



HAL
open science

Naturalisation des débits

Morgane Terrier

► **To cite this version:**

Morgane Terrier. Naturalisation des débits. Hydrologie. AgroParisTech, 2020. Français. NNT : 2020AGPT0006 . tel-03185026

HAL Id: tel-03185026

<https://pastel.hal.science/tel-03185026>

Submitted on 30 Mar 2021

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

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

NNT : 2020AGPT0006

Doctorat AgroParisTech

THÈSE

pour obtenir le grade de docteur délivré par

**L'Institut des Sciences et Industries
du Vivant et de l'Environnement**

(AgroParisTech)

Spécialité : Hydrologie

présentée et soutenue publiquement par

Morgane Terrier

le 17/12/2020

Naturalisation des débits

Directeur de thèse : **Vazken ANDRÉASSIAN**

Co-encadrement de la thèse : **Alban DE LAVENNE**

Co-encadrement de la thèse : **Charles PERRIN**

Jury

M. Pierre RIBSTEIN, Professeur émérite, Sorbonne Université, Paris

M. Nicolas MASSEI, Professeur, Université de Rouen Normandie, Mont Saint Aignan

M. Roger MOUSSA, Directeur de recherche, INRAE, Montpellier

Mme Claire LANG-DELUS, Maître de conférences, Université de Lorraine, Metz

M. Vazken ANDRÉASSIAN, ICPEF (HDR), INRAE, UR HYCAR, Antony

M. Alban DE LAVENNE, CR, INRAE, UR HYCAR, Antony

M. Charles PERRIN, IAE, INRAE, UR HYCAR, Antony

Mme Claire MAGAND, Chargée de mission, OFB, Vincennes

Président

Rapporteur & Examinateur

Rapporteur & Examinateur

Examinatrice

Directeur de thèse

Co-encadrant & Examinateur

Co-encadrant & Examinateur

Invitée

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la mise en place et l'avancement de cette thèse.

Je souhaite tout d'abord chaleureusement remercier l'ensemble de mes encadrants : Vazken Andréassian, Charles Perrin et Alban de Lavenne. Je les remercie pour avoir suivi ces travaux de thèse et pour l'ensemble de leurs conseils. Je les remercie pour toutes les connaissances hydrologiques que j'ai pu acquérir, ainsi que pour tout leur travail d'animation de l'équipe hydrologie d'INRAE Antony : l'organisation d'interventions d'invités extérieurs, l'animation des réunions toujours enrichissante et la formation boule de neige.

Je remercie l'Office français de la biodiversité (OFB) qui, grâce à son soutien financier, a permis la réalisation de cette thèse. Je remercie Claire Magand pour avoir suivi mon travail tout au long de la thèse.

Je remercie Jai Vaze et l'équipe *Land and Water* du CSIRO pour m'avoir accueillie à Canberra. Je remercie également Julien Lerat et les membres du *Bureau of Meteorology* pour avoir mis à disposition des données pour cette étude ainsi que pour leurs conseils. Je remercie Météo-France pour la mise à disposition des données climatiques et le SCHAPI pour les données hydrologiques. Je remercie l'ensemble des gestionnaires d'ouvrages pour la mise à disposition des données sur les barrages.

Je remercie également Mathilde Chauveau (BRLi), Sébastien Chazot (BRLi), Arnaud Belleville (EDF-DTG), François Bourgin (INRAE, Antony), Timothée Leurant (OFB), Ludovic Oudin (Sorbonne Universités), Eric Sauquet (INRAE, Lyon) et Jean-Philippe Vidal (INRAE, Lyon) pour les conseils donnés lors des comités de suivi.

J'adresse mes remerciements aux membres du jury, qui ont accepté d'évaluer ces travaux sur la naturalisation des débits : Nicolas Massei et Roger Moussa, qui ont accepté d'être rapporteurs, et Claire Lang-Delus et Pierre Ribstein, qui ont accepté d'être examinateurs.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui par leur présence et travail au quotidien font d'INRAE Antony un endroit accueillant : Helena, Louise, Carine, Andrea, Philippe, Léonard, Sylvia, Pierre, Lila, Benoît, Valentin, François, Paul (PRG), Anthony, Antoine,

Paul et Thibault. Merci à Nathalie Camus pour tout son travail. Je remercie Olivier Delaigue pour toutes ses formations très pédagogiques et également pour toute l'aide qu'il apporte avec réactivité à l'ensemble de l'équipe. Je remercie Guillaume qui, malgré nos débats sur les chats, m'a fait l'honneur d'inviter Tigrette à ma soutenance. Je remercie Cédric qui a toujours été disponible pour apporter son aide aux nouveaux venus et pour nous avoir enchanté avec ses talents de pâtissier.

Je tiens à remercier l'ensemble de mes co-bureaux que j'ai pu avoir pendant ces trois années de thèse : Arnaud, Imane, et Philippe. Un grand merci à Alexis pour toutes ces discussions énergisantes, c'est grâce à toi que j'ai pu ouvrir un nouveau chapitre de ma vie professionnelle. Je remercie mes deux compères, José et Manon, pour cette traversée sur l'océan thèse que nous avons partagée et pour leur soutien quand l'horizon me paraissait si loin. Merci à José pour nous avoir fait voyager avec toutes ses anecdotes quand nous en avions besoin. Et évidemment, merci à tous les deux pour les nombreux débats aussi enflammés qu'originaux.

Je remercie Julie, Laure, Gaia et Manon pour leur soutien et précieux conseils tout au long de cette thèse et pour toute la bonne humeur qu'elles apportent. Merci, pour tous ces moments que nous avons pu partager ensemble (les délicieux repas italiens, les fondues, les mojitos, etc.), et que j'espère, nous pourrions encore partager pendant longtemps.

Enfin, je tiens à remercier l'ensemble de mes proches. Merci à la famille Tang pour leur accueil. Merci à mes parents pour leur soutien.

Résumé

Les séries de débits observés au fil du temps comportent à la fois la trace des variations climatiques naturelles et des altérations hydrologiques dues aux activités humaines. Or, l'accès aux débits naturels s'avère souvent nécessaire afin d'optimiser la gestion de la ressource en eau ou encore pour le contrôle réglementaire des usages. Ainsi, depuis plus d'une vingtaine d'années, plusieurs méthodes de naturalisation, permettant de passer d'un débit influencé à un débit naturalisé, sont appliquées en conditions opérationnelles. Nous avons cependant constaté que, dans les études, une seule méthode de naturalisation était appliquée, bien souvent sans justification de son choix, et que les débits naturalisés obtenus étaient abusivement considérés comme des valeurs exactes de débit naturel.

L'objectif principal de cette thèse est de mettre au point une méthode permettant d'évaluer la fiabilité des méthodes de naturalisation. La principale difficulté est que, sur la période influencée, il n'est pas possible de comparer directement les débits naturalisés au débit naturel réel puisque ce dernier n'est pas observable. La démarche adoptée se base sur la mise en place d'une base de données d'environ 130 bassins versants situés en Australie, aux États-Unis et en France. Ces bassins versants sont principalement influencés par des grands barrages-réservoirs. La taille et la diversité de la base de données en terme de conditions climatiques et niveau d'influence nous a permis d'identifier des résultats généraux selon les caractéristiques des bassins et des ouvrages.

Les résultats montrent que les débits obtenus avec les différentes méthodes de naturalisation présentent des disparités, parfois très importantes. Ces dernières s'expliquent par le fait que les méthodes de naturalisation reposent sur des hypothèses et des données d'entrées différentes. La méthodologie proposée pour évaluer la fiabilité des méthodes se décompose en deux parties. La première partie consiste à évaluer les hypothèses de chacune des méthodes de naturalisation et d'écarter les méthodes dont les hypothèses ne sont pas respectées. La deuxième partie consiste à évaluer les méthodes de naturalisation par rapport à une référence externe similaire et d'attribuer un niveau de confiance à chacune des méthodes. Puis, une approche combinatoire est appliquée pour produire des débits naturalisés.

Abstract

The observed flow time series include natural climatic variations and hydrological alterations due to human activities. Access to natural flows is necessary to optimise water resource management or for the regulatory control of uses. Naturalization methods enable to reconstitute "natural" flows from influenced measurements. In the studies, generally only a single naturalization method is applied, without justification of its choice, and the naturalized flows are considered as an exact estimate of natural flow.

The main objective of this thesis was to develop a method to assess the reliability of naturalization methods. The main difficulty is that, over the influenced period, it is not possible to directly compare the naturalized flows with the natural flow which cannot be observed. The adopted approach is based on a database of approximately 130 catchments in Australia, the United States and France. These catchments are mainly influenced by large dams. The size and diversity of the database in terms of climatic conditions and level of influence allowed us to obtain quite general results according to the characteristics of the basins.

Results show that there are significant disparities in the flows obtained with the different naturalization methods. These differences can be explained by the fact that the naturalization methods are based on different assumptions and input data. The methodology proposed to assess the reliability of the methods is divided in two parts. The first part consists in assessing the assumptions of each of the naturalization methods and discarding the methods that do not validate the assumptions. The second part consists in evaluating the naturalization methods against a similar benchmark and assigning a confidence level to each of them. A combinatorial approach is then applied to produce naturalized flows.

Table des matières

| | |
|---|------------|
| Remerciements | iii |
| Résumé | vii |
| Abstract | xi |
| 1 Introduction générale | 1 |
| 1.1 Contexte | 3 |
| 1.1.1 État influencé des bassins versants | 3 |
| 1.1.2 Exemple d’application des méthodes de naturalisation pour des ob- jectifs de gestion en France | 5 |
| 1.2 Cadre de la thèse | 6 |
| 1.3 Focus sur l’impact des barrages-réservoirs | 7 |
| 1.3.1 Rôle des grands barrages-réservoir | 7 |
| 1.3.2 Impacts associés aux barrages-réservoirs | 8 |
| 1.4 Questions traitées dans la thèse | 10 |
| 2 Etat de l’art sur la naturalisation | 13 |
| 2.1 Introduction | 15 |
| 2.1.1 Natural, influenced and naturalized flows | 15 |
| 2.1.2 Why do we need natural flows? | 16 |
| 2.1.3 Key challenges around naturalization | 19 |
| 2.1.4 Objectives | 20 |
| 2.2 Potential impact of anthropogenic influences on streamflow | 20 |
| 2.2.1 Human impacts considered | 20 |
| 2.2.2 Dams and their associated storage | 21 |
| 2.2.3 Water withdrawal | 22 |
| 2.2.4 Water release | 23 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.2.5 | Land use and land cover change | 24 |
| 2.2.6 | Combination of human impacts | 24 |
| 2.3 | Defining the natural state of the flow regime | 26 |
| 2.3.1 | Naturalization terminology | 26 |
| 2.3.2 | Determination of the basin's baseline condition | 27 |
| 2.4 | Methods to naturalize streamflows | 30 |
| 2.4.1 | Overview on naturalization methods | 30 |
| 2.4.2 | Methods using data on influences | 32 |
| 2.4.3 | Methods using observation from the pre-influenced period | 37 |
| 2.4.4 | Methods using regional information | 41 |
| 2.5 | Discussion | 44 |
| 2.5.1 | Defining naturalized streamflow | 44 |
| 2.5.2 | Choice of naturalization methods | 45 |
| 2.5.3 | Operational implementation of naturalization methods : the case study on the Rhône basin (France) | 47 |
| 2.5.4 | Level of confidence associated with naturalized streamflow | 49 |
| 2.6 | Conclusion | 54 |
| 3 | Base de données | 57 |
| 3.1 | Introduction | 59 |
| 3.2 | Sources des données | 61 |
| 3.2.1 | Australie | 61 |
| 3.2.2 | France | 63 |
| 3.2.3 | États-Unis | 65 |
| 3.2.4 | Critère de sélection des bassins versants | 69 |
| 3.3 | Situation géographique et caractéristiques physiques des bassins de l'échan- tillon et de leurs influences | 70 |
| 3.3.1 | Australie | 70 |
| 3.3.2 | France | 71 |
| 3.3.3 | États-Unis | 73 |
| 3.4 | Identification de groupes de bassins influencés par les barrages | 75 |
| 3.5 | Analyse de la qualité des chroniques de données | 77 |
| 3.5.1 | Sources d'erreurs | 77 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 3.5.2 | Identification des données anormales | 79 |
| 3.5.3 | Gestion des données manquantes et douteuses | 80 |
| 3.6 | Cas d'études spécifiques | 80 |
| 3.6.1 | Glennies Creek à Middle Falbrook (210044, AUS), Groupe 1 | 82 |
| 3.6.2 | La Manilla river à l'aval de Split Rock Dam (419043, AUS), Groupe 2 | 85 |
| 3.6.3 | L'Aube à Arcis-sur-Aube (H1501010, FR), Groupe 3 | 87 |
| 3.6.4 | La Gimone à Garganvillar (O2883310, FR), Groupe 4 | 89 |
| 3.7 | Synthèse | 91 |
| 4 | Comparaison des méthodes de naturalisation | 93 |
| 4.1 | Introduction | 95 |
| 4.2 | Méthodes et outils | 96 |
| 4.2.1 | Méthodes de naturalisation appliquées | 96 |
| 4.2.2 | Modèle hydrologique | 98 |
| 4.2.3 | Choix des indicateurs pour la suite de l'étude | 101 |
| 4.2.4 | Estimation des variations de volume | 104 |
| 4.3 | Prise en compte de l'évaporation et des précipitations sur les débits naturalisés | 108 |
| 4.3.1 | Méthode de bilan sur ouvrage | 108 |
| 4.3.2 | Méthode de reconstitution | 112 |
| 4.4 | Évaluation des différences entre les méthodes | 114 |
| 4.4.1 | Comparaison globale des séries naturalisées | 114 |
| 4.4.2 | Comparaison des indicateurs | 120 |
| 4.5 | Synthèse | 124 |
| 5 | Applicabilité des méthodes de naturalisation | 127 |
| 5.1 | Introduction | 129 |
| 5.2 | Applicabilité de la méthode d'extension | 129 |
| 5.2.1 | Méthodologie d'évaluation de la méthode d'extension | 130 |
| 5.2.2 | Évaluation des différences climatiques entre les périodes | 131 |
| 5.2.3 | Évaluation de la robustesse globale du modèle | 133 |
| 5.2.4 | Évaluation des indicateurs hydrologiques | 136 |
| 5.3 | Applicabilité de la méthode de reconstitution | 137 |
| 5.3.1 | Méthodologie d'évaluation de la méthode de reconstitution | 138 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.3.2 | Robustesse globale du modèle | 138 |
| 5.3.3 | Comparaison des paramètres obtenus avec GR5J | 139 |
| 5.3.4 | Causes possibles des mauvaises performances de GR5J-Dam | 144 |
| 5.4 | Applicabilité de la méthode de bilan sur ouvrage | 146 |
| 5.4.1 | Évaluation de la méthode de bilan sur ouvrage | 146 |
| 5.4.2 | Analyse sur la méthode de bilan sur ouvrage sans prise en compte de l'évaporation | 147 |
| 5.4.3 | Analyse sur la méthode de bilan sur ouvrage avec prise en compte de l'évaporation | 152 |
| 5.5 | Applicabilité de la méthode de régionalisation | 153 |
| 5.5.1 | Performances régionales de la méthode de régionalisation | 155 |
| 5.5.2 | Estimation des performances locales de la méthode de régionalisation | 158 |
| 5.6 | Synthèse | 162 |
| 6 | Cadre d'évaluation indirecte des méthodes de naturalisation | 165 |
| 6.1 | Introduction | 167 |
| 6.2 | Méthodologie | 168 |
| 6.2.1 | Comment comparer des méthodes utilisant un modèle hydrologique et des méthodes utilisant un modèle de routage? | 168 |
| 6.2.2 | Critères de choix du référentiel | 171 |
| 6.2.3 | Principe multi-modèle | 172 |
| 6.3 | Application à des cas d'étude | 174 |
| 6.3.1 | Manilla river à l'aval de Split Rock Dam (419043, Groupe 2, AUS) . | 174 |
| 6.3.2 | L'Aube à Arcis-sur-Aube (H1501010, Groupe 3, FR) | 191 |
| 6.4 | Synthèse | 201 |
| 7 | Finesse des intervalles de confiance associés aux méthodes de naturali- sation | 205 |
| 7.1 | Introduction | 207 |
| 7.2 | Méthodes et outils | 207 |
| 7.2.1 | Quantification de l'incertitude des méthodes hydrologiques | 207 |
| 7.2.2 | Quantification de l'incertitude de la méthode de bilan sur ouvrage . | 210 |
| 7.2.3 | Critère d'évaluation des intervalles de confiances | 218 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 7.3 | Évaluation des intervalles de confiance des chroniques de débits naturalisés | 219 |
| 7.4 | Synthèse | 223 |
| 8 | Conclusion générale | 225 |
| | Annexes | 267 |
| A | Liste des barrages de l'étude | 269 |
| B | Liste des bassins de l'étude | 275 |
| C | Caractéristiques des bassins influencés par les barrages-réservoirs | 283 |
| C.1 | Caractéristiques hydro-climatiques | 285 |
| C.2 | Caractéristiques des barrages-réservoirs | 288 |
| C.3 | Estimation de l'impact potentiel des prélèvements de surface | 290 |
| D | Estimation du temps de trajets entre les barrages-réservoirs et les stations | 293 |
| E | Estimation des variations de volume avec prise en compte de l'évaporation et des précipitations sur les réservoirs | 299 |
| F | Causes possibles des mauvaises performances de GR5J-Dam avec la méthode de reconstitution | 307 |
| F.1 | Quel est le lien entre les performances du modèle et l'état influencé des bassins versants? | 309 |
| F.2 | Quel est le lien entre les performances du modèle et les paramètres obtenus en calage? | 311 |
| G | Critères d'évaluation des méthodes de naturalisation | 317 |
| H | Coefficient ARIAL sur les bas et hauts débits | 325 |

Table des figures

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | Diagramme des impacts des activités anthropiques sur le débit des rivières. Figure modifiée provenant de Ward (1990). | 3 |
| 1.2 | Carte de localisation des barrages de classe A en France métropolitaine selon la base de données SIOUH (Système d'Information des Ouvrages Hydrauliques), fournie par INRAE Lyon. | 8 |
| 2.1 | Schematic representation of the impacts of human activities and the water cycle components they may directly impact (derived from Botai <i>et al.</i> (2015)). | 21 |
| 2.2 | A catchment impacted by human activities : gauging stations A1 and B1 are uninfluenced, gauging stations A2, B2 and C are candidates for natu- ralization procedures (Source : INRAE). | 25 |
| 2.3 | Diagram of the three periods distinguished in naturalization. | 28 |
| 2.4 | Hydrograph at logarithmic scale of the daily observed streamflow of the Aube River at Arcis-sur-Aube (France, 3560 km ²). The red line corresponds to the upstream dam's commissioning in 1990. | 29 |
| 2.5 | Diagram of the choice of naturalization according to the available data. . . | 31 |
| 2.6 | Naturalization methods applied in the studies reviewed. | 32 |
| 2.7 | Illustration of the two application steps of the Reconstitution method. . . . | 36 |
| 2.8 | Illustration of the two application steps of the Extension method. | 38 |
| 2.9 | Map of the withdrawable water volumes in the catchments studied (Rhône- Mediterranean district). | 50 |
| 3.1 | Carte des bassins versants naturels en Australie selon la base de données du CSIRO. | 62 |
| 3.2 | Carte des bassins versants naturels aux États-Unis, d'après Newman <i>et al.</i> (2015). | 67 |
| 3.3 | Localisation des barrages et bassins versants influencés en Australie utilisés dans le cadre de cette étude. | 72 |

| | | |
|------|--|----|
| 3.4 | Localisation des barrages et bassins versants influencés français utilisés dans le cadre de cette étude. | 73 |
| 3.5 | Localisation des barrages et bassins versants influencés aux États-Unis utilisés dans le cadre de cette thèse. | 74 |
| 3.6 | Distribution par groupe de bassins pour chaque indicateur. Les extrémités correspondent au 5 ^{ème} et 95 ^{ème} quantiles. Les bornes de la boîte correspondent au 1 ^{er} et 3 ^{ème} quartile. Le trait horizontal de la boîte à moustaches correspond à la valeur médiane. | 76 |
| 3.7 | Cartes des groupes de bassins par pays. Le groupe 1 correspond aux bassins bruns, le groupe 2 aux bassins orange, le groupe 3 aux bassins bleu foncé et le groupe 4 aux bassins bleu clair. | 78 |
| 3.8 | Chronique des débits de l'Aube à Blaincourt-sur-Aube (H1231010) en 2006 (milieu), des précipitations associées à son bassin versant (haut), des variations de volume du barrage de l'Aube en amont (bas en noir), et du volume des réservoirs amont (bas en vert). | 81 |
| 3.9 | Localisation du bassin versant de Glennies Creek à Middle Falbrook et des barrages-réservoirs amont. | 83 |
| 3.10 | Chronique des débits de Glennies Creek à Middle Falbrook (210044). La ligne verticale pointillée correspond à la mise en service du barrage-réservoir de Glennies Creek. La partie verte et rouge des chroniques correspondent respectivement au débit observé avant et après mise en service du barrage-réservoir. Les lignes horizontales noires correspondent au débit médian avant et après mise en service du barrage-réservoir. L'échelle est logarithmique. | 84 |
| 3.11 | Régime mensuel interannuel des débits (a) de Glennies Creek à Middle Falbrook (210044) et des volumes du barrage de Glennies Creek (b). Les courbes verte et rouge correspondent respectivement au débit observé avant et après mise en service du barrage-réservoir. L'échelle de la figure a) est logarithmique. | 84 |
| 3.12 | Localisation du bassin versant de la Manilla river à l'aval de Split Rock Dam et des barrages-réservoirs amont. | 85 |

- 3.13 Chronique des débits de la Manilla river à l'aval de Split Rock Dam (419043). La ligne verticale pointillée correspond à la mise en service du barrage-réservoir de Split Rock Dam. La partie verte et rouge des chroniques correspondent respectivement au débit observé avant et après mise en service du barrage-réservoir. Les lignes horizontales noires correspondent au débit médian avant et après mise en service du barrage-réservoir. L'échelle est logarithmique. 86
- 3.14 Régime mensuel interannuel des débits (a) de la Manilla river à l'aval de Split Rock Dam (419043) et des volume du barrage de Split Rock Dam (b). Les courbes verte et rouge correspondent respectivement au débit observé avant et après mise en service du barrage-réservoir. L'échelle de la figure a) est logarithmique. 86
- 3.15 Localisation du bassin versant l'Aube à Arcis-sur-Aube et des barrages-réservoirs amont. 87
- 3.16 Chronique des débits de l'Aube à Arcis-sur-Aube (H1501010). La ligne verticale pointillée correspond à la mise en service du barrage-réservoir de l'Aube. La partie verte et rouge des chroniques correspondent respectivement au débit observé avant et après mise en service du barrage-réservoir. Les lignes horizontales noires correspondent au débit médian avant et après mise en service du barrage-réservoir. L'échelle est logarithmique. 88
- 3.17 Régime mensuel interannuel des débits (a) de l'Aube à Arcis-sur-Aube (H1501010) et des volumes du barrage de l'Aube (b). Les courbes verte et rouge correspondent respectivement au débit observé avant et après mise en service du barrage-réservoir. L'échelle de la figure a) est logarithmique. 88
- 3.18 Localisation du bassin versant de la Gimone à Garganvillar et des barrages-réservoirs amont. 89
- 3.19 Chronique des pluies annuelles de la Gimone à Garganvillar (O2883310) de 1966 à 2010. La courbe horizontale noire représente la pluie moyenne inter-annuelle d'une valeur de 727 mm/an 89

-
- 3.20 Chronique des débits de la Gimone à Garganvillar (O2883310). La ligne verticale pointillée correspond à la mise en service du barrage-réservoir de la Gimone. La partie verte et rouge des chroniques correspondent respectivement au débit observé avant et après mise en service du barrage-réservoir. Les lignes horizontales noires correspondent au débit médian avant et après mise en service du barrage-réservoir. L'échelle est logarithmique. 90
- 3.21 Régime mensuel interannuel des débits (a) de la Gimone à Garganvillar (O2883310) et des volumes du barrage de la Gimone (b). Les courbes verte et rouge correspondent respectivement au débit observé avant et après mise en service du barrage-réservoir. L'échelle de la figure a) est logarithmique. . . 91
- 4.1 Schéma du fonctionnement du modèle journalier GR5J avec en bleu la partie correspondant au module barrage (E, P et Q sont respectivement l'évapotranspiration potentielle, la pluie et le débit ; X1 à X5 sont les paramètres libres du modèles ; ΔV est la variation de volume dans le réservoir image ; les autres lettres désignent des variables internes du modèle). 99
- 4.2 Rapport de la surface des bassins versants et des surfaces moyennes des barrages-réservoirs amont par groupe de bassins (G1 à G4). Plus le rapport est grand, plus la surface des barrages-réservoirs est petite par rapport à la surface des bassins versants, et inversement. 106
- 4.3 Moyenne annuelle par groupe de bassins de l'évaporation des barrages-réservoirs amont (a), des précipitations sur les barrages-réservoirs amont (b), de l'évapotranspiration potentielle (c) et des précipitations (d) du bassin versant, et du débit influencé observé (e). Pour les graphiques (a) et (b), il s'agit des hauteurs équivalentes à l'échelle du bassin versant. 107
- 4.4 Quantiles calculés sur les débits naturalisés obtenus avec la méthode de bilan sur ouvrage par groupe de bassins, en ne considérant pas l'évaporation et les précipitations sur les réservoirs (boîtes à moustaches blanches) et en les prenant en compte (boîtes à moustaches grises). Le graphe (d) a une échelle des ordonnées différente des trois autres groupes. La croix correspond à la valeur médiane, les extrémités des boîtes aux quantiles 0,25 et 0,75, et les extrémités des moustaches aux quantiles 0,05 et 0,95. 109

-
- 4.5 Courbe de débit classé du débit influencé observé (courbe noire), du débit naturalisé de la méthode de bilan sur ouvrage sans (bleu foncé) et avec (bleu clair) prise en compte des variables météorologiques, et du débit naturalisé de la méthode de reconstitution sans (vert foncé) et avec (vert clair) prise en compte des variables météorologiques sur les bassins de Glennies Creek à Middle Falbrook (a), la Manilla river à l'aval de Split Rock Dam (b), l'Aube à Arcis-sur-Aube (c) et la Gimone à Garganvillar (d). 110
- 4.6 Régime de l'évaporation des barrages et des précipitations sur les barrages des bassins de Glennies Creek à Middle Falbrook (a), la Manilla river à l'aval de Split Rock Dam (b), l'Aube à Arcis-sur-Aube (c) et la Gimone à Garganvillar (d). Les courbes oranges correspondent à l'évaporation des barrages-réservoirs amont et les bleues aux précipitations tombées sur ces derniers. 111
- 4.7 Quantiles calculés sur les débits naturalisés obtenus avec la méthode de reconstitution par groupe de bassins, en ne considérant pas l'évaporation et les précipitations sur les réservoirs (boxplot blanc) et en les prenant en compte (boxplot gris). 113
- 4.8 Distribution des coefficients de variation (écart-type ramené à la moyenne), par groupe de bassins, pour les modules (a), QMNA5 (b), Q10 (c), Q90 (e) et QJXA5 (f) produits par les différentes méthodes de naturalisation. Pour Qzero (d), c'est la distribution des écarts-types qui est représentée. 121
- 4.9 Pourcentages des bassins par groupe pour lesquels chaque méthode donne la valeur la plus forte de l'indicateur considéré. Bleu foncé : bilan sur ouvrage ; bleu clair : bilan sur ouvrage avec prise en compte de l'évaporation et des précipitations sur les réservoirs ; vert : reconstitution ; vert clair : reconstitution avec prise en compte de l'évaporation et des précipitations sur les réservoirs ; jaune : extension ; rouge : régionalisation par voisinage. . 123

| | | |
|------|--|-----|
| 4.10 | Pourcentages des bassins par groupe pour lesquels chaque méthode donne la valeur la plus faible de l'indicateur considéré. Bleu foncé : bilan sur ouvrage ; bleu clair : bilan sur ouvrage avec prise en compte de l'évaporation et des précipitations sur les réservoirs ; vert : reconstitution ; vert clair : reconstitution avec prise en compte de l'évaporation et des précipitations sur les réservoirs ; jaune : extension ; rouge : régionalisation par voisinage. | 124 |
| 5.1 | Subdivision des différentes périodes d'étude (en vert la période naturelle et en rouge la période influencée). | 130 |
| 5.2 | Précipitation et évapotranspiration potentielle annuelle moyenne sur la période de calage P_{Nat} et la période de naturalisation P_{Inf} , pour l'ensemble des 34 bassins. | 132 |
| 5.3 | Précipitation et évapotranspiration potentielle annuelle moyenne sur les sous-périodes naturelles P_{Nat1} et P_{Nat2} , pour l'ensemble des 34 bassins. | 132 |
| 5.4 | Comparaison du KGE et de ses différentes composantes en calage et validation. Les ronds verts correspondent aux performances du modèle en calage sur P_{Nat1} et en validation sur P_{Nat2} , et inversement pour les triangles rouges. | 134 |
| 5.5 | Différence relative entre les indicateurs hydrologiques estimés avec les débits observés et les débits simulés, sur les périodes P_{Nat1} et P_{Nat2} . Les ronds verts correspondent aux indicateurs du modèle en le calant sur P_{Nat1} et en validant sur P_{Nat2} , et inversement pour les triangles rouges. *Calculé sur 16 bassins versants. | 137 |
| 5.6 | Distribution des performances du modèle GR5J-Dam, obtenue en appliquant le <i>split-sample test</i> sur les sous-périodes influencées des bassins de la base de données, en calage (C) et validation (V) par groupe de bassins (G1, G2, G3 et G4), suivant les critères $KGE(Q)$ (haut), $KGE(\sqrt{Q})$ (moyen) et $KGE(\frac{1}{Q})$ (bas). Les extrémités des moustaches correspondent aux quantiles 0,05 et 0,95 des données. Les extrémités des boîtes correspondent aux quantiles 0,25 et 0,75 des données, et la ligne dans la boîte correspond à la médiane. La valeur en bleu correspond à la valeur médiane. | 140 |

| | | |
|------|--|-----|
| 5.7 | Paramètres de GR5J obtenus en calage sur les bassins voisins naturels des bassins influencés. Les bassins sont considérés comme arides si leur indice d'aridité est inférieur à 0,75 et humide s'il est supérieur à 0,75. X1 correspond à la capacité du réservoir de production, X2 au coefficient d'échanges souterrains, X3 à la capacité du réservoir de routage, X4 au temps de base de l'hydrogramme unitaire et X5 au seuil d'inversion des échanges souterrains. | 141 |
| 5.8 | Paramètres de GR5J-Dam obtenus en calage sur les bassins influencés. . . | 142 |
| 5.9 | Occurrence d'obtention des erreurs selon la gamme de quantiles de la courbe de débits classés du débit observé influencé. | 149 |
| 5.10 | Indicateur B_{error} obtenu par groupes de bassins avec la méthode de bilan sur ouvrage. | 150 |
| 5.11 | Caractéristique des erreurs obtenues avec la méthode de bilan sur ouvrage par groupes de bassins. | 151 |
| 5.12 | Indicateur B_{error} obtenu par groupes de bassins avec la méthode de bilan sur ouvrage prenant en compte l'évaporation des barrages-réservoirs amont. | 153 |
| 5.13 | Caractéristiques des erreurs obtenues avec la méthode de bilan sur ouvrage, prenant en compte l'évaporation des barrages-réservoirs amont, par groupes de bassins. | 153 |
| 5.14 | Occurrence d'obtention des erreurs de la méthode de bilan sur ouvrage prenant en compte l'évaporation des barrages-réservoirs amont, selon la gamme de quantile de la courbe de débits classés du débit observé influencé. | 154 |
| 5.15 | KGE sur le débit et ses composantes calculés entre les débits observés et des débits simulés en régionalisation sur les groupes de bassins donneurs par pays. | 156 |
| 5.16 | Différence relative entre les indicateurs hydrologiques des débits observés et des débits simulés en régionalisation sur les groupes de bassins donneurs par pays. | 157 |
| 5.17 | Lien entre les performances en régionalisation sur le bassin cible, en ordonnée, et les performances moyennes sur les bassins donneurs, en abscisse. Les bassins verts correspondent aux bassins australiens, les bleus aux français et les rouges aux américains. | 161 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 6.1 | Régimes du débit influencé observé sur la période de naturalisation (a) et du débit naturel observé sur la période pré-influence (b) à Manilla river à l’aval de Split Rock Dam. Le graphique (c) correspond aux débits naturels observés sur les cinq bassins naturels voisins les plus proches géographiquement. Plus la courbe est foncée, plus le voisin est géographiquement proche. | 175 |
| 6.2 | Chroniques du débit journalier de la Manilla river à l’aval de Split Rock Dam, en 1975 (a) et 1980 (b), soit avant la mise en service du barrage-réservoir de Split Rock Dam fin 1989. | 176 |
| 6.3 | Chroniques du débit journalier de la Manilla river à l’aval de Split Rock Dam, en 1995 (a) et 2000 (b), soit après la mise en service du barrage-réservoir de Split Rock Dam fin 1989. | 177 |
| 6.4 | Chroniques de débits journaliers, sur l’année 1980, des cinq bassins voisins naturels de la Manilla river à l’aval de Split Rock Dam. Le voisin 1 correspond au plus proche géographiquement et le voisin 5 au plus éloigné. | 178 |
| 6.5 | Carte du bassin versant de la Manilla river à l’aval de Split Rock Dam, en rouge, et des cinq bassins voisins naturels donneurs, en gris. V1 correspond au bassin le plus proche géographiquement et V5 au plus éloigné. | 180 |
| 6.6 | Régime des débits naturalisés avec les différentes méthodes. BO : courbe bleue clair ; BOM : courbe bleue foncé pointillé ; R : courbe verte ; E : courbe jaune ; V : courbe rouge. | 181 |
| 6.7 | Chroniques journalières des précipitations (a), des débits naturalisé et observé (b), et des variations de volume du barrage-réservoir de Split Rock Dam (c), de début mai à fin août 2002. Code couleur pour les chroniques de débits : BO, courbe bleue clair ; BOM, courbe bleue foncé pointillé ; R, courbe verte ; E, courbe jaune ; V, courbe rouge ; Débit influencé observé, courbe noire. | 182 |
| 6.8 | Pourcentage moyen d’erreurs obtenues par mois, à la station Manilla river à l’aval de Split Rock Dam, avec la méthode de bilan sur ouvrage sans (a) et avec (b) prise en compte de l’évaporation et des précipitations sur le barrage de Split Rock Dam. | 184 |

-
- 6.9 Paramètres obtenus en calage sur le bassin Manilla river à l'aval de Split Rock Dam avec la méthode de reconstitution (R), d'extension (E), et de régionalisation sur les bassins versants voisins donneurs du plus proche (V1) au plus éloigné (V5). Les graphiques (a) et (c) sont en échelle logarithmique. 185
- 6.10 Chroniques des précipitations (a) et de l'évapotranspiration (b) annuelles sur la bassin de la Manilla river à l'aval de Split Rock dam. Les courbes rouges et vertes correspondent respectivement aux données météorologiques durant la période influencée et la période non influencée. La droite noire correspond à la courbe de tendance obtenue avec le test de Mann-Kendall. 186
- 6.11 Chroniques de débit naturalisé avec la méthode de régionalisation en n'utilisant le jeu de paramètres que d'un seul voisin naturel à la fois, sur la période mai-août 2002. La courbe noire correspond au débit naturalisé obtenu avec le jeu de paramètre du voisin V1 et la courbe gris clair à celui obtenu avec le voisin V5. 187
- 6.12 Chronique de débit, sur la période de début mai à fin août 2002, de la méthode de bilan sur ouvrage (courbe noire pointillée) et du débit correspondant à la moyenne des débits naturalisés (courbe rouge). 190
- 6.13 Régime de débit obtenu avec la méthode de bilan sur ouvrage (courbe noire pointillée) et du débit correspondant à la moyenne des débits naturalisés (courbe rouge) sur la période de naturalisation 1990-2016. 191
- 6.14 Régimes du débit influencé observé sur la période de naturalisation (a) et du débit naturel observé sur la période pré-influence (b) pour l'Aube à Arcis-sur-Aube. Le graphique (c) correspond aux débits naturels observés sur les cinq bassins naturels voisins les plus proches géographiquement. Plus la courbe est foncée, plus le voisin est géographiquement proche. . . . 193
- 6.15 Chroniques du débit journalier de l'Aube à Arcis-sur-Aube, en 1965 (a) et 1976 (b), soit avant la mise en service du barrage-réservoir de l'Aube début 1990. 194
- 6.16 Chroniques du débit journalier de l'Aube à Arcis-sur-Aube, en 2001 (a) et 2003 (b), soit après la mise en service du barrage-réservoir de l'Aube début 1990. 194

| | | |
|------|--|-----|
| 6.17 | Régime des débits naturalisés avec les différentes méthodes de naturalisation à l'Aube sur Arcis-sur-Aube. BO : courbe bleue clair ; BOm : courbe bleue foncé pointillé ; R : courbe verte ; E : courbe jaune ; V : courbe rouge. | 196 |
| 6.18 | Pourcentage moyen du nombre d'erreur obtenue par mois, à l'Aube à Arcis-sur-Aube, avec la méthode de bilan sur ouvrage sans (a) et avec (b) prise en compte de l'évaporation et des précipitations du barrage de l'Aube. | 197 |
| 6.19 | Paramètres obtenus en calage sur le bassin de l'Aube à Arcis-sur-Aube avec la méthode de reconstitution (R), d'extension (E), et de régionalisation sur les bassins versants voisins donneurs du plus proche (V1) au plus éloigné (V5). | 198 |
| 6.20 | Chroniques des précipitations (a) et de l'évapotranspiration (b) annuelle sur le bassin de l'Aube à Arcis-sur-Aube. Les courbes rouges et vertes correspondent respectivement aux données météorologiques durant la période influencée et la période non influencée. La droite noire correspond à la courbe de tendance obtenue avec le test de Mann-Kendall. | 199 |
| 7.1 | Étapes principales de la méthode QUOIQUE d'estimation des incertitudes de modélisation développée par Bourgin (2014). | 208 |
| 7.2 | Impact minimal (a), moyen (b) et maximal (c) d'une erreur de 1 cm en débit moyen sur 24 h, selon la capacité des barrages-réservoirs. Les barrages-réservoirs verts se situent en Australie, les bleus en France et les rouges aux Etats-Unis. | 215 |
| 7.3 | Régime de débit naturalisé par la méthode de bilan sur ouvrage et incertitude associée sur les bassins de Glennies Creek à Middle Fallbrook(a), Manilla river à l'aval de Split Rock Dam (b), l'Aube à Arcis-sur-Aube (c) et la Gimone à Garganvillar (d). La courbe noire correspond au régime de débit naturalisé par la méthode de bilan sur ouvrage. Les courbes vertes pointillées correspondent à l'incertitude sur les mesures de débits. Les courbes rouges pointillées correspondent à l'incertitude liées à la mesure de la hauteur d'eau. | 216 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 7.4 | Distribution des coefficients ARIAL, calculés sur les débits naturalisés compris entre Q20 et Q80, pour chaque méthode de naturalisation (BO : Bilan sur Ouvrage; BOm : Bilan sur Ouvrage avec prise en compte de l'évaporation et des précipitations sur le réservoir; R : Reconstitution; E : Extension; V : Régionalisation) par groupe de bassins. Les valeurs minimales et maximales de la boîte à moustache correspondent aux quantiles 0,05 et 0,95. Les extrémités de la boîte à moustache correspondent aux quantiles 0,25 et 0,75. Le quantile 0,5 est représenté par un trait horizontal épais. | 222 |
| C.1 | Débit moyen annuel (a) et le coefficient de variation (b) classés par ordre croissant selon les pays. Les bassins verts correspondent aux bassins australiens, les bleus aux français et les rouges aux américains. | 285 |
| C.2 | Précipitation (a) et évapotranspiration potentielle (b) moyenne annuelle classées par ordre croissant selon les pays, et leurs coefficients de variation (c et d). Les bassins verts correspondent aux bassins australiens, les bleus aux français et les rouges aux américains. | 286 |
| C.3 | Indice d'aridité par bassin versant, classé par ordre croissant selon les pays. Les bassins verts correspondent aux bassins australiens, les bleus aux français et les rouges aux américains. Les traits horizontaux gris correspondent aux limites des différentes zones d'aridité (UNESCO, 1979). H correspond à la zone humide, SH à la semi-humide, SA à la semi-aride, A à l'aride et HA à l'hyper-aride. | 287 |
| C.4 | Schéma des différents positionnements des barrages amont. | 288 |
| C.5 | Caractéristiques des barrages par bassin versant. Les bassins verts correspondent aux bassins australiens, les bleus aux français et les rouges aux américains. | 290 |
| C.6 | Schéma des éventuelles zones de prélèvements de surface sur les bassins versants influencés. | 291 |
| C.7 | Indices de prélèvements par bassin selon leur finalité, classés par ordre croissant selon les pays. Les bleus correspondent aux bassins français et les rouges aux américains. | 292 |

| | | |
|-----|--|-----|
| D.1 | Graphique à échelle logarithmique de la relation entre la pente moyenne du bassin versant et la vitesse obtenue avec le modèle GRSD sur 908 bassins versants français. | 295 |
| D.2 | Graphique à échelle logarithmique de la relation entre la surface du bassin versant et la vitesse obtenue avec le modèle GRSD sur 908 bassins versants français. La droite verte correspond à l'approximation de la relation. | 296 |
| E.1 | Comparaison de l'évapotranspiration journalière de Morton, en abscisse, et de l'évaporation journalière de Morton, en ordonnée, au niveau du barrage-réservoir de Burrendong (Australie). La droite verte correspond à la régression linéaire établie entre les données journalières des deux variables. | 302 |
| E.2 | Carte de la forme des surfaces des réservoirs de Seine Grands Lacs. La constante α obtenue avec l'équation E.5 est précisée pour chaque réservoir. | 305 |
| E.3 | Relation entre le volume, en abscisse, et la surface, en ordonnée, sur les réservoirs de Seine Grands Lacs. La courbe rouge entière correspond aux données fournies par Seine Grand Lacs, la courbe bleue pointillée provient de la relation surface-volume établie, et la courbe noire horizontale correspond à la surface maximale. | 306 |
| F.1 | Performance du modèle GR5J-Dam en validation, obtenue en appliquant le <i>split-sample test</i> sur les sous-périodes influencées des bassins de la base de données, par rapport aux caractéristiques des barrages-réservoirs amont de chaque bassins versants. Les bassins bruns correspondent aux bassins du groupe 1, les oranges au groupe 2, les bleu foncé au groupe 3 et les bleu clair au groupe 4. L'indicateur VI_D n'est pas disponible sur les bassins V5004010, V5045020 et W2755010. | 310 |
| F.2 | Performance du modèle GR5J-Dam en validation, obtenue en appliquant le <i>split-sample test</i> sur les sous-périodes influencées des bassins de la base de données, par rapport aux paramètres obtenus en calage. X1 correspond au réservoir de production et X3 au réservoir de routage. Les bassins bruns correspondent aux bassins du groupe 1, les oranges au groupe 2, les bleu foncé au groupe 3 et les bleu clair au groupe 4. | 312 |

-
- F.3 Chroniques journalières des précipitations, des ΔV négatifs du barrage en valeur absolue, des débits, de l'évolution du niveau des réservoirs de production et de routage de GR5J-Dam sur le bassin 210021 pour l'année 1994. Pour le débit, la courbe bleue correspond au débit simulé en calage et la courbe noire pointillée au débit observé. 314
- F.4 Chroniques journalières des précipitations, des ΔV négatifs du barrage en valeur absolue, des débits, de l'évolution du niveau des réservoirs de production et de routage de GR5J-Dam sur le bassin 210015 pour l'année 1994. Pour le débit, la courbe bleue correspond au débit simulé en calage et la courbe noire pointillée au débit observé. 315
- H.1 Distribution des coefficients ARIAL, calculés sur les débits naturalisés inférieurs au débit non-dépassé 20% du temps (Q20), pour chaque méthode de naturalisation (BO : Bilan sur Ouvrage ; BOm : Bilan sur ouvrage avec prise en compte de l'évaporation et des précipitations sur le réservoir ; R : Reconstitution ; E : Extension ; V : Régionalisation) par groupe de bassins. Les valeurs minimales et maximales de la boîte à moustaches correspondent aux quantiles 0,05 et 0,95. Les extrémités de la boîte à moustaches correspondent aux quantiles 0,25 et 0,75. Le quantile 0,5 est représenté par un trait horizontal épais. 327
- H.2 Distribution des coefficients ARIAL, calculés sur les débits naturalisés supérieurs au débit non-dépassé 80% du temps (Q80), pour chaque méthode de naturalisation (BO : Bilan sur Ouvrage ; BOm : Bilan sur ouvrage avec prise en compte de l'évaporation et des précipitations sur le réservoir ; R : Reconstitution ; E : Extension ; V : Régionalisation) par groupe de bassins. Les valeurs minimales et maximales de la boîte à moustaches correspondent aux quantiles 0,05 et 0,95. Les extrémités de la boîte à moustaches correspondent aux quantiles 0,25 et 0,75. Le quantile 0,5 est représenté par un trait horizontal épais. 328

Liste des tableaux

| | | |
|-----|--|-----|
| 2.1 | Definitions of "natural streamflow" and "natural regime" found in the literature. | 26 |
| 2.2 | Synthesis of studies applying Water Balance methods. | 34 |
| 2.3 | Synthesis of studies applying Reconstitution methods. | 36 |
| 2.4 | Synthesis of studies applying Extension methods. | 39 |
| 2.5 | Synthesis of models used in studies applying Routing modelling methods. | 42 |
| 2.6 | Synthesis of input data and tools used by each of the naturalization methods. | 46 |
| 2.7 | Synthesis of withdrawable water volume studies. WB corresponds to the Water Balance method, R to the Reconstitution method, E to the Extension method and N to the Neighbourhood method. | 51 |
| 3.1 | Liste des fournisseurs de données. | 63 |
| 3.2 | Liste des bassins avec des données de débits observés sur la période pré-influence. | 68 |
| 3.3 | Nombre de bassins versants et de barrages-réservoir de l'étude par pays. | 70 |
| 3.4 | Nombre de bassins versants par groupes et par pays. | 77 |
| 3.5 | Caractéristiques des quatre bassins versants choisis comme cas d'études spécifiques. | 82 |
| 4.1 | Différence relative (en %) par groupe de bassins entre les quantiles de débits naturalisés, obtenus par la méthode de bilan sur ouvrage, avec et sans prise en compte de l'évaporation et des précipitations sur les réservoirs. | 108 |
| 4.2 | Différence relative médiane (en %) par groupe de bassins entre les quantiles de débits naturalisés, de la méthode de reconstitution, obtenue avec et sans prise en compte de l'évaporation et des précipitations sur les réservoirs. | 114 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 4.3 | Valeur médiane du KGE sur le débit obtenu entre les chroniques de débits naturalisés. Les méthodes en colonne correspondent aux chroniques de référence. BO : bilan sur ouvrage; BOM : bilan sur ouvrage avec prise en compte de l'évaporation et des précipitations sur les réservoirs; R : reconstitution; Rm : reconstitution avec prise en compte de l'évaporation et des précipitations sur les réservoirs; E : extension; V : régionalisation par voisinage. | 115 |
| 4.4 | Valeur médiane de la corrélation entre les chroniques de débits naturalisés. Les méthodes en colonne correspondent aux chroniques de référence. | 115 |
| 4.5 | Valeur médiane du biais entre les chroniques de débits naturalisés. Les méthodes en colonne correspondent aux chroniques de référence. | 116 |
| 4.6 | Valeur médiane du rapport des écarts-types entre les chroniques de débits naturalisés. Les méthodes en colonne correspondent aux chroniques de référence. | 116 |
| 5.1 | Liste des bassins ayant un biais de plus de 30% lors de l'évaluation de la robustesse du modèle et liste des causes. | 135 |
| 5.2 | Bilan des limites d'application identifiées sur la base de données de la thèse. | 162 |
| 6.1 | Méthode de comparaison par rapport à un débit de référence selon la méthode de naturalisation. | 170 |
| 6.2 | Critères pour sélectionner les débits de référence. Pour chaque cas d'étude, la référence ayant le plus de "+" est considérée comme la référence la plus adaptée. | 172 |
| 6.3 | Choix de la référence sur le bassin de la Manilla river à l'aval de Split Rock Dam. | 188 |
| 6.4 | KGE sur le débit (a), la racine carrée des débits (b), et l'inverse des débits (c), obtenus entre les débits naturalisés et les débits de référence. | 189 |
| 6.5 | Choix de la référence sur le bassin de l'Aube à Arcis-sur-Aube. | 200 |
| 6.6 | KGE sur le débit (a), la racine carrée des débits (b), et l'inverse des débits (c), obtenus entre les débits naturalisés et les débits de référence. | 200 |
| 7.1 | Synthèse des sources d'incertitude de la méthode de bilan sur ouvrage. . . | 210 |

1

Introduction générale

1.1 Contexte

1.1.1 État influencé des bassins versants

Actuellement, la plupart des débits mesurés à l'exutoire des rivières comportent la trace des activités humaines (Dynesius et Nilsson, 1994 ; Vörösmarty et Sahagian, 2000). D'une part, comme illustré à la figure 1.1, la modification de l'utilisation des sols ainsi que les ouvrages et les différentes utilisations de l'eau influent sur différentes composantes du cycle de l'eau : l'évapotranspiration, le ruissellement, l'infiltration, la percolation et la variation des réserves. Toutes ces altérations du cycle hydrologique mènent à un changement du débit des cours d'eau (Abbott *et al.*, 2019). D'autre part, le changement climatique, qui est lié aux gaz à effet de serre émis par l'Homme, influe fortement sur le cycle hydrologique de l'eau (Magand, 2014a ; Pagano et Sorooshian, 2005). Cependant, nous distinguerons par la suite les impacts dus aux changements climatiques et les impacts dus aux activités humaines. Les débits modifiés par les activités anthropiques sont communément appelés débits influencés, par opposition aux débits naturels.

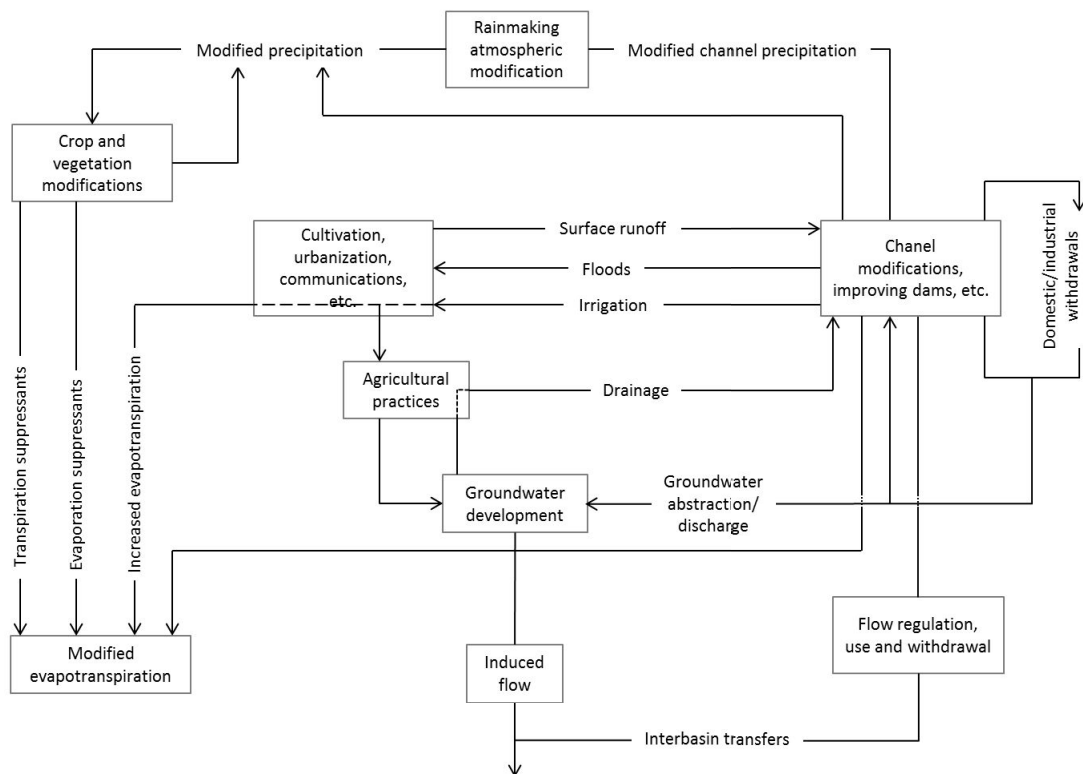


Figure 1.1 – Diagramme des impacts des activités anthropiques sur le débit des rivières. Figure modifiée provenant de Ward (1990).

Bien que la majorité des débits mesurés dans les rivières soient influencés, le début de la décennie Pantha Rhei portée par l'AISH (Association International des Sciences Hydrologiques) en 2013, a mis en avant le fait que les connaissances sur l'impact des activités anthropiques sur le cycle naturel de l'eau et leur représentation dans un unique cycle restent limitées. Les connaissances sur le cycle naturel de l'eau et sa représentation étant plus abouties, la gestion de la ressource en eau se fonde principalement sur l'hydrologie naturelle du bassin versant. Dans la littérature, afin d'avoir une référence naturelle sur un bassin versant influencé, trois méthodes sont couramment utilisées :

- Référence naturelle passée : dans le cas où l'on dispose d'observations de débit naturel passé, ces dernières peuvent être utilisées comme référence naturelle (Richter *et al.*, 1996). La principale limite de cette approche est l'accès à des mesures de ces débits naturels passés. De plus, les débits naturels passés observés seront à la fois représentatifs des conditions d'écoulement sans l'impact des activités humaines, mais également des conditions climatiques de cette période (Magilligan et Nislow, 2005).
- Référence naturelle régionale : des réseaux de stations hydrométriques de référence ont été établis dans plusieurs pays (Burn *et al.*, 2012 ; Whitfield *et al.*, 2012). Ils sont constitués de bassins sélectionnés selon plusieurs critères : le caractère non-influencé des débits observés, la qualité des mesures de débits et la longueur des chroniques de débits observés. En appliquant des critères restrictifs pour sélectionner des bassins versants non-influencés, on risque d'avoir un réseau de référence essentiellement composé de petits bassins versants (Falcone *et al.*, 2010), et donc non représentatifs des grands bassins versants. On risque également d'avoir un réseau de référence pas suffisamment dense pour être exploitable (Benke, 1990). En appliquant des critères moins restrictifs, on risque de se retrouver avec un réseau de référence potentiellement influencé par certaines activités humaines et donc potentiellement non exploitables selon les besoins de l'étude.
- Reconstruction d'une référence naturelle : afin de passer d'un débit influencé à un débit naturel, les méthodes de naturalisation, à bases mathématiques, peuvent être utilisées. Leur avantage est qu'elles permettent d'avoir une référence naturelle sur le bassin cible durant la période influencée. Il n'existe cependant pas d'études analysant les forces et faiblesses des différentes méthodes existantes.

Dans cette thèse, nous nous intéresserons à l'obtention d'une référence naturelle grâce aux méthodes de naturalisation, car, comme présenté dans la partie suivante, ce sont des méthodes largement utilisées dans la littérature et dont les résultats servent de référence dans le cadre législatif, notamment en France.

1.1.2 Exemple d'application des méthodes de naturalisation pour des objectifs de gestion en France

Estimation de l'équilibre quantitatif de la ressource. En France, les autorisations de prélèvements d'eau dans une rivière résultent d'un compromis entre la ressource disponible et le débit réservé (aussi appelé débit minimum biologique), correspondant à un débit minimal permettant de garantir en permanence la vie, la circulation et la reproduction des espèces présentes (article L.214-18 du Code de l'environnement, https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000006833152/2017-02-26). Sur les bassins influencés, l'estimation de ces deux variables de référence se fait grâce à l'application de méthodes de naturalisation. La ressource en eau disponible correspond au débit naturalisé obtenu. De même, le débit réservé est déduit du module de débit naturalisé obtenu sur le cours d'eau. Le débit réservé correspond au dixième du module du cours d'eau, sauf à l'aval des ouvrages assurant la production d'électricité et sur les cours d'eau dont le module est supérieur à $80 \text{ m}^3/\text{s}$ où il correspond alors au vingtième du module. On retrouve également dans d'autres pays européens des indices hydrologiques qui sont utilisés pour définir un débit environnemental (Delus *et al.*, 2014).

Projection de la ressource à long terme. La planification à long terme de la ressource en eau est un enjeu majeur auquel font face les gestionnaires. En effet, à l'horizon 2050, l'augmentation de la population à l'échelle mondiale (USCB, 2019) s'accompagnera d'une plus grande sollicitation de la ressource en eau pour répondre à la demande énergétique, domestique, agricole et industrielle (Golubev et Biswas, 1984 ; UNESCO, 2015). De plus, du fait du changement climatique (Collins *et al.*, 2013), l'évolution de la ressource est incertaine. Il n'y a pas de réponse unique quant à l'impact combiné de ces deux facteurs sur la ressource en eau : dans certains cas, cela risque de créer ou d'exacerber des tensions liées à l'usage de l'eau ; dans d'autres cas, la combinaison des deux entraîne une augmentation de la ressource en eau (Döll et Zhang, 2010 ; Mittal *et al.*, 2016). Pour

avoir une perception de l'évolution de cette ressource sur les bassins versants, des études d'impacts sont menées (Chauveau *et al.*, 2013 ; Chazot *et al.*, 2012 ; Dorchies *et al.*, 2014 ; Magand, 2014b ; Sauquet, 2009). L'estimation de la ressource en eau future et l'évaluation des impacts liés au changement climatique s'appuient sur la ressource en eau passée. La plupart des débits observés étant influencés par les activités humaines (Dynesius et Nilsson, 1994 ; Vörösmarty et Sahagian, 2000), les débits naturels représentatifs de la ressource en eau doivent être estimés grâce à des méthodes de naturalisation.

Le cas des concessions hydroélectrique. En France, l'hydroélectricité constitue la première source d'énergie d'origine renouvelable. Les installations hydroélectriques appartiennent à l'État et l'hydroélectricité est réglementée par ce dernier, depuis la loi du 16 octobre 1919 relative à l'utilisation de l'énergie hydraulique (<https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000498687>). Dans le cas du suivi d'une concession hydroélectrique ou dossier de fin de concession, l'exploitant doit fournir les chroniques de débits naturalisés en entrée du barrage à un pas de temps journalier.

1.2 Cadre de la thèse

Pas de temps adopté. Le choix du pas de temps dépend des besoins de l'étude. Dans les études de volumes prélevables réalisées en France afin d'estimer l'équilibre quantitatif de la ressource, certains indices hydrologiques représentatifs de l'écoulement durant la période de basses eaux doivent être calculés sur des chroniques journalières de débits naturalisés. Dans le cas des débits réservés, ces derniers sont également issus de chroniques de débits journaliers. Du fait de ces besoins en opérationnel, le pas de temps adopté dans cette thèse est le pas de temps journalier.

Influences considérées. Plusieurs activités humaines sont susceptibles d'impacter le débit observé : le changement d'occupation du sol, les prélèvements de surface et souterrains et les rejets en rivière, et les ouvrages de stockage tels que les barrages-réservoirs. La difficulté d'accès à l'heure actuelle à des chroniques suffisamment longues de prélèvements à un pas de temps inférieur à l'annuel ainsi qu'à leur localisation, nous a conduit à ne pas prendre en compte cette influence. Cette thèse traitera essentiellement du désinfluen-
cement des débits dans les bassins où existent de grands barrages-réservoirs du fait de la

disponibilité des données de variations des volumes dans les réservoirs à un pas de temps journalier sur des périodes longues et de leur impact potentiellement significatif sur le cycle hydrologique du bassin versant. En France, l'impact des grands barrages-réservoirs a déjà fait l'objet d'une étude spéciale de l'Office français de la biodiversité (OFB) (Cipriani et Sauquet, 2014).

1.3 Focus sur l'impact des barrages-réservoirs

Un barrage désigne un ouvrage artificiel construit en travers d'un cours d'eau, permanent ou non, et capable de retenir l'eau (Chocat, 2014). Le réservoir désigne l'étendue d'eau formée par accumulation à l'amont du barrage. Par la suite, le terme barrage-réservoir désignera le barrage et la retenue qu'il crée (Payan, 2007).

1.3.1 Rôle des grands barrages-réservoir

Les grands barrages-réservoirs dans le monde. Selon la Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB), un barrage est défini comme grand s'il a une hauteur d'au moins quinze mètres. Un barrage-réservoir ayant une hauteur comprise entre cinq et quinze mètres peut être considéré comme grand si la capacité de son réservoir est supérieure à trois millions de mètres cubes. En 2019, la CIGB estime à environ 58,000 le nombre de grands barrages dans le monde, dont 49% sont à fonction unique et 17% sont polyvalents. Les données sur les fonctions des 34% restants ne sont pas disponibles. D'après la CIGB, l'irrigation est la raison la plus courante pour construire un barrage, suivie de la production d'hydroélectricité, de l'approvisionnement en eau potable, du contrôle des crues, des activités récréatives et de la navigation.

Les grands barrages-réservoirs en France. En France, le décret du 12 mai 2015 du Code de l'Environnement (https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000030594166) encadre le classement des barrages. Les barrages sont classés selon un paramètre K tel que $K = H^2 \times \sqrt{V}$, où H correspond à la hauteur du barrage (en mètres) et V au volume d'eau dans le réservoir (en millions de mètres cube). Les barrages de types A, qui correspondent donc à la définition de ce que l'on considère

comme un grand barrage en France, ont une hauteur d'au moins 20 mètres et un K d'au moins $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-5}$. Selon le CFBR (Comité Français des Barrages et Réservoirs), il y a en France et en outre-mer 200 barrages correspondant à la classe A (figure 1.2).

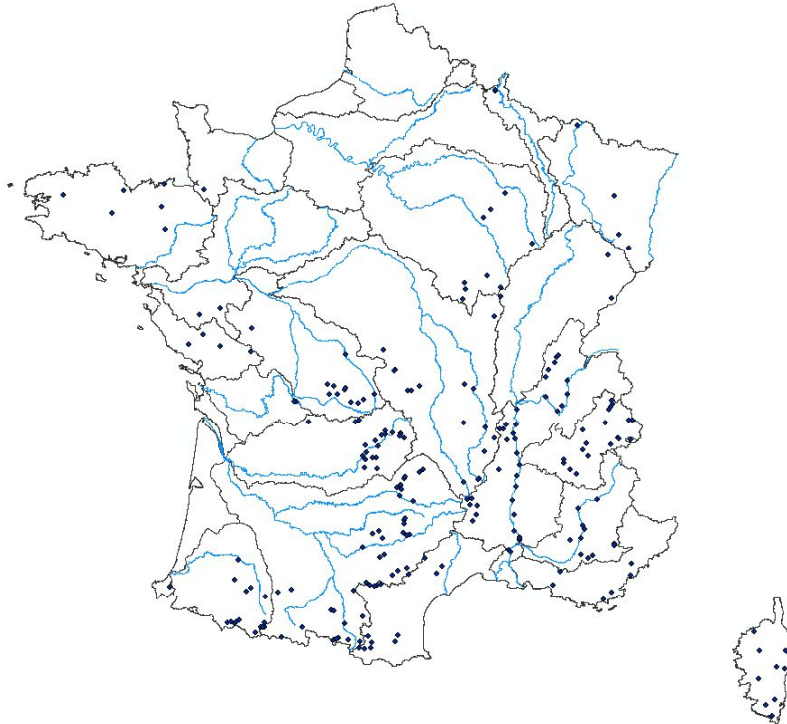


Figure 1.2 – Carte de localisation des barrages de classe A en France métropolitaine selon la base de données SIOUH (Système d'Information des Ouvrages Hydrauliques), fournie par INRAE Lyon.

1.3.2 Impacts associés aux barrages-réservoirs

Les barrages-réservoirs impactent de plusieurs manières le fonctionnement des rivières : s'ils permettent de régulariser l'écoulement, ils modifient le régime hydrologique, perturbent les conditions écologiques, fragmentent l'habitat de la faune aquatique, font obstacle aux déplacements des grands migrateurs, diminuent les capacités d'autoépuration, modifient les processus d'érosion et de transport solide et stockent les sédiments et les polluants (Chocat, 2014). Les modifications hydrologiques causées par les barrages-réservoirs ont deux origines (McCully, 2001) : les impacts dus à l'existence du réservoir et les impacts dus au mode de gestion du barrage-réservoir. Les impacts dus au mode de gestion dépendent du rôle et de la localisation du barrage.

Les impacts dus à l'existence du réservoir

La construction d'un barrage-réservoir change le tronçon amont du barrage en réservoir et modifie donc la dynamique des écoulements et leur temps de résidence. Selon Blöschl (2005), alors que le temps moyen de résidence de l'eau dans les rivières à l'échelle globale est de seize jours, le temps de résidence dans les réservoirs artificiels est de soixante-douze jours en moyenne. La présence de cette masse d'eau stagnante, créée par le barrage, va modifier plusieurs composantes du cycle hydrologique local, notamment :

- **L'évaporation** : plusieurs études, cherchant à quantifier l'empreinte hydrique de l'hydroélectricité, se sont penchées sur l'évaporation des retenues artificielles. Il en ressort que l'évaporation d'un réservoir artificiel dépend plus de sa taille que du climat (Mekonnen et Hoekstra, 2012). Cependant, les réservoirs situés en zones subtropicale et tropicale auront généralement une évaporation plus élevée que les réservoirs en zone tempérée. En France, on estime que l'évaporation des barrages-réservoirs correspond à 0.7% de la ressource en eau disponible (Margat et Andréassian, 2008).
- **Les précipitations** : des travaux ont été menés pour savoir si la présence de grands réservoirs altère le climat, et donc les précipitations (Degu et Hossain, 2012 ; Haberlie *et al.*, 2016). Cependant, l'altération du climat relevant d'un autre domaine de compétence, nous n'approfondirons pas la question par la suite. Nous ne considérerons que l'apport des précipitations correspond à la pluie tombant directement sur la surface libre du réservoir.
- **L'infiltration** : certains barrages-réservoirs ont vocation à recharger les nappes phréatiques. Ces barrages-réservoirs seront donc conçus afin d'avoir un taux d'infiltration important. Pour ce qui est de l'infiltration des autres barrages-réservoirs, il n'existe que très peu de littérature à ce sujet, les sites recherchés pour la construction de barrages étant précisément les moins perméables. Quelques travaux ont cependant été publiés dès lors que l'infiltration paraissait anormale (Ammar *et al.*, 2006 ; Hien et others, 1996).

Dans leur expertise sur l'impact cumulé des retenues et notamment des barrages-réservoirs sur l'hydrologie, Molénat *et al.* (2016) présentent une revue d'études ayant chiffré ces différents impacts selon des estimations ou observations.

Les impacts dus au mode de gestion du barrage-réservoir

Comme évoqué précédemment, les barrages sont construits à plusieurs fins : contrôler les pics de crues, produire de l'hydroélectricité ou encore assurer une réserve permanente en eau potable. Le rôle du barrage conditionne son mode de gestion. En hydroélectricité, la gestion dépendra de la rentabilité de la production ; en agriculture, elle dépendra du besoin des cultures ; pour la protection des crues, on souhaitera garder le réservoir aussi vide que possible et, pour la ressource en eau, on souhaitera toujours avoir un réservoir aussi plein que possible (Margat et Andréassian, 2008). Ainsi, chaque barrage ayant un mode de gestion spécifique, les impacts des barrages et leurs amplitudes sont propres à chaque ouvrage. Les principaux impacts potentiels associés au mode de gestion des barrages-réservoirs sont :

- La modification du volume total d'écoulement : une partie du débit en amont du barrage-réservoir ne parvient pas jusqu'à l'aval du barrage. Ceci peut s'expliquer par l'évaporation du réservoir ou encore par les prélèvements qui sont effectués directement dans le réservoir.
- Le changement de la saisonnalité des débits.
- Les fluctuations temporaires : cela concerne essentiellement les barrages hydroélectriques dont les lâchers sont liés à la demande en électricité dans la journée. Ainsi, le débit du fleuve Colorado à l'aval du barrage de Glenn Canyon peut avoir un débit qui varie de plus de 425 m³/s d'un jour sur l'autre (WCD, 2000).
- La modification des débits de crues et d'étiages.

L'ampleur de ces changements dépend du régime hydrologique influencé. Assani *et al.* (2005) distinguent trois types de régime influencé induit par la gestion des barrages-réservoirs : le régime d'inversion correspond à une inversion complète du cycle hydrologique naturel, le régime d'homogénéisation est caractérisé par une faible variation des débits durant toute l'année, et le régime de type naturel est caractérisé par l'absence de changement des périodes d'occurrence des débits mensuels maximaux et/ou minimaux.

1.4 Questions traitées dans la thèse

L'état de l'art (chapitre 2) nous a permis d'identifier les questions suivantes :

Quelles sont les différentes méthodes de naturalisation proposées dans la littérature ? Bien que les méthodes de naturalisation servent pour l'obtention de débits naturels de référence, il n'existe à ce jour pas d'état de l'art présentant les différentes méthodes de naturalisation existantes et les différentes problématiques associées. Le chapitre 2, basé sur une analyse des études appliquant des méthodes de naturalisation, présente une synthèse des méthodes existantes et de leurs conditions d'application, et propose une classification des méthodes selon les données qu'elles utilisent. Une discussion portera sur la clarification de la terminologie employée en naturalisation, sur le choix de la méthode et enfin sur les sources d'incertitudes associées aux méthodes de naturalisation.

Quelles différences existe-t-il entre les chroniques de débits naturalisés obtenus avec les différentes méthodes ? Dans la littérature, plusieurs méthodes de naturalisation se différencient par leurs hypothèses d'application et les outils qu'elles nécessitent. Un des axes de recherche abordés dans cette thèse est d'identifier les différences entre les débits de référence obtenus selon différentes méthodes de naturalisation. Afin de pouvoir évaluer ces différences dans des conditions d'application variées, le chapitre 3 présentera la base de données mise en place, composée de 127 bassins versants et 60 barrages-réservoirs. Le chapitre 4 évalue les différences entre les débits naturalisés obtenus avec les différentes méthodes de naturalisation sans a priori sur leur applicabilité, selon les caractéristiques climatiques et des barrages-réservoirs amont.

Dans le contexte réglementaire actuel, où l'on se réfère à une valeur unique de débit naturalisé, à quelle chronique de débit naturalisé peut-on se référer ?

En France, la valeur du débit réservé d'un cours d'eau va conditionner sa gestion. Bien que cette valeur comporte des incertitudes, la législation contraint à se référer à une valeur unique du débit réservé. Le chapitre 5 propose d'évaluer les hypothèses d'applicabilité de chacune des méthodes pour écarter les méthodes non-adaptées. Le chapitre 6 propose un cadre d'application des méthodes de naturalisation pour les évaluer dans un contexte similaire. En partant du principe que chacune des méthodes comporte des faiblesses, une approche combinatoire des débits naturalisés obtenus avec les différentes méthodes de naturalisation est proposée. Ce chapitre sera illustré par deux cas d'études complets.

Quel niveau de confiance peut-on associer à chacune des méthodes de naturalisation ? Les débits naturalisés obtenus sont, la majorité du temps, considérés comme des références exactes du débit naturel. Or, ces débits naturalisés se fondent, d'une part, sur des hypothèses, et correspondent, d'autre part, à des sorties de modèle. Dans le chapitre 7, nous évaluerons l'incertitude globale associée aux méthodes de naturalisation en appliquant ou en adaptant des méthodes déjà existantes.

2

Etat de l'art sur la naturalisation

Ce chapitre est constitué d'un article accepté par *Hydrological Sciences Journal* en septembre 2020.

Résumé

Durant les dernières décennies, plusieurs méthodes de naturalisation ont été développées afin de passer d'un débit influencé à un débit naturalisé. Par abus, dans les études, ce débit naturalisé est souvent considéré comme une estimation exacte du débit naturel alors que la validité des hypothèses sous-tendant ces méthodes et les incertitudes associées aux débits naturalisés ne sont souvent pas évaluées.

Cet article présente les différentes méthodes de naturalisation existantes dans la littérature et propose une classification de ces dernières selon les données qu'elles utilisent. Cet article discute également de la terminologie employée en naturalisation et du besoin de clarifier cette dernière.

Un large ensemble d'études développant ou appliquant des méthodes de naturalisation est passé en revue. Pour donner un exemple plus concret, l'accent est mis sur les études de volume prélevable menées en France.

2.1 Introduction

2.1.1 Natural, influenced and naturalized flows

It is now established that humans have fundamentally affected the continental hydrological cycle through the impoundment of rivers, land use changes, water extractions and the long-term effect of climate change (Dynesius et Nilsson, 1994 ; Steffen *et al.*, 2011 ; Vidal, 2019 ; Vörösmarty et Sahagian, 2000). Since the 1950s, there has been phenomenal growth of human enterprise, which resulted in an exponential increase in the number of large dams and water consumption (Steffen *et al.*, 2015). These human influences have a significant impact on observed river flows, which will be qualified as "influenced" in the rest of this paper. As highlighted by the Panta Rhei decade launched by the International Association of Hydrological Sciences (IAHS) in 2013, knowledge of the interactions between humans and water remains limited (Montanari *et al.*, 2013). Therefore the natural and anthropogenic (i.e. generated by human activities) parts of the observed flows are

distinguished (Littlewood et Marsh, 1996).

In case of existing upstream human influences, observed flows are generated both by natural processes and human activities. Therefore natural flows cannot be directly measured and must be estimated. Thus two main types of approaches are adopted to get natural flows :

- **Using reference high-quality flow observation** : Reference Hydrologic Networks (RHNs) have been established in several countries (Burn *et al.*, 2012 ; Whitfield *et al.*, 2012). The gauging stations are selected for having stable land-use conditions in upstream catchment, no significant regulation, enough record length, active data collection, high data quality and adequate metadata (Whitfield *et al.*, 2012). They represent how catchments respond to climate variability and serve as reference to hydrological trends induced by climate-driven changes and to regionalization.
- **Using naturalization methods** : in case there are human influences, dedicated methods have to be applied to retrieve the natural flow regime from influenced flow in a target basin. The natural flow estimates are then called naturalized flows.

In this article, we will focus on the second type of approach. Naturalization methods use various sources of information depending on their availability, typically observed influenced flows, volumes linked to human influences, flows observed before or after the period of influence, or non-influenced regional flows. Naturalization methods are all based on models, some of which are very crude (typically a water balance equation) and others are more complex and comprehensive. Hydrological models, representing the rainfall-flow relationship at the catchment scale, or routing models, representing the upstream-downstream flow propagation, are commonly used in naturalization methods. In case of insufficient or too coarse data on influences, models may be also needed to generate information on these influences.

2.1.2 Why do we need natural flows ?

As noted by the Canadian Science Advisory Secretariat (MPO, 2013), the flow of a river is the main variable that connects ecosystem components along a river corridor via hydrological, biological, geomorphological, and water quality processes. As a result, natural flow can be typically used as a reference to estimate hydrological response to

climate regime, to evaluate the ecological state of a river (Poff *et al.*, 1997) and to estimate the quantity of water available. Here we detail three domains for which natural flows are needed and naturalization methods can therefore be helpful.

- Ecological impact assessment. Naturalization methods contribute to evaluate the anthropogenic impacts on ecosystems. Comparing naturalized streamflows against influenced ones provides a way to assess the anthropogenic impact on the natural environment (Poff *et al.*, 1997 ; Rahman et Bowling, 2018). The degree of alteration corresponds to the difference between naturalized and observed streamflows (Jacobson et Galat, 2008), or the difference between indicators computed on these streamflows (Richter *et al.*, 1996). These indicators include the magnitude of monthly flows, magnitude and duration of annual extreme floods, timing of annual extreme floods, frequency and duration of high and low pulses, and rate and frequency of flow changes (Birkel *et al.*, 2014 ; De Girolamo *et al.*, 2015 ; Fantin-Cruz *et al.*, 2015 ; Fernández *et al.*, 2012 ; Laizé *et al.*, 2014 ; Ryo *et al.*, 2015).

The classical approach to quantify the degree of alteration consists in using the observed natural flow from a pre-influence period. However, if these observations are not available or on a too short duration to give a robust estimates of hydrological indicators (Fantin-Cruz *et al.*, 2015), naturalization methods can provide an estimation of natural flow based on data from the influenced period only. Moreover, observed natural flows over the pre-influence period may not be representative of the climate and physical conditions of the influenced period due to natural evolution and variability. So they may not be exploitable for human impact studies. Naturalization methods also make it possible to separate the impact due to anthropogenic pressures (local or regional) and the impact caused by climate change, and to quantify them. The anthropogenic impact corresponds to the difference between the naturalized and observed streamflow during the influenced period. The climatic impact corresponds to a difference between the naturalized flow over the influenced period and the observed natural flow of an earlier period. As an example, naturalization has been applied in China to quantify climatic and anthropogenic impacts : on the Haihe River basin (Bao *et al.*, 2012 ; Wang *et al.*, 2013 ; Zhan *et al.*, 2013), the Yellow River basin (Hu *et al.*, 2015 ; Li *et al.*, 2007 ; Wang *et al.*, 2010), the Miyun reservoir (Ma *et al.*, 2010), the Yangtze River basin (Li *et al.*,

2013) and Poyang Lake (Gu *et al.*, 2017), the Laohahe River basin (Jiang *et al.*, 2011) and the Shiyang River basin (Huo *et al.*, 2008). Similarly, in Australia, the CSIRO (2008) conducted the Sustainable Yields project to assess climate change impacts on the Murray-Darling basin, at a detailed basin scale.

- Climate impact issue. In a context of climate change, many studies prefer to focus on projections of "natural streamflows", even in heavily influenced rivers, because it would be too complex to address the issues of climate change and water use changes at the same time. Therefore, flow naturalization becomes necessary to serve as a baseline, as well as to calibrate hydrological models. For example, in the case study of the Seine River, Dorchies *et al.* (2014) used the naturalized streamflow on the 1990-2011 period to calibrate a model to estimate the future available water resources for the 2046-2065 period. On a larger scale, in the SCENES project (water Scenarios for Europe and Neighbouring States), Laizé *et al.* (2014) used the naturalized streamflow on the 1961-1990 period as a baseline to estimate the future of freshwater resources for 2040-2069.
- Water resources management. In many countries, regulations on the authorization of abstractions and discharges into rivers, and on the good ecological status of rivers, are based on naturalized hydrological indicators. The environmental conditions enabling governmental agencies to protect, restore or rehabilitate rivers, can be linked to components of the natural flow regime (Poff *et al.*, 1997). Two of the main approaches to obtain an environmental flow regime are linked to the natural flow regime (Acreman et Dunbar, 2004) : the look-up tables approach is based on the statistical properties of the natural flow regime and the desktop analysis approach is based on the natural seasonality and variability of flows. These methods, failing to have access to observed natural flow, use a naturalized flow regime. In a regulation context, management of water resources appears essential to satisfy the supply of drinking water, preserve the ecological status of the aquatic environment, limit the negative consequences of floods and droughts, and provide water for different economic needs such as industry, agriculture, fishing and electricity (European Commission, 1997). In this perspective, naturalized flow can be used to simulate different water management scenarios and the impact of these scenarios on the quantity of available water (Desconnets *et al.*, 1998 ; Dunn et Ferrier, 1999 ;

Kim et Wurbs, 2011 ; Maurel *et al.*, 2008 ; Wurbs, 2006).

Naturalization methods constitute also one of the fundamental element supporting water management policies. For example, the Water Framework Directive typically appeals to natural conditions to define the natural status of a river (Bouleau et Pont, 2015). In France, naturalization methods are used to estimate maximum water extractions sustaining environmental flows (Fabre *et al.*, 2016). In the UK, the Environmental Agency developed guidelines to provide naturalized low-flow statistics to enable regulators to make licensing decisions (Bullock *et al.*, 1991 ; Holmes *et al.*, 2002 ; Young *et al.*, 2003). These results make it possible, in particular, to define the maximum possible withdrawals to maintain good ecological status (Acreman *et al.*, 2008).

2.1.3 Key challenges around naturalization

Flow naturalization faces several challenges. From a theoretical point of view, a naturalized flow could be defined as a flow observed in the absence of human activities in the catchment upstream of the gauging station. However, the definition of a natural status of a catchment may be difficult for various reasons, e.g. when the catchment characteristics and the human influences have been co-evolving over a long period. Therefore, there is not always a clear distinction between the influenced period and the pre- or post-influenced periods, which may limit the naturalization process.

Another issue lies in the lack of justification in the choice of naturalization methods in many studies. The application of naturalization methods raises hypotheses, in particular in terms of transposition in space and time, which seem rarely verified. This may limit the reliability of naturalized flow estimates.

Last, naturalized flows are often implicitly considered to be an accurate estimate of natural flow. In practice, naturalized flows include uncertainties arising from method assumptions, data and models used. It is therefore important to be transparent about these uncertainties to avoid mis-use of natural flows data when uncertainty is large.

2.1.4 Objectives

The main objective of this article is to provide a review on the issue of flow naturalization. More specifically, this paper intends to (1) provide an overview of the naturalization methods, their assumptions and associated tools, and (2) highlight the scientific issues raised by the application of naturalization methods commonly done in scientific or operational studies.

Establishing a corpus of studies on naturalization methods is not straightforward. Indeed, naturalization methods used to estimate flow series free from anthropogenic influence are rarely the main focus of scientific publications, though they remain a necessary step for many issues detailed above. In addition, there is a quite large terminology to address naturalization issues (see the discussion in section 3.1). Therefore, the literature review presented in this article is probably not exhaustive though it encompasses already a wide range of aspects. Selected articles in this review dates back to the 1970s, with a recent increase in publications after 2010, showing a growing interest in this issue in the water management community.

This paper is organized as follows. Section 2 lists the main human influences considered in this paper and their potential impact on the natural hydrological cycle. Then section 3 investigates the concept of naturalized flow and how it is interpreted in the literature reviewed. Section 4 presents the main types of naturalization methods with their underlying assumptions and uncertainties. Section 5 discusses scientific and technical issues associated with naturalization methods, with an example in France. Finally section 6 gives some concluding remarks.

2.2 Potential impact of anthropogenic influences on streamflow

2.2.1 Human impacts considered

A prerequisite for streamflow naturalization is to identify the nature of human impacts and quantify them to determine which influences should be considered in the naturalization process. Figure 2.1 (Botai *et al.*, 2015) summarizes how human activities potentially

affect the different components of the hydrological cycle. The main anthropogenic influences are land cover and land use change, streamflow regulation infrastructure, and withdrawals and discharges associated with different water uses (we did not consider here the impacts of human activities on climate, which ultimately impact water resources). Most of these influences potentially impact several components of the water cycle and so directly or indirectly the observed streamflow. We detail their main impacts in the following paragraphs. Some of these impacts may be interlinked or show counterbalancing effects. For example, in-basin water abstraction and release may compensate to some extent at the catchment scale, with limited net impact on mean flow at the yearly scale. However, they may more deeply modify catchment dynamics at the seasonal or event scale (high or low flows). Other activities will always strongly impact catchment water yields and hydrological dynamics, e.g. inter-basin water transfers.

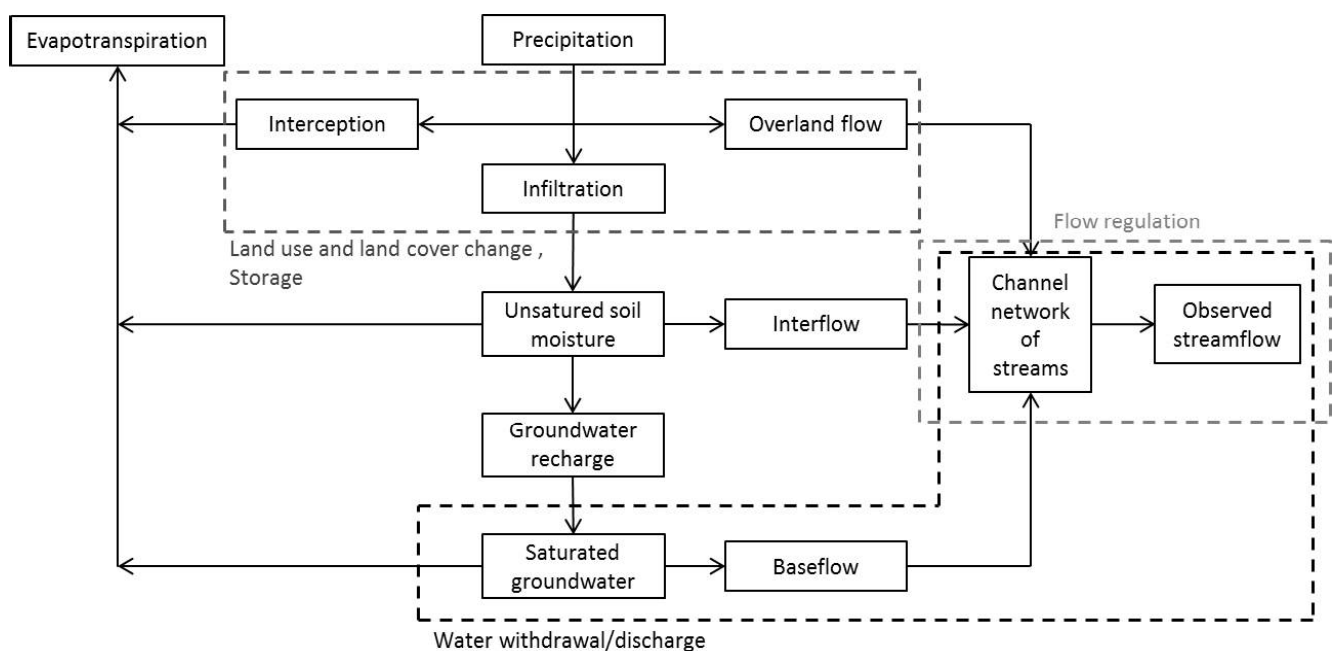


Figure 2.1 – Schematic representation of the impacts of human activities and the water cycle components they may directly impact (derived from Botai *et al.* (2015)).

2.2.2 Dams and their associated storage

Among the 62 studies applying naturalization methods we reviewed, 47 are considering the impact of dams and artificial reservoirs. The hydrological modifications caused by dams have two origins (McCully, 2001) : the impacts due to the management of the

dam (alternating operations of water storage and release) and the impacts stemming from the ponding effect of the reservoir. The presence of the stagnant water body, created by the dam, modifies several components of the local hydrological cycle, including evaporation and infiltration, and local precipitation for large dams (Degu et Hossain, 2012 ; Haberlie *et al.*, 2016). It may also strongly modify water quality (Winton *et al.*, 2019). A permanent rise in the water table downstream can be caused by infiltration from the reservoir. The dam operations, consisting in periods of storage and release, regulate water flows in a way generally opposite to natural processes (typically flood alleviation or low-flow augmentation). They also result in various status of the water body : for flood protection, the reservoir should be as empty as possible and for potable water supply, the reservoir should be as full as possible (Margat et Andréassian, 2008). From a temporal point of view, dams can cause changes in flow seasonality and temporary fluctuations, especially hydro-power dams. The management of hydro-power reservoirs will depend on the profitability of electricity generation ; for agriculture purposes, it will depend on crop needs. Since each dam has specific management rules, the impacts of the dams and their amplitudes are each time specific. Note that the cumulated effect of dams over a catchment may also be considered. This is often the case when there are many small farm dams spread over a catchment. In that case, this is often much more difficult to access data for each dam and a meta-analysis over all dams may be preferred (Dong *et al.*, 2019 ; Fowler *et al.*, 2015 ; Hughes et Mantel, 2010).

2.2.3 Water withdrawal

Water withdrawals refer to the amount of freshwater that is artificially extracted from groundwater or surface water resources. The consumptive use of water corresponds to "the part of water withdrawn that is evaporated, transpired, incorporated into products or crops, consumed by humans or livestock, or otherwise not available for immediate use" (USGS et National Water-Use Science Project, 2019)). In our case, water returned to a different catchment than the point of withdrawal (interbasin transfer) is considered a consumptive use. Therefore the quantity of water withdrawn from a river cannot be considered a good indicator of the actual quantitative impact of withdrawals, and the consumed water quantity should be used instead. According to the report of the World Water Development Program (WWAP, 2009), agriculture is the largest consumer of water

with 90% consumption for drip irrigation and 50-60% for surface irrigation. The energy sector has the smallest consumption ratio on the order of 1-2% in relative, it's also because they withdraw large amount of water. Domestic uses consume between 10 and 20% of the water withdrawn, and industry between 5 and 10%. These figures, however, remain overall estimates with large variability between regions. Water withdrawal can have a temporal impact because of the time lag between the time the water is withdrawn and the moment when the amount of water not consumed returns to the system (Kendy et Bredehoeft, 2006).

Two sources of water are distinguished : water withdrawn from the groundwater and water abstracted from the surface. Surface water withdrawals have a direct and rapid impact on streamflow. Groundwater withdrawals have an indirect or delayed impact on river flows. Exchanges between surface water and groundwater can occur in both directions : a water table lower than the free surface of the river leads to a recharge of the aquifer by the river ; the situation is reversed if the groundwater level is higher. Disturbance of the river-groundwater table balance can lead to a drop in the water table and/or an increase in the recharge rate, and so indirectly influences streamflow (Theis, 1941). With only four articles considering groundwater abstraction, this type of withdrawals remains limited in our article database, but it is more widespread in operational studies to quantify the available water.

2.2.4 Water release

Water releases refer to the amount of water that is artificially brought to rivers. Two cases of water release can be distinguished : water releases originating from a withdrawal on the basin and the releases from an inter-basin water transfer. Inter-basin water transfer corresponds to the artificial withdrawal of water by ditch, canal or pipeline from its source in one basin for use in another (Slabbert, 2007). The streamflow of the receiving basin can consequently be artificially increased. It can also impact the seasonality of river flows. For example, in several rivers in South African, inter-basin transfers aim to counter temporal variability and reduce the economic impact of a localised drought (Blanchon, 2005). In the case of a release following a withdrawal within the catchment, one part of the water withdrawn having been consumed, the release has a reduced impact on the water resource

quantity but an impact on the temporality of observed streamflow. In the case where the release place differs from the withdrawal place, release can impact the spatial distribution of water resources.

2.2.5 Land use and land cover change

Human activities can lead to a change in land use and land cover through urbanization, agricultural development, afforestation and deforestation. In the article database, human influences related to land use are taken into account in the naturalization process in only eleven studies, although they are the most pervasive anthropogenic impact (Pagano et Sorooshian, 2005). Changes in land use and land cover have an indirect impact on flow. In modifying the quantity of energy absorbed by the surface, the evaporation rate is impacted and the precipitation rate can also be modified in changing the temperature gradient (Giambelluca, 2005). Groundwater recharge and overland flow are also impacted. Moreover, numerous studies on land use and land cover change and its impact on the hydrological cycle have been carried out in relatively small paired catchments (Stednick, 1996), with results difficult to generalize to a larger scale (Siriwardena *et al.*, 2006 ; Zhang *et al.*, 2018). The particularity of land use changes is that the modification of the evapotranspiration-runoff relation at the local scale can impact the regional water balance because of changes in atmospheric circulation (Bosmans *et al.*, 2017 ; Chase *et al.*, 2000 ; Gash et Nobre, 1997).

2.2.6 Combination of human impacts

In practice, observed flow at gauging stations is potentially influenced by several existing human activities in the basin : industries, energy production at the hydroelectric dam, agriculture, recreational activities (e.g. ski resorts, navigation for pleasure boating) and cities (see illustration in figure 2.2).

Flow regulation and direct withdrawal and discharge in rivers lead to a sudden change (typically on a daily basis) in river streamflow, whereas the impacts on the other components of the hydrological cycle can take longer to impact the observed streamflow. The time delay of the impact on the observed flow is also conditioned by the distance between the source of the influence and the gauging station, and by the water pathways. For

example, in figure 2.2, stations A2 and C are both influenced by the dam's management. The A2 station, directly downstream of the dam, is impacted sooner than station C due to shorter propagation time.

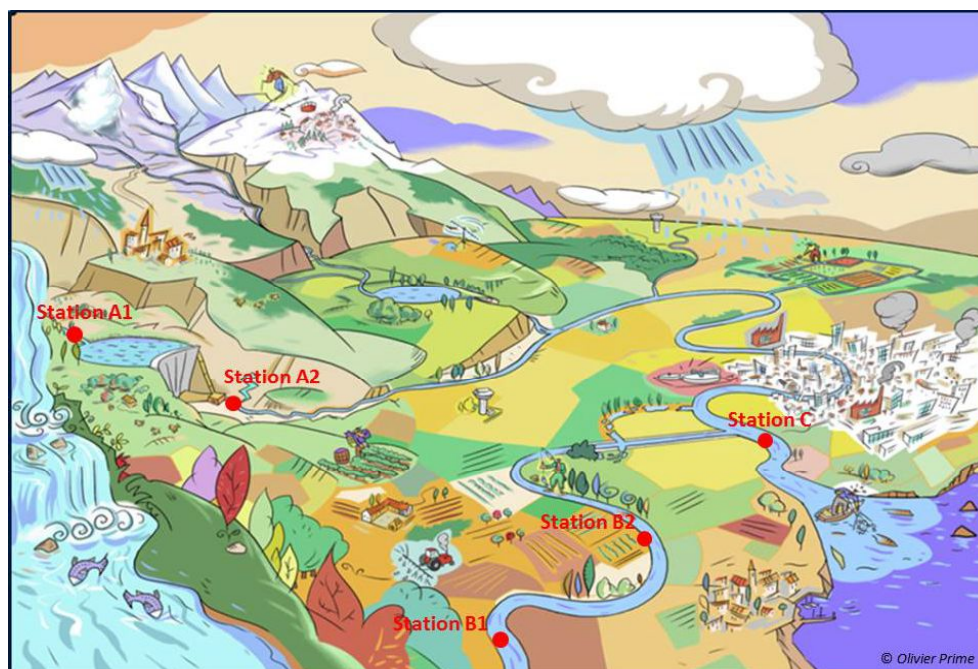


Figure 2.2 – A catchment impacted by human activities : gauging stations A1 and B1 are uninfluenced, gauging stations A2, B2 and C are candidates for naturalization procedures (Source : INRAE).

The importance of the influenced signal contained in the observed streamflow can be conditioned by several factors. Distance plays a role because the intermediate hydrological processes can mitigate the importance of the impact (Mwedzi *et al.*, 2016). Thus, the influence of the dam at station C is much less than at station A2, because dam releases will represent a smaller proportion of the total streamflow at station C than at station A2, due to inflows by the intermediary basin. In the case of basins with multiple influences, there can be compensations of some impacts : dam releases can be planned for agricultural withdrawals downstream, and therefore their impact may not be visible at the catchment outlet, the reservoir can increase groundwater recharge and thus compensate the effects of underground withdrawals in summer (Constantz et Essaid, 2007).

The impact of human activities on flow therefore depends on several factors specific to each basin (type of influence and location, basin characteristics). The following sections present if and how impacts are taken into account in the naturalization process.

2.3 Defining the natural state of the flow regime

In naturalization studies, the purpose is to produce a reference flow regime for influenced rivers. First, the question of what the natural regime of a river corresponds to is addressed, followed by the use and identification of the reference period in studies.

2.3.1 Naturalization terminology

Examples of scientific definitions of "natural streamflow" or "natural regime" are provided in table 2.1. For definitions (D1) and (D3), it is possible to have a natural streamflow despite the presence of anthropogenic factors as long as it does not significantly impact streamflow. Moreover, (D1) and (D2) include the notion of runoff, which can be modified by land use change, without specifying whether it is from a natural or anthropic source. Only (D3), which remains quite comprehensive by referring to "human activity", could take into account this notion of land use and land cover change by human intervention. The first three definitions refer to climate as a variable of the natural regime even though climate change is linked to greenhouse gases emitted by humans. Although (D2) does not refer to the catchment in its natural state, it refers to the drainage network, and thus the aspect of the natural geomorphology of the river. (D4) remains quite general by referring to natural conditions without explaining what they are.

Tableau 2.1 – Definitions of "natural streamflow" and "natural regime" found in the literature.

| Source | Definition |
|---|---|
| New South Wales Scientific Committee in Australia, 2002 | (D1) Natural flow regimes are determined by the climate, run-off, catchment size and geomorphology without the impacts of dams, weirs, extraction and river management (NSW Scientific Committee, 2002). |
| Environmental Protection Agency in the USA, 2015 | (D2) A stream's natural flow regime is a function of the climate and physical properties of its unique upstream drainage area (Novak et al., 2015). |
| Canadian Science Advisory Secretariat, 2013 | (D3) A "natural flow regime" can be defined as a flow regime that is only affected by the variability in hydrological inputs and outputs (precipitation, evaporation) and natural water storage (such as groundwater) and for which the response in terms of amplitude, timing, duration and frequency of events is unaltered by human impacts (DFO, 2013). |
| World Meteorological Organization, 2012 | (D4) Natural flow corresponds to flow in a stream that would occur under natural conditions (WMO, 2012). |

Although there is no common definition of natural streamflow, we summarise the previous definitions as follows : a naturalized streamflow refers to an estimation of the natural flow under specified conditions of river basin development that includes either no human impact or some defined low level of development (Wurbs, 2006).

In the literature, it appears that the streamflow obtained in naturalization is not systematically called "naturalized streamflow" and may be designated by other words which are not necessarily synonymous. We will present the terms by which some authors refer to naturalized flows and discuss the nuances in the definition of naturalized flow that these terms imply. First, there are the terms referring to the influenced state of the basin such as the terms "regulated" or "influenced" streamflow. Following existing definitions of regulated flow (AFB et Ministère chargé de l'environnement, 2016b ; Bureau of Meteorology, 2012 ; Environmental Protection Agency, 2015 ; WaterNSW, 2015), an unregulated streamflow corresponds to a natural flow not impacted by artificial flow-regulation structures. The influences of land-use changes are therefore not included. The terms "uninfluenced" and "unimpaired" flow refer to the flow of an undisturbed stream caused by human interventions and whose flows retain their general characteristics (AFB et Ministère chargé de l'environnement, 2016a). The uninfluenced flow thus takes into account a wider field of influence such as the change of land use and land cover. Other terms refer to the natural state of the catchment such as "flow under natural conditions" and "natural flow". The "simulated natural streamflow" encountered in some studies refers to a naturalized streamflow obtained using a hydrological model. The terms of "reconstructed or estimated natural/virgin streamflow" are synonymous with naturalized streamflow. Although all these terms refer to a naturalized flow, they may not reflect the same natural reference. So, the nuances between these terms must not be forgotten to avoid confusion.

2.3.2 Determination of the basin's baseline condition

As illustrated in figure 2.3, three periods can be distinguished in naturalization. The influenced period corresponds to the period when the observed flows are impacted by anthropogenic influences. Over this period, where no observation of the natural flow is available, one seeks to estimate natural streamflow using naturalization methods.

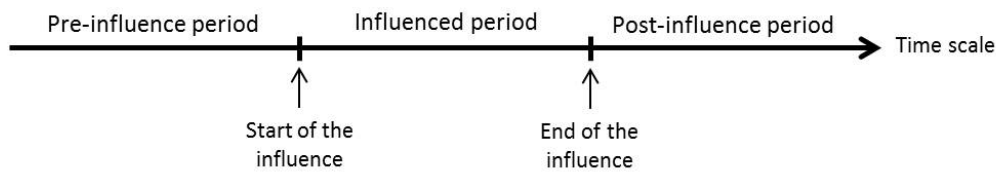


Figure 2.3 – Diagram of the three periods distinguished in naturalization.

The pre-influence period serves as the basin’s baseline condition and is assumed to correspond to a past period when the observed flow is considered as free of the impact of the anthropogenic influences considered in the naturalization processes. Information from this pre-influence period is used by several naturalization methods. However, in many cases, the influence dates back before flow measurements were made and there is therefore no information on natural flows.

The post-influence period corresponds to the period after the influences considered in the basin has ceased and a return to a natural state, which may be different from the state before the influence. This period is also relevant to serve as a natural reference period if the system has enough time to return to uninfluenced conditions. Obviously, the post-influence period does not exist in catchments under active anthropogenic activities. Studies exploiting the post-influence period mainly focus on sediment dynamics and fauna and flora species after a dam removal (Hart *et al.*, 2002 ; Kibler *et al.*, 2011 ; Magirl *et al.*, 2014). Therefore, post-influence periods will not be discussed in this paper, however some comments about the pre-influence period are somewhat transposable to post-influence.

The use of data from the pre-influence and post-influence periods to estimate the natural regime over a later influenced period raises a question about the reversibility of the system : if all activities stopped, would the river be able to return to a natural state that it would have reached if it had never been influenced (Cooper, 2004) ? In some cases, the influence of humans is so old that it has shaped the characteristics of the basin and it represents the new natural condition. For example in southern France, the system Neste was created in the 19th century for irrigation purposes. This network of canals strongly impacted the land use of a large number of small catchments, with conditions now that are very different from those that were before (Tardieu, 2008 ; Villocel, 2002). Still in

France, many wetlands were dried out for sanitary or agricultural objectives, like the Marais Poitevin since the beginning of the 18th century, and it would be difficult to come back to the pristine conditions (Godet et Thomas, 2013).

Theoretically, the separation of the pre-influence and influenced periods should match the start of the influence on the basin. In practice, in the case of dam commissioning, as illustrated for the Aube dam (figure 2.4), the change on the observed flow time series is abrupt and so the separation is easily identifiable. In other cases, like withdrawals or small farm dams, which may gradually appear in the basin and evolve over time, or in the case of gradual land use and land cover change, the date of implementation of all the influences is rarely accessible and there is generally no abrupt change on the observed flow time series, which complicates the separation dating.

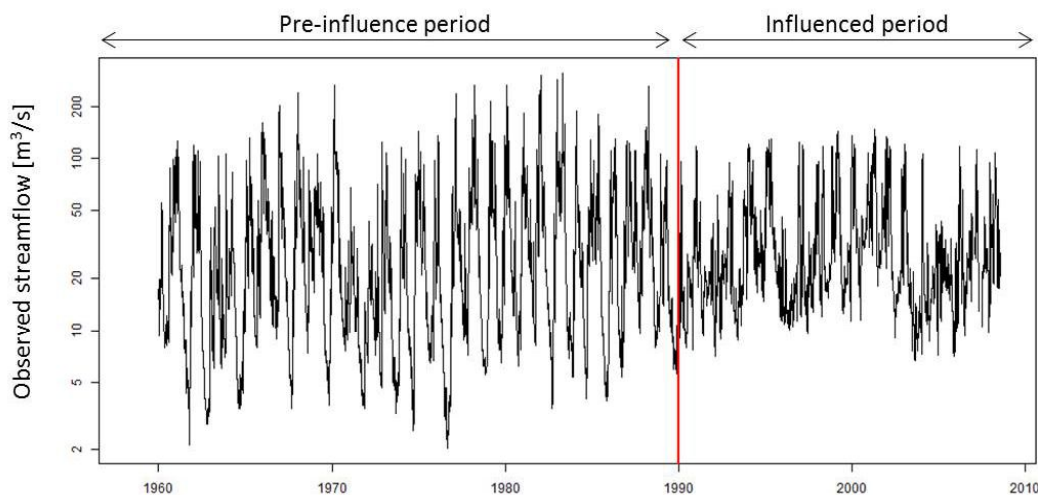


Figure 2.4 – Hydrograph at logarithmic scale of the daily observed streamflow of the Aube River at Arcis-sur-Aube (France, 3560 km²). The red line corresponds to the upstream dam's commissioning in 1990.

In naturalization studies, change-point detection tests (Andréassian *et al.*, 2003 ; Hubert *et al.*, 1989) are mainly used to distinguish the pre-influence and influenced periods (Bao *et al.*, 2012 ; Gu *et al.*, 2017 ; Guo *et al.*, 2014 ; Hu *et al.*, 2015 ; Jiang *et al.*, 2011 ; Wang *et al.*, 2009, 2013 ; Zhan *et al.*, 2013). The identified break point most often corresponds to a statistically significant change in the observed flow time series, but this break can have an anthropogenic origin (dam, urbanization, etc.), be natural (natural change in the morphology of the river) or stem from climatic variability or a data problem (change

in data measurement devices, etc.). With this method, it is important to underline that anthropogenic disturbances can still exist during the period defined as pre-influence (Jiang *et al.*, 2011) and that these influences can therefore impact the naturalized flows obtained.

2.4 Methods to naturalize streamflows

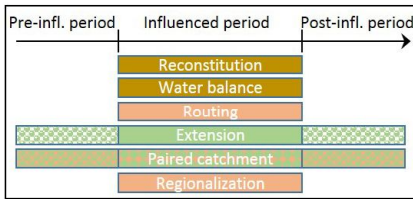
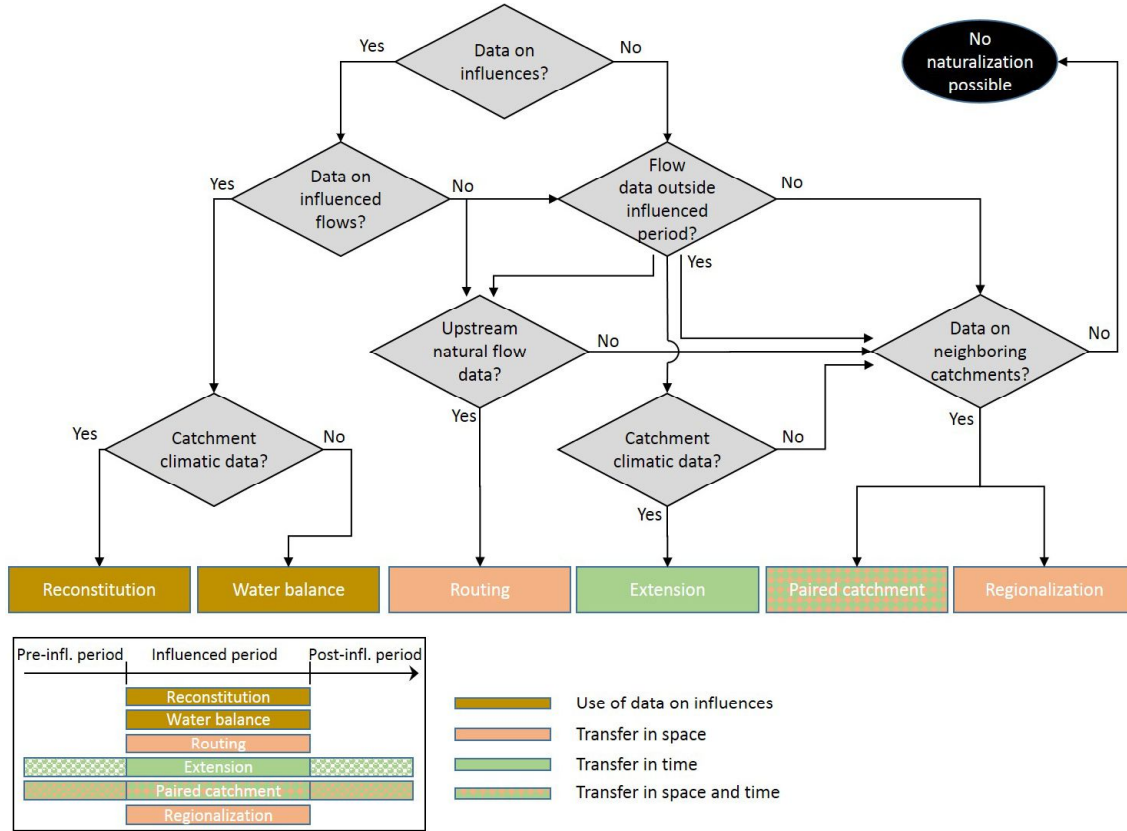
2.4.1 Overview on naturalization methods

We have identified six main naturalization methods in the literature : (1) the reconstitution, (2) water balance, (3) routing, (4) the extension, (5) the paired catchment and (6) regionalization (or neighbourhood) methods. These methods differ mainly by their input data and the underlying models used.

The reconstitution, extension and neighbourhood methods are based on a hydrological model simulating a naturalized streamflow with an estimated set of parameters reflecting the natural hydrological conditions. In reconstitution, failing to have past observations, information on the observed influenced streamflow and the anthropogenic influences are exploited to indirectly estimate the set of parameters. In extension, past observations of natural flows on the target catchment are used to estimate the set of parameters reflecting the natural hydrological conditions. In neighbourhood, the observations that exist on neighbouring basins are exploited to estimate the set of parameters. Although these methods use a hydrological model, they rely on different assumptions and data to obtain the model parameter set.

Figure 2.5 provides a decision tree for the use of the various methods. The starting key question is generally the availability of input data on influences, followed by the availability of data from pre- or post-influenced period, or of regional data. The use of these different data raises hypotheses for the application of the methods. Figure 2.5 shows which methods can be applied based on the available data. If all the data are available, all the methods can be applied. If no data is available, one may end up to the conclusion that no flow naturalization is possible (black ellipse on the graph). In that case, one may appeal to hydrological models implemented at the global scale, which do not require local or regional data. However, the reliability of these models at the local scale remains often limited. That is why this option will not be further discussed in this review.

In the following sections, an explanation of the main hypotheses raised by the naturalization methods is provided in order to identify their application conditions. Figure 2.6 shows which methods are used in our articles database.



- Use of data on influences
- Transfer in space
- Transfer in time
- Transfer in space and time

Figure 2.5 – Diagram of the choice of naturalization according to the available data.

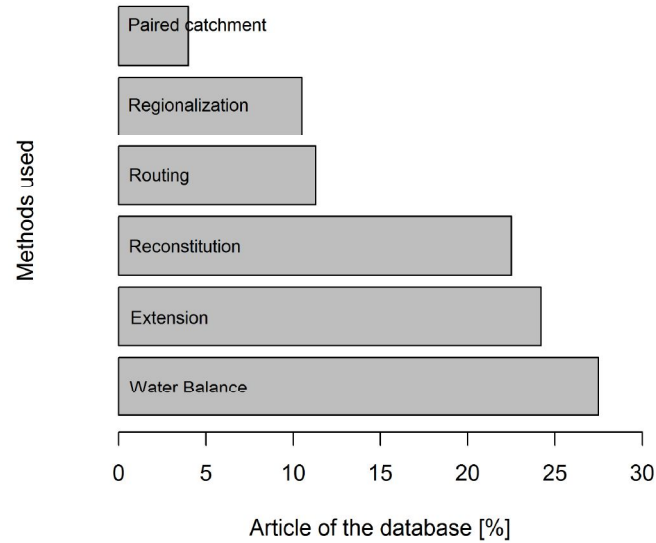


Figure 2.6 – Naturalization methods applied in the studies reviewed.

2.4.2 Methods using data on influences

2.4.2.1 Water Balance

The Water Balance method consists in decomposing flow into a natural part and an influence part, by removing the volume variation in the river induced by the source of influence, ΔV , during the time interval Δt , from the influenced observed flow, Q_{observed} , to obtain the naturalized flow, $Q_{\text{naturalized}}$ (equation 1). The system studied can be a river reach where there is a water withdrawal or release, or a reach downstream of an influence. By convention, in the case of a water discharge, ΔV will be negative. In the case of a water withdrawal, ΔV will be positive. This method is generally applied at a gauging station located downstream of the influences in the river, although in principle it is also applicable to a fictitious point where flow data obtained through regionalization methods are available. Hydraulic propagation between the influence and the station can have an impact on the computation of the naturalized streamflow. The ΔV computed at a moment t will not have an immediate impact on the observed streamflow at the downstream station, but will have an impact at the time $t + \Delta p$, where Δp corresponds to the propagation time. If the propagation time is much lower than the study time step,

then the propagation effect can be ignored. Otherwise, it is advisable to use a propagation model. The choice of time step will define the hydrological processes to be taken into account and their influences to be considered.

$$Q_{naturalized} = Q_{observed} + \frac{\delta V}{\delta t} \quad (2.1)$$

The Water Balance method is the most widely used in the studies. Table 2.2 lists the studies using this method. It appears that this method, mainly constrained by the availability of data, is mostly applied to a daily time step over periods ranging from a few months to several decades. However, if the method is applied over a long period of time, there may be disparities in the quality of the naturalized flows obtained over the entire period. This may be due to the evolution of the quality of the measured flows (Littlewood et Marsh, 1996). In the studies taking into account the influence of dams, it appears that, for the most part, only the impact of dam regulation operations is taken into account (Assani *et al.*, 1999 ; Kim et Wurbs, 2011 ; Naik et Jay, 2005 ; Page *et al.*, 2005 ; Peters et Prowse, 2001 ; Yuan *et al.*, 2017). Some studies also take into account evaporation from the reservoirs (Fantin-Cruz *et al.*, 2015 ; Tongal *et al.*, 2017) and precipitation falling on the reservoirs (Gu *et al.*, 2017), but no studies seem to take into account the underground exchanges induced by the reservoir. For studies taking into account withdrawals, it appears that it is the volume of water consumed that is taken into account in naturalization and not the volume of water withdrawn (Davtalab *et al.*, 2017 ; Littlewood et Marsh, 1996 ; Wallace et Pavvloski, 1988 ; Wurbs, 2006).

Tableau 2.2 – Synthesis of studies applying Water Balance methods.

| Authors | Basins | Size of the catchments | Influence | Time step | Period | Length[year] |
|---------------------------|--|------------------------|--|-----------|-----------------------------------|--------------|
| Irwin et al., 1975 | Venison Creek, Canada | 90 | Irrigation abstraction | Daily | July and August from 1967 to 1969 | 0.3 |
| Wallace et Pawloski, 1988 | Small stream in central Michigan | 78 | Irrigation abstraction | Monthly | From June to August 1983 | 0.3 |
| Littlewood et Marsh, 1996 | Thames basin to Kingston, United Kingdom | 9 950 | Reservoirs and abstraction | Monthly | 1883-1992 | 99 |
| Assani et al., 1999 | La Wache river, Belgium | 118 | Two dams | Daily | 1930-1995 | 65 |
| Peters et Prowse, 2001 | Lower Peace River, Canada | 293 000 | Hydroelectric dam | Daily | 1972-1996 | 24 |
| Wurbs, 2006 | 23 basins in Texas, USA | 648 to 685 000 | | Monthly | | |
| Page et al., 2005 | Murrumbidgee river, Murray-Darling river system, Australia | 84 000 | 26 dams, weir, and irrigation canals | Daily | 1970-1998 | 28 |
| Jiongxin, 2005 | Lijin station (outlet of the river), Yellow river, China | | Diversions | Annual | 1952-1996 | 44 |
| Naik et Jay, 2005 | Columbia river at the Dalles | 660 480 | Irrigation abstraction and dam | Daily | 1879-1928 | 49 |
| Agosta, 2007 | Ariège river at Foix, Garonne, France | 1 360 | Hydroelectric dams | Daily | 1990-2004 | 14 |
| Maurel et al., 2008 | Seine basins, France | 78 000 | Industrial, agricultural and drinking water abstraction | Daily | 1975-2004 | 29 |
| Kim et Wurbs, 2011 | Brazos river basin | 115 565 | Dam and diversions | Monthly | 1998-2007 | 9 |
| Fantin-Cruz et al., 2015 | Correntes river, Brazil | 3 898 | Hydroelectric dam | Daily | 2005-2012 | 7 |
| Tongal et al., 2016 | South Fork Flathead river | 4 248 | Dam | Daily | 1953-2000 | 47 |
| Davtalab et al., 2017 | Karkheh river, Iran | 50 000 | Withdrawal for irrigation and canals | Daily | | |
| Gu et al., 2017 | Poyang Lake, China | 162 200 | 14 reservoirs | | 1961-2013 | 52 |
| Yuan et al., 2017 | Yellow river, China | 752 000 | Irrigation, diversion, reservoirs, withdrawal for industry and civil sectors | Monthly | 1961-2010 | 49 |

2.4.2.2 Reconstitution method

The Reconstitution method is based on the exploitation of the influenced observed streamflow and the information available on influences during the influenced period and on the use of hydrological models taking anthropogenic influences explicitly into account. As illustrated in figure 2.7, the Reconstitution method consists first in calibrating the hydrological model on the influenced observed streamflow taking into account the anthropogenic influences. Then the set of parameters obtained is used to simulate a naturalized streamflow without taking into account the anthropogenic influences. In cases where the signal of influence in the observed flow is predominant over the natural signal, it is important to ensure that the calibrated parameter set is able to reflect the natural catchment behaviour. Step 1 is common to all studies applying the Reconstitution method, with more or less complex calibration methods depending on the model used and the influence considered. There are some variants of step 2, for the estimation of the naturalized streamflow. One variant corresponds to the case where the model output considered is the time series of the influences. The second step then corresponds to the application of the Water Balance method where the volume variation of the influences is added to the observed streamflow (Dunn et Ferrier, 1999 ; Maheshwari *et al.*, 1995 ; Wurbs, 2006). Another more hydraulics-oriented variant, relevant for the semi-distributed and distributed models with an in-stream flow routing, consists at step 2 of propagating the upstream natural streamflow if available (Kim *et al.*, 2012). In the case of an impact of land use and cover change, in the second step the parameter and input corresponding to influenced land use are changed to correspond to the pre-influenced state (Nobert et Jeremiah, 2012 ; Shi *et al.*, 2013 ; Yin *et al.*, 2017 ; Zhang *et al.*, 2016).

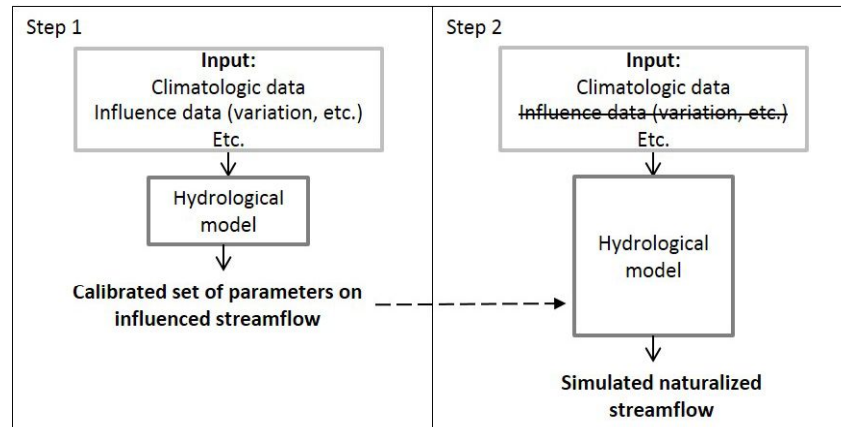


Figure 2.7 – Illustration of the two application steps of the Reconstitution method.

Since studies are often not very explicit in terms of the model calibration with anthropogenic influences, it is difficult to clearly identify which studies apply Reconstitution methods. Table 2.3 presents a synthesis of the models used in studies applying the Reconstitution method, the time step of the naturalized flow, the influence taken into account as input in the studies and the simulated flow. The impact of dams and reservoirs are often the main issue in Reconstitution studies. This can be explained by the fact that their management can be simulated. The second most studied influence is land use and land cover changes, which are taken into account by physically based hydrological models such as SWAT (see table 2.3). The semi-distributed spatial resolution is adopted by most studies. In the case of large catchments, the influences can be localized in space and attenuation of the influences along the river are more accurately considered.

Tableau 2.3 – Synthesis of studies applying Reconstitution methods.

| Study | Name | Spatial resolution | Temporal scale | Reservoirs and associated withdrawals in input | Reservoirs and associated withdrawals model | Imigation in input | Crop model | Land use and land cover | Withdrawal for domestic and industrial purpose |
|----------------------------|--|--------------------|----------------|--|---|--------------------|------------|-------------------------|--|
| Maheshwari et al. (1995) | Model of the Murray-Darling Commission | Semi-distributed | Monthly | Yes | No | No | No | No | No |
| Gosain et al. (2005) | SWAT | Semi-distributed | Daily | Yes | No | Yes | No | Yes | No |
| Kim et al. (2012) | SWAT | Semi-distributed | Daily | Yes | Yes | No | No | No | No |
| Nobert and Jeremiah (2012) | SWAT | Semi-distributed | Daily | No | No | No | No | Yes | No |
| Shi et al. (2013) | SWAT | Semi-distributed | Daily | No | No | No | No | Yes | No |
| De Girolamo et al. (2015) | SWAT | Semi-distributed | Daily | No | No | Yes | Yes | No | Yes |
| Zhang et al. (2016) | SWAT | Semi-distributed | Daily | No | No | No | No | Yes | No |
| Yin et al. (2017) | | Semi-distributed | Daily | No | No | No | Yes | No | No |
| Morin et al. (1975) | CEQUEAU | Distributed | Daily | Yes | Yes | No | No | No | No |
| Desconnets et al. (1998) | CEQUEAU-ONU | Distributed | Daily | Yes | Yes | No | No | No | No |

2.4.2.3 Comparison

The Reconstitution and Water Balance methods are based on the hypothesis that by knowing the impacts of the various influences on the observed flow, it is possible to have a naturalized flow free from these influences. As no study has made a comparison between the Reconstitution method and the Water Balance method, it is not possible to know which one is the most suitable. However, here are a few elements that differentiate these methods and may guide their choice :

- Data availability. The Water Balance method requires time series data on the entire period to naturalize. The advantage of the Reconstitution method is that once the parameter set has been obtained, it is theoretically applicable to other periods.
- Setting up the model. The Water Balance method seems to be easier to apply than the Reconstitution method which requires the implementation of a hydrological model on the basin. However, the use of a hydrological model can facilitate several steps such as estimating the volumes of influences that can be incorporated into the model or estimating travel time. It is difficult to say a priori which method will be easier to apply. This depends primarily on the catchment area and the influences considered.

2.4.3 Methods using observation from the pre-influenced period

2.4.3.1 Extension method

The Extension method is based on the exploitation of observed data of the target catchment from the pre-influence period and on the use of a hydrological model able to simulate the natural streamflow of the target catchment. The required data for the pre-influence period are at least the natural observed streamflow and the input data required by the model. On the influenced period, the input data required to use the model are necessary. The Extension method consists in calibrating the hydrological model on the natural observed streamflow of the pre-influence period and then in using the set of parameters obtained on the influenced period to simulate a naturalized streamflow (figure 2.8).

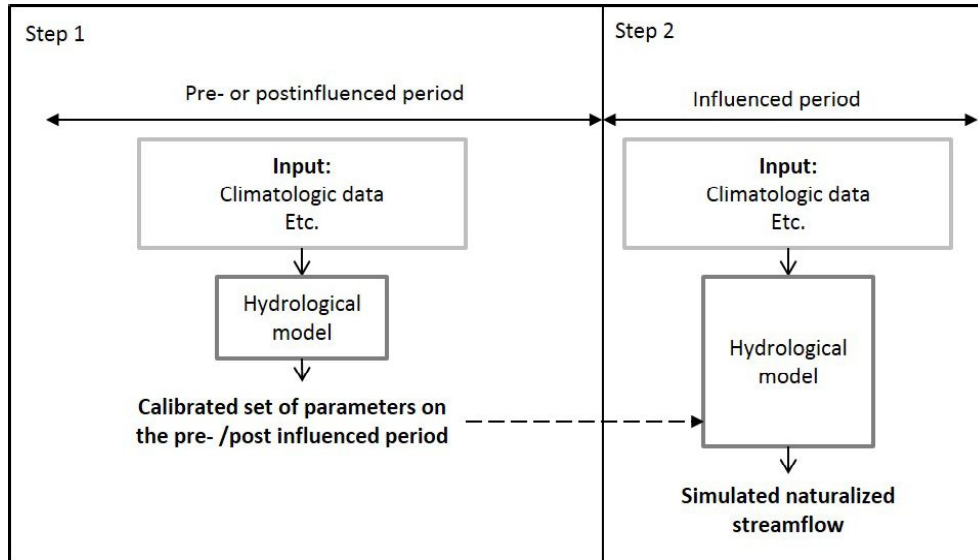


Figure 2.8 – Illustration of the two application steps of the Extension method.

Table 2.4 presents an overview of the studies applying the Extension method and the hydrological models used. The common point of the models is their ability to simulate a natural flow. The models used in these studies show differences in terms of the type and level of complexity. Some studies used empirical models which establish a purely mathematical relationship between natural flow and weather variables over the pre-influence period. Wen (2009) established a multi-regression model with the precipitation and the maximum temperature data at the monthly time step; Jiang *et al.* (2011) built a multi-regression model with the precipitation and the potential evapotranspiration; Ahn et Merwade (2014) also take into account the drainage area. Other studies applied more complex models such as conceptual hydrological models (Chang *et al.*, 2015; Guo *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2013; Zhan *et al.*, 2013), or physical models (Bao *et al.*, 2012; Chang *et al.*, 2015; Jiang *et al.*, 2011; Ma *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2010). Jiang *et al.* (2011) and Chang *et al.* (2015), who used models of different types, showed that the results obtained with the two models are comparable.

Tableau 2.4 – Synthesis of studies applying Extension methods.

| Authors | Catchment | Country | Influence | Model | Time step | Calibration period | Naturalization period |
|---------------------------|---|-----------|---|--|------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| Siriwardena et al. (2006) | Comet River basin (1 400 km ²) | Australia | Land use and land cover change | SIMHYD (Chiew et al., 2008) | Daily | 1970-2000 | 1970-2000 |
| Wen (2009) | Murrumbidgee river (84,000 km ²) | Australia | Fourteen dams and eight large weirs | Regressive model | Monthly | 1889-1920 | 1921-2007 |
| Ma et al.(2010) | Junction of Chao and Bai River basin (15,800 km ²) | China | Direct withdrawal for irrigation and land use changes | GBHM (Yang et al. 2002, 1998) | Hourly | 1956-1965 | 1984-2005 |
| Wang et al. (2010) | Baimasi basin (13,915 km ²), Yellow River | China | River water withdrawals for irrigation, land use changes | VIC model (Liang et al., 1994) | Daily | 1961-1970 | 1971-2000 |
| Jiang et al. (2011) | Laohahe basin (18,112 km ²) | China | Agricultural and industrial withdrawals, dams and reservoirs | 1. Multi-regression 2. VIC model | 1. Monthly 2. Daily | 1964-1979 | 1980-2008 |
| Bao et al. (2012) | Three catchments of the Haihe River (from 1,800 to 24,000 km ²) | China | Surface water and groundwater withdrawals for fam, industry and population and land use changes | VIC model (Liang et al., 1994) | Daily | 11/16 years in the 1952-1972 period | 5/40 years in the 1965-2004 period |
| Wang et al. (2013) | Haihe River basin (189,000 km ²) | China | Surface water and groundwater withdrawals for farming, industry and population and land use changes | Two-parameter monthly hydrological model (Xiong and Guo, 1999) | Monthly | 1957-1978 | 1978/1980-2000 |
| Zhan et al. (2013) | Bai River (9,228 km ²) | China | Dams, farmland | SIMHYD (Chiew et al., 2008) | Daily | 1986-1990 | 1991-1998 |
| Ahn and Merwade (2014) | 103 Stations in New York, Indiana, Arizona and Georgia | USA | | Regression (Jiang et al., 2011) | Monthly | 1950-1979 | 1981-2010 |
| Guo et al. (2014) | Weihe River (30,661 km ²) | China | Agricultural irrigation, industrial development, dam construction | HBV model | Daily | 1972/1975-19 | 1985-2007 |
| Chang et al. (2015) | Jinghe River basin (45,400 km ²) | China | Withdrawals | 1.TOPMODEL 2.VIC model (Liang et al., 1994) | 1. Monthly 2. Daily | 1960-1970 | 1971-2010 |

2.4.3.2 Paired catchment method

This method is explained here but also partly belongs to the family of methods exploiting regional information (see figure 2.5). This method is based on the implementation of a statistical flow-rate relationship between the target station to naturalize and natural donor stations over the pre-influence period. The natural donor catchment is generally a catchment that is spatially close to (but not nested in) the target catchment, with similar size. There is no hydrological model involved in this method. This approach is not limited to cases of experimental basins to evaluate land use and land cover changes (Brown *et al.*, 2005). To naturalize the flows of La Grande Rivière in Canada, (Hernández-Henríquez *et al.*, 2010) established a flow-rate relation over the pre-influence period by applying a variant of the Hirsh MOVE I method (Hirsch, 1982). On the Lena River in

the Arctic, influenced by a reservoir dam, Ye *et al.* (2003) established a regression on the pre-influence period between a station downstream of the dam and five natural upstream uninfluenced stations. Smakhtin (1999) proposed the same principle for catchments in South Africa. In China, Huo *et al.* (2008) established flow-rate relationships, including climatic variables (precipitation and temperature), between the uninfluenced upstream and downstream stations. The relation proposed by Huo *et al.* (2008) differs from the conventional paired basin methods (Andréassian *et al.*, 2012b) because they also use climatic information. Other variants exploiting the paired catchment relationship can be applied without parameter calibration. The drainage area ratio method (Hirsch, 1979) and different variants, requiring only an access to the catchment's area value, are applied in many naturalization studies (Kim, 2015 ; Rahman et Bowling, 2018 ; Wurbs, 2006). In any case, these approaches make the strong assumption that the departure of observed influenced flows from the relationship with paired catchment flow would be due to the influence only, which may not be always the case.

2.4.3.3 Comparison

Extension and Paired catchment methods are based on the hypothesis that relations established over the pre-influence period are stationary and remain valid over the influenced period. For the Extension method, running a hydrological model under climatic conditions that are different for the calibration period can generate uncertainties (Coron *et al.*, 2012). The source of these uncertainties can be partly explained by the fact that, in the models, several physical parameters (soil, vegetation, etc.) are related to climatic conditions. The calibration of the model creates an interaction between the parameters and the climatic characteristics of the calibration period. The robustness of the model is usually tested on the pre-influence period by calibrating the model on a sub-period and validating it on another one (Bao *et al.*, 2012 ; Guo *et al.*, 2014 ; Jiang *et al.*, 2011 ; Wang *et al.*, 2010, 2013). For the Paired Catchment method, the limitation is the climatic gradient between the basins, which could lead to the two basins evolving differently. On the pre-influenced period, similar climatic conditions, landforms, soils, vegetation and hydrological processes between the basins can reduce the uncertainties associated with the natural evolution state of the target catchment (Hernández-Henríquez *et al.*, 2010). These two methods can be distinguished by their level of complexity. The Extension me-

thod requires a rainfall-runoff model and meteorological data as input, whereas the paired basins method is simpler because it consists in establishing a relationship between two neighbouring catchments and only requires streamflow measurements. Despite these differences in complexity, Andréassian *et al.* (2012b) showed that the paired basin methods can give better performance than the use of a rainfall-runoff model when the density of gauging stations is quite high.

2.4.4 Methods using regional information

2.4.4.1 Routing modelling

Routing models can propagate the observed streamflow from upstream to downstream. In the case where the upstream recorded streamflow is uninfluenced, it can be propagated by a hydraulic model (or other simpler propagation or statistical methods) to obtain a naturalized downstream streamflow.

Table 2.5 presents studies applying Routing modelling methods to naturalize. The influences taken into account in these studies directly affect flows due to infrastructures built in the river. In these studies, the hydraulic models used assume that the river bed topography is still the same without the dams or levees. The implementation of Routing modelling methods is often time consuming and requires many data to calibrate the hydraulic model (Shiklomanov et Lammers, 2009). This is especially the case when important transmission losses occur and must be accounted for (Hughes, 2019 ; Pacheco-Guerrero *et al.*, 2017). When the upstream flows are influenced, the flow can be naturalized and then propagated using a hydraulic model (Peters et Prowse, 2001). Another variant consists in using a hydraulic model that explicitly takes into account the different structures (dam, weir, levee, etc.) that may alter streamflow. The model is first calibrated on the flow conditions of the influenced period. Then, to obtain a naturalized flow, the various obstacles are removed from the propagation model (Ahn *et al.*, 2006 ; Peters *et al.*, 2006 ; Wyrick *et al.*, 2009). Wu *et al.* (2015) assume that the hydraulic propagation has no impact and sum the natural upstream flows to naturalize.

Tableau 2.5 – Synthesis of models used in studies applying Routing modelling methods.

| Authors | Catchment | Country | Influence | Model |
|--------------------------------|--|---------------|---------------------------------|--|
| Peters and Prowse (2011) | Lower Peace River (293 000 km ²) | Canada | Hydroelectric dam | Hydraulic: one-dimensional hydraulic flood routing model |
| Ahn et al. (2006) | Illinois river | United States | Seven locks and dams, 36 levees | Hydraulic (UNET) |
| Peters et al. (2006) | Peace-Athabasca Delta (6000 km ²) | Canada | Hydroelectric dam | Hydraulic: one-dimensional hydrodynamic model |
| Shikdomanov and Lammers (2009) | Large Russian Arctic rivers | Russia | Reservoirs | Hydraulic: hydrograph routing model |
| Wyrick et al. (2009) | Mantua Creek (19 km ²), New Jersey | United States | Two small dams | Hydraulic (HEC-RAS) + Hydrology (HEC-HMS) |
| Wu et al. (2015) | Taiwan (680 km ²) | Taiwan | Reservoirs and diversions | |

2.4.4.2 Regionalization

Regionalization methods exploit the similarity between catchments to estimate streamflow. Although mainly used for ungauged or poorly gauged basins, their application in naturalization studies is an interesting option for several reasons. First, the Water Balance and Reconstitution methods require good knowledge and an access to the data used to characterize the influences, whereas regionalization methods are usable on a basin with limited data (Hernández-Henríquez *et al.*, 2010 ; Ye *et al.*, 2003). Secondly, the principle of the Extension methods is based on the temporal transposability of streamflow. Regionalisation methods can be viewed as a variant based on spatial transposability.

Regionalization of the hydrological regimes and flow duration curves. In the case where only the flow characteristics of the natural basin's behaviour are investigated and not complete time series are sought, the regionalization of a hydrological regime can be used. For example, in Switzerland, the natural monthly regimes of Alpine basins have been classified into six groups according to the average altitude of the catchments and the proportion of their glacier-covered area. Therefore, due to the physical characteristics of the influenced catchments and an estimate of the average annual flow, Weingartner et Aschwanden (1994) estimated their natural monthly regime, with an uncertainty ranging from 10 to 20%. In Spanish basins, Fernández *et al.* (2012) estimated the naturalized monthly flow with a hydrological model at the influenced stations. Then, to estimate the naturalized regime at a daily time step, they calculated daily distribution coefficients on neighbouring natural stations. These distribution coefficients were then applied to the

naturalized monthly flows that had a naturalized daily regime. Here, since the focus is on methods for obtaining naturalized flow time series, the methods of this subsection will not be further discussed. However, they remain used operationally in many countries, in cases where only synthetic streamflow descriptors are needed.

Neighbourhood method. The Neighbourhood method consists in estimating the hydrological model parameters on natural neighbouring basins. The selection criteria for natural neighbouring basins are related to geographical distance or the physical characteristics of the basins (Hrachowitz *et al.*, 2013). This method is not currently used on gauged stations in naturalization studies. However, like the Extension and Reconstitution methods it uses a hydrological model with an alternative approach to estimate the model parameter. It may be of particular interest when there are no existing natural flow data on the pre-influence period nor on the influences themselves during the influenced period.

2.4.4.3 Comparison

In this family, the Routing method seems to be a priori the method giving the best estimate of natural flow since it directly exploits measurements of natural flows upstream of the basins. However, in the case where the intermediate basin has a significant influence on the flow, it may be necessary to also use a hydrological model to simulate the contribution of the intermediate flow (Wyrick *et al.*, 2009). It is also a complex method to use in the case of large transmission losses between the upstream and downstream station (e.g. in arid regions) (Schreiner-McGraw et Vivoni, 2018). The Paired catchment method can also be applied in cases where upstream uninfluenced flow measurements are available. What differentiates it from the Routing method is that it is based on a flow rate relationship that can indirectly take into account the inflows from the intermediate basin. Like the Paired Catchment method, the Neighbourhood method also exploits information from basins with a natural regime. The significant difference between these two methods is that Neighbourhood is primarily aimed at transferring parameter sets from a natural catchment to the influenced catchment. The assumptions involved in these methods, and their strengths and weaknesses, have been the topic of several studies within the framework of the IAHS decade on Prediction in Ungauged Basins (Hrachowitz *et al.*, 2013 ; Sivapalan *et al.*, 2003).

2.5 Discussion

2.5.1 Defining naturalized streamflow

When discussing the definition of a natural regime, we showed that there is no consensus on what a naturalized flow and the natural state of a basin should exactly refer to. This impacts the choice of the reference period in the various studies. In practice, the definition of naturalized streamflow should be a compromise between :

- Our knowledge of the interactions between human activities and the water cycle and the limit of the definition to be adopted. Since the water cycle is linked to several other environmental cycles (energy, chemistry, sedimentation, etc.), this raises the question of the natural state of these other environmental cycles and their interactions with the water cycle. Typically, the issue of defining a natural reference in the climate or ecological domains has been discussed and results from a compromise between knowledge, data availability and objectives in the use of the reference (Brázdil *et al.*, 2005 ; Davis, 2015 ; Gatti *et al.*, 2015 ; Roubicek, 2010).
- A definition not too restrictive to be applicable to a large number of case studies. Ideally, the reference conditions should correspond to minimally disturbed conditions (Stoddard *et al.*, 2006), i.e. conditions where there is no significant anthropogenic disturbance. In practice this would be very constraining because it is difficult nowadays to access data from basins that are not disturbed by human activities. In Europe, there are no data on the natural state of a catchment because the continent has long been densely populated, and the landscapes and land use have been modified by human presence (Stahl *et al.*, 2010). Moreover, in some studies, only the naturalization of major influences is desired. In some cases, the naturalized flow can be obtained by removing a single influence to quantify the role of the influence in the observed flow.

The summary of previous definitions we gave in section 3.1 may meet this compromise. This is actually a key issue when establishing hydrometric reference networks. Since they should be representative of natural flow conditions, the question of the criteria to be met in order to consider the corresponding catchments as natural references is raised (Whitfield *et al.*, 2012). It appears that the definition of conditions vary between national

networks. In Canada, where there are many catchments in pristine conditions, criteria are more rigorous whereas the impact of influences on natural flow regimes is visible across much of the UK rivers for instance.

The current perspectives would be to define the naturalized flow as corresponding to a more or less natural state of the basin and to express which influences and associated impacts are considered in each study. Another perspective is to use a more comprehensive approach, consistent with the definition of naturalized flow chosen, to identify the pre-influence period. In the reviewed studies applying naturalization methods, the methods to identify the reference period are currently limited to change-point detection tests, which raise several issues concerning the origin of the change-point. It would also be interesting to have methods to detect a certain level of influence on the basin.

Although defining terms appears essential to understand and compare studies, the definition process can lead to a reflection on the role of the influences in the methods and the hypotheses raised. For example, in the case of the Extension method, setting it at a pre-influence period may imply to account for change in land use to obtain the naturalized flow.

2.5.2 Choice of naturalization methods

By comparing the characteristics of the studies with the choice of the naturalization methods applied, it appears that the same methods are applied on basins with different areas, from the basin scale (100 - 10,000 km²) to the regional scale (100,000 - 1,000,000 km²), and with different influences. Methodological aspects of the studies such as the time step and the length of the available time series to naturalize do not seem to play a major role in the choice. This raises the question of the criteria that can motivate authors to choose one method over another.

2.5.2.1 Data availability

From a practical point of view, data availability is the first selection criterion (table 2.6), which is also reflected in the decision tree illustrated in figure 2.5. Thus, the Water Balance and Reconstitution methods use data on influences. The Paired Catchment and

Neighbourhood methods need data on non-influenced catchments. The Routing modelling method requires a natural upstream flow to propagate it downstream. The Extension and Paired Catchment methods need data on the past observed natural streamflow. It is clear that several of these methods are relatively similar and that they differ only in the tools used. In this section, we will discuss the aspects that can influence the choice of the applied methods.

Tableau 2.6 – Synthesis of input data and tools used by each of the naturalization methods.

| | Data required | Water Balance | Reconstitution | Extension | Paired Catchment | Neighbourhood | Routing modelling |
|--------------------|---|---------------|----------------|-----------|------------------|---------------|-------------------|
| Based on access to | Influenced period information: | | | | | | |
| | _ Influenced observed streamflow | X | X | | | | |
| | _ Influence volume time series | X | X | | | | |
| | Uninfluenced period information: | | | | | | |
| | Natural observed streamflow on a pre- or postinfluence period | | | X | X | | |
| Tool used | Regional information: | | | | | | |
| | _ Upstream natural flow | | | | X | X | X |
| | _ Natural observed streamflow on neighbourhood catchment | | | | X | X | |
| | Hydrological model | | X | X | X | X | |
| | Hydraulic model | X | | | | | X |
| | Mass balance method (catchment area scaling, equipercetile methods, etc.) | X | | | | | |

2.5.2.2 Distance between the source of influence and the target gauging station

Distance is taken into account by the Water Balance and the Routing modelling methods with the propagation time, and by the Reconstitution methods, which take it into account according to the structure of the model used and the parameters. For the transfer modelling family methods, in the case where intermediate hydrological phenomena such as runoff or river-groundwater exchanges have a potential impact on the routed flow, a hydrological model should be used to simulate them.

2.5.2.3 Type of influences

In the transfer modelling family, Routing modelling methods are used only to take into account influences that directly impact the flow, as is the case for dams and withdrawals. For the Water Balance method, all the influences and their associated impact on the

hydrological cycle could theoretically be taken into account via the ΔV . In practice, indirect impacts on river streamflow are easier to take into account with a hydrological model family method.

In the hydrological method family, theoretically the entire impact on the hydrological cycle could be considered. In practice, the type of influences present in the basin seem to impact the choice of methods. In studies that take into account land use and land cover changes in their naturalization process, only Extension and Reconstitution methods are used. The Extension method is calibrated on the basin conditions before the evolution of the cover. The Reconstitution method makes it possible to take the land cover directly into account during the calibration and then to modify it. As land use changes indirectly modify the flow, it is easier to take these interactions into account with a hydrological model. For the Regionalization methods, this would require a neighbouring basin with a land cover similar to the influenced basin in its natural state. These methods could be applied on small experimental Paired Catchments (Brown *et al.*, 2005) but do not seem to be applicable to large catchments.

Regionalization methods are applied on catchments which are strongly influenced by dams and other influences. This can be explained by the fact that it is now difficult to access databases with completely uninfluenced catchments. Weingartner et Aschwanden (1994) explain that Regionalization methods are easier to apply in cases where the hydrological conditions encountered are very complex, as in multi-influenced basins. The complexity of the influences and their impact on the catchment could be a limit of the Reconstitution method. For example, in the case where irrigation return flow is taken into account, the difficulty in quantifying them (Dewandel *et al.*, 2008) may lead to eliminating the choice of Reconstitution method.

2.5.3 Operational implementation of naturalization methods : the case study on the Rhône basin (France)

From theory to practice, it is always useful to see the way practitioners implement methods proposed in the scientific literature. We describe a case study from France. In France, one of the objectives of the Law on Water and Aquatic Environments (LEMA in French) of 30 December 2006 is to restore the balance between water supply and demand. Consequently, studies of withdrawable water volumes were carried out at the catchment

scale in order to determine the quantitative state of water resources and then to propose a preservation strategy of the existing balance or reduce the deficit. These studies include several phases, including an important phase on the identification and quantification of anthropogenic influences and a phase on the estimation of the water resource using naturalization methods. The reports produced at the end of these studies are a useful source of information on the application of naturalization methods in operational contexts. Because low-flow periods are of particular concern, naturalized flows are preferentially obtained at a daily scale to calculate drought indicators.

Among the many reports available, we made a selection over 20 basins in the Rhône-Mediterranean Water Agency district (figure 2.9). These reports were generally produced by consulting firms and were chosen here in order to have the widest possible panorama (table 2.7). Naturalization methods were applied on sub-basins from a few dozen to several hundreds of square kilometres. Note that a study at the scale of whole Rhône basin (BRL Ingénierie, 2014b) produced monthly naturalized flows on a set of 17 sub-basins using mainly Water balance approaches (and in a few cases hydrological modelling to extend time series).

With regard to the choice of methods, the most widely used methods are the Water Balance and the Reconstitution methods. The choice of the methods is not clearly justified but can be explained by several factors. First, all influences in the basin are taken into account. This excludes the Extension method where it is almost impossible to have a period when there is no withdrawal, and the Regionalization method where it is also complicated to have neighbouring basins with no withdrawals. However, a variant of the Neighbourhood method used in an operational context consists in calibrating the hydrological model on the naturalized flow of the upstream influenced sub-basins, and then to use the set of parameters obtained on the influenced downstream basin (CEREG Ingénierie, 2011). Moreover, in these studies considerable preliminary work is undertaken to identify and quantify the anthropogenic influences present in the basins. This facilitates the application of the Water Balance and Reconstitution methods.

The synthesis of these reports also highlights the implementation of hybrid naturalization methods to address data gaps. Given that hydrological indicators are calculated on the naturalized flow series, the times series must be long enough. These hybrid versions are

presented as a solution in cases where the observational data on influence and streamflow are too short. One version is to first naturalize the streamflow with the Water Balance method and then to apply the Extension method in calibrating the hydrological model on these naturalized flows. Inversely, the influenced flow time series can be extended with a hydrological model and then be naturalized with the Water Balance method. It should be noted that each addition of steps in the naturalization process is a potential source of uncertainty.

In the terms of reference of these studies, authors were requested to clarify the limits and uncertainties related to the naturalization process. The level of reflection is very heterogeneous depending on the studies. It appears that most of the authors were able to identify sources of uncertainty. The main sources of uncertainties cited were the streamflow data, the data on the influence and the climatic data used as model input and model calibration. No study has clearly quantified the global uncertainty of the naturalized streamflow obtained. In the Les Gardons catchment, it was highlighted that a 7% error on the naturalized flow had an impact on the study conclusions.

2.5.4 Level of confidence associated with naturalized streamflow

The previous section on the operational application of naturalization methods in France showed that there is a request on how to assign a level of confidence to naturalized flow. Because naturalized streamflow is used as a reference for many applications (as discussed in section 2.1.2), it is important to quantify the associated uncertainties in order to make robust decisions (Refsgaard *et al.*, 2007). The error associated with naturalized flows is not directly quantifiable because there is no observation of natural flows over the influenced period. The estimation of the confidence in the methods can therefore only be done indirectly. Among the articles analysed, there does not currently seem to be a methodology to evaluate the naturalization process. In this part, we discuss how to indirectly estimate the confidence in results.

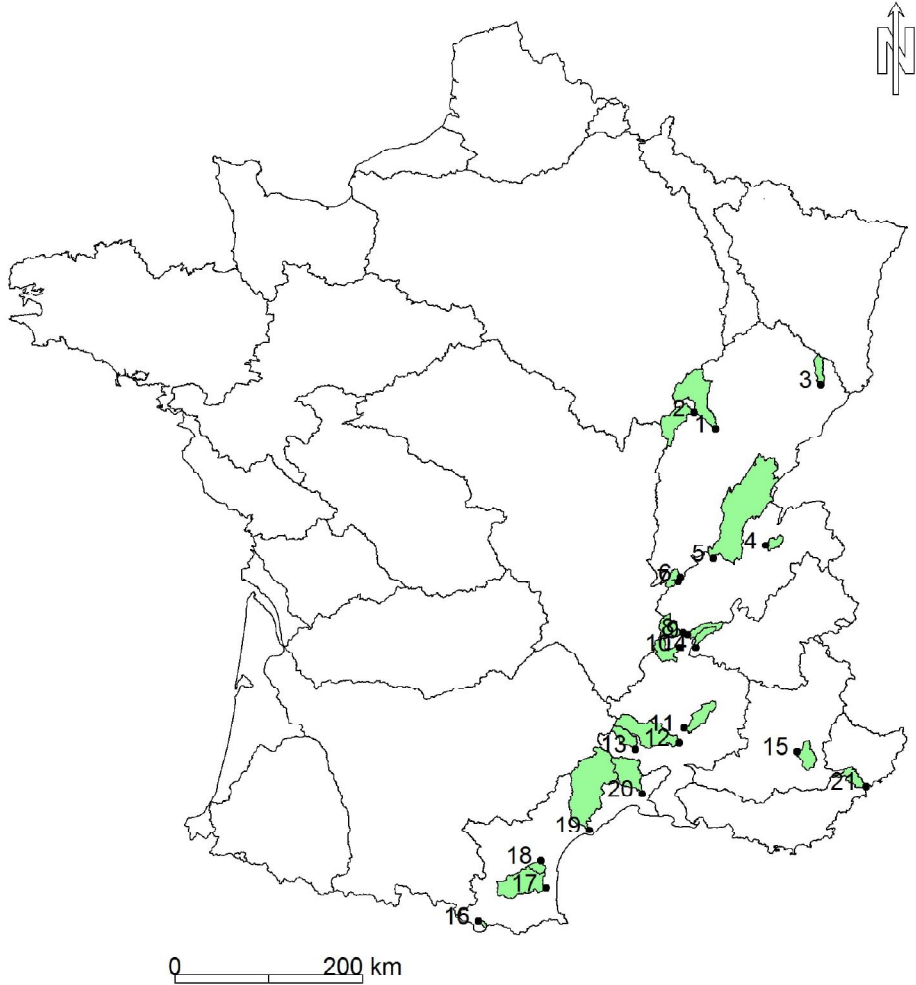


Figure 2.9 – Map of the withdrawable water volumes in the catchments studied (Rhône-Mediterranean district).

Tableau 2.7 – Synthesis of withdrawable water volume studies. WB corresponds to the Water Balance method, R to the Reconstitution method, E to the Extension method and N to the Neighbourhood method.

| Index | Catchments | Area [km ²] | Influences | Naturalization method | | | | Models | Reference |
|-------|-----------------------|-------------------------|---|-----------------------|---|---|---|---|---|
| | | | | WB | R | E | N | | |
| 1 | La Cance | From 11 to 380 | Withdrawals and discharges, and farm dams | X | | | X | GR2M | BRL Ingénierie (2014) |
| 2 | Le Loup | 283 | Dam and withdrawals | X | | | X | Groieau-pixel monthly model | Département des Alpes-Maritimes (2013) |
| 3 | Les Gardons | From 69 to 2034 | Withdrawal for water supply, agriculture and industry, and dam | X | | | X | GR4J | BRL Ingénierie (2015) |
| 4 | Basse vallée de l'Ain | 3630 | Five dams and, surface and groundwater withdrawals | | X | | | Modflow | SOGREAH Consultants et EPTEAU (2012) |
| 5 | Drôme des collines | 470 | Withdrawals | | X | | | Conceptual semi-distributed daily model | Artelia Eau et Environnement et Maison régionale de l'Eau (2012a) |
| 6 | Hérault | 2622 | Withdrawals | | X | | | ATHYS and hydrogeological model with withdrawal module | CEREG Ingénierie et Berga Sud (2015) |
| 7 | La Galaure | 240 | Withdrawals | | X | | | Conceptual semi-distributed daily model | Artelia Eau et Environnement et Maison régionale de l'Eau (2012b) |
| 8 | Lez provençal | From 110 to 455 | Surface and groundwater withdrawals for irrigation and water supply | | X | | | Hydrological model (ATHYS) and hydrogeological model (MODFLOW) with withdrawal module | CEREG Ingénierie et al. (2013) |
| 9 | Ouche | 916 | Surface and groundwater withdrawals | | X | | | Semi-distributed model | SOGREAH et al. (2011) |
| 10 | Tille | 1300 | Surface and groundwater withdrawals | | X | | | NAM (MIKE11) | SAFEGE Ingénieurs Conseils (2011) |
| 11 | L'Asse | 692 | Withdrawals | | X | | X | ATHYS with withdrawal module | CEREG Ingénierie (2011) |
| 12 | La Berre drômoise | 138 | Withdrawals | X | | | | | Société du Canal de Provence et ASCONIT Consultants (2012) |
| 13 | L'Agly | From 157 to 1100 | Surface and groundwater withdrawals, and dam | X | | | | | GINGER Environnement & Infrastructures (2012a) |
| 14 | Le Sègre | | Withdrawals for irrigation, water supply, industry and artificial snow, and hydroelectric dam | X | | | | | SOGREAH (2012) |
| 15 | Le Vidourle | 800 | Surface and groundwater withdrawals, and dams | X | | | | | GINGER Environnement & Infrastructures (2012b) |
| 16 | Les Usses | 310 | Withdrawals | X | | | | | Risques et Développement et Maison régionale de l'Eau (2012) |
| 17 | Savoireuse | 235 | Withdrawals and farm dams | X | | | | | Cabinet Reilé (2012) |
| 18 | Le Garon | 208 | Groundwater withdrawals, farm reservoirs, inter-basin transferts, dam, irrigation | X | | X | | GR2M | BRL Ingénierie (2013) |
| 19 | Yzeron | 150 | 130 farm dams, inter-basin transfert, irrigation | X | | X | | GR2M | BRL Ingénierie (2012) |
| 20 | Le Doux | 630 | Withdrawals and discharges, dams and farm reservoirs | X | | X | | GR4J | ISL (2011) |
| 21 | La Cèze | 1359 | Withdrawal for water supply, agriculture and industry, and dam | X | | X | | GR2M | BRL Ingénierie (2011) |

2.5.4.1 Uncertainties in data

To estimate which method is the most appropriate, a first reflection can be carried out on the quality of the input data (McMillan *et al.*, 2012). As shown in part 2.5.2, naturalization methods use different input data which can generate different levels of uncertainty. The main categories of input data are :

- Streamflow time series. We distinguish the streamflow time series corresponding to an observed natural flow and the time series corresponding to an influenced observed flow. The main uncertainties come from the measurement system in place, the operational conditions and the post-processing step to estimate the flow (e.g. the stage-discharge relationship). Usually a post-processing step corrects the occasional errors. In case of a direct impact, the influenced series can be distinguished from the natural series by the presence of sudden changes in the time series. This implies a more thorough post-treatment to distinguish changes due to measurement errors from those due to anthropogenic influences. Ideally, the measurement system should not change in time. Naik et Jay (2005) pointed out that flow errors can be much more important at the beginning of the period of record. When choosing a method from the hydrological modelling family, questions should be raised on the confidence placed in the natural flow in the past and the observed flow in the present. When the observed data appear uncertain in both cases, it may be beneficial to use the Neighbouring basin method.
- Climatic time series. The main climatic variables used in the studies are precipitation and evapotranspiration. Precipitation estimation at the catchment scale is carried out using interpolation methods of local rainfall measurements. The measurement system put in place must therefore be adapted to the spatial and temporal variability of rainfall events in the basin (Lebecherel, 2015). Since actual evapotranspiration is not measurable at the catchment scale, point evapotranspiration is used most of the time in the studies. However, this potential evapotranspiration corresponds to a model output (Oudin *et al.*, 2005), and therefore includes uncertainties. Precipitation can also be estimated by radar data. In contrast to the raingauge, it is an indirect measurement which is also uncertain.

- Volume time series of human influences. Since the influence measurements are not always available, different techniques and assumptions are used to estimate influence time series. For example, in the naturalization studies examining agricultural withdrawals, the volume time series are estimated based on data reported by farmers (Irwin *et al.*, 1975) or models based on cropping patterns, irrigation water needs and irrigation efficiency (Davtalab *et al.*, 2017 ; Wallace et Pavloski, 1988). Uncertainties associated with these processes seem not to be quantified, but it can be assumed that these uncertainties could be greater than for the other input data. It is also difficult in naturalization studies to get sufficient data to characterize all the influences at play on the catchment. Often one has data on the major influences (typically dams, abstractions in rivers), but it is harder to quantify the impact of other influences on flows (land use change, groundwater abstractions). This may leave a level of uncertainty difficult to remove in naturalized flow estimates.

A first perspective would be to assess the impact of the quality of these data on the naturalized flow obtained in a sensitivity study (Devak et Dhanya, 2017). Model parameters are sensitive to the errors contained in input data. Several studies have already shown the sensitivity of the models to climate variables (Andréassian *et al.*, 2004 ; Oudin *et al.*, 2006). For example, Andréassian *et al.* (2004) showed that having a better estimate of potential evapotranspiration does not give better results. In the case of withdrawable water volume studies in France, there are often strong uncertainties on the influence data, especially on irrigation data. It would therefore have been interesting to see the sensitivity of the calculated hydrological indicators to influence data.

2.5.4.2 Uncertainties in model structure

Model structures can be a source of uncertainties if they are not in line with reality (Pechlivanidis *et al.*, 2011). The model is a simplification of reality and all the relevant processes may not be represented. In the Reconstitution method, where the model takes anthropogenic influences into account in the model, it is important to ensure that the structure of the model is adapted to represent the potential impacts of the human activities on the different components of the hydrological cycle. The structure of the Water Balance method can be attractive because of its simplicity, but, during low-flow periods, errors can lead to obtaining abnormally low or even negative flow rates (Agosta, 2007 ;

Littlewood et Marsh, 1996). With the Reconstitution method, the simulated streamflow can be extremely low, which raises questions about its interpretability, especially in intermittent rivers (De Girolamo *et al.*, 2015).

2.5.4.3 Validation of the method's hypotheses

Each naturalization method is based on different assumptions (see section 2.4). One key issue in all methods is the uncertainty linked to the transfer of information in space and time. This aspect is however not so easy to quantify in the case of naturalization since no natural flow observation is available on the influenced period and standard split sample or proxy-basin approaches (Klemes, 1986) cannot be directly applied.

To assess if the method and tools used are appropriate and thus reinforce our confidence in the results, several methods applied in the literature can be used. In the case of the hydrological modelling family, methods are based on the transferability of the parameter set. In fact, there is no single set of parameters that can perfectly reproduce the uninfluenced flow (Beven, 2000). The problem in naturalization is to know which method makes it possible to transfer the parameter sets with the least possible uncertainty. With a temporal transposition, robustness can be assessed using the split-sample test (Coron *et al.*, 2012 ; Klemes, 1986). This method consists of evaluating the performance obtained over a subperiod different from the calibration period. In the case of a spatial-proximity-transposition, robustness can be assessed using the hydrometrical desert method (Lebecherel *et al.*, 2016). For the Reconstitution method, the uncertainty obtained at calibration on the simulated influenced streamflow can be transferred to the simulated naturalized streamflow.

2.6 Conclusion

Human activities can directly impact the observed flow or several components of the hydrological cycle. These human influences can have an impact at the catchment, regional or global levels. Consequently, most of the observed flows are influenced. To have a reference to the natural regime of influenced rivers, an increasing number of studies apply different naturalization methods. However, no state of the art on the topic has yet been

made. The inventory of the terms to designate a naturalized streamflow shows that there are several definitions considering different human influences. We believe that it would currently be too restrictive to propose a single definition of the naturalized flow. We advise that studies propose a clear definition of the influences and impacts considered by the naturalization process.

The main naturalization methods were presented and a classification into three families based on the information they used was proposed. Although data availability appears to be the main constraint in the choice of methods to be applied, other criteria play an important role. When intermediate phenomena such as runoff impact the water flow from upstream to downstream, a method from the hydrological modelling family will be more appropriate. The influences and their impacts considered in the naturalization process also lead to questioning the choice of methods and tools used.

The example of the application of operational methods shows that the most commonly applied methods for estimating water resources are the Water Balance and Reconstitution methods. This choice is explained by the fact that the authors' goal is to take into account all the influences of the basins and by the difficulty of having access at a completely natural reference over an earlier period or a neighbouring basin. The development of hybrid methods is a consequence of the difficulty of having both an estimate of the natural flow without any influence and a sufficiently long series to calculate robust hydrological indicators.

In these studies of withdrawable water volumes, the uncertainties associated with the naturalization procedure were investigated. It appeared that the authors could identify most sources of uncertainty, but did not quantify the total uncertainty of the naturalized flow obtained. The difficulty in estimating the error associated with naturalized flows is that this can only be done indirectly because the naturalized flow is obtained over a period when there is no direct observation of the natural flow. A first perspective to estimate the confidence of the naturalized flow would be to assess their sensitivity to the input data, knowing that very often these inputs do not correspond to observations. A

second perspective would be to indirectly assess the assumptions raised by the methods. Methodologies have been established in the literature to assess the ability of models to transfer a set of parameters spatially or temporally.

3

Base de données

3.1 Introduction

Le principal objectif de la base de donnée est de disposer de cas d'étude permettant l'application et la comparaison de l'ensemble des méthodes de naturalisation. Un des autres objectifs de la base de données est de disposer d'un large échantillon de bassins aux conditions climatiques et aux influences diverses. Comme discuté par Gupta *et al.* (2014), l'utilisation d'un large échantillon de bassins permet de mieux diagnostiquer les limites des méthodes et juger de leur applicabilité. De plus, cela permet de réduire l'impact des erreurs de données, pouvant affecter quelques bassins, et permet d'identifier des bassins avec un comportement particulier. Ainsi, les résultats généraux présentés sont plus robustes.

Dans la pratique, la disponibilité des données est un facteur souvent limitant qui conditionne le choix des méthodes de naturalisation et leur niveau de complexité. Dans notre étude, l'application de méthodes et l'utilisation de modèles hydrologiques nécessitant des données facilement accessibles nous permettent de ne pas être trop impactés par le manque de données. Les modèles hydrologiques utilisés n'ont besoin en entrée que de données de pluie et d'évapotranspiration potentielle pour fonctionner, ainsi que de données de débit pour le calage des paramètres ou l'évaluation des performances des modèles (voir partie 4.2.2.1). Pour l'application de l'ensemble des méthodes de naturalisation, il est donc nécessaire d'avoir :

- Les chroniques journalières des débits influencés observés sur la période influencée, que l'on souhaite naturaliser. Bien qu'elles ne soient pas indispensables pour appliquer toutes les méthodes, nous considérons que c'est une information primordiale, car le but de la naturalisation est avant tout de passer d'un débit influencé à un débit naturalisé.
- Des données sur la localisation des influences, pour associer une influence à un bassin versant, et les chroniques des impacts volumiques des influences, typiquement les chroniques de prélèvements/rejets ou les chroniques de variation du volume dans le réservoir dans le cas d'un barrage-réservoir. Ces données permettent l'application des méthodes de naturalisation exploitant les informations sur les influences considérées.

- Les chroniques journalières de précipitations et d'évapotranspiration potentielle (ETP) sur la période influencée à naturaliser. Elles correspondent aux données d'entrée nécessaires pour l'utilisation de nos modèles hydrologiques globaux conceptuels.
- Les chroniques journalières de débits observés, de précipitations et d'ETP sur la période pré-influence. Certaines méthodes exploitent ces données pour estimer le débit naturalisé sur une période influencée ultérieure.
- Les chroniques journalières de débits observés, de précipitations et d'ETP des bassins versants non-influencés voisins. Ces données permettent l'application des méthodes exploitant des informations issues du voisinage hydrologique des bassins influencés.

En France, l'accès aux données de volumes des influences à l'échelle des bassins versants et à un pas de temps journalier avec une étendue temporelle suffisante reste encore relativement limité. Des données quantitatives selon les usages sont disponibles à l'échelle des communes sur le site de la Banque nationale des prélèvements quantitatifs en eau (BNPE, <http://www.bnpe.eaufrance.fr>) mais à un pas de temps annuel et avec des chroniques pour la plupart encore assez courtes. Des bases de données de prélèvements au pas de temps journalier sur les influences ont été mises en place lors des études de volumes prélevables globales (EVPG) à l'échelle de plusieurs bassins versants. Ces données journalières de prélèvement correspondent principalement à des estimations provenant de sorties de modèles et/ou d'observations ponctuelles. Ces bases de données sont disponibles auprès des Agences de l'Eau ayant mené des EVPG. Quant aux barrages-réservoirs, leurs données d'exploitations sont détenues par leurs gestionnaires.

La base de données constituée pour cette thèse est principalement composée de bassins influencés par des barrages-réservoirs, car leurs données de gestion sont plus facilement accessibles à un pas de temps journalier. Du fait de la difficulté d'avoir accès à des données de prélèvements à une échelle temporelle et spatiale assez fine, la prise en compte des prélèvements dans la naturalisation ne sera effectuée que sur un échantillon réduit de bassins.

Les barrages-réservoirs présents sur un bassin ont pour rôle de régulariser l'écoulement, de limiter l'impact d'évènements particuliers (inondations, sécheresse), généralement avec l'objectif de limiter les risques pour les personnes et les infrastructures et/ou de soutenir des activités humaines correspondant à différents usages de l'eau nécessitant en particulier des prélèvements pour l'alimentation en eau potable, l'agriculture (en particulier l'irrigation) et la production d'énergie.

3.2 Sources des données

La première partie de ce chapitre présente les différentes sources des données exploitées. Une partie des données sur les barrages-réservoirs provient de la base constituée par Payan (2007) dans le cadre de sa thèse sur l'intégration d'un module barrage dans le modèle GR4J. Une partie du travail a donc consisté à mettre à jour cette base de données. De nouveaux cas d'études ont également été intégrés grâce à la collaboration avec différents gestionnaires de barrages et le CSIRO, institut de recherche australien.

3.2.1 Australie

3.2.1.1 Données climatologiques et hydrométriques

Les données climatologiques ainsi que les données hydrométriques ont été fournies par le *Bureau of Meteorology* (BoM), qui est une agence gouvernementale s'occupant entre autre des prévisions hydrométéorologiques. Les mesures journalières de hauteurs d'eau mesurées aux stations hydrométriques et les débits associés sont disponibles en ligne (<http://www.bom.gov.au/waterdata/>). Les données climatiques sont issues du projet AWAP (*Australian Water Availability Project*) et sont disponibles de 1900 à nos jours à une échelle de $5 \times 5 \text{ km}^2$ (Raupach *et al.*, 2009). Il a été décidé de ne pas travailler avec des données datant d'avant 1950, car les données climatologiques sont jugées peu fiables du fait de la faible densité du réseau de mesure (communication personnelle du BoM).

3.2.1.2 Données sur les influences

Les barrages-réservoirs composant notre base de données australiennes se situent majoritairement dans le sud-est de l'Australie, dans le bassin versant de Murray-Darling et sur la côte est. Les données de gestion sur ces barrages-réservoirs ont été fournies par le

Bureau of Meteorology. Les mesures de hauteur d'eau sont converties en volume grâce à une relation hauteur-volume, dont nous n'avons pas le détail. Les hauteurs d'eau journalières correspondent à des valeurs instantanées obtenues à minuit.

Les données d'occupation du sol proviennent de la base de données National Dynamic Land Cover Dataset-MODIS (Lymburner *et al.*, 2011) couvrant toute l'Australie à une résolution spatiale d'environ 250 m, pour chaque année de 2000 à 2008. Dans notre étude, la carte de 2002 fut choisie comme carte de référence car la majorité de nos bassins ont des données sur cette période.

3.2.1.3 Base de données des bassins versants naturels

La base de données des bassins versants naturels, composée de plus de 600 bassins, a été fournie par le CSIRO (figure 3.1). Grâce à la connaissance du réseau du drainage, à l'interprétation d'images spatiales et à l'avis d'agences locales de gestion de l'eau, seules des stations sans ouvrages majeurs ou schéma d'irrigation en amont ont été prises en compte. Une sélection sur la qualité des données a également été effectuée.

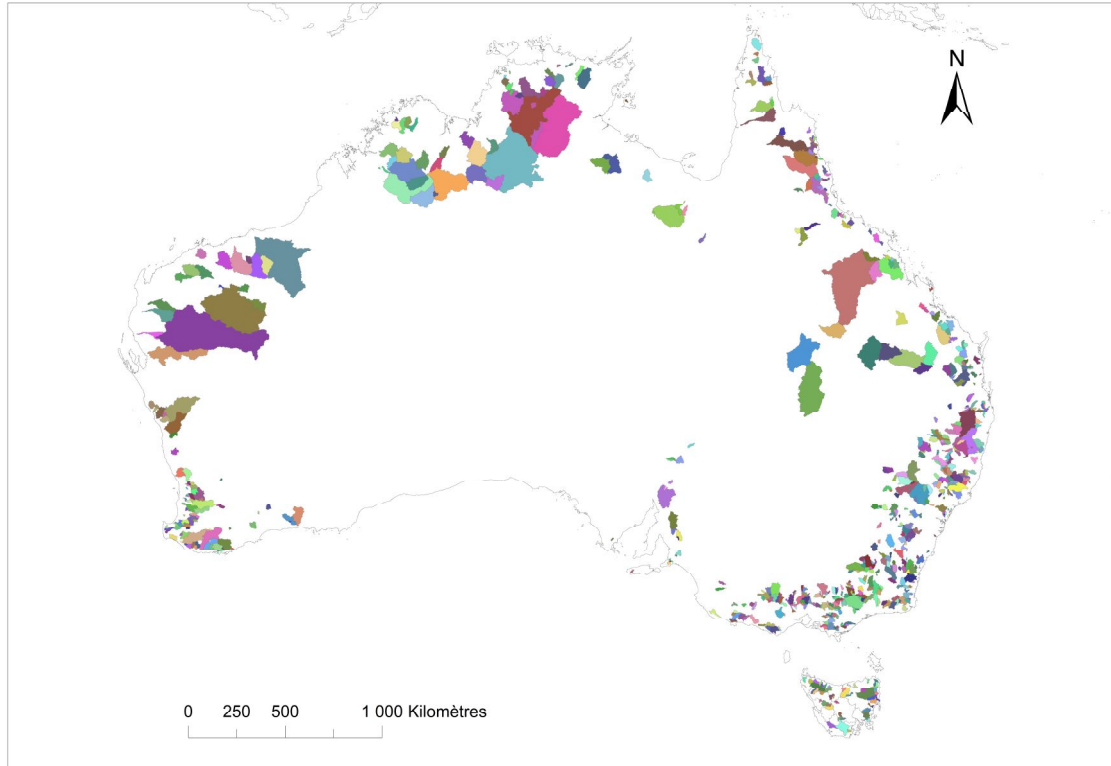


Figure 3.1 – Carte des bassins versants naturels en Australie selon la base de données du CSIRO.

3.2.2 France

3.2.2.1 Données climatologiques et hydrométriques

Les données hydrométriques proviennent de la Banque HYDRO (<http://www.hydro.eaufrance.fr/>) (Leleu *et al.*, 2014). Les données climatiques sont issues de la réanalyse climatique SAFRAN (Vidal *et al.*, 2010) (<https://publitheque.meteo.fr>). Les données utilisées ici, spatialisées sur une grille de $8 \times 8 \text{ km}^2$, vont d'août 1958 à juillet 2016. L'évapotranspiration potentielle (ETP) est obtenue avec la formule d'Oudin basée sur la température moyenne journalière et le rayonnement extraterrestre (Oudin *et al.*, 2005).

3.2.2.2 Données sur les influences

Parmi les barrages-réservoirs constituant la base de données de Payan, une mise à jour des chroniques de données a pu être effectuée sur plusieurs barrages-réservoirs. Les gestionnaires ayant participé à la mise à jour et à l'élargissement de la base de données sont présentés dans le tableau 3.1. Les données fournies correspondent à des mesures instantanées journalières de la hauteur des barrages avec une précision au centimètre. Ces hauteurs sont ensuite converties en volume par le gestionnaire grâce à une relation hauteur-volume.

Tableau 3.1 – Liste des fournisseurs de données.

| Organisme | Service/Contact |
|--|--|
| BRL Ingénierie | Département gestion de la ressource en eau |
| Communauté de Communes du Pays Bigouden Sud en région Bretagne | Contact avec la chargée de la ressource en eau |
| Commune de Commentry en région Auvergne-Rhône-Alpes | Contact avec le responsable du service des eaux et de l'assainissement |
| Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne | |
| Conseil Général de l'Hérault | Service milieux aquatiques et littoral, contact avec le chargé de la gestion des barrages départementaux |
| Conseil Général du Haut-Rhin | Service rivières et barrages |
| EDF | Service développement Mesures et Méthodes |
| Syndicat Intercommunal de Distribution d'Eau de la Corniche des Maures | |

Concernant les données permettant de repérer la présence d'autres influences, les données d'occupation du sol proviennent de la base européenne de données Corine Land Cover (European Environment Agency, 2007). La version de 2006 a été exploitée pour nos travaux, car les données que nous avons sur les bassins couvrent cette période. Les données ont une échelle de $0,25 \text{ km}^2$. Cette échelle peut être trop grossière pour l'identification de certains espaces artificialisés (Pageaud et Carré, 2009). Cependant, à l'échelle de nos bassins d'étude, cette précision nous paraît suffisante. Les occupations du sol classifiées comme territoires artificialisés et territoires agricoles sont considérées comme des indicateurs de la présence d'activités humaines.

Les données quantitatives sur les prélèvements proviennent de la BNPE. La constitution de la base de données étant en cours (Nowak *et al.*, 2014), les données de la BNPE disponibles sur l'ensemble de la France métropolitaine commencent généralement en 2012, et à partir de 2008 sur certains bassins versants. Les prélèvements, disponibles au pas de temps annuel, sont caractérisés par leur origine (surface ou souterraine), leurs usages et le numéro INSEE de la commune sur laquelle ils sont déclarés. Les déclarations provenant de redevances ne comprennent pas les activités exonérées de la redevance et les prélèvements non-domestiques inférieurs à $10\,000 \text{ m}^3/\text{an}$ et à $7\,000 \text{ m}^3/\text{an}$ en zone de répartition des eaux (ZRE). Dans notre analyse, seuls les usages qui amènent à une consommation importante de l'eau ou à une restitution non immédiate ont été considérés : les prélèvements pour les canaux, l'irrigation et l'AEP (Alimentation en Eau Potable). Pour les bassins versants influencés de la base de données, l'estimation des prélèvements correspond aux prélèvements déclarés sur les communes du bassin versant. De nombreuses incertitudes demeurent sur les chiffres obtenus du fait notamment de la non-exhaustivité des prélèvements répertoriés, de prélèvements non effectués sur le bassin pour les communes à la bordure du bassin, et la prise en compte de prélèvements effectués dans les canaux traversant le bassin.

3.2.2.3 Base de données des bassins versants naturels

La constitution d'une base de données de bassins versants naturels est une tâche importante nécessitant une expertise locale et une importante récolte de données. Elle n'a pas été réalisable dans le cadre de la thèse. Cependant, de nombreux travaux antérieurs existent sur la mise au point d'échantillons de bassins versants qui peuvent être considérés

comme peu influencés, notamment à INRAE (Poncelet, 2016). On peut noter par exemple l'existence du réseau de référence pour la surveillance des étiages proposé par Giuntoli et Renard (2010). C'est un réseau de 236 stations sélectionnées pour leur caractère non influencé, l'ancienneté de leurs données et la qualité de ces dernières en étiage. Ici, pour déterminer si une station est non-influencée, le code qualité de la banque HYDRO a été utilisé, bien que cet indicateur réfère souvent à une influence hydraulique locale au niveau de la station et pas forcément aux influences situées sur le bassin. Les stations ayant un ou des ouvrages en amont n'ont pas été retenues. Pour quantifier l'influence des prélèvements, les gestionnaires locaux ont été sollicités.

Dans cette thèse, la base de données de bassins versants naturels sera constituée de bassins versants de la Banque HYDRO ayant pour code qualité "peu ou pas influencés" et sans barrage-réservoir répertorié en amont (Bourgin *et al.*, 2012). Cette base est composée d'environ 2300 bassins versants répartis sur tout le territoire métropolitain.

3.2.3 États-Unis

La facilité d'accès aux données climatologiques et hydrométriques aux États-Unis ainsi que le nombre d'études portant sur les bassins influencés en fait un pays de choix pour y tester des méthodes de naturalisation.

3.2.3.1 Données climatologiques et hydrométriques

Les données climatologiques sont issues des vingt mille stations de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) présentes aux États-Unis (Livneh *et al.*, 2013). Ces données sont spatialisées sur l'ensemble du territoire des États-Unis avec une résolution de $1/16^{\text{ème}}$ de degré. Elles comprennent les précipitations ainsi que les températures minimales et maximales journalières. L'évapotranspiration potentielle journalière a également été obtenue avec la formule d'Oudin (Oudin *et al.*, 2005). Les données sont disponibles de janvier 1915 à décembre 2011.

Les données hydrométriques sont issues de la base de données de l'*United States Geological Survey* (USGS) et sont disponibles en ligne (<https://waterdata.usgs.gov/usa/nwis/rt>). Payan ayant également obtenu les débits de ses stations sur le site de l'USGS

en 2004, nous avons des chroniques de débit très similaires. Sur quelques stations, un écart existe ; ceci s'explique par le fait que notre série, plus récente, a pu faire l'objet de corrections, notamment sur la courbe de tarage.

3.2.3.2 Données sur les influences

Dans la thèse de Payan, les chroniques de volume des réservoirs étaient issues de l'*United States Bureau of Reclamation* (USBR). Actuellement, les données des réservoirs ne sont plus toutes disponibles sur le site de l'USBR. Dans la base de données de cette thèse, seule la chronique du barrage-réservoir de Cobb est issue du site de l'USBR. Pour les barrages-réservoirs situés en Oklahoma et au Texas, les données sont issues du site du Corps des ingénieurs de l'armée (US Army Corps of Engineers, USACE) en charge du district de Tulsa (<http://www.swt-wc.usace.army.mil/>). Pour les barrages-réservoirs situés en Californie, le Corps des ingénieurs de l'armée en charge du district de Sacramento gère et met en ligne les données (http://www.spk-wc.usace.army.mil). Afin d'avoir des chroniques de données de longue durée, dans certains cas, une combinaison avec les données de Payan plus anciennes a été effectuée. L'homogénéité des chroniques a été vérifiée pour s'assurer qu'il n'y ait pas d'écart trop important par rapport aux valeurs de volumes des chroniques de Payan.

La carte d'occupation du sol provient de la base nationale mise en place par l'U.S. Geological Survey (2014). La carte de référence choisie, qui a une résolution spatiale de trente mètres, correspond à l'année 2006 car les données que nous avons sur les bassins sont majoritairement sur cette période.

Les données de prélèvements proviennent de l'USGS (<https://water.usgs.gov/watuse/data/>) qui publie tous les cinq ans, depuis 1950, une estimation des prélèvements à l'échelle de chaque comté. Pour estimer les prélèvements à l'échelle des bassins, les prélèvements ont été sommés selon le pourcentage d'aire de chaque comté présent sur les bassins. Seuls les prélèvements pour l'irrigation et l'AEP ont été considérés ainsi que les données des années 1995, 2000, 2005 et 2010 qui sont représentatives de la période d'étude des bassins. Ces données comportent plusieurs incertitudes. Les données sur l'irrigation

provenant d'estimations théoriques et de mesures sont de qualité variable (Solley *et al.*, 1998). Il peut y avoir une sous- ou surestimation des volumes prélevés sur le bassin due au fait que nous avons seulement accès aux données à l'échelle des comtés.

3.2.3.3 Base de données des bassins versants naturels

La base de données choisie pour les bassins versants naturels est celle de Newman *et al.* (2015), composée de 671 bassins versants. La figure 3.2 montre que leur répartition n'est pas homogène sur l'ensemble du territoire et leur taille est variable. Mais, elle a l'avantage d'être sélective dans le choix des bassins versants "naturels" avec la mise en place d'un index de perturbation hydrologique, une analyse des cartes, des images satellites et un jugement d'experts locaux (Falcone *et al.*, 2010). Les chroniques de débit journalier et les données climatologiques vont de janvier 1980 à décembre 2014. Les données climatologiques sont les données Daymet, *Daily surface weather and climatological summaries* (Thornton *et al.*, 1997), disponibles à un pas de temps journalier et à une échelle de 1 km x 1 km sur l'ensemble de l'Amérique du Nord.

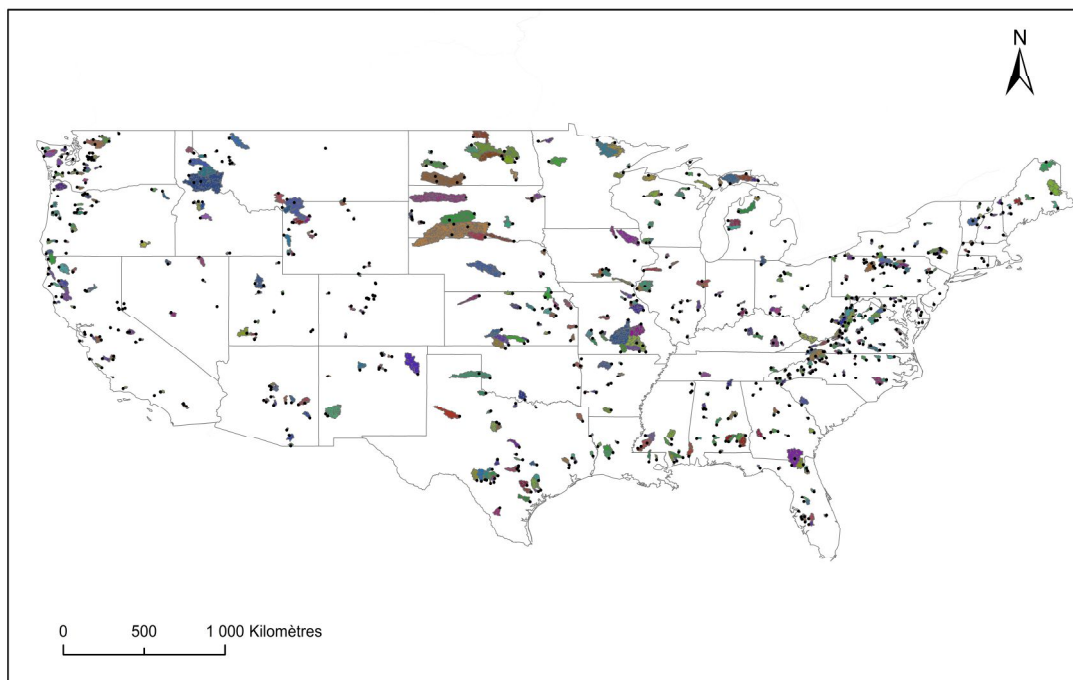


Figure 3.2 – Carte des bassins versants naturels aux États-Unis, d'après Newman *et al.* (2015).

Tableau 3.2 – Liste des bassins avec des données de débits observés sur la période pré-influence.

| Station | Code | Pays | Période naturelle | Période influencée |
|---|----------|------|-------------------|--------------------|
| Little River near Sasakwa, OK | 07231000 | USA | 1943-10/1961-12 | 1992-01/2011-12 |
| Nueces River near Three Rivers, TX | 08210000 | USA | 1916-07/1977-12 | 1986-01/2011-12 |
| Russian River near Hopland, CA | 11462500 | USA | 1940-10/1957-12 | 1987-02/2011-12 |
| Russian River near Cloverdale, CA | 11463000 | USA | 1952-08/1957-12 | 1986-02/2011-12 |
| Russian River near Healdsburg, CA | 11464000 | USA | 1940-10/1957-12 | 1988-07/2011-12 |
| Glennies Creek at Middle Falbrook | 210044 | AUS | 1961-01/1982-12 | 1992-07/2016-12 |
| Glennies Creek at the Rocks | 210084 | AUS | 1970-08/1982-12 | 1992-07/2016-12 |
| Brogo River at North Brogo | 219013 | AUS | 1961-11/1963-12 | 1976-07/2016-12 |
| Belubula River at Carcoar | 412077 | AUS | 1966-12/1969-12 | 1970-11/2016-12 |
| Peel River at Carroll gap | 419006 | AUS | 1973-02/1978-12 | 1979-07/2016-12 |
| Manilla River at Brabi | 419020 | AUS | 1977-01/1986-12 | 1989-12/2016-12 |
| Namoi River at Manilla railway bridge | 419022 | AUS | 1970-07/1986-12 | 1989-12/2016-12 |
| Manilla River downstream Split Rock dam | 419043 | AUS | 1973-06/1986-12 | 1989-12/2016-12 |
| Cudgegong River at Yamble bridge | 421019 | AUS | 1961-01/1983-12 | 1985-07/2016-12 |
| Mersey River at Latrobe | 447.1 | AUS | 1962-11/1966-12 | 1970-11/2016-12 |
| Mersey River at Liena | 60.1 | AUS | 1961-01/1966-12 | 1970-11/2016-12 |
| L'Helpe Majeure à Taisnières-en-Thierache | D0156520 | FR | 1962-01/1966-12 | 1980-01/2003-12 |
| Blaincourt | H1231010 | FR | 1959-08/1989-12 | 1989-12/2009-01 |
| Arcis-sur-Aube | H1501010 | FR | 1960-01/1989-12 | 1989-12/2009-01 |
| La Vire à Vire | I5021010 | FR | 1959-08/1976-12 | 1988-12/2000-03 |
| La Morge à Montbel | K2753010 | FR | 1967-01/1993-12 | 1994-03/2004-03 |
| La Morge à Maringues | K2783010 | FR | 1970-10/1993-12 | 1994-03/2004-03 |
| L'Hers-vif à Mazere | O1652920 | FR | 1966-01/1984-12 | 1984-11/2000-12 |
| L'Hers-vif à Auterive | O1712510 | FR | 1966-01/1984-12 | 1984-11/2004-08 |
| L'Hers Mort à Toulouse | O2222510 | FR | 1965-01/1978-12 | 1996-07/2004-10 |
| La Gimone à Gimont | O2743320 | FR | 1965-10/1990-12 | 1995-10/2006-07 |
| La Gimone à Garganvillar | O2883310 | FR | 1965-10/1990-12 | 1995-10/2015-09 |
| L'Arrats à Saint-Antoine | O6094010 | FR | 1965-10/1975-12 | 1994-10/2004-08 |
| L'Arros à Juillac | Q0612510 | FR | 1967-01/1995-12 | 1995-12/2016-07 |
| La Charente à Saint-Saviol | R0110010 | FR | 1971-01/1987-12 | 1993-11/2004-09 |
| L'Eau d'Olle à Allemond | W2755010 | FR | 1959-08/1983-12 | 1984-01/2016-07 |
| La Rougeanne à Moussoulens | Y1355210 | FR | 1977-01/1983-12 | 1996-07/2004-10 |
| Le Fresquel à Carcassonne | Y1364010 | FR | 1977-01/1983-12 | 1996-07/2004-10 |
| La Giscle à Cogolin | Y5444010 | FR | 1974-12/1990-12 | 1991-02/2016-07 |

3.2.4 Critère de sélection des bassins versants

Payan, pour constituer sa base de données, avait sélectionné des bassins et des barrages selon les critères suivants :

- i) Les barrages-réservoirs devaient avoir une capacité d'au moins 10^6 m³. Cela englobe donc les grands barrages dits de classe A, qui ont une hauteur de 20 mètres et une capacité d'au moins 3 millions de mètres cubes, et les barrages de classe B, qui ont une hauteur d'au moins 10 mètres.
- ii) La capacité des barrages présents sur le bassin versant devait représenter une lame d'eau équivalente d'au moins 5 mm afin que l'influence des manœuvres des ouvrages reste détectable au pas de temps journalier. Les stations devaient ne pas se situer à l'aval direct d'ouvrages où l'impact des manœuvres est très marqué.
- iii) Les bassins versants devaient être faiblement influencés par la neige. Ce choix était motivé par le fait que la neige risque d'introduire une source supplémentaire de difficulté dans la modélisation. Les bassins sélectionnés par Payan avaient une altitude maximale inférieure à 1200 m et avaient moins de 20 jours d'enneigement moyen par an.
- iv) La densité du réseau pluviométrique devait être "suffisante".

La base de données constituée par Payan comportait 77 bassins versants et 43 barrages-réservoirs. Certaines données ayant été fournies uniquement pour la thèse de Payan, nous avons à disposition des données sur 60 bassins versants, dont 44 en France, 14 aux États-Unis et 2 en Tasmanie, et des données sur 34 barrages-réservoirs, dont 23 en France, 8 aux États-Unis et 3 en Tasmanie.

Pour constituer notre base de données, nous avons gardé le critère i) sur la capacité des barrages-réservoirs. Pour la sélection des bassins versants, nous n'avons gardé qu'une partie du critère ii), correspondant à la lame d'eau minimale que devaient représenter les capacités des réservoirs présents sur le bassin. Le critère iii) n'a pas été pris en compte afin d'avoir des cas de bassins à l'aval des barrages à naturaliser. Le critère iv) n'a pas été pris en compte du fait de la disponibilité des données météorologiques spatialisées sur l'ensemble de la base de données. Un critère a été ajouté sur la période de naturalisation, qui correspond à la période où l'on dispose de données climatiques, de débits observés et de données sur les influences. Nous avons imposé une durée minimale de 8 ans, afin

Tableau 3.3 – Nombre de bassins versants et de barrages-réservoir de l'étude par pays.

| | Australie | Etats-Unis | France | Total |
|-------------------------------|-----------|------------|--------|-------|
| Nombre de barrages-réservoirs | 18 | 8 | 34 | 60 |
| Nombre de bassins | 62 | 14 | 51 | 127 |

de disposer d'une période assez longue pour calculer des indicateurs et pouvoir évaluer la robustesse des modèles utilisés dans l'application de certaines méthodes de naturalisation. Pour les bassins disposant d'une période pré-influence, nous avons imposé une longueur minimale de 4 ans pour être exploitables dans nos travaux (tableau 3.2).

Au regard des critères de l'étude, trois bassins versants de la base de données de Payan ont été enlevés. L'agrandissement de la base de données, suivant ces critères, a permis l'ajout de soixante-douze bassins versants, dont dix en France et soixante deux en Australie, et vingt-six barrages-réservoirs, dont onze en France et quinze en Australie (figure 3.3).

3.3 Situation géographique et caractéristiques physiques des bassins de l'échantillon et de leurs influences

Dans cette partie, nous présenterons les différents bassins et les influences de la base de données par pays. Nous présenterons leurs principales caractéristiques physiques telles que l'occupation du sol et leur surface.

3.3.1 Australie

Depuis 1997, le conseil de l'agriculture et de la gestion des ressources d'Australie et de Nouvelle-Zélande (ARMCANZ) a découpé l'Australie en douze divisions hydrologiques. Les bassins versants et barrages australiens de l'étude se situent majoritairement en Australie continentale (figure 3.3a), sur la division du bassin Murray-Darling et sur la division du bassin de la côte sud-est. Les 15 barrages-réservoirs continentaux de l'étude ont plusieurs objectifs : 14 sont gérés pour l'irrigation, 10 pour l'alimentation en eau

potable (AEP), 9 pour l'hydroélectricité et 5 pour la gestion des crues. La majorité des barrages-réservoirs continentaux font l'objet d'une gestion pluriannuelle. Ils stockent de l'eau durant les années humides pour répondre aux besoins durant les années sèches. Ce sont des barrages-réservoirs avec d'importantes capacités de stockage d'environ 400 hm³ en valeur médiane et avec un bassin versant associé d'environ 1 600 km².

Les soixante bassins versants continentaux ont une surface allant de 400 à 23 000 km², avec une valeur médiane de 4 500 km². Selon l'analyse de l'occupation du sol des bassins versants, l'irrigation représente moins de 1% des surfaces des bassins et l'agriculture pluviale environ 30% des surfaces. Les bassins sont essentiellement recouverts de forêt.

Sur le territoire tasmanien (3.3b), se trouvent deux bassins versants influencés par trois barrages-réservoirs hydroélectriques. Les bassins ont une surface respective d'environ 800 et 1700 km² et sont recouverts à plus de 90% de forêt.

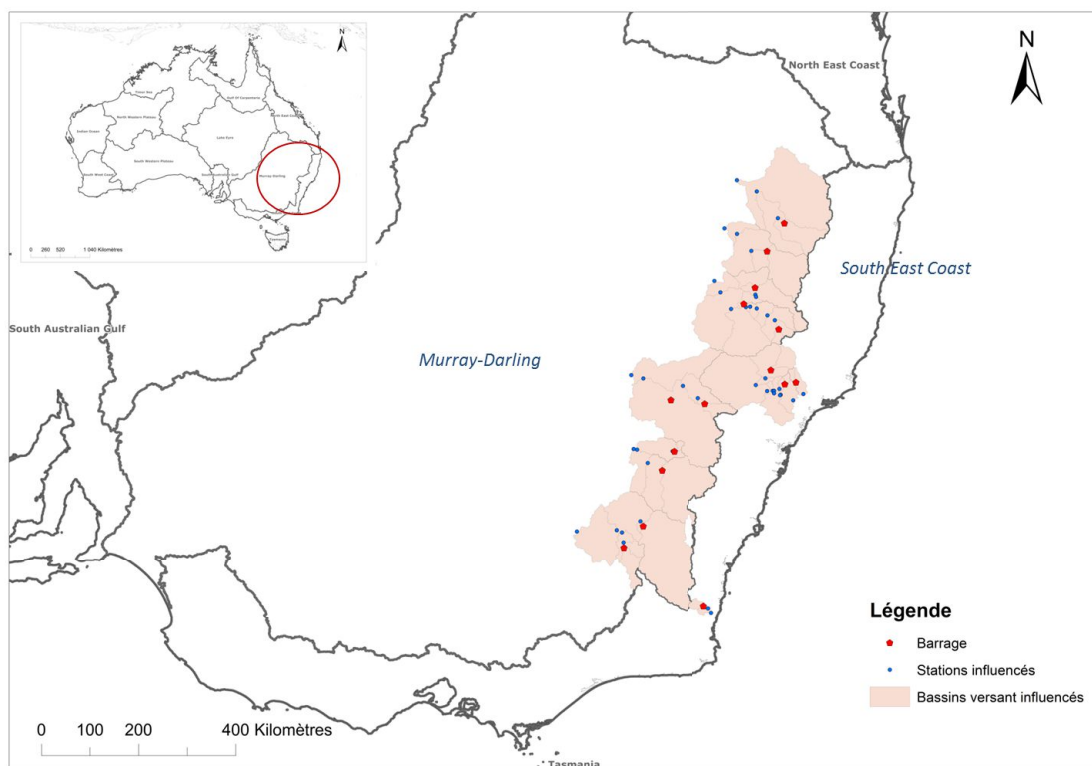
3.3.2 France

La base de données française est composée de 51 bassins versants bien répartis sur tout le territoire métropolitain (figure 3.4), avec des surfaces allant de 50 à 43 800 km² et une surface médiane de 713 km². La surface agricole des bassins est d'environ 60% en valeur médiane et la surface forestière représente environ 35%.

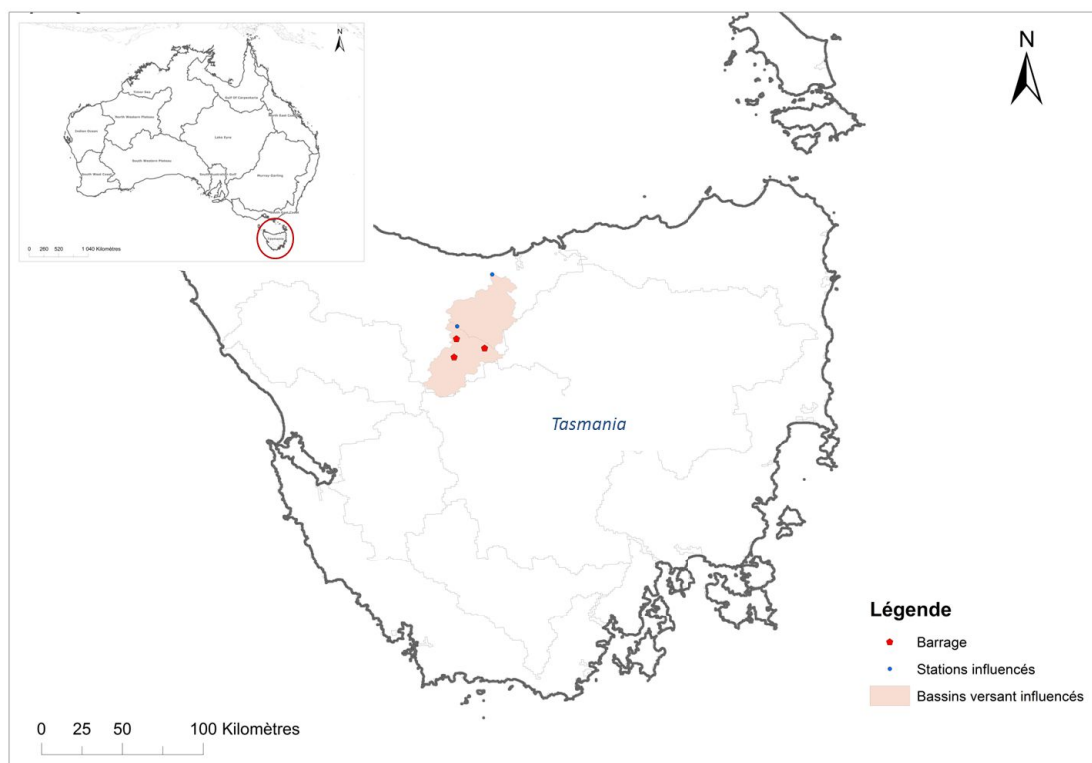
Sur les 34 barrages-réservoirs de la base de données française, 24 ont un rôle pour l'AEP, 15 pour l'hydroélectricité, 12 pour l'irrigation et 12 pour la gestion des crues. Ce sont des barrages-réservoirs qui ont une capacité d'environ 10 hm³ et un bassin versant amont d'environ 55 km² en valeur moyenne.

3.3. SITUATION GÉOGRAPHIQUE ET CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DES BASSINS DE L'ÉCHANTILLON ET DE LEURS INFLUENCES

72



(a) Bassins du Sud-Est, Australie continentale.



(b) Bassins tasmaniens.

Figure 3.3 – Localisation des barrages et bassins versants influencés en Australie utilisés dans le cadre de cette étude.

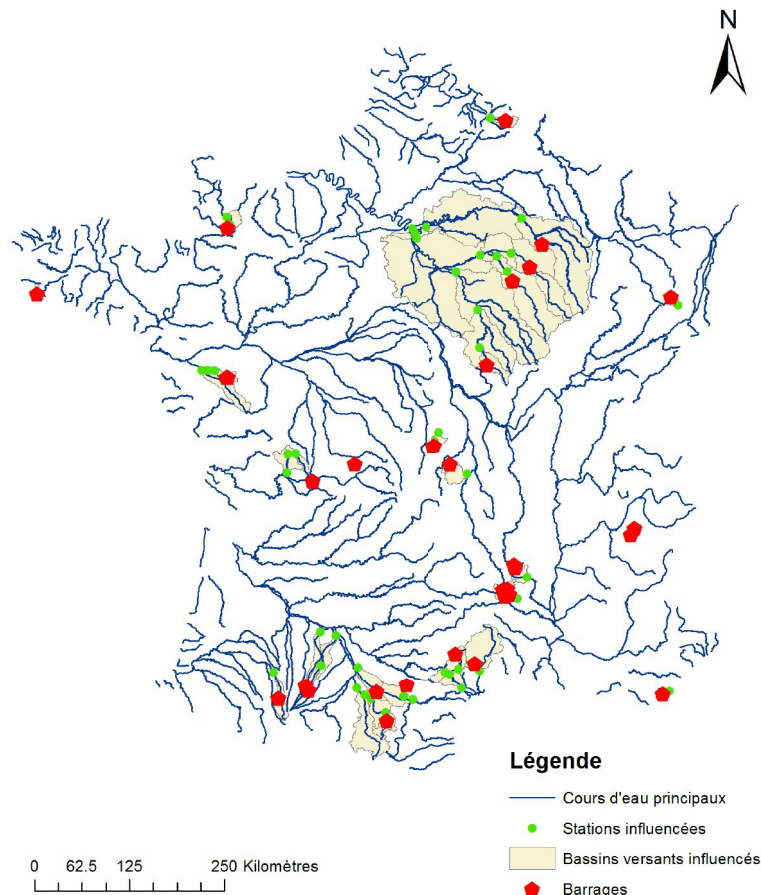


Figure 3.4 – Localisation des barrages et bassins versants influencés français utilisés dans le cadre de cette étude.

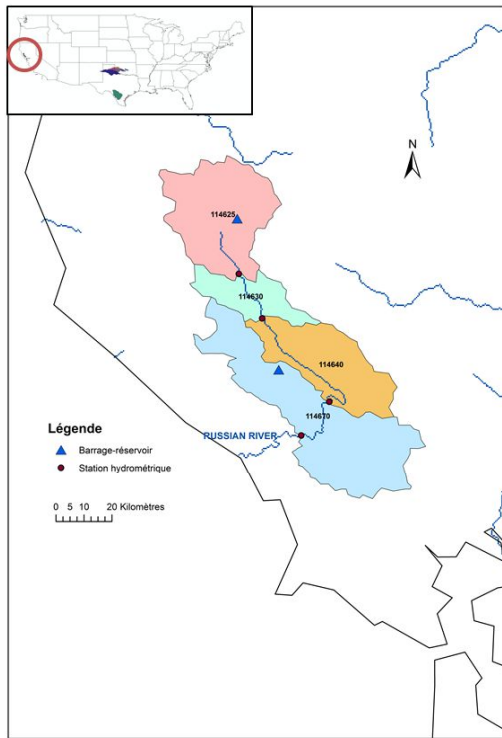
3.3.3 États-Unis

La base de données américaine est composée de 14 bassins versants influencés dont 4 en Californie (figure 3.5a), 9 en Oklahoma (figure 3.5b) et 1 au Texas (figure 3.5c). Les bassins versants ont une surface médiane d'environ 9 000 km², allant de 1 000 à 45 000 km². L'agriculture représente moins de 6% de l'occupation du sol. Les bassins sont essentiellement recouverts de jachères (26%), de prairies (25%) et de forêt (14%).

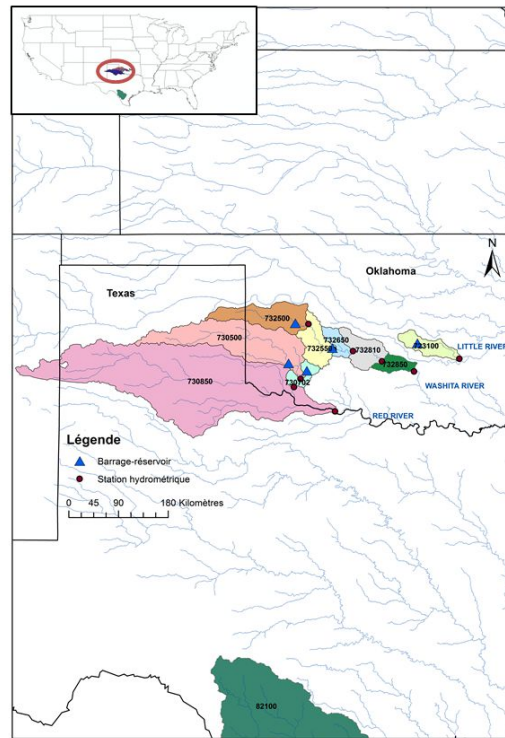
Sur les 8 barrages-réservoirs américains, 2 se situent en Californie, 5 en Oklahoma et 1 au Texas. Il est à noter qu'un des barrages californiens est en partie alimenté par des transferts interbassins. Ce sont des barrages-réservoirs avec une capacité médiane d'environ 200 hm³. Six barrages ont pour rôle la gestion des crues, 3 la production d'hydroélectricité, 1 l'irrigation, et 6 l'AEP.

3.3. SITUATION GÉOGRAPHIQUE ET CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DES BASSINS DE L'ÉCHANTILLON ET DE LEURS INFLUENCES

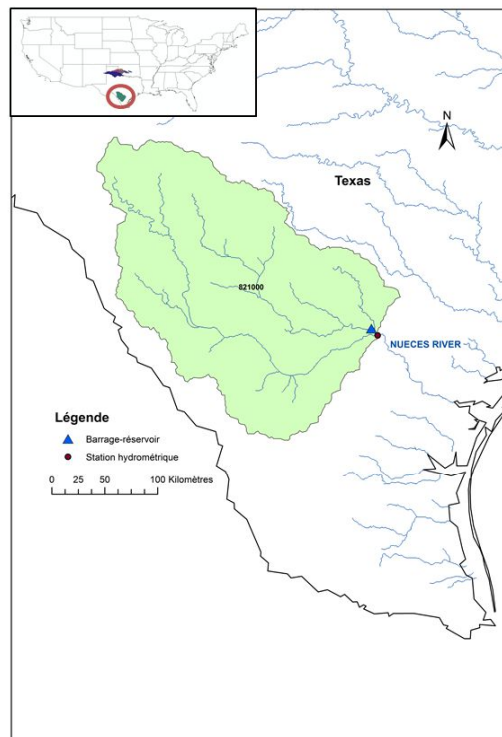
74



(a) Californie, États-Unis.



(b) Oklahoma, États-Unis.



(c) Texas, États-Unis.

Figure 3.5 – Localisation des barrages et bassins versants influencés aux États-Unis utilisés dans le cadre de cette thèse.

3.4 Identification de groupes de bassins influencés par les barrages

L'annexe C présente les caractéristiques hydro-climatiques des différents bassins versants (partie C.1) et les caractéristiques de leurs barrages-réservoirs (partie C.2). La partie C.3 évalue l'estimation de l'impact potentiel des prélèvements de surface. Au final, il apparaît que nous avons une base de données avec des bassins aux caractéristiques et aux niveaux d'influence très divers, au sein même des pays. Dans cette partie, nous cherchons à former des groupes où les bassins soient les plus semblables possible afin de voir dans la suite de la thèse si les méthodes de naturalisation ont des comportements similaires sur ces groupes.

La première étape pour constituer nos groupes a consisté à sélectionner un nombre limité d'indicateurs hydrométéorologiques et anthropiques, afin de ne pas avoir d'information redondante et simplifier l'interprétation des groupes. Pour cela, la corrélation entre les indicateurs a été calculée. De cette analyse, il a été choisi de garder les indices normalisés suivants pour la formation des groupes :

- l'indice d'aridité, calculé comme le rapport entre la pluie moyenne et l'ETP moyenne ;
- le coefficient de variation interannuelle des précipitations ;
- l'indice d'écoulement mobilisable des barrages (IRI_D), calculé comme le ratio entre la capacité du barrage et le débit annuel moyen influencé ;
- l'indice de surface contrôlée par les barrages (SC_D), calculé comme le rapport entre la surface contrôlée par les barrages et la surface totale du bassin ;
- l'indice de variabilité des chroniques de volume au sein du réservoir (VI_D), calculé comme la moyenne des variations absolues journalières rapportée à l'écart entre les volumes maximum et minimum au sein de la période.

Afin de constituer les groupes, il a été choisi d'utiliser la Classification Ascendante Hiérarchique, appliquée avec la méthode de Ward, avec la fonction *agnes* du package R *cluster* (Maechler *et al.*, 2018). Sur la figure 3.6, sont représentées les distributions des indicateurs selon les groupes de bassins obtenus.

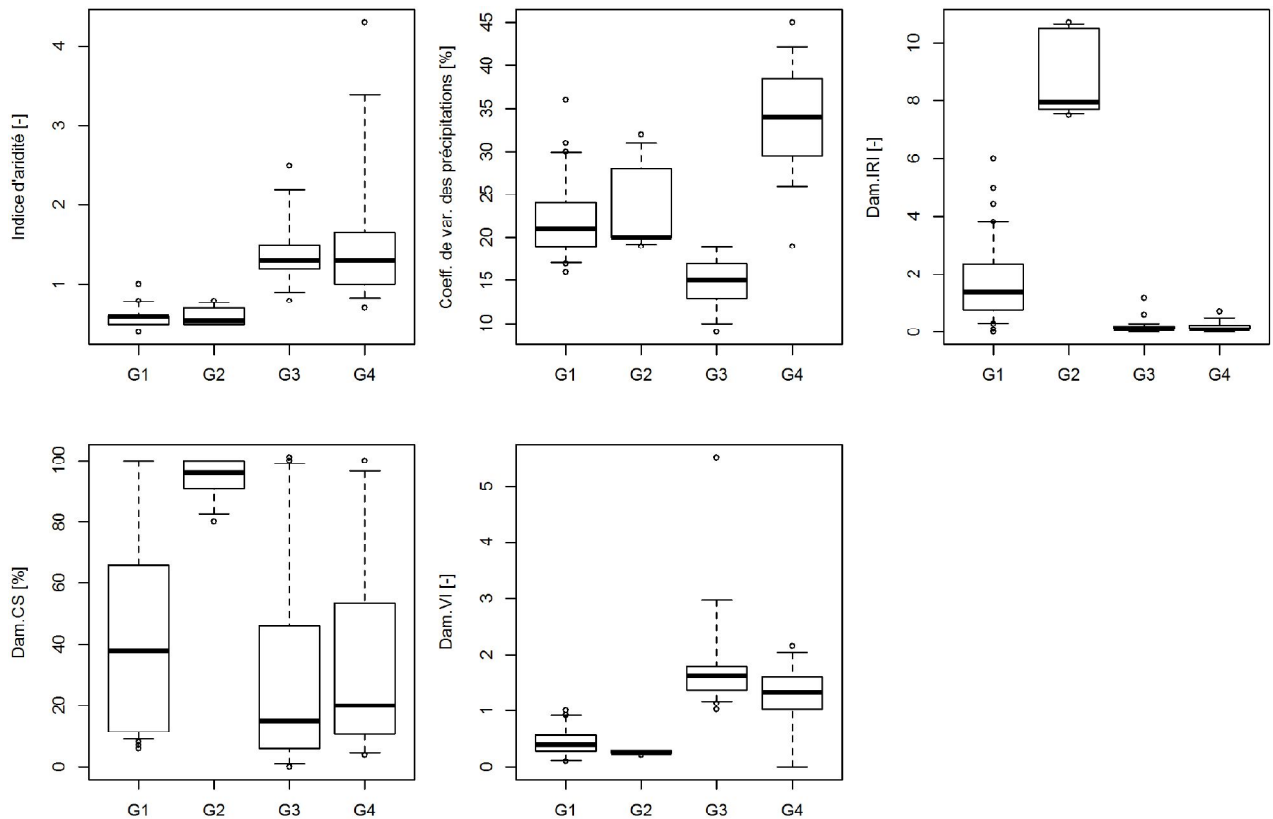


Figure 3.6 – Distribution par groupe de bassins pour chaque indicateur. Les extrémités correspondent au 5^{ème} et 95^{ème} quantiles. Les bornes de la boîte correspondent au 1^{er} et 3^{ème} quartile. Le trait horizontal de la boîte à moustaches correspond à la valeur médiane.

Le groupe 1 est composé de soixante-trois bassins versants (tableau 3.4) dont cinquante-trois australiens et des bassins américains situés au Texas et en Oklahoma (figure 3.7). Ce sont des bassins allant de semi-arides (entre 0,2 et 0,5) à semi-humides (entre 0,5 et 0,75), avec des variations interannuelles des précipitations d'environ 20%. Les barrages sur ces bassins influencés ont un comportement peu variable et peuvent stocker plus d'un an de débit, ce qui indique que ce sont des barrages avec un comportement interannuel. Le groupe 2, composé uniquement de six bassins australiens (figure 3.7), est proche du groupe 1. Sa particularité est d'être composé de stations se trouvant à l'aval immédiat des barrages, et que ces derniers sont capables de stocker environ neuf fois leur débit moyen annuel.

Le groupe 3 est composé de quarante-et-un bassins dont trente-sept en France, et quatre en Tasmanie et sur la côte est australienne (figure 3.7). Ce sont des bassins avec une faible variabilité interannuelle des pluies. Les barrages amont ont la particularité d'avoir

Tableau 3.4 – Nombre de bassins versants par groupes et par pays.

| | Nombre de bassins | | | |
|----|-------------------|------------|--------|-------|
| | Australie | Etats-Unis | France | Total |
| G1 | 53 | 10 | 0 | 63 |
| G2 | 6 | 0 | 0 | 6 |
| G3 | 4 | 0 | 37 | 41 |
| G4 | 1 | 4 | 10 | 15 |

une importante variabilité des stocks avec une faible capacité de stockage, ce qui nous indique que ce sont plutôt des bassins qui ont une gestion journalière ou saisonnière.

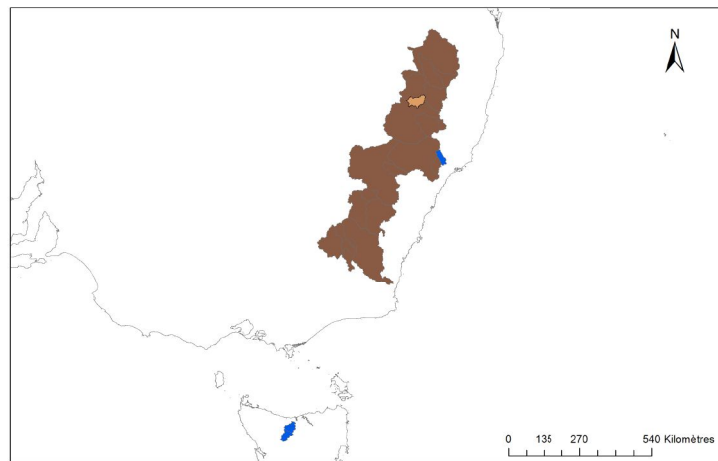
Le groupe 4 est très similaire au groupe 3. Il est composé de quinze bassins dont dix français, quatre bassins américains situés en Californie et un bassin australien situé au sud de la côte est (figure 3.7). Ce qui les distingue principalement du groupe 3 est qu'ils ont une plus forte variabilité interannuelle des précipitations, de l'ordre de 30%.

3.5 Analyse de la qualité des chroniques de données

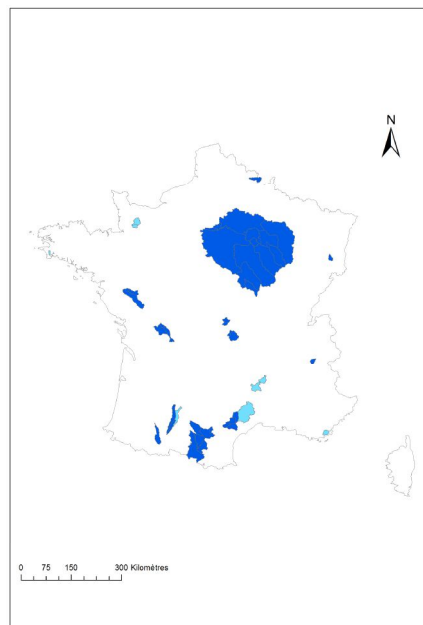
Les données utilisées pour naturaliser comportent des erreurs qui peuvent avoir un impact sur les performances des méthodes de naturalisation et donc a fortiori sur la confiance que l'on peut accorder aux débits naturalisés. Pour évaluer la qualité des données utilisées, nous allons tout d'abord identifier les sources éventuelles des erreurs, puis une analyse des chroniques de données sera effectuée.

3.5.1 Sources d'erreurs

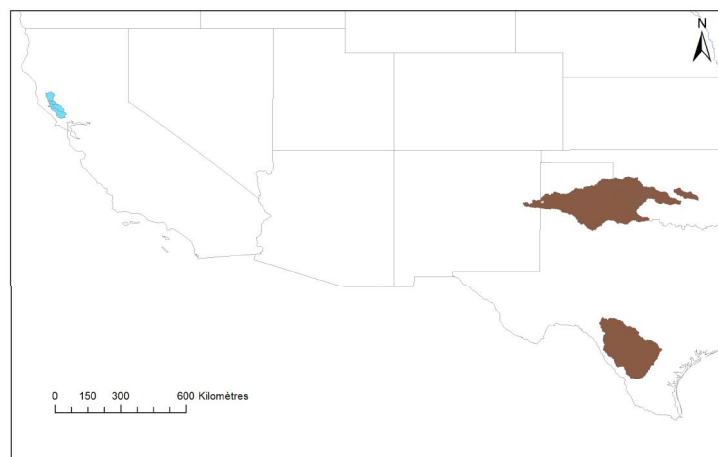
Cette partie recense les différentes sources d'erreurs des données utilisées par les méthodes de naturalisation. Les données employées dans notre étude sont des données climatologiques (les précipitations et l'évapotranspiration potentielle), des données hydro-métriques (le débit observé) et des données sur les volumes mis en jeu par les influences (typiquement des volumes prélevés/rejetés et des volumes de réservoirs). La qualité de ces données est fortement dépendante de l'instrumentation, des conditions environnementales de la mesure et de leur traitement :



(a) Bassins australiens.



(b) Bassins français.



(c) Bassins américains.

Figure 3.7 – Cartes des groupes de bassins par pays. Le groupe 1 correspond aux bassins bruns, le groupe 2 aux bassins orange, le groupe 3 aux bassins bleu foncé et le groupe 4 aux bassins bleu clair.

- Les données de débits ne proviennent pas d'une mesure directe mais sont déduites d'une courbe de tarage, faisant correspondre une hauteur mesurée à un débit. La qualité du débit estimé dépend donc de la précision du système de mesure mis en place, de la relation d'interpolation utilisée pour le tracé de la courbe de tarage et de la stabilité de la relation hauteur-débit (McMillan *et al.*, 2012).
- Tout comme pour les débits, le volume des barrages-réservoirs est déduit d'une relation hauteur/volume. La première source d'erreur provient de l'estimation de la hauteur d'eau qui peut être faussée par les vagues générées à la surface par le vent ainsi que par la non-horizontalité du plan d'eau. La précision de la mesure peut également avoir un impact relativement important. Dans le cas du bassin versant de la Seine, une erreur d'un centimètre peut correspondre à un volume d'environ 237 000 m³ (BCEOM, 1999). La relation hauteur-volume peut également être faussée par la sédimentation.
- Les données de précipitations américaines et australiennes correspondent à des données observées spatialisées et les données de précipitations françaises proviennent de la ré-analyse SAFRAN associant observations et sorties de modèle. La qualité des données dépend donc des conditions de mesures de la pluie, de la densité du réseau de mesure et de la méthode de spatialisation employée (Lebecherel *et al.*, 2016).
- Les données d'évapotranspiration potentielle ne sont pas des valeurs mesurables, elles proviennent donc de modèles qui comportent des erreurs (Oudin *et al.*, 2005).

3.5.2 Identification des données anormales

Toutes les chroniques de débits récoltées ont déjà fait l'objet d'une première analyse de qualité par les entités les fournissant. Pour les données de débits sur les bassins américains, toutes les chroniques de plus de trois ans ont fait l'objet d'une vérification. Pour les données jugées non compatibles avec la publication en ligne, les valeurs estimées par le personnel de l'USGS sont fournies. Pour les codes qualité des bassins australiens, la vérification des données se fait au niveau des agences locales. Le BOM, qui récolte toutes les données des stations hydrométriques au niveau national, homogénéise et simplifie les codes qualité attribués par les agences locales. Pour les données françaises de la Banque HYDRO, en plus du code qualité fourni par ces derniers, l'équipe Hydrologie d'INRAE-

Antony applique un module de détection des anomalies et fournit pour chaque mesure un code qualité indiquant si la valeur est jugée bonne ou anormale (Bourgin *et al.*, 2012). En plus de ces analyses amont, nous avons effectué une vérification visuelle des chroniques de débit ainsi que des chroniques de volumes des réservoirs.

Pour les chroniques de débits, le fait que les chroniques soient influencées complique la détection des erreurs, surtout sur les bas débits. Notre analyse a donc essentiellement consisté à mettre les valeurs jugées aberrantes en lacunes. Pour nous aider à juger si un pic de débit est anormal, la courbe des précipitations et la courbe des variations de volume des barrages-réservoirs amont ont également été tracées (figure 3.8) afin de vérifier si un pic de débit correspond bien à un lâcher de barrage ou à un apport des précipitations.

Les chroniques de volume des barrages-réservoirs ont également fait l'objet d'une vérification visuelle afin de détecter les erreurs. Les chroniques de volumes des barrages-réservoirs évoluent de façon assez lissée, ce qui facilite la détection d'éventuelles erreurs.

3.5.3 Gestion des données manquantes et douteuses

Pour les chroniques de volumes des barrages-réservoirs, nous avons traité les données manquantes et douteuses de la même manière. En cas de données manquantes, une interpolation linéaire est effectuée, sous condition qu'il n'y ait pas plus de sept jours entre les deux points interpolés. Dans le cas des chroniques de débits, les données anormales sont considérées comme manquantes.

3.6 Cas d'études spécifiques

Dans la suite des travaux, des analyses générales seront faites selon les groupes de bassins, représentatifs des conditions climatiques et influencées des bassins. Des analyses seront également faites plus en détail dans le cas où des bassins présentent des résultats anormaux. Pour illustrer nos travaux par des cas concrets, quatre bassins versants, venant des quatre groupes de bassins (partie 3.4), ont été arbitrairement sélectionnés. Ce sont des bassins où la seule influence considérée dans le processus de naturalisation est l'impact des barrages-réservoirs amont.

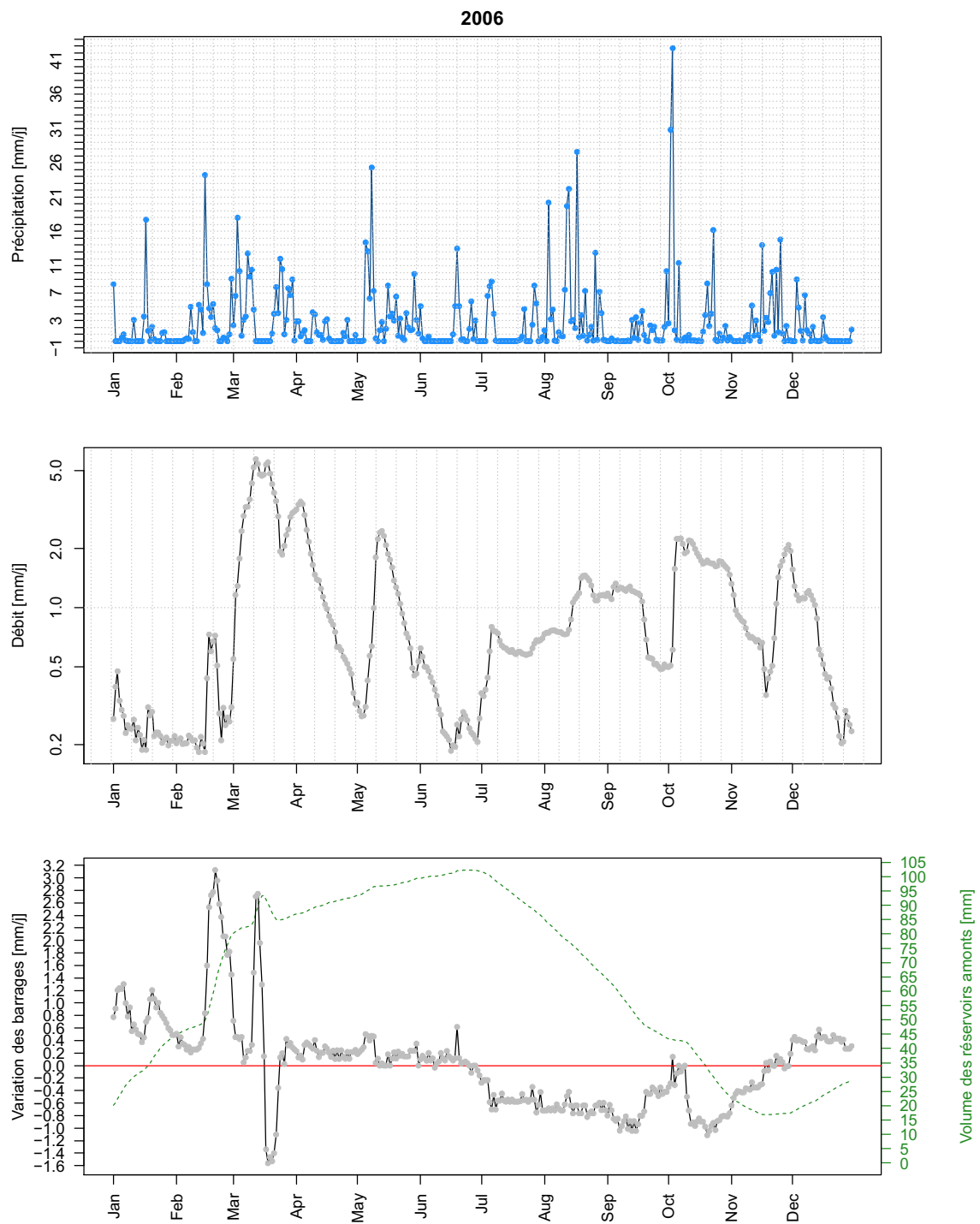


Figure 3.8 – Chronique des débits de l’Aube à Blaincourt-sur-Aube (H1231010) en 2006 (milieu), des précipitations associées à son bassin versant (haut), des variations de volume du barrage de l’Aube en amont (bas en noir), et du volume des réservoirs amont (bas en vert).

Tableau 3.5 – Caractéristiques des quatre bassins versants choisis comme cas d'études spécifiques.

| Station | Groupe | Aire [km^2] | Indice d'aridité [-] | IRI_D [-] | SC_D [-] | VI_D [-] |
|--|--------|--------------------|----------------------------|-------------|------------|------------|
| Glennies Creek à Middle Falbrook, 210044 | 1 | 425 | 0.7 | 5 | 50 | 0.29 |
| La Manilla ri- ver à l'aval de Split Rock Dam, 419043 | 2 | 1 576 | 0.5 | 8.1 | 100 | 0.24 |
| L'Aube à Arcis-sur-Aube, H1501010 | 3 | 3 590 | 1.3 | 0.2 | 46 | 1.66 |
| La Gimone à Garganvillar, O2883310 | 4 | 827 | 0.9 | 0.4 | 5 | 1.44 |

3.6.1 Glennies Creek à Middle Falbrook (210044, AUS), Groupe 1

Le bassin semi-aride de Glennies Creek à Middle Falbrook (figure 3.9) fait partie du grand ensemble hydrologique de bassins de la côte Sud-Est de Nouvelle-Galles du Sud selon le conseil de l'agriculture et de la gestion des ressources d'Australie et de Nouvelle-Zélande (ARMCANZ). Le bassin de Glennies Creek à Middle Falbrook a une surface de 425 km^2 . Le bassin est principalement occupé par des forêts (61.7 %), de l'agriculture pluviale (33.8 %) et des plans d'eau (3.5 %). La surface de terre irriguée sur le bassin représente une surface de seulement 13 km^2 , soit 0.17 % de la surface du bassin. Or, comme nous le verrons pour cet exemple et le suivant, les barrages ont pour vocation d'apporter un soutien à l'agriculture. Il se peut donc que les terres dites d'agriculture pluviale reçoivent également ponctuellement de l'eau.

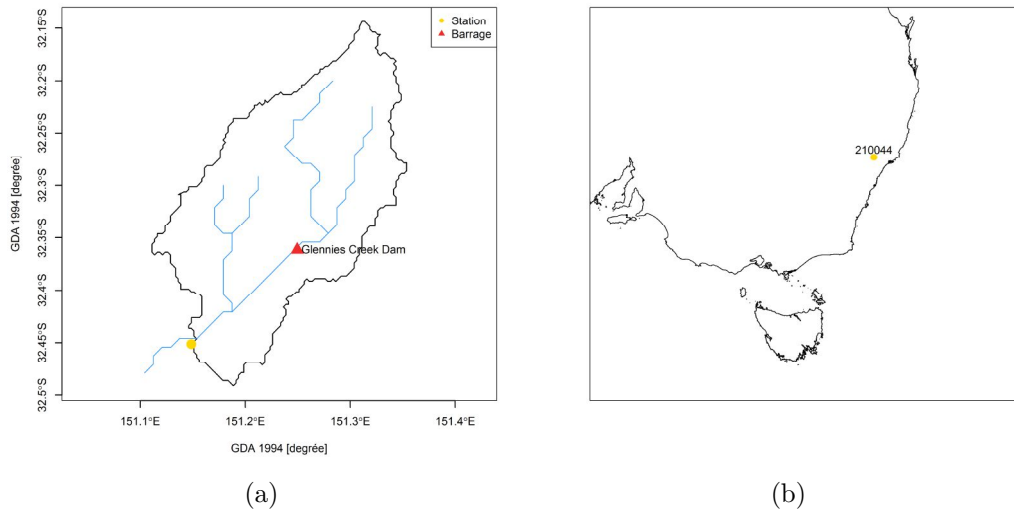


Figure 3.9 – Localisation du bassin versant de Glennies Creek à Middle Falbrook et des barrages-réservoirs amont.

Le bassin est influencé par le barrage-réservoir de Glennies Creek, d'une capacité de 283 hm^3 . Il a été mis en service en 1983 afin de fournir de l'eau tout au long de l'année pour l'alimentation en eau potable, pour l'agriculture et les industries ainsi que pour écrêter les pics de crue. Le barrage-réservoir a la capacité de stocker cinq fois la quantité d'eau annuelle écoulée (tableau 3.5), c'est donc un barrage qui a une gestion pluriannuelle. Il contrôle 50% du bassin versant. Sur la figure 3.10, il apparaît que le barrage-réservoir a fait baisser le module qui est passé de 0.51 mm/j à 0.35 mm/j . Les débits qui atteignaient 83.9 mm/j avant la mise en service du barrage-réservoir, ne dépassent plus les 56 mm/j . Concernant les bas débits, avant la mise en service du barrage, des débits nuls étaient observés sur 13% de la chronique. La mise en service du barrage-réservoir a permis un soutien durant la période d'étiage et la fin des périodes d'assecs. On note une lacune de plus de 10 ans, dont nous ne connaissons pas l'origine.

La figure 3.11a présente le régime de la rivière avant (courbe verte) et après (courbe rouge) mise en service du barrage-réservoir. Avant mise en service du barrage-réservoir, la période de hautes eaux allait de mai à septembre et la période de basses eaux d'octobre à avril. Après mise en service, on constate que le régime est plus constant, et que les périodes de hautes et basses eaux ont été inversées. D'un point de vue météorologique, en Australie, la saison chaude va de novembre à mars, et la saison froide d'avril à octobre. Il se peut donc que durant la saison chaude, la demande en eau soit plus importante, notamment

pour l'irrigation à l'aval. Le barrage adapte donc sa gestion pour fournir de l'eau durant cette période (figure 3.11b). Nous verrons plus en détail dans le chapitre 4 si les écarts climatiques entre les deux périodes peuvent également expliquer ces différences.

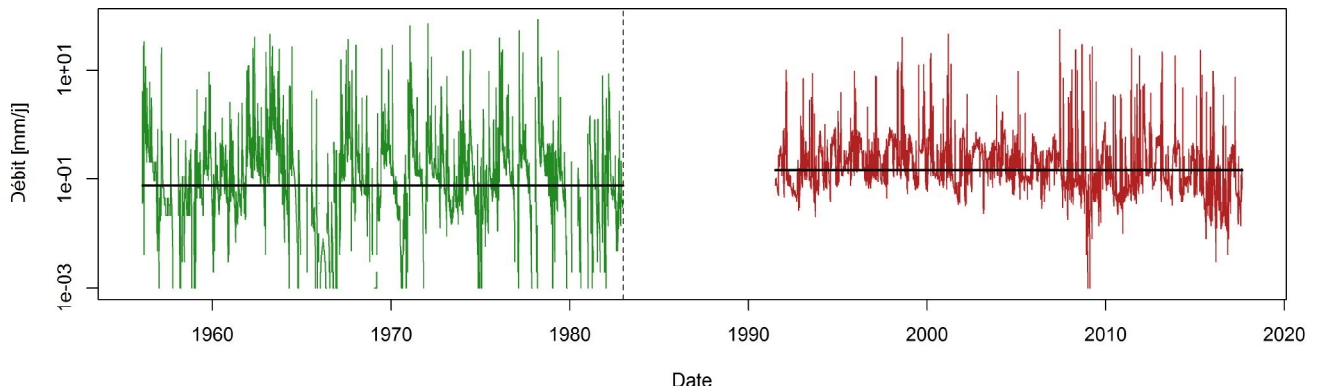


Figure 3.10 – Chronique des débits de Glennies Creek à Middle Falbrook (210044). La ligne verticale pointillée correspond à la mise en service du barrage-réservoir de Glennies Creek. La partie verte et rouge des chroniques correspondent respectivement au débit observé avant et après mise en service du barrage-réservoir. Les lignes horizontales noires correspondent au débit médian avant et après mise en service du barrage-réservoir. L'échelle est logarithmique.

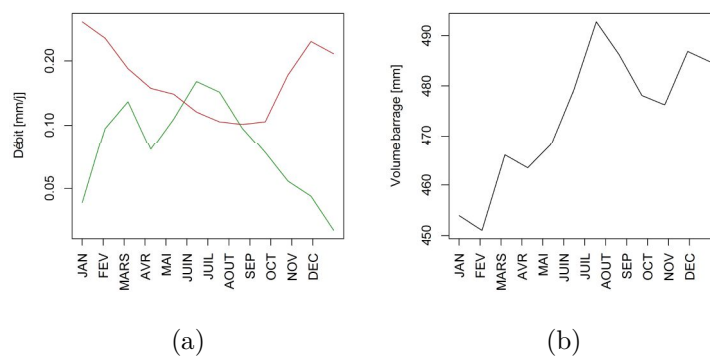


Figure 3.11 – Régime mensuel interannuel des débits (a) de Glennies Creek à Middle Falbrook (210044) et des volumes du barrage de Glennies Creek (b). Les courbes verte et rouge correspondent respectivement au débit observé avant et après mise en service du barrage-réservoir. L'échelle de la figure a) est logarithmique.

3.6.2 La Manilla river à l'aval de Split Rock Dam (419043, AUS), Groupe 2

Le bassin semi-aride de la Manilla river à l'aval de Split Rock Dam (figure 3.12) se situe à l'est du bassin de Murray-Darling. Le bassin hydrographique de Murray-Darling, d'une superficie de plus d'un million de kilomètres carrés, se situe sur plusieurs États où se concentre la majorité de la population australienne (Nouvelle-Galles du Sud, Victoria, Queensland, Territoire de la Capitale Australienne). Il fait l'objet de nombreuses études notamment sur l'estimation de la ressource en eau (CSIRO, 2008 ; MDBA, 2010b) grâce à un modèle. Le bassin de Manilla river à l'aval de Split Rock Dam a une surface de 1576 km^2 dont l'occupation du sol est principalement composée de forêt (63 %), d'agriculture pluviale (33.8 %), de plans d'eau (1.3 %). Les terres irriguées représentent seulement 4 km^2 de surface.

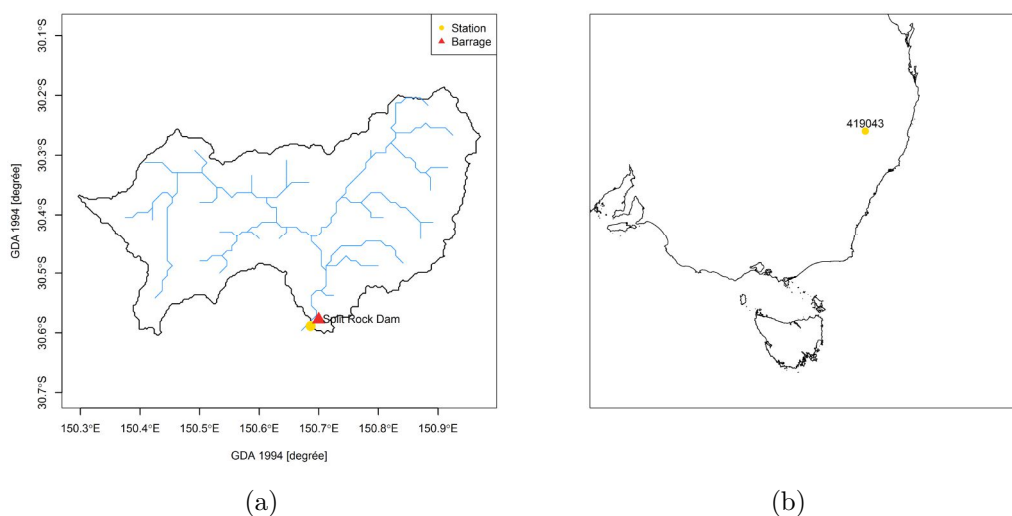


Figure 3.12 – Localisation du bassin versant de la Manilla river à l'aval de Split Rock Dam et des barrages-réservoirs amont.

La station se situe juste à l'aval du barrage de Split Rock Dam, son débit dépend donc principalement du mode de gestion du barrage. D'une capacité de 397 hm^3 , il a été mis en service en 1987 afin de fournir de l'eau pour l'irrigation. Le barrage-réservoir a la capacité de stocker huit fois la quantité d'eau annuelle écoulée (tableau 3.5), c'est donc un barrage qui a une gestion pluriannuelle. Selon les chroniques de débits observés (figure 3.13), le module est passé de $0.13 \text{ mm}/j$ à $0.08 \text{ mm}/j$ après mise en service du barrage-réservoir.

Depuis la mise en service, le débit observé ne dépasse plus 13.3 mm/j , contre 17.8 mm/j avant, et ne descend plus sous la barre des 0.001 mm/j , alors qu'avant on observait sur 6 % de la chronique des débits nuls. Après la mise en service du barrage, le régime a été inversé (figure 3.14) et les débits observés ont une amplitude moins importantes qu'avant. Nous verrons plus en détail dans le chapitre 4 si les écarts climatiques entre les deux périodes peuvent également expliquer ces différences.

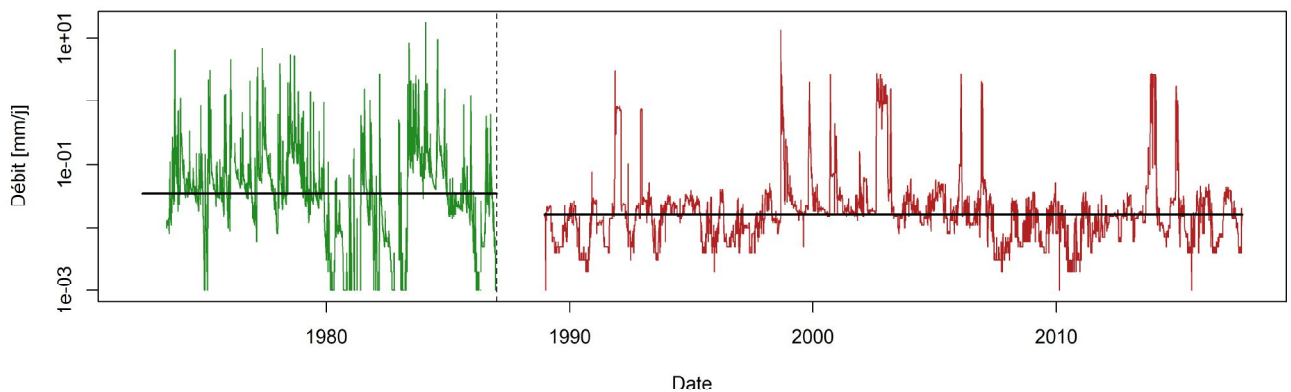


Figure 3.13 – Chronique des débits de la Manilla river à l'aval de Split Rock Dam (419043). La ligne verticale pointillée correspond à la mise en service du barrage-réservoir de Split Rock Dam. La partie verte et rouge des chroniques correspondent respectivement au débit observé avant et après mise en service du barrage-réservoir. Les lignes horizontales noires correspondent au débit médian avant et après mise en service du barrage-réservoir. L'échelle est logarithmique.

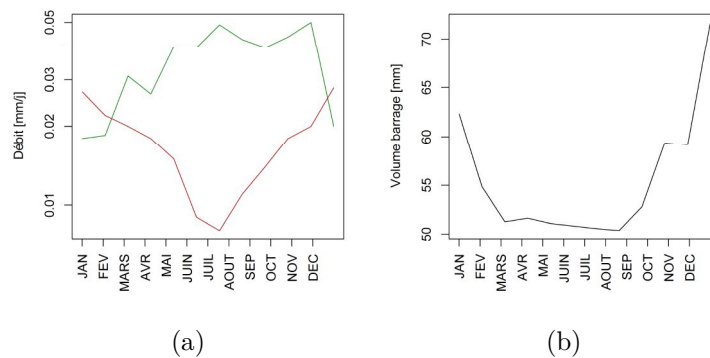


Figure 3.14 – Régime mensuel interannuel des débits (a) de la Manilla river à l'aval de Split Rock Dam (419043) et des volume du barrage de Split Rock Dam (b). Les courbes verte et rouge correspondent respectivement au débit observé avant et après mise en service du barrage-réservoir. L'échelle de la figure a) est logarithmique.

3.6.3 L'Aube à Arcis-sur-Aube (H1501010, FR), Groupe 3

Le bassin humide de l'Aube à Arcis-sur-Aube se situe sur le bassin de la Seine en France. Sa surface de $3\,590\text{ km}^2$ est en majoritairement couverte par des terres agricoles (58 %), de la forêt (39 %) et de surface artificialisée (2.1 %).

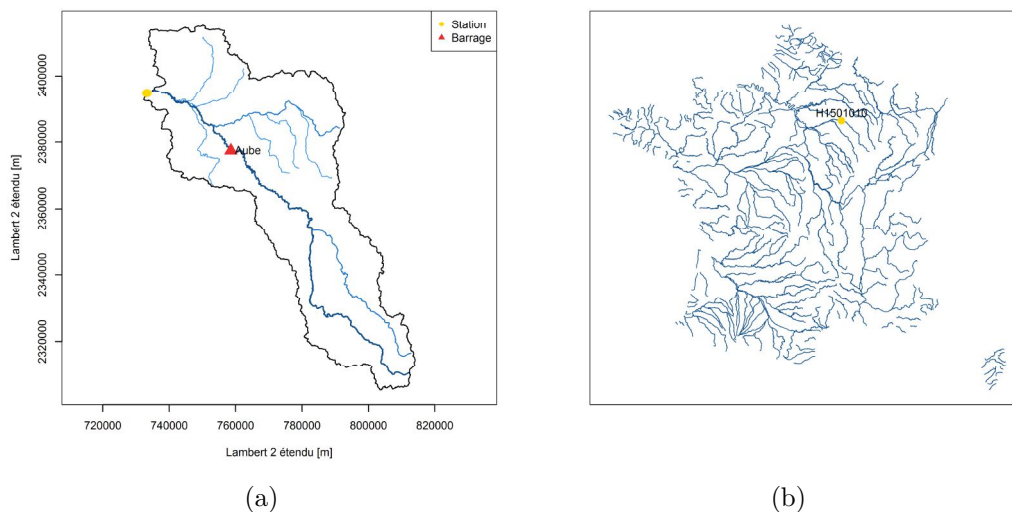


Figure 3.15 – Localisation du bassin versant l'Aube à Arcis-sur-Aube et des barrages-réservoirs amont.

La station d'Arcis-sur-Aube se trouve à l'aval du réservoir Aube, géré par l'Établissement territorial public de bassin (EPTB) Seine Grands Lacs (seinegrandslacs.fr). Le principal rôle du barrage de l'Aube est de soutenir le débit à l'aval pendant l'étiage ainsi que de diminuer le risque d'inondation. Le barrage a un fonctionnement annuel : le remplissage du réservoir démarre en principe le 1^{er} novembre et s'achève fin juin, puis une vidange du lac est effectuée de début juillet à fin octobre (figure 3.17b). Ces périodes, définies par arrêté inter-préfectoral, peuvent varier selon les aléas climatiques. Le barrage contrôle 50% du bassin versant d'Arcis-sur-Aube. D'après les chroniques de débit observé à Arcis-sur-Aube (figure 3.16), après la mise en service du barrage en 1990, le débit n'est plus descendu sous $0.128\text{ mm}/j$ et ne dépasse plus $4.7\text{ mm}/j$, contre respectivement 0.049 et $7.6\text{ mm}/j$ avant. Le module a légèrement baissé en passant de 0.83 à $0.79\text{ mm}/j$. La figure 3.17a montre qu'après la mise en service du barrage-réservoir de l'Aube, la variabilité du régime a diminué.

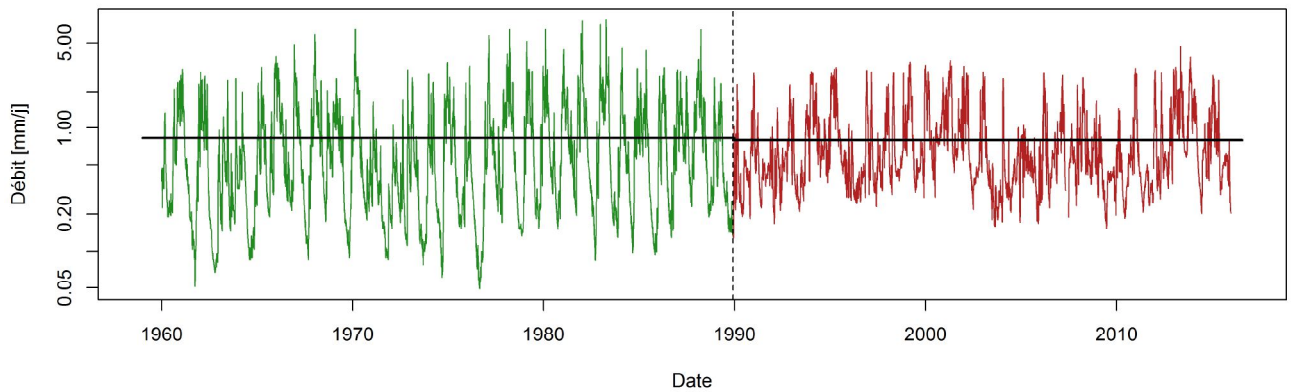


Figure 3.16 – Chronique des débits de l'Aube à Arcis-sur-Aube (H1501010). La ligne verticale pointillée correspond à la mise en service du barrage-réservoir de l'Aube. La partie verte et rouge des chroniques correspondent respectivement au débit observé avant et après mise en service du barrage-réservoir. Les lignes horizontales noires correspondent au débit médian avant et après mise en service du barrage-réservoir. L'échelle est logarithmique.

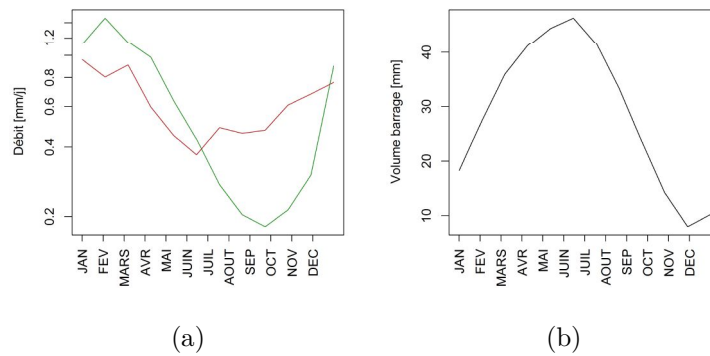


Figure 3.17 – Régime mensuel interannuel des débits (a) de l'Aube à Arcis-sur-Aube (H1501010) et des volumes du barrage de l'Aube (b). Les courbes verte et rouge correspondent respectivement au débit observé avant et après mise en service du barrage-réservoir. L'échelle de la figure a) est logarithmique.

3.6.4 La Gimone à Garganvillar (O2883310, FR), Groupe 4

Le bassin humide de la Gimone à Garganvillar se situe dans le sud-ouest de la France. Sa surface de 827 km^2 est majoritairement couverte par des terres agricoles (94 %) et des forêts (5 %). La particularité des bassins humides du groupe 4 par rapport à ceux du groupe 3 est que la variabilité de leurs précipitations, de l'ordre de 20%, est plus importante. La figure 3.19 illustre ces variabilités interannuelles des précipitations.

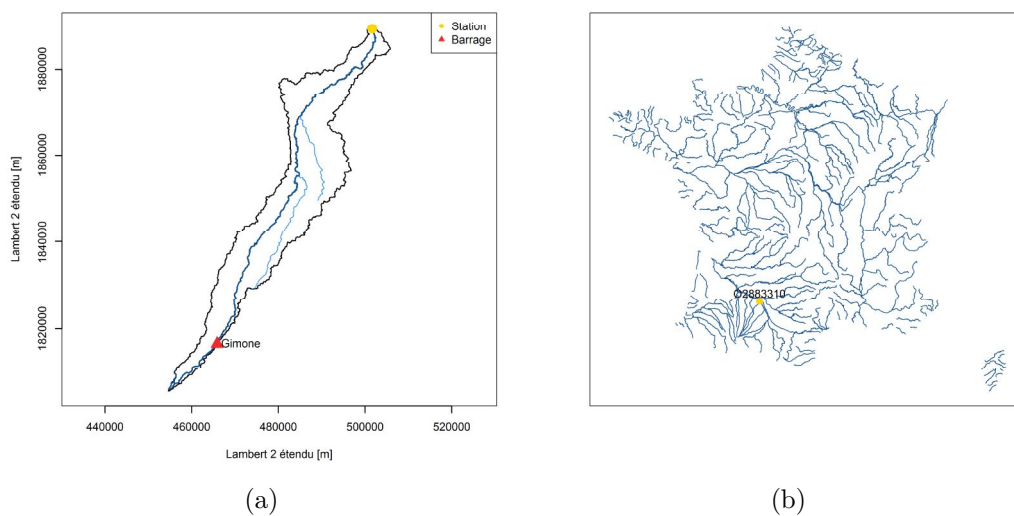


Figure 3.18 – Localisation du bassin versant de la Gimone à Garganvillar et des barrages-réservoirs amont.

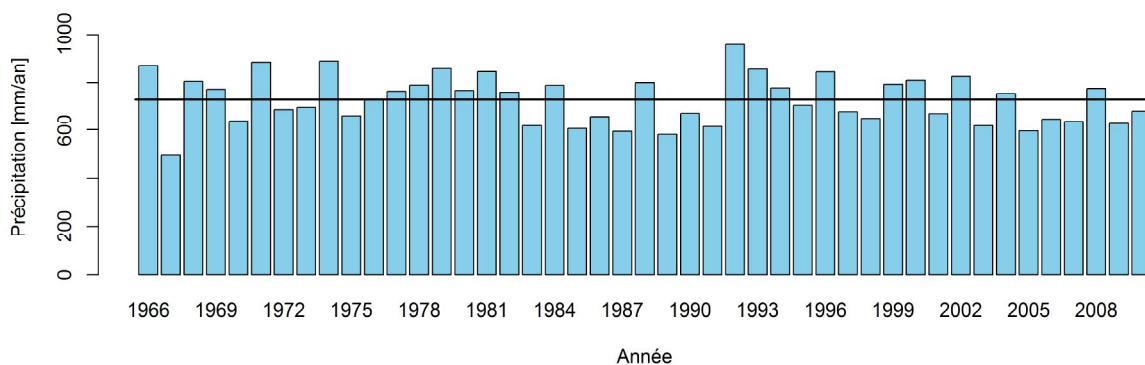


Figure 3.19 – Chronique des pluies annuelles de la Gimone à Garganvillar (O2883310) de 1966 à 2010. La courbe horizontale noire représente la pluie moyenne inter-annuelle d'une valeur de 727 mm/an .

Le principal rôle du barrage de la Gimone est de fournir de l'eau pour l'irrigation et de limiter le risque de crue. Il a cependant une gestion annuelle et n'est capable de stocker que 40% du module de l'écoulement à la station de la Gimone à Garganvillar. Le barrage-réservoir ne contrôle que 5% du bassin versant. Le barrage-réservoir est rempli de décembre à fin mai, puis est vidangé de juin à fin novembre (figure 3.21b). Après mise en service du barrage-réservoir, le module a diminué de 0.36 à 0.24 mm/j (figure 3.20) et les débits ne dépassent plus le seuil de 10.7 mm/j contrairement à 21.2 mm/j avant. Le régime de la période influencée a des amplitudes plus faibles que le débit naturel observé (figure 3.21).

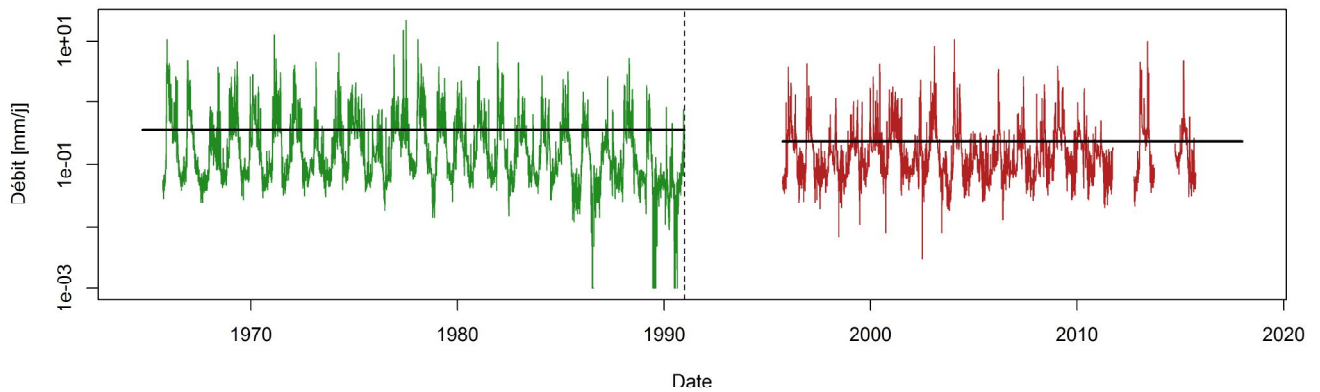


Figure 3.20 – Chronique des débits de la Gimone à Garganvillar (O2883310). La ligne verticale pointillée correspond à la mise en service du barrage-réservoir de la Gimone. La partie verte et rouge des chroniques correspondent respectivement au débit observé avant et après mise en service du barrage-réservoir. Les lignes horizontales noires correspondent au débit médian avant et après mise en service du barrage-réservoir. L'échelle est logarithmique.

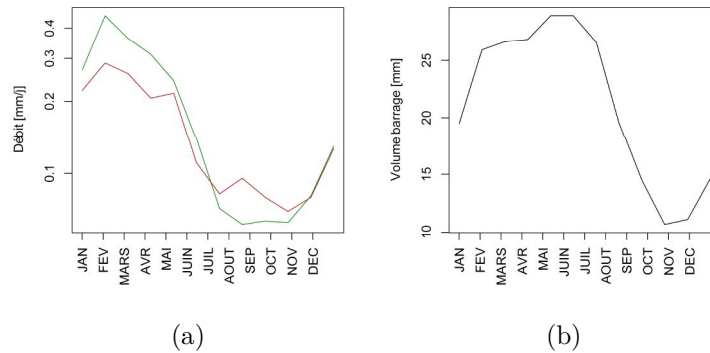


Figure 3.21 – Régime mensuel interannuel des débits (a) de la Gimone à Garganvillar (O2883310) et des volumes du barrage de la Gimone (b). Les courbes verte et rouge correspondent respectivement au débit observé avant et après mise en service du barrage-réservoir. L'échelle de la figure a) est logarithmique.

3.7 Synthèse

La présentation de la base de données a permis de mettre en avant la diversité des bassins versants et barrages de l'étude. Une classification ascendante hiérarchique a permis de distinguer quatre principaux groupes de bassins influencés. Par exemple, cela met en évidence que les bassins semi-arides ont des barrages-réservoirs avec une importante capacité de stockage et un faible niveau de variation. Cette classification nous permettra par la suite d'étudier si le niveau de confiance que l'on accorde aux méthodes de naturalisation varie selon le groupe de bassins.

Notre base manque malheureusement de données de prélèvements pour l'ensemble des bassins. Il a été possible sur les bassins français et américains d'estimer indirectement le volume annuel maximal des prélèvements (voir annexe C3). Cependant, ces estimations comportent beaucoup d'incertitudes du fait de la manière d'agréger l'information à l'échelle des bassins versants dans notre étude, et du moyen d'obtention de ces données (sortie de modèle ou données observées). De plus, ces données étant disponibles sur une courte plage temporelle, elles ne peuvent pas être considérées représentatives de l'ensemble de la période d'étude. Ces indicateurs seront principalement utilisés pour l'analyse des cas où les résultats obtenus semblent divergents par rapport au reste de l'échantillon.

4

Comparaison des méthodes de naturalisation

4.1 Introduction

L'état de l'art (chapitre 2) a permis de montrer l'existence de différentes méthodes de naturalisation, qui se distinguent principalement par les hypothèses qu'elles font ainsi que par les données et modèles que nécessite leur application. Une des principales constatations est qu'une seule méthode de naturalisation est généralement appliquée dans les études, la plupart du temps sans justification du choix de la méthode.

Dans un premier temps, ce chapitre présentera les méthodes de naturalisation, représentatives des différentes familles appliquées dans notre étude. Ces méthodes nécessitent pour la plupart l'utilisation de modèles hydrologiques. Afin de permettre une meilleure comparaison des méthodes, nous avons choisi d'utiliser un même modèle hydrologique sur tous les bassins de la base de données.

Le principal objectif de ce chapitre est d'évaluer les différences entre les débits naturalisés obtenus avec les différentes méthodes de naturalisation sans a priori sur leur applicabilité. Dans un premier temps, nous évaluerons l'impact de la prise en compte de l'évaporation et des précipitations des barrages-réservoirs amont sur les débits naturalisés. Certaines méthodes de naturalisation se fondent sur l'estimation des variations de débit induites par les influences pour naturaliser le débit. Lors des échanges avec les bureaux d'études appliquant les méthodes de naturalisation, il est apparu qu'il y avait un questionnement fort en particulier sur les conséquences de la non-prise en compte de l'évaporation des réservoirs amont.

Dans un deuxième temps, une comparaison globale des chroniques de débits naturalisés sera effectuée afin d'évaluer les écarts entre les méthodes. Une comparaison entre plusieurs indicateurs permettra de juger les différences en fonction de diverses conditions d'écoulement (crue, étiage, etc.).

4.2 Méthodes et outils

4.2.1 Méthodes de naturalisation appliquées

Une méthode provenant de chaque famille de naturalisation a été choisie, à l'exception de la modélisation hydraulique. Celle-ci nécessite en effet la mise en place d'un modèle hydraulique sur l'ensemble des bassins, ce qui représentait une tâche trop large pour le cadre de cette thèse.

Cette partie ne revient pas sur le principe des méthodes (chapitre 2), mais présente leurs spécificités d'application à notre base de données.

4.2.1.1 Méthode de bilan sur ouvrage (BO)

La méthode de bilan sur ouvrage consiste à additionner à chaque pas de temps la variation de volume induite par les influences au débit influencé observé afin d'obtenir un débit naturalisé. Dès lors que le temps de trajet entre la source d'influence et la station influencée est supérieur au pas de temps (ici un jour), celui-ci doit être logiquement pris en compte. N'ayant pas accès à des données de propagations journalières, une estimation indirecte du temps de propagation entre les réservoirs et les stations a été effectuée (annexe D). Sur les bassins français et américains, le temps de trajet correspond à un temps de trajet moyen obtenu grâce à la distance hydraulique, entre le réservoir et la station, et la vitesse de propagation. Sur les bassins australiens, le temps de trajet a été obtenu avec le modèle vectoriel AWRA-D (Dutta *et al.*, 2015), calé par l'équipe du CSIRO.

4.2.1.2 Méthodes hydrologiques

Méthode de reconstitution (R). La méthode de reconstitution consiste à caler un modèle hydrologique prenant en compte les influences sur les débits influencés observés, puis à utiliser le jeu de paramètres obtenu en considérant les influences comme nulles. Dans notre cas, il convient de sélectionner un modèle pouvant prendre en compte l'influence des barrages-réservoirs et des prélèvements sur les bassins.

La principale hypothèse soulevée par cette méthode est qu'en prenant en compte explicitement les influences et leurs impacts dans le modèle, le jeu de paramètres obtenu en calage va être représentatif du fonctionnement naturel du bassin versant.

Méthode d'extension (E). La méthode d'extension consiste à caler un modèle hydrologique sur les débits naturels observés du bassin versant d'une période antérieure ou postérieure à l'influence, puis à utiliser le jeu de paramètres obtenu sur la période influencée pour simuler un débit naturalisé. Dans notre cas, cette méthode n'est applicable que sur les 34 bassins de la base pour lesquels nous disposons de données d'observation du débit naturel (tableau 3.2).

La principale hypothèse de cette méthode est que le jeu de paramètres obtenu avant la construction du réservoir est représentatif des conditions d'écoulement naturel sur la période influencée et transposable à une autre période climatique (correspondant à la période influencée).

4.2.1.3 Méthode de régionalisation (V)

Parmi les méthodes de régionalisation existantes, il a été choisi d'utiliser la méthode de régionalisation basée sur la proximité spatiale à la place des deux autres principales méthodes existantes, respectivement basées l'estimation des paramètres par régression avec les descripteurs du bassin et la similarité physique. La méthode basée sur la proximité spatiale fait l'hypothèse que plus un bassin naturel est spatialement proche du bassin influencé, plus il a de chance de ressembler à l'état naturel du bassin influencé. Oudin *et al.* (2008) ont montré que parmi les trois méthodes de régionalisation, celle basée sur la proximité spatiale donne les meilleurs résultats en France. En Australie, Zhang et Chiew (2009) ont montré que les différences entre les trois méthodes sont minimales. On ne retrouve pas aux États-Unis, ou sur les États où se trouvent nos bassins, d'étude comparant globalement les différentes méthodes de régionalisation. Dans notre étude, l'information de cinq bassins versants voisins est utilisée (Oudin *et al.*, 2008 ; Zhang et Chiew, 2009).

Pour l'approche de régionalisation, les paramètres du modèle hydrologique sont calés sur un bassin voisin naturel (dit bassin donneur) géographiquement proche où l'on dispose de données de débit observé. Le jeu de paramètres obtenu par calage est transféré vers le bassin à naturaliser (dit bassin receveur). Le débit naturalisé est obtenu en pondérant les débits naturels simulés avec les jeux de paramètres des bassins donneurs par l'inverse

de la distance entre bassins donneurs et receveur. La distance, D , issue des travaux de Lebecherel (2015), est utilisée pour sélectionner des bassins versants donneurs de tailles similaires et géographiquement proches (équation 4.1).

$$D = 0.2 * d_{exutoire} + 0.8 * d_{centroïde} \quad (4.1)$$

$d_{exutoire}$ correspond à la distance entre les exutoires des bassins et $d_{centroïde}$ correspond à la distance entre les centroïdes des bassins.

4.2.2 Modèle hydrologique

Les modèles hydrologiques utilisés dans les études de naturalisation présentent une diversité en termes de nature et de complexité (voir tableau 2.8, chapitre 2). Dans notre cas, afin de permettre leur application sur l'ensemble des bassins de la base de données, il a été choisi d'utiliser des modèles conceptuels globaux nécessitant peu de données en entrée et ayant un faible nombre de paramètres.

4.2.2.1 Modèle de bassin naturel

Le modèle de bassin naturel choisi est le modèle du **Génie Rural à 5 paramètres Journalier** (version 1.0.9), GR5J, développé par l'équipe Hydrologie d'INRAE à Antony (<http://webgr.inrae.fr/>) et disponible dans le package airGR (Coron *et al.*, 2018, 2017). C'est un modèle hydrologique simple, capable de simuler des débits naturels, et nécessitant en entrée peu de données : les chroniques de précipitation et d'évapotranspiration potentielle du bassin modélisé. GR5J est un modèle conceptuel où les paramètres ne correspondent pas à des grandeurs physiques directement mesurables (figure 4.1) :

- X1 [mm] : capacité du réservoir de production
- X2 [mm/j] : coefficient d'échanges souterrains en eau. Il est positif en cas d'apports au bassin et négatif en cas de pertes du bassin.
- X3 [mm] : capacité à un jour du réservoir de routage.
- X4 [jour] : temps de base de l'hydrogramme unitaire.
- X5 [-] : seuil de remplissage du réservoir de routage à partir duquel les échanges souterrains s'inversent.

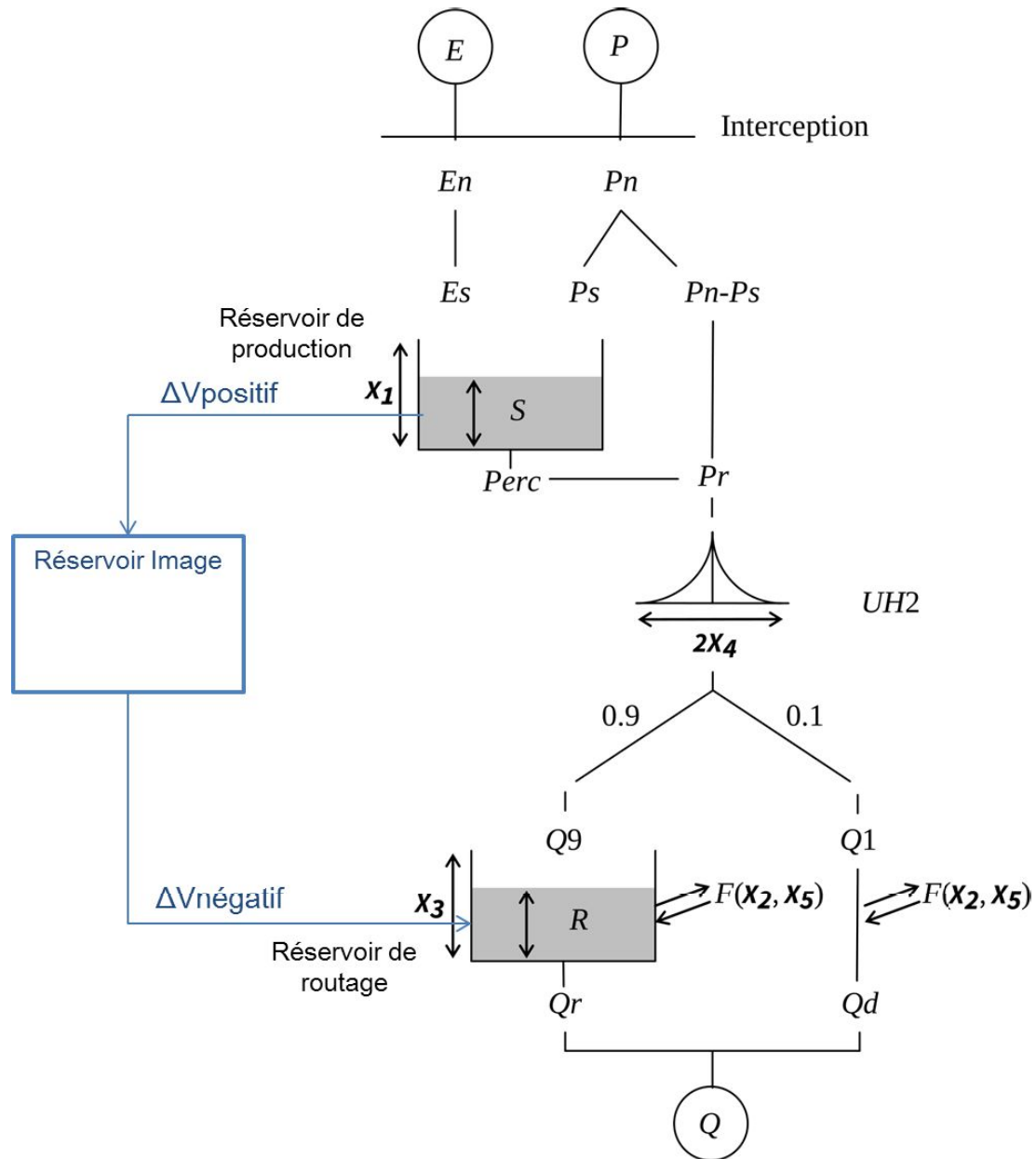


Figure 4.1 – Schéma du fonctionnement du modèle journalier GR5J avec en bleu la partie correspondant au module barrage (E, P et Q sont respectivement l'évapotranspiration potentielle, la pluie et le débit ; X1 à X5 sont les paramètres libres du modèles ; ΔV est la variation de volume dans le réservoir image ; les autres lettres désignent des variables internes du modèle).

Le module CemaNeige (Riboust *et al.*, 2019 ; Valéry *et al.*, 2014), qui permet de prendre en compte l'accumulation et la fonte de la neige, est également utilisé sur les bassins français enneigés. Il comporte deux paramètres : le coefficient de pondération de l'état thermique du manteau et le facteur degré-jour, qui sont fixés respectivement à 0.25 et $3.74 \text{ mm.}^\circ\text{C}^{-1}$ (Poncelet *et al.*, 2017 ; Valéry *et al.*, 2014).

4.2.2.2 Modèle de bassin influencé

Une version de GR4J incluant un réservoir image correspondant aux barrages-réservoirs, a été développée par Payan (2007). GR5J ayant une structure similaire à GR4J, le réservoir image placé dans GR5J a les mêmes entrées et sorties que celui développé pour GR4J (figure 4.1). La variable caractérisant ce réservoir image est la variation du volume, ΔV , entrant dans le réservoir ou en sortant. Lorsque la variation est positive, de l'eau est prise du réservoir de production pour alimenter le réservoir image : cela revient à considérer que le bassin versant naturel alimente globalement les stocks artificiels sur le bassin. Lorsque la variation est négative, de l'eau est prise du réservoir image pour alimenter le réservoir de routage : les stocks artificiels alimentent le bassin naturel. Dans cette étude, le modèle GR5J avec module barrage est nommé GR5J-Dam.

4.2.2.3 Critère de calage des modèles

L'évaluation de la qualité des simulations des modèles hydrologiques se fait par comparaison de la série de débits simulés et d'une référence (typiquement la série des débits observés). Parmi les nombreux critères numériques permettant de quantifier la distance entre les deux séries, nous avons décidé d'utiliser un critère composite basé sur le critère de Kling-Gupta (Gupta *et al.*, 2009), dit KGE (équation 4.3), associant un KGE sur l'inverse des débits et un KGE sur la racine carrée des débits.

$$\text{FonctionObjectif} = 0,5.KGE\left(\frac{1}{Q}\right) + 0,5.KGE(\sqrt{Q}) \quad (4.2)$$

$$KGE(Q) = 1 - \sqrt{(\gamma - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (4.3)$$

où

$$\alpha = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{sim}(i) - \overline{Q}_{sim})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{ref}(i) - \overline{Q}_{ref})^2}}$$

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{sim}(i)}{\sum_{i=1}^n Q_{ref}(i)}$$

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim}(i) - \overline{Q_{sim}}) \cdot (Q_{ref}(i) - \overline{Q_{ref}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{sim}(i) - \overline{Q_{sim}})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{ref}(i) - \overline{Q_{ref}})^2}}$$

$Q_{sim}(i)$ et $Q_{ref}(i)$ sont respectivement le débit simulé et le débit de référence au jour i . $\overline{Q_{sim}}$ et $\overline{Q_{ref}}$ correspondent à leurs moyennes sur l'ensemble de la période de calage. α , β et γ sont respectivement le rapport des écarts-types, le rapport des volumes (ou biais) et la corrélation.

Le KGE varie entre $-\infty$ et 1. Plus il est proche de 1, plus les débits simulés sont proches des débits de référence. Nous n'avons pas choisi le KGE' proposé par Kling *et al.* (2012) et qui considère pour α le rapport des coefficients de variations car, au début de la thèse, il n'était pas disponible dans le package airGR. Le fait de caler le critère de Kling-Gupta sur la racine carrée des débits et l'inverse des débits permet de donner un poids plus important aux débits moyens et aux bas débits (Pushpalatha *et al.*, 2012). Nous avons fait le choix d'utiliser un critère composite pour maximiser les performances du modèle sur plusieurs gammes de débits.

4.2.3 Choix des indicateurs pour la suite de l'étude

Nous allons, dans cette partie, présenter les indicateurs qui serviront par la suite à comparer les chroniques de débits naturalisés obtenues. Dans un premier temps, une comparaison globale des chroniques est proposée. Puis, dans un deuxième temps, des indicateurs sur des évènements hydrologiques plus particuliers sont proposés.

4.2.3.1 Analyse globale

Afin d'évaluer la capacité globale des méthodes et modèles à reproduire les débits observés, on a calculé le KGE (équation 4.3), ainsi que ses trois composantes (α , β , γ). Le KGE est un indicateur numérique qui permet d'évaluer les performances globales des modèles hydrologiques. Selon Crochemore *et al.* (2015), on peut interpréter les valeurs du KGE comme très bonnes lorsqu'elles sont supérieures à 0.80, moyennes lorsqu'elles sont comprises entre 0.79 et 0.60, et faibles lorsqu'elles sont inférieures à 0.60.

Le biais représente la différence quantitative entre deux chroniques de débits, sous la forme du rapport des moyennes simulées et observées. Plus il est proche de 1, plus les

deux chroniques de débits ont des moyennes similaires. Un biais inférieur à 1 est le signe que la chronique simulée sous-estime la chronique de référence.

La corrélation est une mesure du lien entre les séries de débits observés et simulés. Plus la corrélation est proche de 1, plus les chroniques de débits évoluent de manière semblable. Une corrélation négative est le signe que les chroniques de débits évoluent de manière opposée. Dans cette étude, nous avons choisi de considérer qu'une corrélation en valeur absolue est très importante si elle est supérieure ou égale à 0.90, importante entre 0.70 et 0.89, moyenne entre 0.50 et 0.69, faible de 0.30 à 0.49, et négligeable de 0 à 0.29.

Le rapport des écarts-types évalue la différence de variabilité des débits entre deux chroniques. Plus elle est proche de 1, plus les chroniques de débits ont une variation semblable. Si elle est inférieure à 1, cela signifie que la chronique de référence est plus variable par rapport à l'autre chronique. Inversement, si elle est supérieure à 1, cela signifie qu'elle est moins variable.

Pour comparer les débits simulés et observés, une comparaison des courbes de débits classés permettra d'avoir également un aperçu des gammes de débits où se situent les différences.

4.2.3.2 Analyse sur les débits moyens

Module Le module correspond à la moyenne des débits journaliers interannuels obtenus sur n années. En France, l'estimation de ce module est importante car, d'après l'article L.214-18 du Code de l'Environnement, le débit réservé, garantissant en permanence la vie, la circulation et la reproduction des espèces, correspond à un dixième du module naturel et à un vingtième lorsque le module est supérieur à $80 \text{ m}^3/\text{s}$. L'estimation du module naturalisé est donc importante car elle va conditionner la gestion des activités du bassin influencé.

Il est à noter que pour avoir une valeur robuste du module, il est conseillé d'avoir au moins $n = 18$ ans de données (Sauquet et Catalogne, 2011). N'ayant pas des périodes de naturalisation de 18 ans sur l'ensemble de nos bassins, nous sommes conscients que les modules ne seront pas tous robustes. Cependant, cela n'impactera pas les résultats car nous cherchons à comparer les modules obtenus avec chacune des méthodes de naturalisation sur des périodes similaires.

4.2.3.3 Analyse sur les étiages et basses eaux

QMNA5 et Q10 Le QMNA correspond au débit mensuel minimal annuel. Le QMNA5 correspond au QMNA de période de retour cinq ans (c'est-à-dire la valeur sous-passée une année sur cinq).

En France, le QMNA5 correspond à un débit de référence d'étiage. Les QMNA sont des débits de références utilisés par les gestionnaires de bassin pour estimer la normalité et gravité d'un événement d'étiage (Catalogne, 2012).

Le Q10 correspond à la valeur de débit non-dépassée 10% du temps. Il est obtenu à partir de la courbe des débits journaliers classés.

Sur les bassins influencés, les débits caractéristiques d'étiages semblent plus influencés que le module. Selon Baran (2011), dans le cas de prélèvements, ils subissent des diminutions de 75 à 90% par rapport à la situation non influencée, alors que, pour le module, elles sont de l'ordre de 17 à 60%. Dans le cas de barrages de soutien d'étiage, on s'attendrait, à l'inverse, à une augmentation des indicateurs.

Qzero Le Qzero correspond au pourcentage de jours de débits nuls obtenus sur les chroniques de débits naturalisés. Nous avons considéré les débits journaliers inférieurs à 1 l/s comme nuls, car en dessous de ce seuil, nous considérons que le débit est difficilement mesurable et est en deçà de la précision de la plupart des mesures disponibles. C'est un indicateur important dans le cas des bassins australiens de notre échantillon, car dans le sud-est du pays, plusieurs rivières ne sont pas pérennes à l'état naturel (Zhang *et al.*, 2014).

4.2.3.4 Analyse sur les crues et hautes eaux

QJXA5 et Q90 Le QJXA5 correspond au débit journalier maximal annuel de période de retour 5 ans. Le Q90 correspond à la valeur de débit non-dépassée 90% du temps issue de la courbe des débits journaliers classés.

4.2.4 Estimation des variations de volume

Le ΔV , utilisé par les méthodes de bilan sur ouvrage et de reconstitution, est représentatif des variations de volumes induites par les influences. Nous allons dans cette partie présenter comment l'estimer.

4.2.4.1 Estimation initiale

Initialement, à l'échelle d'un barrage-réservoir, le bilan en eau se présente selon la formule suivante (Payan, 2007) :

$$\Delta V(j) = Q_e(j) + P_{ret}(j) - Q_s(j) - p(j) - E_{ret}(j) - I_{ret}(j) \quad (4.4)$$

avec $\Delta V(j)$ la variation du volume d'eau stocké entre le jour j et $j-1$, Q_e et Q_s les débits entrants et sortants, P_{ret} les précipitations sur la retenue, E_{ret} l'évaporation de la retenue, I_{ret} l'infiltration au niveau de la retenue et p les prélèvements dans le réservoir. Nous ne pouvons pas réaliser dans notre étude un bilan en eau détaillé au niveau des barrages-réservoirs car nous ne disposons pas des données nécessaires. A défaut, nous utiliserons deux autres formulations de $\Delta V(j)$.

Formulation 1

Par simplification, dans nos travaux, le $\Delta V(j)$ est calculé avec l'équation 4.5 qui nécessite en comparaison beaucoup moins de données. Le $\Delta V(j)$, correspondant alors à la variation induite par un barrage-réservoir au jour j , est obtenu en soustrayant au volume stocké au jour j , $V(j)$, le volume stocké au jour $j-1$, $V(j-1)$ (équation 4.5). Un $\Delta V(j)$ positif correspond à un remplissage du réservoir et un $\Delta V(j)$ négatif à une vidange du réservoir.

$$\Delta V(j) = V(j) - V(j-1) \quad (4.5)$$

Cette formulation induit qu'en naturalisant, l'impact des prélèvements au niveau des réservoirs, l'infiltration et l'évaporation induites par la présence des réservoirs, de même que les précipitations sur le réservoir, ne sont pas pris en compte. Ceci peut induire des erreurs dans le processus : par exemple, dans le cas où d'importants prélèvements sont effectués dans le réservoir, la variation de volume correspondante serait considérée comme

un lâcher de barrage et serait soustraite au débit observé alors que ce dernier ne comporte pas la trace de lâcher.

Formulation 2

Cette deuxième formulation se base sur la prise en compte de l'évaporation et les précipitations sur les barrages-réservoirs amont 4.6.

$$\Delta V(j) = V(j) - V(j - 1) + E_{ret}(j) - P_{ret}(j) \quad (4.6)$$

En annexe E, est présenté l'estimation de $\Delta V(j)$ (équation 4.6) avec prise en compte de l'évaporation et des précipitations sur les réservoirs. L'annexe présente les sources des données de précipitations et d'évaporation utilisées, ainsi que la méthode utilisée pour estimer les variations de surface des réservoirs.

4.2.4.2 Comparaison de l'évaporation et des précipitations du réservoir par rapport aux autres variables

Pour rappel, les groupes 1 et 2 sont composés des bassins semi-arides. Les bassins du groupe 2 ont la caractéristique d'être potentiellement fortement influencés par les barrages-réservoirs amont. Les groupes 3 et 4 sont composés des bassins humides. Les bassins du groupe 4 ont la caractéristique d'avoir une variabilité interannuelle des précipitations plus importantes.

La figure 4.3 représente les valeurs annuelles moyennes du débit influencé observé, de l'évaporation des barrages-réservoirs amont et des précipitations qu'ils reçoivent, des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle, ramenés à la surface des bassins. Bien que les bassins du groupe 1 soient semi-arides et aient une évapotranspiration deux fois plus importante que les bassins humides des groupes 3 et 4, le volume d'eau annuel moyen évaporé des réservoirs est similaire sur ces trois groupes (figure 4.3a). Cela s'explique par le fait que la surface moyenne des barrages-réservoirs représente une faible part de la surface des bassins versants des groupes 1, alors que sur les groupes 3 et 4 la surface des barrages-réservoirs est plus importante (figure 4.2). Sur les bassins semi-arides du groupe 2 situés directement à l'aval de réservoirs, l'évaporation des barrages-réservoirs est environ

quatre fois plus importante que sur les bassins des groupes 1, 3 et 4, du fait du climat semi-aride des bassins et de la plus grande surface des réservoirs par rapport à la surface des bassins.

Sur les bassins humides des groupes 3 et 4, les précipitations reçues par les barrages-réservoirs sont relativement faibles par rapport à la quantité d'eau évaporée. Sur les bassins des groupes 1 et 2, les précipitations reçues par les barrages-réservoirs (figure 4.3b) représentent la moitié de la quantité d'eau évaporée. Ceci s'explique par le fort gradient est-ouest des précipitations (CSIRO, 2008) et le fait que les barrages-réservoirs se trouvent dans la zone recevant la majorité des pluies des bassins.

Au final, en combinant l'influence des précipitations et de l'évaporation sur les barrages-réservoirs, on retrouve sur les groupes 1, 3 et 4, une quantité annuelle d'eau similaire perdue par les barrages-réservoirs. Cependant, le débit influencé annuel moyen des bassins du groupe 1 étant relativement bas (figure 4.3e), la prise en compte de l'évaporation et des précipitations sur les barrages-réservoirs aura potentiellement un impact plus important que sur les bassins des groupes 3 et 4. Sur les bassins semi-arides du groupe 2, l'évaporation et les précipitations de ces derniers représentent en valeur médiane 5.5 mm/an. Par rapport au débit observé influencé, valant en valeur médiane 32 mm/an, l'évaporation des réservoirs a potentiellement un impact non-négligeable. Nous allons donc voir quel impact a la prise en compte de l'évaporation des barrages-réservoirs amont et leurs précipitations, sur les méthodes de bilan sur ouvrage et de reconstitution dans les parties 4.3.1 et 4.3.2.

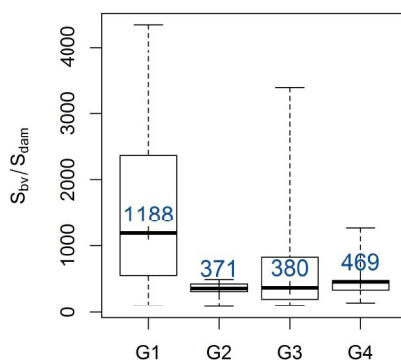


Figure 4.2 – Rapport de la surface des bassins versants et des surfaces moyennes des barrages-réservoirs amont par groupe de bassins (G1 à G4). Plus le rapport est grand, plus la surface des barrages-réservoirs est petite par rapport à la surface des bassins versants, et inversement.

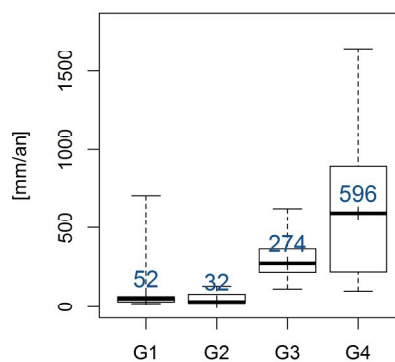
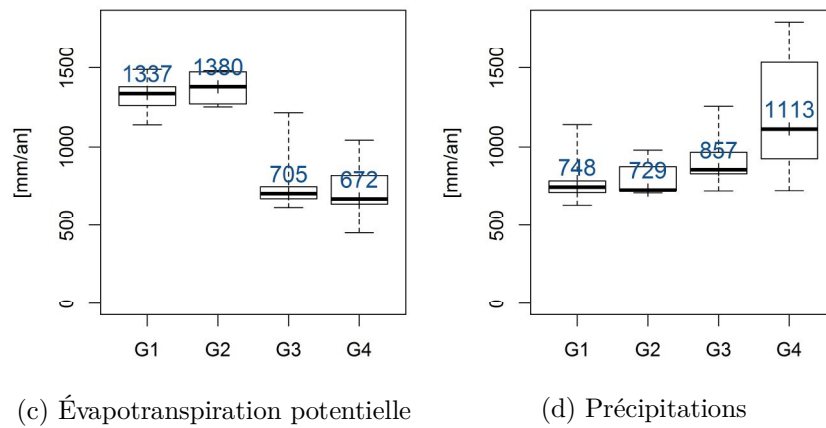
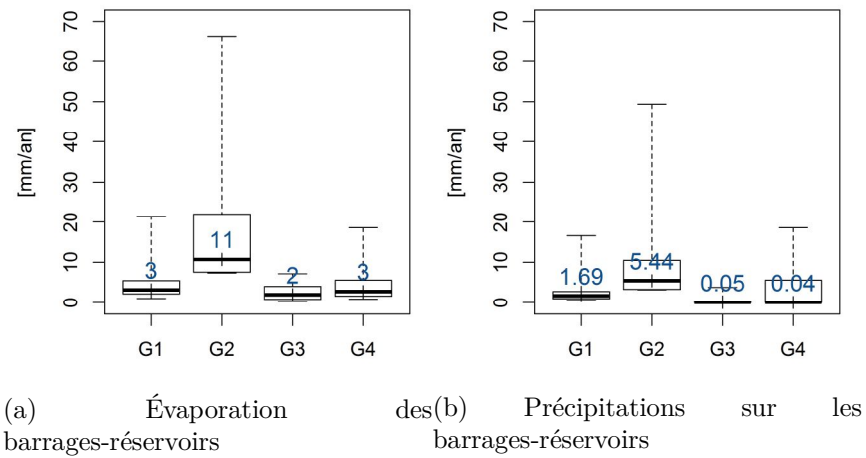


Figure 4.3 – Moyenne annuelle par groupe de bassins de l'évaporation des barrages-réservoirs amont (a), des précipitations sur les barrages-réservoirs amont (b), de l'évapotranspiration potentielle (c) et des précipitations (d) du bassin versant, et du débit influencé observé (e). Pour les graphiques (a) et (b), il s'agit des hauteurs équivalentes à l'échelle du bassin versant.

4.3 Prise en compte de l'évaporation et des précipitations sur les débits naturalisés

Les méthodes de bilan sur ouvrage et de reconstitution reposent sur l'utilisation d'une chronique de variations de volume (ΔV) représentative de l'influence des barrages-réservoirs. Dans notre revue bibliographique (chapitre 2), nous n'avons trouvé que deux études prenant en compte l'évaporation des barrages-réservoirs et/ou les précipitations avec ces deux méthodes (Fantin-Cruz *et al.*, 2015 ; R.J. Brandes Company *et al.*, 2004), sans évaluation de l'impact de leur prise en compte. Nous allons donc dans cette partie évaluer l'impact de la non prise en compte de l'évaporation et des précipitations sur les barrages-réservoirs amont par groupes de bassins.

4.3.1 Méthode de bilan sur ouvrage

La figure 4.4 illustre l'impact de la prise en compte de l'évaporation et des précipitations sur les réservoirs, sur les différents quantiles de débits naturalisés obtenus avec la méthode de bilan sur ouvrage. Les boîtes à moustaches blanches représentent les résultats de la méthode de bilan sur ouvrage sans leur prise en compte et les boîtes à moustaches grises avec leur prise en compte. Le tableau 4.1 illustre l'impact médian de leur prise en compte sur les quantiles naturalisés par la méthode de bilan sur ouvrage sans prise en compte de l'évaporation.

Tableau 4.1 – Différence relative (en %) par groupe de bassins entre les quantiles de débits naturalisés, obtenus par la méthode de bilan sur ouvrage, avec et sans prise en compte de l'évaporation et des précipitations sur les réservoirs.

| | Q10 | Q20 | Q30 | Q40 | Q50 | Q60 | Q70 | Q80 | Q90 |
|----------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| Groupe 1 | -112 | -1093 | -101 | -41 | -19 | -11 | -5.8 | -2.8 | -0.6 |
| Groupe 2 | -Inf | -Inf | -Inf | -Inf | -335 | -118 | -69 | -20 | -2.4 |
| Groupe 3 | -8.4 | -5.7 | -3.6 | -2 | -1.1 | -0.7 | -0.4 | -0.2 | -0.1 |
| Groupe 4 | -6.8 | -6.1 | -3.8 | -2.1 | -1.3 | -1.1 | -0.8 | -0.4 | -0.2 |

De manière générale, la prise en compte de l'évaporation dans le calcul de $\Delta V(j)$ (formulation 2) induit une augmentation plus ou moins forte des quantiles de débits (figure 4.5). Ceci est dû au fait qu'en les prenant en compte pour naturaliser, on va ajouter au

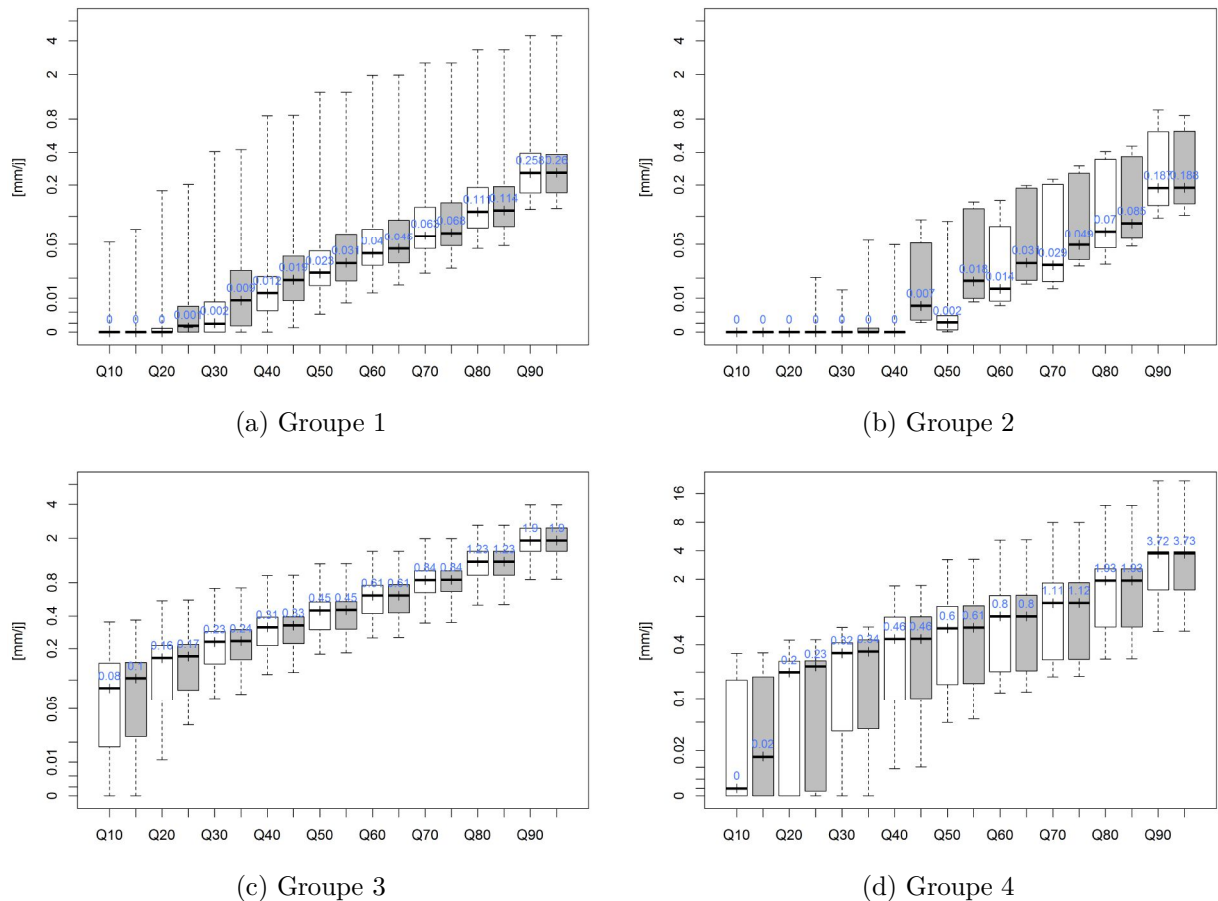


Figure 4.4 – Quantiles calculés sur les débits naturalisés obtenus avec la méthode de bilan sur ouvrage par groupe de bassins, en ne considérant pas l'évaporation et les précipitations sur les réservoirs (boîtes à moustaches blanches) et en les prenant en compte (boîtes à moustaches grises). Le graphe (d) a une échelle des ordonnées différente des trois autres groupes. La croix correspond à la valeur médiane, les extrémités des boîtes aux quantiles 0,25 et 0,75, et les extrémités des moustaches aux quantiles 0,05 et 0,95.

débit influencé la différence entre la quantité d'eau évaporée et tombée sur le réservoir. Comme on peut le constater sur nos exemples (figure 4.6), cette différence est positive tout au long de l'année sur les bassins humides des groupes 3 et 4. Pour les bassins semi-arides des groupes 1 et 2, cette différence est également positive la majorité de l'année sauf durant la période hivernale allant de juin à août en Australie. Les précipitations sur les réservoirs semblent relativement constantes tout au long de l'année, alors que l'évaporation des réservoirs est clairement cyclique avec un pic durant la période estivale, de juin à septembre pour les bassins français des groupes 3 et 4 et de novembre à février pour les bassins australiens des groupes 1 et 2. C'est donc durant la période de basses eaux que l'impact de la prise en compte des variables météorologiques des réservoirs aura potentiellement le plus d'impact.

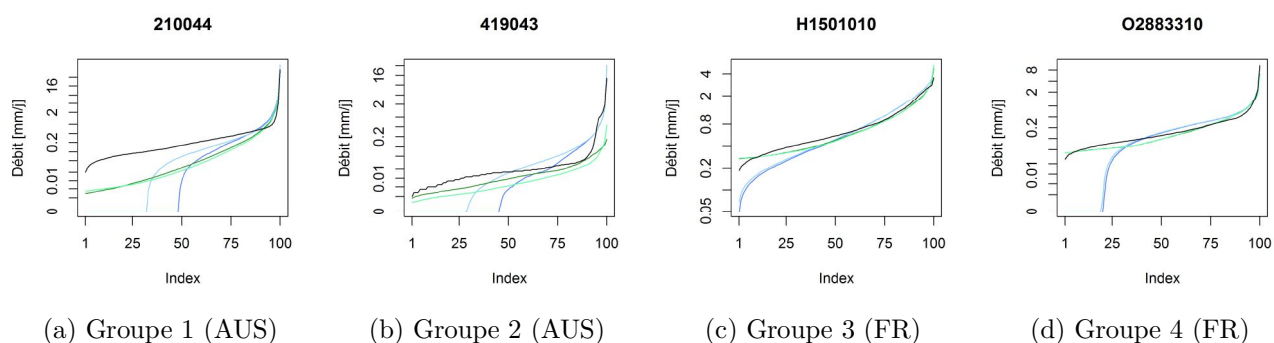


Figure 4.5 – Courbe de débit classé du débit influencé observé (courbe noire), du débit naturalisé de la méthode de bilan sur ouvrage sans (bleu foncé) et avec (bleu clair) prise en compte des variables météorologiques, et du débit naturalisé de la méthode de reconstitution sans (vert foncé) et avec (vert clair) prise en compte des variables météorologiques sur les bassins de Glennies Creek à Middle Falbrook (a), la Manilla river à l'aval de Split Rock Dam (b), l'Aube à Arcis-sur-Aube (c) et la Gimone à Garganvillar (d)).

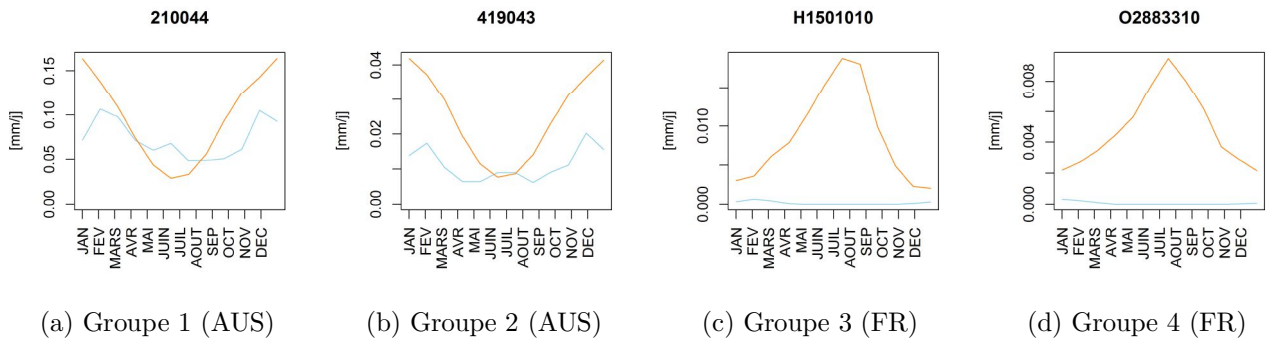


Figure 4.6 – Régime de l'évaporation des barrages et des précipitations sur les barrages des bassins de Glennies Creek à Middle Falbrook (a), la Manilla river à l'aval de Split Rock Dam (b), l'Aube à Arcis-sur-Aube (c) et la Gimone à Garganvillar (d). Les courbes oranges correspondent à l'évaporation des barrages-réservoirs amont et les bleues aux précipitations tombées sur ces derniers.

Sur les bassins semi-arides des groupes 1 et 2, leur prise en compte va changer les conclusions que l'on peut tirer par rapport au caractère non-pérenne des rivières. Sans leur prise en compte, on arrive à la conclusion qu'en valeur médiane, les bassins ont un écoulement nul 20 et 40% du temps respectivement sur les bassins des groupes 1 et 2. Avec prise en compte de l'évaporation et des précipitations, cela descend à 10 et 30% du temps. Plus la gamme de débit augmente, plus l'impact de leur prise en compte diminue. Ainsi sur les bassins semi-arides du groupe 1, à partir de Q70 leur prise en compte induit une augmentation médiane de 5,8% et descend à 0,8% pour le Q90. Dès lors qu'on s'intéresse aux débits de crues, la prise en compte de l'évaporation et des précipitations n'aura qu'un très faible impact. Sur les bassins du groupe 2, le poids de l'évaporation et des précipitations sur les débits naturalisés reste relativement important pour les quantiles de débits inférieurs à Q90 du fait de la proximité spatiale des stations par rapport aux réservoirs. Sur le quantile Q90, la différence relative n'est plus que de 2,1% en valeur médiane (figure 4.4).

Sur les bassins des groupes 3 et 4, il apparaît que la prise en compte de l'évaporation et des précipitations change très peu les quantiles sur les moyens et hauts débits. Sur le quantile de bas débits Q10, la prise en compte de l'évaporation induit une augmentation d'environ 8% de l'indicateur sur ces groupes.

Par la suite, au vu de l'impact potentiellement non-négligeable de l'évaporation des barrages-réservoirs et de leur précipitations sur les conclusions des études, il semble nécessaire à ce stade de considérer la méthode de bilan sur ouvrage avec et sans prise en compte de l'évaporation et des précipitations.

4.3.2 Méthode de reconstitution

La figure 4.7 illustre l'impact de la prise en compte de l'évaporation et des précipitations sur les réservoirs sur les différents quantiles de débits naturalisés obtenus avec la méthode de reconstitution et le tableau 4.2 présente les différences relatives médianes. Dans le cas de la méthode de reconstitution, sur les bassins du groupe 4, leur prise en compte n'aboutit pas forcément à une plus haute estimation du débit naturalisé. Sur les bassins des groupes 3 et 4, l'impact de l'évaporation et des précipitations sur les débits naturalisés restent relativement faibles. On constate également que contrairement à la méthode de bilan sur ouvrage, l'impact de la prise en compte de l'évaporation et des précipitations n'est pas graduel.

Sur les bassins semi-arides du groupe 2, on constate que la prise en compte des précipitations et de l'évaporation des réservoirs induit une augmentation plus importante des quantiles de débits. Pour le groupe 1, elle se situe essentiellement au niveau des bas-débits avec une augmentation médiane de 9,4% du Q10. Pour le groupe 2, elle se situe essentiellement au niveau des débits moyens avec une augmentation médiane de 32% du Q50 et du Q60.

Comment expliquer le comportement de la méthode de reconstitution face à la prise en compte des variables météorologiques ?

Le tableau 4.2 montre la différence relative médiane entre les quantiles de débits naturalisés, de la méthode de reconstitution, obtenue avec et sans prise en compte de l'évaporation et des précipitations sur les réservoirs. Comme le montre ce tableau, les différences classées par quantile ne sont pas linéaires. La non-linéarité de l'impact de la prise en compte des variables météorologiques est surprenante car, comme nous l'avons vu dans le cas de la méthode de bilan sur ouvrage et sur les exemples, c'est durant la période

de basses eaux que la prise en compte des variables météorologiques va induire les changements les plus importants dans la naturalisation des débits. Les hypothèses que nous allons présenter seront explorées dans le chapitre suivant :

- La méthode de reconstitution prend déjà en compte implicitement les erreurs qui existent sur le ΔV . En calant le modèle sur des débits observés, ce dernier ajuste déjà ses paramètres afin de minimiser les erreurs de bilan en eau.
- La méthode de reconstitution et/ou le modèle utilisés ne sont pas adaptés pour naturaliser les débits.

Nous verrons dans les prochains chapitres si leur prise en compte permet une amélioration des résultats de la méthode de reconstitution.

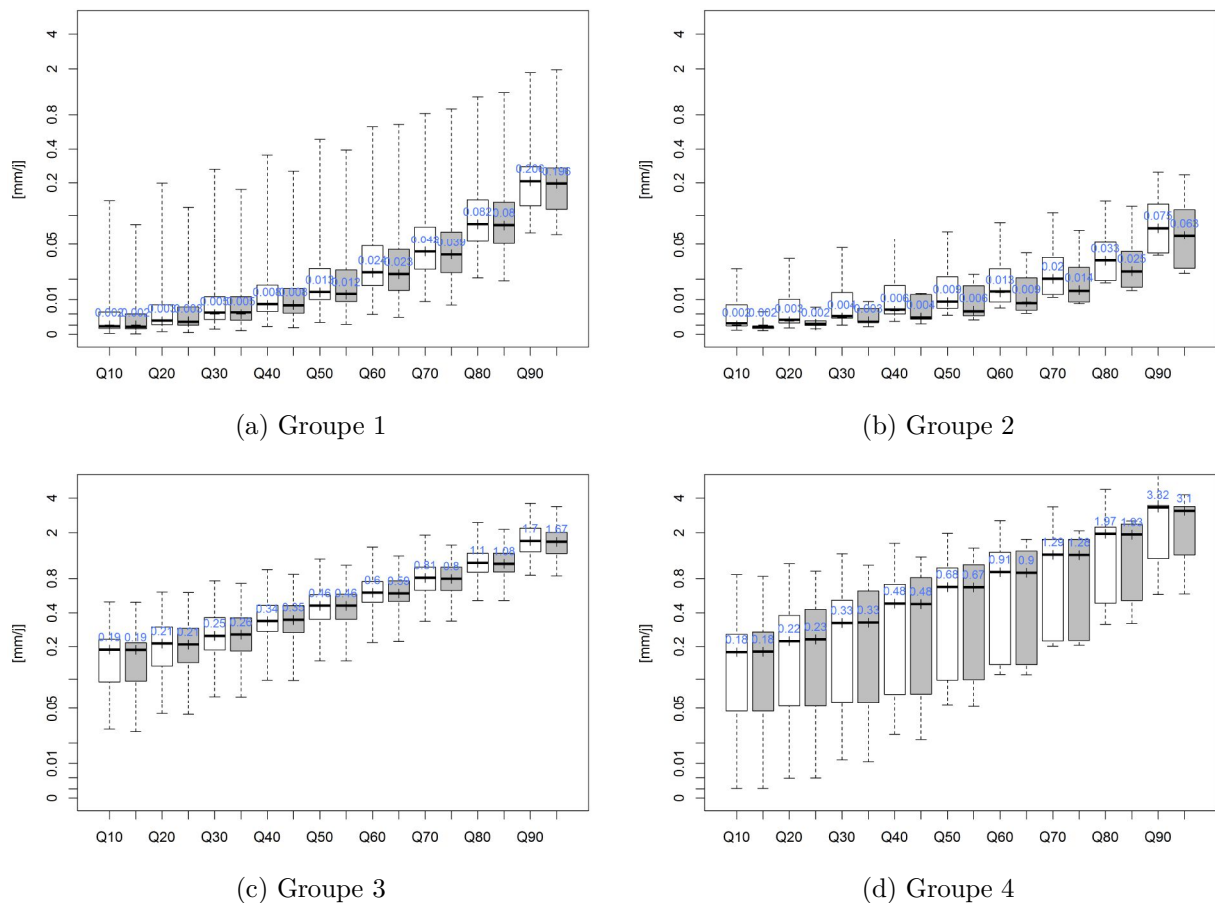


Figure 4.7 – Quantiles calculés sur les débits naturalisés obtenus avec la méthode de reconstitution par groupe de bassins, en ne considérant pas l'évaporation et les précipitations sur les réservoirs (boxplot blanc) et en les prenant en compte (boxplot gris).

Tableau 4.2 – Différence relative médiane (en %) par groupe de bassins entre les quantiles de débits naturalisés, de la méthode de reconstitution, obtenue avec et sans prise en compte de l'évaporation et des précipitations sur les réservoirs.

| | Q10 | Q20 | Q30 | Q40 | Q50 | Q60 | Q70 | Q80 | Q90 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Groupe 1 | 9.4 | 7.8 | 8.9 | 7.9 | 6.9 | 5.9 | 4.6 | 3.2 | 2.8 |
| Groupe 2 | 23 | 24 | 28 | 29 | 32 | 32 | 28 | 21 | 14 |
| Groupe 3 | 0.13 | 0.09 | 0.39 | 0.34 | 0.21 | 0.21 | 0.54 | 0.68 | 1.66 |
| Groupe 4 | -0.7 | -0.2 | 0.4 | 2.2 | 2.1 | 0.4 | 0.6 | 1% | 1.9 |

4.4 Évaluation des différences entre les méthodes

Dans cette partie, nous cherchons à évaluer les différences entre les débits naturalisés obtenus par les différentes méthodes. L'écart entre les débits naturalisés obtenus traduit l'incertitude qu'induit le choix d'une méthode de naturalisation. Le choix d'une comparaison relative des méthodes vient du fait que l'on ne dispose pas d'observations de débits naturels sur la période influencée, et qu'on ne peut donc pas adopter la démarche classique de calcul de critères par rapport à des observations.

4.4.1 Comparaison globale des séries naturalisées

Le KGE sur les débits est calculé sur chaque bassin par paire de chroniques de débits naturalisés afin d'avoir une information globale sur la similarité entre ces chroniques (tableau 4.3). Une analyse des composantes du KGE permettra de mieux évaluer les points de divergences entre les méthodes.

Tableau 4.3 – Valeur médiane du KGE sur le débit obtenu entre les chroniques de débits naturalisés. Les méthodes en colonne correspondent aux chroniques de référence. BO : bilan sur ouvrage; BOm : bilan sur ouvrage avec prise en compte de l'évaporation et des précipitations sur les réservoirs; R : reconstitution; Rm : reconstitution avec prise en compte de l'évaporation et des précipitations sur les réservoirs; E : extension; V : régionalisation par voisinage.

| (a) Groupe 1 | | | | | | | (b) Groupe 2 | | | | | | |
|--------------|----|------|------|------|------|-------|--------------|----|------|-------|-------|-------|-------|
| | BO | BOm | R | Rm | E | V | | BO | BOm | R | Rm | E | V |
| BO | | 0.96 | 0.53 | 0.38 | 0.57 | -0.17 | BO | | 0.94 | -5.75 | -4.56 | 0.65 | 0.07 |
| BOm | | | 0.45 | 0.5 | 0.56 | -0.13 | BOevp | | | -5.5 | -4.42 | 0.66 | 0.08 |
| R | | | | 0.91 | 0.43 | 0.36 | R | | | | 0.66 | -0.23 | -0.06 |
| Rm | | | | | 0.41 | 0.28 | Rm | | | | | -0.22 | -0.06 |
| E | | | | | | 0 | E | | | | | | -0.84 |
| V | | | | | | | V | | | | | | |

| (c) Groupe 3 | | | | | | | (d) Groupe 4 | | | | | | |
|--------------|----|------|------|------|------|------|--------------|----|-----|------|------|------|------|
| | BO | BOm | R | Rm | E | V | | BO | BOm | R | Rm | E | V |
| BO | | 0.99 | 0.79 | 0.76 | 0.8 | 0.62 | BO | | 1 | 0.84 | 0.84 | 0.74 | 0.71 |
| BOm | | | 0.79 | 0.76 | 0.8 | 0.62 | BOm | | | 0.84 | 0.84 | 0.74 | 0.71 |
| R | | | | 0.98 | 0.71 | 0.75 | R | | | | 0.98 | 0.78 | 0.7 |
| Rm | | | | | 0.68 | 0.75 | Rm | | | | | 0.76 | 0.69 |
| E | | | | | | 0.66 | E | | | | | | 0.79 |
| V | | | | | | | V | | | | | | |

Tableau 4.4 – Valeur médiane de la corrélation entre les chroniques de débits naturalisés. Les méthodes en colonne correspondent aux chroniques de référence.

| (a) Groupe 1 | | | | | | | (b) Groupe 2 | | | | | | |
|--------------|----|------|------|------|------|------|--------------|----|------|------|------|------|------|
| | BO | BOm | R | Rm | E | V | | BO | BOm | R | Rm | E | V |
| BO | | 0.98 | 0.81 | 0.8 | 0.85 | 0.81 | BO | | 0.98 | 0.64 | 0.74 | 0.87 | 0.88 |
| BOm | | | 0.78 | 0.82 | 0.83 | 0.78 | BOevp | | | 0.6 | 0.75 | 0.85 | 0.86 |
| R | | | | 0.96 | 0.92 | 0.79 | R | | | | 0.84 | 0.79 | 0.59 |
| Rm | | | | | 0.9 | 0.74 | Rm | | | | | 0.66 | 0.7 |
| E | | | | | | 0.85 | E | | | | | | 0.9 |
| V | | | | | | | V | | | | | | |

| (c) Groupe 3 | | | | | | | (d) Groupe 4 | | | | | | |
|--------------|----|-----|------|------|------|------|--------------|----|-----|------|------|------|------|
| | BO | BOm | R | Rm | E | V | | BO | BOm | R | Rm | E | V |
| BO | | 1 | 0.93 | 0.91 | 0.9 | 0.88 | BO | | 1 | 0.92 | 0.9 | 0.88 | 0.88 |
| BOm | | | 0.92 | 0.91 | 0.9 | 0.87 | BOm | | | 0.92 | 0.92 | 0.88 | 0.88 |
| R | | | | 0.98 | 0.96 | 0.93 | R | | | | 0.99 | 0.94 | 0.94 |
| Rm | | | | | 0.94 | 0.91 | Rm | | | | | 0.94 | 0.92 |
| E | | | | | | 0.94 | E | | | | | | 0.92 |
| V | | | | | | | V | | | | | | |

Tableau 4.5 – Valeur médiane du biais entre les chroniques de débits naturalisés. Les méthodes en colonne correspondent aux chroniques de référence.

| | BO | BOm | R | Rm | E | V |
|-----|----|------|------|------|------|------|
| BO | | 1.02 | 1.32 | 1.42 | 0.68 | 1.93 |
| BOm | | | 1.26 | 1.38 | 0.66 | 1.89 |
| R | | | | 1.05 | 0.58 | 1.43 |
| Rm | | | | | 0.56 | 1.36 |
| E | | | | | | 1.73 |
| V | | | | | | |

| | BO | BOm | R | Rm | E | V |
|-------|----|------|------|------|------|------|
| BO | | 0.98 | 4.02 | 4.43 | 0.68 | 1.7 |
| BOevp | | | 4.21 | 4.5 | 0.7 | 1.7 |
| R | | | | 1.24 | 0.14 | 0.36 |
| Rm | | | | | 0.14 | 0.33 |
| E | | | | | | 2.66 |
| V | | | | | | |

| | BO | BOm | R | Rm | E | V |
|-----|----|------|------|------|------|------|
| BO | | 0.99 | 1.02 | 1.03 | 0.87 | 1.08 |
| BOm | | | 1.03 | 1.05 | 0.88 | 1.08 |
| R | | | | 1.01 | 0.85 | 1.04 |
| Rm | | | | | 0.84 | 1.03 |
| E | | | | | | 1.22 |
| V | | | | | | |

| | BO | BOm | R | Rm | E | V |
|-----|----|-----|------|------|------|------|
| BO | | 1 | 1.04 | 1.04 | 0.96 | 0.93 |
| BOm | | | 1.04 | 1.04 | 0.97 | 0.94 |
| R | | | | 1 | 0.85 | 0.84 |
| Rm | | | | | 0.84 | 0.84 |
| E | | | | | | 1.02 |
| V | | | | | | |

Tableau 4.6 – Valeur médiane du rapport des écarts-types entre les chroniques de débits naturalisés. Les méthodes en colonne correspondent aux chroniques de référence.

| | BO | BOm | R | Rm | E | V |
|-----|----|------|------|------|------|------|
| BO | | 1.02 | 1.31 | 1.36 | 0.89 | 1.61 |
| BOm | | | 1.29 | 1.27 | 0.86 | 1.52 |
| R | | | | 0.99 | 0.63 | 1.08 |
| Rm | | | | | 0.63 | 1.11 |
| E | | | | | | 1.51 |
| V | | | | | | |

| | BO | BOm | R | Rm | E | V |
|-------|----|------|------|------|------|------|
| BO | | 1.02 | 7.03 | 5.36 | 0.97 | 1.38 |
| BOevp | | | 6.73 | 5.12 | 0.93 | 1.36 |
| R | | | | 0.9 | 0.13 | 0.2 |
| Rm | | | | | 0.16 | 0.26 |
| E | | | | | | 1.75 |
| V | | | | | | |

| | BO | BOm | R | Rm | E | V |
|-----|----|-----|------|------|------|------|
| BO | | 1 | 1.18 | 1.18 | 0.96 | 1.13 |
| BOm | | | 1.18 | 1.18 | 0.86 | 1.13 |
| R | | | | 1 | 0.8 | 0.97 |
| Rm | | | | | 0.78 | 0.95 |
| E | | | | | | 1.08 |
| V | | | | | | |

| | BO | BOm | R | Rm | E | V |
|-----|----|-----|-----|------|------|------|
| BO | | 1 | 1.1 | 1.08 | 1.07 | 0.96 |
| BOm | | | 1.1 | 1.1 | 1.07 | 0.96 |
| R | | | | 1 | 0.91 | 0.9 |
| Rm | | | | | 0.91 | 0.84 |
| E | | | | | | 0.84 |
| V | | | | | | |

Groupe 1. Le groupe 1 correspond aux bassins semi-arides. Le KGE de 0,96 en valeur médiane obtenu entre les chroniques de débits naturalisés avec la méthode de bilan sur ouvrage avec (BOm) et sans (BO) prise en compte de l'évaporation et des précipitations sur les réservoirs amont montre que ces chroniques de débits sont globalement similaires, avec de légères différences au niveau du biais et de la corrélation. Pour la méthode de reconstitution, le KGE médian de 0,91 entre la méthode avec (Rm) et sans (R) prise en compte de l'évaporation et des précipitations sur les réservoirs amont montre que globalement les séries sont similaires entre elles.

Les chroniques de débits obtenues avec les différentes méthodes ont un KGE inférieur à

0,60, et on trouve avec la méthode de régionalisation des KGE négatifs par rapport aux autres méthodes (tableau 4.3a). Les chroniques obtenues avec les différentes méthodes de naturalisation présentent donc d'importantes différences. Les chroniques de débits obtenues avec les méthodes ont en valeur médiane une corrélation importante entre elles (tableau 4.4a), les différences entre les méthodes se situent plus au niveau de la variance et du biais.

Les chroniques obtenues avec la méthode de régionalisation (V) présentent une variance plus faible de 70% en valeur médiane par rapport aux méthodes de bilan sur ouvrage et de 50% en valeur médiane par rapport à la méthode d'extension (E). Cette plus faible variance peut en partie être due au fait que le débit naturalisé obtenu avec la méthode de régionalisation correspond à une moyenne de débits simulés. La chronique obtenue en régionalisation a donc un aspect plus lissé par rapport aux autres méthodes. La méthode de reconstitution présente également une variance plus faible par rapport aux autres méthodes. La méthode d'extension présente la variance la plus importante par rapport aux autres chroniques de débits naturalisés. Cette variance montre que, dans les conditions dans lesquelles le modèle a été calé, les chroniques de débits non-influencés observés présentent potentiellement une variation naturelle importante.

Au niveau des biais (tableau 4.5a), il apparaît que les bilans en eau peuvent doubler selon la méthode. Ainsi, avec la méthode de régionalisation, le bilan en eau obtenu est environ deux fois plus faible par rapport aux autres méthodes. Cela signifie que, d'un point de vue régional, pour une même quantité de précipitations, le bassin produit deux fois moins d'eau. Inversement la méthode d'extension produit deux fois plus de débit pour une même quantité de pluie. Comme nous le verrons dans le prochain chapitre, ces résultats surprenants montrent que certaines méthodes présentent des difficultés à modéliser un débit naturalisé. Les bilans en eau produits par les méthodes de reconstitution (R) et de bilan sur ouvrage sont moins extrêmes. Le bilan en eau de la méthode de bilan sur ouvrage est conditionné par nos connaissances sur les entrées et sorties en eau du système durant la période de naturalisation. Le bilan en eau de la méthode de reconstitution est conditionné par sa capacité à reproduire le bilan en eau influencé et à prendre en compte l'information sur les barrages-réservoirs.

Groupe 2. Le groupe 2 correspond aux bassins semi-arides fortement influencés. Le KGE de 0,94 en valeur médiane obtenu entre les chroniques de débits naturalisés par la méthode de bilan sur ouvrage avec et sans prise en compte de l'évaporation et des précipitations sur les réservoirs amont (tableau 4.3b), montre que les chroniques de débits sont similaires. Pour la méthode de reconstitution, le KGE médian de 0,84 montre qu'il existe de légères différences entre les chroniques avec et sans prises en compte des variables météorologiques. Il apparaît que la principale différence se trouve au niveau du volume d'eau total ruisselé, qui est plus important lorsqu'on prend en compte l'évaporation et les précipitations sur les réservoirs.

Les analyses entre les méthodes sont similaires à celles obtenues pour les bassins du groupe 1, à l'exception de la méthode de reconstitution. Avec un KGE négatif, les chroniques de débits obtenues avec la méthode de reconstitution présentent d'importantes divergences par rapport à celles obtenues avec les autres méthodes. Cela met en avant qu'une ou plusieurs méthodes de naturalisation ne sont pas adaptées pour naturaliser les débits des bassins du groupe 2. Cela se traduit notamment par une corrélation plus faible entre les chroniques de la méthode de reconstitution et celles obtenues avec les autres méthodes et de régionalisation (tableau 4.4b). On constate d'importantes différences au niveau du biais (tableau 4.5b). Le bilan en eau de la méthode de reconstitution est en valeur médiane respectivement 4 et 4,6 fois plus petit que ceux obtenus avec les méthodes de bilan sur ouvrage avec et sans prise en compte de l'évaporation des réservoirs, 10 fois plus petit par rapport à celui obtenu avec la méthode d'extension et 3 fois plus petit que celui obtenu avec la méthode de régionalisation. Les chroniques obtenues avec la méthode de reconstitution présentent également une variation pouvant être 10 fois plus faible que celle obtenue avec les autres méthodes (tableau 4.6b). Ces différences préoccupantes entre les méthodes sont encore plus importantes que sur les bassins du groupe 1.

Groupe 3. Le groupe 3 correspond aux bassins humides ayant une faible variation interannuelle des précipitations. Entre les méthodes de bilan sur ouvrage avec et sans prise en compte de l'évaporation des barrages-réservoirs amont, on obtient en valeur médiane une similarité presque parfaite entre les chroniques (tableau 4.3c). Ceci s'explique par le poids globalement moins important de l'évaporation et des précipitations des réservoirs sur les bassins humides. Il en est de même pour la méthode de reconstitution avec et sans prise en compte de l'évaporation et des précipitations.

Avec des KGE de plus de 0,6 en valeur médiane, les chroniques obtenues avec les différentes méthodes sont globalement similaires, à l'exception de celles obtenues avec la méthode de voisinage qui présente une similarité moins importante. On note d'importantes corrélations entre les différentes chroniques de débits (tableau 4.4c). Pour la méthode d'extension, ses principales différences par rapport aux autres méthodes se situent au niveau du bilan en eau (tableau 4.5c), qui est en valeur médiane environ 15% plus important par rapport aux autres méthodes. La méthode d'extension présente également une variation des débits plus importante de 25% en valeur médiane par rapport à la méthode de reconstitution (tableau 4.6c). C'est la méthode qui présente le plus de variation. Pour les autres méthodes, on note également des différences au niveau de la variation des chroniques de débits. La méthode de reconstitution suivie de la méthode de régionalisation présentent les plus petites variations. Les méthodes de bilan sur ouvrage ont, en valeur médiane, une variation plus importante de l'ordre de 10 à 20%. Pour la méthode de bilan sur ouvrage, l'addition directe des variations de barrages aux débits influencés observés peut donner un aspect moins lisse au débit naturalisé, ce qui peut expliquer ses variations plus importantes.

Groupe 4. Le groupe 4 correspond aux bassins humides ayant une variation interannuelle des précipitations supérieure à 20%. On constate tout d'abord que les chroniques des méthodes de bilan sur ouvrage présentent une corrélation plus faible avec les chroniques des autres méthodes (tableau 4.4d). En comparant les biais, il apparaît que la méthode de bilan sur ouvrage avec prise en compte de l'évaporation produit en valeur médiane un bilan en eau plus important allant de 4 à 12 % selon les méthodes (tableau 4.5d). La méthode de reconstitution produit, quant à elle, des bilans en eau plus faibles par rapport aux autres méthodes allant de 6 à 17% en valeurs médianes. La méthode de bilan sur ouvrage présente également des variations de débit plus importantes d'au moins 20% par rapport aux autres méthodes.

En comparant les méthodes sur les groupes 1 et 2, il ressort que les hypothèses de départ soulevées par les méthodes aboutissent globalement à d'importantes différences d'un point de vue quantitatif. Il apparaît essentiel de mettre en place une méthode de validation du choix des méthodes. En comparant les méthodes sur les bassins des groupes 3 et 4, il

ressort que globalement les chroniques de débits naturalisés peuvent apparaître similaires. On constate que sur ces groupes, les écarts portent essentiellement sur la variation des chroniques de débits.

4.4.2 Comparaison des indicateurs

Dans cette partie, la largeur de l'intervalle des indicateurs obtenus permet d'évaluer l'impact du choix des méthodes sur l'estimation de ces indicateurs. Pour évaluer la largeur de l'intervalle, sur chaque bassin versant et pour chaque indicateur, on calcule le coefficient de variation : l'écart-type entre les indicateurs obtenus avec les différentes méthodes de naturalisation est calculé et divisé par la moyenne, afin d'avoir une évaluation de la dispersion par rapport à la moyenne. Plus la dispersion est faible, plus les indicateurs se trouvent dans un intervalle restreint. La figure 4.8 présente pour chaque indicateur la distribution des coefficients de variations par groupe de bassins. Les figures 4.9 et 4.10 indiquent quelles méthodes donnent respectivement le plus grand et petit indicateur sur chaque groupe de bassins. Les indicateurs sont calculés individuellement par bassin.

Débits moyens Comme nous pouvons le voir sur la figure 4.8a, pour les groupes 1 et 2, le choix de la méthode de naturalisation impacte la valeur du module de respectivement 27 et 47%. Sur ces groupes, la borne supérieure de l'intervalle correspond, pour 60% des bassins du groupe 1, à la méthode de bilan sur ouvrage sans prise en compte de l'évaporation suivie de la méthode de bilan sur ouvrage avec prise en compte de l'évaporation. Sur le groupe 1, la méthode de régionalisation donne la plus faible estimation du module sur plus de 60% des bassins de ce groupe suivie de la méthode de reconstitution sur plus de 30%. Sur les bassins du groupe 2, la méthode d'extension donne la plus haute valeur du module et la méthode de reconstitution aboutit systématiquement à la plus faible valeur. Sur les bassins humides des groupes 3 et 4, le choix de la méthode a un impact plus faible sur la valeur du module obtenu, de l'ordre de 9%. Pour le groupe 3, la méthode de bilan sur ouvrage avec prise en compte de l'évaporation et des précipitations des réservoirs donne la valeur la plus forte du module sur plus de 40% des bassins. Sur les bassins du groupe 4, la méthode de régionalisation aboutit sur plus de 40% des bassins à la plus forte estimation du module.

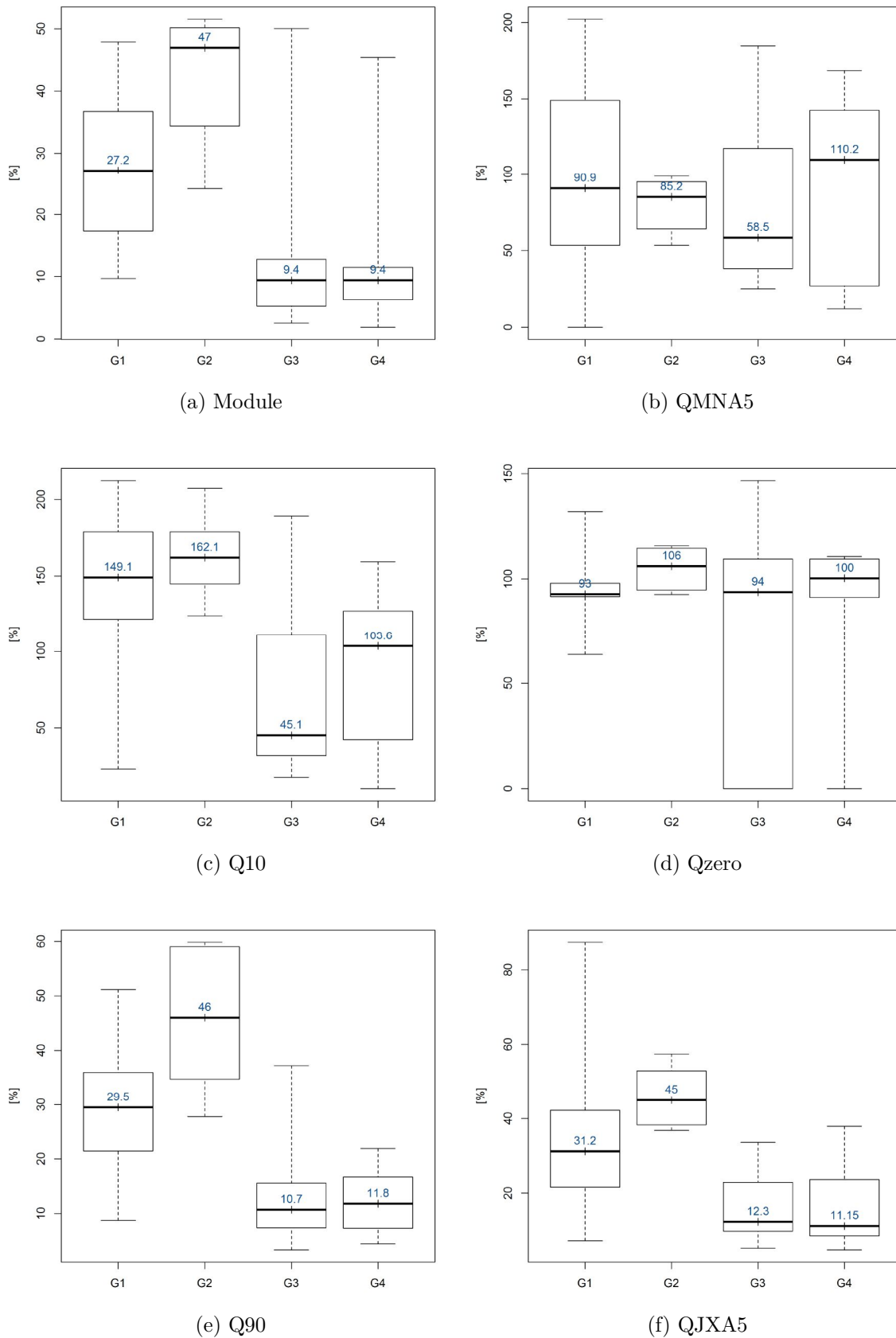


Figure 4.8 – Distribution des coefficients de variation (écart-type ramené à la moyenne), par groupe de bassins, pour les modules (a), QMNA5 (b), Q10 (c), Q90 (e) et QJXA5 (f) produits par les différentes méthodes de naturalisation. Pour Qzero (d), c'est la distribution des écarts-types qui est représentée.

Bas débits Sur les figures 4.8b et 4.8c (QMNA5 et Q10), il apparaît que les indicateurs obtenus sur les bas débits semblent plus sensibles au choix de la méthode que précédemment sur les débits moyens. Sur les groupes 1 et 2, on a des écarts-types médians allant de 85 et 162%. Sur ces groupes, c'est la méthode de reconstitution qui aboutit à la plus importante estimation de Q10 et du QMNA5. La plus faible estimation est, quant à elle, donnée par la méthode de bilan sur ouvrage. Sur les groupes 3 et 4, les différences sont également importantes, allant de 45 et 59% sur le groupe 3 et de 103 à 110% sur le groupe 4. Ce sont, comme pour le groupe 1, les mêmes méthodes qui bornent les intervalles. Pour le groupe 2, il apparaît que la borne inférieure correspond à la méthode de bilan sur ouvrage.

Débits nuls La figure 4.8d correspond à l'écart-type entre les Q_{zero} obtenus entre les différentes méthodes. Il apparaît que le choix de la méthode impacte fortement la fréquence d'obtention de débit nul, avec des écarts-types de l'ordre de 100%. Ceci peut aboutir à des conclusions très différentes sur le caractère pérenne de ces cours d'eau. La méthode de bilan sur ouvrage aboutit sur tous les bassins à la plus grande estimation de Q_{zero} . Comme nous le verrons dans le chapitre 5, la méthode de bilan sur ouvrage a tendance à aboutir à des erreurs sur les bas débits, ce qui peut amener à une surestimation des débits nuls. La méthode de reconstitution aboutit à la plus faible estimation de Q_{zero} sur ces bassins.

Haut débits Les figures 4.8e et 4.8f présentent les indicateurs relatifs aux crues. Il apparaît que les groupes 1 et 2 présentent une plus grande sensibilité au choix de la méthode sur ces indicateurs. Sur les bassins du groupe 1, la méthode de bilan sur ouvrage donne la plus grande estimation de ces indicateurs et la méthode de reconstitution aboutit à une plus faible estimation. Sur les bassins du groupe 2, ce sont les méthodes de bilan sur ouvrage qui donnent une plus forte estimation des chroniques de débits et la méthode de régionalisation qui aboutit à une plus faible estimation.

Sur les bassins des groupes 3 et 4, on a un écart-type de respectivement 10 et 12% pour le Q_{90} , et légèrement plus élevé pour le QJXA5, de l'ordre de 15%. Les bornes supérieures sont globalement obtenues avec les méthodes de bilan sur ouvrage avec prise en compte de l'évaporation et des précipitations, et de régionalisation.

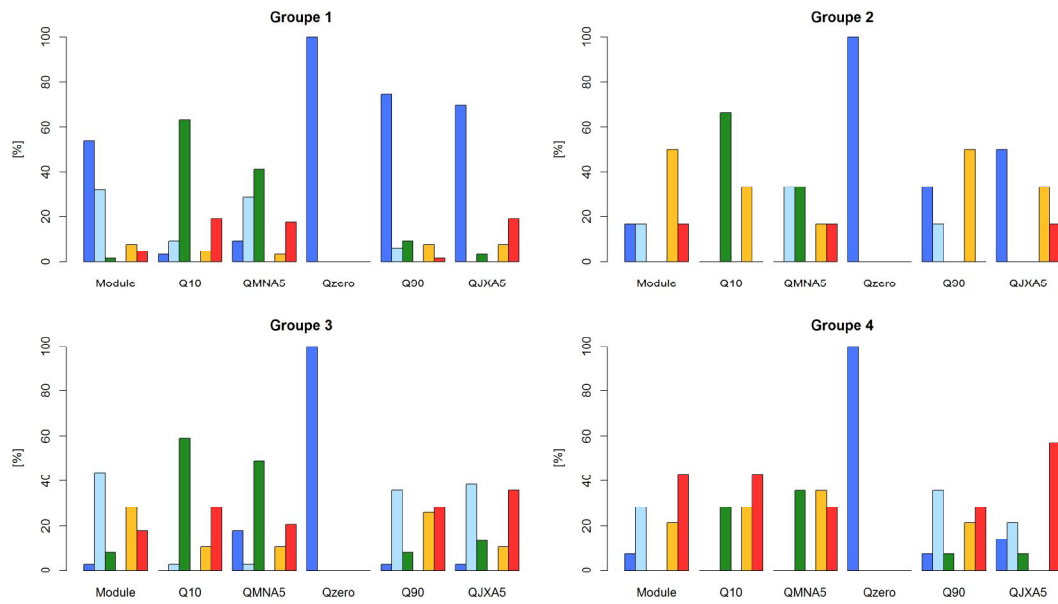


Figure 4.9 – Pourcentages des bassins par groupe pour lesquels chaque méthode donne la valeur la plus forte de l'indicateur considéré. Bleu foncé : bilan sur ouvrage ; bleu clair : bilan sur ouvrage avec prise en compte de l'évaporation et des précipitations sur les réservoirs ; vert : reconstitution ; vert clair : reconstitution avec prise en compte de l'évaporation et des précipitations sur les réservoirs ; jaune : extension ; rouge : régionalisation par voisinage.

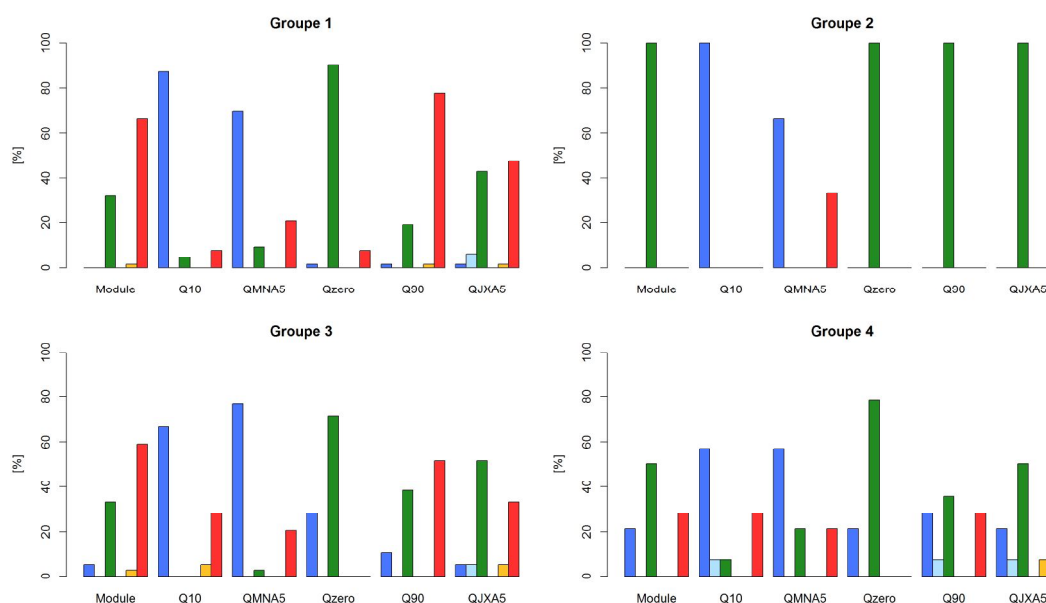


Figure 4.10 – Pourcentages des bassins par groupe pour lesquels chaque méthode donne la valeur la plus faible de l'indicateur considéré. Bleu foncé : bilan sur ouvrage ; bleu clair : bilan sur ouvrage avec prise en compte de l'évaporation et des précipitations sur les réservoirs ; vert : reconstitution ; vert clair : reconstitution avec prise en compte de l'évaporation et des précipitations sur les réservoirs ; jaune : extension ; rouge : régionalisation par voisinage.

4.5 Synthèse

Ce chapitre a souligné l'importance de mettre en place une méthodologie permettant d'évaluer la confiance que l'on peut placer dans les méthodes de naturalisation.

Concernant l'hypothèse de prise en compte de l'évaporation et des précipitations par les méthodes, pour la méthode de reconstitution, les débits naturalisés sont très peu impactés par la prise en compte de l'évaporation et des précipitations. Par la suite, nous avons donc décidé de ne considérer que le ΔV sans prise en compte de l'évaporation et des précipitations pour naturaliser avec la méthode de reconstitution.

Pour la méthode de bilan sur ouvrage, la prise en compte de l'évaporation induit une importante augmentation des débits sur les bassins semi-arides des groupes 1 et 2. Pour les bassins humides des groupes 3 et 4, elle induit une augmentation d'environ 8% sur les bas débits. Nous avons donc décidé par la suite de considérer les résultats de la méthode de bilan sur ouvrage avec et sans prise en compte de l'évaporation.

Ce chapitre a également mis en avant l'importance des différences existant entre les méthodes, ainsi que la sensibilité des indicateurs hydrologiques au choix de la méthode de naturalisation. Sur les bassins semi-arides des groupes 1 et 2, d'importantes divergences existent entre les chroniques obtenues avec les différentes méthodes de naturalisation, notamment sur le bilan en eau et la variabilité temporelle de ces chroniques. Ces divergences aboutissent à des écarts importants entre les indicateurs hydrologiques obtenus avec les différentes méthodes. Sur le groupe 2, les importantes divergences entre les chroniques obtenues avec la méthode de reconstitution et les autres méthodes indiquent qu'une ou plusieurs méthodes ne sont pas du tout adaptées pour la modélisation des débits naturels sur les bassins semi-arides influencés. Sur les bassins humides des groupes 3 et 4, les écarts entre les chroniques sont globalement plus faibles. On constate cependant une sensibilité importante de la variabilité temporelle des débits au choix de la méthode.

Globalement, c'est sur les indicateurs de bas débits que l'on obtient les divergences les plus importantes entre les méthodes. Sur ces indicateurs, il apparaît que systématiquement la méthode de bilan sur ouvrage et la méthode de régionalisation aboutissent, respectivement, à la plus basse et haute estimations (figure 4.9 et figure 4.10). Sur les moyens et hauts débits, les intervalles sont équivalents au sein de chaque groupe de bassins : de l'ordre de 30 à 40% pour le groupe 1, 50 à 60% pour le groupe 2, et 10 à 15% pour les groupes 3 et 4. Au vu des larges intervalles obtenus sur les groupes 1 et 2, on peut faire l'hypothèse que certaines méthodes sont plus adaptées que d'autres pour naturaliser certaines caractéristiques du débit. En effet, au sein des groupes de méthodes, le fait que ce ne soit pas systématiquement les mêmes méthodes qui bornent les intervalles montre que les méthodes ne sont pas forcément à prohiber pour l'ensemble des caractéristiques de débits.

5

Applicabilité des méthodes de naturalisation

5.1 Introduction

Le chapitre 4 a montré les écarts entre les débits naturalisés produits par les différentes méthodes de naturalisation. Ces écarts sont particulièrement importants sur les bassins semi-arides, et ils sont en général plus marqués sur les débits de crues ou d'étiage. Sur chaque bassin, l'intervalle formé par les débits naturalisés correspond potentiellement à la zone d'existence du débit naturel. Le but final des travaux est d'obtenir un intervalle qui soit à la fois fiable, c'est-à-dire qu'il y ait de fortes chances que le débit naturel se trouve dans cet intervalle, et fin, pour avoir une estimation précise du débit naturel.

Dans ce chapitre, afin de réduire l'intervalle d'existence du débit naturel et de nous assurer de sa fiabilité, nous allons nous assurer de l'applicabilité des méthodes de naturalisation en évaluant si les hypothèses soulevées par ces méthodes sont vérifiées. Les hypothèses de chacune des méthodes de naturalisation étant différentes, chaque méthode aura une méthodologie d'évaluation spécifique. Les méthodologies proposées ont pour objectif de pouvoir vérifier individuellement sur chaque bassin la validité des hypothèses, tout en étant applicables à l'ensemble des bassins, c'est-à-dire avec des données facilement disponibles.

5.2 Applicabilité de la méthode d'extension

La méthode d'extension se base sur les hypothèses principales suivantes. Les débits observés de la période non-influencée ne comportent pas la trace d'activités humaines. Le jeu de paramètres du modèle hydrologique, obtenu en calage sur une période non-influencée peut être utilisé sur la période influencée pour simuler un débit naturel. Cela signifie que le comportement hydrologique du bassin versant n'a pas évolué entre les deux périodes, en dehors des changements induits par l'influence considérée. Dans les faits, les paramètres calés des modèles hydrologiques montrent toujours une petite dépendance à la période de calage (Coron, 2013) : c'est un défaut récurrent qui se traduit en général par une incertitude un peu plus grande quand on transpose les paramètres calés d'une période à une autre. Des différences dans les conditions environnementales, du type d'occupation des sols, et dans les conditions climatiques entre les périodes non-influencées et influencées peuvent entre autres générer des incertitudes. Il est donc nécessaire de s'assurer que le modèle, dans notre cas GR5J, est capable de reproduire le comportement du bassin en

dehors de sa période de calage.

Dans cette partie, une méthodologie, permettant d'évaluer la robustesse temporelle du modèle et des indicateurs hydrologiques, est proposée afin d'avoir une estimation de l'impact potentiel de la transposition temporelle du jeu de paramètres. Puis, dans un deuxième temps, la méthode est appliquée à la base de données et permettra d'identifier d'éventuels bassins où la méthode n'est pas applicable avec le modèle GR5J.

5.2.1 Méthodologie d'évaluation de la méthode d'extension

Pour évaluer la robustesse temporelle des jeux de paramètres obtenus en calage, la procédure du *split sample test* (Klemes, 1986), permettant d'évaluer les performances du modèle dans des conditions différentes de sa période de calage, est appliquée. Elle consiste en des tests de calage-contrôle croisés sur des périodes indépendantes. Pour GR5J, la période de débit naturel est subdivisée en deux sous-périodes de même longueur, P_{Nat1} et P_{Nat2} (figure 5.1). Le calage du modèle est réalisé sur la première période, P_{Nat1} , et la validation sur la deuxième période, P_{Nat2} , puis le rôle des deux sous-périodes est inversé.

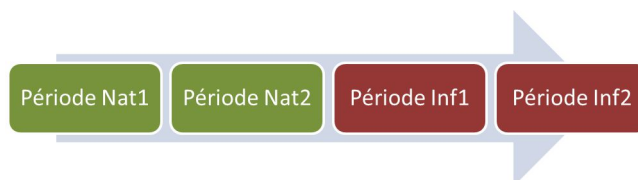


Figure 5.1 – Subdivision des différentes périodes d'étude (en vert la période naturelle et en rouge la période influencée).

L'application du *split sample test* permet d'évaluer l'impact de la transposition temporelle du jeu de paramètres sur la qualité des indicateurs hydrologiques simulés. Dans un premier temps, pour évaluer les performances du modèle sur la période de calage P_{Nat1} , pour chaque indicateur hydrologique, la différence relative (équation 5.1) entre l'indicateur obtenu sur les débits observés de la période P_{Nat1} , $Ind(Q_{obs})$, et l'indicateur obtenu sur les débits simulés par GR5J sur la période de calage P_{Nat1} , $Ind(Q_{sim})$, est calculée. Puis, pour évaluer l'impact de la transposition temporelle du jeu de paramètres, la différence est évaluée sur la période de validation P_{Nat2} en comparant l'indicateur calculé sur les débits observés de la période P_{Nat2} à l'indicateur calculé sur les débits simulés par

GR5J sur P_{Nat2} avec le jeu de paramètres obtenu en calage sur P_{Nat1} . Dans un deuxième temps, la même procédure est répétée en prenant P_{Nat2} pour période de calage et P_{Nat1} pour période de validation.

$$Différencerelative = 100 * \frac{Ind(Q_{sim}) - Ind(Q_{obs})}{Ind(Q_{obs})} [\%] \quad (5.1)$$

Plus la différence relative entre les indicateurs est proche de zéro, plus l'indicateur simulé par GR5J est proche de celui observé. Une différence relative supérieure à zéro signifie que l'indicateur simulé est plus grand que celui observé et inversement pour une différence inférieure à zéro.

5.2.2 Évaluation des différences climatiques entre les périodes

L'impact de la transposition temporelle des jeux de paramètres est évalué sur les sous-périodes naturelles P_{Nat1} et P_{Nat2} . Le tableau 3.2 du chapitre 3 présente les longueurs périodes naturelles pour chacun des sous-bassins. Elles varient de 2 à 25 ans. Nous allons dans cette partie évaluer les différences climatiques entre les sous-périodes naturelles, puis évaluer les différences entre la période naturelle et la période influencée. Cela permettra, dans un premier temps, d'évaluer la variabilité climatique entre les périodes, qui peut être à l'origine d'une non-robustesse du modèle. Dans un deuxième temps, si les différences climatiques entre les sous-périodes naturelles sont équivalentes aux différences entre la période de calage et de naturalisation, alors les analyses menées sur les sous-périodes naturelles pourront nous donner un aperçu de la robustesse du modèle entre la période de calage et de naturalisation.

En comparant les différences en termes d'évapotranspiration potentielle annuelle entre la période de calage, P_{Nat} , et la période de naturalisation, P_{Inf} , nous constatons sur 90% des bassins des différences comprises dans un intervalle de $\pm 6,8\%$ (figure 5.2a). Entre les sous-périodes naturelles (figure 5.3a), les différences médianes en termes d'évapotranspiration sont comprises dans un intervalle de $\pm 5\%$ et vont jusqu'à 13% pour le bassin 219013 (Brogo à North Brogo).

En termes de précipitations, pour 90% des bassins, les différences entre la période naturelle et la période influencée (figure 5.2b) sont comprises dans un intervalle de $\pm 9,6\%$. Glo-

bablement, sur les sous-périodes naturelles, les différences sur les précipitations sont plus importantes avec un intervalle de $\pm 24\%$. Sur le bassin 219013, on note une différence de plus de $\pm 31\%$ et, entre les sous-périodes naturelles, une différence de $\pm 70\%$ (figure 5.3b). Ces importantes différences sont dues au fait que les moyennes ont été calculées sur des sous-périodes de 2 ans et elles sont donc très sensibles aux variations interannuelles.

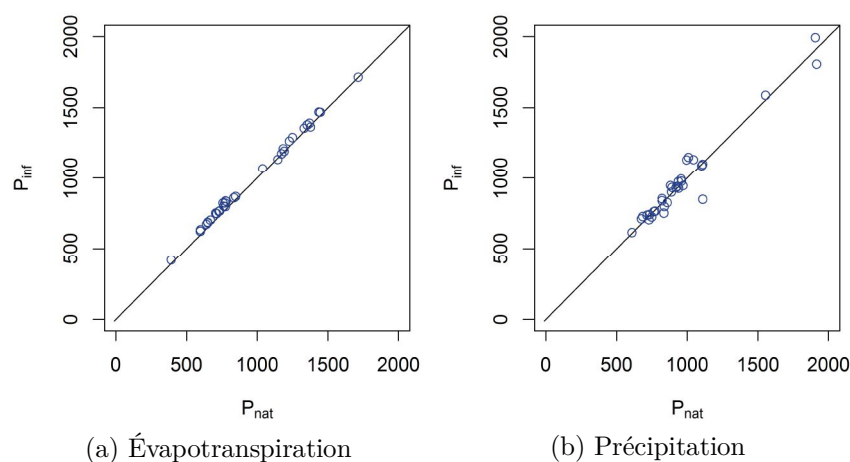


Figure 5.2 – Précipitation et évapotranspiration potentielle annuelle moyenne sur la période de calage P_{Nat} et la période de naturalisation P_{Inf} , pour l'ensemble des 34 bassins.

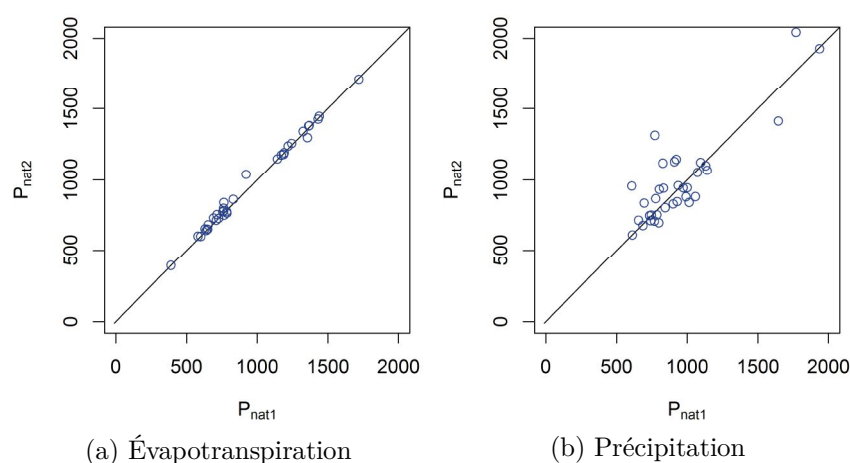


Figure 5.3 – Précipitation et évapotranspiration potentielle annuelle moyenne sur les sous-périodes naturelles P_{Nat1} et P_{Nat2} , pour l'ensemble des 34 bassins.

Il ressort que les différences climatiques entre la période de calage naturelle et la période de naturalisation sont relativement faibles. Les différences entre les sous-périodes naturelles, sur lesquelles sont testées la robustesse du modèle, sont plus importantes. Si

GR5J s'avère être robuste sur ces sous-périodes, cela accroîtra la confiance que l'on peut avoir dans le modèle. Il reste cependant des incertitudes, notamment liées à l'évolution de l'occupation des sols. Nous n'avons cependant pas mis en place une base de données permettant d'évaluer l'occupation du sol pour tester son potentiel impact, du fait de l'importance de la tâche. Ce point ne sera donc pas traité dans ce travail, ce qui en constitue une potentielle limite, même si la question de l'impact du couvert végétal sur l'hydrologie des bassins n'est pas une question avec une réponse unique (Andréassian *et al.*, 2001).

5.2.3 Évaluation de la robustesse globale du modèle

Cette partie présente les performances globales de GR5J obtenues en appliquant la *split-sample test* sur les sous-périodes non-influencées P_{Nat1} et P_{Nat2} . Nous faisons l'hypothèse que la robustesse des indicateurs sur les sous-périodes non-influencées renforce la confiance que l'on pourra avoir sur ces indicateurs obtenus avec la méthode d'extension. La figure 5.4 présente la robustesse du KGE et de ses composantes. Avec des KGE en calage de l'ordre de 0,80 en valeur médiane et des KGE en validation de l'ordre de 0,70 en valeur médiane, le modèle GR5J fournit globalement une bonne estimation des débits observés et est relativement robuste. Quelques bassins semblent cependant poser de grosses difficultés. Pour le bassin 08210000 (Nueces river near Three rivers, G1), avec des performances moyennes en calage de -0,39 et en validation de -0,17, le modèle GR5J est incapable de simuler correctement le débit naturel. Ce bassin a la particularité d'être l'un des plus grands de la base de données avec une surface d'environ 45000 km^2 . La cause ne semble pas être d'origine climatique puisqu'entre les sous-périodes, longues de 31 ans chacune, il y a 1% de différences entre les précipitations moyennes annuelles et pas de différences entre les évapotranspirations annuelles moyennes. Sur l'ensemble de la période naturelle, le rapport entre les précipitations et l'évaporation potentielle équivaut à 2,8 et le rapport entre le débit et les précipitations équivaut à 0,02. La situation de ce bassin selon la représentation de Turc-Mezentsev (Turc, 1954) tend à indiquer qu'il n'a pas assez d'énergie pour perdre autant d'eau. L'USGS indique la présence sur le bassin de plusieurs pertes karstique en amont ainsi que de nombreuses petites dérivations pour l'irrigation et l'approvisionnement municipal à l'amont de la station 0821000. Les faibles performances

sur cette station pourraient donc s'expliquer par le caractère influencé des séries de débits observés et la complexité des échanges nappes-rivières sur ce bassin. Sur cette station, la méthode d'extension n'est pas adaptée avec le modèle utilisé ici.

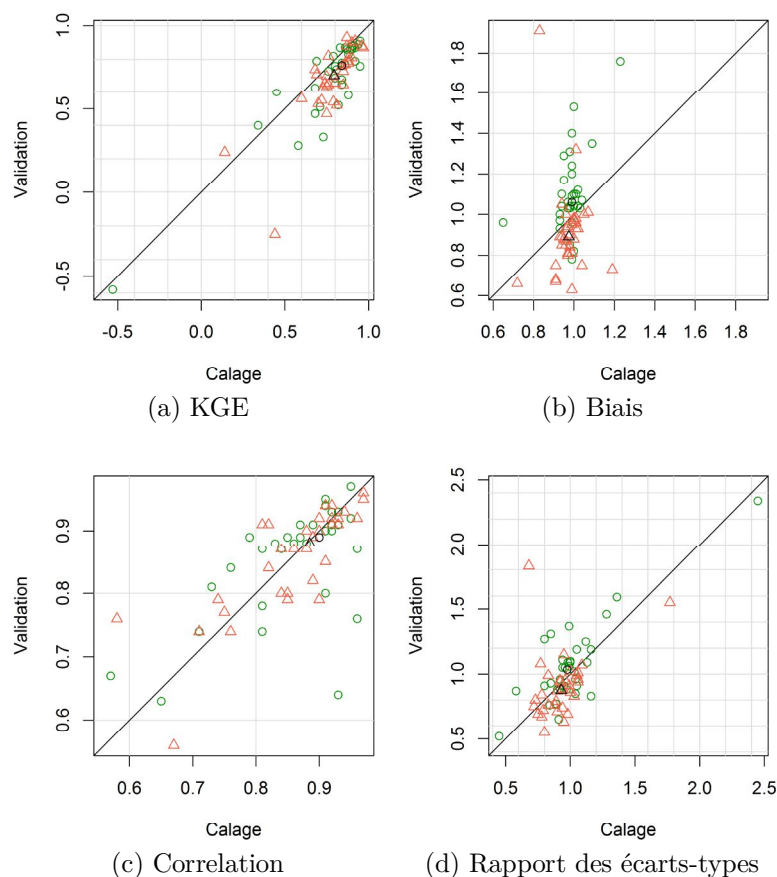


Figure 5.4 – Comparaison du KGE et de ses différentes composantes en calage et validation. Les ronds verts correspondent aux performances du modèle en calage sur P_{Nat1} et en validation sur P_{Nat2} , et inversement pour les triangles rouges.

Pour le bassin 219013 (Brogo River à North Brogo, G4), comme nous l'avons vu précédemment, d'importantes différences climatiques existent entre les sous-périodes. Ces différences aboutissent à un KGE moyen en calage de 0,57 et de 0,55 en validation. Bien que le KGE puisse paraître relativement faible, le modèle est robuste car les différences de KGE entre calage et validation sont faibles. Avec un KGE en calage de 0,67 sur la période naturelle, on pourra donc s'attendre à ce que GR5J ait des performances similaires sur la période de naturalisation.

Concernant le biais (figure 5.4b), on peut voir que la transposition temporelle des paramètres a tendance à le dégrader mais qu'en valeur médiane, il y a un écart compris

majoritairement entre plus ou moins 10% sur la période de validation. On remarque que sur 28 bassins, en calant sur la période P_{Nat1} et en validant sur la période P_{Nat2} , GR5J simule en validation un bilan en eau plus important. Sur six bassins, on constate une différence de biais moyens de 30% entre les deux périodes (tableau 5.1).

Pour la première station, comme expliqué précédemment, cela est probablement dû à l'influence d'activités humaines. Pour les deuxième et troisième stations, cela peut s'expliquer par la courte durée des sous-périodes qui n'est que de deux ans. Une période de calage trop courte peut entraîner un manque de diversité hydroclimatique rencontrée pendant l'entraînement du modèle. Le jeu de paramètres obtenus peut alors ne pas être robuste (Andréassian *et al.*, 2012a). Pour les trois derniers bassins, qui ont des sous-périodes allant de 6 à 8 ans, nous n'avons pas identifié de causes évidentes. Il s'agit donc probablement de limites intrinsèques du modèle.

Tableau 5.1 – Liste des bassins ayant un biais de plus de 30% lors de l'évaluation de la robustesse du modèle et liste des causes.

| Bassin | Groupe | Causes |
|--|--------|---|
| Nueces river près de Three rivers (08210000), USA | 1 | Le débit observé est potentiellement influencé par des prélèvements amont. Limites du modèle. |
| Brogo à North Brogo (219013), AUS | 4 | La courte durée des sous-périodes de deux ans. Limites du modèle. |
| Belubula à Carcoar (412077), AUS | 1 | La courte durée des sous-périodes de deux ans. Limites du modèle. |
| Namoi à Manilla Railway bridge (419022), AUS | 1 | Limites du modèle. |
| Glennies creek à the Rocks No. 2 (210084), AUS | 2 | Limites du modèle. |
| Manilla river à l'aval de Split Rock dam (419043), AUS | 2 | Limites du modèle. |

En ce qui concerne la corrélation entre les débits observés et simulés (figure 5.4c), la variation entre les deux périodes est de $\pm 3\%$. C'est donc un indicateur assez stable temporellement. Les bassins présentant des différences de plus de 10% entre les deux périodes font partie de la liste de bassins évoquée dans le paragraphe précédent.

Le rapport des écarts-types entre les deux sous-périodes (figure 5.4d) présente en calage une différence en valeur médiane de $\pm 8\%$. En validation, on note une dégradation de l'indicateur en valeur médiane de $\pm 10\%$.

5.2.4 Évaluation des indicateurs hydrologiques

Dans cette partie, nous évaluons l'impact de la transposition temporelle des jeux de paramètres sur la qualité des indicateurs hydrologiques. Il n'a pas été possible de calculer les indicateurs QMNA5 et QJXA5 sur tous les bassins du fait de la courte durée des sous-périodes. Sur la figure 5.5, plus la différence relative est proche de 0, plus l'indicateur simulé par le modèle est proche de l'indicateur calculé sur les débits observés naturels. Dans le cas où l'indicateur observé est nul, la différence relative est fixée à -100.

En calage, le module simulé par le modèle est très proche de celui observé, avec une différence de $\pm 10,6\%$ sur 90% des bassins, et se dégrade en validation avec une différence médiane de $\pm 32\%$. Sur les indicateurs de hauts débits, QJXA5 (figure 5.5b) et Q90 (figure 5.5c), on constate sur 90% des bassins un écart de, respectivement, $\pm 51\%$ et $\pm 25\%$ sur la période de calage, entre l'indicateur calculé sur les débits simulés et celui calculé sur les débits observés, et de $\pm 61\%$ et $\pm 39\%$ sur la période de validation.

Sur les bas débits, onze bassins ont des débits observés nuls sur les périodes P_{Nat1} et/ou P_{Nat2} . Pour rappel, on estime un débit comme nul dès lors que le débit simulé est inférieur à 1 l/s. Il apparaît que le modèle GR5J n'arrive pas à simuler les débits nuls (figure 5.5d), à l'exception du bassin 412077 où il surestime le nombre de débits nuls en validation. Par la suite, cela remet en cause l'utilisation de la méthode d'extension avec GR5J pour évaluer le caractère intermittent des rivières. Il en découle que sur le QMNA5 (figure 5.5e), alors que le QMNA5 calculé sur les débits observé est nul sur les bassins 210044 et 421019, le modèle les estiment non-nuls. Il en est de même pour l'indicateur Q10 (figure 5.5f) sur 7 bassins semi-arides.

Sur l'ensemble des indicateurs du KGE, les performances en calage étant bonnes et la transposition temporelle des paramètres entraînant sur 90% des bassins une détérioration de la qualité des indicateurs variant d'environ $\pm 10\%$ à $\pm 20\%$, la méthode d'extension et le modèle GR5J sont utilisables dans la suite de l'étude pour simuler des chroniques de débits naturalisés. Sur le bassin 08210000, la méthode d'extension n'est pas applicable du fait de la présence probable d'activités humaines, ce qui conduit à des problèmes en calage du modèle. Concernant les indicateurs hydrologiques, il ressort que les indicateurs sur les extrêmes sont moins robustes. Il n'est pas sûr que notre liste des bassins pour lesquels le modèle peine à être robuste soit exhaustive, les conclusions sont donc difficilement généralisables.

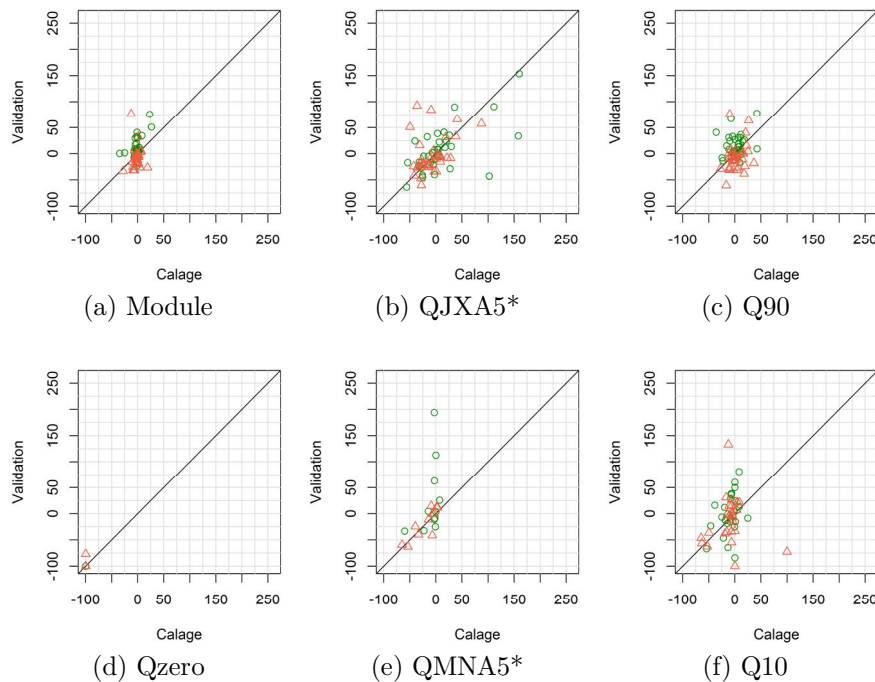


Figure 5.5 – Différence relative entre les indicateurs hydrologiques estimés avec les débits observés et les débits simulés, sur les périodes P_{Nat1} et P_{Nat2} . Les ronds verts correspondent aux indicateurs du modèle en le calant sur P_{Nat1} et en validant sur P_{Nat2} , et inversement pour les triangles rouges. *Calculé sur 16 bassins versants.

5.3 Applicabilité de la méthode de reconstitution

La méthode de reconstitution repose sur l'hypothèse qu'en calant GR5J-Dam sur les débits observés influencés en tenant compte de l'influence du réservoir, le jeu de paramètres obtenu est représentatif de l'état naturel du bassin. Dans les faits, il n'est pas possible

d'évaluer sur la période de calage la capacité du modèle à simuler à la fois le cycle naturel hydrologique et le cycle influencé puisque nous ne disposons que des observations de débits influencés. Dans cette partie, nous cherchons à évaluer l'applicabilité de la méthode de reconstitution avec le modèle GR5J-Dam sur les bassins de notre base de données.

5.3.1 Méthodologie d'évaluation de la méthode de reconstitution

Une des méthodes les plus intuitives pour savoir si les paramètres obtenus avec la méthode de reconstitution permettent de simuler un débit naturel est de tester le modèle sur des observations du débit naturel du bassin. Or, dans cette partie, nous cherchons tout d'abord à proposer une méthodologie d'évaluation applicable à l'ensemble des bassins, qui n'ont pas forcément d'observation du débit naturel. L'exploitation de la période naturelle sera valorisée ultérieurement dans la thèse.

Pour estimer la fiabilité du modèle à obtenir un jeu de paramètres acceptable, nous allons évaluer sa robustesse avec le *split sample test* : le calage du modèle est réalisé sur la première sous-période influencée, P_{Inf1} , et la validation sur la deuxième sous-période influencée, P_{Inf2} , puis le rôle des deux sous-périodes est inversé (figure 5.1).

5.3.2 Robustesse globale du modèle

La figure 5.6 présente les performances en calage et validation de GR5J-Dam sur les sous-périodes influencées par groupe de bassins.

Sur les bassins semi-arides des groupes 1 et 2, les performances du modèle sur le $KGE(Q)$ (poids important sur les hauts débits) sont globalement faibles, avec des KGE en validation de respectivement 0,58 et 0,51. Les performances du modèle sont moyennes sur le $KGE(\sqrt{Q})$, avec les valeurs en validation de respectivement 0,74 et 0,66. Ces valeurs de KGE montrent que le modèle rencontre des difficultés à modéliser ces gammes de débits. Sur les bas débits, les KGE obtenus en validation étant inférieurs à 0,2 en moyenne, l'application de la méthode de reconstitution avec le modèle GR5J-Dam n'est pas recommandée pour estimer les bas débits.

Sur les bassins humides des groupes 3 et 4, on obtient en validation en valeur médiane des

KGE de plus de 0,8 et 0,85, respectivement sur les débits et les racines carrées des débits. Sur les bassins du groupe 3 et 4, le modèle GR5J-Dam est globalement robuste et produit de bonnes performances sur $KGE(Q)$ et $KGE(\sqrt{Q})$. Sur les bas débits ($KGE(\frac{1}{Q})$), malgré de bonnes performances en calage, il apparaît que les performances de GR5J-Dam en validation sont relativement faibles.

5.3.3 Comparaison des paramètres obtenus avec GR5J

Le but de la méthode de reconstitution est d'obtenir indirectement un jeu de paramètres représentatif de l'état naturel du bassin, en prenant en compte les influences dans le modèle GR5J-Dam. Dans un premier temps, le modèle GR5J, représentatif du cycle naturel, a été appliqué sur les bassins naturels voisins afin d'avoir une estimation des gammes de paramètres auxquelles on peut s'attendre. La figure 5.7 présente les paramètres obtenus selon le type de climat, humide ou aride, afin de faciliter la comparaison avec les groupes de bassins influencés. La figure 5.8 présente les paramètres obtenus avec GR5J-Dam en appliquant la méthode de reconstitution sur les bassins influencés.

La capacité du réservoir de production, X1, influe sur la quantité d'eau qui s'évapore et la quantité d'eau qui ruisselle. Selon Poncelet (2016), plus X1 est grand, plus les quantités d'eau évapotranspirées réelles, la quantité de pluie alimentant le réservoir de routage et la vidange du réservoir de production sont importantes. Elle note également que lorsque X1 prend des valeurs trop importantes, le rendement du bassin devient constant. Sur les bassins naturels, X1 équivaut en valeur médiane à 211 mm et 304 mm respectivement sur les bassins arides et humides. La capacité du réservoir de production des bassins humides est logiquement plus importante car ces derniers reçoivent plus de précipitation que les bassins arides. Avec GR5J-Dam, sur les bassins semi-arides du groupe 1, il apparaît qu'en valeur médiane, on obtient des X1 plus importants que ceux que l'on retrouve sur les bassins arides naturels. Pour le groupe 2, il apparaît que les valeurs obtenues sont anormalement grandes par rapport à ce que l'on observe sur les bassins naturels. Ces valeurs anormalement grandes montrent que le modèle rencontre des difficultés à simuler le débit influencé observé. Sur les bassins humides du groupe 3, les valeurs de X1 correspondent

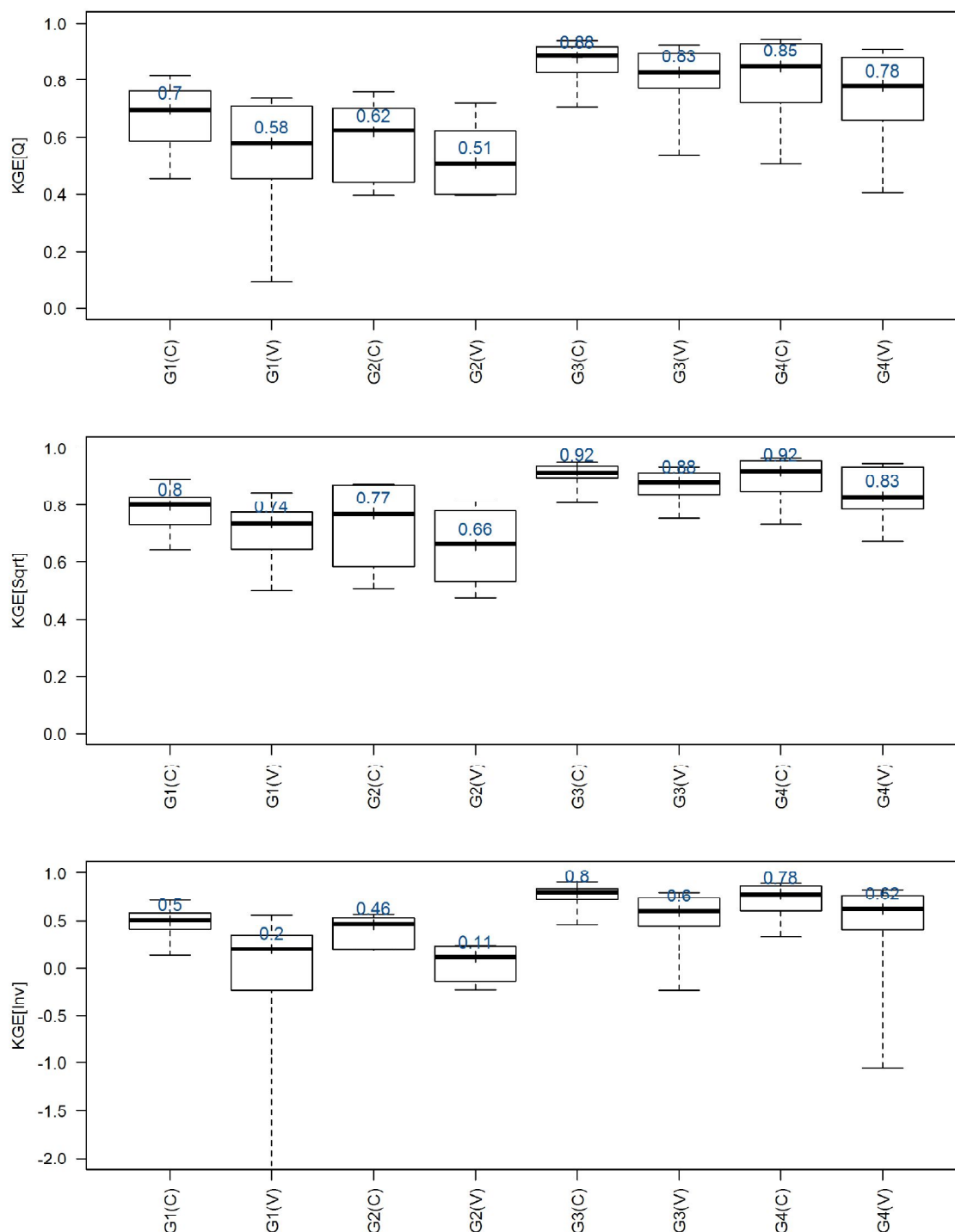


Figure 5.6 – Distribution des performances du modèle GR5J-Dam, obtenue en appliquant le *split-sample test* sur les sous-périodes influencées des bassins de la base de données, en calage (C) et validation (V) par groupe de bassins (G1, G2, G3 et G4), suivant les critères $KGE(Q)$ (haut), $KGE(\sqrt{Q})$ (moyen) et $KGE(\frac{1}{Q})$ (bas). Les extrémités des moustaches correspondent aux quantiles 0,05 et 0,95 des données. Les extrémités des boîtes correspondent aux quantiles 0,25 et 0,75 des données, et la ligne dans la boîte correspond à la médiane. La valeur en bleu correspond à la valeur médiane.

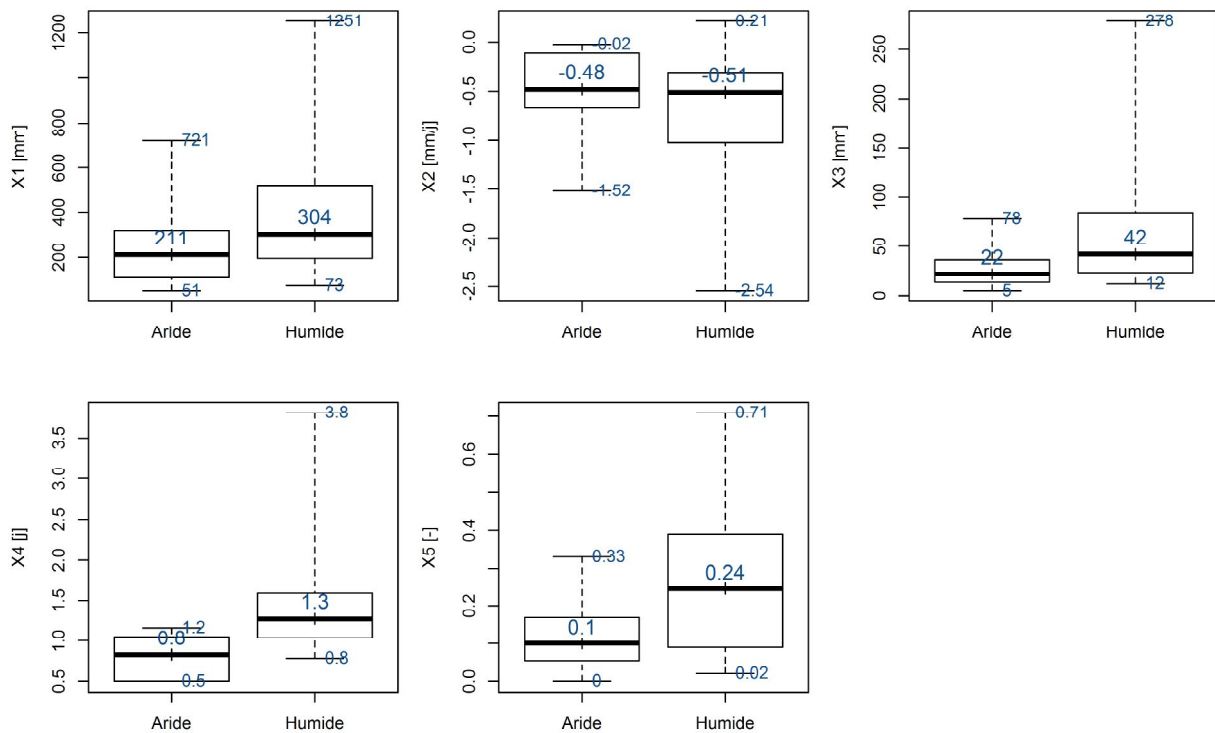


Figure 5.7 – Paramètres de GR5J obtenus en calage sur les bassins voisins naturels des bassins influencés. Les bassins sont considérés comme arides si leur indice d’aridité est inférieur à 0,75 et humide s’il est supérieur à 0,75. X1 correspond à la capacité du réservoir de production, X2 au coefficient d’échanges souterrains, X3 à la capacité du réservoir de routage, X4 au temps de base de l’hydrogramme unitaire et X5 au seuil d’inversion des échanges souterrains.

aux gammes de débits obtenus sur les bassins naturels. Pour le groupe 4, en valeur médiane, les X1 sont plus faibles.

La capacité du réservoir de routage, X3, joue un rôle sur la distribution de la quantité d’eau venant du réservoir de production et sur la variabilité du débit simulé. Un faible X3 reflète un débit variable (Poncelet, 2016). X3 a une capacité en valeur médiane de 22 mm et 42 mm sur respectivement les bassins naturels arides et humides. Cela correspond au fait que les débits simulés sur les bassins naturels arides ont une variabilité plus importante que sur les bassins humides. Sur les bassins semi-arides du groupe 1, en valeur médiane, X3 est inférieur à ce que l’on observe sur les bassins arides naturels. Cependant, les valeurs de X3 obtenues restent dans les gammes obtenues sur les bassins naturels. Pour le groupe 2, les X3 obtenus sur le groupe sont pour certains bassins anormalement bas par rapport à ceux que l’on obtient sur les bassins naturels. Sur les bassins humides

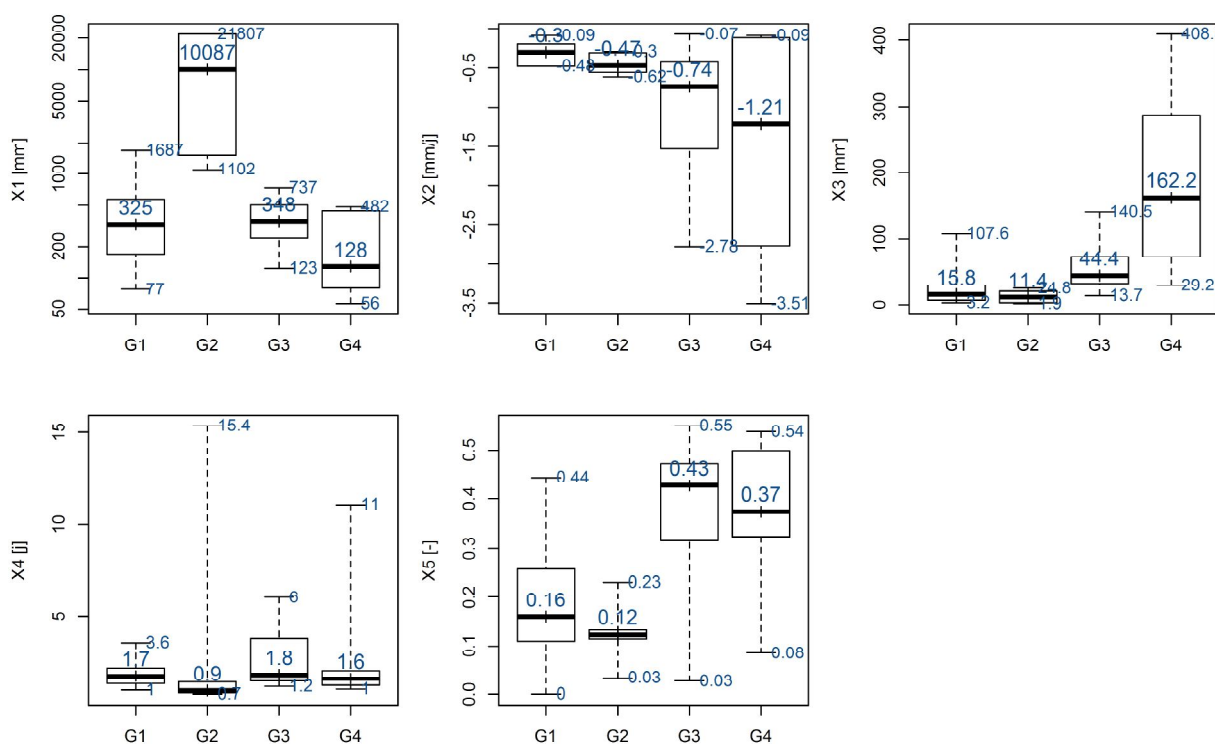


Figure 5.8 – Paramètres de GR5J-Dam obtenus en calage sur les bassins influencés.

du groupe 3, la valeur médiane de X3 correspond à celle obtenue sur les bassins humides naturels. Sur les bassins du groupe 4, on note en valeur médiane un X3 plus important. Le 95^{ème} quantile obtenu est presque deux fois plus grand que celui obtenu sur les bassins naturels.

Le temps de base de l'hydrogramme unitaire, X4, est représentatif du temps de réaction du bassin. Plus X4 est grand, plus les pics de crues sont retardés et atténués (Poncelet, 2016). Il ressort que les bassins naturels arides ont, en valeur médiane, un X4 plus petit que sur les bassins humides alors qu'ils ont en valeur médiane une surface plus importante. Cela montre qu'ils sont plus réactifs face à un évènement pluvieux que les bassins humides. Avec le modèle GR5J-Dam, les X4 obtenus sont plus grands que ceux obtenus sur les bassins naturels partageant le même coefficient d'aridité. Le modèle utilise donc peut-être artificiellement l'hydrogramme pour rendre compte du comportement influencé.

Le sens des échanges souterrains contrôlés par X_2 , peut varier au cours de l'année suivant que le remplissage du réservoir de routage se situe au dessus ou en dessous de X_5 . Le signe est positif en cas d'apports en eau et négatif en cas de pertes. Le seuil de changement de signe de la fonction d'échanges souterrains, X_5 , dépend du taux de remplissage du réservoir de routage. Plus X_5 est proche de ses bornes 0 et 1, plus les quantités d'eau échangées augmentent (Poncelet, 2016), le signe des échanges tend alors à ne pas changer. Sur les bassins naturels arides et humides, la valeur médiane de X_2 d'environ -0,5 montre que les bassins subissent probablement des pertes. Sur les bassins influencés humides, les pertes souterraines potentielles sont beaucoup plus grandes que sur les bassins naturels, mais le X_5 étant plus éloigné de ses bornes, cela atténue les quantités d'eau échangées.

La comparaison des paramètres obtenus en calage sur les bassins naturels avec GR5J et sur les bassins influencés avec GR5J-Dam montre qu'il existe en valeur médiane des différences importantes. On note notamment que sur les bassins semi-arides du groupe 1, les capacités du réservoir de production sont plus grandes et celles du réservoir de routage plus petites que ce que l'on observe sur les bassins naturels arides. Sur les bassins semi-arides ayant leur exutoire à l'aval immédiat d'un barrage, l'obtention de X_1 anormalement haut et de X_3 anormalement bas montre que GR5J-Dam rencontre des problèmes de calage et que le jeu de paramètres obtenu n'est pas exploitable pour la naturalisation. Pour les bassins humides du groupe 3, on note des valeurs de paramètres proches en valeur médiane de celles obtenues sur les bassins naturels. On note cependant des modifications des paramètres d'échange souterrain X_2 et X_5 . Cependant, leur impact combiné sur les débits simulés est difficilement interprétable. Pour les bassins humides du groupes 4, ayant une forte variabilité interannuelles des précipitations, les X_1 obtenus avec GR5J-Dam sont en valeur médiane beaucoup plus petits et les X_3 plus grands que ceux obtenus sur les bassins naturels. Les différences que l'on constate sur les bassins de groupes 1,2 et 4 montrent que la prise en compte des barrages-réservoirs peut aboutir à l'obtention de jeux de paramètres différents de ce que l'on obtient sur les bassins naturels avec GR5J. Sachant que les paramètres obtenus avec GR5J devraient être représentatifs des conditions d'écoulement naturelles, cela peut remettre en cause l'utilisation des paramètres obtenus avec GR5J-Dam pour simuler un débit naturel sur ces groupes de bassins.

5.3.4 Causes possibles des mauvaises performances de GR5J-Dam

L'annexe F analyse les causes qui peuvent mener à de mauvaises performances de GR5J-Dam sur les bassins des groupes 1 à 4. Il ressort que les stations ayant de mauvaises performances sur les moyens et hauts débits avec la méthode de reconstitution sont des stations dont le régime est potentiellement fortement influencé par les barrages-réservoirs. Le régime influencé résultant principalement des barrages-réservoirs, GR5J-Dam modélise le comportement des barrages-réservoirs et non celui des bassins versants ou bien, toute l'hydrologie est dominée par ΔV et le comportement naturel du bassins devient quasi indétectable et donc le calage instable. Nous avons vu précédemment sur les bassins du groupe 1, 2 et 4 que le modèle avait des capacités de réservoirs de production et de routage qui différaient de celles obtenues sur les bassins naturels. Or, c'est sur ces bassins que l'impact des barrages-réservoirs est potentiellement le plus important car les barrages-réservoirs doivent faire face à la variabilité interannuelle des précipitations. Plusieurs questions et pistes d'amélioration ressortent de cette analyse :

- **A partir de quel niveau d'influence la méthode de reconstitution n'est pas adaptée ?** La difficulté de répondre à cette question est que nous n'avons a priori aucune mesure de l'impact des influences sur le débit naturel. L'utilisation d'indicateurs sur les caractéristiques des barrages-réservoirs amont n'est pas optimale car, comme nous l'avons vu à travers les exemples, ce n'est pas parce qu'une station se trouve à l'aval d'un barrage qu'elle est fortement influencée dès lors que ce dernier ne s'éloigne pas trop de l'écoulement naturel, c'est-à-dire qu'il n'en modifie pas profondément le régime. On retrouve également des stations situées plus à l'aval, mais qui sont fortement influencées, car les barrages-réservoirs amont inversent le régime d'écoulement. L'application du *split-sample test* permet de détecter les bassins où la méthode de reconstitution n'est a priori pas applicable. Une évaluation indirecte des débits naturalisés permettra par la suite d'avoir une meilleure estimation de la confiance à accorder aux débits naturalisés produits par la méthode de reconstitution.

- **Arriverions-nous à des conclusions similaires en utilisant un autre modèle hydrologique ?** Dans nos travaux, nous n'avons appliqué la méthode de reconstitution qu'avec GR5J-Dam. Il s'est avéré que, dans des conditions potentiellement fortement influencées, le modèle rencontre des difficultés à modéliser les processus hydrologiques sur le bassin, en partie du fait de difficultés d'estimation des paramètres. Il serait cependant intéressant d'utiliser d'autres modèles afin d'évaluer si notre analyse est généralisable, et de concevoir des méthodes de calage alternatives, par exemple en utilisant des contraintes basées sur des signatures hydrologiques régionales naturelles.
- **Quelles alternatives appliquer si la méthode de reconstitution n'est pas adaptée ?** L'utilisation de la méthode est remise en cause pour les bassins appartenant aux groupes 1, 2 et 4. Or, c'est l'une des méthodes les plus utilisées en opérationnel (chapitre 2). Cela s'explique d'une part par le fait que le jeu de paramètres obtenus est utilisable en dehors de la période de calage, ce qui la rend plus intéressante que la méthode de bilan sur ouvrage. D'autre part, dans le cas des études de quantification de la ressource en eau, on prend en compte l'ensemble des influences humaines du bassin. Or, il se peut qu'il n'existe pas de période sans la présence de ces influences ou de bassins versants voisins non influencés, et donc que les méthodes de régionalisation et d'extension ne soient pas applicables au vu des demandes des études.

5.3.4.1 Possibles causes des faibles performances sur les bas débits

Il est apparu que les performances du modèle GR5J-Dam en validation sur les bas débits sont très faibles. Comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent, sur les moyens et hauts débits, le modèle GR5J-Dam n'est pas robuste sur les bassins où l'influence des barrages-réservoirs est trop marquée. Les bas débits étant particulièrement sensibles aux influences, il se peut que ces derniers soient trop sensibles à l'influence des barrages-réservoirs d'où la difficulté de GR5J-Dam à être robuste sur les bas débits. Dans les 26 bassins versants n'ayant pas de KGE négatif en validation, il apparaît que ce sont des bassins versants avec des barrages-réservoirs qui ne contrôlent en valeur médiane que 15% du bassin versant. Ils ne peuvent stocker qu'un dixième du volume d'eau moyen an-

nuel. Ils n'ont donc potentiellement qu'un impact temporel et quantitatif limité. Dans le cas des bassins ayant de mauvaises performances sur les bas débits, cela provient du fait que l'influence des barrages est très forte durant la période de basses eaux.

5.4 Applicabilité de la méthode de bilan sur ouvrage

La méthode de bilan sur ouvrage consiste à chaque pas de temps à ajouter au débit influencé la quantité d'eau artificiellement enlevée en amont et à soustraire la quantité d'eau artificiellement ajoutée. Dans le cas où la quantité d'eau artificiellement ajoutée est supérieure au débit influencé, le débit naturalisé obtenu est alors négatif. Face à cette particularité de la méthode, dans notre étude, nous avons considéré les débits négatifs comme étant nuls. R.J. Brandes Company *et al.* (2004), qui obtiennent également les débits négatifs avec cette méthode, considèrent également les débits négatifs comme nuls. Or, la légitimité d'application de cette simplification et ses conséquences sur le débit naturalisé peuvent être questionnées.

Dans cette partie, nous nous intéresserons en particulier à l'erreur, qui correspond à la valeur absolue du débit négatif obtenu, et qui indique la quantité d'eau manquante pour ne pas aboutir à un débit négatif. L'objectif de cette partie est de proposer une méthodologie permettant de caractériser les erreurs obtenues et d'évaluer en particulier leurs impacts sur le débit naturalisé.

5.4.1 Évaluation de la méthode de bilan sur ouvrage

Une faiblesse de cette méthode est l'obtention possible de débits négatifs. Un nombre élevé de débits négatifs peut venir de l'invalidité des hypothèses qui sont faites sur la non-prise en compte des autres termes du bilan, comme l'évaporation des réservoirs, ou les impacts anthropiques modifiant le ΔV entre le barrage-réservoir et la station, d'une mauvaise estimation du temps de transfert de l'influence, d'une non-prise en compte des pertes lors de la propagation hydraulique, ou encore d'un problème de précision des mesures.

L'indicateur proposé, B_{error} (équation 5.2), cherche à exprimer la fréquence d'obtention de débits négatifs (partie bleue) tout en prenant en compte l'ordre de grandeur du débit négatif (partie rouge).

$$B_{error} = \left(1 - \frac{N_{Qnegatif}}{L}\right) \cdot \left(1 - \frac{|\bar{Q}_{Naturalise}^{Negatif}|}{\bar{Q}_{Naturalise}^{Positif}}\right) \quad (5.2)$$

$N_{Qnegatif}$ correspond au nombre de débits négatifs obtenus avec la méthode, L au nombre de débits naturalisés, $\bar{Q}_{Naturalise}^{Negatif}$ au débit négatif moyen obtenu et $\bar{Q}_{Naturalise}^{Positif}$ au débit positif moyen obtenu.

Moins la méthode génère de débits négatifs élevés, plus l'indice est proche de 1 et plus notre niveau de confiance dans la méthode est élevé. Un B_{error} bas est le signe d'erreurs très fréquentes ou d'erreurs peu fréquentes mais importantes.

Afin de mieux comprendre l'origine de ces erreurs, nous regarderons plus précisément :

- le pourcentage d'erreur dans les chroniques de débits naturalisés afin de voir si les erreurs sont fréquentes ou ponctuelles ;
- l'amplitude moyenne de l'erreur par rapport au module du débit influencé afin d'évaluer l'importance de ces erreurs ;
- l'occurrence d'obtention des erreurs selon la valeur de débits influencés. Dans le cas où on obtient principalement des faibles erreurs sur les bas débits, nous faisons l'hypothèse que ces erreurs proviennent de l'incertitude sur la mesure des débits.

5.4.2 Analyse sur la méthode de bilan sur ouvrage sans prise en compte de l'évaporation

Sur la figure 5.10, l'indicateur B_{error} , caractérisant l'occurrence et l'amplitude des erreurs obtenues, est représenté pour chaque groupe de bassins. Afin de mieux analyser ces erreurs, la figure 5.11a présente le pourcentage d'erreur dans les chroniques de débits naturalisés par groupe de bassins. Par exemple, on voit que pour le groupe 3, en valeur médiane, les chroniques de débits naturalisés contiennent 2,9% d'erreurs. La figure 5.11b présente pour chaque groupe de bassins, l'amplitude moyenne des erreurs par rapport au module des débits influencés observés. Par exemple, pour le groupe 3, l'erreur moyenne équivaut en valeur médiane à 6% du module du débit observé. La figure 5.9 présente la

répartition des erreurs selon la gamme de débits influencés rencontrés. Par exemple, pour le groupe 3, dès lors qu'il y a une erreur sur la chronique de débit naturalisé, il y a en valeur médiane 33% de chance que le débit influencé observé, auquel on soustrait l'impact de l'influence pour naturaliser, soit dans la gamme de quantile entre 1 et 10.

Les critères B_{error} obtenus sur les bassins du groupe 1 valent en valeur médiane 0,6 (figure 5.10), ce qui indique la présence d'erreurs non négligeables dans les chroniques de débits naturalisés par la méthode de bilan sur ouvrage. Les erreurs ont une forte occurrence puisqu'elles représentent en valeur médiane environ 30% des chroniques (figure 5.11a). L'amplitude de l'erreur sur les bassins du groupe 1 représente en valeur médiane un seizième du module influencé (figure 5.11b). Cela signifie que, dès lors qu'on soustrait l'apport en eau des barrages amont au débit influencé observé et qu'on obtient une erreur, la quantité d'eau manquante afin de ne pas avoir de débit inférieur à zéro équivaut à un seizième du module (figure 5.11b). On pourrait imaginer que les erreurs sont plus fréquentes dès lors que le débit observé influencé est faible car les bas débits sont plus sensibles aux erreurs venant de la mesure du débit, aux erreurs contenues dans le ΔV et aux hypothèses de départ de non-prise en compte de tous les impacts du barrage (évaporation, infiltration) et de toutes les influences du bassin versant (prélèvements intermédiaires, pertes sur le linéaire). Or, on constate qu'on a pratiquement la même chance d'obtenir une estimation erronée du débit naturel quelle que soit la gamme de débits observés influencés (figure 5.9).

Sur les bassins du groupe 2, les relativement faibles B_{error} de 0,26 en valeur médiane indiquent que la méthode de bilan sur ouvrage rencontre des difficultés à naturaliser les débits sur ces bassins. Il apparaît que les chroniques de débits naturalisés contiennent en valeur médiane 46% d'erreurs et que ces dernières équivalent en valeur moyenne à environ 55% du module influencé (figure 5.11). On constate que comme sur le groupe 1, on a pratiquement les mêmes chances d'obtenir une erreur quelle que soit la gamme de débits influencés observés.

Sur les bassins du groupe 3, globalement les critères B_{error} sont relativement bons avec une valeur médiane de 0,9. La fréquence des erreurs est faible puisqu'elles représentent en valeurs médianes 2,9% des chroniques de débits naturalisés, avec une amplitude également faible puisqu'une erreur équivaut en valeur médiane à un sixième du module influencé (fi-

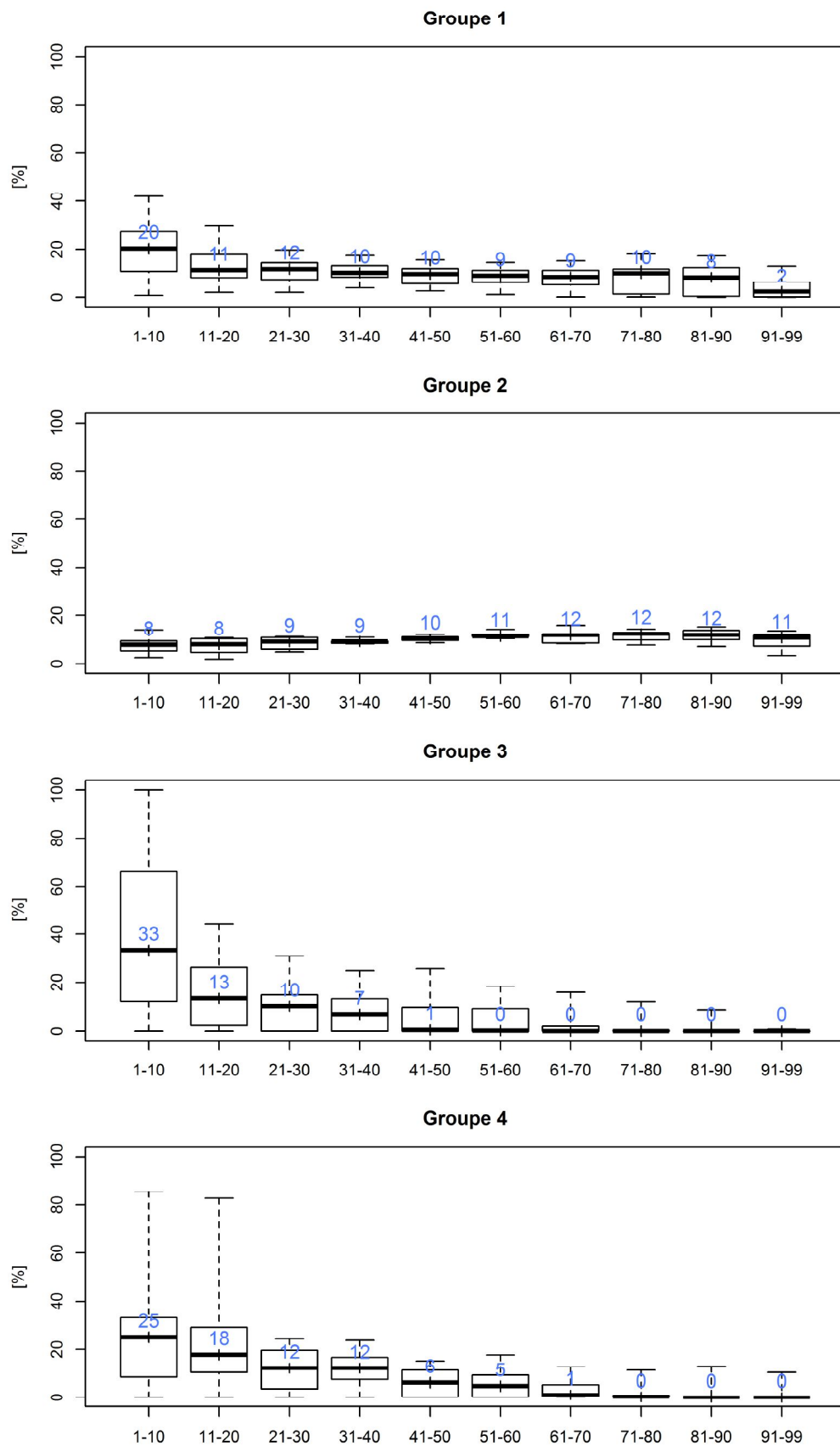


Figure 5.9 – Occurrence d’obtention des erreurs selon la gamme de quantiles de la courbe de débits classés du débit observé influencé.

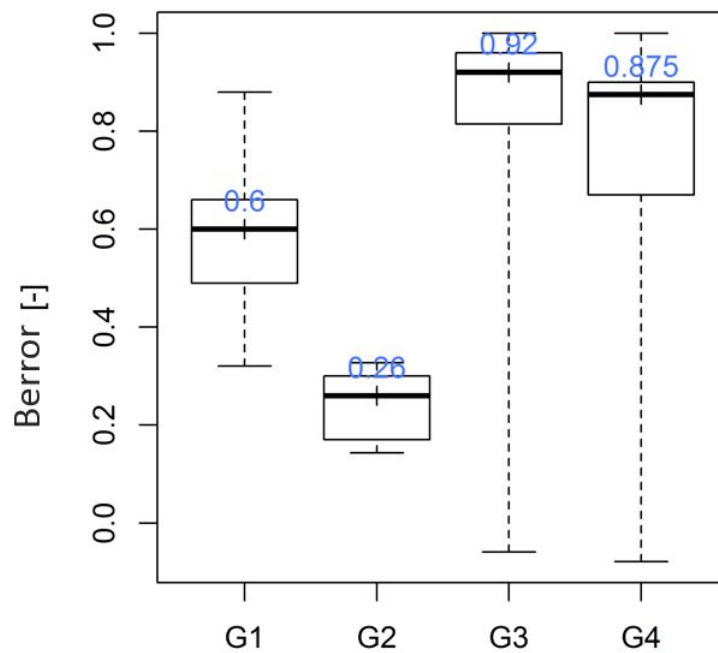
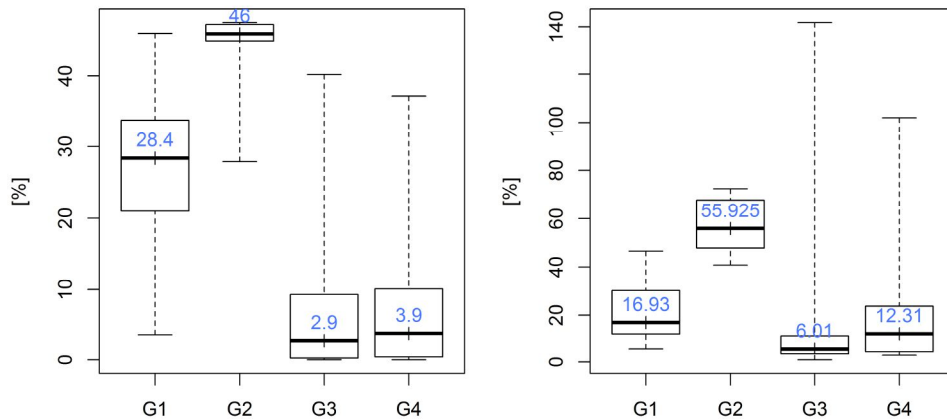


Figure 5.10 – Indicateur B_{error} obtenu par groupes de bassins avec la méthode de bilan sur ouvrage.

gure 5.11). Sur la figure 5.9, il apparaît que plus le débit influencé est bas, plus on a de chance d’obtenir des erreurs avec la méthode de bilan sur ouvrage. De même, pour le groupe 4, les B_{error} valent en moyenne 0,87. On obtient des erreurs peu fréquentes, mais équivalentes à un douzième du module.

On note des bassins des groupes 3 et 4 ayant des B_{error} négatifs. Il s’agit du bassin de Mersey à Liéna (60.1) du groupe 3 avec un B_{error} de -0,91 et du bassin de l’Eau d’Olle à Allemond (W2755010) du groupe 4 avec un B_{error} de -0,24. Pour le bassin 60.1, situé à l’aval du barrage Parangana en Tasmanie, une grande partie de l’eau du barrage est détournée vers des bassins voisins via un tunnel de 5 km (Knighton, 1988). La baisse de volume d’eau du barrage n’équivaut donc pas totalement à des lâchers de barrages qui seraient enregistrés à la station. Nous n’avons cependant pas accès aux données sur les volumes d’eau prélevés dans ce barrage. Du fait de l’impact potentiellement non négligeable de la non-prise en compte des prélèvements sur les débits naturalisés, la méthode de bilan sur ouvrage ne sera pas préconisée par la suite pour ce bassin tasmanien. Pour le bassin W2755010, ce dernier a des erreurs peu fréquentes (3,6%) mais équivalentes à 1,18 fois le module influencé. On constate que les erreurs sont essentiellement obtenues sur les mesures de hauts débits. La station se trouvant à l’aval du barrage qui turbine de



(a) Pourcentage d'erreurs dans les chroniques de débits naturalisés (b) Amplitude moyenne de l'erreur par rapport au module du débit influencé

Figure 5.11 – Caractéristique des erreurs obtenues avec la méthode de bilan sur ouvrage par groupes de bassins.

l'eau pour produire de l'hydroélectricité, il se peut que les mesures de hauts débits soient perturbées par cette dernière.

Il ressort que sur les bassins arides des groupes 1 et 2, les erreurs obtenues avec la méthode de bilan sur ouvrage ont le même comportement : ce sont des erreurs fréquentes, représentant une part potentiellement importante du module, et qui sont obtenues quelle que soit la gamme de débits observés influencés. Du fait de ces similarités, nous pouvons faire l'hypothèse que la source d'erreurs sur ces bassins est la même. Les bassins du groupe 2 se situant directement à l'aval des barrages, la source d'erreurs vient probablement de ΔV représentatifs de l'impact du barrage. Le ΔV ayant un poids plus important sur les stations situées directement à l'aval, ceci pourrait expliquer la plus grande fréquence d'obtention des erreurs et leur amplitude plus importante. Les incertitudes dans le ΔV pouvant conduire à des erreurs pour la méthode de bilan sur ouvrage sont :

- la présence de prélèvements au sein du barrage.
- la non-prise en compte de l'évaporation et des précipitations au niveau des réservoirs et du taux d'infiltration de ces derniers.

Sur les bassins des groupes 3 et 4, les erreurs ont une amplitude plus faible et sont peu fréquentes. Ces erreurs étant principalement obtenues sur les bas débits influencés, nous pouvons faire l'hypothèse que ces erreurs sont dues à une plus grande sensibilité de ces

débits aux incertitudes de mesures et à la non-prise en compte de certaines influences. Par la suite, du fait du fort pourcentage d'erreurs obtenues sur les bas débits, cela pourra remettre en cause la confiance des indicateurs calculés sur les bas débits et sur les conclusions concernant le caractère intermittent des rivières.

5.4.3 Analyse sur la méthode de bilan sur ouvrage avec prise en compte de l'évaporation

La prise en compte de l'évaporation dans la méthode de bilan sur ouvrage induit une augmentation des débits naturalisés. Cela entraîne donc sur l'ensemble des bassins une diminution du B_{error} (figure 5.12) en diminuant la fréquence des erreurs (figure 5.13a), qui restent cependant relativement importantes sur les bassins des groupes 1 et 2 avec des valeurs médianes de 19,5 et 29%, et qui deviennent pratiquement nulles pour les bassins des groupes 3 et 4. L'amplitude moyenne des erreurs diminue également nettement (figure 5.13b). Sur l'ensemble des bassins, l'erreur moyenne équivaut à moins de 1% du module du débit influencé. En analysant les gammes de débits observés touchées par les erreurs, on constate que sur les bassins semi-arides des groupes 1 et 2, l'ensemble des gammes de débits sont touchées. Sur les bassins humides des groupes 3 et 4, les erreurs restent principalement sur les bas débits (figure 5.14).

Il ressort que malgré la prise en compte de l'évaporation, de faibles B_{error} subsistent avec la méthode de bilan sur ouvrage, en particulier sur les bassins semi-arides des groupes 1 et 2. Comme dans la partie précédente, les erreurs obtenues sur les bassins de ces groupes sont similaires. Le faible poids des erreurs face au débit moyen peut également être le signe que les erreurs ont pour origine l'incertitude de l'ensemble des variables utilisées par la méthode de bilan sur ouvrage.

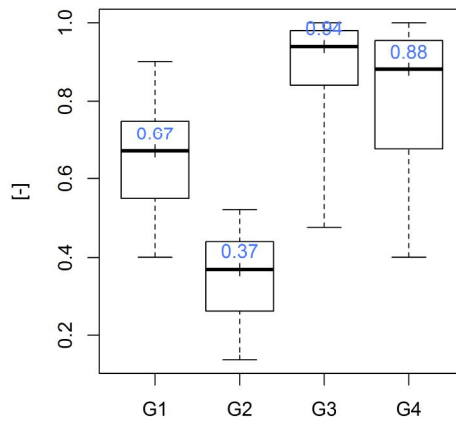
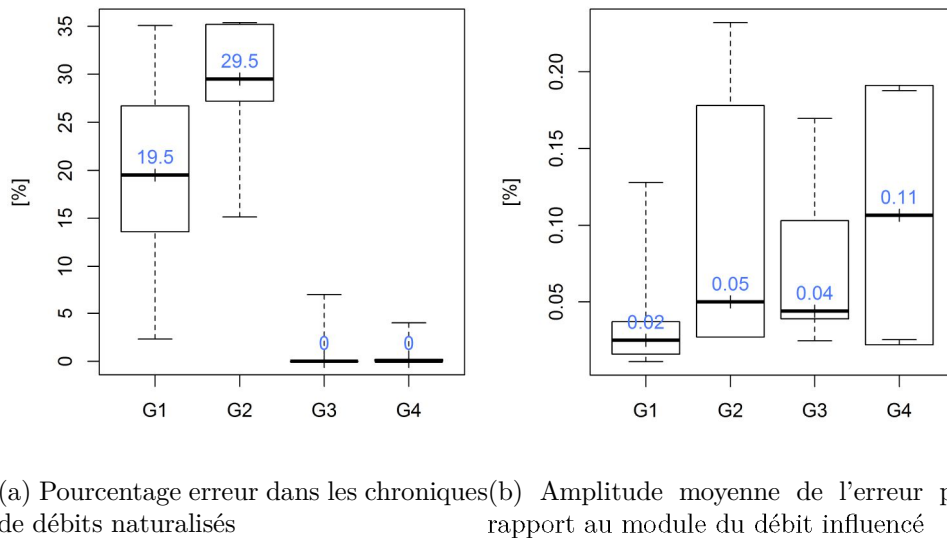


Figure 5.12 – Indicateur B_{error} obtenu par groupes de bassins avec la méthode de bilan sur ouvrage prenant en compte l'évaporation des barrages-réservoirs amont.



(a) Pourcentage erreur dans les chroniques de débits naturalisés (b) Amplitude moyenne de l'erreur par rapport au module du débit influencé

Figure 5.13 – Caractéristiques des erreurs obtenues avec la méthode de bilan sur ouvrage, prenant en compte l'évaporation des barrages-réservoirs amont, par groupes de bassins.

5.5 Applicabilité de la méthode de régionalisation

Les méthodes de régionalisation sont classiquement utilisées pour estimer le débit naturel sur des bassins non jaugés. Ce sont des méthodes qui sont a priori moins performantes que si l'on avait pu caler le modèle sur le bassin à modéliser (Lebecherel *et al.*, 2016 ; Oudin *et al.*, 2008 ; Poncelet, 2016). Elles restent cependant intéressantes à utiliser

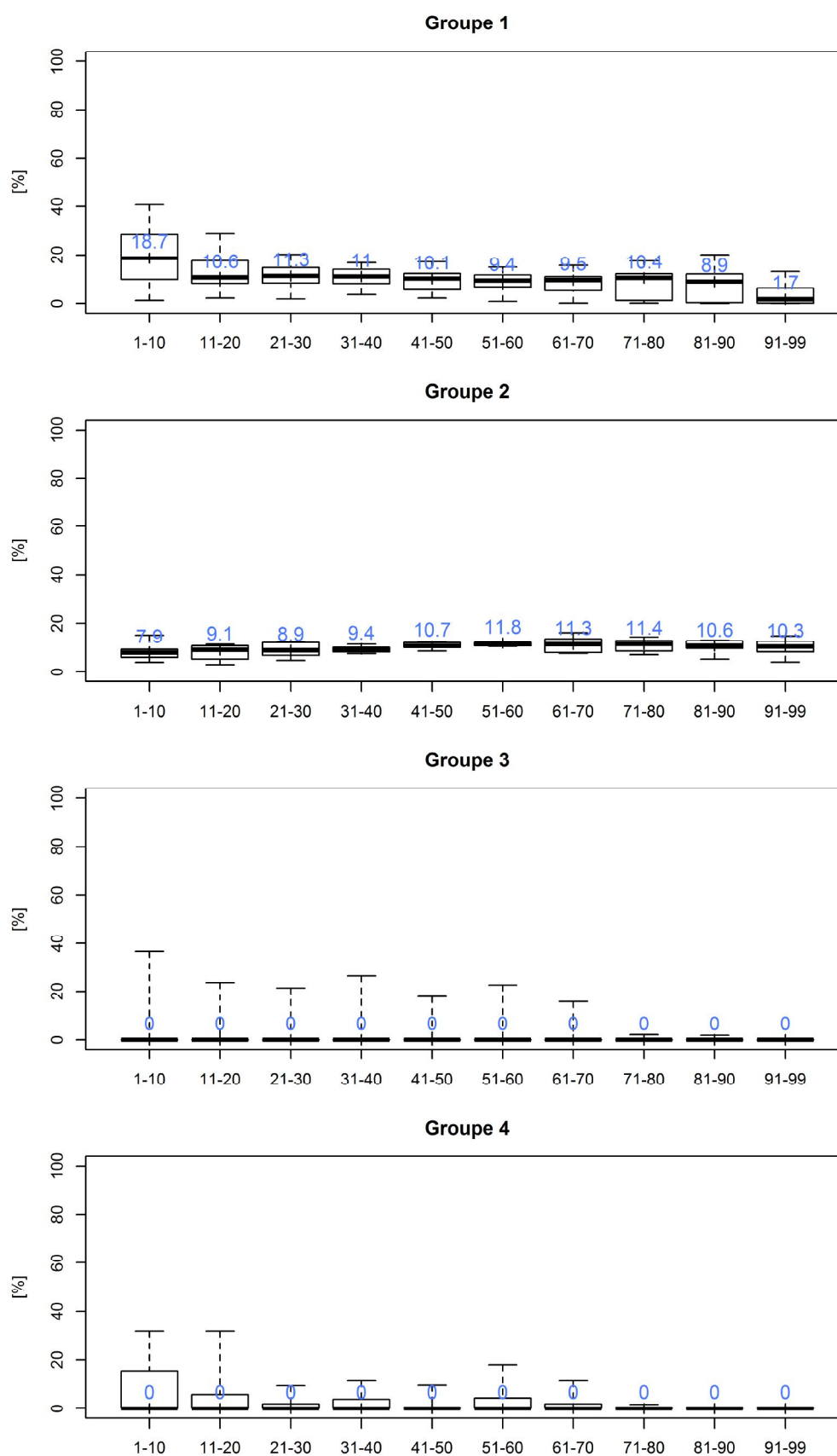


Figure 5.14 – Occurrence d’obtention des erreurs de la méthode de bilan sur ouvrage prenant en compte l’évaporation des barrages-réservoirs amont, selon la gamme de quantile de la courbe de débits classés du débit observé influencé.

dans les cas où de nombreuses influences existent sur le bassin, la récolte des données caractérisant les influences pouvant être impossible en raison de l'absence de mesures, et lorsqu'on ne dispose pas de données d'observation du débit naturel (chapitre 2).

La méthode de régionalisation basée sur la proximité spatiale repose sur l'hypothèse qu'un bassin naturel géographiquement proche d'un bassin influencé, a de grandes chances de correspondre aux conditions naturelles de ce bassin.

Dans un premier temps, nous allons évaluer les performances en régionalisation sur les bassins naturels donneurs. On en décompte 384, 134 et 24 respectivement pour l'Australie, la France et les États-Unis. Dans un deuxième temps, nous essaierons de voir si les performances en régionalisation obtenues sur les bassins donneurs sont exploitables pour estimer les performances sur le bassin à naturaliser.

5.5.1 Performances régionales de la méthode de régionalisation

La figure 5.15 présente les performances globales obtenues en régionalisation avec le modèle GR5J sur les bassins naturels par pays. Le KGE montre qu'en valeur médiane, sur les bassins français, la régionalisation simule des débits de qualité moyenne par rapport aux débits observés. Ces performances s'expliquent par un biais variant entre 0,7 et 1,6 pour 80% des bassins. Ce biais traduit les difficultés de la méthode à reproduire correctement le bilan en eau des bassins. Concernant le rapport des écarts-types, il varie entre 0,6 et 1,4, ce qui montre que la méthode peut avoir tendance à fortement surestimer ou sous-estimer la variabilité naturelle. Concernant la corrélation, les performances sont en valeur médiane bonnes, ce qui signifie que la méthode de régionalisation arrive globalement à reproduire l'évolution des chroniques de débits.

Sur les bassins australiens, les KGE obtenus en valeurs médianes traduisent de faibles performances du modèle. Il est intéressant de noter que sur 90% des bassins, la méthode de régionalisation aboutit à une sous-estimation de la variabilité naturelle. La méthode de régionalisation faisant la moyenne des chroniques de débits simulés pour naturaliser, il se peut que les courbes aient un aspect plus lissé. Pour 80% des bassins, le biais varie entre 0,65 et 1,4, ce qui est assez important.

Sur les bassins américains, le KGE médian obtenu sur les bassins traduit très clairement que la méthode de régionalisation rencontre des problèmes. On note notamment une

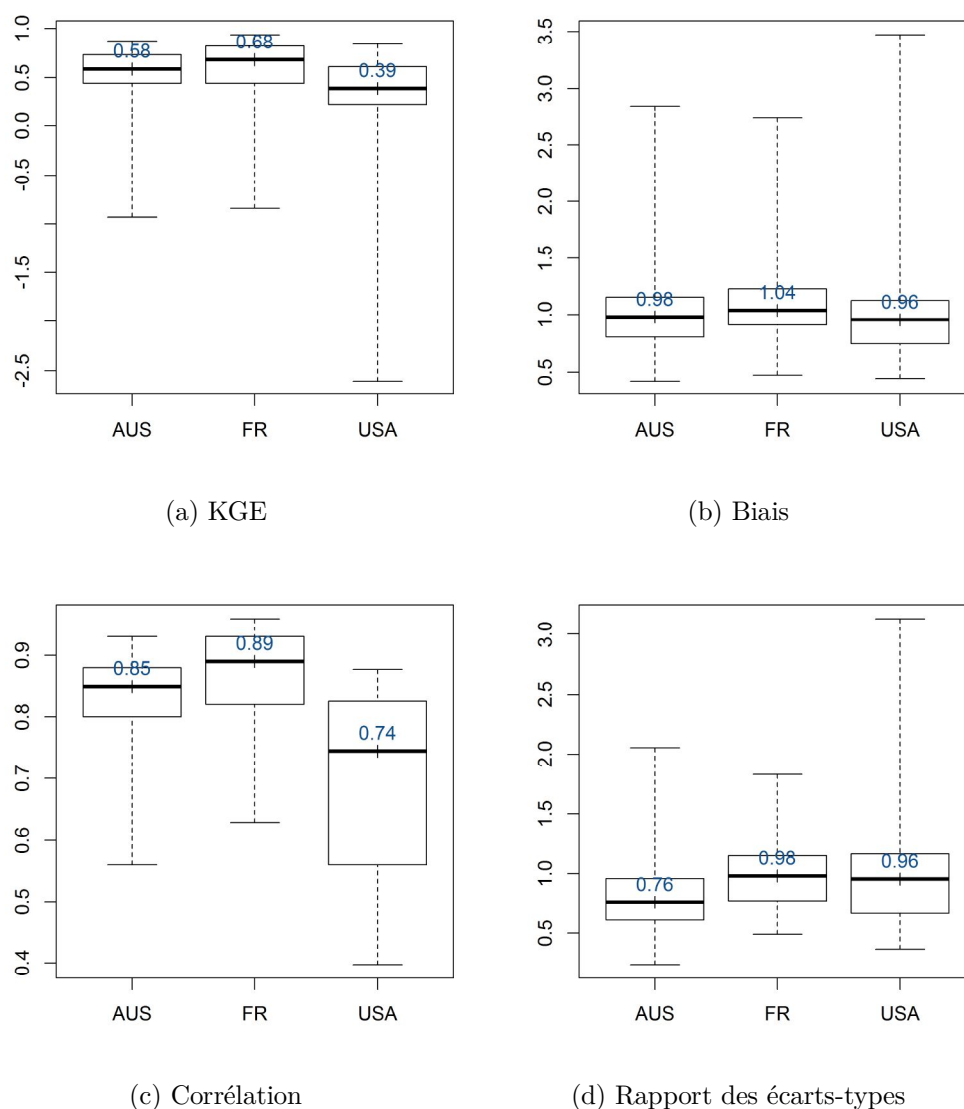


Figure 5.15 – KGE sur le débit et ses composantes calculés entre les débits observés et des débits simulés en régionalisation sur les groupes de bassins donateurs par pays.

corrélation plus faible que sur les autres pays, qui montre que l'évolution des chroniques de débits régionalisés et observés n'est pas toujours similaire.

Il ressort que, par rapport à la transposition temporelle des paramètres (partie 5.2), la transposition spatiale entraîne des performances plus faibles. On constate notamment que les erreurs de biais et de corrélation sont plus importantes. Cette baisse de performances est un résultat commun qui corrobore les résultats d'application du *Split Sample Test* et *Proxy-basin differential split-sample test* de Klemes (1986) (Andréassian *et al.*, 2009).

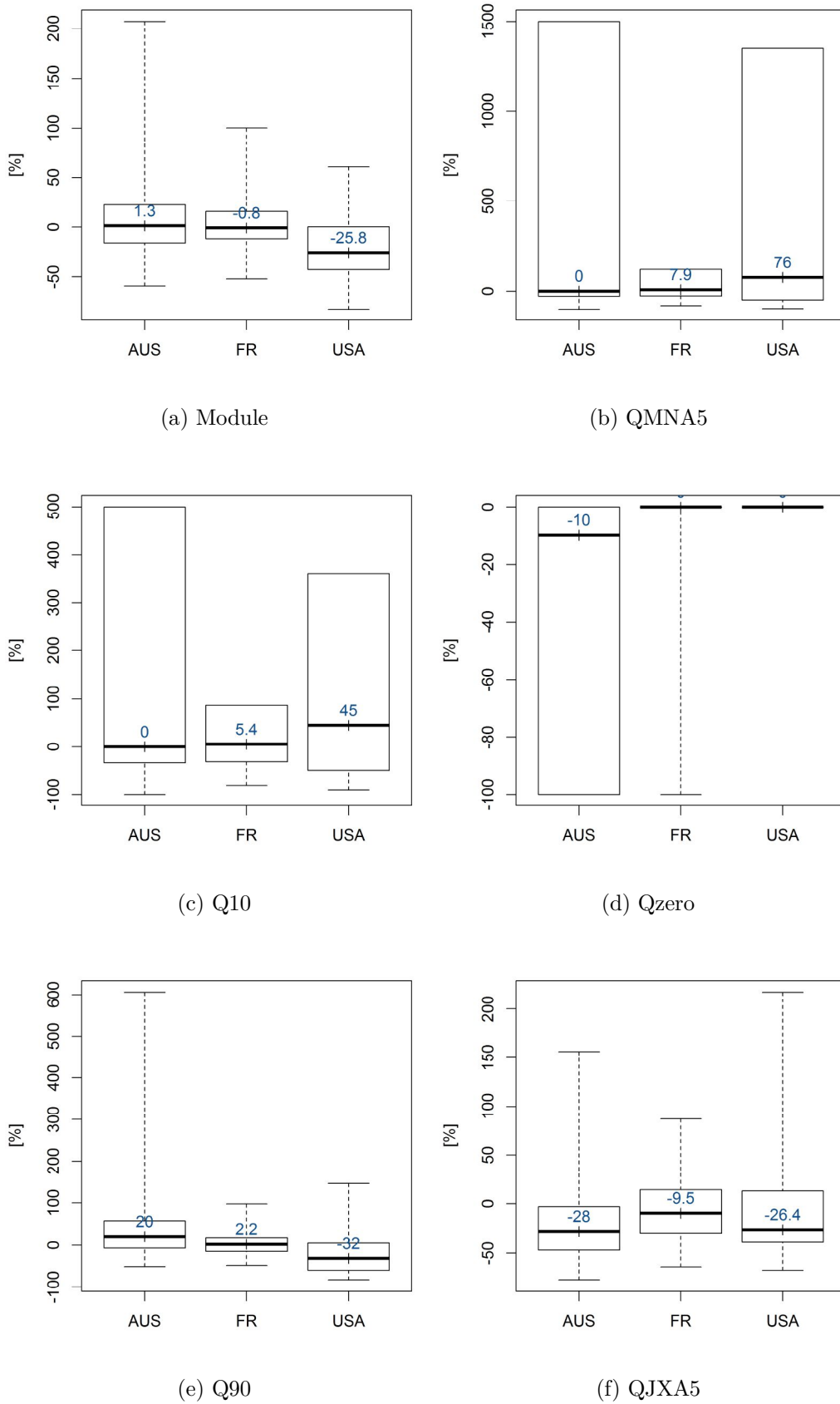


Figure 5.16 – Différence relative entre les indicateurs hydrologiques des débits observés et des débits simulés en régionalisation sur les groupes de bassins donateurs par pays.

La figure 5.16 présente les performances de la méthode de régionalisation selon différents indicateurs hydrologiques. Les indicateurs sur les bas débits, QMNA5 (figure 5.16b) et Q10 (figure 5.16c), montrent que globalement la méthode de régionalisation surestime les bas débits, en particuliers aux États-Unis et en Australie où les bassins de l'échantillon ont majoritairement un climat semi-aride. Cette surestimation des bas débits aboutit à une sous-estimation du pourcentage de débits nuls (figure 5.16d). En Australie, 58% des bassins naturels ont des débits observés nuls. La méthode de régionalisation estime des débits nuls sur seulement 20% des bassins. La méthode de régionalisation arrive donc à simuler les débits nuls, mais a tendance à sous-estimer leur occurrence.

Concernant les hauts débits, le QJXA5 (figure 5.16f), qui correspond au débit maximum annuel observé une année sur cinq, a tendance à être sous-estimé. Cela provient du fait que le débit naturalisé obtenu avec la méthode de régionalisation correspond à une moyenne des débits simulés. En moyennant, on lisse donc les hauts débits et cela conduit à une sous-estimation du niveau des crues (Poncelet, 2016). Pour le Q90 (figure 5.16e), on observe des tendances différentes selon les pays. En Australie, en valeur médiane, on observe une surestimation du Q90 alors que sur les bassins américains, on observe une sous-estimation. Concernant le module (figure 5.16a), sur les bassins américains, on constate qu'il est, en général, sous-estimé. Sur les bassins australiens et français, les différences varient pour 80% des bassins entre -30 et 40%.

5.5.2 Estimation des performances locales de la méthode de régionalisation

Dans la littérature, la justification de l'application des méthodes de régionalisation peut se faire grâce à des études menées dans la zone géographique d'intérêt qui ont identifié la méthode la plus adaptée (Oudin *et al.*, 2008 ; Zhang et Chiew, 2009). Or, une méthode a priori bonne sur l'ensemble des bassins de la région ne l'est pas forcément pour tous les bassins. Le but de ce chapitre est de vérifier l'applicabilité des méthodes de naturalisation individuellement sur chaque bassin. Dans cette partie, nous allons voir s'il est possible d'évaluer indirectement sur les bassins influencés la qualité des débits obtenus avec la méthode de régionalisation. Pour rappel, les bassins donneurs désignent les bassins voisins sur lesquels sont calés les paramètres du modèle et le bassin receveur désigne le bassin sur lequel est appliquée la régionalisation.

Méthode d'évaluation des performances en régionalisation localement

L'hypothèse de la méthode d'évaluation proposée repose sur le principe que, si la méthode de régionalisation donne de bonnes performances sur les bassins donneurs, alors les performances en régionalisation sur le bassin receveur ont de fortes chances d'être également bonnes. Nous cherchons donc à établir un lien entre les performances en régionalisation obtenues sur les bassins donneurs et sur le bassin receveur :

1. Dans un premier temps, on considère à tour de rôle chacun des cinq bassins versants naturels donneurs comme non jaugé, et on estime leurs débits en appliquant la méthode de régionalisation par proximité spatiale.
2. Dans un deuxième temps, on calcule pour chacun des cinq bassins versants naturels, le KGE entre le débit obtenu en régionalisation et le débit naturel observé. Ceci nous permet alors de connaître les performances en régionalisation sur chacun des bassins donneurs.
3. Le KGE est mis sous la forme du $C2M$ (Mathevet, 2005) afin de le borner entre -1 et 1 (équation 5.3). Ceci permet, dans le cas où une moyenne est calculée sur les KGE et que certains présentent des valeurs exceptionnellement basses, d'avoir un indicateur interprétable.
4. Les $C2M$ obtenus sur les bassins voisins donneurs sont moyennés selon l'inverse de la distance géographique. On part sur l'idée que l'indicateur obtenu nous renseigne sur les performances en régionalisation qu'on obtiendra sur le bassin cible.

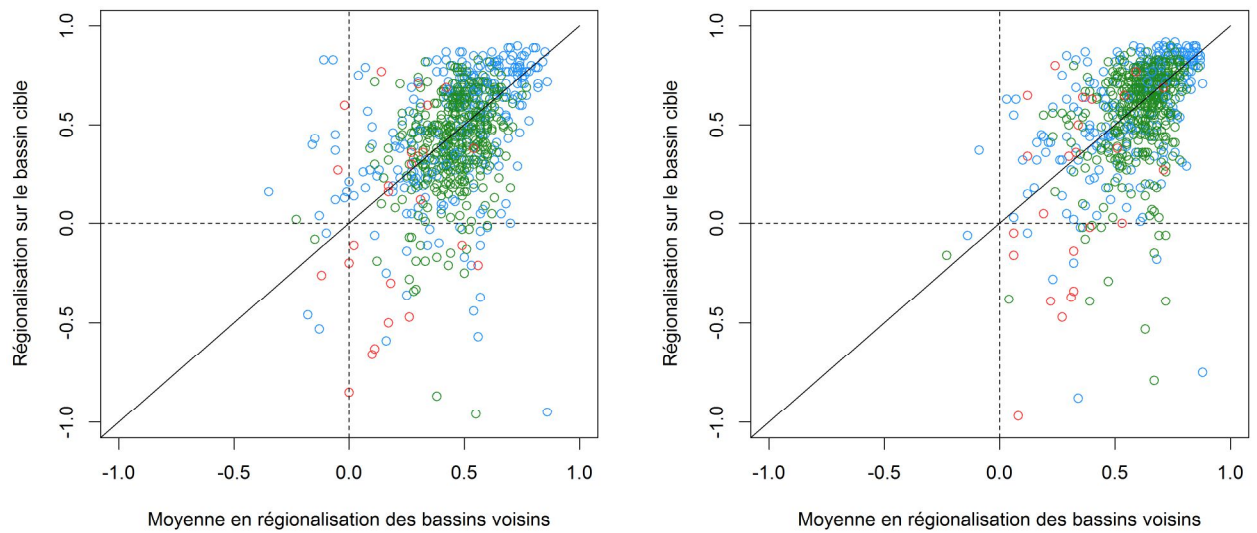
$$C2M = \frac{KGE}{2 - KGE} \quad (5.3)$$

Application sur les bassins naturels

La méthode proposée est appliquée sur les bassins donneurs naturels de la base de données, sur le KGE sur le débit, sur la racine carrée et sur l'inverse du débit. Sur les débits moyens (figure 5.17b), aucune relation linéaire entre les performances sur les bassins donneurs et le bassin cible ressort. Sur les débits moyens, on a une dispersion moins importante et on a globalement de meilleures performances sur le bassin cible en régionalisation que sur les bassins donneurs. Ceci provient du fait qu'en utilisant cinq bassins donneurs, il y a une compensation des erreurs.

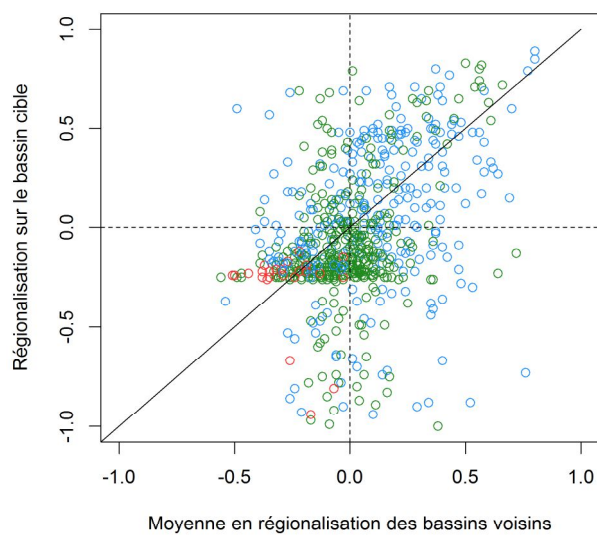
En regardant le lien entre les performances sur les bassins donateurs et le bassin cible sur les bas débits (figure 5.17c), il ressort que de bonnes performances sur les bassins donateurs ne garantissent pas de bonnes performances sur le bassin cible et inversement. On remarque que, sur le graphique, les bassins australiens semblent former une ligne autour de la valeur -0,25 en ordonnée. On constate que beaucoup de bassins ont des performances similaires en régionalisation mais que les valeurs oscillent majoritairement entre -0,15 et -0,26. L'échelle étant large, cela donne un effet plateau.

Au final, on constate qu'il est difficile de transposer l'information sur les performances régionales à l'échelle locale. Il n'est donc pas possible à ce stade de vérifier précisément sur chaque bassin si la méthode de régionalisation est applicable. Cependant, la première partie nous a permis d'avoir une idée globale des performances de la méthode de régionalisation sur les bassins donateurs par pays. Il ressort qu'aux États-Unis, les performances obtenues avec la méthode de régionalisation par proximité spatiale sont relativement faibles. Nous n'avons pas trouvé d'étude préconisant d'utiliser une méthode en particulier aux États-Unis. Il se peut que la méthode de régionalisation par proximité spatiale ne soit pas la méthode la plus adaptée. Or, la mise en place d'une étude comparative des méthodes de régionalisation permettant d'identifier la méthode la plus appropriée est un travail important, non-réalisable dans cette thèse. En France et en Australie, les performances obtenues avec la méthode de régionalisation sur les bassins donateurs naturels sont acceptables et appuient l'utilisation de cette méthode pour naturaliser.



(a) $C2M(KGE(Q))$

(b) $C2M(KGE(\sqrt{Q}))$



(c) $C2M(KGE(\frac{1}{Q}))$

Figure 5.17 – Lien entre les performances en régionalisation sur le bassin cible, en ordonnée, et les performances moyennes sur les bassins donneurs, en abscisse. Les bassins verts correspondent aux bassins australiens, les bleus aux français et les rouges aux américains.

Tableau 5.2 – Bilan des limites d’application identifiées sur la base de données de la thèse.

| Méthode | Limites d'applications identifiées |
|-------------------|---|
| Bilan sur ouvrage | Bassins semi-arides (groupe 1 et 2) : erreurs récurrentes sur les bas débits qui remettent en cause l'utilisation de la méthode. |
| Extension | Pas de conclusion générale, applicabilité à évaluer bassin par bassin. |
| Reconstitution | Bassins fortement influencés (groupe 2) : sur les bassins situés à la sortie d'ouvrage, la méthode de reconstitution n'est pas applicable. Tous les bassins: l'applicabilité de la méthode de reconstitution sur les bas débits est remise en cause. |
| Régionalisation | Les faibles performances de la méthode de régionalisation par proximité spatiale aux Etats-Unis remettent en cause l'applicabilité de cette méthode. |

5.6 Synthèse

L’objectif de ce chapitre était d’évaluer la validité des hypothèses faites par les différentes méthodes de naturalisation. Plusieurs limites d’application des méthodes sont ressorties (tableau 5.2) :

- Il apparaît que la méthode de bilan sur ouvrage aboutit de manière générale à des erreurs fréquentes sur les débits des bassins appartenant aux groupes 1 et 2. Cela s’explique par l’incertitude des mesures de volume des barrages, et les hypothèses de non-prise en compte de tous les termes du bilan en eau. Ces erreurs remettent en cause la confiance que l’on peut avoir dans les bas débits obtenus et les indicateurs calculés par la suite sur l’ensemble de la chronique de débits naturalisés. Dans les cas des bassins des groupes 1 et 2, les erreurs impactant essentiellement les bas débits durant la période de basses eaux, la confiance dans les bas débits sera également remise en question.
- La principale hypothèse faite par la méthode de reconstitution est qu’en calant le modèle GR5J-Dam prenant explicitement en compte l’influence des barrages-réservoirs, le jeu de paramètres obtenu reflète les conditions d’écoulement naturelles du bassin versant. Dans les faits, dès lors que le débit influencé observé résulte principalement de la gestion des barrages amont, GR5J-Dam n’est pas capable de modéliser le comportement naturel du bassin versant et le jeu de paramètres

obtenus reflète uniquement la gestion des barrages. Les influences anthropiques ayant un poids potentiellement non-négligeable sur les bas débits, la méthode de reconstitution n'est pas adaptée pour naturaliser les étiages. Sur les moyens et hauts débits, cela dépend de l'impact des influences anthropiques sur ces gammes de débits.

- Pour la méthode d'extension, quatre bassins sur lesquels la méthode d'extension n'est pas adaptée ont été identifiés (08210000, 419022, 210084, 419043). Il s'avère que pour le bassin 08210000, cela provient certainement d'influences anthropiques présentes sur la période non-influencée. Cela met en avant les incertitudes que soulèvent le choix de cette période non-influencée (chapitre 2) et la confiance qu'on peut lui accorder. Dans notre étude, par souci de simplicité, la période non-influencée correspond à la période avant mise en service des barrages-réservoirs où les autres influences présentes sur le bassin sont supposées être négligeables. Il serait cependant plus judicieux d'associer un degré d'influence aux périodes non-influencées utilisées par la méthode d'extension. Ceci représente cependant un important travail qu'il n'est pas possible d'effectuer sur l'ensemble de la base de données.
- Concernant la méthode de régionalisation par proximité spatiale, d'un point de vue régional, nous avons vu que les performances obtenues en France et en Australie étaient acceptables. Aux États-Unis, il s'est avéré que les performances obtenues étaient faibles et pouvaient remettre en question l'applicabilité de cette méthode pour naturaliser, en particulier sur les bas et hauts débits.

Ce chapitre a permis de proposer des méthodologies d'évaluation indirecte de l'applicabilité des méthodes de naturalisation et d'avoir une première opinion sur la confiance à accorder à chacune des méthodes. D'autres approches pourraient être utilisées. Dans les prochains chapitres, une évaluation plus approfondie des méthodes sera effectuée afin de juger la confiance qu'on peut leur accorder. Rappelons cependant que les conclusions de ce chapitre sont relatives à la base de données utilisée et aux modèles et modalités d'application mises en œuvre. Certaines des limites mentionnées précédemment pourraient être différentes dans d'autres contextes.

6

Cadre d'évaluation indirecte des méthodes de naturalisation

6.1 Introduction

L'analyse bibliographique (chapitre 2) a montré qu'il existe plusieurs méthodes de naturalisation qui diffèrent par les données qu'elles utilisent et les hypothèses soulevées. Les méthodes de reconstitution et de bilan sur ouvrage utilisent les données sur les influences, la méthode d'extension utilise les données d'observation sur la période pré-influence et la méthode de régionalisation utilise les données de débits observés sur les bassins non-influencés voisins. La méthode de reconstitution utilise un modèle hydrologique prenant en compte explicitement les influences humaines, alors que les méthodes d'extension et de régionalisation utilisent un modèle hydrologique modélisant uniquement le cycle naturel de l'eau. La méthode de bilan sur ouvrage se base quant à elle sur un modèle de routage simplifié.

La plupart du temps dans les études, une seule méthode est appliquée sans justification de son choix par rapport aux autres méthodes existantes. Le choix d'une méthode de naturalisation n'est pourtant pas anodin : la comparaison des méthodes (chapitre 4) a montré que la valeur des indicateurs hydrologiques calculés sur les débits naturalisés pouvait différer de 50% selon le choix de la méthode. Le chapitre sur l'applicabilité des méthodes de naturalisation (chapitre 5) a permis d'évaluer les hypothèses de chacune des méthodes. Les débits naturalisés obtenus sur la période influencée ne pouvant pas être directement comparés au débit naturel de la période influencée qui n'est pas mesurable, une méthode indirecte doit être mise en place pour évaluer quelle est la méthode la plus adaptée à chacun des cas.

L'objectif de ce chapitre est, dans un premier temps, de proposer un cadre d'évaluation indirecte des méthodes de naturalisation. La méthodologie proposée se base sur le choix d'une référence commune, qui permet d'évaluer les différentes méthodes de naturalisation dans un contexte similaire. Dans un deuxième temps, nous faisons l'hypothèse qu'il n'y a pas de méthode de naturalisation optimale. Nous proposons alors dans ce chapitre une approche multi-méthode, permettant de créer une nouvelle chronique de débit naturalisé résultant de la pondération des chroniques obtenues avec les différentes méthodes.

6.2 Méthodologie

Dans cette partie, nous fournissons des clés d'analyse pour aider à cadrer le choix d'une référence qui servira à l'évaluation commune de différentes méthodes. Les références considérées sont :

- le débit influencé observé,
- le débit naturel passé,
- les débits naturels régionaux.

Nous faisons l'hypothèse que la méthode la plus capable de reproduire la référence a les meilleures chances de fournir des débits naturels proches de ce qu'ils seraient sur la période influencée.

6.2.1 Comment comparer des méthodes utilisant un modèle hydrologique et des méthodes utilisant un modèle de routage ?

Les méthodes appliquées se distinguent par les outils qu'elles utilisent. Les méthodes de reconstitution, d'extension et de régionalisation utilisent un modèle hydrologique alors que la méthode de bilan sur ouvrage utilise un modèle de routage simplifié.

L'avantage des méthodes utilisant un modèle hydrologique est qu'il est possible de transposer les jeux de paramètres pour se ramener à une période commune et ainsi comparer les méthodes par rapport à une référence commune. En théorie, c'est également le cas pour les méthodes de routage, mais la méthode de bilan sur ouvrage correspond à une méthode de routage très simplifiée, pour laquelle la transposition ne permet pas une évaluation réelle. Le tableau 6.1 présente comment évaluer les méthodes de naturalisation selon la référence choisie.

- **Dans le cas où le débit naturel de la période pré-influence sert de référence** : dans un premier temps, pour chacune des méthodes, le jeu de paramètres utilisé pour simuler le débit naturalisé sur la période influencée est appliqué sur la période non-influencée pour simuler un débit naturel avec GR5J. Pour la méthode de reconstitution, le jeu de paramètres obtenu en calage avec GR5J-Dam sur la

période influencée est utilisé avec le modèle GR5J sur la période non-influencée pour simuler un débit naturel. Pour la méthode de régionalisation, les cinq jeux de paramètres obtenus en calage sur les bassins naturels voisins sont utilisés pour simuler le débit naturel sur la période pré-influence. Pour la méthode d'extension, le jeu de paramètres obtenu en calage sur la période pré-influence est utilisé pour simuler un débit naturel. Dans un deuxième temps, une comparaison entre les débits naturels observés et les débits naturels simulés est effectuée en utilisant un critère de performance, par exemple le KGE (partie 4.2.2.3, équation 4.3). Dans le cas où les débits naturels passés sont la référence la plus adaptée, la méthode de naturalisation donnant les débits naturels simulés les plus proches des débits naturels observés correspondra à la méthode de naturalisation a priori la plus adaptée.

- **Dans le cas où le débit influencé sert de référence :** pour chacune des méthodes, le jeu de paramètres est appliqué sur la période influencée pour simuler un débit influencé avec GR5J-Dam. Dans le cas où les débits influencés observés sont la référence la plus adaptée, la méthode de naturalisation donnant les débits influencés simulés les plus proches des débits influencés observés correspondra à la méthode de naturalisation la plus adaptée.
- **Dans le cas où les débits voisins régionaux servent de référence :** pour chacune des méthodes, le jeu de paramètres est appliqué sur chacun des cinq bassins voisins pour simuler un débit naturel avec GR5J. Les cinq bassins naturels voisins correspondent aux cinq bassins les plus proches spatialement du bassin influencé, comme dans la méthode de régionalisation appliquée (partie 4.2.1.3). Dans un deuxième temps, un KGE est calculé sur chaque bassin voisin entre le débit naturel simulé et le débit naturel observé. Puis dans un troisième temps, le KGE est moyenné en pondérant par la distance pour donner un poids plus important aux bassins les plus proches spatialement.

Tableau 6.1 – Méthode de comparaison par rapport à un débit de référence selon la méthode de naturalisation.

| | Méthode basée sur l'utilisation d'un modèle hydrologique | Méthode basée sur l'utilisation d'un modèle d'écoulement |
|--|--|--|
| Débits influencés observés sur le bassin cible | <ol style="list-style-type: none"> 1. Utilisation du jeu de paramètres avec le modèle simulant un débit influencé. 2. Comparaison en calculant le KGE entre les débits influencés simulés et le débit influencé observé. | Pas de comparaison possible. |
| Débits naturels observés sur le bassin cible durant la période pré-influence | <ol style="list-style-type: none"> 1. Utilisation du jeu de paramètres avec le modèle simulant un débit naturel. 2. Comparaison en calculant le KGE entre les débits naturels simulés et le débit naturel observé. | 1. Comparaison en calculant le KGE entre le régime de débits naturalisés et le régime de débits naturels passés. |
| Débits naturels observés sur les bassins voisins | <ol style="list-style-type: none"> 1. Utilisation du jeu de paramètres avec le modèle simulant un débit naturel sur chaque bassin voisin naturel. 2. Sur chaque bassin, comparaison en calculant le KGE entre les débits naturels simulés et le débit naturel observé. 3. Moyenne des KGE obtenus en les pondérant par leur distance par rapport au bassin cible. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Sur chaque bassin voisin naturel, comparaison en calculant le KGE entre le régime de débits naturalisés et le régime de débits naturels passés. 2. Moyenne des KGE obtenus en les pondérant par leur distance par rapport au bassin cible. |

La méthode de bilan sur ouvrage est l'une des méthodes les plus appliquées dans les études de volumes prélevables du fait de sa simplicité d'application et de son utilisation de données sur les influences en entrée, qui sont systématiquement produites dans ces études. De plus, la finesse des intervalles de confiance obtenus sur les débits naturalisés (voir chapitre 7) en font une méthode attractive. La méthode de bilan sur ouvrage n'utilise pas de modèle hydrologique, elle est applicable uniquement sur le bassin influencé cible durant la période influencée, ce qui limite les possibilités de comparaison avec les méthodes hydrologiques. Dans le cas où les débits influencés servent de référence, il n'est donc pas possible de comparer la méthode de bilan sur ouvrage aux autres méthodes.

Dans le cas où les débits naturels passés ou les débits naturels régionaux servent de référence, il n'est pas possible de transposer temporellement ou spatialement la méthode. A défaut, il est possible de comparer directement le régime des débits naturalisés obtenus avec la méthode de bilan sur ouvrage au régime des débits naturels passés. De même, il est possible de comparer directement le régime des débits naturalisés obtenus avec la méthode de bilan sur ouvrage aux régimes des débits naturels régionaux (tableau 6.1).

6.2.2 Critères de choix du référentiel

Le but de cette partie est de discuter de la référence a priori la plus adaptée pour comparer les débits naturalisés dans les mêmes conditions. Le choix du référentiel est une partie importante car c'est lui qui va déterminer quelle méthode est la plus adaptée. De plus, dans le cas des méthodes utilisant un modèle hydrologique, on peut s'attendre à ce que la méthode calée sur le référentiel choisi arrive mieux à simuler un débit proche du débit de référence. Cette discussion est présentée en détail en annexe G, nous n'en donnons ici que les principaux éléments.

Quatre critères sont proposées pour orienter le choix d'une référence pour chacun des cas d'étude. Les critères sur la longueur des chroniques de débits et leur qualité ont été choisis car selon l'Organisation météorologique mondiale (World Meteorological Organization, 2008), il est recommandé de se référer à des débits observés ayant une qualité et une longueur de chronique suffisante. Deux critères permettent d'évaluer si les références sont représentatives des conditions d'écoulement naturel de la période de naturalisation : un critère sur la représentativité des conditions climatiques de la période de naturalisation et un critère sur les conditions physiques du bassin. La référence qui remplira les critères de sélection sera considérée comme la référence la plus adaptée pour la comparaison des méthodes de naturalisation.

Compte tenu des difficultés évoquées pour évaluer les différentes méthodes de naturalisation, la méthodologie proposée est basée sur l'évaluation des méthodes par rapport à une référence commune. La sélection de cette référence se base à la fois sur des questions techniques et des questions de représentativité de la période de naturalisation. Le tableau 6.2 récapitule les critères de sélection appliqués par la suite pour choisir la référence. Dans notre étude, les résultats associés à certains de ces critères ont été fixés suite à la discussion menée dans cette partie, et d'autres sont à fixer au cas par cas. Nous faisons l'hypothèse qu'il n'y a pas de hiérarchie entre les facteurs. Ils ont tous le même poids dans le choix de la référence. L'avantage de cette approche est qu'elle est a priori applicable à un large échantillons de cas d'études. Cependant, au vu du nombre réduit d'indicateurs, il est possible de se retrouver dans un cas où aucune référence ne ressort du

lot. Cela montrera qu'il est alors nécessaire de faire une analyse plus locale. De plus, dans une perspective d'amélioration de la méthode, il est toujours possible d'envisager plus de critères pour apporter des améliorations.

Tableau 6.2 – Critères pour sélectionner les débits de référence. Pour chaque cas d'étude, la référence ayant le plus de "+" est considérée comme la référence la plus adaptée.

| Critères | | Débits influencés observés | Débits naturels passés | Débits naturels régionaux |
|--|--|---|------------------------|--|
| Critère technique | Qualité des débits observés | Si à l'aval de barrage-réservoir: - Sinon: + | - | Si mesure disponible pendant la période influencé: + Sinon: - |
| | Longueur des chroniques de débits disponibles | A déterminer | A déterminer | A déterminer |
| Représentativité de la période de naturalisation | Climat représentatif de la période de naturalisation | + | - | A déterminer |
| | Condition physique du bassin représentatif de la période de naturalisation | + | +/- | +/- |

6.2.3 Principe multi-modèle

En prévision, on cherche à estimer le débit futur grâce à différentes sources de données climatiques et différents modèles. Comme en naturalisation, on est dans un contexte où le débit futur n'est pas connu. On ne peut donc pas comparer directement les débits simulés selon différents modèles aux débits futurs et conclure quel est le modèle le plus adapté. Comme tous les modèles sont imparfaits et qu'aucun modèle n'est censé fonctionner correctement dans toutes les circonstances, les méthodes multi-modèles sont apparues comme un moyen d'obtenir de meilleures performances en prévision (Ajami *et al.*, 2006). Ces méthodes de post-traitement permettent de combiner les différentes simulations pour au final n'en obtenir qu'une. Similairement, en naturalisation, il n'y a pas de méthode optimale. Nous allons donc dans cette partie présenter des méthodes multi-modèles qui seront par la suite appliquées à nos cas d'étude en tant que post-traitement multi-méthode. En première approche, nous allons nous intéresser aux post-traitements basés sur la pon-

dération des chroniques de débits, qui sont les méthodes les plus communément appliquées (Krishnamurti *et al.*, 1999).

Moyenne simple non-pondérée. Une des approches les plus simples consiste à moyenner les résultats de chaque méthode sans a priori sur leurs performances. Le débit obtenu avec post-traitement, Q_{PT1} , correspond à la moyenne des débits, Q_i , obtenus avec les N méthodes de naturalisation (équation 6.1).

$$Q_{PT1} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q_i \quad (6.1)$$

Une des principales limitations de cette approche est que les bonnes et mauvaises simulations ont un poids équivalent, ce qui résulte en une combinaison non-optimale (Muhammad *et al.*, 2018). Dans certains cas, l'estimation faite avec cette approche peut être moins bonne que la simulation faite avec un seul modèle.

Moyenne simple pondérée. Le deuxième post-traitement appliqué consiste à pondérer les débits obtenus avec les différentes méthodes de naturalisation. Wanders et Wood (2016) montrent qu'en prévision, la pondération donne de meilleurs résultats qu'une simple moyenne. Le débit obtenu après post-traitement, Q_{PT2} , correspond à la somme des débits obtenus selon chaque méthode, Q_i , pondérée par le KGE obtenu, KGE_i (équation 6.2). Dans le cas où l'on s'intéresse au débit moyen, pour déterminer la pondération à attribuer à chaque méthode, le KGE sur la racine carrée du débit est calculé entre chaque chronique de débit simulé et la chronique de référence. Dans le cas où l'on s'intéresse aux bas et hauts débits, on utilisera respectivement le KGE sur l'inverse des débits et sur les débits. Pour la méthode de bilan sur ouvrage, on calculera à défaut un KGE entre les régimes de débits. Si le KGE obtenu est égal ou inférieur à zéro, on considérera le poids de la méthode comme nul. Si la méthode ne remplit pas les conditions d'application, son poids sera également considéré comme nul. Pour les méthodes ayant un KGE compris entre 0 et 1, plus le KGE sera proche de 1, plus le poids de la méthode sera important.

$$Q_{PT2} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N KGE_i} \sum_{i=1}^N KGE_i * Q_i \quad (6.2)$$

Dans le cas où les débits de référence correspondent aux débits influencés observés, la méthode de bilan sur ouvrage ne peut pas être comparée aux débits influencés observés. Ces débits ne seront donc pas pris en compte dans la moyenne pondérée. Sur les bassins versants humide, les méthodes de bilan sur ouvrage, avec et sans prise en compte de l'évaporation et des précipitations sur les réservoirs amonts, donnent des résultats quasi-similaires. Afin de ne pas sur-représenter la méthode de bilan sur ouvrage par rapport aux autres méthodes, nous avons fait le choix, dans le cas des bassins versants humides, de diviser son poids par deux.

6.3 Application à des cas d'étude

Nous allons dans cette partie évaluer quelle référence est a priori la plus adaptée selon la liste de critères énumérés dans la partie 6.2. Puis, selon la référence choisie, les chroniques de débits naturalisés obtenues avec chacune des méthodes feront l'objet d'une moyenne pondérée selon les performances des méthodes obtenues selon la référence choisie.

Dans cette partie, nous avons choisi de présenter des cas d'étude complets sur tout le processus de naturalisation avec une analyse des différents débits de références, une synthèse sur la validation des hypothèses des différentes méthodes de naturalisation, une discussion sur le choix de la référence, suivie d'une application du post-traitement. La présentation de ces cas d'étude et des résultats étant assez étendue, nous avons décidé de présenter deux cas d'étude apparaissant les plus intéressants. Manilla river à l'aval de Split Rock Dam fait partie des bassins semi-arides se trouvant à l'aval d'une barrage-réservoir, et est donc un cas d'étude complexe où les méthodes de naturalisation donnent des résultats divergents. L'Aube à Arcis-sur-Aube fait partie des bassins versants humides où les méthodes de naturalisation présentent essentiellement des différences sur les débits extrêmes.

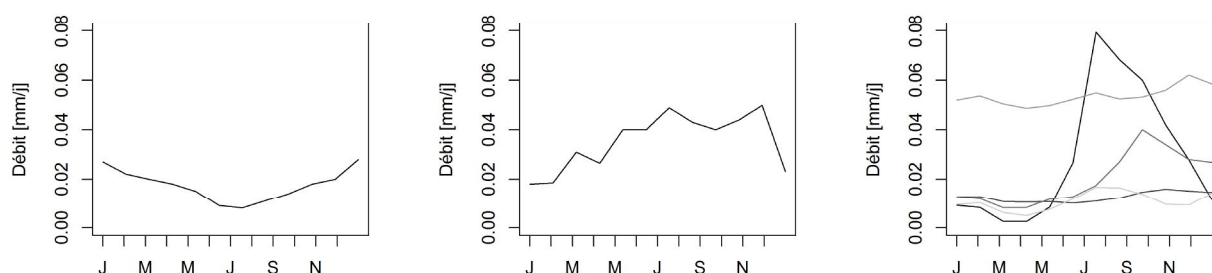
6.3.1 Manilla river à l'aval de Split Rock Dam (419043, Groupe 2, AUS)

Le bassin semi-aride de Manilla river à l'aval de Split Rock Dam se situe à l'est de l'Australie dans le bassin du Namoi, qui est un des sous-bassins du Murray-Darling. La station a, comme son nom l'indique, la particularité de se situer à la sortie du barrage

de Split Rock Dam. Le débit influencé observé dépend donc entièrement de la gestion du barrage-réservoir amont. La partie 3.6.2 présente plus en détail les caractéristiques du bassin versant et de son barrage.

6.3.1.1 Comparaison globale des différentes références

La figure 6.1 présente le régime des différents débits de référence : le débit influencé observé sur la période de naturalisation (6.1a), le débit naturel observé sur la période pré-influence (6.1b), et les débits naturels observés sur les bassins voisins (6.1c). Sur la période pré-influence, la période de hautes eaux va de début mai à fin novembre, qui correspondent aux mois d'automne et d'hiver en Australie, et la période de basse eaux de début décembre à fin avril. En comparant le régime influencé au régime naturel passé, il ressort que la mise en place du barrage réservoir a inversé la saisonnalité des débits et réduit la variabilité inter-mensuelle des débits.



(a) Débit influencé (1990-2016) (b) Débit naturel passé (1973-1986) (c) Débit naturel bassins voisins (1973-2011)

Figure 6.1 – Régimes du débit influencé observé sur la période de naturalisation (a) et du débit naturel observé sur la période pré-influence (b) à Manilla river à l'aval de Split Rock Dam. Le graphique (c) correspond aux débits naturels observés sur les cinq bassins naturels voisins les plus proches géographiquement. Plus la courbe est foncée, plus le voisin est géographiquement proche.

La figure 6.2 présente des chroniques de débits observés sur la période pré-influence en 1975 et 1980. Ces deux années sont différentes d'un point de vue hydrologique et climatique, et permettent d'avoir un aperçu du comportement du bassin sur la période pré-influence en période humide et en période sèche. Bien que la Millenium Drought reste la sécheresse la plus connue, l'Australie a été touchée par de nombreuses sécheresses dans

le passé (Verdon-Kidd et Kiem, 2009) : la *Federation drought* de 1895 à 1902, la *World War II drought* de 1937 à 1945, et plusieurs courts épisodes de sécheresse au milieu des années 1910, à la fin des années 1960 et au début des années 1980. Le débit annuel observé en 1975 et 1980 est, respectivement, de 43 mm et 2,5 mm, pour des précipitations de 808 mm et 430 mm, et une évapotranspiration potentielle de 1435 mm et 1498 mm. Ces deux années montrent bien la forte variabilité des précipitations que l'on observe en Australie. D'après MDBA (2010a), sur le bassin du Murray-Darling, c'est sur le sous-bassin de Namoi qu'on observe la plus grande variabilité interannuelle des débits. Une des particularités du bassin du Murray-Darling est le faible coefficient d'écoulement (ratio débit moyen sur pluie moyenne) : Leblanc *et al.* (2012) estiment que ce coefficient est seulement de 6%. Sur le bassin, on retrouve en effet ce coefficient pour l'année 1975, mais il n'est que de 0,6 pour l'année sèche de 1980. Concernant l'évolution des chroniques de débits, les rivières australiennes ont généralement des débits de base faibles qui persistent pendant une grande partie de l'année, avec seulement quelques grandes mais brèves crues qui représentent une grande partie du débit total annuel (Dettinger et Diaz, 2000). Les crues ont généralement lieu en période estivale, de novembre à mars (MDBA, 2010a).

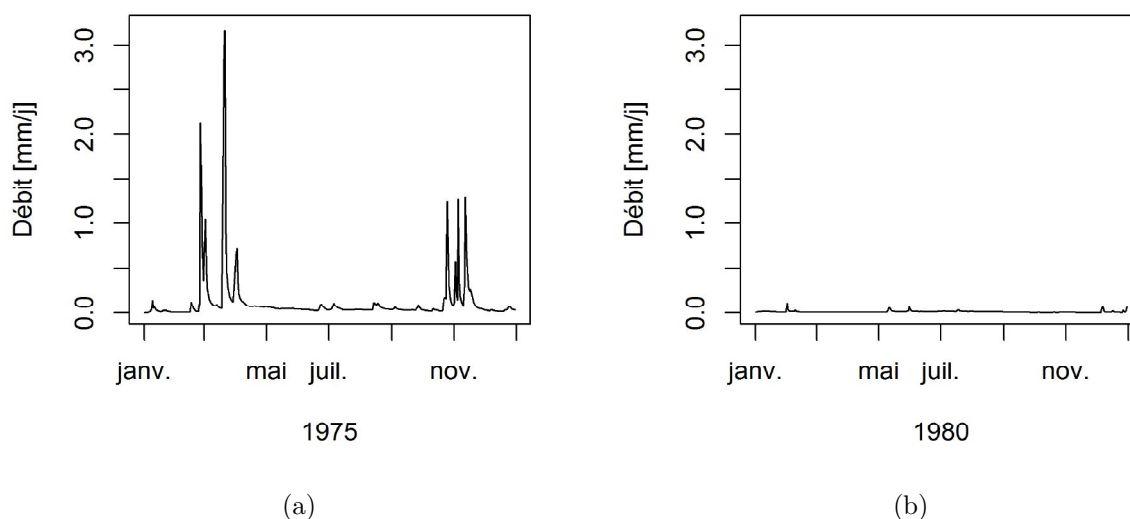


Figure 6.2 – Chroniques du débit journalier de la Manilla river à l'aval de Split Rock Dam, en 1975 (a) et 1980 (b), soit avant la mise en service du barrage-réservoir de Split Rock Dam fin 1989.

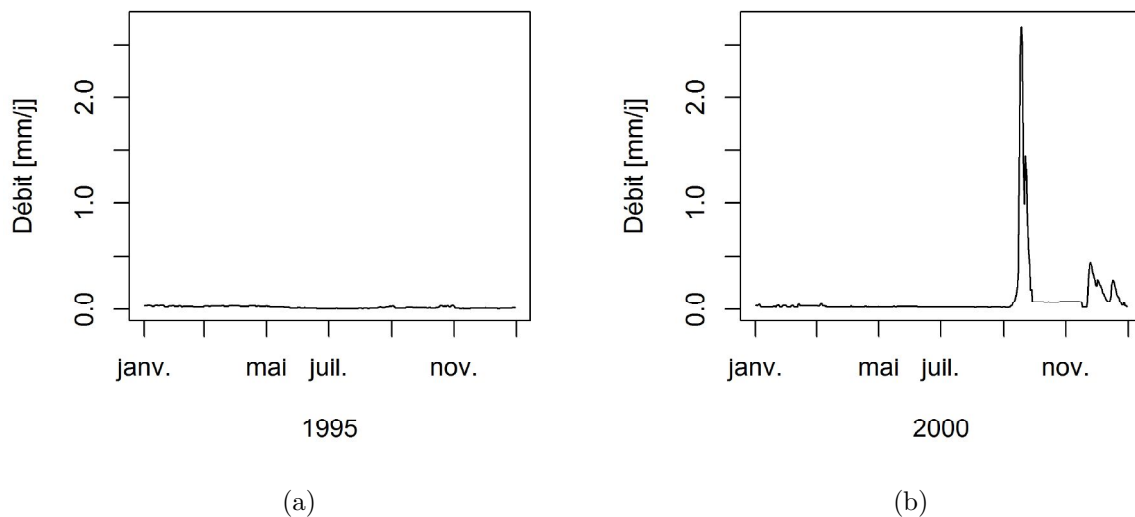


Figure 6.3 – Chroniques du débit journalier de la Manilla river à l'aval de Split Rock Dam, en 1995 (a) et 2000 (b), soit après la mise en service du barrage-réservoir de Split Rock Dam fin 1989.

La figure 6.3 présente des chroniques de débits observés sur la période influencée en 1995 et 2000. Ces années ne sont pas exceptionnelles d'un point de vue hydrologique ou climatique, mais permettent d'avoir une vision du comportement du bassin sur la période influencée. Le débit annuel observé en 1995 et 2000 est, respectivement, de 5 mm et 33 mm, pour des précipitations de 777 mm et 733 mm, et une évapotranspiration potentielle de 1412 mm et 1445 mm. Malgré des conditions climatiques similaires, on constate une grande différence en termes de débit annuel. Cela s'explique d'une part par l'influence du barrage-réservoir, qui a stocké l'équivalent de 14,5 mm d'eau en 1995 et relâché l'équivalent de 0,5 mm d'eau en 2000. En 2000, il est intéressant de noter que le pic de débit, situé début octobre, ne correspond pas à un événement de crue, mais à un lâcher de barrage. Bien que non-vérifiable, il se peut que ce lâcher de barrage en début de période estivale corresponde à une demande en eau pour remplir les retenues collinaires des agriculteurs situées plus à l'aval. Ces retenues ne sont alors pas remplies par le surplus de ruissellement, mais en transférant artificiellement l'eau de la rivière aux retenues. Cette hypothèse provient d'une discussion interne au CSIRO sur la gestion des barrages-réservoirs.

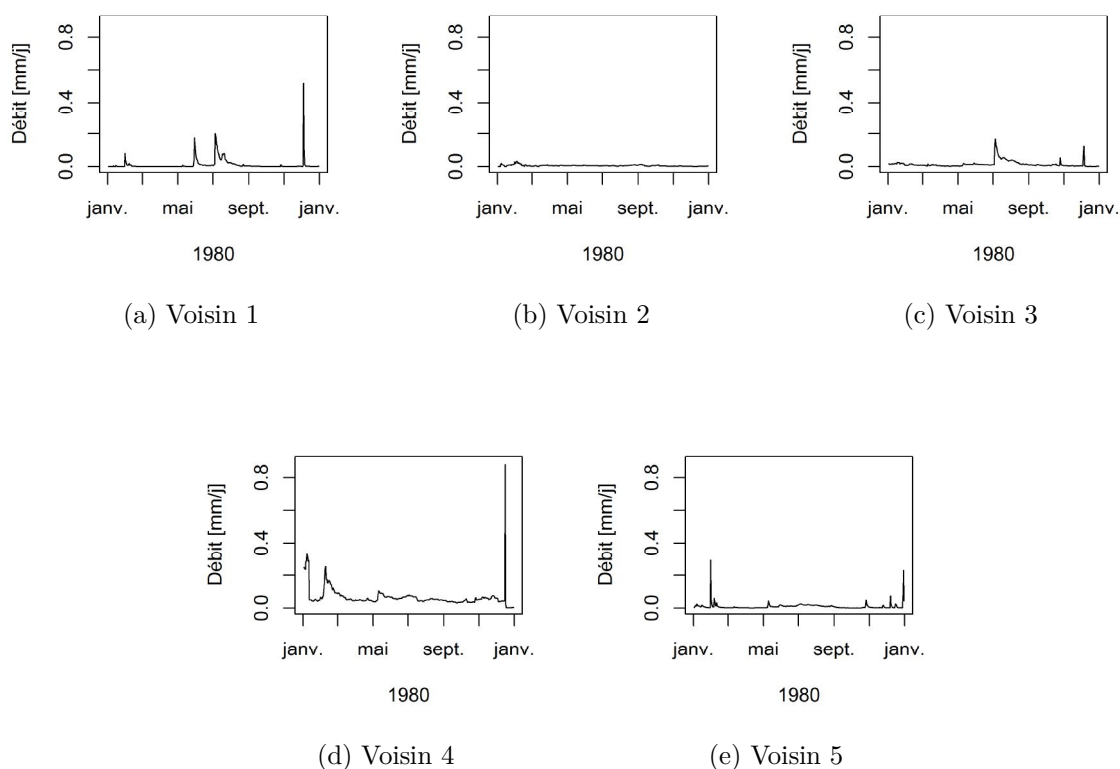


Figure 6.4 – Chroniques de débits journaliers, sur l’année 1980, des cinq bassins voisins naturels de la Manilla river à l’aval de Split Rock Dam. Le voisin 1 correspond au plus proche géographiquement et le voisin 5 au plus éloigné.

Sur la figure 6.1c, en comparant les débits naturels des bassins voisins, on remarque de grandes disparités entre leurs régimes. La figure 6.5 montre leur emplacement géographique. Les bassins V1 et V3, correspondant aux premiers et troisièmes bassins les plus proches, ont une saisonnalité marquée avec, respectivement, un pic de débit en août et octobre. Selon Dettinger et Diaz (2000), un fort gradient dans la chronologie des pics saisonniers caractérise les cours d’eau le long de la côte est de l’Australie, ce qui pourrait expliquer en partie ce décalage. Les bassins V2, V4 et V5 ont quant à eux un régime avec une saisonnalité moins marquée. Pour rappel, les bassins naturels voisins sont sans ouvrages majeurs ou schéma d’irrigation en amont. Cette faible saisonnalité ne s’explique donc pas par le facteur humain. Elle provient du fait que les rivières australiennes ont généralement une saisonnalité peu marquée (Dettinger et Diaz, 2000). La figure 6.4 présente, pour chacun des cinq bassins naturels voisins, leur débit journalier sur l’année 1980. Les conditions climatiques sur les cinq bassins versants sont similaires en 1980. On enre-

gistre respectivement 521 mm de précipitations, 476 mm, 471 mm, 500 mm et 524 mm sur les bassins V1 à V5. De même, pour l'évapotranspiration potentielle, on estime une valeur de 1109 mm, 1160 mm, 1091 mm, 1176 mm et 1178 mm pour les bassins V1 à V5. La quantité d'eau annuelle des cinq bassins voisins, V1 à V5, est respectivement de 4 mm, 2,1 mm, 5,4 mm, 24 mm et 3,7 mm. Il apparaît que le bassin V4 a un débit annuel bien plus important que les autres bassins malgré des conditions climatiques similaires. D'après la figure 6.4d, cette différence en terme de quantité vient du fait que le bassin a un débit de base plus important.

En comparant la chronique de débit journalier en 1980 sur le bassin cible par rapport à ses voisins (figure 6.2b), on constate qu'en termes de débit, précipitation et évapotranspiration annuels, les ordres de grandeur sont similaires à ceux obtenus sur les bassins V1, V2, V3 et V5. Cependant, en comparant le régime des débits obtenu sur la période pré-influence à ceux obtenus sur les bassins voisins (figures 6.1b et 6.1c), on constate des différences en termes de saisonnalité. Pour rappel, les débits naturalisés obtenus avec la méthode de bilan sur ouvrage sont évalués en comparant le régime naturalisé au régime naturel et au régime voisin. Or, dans le cas des bassins semi-arides australiens, qui n'ont pas de saisonnalité marquée comme c'est le cas sur les bassins humides, cette approche ne semble pas être adaptée. On constate sur le bassin voisin V4, ainsi que sur le V1, un pic de débit d'environ 0,9 mm/j vers fin décembre. Ce pic correspond à un événement pluvieux équivalent à environ 35 mm sur trois jours.

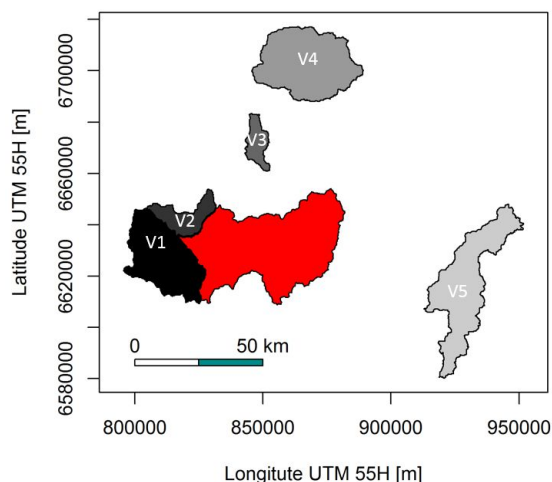


Figure 6.5 – Carte du bassin versant de la Manilla river à l’aval de Split Rock Dam, en rouge, et des cinq bassins voisins naturels donneurs, en gris. V1 correspond au bassin le plus proche géographiquement et V5 au plus éloigné.

6.3.1.2 Applicabilité des méthodes de naturalisation

Dans le chapitre 4, qui concernait la comparaison des méthodes de naturalisation, il a été montré que globalement, c’est sur les bassins semi-arides se situant à la sortie d’un barrage-réservoir que l’on observe le plus de divergence entre les méthodes. La figure 6.6 présente les différents régimes de débits naturalisés obtenus selon les différentes méthodes sur la Manilla river à l’aval de Split Rock Dam. Les débits moyens varient nettement selon le choix de la méthode de naturalisation. Entre la méthode d’extension (courbe jaune), avec laquelle on obtient le plus important volume de débit, et la méthode de régionalisation (courbe rouge), avec laquelle on obtient le plus faible volume, on a un facteur 18. Concernant la méthode de bilan sur ouvrage (courbes bleues), en prenant en compte l’évaporation et les précipitations du barrage-réservoir amont, le volume annuel est multipliée par quatre. Ceci montre qu’il y a très probablement des méthodes qui ne sont pas applicables pour ce cas d’étude. Nous constatons également des différences dans la saisonnalité des courbes. La saisonnalité semble peu marquée sur les débits obtenus avec la méthode de régionalisation (courbe rouge) et de reconstitution (courbe verte).

De plus, avec la méthode de reconstitution, on a la période de hautes eaux en janvier et la période de basses eaux en juin. Ceci contredit les résultats que l'on obtient avec les méthodes d'extension et de bilan sur ouvrage.

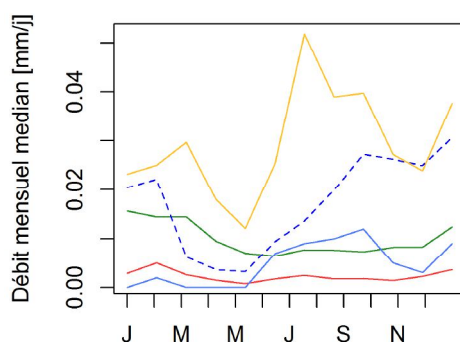


Figure 6.6 – Régime des débits naturalisés avec les différentes méthodes. BO : courbe bleu clair ; BOM : courbe bleu foncé pointillé ; R : courbe verte ; E : courbe jaune ; V : courbe rouge.

La figure 6.7 présente l'aspect des chroniques de débits journaliers naturalisés obtenus (figure 6.7b), sur la période de début mai à fin août 2002, ainsi que les précipitations (figure 6.7a) et l'évolution du volume du réservoir (figure 6.7c). L'année 2002 correspond à une année de sécheresse avec 420 mm de précipitations et 1622 mm d'évapotranspiration potentielle. Durant la période de début mai à fin août, on enregistre sur le bassin 58,9 mm de précipitations dont l'origine vient principalement de courts évènements pluvieux en juin et fin août. On estime que l'évapotranspiration potentielle équivaut à 276 mm sur cette période. On constate une différence de volume d'eau stocké équivalant à -39,5 mm dans le réservoir amont entre le début et la fin de cette période. Comme précédemment, l'hypothèse la plus plausible est que ce lâcher d'eau effectué en août sert à alimenter les retenues collinaires plus à l'aval.

Voici les principaux points qui ressortent en observant les débits naturalisés obtenus selon les différentes méthodes.

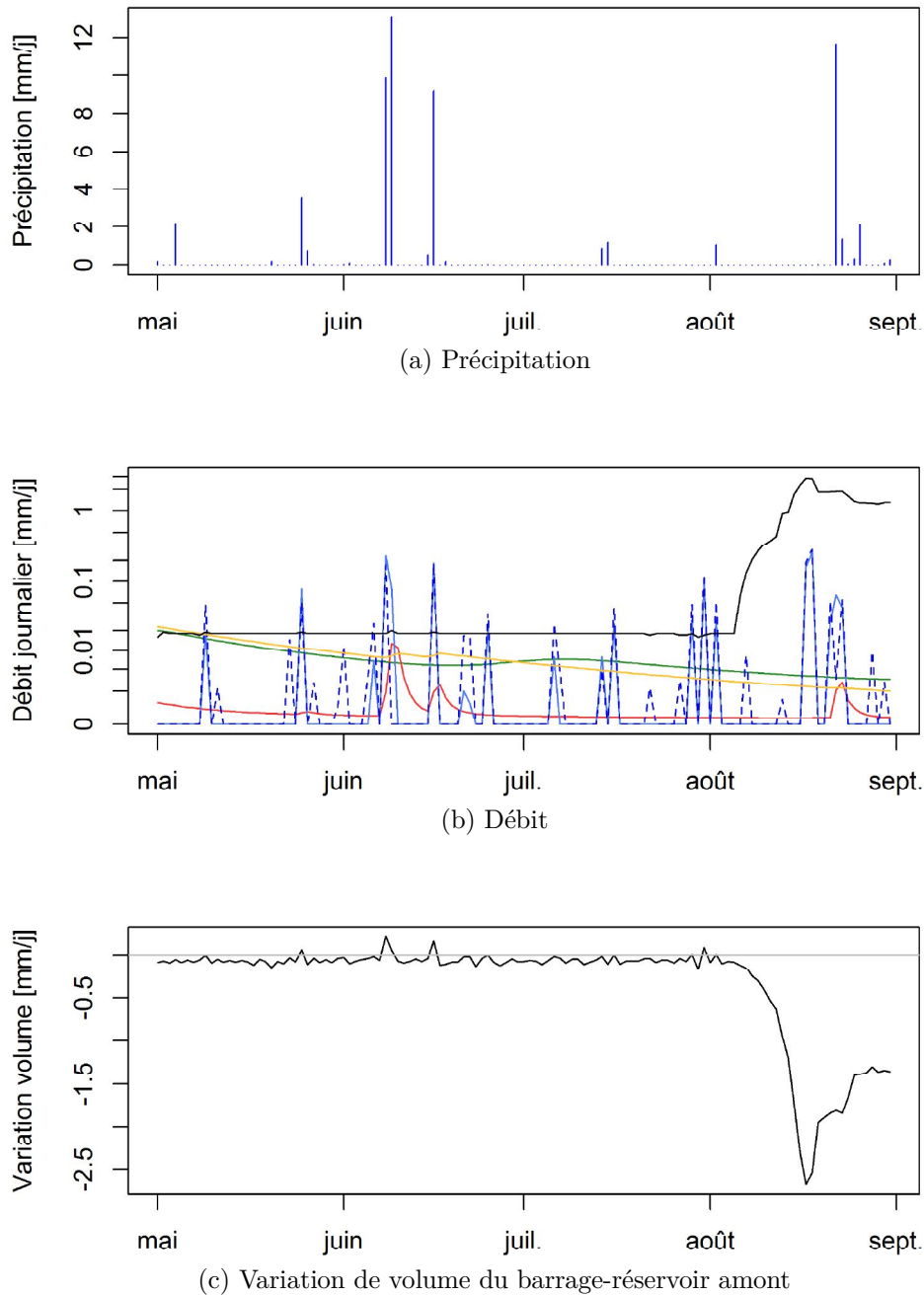


Figure 6.7 – Chroniques journalières des précipitations (a), des débits naturalisé et observé (b), et des variations de volume du barrage-réservoir de Split Rock Dam (c), de début mai à fin août 2002. Code couleur pour les chroniques de débits : BO, courbe bleue clair ; BOm, courbe bleue foncé pointillé ; R, courbe verte ; E, courbe jaune ; V, courbe rouge ; Débit influencé observé, courbe noire.

• **Bilan sur ouvrage.** Les chroniques de débits naturalisés obtenues avec les méthodes de bilan sur ouvrage, sans (courbe bleue foncé pleine, figure 6.6) et avec (courbe bleue pointillée, figure 6.6) prise en compte de l'évaporation sur le barrage-réservoir, correspondent aux chroniques ayant la variabilité la plus importante. Cependant, en dehors de ces pics, le débit de base est nul, ce qui ne correspond pas à l'aspect des débits sur la période pré-influence où l'on observait un débit lissé entre les pics. Dans la partie 5.4 du chapitre 5, il avait été montré que la faiblesse de la méthode de bilan sur ouvrage est l'obtention de débits négatifs qui correspondent donc à des erreurs. Ces erreurs sont dues à l'incertitude sur les données en entrées, et particulièrement sur la mesure de la hauteur d'eau dans le barrage-réservoir, qui a un impact conséquent sur les stations situées directement à l'aval des barrages-réservoirs. Ces points seront présentés dans la partie 7.2.2 du chapitre 7. La figure 6.8 présente le nombre moyen d'erreurs obtenues chaque mois par rapport au nombre de débit avec la méthode de bilan sur ouvrage sur le bassin de la Manilla river à l'aval de Split Rock Dam. Avec la méthode de bilan sur ouvrage sans prise en compte de l'évaporation et des précipitations sur le barrage-réservoir amont, le nombre d'erreurs varie entre 30 et plus de 60% selon les mois. L'ordre de grandeur des erreurs varie entre 0,05 mm en période hivernale, et 0,08 mm, en période estivale. D'après la partie 7.2.2 du chapitre 7, les incertitudes liées au débit observé sont plus importantes durant la période estivale sur ce bassin, ce qui peut expliquer l'occurrence plus importante d'erreurs. L'incertitude liée à la mesure de la hauteur d'eau semble constante tout le long de l'année. Cependant, cette dernière nettement plus importante que celle associée à la mesure du débit. Avec la méthode de bilan sur ouvrage prenant en compte l'évaporation et les précipitations du barrage-réservoir amont, on note une diminution de la fréquence des erreurs. Leur ordre de grandeur est également plus faible en variant de 0,02 mm en période hivernale, à 0,05 mm en période estivale. Sur la figure 6.7b, on observe avec la méthode de bilan sur ouvrage plusieurs pic de débit, qui ne correspondent pas à des précipitations. Ces pics correspondent sûrement à des erreurs dues au manque de précision des différentes variables de la méthode.

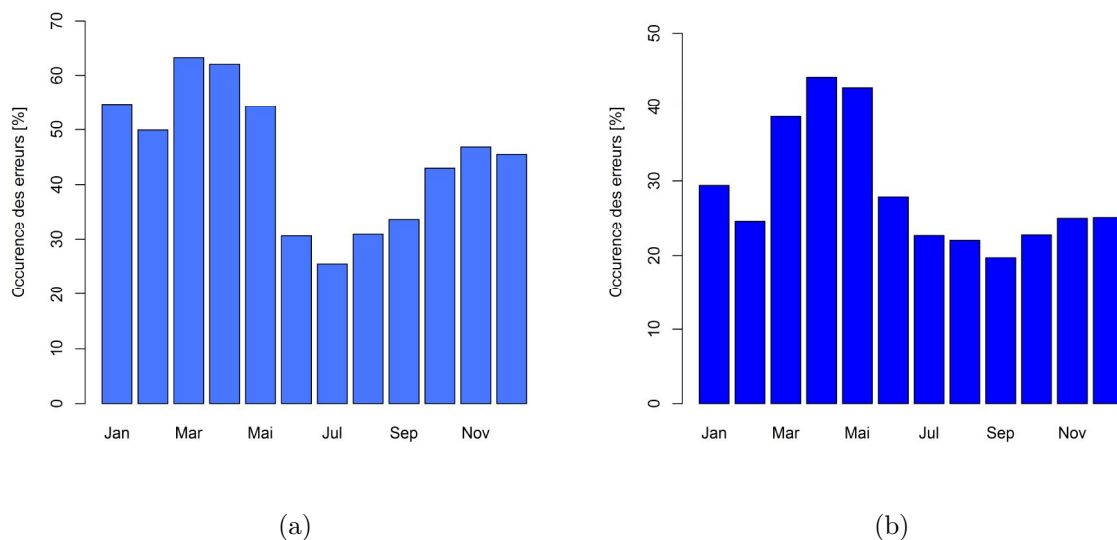


Figure 6.8 – Pourcentage moyen d’erreurs obtenues par mois, à la station Manilla river à l’aval de Split Rock Dam, avec la méthode de bilan sur ouvrage sans (a) et avec (b) prise en compte de l’évaporation et des précipitations sur le barrage de Split Rock Dam.

- **Reconstitution.** La méthode de reconstitution (courbe verte, figure 6.6) se distingue des autres méthodes par son aspect lisse et l’absence de pic de débits face à un évènement pluvieux. Il avait été montré dans la partie 5.3 du chapitre 5, que la méthode de reconstitution n’était pas applicable sur les stations se trouvant à l’aval de barrages-réservoirs, car lors du calage du modèle sur les débits observés avec GR5J-Dam, on obtenait des valeurs de paramètres insolites. La figure 6.9 présente les valeurs de paramètres obtenues avec les différentes méthodes utilisant un modèle hydrologique. On voit notamment que le réservoir de production, X1, vaut environ 9500 mm et que le temps de base de l’hydrogramme unitaire est de 20 jours. L’aspect de la courbe laisse penser que GR5J-Dam rencontre des problèmes d’initialisation. Cependant, en faisant varier la période d’initialisation du modèle de 2 à 10 ans, on obtient des résultats similaires.

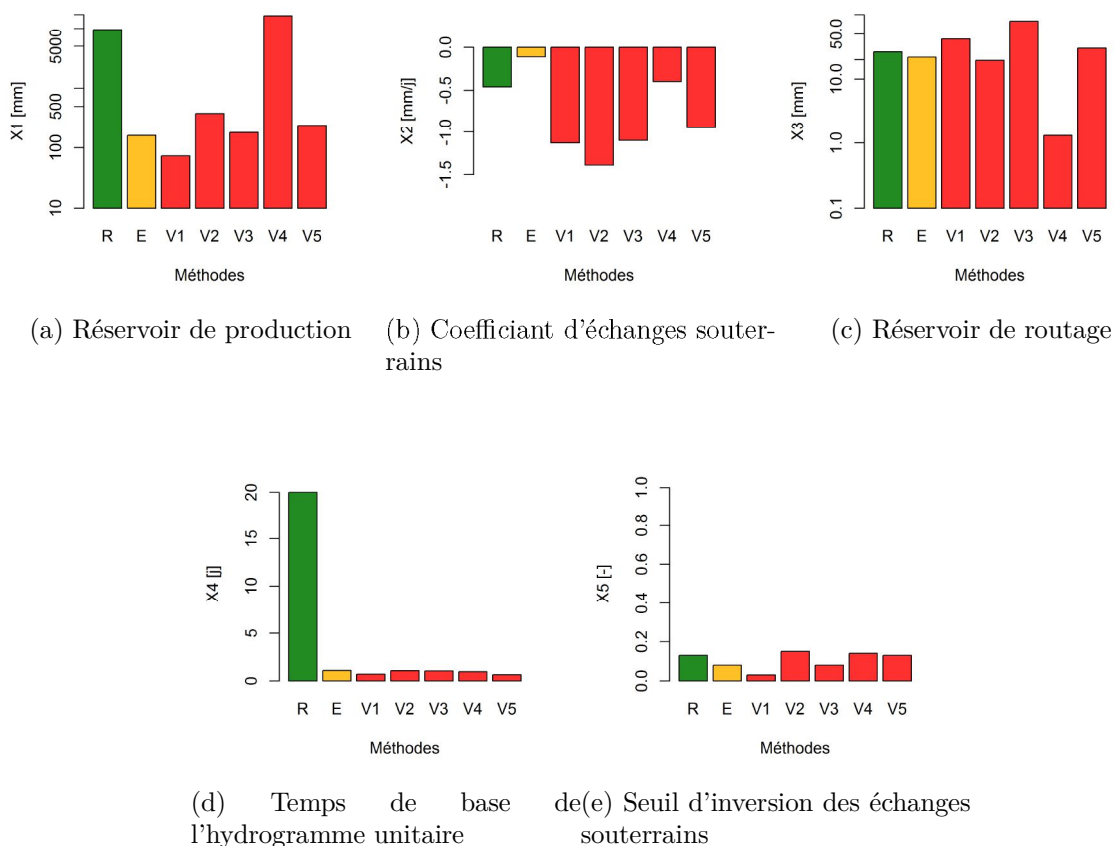


Figure 6.9 – Paramètres obtenus en calage sur le bassin Manilla river à l'aval de Split Rock Dam avec la méthode de reconstitution (R), d'extension (E), et de régionalisation sur les bassins versants voisins donneurs du plus proche (V1) au plus éloigné (V5). Les graphiques (a) et (c) sont en échelle logarithmique.

- Extension.** Le débit naturalisé obtenu avec la méthode d'extension (courbe jaune, figure 6.6) paraît également lisse. La figure 6.10 présente les chroniques de précipitations et d'évapotranspirations annuelles sur le bassin, durant la période pré-influence, en vert, et la période influencée, en rouge. Nous avons appliqué sur ces chroniques annuelles le test de Pettitt (Pettitt, 1979), qui est un test non-paramétrique qui examine l'existence d'un point de rupture dans la série de données, et le test de Mann-Kendall (Kendall, 1975 ; Mann, 1945), qui permet de détecter des tendances dans les séries de données. Les résultats de ces tests sont significatifs dès lors que la p-value est égale ou inférieure à 0,05. La courbe noire correspond aux courbes de tendances obtenues avec le test de Mann-Kendall. Avec des p-value de 0,96 et 0,39, respectivement pour les précipitations annuelles et l'évapotranspiration, il ressort qu'il n'y a pas de tendance significative. En

appliquant le test de Pettitt pour détecter la présence d'une rupture dans les chroniques, on obtient des p-value non significatives de 1,05 et 0,78. D'un point de vue climatique, il n'y a donc pas de différences significatives entre les deux périodes qui remettent en cause l'application de la méthode d'extension. En évaluant la robustesse du modèle GR5J sur les sous-périodes, P_{Nat1} et P_{Nat2} de la période pré-influence (partie 5.2 du chapitre 5), nous avons obtenu un KGE en calage de 0,77 et de 0,43 en validation. Les deux sous-périodes ont six ans de données, des précipitations annuelles moyennes de 767 mm et 707 mm respectivement sur P_{Nat1} et P_{Nat2} , une évapotranspiration de 1437 et 1445 mm, et un débit annuel moyen de 56 mm et 47 mm. Il apparaît que le biais du modèle est de l'ordre de plus ou moins 35% en validation entre le débit observé et simulé, contre 15% en calage.

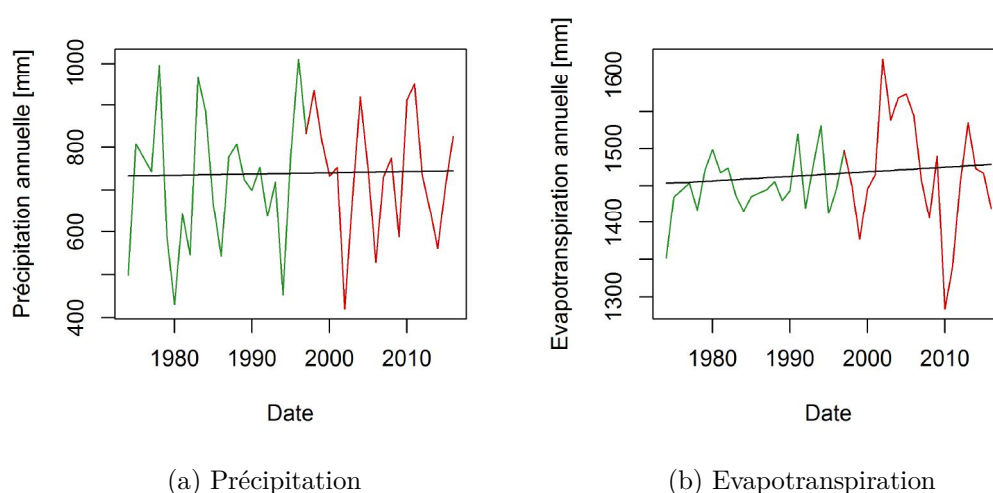


Figure 6.10 – Chroniques des précipitations (a) et de l'évapotranspiration (b) annuelles sur la bassin de la Manilla river à l'aval de Split Rock dam. Les courbes rouges et vertes correspondent respectivement aux données météorologiques durant la période influencée et la période non influencée. La droite noire correspond à la courbe de tendance obtenue avec le test de Mann-Kendall.

- **Régionalisation.** Concernant l'allure du débit journalier naturalisé obtenu avec la méthode de régionalisation (figure 6.7b), on observe un débit de base non nul avec des pics de crue de mi-juin et fin août. La figure 6.11 présente les chroniques de débits obtenus avec un seul jeu de paramètres venant de chacun des bassins versants. Le débit naturalisé final correspond à une moyenne pondérée par la distance de ces cinq chroniques. On aurait

pu croire qu'en moyennant, les pics de crues sont lissés, et qu'il aurait été plus intéressant d'utiliser un seul jeu de paramètres pour conserver une certaine variabilité. Or, comme le montre la figure 6.11, le bassin le plus proche géographiquement ne montre aucune variabilité face aux évènements pluvieux. Sur les cinq bassins naturels voisins, les KGE obtenus en calage avec GR5J valent en moyenne 0,59 illustrant les difficultés du modèle. D'après la partie 5.5 du chapitre 5, en Australie, la transposition spatiale des jeux de paramètres aboutit à un biais variant entre 0,65 et 1,6, ce qui pourrait expliquer les faibles volumes de débits avec la méthode de régionalisation. En regardant les paramètres obtenus sur les bassins voisins (figure 6.9), il apparaît que la valeur du réservoir de production (X1) du bassin V4 est anormalement grande, ce qui montre que le modèle rencontre des problèmes de modélisation sur ce bassin.

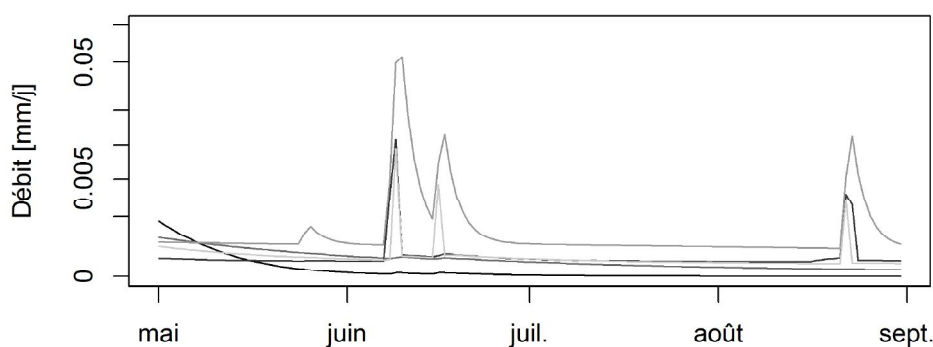


Figure 6.11 – Chroniques de débit naturalisé avec la méthode de régionalisation en n'utilisant le jeu de paramètres que d'un seul voisin naturel à la fois, sur la période mai-août 2002. La courbe noire correspond au débit naturalisé obtenu avec le jeu de paramètre du voisin V1 et la courbe gris clair à celui obtenu avec le voisin V5.

L'exemple du bassin de la Manilla river à l'aval de Split Rock Dam est un exemple complexe car, malgré l'application de méthodes basées sur l'utilisation de données différentes, chacune semble rencontrer des difficultés à modéliser un débit naturalisé réaliste. Le caractère fortement influencé de la station et la variabilité temporelle des conditions climatiques semblent se répercuter sur les performances des méthodes de naturalisation.

6.3.1.3 Post-traitement appliqué aux méthodes de naturalisation

Pour la Manilla river à l'aval de Split Rock Dam, la meilleure référence est la référence régionale (tableau 6.3). Ceci est dû au fait que, la station se trouvant à l'aval du barrage-réservoir, il y a de fortes incertitudes sur la qualité des débits observés. Les débits naturels régionaux ont, de plus, 35 ans de débits observés sur la période 1973-2011.

Tableau 6.3 – Choix de la référence sur le bassin de la Manilla river à l'aval de Split Rock Dam.

| Critères | Débits influencés observés | Débits naturels passés | Débits naturels régionaux |
|---|----------------------------|------------------------|---------------------------|
| Qualité des débits observés | + | - | + |
| Longueur des chroniques de débits disponibles | + | - | - |
| Climat représentatif de la période de naturalisation | + | - | + |
| Conditions physiques du bassins représentatives de la période de naturalisation | + | +/- | +/- |

Le tableau 6.4 présente le KGE sur le débit, la racine carrée du débit et l'inverse du débit, obtenu entre le débit naturalisé par chaque méthode de naturalisation et le débit de référence. En regardant les résultats obtenus par rapport aux débits régionaux de référence, il apparaît que seule la méthode de régionalisation a un KGE sur le débit et sur la racine carrée des débits supérieur à 0. Sur les bas débits, aucune méthode n'obtient un KGE supérieur à zéro. Il ressort donc que dans le cas de ce bassin semi-aride situé à l'aval d'un barrage-réservoir, aucune méthode de naturalisation ne semble adaptée pour simuler des bas débits. Cependant, dans le cas des bassins semi-arides, il n'est en général pas facile d'avoir un KGE positif sur les bas débits. Cela est dû au processus pluie-débit et aux échanges rivières-nappes qui sont plus complexes sur les bassins arides et semi-arides (Wheater, 2008)

Bien que les débits influencés observés et les débits naturels passés ne correspondent pas aux débits de référence choisis dans l'étude, on note que dans ces deux cas, la méthode de régionalisation donne un KGE sur le débit et sur la racine carrée des débits toujours supérieur à zéro. Sur ces références, les méthodes ayant calé le modèle sur ces débits de référence donnent de bons résultats. Cependant, comme nous l'avons vu dans les résultats, pour la méthode de reconstitution, les paramètres obtenus montrent que

le modèle rencontre des problèmes dans l'obtention d'un jeu de paramètres capable de simuler un débit naturel. Dans le cas de la méthode d'extension, les résultats montraient que le modèle était très peu robuste. Ces deux méthodes présentaient des chroniques de débit peu réactives aux précipitations. Concernant la méthode de bilan sur ouvrage, il apparaît que c'est la méthode qui donne souvent les résultats les plus mauvais par rapport aux débits de référence. Cela est dû en partie au fait que contrairement aux autres méthodes, on compare les régimes de débits obtenus entre les débits naturalisés et le débit de référence. Nous avons vu que le régime des débits était peu marqué en Australie, et dépend fortement des événements climatiques de la période. La comparaison de régime entre bassins n'est donc pas dans ce cas la solution la plus adaptée. Cependant, les résultats du tableau 6.4 mettent en avant un biais de la méthode d'évaluation indirecte des méthodes de naturalisation à savoir que les méthodes de naturalisation, sont globalement meilleures si elles ont été calées sur les débits de la période de référence.

Tableau 6.4 – KGE sur le débit (a), la racine carrée des débits (b), et l'inverse des débits (c), obtenus entre les débits naturalisés et les débits de référence.

(a) $KGE(Q)$

| Méthode | Référentiel | | |
|------------------------------|----------------------------|------------------------|---------------------------|
| | Débits influencés observés | Débits naturels passés | Débits naturels régionaux |
| Bilan sur Ouvrage | | -0.26 | -0.44 |
| Bilan sur Ouvrage avec Meteo | | -0.14 | -1.39 |
| Reconstitution | 0.51 | -0.57 | -0.35 |
| Extension | -0.45 | 0.79 | -0.97 |
| Régionalisation | 0.49 | 0.12 | 0.29 |

(b) $KGE(Q^{0.5})$

| Méthode | Référentiel | | |
|------------------------------|----------------------------|------------------------|---------------------------|
| | Débits influencés observés | Débits naturels passés | Débits naturels régionaux |
| Bilan sur Ouvrage | | 0 | -1.63 |
| Bilan sur Ouvrage avec Meteo | | -0.09 | -1.55 |
| Reconstitution | 0.79 | -0.12 | -0.36 |
| Extension | -0.15 | 0.82 | -0.3 |
| Régionalisation | 0.6 | 0.35 | 0.43 |

(c) $KGE(\frac{1}{Q})$

| Méthode | Référentiel | | |
|------------------------------|----------------------------|------------------------|---------------------------|
| | Débits influencés observés | Débits naturels passés | Débits naturels régionaux |
| Bilan sur Ouvrage | | -33.72 | -96.7 |
| Bilan sur Ouvrage avec Meteo | | -48.41 | -139.32 |
| Reconstitution | 0.39 | 0.32 | -0.55 |
| Extension | -2.04 | 0.49 | -0.59 |
| Régionalisation | -6.47 | -7.59 | -1.07 |

Dans le cas de la Manilla river à l'aval de Split Rock Dam, seule la méthode de régionalisation a été retenue. Nous ne pourrions donc pas appliquer la méthode de moyenne pondérée. La figure 6.12 présente la chronique de débit naturalisé par la méthode de régionalisation (courbe rouge) et celle correspondant à la moyenne des débits naturalisés sans pondération sur la période de mai à fin août 2002. Ces moyennes non pondérées correspondent au cas où l'on considère que l'information venant de chacune des méthodes de naturalisation est équivalente. Sur la courbe des débits moyennés, on retrouve fortement le comportement du débit naturalisé avec les méthodes de bilan sur ouvrage. Or, nous avons montré précédemment que, certains de ces pics semblent être dus à des incertitudes de la méthode de bilan sur ouvrage. Par rapport à la courbe obtenue avec la méthode de régionalisation, le bassin semble plus réactif aux pics de crue dus aux événements pluvieux début et fin mai, et de mi-juillet. En comparant le régime de la méthode de régionalisation et le régime obtenu en post-traitement (figure 6.13), on note une différence nette en termes de quantité d'eau. De plus, leur régime semble peu affecté par la saisonnalité dans les deux cas.

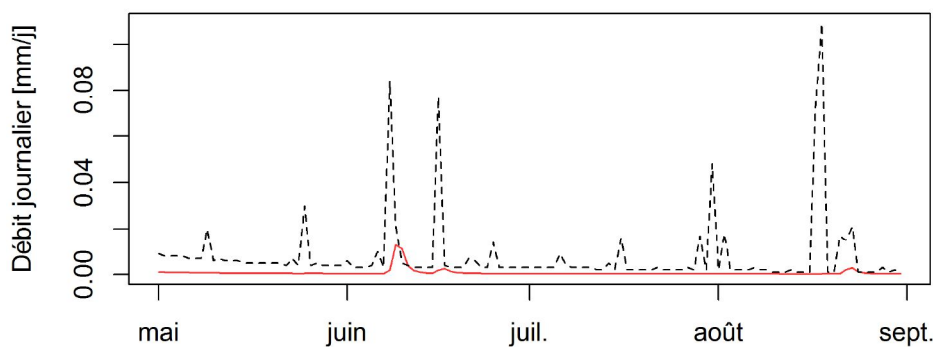


Figure 6.12 – Chronique de débit, sur la période de début mai à fin août 2002, de la méthode de bilan sur ouvrage (courbe noire pointillée) et du débit correspondant à la moyenne des débits naturalisés (courbe rouge).

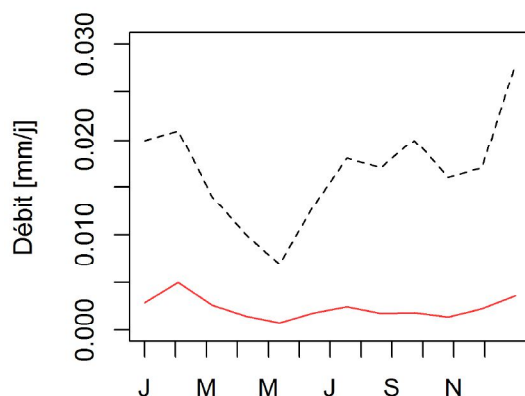


Figure 6.13 – Régime de débit obtenu avec la méthode de bilan sur ouvrage (courbe noire pointillée) et du débit correspondant à la moyenne des débits naturalisés (courbe rouge) sur la période de naturalisation 1990-2016.

Au final, le bassin de la Manilla river à l’aval de Split Rock Dam est un cas complexe, car le débit observé influencé résulte principalement de la gestion du barrage-réservoir amont et ne contient donc presque plus de signal naturel, ce qui complique l’utilisation des méthodes de naturalisation utilisant les observations de débits influencés. Dans le cas des débits passés, on dispose de chroniques de débits relativement courtes. De plus, la transposition temporelle et spatiale des jeux de paramètres semble induire un biais variant entre 30% et 60%. D’après notre référence, seule la méthode de régionalisation semble applicable. Cependant, ses performances restent relativement faibles et les résultats obtenus ne doivent pas être considérés comme des estimations exactes du débit naturel sur la période influencée. Concernant les bas débits, aucune méthode n’arrive à en fournir une estimation fiable.

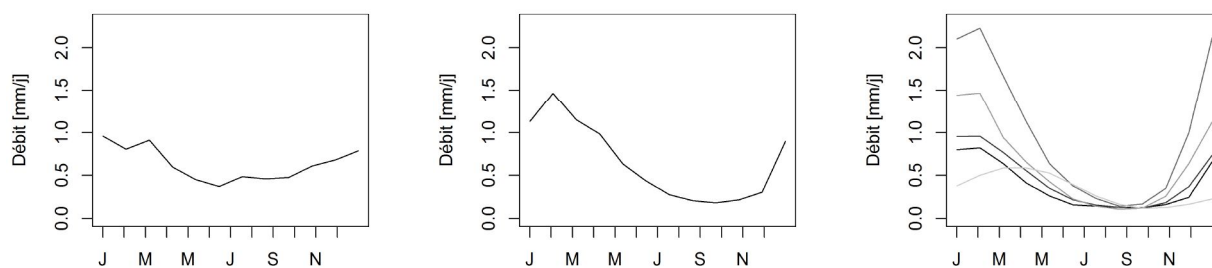
6.3.2 L’Aube à Arcis-sur-Aube (H1501010, Groupe 3, FR)

Le bassin de l’Aube à Arcis-sur-Aube est un sous-bassin, d’une superficie de 3595 km², du bassin versant de la Seine. Il a un régime hydrologique de type pluvial océanique, qui se caractérise par de hauts débits et une faible évapotranspiration en hiver, et par de faibles débits accompagnés d’une forte évapotranspiration en été. Avec moins de 2% de précipitations solides, l’influence de la neige sur le régime est relativement faible. Sur le bassin de

la Seine, le régime des cours d'eau est altéré par les nombreuses activités anthropiques : les prélèvements dans les rivières et la nappe phréatique (Viennot et Ledoux, 2006), la présence des barrages-réservoirs et l'aménagement de voies navigables. Dans cette étude, seule l'influence du barrage-réservoir de l'Aube sera pris en compte, car la constitution d'une base de données sur les prélèvements constituait une tâche trop importante dans le cadre de cette thèse. En période d'étiage, d'après Maurel *et al.* (2008) qui ont effectué un bilan des ressources sur le bassin de la Seine, on ne constate pas un déficit en eau dû à des consommations anthropiques sur le bassin de l'Aube. Le bassin de la Seine a déjà fait l'objet d'études de naturalisation pour enlever l'impact des barrages-réservoirs amont (Hydratec, 2011) grâce à un modèle hydraulique.

6.3.2.1 Comparaison globale des différentes références

La figure 6.14 présente le régime des différents débits de référence : le régime du débit influencé sur la période de naturalisation allant de début 1990 à fin 2009 (figure 6.14a), le débit observé sur la période pré-influence allant de début 1959 à fin 1989 (figure 6.14b), et les débits observés sur les bassins voisins non-influencés (figure 6.14c). Sur la période pré-influence, la période de basses eaux va de début juin à fin octobre, et la période de hautes eaux de début décembre à fin mai. En comparant le régime influencé au régime naturel passé, on constate que la mise en place du barrage-réservoir a diminué la variabilité intra-annuelle du débit.



(a) Débit influencé (1990-2009) (b) Débit naturel passée (1959-1989) (c) Débit naturel bassin voisin (1970/1987-2015)

Figure 6.14 – Régimes du débit influencé observé sur la période de naturalisation (a) et du débit naturel observé sur la période pré-influence (b) pour l'Aube à Arcis-sur-Aube. Le graphique (c) correspond aux débits naturels observés sur les cinq bassins naturels voisins les plus proches géographiquement. Plus la courbe est foncée, plus le voisin est géographiquement proche.

La figure 6.15 présente des chroniques de débits observés sur la période pré-influence en 1965 et 1976. L'année 1976 est connue pour l'épisode de sécheresse qui a touché toute l'Europe (Brochet, 1978). Les précipitations annuelles, respectivement pour 1965 et 1976, sont de 980 mm et 564 mm, l'évapotranspiration de 620 mm et 696 mm, et le débit observé de 362 mm et 141 mm.

La figure 6.16 présente les chroniques de débits observés durant la période influencée en 2001 et 2003. Ces deux années ont été choisies pour leurs différences climatiques, 2001 étant une année très humide en terme de précipitations et 2003 une année très sèche par rapport à ce qui est habituellement observé sur le bassin de l'Aube à Arcis-sur-Aube. Elles ont, respectivement pour 2001 et 2003, une précipitation annuelle de 1122 mm et 630 mm, une évapotranspiration de 681 mm et 740 mm, et un débit observé de 475 mm et 195 mm. Durant ces deux années, le volume du barrage-réservoir de l'Aube a été très peu modifié : augmentant de 1,2 mm en 2001 et diminuant de 3 mm en 2003. Le principal rôle du barrage-réservoir de l'Aube est de soutenir le débit à l'aval pendant l'étiage ainsi que de diminuer le risque d'inondation. Il n'a pas vocation à stocker de l'eau d'une année à l'autre, mais répartit le débit tout au long de l'année. Chaque année, le remplissage du lac démarre en principe le 1^{er} novembre et s'achève fin juin. Puis une vidange du lac est

effectuée de début juillet à fin octobre. Ces périodes, définies par arrêté inter-préfectoral, peuvent varier selon les aléas climatiques. La gestion suit une courbe guide, avec donc un cycle proche d'une année sur l'autre.

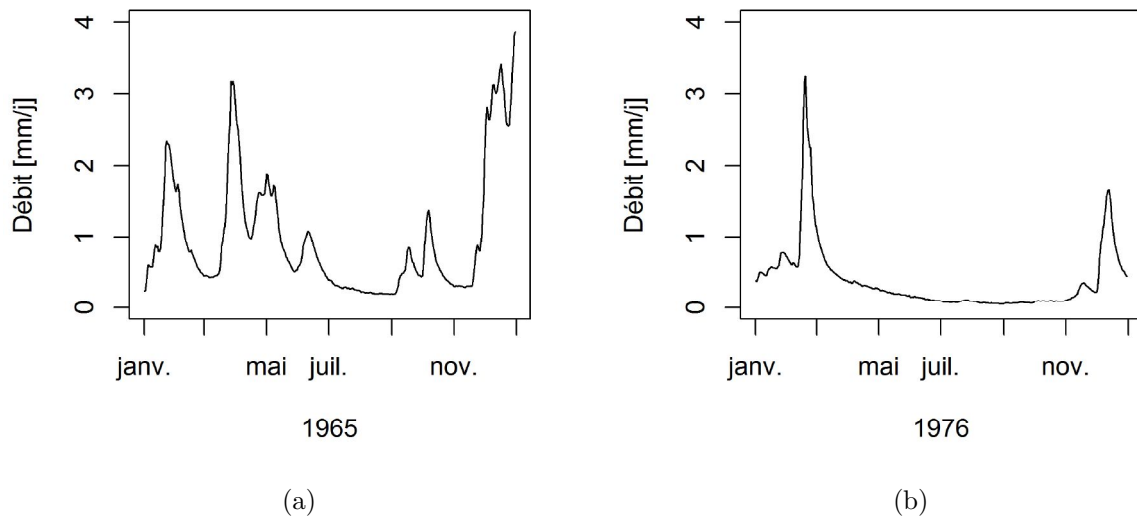


Figure 6.15 – Chroniques du débit journalier de l'Aube à Arcis-sur-Aube, en 1965 (a) et 1976 (b), soit avant la mise en service du barrage-réservoir de l'Aube début 1990.

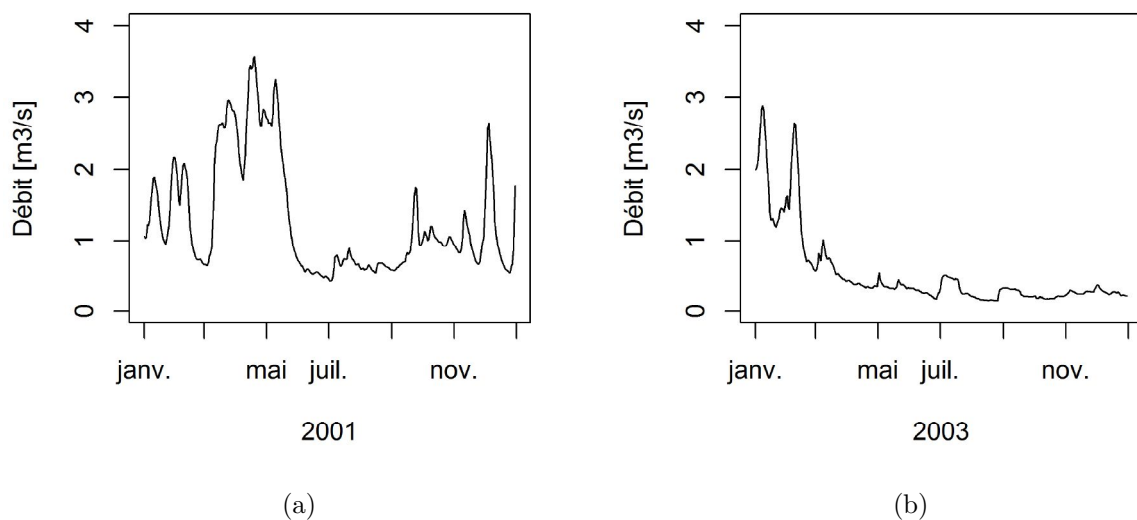


Figure 6.16 – Chroniques du débit journalier de l'Aube à Arcis-sur-Aube, en 2001 (a) et 2003 (b), soit après la mise en service du barrage-réservoir de l'Aube début 1990.

6.3.2.2 Applicabilité des méthodes de naturalisation

La figure 6.17 présente les régimes de débits naturalisés obtenus avec les différentes méthodes de naturalisation. Concernant la méthode de bilan sur ouvrage, les résultats sont similaires que l'on prenne en compte ou non l'évaporation et les précipitations du barrage-réservoir de l'Aube, du fait de leur faible ordre de grandeur par rapport aux variations de volume (chapitre 4, partie 4.3.1). En termes de saisonnalité du régime, les courbes obtenues avec les différentes méthodes s'accordent sur le fait que l'étiage dure de début mai à fin octobre et que la période de hautes eaux dure de début novembre à fin avril. D'un point de vue quantitatif, la méthode de bilan sur ouvrage, avec et sans prise en compte de l'évaporation et des précipitations du barrage-réservoir amont, donne un module de $32,7 \text{ m}^3/\text{s}$. Ce dernier est similaire à ceux obtenus avec la méthode de reconstitution et d'extension, qui sont respectivement $30,2 \text{ m}^3/\text{s}$ et $35,2 \text{ m}^3/\text{s}$. Il semble donc qu'entre ces trois méthodes, la plus grande différence provienne de la répartition temporelle du débit. La méthode de régionalisation donne, quant à elle, une valeur de module de $26,9 \text{ m}^3/\text{s}$, bien moins importante par rapport aux autres méthodes. Les valeurs de Q90, débit non-dépassé 90% du temps, diffèrent bien plus entre les méthodes. La méthode de reconstitution donne la valeur de Q90 la plus basse avec $65,4 \text{ m}^3/\text{s}$, suivie de la méthode de régionalisation avec $66,3 \text{ m}^3/\text{s}$, des méthodes de bilan sur ouvrage avec $78,6 \text{ m}^3/\text{s}$ et de la méthode d'extension avec $83,6 \text{ m}^3/\text{s}$. Concernant le Q10, débit non-dépassé 10% du temps, la méthode de bilan sur ouvrage donne, sans prise en compte de l'évaporation et des précipitations du barrage-réservoir, une valeur de $6,2 \text{ m}^3/\text{s}$. En prenant en compte ces derniers, on obtient une valeur de $6,7 \text{ m}^3/\text{s}$, soit une différence de 8%. C'est avec la méthode de régionalisation qu'on obtient le plus faible Q10 d'une valeur de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$, suivie de la méthode d'extension avec $6 \text{ m}^3/\text{s}$, suivie de la méthode de bilan sur ouvrage et de la méthode de reconstitution avec $12 \text{ m}^3/\text{s}$.

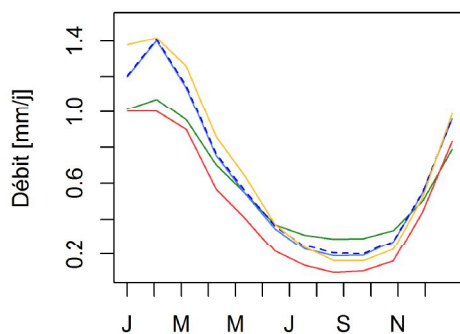


Figure 6.17 – Régime des débits naturalisés avec les différentes méthodes de naturalisation à l'Aube sur Arcis-sur-Aube. BO : courbe bleu clair ; BOM : courbe bleu foncé pointillé ; R : courbe verte ; E : courbe jaune ; V : courbe rouge.

- **Bilan sur ouvrage.** La figure 6.18 montre l'occurrence des erreurs que l'on obtient en moyenne chaque mois avec la méthode de bilan sur ouvrage. Il apparaît que le pic d'erreur se situe en août. Ceci s'explique par le fait qu'en août, les débits observés sont relativement faibles et que l'influence du barrage-réservoir amont est alors importante pour soutenir le débit. Les incertitudes associées à la mesure du débit et aux mesures de variation du barrage-réservoir aboutissent alors à des erreurs. Cependant, dans le cas de l'Aube à Arcis-sur-Aube, l'occurrence de ces erreurs est inférieure à 1%, ce qui nous permet d'avoir confiance dans l'application de la méthode de bilan sur ouvrage. En prenant en compte l'évaporation du barrage-réservoir amont, bien que relativement faible par rapport aux volumes d'eau mis en jeu, cela permet de réduire légèrement l'occurrence des erreurs en étiage.

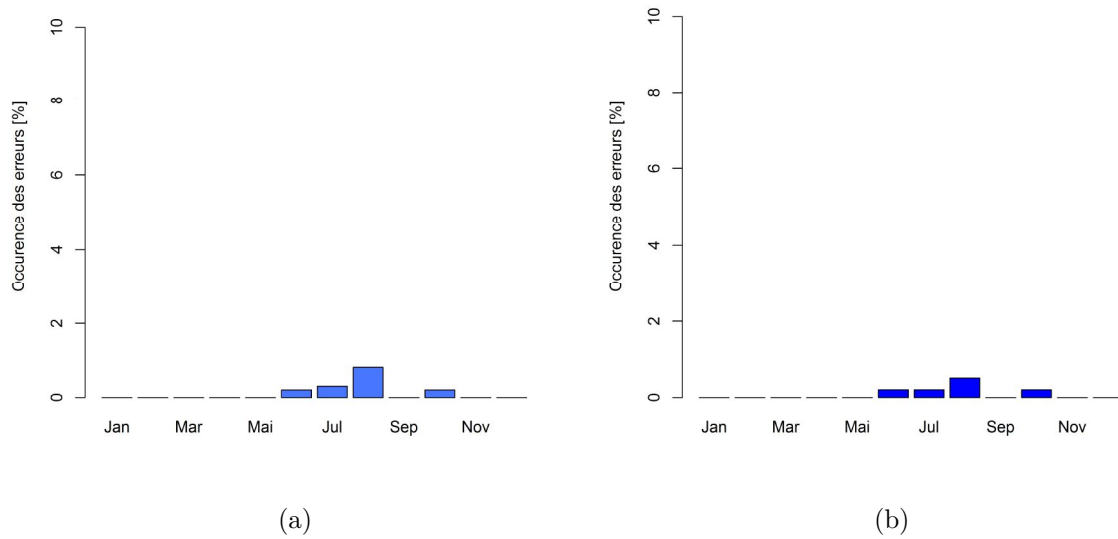


Figure 6.18 – Pourcentage moyen du nombre d’erreur obtenue par mois, à l’Aube à Arcis-sur-Aube, avec la méthode de bilan sur ouvrage sans (a) et avec (b) prise en compte de l’évaporation et des précipitations du barrage de l’Aube.

- **Reconstitution.** La figure 6.19 présente les différentes valeurs de paramètres obtenues selon les différentes méthodes de naturalisation. Dans ce cas, nous n’avons pas affaire à un régime a priori très influencé, la méthode de reconstitution ne présente donc pas de paramètres anormalement haut ou bas. Concernant les performances obtenues en calage, le KGE sur le débit vaut 0,84, 0,86 sur la racine carrée des débits et 0,69 sur l’inverse des débits. En évaluant la robustesse du modèle sur les sous-périodes P_{Inf1} et P_{Inf2} , il apparaît que le modèle est robuste. Le KGE sur le débit donne 0,94 en calage et 0,92 en validation, le KGE sur la racine carrée du débit 0,94 en calage et 0,93 en validation, et le KGE sur l’inverse du débit 0,81 en calage et 0,83 en validation. Ces bons résultats confortent la confiance que l’on peut avoir dans les résultats de la méthode de reconstitution sur l’ensemble des gammes de débits.

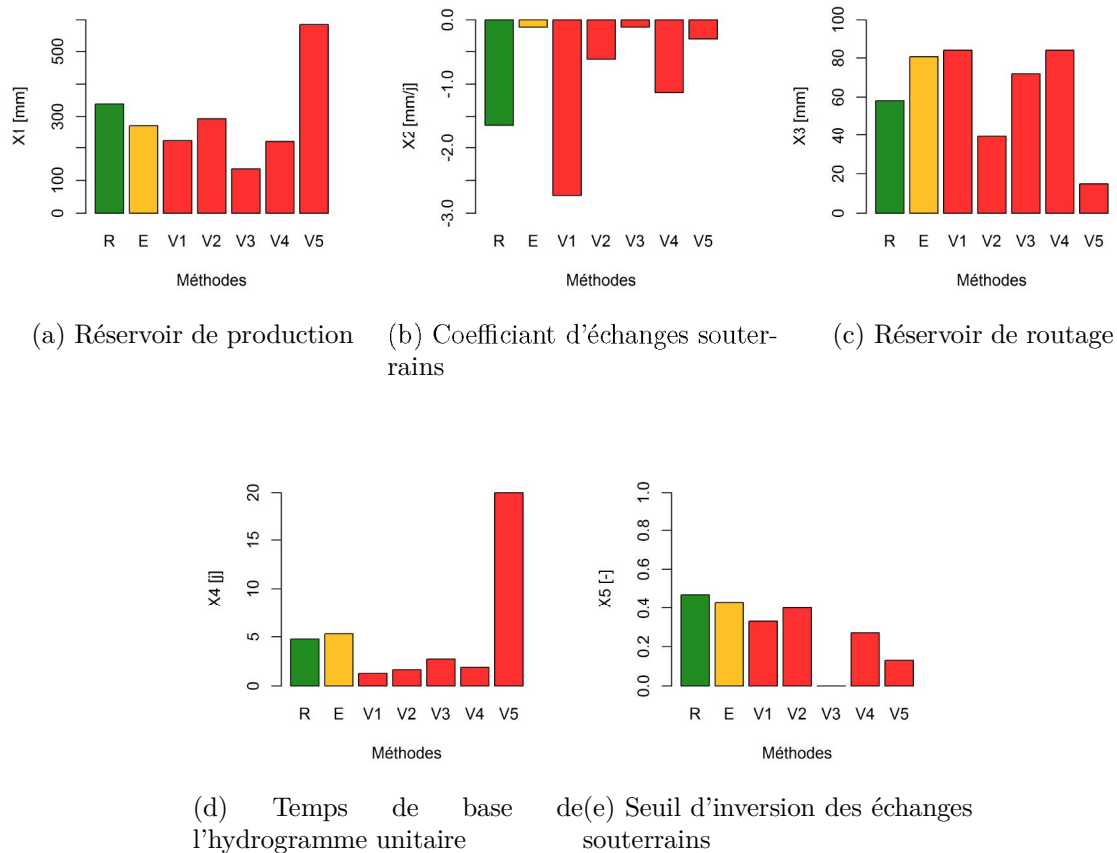


Figure 6.19 – Paramètres obtenus en calage sur le bassin de l'Aube à Arcis-sur-Aube avec la méthode de reconstitution (R), d'extension (E), et de régionalisation sur les bassins versants voisins donneurs du plus proche (V1) au plus éloigné (V5).

- **Extension.** La méthode d'extension donne de bons résultats en calage avec un KGE sur le débit de 0,96, sur la racine carrée des débits de 0,97 et sur l'inverse des débits de 0,76. La figure 6.20 présente les chroniques d'évapotranspirations et de précipitations annuelles de l'Aube à Arcis-sur-Aube. Le test de Pettitt (Pettitt, 1979) a été appliqué sur les chroniques pour détecter une rupture. Concernant l'évapotranspiration annuelle, le test de Pettitt détecte une rupture en 1987, avec une p-value significative de $7e^{-5}$.

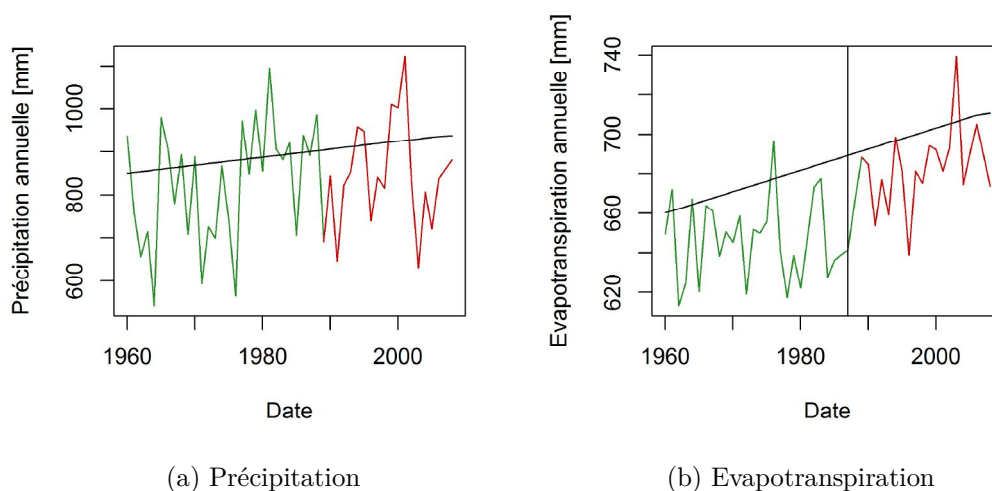


Figure 6.20 – Chroniques des précipitations (a) et de l'évapotranspiration (b) annuelle sur le bassin de l'Aube à Arcis-sur-Aube. Les courbes rouges et vertes correspondent respectivement aux données météorologiques durant la période influencée et la période non influencée. La droite noire correspond à la courbe de tendance obtenue avec le test de Mann-Kendall.

- Régionalisation.** Les KGE sur la racine carrée du débit obtenus en calage sur les bassins voisins valent, du plus proche au plus loin, 0,90, 0,94, 0,96, 0,90 et 0,83, ce qui est globalement très bon. On obtient des performances similaires pour le KGE sur le débit. Pour le KGE sur l'inverse des débits, les performances des bassins V1 à V4 varient entre 0,70 et 0,91. Seul le bassin V5 (H1513210, La Barbuise à Pouan-les-Vallées) donne un KGE de 0,3 sur l'inverse des débits. Ce bassin se distingue des autres pour ses valeurs de paramètres obtenus en calage. La capacité du réservoir de production est de 585 mm, celle du réservoir de routage de 15 mm, et le temps de base de l'hydrogramme unitaire est de 20 jours pour un bassin de 200 km² de superficie. Bien que les performances sur ce bassin soient discutables, c'est le bassin le plus éloigné et dont le poids influe le moins sur l'obtention du débit naturalisé par la méthode de régionalisation.

6.3.2.3 Post-traitement appliqué aux méthodes de naturalisation

Dans le cas du bassin de l'Aube à Arcis-sur-Aube, le débit influencé observé semble être la meilleure référence car il est représentatif de la période de naturalisation, et que l'on dispose de plus de 24 ans de débits observés (tableau 6.5).

Tableau 6.5 – Choix de la référence sur le bassin de l'Aube à Arcis-sur-Aube.

| Critères | Débits influencés observés | Débits naturels passés | Débits naturels régionaux |
|--|----------------------------|------------------------|---------------------------|
| Qualité des débits observés | + | - | + |
| Longueur des chroniques de débits disponibles | + | - | - |
| Climat représentatif de la période de naturalisation | + | - | + |
| Conditions physiques du bassin représentatives de la période de naturalisation | + | +/- | - |

Tableau 6.6 – KGE sur le débit (a), la racine carrée des débits (b), et l'inverse des débits (c), obtenus entre les débits naturalisés et les débits de référence.

(a) $KGE(Q)$

| Méthode | Référentiel | | |
|------------------------------|----------------------------|------------------------|---------------------------|
| | Débits influencés observés | Débits naturels passés | Débits naturels régionaux |
| Bilan sur Ouvrage | | 0.91 | 0.28 |
| Bilan sur Ouvrage avec Meteo | | 0.91 | 0.28 |
| Reconstitution | 0.84 | 0.71 | 0.38 |
| Extension | 0.6 | 0.96 | 0.35 |
| Régionalisation | 0.37 | 0.58 | 0.28 |

(b) $KGE(Q^{0.5})$

| Méthode | Référentiel | | |
|------------------------------|----------------------------|------------------------|---------------------------|
| | Débits influencés observés | Débits naturels passés | Débits naturels régionaux |
| Bilan sur Ouvrage | | 0.93 | 0.57 |
| Bilan sur Ouvrage avec Meteo | | 0.92 | 0.57 |
| Reconstitution | 0.86 | 0.73 | 0.56 |
| Extension | 0.62 | 0.97 | 0.57 |
| Régionalisation | 0.69 | 0.67 | 0.5 |

(c) $KGE(\frac{1}{Q})$

| Méthode | Référentiel | | |
|------------------------------|----------------------------|------------------------|---------------------------|
| | Débits influencés observés | Débits naturels passés | Débits naturels régionaux |
| Bilan sur Ouvrage | | 0.92 | -1.47 |
| Bilan sur Ouvrage avec Meteo | | 0.88 | -1.35 |
| Reconstitution | 0.69 | 0.26 | -1.52 |
| Extension | -0.52 | 0.94 | -1.58 |
| Régionalisation | 0.25 | -0.02 | -0.43 |

Le tableau 6.6 présente le KGE sur le débit, la racine carrée du débit et l'inverse du débit, obtenu entre le débit naturalisé par chaque méthode de naturalisation et le débit de référence. En pondérant grâce à l'indicateur $KGE(Q^{0.5})$ et en prenant le débit influencé pour référence, on obtient un module de 30,8 m³/s, de 31,9 m³/s pour le débit observé passé, de 31,6 m³/s pour les débits régionaux et de 31,4 m³/s sans pondération. On a donc une différence de moins de 4% sur le module selon le choix du post-traitement considéré. En pondérant grâce à l'indicateur $KGE(Q)$ sur les hauts débits, on obtient, respectivement pour le QJXA5 et Q90, 169 m³/s et 72 m³/s en prenant pour référence le débit influencé observé, soit moins de 1%, pour le QJXA5, et 5%, pour le Q90, de différence en utilisant une autre pondération. En pondérant grâce à l'indicateur $KGE(\frac{1}{Q})$, c'est sur les bas débits que le choix de la pondération génère le plus de différence. Avec le débit influencé, on obtient un Q10 de 9,7 m³/s et un QMNA5 de 9,1 m³/s, soit une différence respective de 25 et 30% par rapport aux autres pondérations. Cela s'explique principalement par le fait qu'en prenant le débit influencé observé comme référence, le poids des débits obtenus avec les méthodes de bilan sur ouvrage est nul. Or, c'est avec cette méthode qu'on a la plus faible estimation sur les bas débits. C'est pourquoi les indicateurs sur les bas débits obtenus avec les autres pondérations sont plus faibles.

Au final, pour l'Aube à Arcis-sur-Aube, les différents post-traitements donnent des résultats assez similaires sur les moyens et haut débits. C'est sur les bas débits que le choix du post-traitement peut nettement influencer les valeurs des indicateurs hydrologiques obtenus.

6.4 Synthèse

Choix du débit de référence. Bien que non utilisée dans cette étude, l'utilisation d'un réseau hydrologique de référence comme référence de débits naturels observés régionaux paraît intéressante. En effet, les stations de références sont entre autres sélectionnées pour la qualité de leurs données, la longueur des chroniques de débits et leur caractère peu influencé (Whitfield *et al.*, 2012). Cependant, dans leur analyse de 22 réseaux de références situés dans différents pays, Whitfield *et al.* (2012) constatent des différences qualitatives entre les réseaux de stations. Premièrement, les réseaux de stations de références sont constituées d'un nombre limité de stations et très variables entre les réseaux. Ainsi, pour

le Royaume-Uni et le Canada, les réseaux de référence sont constitués respectivement de 20 et 229 stations alors que, pour les États-Unis, ce dernier est constitué de 1703 stations (Whitfield *et al.*, 2012). Deuxièmement, les critères pour déterminer si un bassin est peu influencé par les activités humaines varient d'un réseau à l'autre. Au Royaume-Uni, les bassins versants où l'impact net des prélèvements et des rejets est inférieur ou supérieur de 10 % par rapport au débit naturel et au Q05 (correspondant au débit non-dépassé 5% du temps) sont jugés appropriés pour faire partie du réseau de références. Au Canada, il y a de nombreux bassins considérés comme étant vierges de toute influence humaine (Whitfield *et al.*, 2012).

Un biais de la méthode d'évaluation indirecte des méthodes de naturalisation, proposée dans ce chapitre, est que les méthodes de naturalisation sont globalement meilleures si elles ont été calés sur les débits de la période de référence. Ainsi, si on choisit les débits influencés comme référence, la méthode de reconstitution peut être avantagée par rapport aux autres méthodes. Pour améliorer l'équité des méthodes, il serait peut-être intéressant de considérer les trois références et de considérer les performances moyennes de chacune des méthodes sur ces trois références.

Cas d'étude. Dans cette partie, il a été choisi de présenter deux cas d'études complets. Le bassin de la Manilla river à l'aval de Split Rock Dam est un bassin semi-aride avec une station se trouvant à l'aval d'un barrage-réservoir. D'après notre référence, seule la méthode de régionalisation semble applicable. Cependant, ses performances restent relativement faibles et les résultats obtenus ne doivent pas être considérés comme des estimations exactes du débit naturel sur la période influencée. Concernant les bas débits, aucune méthode n'arrive à fournir une estimation fiable de ces derniers. Nous pensons que, dans ce genre de cas d'étude, il serait intéressant d'appliquer une méthode basée sur l'utilisation d'un modèle hydraulique, là où les modèles hydrologiques semblent rencontrer des difficultés. Cela nécessiterait de disposer d'une chronique de débit observé non-influencé en amont du barrage-réservoir et de la propager jusqu'à la station de Split Rock Dam. Il faudrait cependant que la distance soit relativement faible de manière à ne pas devoir utiliser un modèle hydrologique pour simuler les apports intermédiaires. Dans le cas de l'Aube à Arcis-sur-Aube, nous sommes dans un cas où l'ensemble des méthodes de naturalisation valident les hypothèses d'application et donnent des résultats assez si-

milaires. Dans ce cas là, les débits naturalisés obtenus ont été moyennés selon plusieurs pondérations. Il ressort que les résultats obtenus sont assez similaires à l'exception des résultats sur les bas débits.

7

Finesse des intervalles de confiance associés aux méthodes de naturalisation

7.1 Introduction

L'analyse des études de volumes prélevables en France (chapitre 2) a montré que globalement les études font ressortir plusieurs sources d'incertitudes liées au processus de naturalisation : les incertitudes sur les données de débits, celles sur les entrées météorologiques et les chroniques de volumes d'eau prélevés/relâchés par les influences, ainsi que les incertitudes liées au calage du modèle. La partie 2.5.4 présente l'ensemble des sources d'incertitudes des différentes méthodes de naturalisation. Il apparaît cependant que les incertitudes ne sont jamais quantifiées. Cela provient principalement du fait que, le débit naturel n'étant pas observable sur la période influencée, il n'est pas possible d'estimer directement l'incertitude liée aux méthodes de naturalisation.

Le but de ce chapitre est d'évaluer indirectement l'incertitude globale liée au processus de naturalisation en appliquant ou en adaptant des méthodes d'estimation des incertitudes existantes. Cela nous permettra d'estimer un intervalle de confiance pour chaque indicateur hydrologique naturalisé. La comparaison des intervalles de confiances de chacune des méthodes nous permettra d'évaluer quelles méthodes ont l'intervalle de confiance le plus fin.

7.2 Méthodes et outils

7.2.1 Quantification de l'incertitude des méthodes hydrologiques

7.2.1.1 Méthode QUOIQUE

La méthode QUOIQUE (QUantification Opérationnelle de l'Incertainitude prédictive par Quantiles de dEbits), développée par Bourgin (2014) et utilisée en opérationnel pour la prévision des crues notamment avec l'outil OTAMIN, permet de quantifier l'incertitude liée aux modèles. Elle repose sur l'idée que l'incertitude de modélisation peut être estimée à partir de l'analyse statistique des écarts entre débits simulés et observés sur la période de calage du modèle hydrologique. Comme illustré sur la figure 7.1, la méthode consiste dans un premier temps à calculer l'erreur relative entre le débit simulé (Q_{sim}) et le débit observé (Q_{obs}) sur la chronique de calage. Les débits simulés et leurs erreurs associées sont ensuite classés par ordre croissant, puis rangés dans n groupes contenant le même

nombre de débits simulés. Le nombre maximum de groupes est fixé à 20 et chaque groupe est composé à minima de 200 débits simulés. Enfin, pour chaque groupe, les quantiles des erreurs relatives sont calculés. Ainsi, pour attribuer un intervalle de confiance à un débit simulé, on regarde à quel groupe appartient le débit. Pour obtenir la borne supérieure de l'intervalle de confiance, le débit est multiplié par le 90^{ème} quantile de l'erreur relative du groupe. La borne inférieure correspondra au 10^{ème} quantile.

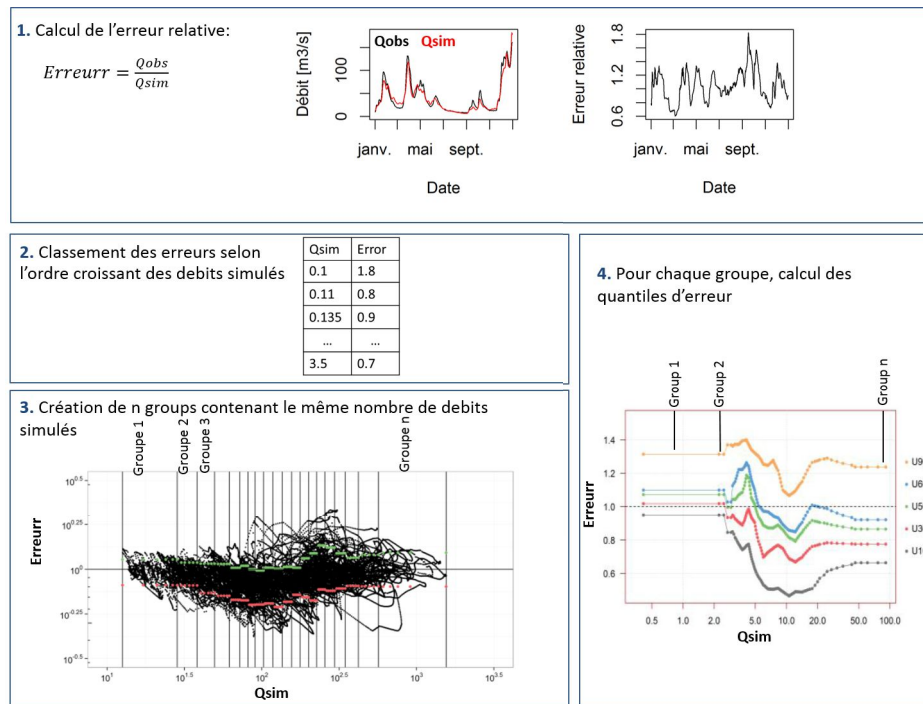


Figure 7.1 – Étapes principales de la méthode QUOIQUE d'estimation des incertitudes de modélisation développée par Bourgin (2014).

Application à la méthode de reconstitution La méthode de reconstitution repose sur l'hypothèse de transposition de jeu de paramètre d'un modèle hydrologique prenant en compte les influences, ici GR5J-Dam, vers un modèle hydrologique naturel, ici GR5J. La principale source d'incertitude soulevée par la méthode de reconstitution est la capacité du modèle à modéliser un débit naturel à partir d'un jeu de paramètres calés sur les débits observés par un modèle prenant en compte les influences anthropiques. Pour estimer les incertitudes liées à la méthode de reconstitution, nous faisons l'hypothèse que l'incertitude des débits influencés simulés par le modèle GR5J-Dam est transposable au débit naturalisé simulé par GR5J avec la méthode de reconstitution. Pour évaluer cette incertitude avec la méthode QUOIQUE, dans un premier temps, le modèle GR5J-Dam est calé sur les débits

observés influencés de la période P_{Inf} . Dans un deuxième temps, l'ensemble des erreurs, obtenues entre les débits influencés simulés et observés, sont utilisées pour construire les intervalles de confiance. Au final, l'intervalle de confiance des débits naturalisés avec la méthode de reconstitution correspond à celui obtenu sur la chronique de débit influencé simulé.

Application à la méthode d'extension La méthode d'extension repose sur la transposition temporelle du jeu de paramètres du modèle hydrologique. La principale source d'incertitude soulevée par la méthode d'extension est la capacité du modèle à modéliser le débit sur des périodes temporelles différentes de la période de calage. Pour évaluer cette incertitude, le modèle est, dans un premier temps, calé sur la sous-période non-influencée P_{Nat1} , puis utilisé sur la période P_{Nat2} pour simuler une estimation du débit naturel. L'erreur relative entre les débits naturels observés de la période P_{Nat2} et les débits simulés grâce au jeu de paramètres obtenu sur P_{Nat1} est évaluée. Puis, inversement, le modèle est calé sur P_{Nat2} pour simuler un débit sur P_{Nat1} et connaître l'erreur qu'apporte la transposition temporelle du jeu de paramètres. Dans un deuxième temps, l'ensemble des erreurs obtenues sur les sous-périodes sont considérées ensemble pour construire les intervalles de confiance.

Application à la méthode de régionalisation La méthode de régionalisation repose sur la transposition spatiale de jeu de paramètres. Pour la méthode de régionalisation, Bourgin *et al.* (2015) ont mis en place une variante de la méthode QUOIQUE pour les bassins non jaugés. Dans un premier temps, la méthode de régionalisation par proximité spatiale est appliquée sur chacun des cinq bassins versants naturels donneurs du bassin influencé. On fait l'hypothèse que les erreurs obtenues sur les bassins voisins, correspondant à la différence relative entre le débit naturel simulé en régionalisation et le débit naturel observé, et les intervalles de confiance construits à partir de ces derniers, sont représentatifs de l'incertitude du modèle en régionalisation.

7.2.2 Quantification de l'incertitude de la méthode de bilan sur ouvrage

La méthode de bilan sur ouvrage se base sur la propagation du débit contrairement aux autres méthodes appliquées qui utilisent des modèles hydrologiques. Pour rappel, la méthode de bilan sur ouvrage consiste à additionner la variation de volume dans la rivière induite par la source d'influence, ΔV , pendant l'intervalle de temps Δt , au débit observé influencé, $Q_{\text{observé}}$, pour obtenir le débit naturalisé, $Q_{\text{naturalisé}}$ (voir équation 2.1 du chapitre 2). Pour cette méthode, la méthode OTAMIN n'est pas applicable puisque l'on ne quantifie pas l'erreur de modélisation.

Le tableau 7.1 présente les différentes sources d'incertitude de la méthode de bilan sur ouvrage. Nous allons dans cette partie évaluer l'incertitude venant de la mesure de débits influencés observés et celle associée à l'estimation du volume des barrages-réservoirs. Nous n'allons pas dans cette partie prendre en compte l'incertitude liée à l'estimation du temps de propagation.

Tableau 7.1 – Synthèse des sources d'incertitude de la méthode de bilan sur ouvrage.

| Variable | Source d'incertitude |
|--|---|
| Débits influencés observés | Qualité des mesures |
| | Moyens de conversion utilisés |
| Estimation du volume dans les lacs-réservoirs | Le vent à la surface des lacs peut entraîner des vagues qui vont fausser l'estimation de la hauteur d'eau |
| | Non-horizontalité du plan d'eau |
| | Qualité de la mesure de la hauteur d'eau |
| Estimation du temps de propagation entre la source d'influence et la station de mesure | Estimation d'un unique temps de trajet quelles que soient les conditions d'écoulement |

7.2.2.1 Incertitude liée au débit observé influencé

Il y a tout d'abord les incertitudes liées à l'estimation du débit influencé observé. Les débits aux stations de jaugeage sont estimés grâce à la mesure de la hauteur d'eau et à une courbe de tarage. Nous allons dans ce paragraphe discuter de l'ordre de grandeur des incertitudes liées au débit observé influencé.

Les trois principales sources d’incertitudes associées à l’estimation des débits observés proviennent de :

- **La mesure de la hauteur d’eau et du débit.** Les incertitudes liées à la mesure de la hauteur d’eau sont généralement faibles (McMillan *et al.*, 2012). Les mesures de débits sont plus incertaines. Leurs incertitudes portent essentiellement sur l’instrumentation mise en place et sur le contrôle de qualité des données. D’après Lamb *et al.* (2003), l’incertitude moyenne liée au système de mesure du débit varie entre plus ou moins 2 % et plus ou moins 20%.
- **L’extrapolation de la courbe de tarage.** Une courbe de tarage permet d’associer un débit à une hauteur d’eau. Ces courbes, propres à chaque station, sont réalisées grâce à des campagnes de mesures à différentes périodes de l’année afin d’être le plus exhaustif possible. La première source d’incertitude porte sur l’interpolation effectuée pour construire la courbe de tarage, et donc sur la fiabilité de la forme de la courbe obtenue (McMillan *et al.*, 2012). La deuxième source d’incertitude liée aux courbes de tarage porte sur les hauts débits. Ces dernières sont mal définies pour les hauts débits puisqu’il est rare et difficile de mesurer les crues techniquement et en toute sécurité (Despax, 2016). Les courbes font donc l’objet d’extrapolation. L’incertitude liée à la courbe de tarage est plus importante que celle liée aux appareils de mesure (McMillan *et al.*, 2012).
- **Des conditions de mesures.** L’incertitude provient majoritairement de la remise en cause de la stabilité de la relation hauteur–débit (McMillan *et al.*, 2012). La stabilité de la courbe de tarage dépend de la géomorphologie de la section (Despax, 2016). Ainsi, sur les bas débits, les modifications locales des contrôles hydrauliques sont plus importantes, car la section mouillée est moins sensible. De plus, en période d’été, les stations situées à quelques centaines de mètres de la sortie du réservoir sont soumises aux variations de débits générées par la manœuvre des ouvrages. Les mesures sont donc généralement effectuées sur des stations plus à l’aval.

Bien que des méthodes d’estimation des incertitudes dans le domaine de l’hydrométrie existent (McMillan *et al.*, 2012), il est encore rare de disposer en opérationnel d’un intervalle de confiance associé à la donnée (Despax, 2016). Baldassarre et Montanari (2009) ont estimé sur le fleuve Po, en Italie, que l’incertitude globale sur les débits varie entre plus

ou moins 6,2 et 42,8%, avec une moyenne 25,6%. Westerberg et McMillan (2015) estiment que l'impact de cette incertitude globale sur la mesure du débit induit une incertitude variant entre plus ou moins 10% et 40% sur les indicateurs hydrologiques. Dans notre étude, à défaut de pouvoir évaluer l'incertitude globale associée à la mesure de débits de chaque station, nous considérerons que pour la méthode de bilan sur ouvrage, l'incertitude liée au débit observé est de plus ou moins 20%. Cette valeur est similaire à la marge d'incertitude utilisée dans les études de volumes prélevables, où le Bureau du Comité du Bassin Rhône-Méditerranée (2011) conseille de considérer une marge d'incertitude de l'ordre de plus ou moins 10 à 20%.

7.2.2.2 Incertitude liée à l'estimation de la variation de volume des influences

La deuxième source principale d'incertitude provient de l'estimation de la variation de volume des influences. Pour rappel, la variation de volume journalière induite par un barrage-réservoir au jour j correspond à une différence entre le volume du réservoir estimé au jour j et au jour $j - 1$ (voir équation 4.5). Dans cette partie, nous ne traiterons pas des incertitudes liées à l'estimation de l'évaporation et des précipitations des réservoirs.

La quantification des erreurs associées aux variations de volumes des barrages-réservoirs a déjà été effectuée dans des études. Généralement, la quantification des erreurs se base sur l'hypothèse qu'en connaissant les volumes entrant et sortant du réservoir, il est possible d'estimer la variation de volume du réservoir d'après le principe de conservation des volumes (Seguis *et al.*, 1993). Les données utilisées pour effectuer ce bilan sont : le débit entrant et sortant, l'évaporation du réservoir, les précipitations à la surface du réservoir et l'infiltration. Les variations de volumes simulées peuvent cependant comporter des erreurs du fait d'imprécision sur les données en entrée (Winter, 1981). D'après la synthèse bibliographique de Vanderkelen *et al.* (2018), les incertitudes liées aux données en entrées peuvent aller jusqu'à 50% pour les précipitations, 15% pour l'évaporation, 140% pour les débits entrants et 20% pour les débits sortants. De plus, selon Winter (1981), plus l'on travaille à un pas de temps fin, plus les erreurs sont importantes, notamment les erreurs liées à l'estimation de l'évaporation qui double lorsque l'on passe d'un pas de temps annuel à mensuel.

Du fait des incertitudes liées aux variations de volumes des barrages-réservoirs simulées

avec la méthode de bilan, les utiliser comme référence pour évaluer la qualité des variations de volumes n'est peut-être pas la méthodologie la plus adaptée. De plus, du fait de la contrainte de temps pour établir une base de données fiables sur les soixante barrages-réservoirs de l'étude, il a été choisi de ne pas effectuer la méthode de bilan.

Dans le cas des barrages-réservoirs, leur volume journalier est obtenu grâce à une mesure de hauteur d'eau qui est ensuite convertie en volume grâce à une courbe de correspondance hauteur-volume. Plusieurs facteurs peuvent induire des erreurs dans la mesure de cette hauteur d'eau :

- la non-horizontalité du plan d'eau : lorsqu'il y a de forts débits de prise ou de restitution, il se peut que la surface du lac-réservoir ne soit pas absolument horizontale. Le volume estimé, issu d'une relation hauteur-volume, ne correspondra donc pas au volume réel.
- l'incidence du vent : ce dernier peut générer des vagues qui vont alors fausser les mesures de hauteur d'eau (Winter, 1981). La hauteur des vagues générées dépend de la force du vent, de sa durée et de la distance d'application de ce vent sur la surface libre (BCEOM, 1999). Dans le cas des barrages-réservoirs de Seine Grand Lacs, les mesures sont effectuées chaque matin à 8 heures, car les vents sont plus faibles en matinée, et les vagues générées ont donc une amplitude très faible. N'ayant cependant pas accès au mode opératoire des mesures de hauteur d'eau de chaque barrage réservoir, nous ne pouvons pas garantir l'absence d'impact des vagues.
- la précision du système de mesure des hauteurs mis en place et de la courbe hauteur-volume.

Parmi les sources d'incertitude évoquées, l'incidence du vent sur l'incertitude de l'estimation du volume des réservoirs et la non-horizontalité des plans d'eau ne sont pas vérifiables sur les réservoirs de la base de données. Concernant l'incertitude due à la précision du système de mesure mis en place, nous disposons de courbes hauteur-volume sur 28 barrages-réservoirs. Sur les barrages où nous n'avons pas de courbes hauteurs-volumes, ces dernières ont été reconstituées grâce à la formule de Campos *et al.* (2004) (voir annexe E). La précision des hauteurs d'eau fournies est de l'ordre du centimètre. Par la suite, nous faisons les hypothèses suivantes :

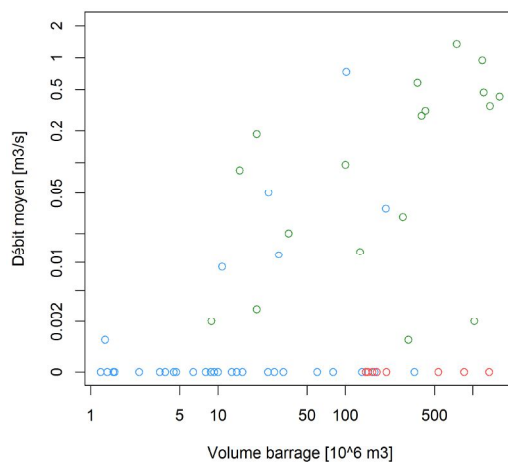
- du fait des informations disponibles, la seule source d'incertitude considérée dans l'estimation de la variation de volume des barrages-réservoirs est l'incertitude provenant de la précision du système de mesure de la hauteur d'eau mis en place.
- la précision de mesure de la hauteur d'eau est de 1 cm.

Ordre de grandeur de l'incertitude liée à l'estimation des volumes. La figure 7.2 présente l'impact qu'une erreur de 1 cm sur la mesure de la hauteur d'eau a sur l'estimation du volume des réservoirs. Les résultats sont présentés sous forme de débit moyen sur 24 h. Pour chaque volume associé à une hauteur d'eau, l'incertitude associée correspond à l'impact moyen d'une erreur de plus ou moins un centimètre. Cette incertitude dépend de la relation hauteur-volume de chacun des barrages-réservoirs. Plus la quantité d'eau associée à 1 cm de hauteur est importante, plus l'incertitude sera importante. De ce fait, plus le barrage est rempli, plus l'incertitude sur le volume du réservoir est importante. Ainsi l'incertitude maximale correspond au cas où le barrage est rempli au maximum, et, à l'inverse, l'incertitude minimale au cas où il est quasi-vidé.

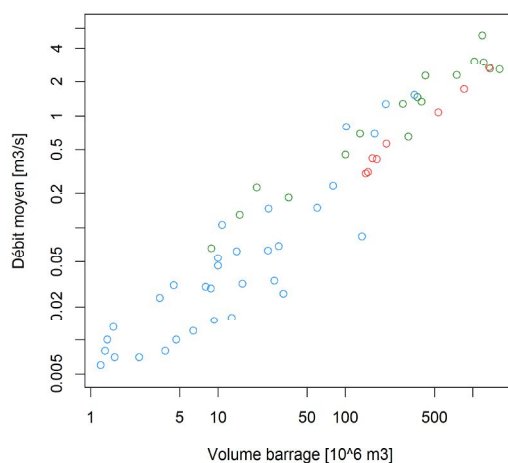
Plus la surface du réservoir est large, plus le volume associé à une hauteur d'eau est important. Ainsi, l'erreur liée à l'incertitude de la hauteur d'eau varie selon le niveau de remplissage du réservoir. La figure 7.2 montre l'ordre de grandeur de ces erreurs selon la capacité des réservoirs. Plus la capacité des réservoirs est importante, plus l'erreur moyenne et maximale potentielle est importante. Sur les barrages australiens, qui ont une capacité de stockage importante, les incertitudes seront donc globalement plus importantes que sur les barrages français.

7.2.2.3 Ordre de grandeur des différentes sources d'incertitudes sur nos bassins de référence

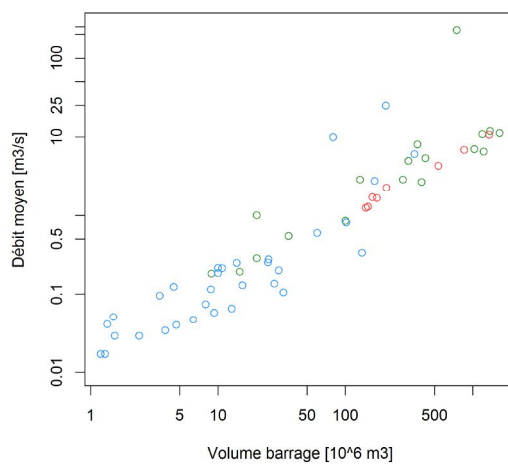
L'objectif de cette partie est de comparer, sur nos bassins de référence, l'ordre de grandeurs des deux sources d'incertitudes considérées pour la méthode de bilan sur ouvrage. La figure 7.3 présente l'incertitude sur le régime de débit naturalisé par la méthode de bilan sur ouvrage. Les courbes vertes correspondent aux intervalles d'incertitudes liées à la mesure du débit et les courbes rouges aux incertitudes liées à la mesure de la hauteur d'eau des réservoirs.



(a)



(b)



(c)

Figure 7.2 – Impact minimal (a), moyen (b) et maximal (c) d’une erreur de 1 cm en débit moyen sur 24 h, selon la capacité des barrages-réservoirs. Les barrages-réservoirs verts se situent en Australie, les bleus en France et les rouges aux Etats-Unis.

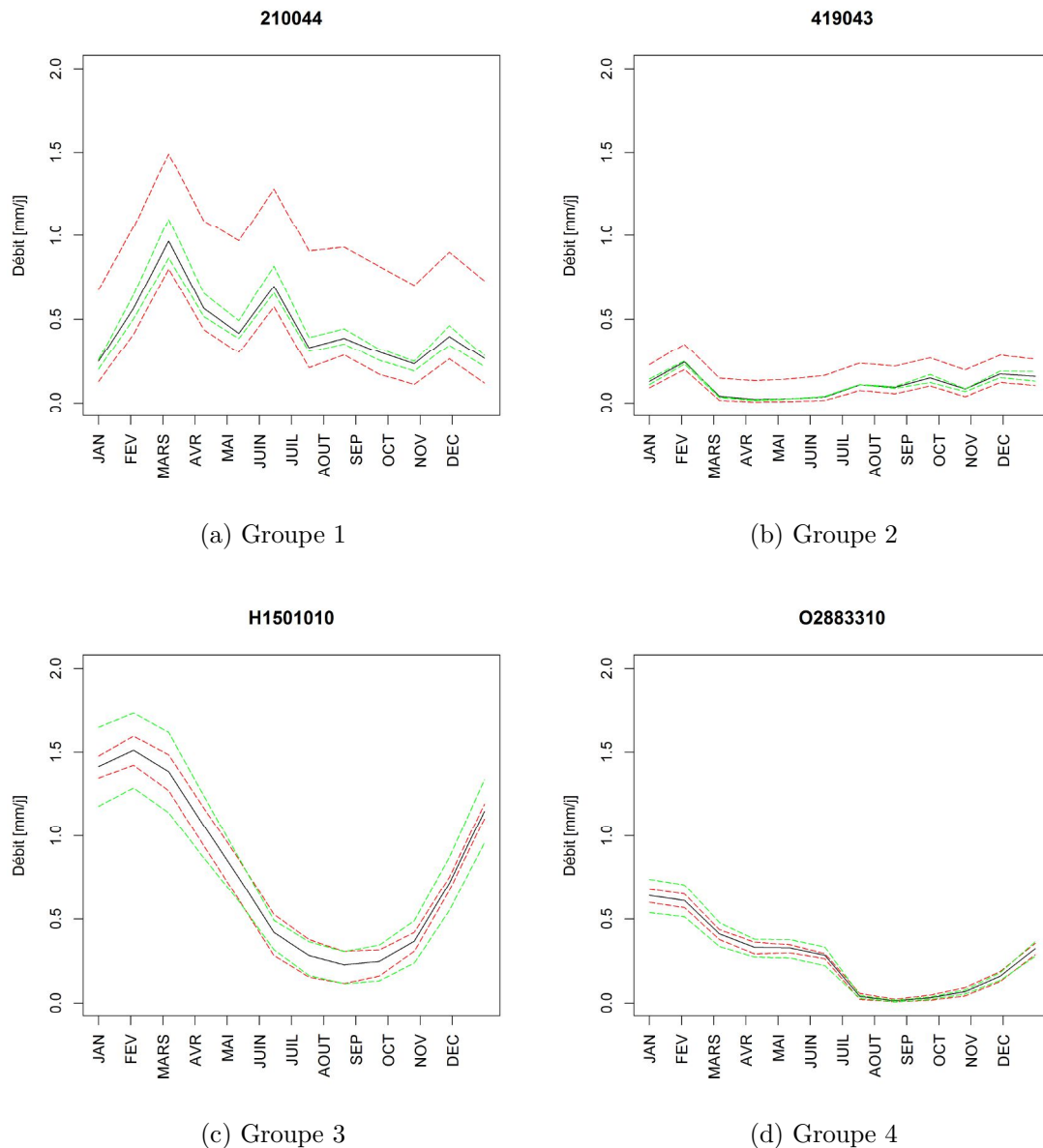


Figure 7.3 – Régime de débit naturalisé par la méthode de bilan sur ouvrage et incertitude associée sur les bassins de Glennies Creek à Middle Fallbrook(a), Manilla river à l'aval de Split Rock Dam (b), l'Aube à Arcis-sur-Aube (c) et la Gimone à Garganvillar (d). La courbe noire correspond au régime de débit naturalisé par la méthode de bilan sur ouvrage. Les courbes vertes pointillées correspondent à l'incertitude sur les mesures de débits. Les courbes rouges pointillées correspondent à l'incertitude liées à la mesure de la hauteur d'eau.

Cas des bassins humides H1501010 (G3) et O2883310 (G4). On note tout d'abord une saisonnalité des incertitudes ainsi que de la largeur des intervalles d'incertitudes (figure 7.3c et 7.3d). Pour l'incertitude liée à l'estimation de débit, cela provient du fait qu'on considère l'incertitude de mesure proportionnelle à la valeur du débit ob-

servé. Plus le débit observé est bas, plus l'incertitude sera faible, et inversement. Pour l'incertitude sur les mesures de hauteurs d'eau des réservoirs, cette dernière dépend du taux de remplissage des barrages-réservoirs amont car, comme nous l'avons vu précédemment, plus un barrage est rempli, plus l'incertitude liée à la mesure de la hauteur d'eau est importante. Dans le cas de l'Aube à Arcis-sur-Aube (H1501010), le réservoir se remplit à partir de janvier et atteint son niveau le plus haut en juin, puis se vidange pour atteindre son niveau le plus bas en décembre. Dans le cas de la Gimone à Garganvillar (O2883310), le réservoir se remplit à partir de décembre et atteint son niveau le plus haut en juin, puis se vidange pour atteindre son niveau le plus bas en novembre. Sur ces bassins, du fait de la gestion des barrages-réservoirs amont, l'incertitude est plus faible en novembre/décembre et plus importante en juin. En comparant les deux sources d'incertitudes en terme d'amplitude, il apparaît que l'incertitude liée à l'estimation du débit observé est plus importante que l'incertitude liée à la mesure de la hauteur d'eau des réservoirs amont de début septembre à fin avril pour le bassin de l'Aube à Arcis-sur-Aube, et de début décembre à fin juin pour le bassin de la Gimone à Garganvillar. En dehors de ces périodes, les deux sources d'incertitudes sont équivalentes.

Cas des bassins semi-arides 210044 (G1) et 419043(G2). Dans le cas des bassins semi-arides de Glennies Creek à Middle Fallbrook (210044) et de Manilla river à l'aval de Split Rock Dam (419043), il ressort d'une part que la saisonnalité des intervalles de confiance est moins marquée par rapport aux bassins humides. D'autre part, l'incertitude liée à la mesure de la hauteur d'eau des barrages-réservoirs est bien plus importante que celle liée à l'estimation des débits observés. Comme présenté précédemment, plus le ratio hauteur-volume est important, plus l'incertitude sur la mesure de la hauteur d'eau est importante. Pour rappel, la capacité du réservoir amont de Glennies Creek à Middle Fallbrook (210044) est de 283 hm^3 , et de la Manilla river à l'aval de Split Rock Dam de 397 hm^3 , contre 170 hm^3 pour l'Aube à Arcis-sur-Aube et 25 hm^3 pour la Gimone à Garganvillar.

Au final, sur les bassins semi-arides de nos exemples, la principale source d'incertitude provient de la mesure de la hauteur d'eau des barrages-réservoirs amont. Sur les bassins humides, l'incertitude liée à l'estimation du débit observé est plus importante ou équivalente à l'incertitude liée à la mesure de la hauteur d'eau des barrages-réservoirs.

7.2.3 Critère d'évaluation des intervalles de confiances

Dans cette partie, nous nous intéresserons uniquement à la finesse de l'intervalle de confiance. La méthode QUOIQUE a déjà été évalué par Bourgin (2014) qui a montré que c'était une méthode fiable.

La finesse de l'intervalle de confiance est une mesure de la qualité du débit naturalisé obtenu. Plus l'intervalle est fin, plus les incertitudes liées à la méthode sont faibles et plus nous pouvons avoir confiance dans le débit naturalisé obtenu avec les hypothèses de la méthode. Pour évaluer la finesse, nous utilisons une variante de la formule ARIAL (*Average Relative Interval Length*) de Jin *et al.* (2010) :

$$Ind_{ARIAL} = 1 - \frac{1}{n} \sum_t \frac{Borne_{Sup}(t) - Borne_{Inf}(t)}{Q_{nat}(t) + \epsilon} \quad (7.1)$$

$$ARIAL = \frac{Ind_{ARIAL}}{2 - Ind_{ARIAL}} \quad (7.2)$$

$Q_{nat}(t)$ correspond au débit naturalisé à un moment t , et $Borne_{Sup}(t)$ et $Borne_{Inf}(t)$ correspondent respectivement aux bornes supérieure et inférieure de la base de données. ϵ équivaut à $1e^{-5}$ mm/j.

$ARIAL$ est borné entre -1 et 1 contrairement à Ind_{ARIAL} . Plus il est proche de 1, plus l'intervalle de confiance est fin par rapport à la chronique de débit naturalisé. Lorsque $ARIAL$ vaut 0, cela signifie qu'en moyenne l'écart entre les bornes supérieure et inférieure équivaut à la valeur du débit.

Le coefficient $ARIAL$ est un indicateur de finesse par rapport à la chronique de débit naturalisé obtenu. Les débits naturalisés étant différents entre chaque méthode (chapitre 4), pour une même distance entre les bornes de l'intervalle de confiance, nous aurons des coefficients $ARIAL$ différents.

L'indicateur $ARIAL$ semble être assez sévère sur les bas débits. Afin d'avoir un indicateur représentatif des débits non-extrêmes, il sera calculé pour chaque méthode sur les débits naturalisés se trouvant entre Q_{20} et Q_{80} . Q_{20} et Q_{80} correspondent respectivement

aux débits non-dépassés 20% et 80% du temps, obtenus avec la méthode de naturalisation considérée. Les coefficients ARIAL obtenus sur les débits inférieurs à Q20 et supérieurs à Q80 sont présentés en annexe H.

7.3 Évaluation des intervalles de confiance des chroniques de débits naturalisés

Le coefficient ARIAL, représentatif de la finesse de l'intervalle de confiance par rapport au débit naturalisé obtenu, a été calculé sur chaque intervalle obtenu avec les différentes méthodes sur l'ensemble des bassins. La figure 7.4 présente une comparaison de l'indicateur par groupes de bassins selon les différentes méthodes de naturalisation.

Globalement, il apparaît que la plupart des indicateurs ARIAL obtenus sont inférieurs à zéro. Cela signifie qu'en moyenne, la largeur de l'intervalle de confiance est plus grande que la valeur du débit naturalisé. On observe que les incertitudes associées aux méthodes de naturalisation sont bien plus importantes sur les bassins semi-arides des groupes 1 et 2 que sur les bassins humides. Pour les méthodes utilisant un modèle hydrologique, cela s'explique par le fait que la modélisation hydrologique est moins performante sur les bassins semi-arides (chapitre 5). Cette différence en termes de performances peut s'expliquer par la plus grande variabilité interannuelle des débits qui impacte la capacité du modèle à modéliser l'ensemble des gammes de débits. Pour la méthode de bilan sur ouvrage, il a été montré dans la partie 7.2.2 que les barrages-réservoirs des bassins semi-arides sont bien plus grands du fait de leur fonctionnement pluriannuelle. Les incertitudes liées à l'erreur de mesure de la hauteur d'eau des réservoirs sont donc plus importantes sur les bassins semi-arides. D'autre part, les chroniques de débits obtenus avec la méthode de bilan sur ouvrage sur les bassins semi-arides ont l'aspect de chroniques nulles ponctuées par des pics. Le fort taux de débits nuls dégrade donc fortement l'indicateur ARIAL présenté. Concernant les différences entre les coefficients ARIAL de la méthode de bilan sur ouvrage avec et sans prise en compte des conditions météorologiques sur les réservoirs, on observe que ces dernières sont assez faibles sur les groupes de bassins 2 à 4. Les différences peuvent s'expliquer tout d'abord par les différences entre les débits naturalisés obtenus. La finesse des intervalles dépend de l'ordre de grandeur des débits naturalisés. Les diffé-

rences peuvent également s'expliquer par des distances ponctuellement différentes entre les bornes inférieures et supérieures avec chacune des méthodes. Dans le cas où l'incertitude est supérieure à la valeur de débit naturalisé, la borne inférieure équivaut alors à 0. Les débits naturalisés n'étant pas identiques entre les deux méthodes, des différences peuvent survenir. Nous avons vu dans le chapitre 4 que les différences entre débits naturalisés portent essentiellement sur les bas débits, c'est-à-dire les débits observés moins de 10 à 30% du temps, et que les différences, de l'ordre du 10^{-3} mm/j, étaient relativement faibles. Ceci explique donc les faibles différences entre les indicateurs ARIAL de la méthode de bilan sur ouvrage avec et sans prise en compte des conditions météorologiques des barrages.

Groupe 1. Sur les bassins semi-arides du groupe 1, il apparaît que la méthode de reconstitution donne les intervalles de confiance les plus fins en valeur médiane, suivi des méthodes d'extension, de bilan sur ouvrage avec prise en compte des variables météorologique, de régionalisation puis de bilan sur ouvrage sans prise en compte des variables météorologiques. Il apparaît que les intervalles de confiance associés à la méthode de régionalisation, basée sur l'utilisation des débits observés sur des bassins naturels voisins, sont en valeurs médianes plus larges que ceux de la méthode d'extension. Cela signifie donc que, sur les bassins semi-arides, la transposition spatiale des jeux de paramètres génère plus d'incertitudes que la transposition temporelle. Dans le cas de la méthode de régionalisation, on constate que les bassins voisins non-influencés ont des données de débits observés sur au moins 80% de la période de naturalisation. Malgré le fait que les jeux de paramètres obtenus sur les bassins voisins non-influencés soient plus représentatifs des conditions climatiques de la période de naturalisation, globalement il semble qu'il vaut mieux privilégier le jeux de paramètres obtenus sur la période pré-influence.

Groupe 2. Sur les bassins semi-arides du groupe 2 situés à l'aval des barrages-réservoirs, la méthode de reconstitution donne les intervalles de confiance les plus fins en valeur médiane, suivi de la méthode d'extension, des deux méthodes de bilan sur ouvrage puis de régionalisation. La différence par rapport aux résultats obtenus sur les bassins du groupe 1 porte sur les intervalles de confiance obtenus avec la méthode de bilan sur ouvrage qui

sont en valeur médiane plus larges. Les bassins du groupe 2 étant situés à l'aval des barrages réservoirs, les incertitudes liées aux variations du barrage en amont ont un ordre de grandeur plus important.

Groupe 3. Sur les bassins humides du groupe 3, c'est avec les méthodes de bilan sur ouvrage avec et sans prise en compte des conditions météorologiques que l'on obtient le meilleur indicateur ARIAL. Pour rappel, plus la capacité des réservoirs est importante, plus l'incertitude associée aux variations de volumes, utilisées par la méthode de bilan sur ouvrage, est importante. Les barrages-réservoirs des bassins humides ayant une capacité plus faible que ceux situés en zone semi-aride, cela explique les meilleures performances de la méthode de bilan sur ouvrage. L'indicateur ARIAL obtenu avec les méthodes de reconstitution et d'extension ont une valeur médiane respective de -0,05 et -0,03. Cela montre que les incertitudes associées à chacune de ces trois méthodes ont un ordre de grandeur similaire. C'est avec la transposition spatiale que l'on obtient les intervalles de confiance les plus larges. Il a déjà été montré que, globalement, sur les bassins français, la transposition spatiale est moins performante que la transposition temporelle (Lebecherel *et al.*, 2016 ; Oudin *et al.*, 2008).

Groupe 4. Il apparaît que les méthodes de bilan sur ouvrage donnent en valeur médiane les intervalles de confiance les plus fins, suivies à égalité des méthodes d'extension et de reconstitution, puis de la méthode de régionalisation. Pour rappel, les bassins humides du groupe 4 ont la caractéristique d'avoir une variabilité des données climatiques plus importantes que les bassins humides du groupe 4. Les méthodes utilisant un modèle hydrologique peuvent avoir plus d'incertitudes que la méthode de bilan sur ouvrage, car l'obtention d'un jeu de paramètres capable de prendre en compte ces variabilités interannuelles peut être plus compliquée.

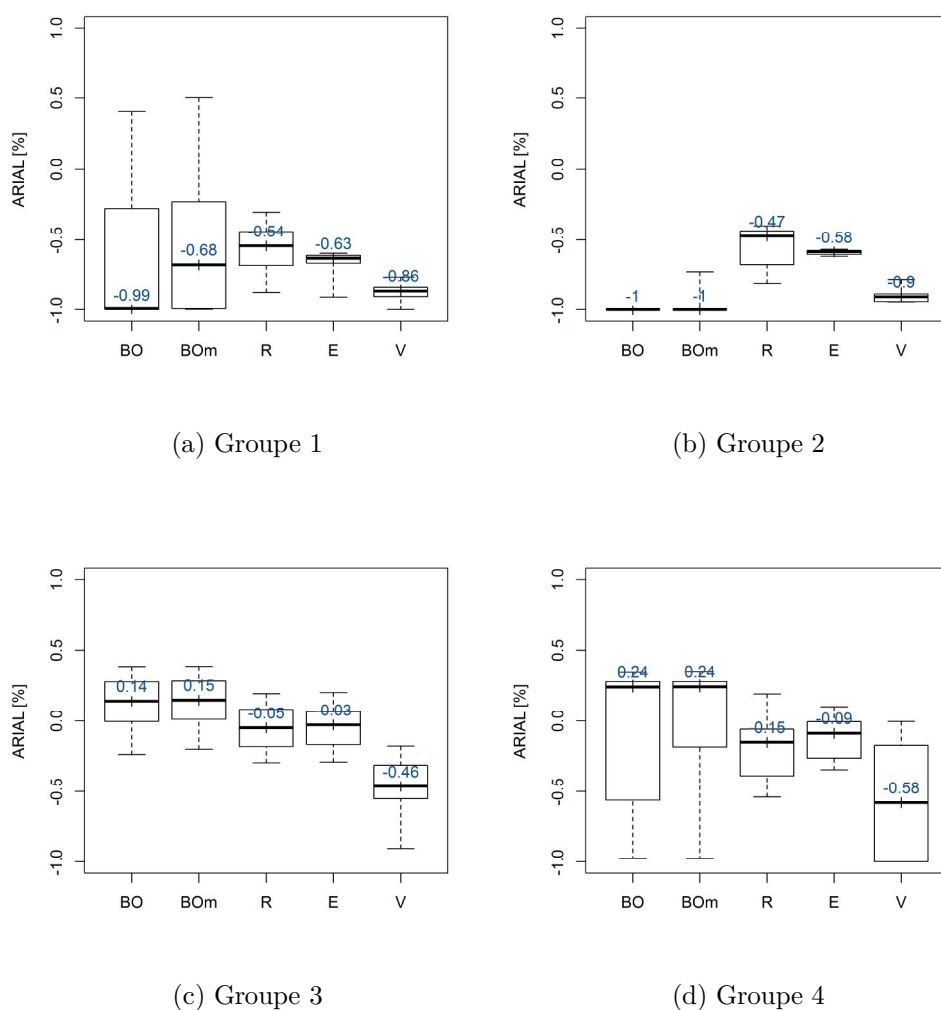


Figure 7.4 – Distribution des coefficients ARIAL, calculés sur les débits naturalisés compris entre Q20 et Q80, pour chaque méthode de naturalisation (BO : Bilan sur Ouvrage ; BOm : Bilan sur Ouvrage avec prise en compte de l'évaporation et des précipitations sur le réservoir ; R : Reconstitution ; E : Extension ; V : Régionalisation) par groupe de bassins. Les valeurs minimales et maximales de la boîte à moustache correspondent aux quantiles 0,05 et 0,95. Les extrémités de la boîte à moustache correspondent aux quantiles 0,25 et 0,75. Le quantile 0,5 est représenté par un trait horizontal épais.

En annexe H, sont présentés les coefficients ARIAL obtenus sur les débits inférieurs à Q20 (figure H.1) et supérieurs à Q80 (figure H.2). Globalement, sur les bas débits inférieurs à Q20, on observe une dégradation des coefficients ARIAL. Pour la méthode de bilan sur ouvrage, ces coefficients valent en valeur médiane -1 pour tous les groupes. Cela provient du fait que les bas débits obtenus avec la méthode de bilan sur ouvrage sont très faibles voire nuls (chapitre 4, partie 4.4.2). Sur les bassins semi-arides des groupes 1 et 2, l'ordre de performance des méthodes en terme de finesse change. On observe notam-

ment une démarcation de la méthode de régionalisation par ses bonnes performances par rapport aux autres méthodes. Sur les hauts débits, l'indicateur ARIAL est globalement meilleur pour toutes les méthodes et sur tous les groupes. Cela provient du fait que la valeur du débit étant plus grande, la largeur de l'intervalle de confiance apparaît proportionnellement moins grande.

En termes de finesse des intervalles, sur les bassins des groupes 1, 2 et 4, il y a des différences marquées entre les coefficients ARIAL obtenus sur chacune des méthodes, contrairement aux groupes 3 où les différences entre coefficients sont moins marquées.

7.4 Synthèse

Dans ce chapitre, différentes méthodes d'estimation des incertitudes ont été adaptées et appliquées à l'ensemble des méthodes de naturalisation. Dans le cas de la méthode de bilan sur ouvrage, qui par rapport aux autres méthodes, n'utilise pas de modèle hydrologique, nous avons proposé une évaluation des incertitudes des données en entrée.

Sur les bassins semi-arides, la méthode de reconstitution donne les intervalles de confiance les plus fins. Cependant, comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents, cette méthode n'est pas applicable sur les bassins dont la station se trouve à la sortie d'un barrage. La méthode de bilan sur ouvrage, avec et sans prise en compte de l'évaporation et des précipitations sur les ouvrages amonts, donne sur les bassins arides l'intervalle de confiance le plus large. Ceci est dû au fait que l'ordre de grandeurs des incertitudes liées aux variations de volumes est plus important sur les barrages-réservoirs australiens du fait de leur taille. Sur les bassins semi-humides, c'est globalement la méthode de bilan sur ouvrage qui donne les intervalles de confiance les plus fins, et la méthode de régionalisation qui donne les intervalles les moins fins.

8

Conclusion générale

La thèse a porté sur la naturalisation des débits sur les bassins influencés par des barrages-réservoirs amont, après mise en service de ces derniers. Le débit observé sur ces bassins correspond à un débit influencé, par opposition au débit naturel. Cependant, l'estimation et la gestion de la ressource en eau d'un bassin se base sur l'hydrologie naturelle de ce dernier. C'est pourquoi on utilise des méthodes de naturalisation, qui permettent de passer d'un débit influencé à un débit naturalisé.

D'où partions-nous sur la naturalisation ?

Lorsque nous avons commencé l'état de l'art sur les méthodes de naturalisation, il est apparu que ce sujet n'avait fait l'objet d'aucune étude spécifique et qu'aucune synthèse sur ce domaine n'existait. Bien que les méthodes appliquées ne sont souvent pas nommées sous le terme de méthodes de naturalisation, ces dernières sont pourtant largement appliquées dans la littérature scientifique et dans la littérature grise afin de fournir une estimation du débit naturel sur des bassins influencés. L'application des méthodes de naturalisation dans les articles semblait être une tâche presque secondaire, qui fait l'objet de rares justifications. Dans les études de volumes prélevables, les méthodes de naturalisation constituaient un élément central. Cependant, face à l'absence de travaux sur le sujet, le choix des méthodes de naturalisation était souvent lié à la disponibilité des données, et l'estimation des incertitudes associées aux résultats n'était pas faite.

L'analyse des études antérieures a permis d'identifier les principales méthodes de naturalisation de nature hydrologique et hydraulique existantes (bilan sur ouvrage, reconstitution, extension, régionalisation), d'explicitier les différentes hypothèses d'application de ces méthodes et d'identifier différents axes de recherche abordés dans la thèse, avec les questions suivantes :

1. Quelles différences existe-t-il entre les débits naturalisés obtenus selon les différentes méthodes de naturalisation ? Les études appliquant le plus souvent une seule méthode de naturalisation, nous ne connaissons pas l'impact que peut représenter le choix d'une méthode spécifique sur les débits naturalisés obtenus.
2. Quelles méthodes de naturalisation sont applicables ? De manière générale, l'application des méthodes de naturalisation faisait l'objet de peu de justifications, l'évaluation des hypothèses d'applicabilités des méthodes n'étant pas faites.

3. Quels intervalles de confiance peut-on associer aux débits naturalisés ? Ce point est demandé dans le cahier des charges des études de volumes prélevables, mais ne semble faire l'objet d'aucune analyse quantitative dans les études.

Pour répondre à ces questions, une large base de données a été constituée. Cette dernière est composée d'environ 130 bassins versants influencés par des grands barrages-réservoirs.

Objectifs de la thèse et réponses apportées

L'objectif principal de la thèse a été de mettre en place un cadre de comparaison des méthodes de naturalisation afin d'évaluer l'applicabilité des méthodes à chaque cas d'étude et d'évaluer le niveau de confiance que l'on peut accorder aux débits naturalisés. Une difficulté majeure dans cette démarche de mise au point d'une méthodologie d'évaluation réside dans l'impossibilité d'accéder à des observations de débit naturel sur la période influencée. La méthodologie développée fait donc appel à une approche d'évaluation indirecte en choisissant des références externes.

En comparant les indicateurs hydrologiques calculés sur les chroniques de débits naturalisés obtenus avec chaque méthode, il a été montré que le choix de la méthode pouvait faire varier le débit moyen d'environ 10 à 50% selon le type de bassin. Plus l'on s'intéresse à des débits extrêmes, plus les différences entre les méthodes sont importantes. Les travaux ont permis de montrer qu'au vu des différences obtenues entre les méthodes, le choix de la méthode peut possiblement modifier les conclusions des études, et qu'il est donc nécessaire d'appliquer une méthodologie pour obtenir un débit naturalisé le plus fiable possible.

L'évaluation de l'applicabilité des méthodes a permis d'identifier des cas où l'application de certaines méthodes de naturalisation était à proscrire, montrant par exemple la difficulté de traiter le cas des stations situées immédiatement à l'aval d'un barrage-réservoir par la méthode de reconstitution. Les méthodes de naturalisation reposent sur des hypothèses d'applicabilité différentes et utilisent des données en entrée et des modèles différents. Nous avons donc proposé un cadre d'évaluation des méthodes de naturalisation à appliquer pour chaque cas d'étude. Cette approche repose, dans un premier temps, sur le choix, bassin par bassin, d'un débit observé de référence, par rapport auquel on va com-

parer les débits obtenus avec les différentes méthodes de naturalisations applicables. Dans un deuxième temps, en partant du principe qu'une approche multi-méthode est a priori plus fiable qu'une approche mono-méthode, une approche combinatoire est appliquée sur les débits naturalisés afin de combiner les forces de chacune des méthodes.

Recommandations opérationnelles

A l'issue de ce travail, nous pouvons faire quelques recommandations pour un ingénieur ou gestionnaire qui voudrait faire de la naturalisation des débits sur un cas d'étude particulier. Si la base de données le permet, il est préférable d'appliquer plusieurs méthodes de naturalisation se basant sur différentes hypothèses. Dans un premier temps, en appliquant les différentes méthodes de naturalisation, plusieurs situations peuvent se présenter :

- **Cas 1.** Les débits naturalisés sont similaires d'un point de vue quantitatif et ont la même temporalité. De plus, en les comparant au débit influencé observé, on arrive à des conclusions similaires quant à l'impact de l'influence. Dans ce cas, la similarité des résultats indique qu'ils sont peu dépendants de la méthode choisie. Cela renforce donc la confiance que l'on peut avoir dans les résultats, étant donné les différences d'approches des méthodes.
- **Cas 2.** On arrive à des conclusions différentes sur l'impact des influences selon le choix de la méthode. De plus, d'importantes différences d'un point de vue volumétrique existent entre les méthodes de naturalisation. Il y a dans ce cas une forte incertitude associée au choix de la méthode.

Dans un deuxième temps, les hypothèses de chacune des méthodes de naturalisation sont appliquées afin d'écarter les méthodes de naturalisation dont les hypothèses ne sont pas validées. Plusieurs situations peuvent alors se présenter :

- **Cas 1.** Plusieurs méthodes de naturalisation sont applicables. Nous conseillons alors d'appliquer une méthode de post-traitement permettant de combiner les différentes chroniques de débits naturalisés pour au final n'en obtenir qu'une.
- **Cas 2.** Une seule méthode de naturalisation est applicable. Nous conseillons alors d'appliquer une méthode d'évaluation de l'incertitude associée à cette chronique de débits naturalisés.

- **Cas 3.** Aucune méthode de naturalisation ne paraît applicable. Cela correspond au cas où les incertitudes présentes semblent trop importantes pour donner une estimation réaliste des débits naturels. Il est alors conseillé de mettre en place un dispositif complémentaire d'acquisition de données pour conduire à une estimation plus fiable des débits naturalisés.

Perspectives de recherche

1. Prise en compte de nouvelles sources d'influences

Dans notre étude, nous n'avons considéré que l'impact des barrages-réservoirs. Comme expliqué en introduction (chapitre 1), ce choix découle du fait de la difficulté d'avoir accès à des chroniques de prélèvements à un pas de temps journalier ainsi qu'à leur localisation. Nous sommes cependant conscients que l'impact des prélèvements et leur prise en compte dans les méthodes de naturalisation constituent un enjeu majeur dans les études d'évaluation des volumes prélevables globaux. La prise en compte des prélèvements de surface et souterrains par les méthodes de naturalisation, présentées dans cette thèse, soulève de nouvelles questions :

- **Quelle partie de l'eau est réellement consommée ?** Dans les études de naturalisation utilisant une méthode basée sur des chroniques de volumes des influences, par souci de simplification, la consommation est considérée comme totale (Irwin *et al.*, 1975 ; Naik et Jay, 2005). Pour rappel, d'après le rapport du WWAP (2009) (World Water Development Programm), dans le secteur agricole, une irrigation localisée entraîne une consommation de 90% de la ressource contre 50-60% pour une irrigation de surface. Le secteur de l'énergie a une consommation de l'ordre de 1-2%. Les usages domestiques consomment entre 10 et 20% de l'eau prélevée, et l'industrie entre 5 et 10%. Ces chiffres restent des estimations globales. La consommation agricole dépend en grande partie de l'efficacité de l'irrigation. Quant aux usages domestiques, dans certains cas, la consommation peut être faible, si l'eau est mal acheminée, ou totale, si l'eau traitée est ensuite rejetée à la mer comme c'est le cas pour certaines villes côtières (Margat et Andréassian, 2008). Ces chiffres

montrent que, dans les études, l'hypothèse de consommation totale de la ressource en eau peut paraître forte.

- **La gestion des impacts indirects.** Dans le cas d'une station située à l'aval d'un barrage-réservoir, dès lors que l'on travaille au pas de temps journalier, l'impact des variations de volume est considéré comme immédiat à la station. Dans le cas de prélèvements sur les eaux de surface, il y a un impact direct sur le débit de la rivière avec une diminution du débit à l'aval et un impact indirect avec le retour au milieu naturel d'une partie de l'eau non consommée. Les prélèvements dans les nappes phréatiques ont un impact indirect sur le débit des rivières. Dès lors que l'on prend en compte les impacts indirects des méthodes, on peut se demander si la méthode de bilan sur ouvrage, qui se caractérise par sa simplicité, reste adaptée.
- **Quelle référence non-influencée considérer ?** Les méthodes d'extension et de régionalisation se fondent sur l'existence d'une référence non-influencée. Contrairement aux barrages-réservoirs où la construction et/ou mise en service marque la séparation entre une période pré et post-influence, dans le cas des prélèvements, il est plus compliqué de se référer à des périodes passées ou des bassins dont le débit ne comporte pas l'impact des prélèvements. Ces questions sur le choix des références ont été soulevées plus en détail dans l'état de l'art du chapitre 2.
- **Effets cumulés des influences.** Les débits des rivières sont bien souvent perturbés par plusieurs influences, qui peuvent être de plus liées entre elles : certains barrages ont vocation à permettre l'irrigation des cultures lors de la période de basses eaux, les retenues collinaires existent pour l'irrigation des cultures, etc. Nous pouvons donc penser que certaines influences compensent l'impact d'autres influences, comme c'est le cas dans l'étude de Constantz et Essaid (2007) où le barrage-réservoir compense les effets des prélèvements souterrains en été. Dans le cas où la rivière ne fait l'objet d'aucune gestion, nous pouvons nous attendre à une amplification des impacts liés à la multiplicité des influences. A l'échelle mondiale, Biemans *et al.* (2011) montrent que la combinaison de l'influence de l'irrigation

et des réservoirs a un impact plus important sur le débit des rivières. La prise en compte des impacts cumulés des influences apparaît donc comme une question clé par la suite.

2. Les limites d'application des méthodes en opérationnel

L'objectif de la thèse étant de comparer les méthodes de naturalisation, la base de données était constituée de cas d'étude permettant l'application de l'ensemble des méthodes de naturalisation. D'après des échanges avec l'OFB (Office français de la biodiversité) et des professionnels de l'eau lors de comités de thèse, ces conditions idéales semblent peu répandues en opérationnel. En effet, l'accès à des données et/ou leur estimation conditionne l'application des méthodes de naturalisation. Dans cette thèse, nous avons été contraints de nous limiter à l'impact des barrages du fait que nous n'avions pas accès à une base de données des influences à l'échelle nationale et au pas de temps journalier. Plusieurs pistes pourraient être explorées par la suite :

- **Détermination des conditions minimales d'application des méthodes.** En opérationnel, les chroniques de données peuvent être relativement courtes. Il serait donc intéressant de pouvoir déterminer le rapport entre la quantité de données requises par les méthodes de naturalisation et leurs performances. Dans le cas de modèles pluie-débit reflétant le cycle hydrologique naturel, plusieurs travaux ont déjà été menés sur le nombre d'observations nécessaires pour garantir de bonnes performances (Juston *et al.*, 2009 ; Li *et al.*, 2010 ; Liu et Han, 2010 ; Perrin *et al.*, 2007). Ces travaux peuvent donc par la suite servir de base dans la détermination des conditions minimales d'application de la méthode d'extension et de régionalisation. Dans le cas de la méthode de reconstitution, le débit reflète les conditions météorologiques et le comportement des influences sur le bassin. On peut alors se retrouver avec un ensemble de sous-périodes se caractérisant à la fois par des conditions climatiques arides ou humides, et par différents niveaux d'influence. On peut se demander si le modèle nécessite une période de calage ou un nombre d'observations plus importants afin de refléter cette diversité.

- **Développement de nouvelles méthodes de naturalisation.** Nos travaux ont porté sur l'application de méthodes de naturalisation déjà existantes. Cependant, en opérationnel, des méthodes de naturalisation hybrides sont parfois appliquées pour compenser le manque de données. Une méthode que nous avons souvent retrouvée dans les études de volumes prélevables consiste, dans un premier temps, à calculer un débit naturalisé sur une courte période grâce à la méthode de bilan sur ouvrage, puis dans un deuxième temps, à appliquer la méthode d'extension avec un modèle hydrologique pour étendre temporellement la série de débits naturalisés. Ces méthodes sont appliquées pour contourner la problématique des données limitées sur les bassins. Afin de répondre à ces besoins plus opérationnels, il serait intéressant de développer d'autres méthodes hybrides.

Il serait également intéressant d'identifier des moments où l'impact des influences est minimale. On pourrait alors appliquer la méthode hybride des travaux de Rojas-Serna *et al.* (2016) qui consiste à combiner des informations régionales (jeux de paramètres de stations naturelles jaugées) et des informations locales (fournies par les mesures ponctuelles).

Bibliographie

- ABBOTT, B. W., BISHOP, K., ZARNETSKE, J. P., HANNAH, D. M., FREI, R. J., MINAUDO, C., CHAPIN III, F. S., KRAUSE, S., CONNER, L., ELLISON, D., GODSEY, S. E., PLONT, S., MARÇAIS, J., KOLBE, T., HUEBNER, A., HAMPTON, T., GU, S., BUHMAN, M., SAYEDI, S. S., URSACHE, O., CHAPIN, M., HENDERSON, K. D. et PINAY, G. (2019). A water cycle for the Anthropocene. *Hydrological Processes*, 33(23):3064–3052.
- ACREMAN, M., DUNBAR, M., HANNAFORD, J., MOUNTFORD, O., WOOD, P., HOLMES, N., COWX, I., NOBLE, R., EXTENCE, C., ALDRICK, J., KING, J., BLACK, A. et CROOKALL, D. (2008). Developing environmental standards for abstractions from UK rivers to implement the EU Water Framework Directive. *Hydrological Sciences Journal*, 53(6):1105–1120.
- ACREMAN, M. C. et DUNBAR, M. J. (2004). Defining environmental river flow requirements - a review. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8(5):861–876.
- AFB et MINISTÈRE CHARGÉ DE L'ENVIRONNEMENT (2016a). *Débit contrôlé - Glossaire sur l'eau*.
- AFB et MINISTÈRE CHARGÉ DE L'ENVIRONNEMENT (2016b). *Débit influencé - Glossaire sur l'eau*.
- AGOSTA, C. (2007). Naturalisation des débits et modélisation hydrologique sur des sous-bassins versant de la Garonne à Lamagistère (in French). Mémoire de Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie - Parcours Hydrologie-hydrogéologie, Université Pierre et Marie Curie, Paris, Laboratoire National en Hydraulique et Environnement, EDF Recherche et développement, Chatou. /, EDF.
- AHN, C., JOHNSTON, D. M., SPARKS, R. E. et WHITE, D. C. (2006). Analysis of Naturalization Alternatives for the Recovery of Moist-soil Plants in the Floodplain of the Illinois River. *Hydrobiologia*, 565(1):217–228.

- AHN, K.-H. et MERWADE, V. (2014). Quantifying the relative impact of climate and human activities on streamflow. *Journal of Hydrology*, 515:257–266.
- AJAMI, N., DUAN, Q., GAO, X. et SOROOSHIAN, S. (2006). Multimodel combination techniques for analysis of hydrological simulations : application to distributed model intercomparison project results. *Journal of Hydrometeorology*, 7(4):755–768.
- AL-WAGDANY, A. S. et RAO, A. R. (1997). Estimation of the velocity parameter of the geomorphologic instantaneous unit hydrograph. *Water resources management*, 11(1):1–16.
- AMMAR, S. B., ZOUARI, K., LEDUC, C. et M'BAREK, J. (2006). Caractérisation isotopique de la relation barrage-nappe dans le bassin du Merguellil (Plaine de Kairouan, Tunisie centrale). *Hydrological Sciences Journal*, 51(2):272–284.
- ANDRÉASSIAN, V., LE MOINE, N., PERRIN, C., RAMOS, M., OUDIN, L., MATHEVET, T., LERAT, J. et BERTHET, L. (2012a). All that glitters is not gold : the case of calibrating hydrological models. *Hydrological Processes*, 26:2206–2210.
- ANDRÉASSIAN, V., LERAT, J., LE MOINE, N. et PERRIN, C. (2012b). Neighbors : Nature's own hydrological models. *Journal of Hydrology*, 414–415:49–58.
- ANDRÉASSIAN, V., PARENT, E. et MICHEL, C. (2003). A distribution-free test to detect gradual changes in watershed behavior. *Water Resources Research*, 39(9):1252.
- ANDRÉASSIAN, V., PERRIN, C., BERTHET, L., LE MOINE, N., LERAT, J., LOUMAGNE, C., OUDIN, L., MATHEVET, T., RAMOS, M. et VALÉRY, A. (2009). HESS Opinions "Crash tests for a standardized evaluation of hydrological models". 13:1757–1764.
- ANDRÉASSIAN, V., PERRIN, C. et MICHEL, C. (2004). Impact of imperfect potential evapotranspiration knowledge on the efficiency and parameters of watershed models. *Journal of Hydrology*, 286(1-4):19–35.
- ANDRÉASSIAN, V., TANGARA, M. et MURAZ, J. (2001). Evaluer l'impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants : méthodologie et premiers résultats fondés sur les données de l'IFN. *Revue Forestière Française*, LIII(3-4):475–480.

- ARTELIA EAU ET ENVIRONNEMENT et MAISON RÉGIONALE DE L'EAU (2012). Etudes d'estimation des volumes prélevables globaux - sous bassin versant de la Galaure (in french). Rapport technique, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse.
- ASSANI, A. A., GRAVEL, E., BUFFIN-BÉLANGER, T. et ROY, A. G. (2005). Impacts des barrages sur les débits annuels minimums en fonction des régimes hydrologiques artificialisés au Québec (Canada). *Revue des sciences de l'eau*, 18(1):103–127.
- ASSANI, A. A., PETIT, F. et MABILLE, G. (1999). Analyse des débits de la Wache aux barrages de Butgenbach et de Robertville (Ardenne belge). *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 36:17–30.
- BALDASSARRE, G. D. et MONTANARI, A. (2009). Uncertainty in river discharge observations : a quantitative analysis. *Hydrological and Earth System Sciences*, 13:913–921.
- BAO, Z., ZHANG, J., WANG, G., FU, G., HE, R., YAN, X., JIN, J., LIU, Y. et ZHANG, A. (2012). Attribution for decreasing streamflow of the Haihe River basin, northern China : Climate variability or human activities? *Journal of Hydrology*, 460-461:117–129.
- BARAN, P. (2011). Circulaire relative à l'application de l'article L. 214- 18 du code de l'environnement, modifié par la loi n°2006-1772 du 30 décembre 2006 dite loi sur l'eau et les milieux aquatiques - Annexe 2 : Les Méthodes d'aide à la détermination de valeur de débit Minimum. Rapport technique NOR : DEVL1117584C, Ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement - ONEMA.
- BCEOM (1999). Etude du bilan hydrologique du Lac-réservoir Seine et étude hydraulique des canaux de restitution. Rapport HEN 90723 M, Les Grands Lacs de Seine, Paris.
- BENKE, A. C. (1990). A Perspective on America's Vanishing Streams. *Journal of the North American Benthological Society*, 9(1):77–88.
- BEVEN, K. (2000). Uniqueness of place and process representations in hydrological modelling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 4(2):203–213.
- BIEMANS, H., HADDELAND, I., KABAT, P., LUDWIG, F., HUTJES, R. W. A., HEINKE, J., VON BLOH, W. et GERTEN, D. (2011). Impact of reservoirs on river discharge and irrigation water supply during the 20th century. *Water Resources Research*, 47(3): W03509.

- BIRKEL, C., SOULSBY, C., ALI, G. et TETZLAFF, D. (2014). Assessing the cumulative impacts of hydropower regulation on the flow characteristics of a large atlantic salmon river system. *River Research and Applications*, 30(4):456–475.
- BLANCHON, D. (2005). Enjeux territoriaux et impacts environnementaux des transferts d'eau inter bassins en Afrique du Sud. *La Houille Blanche*, (5):97–100.
- BLÖSCHL, G. (2005). On the Fundamentals of Hydrological Sciences (Chapter 1). *In Encyclopedia of Hydrological Sciences*, volume 1, pages 3–12. Malcolm G. Anderson.
- BOSMANS, J. H. C., van BEEK, L. P. H., SUTANUDJAJA, E. H. et BIERKENS, M. F. P. (2017). Hydrological impacts of global land cover change and human water use. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(11):5603–5626.
- BOTAI, C., BOTAI, O. J., MUCHURU, S. et NGWANA, I. (2015). Hydrometeorological Research in South Africa : A Review. *Water*, 7(4):1580–1594.
- BOULEAU, G. et PONT, D. (2015). Did you say reference conditions? Ecological and socio-economic perspectives on the European Water Framework Directive. *Environmental Science & Policy*, 47:32–41.
- BOURGIN, F. (2014). *Comment quantifier l'incertitude prédictive en modélisation hydrologique ? Travail exploratoire sur un grand échantillon de bassins versants*. Thèse de doctorat, Irstea, AgroParisTech.
- BOURGIN, F., ANDRÉASSIAN, V., PERRIN, C. et OUDIN, L. (2015). Transferring global uncertainty estimates from gauged to ungauged catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(5):2535–2546.
- BOURGIN, P.-Y., LOBLIGEOIS, F., PESCHARD, J., ANDRÉASSIAN, V., LE MOINE, N., CORON, L., PERRIN, C., RAMOS, M. et KHALIFA, A. (2012). Description des caractéristiques morphologiques, climatiques et hydrologiques de 4436 bassins versants français. Guide d'utilisation de la base de données hydro-climatique, Cemagref, Antony.
- BRL INGÉNIERIE (2011). Détermination des volumes prélevables maximum sur le bassin versant de la Cèze. Rapport de phase 2 : Analyse de la ressource en eau. Rapport final (in french). Rapport technique, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse.

- BRL INGÉNIERIE (2012). Etudes d'estimation des volumes prélevables globaux - Sous bassin versant de l'Yzeron - Phase 3 : Impact des prélèvements et quantification des ressources existantes (in french). Rapport technique, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse.
- BRL INGÉNIERIE (2013). Etudes d'estimation des volumes prélevables globaux - Sous bassin versant du Garon - Phase 1 - Rapport B (in french). Rapport technique, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse.
- BRL INGÉNIERIE (2014a). Etude de détermination des volumes prélevables - Sous bassin versant des 3 rivières - Rapport de phase 3. Rapport technique, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse.
- BRL INGÉNIERIE (2014b). Etude de la gestion quantitative des débits du Rhône en période de basses eaux. Phase 2 – Etude des étiages historiques, reconstitution des débits désinfluencés et évaluation de l'empreinte des influences anthropiques sur les débits du Rhône. Document B - Rapport principal de mission 2 : Reconstitution des débits désinfluencés et évaluation des empreintes des influences anthropiques sur les débits. Rapport technique, Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse.
- BRL INGÉNIERIE (2015). Gestion quantitative de la ressource en eau du bassin versant des Gardons - Etude des volumes prélevables (in french). Rapport technique, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse.
- BROCHET, P. (1978). La sécheresse 1976 : aspects climatologiques. *In Sécheresse 1976 – Aspects climatique, hydrologique et hydrogéologique. Techniques de prévision.*, volume Deuxième série – section III – numéro 3 de *Bulletin du BRGM*.
- BROWN, A. E., ZHANG, L., MCMAHON, T. A., WESTERN, A. W. et VERTESSY, R. A. (2005). A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology*, 310(1-4):28–61.
- BRÁZDIL, R., PFISTER, C., WANNER, H., VON STORCH, H. et LUTERBACHER, J. (2005). Historical Climatology In Europe – The State Of The Art. *Climatic Change*, 70(3):363–430.

- BULLOCK, A., GUSTARD, A., IRVING, K. et YOUNG, A. (1991). Low Flow Estimation in Artificially Influenced Catchments. Rapport technique NRA R&D Project 257, NRA, Institute of Hydrology.
- BUREAU DU COMITÉ DU BASSIN RHÔNE-MÉDITERRANÉE (2011). Méthodes des études volumes prélevables. Rapport technique Scéance du 10 juin 2011 - Point IV, Bureau du Comité du Bassin Rhône-Méditerranée.
- BUREAU OF METEOROLOGY (2012). *Australian Water Information Dictionary - Water status : National Water Account 2012-2015 - line item 1.3 - regulated river*, volume <http://www.bom.gov.au/water>.
- BUREAU OF METEOROLOGY (2018). *Australian Landscape Water Balance - Evaporation*, volume <http://www.bom.gov.au/water/landscape>.
- BURN, D. H., HANNAFORD, J., HODGKINS, G. A., WHITFIELD, P. H., THORNE, R. et MARSH, T. (2012). Reference hydrologic networks II. Using reference hydrologic networks to assess climate-driven changes in streamflow. *Hydrological Sciences Journal*, 57(8):1580–1593.
- CABINET REILÉ (2012). Etude de détermination des volumes prélevables dans le sous-bassin de la Savoureuse - Rapport d'étape phase III (in french). Rapport technique, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse.
- CAMPOS, J. N. B., NASCIMENTO, L. S. V., de CARVALHO STUDART, T. M. et BARCELOS, D. G. (2004). Desvios nas estimativas de vazões regularizadas resultantes da representação das relações cota x area volume por equações matematicas. page 9, São Paulo, Brasil. IAHR AIPH.
- CATALOGNE, C. (2012). *Amélioration des méthodes de prédétermination des débits de références d'étiage en sites peu ou pas jaugés*. PhD Thesis, Université de Grenoble - Istea Lyon.
- CATALOGNE, C. et SAUQUET, E. (2012). Cartographie des débits de référence - Interpolation des caractéristiques d'étiage. Partenariat 2011 – Domaine Hydro-morphologie et altérations physiques des hydrosystèmes continentaux - Action Prédétermination des étiages, Irstea & Onema.

- CEREG INGÉNIERIE (2011). Etudes d'estimation des volumes prélevables globaux - Sous bassin versant de l'Asse - Rapport définitif phase 3 (in french). Rapport technique M09067, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse.
- CEREG INGÉNIERIE et BERGA SUD (2015). Elaboration du schéma directeur de la ressource en eau sur le bassin de l'Hérault - Détermination des volumes maximums prélevables - Reconstitution de l'hydrologie influencée et naturelle (phase 2) (in french). Rapport technique M11169, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse.
- CEREG INGÉNIERIE, IDÉE EAUX, LISODE, HYDRIAD et BRIGITTE LAMBEY (2013). Etudes d'estimation des volumes prélevables globaux - Sous bassin versant du Lez - Rapport de phase 3 (in french). Rapport technique, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse.
- CHANG, J., WANG, Y., ISTANBULLUOGLU, E., BAI, T., HUANG, Q., YANG, D. et HUANG, S. (2015). Impact of climate change and human activities on runoff in the Weihe River Basin, China. *Quaternary International*, 380-381:169–179.
- CHASE, T. N., PIELKE SR, R. A., KITTEL, T. G. F., NEMANI, R. R. et RUNNING, S. W. (2000). Simulated impacts of historical land cover changes on global climate in northern winter. *Climate Dynamics*, 16(2-3):93–105.
- CHAUVEAU, M., CHAZOT, S., PERRIN, C., BOURGIN, P.-Y., SAUQUET, E., VIDAL, J.-P., ROUCHY, N., MARTIN, E., DAVID, J., NOROTTE, T., MAUGIS, P. et DE LACAZE, X. (2013). Quels impacts des changements climatiques sur les eaux de surface en France à l'horizon 2070 ? *La Houille Blanche*, (4):5–15.
- CHAZOT, S., PERRIN, C., VIDAL, J.-P., SAUQUET, E., CHAUVEAU, M. et ROUCHY, N. (2012). Explore 2070 - Hydrologie de surface - Partie B2b : Hydrologie de la Métropole. Rapport technique, BRL Ingénierie - Irstea - Météo France.
- CHOCAT, B. (2014). Les barrages sont-ils un bien pour l'environnement ? Méli Mélo - Démêlons les fils de l'eau, https://www.graie.org/eaumelimelo/IMG/pdf/barrages_et_continuite_def_cle41d152.pdf.
- CIPRIANI, T. et SAUQUET, E. (2014). Altération de l'hydrologie des cours d'eau français par des ouvrages hydrauliques. Rapport final, Irstea & Onema.

- COLLINS, M., KNUTTI, R., ARBLASTER, J., DUFRESNE, J.-L., FICHEFET, T., FRIEDLINGSTEIN, P., GAO, X., GUTOWSKI, W. J., JOHNS, T., KRINNER, G., SHONGWE, M., TEBALDI, C., WEAVER, A. J. et WEHNER, M. (2013). Long-term Climate Change : Projections, Commitments and Irreversibility. In *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis*, pages 1029–1136. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press édition.
- CONSTANTZ, J. et ESSAID, H. (2007). Influence of groundwater pumping on streamflow restoration following upstream dam removal. *Hydrological Processes*, 21(21):2823–2834.
- COOPER, R. (2004). Natural flow estimates for streams in the Klamath basin. Rapport technique Report SW 04 – 001, State of Oregon, Water Resources Department.
- CORON, L. (2013). *Les modèles hydrologiques conceptuels sont-ils robustes face à un climat en évolution ? Diagnostic sur un échantillon de bassins versants français et australiens*. PhD Thesis, AgroParisTech.
- CORON, L., ANDRÉASSIAN, V., PERRIN, C., LERAT, J., VAZE, J., BOURQUI, M. et HENDRICKX, F. (2012). Crash testing hydrological models in contrasted climate conditions : An experiment on 216 Australian catchments. *Water Resources Research*, 48(5):W05552.
- CORON, L., DELAIGUE, O., THIREL, G., PERRIN, C. et MICHEL, C. (2018). airGR : Suite of GR Hydrological Models for Precipitation-Runoff Modelling. R package version 2018. <https://CRAN.R-project.org/package=airGR>.
- CORON, L., THIREL, G., DELAIGUE, O., PERRIN, C. et ANDRÉASSIAN, V. (2017). The suite of lumped GR hydrological models in an R package. *Environmental Modelling & Software*, 94:166–171.
- CROCHEMORE, L., ISBERG, K., PIMENTEL, R., PINEDA, L., HASAN, A. et ARHEIMER, B. (2019). Lessons learnt from checking the quality of openly accessible river flow data worldwide. *Hydrological Sciences Journal*, 65(5):699–711.

- CROCHEMORE, L., PERRIN, C., ANDRÉASSIAN, V., EHRET, U., SEIBERT, S. P., GRIMALDI, S., GUPTA, H. et PATUREL, J. E. (2015). Comparing expert judgement and numerical criteria for hydrograph evaluation. *Hydrological Sciences Journal*, 60(3):402–423.
- CSIRO (2008). Water availability in the Murray-Darling Basin. A report to the Australian Government from the CSIRO Murray-Darling Basin Sustainable Yields Project. Rapport technique, CSIRO, Australia.
- DALTON, J. (1802). Experimental essays on the constitution of mixed gases. *Manchester Lit. Philos. Soc. Mem. Proc*, 5:556–602.
- DAVIS, J. (2015). The 30-year 'baseline' and the reality of climate change. *Weather*, 70(6):190–190.
- DAVTALAB, R., MIRCHI, A., KHATAMI, S., GYAWALI, R., MASSAH, A., FARAJZADEH, M. et MADANI, K. (2017). Improving Continuous Hydrologic Modeling of Data-Poor River Basins Using Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System : Case Study of Karkheh River Basin. *Journal of Hydrologic Engineering*, 22(8):05017011.
- DE GIROLAMO, A. M., LO PORTO, A., PAPPAGALLO, G. et GALLART, F. (2015). Assessing flow regime alterations in a temporary river - The River Celone case study. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 63(3):263–272.
- DE LAVENNE, A. (2013). *Modélisation hydrologique à base géomorphologique de bassins versants non jaugés par régionalisation et transposition d'hydrogramme*. PhD Thesis, AGROCAMPUS Ouest.
- DE LAVENNE, A., THIREL, G., ANDRÉASSIAN, V., PERRIN, C. et RAMOS, M.-H. (2016). Spatial variability of the parameters of a semi-distributed hydrological model. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 373:87–94.
- DEGU, A. M. et HOSSAIN, F. (2012). Investigating the mesoscale impact of artificial reservoirs on frequency of rain during growing season : dams and rainfall frequency. *Water Resources Research*, 48(5):W05510.

- DELAIGUE, O., GÉNOT, B., LEBECHEREL, L., BRIGODE, P. et BOURGIN, P.-Y. (2018). *Base de données hydroclimatiques observées à l'échelle de la France*, volume <https://webgr.irstea.fr/base-de-donnees>.
- DELUS, C. L., LAAHA, G., KOFFLER, D., STAHL, K., HISDAL, H., PRUDHOMME, C., FENDEKOVA, M. et JAKUBOWSKI, W. (2014). Towards a pan-European assessment of low flow indices. *AIHS Publ.* volume 362, pages 348–354, Montpellier, France.
- DESCONNETS, J., DIALLO, A., TRAORE, O., CHENE, J. et MORIN, G. (1998). Exemple d'application du modèle CEQUEAU-ONU : Évaluation de l'impact des aménagements sur les écoulements de la rivière Nakambé, Burkina Faso. *IAHS-AISH Publication*, 252:375–385.
- DESPAX, A. (2016). *Incertitude des mesures de débit des cours d'eau au courantomètre. Amélioration des méthodes analytiques et apports des essais interlaboratoires*. Thèse de doctorat, Ecole Doctorale Terre, Univers, Environnement ; Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE) en collaboration avec EDF-DTG.
- DETTINGER, M. D. et DIAZ, H. F. (2000). Global Characteristics of Stream Flow Seasonality and Variability. *Journal of Hydrometeorology*, 1:289–310.
- DEVAK, M. et DHANYA, C. T. (2017). Sensitivity analysis of hydrological models : review and way forward. *Journal of Water and Climate Change*, 8(4):557–575.
- DEWANDEL, B., GANDOLFI, J.-M., DE CONDAPPA, D. et AHMED, S. (2008). An efficient methodology for estimating irrigation return flow coefficients of irrigated crops at watershed and seasonal scale. *Hydrological Processes*, 22(11):1700–1712.
- DÖLL, P. et ZHANG, J. (2010). Impact of climate change on freshwater ecosystems : a global-scale analysis of ecologically relevant river flow alterations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(5):783–799.
- DONG, N., YU, Z., YANG, C., YANG, M. et WENZHUO, W. (2019). Hydrological impact of a reservoir network in the upper Gan River Basin, China. *Hydrological Processes*, 33(12):1709–1723.

- DORCHIES, D., THIREL, G., JAY-ALLEMAND, M., CHAUVEAU, M., DEHAY, F., BOURGIN, P.-Y., PERRIN, C., JOST, C., RIZZOLI, J.-L., DEMERLIAC, S. et THÉPOT, R. (2014). Climate change impacts on multi-objective reservoir management : case study on the Seine River basin, France. *International Journal of River Basin Management*, 12(3): 265–283.
- DUNN, S. M. et FERRIER, R. C. (1999). Natural flow in managed catchments. A case study of a modelling approach. *Water Research*, 33(3):621–630.
- DUTTA, D., KIM, S., HUGHES, J., VAZE, J. et YANG, A. (2015). AWRA-R v5.0 Technical Report. Rapport technique, CSIRO Land and Water, Australia.
- DYCK, S. (1976). *Applied Hydrology, part I. Calculation and regulation of the discharge of streams*. Berlin, veb verlag für bauwesen (Éditeur) édition.
- DYNESIUS, M. et NILSSON, C. (1994). Fragmentation and Flow Regulation of River Systems in the Northern Third of the World. *Science*, 266(5186):753–762.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (2015). *Definition and Characteristics of Low Flows from DFLOW - Design Flows : Definitions and Methods*. <https://www.epa.gov/waterdata/definition-and-characteristics-low-flows-dflow#methods>.
- EUROPEAN COMMISSION (1997). Avis du Comité des régions sur la "Communication de la Commission au Conseil et au Parlement européen sur la politique communautaire dans le domaine de l'eau". *Journal officiel des Communautés européennes C 34/30*, pages 30–33.
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2007). CLC2006 technical guidelines. EEA technical report No 17.
- FABRE, J., DENIS, R., DEZETTER, A. et GROUILLET, B. (2016). Reducing the gap between water demand and availability under climate and water use changes : assessing the effectiveness and robustness of adaptation. *La Houille Blanche*, (6):21–29.
- FALCONE, J. A., CARLISLE, D. M., WOLOCK, D. M. et MEADOR, M. R. (2010). Gages : A stream gage database for evaluating natural and altered flow conditions in the conterminous United States. *Ecology*, 91(2):621–621.

- FANTIN-CRUZ, I., PEDROLLO, O., GIRARD, P., ZEILHOFER, P. et HAMILTON, S. K. (2015). Effects of a diversion hydropower facility on the hydrological regime of the Correntes River, a tributary to the Pantanal floodplain, Brazil. *Journal of Hydrology*, 531:810–820.
- FERNÁNDEZ, J. A., MARTÍNEZ, C. et MAGDALENO, F. (2012). Application of indicators of hydrologic alterations in the designation of heavily modified water bodies in Spain. *Environmental Science & Policy*, 16:31–43.
- FOWLER, K., MORDEN, R., LOWE, L. et NATHAN, R. (2015). Advances in assessing the impact of hillside farm dams on streamflow. *Australasian Journal of Water Resources*, 19(2):96–108.
- GASH, J. H. C. et NOBRE, C. A. (1997). Climatic Effects of Amazonian Deforestation : Some Results from ABRACOS. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(5): 823–830.
- GATTI, G., BIANCHI, C. N., PARRAVICINI, V., ROVERE, A., PEIRANO, A., MONTEFALCONE, M., MASSA, M. et MORRI, C. (2015). Ecological Change, Sliding Baselines and the Importance of Historical Data : Lessons from Combing Observational and Quantitative Data on a Temperate Reef Over 70 Years. *Plos One*, 10(2).
- GIAMBELLUCA, T. W. (2005). 189 : Land Use and Water Resources Under a Changing Climate. In *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, volume 5, pages 2931–2937. Malcolm G. Anderson, Wiley-Blackwell.
- GINGER ENVIRONNEMENT & INFRASTRUCTURES (2012a). Etude de détermination des volumes prélevables - Bassin versant de l'Agly - Phases 1, 2 et 3 - Bilan et impact des prélèvements ; Quantification des ressources (in french). Rapport technique, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse.
- GINGER ENVIRONNEMENT & INFRASTRUCTURES (2012b). Etude de détermination des volumes prélevables - Bassin versant du Vidourle - Phase 1, 2 et 3 (in french). Rapport technique, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse.

- GIUNTOLI, I. et RENARD, B. (2010). Identification des impacts hydrologiques du changement climatique : constitution d'un réseau de référence pour la surveillance des étiages. Partenariat 2010 - Hydrologie des étiages, Evolution des régimes hydrologiques, Cemagref et ONEMA.
- GODET, L. et THOMAS, A. (2013). Three centuries of land cover changes in the largest French Atlantic wetland provide new insights for wetland conservation. *Applied Geography*, 42:133–139.
- GOLUBEV, G. N. et BISWAS, A. K. (1984). Large-scale water transfers : emerging environmental and social issues. *International Journal of Water Resources Development*, 2(2-3):1–5.
- GRAF, W. L. (1999). Dam nation : A geographic census of American dams and their large-scale hydrologic impacts. *Water Resources Research*, 35(4):1305–1311.
- GU, C., MU, X., GAO, P., ZHAO, G., SUN, W. et LI, P. (2017). Effects of climate change and human activities on runoff and sediment inputs of the largest freshwater lake in China, Poyang Lake. *Hydrological Sciences Journal*, 62(14):2313–2330.
- GUO, Y., LI, Z., AMO-BOATENG, M., DENG, P. et HUANG, P. (2014). Quantitative assessment of the impact of climate variability and human activities on runoff changes for the upper reaches of Weihe River. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 28(2):333–346.
- GUPTA, H. V., KLING, H., YILMAZ, K. K. et MARTINEZ, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria : Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1–2):80–91.
- GUPTA, H. V., PERRIN, C., BLÖSCHL, G., MONTANARI, A., KUMAR, R., CLARK, M. et ANDRÉASSIAN, V. (2014). Large-sample hydrology : a need to balance depth with breadth. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(2):463–477.
- GUSTARD, A., BULLOCK, A. et DIXON, J. M. (1992). *Low flow estimation in the United Kingdom*. Numéro 108 de Report / Institute of Hydrology. Institute of Hydrology, Wallingford. OCLC : 730961823.

- HABERLIE, A. M., ASHLEY, W. S., FULTZ, A. J. et EAGAN, S. M. (2016). The effect of reservoirs on the climatology of warm-season thunderstorms in Southeast Texas, USA : reservoirs and thunderstorms. *International Journal of Climatology*, 36(4):1808–1820.
- HART, D. D., JOHNSON, T. E., BUSHAW-NEWTON, K. L., HORWITZ, R. J., BEDNAREK, A. T., CHARLES, D. F., KREEGER, D. A. et VELINSKY, D. J. (2002). Dam removal : challenges and opportunities for ecological research and river restoration. *AIBS Bulletin*, 52(8):669–682.
- HERNÁNDEZ-HENRÍQUEZ, M. A., MLYNOWSKI, T. J. et DÉRY, S. J. (2010). Reconstructing the natural streamflow of a regulated river : A case study of la grande rivière, Québec, Canada. *Canadian Water Resources Journal*, 35(3):301–316.
- HIEN, P. D. et OTHERS (1996). Application of isotope tracer techniques for assessing the seepage of the hydropower dam at Tri An, South Vietnam. *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*, 206(2):295–303.
- HIRSCH, R. M. (1979). An Evaluation of Some Record Reconstruction Techniques. *Water Resources Management*, 15(6):1781–1790.
- HIRSCH, R. M. (1982). A comparison of four streamflow record extension techniques. *Water Resources Research*, 18(4):1081–1088.
- HOLMES, M. G. R., YOUNG, A. R., GUSTARD, A. et GREW, R. (2002). A region of influence approach to predicting flow duration curves within ungauged catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(4):721–731.
- HRACHOWITZ, M., SAVENIJE, H., BLÖSCHL, G., MCDONNELL, J., SIVAPALAN, M., POMEROY, J., ARHEIMER, B., BLUME, T., CLARK, M., EHRET, U., FENICIA, F., FREER, J., GELFAN, A., GUPTA, H., HUGHES, D., HUT, R., MONTANARI, A., PANDE, S., TETZLAFF, D., TROCH, P., UHLENBROOK, S., WAGENER, T., WINSEMIUS, H., WOODS, R., ZEHE, E. et CUDENNEC, C. (2013). A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB)—a review. *Hydrological Sciences Journal*, 58(6):1198–1255.

- HU, Z., WANG, L., WANG, Z., HONG, Y. et ZHENG, H. (2015). Quantitative assessment of climate and human impacts on surface water resources in a typical semi-arid watershed in the middle reaches of the Yellow River from 1985 to 2006. *International Journal of Climatology*, 35(1):97–113.
- HUBERT, P., CARBONNEL, J. P. et CHAOUCHE, A. (1989). Segmentation des séries hydrométéorologiques - application à des séries de précipitations et de débits de l’Afrique de l’ouest. *Journal of Hydrology*, 110(3-4):349–367.
- HUGHES, D. A. (2019). A simple approach to estimating channel transmission losses in large South African river basins. *Journal of Hydrology : Regional Studies*, 25(100619).
- HUGHES, D. A. et MANTEL, S. K. (2010). Estimating the uncertainty in simulating the impacts of small farm dams on streamflow regimes in South Africa. *Hydrological Sciences Journal*, 55(4):578–592.
- HUO, Z., FENG, S., KANG, S., LI, W. et CHEN, S. (2008). Effect of climate changes and water-related human activities on annual stream flows of the Shiyang river basin in arid north-west China. *Hydrological Processes*, 22(16):3155–3167.
- HYDRATEC (2011). Actualisation de la base de données des débits journaliers ‘naturalisés’ - Phase 2. Rapport 26895- LME/TL.
- IRWIN, R. W., DICKINSON, W. T. et LAMMERS, W. (1975). Model for the determination of the natural streamflow of Venison Creek. *Canadian agricultural engineering*, 17(1):12–17.
- ISL (2011). Etude de détermination des volumes prélevables - Bassin versant du Doux - Rapport de phase 3 (in french). Rapport technique, Agence de l’Eau Rhône Méditerranée et Corse.
- JACOBSON, R. B. et GALAT, D. L. (2008). Design of a naturalized flow regime - an example from the Lower Missouri River, USA. *Ecohydrology*, 1:81–104.
- JIANG, S., REN, L., YONG, B., SINGH, V. P., YANG, X. et YUAN, F. (2011). Quantifying the effects of climate variability and human activities on runoff from the Laohahe basin in northern China using three different methods. *Hydrological Processes*, 25(16):2492–2505.

- JIN, X., XU, C.-Y., ZHANG, Q. et SINGH, V. (2010). Parameter and modeling uncertainty simulated by GLUE and a formal Bayesian method for a conceptual hydrological model. *Journal of Hydrology*, 383(3-4):147–155.
- JUSTON, J., SEIBERT, J. et JOHANSSON, P. O. (2009). Temporal sampling strategies and uncertainty in calibrating a conceptual hydrological model for a small boreal catchment. *Hydrological Processes*, 23(21):3093–3109.
- KENDALL, M. (1975). *Rank Correlation Methods*. Charles Griffin, London, 4ème édition édition.
- KENDY, E. et BREDEHOEFT, J. D. (2006). Transient effects of groundwater pumping and surface-water-irrigation returns on streamflow : transient effects of groundwater stress. *Water Resources Research*, 42(8):W08415.
- KIBLER, K., TULLOS, D. et KONDOLF, M. (2011). Evolving Expectations of Dam Removal Outcomes : Downstream Geomorphic Effects Following Removal of a Small, Gravel-Filled Dam. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 47(2):408–423.
- KIM, N. W., LEE, J. E. et KIM, J. T. (2012). Assessment of Flow Regulation Effects by Dams in the Han River, Korea, on the Downstream Flow Regimes Using SWAT. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 138(1):24–35.
- KIM, T. J. (2015). Generation of daily naturalized flow at ungaged control points. *Journal of Water Supply : Research and Technology - AQUA*, 64(3):354–364.
- KIM, T. J. et WURBS, R. A. (2011). Development of monthly naturalized flow using Water Rights Analysis Package (WRAP)-based methods. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15(7):1299–1307.
- KLEMES, V. (1986). Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, 31(1):13–24.
- KLING, H., FUCHS, M. et PAULIN, M. (2012). Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, 424-425:264–277.

- KNIGHTON, A. D. (1988). The impact of the Parangana Dam on the River Mersey, Tasmania. *Geomorphology*, 1(3):221–237.
- KONDOLF, G. M. et BATALLA, R. J. (2005). *Hydrological effects of dams and water diversions on rivers of Mediterranean-climate regions : examples from California*. Elsevier : Amsterdam.
- KOUSSIS, A. (1980). Comparison of Muskingum Method Difference Schemes. *Journal of the Hydraulics Division*, 106(5):925–929.
- KRISHNAMURTI, T. N., KISHTAWAL, C. M., LAROW, T. E., BACHIOCHI, D. R., ZHANG, Z., WILLIFORD, C. E., GADGIL, S. et SURENDRAN, S. (1999). Improved weather and seasonal climate forecasts from multimodel superensemble. *Science*, 285(5433):1548–1550.
- LAIZÉ, C. L. R., ACREMAN, M. C., SCHNEIDER, C., DUNBAR, M. J., HOUGHTON-CARR, H. A., FLÖRKE, M. et HANNAH, D. M. (2014). Projected flow alteration and ecological risk for pan-european rivers. *River Research and Applications*, 30(3):299–314.
- LAMB, R., GREAT BRITAIN, ENVIRONMENT AGENCY, JBA CONSULTING et CENTRE FOR ECOLOGY AND HYDROLOGY (GREAT BRITAIN) (2003). *River gauging station data quality classification (GSDQ)*. Environment Agency, Bristol. OCLC : 316409056.
- LEBECHEREL, L. (2015). *Sensibilité des calculs hydrologiques à la densité des réseaux de mesure hydrométrique et pluviométrique*. Thèse de doctorat, Irstea, AgroParisTech.
- LEBECHEREL, L., ANDRÉASSIAN, V. et PERRIN, C. (2016). On evaluating the robustness of spatial-proximity-based regionalization methods. *Journal of Hydrology*, 539:196–203.
- LEBLANC, M., TWEED, S., VAN DIJK, A. et TIMBAL, B. (2012). A review of historic and future hydrological changes in the Murray-Darling Basin. *Global and Planetary Change*, 80-81:226–246.
- LEHNER, B., VERDIN, K. et JARVIS, A. (2008). New global hydrography derived from spaceborne elevation data. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 89(10):93–104.

- LELEU, I., TONNELIER, I., PUECHBERTY, R., GOUIN, P., VIQUENDI, I., COBOS, L., FORAY, A., BAILLON, M. et NDIMA, P.-O. (2014). La refonte du système d'information national pour la gestion et la mise à disposition des données hydrométriques. *La Houille Blanche*, (1):25–32.
- LEOPOLD, L. B. et MADDOCK, T. (1953). The Hydraulic Geometry of Stream Channels and Some Physiographic Implications. USGS Numbered Series Professional Paper 252, Washington, D.C.
- LI, C.-z., WANG, H., LIU, J., YAN, D.-H., YU, F.-l. et ZHANG, L. (2010). Effect of calibration data series length on performance and optimal parameters of hydrological model. *Water Science and Technology*, 3(4):16.
- LI, L.-J., ZHANG, L., WANG, H., WANG, J., YANG, J.-W., JIANG, D.-J., LI, J.-Y. et QIN, D.-Y. (2007). Assessing the impact of climate variability and human activities on streamflow from the Wuding River basin in China. *Hydrological Processes*, 21(25):3485–3491.
- LI, S., XIONG, L., DONG, L. et ZHANG, J. (2013). Effects of the Three Gorges Reservoir on the hydrological droughts at the downstream Yichang station during 2003–2011. *Hydrological Processes*, 27(26):3981–3993.
- LITTLEWOOD, I. G. et MARSH, T. J. (1996). Re-assessment of the monthly naturalized flow record for the River Thames at Kingston since 1883, and the implications for the relative severity of historical droughts. *River Research and Applications*, 12(1):13–26.
- LIU, J. et HAN, D. W. (2010). Indices for calibration data selection of the rainfall-runoff model. *Water Resources Research*, 46:W04512.
- LIVNEH, B., ROSENBERG, E. A., LIN, C., NIJSSEN, B., MISHRA, V., ANDREADIS, K. M., MAURER, E. P. et LETTENMAIER, D. P. (2013). A long-term hydrologically based dataset of land surface fluxes and states for the conterminous United States : Update and extensions. *Journal of Climate*, 26(23):9384–9392.
- LYMBURNER, L., TAN, P., MUELLER, N., THACKWAY, R., LEWIS, A., THANKAPPAN, M., RANDALL, L., ISLAM, A. et SENARATH, U. (2011). The National Dynamic Land Cover Dataset - Record 2011/31. Technical Report, Geoscience Australia.

- MA, H., YANG, D., TAN, S. K., GAO, B. et HU, Q. (2010). Impact of climate variability and human activity on streamflow decrease in the Miyun Reservoir catchment. *Journal of Hydrology*, 389(3-4):317–324.
- MAECHLER, M., ROUSSEEUW, P., STRUYF, A., HUBERT, M. et HORNİK, K. (2018). *cluster : Cluster Analysis Basics and Extensions*, volume <https://cran.r-project.org/web/packages/cluster/cluster.pdf>.
- MAGAND, C. (2014a). Impact du réchauffement climatique sur les ressources en eau. Le cas de la Durance. *Découverte*, (390):16–23.
- MAGAND, C. (2014b). *Influence de la représentation des processus nivaux sur l'hydrologie de la Durance et sa réponse au changement climatique*. Thèse de Doctorat en Hydrologie, Université Pierre et Marie Curie.
- MAGILLIGAN, F. J. et NISLOW, K. H. (2005). Changes in hydrologic regime by dams. *Geomorphology*, 71(1-2):61–78.
- MAGIRL, C. S., HILLDALE, R. C., CURRAN, C. A., DUDA, J. J., STRAUB, T. D., DOMANSKI, M. et FOREMAN, J. R. (2014). Large-scale dam removal on the Elwha River, Washington, USA : Fluvial sediment load. *Geomorphology*, 246:669–686.
- MAHESHWARI, B. L., WALKER, K. F. et MCMAHON, T. A. (1995). Effects of regulation on the flow regime of the River Murray, Australia. *River Research and Applications*, 10(1):15–38.
- MANN, H. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13:245–259.
- MARGAT, J. et ANDRÉASSIAN, V. (2008). *L'eau*. Idées reçues. Le cavalier bleu édition.
- MATHEVET, T. (2005). *Quels modèles pluie-débit globaux au pas de temps horaire ? Développements empiriques et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants*. Thèse en sciences de l'eau, Irstea, ENGREF, Paris.
- MAUREL, F., LEPelletier, T., MOREAU, J., NOEUVEGLISE, C. et LANCELOT, B. (2008). Prospective assessment in water consumption-resources in Seine-Normandie basin. *La Houille Blanche*, (5):45–52.

- MCCULLY, P. (2001). A new order for river and society : the world commission on dams, and beyond. *In Silenced rivers. The ecology and politics of large dams.*, pages i – lxxii. Zed books.
- MCMILLAN, H., KRUEGER, T. et FREER, J. (2012). Benchmarking observational uncertainties for hydrology : rainfall, river discharge and water quality. *Hydrological Processes*, 26(26):4078–4111.
- MDBA (2010a). Guide to the proposed Basin Plan : Technical background. Rapport technique Volume 2, Murray–Darling Basin Authority, Canberra.
- MDBA (2010b). Water availability in the Murray-Darling Basin - An update of the CSIRO Murray-Darling Basin Sustainable Yields Assessment. Rapport technique 112/10, Murray-Darling Basin Authority.
- MEKONNEN, M. M. et HOEKSTRA, A. Y. (2012). The blue water footprint of electricity from hydropower. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(1):179–187.
- MITTAL, N., BHAVE, A. G., MISHRA, A. et SINGH, R. (2016). Impact of Human Intervention and Climate Change on Natural Flow Regime. *Water Resources Management*, 30:685 – 699.
- MOLÉNAT, J., HABETS, F., DOUEZ, O. et BURGER-LEENHARDT, D. (2016). Expertise scientifique collective sur l’impact cumulé des retenues - Chapitre III : Hydrologie - Hydrogéologie. Rapport, Irstea.
- MONTANARI, A., YOUNG, G., SAVENIJE, H., HUGHES, D., WAGENER, T., REN, L., KOUTSOYIANNIS, D., CUDENNEC, C., TOTH, E., GRIMALDI, S., BLÖSCHL, G., SIVAPALAN, M., BEVEN, K., GUPTA, H., HIPSEY, M., SCHAEFLI, B., ARHEIMER, B., BOEGH, E., SCHYMANSKI, S., DI BALDASSARRE, G., YU, B., HUBERT, P., HUANG, Y., SCHUMANN, A., POST, D., SRINIVASAN, V., HARMAN, C., THOMPSON, S., ROGGER, M., VIGLIONE, A., MCMILLAN, H., CHARACKLIS, G., PANG, Z. et BELYAEV, V. (2013). “Panta Rhei—Everything Flows” : Change in hydrology and society—The IAHS Scientific Decade 2013–2022. *Hydrological Sciences Journal*, 58(6):1256–1275.
- MORTON, F. I. (1983). Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology. *Journal of Hydrology*, 66(1-4):1–76.

- MPO (2013). Cadre d'évaluation des exigences relatives au débit écologique nécessaire pour soutenir les pêches au Canada. Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis. sci. 2013/017. Rapport technique.
- MUHAMMAD, A., STADNYK, T., UNDUCHÉ, F. et COULIBALY, P. (2018). Multi-Model Approaches for Improving Seasonal Ensemble Streamflow Prediction Scheme with Various Statistical Post-Processing Techniques in the Canadian Prairie Region. *Water*, 10(11):1604.
- MUSY, A. (2005). Cours d'Hydrologie Générale " e-drologie " - Chapitre 2 : le bassin versant et son complexe. <https://echo2.epfl.ch/e-drologie/>.
- MWEDZI, T., KATIYO, L., MUGABE, F. T., BERE, T., BANGIRA, C., MANGADZE, T. et KUPIKA, O. L. (2016). A spatial assessment of stream-flow characteristics and hydrologic alterations, post dam construction in the Manyame catchment, Zimbabwe. *Water SA*, 42(2):194–202.
- NAIK, P. K. et JAY, D. A. (2005). Estimation of Columbia River virgin flow : 1879 to 1928. *Hydrological Processes*, 19(9):1807–1824.
- NEWMAN, A. J., CLARK, M. P., SAMPSON, K., WOOD, A., HAY, L. E., BOCK, A., VIGER, R. J., BLODGETT, D., BREKKE, L., ARNOLD, J. R., HOPSON, T. et DUAN, Q. (2015). Development of a large-sample watershed-scale hydrometeorological data set for the contiguous USA : data set characteristics and assessment of regional variability in hydrologic model performance. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(1):209–223.
- NICOLLE, P., ANDRÉASSIAN, V. et SAUQUET, E. (2013). Blending neighbor-based and climate-based information to obtain robust low-flow estimates from short time series. *Water Resources Research*, 49(12):8017–8025.
- NOBERT, J. et JEREMIAH, J. (2012). Hydrological Response of Watershed Systems to Land Use/Cover Change. A Case of Wami River Basin. *The Open Hydrology Journal*, 6:78–87.

- NOWAK, C., MICHON, J., MORICE, E., HYPOLITE, B., CHÉRY, L., MAUCLERC, A., AUTERIVES, C., LEVEUGLE, F., COURAUD, G. et HOCQUET, C. (2014). Construction d'un dispositif de connaissance quantitative des usages de la ressource en eau fondé sur la BNPE. Fiche technique, ONEMA.
- LOUDIN, L., ANDRÉASSIAN, V., MATHEVET, T., PERRIN, C. et MICHEL, C. (2006). Dynamic averaging of rainfall-runoff model simulations from complementary model parameterizations. *Water Resources Research*, 42(7):W03413.
- LOUDIN, 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(3):W03413.
- LOUDIN, L., MICHEL, C. et ANCTIL, F. (2005). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model ? Part 1 - Can rainfall-runoff models effectively handle detailed potential evapotranspiration inputs? *Journal of Hydrology*, 303(1-4):275–289.
- PACHECO-GUERRERO, A., GOODRICH, D. C., GONZALEZ-TRINIDAD, J., JUNEZ-FERREIRA, H. E. et BAUTISTA-CAPETILLO, C. (2017). Flooding in ephemeral streams : incorporating transmission losses. *Journal of Maps*, 13(2):350–357.
- PAGANO, T. C. et SOROOSHIAN, S. (2005). 173 : Global Water Cycle (Fundamental, Theory, Mechanisms). In *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, volume 5, pages 2697–2711. Malcolm G. Anderson, Wiley-Blackwell (édition).
- PAGE, K., READ, A., FRAZIER, P. et MOUNT, N. (2005). The effect of altered flow regime on the frequency and duration of bankfull discharge : Murrumbidgee River, Australia. *River Research and Applications*, 21(5):567–578.
- PAGEAUD, D. et CARRÉ, C. (2009). La France vue par CORINE Land Cover, outil européen de suivi de l'occupation des sols. *Le Point Sur*, 10(Observation et statistiques):Commissariat général au développement durable.
- PAYAN, J. L. (2007). *Prise en compte de barrages-réservoirs dans un modèle global pluie-débit*. Thèse de doctorat, Cemagref, AgroParisTech.

- PECHLIVANIDIS, I. G., JACKSON, B. M., MCINTYRE, N. R. et WHEATER, H. S. (2011). Catchment scale hydrological modelling : a review of model types, calibration approaches and uncertainty analysis methods in the context of recent developments in technology and applications. *Global NEST journal*, 13(3):193–214.
- PERRIN, C., OUDIN, L., ANDRÉASSIAN, V., ROJAS-SERNA, C., MICHEL, C. et MATHEVET, T. (2007). Impact of limited streamflow data on the efficiency and the parameters of rainfall-runoff models. *Hydrological Sciences Journal*, 52(1):131–151.
- PETERS, D. L. et PROWSE, T. D. (2001). Regulation effects on the lower Peace River, Canada. *Hydrological Processes*, 15(16):3181–3194.
- PETERS, D. L., PROWSE, T. D., PIETRONIRO, A. et LECONTE, R. (2006). Flood hydrology of the Peace-Athabasca Delta, northern Canada. *Hydrological Processes*, 20(19):4073–4096.
- PETTITT, A. N. (1979). A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. *Applied Statistics*, 28(2):126.
- POFF, N. L., ALLAN, J. D., BAIN, M. B., KARR, J. R., PRESTEGAARD, K. L., RICHTER, B. D., SPARKS, R. E. et STROMBERG, J. C. (1997). The natural flow regime : A paradigm for river conservation and restoration. *BioScience*, 47(11):769–784.
- PONCELET, C. (2016). *Modélisation hydrologique en contexte non jaugé - Développements méthodologiques et conceptualisation*. PhD Thesis, Université Pierre et Marie Curie.
- PONCELET, C., MERZ, R., MERZ, B., PARAJKA, J., OUDIN, L., ANDRÉASSIAN, V. et PERRIN, C. (2017). Process-based interpretation of conceptual hydrological model performance using a multinational catchment set : MULTINATIONAL PERFORMANCE ASSESSMENT. *Water Resources Research*, 53(8):7247–7268.
- PRATS, J. et DANIS, P.-A. (2019). An epilimnion and hypolimnion temperature model based on air temperature and lake characteristics. *Knowledge & Management of Aquatic Ecosystems*, 420(8):24.
- PUSHPALATHA, R., PERRIN, C., MOINE, N. L. et ANDRÉASSIAN, V. (2012). A review of efficiency criteria suitable for evaluating low-flow simulations. *Journal of Hydrology*, 420-421:171–182.

- RAHMAN, S. et BOWLING, L. (2018). Streamflow Impacts of Management and Environmental Change in the Upper Wabash River Basin. *Journal of Hydrologic Engineering*, 24(3):N°05018034.
- RANTZ, S. E. (1982). Measurement and Computation of Strzamflow. Volume 1 : Measurement of Stage and Discharge. USGS Numbered Series 2175, U.S. G.P.O.
- RAUPACH, M. R., BRIGGS, P., HAVERD, V., KING, E., PAGET, M. et TRUDINGER, C. (2009). Australian water availability project (AWAP) : CSIRO Marine and Atmospheric Research component : final report for phase 3. CAWCR Technical Report No. 013, Bureau of Meteorology and CSIRO, Melbourne.
- REFSGAARD, J. C., van der SLUIJS, J. P., HØJBERG, A. L. et VANROLLEGHEM, P. A. (2007). Uncertainty in the environmental modelling process – A framework and guidance. *Environmental Modelling & Software*, 22(11):1543–1556.
- RIBOUST, P., THIREL, G., LE MOINE, N. et RIBSTEIN, P. (2019). Revisiting a simple degree-day model for integrating satellite data : implementation of SWE-SCA hystereses. *J. Hydrol. Hydromech*, 67(1):70–81.
- RICHTER, B. D., BAUMGARTNER, J., POWELL, J. et BRAUN, D. (1996). A Method for Assessing Hydrologic Alteration within Ecosystems. *Conservation Biology*, 10(4):1163–1174.
- RISQUES ET DÉVELOPPEMENT et MAISON RÉGIONALE DE L'EAU (2012). Etudes d'estimation des volumes prélevables globaux - Sous bassin versant des Usse - Rapport final (in french). Rapport technique, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse.
- R.J. BRANDES COMPANY, TEXAS COMMISSION ON ENVIRONMENTAL QUALITY, PARSONS, ESPEY CONSULTANTS, INC., RIVERSIDE TECHNOLOGY, INC. et CRESPO CONSULTING SERVICES, INC (2004). Water Availability Modeling for the Rio Grande Basin. Final Report to Texas Commission on Environmental Quality, Austin, Texas.
- ROJAS-SERNA, C., LEBECHEREL, L., PERRIN, C., ANDRÉASSIAN, V. et OUDIN, L. (2016). How should a rainfall-runoff model be parameterized in an almost ungauged catchment ? A methodology tested on 609 catchments. *Water Resources Research*, 52(6):4765–4784.

- ROUBICEK, A. J. (2010). Does the choice of climate baseline matter in ecological niche modelling? *Ecological Modelling*, 221(19):2280–2286.
- RYO, M., IWASAKI, Y., YOSHIMURA, C. et SAAVEDRA V, O. C. (2015). Evaluation of spatial pattern of altered flow regimes on a river network using a distributed hydrological model. *PLoS ONE*, 10(7).
- SAFEGE INGÉNIEURS CONSEILS (2011). Etude de détermination des volumes prélevables sur le bassin versant de la Tille - Rapport de Phase 3 (in french). Rapport technique Version finale (3.2), Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse.
- SAFT, M., WESTERN, A. W., ZHANG, L., PEEL, M. C. et POTTER, N. J. (2015). The influence of multiyear drought on the annual rainfall-runoff relationship : An Australian perspective. *Water Resources Research*, 51(4):2444–2463.
- SAUQUET, E. (2009). Imagine 2030 - Climat et aménagement de la Garonne : Quelles incertitudes sur la ressource en eau en 2030? Rapport de fin de contrat, Cemagref, Agence de l'Eau Adour Garonne.
- SAUQUET, E. et CATALOGNE, C. (2011). Guide méthodologique en vue de l'estimation du module d'un cours d'eau - Interpolation des modules : quelles évolutions depuis la note technique de 1987? Annexe 3 à la circulaire relative)à l'application de l'article L.214-18 du code de l'environnement. Circulaire NOR : DEVL1117584C.
- SCHREINER-MCGRAW, A. P. et VIVONI, E. R. (2018). On the Sensitivity of Hillslope Runoff and Channel Transmission Losses in Arid Piedmont Slopes. *Water Resources Research*, 54(7):4498–4518.
- SEGUIS, L., ALBERGEL, J. et BADER, J.-C. (1993). Construction de la courbe de remplissage d'un réservoir par bilan hydrologique et applications. *Hydrologie continentale*, 8(1):63–69.
- SHI, P., MA, X., HOU, Y., LI, Q., ZHANG, Z., QU, S., CHEN, C., CAI, T. et FANG, X. (2013). Effects of Land-Use and Climate Change on Hydrological Processes in the Upstream of Huai River, China. *Water Resources Management*, 27(5):1263–1278.
- SHIKLOMANOV, A. I. et LAMMERS, R. B. (2009). Record Russian river discharge in 2007 and the limits of analysis. *Environmental Research Letters*, 4(4):045015.

- SIRIWARDENA, L., FINLAYSON, B. et MCMAHON, T. (2006). The impact of land use change on catchment hydrology in large catchments : The Comet River, Central Queensland, Australia. *Journal of Hydrology*, 326(1-4):199–214.
- 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(6):857–880.
- SLABBERT, N. (2007). *The potential impact of an inter-basin water transfer on the Modder and Caledon river systems - Chapter 1 : An overview of inter-basin transfer schemes and the South African perspectives*. PhD Thesis, University of the Free State, Bloemfontein.
- SMAKHTIN, V. Y. (1999). Generation of natural daily flow time-series in regulated rivers using a non-linear spatial interpolation technique. *River Research and Applications*, 15(4):311–323.
- SOCIÉTÉ DU CANAL DE PROVENCE et ASCONIT CONSULTANTS (2012). Etudes d'estimation des volumes prélevables globaux - Sous bassin versant de la Berre - Rapport final phase 3 (in french). Rapport technique, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse.
- SOGREAH, ANTEAGROUP et PIERRE PARIS CONSULTANT (2011). Etude de détermination des volumes maximum prélevables - Phase 3 : Impact des prélèvements et quantification des ressources existantes (in french). Rapport technique 1741452, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse.
- SOGREAH CONSULTANTS et EPTEAU (2012). Etudes d'estimation des volumes prélevables globaux - Sous bassin versant de La Basse Vallée de l'Ain - Rapport de phase 3 (in french). Rapport technique, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse.
- SOLLEY, W. B., PIERCE, R. R. et PERLMAN, H. A. (1998). *Estimated use of water in the United States in 1995*. Numéro 1200 de U.S. Geological Survey circular. U.S. Dept. of the Interior, U.S. Geological Survey ; For sale by U.S. Geological Survey, Branch of Information Services, [Reston, Va.] : Denver, CO.

- STAHL, K., HISDAL, H., HANNAFORD, J., TALLAKSEN, L. M., van LANEN, H. A. J., SAUQUET, E., DEMUTH, S., FENDEKOVA, M. et JODAR, J. (2010). Streamflow trends in Europe : evidence from a dataset of near-natural catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14:2367–2382.
- STEDNICK, J. D. (1996). Monitoring the effects of timber harvest on annual water yield. *Journal of Hydrology*, 176(1-4):79–95.
- STEFFEN, W., BROADGATE, W., DEUTSCH, L., GAFFNEY, O. et LUDWIG, C. (2015). The trajectory of the Anthropocene : The Great Acceleration. *The Anthropocene Review*, 2(1):81–98.
- STEFFEN, W., GRINEVALD, J., CRUTZEN, P. et MCNEILL, J. (2011). The Anthropocene : conceptual and historical perspectives. *Philosophical Transactions of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369(1938):842–867.
- STODDARD, J. L., LARSEN, D. P., HAWKINS, C. P., JOHNSON, R. K. et NORRIS, R. H. (2006). Setting expectations for the ecological condition of streams : the concept of reference condition. *Ecological Applications*, 16(4):1267–1276.
- TARDIEU, H. (2008). Water scarcity, new challenges for the operational management of " sustainable infrastructures ". *La Houille Blanche*, 6:85–92.
- THEIS, C. V. (1941). The effect of a weel on the flow of a nearby stream. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 22(3):734–738.
- THORNTON, P. E., RUNNING, S. W. et WHITE, M. A. (1997). Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain. *Journal of Hydrology*, 190(3-4):214–251.
- TONGAL, H., DEMIREL, M. C. et MORADKHANI, H. (2017). Analysis of dam-induced cyclic patterns on river flow dynamics. *Hydrological sciences journal*, 62(4):626–641.
- TURC, L. (1954). Le bilan d'eau des sols : relation entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. *In Annales Agronomiques*, volume Série A, pages 491–595.
- UNESCO (1979). Map of the World Distribution of Arid Region. MAB Technical Notes, UNESCO, Paris, France.

- UNESCO, éditeur (2015). *Water for a sustainable world*. Numéro 6.2015 de The United Nations world water development report. UNESCO, Paris.
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY (2014). *NLCD 2006 Land Cover (2011 Edition, amended 2014) - National Geospatial Data Asset (NGDA) Land Use Land Cover*. U.S. Geological Survey, Sioux Falls, SD.
- USCB (2019). *International Programs*, volume <https://www.census.gov/programs-surveys/international-programs.html>.
- USGS et NATIONAL WATER-USE SCIENCE PROJECT (2019). *Water-Use Terminology*. https://www.usgs.gov/mission-areas/water-resources/science/water-use-terminology?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects.
- VALÉRY, A., ANDRÉASSIAN, V. et PERRIN, C. (2014). ‘As simple as possible but not simpler’ : What is useful in a temperature-based snow-accounting routine? Part 2 – Sensitivity analysis of the Cemaneige snow accounting routine on 380 catchments. *Journal of Hydrology*, 517:1176–1187.
- VANDERKELEN, I., van LIPZIG, N. P. M. et THIERY, W. (2018). Modelling the water balance of Lake Victoria (East Africa) – Part 1 : Observational analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(10):5509–5525.
- VAZE, J., POST, D., CHIEW, F., PERRAUD, J.-M., VINEY, N. et TENG, J. (2010). Climate non-stationarity – Validity of calibrated rainfall–runoff models for use in climate change studies. *Journal of Hydrology*, 394(3-4):447–457.
- VERDON-KIDD, D. C. et KIEM, A. S. (2009). Nature and causes of protracted droughts in southeast Australia : Comparison between the Federation, WWII, and Big Dry droughts. *Geophysical Research Letters*, 36(22).
- VIDAL, J. P. (2019). *Écrire l’hydrologie de l’Anthropocène*. Mémoire d’Habilitation à diriger des recherches, Université Grenoble Alpes, Ecole Doctorale Terre, Univers, Environnement.
- 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(11):1627–1644.

- VIENNOT, P. et LEDOUX, E. (2006). Influence de l'augmentation des prélèvements anthropiques en formation aquifères sur le fonctionnement hydrodynamique du bassin de la Seine. Rapport technique R060713PVIE, Ecole des Mines de Paris, Centre de Géosciences.
- VILLOCEL, A. (2002). Le système Neste Développement d'une approche citoyenne de la ressource en eau (The Neste system-Development of a citizen-based approach of water resources management). *La Houille Blanche*, 4-5(78-82).
- VINEY, N., MCMAHON, T. A. et CHIEW, F. H. S. (2010). Classification of streamflow datasets for Bureau of Meteorology national streamflow database. Rapport du Bureau of Meteorology.
- VÖRÖSMARTY, C. J. et SAHAGIAN, D. (2000). Anthropogenic Disturbance of the Terrestrial Water Cycle. *BioScience*, 50(9):753.
- WALLACE, R. B. et PAVVLOSKI, J. T. (1988). Assessing impacts of irrigation on streamflow. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 114(2):211–225.
- WANDERS, N. et WOOD, E. F. (2016). Improved sub-seasonal meteorological forecast skill using weighted multi-model ensemble simulations. *Environmental Research Letters*, 11(9):N°094007.
- WANG, G., XIA, J. et CHEN, J. (2009). Quantification of effects of climate variations and human activities on runoff by a monthly water balance model : A case study of the Chaobai River basin in northern China : Climate variations and human activities. *Water Resources Research*, 45(7):W00A11.
- WANG, J., HONG, Y., GOURLEY, J., ADHIKARI, P., LI, L. et SU, F. (2010). Quantitative assessment of climate change and human impacts on long-term hydrologic response : a case study in a sub-basin of the Yellow River, China. *International Journal of Climatology*, 30(14):2130–2137.
- WANG, W., SHAO, Q., YANG, T., PENG, S., XING, W., SUN, F. et LUO, Y. (2013). Quantitative assessment of the impact of climate variability and human activities on runoff changes : a case study in four catchments of the Haihe River basin, China. *Hydrological Processes*, 27(8):1158–1174.

- WARD (1990). *Principles of Hydrology - Systems diagram of the impacts of human activities on streamflow*. London, mcgraw-hill édition.
- WATERNSW (2015). *Glossary of water terms.*, volume <http://www.waternsw.com.au/customer-service/iwas/glossary>.
- WCD (2000). Barrages et développement. Un nouveau cadre pour la prise de décisions. Rapport de la commission mondiale des barrages, World Commission on Dams.
- WEINGARTNER, R. et ASCHWANDEN, H. (1994). Quantification des débits des cours d'eau des Alpes suisses et des influences anthropiques qui les affectent. *Revue de géographie alpine*, 82(2):45–57.
- WEN, L. (2009). Reconstruction natural flow in a regulated system, the Murrumbidgee River, Australia, using time series analysis. *Journal of Hydrology*, 364(3-4):216–226.
- WESTERBERG, I. K. et MCMILLAN, H. K. (2015). Uncertainty in hydrological signatures. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(9):3951–3968.
- WHEATER, H. (2008). An introduction to the workshop. In *Modelling hydrological processes in arid and semi-arid areas*, International Hydrology Series, pages 1–20. Cambridge University Press.
- WHITFIELD, P. H., BURN, D. H., HANNAFORD, J., HIGGINS, H., HODGKINS, G. A., MARSH, T. et LOOSER, U. (2012). Reference hydrologic networks I. The status and potential future directions of national reference hydrologic networks for detecting trends. *Hydrological Sciences Journal*, 57(8):1562–1579.
- WINTER, T. C. (1981). Uncertainties in estimating the water balance of lakes. *Journal of the American Water Resources Association*, 17(1):82–115.
- WINTON, R. S., CALAMITA, E. et WEHRLI, B. (2019). Reviews and syntheses : Dams, water quality and tropical reservoir stratification. *Biogeosciences*, 16:1657–1671.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (2008). Manual on Low-flow Estimation and Prediction. Operational Hydrology Report No.50.

- WU, F. C., CHANG, C. F. et SHIAU, J. T. (2015). Assessment of flow regime alterations over a spectrum of temporal scales using wavelet-based approaches. *Water Resources Research*, 51(5):3317–3338.
- WURBS, R. A. (2006). Methods for developing naturalized monthly flows at gaged and ungaged sites. *Journal of Hydrologic Engineering*, 11(1):55–64.
- WWAP (2009). The United Nations World Water Development Report 3 : Water in a changing world. Rapport technique, Paris : UNESCO & London : Earthscan.
- WYRICK, J. R., RISCHMAN, B. A., BURKE, C. A., MCGEE, C. et WILLIAMS, C. (2009). Using hydraulic modeling to address social impacts of small dam removals in southern New Jersey. *Journal of Environmental Management*, 90:S270–S278.
- YE, B., YANG, D. et KANE, D. L. (2003). Changes in Lena River streamflow hydrology : Human impacts versus natural variations. *Water Resources Research*, 39(7):1200.
- YIN, J., HE, F., XIONG, Y. J. et QIU, G. Y. (2017). Effects of land use/land cover and climate changes on surface runoff in a semi-humid and semi-arid transition zone in northwest China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(1):183–196.
- YOUNG, A., GREW, R. et HOLMES, M. (2003). Low Flows 2000 : a national water resources assessment and decision support tool. *Water Science and Technology*, 48(10): 119–126.
- YUAN, X., ZHANG, M., WANG, L. et ZHOU, T. (2017). Understanding and seasonal forecasting of hydrological drought in the Anthropocene. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(11):5477–5492.
- ZHAN, C., NIU, C., SONG, X. et XU, C. (2013). The impacts of climate variability and human activities on streamflow in Bai River basin, northern China. *Hydrology Research*, 44(5):875.
- ZHANG, L., CHENG, L., CHIEW, F. et FU, B. (2018). Understanding the impacts of climate and landuse change on water yield. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 33:167–174.

- ZHANG, L., NAN, Z., XU, Y. et LI, S. (2016). Hydrological Impacts of Land Use Change and Climate Variability in the Headwater Region of the Heihe River Basin, Northwest China. *PLOS ONE*, 11(6):e0158394.
- ZHANG, Y., VAZE, J., CHIEW, F. H., TENG, J. et LI, M. (2014). Predicting hydrological signatures in ungauged catchments using spatial interpolation, index model, and rainfall–runoff modelling. *Journal of Hydrology*, 517:936–948.
- ZHANG, Y. Q. et CHIEW, F. H. S. (2009). Evaluation of regionalisation methods for predicting runoff in ungauged catchments in southeast Australia. *In 18th World IMACS Congress and MODSIM09 International Congress on Modelling and Simulation*, pages 3442–3448, Australia. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand.

Annexes

A

Liste des barrages de l'étude

Liste des barrages de l'étude

| Ouvrages | Pays | Construction | Mise en service | Volume [hm3] | Bassin amont [km2] | Crue | Electricité | Irrigation | AEP |
|----------------|------|--------------|-----------------|--------------|--------------------|------|-------------|------------|-----|
| Wyangala | AU | 1928 | 1935 | 1 220 | 8 070 | oui | oui | oui | oui |
| Blowering | AU | 1964 | 1968 | 1 628 | 1 606 | oui | oui | oui | oui |
| Brogo | AU | 1964 | 1976 | 9 | 400 | non | oui | oui | oui |
| Burrendong | AU | 1958 | 1967 | 1 188 | 13 886 | oui | oui | oui | oui |
| Burrinjuck | AU | 1907 | 1928 | 1 028 | 12 953 | non | oui | oui | non |
| Carcoar | AU | 1969 | 1970 | 36 | 230 | non | non | oui | oui |
| Chaffey | AU | 1976 | 1979 | 101 | 393 | non | non | oui | oui |
| Copeton | AU | 1968 | 1973 | 1 364 | 5 130 | non | oui | oui | oui |
| Glenbawn | AU | 1948 | 1958 | 750 | 1 251 | non | oui | oui | oui |
| Glennies Creek | AU | 1980 | 1983 | 283 | 214 | oui | non | oui | oui |
| Keepit | AU | 1939 | 1960 | 426 | 5 554 | non | non | oui | non |
| Lostock | AU | 1969 | 1971 | 20 | 277 | oui | oui | oui | oui |
| Mackenzie | AU | 1973 | 1973 | 20 | 75 | non | oui | non | non |
| Pindari | AU | 1967 | 1969 | 312 | 2 000 | non | oui | non | non |
| Rowallan | AU | 1963 | 1967 | 130 | 345 | non | oui | non | non |
| Split Rock | AU | 1984 | 1987 | 397 | 1 576 | non | non | oui | non |
| Windamere | AU | 1974 | 1984 | 368 | 1 070 | non | non | oui | non |

| Ouvrages | Pays | Construction | Mise en service | Volume [hm3] | Bassin amont [km2] | Crue | Electricité | Irrigation | AEP |
|-------------------|------|--------------|-----------------|--------------|--------------------|------|-------------|------------|-----|
| Parangan | AU | 1968 | 1968 | 15 | 715 | non | oui | non | non |
| Arret-Darre | FR | | 1996 | 11 | 57 | non | non | oui | oui |
| Astarac | FR | | 1976 | 10 | 51 | oui | non | oui | oui |
| Bazergues | FR | | 1953 | 1 | 18 | non | non | non | oui |
| Gannes | FR | | 1908 | 1 | 13 | non | non | non | oui |
| Du Moulin Neuf | FR | | 1976 | 1 | 52 | non | non | non | oui |
| Ganguise | FR | | 1979 | 25 | 28 | non | non | oui | oui |
| Gimone | FR | | 1991 | 25 | 41 | oui | non | oui | oui |
| Kruth-Wildenstein | FR | | 1968 | 12 | 22 | oui | non | non | oui |
| La Sep | FR | | 1994 | 5 | 24 | non | non | oui | oui |
| La Verne | FR | | 1991 | 8 | 32 | non | non | non | oui |
| Laprade | FR | | 1984 | 9 | 12 | non | oui | oui | oui |
| Lavaud | FR | | 1991 | 10 | 39 | oui | non | oui | oui |
| Le Mesnil | FR | | 1977 | 2 | 27 | non | non | non | oui |
| Mazeaud | FR | | 1978 | 7 | 19 | non | non | non | oui |
| Montbel | FR | | 1985 | 60 | 15 | non | oui | oui | oui |
| Ribou | FR | | 1957 | 4 | 133 | non | non | non | oui |
| Verdon | FR | | 1980 | 14 | 71 | non | non | oui | oui |
| Salagou | FR | | 1970 | 102 | 77 | oui | oui | oui | oui |
| ValJoly | FR | | 1966 | 5 | 179 | oui | non | non | non |

| Ouvrages | Pays | Construction | Mise en service | Volume [hm3] | Bassin amont [km2] | Crue | Electricité | Irrigation | AEP |
|--------------|------|--------------|-----------------|--------------|--------------------|------|-------------|------------|-----|
| Orb | FR | | 1962 | 30 | 139 | oui | oui | oui | oui |
| Aube | FR | | 1990 | 170 | 1 640 | oui | non | non | oui |
| Seine | FR | | 1966 | 208 | 2 900 | oui | non | non | oui |
| Panneciere | FR | | 1949 | 80 | 216 | oui | oui | non | oui |
| Marne | FR | | 1974 | 349 | 3 048 | oui | non | non | oui |
| Grand'Maison | FR | | 1988 | 135 | 50 | non | oui | non | non |
| Verney | FR | | 1984 | 16 | 162 | non | oui | non | non |
| Villefort | FR | | 1964 | 28 | 126 | non | oui | non | non |
| Roujanel | FR | | 1964 | 6 | 98 | non | oui | non | non |
| Raschas | FR | | 1964 | 2 | 102 | non | oui | non | non |
| Puylaurent | FR | | 1996 | 13 | 80 | oui | oui | oui | oui |
| Malarce | FR | | 1970 | 2 | 482 | non | oui | non | non |
| Palisse | FR | | 1954 | 9 | 131 | non | oui | non | non |
| Gage | FR | | 1954 | 4 | 41 | non | oui | non | non |
| Issarles | FR | | 1954 | 33 | 45 | non | oui | non | non |
| Altus | US | 1927 | | 163 | 6 514 | oui | non | oui | oui |
| Choke Canyon | US | 1978 | | 857 | 14 322 | non | non | non | oui |
| Fort Cobb | US | 1958 | | 177 | 813 | oui | non | non | oui |
| Foss | US | 1931 | | 538 | 3 797 | oui | non | non | oui |
| Norman | US | 1962 | | 1 349 | 663 | non | oui | non | non |

| Ouvrages | Pays | Construction | Mise en service | Volume [hm3] | Bassin amont [km2] | Crue | Electricité | Irrigation | AEP |
|-------------------|------|--------------|-----------------|--------------|--------------------|------|-------------|------------|-----|
| Reserve Tom Steed | US | 1975 | | 145 | 313 | non | non | non | oui |
| Coyote Valley | US | 1958 | | 151 | 272 | oui | oui | non | oui |
| Warm Springs | US | 1918 | | 210 | 337 | oui | oui | non | non |

B

Liste des bassins de l'étude

| Code | Pays | Nom | Aire [km ²] |
|----------|------|---|-------------------------|
| A1432010 | FR | La Thur à Willer-sur-Thur | 160 |
| D0156520 | FR | L'Helpe Majeure à Taisnieres-en-Thierache | 322 |
| H0800010 | FR | La Seine à Troyes | 3500 |
| H0810010 | FR | La Seine à Mery-sur-Seine | 3900 |
| H1231010 | FR | L'Aube à Blaincourt | 1659 |
| H1501010 | FR | L'Aube Arcis-sur-Aube | 3595 |
| H1700010 | FR | La Seine à Pont-sur-Seine | 8856 |
| H2051010 | FR | L'Yonne à Dornecy | 754 |
| H2221010 | FR | L'Yonne à Gurgy | 3820 |
| H2721010 | FR | L'Yonne à Courlon-sur-Yonne | 10687 |
| H4340010 | FR | La Seine à Villeneuve-Saint-Georges | 30741 |
| H4340020 | FR | La Seine à Alfortville | 30785 |
| H5201010 | FR | La Marne à Chalons-sur-Marne | 6292 |
| H5841010 | FR | La Marne à Noisiel | 12548 |
| H5920010 | FR | La Seine à Paris [Pont d'Austerlitz] | 43825 |
| I5021010 | FR | La Vire à Vire | 130 |
| I5101010 | FR | La Vire à Malloue | 478 |
| J4124430 | FR | La Riviere de Pont-l'Abbe à Tremeoc | 53 |
| K2753010 | FR | La Morge à Montbel | 116 |
| K2783010 | FR | La Morge à Maringues [Cote Rouge] | 668 |
| K5343210 | FR | L'Œil à Malicorne [Beaufrancon] | 122 |
| K5363210 | FR | L'Œil à Villefranche-d'Allier [Fouctiere] | 319 |
| M7213010 | FR | La Moine à Roussay | 287 |
| M7213020 | FR | La Moine à Saint-Crespin-sur-Moine | 365 |
| M7302420 | FR | La Sevre Nantaise à Clisson | 1381 |
| O1532910 | FR | L'Hers-vif à Roumengoux | 598 |
| O1652920 | FR | L'Hers-vif à Mazere | 1303 |
| O1662910 | FR | L'Hers-vif à Calmont | 1366 |
| O1712510 | FR | L'Hers-vif à Auterive | 3412 |
| O2222510 | FR | L'Hers Mort à Toulouse | 786 |
| O2743320 | FR | La Gimone à Gimont | 282 |

| Code | Pays | Nom | Aire [km2] |
|----------|------|---|------------|
| O2883310 | FR | La Garganvillar | 830 |
| O6094010 | FR | L'Arrats à Saint-Antoine | 604 |
| Q0612510 | FR | L'Arros à Juillac | 568 |
| R0100010 | FR | La Charente à Charroux | 366 |
| R0110010 | FR | La Charente à Saint-Saviol | 486 |
| R0220020 | FR | La Charente à Aunac | 1092 |
| V5004010 | FR | L'Ardèche à Pont-de-Labeaume | 292 |
| V5045020 | FR | Le Chassezac à Chambonas | 508 |
| W2755010 | FR | L' Eau d'Olle à Allemond | 172 |
| Y1355210 | FR | La Rougeanne à Moussoulens | 128 |
| Y1364010 | FR | Le Fresquel à Carcassonne | 936 |
| Y2312010 | FR | L'Herault à Aspiran | 1961 |
| Y5444010 | FR | La Giscle à Cogolin [Les Ajusts] | 202 |
| Y2514020 | FR | L'Orb à Hérépian | 378 |
| Y2545020 | FR | Le Jaur à Olargues | 226 |
| Y2554010 | FR | L'Orb à Vieussan | 912 |
| Y2584010 | FR | L'Orb à Beziers [Tabarka] | 1336 |
| 7231000 | USA | Little River near Sasakwa (OK) | 2300 |
| 7305000 | USA | North Fork Red River near Headrick (OK) | 10311 |
| 7307028 | USA | North Fork Red River near Tipton (OK) | 11476 |
| 7308500 | USA | Red Rv nr Burkburnett (TX) | 37902 |
| 7325000 | USA | Washita river near Clinton (OK) | 5048 |
| 7325500 | USA | Washita river at Carnegie (OK) | 8070 |
| 7326500 | USA | Washita river at Anadarko (OK) | 9394 |
| 7328100 | USA | Washita river at Alex (OK) | 12318 |
| 7328500 | USA | Washita river near Pauls Valley (OK) | 13686 |
| 8210000 | USA | Nueces river near Three Rivers (TX) | 45136 |
| 11462500 | USA | Russian river near Hopland (CA) | 938 |
| 11463000 | USA | Russian river near Cloverdale (CA) | 1303 |
| 11464000 | USA | Russian river near Healdsburg (CA) | 2054 |
| 11467000 | USA | Russian river near Guerneville (CA) | 3465 |

| Code | Pays | Nom | Aire [km2] |
|--------|------|---|------------|
| 60.1 | AUS | Mersey river at Liena | 797 |
| 447.1 | AUS | Mersey river at Latrobe | 1664 |
| 210001 | AUS | Hunter river at Singleton | 16115 |
| 210002 | AUS | Hunter river at Muswellbrook Bridge | 3894 |
| 210015 | AUS | Hunter river at downstream Glenbawn dam | 1251 |
| 210021 | AUS | Paterson river at downstream Lostock dam | 275 |
| 210044 | AUS | Glennies creek at middle Falbrook (Fal dam site) | 426 |
| 210055 | AUS | Hunter river at Denman | 4199 |
| 210056 | AUS | Hunter river at Aberdeen | 2908 |
| 210064 | AUS | Hunter river at Greta | 17412 |
| 210079 | AUS | Paterson river at Gostwyck | 923 |
| 210083 | AUS | Hunter river at Liddell | 13046 |
| 210084 | AUS | Glennies creek at the Rocks No.2 | 214 |
| 210125 | AUS | Hunter river upstream Bayswater Creek | 13152 |
| 210126 | AUS | Hunter river upstream Foy Brook | 13289 |
| 210128 | AUS | Hunter river at Mason Dieu | 14083 |
| 210129 | AUS | Hunter river upstream Singleton | 16108 |
| 219013 | AUS | Brogo river at North Brogo | 444 |
| 219025 | AUS | Brogo river at Angledale | 708 |
| 410001 | AUS | Murrumbidgee river at Wagga Wagga | 26705 |
| 410004 | AUS | Murrumbidgee river at Gundagai | 21169 |
| 410006 | AUS | Tumut river at Tumut | 2410 |
| 410008 | AUS | Murrumbidgee river at downstream Burrinjuck dam | 13024 |
| 410039 | AUS | Tumut river at Brungle Bridge | 3184 |
| 410068 | AUS | Murrumbidgee river at Glendale | 13201 |
| 410073 | AUS | Tumut river at Oddys Bridge | 1603 |
| 410195 | AUS | Murrumbidgee river at upstream Gobarralong Bridge | 16221 |
| 412002 | AUS | Lachlan river at Cowra | 11217 |
| 412033 | AUS | BELUBULA RIVER AT Helensholme | 2492 |
| 412057 | AUS | Lachlan river at Nanami | 15814 |
| 412067 | AUS | Lachlan river downstream Wyangala dam | 8071 |

| Code | Pays | Nom | Aire [km2] |
|--------|------|--|------------|
| 412077 | AUS | Belubula river at Carcoar | 235 |
| 412165 | AUS | Belubula river at the bells | 1890 |
| 416002 | AUS | Macintyre river at Boggabilla | 22093 |
| 416006 | AUS | Severn river at Ashford | 3100 |
| 416012 | AUS | Macintyre river at Holdfast (Yelarbon crossing)) | 6708 |
| 416031 | AUS | Macintyre river at Ridgeland | 6221 |
| 416058 | AUS | Macintyre river at Yetman Bridge | 6695 |
| 416067 | AUS | Severn river at Ducca Marrin | 2044 |
| 418001 | AUS | Gwydir river at Pallamallawa | 11832 |
| 418012 | AUS | Gwydir river at Pinegrove | 6207 |
| 418013 | AUS | Gwydir river at Gravesend road bridge | 10708 |
| 418026 | AUS | Gwydir river downstream Copeton dam | 5130 |
| 419001 | AUS | Namoi river at Gunnedah | 15524 |
| 419006 | AUS | Peel river at Carroll gap | 4516 |
| 419007 | AUS | Namoi river downstream Keepit dam | 5544 |
| 419009 | AUS | Peel river at Tamworth | 2999 |
| 419012 | AUS | Namoi river at Boggabri | 22290 |
| 419015 | AUS | Peel river at Piallamore | 989 |
| 419020 | AUS | Manilla river at Brabi (Merriwee) | 1969 |
| 419022 | AUS | Namoi river at Manilla Railway bridge | 4951 |
| 419023 | AUS | Namoi river at Turrawan (Wallah) | 23706 |
| 419043 | AUS | Manilla river at downstream Split Rock dam | 1576 |
| 419045 | AUS | Peel river downstream Chaffey dam | 393 |
| 419056 | AUS | Manilla river at upper Manilla | 1710 |
| 419070 | AUS | Peel river at Tamworth water supply | 1158 |
| 419073 | AUS | Peel river at Appleby crossing | 3664 |
| 419074 | AUS | Peel river at Bective | 4065 |
| 419075 | AUS | Peel river at Somerton | 440 |
| 421001 | AUS | Macquarie river at Dubbo | 19210 |
| 421019 | AUS | Cudgegong river at Yamble bridge | 3378 |
| 421127 | AUS | Macquarie river at Barooka | 25121 |

| Code | Pays | Nom | Aire [km2] |
|--------|------|-------------------------------------|------------|
| 421149 | AUS | Cudgegong river at Rocky water hole | 1173 |
| 421150 | AUS | Cudgegong river at Wilbertree road | 1978 |

C

Caractéristiques des bassins influencés par les barrages-réservoirs

Cette partie présente les caractéristiques des bassins versants influencés par les barrages-réservoirs.

C.1 Caractéristiques hydro-climatiques

C.1.0.0.1 Débit observé annuel moyen et son coefficient de variation. Dans notre cas, le débit annuel moyen correspond à un débit influencé observé à la station. Comme nous pouvons le voir sur la figure C.1a, nous avons une base de données assez contrastée avec des bassins australiens produisant cent millimètres d'eau par an en moyenne et des bassins français produisant environ quatre-cents millimètres d'eau. Le coefficient de variation représente la dispersion relative par rapport au débit annuel moyen observé. Les bassins australiens ont une importante variabilité du débit, de 80% en moyenne, d'une année à l'autre (figure C.1b) par rapport aux bassins français qui varient de 30% en moyenne.

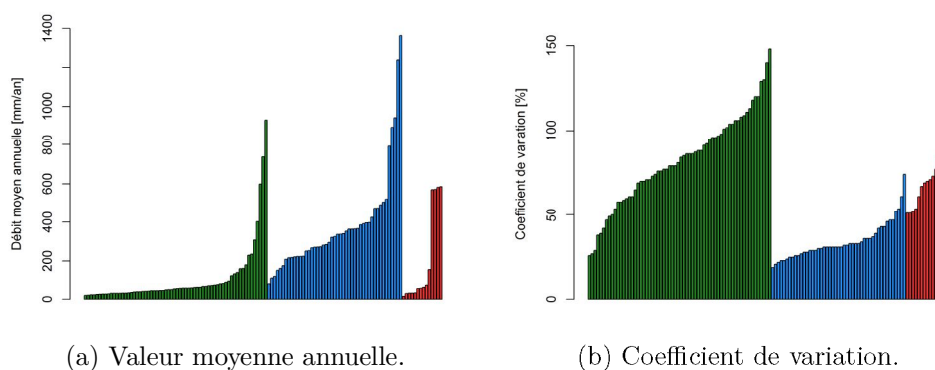
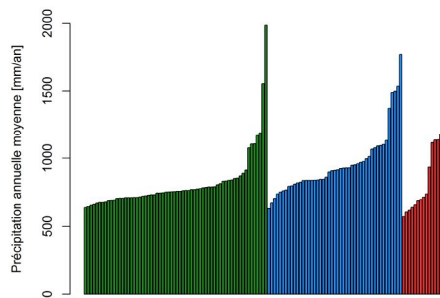


Figure C.1 – Débit moyen annuel (a) et le coefficient de variation (b) classés par ordre croissant selon les pays. Les bassins verts correspondent aux bassins australiens, les bleus aux français et les rouges aux américains.

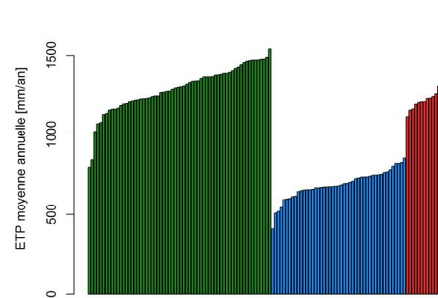
C.1.0.0.2 Précipitation et évapotranspiration potentielle annuelle moyenne et leurs coefficients de variation. Comme illustré sur la figure C.2a, d'un pays à l'autre, les bassins reçoivent des gammes similaires de précipitation annuelle. Au sein même des pays, il y a des contrastes, notamment en Australie où les deux bassins qui reçoivent les plus fortes précipitations sont tasmaniens. Concernant l'évapotranspiration potentielle, il ressort d'importantes différences entre la France, où elle est de six-cent millimètres par an en moyenne, et l'Australie et les États-Unis, où elle équivaut au double.

Ces différences s'expliquent par les différences de conditions climatiques mais peuvent également être en partie liées aux différences de formulations utilisées entre les pays (Oudin pour la France et les États-Unis, Morton pour l'Australie).

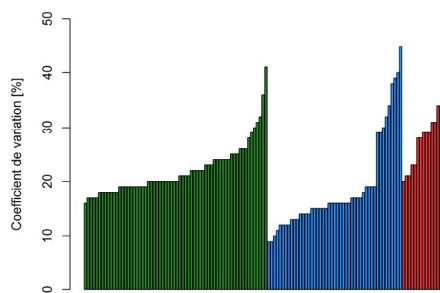
Concernant le coefficient de variabilité des précipitations, il n'y a pas de grandes différences entre les pays où il est de l'ordre de 20-25% en moyenne (figure C.2c). Les principales différences se font au sein des pays. Les coefficients de variabilité de l'évapotranspiration potentielle sont beaucoup plus faibles que ceux des précipitations, aux alentours de 9% pour chacun des pays en moyenne. Sur les bassins français de la base de données, on note d'importants contrastes pour la variabilité de l'évapotranspiration, notamment en Poitou-Charente, où le bassin de la Charente à Voulême (R0110020) a un coefficient de variation d'environ 60%, et en Normandie, où le bassin de la Vire à Vire (I5021010) a un coefficient de variation de 40%.



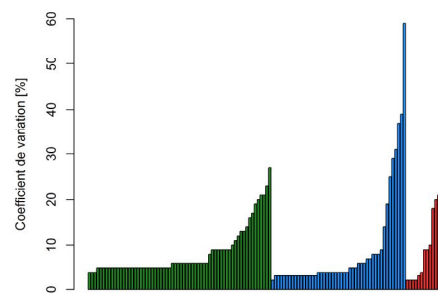
(a) Précipitation moyenne annuelle.



(b) ETP moyenne annuelle.



(c) Coefficient de variation des précipitations.



(d) Coefficient de variation de l'ETP.

Figure C.2 – Précipitation (a) et évapotranspiration potentielle (b) moyenne annuelle classées par ordre croissant selon les pays, et leurs coefficients de variation (c et d). Les bassins verts correspondent aux bassins australiens, les bleus aux français et les rouges aux américains.

C.1.0.0.3 Indice d'aridité. Cet indice, I_a (équation C.1), permet de distinguer cinq niveaux d'aridité (UNESCO, 1979) : les zones hyper-arides avec un indice inférieur à 0,03, les zones arides avec un indice compris entre 0,03 et 0,2, les zones semi-arides avec un indice compris entre 0,2 et 0,5 et les zones semi-humides avec un indice compris entre 0,5 et 0,75. Les zones ayant un indice supérieur à 0,75 sont considérées comme humides.

$$I_a = \frac{\overline{P}_a}{\overline{ETP}_a} \quad (\text{C.1})$$

où \overline{P}_a et \overline{ETP}_a correspondent respectivement aux précipitations et à l'évapotranspiration potentielle annuelles moyennes.

La base de données est constituée de soixante bassins humides, majoritairement situés en France, et de soixante-cinq bassins semi-humides et semi-arides, majoritairement situés en Australie (figure C.3).

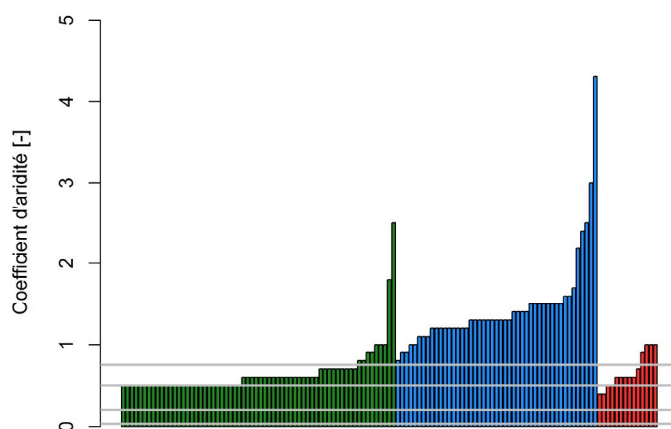


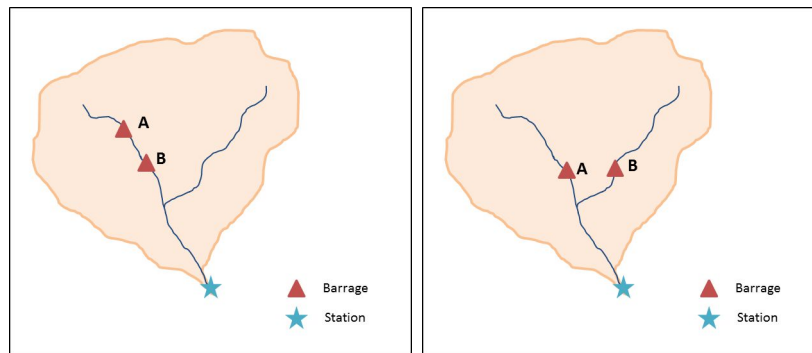
Figure C.3 – Indice d'aridité par bassin versant, classé par ordre croissant selon les pays. Les bassins verts correspondent aux bassins australiens, les bleus aux français et les rouges aux américains. Les traits horizontaux gris correspondent aux limites des différentes zones d'aridité (UNESCO, 1979). H correspond à la zone humide, SH à la semi-humide, SA à la semi-aride, A à l'aride et HA à l'hyper-aride.

C.2 Caractéristiques des barrages-réservoirs

C.2.0.0.1 Surface contrôlée par le(s) barrage(s) amont. Dans le cas où la station est contrôlée par plusieurs barrages amont, si les barrages amont sont situés sur le même cours d'eau (figure C.4a), alors S_c correspond à la surface contrôlée par le barrage le plus à l'aval. Si les bassins ne sont pas situés sur le même cours d'eau (figure C.4b), alors S_c correspond à la somme des surfaces contrôlées par les différents barrages. Plus SC_D est proche de 1, plus la partie contrôlée du bassin versant est importante.

$$SC_D = \frac{S_c}{S_{BV}} \quad (C.2)$$

où S_{BV} correspond à la surface du bassin versant et S_c correspond à la surface du bassin versant contrôlée par le barrage-réservoir amont.



(a) Barrages amont sur le même cours d'eau. (b) Barrage amont sur des cours d'eau différents.

Figure C.4 – Schéma des différents positionnements des barrages amont.

C.2.0.0.2 Variabilité des chroniques de volumes. Cet indicateur, noté VI_D est issu de la thèse de Payan (2007).

$$VI_D = \frac{\frac{365}{N} \sum_{i=1}^N |V_i - V_{i-1}|}{V_{max} - V_{min}} \quad (C.3)$$

où N correspond à la longueur de la chronique de volume, V_i au volume du réservoir le jour i et, V_{min} et V_{max} représentent respectivement le volume minimal et maximal du réservoir durant la période de naturalisation.

Dans le cas où il y a plusieurs barrages en amont de la station, les volumes correspondent à la somme des volumes des barrages.

C.2.0.0.3 Indice d'écoulement mobilisable. L'indice d'écoulement mobilisable, noté IRI_D (équation C.4) (*Impounded Runoff Index* en anglais) (Graf, 1999 ; Kondolf et Batalla, 2005), reflète la capacité du barrage par rapport au débit moyen annuel écoulé.

$$IRI_D = \frac{C_D}{\overline{Q_a}} \quad (C.4)$$

où C_D correspond à la capacité du barrage et $\overline{Q_a}$ correspond au débit annuel moyen influencé.

Dans le cas où la station est contrôlée par plusieurs barrages amont, C_D correspond à la somme des capacités des réservoirs amont.

Plus IRI_D est grand, plus la capacité du barrage est importante par rapport au débit moyen. Cet indicateur peut également être vu comme un indicateur du temps de résidence potentiel dans le réservoir (Kondolf et Batalla, 2005). Par exemple, si IRI_D est égal à 3, alors le temps de résidence peut être potentiellement de 3 ans. On peut alors dans ce cas supposer que le barrage a un comportement interannuel.

Sur la figure C.5, sont représentés les différents indicateurs par bassin versant. La figure C.5a montre que les surfaces influencées sont très variables d'un bassin à l'autre. Concernant l'indice d'écoulement mobilisable (figure C.5b), il est le plus important sur les bassins australiens. Ceci s'explique par le fait qu'ils ont une importante capacité pour stocker de l'eau durant les années humides et ainsi répondre aux besoins lors des années sèches. La figure C.5c montre que les bassins français ont globalement une plus forte variabilité que les bassins australiens.

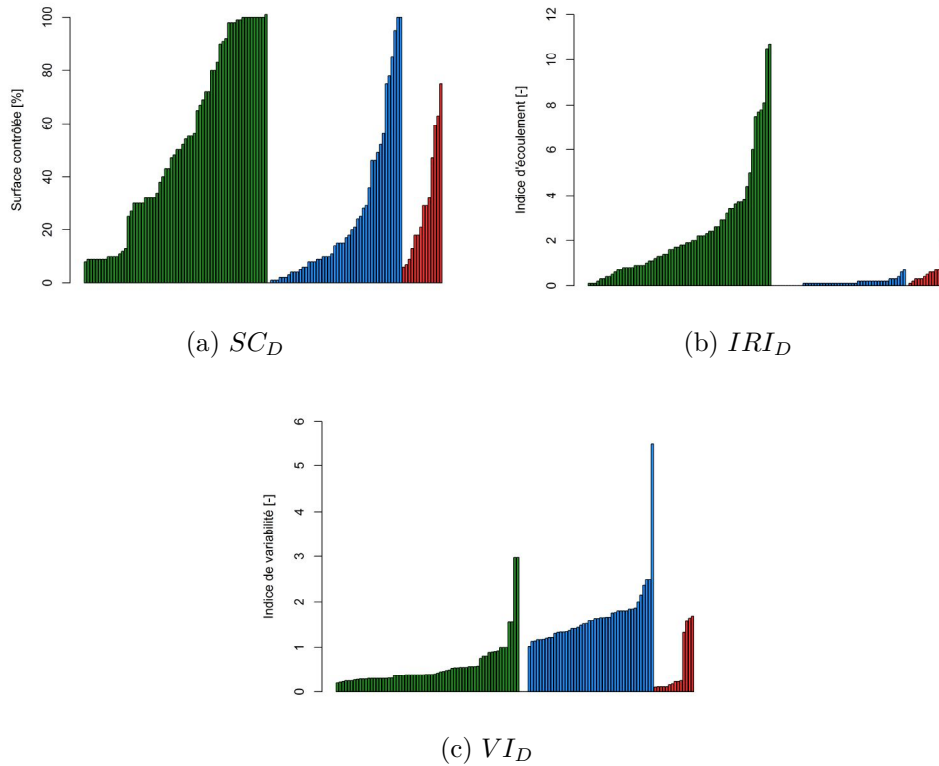


Figure C.5 – Caractéristiques des barrages par bassin versant. Les bassins verts correspondent aux bassins australiens, les bleus aux français et les rouges aux américains.

C.3 Estimation de l'impact potentiel des prélèvements de surface

La non prise en compte des prélèvements peut affecter les résultats des méthodes de bilan sur ouvrage et de reconstitution qui se basent sur les données d'observation du débits et des influences. L'impact sur ces méthodes dépend de la zone où sont effectuées les prélèvements de surface (figure C.6) :

Zone 1 : Dans certains cas, le barrage compense l'influence des prélèvements. Par exemple, des lâchers de barrage peuvent être effectués pour permettre un important prélèvement d'eau à l'aval. Dans le cas où le débit observé est alors plus petit que le lâcher de barrage, cela risque de mener à une estimation nulle du débit naturel.

Zone 2 : Une diminution du volume d'un réservoir causée par un prélèvement pourrait être interprétée comme un lâcher de barrage. Dans cette thèse, nous n'avons pas accès aux éventuels prélèvements effectués au niveau des réservoirs.

Zone 3 : Les prélèvements effectués en amont du barrage peuvent impacter l'estimation de la ressource annuelle en eau par rapport aux autres méthodes, et en particulier, pour la méthode de reconstitution, modifier la simulation des relations pluie-débit avec un modèle hydrologique.

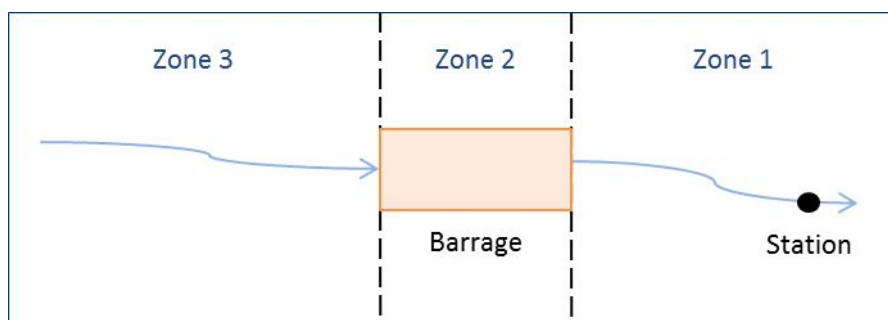


Figure C.6 – Schéma des éventuelles zones de prélèvements de surface sur les bassins versants influencés.

C.3.0.0.1 Indice de prélèvements. Cette partie propose d'appliquer un indice d'impact potentiel pour chaque type de prélèvements, AEP (équation C.5), irrigation (équation C.6) et canaux (équation C.7), prenant en compte pour chaque année la quantité que représente les prélèvements, P_x^{Annee} , par rapport au débit écoulé observé, Q_{Annuel}^{Annee} . L'indice correspond à la valeur maximale obtenue sur ces années, pour savoir le niveau maximum d'impact potentiel de ces prélèvements. Dans le cas des stations n'ayant pas d'indice du fait de la non concordance des années de mesures des prélèvements et des débits, l'indice de la station aval lui sera attribué.

$$Inf_{AEP}^{Prelevement} = \max(\text{vect}\left(\frac{P_{AEP}^{Annee}}{Q_{Annuel}^{Annee}} * 100\right)) \quad (C.5)$$

$$Inf_{Irrigation}^{Prelevement} = \max(\text{vect}\left(\frac{P_{Irrigation}^{Annee}}{Q_{Annuel}^{Annee}} * 100\right)) \quad (C.6)$$

$$Inf_{Canaux}^{Prelevement} = \max(\text{vect}\left(\frac{P_{Canaux}^{Annee}}{Q_{Annuel}^{Annee}} * 100\right)) \quad (C.7)$$

Les données de prélèvements sur les bassins australiens ne sont pas disponibles. Cependant, l'irrigation et l'urbanisation représentant une faible superficie, nous considérons que les prélèvements restent négligeables.

Les indicateurs sont représentés par bassin sur la figure C.7.

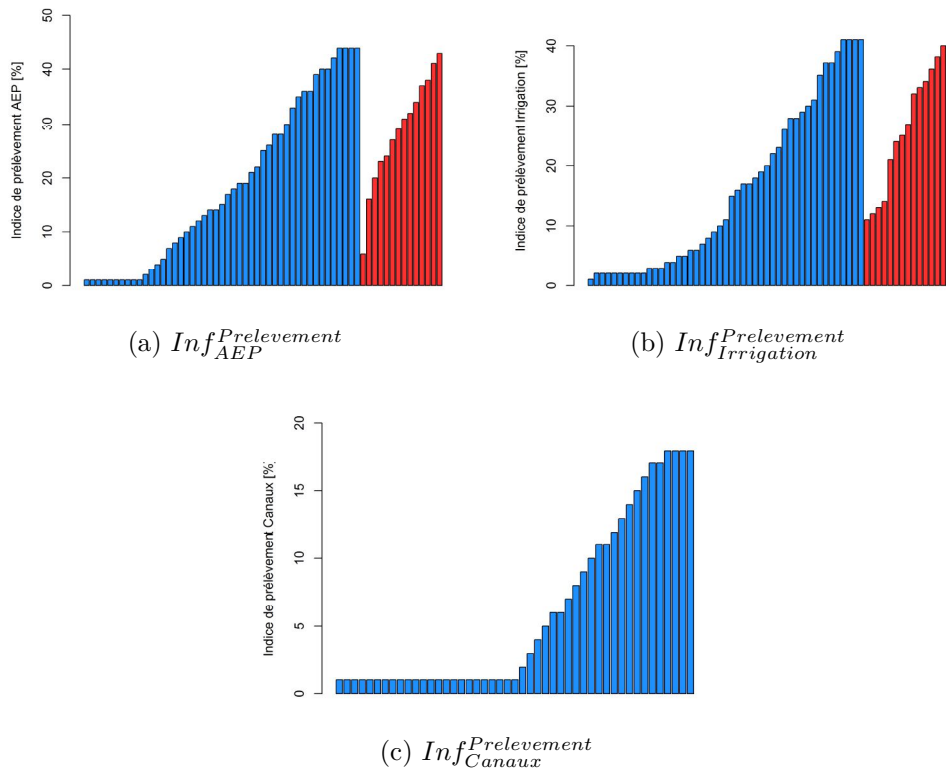


Figure C.7 – Indices de prélèvements par bassin selon leur finalité, classés par ordre croissant selon les pays. Les bleus correspondent aux bassins français et les rouges aux américains.

L'alimentation en eau potable est de l'ordre de 15% et de 30% en valeur médiane respectivement sur les bassins français et américains. La recherche bibliographique a montré qu'environ 80% de ces prélèvements retournent au milieu naturel. Donc, sauf cas particulier, leur impact potentiel sur le volume annuel reste relativement faible. L'irrigation impacte potentiellement plus de 20% de la ressource de 16 bassins français et de 10 bassins américains. L'interprétation concernant les prélèvements de canaux est assez délicate car ils peuvent soit retourner au milieu naturel, car certains prélèvements surfaciques sont effectués dans les canaux, soit être complètement consommés dans le cas où ils servent uniquement à la navigation.

D

**Estimation du temps de trajets entre
les barrages-réservoirs et les stations**

Cette partie présente comment le temps de trajet entre les influences et les stations a été estimé. Ces valeurs sont utilisées par la méthode de bilan sur ouvrage.

Sur les bassins australiens, les temps de trajet moyens ont été fournis en interne lors du séjour au CSIRO. Ils correspondent au temps de trajet obtenu avec le modèle vectoriel AWRA-R (Dutta *et al.*, 2015). Le débit d'une station amont est propagé à la station aval grâce à la méthode de routage de Muskingum (Koussis, 1980). Le calage a été effectué sur la période 1970-1991, comprenant des périodes sèches et humides, et la validation sur la période 1992-2014.

Sur les bassins français et américains, le temps de trajet moyen, T , est calculé grâce à la distance hydraulique, D , entre l'influence et la station, et la vitesse de propagation, $V_{moyenne}$ (équation D.1).

$$T = \frac{D}{V_{moyenne}} \quad (D.1)$$

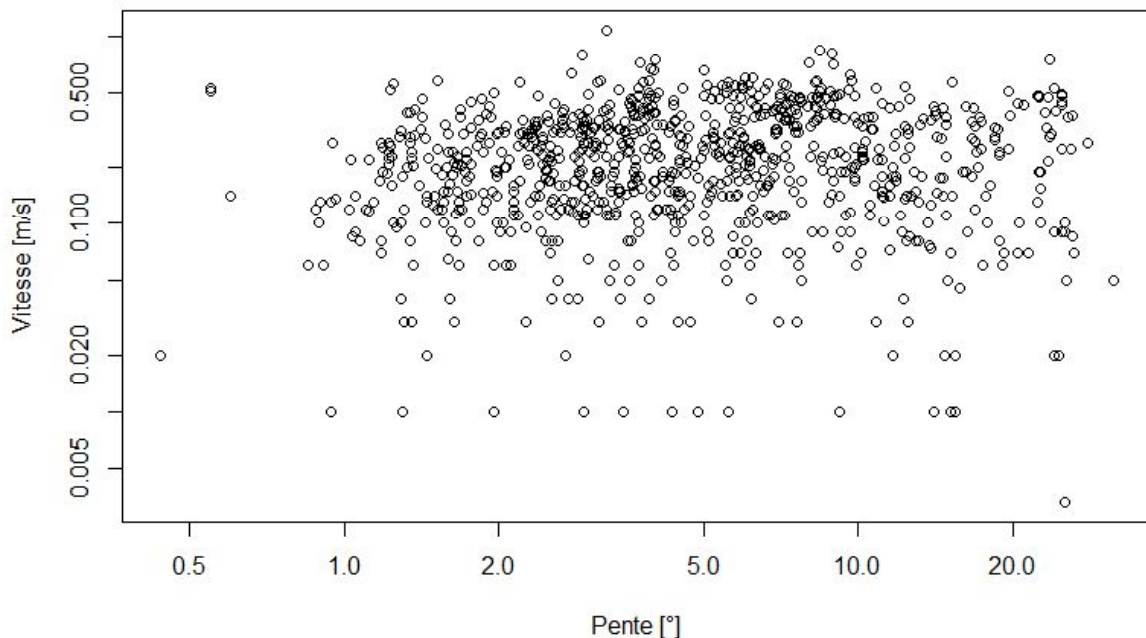


Figure D.1 – Graphique à échelle logarithmique de la relation entre la pente moyenne du bassin versant et la vitesse obtenue avec le modèle GRSD sur 908 bassins versants français.

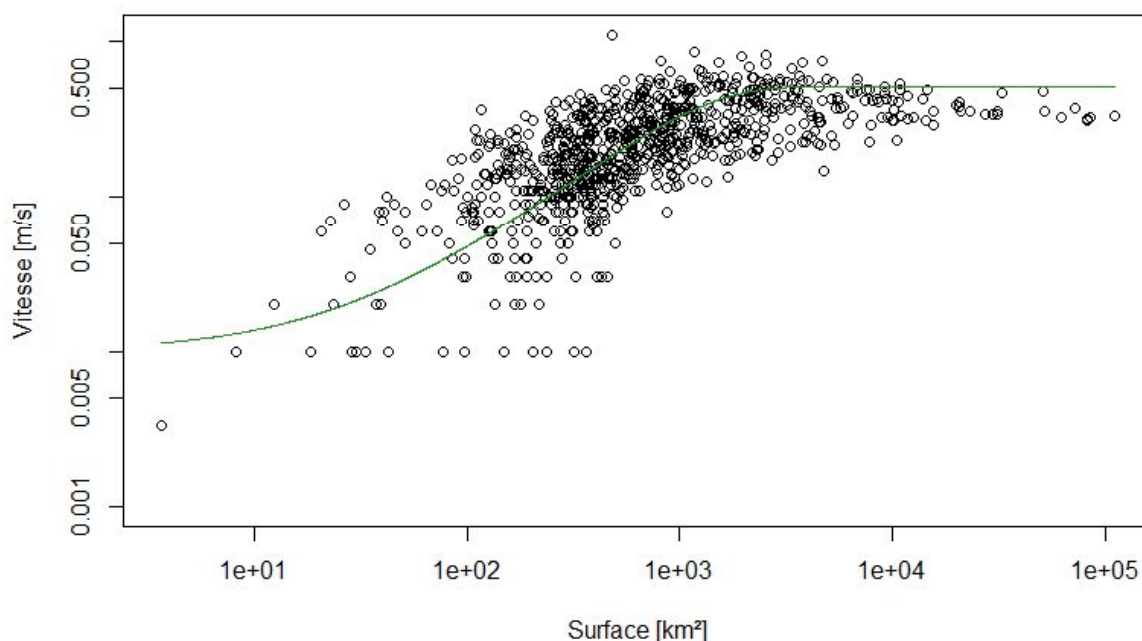


Figure D.2 – Graphique à échelle logarithmique de la relation entre la surface du bassin versant et la vitesse obtenue avec le modèle GRSD sur 908 bassins versants français. La droite verte correspond à l'approximation de la relation.

N'ayant pas accès à des mesures de vitesse de propagation sur nos bassins influencés, cette dernière a été estimée indirectement. Dans un premier temps, les vitesses obtenues grâce au calage du modèle GRSD (De Lavenne *et al.*, 2016), une version semi-distribuée de GR4J, de 1980 à 2010 sur environ 900 stations françaises, ont été fournies en interne par l'équipe HYDRO d'INRAE Antony. Dans un deuxième temps, il a fallu trouver une méthode pour transposer la vitesse moyenne sur les bassins influencés. De Lavenne (2013) montre qu'une transposition spatiale de la vitesse en se basant sur une distance hydrologique n'est pas appropriée et qu'il est plus judicieux de déterminer les paramètres influant sur la vitesse. La pente moyenne et la surface du bassin versant ont été testées. Dans notre cas, aucune tendance ne semble apparaître entre la pente moyenne du bassin et la vitesse moyenne (figure D.1), mais on distingue une influence claire de la surface du bassin versant sur la vitesse moyenne (figure D.2).

Afin d'établir une relation entre la surface des bassins, A , et leur vitesse moyenne, une approximation à l'aide d'une fonction sigmoïde (aussi appelée fonction logistique) a été réalisée (équation D.2). Les paramètres a et b sont fixés respectivement à 0,0015 et -0,49 m/s afin de minimiser l'erreur moyenne de la vitesse qui est de 0,097 m/s.

$$V_{moyenne}(A) = \frac{1}{1 + \exp^{\frac{A}{a}}} + b \quad (\text{D.2})$$

La figure D.2 montre que plus la surface d'un bassin versant est importante, plus sa vitesse est importante. Cela peut paraître contre intuitif car dans l'imaginaire collectif, sur les petits bassins versants, la vitesse d'écoulement de l'eau dans les ruisseaux paraît rapide du fait d'une pente importante, et, au contraire, sur les grands bassins versants à l'aval l'eau dans les rivières paraît s'écouler plus lentement. Dans les faits, De Lavenne (2013) trouve également une corrélation positive entre la taille des bassins versants et la vitesse moyenne sur son échantillon de 85 bassins sur la région Bretagne en France. La relation établie par Al-Wagdany et Rao (1997) sur six bassins aux États-Unis et basée sur l'intensité de la pluie, la surface du bassin et le cumul des pentes, montre qu'une augmentation de la surface du bassin conduit également à une augmentation de la vitesse. En partant de l'équation de Manning, Leopold et Maddock (1953) argumentent que cela est dû au fait que sur les bassins aval, l'augmentation de la profondeur du cours d'eau surcompense la diminution de la pente.

N'ayant pas d'estimation de la vitesse aux États-Unis, la vitesse moyenne est également obtenue grâce à l'équation D.2.

En France, la distance hydraulique entre les barrages et stations aval sont déterminées à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT) ayant servi à caler GRSD (Delaigue *et al.*, 2018). Aux États-Unis, la distance est calculée à partir du MNT HydroSHEDS (Lehner *et al.*, 2008).

Les temps de propagation obtenus restent des estimations en condition moyenne, et peuvent donc ne pas être adaptés à des débits d'étiage, où le temps de propagation est plus long, ou à des débits de crue, où le temps de propagation est plus court. L'utilisation

d'un modèle hydraulique permettrait de minimiser les erreurs introduites par le décalage. Cependant, il n'est pas envisageable dans notre étude de mettre en place un modèle hydraulique sur chaque bassin de notre échantillon.

E

**Estimation des variations de volume
avec prise en compte de l'évaporation
et des précipitations sur les réservoirs**

Dans cette partie, nous cherchons à estimer l'évaporation et les précipitations journalières sur les réservoirs afin de pouvoir par la suite tester les conséquences de leur non-prise en compte sur les méthodes de naturalisation. Ces variables météorologiques dépendent de la surface du réservoir : en effet plus la surface est importante, plus le volume d'évaporation du réservoir augmentera. Nous allons donc également estimer les variations de surface des barrages-réservoirs.

Données de précipitations Les données de précipitations sont principalement issues, pour les réservoirs américains, à des données de pluviomètres situés à proximité des réservoirs. Pour les autres réservoirs, les données de précipitations sont issues des mailles climatiques correspondant au centroïde du réservoir.

Données d'évaporation

- **Australie**

Le Bureau of Meteorology (2018) met à disposition des données d'évaporation spatialisées à une échelle 5x5 km sur l'ensemble du territoire australien. Ces données sont obtenues grâce à la méthode des lacs peu profonds de Morton (1983), à partir de données journalières de températures maximales et moyennes, de pression de vapeur et de rayonnement solaire. Ces données ne sont disponibles que de 2005 à 2015. Nous disposons également au niveau des réservoirs des données d'évapotranspiration de Morton allant de 1960 à 2016. Sur la figure E.1, l'exemple du barrage de Burrendong montre une tendance linéaire entre les deux variables. Sur chaque barrage australien de 2005 à 2015, une relation linéaire entre l'évaporation et l'évapotranspiration de Morton, de la forme $y = a*x + b$, a ainsi été établie pour estimer l'évaporation sur l'ensemble de la période de naturalisation. Sur l'exemple du barrage de Burrendong, a vaut 1,276 et b vaut -0,892. Le coefficient de détermination de la relation établie est de 0,97.

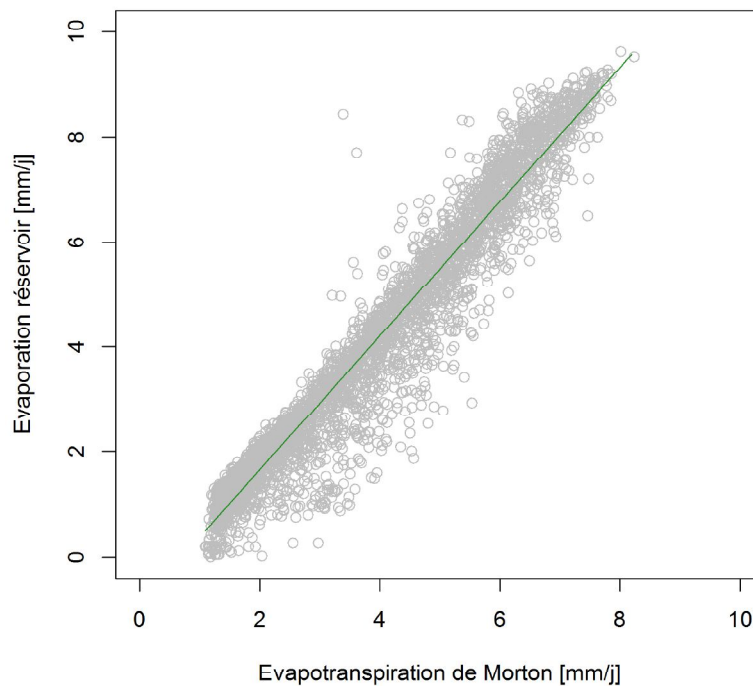


Figure E.1 – Comparaison de l'évapotranspiration journalière de Morton, en abscisse, et de l'évaporation journalière de Morton, en ordonnée, au niveau du barrage-réservoir de Burrendong (Australie). La droite verte correspond à la régression linéaire établie entre les données journalières des deux variables.

- **États-Unis**

Des données d'évaporation sont disponibles sur les barrages-réservoirs d'Altus, Tom Steed, Norman, Foss et Fort Cobb, situés en zones semi-arides en Oklahoma. Les données d'évaporation proviennent du Corps d'ingénieurs de l'armée du district de Tulsa (www.swt-wc.usace.army.mil/). Les données d'évaporation correspondent à des mesures issues de bacs Colorado à proximité des réservoirs (communication personnelle avec le gestionnaire de données).

- **France**

Les données d'évaporation des barrages français, fournies en interne par l'équipe FRESHCO d'INRAE Aix-en-Provence, ont été estimées grâce aux températures de surface des réservoirs, simulées de 1960 à 2015 avec le modèle Ottosson-Kettle (Prats et Danis, 2019). Les données d'évaporation ont été obtenues grâce à la formule de Sill (équation E.1), dérivée de la formule de Dalton (1802) qui fait

partie des méthodes d'estimation de l'évaporation basées sur le bilan de transfert de masse. La formule de Sill a la particularité de prendre en compte les mouvements de convection.

$$EVP = 1.15 * 10^{-8} * c_d * u * (1 + a_3 * c_r) * (e_s - e_a) \quad (E.1)$$

Si $c_r \leq 1.37$, $a_3 = 0.75 * c_r$

Si $c_r > 1.37$, $a_3 = 1$

Si $T_a \leq T_s$, $c_r = \frac{0.0017 * (T_s - T_a)^{\frac{1}{3}}}{c_d * u}$

Si $T_a > T_s$, $c_r = 0$

$c_d[-]$ correspond au coefficient de traînée, $c_r[-]$ au ratio de convection, $T_s[^\circ C]$ à la température de surface du lac et $T_a[^\circ C]$ à la température de l'air.

Il est à noter que dans le cas du barrage de Verney, il y a une surestimation de la température par le modèle et donc une surestimation de l'évaporation. Le réservoir de Verney fait partie de la STEP (Station de Transfert d'Énergie par Pompage) de Grand-Maison et reçoit donc des eaux froides de ce dernier. Le modèle ne prenant initialement pas en compte cette particularité, on obtient une surestimation des températures.

Variation de la surface des réservoirs

Les estimations d'évaporation des barrages-réservoirs dont nous disposons sont en mm/j. Nous devons donc les ramener à la surface des réservoirs pour avoir une estimation de la quantité d'eau évaporée. Or, leur surface évolue dans le temps en fonction du taux de remplissage des barrages-réservoirs. Dans notre base de données, les données de variation de la surface ne sont disponibles que sur les quatre barrages-réservoirs de Seine Grands Lacs (www.seinegrandslacs.fr). Pour estimer indirectement la variation de la surface en fonction du volume, nous sommes partis des travaux de Campos *et al.* (2004), qui estiment le volume de réservoirs brésiliens, allant de 6,43 à 4450 hm^3 , en fonction de la hauteur d'eau grâce à plusieurs formules mathématiques de différents niveau de complexité. L'équation E.2 est recommandée car elle est simple d'application et nécessite

des données facilement accessibles : le volume maximal du réservoir, V_{max} , et la hauteur maximale, h_{max} . La constante α (équation E.3) est un facteur de forme du réservoir, qui garantit l'homogénéité de la relation E.2.

$$V(h) = \alpha * h^3 \quad (\text{E.2})$$

$$\alpha = \frac{V_{max}}{h_{max}^3} \quad (\text{E.3})$$

Cette formulation équivaut à considérer le réservoir comme un cube avec des arêtes équivalentes à $\alpha^{\frac{1}{3}} * h$.

De façon analogue, nous avons choisi d'estimer la surface des réservoirs à partir du volume grâce à la relation E.4. La constante α (équation E.5) dépend de la surface maximale, S_{max} , et du volume maximal, V_{max} . V et V_{max} sont en m^3 , et S et S_{max} sont en m^2 . Une grande valeur de α signifie que la surface maximale est importante par rapport au volume maximal. Comme nous pouvons le voir sur les bassins de la Seine (figure E.2), α est plus grand sur les bassins qui ont une surface étendue, comme c'est le cas du réservoir de la Marne. Sur le réservoir de Pannecière qui a une surface plus réduite, on note un α plus petit.

$$S(V) = \alpha * V^{\frac{2}{3}} \quad (\text{E.4})$$

$$\alpha = \frac{S_{max}}{V_{max}^{\frac{2}{3}}} \quad (\text{E.5})$$

En testant la relation sur les réservoirs de Seine Grands Lacs (figure E.3), on constate que la relation surface-volume reproduit les tendances d'évolution des courbes établies par Seine Grands Lacs.

A chaque pas de temps, j , l'évaporation des retenues, E_{ret} , est ramenée à la surface des réservoirs, S , afin d'avoir une estimation du volume d'eau évaporé (équation E.6).

$$E_{ret}[m^3] = E_{ret}[mm] * S[km^2] * 10^3 \quad (\text{E.6})$$

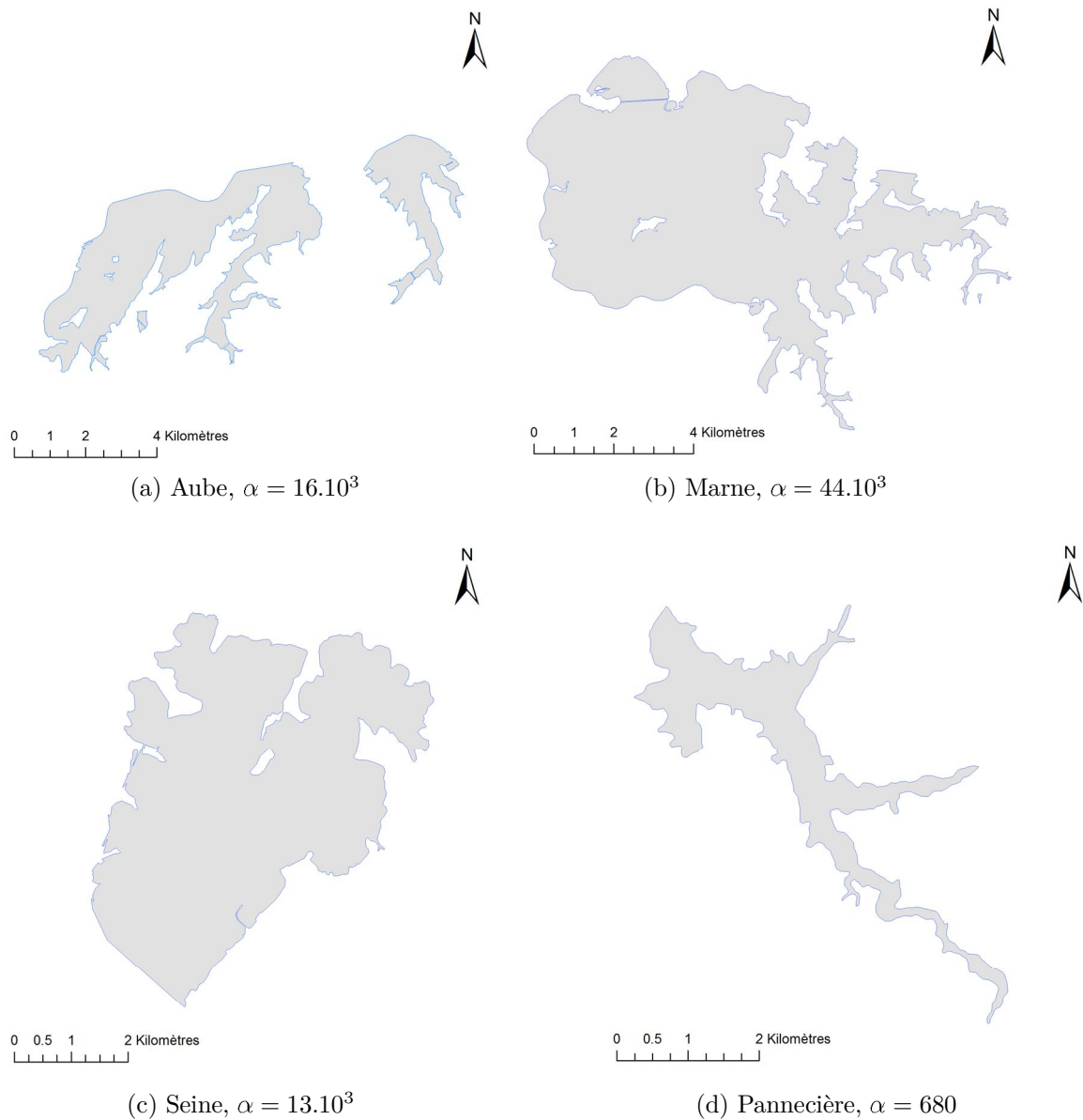


Figure E.2 – Carte de la forme des surfaces des réservoirs de Seine Grands Lacs. La constante α obtenue avec l'équation E.5 est précisée pour chaque réservoir.

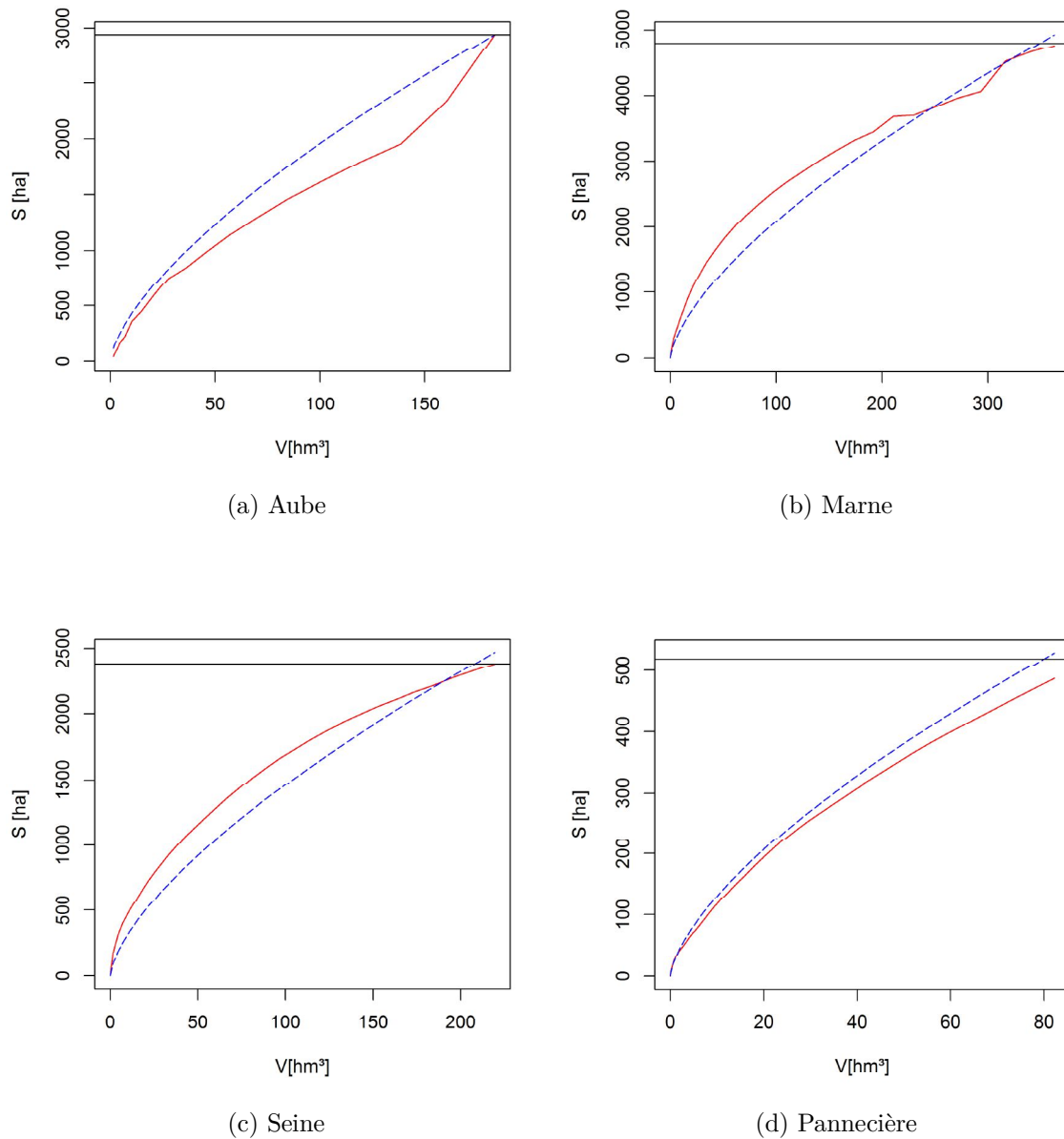


Figure E.3 – Relation entre le volume, en abscisse, et la surface, en ordonnée, sur les réservoirs de Seine Grands Lacs. La courbe rouge entière correspond aux données fournies par Seine Grand Lacs, la courbe bleue pointillée provient de la relation surface-volume établie, et la courbe noire horizontale correspond à la surface maximale.

F

Causes possibles des mauvaises performances de GR5J-Dam avec la méthode de reconstitution

Cette partie discute des causes qui peuvent mener à de mauvaises performances de GR5J-Dam sur les bassins des groupes 1 à 4. Dans la partie précédente, il est apparu que, sur les bassins potentiellement fortement influencés du groupe 2, les performances de GR5J-Dam en validation étaient plus basses que sur les autres bassins et qu'ils étaient d'avantage sujets à des valeurs de paramètres extrêmes. Nous allons donc nous intéresser au lien entre les performances de GR5J-Dam en validation et les caractéristiques des barrages-réservoirs amont (figure F.1). Nous verrons également si une plus faible robustesse du modèle est forcément associée à un jeu de paramètres du modèle en dehors des gammes habituelles (figure F.2). Puis nous verrons si les caractéristiques des barrages peuvent influencer les jeux de paramètres obtenus.

F.1 Quel est le lien entre les performances du modèle et l'état influencé des bassins versants ?

En comparant les rapports entre caractéristiques des barrages-réservoirs et performances moyennes du modèle en validation (figure F.1), on ne note pas de corrélation de Pearson ou de Spearman significative entre les variables. Cela signifie qu'il n'y a a priori pas de lien direct entre l'impact potentiel des barrages-réservoirs amont et la robustesse du modèle. Cependant, certaines tendances apparaissent entre les performances du modèle et les caractéristiques des barrages-réservoirs.

Sur les hauts et moyens débits, il y a une corrélation de Pearson de respectivement -0,4 et -0,45 entre les performances du modèle et la surface contrôlée par les barrages, SC_D . Cela signifie que le modèle a tendance à avoir de meilleures performances sur les bassins potentiellement peu contrôlés. Il apparaît cependant que pour des gammes de SC_D équivalentes, les performances sur les bassins semi-arides sont moins bonnes que sur les bassins humides. Sur les bas débits, la faible corrélation de -0,16 ne peut pas être interprétée comme un lien entre les deux indicateurs.

Entre l'indice d'écoulement utilisable, IRI_D , et les performances sur les hauts, moyens et bas débits, on obtient des corrélations de Spearman de respectivement -0,54, -0,58 et -0,43. Cela montre que plus la capacité de stockage des barrages est importante par rapports au débit écoulé, moins bonnes sont les performances du modèle. Cependant, on peut voir que les capacités des barrages sont fortement liées aux conditions météorologiques des

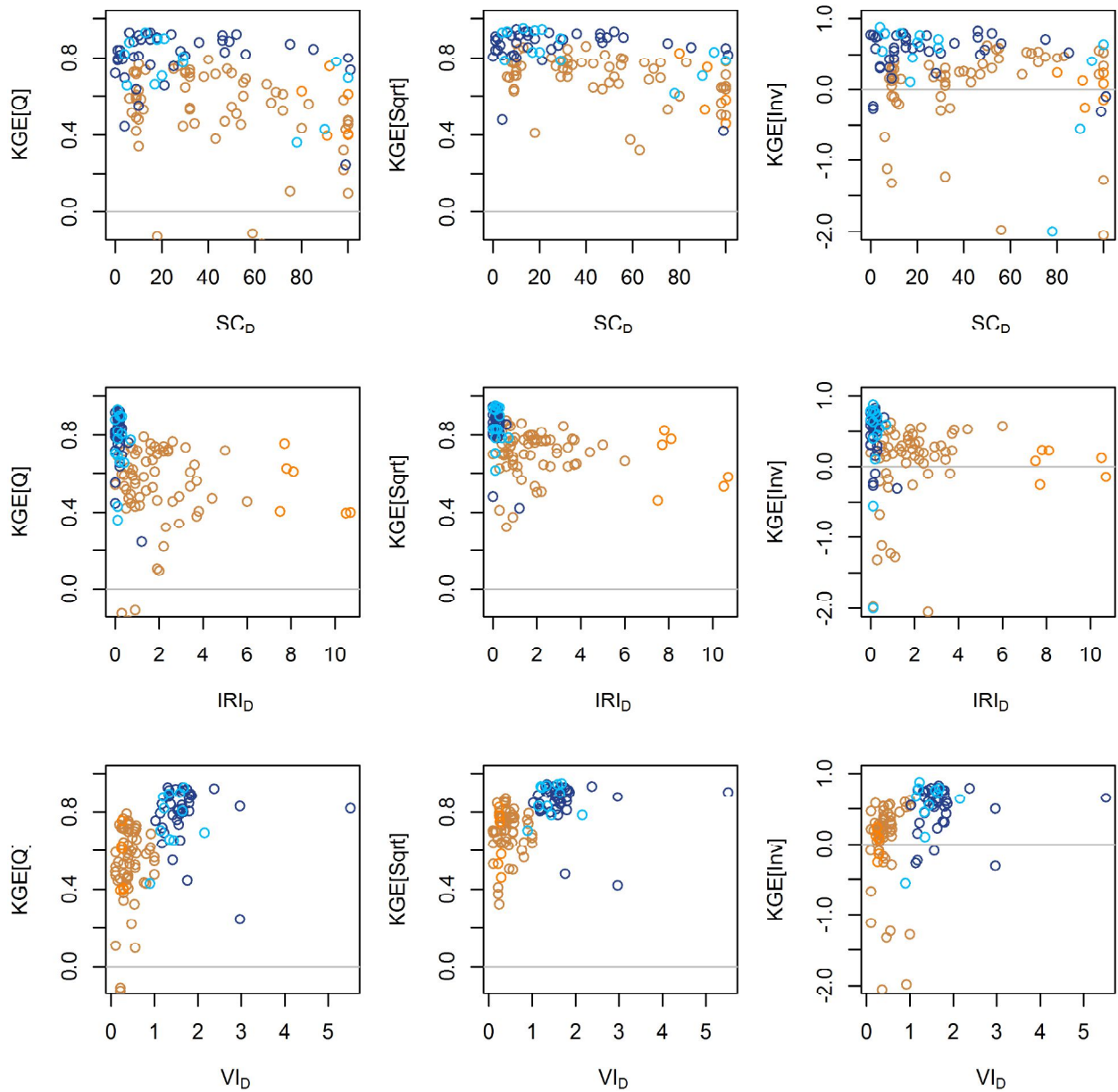


Figure F.1 – Performance du modèle GR5J-Dam en validation, obtenue en appliquant le *split-sample test* sur les sous-périodes influencées des bassins de la base de données, par rapport aux caractéristiques des barrages-réservoirs amont de chaque bassins versants. Les bassins bruns correspondent aux bassins du groupe 1, les oranges au groupe 2, les bleu foncé au groupe 3 et les bleu clair au groupe 4. L'indicateur VI_D n'est pas disponible sur les bassins V5004010, V5045020 et W2755010.

bassins : les barrages-réservoirs des bassins humides ont tendance à avoir des capacités de stockage plus faibles que ceux sur les bassins semi-arides. Cette tendance peut juste être le résultat des meilleures performances de GR5J-Dam sur les bassins humides que sur les bassins semi-arides. De même, entre la variabilité des chroniques de volume des réservoirs et les performances du modèle en validation sur les hauts, moyens et bas débits, on note des corrélations de Spearman de 0.62. Cela montre que plus les barrages ont une variabilité importante, plus ils ont tendance à avoir de meilleures performances. Cependant, comme précédemment, cette caractéristique des barrages-réservoirs dépend fortement des conditions météorologiques et du mode de fonctionnement qui en résulte.

Sur les bas débits, comme précédemment, on trouve des corrélations de Spearman de respectivement -0,43 et 0,61 entre les performances du modèle et, IRI_D et VI_D . Cela montre que le niveau potentiel d'influence des bassins n'explique pas les performances que l'on obtient sur les bas débits.

Il ressort de cette partie que plus les barrages-réservoirs amont contrôlent une partie importante du bassin, plus on a tendance à avoir de faibles performances du modèle sur les hauts et moyens débits. Cependant la corrélation obtenue reste trop faible pour être exploitable par la suite. Concernant les autres caractéristiques des barrages-réservoirs, ces dernières sont fortement liées aux conditions météorologiques du bassin. Or, dans la partie 5.3 du chapitre 5, nous avons montré que sur les bassins naturels, les performances du modèle GR5J sont en valeur médiane moins bonnes sur les bassins semi-arides que sur les bassins humides. Les tendances obtenues entre les performances du modèle et les autres caractéristiques des barrages peuvent donc être interprétées comme des difficultés de GR5J-Dam à simuler des conditions semi-arides.

F.2 Quel est le lien entre les performances du modèle et les paramètres obtenus en calage ?

Nous avons montré que les paramètres obtenus avec GR5J-Dam pouvaient différer des valeurs obtenues avec GR5J sur les bassins naturels. On note en particulier des capacités du réservoir de production, X1, et du réservoir de routage, X3, qui étaient anormalement

grandes ou petites. La figure F.2 présente le lien entre les valeurs moyennes des paramètres obtenues en calage et les performances en validation. On peut dès lors se demander si ces valeurs anormales de paramètres impactent la robustesse de GR5J-Dam.

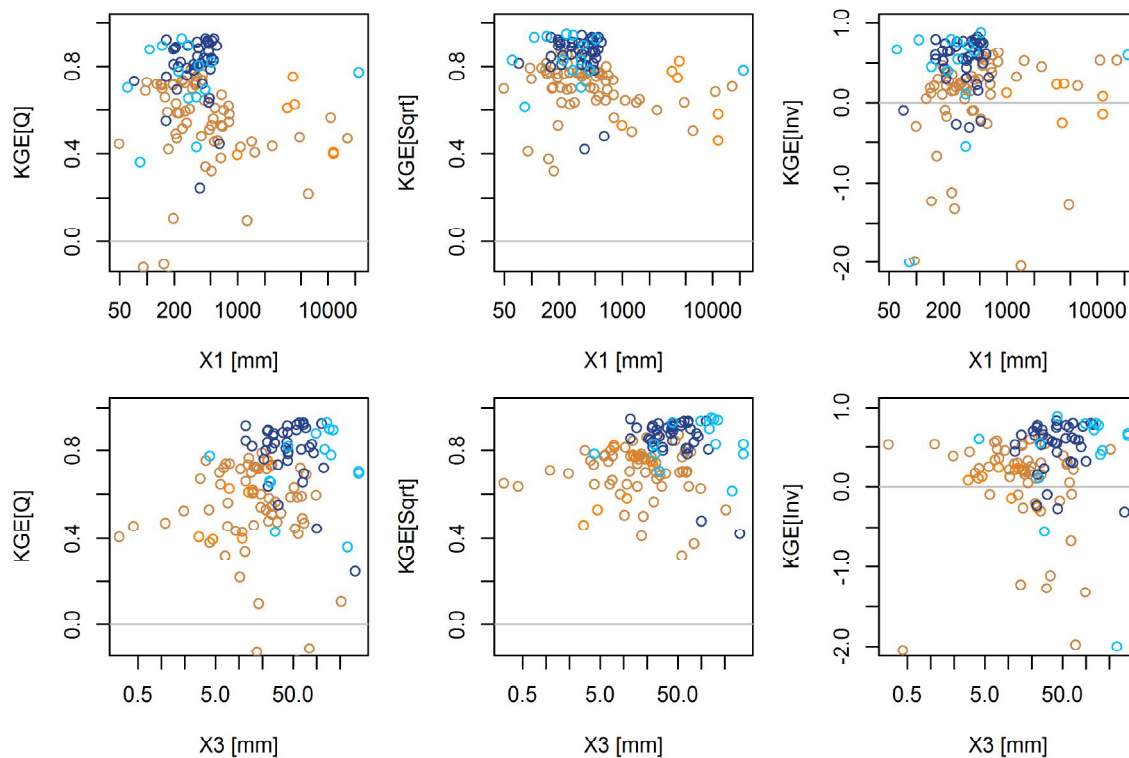


Figure F.2 – Performance du modèle GR5J-Dam en validation, obtenue en appliquant le *split-sample test* sur les sous-périodes influencées des bassins de la base de données, par rapport aux paramètres obtenus en calage. X1 correspond au réservoir de production et X3 au réservoir de routage. Les bassins bruns correspondent aux bassins du groupe 1, les oranges au groupe 2, les bleu foncé au groupe 3 et les bleu clair au groupe 4.

Au niveau du modèle, sur les moyens et hauts débits, les bassins des valeurs anormalement grandes du réservoir de production et petites du réservoir de routage ont des mauvaises performances. Plus le réservoir de routage est petit, plus le bassin est réactif face à un évènement. Dans notre cas, un petit réservoir de routage peut refléter le fait que les débits des stations sont très réactifs aux lâchers de barrages. Un réservoir de production anormalement grand amène à un fort lissage de la pluie efficace. L'eau qui arrive au réservoir de routage par le réservoir de production ne correspond donc qu'aux percolations qui sont très faibles, le réservoir de routage ne réagit donc jamais fortement aux précipitations. A ce stade, nous émettons l'hypothèse que les jeux de paramètres obtenus sur ces bassins reflètent le comportement du barrage et non du bassin.

Afin de vérifier notre hypothèse, nous allons présenter deux cas d'étude illustrant le comportement de GR5J-Dam sur (1) un bassin humide à l'aval d'un barrage-réservoir avec de bonnes performances en validation et (2) un bassin semi-aride à l'aval d'un barrage-réservoir avec de faibles performances en validation.

- **La rivière Paterson à l'aval du barrage de Lostock (210021), Australie** (figure F.3). Cette station du groupe 3 (bassins humides) se situe directement à la sortie du barrage de Lostock qui a la capacité de stocker 20% de la ressource annuelle du bassin versant. C'est un barrage au fil de l'eau qui a pour vocation de produire de l'hydroélectricité et d'écrêter les pics de crues. L'indicateur représentant la variabilité des chroniques de volumes du barrage équivaut à 1,56, ce qui montre que la réserve du barrage varie beaucoup par rapport à sa capacité de stockage. Au vu de ces caractéristiques, bien que la station se situe à l'aval du barrage, ce dernier a un impact limité. Les performances en validation de GR5J-Dam sur les moyens et hauts débits sont bonnes avec une KGE sur le débit de 0,74 et un KGE sur la racine carrée des débits de 0.80. Sur le graphique, le ΔV négatif correspond à une diminution du stock dans l'ouvrage. On note que les apports correspondants au débit observé sont relativement faibles par rapport au débit mesuré. Le barrage semble turbiner la majorité de la ressource en eau à l'échelle journalière. Le débit observé à la station est donc relativement peu influencé sur les débits moyens. En comparant le débit influencé simulé par le modèle en bleu au débit observé en noir, on constate que sur les fortes crues de début mars et fin décembre, le modèle n'arrive pas à prendre entièrement en compte l'effet d'écrêtement du barrage-réservoir qui stocke l'excédant d'eau.
- **La rivière Hunter à l'aval du barrage de Glenbawn (210015), Australie** (figure F.4). C'est un bassin semi-aride appartenant au groupe 2. La station se situe directement à l'aval du barrage Glenbawn, qui a la capacité de stocker environ huit fois le volume d'eau annuel moyen généré par le bassin. L'indicateur représentant la variabilité des chroniques de volumes du barrage équivaut à 0,24, ce qui montre que le volume du barrage varie peu par rapport à la capacité totale du barrage. Ces caractéristiques montrent que le barrage-réservoir a potentiellement un impact important sur les débits naturels. L'application du *split sample test* a montré que les performances en calage sur le KGE sur le débit et sur la racine carrée du débit

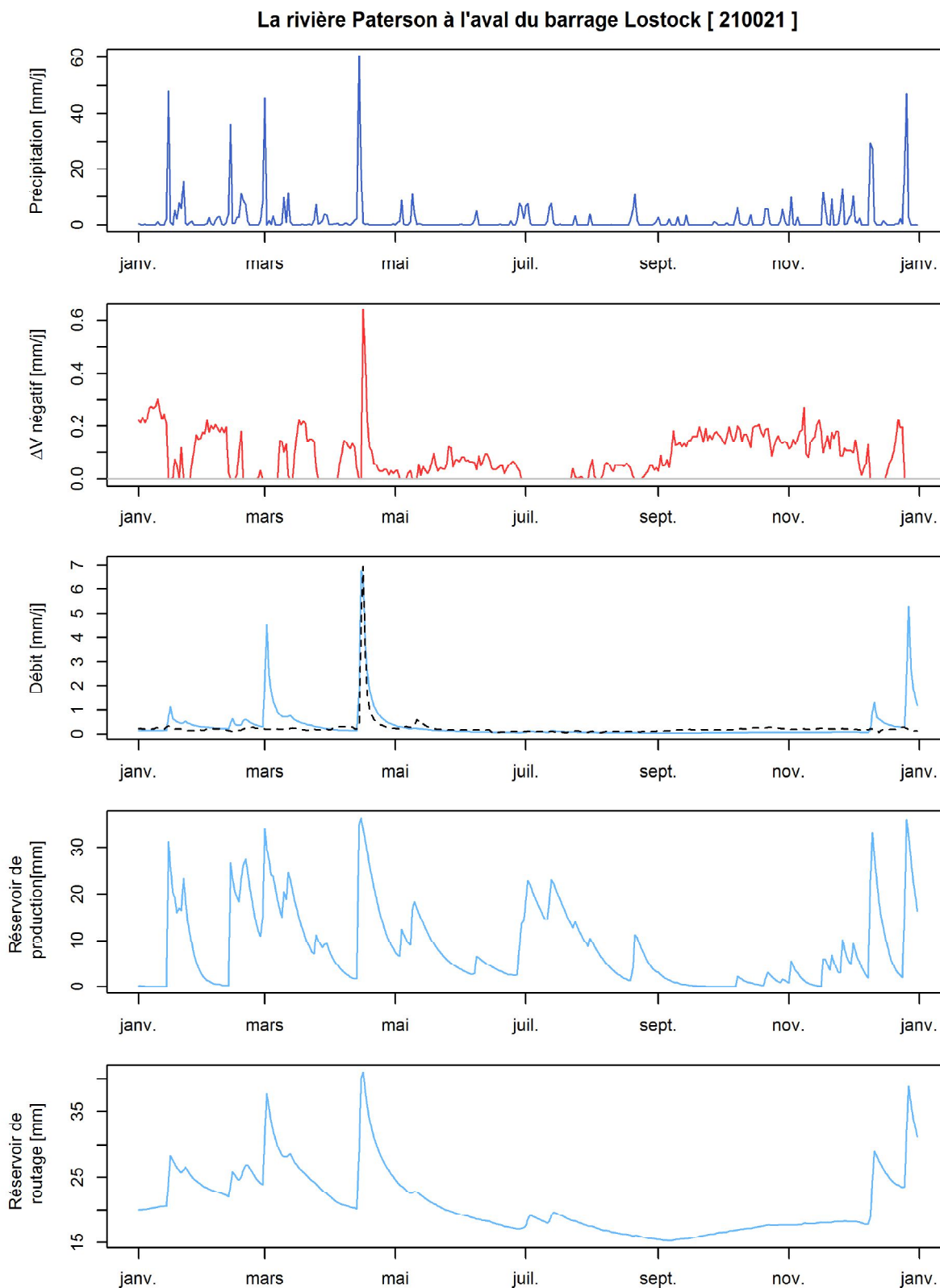


Figure F.3 – Chroniques journalières des précipitations, des ΔV négatifs du barrage en valeur absolue, des débits, de l'évolution du niveau des réservoirs de production et de routage de GR5J-Dam sur le bassin 210021 pour l'année 1994. Pour le débit, la courbe bleue correspond au débit simulé en calage et la courbe noire pointillée au débit observé.

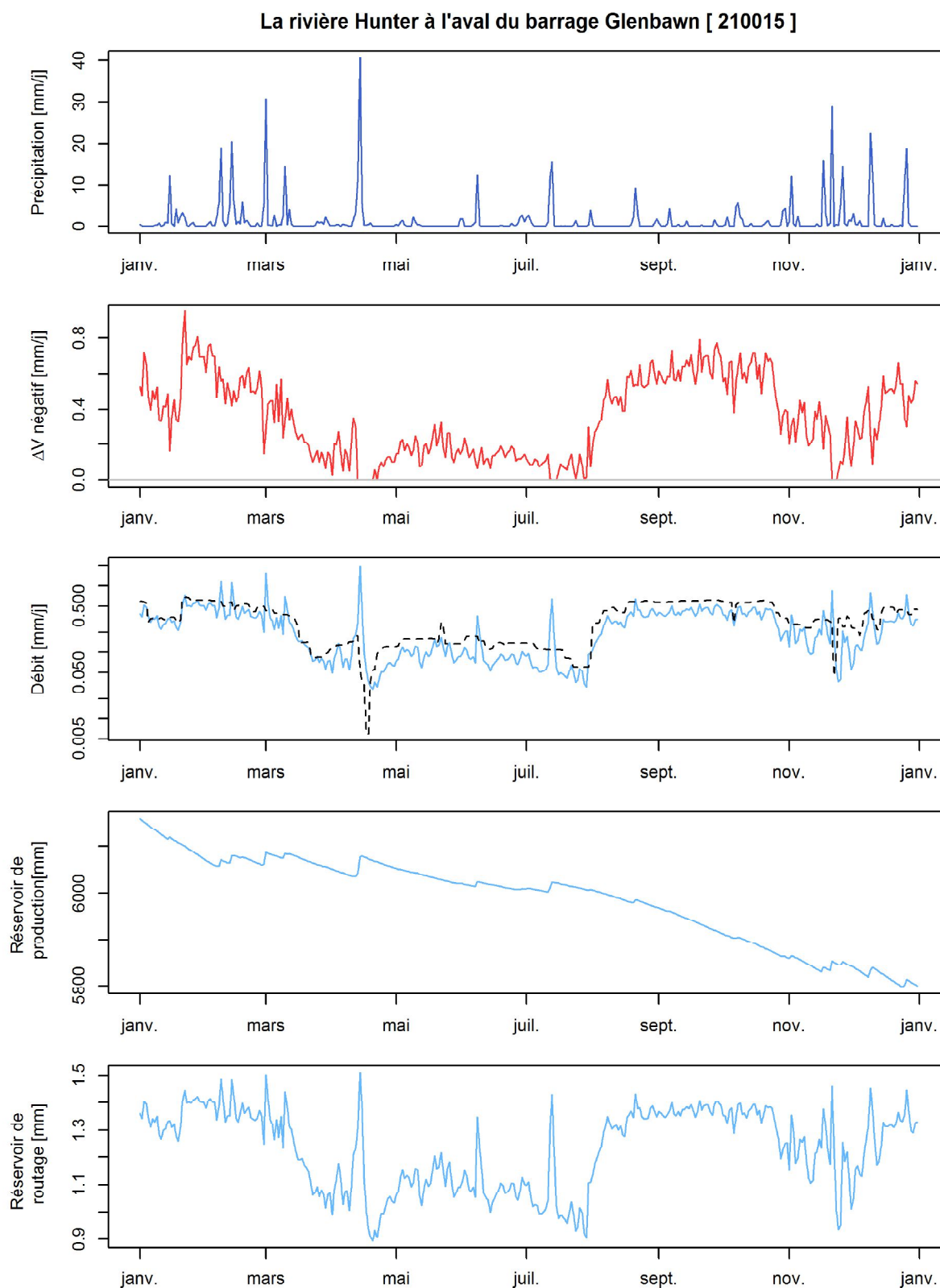


Figure F.4 – Chroniques journalières des précipitations, des ΔV négatifs du barrage en valeur absolue, des débits, de l'évolution du niveau des réservoirs de production et de routage de GR5J-Dam sur le bassin 210015 pour l'année 1994. Pour le débit, la courbe bleue correspond au débit simulé en calage et la courbe noire pointillée au débit observé.

sont respectivement de 0,44 et 0,47, ce qui montre que GR5J-Dam rencontre des difficultés à reproduire les hauts et moyens débits. On remarque également que la capacité du réservoir de production de 21800 mm est anormalement haute, et la capacité du réservoir de routage de 1.5 mm est anormalement basse. L'évolution du taux de remplissage du réservoir de production peut être associée à un problème d'initialisation du réservoir de production. En validation, les performances sont respectivement de -0,38 et -0,36. La non-robustesse du modèle et les valeurs extrêmes des paramètres traduisent la difficulté de GR5J-Dam à modéliser le débit influencé. En regardant l'évolution du réservoir de production en calage, il apparaît qu'il dépend entièrement des lâchers de barrages et que le réservoir de production ne joue pas de rôle dans la simulation du débit. Le jeu de paramètres obtenu en calage est représentatif du comportement du barrage sur la période de calage.

G

Critères d'évaluation des méthodes de naturalisation

La partie suivante discute des critères de choix d'une référence pour évaluer, de manière comparative, la confiance que l'on peut accorder aux méthodes de naturalisation. En pratique, il est préférable que le choix de la référence se fasse bassin par bassin, grâce à des données récoltées et à des indicateurs numériques si cela est possible.

Le choix du référentiel est un aspect important car c'est lui qui va en partie déterminer quelle méthode est la plus adaptée. De plus, dans le cas des méthodes utilisant un modèle hydrologique, on peut s'attendre à ce que la méthode calée sur le référentiel choisi arrive mieux à simuler un débit proche du débit de référence.

Dans cette partie, six critères sont proposées pour orienter le choix d'une référence pour chacun des cas d'étude. Les critères sur la longueur des chroniques de débits et leurs qualités ont été choisis car selon l'Organisation météorologique mondiale (World Meteorological Organization, 2008), il est recommandé de se référer à des débits observés ayant une qualité et une longueur de chronique suffisante. Trois critères permettent d'évaluer si les références sont représentatives des conditions d'écoulement naturel de la période de naturalisation : un critère sur la représentativité des conditions climatiques de la période de naturalisation et un critère sur les conditions physiques du bassin. La référence qui remplira les critères de sélection sera considérée comme la référence la plus adaptée pour la comparaison des méthodes de naturalisation.

La partie suivante se présente sous forme de discussion pour fournir des arguments globaux sur quelle est la meilleure référence. En pratique, il est préférable que le choix de la référence se fasse bassin par bassin, grâce à des données récoltées et à des indicateurs numériques si cela est possible.

G.0.0.1 Qualité des chroniques de débits observés

Définition d'un débit de qualité. Le premier critère porte sur la qualité des débits observés qui serviront de référence par la suite. Toute analyse hydrologique dépend de la qualité des données utilisées (World Meteorological Organization, 2008). Un niveau de qualité est généralement attribué aux données de débits. Pour le *Bureau of Meteorology* (BoM) en Australie, le plus haut niveau de qualité d'une donnée correspond à la meilleure mesure disponible compte tenu de la technologie, des techniques et des objectifs de contrôle

au moment du classement (Viney *et al.*, 2010). En Grande-Bretagne, l'estimation du débit observé est également définie comme étant bonne compte tenu des meilleures pratiques actuelles (Lamb *et al.*, 2003). En France, sur la Banque Hydro, un débit est considéré de qualité selon l'estimation du gestionnaire de la station. Dans les faits, la qualité du débit dépend de la précision du système de mesure mis en place, de la fiabilité de la courbe de tarage, et du post-traitement effectué. Nous renvoyons le lecteur à la partie 7.2.2.1 du chapitre 7, pour l'analyse bibliographique des incertitudes liées à l'estimation du débit observé.

Évaluation de la qualité d'une chronique de débit. On peut distinguer deux moyens pour évaluer la qualité des données : l'observation visuelle des chroniques et l'analyse numérique. Pour s'assurer de la qualité des données de débits, l'inspection visuelle est probablement la méthode la plus efficace (Crochemore *et al.*, 2019 ; World Meteorological Organization, 2008). L'observation visuelle n'est cependant pas applicable à grande échelle, c'est pourquoi plusieurs méthodes basées sur l'utilisation d'indicateurs numériques ont été développées :

- Crochemore *et al.* (2019) proposent huit critères numériques permettant d'évaluer la qualité des chroniques de débits sur environ 21 000 stations entre 1961 et 2019 : ratio du nombre d'observations disponibles sur la période 1961-2019 par rapport à la longueur de la période, ratio du nombre d'observations continues sur la période 1961-2019 par rapport à la longueur de la période, ratio du nombre d'observations continues par rapport au nombre d'observations, ratio des valeurs aberrantes par rapport au nombre d'observations, homogénéité des débits annuels, présence de tendance dans les débits annuels et présence de tendance dans les débits mensuels.
- Gustard *et al.* (1992) proposent d'évaluer la qualité des débits en évaluant la sensibilité par rapport à l'erreur probable de mesure. La sensibilité correspond au pourcentage de différence entre le Q05, débit non dépassé 5% du temps, et le Q05+10 mm. Si la sensibilité du Q05 est inférieure à 20%, alors le débit est considéré comme de qualité. Bien que non précisé, cette valeur de 10 mm peut sûrement correspondre à la précision du système de mesure mis en place.
- L'Organisation mondiale de la météorologie propose plusieurs méthodes permettant d'évaluer la qualité des données de débits (World Meteorological Organization, 2008). La méthode des courbes de double cumul consiste à tracer une courbe avec

en abscisse le débit observé à la station cible et en ordonnée le débit observé sur une station voisine. Cette méthode repose sur l'hypothèse que la courbe débit-débit de deux stations géographiquement proches doit correspondre à une ligne droite. Les points ne se trouvant pas sur la ligne droite sont alors considérés comme des valeurs aberrantes et diminuent la confiance que l'on peut avoir dans la qualité des débits observés.

Dans notre étude, en plus des codes de qualité mis en place par les fournisseurs de données, une inspection visuelle des chroniques de débits a été effectuée (partie 3.5).

Discussion sur la qualité a priori des trois références :

- La qualité des débits est potentiellement meilleure actuellement. Pour définir un débit de qualité à un moment t , on trouve dans les définitions la notion de meilleure qualité au vu de la technologie disponible à ce moment t . Une mesure de débit considérée comme très bonne dans les années 1950 ne le serait probablement plus en 2020, du fait de l'amélioration des techniques de mesures entre les deux périodes. Naik et Jay (2005) soulignent que les erreurs aléatoires dans les chroniques de débits passées sont plus importantes que de nos jours. On peut donc émettre l'hypothèse qu'entre deux débits estimés comme bons selon le fournisseur, le débit observé de la période pré-influence aura une qualité globalement moins bonne que le débit observé de la période influencée, du fait de l'amélioration dans le temps des techniques de mesure. Cela soulève également l'hypothèse qu'il n'y a pas de détérioration du réseau de mesure, ni de l'expertise réalisée sur les données.
- Sur les stations situées à la sortie d'un barrage-réservoir, le débit estimé est potentiellement de moins bonne qualité par rapport aux stations situées plus à l'aval. Le débit sortant d'un barrage-réservoir doit être mesuré pour fournir des données, sur le débit du cours d'eau, nécessaires à la gestion des rejets du barrage-réservoir. Dans notre base de données, on retrouve ainsi plusieurs stations situées en aval de barrages-réservoirs. Il est alors conseillé d'établir la station à proximité du barrage, suffisamment éloignée en aval des vannes de sortie et de l'évacuateur de crues pour permettre au débit de s'établir uniformément sur toute la largeur du cours d'eau. D'autre part, la station ne doit pas être située si loin en aval que le niveau du cours d'eau jaugé puisse être affecté par le niveau d'un cours d'eau confluent. Entre ces deux limites, les caractéristiques hydrauliques doivent être étudiées pour obtenir

un site qui présente les meilleures conditions possibles pour la mesure de la hauteur d'eau et du débit, et pour développer une courbe de tarage stable. Or, d'après Rantz (1982), il est rare de trouver un site idéal pour une station de jaugeage et il faut faire preuve de discernement pour choisir entre des sites adéquats, dont chacun présente certaines lacunes. De plus, en période d'étiage, les stations situées à quelques centaines de mètres de la sortie du réservoir sont soumises aux variations de débits générées par les manœuvres des ouvrages (BCEOM, 1999). Dans le cas des barrages-réservoirs de la Seine, les mesures sont alors effectuées sur des stations plus à l'aval. Pour les stations se trouvant à l'aval de barrage réservoir, la qualité des débits influencés observés n'est donc pas garantie.

Par la suite, dans notre étude, nous considérerons que les mesures de débit sur la période influencée sont de meilleure qualité que les mesures de débits de la période pré-influence. Les débits influencés observés sont donc de meilleure qualité que les débits observés de la période pré-influence, sauf dans le cas où la station se situe à la sortie d'un barrage-réservoir. Dans le cas des débits observés sur les bassins voisins, ils seront considérés comme de bonne qualité si l'on dispose de la majorité des mesures durant ou après la période de naturalisation.

G.0.0.2 Longueurs des chroniques de débits observés

On retrouve dans la littérature plusieurs études sur la longueur optimale d'observation pour obtenir un jeu de paramètres robustes pour un modèle pluie-débit (Juston *et al.*, 2009 ; Li *et al.*, 2010 ; Liu et Han, 2010 ; Perrin *et al.*, 2007) ou encore pour calculer des indicateurs statistiques robustes (Catalogne et Sauquet, 2012 ; Dyck, 1976 ; Nicolle *et al.*, 2013). Notre objectif est similaire, à savoir avoir pour référence une chronique de débit observé suffisamment longue pour être représentative des différentes réponses hydrologiques du bassin.

Dans le cas de la méthode de bilan sur ouvrage, qui n'utilise pas de modèle hydrologique, on compare les indicateurs naturalisés obtenus sur la période de naturalisation aux indicateurs naturels voisins ou passés. La question de la robustesse statistique est donc très importante.

Deux approches existent dans la détermination de la longueur des chroniques de débit optimale. D'une part, des études prônent l'utilisation de longues chroniques continues. Catalogne et Sauquet (2012) ont réalisé une analyse de sensibilité par ré-échantillonnage, avec des chroniques variant entre 5 et 30 ans, pour déterminer objectivement la longueur de chronique requise pour la détermination fiable d'indicateurs hydrologiques statistiques. Pour l'indice d'écoulement de base (Base Flow Index), 5 années suffisent pour avoir une valeur robuste, 18 années pour le module et 24 années pour le Q10 (débit non-dépassé 10% du temps). D'autre part, des études montrent que les mesures de débit ponctuelles sont pertinentes tant qu'elles représentent des situations hydrologiques variées. Selon Perrin *et al.* (2007), 350 jours de données ponctuelles, comprenant des conditions sèches et humides, sont suffisantes pour obtenir un jeu de paramètres robustes.

Par la suite, nous considérerons qu'une chronique de référence a une longueur suffisamment longue si elle a 24 ans de données. Si aucune des références n'est suffisamment longue, la référence avec la plus longue chronique de donnée pourra être privilégiée.

G.0.0.3 Représentativité de la période de naturalisation

Climat représentatif de la période de naturalisation. La prise en compte des débits naturels observés passés comme référentiel soulève plusieurs sources d'incertitudes. Dans le cas de la méthode de bilan sur ouvrage, une comparaison directe entre le régime de débit naturalisé sur la période influencée et le régime de débits observés sur la période pré-influence n'est pas idéale car les différences pourront refléter en partie les différences dans les conditions climatiques et physiques des deux périodes. Dans le cas des méthodes de naturalisation utilisant un modèle hydrologique, il est possible de transposer le jeu de paramètres pour minimiser l'impact des différences climatiques entre les deux périodes. Cependant, les jeux de paramètres obtenus restent en partie dépendant des conditions de calage. Vaze *et al.* (2010) montrent sur une soixantaine de bassins australiens qu'un modèle calé sur une période comprenant des épisodes secs et humides ou sur une période humide, aura des difficultés à simuler un débit sur une période sèche. Coron *et al.* (2012) montrent sur environ 200 bassins australiens qu'on observe une baisse des performances dès lors qu'il y a des différences entre les précipitations et l'évapotranspiration moyennes entre les périodes de calage et validation. Dans le cas des bassins australiens, où on ob-

serve plusieurs courts épisodes de sécheresse durant le 20^{ème} siècle (Verdon-Kidd et Kiem, 2009), Saft *et al.* (2015) montrent qu'un épisode de sécheresse prolongé, comme ce fut le cas pour la *Millenium Drought*, peut changer la relation pluie-débit qui était observée avant la sécheresse.

Nous considérons que les débits influencés observés sont par définition la meilleure référence des conditions climatiques. Dans le cas des bassins naturels voisins, qui ont des conditions climatiques similaires du fait de leur proximité géographique, ils seront considérés comme de bonnes références si la majorité de leurs observations se trouvent durant la période de naturalisation. Les débits observés de la période pré-influence sont considérés comme les plus incertains pour représenter les conditions climatiques de la période de naturalisation.

Conditions physiques représentatives de la période de naturalisation. Les caractéristiques physiques d'un bassin peuvent être classées en trois groupes (Musy, 2005) :

- les caractéristiques géométriques et topographiques telles que la surface, la forme du bassin et le relief ;
- le réseau hydrographique ;
- les caractéristiques agro-pédo-géologiques telles que la couverture et l'utilisation du sol.

Ces caractéristiques physiques conditionnent la réponse du bassin. Elles peuvent être modifiées par l'homme et impacter indirectement le débit observé. La synthèse bibliographique (chapitre 2) présente les impacts sur le débit du changement dans l'utilisation des sols et de la couverture végétale. Dans notre étude, le débit naturalisé est défini comme le débit qui s'écoulerait sans l'impact des barrages-réservoirs amont, nous ne prenons donc pas en compte l'évolution physique du bassin due aux activités humaines.

Dans notre cas, pour la suite, les débits observés de la période influencée sont, par définition, les plus représentatifs des conditions physiques du bassin sur la période de naturalisation.

H

Coefficient ARIAL sur les bas et hauts débits

Les figures suivantes complètent les résultats obtenus dans la partie 7.2.3 du chapitre 7 et illustrent les coefficients ARIAL obtenus sur les débits inférieurs à Q20 et supérieurs à Q80.

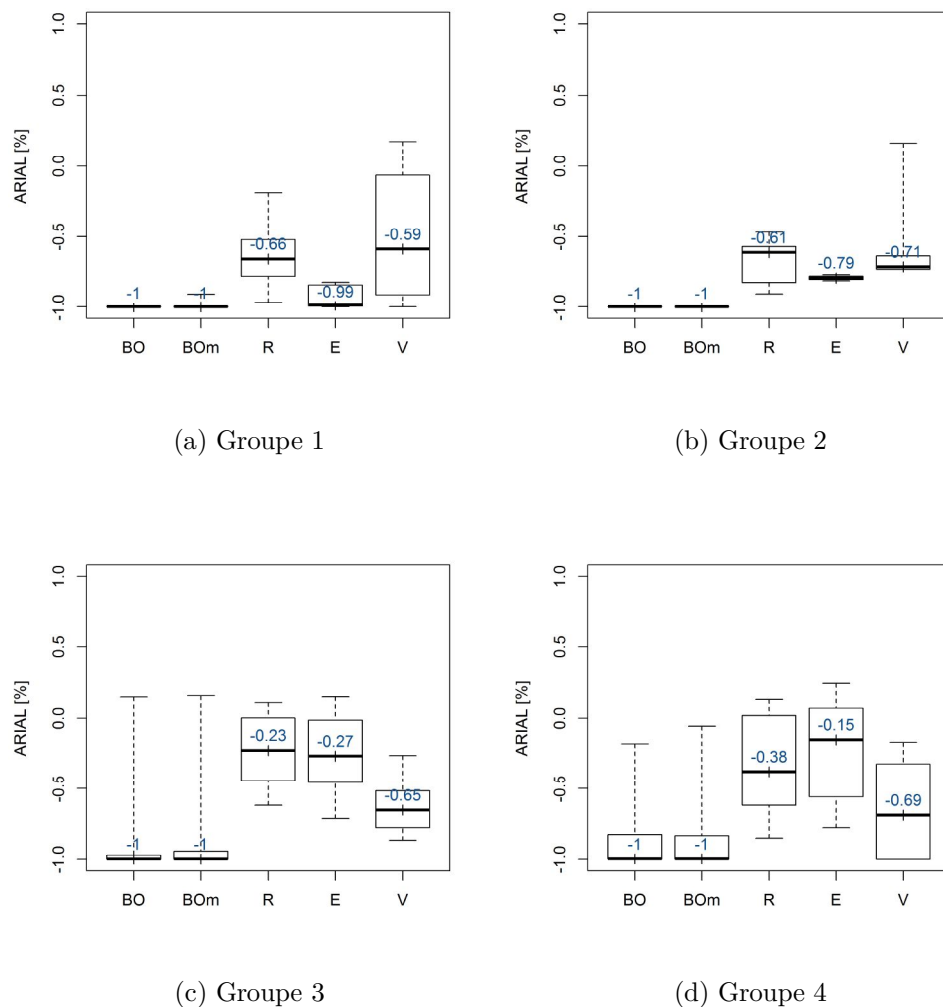
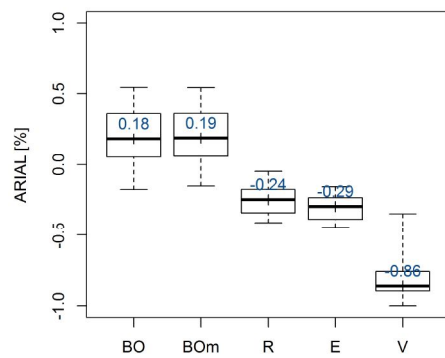
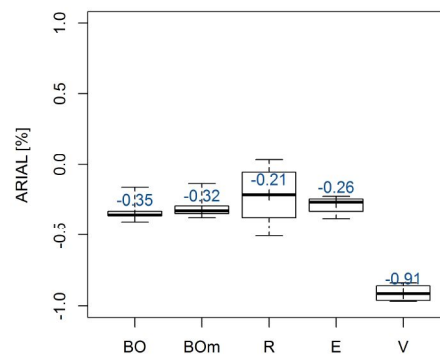


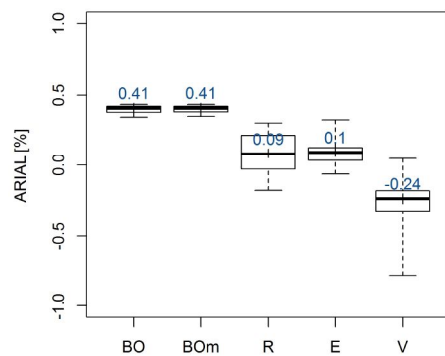
Figure H.1 – Distribution des coefficients ARIAL, calculés sur les débits naturalisés inférieurs au débit non-dépassé 20% du temps (Q20), pour chaque méthode de naturalisation (BO : Bilan sur Ouvrage; BOm : Bilan sur ouvrage avec prise en compte de l'évaporation et des précipitations sur le réservoir; R : Reconstitution; E : Extension; V : Régionalisation) par groupe de bassins. Les valeurs minimales et maximales de la boîte à moustaches correspondent aux quantiles 0,05 et 0,95. Les extrémités de la boîte à moustaches correspondent aux quantiles 0,25 et 0,75. Le quantile 0,5 est représenté par un trait horizontal épais.



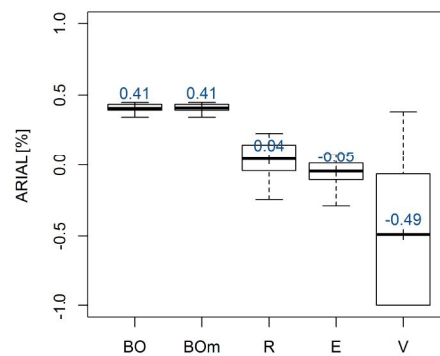
(a) Groupe 1



(b) Groupe 2



(c) Groupe 3



(d) Groupe 4

Figure H.2 – Distribution des coefficients ARIAL, calculés sur les débits naturalisés supérieurs au débit non-dépassé 80% du temps (Q80), pour chaque méthode de naturalisation (BO : Bilan sur Ouvrage; BOm : Bilan sur ouvrage avec prise en compte de l'évaporation et des précipitations sur le réservoir; R : Reconstitution; E : Extension; V : Régionalisation) par groupe de bassins. Les valeurs minimales et maximales de la boîte à moustaches correspondent aux quantiles 0,05 et 0,95. Les extrémités de la boîte à moustaches correspondent aux quantiles 0,25 et 0,75. Le quantile 0,5 est représenté par un trait horizontal épais.

Title : Streamflow naturalization

Keywords : Hydrology – Naturalization – Influenced catchment - Dams

Abstract :

The observed flow time series include natural climatic variations and hydrological alterations due to human activities. Access to natural flows is necessary to optimise water resource management or for the regulatory control of uses. Naturalization methods enable to reconstitute "natural" flows from influenced measurements. In the studies, generally only a single naturalization method is applied, without justification of its choice, and the naturalized flows are considered as an exact estimate of natural flow.

The main objective of this thesis was to develop a method to assess the reliability of naturalization methods. The main difficulty is that, over the influenced period, it is not possible to directly compare the naturalized flows with the natural flow which cannot be observed. The adopted approach is based on a database of approximately 130 catchments in Australia, the United States and France. These catchments are mainly influenced by large dams. The size and diversity of the database in terms of climatic conditions and level of influence allowed us to obtain quite general results according to the characteristics of the basins.

Results show that there are significant disparities in the flows obtained with the different naturalization methods. These differences can be explained by the fact that the naturalization methods are based on different assumptions and input data. The methodology proposed to assess the reliability of the methods is divided in two parts. The first part consists in assessing the assumptions of each of the naturalization methods and discarding the methods that do not validate the assumptions. The second part consists in evaluating the naturalization methods against a similar benchmark and assigning a confidence level to each of them. A combinatorial approach is then applied to produce naturalized flows.

Titre : Naturalisation des débits

Mots clés : Hydrologie – Naturalisation – Bassin influencé - Barrage

Résumé :

Les séries de débits observés au fil du temps comportent à la fois la trace des variations climatiques naturelles et des altérations hydrologiques dues aux activités humaines. Or, l'accès aux débits naturels s'avère souvent nécessaire afin d'optimiser la gestion de la ressource en eau ou encore pour le contrôle réglementaire des usages. Ainsi, depuis plus d'une vingtaine d'années, plusieurs méthodes de naturalisation, permettant de passer d'un débit influencé à un débit naturalisé, sont appliquées en conditions opérationnelles. Nous avons cependant constaté que, dans les études, une seule méthode de naturalisation était appliquée, bien souvent sans justification de son choix, et que les débits naturalisés obtenus étaient abusivement considérés comme des valeurs exactes de débit naturel.

L'objectif principal de cette thèse est de mettre au point une méthode permettant d'évaluer la fiabilité des méthodes de naturalisation. La principale difficulté est que, sur la période influencée, il n'est pas possible de comparer directement les débits naturalisés au débit naturel réel puisque ce dernier n'est pas observable. La démarche adoptée se base sur la mise en place d'une base de données d'environ 130 bassins versants situés en Australie, aux États-Unis et en France. Ces bassins versants sont principalement influencés par des grands barrages-réservoirs. La taille et la diversité de la base de données en terme de conditions climatiques et niveau d'influence nous a permis d'identifier des résultats généraux selon les caractéristiques des bassins et des ouvrages.

Les résultats montrent que les débits obtenus avec les différentes méthodes de naturalisation présentent des disparités, parfois très importantes. Ces dernières s'expliquent par le fait que les méthodes de naturalisation reposent sur des hypothèses et des données d'entrées différentes. La méthodologie proposée pour évaluer la fiabilité des méthodes se décompose en deux parties. La première partie consiste à évaluer les hypothèses de chacune des méthodes de naturalisation et d'écarter les méthodes dont les hypothèses ne sont pas respectées. La deuxième partie consiste à évaluer les méthodes de naturalisation par rapport à une référence externe similaire et d'attribuer un niveau de confiance à chacune des méthodes. Puis, une approche combinatoire est appliquée pour produire des débits naturalisés.