency estimation. Bristol: Environment Agency.

KOCHANEK, K., RENARD, B., ARNAUD, P., AUBERT, Y., LANG, M., CIPRIANI, T. et SAUQUET, E. 2014. A data-based comparison of flood frequency analysis methods used in France. *Natural Hazards and Earth System Sciences,* 14**,** 295-308.

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**,** 2219-2238.

KUCZERA, G. 1999. Comprehensive at-site flood frequency analysis using Monte Carlo Bayesian inference. *Water Resources Research,* 35**,** 1551-1557.

KUCZERA, G. et MROCZKOWSKI, M. 1998. Assessment of hydrologic parameter uncertainty and the worth of multiresponse data. *Water Resources Research,* 34**,** 1481-1489.

LAAHA, G. et BLÖSCHL, G. 2006. A comparison of low flow regionalisation methods—catchment grouping. *Journal of Hydrology,* 323**,** 193-214.

LANG, M., ARNAUD, P., AUBERT, Y., RENARD, B., SAUQUET, E., KOCHANEK, K., CIPRIANI, T., LATAPIE, A., TERRIER, B., PAQUIER, A., SOUBEYROUX, J. M., BORCHI, F., FANTIN, R., PAQUET, E., GARAVAGLIA, F., BERNADARA, P., NEPPEL, L., CARREAU, J., TRAMBLAY, Y., DEZILEAU, L., DELGADO, J. L., CHAMBON, D., DOUMENC, H. et CARRÉ, J. C. 2013. Domaines d'application des méthodes de prédétermination des pluies et crues extrêmes - Rapport V. *Projet ANR-08-RISK-03-01 - Extraflo.* Lyon: IRSTEA.

LANG, M., ARNAUD, P., CARREAU, J., DEAUX, N., DEZILEAU, L., GARAVAGLIA, F., LATAPIE, A., NEPPEL, L., PAQUET, E. et RENARD, B. 2014. Résultats du projet ExtraFlo (ANR 2009-2013) sur l'estimation des pluies et crues extrêmes. *La Houille Blanche***,** 5-13.

LAROUSSE Région. *Dictionnaire Larousse en ligne.* Larousse.

LATT, Z. Z., WITTENBERG, H. et URBAN, B. 2014. Clustering Hydrological Homogeneous Regions and Neural Network Based Index Flood Estimation for Ungauged Catchments: an Example of the Chindwin River in Myanmar. *Water Resources Management*.

LE GALLO, J. 2002. Économétrie spatiale : l'autocorrélation spatiale dans les modèles de régression linéaire. *Economie et prévision,* 155**,** 139-157.

LEBECHEREL, L. 2015. *Sensibilité des calculs hydrologiques à la densité des réseaux de mesure hydrométrique et pluviométrique.* PhD, AgroParisTech.

LOUKAS, A. 2002. Flood frequency estimation by a derived distribution procedure. *Journal of Hydrology,* 255**,** 69-89.

MANLEY, R. 1978. Simulation of flows in ungauged basins/Simulation d'écoulement sur les bassins versants non jaugés. *Hydrological Sciences Journal,* 23**,** 85-101.

MARGAT, J. 1978. *Carte hydrogéologique de la France: Systèmes Aquifères*, 1/1 500 000. Orléans: BRGM.

MARGOUM, M., OBERLIN, G., LANG, M. et WEINGARTNER, R. 1994. Estimation des crues rares et extrêmes: principes du modèle AGREGEE. *Hydrologie Continentale,* 9**,** 85-100.

MARTINS, E. S. et STEDINGER, J. R. 2000. Generalized maximum-likelihood generalized extreme-value quantile estimators for hydrologic data. *Water Resources Research,* 36**,** 737-744.

MASSEY JR, F. J. 1951. The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit. *Journal of the American statistical Association,* 46**,** 68-78.

MATHEVET, T. 2005. *Quels modeles pluie-debit globaux au pas de temps horaire? Développements empiriques et intercomparaison de modeles sur un large échantillon de bassins versants.* PhD, ENGREF.

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***,** 211-219.

MCINTYRE, N., LEE, H., WHEATER, H., YOUNG, A. et WAGENER, T. 2005. Ensemble predictions of runoff in ungauged catchments. *Water Resources Research,* 41**,** 1-14.

MERTZ, L. 2017. *Mise en place de lois statistiques régionales pour l'stimation des débits de crues des cours d'eau.* Rapport de stage, Irstea.

MERZ, R. et BLÖSCHL, G. 2004. Regionalisation of catchment model parameters. *Journal of Hydrology,* 287**,** 95-123.

MERZ, R. et BLÖSCHL, G. 2005. Flood frequency regionalisation - Spatial proximity vs. catchment attributes. *Journal of Hydrology,* 302**,** 283-306.

MICEVSKI, T., HACKELBUSCH, A., HADDAD, K., KUCZERA, G. et RAHMAN, A. 2015. Regionalisation of the parameters of the log-Pearson 3 distribution: A case study for New South Wales, Australia. *Hydrological Processes,* 29**,** 250-260.

MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ENERGIE 2017. Banque HYDRO. http://www.hydro.eaufrance.fr/: Ministère de l'Ecologie du Dévelopement Durable et de l'Energie, SCHAPI.

MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT DES TRANSPORTS ET DU TOURISME, MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT et MINISTÈRE DE L'INTÉRIEUR ET DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE 1994. Circulaire du 24 janvier 1994 relative à la prévention des inondations et à la gestion des zones inondables. JORF n°84 du 10 avril 1994 page 5330, NOR EQUU9400411C.

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE. 2016. *Prévention des inondations* [En ligne]. Ministère de la Transition écologique et solidaire,. Disponible sur: http://www.developpement-durable.gouv.fr/prevention-des-inondations [Consulté le 18/05/2017 2017].

MINISTÈRE DES FINANCES ET DES COMPTES PUBLICS, MINISTÈRE DE L'INTÉRIEUR et MINISTÈRE DES OUTRE-MER 2014. Circulaire du 23 juin 2014 relative à la réforme du dispositif instauré par la loi n° 82-600 du 13 juillet 1982 relative à l'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles, codifiée dans les articles L. 125-1 du Code des assurances.: NOR INTK1405282C.

MOULARD, C. 2010. *Apport de l'information hydrogéologique pour la régionalisation de deux modèles hydrologiques de surface.* Master, Université d'Avignon, Cemagref.

NASH, J. 1960. A unit hydrograph study with particular reference. *Estimation of mean and variance of sediment yield,* 139.

NASH, J. E. et SUTCLIFFE, J. V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology,* 10**,** 282-290.

NATHAN, R. J. et MCMAHON, T. A. 1990. Identification of homogeneous regions for the purposes of regionalisation. *Journal of Hydrology,* 121**,** 217-238.

NELSEN, R. B. 1999. Introduction. *An Introduction to Copulas.* Springer.

NEPPEL, L., ARNAUD, P., BORCHI, F., CARREAU, J., GARAVAGLIA, F., LANG, M., PAQUET, E., RENARD, B., SOUBEYROUX, J.-M. et VEYSSEIRE, J.-M. 2014. Résultats du projet Extraflo sur la comparaison des méthodes d'estimation des pluies extrêmes en France. *La houille blanche***,** 14-19.

NEPPEL, L., BOUVIER, C. et LAVABRE, J. 2003. Areal reduction factor probabilities for rainfall in Languedoc-Roussillon. *IAHS-AISH Publication***,** 276-283.

NERC 1975. Flood Studies Report. Londond: National Environment Research Council.

NEYMAN, J. 1937. Outline of a theory of statistical estimation based on the classical theory of probability. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences,* 236**,** 333-380.

NGUYEN, C. C. 2012. *Improvement of Bayesian MCMC approaches for regional flood frequency analyses.* PhD, Université de Nantes.

OLDEN, J. D. et POFF, N. L. 2003. Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes. *River Research and Applications,* 19**,** 101-121.

ORGANDE, D., ARNAUD, P., FINE, J. A., FOUCHIER, C., FOLTON, N. et LAVABRE, J. 2013. Régionalisation d'une méthode de prédétermination de crue sur l'ensemble du territoire français : la méthode SHYREG. *Revue des sciences de l'eau,* 26**,** 65-78.

OUARDA, T. B. M. J., GIRARD, C., CAVADIAS, G. S. et BOBÉE, B. 2001. Regional flood frequency estimation with canonical correlation analysis. *Journal of Hydrology,* 254**,** 157-173.

OUDIN, L., ANDRÉASSIAN, V., PERRIN, C., MICHEL, C. et LE MOINE, N. 2008. Spatial proximity, physical similarity, regression and ungaged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments. *Water Resources Research,* 44.

OUDIN, L., KAY, A., ANDRÉASSIAN, V. et PERRIN, C. 2010. Are seemingly physically similar catchments truly hydrologically similar? *Water Resources Research,* 46.

PAQUET, E., GARAVAGLIA, F., GARÇON, R. et GAILHARD, J. 2013. The SCHADEX method: A semi-continuous rainfall-runoff simulation for extreme flood estimation. *Journal of Hydrology,* 495**,** 23-37.

PARAJKA, J., BLÖSCHL, G. et MERZ, R. 2007. Regional calibration of catchment models: Potential for ungauged catchments. *Water Resources Research,* 43.

PARAJKA, J., MERZ, R. et BLÖSCHL, G. 2005. A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters. *Hydrology and Earth System Sciences,* 9**,** 157-171.

PARDÉ, M. 1933. *Fleuves et rivières*: Armand Colin.

PARLEMENT EUROPÉEN 2007. Directive 2007/60/CE du Parlement européen et du Conseil, du 23 octobre 2007, relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation. Bruxelles: Union Européenne.

PEBESMA, E. J. 2004. Multivariable geostatistics in S: the gstat package. *Computers & Geosciences,* 30**,** 683-691.

PENOT, D. 2014. *Cartography of the extreme rain falls and use of the SCHADEX method for ungauged sites.* PhD, Université de Grenoble.

PERRIN, C., MICHEL, C. et ANDRÉASSIAN, V. 2001. Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *Journal of Hydrology,* 242**,** 275-301.

PERRIN, C., MICHEL, C. et ANDRÉASSIAN, V. 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of hydrology,* 279**,** 275-289.

PERRIN, F., SAUZAY, P., MENORET, B. et ROCHE, P. 2017. Inondations de mai et juin 2016 dans les bassins moyens de la Seine et de la Loire. Retour d'expérience.: CGEDD, IGA.

PICKANDS, J. I. 1975. Statistical Inference Using Extreme Order Statistics. 119-131.

POKHREL, P., GUPTA, H. V. et WAGENER, T. 2008. A spatial regularization approach to parameter estimation for a distributed watershed model. *Water Resources Research,* 44.

PONCELET, C. 2016. *Du bassin au paramètre: jusqu'où peut-on régionaliser un modèle hydrologique conceptuel?* PhD, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI).

PRÉFET DES ALPES MARITIMES 2016. Inondations des 3 et 4 octobre 2015 dans les Alpes Maritimes. Retour d'expérience. Rapport final.: Préfet des Alpes Maritimes.

PRESCOTT, P. et WALDEN, A. T. 1980. Maximum likelihood estimation of the parameters of the generalized extreme-value distribution. *Biometrika,* 67**,** 723-724.

R CORE TEAM 2016. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna.

RAHMAN, A., HADDAD, K., ZAMAN, M., KUCZERA, G., WEINMANN, E. et WEEKS, W. Regional flood estimation in Australia: An overview of the study for the upgrade of 'Australian rainfall and

runoff'. Proceedings of the 34th Hydrology and Water Resources Symposium, HWRS 2012, 2012. 1441-1448.

RENARD, B. 2011. A Bayesian hierarchical approach to regional frequency analysis. *Water Resources Research,* 47.

RENARD, B., KOCHANEK, K., LANG, M., GARAVAGLIA, F., PAQUET, E., NEPPEL, L., NAJIB, K., CARREAU, J., ARNAUD, P., AUBERT, Y., BORCHI, F., SOUBEYROUX, J. M., JOURDAIN, S., VEYSSEIRE, J. M., SAUQUET, E., CIPRIANI, T. et AUFFRAY, A. 2013. Data-based comparison of frequency analysis methods: A general framework. *Water Resources Research,* 49**,** 825-843.

RENARD, B., LANG, M., SOUBEYROUX, J. M., NEPPEL, L., GARAVAGLIA, F. et ARNAUD, P. 2010. Méthodologie de comparaison d'approches probabilistes d'estimation des valeurs extrêmes - Rapport II. *Projet ANR-08-RISK-03-01 - Extraflo.* Lyon: IRSTEA.

REQUENA, A. I., CHEBANA, F. et MEDIERO, L. 2016. A complete procedure for multivariate index-flood model application. *Journal of Hydrology,* 535**,** 559-580.

RIBATET, M., SAUQUET, E., GRÉSILLON, J. M. et OUARDA, T. B. M. J. 2007. A regional Bayesian POT model for flood frequency analysis. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment,* 21**,** 327-339.

RIES III, K. G. et CROUSE, M. Y. 2002. The National Flood Frequency Program, Version 3: A Computer Program for Estimating Magnitude and Frequency of Floods for Ungaged Sites. Reston: United States Geological Survey.

ROBSON, A. J. et REED, D. W. 1999. *Floord Estimation Handbook Vol. 3: Statistical Procedures for flood frequency estimation,* Wallingford: Institute of Hydrology.

SALIHA, A. H., AWULACHEW, S. B., CULLMANN, J. et HORLACHER, H. B. 2011. Estimation of flow in ungauged catchments by coupling a hydrological model and neural networks: Case study. *Hydrology Research,* 42**,** 386-400.

SALVADORI, G., DE MICHELE, C., KOTTEGODA, N. T. et ROSSO, R. 2007. *Extremes in nature: an approach using copulas*: Springer Science & Business Media.

SAMANIEGO, L., KUMAR, R. et ATTINGER, S. 2010. Multiscale parameter regionalization of a grid-based hydrologic model at the mesoscale. *Water Resources Research,* 46.

SAUQUET, E. 2006a. Cartographie des écoulements mensuels moyens en France. *In:* DURABLE, M. D. L. E. E. D. D. (ed.). Lyon: CEMAGREF.

SAUQUET, E. 2006b. Mapping mean annual river discharges: Geostatistical developments for incorporating river network dependencies. *Journal of Hydrology,* 331**,** 300-314.

SCS, U. 1986. Urban hydrology for small watersheds. *US Soil Conservation Service. Technical Release,* 55**,** 13.

SEFTON, C. E. M. et HOWARTH, S. M. 1998. Relationships between dynamic response characteristics and physical descriptors of catchments in England and Wales. *Journal of Hydrology,* 211**,** 1-16.

SEIBERT, J. 1999. Regionalisation of parameters for a conceptual rainfall-runoff model. *Agricultural and Forest Meteorology,* 98-99**,** 279-293.

SERVICE DE L'OBSERVATION ET DES STATISTIQUES. 2014. *Les évènements naturels dommageables* [En ligne]. Ministère de l'Environnement de l'Energie et de la Mer. Disponible sur: http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lessentiel/ar/368/1239/evenements-naturels-dommageables.html [Consulté le 18/05/2017 2017].

SIGHOMNOU, D. et DESBORDES, M. 1988. Recherche d'un modèle de pluie de projet adapté aux précipitations de la zone tropicale africaine: cas d'Adiopodoumé-Abidjan (Côte d'Ivoire). *Hydrologie continentale,* 3**,** 131-139.

SINGH, R., ARCHFIELD, S. A. et WAGENER, T. 2014. Identifying dominant controls on hydrologic parameter transfer from gauged to ungauged catchments - A comparative hydrology approach. *Journal of Hydrology,* 517**,** 985-996.

SINGH, V. P. 1988. *Hydrologic systems. Volume I: Rainfall-runoff modeling,* Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall.

SIVAPALAN, M., TAKEUCHI, K., FRANKS, S. W., GUPTA, V. K., KARAMBIRI, H., LAKSHMI, V., LIANG, X., MCDONNELL, J. J., MENDIONDO, 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,* 48**,** 857-880.

SKØIEN, J. O., MERZ, R. et BLÖSCHL, G. 2006. Top-kriging - Geostatistics on stream networks. *Hydrology and Earth System Sciences,* 10**,** 277-287.

SMIRNOV, N. 1948. Table for estimating the goodness of fit of empirical distributions. *The annals of mathematical statistics,* 19**,** 279-281.

SOL, B. et DESOUCHES, C. 2005. Spatialisation à résolution kilométrique sur la France de paramètres liés aux précipitations. . *Rapport d'étude Météo-France.,* Convention Météo-France DPPR n°03/1735.**,** 41 pages.

SRIWONGSITANON, N., GAO, H., SAVENIJE, H., MAEKAN, E., SAENGSAWAN, S. et THIANPOPIRUG, S. 2015. The Normalized Difference Infrared Index (NDII) as a proxy for soil moisture storage in hydrological modelling. *Hydrology & Earth System Sciences Discussions,* 12.

STEDINGER, J. R. 1983. Estimating a regional flood frequency distribution. *Water Resources Research,* 19**,** 503-510.

STEDINGER, J. R. et LU, L. H. 1995. Appraisal of regional and index flood quantile estimators. *Stochastic Hydrology and Hydraulics,* 9**,** 49-75.

STEDINGER, J. R. et TASKER, G. D. 1985. Regional Hydrologic Analysis: 1. Ordinary, Weighted, and Generalized Least Squares Compared. *Water Resources Research,* 21**,** 1421-1432.

STEWART, E. J., JONES, D. A., SVENSSON, C., MORRIS, D. G., DEMPSEY, P., DENT, J. E., COLLIER, C. G. et ANDERSON, C. W. 2013. Reservoir Safety – Long Return Period Rainfall. London: Department for Environment Food and Rural Affairs.

SZOLGAY, J., HLAVČOVÁ, K., KOHNOVÁ, S. et DANIHLÍK, R. 2003. Regional estimation of parameters of a monthly water balance model. *Journal of Hydrology and Hydromechanics,* 51**,** 256-273.

TASKER, G. D., HODGE, S. A. et BARKS, C. S. 1996. Region of influence regression for estimating the 50-year flood at ungaged sites. *Journal of the American Water Resources Association,* 32**,** 163-170.

THERNEAU, T., ATKINSON, B. et RIPLEY, B. 2015. rpart: Recursive Partitioning and Regression Trees. R package version 4.1–10.

THOMAS-AGNAN, C., LAURENT, T. et GOULARD, M. 2013. About predictions in spatial autoregressive models: Optimal and almost optimal strategies. *TSE Working Paper,* 13.

THOMAS, D. M. et BENSON, M. A. 1970. Generalization of streamflow characteristics from drainage-basin characteristics. *Water Supply Paper.* - ed.

TOBLER, W. R. 1970. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic geography***,** 234-240.

TUNG, Y. K., YEH, K. C. et YANG, J. C. 1997. Regionalization of unit hydrograph parameters: 1. Comparison of regression analysis techniques. *Stochastic Hydrology and Hydraulics,* 11**,** 145-171.

USGS 1982. Guidelines for determining flood flow frequency: Bulletin 17B of the hydrology Subcomittee. Reston: United States Geological Survey.

VANDEWIELE, G. L. et ELIAS, A. 1995. Monthly water balance of ungauged catchments obtained by geographical regionalization. *Journal of Hydrology,* 170**,** 277-291.

VIDAL, J. P., MARTIN, E., FRANCHISTÉGUY, L., BAILLON, M. et SOUBEYROUX, J. M. 2010. A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology,* 30**,** 1627-1644.

WAGENER, T. et WHEATER, H. S. 2006. Parameter estimation and regionalization for continuous rainfall-runoff models including uncertainty. *Journal of Hydrology,* 320**,** 132-154.

WALLNER, M., HABERLANDT, U. et DIETRICH, J. 2013. A one-step similarity approach for the regionalization of hydrological model parameters based on self-organizing maps. *Journal of Hydrology,* 494**,** 59-71.

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. Ministère de l'Écologie et du Développement durable, Cemagref BEA/LHQ.

WEIBULL, W. 1951. Wide applicability. *Journal of applied mechanics,* 103**,** 293-297.

WIKISTAT. 2016. *Arbres binaires de décision* [En ligne]. Toulouse: INSA Toulouse. Disponible sur: http://wikistat.fr/pdf/st-m-app-cart.pdf [Consulté le 06-09-2017 2017].

WILLEMS, P., BLAZKOVA, S., BEVEN, K. J., ARNAUD, P., PAQUET, E., LOUKAS, A., VASILIADES, L., EFSTRATIADIS, A., LAWRENCE, D., SZOLGAY, J. et KJELDSEN, T. R. 2012. Rewiew of European simulation methods for flood-frequency-estimation. WG3: Flood frequency analysis using rainfall-runoff methods. *Report of Cost Action ES0901.***,** 66 pages.

WMO et UNESCO 2012. Glossaire international d'hydrologie. Genève: Organisation météorologique mondiale.

YADAV, M., WAGENER, T. et GUPTA, H. 2007. Regionalization of constraints on expected watershed response behavior for improved predictions in ungauged basins. *Advances in Water Resources,* 30**,** 1756-1774.

YANG, X. 1993. *Mise au point d'une méthode d'utilisation d'un modèle pluie-débit conceptuel pour la prévision des crues en temps réel.* PhD, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, CERGRENE.

YU, P. S. et YANG, T. C. 2000. Using synthetic flow duration curves for rainfall-runoff model calibration at ungauged sites. *Hydrological Processes,* 14**,** 117-133.

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**,** 176-189.

Résumé

L'estimation de l'aléa hydrologique en sites non jaugés présente un enjeu important pour la gestion des risques. La complexité du phénomène réside à la fois dans la nécessité d'avoir une approche multivariée (estimation de caractéristiques multiples des crues : durées, périodes de retour) qui propose une extrapolation raisonnable des événements. SHYREG est une méthode basée sur la simulation de scénarios de crues, qui présente ces avantages. Évaluée lors du projet ANR ExtraFlo, elle présente de bonnes performances en justesse et en stabilité lorsqu'elle est calée sur des données locales de débits. Cette méthode vise à estimer des débits de crue en tout point du territoire. Elle doit donc pouvoir être appliquée en site non jaugés.

Le travail de thèse présenté ici se focalise sur le transfert de la méthode vers le non jaugé en s'intéressant aux valeurs des débits simulés mais aussi à leur cohérence. Tout d'abord, une révision du calage a permis de s'assurer de la cohérence des débits simulés le long d'un cours d'eau. Ensuite, l'application d'un large panel de méthodes de régionalisation a permis de déterminer que la régionalisation devait s'appuyer à la fois sur la structure spatiale et sur les caractéristiques physiographiques des bassins. Finalement, une méthode qui régionalise SHYREG simultanément à son calage a été retenue. Une comparaison avec d'autres approches régionalisées a mis en évidence la qualité du modèle développé.

Mots-clés : Hydrologie, Analyse fréquentielle des crues, Non jaugé, Régionalisation, SHYREG

Abstract

Flood hazard estimation in ungauged sites presents a major challenge for risk management. The complexity of the phenomenon arises from both the need for a multivariate approach (estimation of different flood characteristics: peak flow, volume, duration ...), and for an approach which offers a reasonable extrapolation of extreme events. The SHYREG method is based on the simulation of flood scenarios and presents these benefits. It has been evaluated during the ANR ExtraFlo project. It showed good performance in both accuracy and stability when calibrated against local discharge data. However, weaknesses have been identified when implemented in ungauged sites.

The objective of the present thesis is to develop the method in order to improve the SHYREG performances in ungauged sites. Two kinds of modifications were implemented. First, the calibration of the method in gauged sites was reviewed. The main idea was to integrate more data and to take more into account the coherence between simulated discharges in different sites. Then, diverse regionalisation schemes extracted from the scientific literature were considered. Their application demonstrated the necessity to exploit information from nearby sites and the physical properties of the catchments. Finally, a version which realises the regionalisation simultaneously to the calibration has been selected. Its comparison with other method showed the quality of this new version of SHYREG.

Keywords: Hydrology, Flood Frequency Analysis, Ungauged, Regionalisation, SHYREG