

ECOLE NATIONALE DU GENIE RURAL, DES EAUX ET DES FORETS

N° attribué par la bibliothèque

□□□□□□□□□□

THESE

pour obtenir le grade de
DOCTEUR de l'ENGREF

Spécialité: Sciences de l'Eau

préparée dans l'Unité de Recherche Hydrosystèmes et Bioprocédés
Cemagref, Antony

dans le cadre de l'**Ecole Doctorale Géosciences et Ressources Naturelles**
présentée et soutenue publiquement par

Jean-Luc Payan

le 5 mars 2007

à l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts
Centre de Paris

Prise en compte de barrages-réservoirs dans un modèle global pluie-débit

JURY

M. Nilo de Oliveira Nascimento	Président
M. Roger Moussa	Rapporteur
M. Claude Thirriot	Rapporteur
M. Gérard Degoutte	Examinateur
M. Rémy Garçon	Examinateur
M. Cyril Kao	Examinateur
M. Charles Perrin	Directeur de thèse

Remerciements

En tout premier lieu, je tiens à remercier Claude Michel et Charles Perrin qui ont encadré ces travaux avec patience et une immense disponibilité. Je leur suis profondément reconnaissant et leur manifeste tout mon respect.

Je remercie également Nilo de Oliveira Nascimento, professeur à l'Université de Minas Gerais (Brésil), qui a accepté de présider le jury, Roger Moussa, directeur de recherche à l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) à Montpellier et Claude Thirriot, professeur émérite de l'Ecole Nationale Supérieure d'Electrotechnique, d'Electronique, d'Informatique, d'Hydraulique de Toulouse (ENSEEIHT) qui se sont acquittés de la délicate tâche de rapporter sur cette thèse.

Toute ma gratitude s'adresse aussi aux membres du jury, Gérard Degoutte, ingénieur-chercheur au Cemagref d'Aix-en-Provence, Rémy Garçon, responsable de l'équipe Hydrologie et Gestion de l'Eau à la Direction Technique Générale d'Electricité de France à Grenoble et Cyril Kao ingénieur-chercheur au Cemagref d'Antony qui m'ont fait l'honneur de lire ce texte et de participer au jury de soutenance de cette thèse

Je tiens à remercier tout particulièrement Vazken Andréassian, et Julien Lerat, dont les remarques et conseils m'ont été précieux tout au long de ce travail.

J'adresse toute ma gratitude à Henri Garros-Berthet (Coyne et Bellier) et Patrick Hurand (Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne, CACG) pour leur participation au comité de suivi de thèse. Leurs remarques m'ont été très précieuses.

J'adresse ma reconnaissance à l'ensemble des organismes (liste en annexe 1) qui ont mis à disposition les données qui ont servi de base à la thèse.

Je voudrais remercier enfin, toutes les personnes de l'Unité de Recherche HBAN qui ont contribué à ce travail, par leur aide et leurs encouragements, en particulier Gildas Le Bozec et Cécile Loumagne successivement chefs d'Unité pour avoir contribué à ce que ce travail se déroule dans de bonnes conditions, Jean-Louis Rosique pour sa contribution à la mise en place de la base de données, Sophie Morin et Valérie Dansin pour leur aide dans les démarches administratives. Je n'oublie pas non plus les membres des équipes de foot, de frisbee et de basket ainsi que les "danseuses de salsa" avec qui j'ai partagé des moments de détente très agréables.

Résumé

Résumé

Les bassins versants influencés par la présence de barrages-réservoirs constituent les objets d'étude de cette thèse. L'objectif principal est de mettre au point une méthode de prise en compte, au sein d'un modèle pluie-débit global, de l'impact de retenues d'eau artificielles sur le comportement hydrologique du bassin versant. Un tel outil, simple dans sa conception, doit permettre d'améliorer la simulation des débits de bassins versants influencés et d'évaluer l'impact de barrages-réservoirs sur le régime hydrologique des cours d'eau, en particulier lorsque l'on se place loin à l'aval de l'ouvrage.

La démarche adoptée est empirique dans le sens où l'on a cherché, sur une base de données de 46 bassins versants situés en France, aux Etats-Unis et au Brésil, à exploiter au mieux, dans la structure du modèle pluie-débit, une information simple sur les ouvrages, à savoir l'évolution temporelle des volumes stockés dans les retenues. La diversité des conditions hydro-climatiques présentes dans la base de données donne aux résultats obtenus un caractère assez général. Au cours de cette thèse, un grand nombre de solutions de prise en compte des barrages-réservoirs a été testé.

Les résultats montrent que cette information sur les remplissages des ouvrages peut être utilement exploitée au sein d'une structure de modèle global pour améliorer la simulation des bassins influencés. Les solutions qui se sont révélées être les plus performantes n'engendrent pas de complexification de la structure initiale du modèle puisqu'aucun ajout de paramètre n'a été nécessaire. Des gains de performances significatifs ont été réalisés, en particulier sur la simulation des étiages. Il s'agit d'un résultat important de la thèse car il montre qu'il est possible de prendre explicitement en compte, dans un modèle pluie-débit global, les barrages-réservoirs présents sur le bassin versant.

Nous avons ensuite essayé de comprendre le lien entre la méthode de prise en compte des barrages-réservoirs et certaines caractéristiques physiques des bassins versants et des ouvrages de stockage afin de tenter d'adapter la solution au bassin versant considéré. Les résultats de ces tests ont montré que ce lien est difficile à mettre en évidence et qu'à ce stade, une solution générique semble la plus efficace.

La solution la plus performante a ensuite été évaluée sur un échantillon complémentaire de 31 bassins versants n'ayant pas servi à son développement. L'évaluation a confirmé l'intérêt de la méthode pour l'amélioration des simulations des débits mais a également montré sa sensibilité à la disponibilité des données de stockages ainsi qu'aux transferts interbassins inconnus.

Abstract

Abstract

This work focuses on catchments whose hydrological behaviour is affected by man-made reservoirs. The main objective is to find a way to account for dam operations in a lumped hydrological model. The resulting method should allow better simulations of influenced streamflows and hydrological impact assessment studies of man-made reservoirs, especially far downstream the dam.

The proposed approach relies on a large database of 46 influenced catchments located in France, the United States and Brazil. Starting from an existing lumped rainfall-runoff model, we test different ways of incorporating storage variation data in the model. The diverse hydroclimatic conditions of the catchments guarantee the general applicability of the developed method.

The results indicate that the use of storage data in a lumped rainfall-runoff model can improve streamflow simulations of influenced catchments. The introduction of this new input does not require any modification of the model structure (no parameters or functions were added). The improvement was more significant on low flows than on high flows.

We tried to link the method of incorporating storage variation data in the model with physical characteristics of the catchments and reservoirs in order to adapt the method for a given catchment. The results showed that no clear links can be established between catchments or dams physical characteristics and the method used to account for dams in the model.

The best solution developed was then assessed on a complementary set of 31 catchments. This assessment proved the efficiency of the solution developed to enhance influenced streamflow simulations but also showed its sensibility to storage data availability and unknown inter-catchment water transfers.

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Table des Matières

Remerciements.....	3
Résumé	7
Abstract	11
Introduction générale.....	25
Chapitre 1. Impacts des barrages-réservoirs.....	31
1.1. Introduction	31
1.2. Définitions préliminaires	31
1.3. Impacts des barrages-réservoirs	32
1.4. Synthèse – Particularité des systèmes étudiés.....	40
Chapitre 2. Modélisation des impacts de la gestion des barrages-réservoirs sur les débits.....	43
2.1. Introduction	43
2.2. Revue des méthodes usuelles de prise en compte des barrages-réservoirs en modélisation - Domaines d'application et limites	44
2.3. L'approche globale : pourquoi "ça marche" ?	51
2.4. Synthèse et objectif de la thèse.....	55
Chapitre 3. Démarche adoptée pour la prise en compte des barrages-réservoirs dans un modèle pluie-débit global	59
3.1. Introduction	59
3.2. Une approche empirique	59
3.3. Le modèle GR4J	62
3.4. Comment prendre en compte les ouvrages dans le modèle ?	64
3.5. Mise en œuvre de la modélisation.....	69
3.6. Synthèse	72
Chapitre 4. Présentation de la base de données	77
4.1. Introduction	77
4.2. Sources des données et constitution de l'échantillon.....	78
4.3. Situation géographique des bassins de l'échantillon.....	84
4.4. Caractéristiques des bassins et des barrages sélectionnés.....	88
4.5. Analyse des chroniques de données.....	100
4.6. Synthèse	104
Chapitre 5. Recherche d'une solution performante de prise en compte des barrages-réservoirs	107
5.1. Introduction	107
5.2. Un point d'alimentation et un point de rejet (1A1R).....	108
5.3. Analyse des meilleures solutions.....	119
5.4. Un point d'alimentation et deux points de rejet	124
5.5. Deux points d'alimentation et un point de rejet	132
5.6. Conclusion	139

Chapitre 6. Choix d'une solution de prise en compte des barrages-réservoirs adaptée au bassin versant	143
6.1. Introduction	143
6.2. Démarche	145
6.3. Réduction du nombre de solutions analysées	149
6.4. Existe-t-il un lien entre un type de solution et certaines caractéristiques des bassins versants et des ouvrages ?	150
6.5. Moduler les manœuvres des barrages-réservoirs.....	163
6.6. Synthèse	171
Chapitre 7. Transposition des résultats obtenus avec le modèle GR4J à un autre modèle pluie-débit global.....	175
7.1. Introduction	175
7.2. Le modèle TOPMODEL.....	176
7.3. Performances sur l'échantillon de bassins versants de référence.....	178
7.4. Conclusion	181
Chapitre 8. Evaluation de la meilleure solution et possible extension.....	185
8.1. Introduction	185
8.2. Evaluation de la solution A3R11 sur un échantillon de bassins versants différent de celui ayant servi à son développement.....	186
8.3. Changements des paramètres du modèle induits par la prise en compte des barrages-réservoirs	189
8.4. Cas d'étude	194
8.5. Cas des barrages-réservoirs pour lesquels les débits restitués sont connus	202
8.6. Synthèse	208
Conclusion générale	211
Bibliographie	217
Annexe 1 : Liste des fournisseurs de données.....	223
Annexe 2 : Listes des bassins et barrages.....	225
Annexe 3 : Exemples de fiches signalétiques issues de la base de données pour les bassins et barrages	229
Annexe 4 : Résultats complémentaires sur le lien entre solution de prise en compte des barrages-réservoirs et caractéristiques physiques des bassins versants et des ouvrages	231
Annexe 5 : Apport de l'introduction d'un hydrogramme unitaire spécifique au routage des rejets du réservoir image	239
Annexe 6 : Article soumis à Water Resources Research	245

Liste des figures

Figure 1.1 : Modifications du cycle hydrologique pouvant être engendrées par un barrage-réservoir (d'après Moulin, 2005).....	33
Figure 1.2 : Effets du barrage de Três Marias sur les débits du São Francisco à São Romão (154 100 km ²).....	38
Figure 1.3 : La Seine à Paris (H5920010) et les quatre réservoirs (d'après IIBRBS, 2006).....	39
Figure 2.1 : Configuration simple permettant d'utiliser une modélisation hydraulique.....	44
Figure 2.2 : Sources de "bruit" pouvant influencer la propagation du débit entre A et C.....	46
Figure 2.3 : Configuration se prêtant bien à une modélisation hydrologique.....	46
Figure 2.4 : Schématisation de la prise en compte des barrages par le modèle CEQUEAU (d'après Morin, 2002)	48
Figure 2.5 : Exemple de ce que peut "voir" un modèle pluie-débit global d'un bassin versant	52
Figure 2.6 : Comparaison entre la vision humaine et celle d'une abeille.....	52
Figure 3.1 : Architecture du modèle GR4J (Perrin, 2000).....	63
Figure 3.2 : Exemple de ce que peut "voir" le modèle GR4J modifié d'un bassin influencé	65
Figure 3.3 : Fonctionnement du réservoir image. Les "points à définir" sont appelés points d'insertion du réservoir image.....	67
Figure 3.4 : Exemple de points d'insertion du réservoir image	68
Figure 3.5 : Calage – Contrôle – Initialisation	70
Figure 4.1 : Nombre de pluviomètres nécessaires à la modélisation pluie-débit en fonction de la surface du bassin (d'après Schaake <i>et al.</i> , 2000).....	82
Figure 4.2 : Nombre d'ouvrages présélectionnés après chaque étape de la constitution de la base de données.....	83
Figure 4.3 : Localisation des 54 stations hydrométriques et des 30 barrages en France	85
Figure 4.4 : Localisation des 14 stations hydrométriques et des 8 barrages aux Etats-Unis	85
Figure 4.5 : Localisation des quatre stations hydrométriques et du barrage de Três Marias au Brésil	86
Figure 4.6 : Localisation des trois stations hydrométriques et des barrages-réservoirs en Australie...	87
Figure 4.7 : Localisation des deux stations hydrométriques et du barrage de Manantali (Mali) (d'après UNESCO).....	87
Figure 4.8 : Distribution des surfaces des bassins versants de l'échantillon	88
Figure 4.9 : Rendement en fonction de l'indice d'aridité pour les 77 bassins versants de l'échantillon	90
Figure 4.10 : Valeurs du coefficient d'irrégularité saisonnière des débits pour les bassins versants de l'échantillon (AU = Australie, BR = Brésil et SE = bassins du fleuve Sénégal)	91
Figure 4.11 : Valeurs du coefficient d'irrégularité saisonnière des pluies pour les bassins versants de l'échantillon (AU = Australie, BR = Brésil et SE = bassins du fleuve Sénégal)	91
Figure 4.12 : Capacités normales des ouvrages de l'échantillon.....	92
Figure 4.13 : Classement des bassins versants (BV) selon le nombre de barrages-réservoirs qu'ils comportent	93
Figure 4.14 : Objectifs principaux des barrages-réservoirs de l'échantillon (un ouvrage peut être comptabilisé plusieurs fois s'il est multi-objectif).....	94
Figure 4.15 : Distributions des indices descripteurs de la localisation et de l'importance des barrages-réservoirs sur le bassin versant	97
Figure 4.16 : Devenir de l'eau stockée dans une retenue.....	98
Figure 4.17 : Exemple de graphique utilisé dans la démarche d'évaluation de la qualité des données (bassin versant de l'Ille à Oberhergheim – 01/01/1996 – 31/12/2000)	102

Figure 4.18 : Durée des chroniques de l'échantillon total	104
Figure 5.1 : Points d'alimentation et de rejet du réservoir image possibles pour chacune des solutions testées	108
Figure 5.2 : Ordre des reports d'alimentation selon les points d'alimentation envisagés	110
Figure 5.3 : Procédures de calage et de contrôle pour le modèle initial et les solutions de prise en compte des retenues.....	114
Figure 5.4 : Comparaison des performances des solution A3R11 et A8R11 sur les 46 bassins versants de référence pour les critères C2MQ et C2MLQ – Contrôle.....	119
Figure 5.5 : Comparaison des performances des meilleures solutions de prise en compte des barrages-réservoirs et de la version initiale pour les critères C2MQ et C2MLQ - Contrôle.....	120
Figure 5.6 : Distributions des résultats par bassins suivant les critères C2MQ et C2MLQ pour la version initiale du modèle, la solution A3R11 et la solution "idéale"	122
Figure 5.7 : Pourcentage de bassins pour lesquels une solution est de classe 1 et 2	123
Figure 5.8 : Définition du coefficient de partage des rejets CPART	125
Figure 5.9 : Comparaison des performances de la meilleure solution à un rejet et celle à deux rejets en contrôle, bassin par bassin pour les trois critères (a, b, et c) et performances moyennes (d)	131
Figure 5.10 : Définition du coefficient de partage des alimentations	132
Figure 5.11 : Comparaison des performances de la meilleure solution à une alimentation et celles à deux alimentations en contrôle, bassin par bassin pour les trois critères (a, b, et c) et performances moyennes (d)	138
Figure 5.12 : Hydrogrammes mesuré, calculés sans prise en compte et avec prise en compte des barrages-réservoirs – Rivière São Francisco à Montante Barra do Jequitai (42030000, Brésil) - Contrôle.....	140
Figure 6.1 : Comparaison bassin par bassin des performances de la solution A3R11 et de la solution "idéale" - Critères C2MQ (a) et C2MLQ (b) en contrôle.....	143
Figure 6.2 : Variations de volume mesurées et hydrogrammes mesuré et calculés avec prise en compte des barrages-réservoirs (solutions A3R11 et A6R8) – Rivière São Francisco à Pirapora (41135000, Brésil) – Contrôle	144
Figure 6.3 : Composition de la solution "idéale" pour les critères C2MQ et C2MLQ sur les 46 bassins versants en contrôle.....	146
Figure 6.4 : Proportion des points d'alimentation et de rejet présents dans la solution idéale lorsque l'accent est mis sur les débits élevés (a, b) et sur les débits faibles (c,d).....	148
Figure 6.5 : Sélection de 25 solutions d'insertion du réservoir image parmi les 117 testées initialement	150
Figure 6.6 : Rang des solutions ayant un rejet dans la branche d'écoulement direct et indirect en fonction des descripteurs des bassins versants	155
Figure 6.7 : Distribution des performances pour les solutions A5R8 et A3R11 selon la valeur de l'indice i3 – Critère C2MLQ, contrôle	157
Figure 6.8 : Distributions des performances des deux meilleures associations, du meilleur modèle unique et de la solution "idéale" – C2MVQ, contrôle	159
Figure 6.9 : Comparaison des performances de l'association A10R8-A3R11 et de la solution A3R11 sur les 46 bassins versants de référence – C2MVQ, contrôle.....	160
Figure 6.10 : Comparaison des performances de la paire de solutions A10R8-A3R11, et de la solution à deux rejets A3R8.11 sur les 46 bassins versants de référence – C2MVQ, contrôle.....	162

Figure 6.11 : Valeurs du coefficient de partage de la solution A3R8.11 en fonction des descripteurs i1, i2, i3 et i4	163
Figure 6.12 : Comparaison des performances de la solution A3R11 avec CVISI optimisé et CVISI fixé à 1 pour les trois critères – 46 bassins versants, contrôle	167
Figure 6.13 : Comparaison des performances de la solution A3R11 avec CVISI fixé à 1 et optimisé et des performances du modèle sans prise en compte des barrages-réservoirs pour les trois critères – 46 bassins versants, contrôle	169
Figure 6.14 : Valeurs du coefficient de visibilité de la solution A3R11 en fonction des descripteurs i1, i2, i3 et i4	171
Figure 7.1 : Structure du modèle TOPMO, version modifiée du modèle TOPMODEL	177
Figure 7.2 : Distributions des performances par bassin suivant les critères C2MQ et C2MLQ pour la version initiale du modèle et la solution A3R4	180
Figure 8.1 : Distributions des superficies des 31 bassins versants de l'échantillon complémentaire et des 46 bassins versants de l'échantillon de référence	187
Figure 8.2 : Comparaison des performances de la solution A3R11 et de la version sans prise en compte des barrages-réservoirs sur l'échantillon complémentaire de 31 bassins versants pour les critères C2MQ et C2MLQ – Contrôle	188
Figure 8.3 : Comparaison des valeurs des paramètres du modèle ne prenant pas en compte les barrages-réservoirs sur des périodes antérieures et postérieures à la mise en eau des ouvrages et des paramètres de la solution A3R11	191
Figure 8.4 : Comparaison bassin par bassin des quatre paramètres du modèle ne prenant pas en compte les barrages-réservoirs et de la solution A3R11 obtenus pour les 46 bassins versant de référence	193
Figure 8.5 : Hydrogrammes observé, simulés avec le modèle sans prise en compte des barrages-réservoirs et avec la solution A3R11 de prise en compte des ouvrages – L'Aube à Arcis-sur-Aube – Contrôle	196
Figure 8.6 : Hydrogrammes observé, simulés avec le modèle sans prise en compte des barrages-réservoirs et avec la solution A3R11 de prise en compte des ouvrages – La Thur à Staffelfelden – Contrôle	197
Figure 8.7 : Hydrogrammes observé, simulés avec le modèle sans prise en compte des barrages-réservoirs et avec la solution A3R11 de prise en compte des ouvrages – La Russian River à Hopland – Contrôle	199
Figure 8.8 : Hydrogrammes observé, simulé avec le modèle sans prise en compte des barrages-réservoirs et avec la solution A3R11 de prise en compte des ouvrages – La Truyère à Serverette – Contrôle	201
Figure 8.9 : Système à modéliser avec un seul sous-bassin amont (d'après Lerat et al., 2006).....	203
Figure 8.10 : Comparaison des performances de l'approche mixte et de la version sans prise en compte des barrages-réservoirs sur l'échantillon de 16 bassins versants pour les critères C2MQ et C2MLQ – Contrôle	204
Figure 8.11 : Comparaison des performances de l'approche mixte et de la solution de prise en compte des barrages-réservoirs A3R11 sur l'échantillon de 16 bassins versants pour les critères C2MQ et C2MLQ – Contrôle	206
Figure 8.12 : Bilan journalier simplifié au niveau du barrage	207

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Quelques caractéristiques des réservoirs du bassin de la Seine	39
Tableau 4.1 : Caractéristiques hydro-climatiques des 77 bassins versants par pays – Valeurs minimales et maximales par pays	89
Tableau 4.2 : Capacités normales des barrages-réservoirs par pays	92
Tableau 4.3 : Répartition du nombre de bassins versants et de barrages-réservoirs entre l'échantillon de référence et l'échantillon complémentaire.....	100
Tableau 5.1 : Performances moyennes des 117 solutions testées sur l'échantillon des 46 bassins versants de référence – Contrôle (performances exprimées suivant le critère C2M, variant de -100 à 100 ; 100 correspondant au modèle parfait)	111
Tableau 5.2 : Comparaison des améliorations de performances des solutions testées avec celles du modèle initial en contrôle sur l'échantillon des 46 bassins versants de référence - Les solutions grisées permettent une amélioration moyenne d'au moins un point par rapport au modèle initial	115
Tableau 5.3 : Comparaison des performances des solutions testées avec celles du modèle initial en contrôle avec les paramètres de la solution A3R11 sur l'échantillon des 46 bassins versants de référence - Les solutions grisées permettent une amélioration moyenne d'au moins un point par rapport au modèle initial.....	117
Tableau 5.4 : Classement des solutions les plus performantes sur les 46 bassins versants de référence en contrôle pour les trois critères – CPART optimisé (en grisé, les solutions à deux rejets)	127
Tableau 5.5 : Classement des solutions les plus performantes sur les 46 bassins versants de référence en contrôle pour les trois critères – CPART fixe (en grisé les solutions à deux rejets)	130
Tableau 5.6 : Classement des solutions les plus performantes sur les 46 bassins versants de référence en contrôle pour les trois critères – CPART optimisé (en grisé les solutions à deux alimentations)	134
Tableau 5.7 : Classement des solutions les plus performantes à alimentation unique et double sur les 46 bassins versants de référence en contrôle pour les trois critères – CPART fixé (en grisé les solutions à deux alimentations).....	136
Tableau 6.1 : Performances moyennes de la sélection de 25 solutions testées sur l'échantillon de 46 bassins versants classés en fonction des quatre descripteurs – C2MQ, contrôle.....	152
Tableau 6.2 : Performances moyennes de la sélection de 25 solutions testées sur l'échantillon de 46 bassins versants classés en fonction des quatre descripteurs – C2MLQ, contrôle	153
Tableau 6.3 : Comparaison des indices moyens des 17 bassins versants (BV) dont les performances sont améliorées par l'association de deux solutions avec les indices moyens des 29 bassins versants non améliorés et de l'échantillon total	160
Tableau 6.4 : Classement des solutions les plus performantes sur les 46 bassins versants de référence en contrôle – CVISI optimisé (en grisé) et fixé à 1	166
Tableau 7.1 : Performances moyennes des 36 solutions testées sur l'échantillon de bassins versants de référence – Contrôle	179
Tableau 8.1 : Principales caractéristiques des bassins versants et des barrages-réservoirs présentés	194
Tableau 8.2 : Principales caractéristiques des bassins versants et des barrages-réservoirs pour lesquels la prise en compte des barrages détériore les performances du modèle initial	205

Tableau 8.3 : Indices moyens des quatre bassins versants (BV) pour lesquels la solution A3R11 est plus performante que l'approche mixte, indices moyens des 12 bassins versants pour lesquels l'approche mixte est plus performante et indices moyens de l'échantillon total.....	206
---	-----

Introduction générale

Introduction générale

La Commission Mondiale des Barrages estime à plus de 45 000 le nombre de grands barrages¹ dans le monde aujourd'hui et à 1 500 le nombre de barrages en construction. Ainsi, près de la moitié des fleuves compte au moins un aménagement de ce type (WCD, 2000).

Pourquoi un tel engouement pour les barrages ?

L'important développement des barrages dans le monde est lié à la production d'énergie hydroélectrique et à la nécessité de stocker l'eau pour se prévenir contre la variabilité saisonnière ou interannuelle des écoulements (pour l'irrigation par exemple). Dans une moindre mesure, les barrages servent aussi à réduire les effets des inondations. Ces utilisations variées ainsi que leur aspect imposant et massif ont contribué à faire des barrages un symbole du développement et de la maîtrise de la nature par l'Homme. Nehru les désignait en 1947 comme "les temples de l'Inde moderne".

Actuellement, malgré la construction de nouveaux ouvrages (barrage géant des Trois Gorges achevé en 2003 par exemple), la tendance semble s'être inversée dans certains pays. Aux Etats-Unis par exemple, le taux de démantèlement de barrages est supérieur à celui de construction (McCully, 2001). Dans certains pays, l'opposition grandissante d'organisations écologiques et de communautés menacées d'être déplacées entrave, voire empêche totalement la construction de nouveaux ouvrages. C'est le cas en Inde pour les aménagements sur le bassin du fleuve Narmada (Roy, 2003) ou plus proche de nous en France où le projet de barrage à Charlas (Haute-Garonne) a provoqué une vive polémique.

Pourquoi un changement dans les projets de barrages ?

A partir des années 50 et jusqu'à la fin des années 80, la construction de barrages a connu un essor très important. Actuellement, on dispose donc d'un nombre de cas et d'un recul suffisant pour évaluer les performances réelles ainsi que les impacts sociaux et environnementaux de ces aménagements. Les barrages ont largement contribué au développement humain, et les avantages qui en résultent ont été considérables. Cependant, dans certains cas, les bénéfices liés aux barrages ont été surestimés et certains de leurs impacts sociaux et environnementaux ont été mal, voire pas du tout pris en compte lors des phases de conception des projets. Ainsi, les barrages apparaissent être des aménagements à double tranchant (Avakyan et Iakovleva, 1998 ; Graf, 1999 ; WCD, 2000 ; Leroy Poff et Hart, 2002) : indispensables au développement dans certains cas, mais aux lourdes

¹ Selon la Commission Internationale des Grands Barrages, un *grand barrage* a une hauteur supérieure à 15 m (par rapport à la fondation), ou une hauteur comprise entre 5 à 15 m et ayant un réservoir d'un volume supérieur à 3 millions de m³.

conséquences sociales et environnementales. La mise au point d'outils performants permettant d'évaluer *a priori* et *a posteriori* l'impact de barrages sur le bassin versant est donc indispensable afin de mieux comprendre (et si possible anticiper) l'évolution du fonctionnement des hydrosystèmes perturbés par les ouvrages.

Contexte d'étude

Les bassins versants influencés, auquel nous nous intéressons dans ce travail, ont une relation pluie-débit qui est altérée par la présence de l'ouvrage. Sur ces bassins, les variations de débit ne sont plus uniquement dues à des phénomènes naturels puisque des perturbations artificielles viennent s'y ajouter. Comment peut-on en tenir compte dans les modèles hydrologiques ? Jusqu'à présent, les modèles hydrologiques simples ne le font pas. Y a-t-il d'ailleurs une solution simple ? Jusqu'où, lorsque l'on s'éloigne vers l'aval, est-il nécessaire de tenir compte des ouvrages ?

Objectif de la thèse

L'objectif principal de cette thèse est de mettre au point une méthode de prise en compte, pour un type particulier de modèles pluie-débit dits globaux, de l'impact de retenues d'eau artificielles sur le comportement hydrologique du bassin versant. Un tel outil doit permettre d'améliorer la simulation des débits des bassins versants influencés et d'évaluer l'impact de barrages-réservoirs (existants ou projetés) sur le régime hydrologique à l'aval des ouvrages.

Démarche et organisation du mémoire

Le premier chapitre de cette thèse aborde les impacts hydrologiques des barrages et plus spécialement les effets des ouvrages sur les débits aval. Il est également l'occasion de rappeler les particularités des systèmes étudiés, c'est-à-dire les bassins versants influencés par la présence d'un ou plusieurs barrages.

Le chapitre 2 se focalise sur les méthodes usuelles de prise en compte des impacts des barrages en modélisation. Nous y détaillons leur domaine d'application ainsi que leurs limites. Nous terminons ce chapitre en insistant sur les particularités de l'approche dite globale et sur l'absence de solution à l'heure actuelle pour prendre en compte les ouvrages avec ce type d'approche.

Les chapitres 3 et 4 sont consacrés à la description du cadre de développement mis en place, des outils et des données utilisées. La démarche adoptée est empirique : nous travaillons sur un grand nombre de bassins versants influencés et nous cherchons la manière la plus performante d'exploiter, dans la structure d'un modèle pluie-débit global (le modèle GR4J), l'évolution temporelle des volumes d'eau stockés dans les retenues. Le large échantillon de bassins versants utilisé permet d'assurer une relative généralité aux résultats obtenus. Le chapitre 4 est plus spécialement consacré à la présentation de la base de données qui a spécifiquement été mise au point pour ce travail de recherche. Les étapes de sa constitution y sont détaillées. Cette base regroupe les données (pluie, débit,

évapotranspiration et volumes stockés dans les retenues) de 77 bassins versants dans des contextes hydro-climatiques très différents. En effet, la base est constituée de bassins versants répartis sur six pays : France, Etats-Unis, Brésil, Australie, Sénégal et Mali.

La recherche d'un moyen performant de prise en compte des impacts des barrages au sein du modèle nous a amené à comparer un grand nombre de solutions différentes. Nous avons progressé en complexifiant progressivement la structure des solutions testées. La totalité des résultats de ces tests ainsi que la solution la plus performante sur l'ensemble des bassins versants sont présentés au chapitre 5.

Dans le chapitre 6, nous explorons les possibilités d'adapter la solution de prise en compte des barrages au bassin versant en fonction de certaines de ses caractéristiques physiques et de celles des ouvrages présents.

Dans le chapitre 7, nous évaluons dans quelle mesure les résultats obtenus avec le modèle GR4J sont transposables à un autre modèle pluie-débit global. Nous utilisons pour cela une version modifiée du modèle TOPMODEL.

Le dernier chapitre est consacré à l'évaluation de la solution de prise en compte des barrages-réservoirs finalement retenue sur un échantillon de bassins versants n'ayant pas servi à son développement. Nous y étudions également les changements induits par la prise en compte des données barrages sur le comportement des paramètres du modèle. Nous terminons le mémoire par la présentation des résultats de l'application de la meilleure solution à quatre bassins versants influencés par des barrages-réservoirs à des degrés différents et proposons certaines perspectives d'application des modèles.

Chapitre 1

Chapitre 1.

Impacts des barrages-réservoirs

1.1. Introduction

La construction d'un barrage-réservoir engendre des effets de diverses natures, sur le milieu physique mais également dans le domaine socio-économique. Ce chapitre se focalise sur la description des impacts hydrologiques des retenues et plus précisément sur les effets des ouvrages sur les débits aval.

1.2. Définitions préliminaires

Avant de présenter les impacts hydrologiques des retenues artificielles, nous précisons quelques définitions qui permettent de comprendre ce que nous entendons par les termes "*barrage*", "*retenue artificielle*", "*réservoir*" ou "*barrage-réservoir*".

Un *barrage* est un ouvrage construit en travers d'une vallée, pour retenir l'eau ou constituer un réservoir (ou une retenue) (UNESCO, 2005). Un *réservoir artificiel* ou une *retenue* désigne l'étendue d'eau formée par accumulation à l'amont du barrage et utilisée pour le stockage, la régularisation et le contrôle des ressources en eau. Un *barrage-réservoir* désigne le barrage et la retenue qu'il crée.

Les principaux objectifs des barrages peuvent être regroupés en trois catégories :

- Réduire les irrégularités naturelles des flux d'eau à la surface du sol dans le but de les rendre compatibles avec les activités humaines (garantir une source d'eau fiable pour les utilisations agricoles, industrielles et domestiques, réduire les risques liés aux crues...);
- Utiliser l'eau comme source d'énergie (hydroélectricité...);
- Fournir un cadre pour certains loisirs. Ce dernier objectif est très souvent associé à l'une des catégories précédentes ou bien est attribué à des ouvrages ayant perdu leur rôle initial.

*Remarque : afin de rendre plus appréhendable la capacité des ouvrages, on note qu'un volume d'un million de m³ (1 hm³) est équivalent au volume de 400 piscines dont les dimensions sont de 50m*20m*2,5.*

1.3. Impacts des barrages-réservoirs

1.3.1. Des aménagements lourds... de conséquences !

Les barrages constituent souvent des aménagements lourds du bassin versant puisqu'ils forment une barrière à travers la rivière (barrage au fil de l'eau) ou bien sont alimentés par une dérivation d'une quantité importante d'eau (barrage en dérivation). Par conséquent, l'implantation et les modes de gestion des barrages ont de nombreux impacts socio-économiques et environnementaux à différentes échelles spatiales et temporelles.

Une abondante littérature traite en détail des diverses conséquences de l'implantation d'un barrage sur un bassin versant. On peut citer par exemple les travaux de la Commission Mondiale des Barrages (WCD, 2000) qui abordent ce thème. Les résultats sont consignés dans un rapport comportant des conseils pour les futurs projets de construction de barrages. Pour un recensement extrêmement détaillé et documenté des impacts des ouvrages (malgré un point de vue très critique sur leur utilité), on peut se référer à l'ouvrage de McCully (2001).

Le but de ce paragraphe n'est pas de dresser un bilan exhaustif de l'ensemble des impacts des ouvrages ni de juger de la pertinence de tels aménagements. Il s'attache à décrire les effets des retenues artificielles sur l'hydrologie et en particulier sur les débits.

La présence d'un barrage-réservoir sur un bassin versant aura un impact à plusieurs niveaux du cycle hydrologique : les régimes d'écoulement, les réserves d'eau, les échanges avec le sol ainsi que l'évaporation peuvent être influencés (Figure 1.1). Ces impacts peuvent être purement anthropiques (*i.e.* directement liés à la gestion des ouvrages) et "pseudo-naturels" (*i.e.* modifications de processus naturels engendrées par la présence de barrages-réservoirs).

A la mise en eau d'une retenue, deux constatations à propos de l'écoulement de l'amont vers l'aval viennent naturellement :

- le tronçon du cours d'eau à l'amont immédiat du barrage se transforme fortement, passant d'un milieu lotique (*i.e.* d'eau courante) à un milieu lentique (*i.e.* d'eau stagnante) ;
- les variations de débit à court et à long terme sont modifiées dans la partie aval du bassin versant.

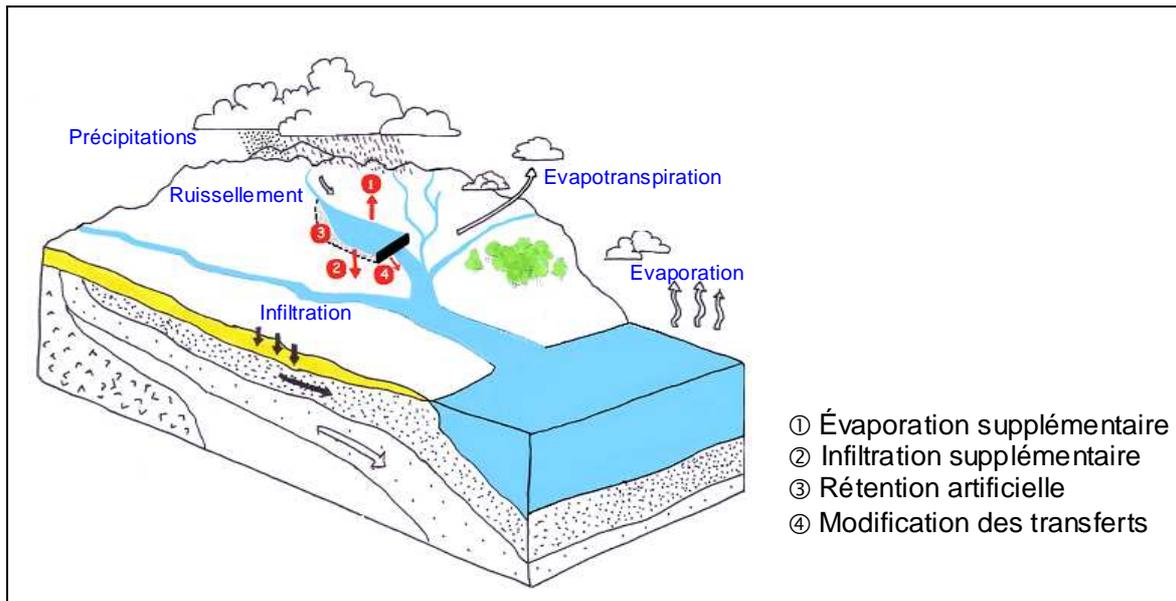


Figure 1.1 : Modifications du cycle hydrologique pouvant être engendrées par un barrage-réservoir (d'après Moulin, 2005)

La nouvelle retenue d'eau peut être responsable d'une augmentation de l'évaporation du bassin (au niveau du lac) tout comme de l'accroissement des infiltrations et de l'approvisionnement des nappes au contact prolongé de l'eau du réservoir et du sol. De plus la pluie tombant sur la retenue ne s'infiltrant pas pourra participer à la génération du débit plus rapidement.

Dans la suite du chapitre, nous nous sommes focalisés sur les impacts des barrages-réservoirs sur les débits à l'aval car cette grandeur intègre de nombreux processus se produisant sur le bassin versant. C'est donc une variable pratique car son évolution dans le temps synthétise le comportement du bassin versant.

1.3.2. Impacts des barrages-réservoirs sur les débits à l'aval

1.3.2.1. Bibliographie

Les impacts des barrages-réservoirs en général et notamment sur les débits sont spécifiques aux bassins versants, au contexte hydroclimatique et aux ouvrages. Plus précisément, les effets d'un ouvrage donné vont dépendre de sa capacité par rapport aux quantités d'eau écoulées, des objectifs de gestion (écrêtement des crues, irrigation, hydroélectricité...) (Williams et Wolman, 1984) et également du type de climat (Batalla *et al.*, 2004). Il est alors délicat d'énoncer des règles générales sur le sujet.

Nous présentons dans la suite, les résultats de différentes études illustrant les impacts des ouvrages sur les débits.

Les études hydrologiques abordant cette question visent en général à étudier les impacts d'un ou plusieurs barrages sur le comportement hydrologique d'un bassin versant donné mais peu de synthèses ou d'études générales existent (Graf, 2006).

- Cadier et Dubreuil (1986) se sont intéressés à l'impact sur le régime hydrologique d'un grand nombre de petites retenues (moins d'un million de m³) sur de petits bassins du Nordeste du Brésil. Ils ont montré que globalement, un grand nombre de petits réservoirs diminue la quantité d'eau disponible, accroît l'irrégularité du régime hydrologique et l'aridité apparente de celui-ci.
- Desconnets *et al.*, (1998) ont utilisé, au pas de temps journalier, le modèle hydrologique distribué CEQUEAU-ONU pour évaluer l'impact sur les écoulements de 15 retenues significatives du bassin du Nakambé à Wayen (20 800 km²) au Burkina Faso. L'étude a montré que les aménagements entraînent, à l'échelle annuelle, une diminution moyenne de l'ordre de 20 % des écoulements naturels à la station de Wayen et que l'influence des barrages-réservoirs est plus marquée en année sèche.
- Zsuffa (1999) étudie l'influence des usines hydroélectriques autrichiennes sur le régime hydrologique du Danube grâce à une analyse statistique des hauteurs d'eau de stations situées à l'aval, sur la partie hongroise du bassin. Il montre que les débits annuels maximaux ont diminué significativement mais que le nombre de crues petites et moyennes a augmenté sur la période étudiée. Ces modifications sont liées à la suppression de superpositions d'ondes de crue résultant de la construction d'un système d'usines hydroélectriques en chaîne sur la partie autrichienne du bassin. L'étude montre que ces aménagements ont permis d'améliorer la protection des digues contre les inondations sur la partie hongroise.
- Peters et Prowse (2001) s'intéressent aux modifications des débits aval occasionnées par le barrage W.A.C. Bennett sur un très grand bassin versant au Canada. Le barrage contrôle 24 % du bassin de Peace à la station Peace Point (293 000 km²) située à 1 100 km à l'aval. Une station localisée juste à l'aval du barrage a été sélectionnée pour suivre l'évolution de l'influence du barrage-réservoir. L'étude repose sur la comparaison de deux chroniques journalières de débits, l'une mesurée après la mise en eau de l'ouvrage et l'autre "naturalisée", c'est-à-dire calculée en supposant l'absence de l'ouvrage. L'association d'un modèle hydrologique et d'un modèle hydraulique a servi à la reconstitution des débits naturalisés. Les résultats ont montré que les effets du barrage-réservoir sur les débits sont significatifs même très loin à l'aval. Les débits moyens en hiver (la période "sèche" du régime glacio-nival) sont augmentés de 250 % alors que les débits annuels maximaux sont de 35 % à 39 % plus faibles. La régulation de la rivière a également réduit la variabilité (temporelle) des débits. Cependant, loin à l'aval, l'hydrogramme garde la forme générale de l'hydrogramme "naturalisé". Ceci

s'explique par l'importance des affluents de la partie du bassin entre le barrage et l'exutoire (zone intermédiaire). Ainsi, des débits importants peuvent être observés malgré les effets du barrage.

- López-Moreno *et al.* (2002) évaluent l'impact de barrage-réservoir Yesa sur la réduction et la saisonnalité des crues sur le bassin versant amont de l'Aragon en Espagne. Ils concluent que l'action du barrage dépend de la fréquence de la crue mais également du niveau d'eau dans la retenue (et donc des objectifs de gestion). Les crues de fréquence rare sont moins écrêtées que celles plus fréquentes. Un résultat plus marquant est qu'il peut arriver que le pic de crue à l'aval du barrage soit plus fort que celui observé à l'amont. Ce cas est possible lorsque à l'arrivée d'une crue, la retenue est quasiment pleine et que, pour des raisons de sécurité de l'ouvrage, il soit nécessaire de lâcher de l'eau. Ce type de situation doit cependant être évité afin de ne pas aggraver les conséquences d'une crue à l'aval.
- Assani *et al.* (2002) analysent les impacts d'un barrage sur le régime hydrologique de la rivière Matawin au Canada. Cette étude s'appuie sur une analyse statistique de deux chroniques de débit de 60 ans, l'une à l'amont de l'ouvrage et l'autre juste à l'aval. Les contextes climatique, lithologique et végétal sont homogènes rendant possible la comparaison des régimes hydrologiques des deux bassins malgré les apports d'affluents. A l'échelle annuelle, le module n'est pas affecté par le barrage. Aux échelles mensuelle et saisonnière, l'impact du barrage se traduit par une inversion du régime hydrologique en raison de l'exploitation hydroélectrique de l'ouvrage. Le barrage entraîne également un laminage du débit maximum mensuel et le changement de sa période d'occurrence. A l'échelle journalière, le barrage affecte la période d'occurrence et l'amplitude des débits extrêmes.

Les cas présentés illustrent la diversité des changements de régime hydrologique liés aux barrages-réservoirs et montrent qu'ils sont spécifiques à chaque cas étudié. Il ressort qu'en général, un barrage-réservoir peut réduire l'amplitude des pics de crue, augmenter les débits d'étiage, modifier les périodes de hautes et basses eaux (saisonnalité).

Il existe cependant quelques synthèses qui analysent plusieurs bassins versants et tentent d'établir des règles générales relatives aux modifications des débits dues aux barrages et à leur évolution spatiale.

- Graf (1999) s'est intéressé aux impacts hydrologiques à grande échelle des barrages aux Etats-Unis. Il s'agit d'une première approche géographique recensant les impacts potentiels de l'ensemble des barrages du pays sur le bilan en eau par région hydrologique. La capacité de stockage rapportée à la surface du bassin versant est prise comme indicateur de possibles changements dans les régimes d'écoulement. Une des conclusions de l'étude est d'insister sur l'amplitude des impacts des

ouvrages sur les débits, impacts qui, selon l'auteur, sont plus importants que ceux que pourrait entraîner le changement climatique (comparaison étonnante).

- Dans l'étude de Batalla *et al.* (2004), l'impact d'un ensemble de 187 barrages-réservoirs sur le régime hydrologique du bassin de l'Ebre (85 530 km²) en Espagne, est évalué statistiquement. L'originalité de l'étude est de lier les changements de régime induits par les ouvrages au degré d'influence des bassins versants. Dans cet objectif, les auteurs ont défini un indice simple reflétant le degré d'influence d'un bassin versant. Il s'agit du rapport de la capacité totale de la retenue (ou de la somme des capacités s'il y a plusieurs retenues) et du débit moyen annuel (module). L'évolution spatiale de l'impact des ouvrages sur les débits de pointe et sur les débits mensuels moyens a également été étudiée. Les résultats obtenus sont hétérogènes et difficilement généralisables. Sur la majorité des bassins, on observe que plus l'influence est importante, plus l'amplitude des crues est réduite, et cette réduction est plus ou moins marquée selon le climat (méditerranéen ou océanique). En revanche, à l'échelle annuelle, les écoulements sont significativement réduits pour moins de la moitié des bassins de l'échantillon. Aucune relation avec le degré d'influence n'a pu être établie. Les effets des barrages-réservoirs sur les débits mensuels sont très variables. Sur certains bassins aucun changement significatif n'a été détecté alors que sur d'autres, on a une inversion de la saisonnalité due aux lâchers pour l'irrigation. Enfin, les ouvrages ont également réduit la variabilité journalière des débits sur la majorité des bassins. Cependant, il n'a pas été possible de lier l'indice d'influence à cette réduction de variabilité des débits.
- Magilligan et Nislow (2005) présentent une étude détaillée des changements du régime hydrologique induits par des barrages sur un échantillon de 21 bassins versants aux conditions climatologiques diverses répartis aux Etats-Unis. La détection des impacts est basée sur une analyse statistique de plusieurs indicateurs caractérisant le régime hydrologique, calculés sur des périodes antérieures et postérieures à la mise en service des ouvrages. Outre la diversité des cas traités, l'originalité de l'étude est de chercher à relier les changements de régime hydrologique à des paramètres climatologiques (liés aux précipitations et aux températures) et à des caractéristiques des bassins et des ouvrages (par exemple la localisation, la taille du bassin, les objectifs de gestion et la capacité du réservoir). Une des conclusions de l'étude est de souligner la difficulté d'établir des règles générales sur la manière dont va être affecté le comportement d'un bassin versant suite à la mise en service d'un barrage.
- Graf (2006) a étudié les impacts de grands barrages-réservoirs sur les débits et sur la géomorphologie sur un échantillon de 36 paires de stations (associant un bassin naturel et un bassin influencé) réparties sur l'ensemble des Etats-Unis. L'étude statistique a notamment montré qu'en moyenne, le débit annuel maximum est

diminué de 67 %, le rapport annuel du débit maximum et du module est diminué de 60 %, le nombre d'inversion des variations des débits augmente de 34 %. Les barrages-réservoirs sont également responsables de la modification de la saisonnalité des débits.

- Lajoie *et al.* (2006) ont évalué les impacts de barrages-réservoirs sur les caractéristiques des débits mensuels au Canada. L'étude statistique a été menée en comparant les caractéristiques des débits mensuels issus de 76 stations sans influence de barrages-réservoirs avec celles des débits issus de 25 stations influencées. L'objectif était également d'étudier le lien entre les changements constatés, la taille des bassins versants et la saison. Les résultats indiquent que l'influence des barrages-réservoirs sur les débits mensuels est variable. Sur les grands bassins (superficie supérieure à 10 000 km²), la variabilité interannuelle des débits mensuels maximaux est plus importante que pour les moyens et petits bassins versants mais moins importante pour les débits mensuels minimaux.
- Citons enfin l'approche originale de Black (1972) qui a étudié la modification des pics de crues en fonction de la taille des barrages-réservoirs et de leur localisation sur le bassin versant. Cette étude a été réalisée sur un modèle réduit de bassin versant (1 m² environ) sur lequel il était possible de changer la taille et la position des barrages. Les résultats ont montré qu'en cas de pluie homogène sur l'ensemble du bassin, un grand barrage à l'aval du bassin est plus efficace pour réduire les pics de crue qu'un réseau de moyennes et petites retenues réparties sur le bassin. En revanche, des moyennes ou petites retenues seront plus efficaces dans le cas d'averses localisées.

1.3.2.2. Illustration

La Figure 1.2 est une illustration de l'impact de la mise en eau d'un barrage-réservoir. Elle présente l'hydrogramme du São Francisco à São Romão au Brésil (154 100 km²) de 1952 à 2004. En 1961, le barrage de Três Marias est mis en service créant une gigantesque retenue de 21 milliards de m³. Le bassin versant contrôlé a une superficie de 50 600 km² (33 % du bassin total). La station de São Romão est située à plus de 260 km à l'aval de l'ouvrage en suivant le cours d'eau. Le barrage est multi-objectif puisqu'il sert à la fois à produire de l'hydroélectricité, à l'alimentation en eau et à faciliter la navigation sur le fleuve São Francisco.

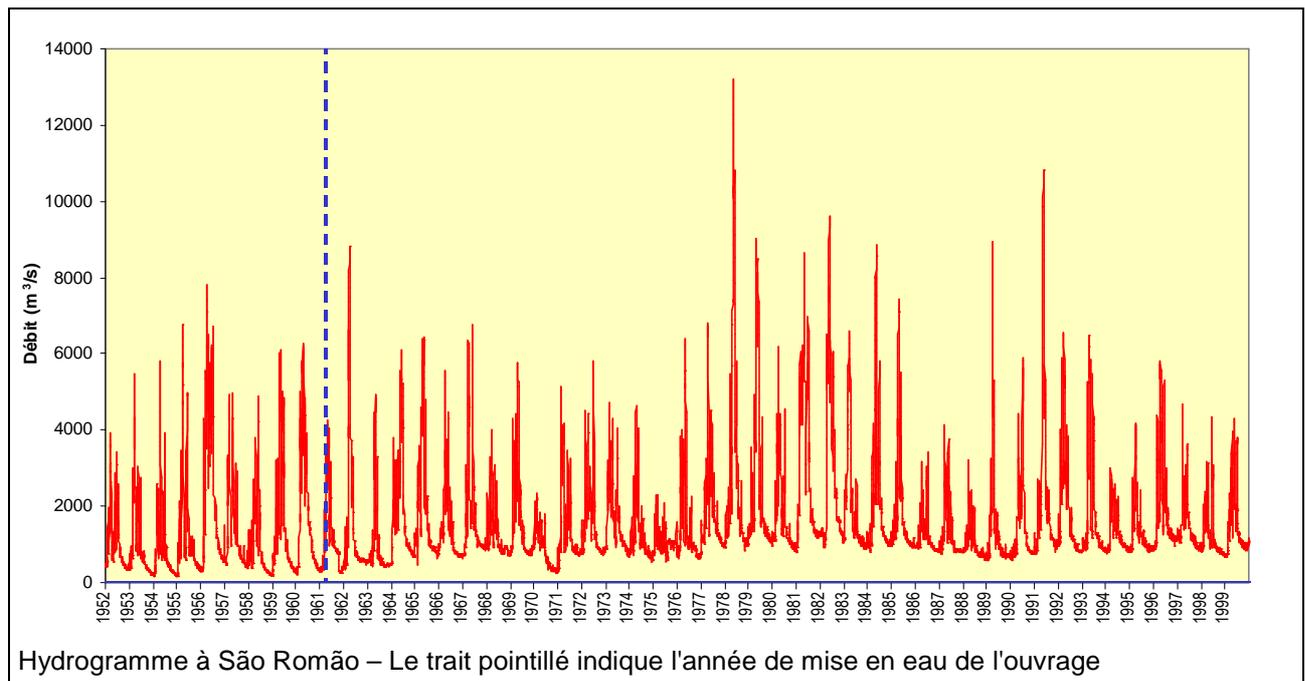


Figure 1.2 : Effets du barrage de Três Marias sur les débits du São Francisco à São Romão (154 100 km²)

On constate que l'effet de la mise en service de l'ouvrage est visible sur le relèvement des débits d'étiage et ce malgré la distance importante séparant l'ouvrage de l'exutoire (260 km).

1.3.3. Ordres de grandeur

Les quantités d'eau stockées dans les ouvrages, qui peuvent sembler immenses à notre échelle, représentent bien souvent une faible proportion par rapport aux autres quantités d'eau mises en jeu à l'échelle du bassin versant (précipitées, évaporées ou écoulées).

Nous illustrons ce point en présentant le cas du bassin de la Seine à Paris (Austerlitz, H5920010). Ce bassin a une superficie de 43 800 km² (Figure 1.3). En moyenne, il reçoit 840 mm de pluie par an pour une évapotranspiration potentielle de 710 mm et un écoulement de 230 mm (moyennes calculées sur la période 1975-2001). Le climat est tempéré.

Les crues catastrophiques de 1910 et 1924 à Paris, ainsi que l'étiage sévère de 1921 et le développement économique de la région parisienne au cours du siècle dernier, ont rendu nécessaire la régularisation du bassin de la Seine en vue d'un double objectif de protection contre les crues et de soutien des étiages.

A partir des années 1940, quatre barrages-réservoirs (Tableau 1.1) ont donc été progressivement réalisés à environ 300 km à l'amont de Paris sur l'Yonne, la Seine, la Marne et l'Aube.

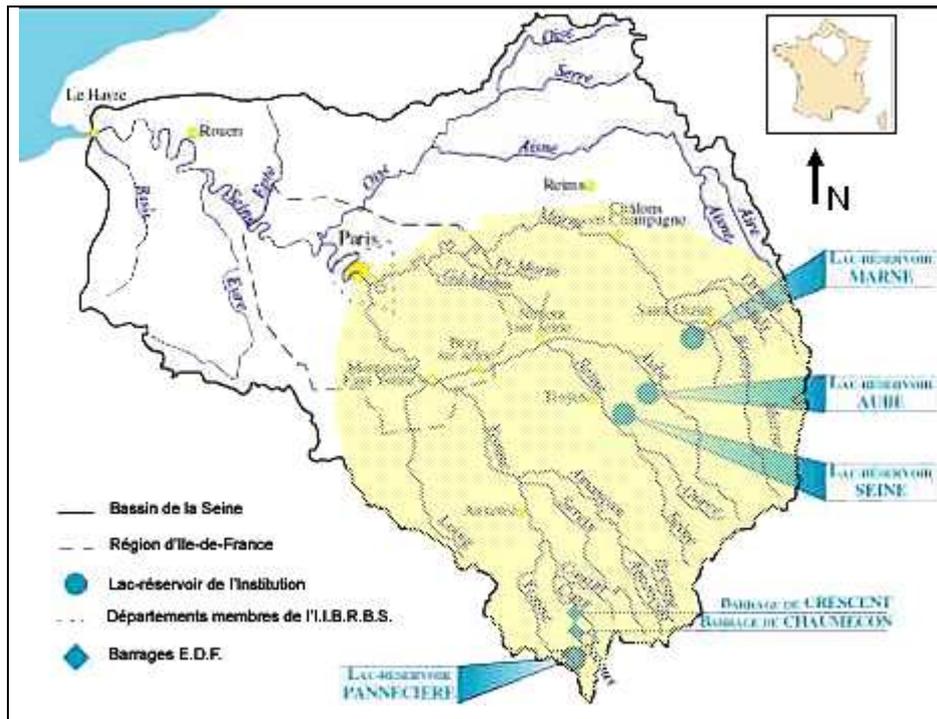


Figure 1.3 : La Seine à Paris (H5920010) et les quatre réservoirs (d'après IIBRS, 2006)

Les quatre ouvrages peuvent stocker un volume total de 805 hm^3 , ce qui, rapporté à la superficie du bassin à Paris, équivaut à une lame d'eau stockable de 18,4 mm. Ainsi, le gestionnaire dispose au mieux d'un "levier" de 18,4 mm, pour écrêter les crues ou soutenir les étiages à Paris. Comparées aux volumes écoulés lors de certaines crues remarquables de la Seine (plus de sept milliards de m^3 se sont écoulés à Paris lors de la crue de 1910), les capacités de stockage disponibles paraissent insuffisantes et le rôle écrêteur de crue des ouvrages n'est que partiel (Villion, 1997). Les barrages-réservoirs de la Seine jouent tout de même un rôle dans l'abaissement des cotes à Paris et encore plus à l'amont notamment à proximité des ouvrages (à Troyes par exemple). L'effet écrêteur n'est appréciable que dans le cas de crues faibles ou moyennes.

	Année de mise en service	Bassin versant contrôlé (km^2)	Volume (hm^3)
Yonne	1949	220 (1 % du bassin total)	80
Seine	1966	2 400 (5 %)	205
Marne	1974	2 950 (7%)	350
Aube	1990	1 700 (4%)	170
Total		7 270 (17 %)	805

Tableau 1.1 : Quelques caractéristiques des réservoirs du bassin de la Seine

L'efficacité des ouvrages est plus importante pour le soutien des étiages qui peut représenter jusqu'aux 3/4 du débit observé à Paris en étiage. $50 \text{ m}^3/\text{s}$ peuvent être lâchés en continu pendant six mois (Tajjar et Levassor, 1993).

1.4. Synthèse – Particularité des systèmes étudiés

Les débits sont sensibles aux stockages artificiels sur le bassin versant. Ainsi, malgré la proportion souvent relativement faible de la lame d'eau stockable par rapport au reste des quantités d'eau mises en jeu sur le bassin, l'impact des ouvrages sur les débits n'est pas négligeable, même loin à l'aval. Les effets des retenues peuvent en effet persister longtemps, malgré l'importance croissante de la partie du bassin situé entre le barrage et l'exutoire (présence d'affluents ou échanges nappe-rivière).

Nous avons présenté dans ce chapitre la diversité des impacts des barrages-réservoirs sur le régime hydrologique d'un bassin versant. Ces impacts dépendent de plusieurs facteurs liés à la fois aux caractéristiques hydroclimatiques du bassin versant mais également aux caractéristiques et à la gestion des barrages-réservoirs. Il semble difficile d'établir des règles générales permettant de déterminer les changements de régime hydrologique possibles suite à la mise en eau d'une retenue.

La modification des écoulements peut être la source d'autres changements sur le bassin versant : modifications géomorphologiques (Graf, 2006), modifications biologiques et écologiques (Balland, 2004), modifications socio-économiques (McCully, 2001), *etc.* L'évaluation et la prévision des impacts hydrologiques des barrages-réservoirs sont alors primordiales dans le domaine de la gestion durable et intégrée des ressources en eau.

Les systèmes que nous étudions dans le cadre de cette thèse sont donc les bassins versants influencés par la présence d'un ou plusieurs barrages-réservoirs. La présence de ce type d'aménagement introduit des variations artificielles du débit liées aux phases de stockage/déstockage modifiant la réponse du bassin aux forçages atmosphériques. Sur ces bassins versants, le débit à l'exutoire peut, par exemple, augmenter sans qu'il y ait eu de précipitations (déstockage) ou inversement, des précipitations pourront avoir lieu sans occasionner d'écoulement (stockage). La relation pluie-débit "naturelle" peut alors être fortement influencée par la présence d'un ou plusieurs barrages-réservoirs. Son étude nécessite en conséquence des moyens spécifiques prenant en compte son artificialisation. Les bassins versants étudiés dans ce travail seront donc analysés suivant le double point de vue du comportement naturel et du comportement artificiel lié à la présence de barrages-réservoirs.

Chapitre 2

Chapitre 2.

Modélisation des impacts de la gestion des barrages-réservoirs sur les débits

2.1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif, dans un premier temps, de présenter les approches généralement utilisées pour étudier les débits journaliers des bassins versants influencés par des barrages-réservoirs. Ces approches peuvent être classées en deux grandes familles :

- Celles basées sur une comparaison de chroniques de débit mesurées antérieurement et postérieurement à la mise en service d'un barrage-réservoir ou de chroniques issues de deux bassins versants proches, l'un influencé et l'autre "naturel". Elles font appels à des analyses statistiques de certaines grandeurs caractéristiques des écoulements. Elles permettent une évaluation *a posteriori* des modifications du régime hydrologique dues aux barrages-réservoirs (Zsuffa, 1999 ; López-Moreno *et al.*, 2002 ; Assani *et al.*, 2002 ; Batalla *et al.*, 2004) ;
- Celles reposant sur la prise en compte explicite des ouvrages en modélisation. Ces approches permettent de simuler les débits des bassins influencés. En général, elles nécessitent plus de données que les précédentes mais permettent une évaluation *a priori* des modifications dues aux barrages-réservoirs. Il est alors possible de tester des scénarios d'aménagement (impact de la construction ou du démantèlement d'un barrage par exemple) ou des modifications des règles de gestion des retenues. Nous nous focaliserons dans ce chapitre sur ce type d'approche.

Dans un deuxième temps, nous présentons et justifions l'intérêt de l'approche de modélisation adoptée ainsi que les objectifs de la thèse.

2.2. Revue des méthodes usuelles de prise en compte des barrages-réservoirs en modélisation - Domaines d'application et limites

Comme il a été vu précédemment, en règle générale, les impacts des ouvrages deviennent de plus en plus diffus à mesure que la distance entre le barrage et l'exutoire du bassin versant augmente (Morin *et al.*, 1975 ; Peters et Prowse, 2001). En effet, l'augmentation de cette distance s'accompagne de l'accroissement de la zone située entre le barrage et l'exutoire (surface intermédiaire). Les processus hydrologiques ayant lieu sur cette partie du bassin peuvent avoir des effets non négligeables sur les écoulements (en termes de quantité et de transfert). Le choix d'une méthode de prise en compte des effets des ouvrages sur les débits va donc dépendre de l'importance de la zone intermédiaire.

2.2.1. Barrage proche de l'exutoire

Dans le cas où le barrage est situé à proximité de l'exutoire (Figure 2.1), la surface de la zone intermédiaire entre les points A et B (S_{AB}) est faible. Il est peu probable que des phénomènes liés à la génération du débit (apports latéraux importants, échanges avec la nappe, apports des pluies sur la zone intermédiaire, *etc.*) influencent significativement le débit au point B. Cette partie du bassin va très peu contribuer à la génération du débit, et agit essentiellement sur le transfert de l'écoulement. Il est alors pertinent d'utiliser des modèles de type hydraulique pour rendre compte de l'influence de l'ouvrage sur le débit au point B.

Dans ce type de modèles "débit-débit", le débit au point B est calculé en transférant le débit d'un point A situé à l'amont. Le calcul s'appuie alors sur la résolution des équations de l'hydraulique à surface libre (équations de Barré de St Venant) ou bien sur des méthodes empiriques de propagation du débit le long d'un cours d'eau. Ce type de modélisation est bien adapté à l'étude de la propagation d'une onde de crue liée à la rupture d'un barrage par exemple.

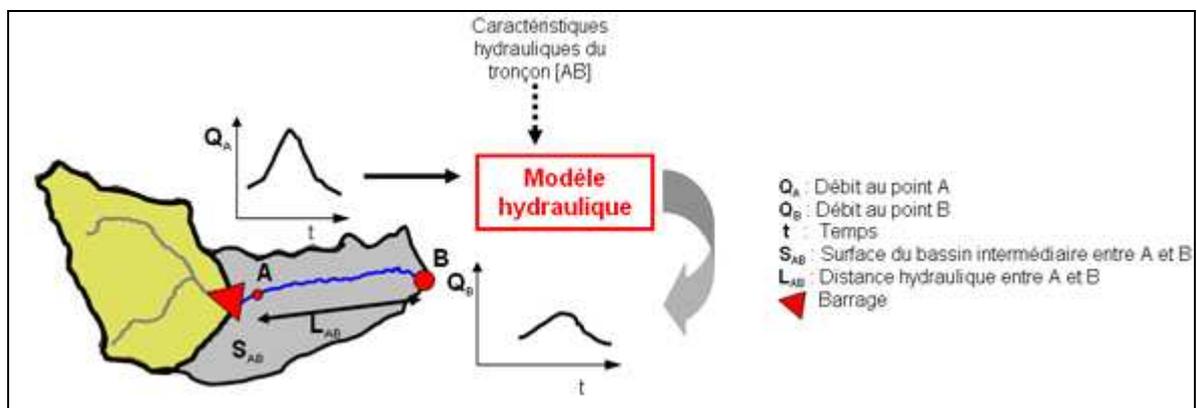


Figure 2.1 : Configuration simple permettant d'utiliser une modélisation hydraulique

Retkowsky et Stein (1985) ont eu recours à ce type d'approche pour modéliser certaines crues du bassin de la Seine entre Montereau et Paris. Les 625 km de vallées modélisées ont été découpés en biefs d'une longueur de 1 à 2 km (près de 500 nœuds de calcul). Les zones d'écoulement complexe ont été décrites plus finement par un maillage prenant en compte la répartition des débits à travers les différents canaux et chenaux. Cette modélisation a permis d'évaluer les impacts des barrages sur les vallées à l'aval et de déterminer certains facteurs dont vont dépendre ces impacts (état de remplissage des retenues, séquence des événements pluvieux...).

Cette étude a porté uniquement sur des événements de crue sans chercher à simuler les débits en continu. Elle n'a pas abordé les effets des ouvrages sur les étiages. Dans ce cas, il est indispensable de prendre en compte les interactions aquifère-rivière. Tajjar et Levassor, (1993) se sont intéressés à la propagation de lâchures des barrages-réservoirs du bassin de la Seine. Ils soulignent qu'une lâchure ne se propage pas uniquement dans la rivière, mais également dans l'aquifère adjacent. L'approche qu'ils utilisent repose sur le couplage d'un modèle simulant les écoulements en rivière (équation de Saint-Venant) et d'un modèle simulant les écoulements dans l'aquifère (équation de Boussinesq).

Il existe cependant des configurations qui rendent la modélisation hydraulique difficilement applicable :

- dans le cas où le bassin amont n'est pas jaugé (Q_A non disponible) ;
- dans le cas où la simulation continue des débits est nécessaire car ces approches sont souvent événementielles (propagation des crues) ;
- dans le cas où le bassin intermédiaire a une influence non négligeable sur l'écoulement. C'est le cas par exemple, lorsque des affluents non jaugés apportent une contribution significative au débit (notamment en période de crue), lorsque les échanges avec la nappe sont importants (en étiage spécialement), lorsque la pluie tombée sur le bassin intermédiaire est significative ou encore lorsque de nombreuses petites retenues non contrôlées sont éparpillées sur le bassin (Figure 2.2). En descendant le long du cours d'eau principal (vers le point C), les sources de "bruits" influençant la propagation s'additionnent et peuvent ne plus être négligeables. Le couplage de modèles prenant en compte ces différents processus devient rapidement lourd, très incertain, voire impossible, les données nécessaires n'existant pas la plupart du temps.

Dans ces configurations, les modifications du débit Q_A (Figure 2.1) ne sont plus uniquement dues aux processus de propagation (délai et atténuation) mais également à des processus hydrologiques difficilement quantifiables, introduisant alors de nombreuses inconnues.

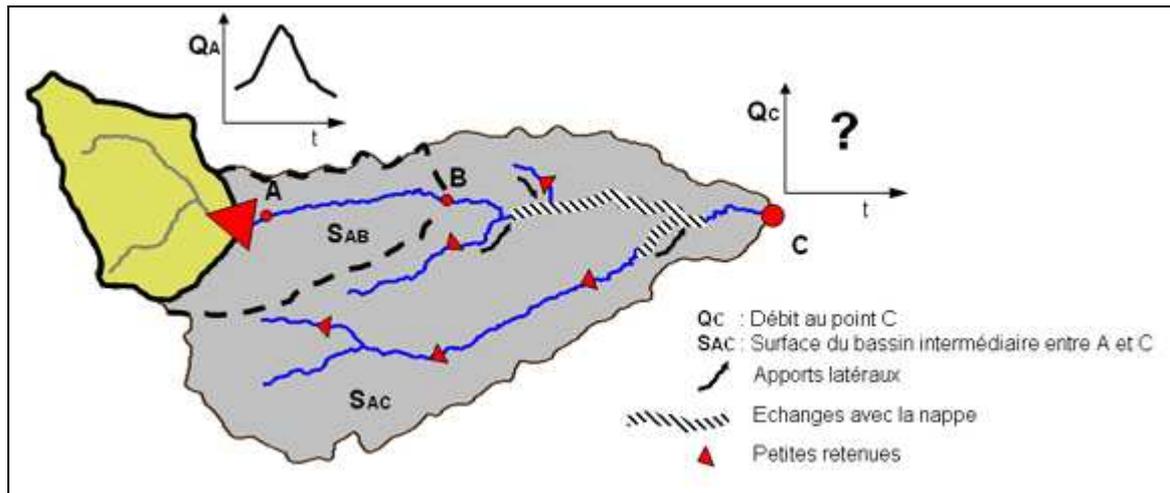


Figure 2.2 : Sources de "bruit" pouvant influencer la propagation du débit entre A et C

2.2.2. Barrage éloigné de l'exutoire

2.2.2.1. Modélisation hydrologique distribuée ou spatialisée

Dans le cas où le barrage est éloigné de l'exutoire et donc où la zone intermédiaire contribue significativement au débit à l'exutoire, ou lorsqu'une simulation continue est nécessaire, les modèles hydrologiques (pluie-débit) sont une alternative intéressante aux modèles hydrauliques (débit-débit) pour simuler les impacts diffus du barrage sur les débits à l'aval. Dans ce type d'approche, les parties de production et de transfert ne sont pas dissociées. Ces modèles peuvent convenir à la simulation des impacts diffus des barrages-réservoirs loin à l'aval sans pour autant demander une description extrêmement détaillée des caractéristiques hydrauliques du réseau hydrographique.

Ces modèles présentent également l'avantage de ne pas utiliser un débit amont comme donnée d'entrée. En revanche, ils peuvent nécessiter une quantité de données météorologiques et d'informations sur le bassin, croissante avec le degré de sophistication (Figure 2.3).

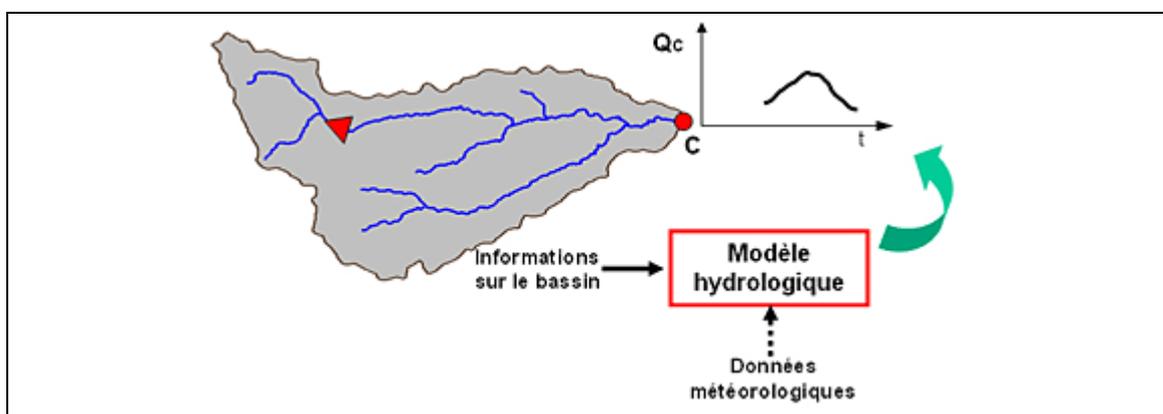


Figure 2.3 : Configuration se prêtant bien à une modélisation hydrologique

Les modèles hydrologiques sont en général conçus pour simuler la transformation pluie-débit naturelle. Or comme on l'a vu au chapitre précédent, cette transformation peut être fortement influencée par les barrages-réservoirs dont la nature est de modifier le comportement du bassin versant. La prise en compte de ces aménagements nécessite alors l'addition de modules spécifiques.

A première vue, les modèles hydrologiques les mieux adaptés à la prise en compte explicite des ouvrages sont spatialisés ou semi-spatialisés.

Dans ce type de modèles, le bassin versant est découpé en mailles ou en sous-unités (dans le cas semi-distribué) supposées homogènes qui sont l'unité spatiale de base dans les équations mises en jeu. Ainsi, en paramétrant convenablement la ou les mailles correspondant à l'emplacement de l'ouvrage, il est possible de tenir compte dans le modèle, de la présence d'un ou plusieurs barrages-réservoirs sur le bassin versant. Il est nécessaire de fournir en entrée du modèle des données spécifiques au fonctionnement du barrage-réservoir comme par exemple le volume évacué de l'ouvrage pour chaque pas de temps. Le modèle calcule alors le bilan des entrées, sorties et stockages sur la maille ou les mailles concernées par le barrage et fournit le niveau (ou volume) d'eau présent dans le réservoir à chaque pas de temps. Le débit qui sort du barrage est propagé vers la maille suivante où il est additionné au débit généré sur cette maille, et ainsi de suite jusqu'à l'exutoire du bassin versant.

La procédure de prise en compte des barrages-réservoirs décrite précédemment est proche de celle mise en œuvre dans le modèle hydrologique spatialement distribué CEQUEAU (Figure 2.4, Morin, 2002).

Le barrage est localisé à la sortie de la maille B. Le volume d'eau (VE) calculé par le modèle à la sortie de la maille est introduit dans le réservoir et la valeur du débit (VBAR) évacué du réservoir, qui est une donnée d'entrée du modèle, est introduit dans la maille A immédiatement à l'aval. La précision des simulations est analysée en comparant le niveau d'eau observé dans le réservoir réel et le niveau calculé.

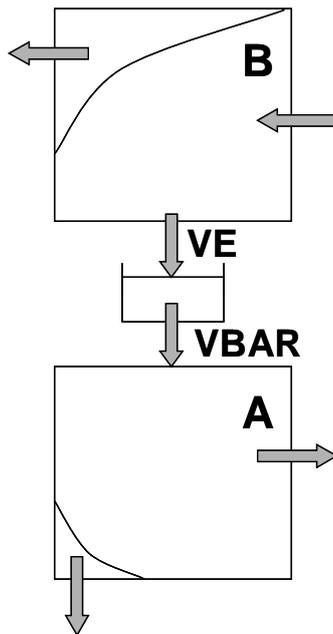


Figure 2.4 : Schématisation de la prise en compte des barrages par le modèle CEQUEAU (d'après Morin, 2002)

La procédure décrite précédemment nécessite la connaissance des débits de sortie des ouvrages et éventuellement des niveaux pour la vérification.

Güntner (2002) s'est intéressé à la modélisation hydrologique à grande échelle d'un bassin semi-aride du Nord Est du Brésil dans l'Etat de Ceara (146 350 km²). Ce bassin est marqué par la présence de nombreuses retenues de petite ou moyenne taille, ainsi que d'ouvrages plus conséquents. L'approche de modélisation utilisée est spatialement distribuée. La prise en compte des barrages-réservoirs dans le modèle repose sur le bilan en eau journalier au niveau de chaque ouvrage (Equation 2.1). Le modèle calcule alors le volume stocké dans le réservoir.

$$V_t = V_{t-1} + Q_E + P_{ret} - Q_S - p - E_{ret} - I_{ret} \quad \text{Equation 2.1}$$

Avec

- V_t le volume stocké au pas de temps t
- V_{t-1} le volume stocké au pas de temps t-1
- Q_E le débit entrant dans l'ouvrage
- P_{ret} la pluie tombant sur la retenue entre t-1 et t
- Q_S le débit sortant de la retenue
- p des prélèvements divers à partir de la retenue
- E_{ret} l'évaporation au niveau de la retenue entre t-1 et t
- I_{ret} l'infiltration au niveau de la retenue

Les données nécessaires au calcul de V_t sont rarement disponibles pour l'ensemble des ouvrages présents sur un bassin versant.

Dans l'étude de Güntner (2002), les barrages-réservoirs ont été inclus dans le modèle de deux manières différentes selon leur taille afin de contourner le manque de données :

- Les ouvrages de petite et moyenne taille (volume inférieur à 50 hm³) pour lesquels peu de données existent (la localisation et la gestion) ont été groupés en classes selon leur capacité. Chaque classe est alors considérée par le modèle comme un réservoir unique ayant les caractéristiques moyennes des ouvrages de la classe. Le modèle dresse le bilan journalier détaillé de ce réservoir moyen. Chaque terme du bilan est évalué grâce à certaines hypothèses palliant le manque de données ;
- La prise en compte des ouvrages de taille plus importante repose également sur un bilan journalier qui est cette fois appliqué à la retenue réelle (traitement individuel de chaque ouvrage). De même que dans le cas précédent, lorsque des données n'existent pas, certaines hypothèses permettent tout de même le calcul des termes du bilan. C'est le cas, par exemple, du débit restitué par l'ouvrage quand les règles de gestion ne sont pas disponibles. Les hypothèses adoptées permettent d'estimer le débit restitué comme une fraction du débit annuel réparti uniformément sur l'ensemble des jours de l'année.

La prise en compte explicite des ouvrages dans un modèle spatialisé est relativement simple en théorie puisqu'elle repose sur un bilan à chaque pas de temps des entrées, sorties et stockages au niveau de la maille concernée par l'ouvrage.

En principe, les modèles distribués sont donc bien adaptés à la prise en compte d'aménagements sur le bassin et en particulier des barrages-réservoirs. En revanche, comme l'illustre l'étude de Güntner (2002), la mise en œuvre des modèles distribués (qu'ils soient à base physique ou conceptuels) se heurte à des difficultés pratiques : l'échelle de discrétisation qu'ils demandent impose de recueillir et de manipuler de nombreuses données et de déterminer un nombre important de paramètres pour chaque maille (Ambroise, 1999). Cette opération est économiquement et techniquement extrêmement difficile voire impossible à réaliser avec le degré de détail nécessaire aux modèles, notamment à cause de la complexité et de l'hétérogénéité du bassin versant réel. Certains paramètres des modèles distribués doivent être obtenus par un calage qui s'avère délicat compte tenu du nombre important de paramètres mis en jeu, ce qui, dans le cas de modèles à base physique, réduit l'intérêt de leur fondement théorique (Beven, 1989).

Enfin, du point de vue théorique, les modèles distribués considèrent tous les problèmes résolus *a priori*, selon des idées qui n'ont pas ou peu été vérifiées. Ceci peut expliquer pourquoi le degré de sophistication et de raffinement de ce type de modèle n'est pas garant

de bonnes performances en termes de simulation des débits à l'exutoire du bassin versant (Michaud et Sorooshian, 1994 ; Loumagne *et al.*, 1996 ; Refsgaard et Knudsen, 1996 ; Reed *et al.*, 2004 ; Smith *et al.*, 2004).

2.2.2.2. Modélisation hydrologique globale

Contrairement à l'approche distribuée, dans l'approche globale le bassin versant est considéré dans l'espace comme une entité homogène. Ceci permet d'éviter la complexité des modèles distribués. La quantité de données nécessaire est moins importante. Par conséquent, ce type de modélisation s'est avéré adapté et performant pour résoudre les problèmes fréquemment rencontrés en hydrologie opérationnelle (dimensionnement, reconstitution de chroniques de débit, prévision des crues et des étiages, *etc.*).

Comme les modèles spatialisés, ces modèles ont été développés pour simuler la transformation pluie-débit naturelle et sont donc mal adaptés à des bassins versants influencés par des barrages-réservoirs. La nature globale de ces modèles semble *a priori* incompatible avec la prise en compte explicite des barrages-réservoirs car :

1. Le bassin versant est considéré comme une unité homogène ce qui rend difficile la prise en compte de la localisation des barrages-réservoirs dans la structure du modèle. Or, comme on l'a montré au chapitre précédent, les impacts des ouvrages sur les débits sont généralement fortement liés à la position des ouvrages par rapport à l'exutoire. En général, plus les retenues seront éloignées de l'exutoire plus leurs effets sur les débits seront diffus ;
2. Il est extrêmement délicat de donner une interprétation physique aux composants et à la structure des modèles globaux. De nombreuses études ont tenté de lier les paramètres de ces modèles à des caractéristiques physiques et climatiques des bassins versants sans donner de résultats satisfaisants.

Ces difficultés expliquent sans doute pourquoi, à notre connaissance, il n'existe aucune étude visant à prendre en compte explicitement les barrages-réservoirs dans la structure des modèles pluie-débit globaux. Pourtant il serait intéressant de disposer d'un outil simple pour étudier et prévoir les impacts de barrages-réservoirs sur les débits.

Dans le paragraphe suivant, nous présentons plus en détail l'approche globale et analysons la pertinence de la prise en compte des barrages-réservoirs dans ce type de modélisation.

2.3. L'approche globale : pourquoi "ça marche" ?

2.3.1. Comment sont "globalisées" des informations localisées et hétérogènes sur un bassin versant en vue de la modélisation pluie-débit globale ?

Le développement de l'approche globale a pour origine le constat qu'il est aujourd'hui impossible de représenter en détail un système aussi complexe et encore très mal connu qu'est un bassin versant. De plus, pour un grand nombre de questions du domaine opérationnel nécessitant une modélisation, on va chercher à connaître l'évolution temporelle d'une seule ou d'un nombre réduit de variables. Il est alors injustifié d'utiliser un modèle détaillé du bassin versant pour connaître uniquement son fonctionnement d'ensemble.

Avec l'approche globale, l'hydrologue représente sous une forme extrêmement simplifiée la résultante des processus qui ont lieu sur un bassin versant. Cela revient à considérer globalement les variations spatiales, à l'échelle du bassin versant, des forçages atmosphériques (précipitations, évapotranspiration) et des caractéristiques physiques (sols, végétation, géologie, topographie, etc.).

Dans le cas des modèles pluie-débit globaux dits "à réservoirs" (dont il sera question dans ce travail), le fonctionnement d'ensemble du bassin versant est représenté par un assemblage de réservoirs interconnectés qui se vident et se remplissent au cours du temps et dont certains commandent la dynamique du système (humidité du sol par exemple). Chaque réservoir est décrit par le niveau d'eau à un pas de temps (variable) et par un ensemble de paramètres constants (souvent sa capacité maximale). Des fonctions, comme les hydrogrammes unitaires, peuvent être également associées aux réservoirs afin d'assurer un fonctionnement spécifique (pour le transfert par exemple).

Ces modèles comportent deux composantes majeures (pas forcément dissociées dans la structure du modèle) :

- Un module de production responsable de la détermination des bilans en eau, c'est-à-dire de la répartition de la pluie brute, en pluie efficace (alimentant le débit), quantité évaporée et quantité stockée. Parfois présentes dans les modèles, des fonctions d'échanges en eau permettent de simuler des pertes et/ou des apports vers ou de l'extérieur du système. Elles appartiennent aussi à la fonction de production ;
- Un module de routage ou transfert permettant d'assurer la répartition temporelle de la quantité d'eau transitant dans le cours d'eau.

La structure de ces modèles dépend d'un certain nombre de paramètres (variable selon le modèle utilisé) qui permettent à l'utilisateur d'adapter la structure d'un modèle donné aux

caractéristiques spécifiques du bassin versant étudié. Grâce à ce jeu de paramètres, il est possible de prendre en compte les hétérogénéités spatiales du bassin d'une manière globale. Les paramètres intègrent alors les spécificités locales du bassin.

Cependant, du fait de la structure de ce type de modèles, il est extrêmement délicat d'interpréter physiquement leurs paramètres en les reliant à des grandeurs observables sur le bassin versant. Malgré un effort important pour tenter de trouver une interprétation physique des paramètres de tels modèles, ils doivent être estimés grâce à des techniques numériques d'optimisation (Mathevet, 2005). Ces techniques permettent, lors de la phase de calage, de déterminer les valeurs des paramètres les plus adaptées au bassin étudié (nous détaillerons ces aspects d'optimisation dans la suite).

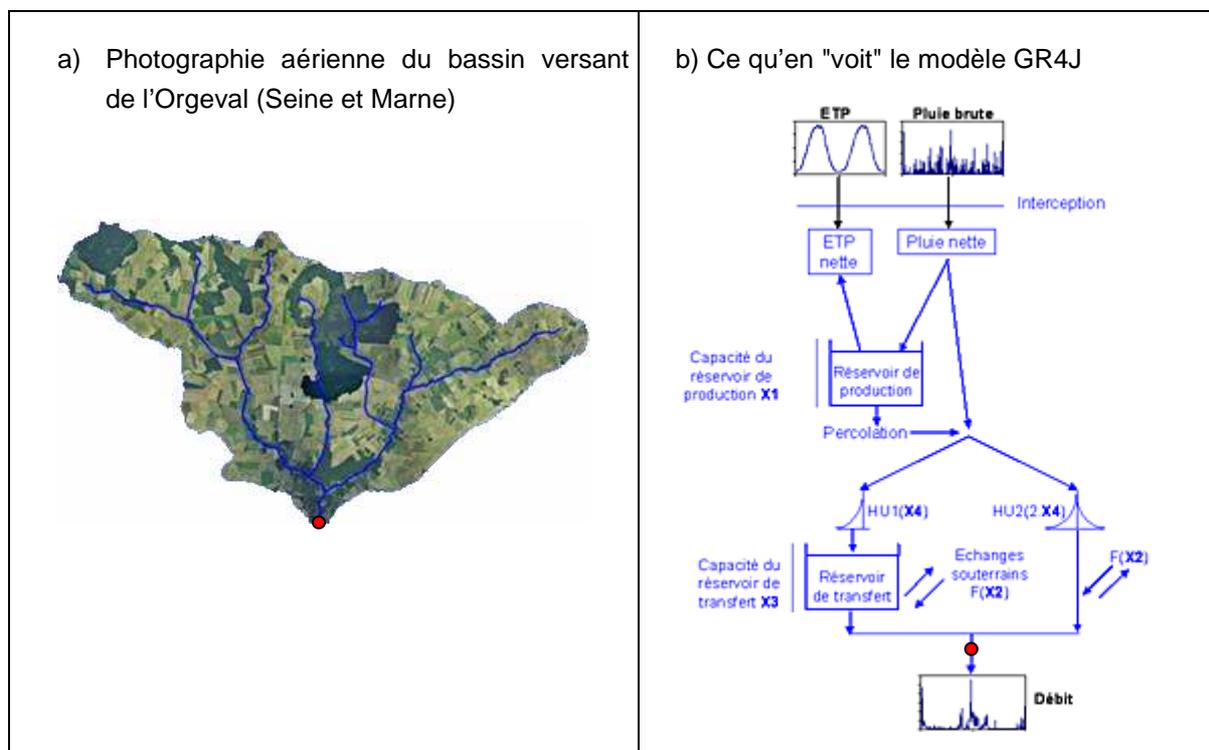


Figure 2.5 : Exemple de ce que peut "voir" un modèle pluie-débit global d'un bassin versant

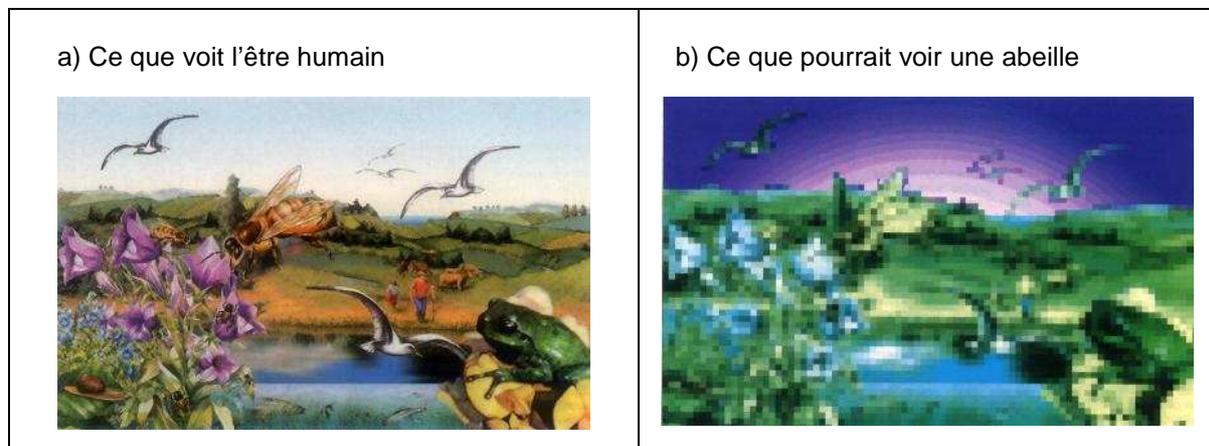


Figure 2.6 : Comparaison entre la vision humaine et celle d'une abeille

La Figure 2.5 permet d'illustrer la réponse à la question posée en titre de ce paragraphe : Comment sont "globalisées" des informations localisées et hétérogènes sur un bassin versant en vue de la modélisation pluie-débit globale ? Elle montre ce que "voit" le modélisateur du bassin versant (à l'image de la comparaison entre la vision de l'être humain par exemple et celle d'un animal Figure 2.6).

Le bassin versant modélisé est "vu" comme une série de fonctions mathématiques permettant de simuler au mieux son comportement. On pressent des explications précédentes qu'une question-clé à laquelle est confronté le concepteur-modélisateur est de déterminer quelles fonctions mathématiques utiliser pour représenter au mieux le comportement du bassin versant.

2.3.2. Approches de développement des modèles globaux à réservoirs

Les approches de développement des modèles globaux à réservoirs s'appuient sur deux points de vue différents (Perrin, 2000) :

- La grande majorité des modèles à réservoirs existants sont des modèles dits conceptuels mis au point à partir de concepts sur la manière dont se passe la transformation pluie-débit. On représente alors dans le modèle de façon simplifiée les processus jugés pertinents pour la modélisation par un certain nombre d'outils mathématiques. Le concepteur du modèle introduit des idées *a priori*, généralement fondées sur les connaissances physiques et l'observation du bassin. Beven (1997) qualifie d'ailleurs cette approche de "perceptuelle", soulignant qu'elle reste personnelle et dépendante de la façon dont le concepteur-modélisateur perçoit la réalité ;
- Plus rares que les précédents, les modèles empiriques, eux, sont construits seulement à partir des observations hydrométéorologiques (correspondant aux entrées et sorties du modèle), sans avancer d'hypothèses *a priori* sur la nature des processus dominants ou d'idées préconçues sur la structuration du modèle. Le modèle est alors construit à partir d'une structure élémentaire initiale, complexifiée progressivement si nécessaire pour une amélioration de l'efficacité. Le concepteur-modélisateur cherche en fait à découvrir quels éléments doivent intervenir dans cette structure et comment les relier, non pas en fonction de la chaîne des phénomènes physiques dont il a connaissance dans le milieu naturel, mais en fonction du plus ou moins grand succès du modèle à reproduire les débits observés. Dans cette approche de développement, les données jouent un rôle primordial puisqu'elles vont guider le concepteur-modélisateur dans le choix des différents outils mathématiques et dans la détermination de leurs relations.

L'approche empirique permet de réduire la part de subjectivité inhérente à l'approche de développement conceptuelle. Nous détaillons l'approche empirique au chapitre 3.

Il peut paraître surprenant que des représentations du bassin versant aussi simplifiées que celles utilisées par les modèles globaux puissent être performantes en termes de simulation de la relation pluie-débit. Cela est dû au fait que le bassin versant n'est pas un assemblage aléatoire de différents éléments mais un système dont les différentes parties sont liées par un passé commun. Ceci nous laisse espérer qu'il sera possible de décrire la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant par des fonctions simples (Nash et Sutcliffe, 1970).

2.3.3. Vouloir prendre en compte les barrages dans un modèle pluie-débit global : une contradiction ?

Utilisant des paramètres globaux pour décrire le bassin et ses différents compartiments et ne permettant pas de tenir compte explicitement de son hétérogénéité et de sa structure spatiale, les modèles globaux semblent, pour beaucoup d'hydrologues, inadéquats pour évaluer l'impact hydrologique d'un aménagement (Sharma et Luxmoore, 1979 ; Freeze, 1980 ; Abbott *et al.*, 1986 ; Ambroise, 1998 ; Sivapalan *et al.*, 2002). Comme nous l'avons évoqué précédemment, la prise en compte des barrages-réservoirs dans ce type de modèles peut représenter un combat perdu d'avance. En effet, leur localisation sur le bassin et leurs caractéristiques qui, comme on l'a rappelé au chapitre 1, jouent un rôle important sur leurs impacts hydrologiques, ne peuvent pas être utilisées directement par le modèle. Les composants et les paramètres de ce type de modèles sont difficilement interprétables physiquement, ce qui rend délicate la prise en compte dans leur structure d'un élément comme un barrage-réservoir.

Cependant, en élargissant la recherche bibliographique à la prise en compte d'éléments spécifiques et localisés dans une modélisation globale, on trouve un certain nombre d'études qui ont abordé ce sujet et dont les résultats semblent prometteurs.

Il faut distinguer les approches qui visent à intégrer dans la structure d'un modèle pluie-débit des éléments spécifiques et localisés (comme on cherche à le faire avec les barrages) des approches qui cherchent à prendre en compte la variabilité spatiale de phénomènes touchant l'ensemble du bassin comme les pluies ou l'évapotranspiration. Dans le premier cas, il s'agit de prendre en compte des éléments très localisés pouvant avoir un impact sur la réponse du bassin versant alors que dans le deuxième cas, il s'agit de prendre en compte des phénomènes susceptibles d'avoir lieu sur l'ensemble du bassin mais dont l'intensité peut varier dans l'espace.

- Eckert (2002) s'est intéressé à la prise en compte des couverts neigeux au sein d'un modèle pluie-débit global. Le phénomène neigeux possède une grande variabilité spatiale : à l'échelle du bassin versant, les précipitations ne sont pas uniformes et la

fonte est essentiellement contrôlée par l'altitude. Un modèle complètement global, ne "voit" ni la répartition spatiale des précipitations ni les altitudes du bassin. Il semble alors contradictoire de vouloir tenir compte du couvert neigeux dans ce type d'approche. Eckert (2002) montre qu'un certain niveau statistique de variabilité est alors possible lors de la prise en compte du couvert neigeux temporaire au sein d'un modèle pluie-débit global. La problématique de cette étude diffère de la prise en compte des barrages-réservoirs car il s'agissait de modéliser un phénomène, certes souvent localisé mais naturel ;

- Ivkovic *et al.* (2005) se sont penchés sur la prise en compte des prélèvements dans la nappe dans un modèle pluie-débit global afin d'en quantifier l'impact sur les débits à l'exutoire. A partir d'un modèle pluie-débit existant (IHACRES, Jakeman *et al.*, 1990), un module prenant explicitement en compte les changements de niveaux de la nappe (dus à des prélèvements pour l'irrigation) a été développé. Un réservoir supplémentaire représentant la nappe a alors été ajouté à la structure initiale du modèle. Les volumes prélevés dans la nappe constituent de nouvelles entrées du modèle. Dans ce cas, les prélèvements et les échanges avec la nappe sont traités de manière globale.

Les deux exemples précédents, bien qu'éloignés de la problématique de la prise en compte des barrages, suggèrent que les modèles globaux sont aptes à prendre en compte des éléments dont les impacts sur le débit dépendent de leur localisation sur le bassin versant.

La prise en compte des barrages-réservoirs en modélisation pluie-débit globale n'a pas été abordée en pratique jusqu'à présent. Souvent, un modèle global est jugé *a priori* inadéquat pour traiter cette problématique. Face à ce constat, il nous est apparu intéressant (et stimulant !) de traiter cette question.

2.4. Synthèse et objectif de la thèse

Nous venons de présenter les approches usuelles de prise en compte des barrages-réservoirs en modélisation. Il ressort que chacune pose des problèmes spécifiques :

- L'approche hydraulique convient à des situations où les processus de transfert sont prédominants par rapport au processus de production. C'est typiquement le cas lorsqu'un ouvrage est proche de l'exutoire du bassin versant considéré ;
- L'approche hydrologique (pluie-débit) qui semble la plus adaptée pour traiter cette problématique repose sur une spatialisation du bassin versant. Elle permet ainsi en théorie de prendre en compte les barrages-réservoirs présents sur le bassin et les processus de production ayant lieu sur la zone intermédiaire entre les barrages-

réservoirs et l'exutoire. Ces avantages théoriques sont malheureusement complètement annulés par la connaissance encore très déficiente du fonctionnement du bassin versant et par des modalités pratiques de mise en place peu compatibles avec les contraintes opérationnelles ;

- L'approche hydrologique globale s'est avérée adéquate pour répondre de manière robuste et performante à des problèmes d'hydrologie opérationnelle. Cependant, la prise en compte des ouvrages dans ce type d'approche ne coule pas de source et peut même paraître en contradiction avec le principe de l'approche. Mais cette problématique s'avère intéressante à traiter afin d'exploiter l'efficacité des modèles pluie-débit globaux et de tenter de les rendre utilisables sur des bassins versants influencés par des barrages-réservoirs.

Le dilemme qui est à l'origine de la thèse est le choix entre :

- Utiliser un modèle distribué dont on sait qu'il ne marche pas mieux qu'un modèle global, bien qu'il soit beaucoup plus complexe, et y introduire sans difficulté la présence d'un barrage-réservoir sur le bassin versant ;
- Utiliser un modèle global dont on apprécie le rapport efficacité/complexité, mais qui semble *a priori* peu adapté à la prise en compte d'un barrage-réservoir par essence ponctuel.

L'objectif de ce travail est d'étudier les possibilités de prendre en compte les barrages-réservoirs en modélisation hydrologique globale. Il s'agit de mettre au point une méthode de prise en compte, au sein de la structure d'un modèle pluie-débit global, de l'impact de retenues d'eau artificielles sur le comportement hydrologique du bassin versant.

Un tel outil, simple dans sa conception, doit permettre d'améliorer la simulation des débits des bassins versants influencés et d'évaluer l'impact de barrages-réservoirs sur le régime hydrologique des cours d'eau, en particulier lorsqu'on se place loin à l'aval de l'ouvrage.

Notre travail s'inscrit dans la continuité de l'approche de modélisation empirique globale développée au Cemagref, et qui vise à mettre au point des outils aisément transférables au domaine opérationnel.

Chapitre 3

Chapitre 3.

Démarche adoptée pour la prise en compte des barrages-réservoirs dans un modèle pluie-débit global

3.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de détailler la démarche de développement et les outils utilisés pour prendre en compte les barrages-réservoirs dans une modélisation pluie-débit globale.

Nous avons retenu le pas de temps journalier car il est bien adapté à l'étude des variations de stocks constatées dans les barrages-réservoirs de taille importante pouvant avoir une influence significative sur les débits. De plus, les données journalières sont en général disponibles et relativement abondantes.

La démarche s'inscrit dans la continuité des travaux de modélisation pluie-débit réalisés au Cemagref depuis une vingtaine d'années. Sa principale originalité est de reposer sur un développement empirique de modèles faisant intervenir de larges échantillons de bassins versants (Edijatno, 1991 ; Makhoulouf, 1994 ; Nascimento, 1995 ; Perrin, 2000 ; Andréassian, 2002 ; Mouelhi, 2003 ; Oudin, 2004 ; Mathevet, 2005 ; Rojas-Serna, 2005 ; Tangara, 2005).

Après une présentation de la démarche empirique et du modèle pluie-débit GR4J utilisé comme support à notre recherche, nous détaillerons la manière pratique dont les ouvrages peuvent être pris en compte dans le modèle. L'utilisation d'un large échantillon de bassins versants impose de disposer de méthodes et de critères d'évaluation des simulations des débits adaptés. Ils seront également présentés dans ce chapitre.

3.2. Une approche empirique

Le but du paragraphe est de préciser ce qu'est l'approche empirique évoquée au chapitre 2 à travers la présentation de différents choix qui nous ont guidé dans la construction d'un module de prise en compte des ouvrages dans un modèle pluie-débit global (voir Perrin, 2000 ; Mathevet, 2005).

3.2.1. Les données comme guide

Contrairement à l'approche de développement conceptuelle ou même physique, l'approche empirique ne repose pas sur des hypothèses *a priori* sur la nature des processus dominants, difficiles à déterminer à l'échelle du bassin versant, ni sur une représentation, forcément subjective, que s'en fait le modélisateur. Le guide qui va orienter vers telle ou telle représentation de la relation pluie-débit n'est pas les lois physiques qui régissent les écoulements mais l'information contenue dans les données hydrométéorologiques correspondant aux entrées et sorties du modèle (Nash et Sutcliffe, 1970).

Ce choix est motivé par le caractère global de la modélisation retenue pour cette recherche. En effet, à l'heure actuelle, il n'existe pas de lois fondamentales en hydrologie (Dooge, 1988) et notamment de théories permettant d'utiliser, à l'échelle du bassin versant, des lois théoriques mises au point et validées à l'échelle locale (Richards, Boussinesq, De Saint Venant). L'approche empirique nous permet de ne pas nous enfermer dans des représentations arbitraires du cycle de l'eau à l'échelle du bassin versant. Elle est compatible avec une description globale du bassin versant, pour laquelle il est extrêmement délicat de relier des composants du modèle à des processus physiques ayant lieu sur le bassin. Les données constituent alors ce lien (sorte de "garde-fou") entre la représentation du bassin (*i.e.* le modèle) et la réalité.

3.2.2. Augmentation progressive de la complexité d'une structure de modèle – Comment commencer et progresser ?

Le but de ce paragraphe est de présenter la démarche globale de mise au point d'une solution de prise en compte des barrages-réservoirs dans un modèle pluie-débit global.

Dans la démarche proposée, la prise en compte des barrages-réservoirs s'appuie sur une augmentation progressive de la complexité d'un modèle pluie-débit global initial qui sera présenté en détail au paragraphe 3.3. L'idée est de tester plusieurs possibilités de prise en compte des ouvrages (détaillées au paragraphe 3.4) à travers un processus itératif de type "essai-erreur".

Chaque solution testée est évaluée en termes de performances, c'est-à-dire sur la capacité qu'elle offre de simuler des débits les plus proches possible des observations. Une solution est jugée acceptable si elle permet d'élargir le domaine d'utilisation du modèle initial (Nash et Sutcliffe, 1970). Les critères utilisés pour "mesurer" les progrès apportés par une solution sont présentés au paragraphe 3.5.

Le moteur de progression est donc l'amélioration des capacités du modèle intégrant les barrages-réservoirs à simuler les débits mesurés. Ce principe de discrimination des solutions permet de ne conserver que celles qui sont nécessaires à l'amélioration des performances, sans être influencé par les connaissances théoriques *a priori* des processus.

Maintenir la complexité d'un modèle à son niveau le plus faible est nécessaire aussi bien pour garantir la robustesse que pour faciliter la compréhension de son fonctionnement pour le modélisateur qui cherche à le modifier (l'améliorer) et encore plus à l'utilisateur. Cela permet également de garantir la parcimonie du modèle en paramètres dont le nombre va souvent croissant avec la complexité du modèle. La démarche proposée permet de déterminer la solution la plus performante et ayant le niveau de complexité le plus faible possible, sans sophistication superflue.

En d'autres termes, la démarche présentée précédemment repose sur une complexification raisonnée et progressive du modèle initial. Elle s'inspire de l'approche de développement dite "descendante" (*downward approach* ou encore *top-down*) introduite en modélisation hydrologique par Klemeš (1982) et utilisée plus récemment par Jothityangkoon *et al.* (2001), et Sivapalan *et al.* (2003). Le bassin versant est analysé dans sa globalité en cherchant à décrire ses propriétés émergentes (c'est-à-dire des propriétés différentes de celles de chaque processus élémentaire du système). L'approche "descendante" est à l'opposé de l'approche "ascendante" (*upward* ou *bottom-up*) qui s'attache à décrire de façon mécaniste le fonctionnement d'un système grâce à la description des différents processus élémentaires d'un système et de leurs interactions.

3.2.3. Large échantillon de données

Une des principales limitations de l'approche empirique réside dans le fait que les résultats obtenus sont dépendants de l'échantillon de données utilisé lors de sa mise en œuvre et donc des conditions hydro-climatiques des bassins versants utilisés. Ceci est d'autant plus vrai que l'échantillon est restreint. Linsley (1982) indique que n'importe quel modèle ayant un nombre suffisant de paramètres libres (ou de degrés de liberté) peut donner des résultats satisfaisants lorsqu'il est appliqué sur des courtes chroniques de données issues d'un seul bassin. Il préconise alors de tester le modèle sur un large échantillon de bassins aux caractéristiques variées et avec des chroniques de données suffisamment longues. Plus l'échantillon sera important, plus les résultats seront statistiquement significatifs.

Afin d'assurer une relative généralité à nos résultats, nous avons choisi de travailler sur un large échantillon de bassins versants influencés. Dans la mesure du possible, nous avons essayé de collecter des données de bassins versants ayant des caractéristiques hydrométéorologiques et physiographiques variées. Nous avons également tenté de diversifier les caractéristiques des barrages-réservoirs de l'échantillon. Une description détaillée des étapes de la constitution et du contenu de la base de données est présentée au chapitre 4.

Le recours à de larges échantillons de données a été exploité avec succès au cours de nombreux travaux menés au Cemagref (Edijatno, 1991 ; Perrin, 2000 ; Andréassian, 2002 ; Mouelhi, 2003 ; Oudin, 2004 ; Mathevet, 2005 ; Rojas-Serna, 2005 ; Tangara, 2005), ce qui nous a confortés dans notre approche.

3.2.4. Approche empirique : en résumé

Avant de présenter les outils utilisés dans la mise en œuvre de l'approche empirique, nous synthétisons les principales caractéristiques de la démarche détaillée précédemment :

- Point de départ : un modèle pluie-débit global au pas de temps journalier ;
- Complexification progressive (si nécessaire) de la structure du modèle par essai-erreur de plusieurs solutions de prise en compte des barrages-réservoirs. Les progrès éventuels d'une solution sont mesurés par l'amélioration des capacités du modèle à simuler les débits observés ;
- Les données observées comme guide pour le développement d'une solution ;
- Utilisation d'un large échantillon de bassins versants influencés par la présence de barrages-réservoirs pour garantir la généralité des résultats obtenus.

3.3. Le modèle GR4J

Le modèle GR4J (Perrin *et al.*, 2003) a été sélectionné pour servir de base à ce travail. Il s'agit d'un modèle global, fonctionnant au pas de temps journalier. Il a quatre paramètres optimisables. Il fait partie d'une famille de modèles (annuel GR1A, Mouelhi *et al.*, 2006a, mensuel GR2M, Mouelhi *et al.*, 2006b, et horaire, Mathevet, 2005) dont la première version journalière a été développée par Michel (1983). Le modèle GR4J a été progressivement complété et amélioré en suivant une démarche empirique proche de celle décrite précédemment (Edijatno, 1991 ; Nascimento, 1995 ; Perrin, 2000 ; Mouelhi, 2003 ; Mathevet, 2005). Le modèle GR4J, par ses qualités de robustesse, de simplicité et d'efficacité, est adapté à l'approche envisagée.

La structure de GR4J est la suivante (Figure 3.1) :

- une fonction de production faisant intervenir :
 - une fonction de neutralisation entre la pluie et l'ETP ;
 - une fonction de rendement dépendant d'un réservoir de suivi d'humidité (qui se vide par évaporation et se vidange aussi, de façon secondaire par percolation) ;
 - une fonction d'échange en eau permettant de simuler des échanges avec l'extérieur du bassin ;

- une fonction de transfert présentant deux composantes d'écoulement :
 - l'une faisant intervenir un hydrogramme unitaire, avec une phase de montée, assure le transfert de 90% de la pluie efficace, qui est ensuite routée par un réservoir non linéaire ;
 - l'autre faisant intervenir un hydrogramme unitaire avec une phase de montée et une phase de descente, assure le transfert des 10% restants de la pluie efficace.

Les quatre paramètres ajustables du modèle sont :

- **X1** : la capacité maximale du réservoir de production ;
- **X2** : le coefficient d'échange ;
- **X3** : la capacité du réservoir de transfert ;
- **X4** : le temps de base des hydrogrammes unitaires.

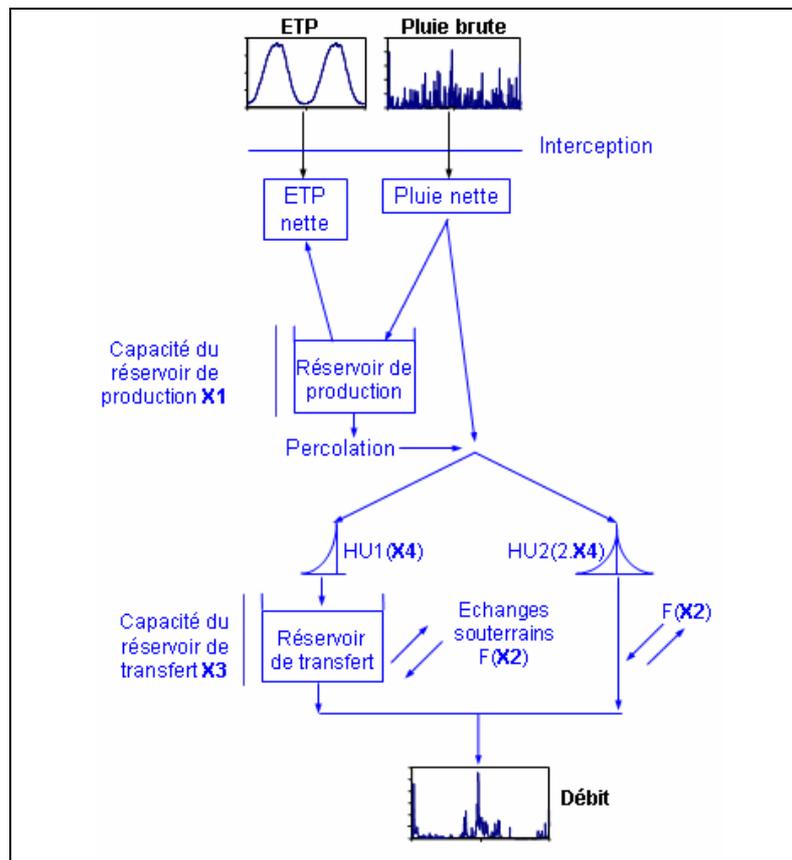


Figure 3.1 : Architecture du modèle GR4J (Perrin, 2000)

Les différentes fonctions du modèle ont été déterminées empiriquement afin de simuler correctement le comportement "moyen" des bassins versants. Le modèle GR4J a été établi au pas de temps journalier. Il a, à de nombreuses reprises, été testé avec de bons résultats sur de nombreux bassins versants dans le monde (Perrin, 2000).

Le modèle GR4J peut être utilisé pour simuler les débits sur une grande gamme de bassins versants à condition de disposer des données de pluie et d'évapotranspiration potentielle. Des données de débit ne sont, quant à elles, nécessaires que pour le calage des paramètres.

3.4. Comment prendre en compte les ouvrages dans le modèle ?

Etant donné le caractère global de la modélisation envisagée, deux questions se posent :

- Comment pourrait être "vu" un barrage-réservoir dans le modèle ?
- Comment prendre en compte les données sur les volumes stockés dans les barrages-réservoirs ?

3.4.1. Comment représenter un barrage-réservoir dans un modèle pluie-débit global ?

Conformément à la démarche empirique adoptée, l'idée est de commencer par une représentation simple des barrages-réservoirs dans la structure de GR4J et de la complexifier progressivement si nécessaire.

Par analogie avec les réservoirs utilisés dans la structure de GR4J pour représenter les différents stockages naturels d'eau ayant lieu sur un bassin versant (dans le sol, le sous-sol, les dépressions naturelles, *etc.*), le stockage artificiel d'eau dans un barrage-réservoir pourrait être représenté dans la structure du modèle par un réservoir.

La capacité de ce nouveau réservoir serait identique à celle du barrage-réservoir réel rapportée à la surface du bassin versant (lame d'eau maximale stockable exprimée en mm). Par exemple, si la capacité maximale d'un barrage-réservoir est de 10 hm^3 et la surface du bassin versant de 1000 km^2 , la capacité équivalente du réservoir du modèle serait de 10 mm.

Le fonctionnement de ce réservoir n'est pas modélisé. L'évolution de son stock est simplement régie par les variations observées sur le barrage-réservoir réel. Les flux d'eau entrants et sortants vont donc correspondre aux variations de volume observées d'un pas de temps à un autre. A chaque pas de temps, la variation de volume du réservoir du modèle va donc uniquement correspondre à la variation réelle de volume enregistrée dans le barrage-réservoir. Ce nouveau réservoir est appelé dans la suite "réservoir image" car il constitue le reflet du barrage-réservoir réel au sein du modèle.

Il est à noter que les variations de volume observées dans le barrage-réservoir ne sont pas uniquement dues à la gestion de l'ouvrage (stockage ou vidange). D'autres causes de variations, comme l'évaporation, l'infiltration ou des précipitations au niveau du lac, peuvent intervenir.

S'il y a plusieurs barrages-réservoirs sur le bassin versant, les volumes journaliers stockés dans les barrages-réservoirs sont sommés afin de ne constituer qu'un unique stockage représenté dans le modèle par un seul réservoir. Les variations de niveau du réservoir image correspondent alors à la somme des variations réellement observées pour chaque barrage-réservoir du bassin. Ce regroupement n'est pas obligatoire, mais il nous permet, dans cette phase initiale de développement, de simplifier.

Le modèle "voit" alors le ou les barrages-réservoirs comme un réservoir unique dont la capacité et les variations de volume (alimentation et vidange) sont identiques à celles observées en réalité (Figure 3.2).

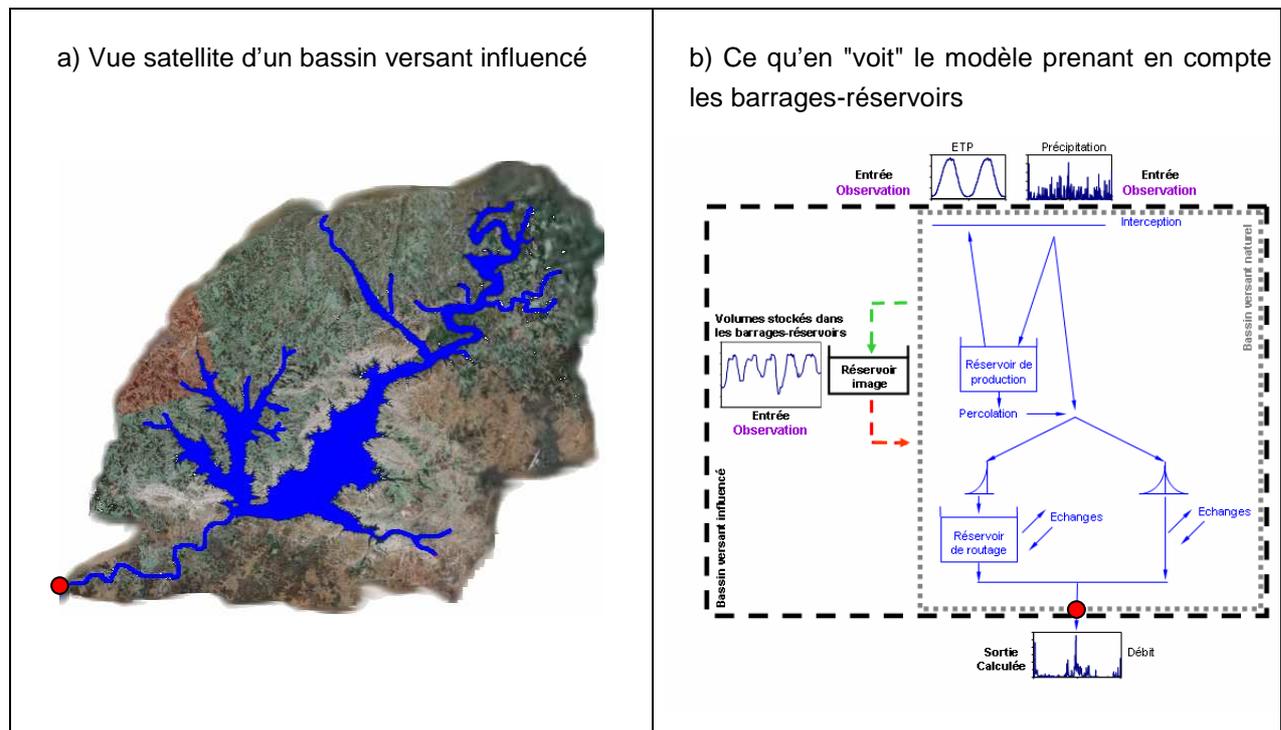


Figure 3.2 : Exemple de ce que peut "voir" le modèle GR4J modifié d'un bassin influencé

Pour la modélisation, les barrages-réservoirs ne sont donc vus qu'au travers de leurs chroniques d'entrées-sorties observées. Le fonctionnement (*i.e.* la gestion) des barrages-réservoirs n'est donc pas modélisé, le réservoir image servant uniquement de représentation du stock réel observé.

Les volumes stockés observés quotidiennement dans les barrages-réservoirs vont alors être utilisés pour calculer les nouvelles entrées du modèle, à savoir les variations de volume dans les réservoirs réels.

Intéressons-nous maintenant plus particulièrement à la représentation du réservoir image.

3.4.2. Représentation du réservoir image

Afin de bien comprendre à quoi correspond le réservoir image, il faut avoir en tête que, contrairement aux données de pluie, les données de variation de volumes entrées dans le modèle ne sont pas des apports extérieurs supplémentaires d'eau. Il ne s'agit pas d'une "source" qui va alimenter le modèle, ni d'un "puits sans fond" que le modèle pourrait utiliser pour faire disparaître de l'eau. Les données vont servir au modèle comme indicateur de fonctionnement du ou des barrages-réservoirs réels. En d'autres termes, ces données vont indiquer au modèle quand et combien, pour un jour donné, le ou les ouvrages réels stockent (remplissage) d'eau ou en rejettent (vidange) :

- En cas de remplissage, le modèle va devoir "livrer" une quantité d'eau correspondant à la variation de volume observée vers le réservoir image ;
- En cas de vidange, le modèle va devoir "accepter" une quantité d'eau correspondant à la variation de volume observée depuis le réservoir image.

Par convention, le système considéré est le bassin versant naturel. On pose ΔV , la variation journalière de volumes (Equation 3.1). Elle peut donc être positive (vidange de l'ouvrage) ou négative (remplissage de l'ouvrage).

$$\Delta V = V_{t-1} - V_t$$

Equation 3.1

avec

V_t le volume d'eau stocké dans le barrage-réservoir au pas de temps courant (t)

V_{t-1} le volume d'eau stocké dans le barrage-réservoir au pas de temps précédent (t-1)

Une variation ΔV positive, indique au modèle que la quantité d'eau stockée dans le barrage-réservoir a diminué de ΔV entre t-1 et t. Par conséquent, au pas de temps t, une quantité d'eau ΔV va être retirée du réservoir image et introduite dans la structure initiale du modèle GR4J pour que la quantité d'eau stockée dans le réservoir image corresponde exactement à celle observée (Figure 3.3a).

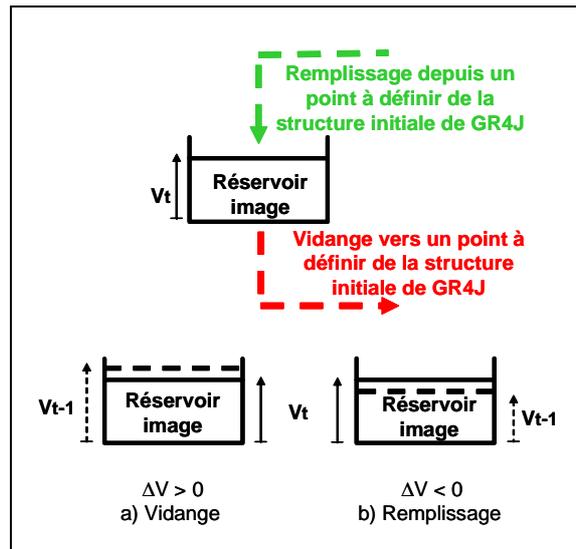


Figure 3.3 : Fonctionnement du réservoir image. Les "points à définir" sont appelés points d'insertion du réservoir image

De même, une variation ΔV négative, indique au modèle que la quantité d'eau stockée dans le barrage-réservoir a augmenté de ΔV entre $t-1$ et t . Par conséquent, au pas de temps t , une quantité d'eau ΔV va être retirée de la structure initiale de GR4J et stockée dans le réservoir image pour que la quantité d'eau stockée dans le réservoir image corresponde également exactement à celle observée (Figure 3.3b).

L'évolution du niveau du réservoir image n'est donc définie que par la chronique de volumes stockés réellement observés. Il n'y a aucune modélisation du fonctionnement de ce réservoir.

3.4.3. Insertion du réservoir image

La structure du modèle GR4J dispose d'un certain nombre de fonctions permettant d'approcher la transformation naturelle (non influencée) de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant. Ces fonctions (présentées précédemment) permettent notamment de simuler implicitement des stocks d'eau libre et de simuler les transferts dans le réseau hydrographique. C'est sur ces stocks que des prélèvements sont faits par les barrages-réservoirs réels et c'est dans le réseau hydrographique que se propagent les lâchures. Cependant, du fait de la nature globale du modèle, la correspondance de ses fonctions avec des compartiments du bassin versant réel ne peut pas être établie explicitement. On ne sait donc pas *a priori* quels stocks d'eau du modèle exploiter pour alimenter le réservoir image représentant les barrages, ni quelles fonctions de transfert et/ou de production exploiter pour rendre compte du devenir des lâchures à l'aval des ouvrages. Une des questions cruciales à résoudre est donc de savoir comment insérer le réservoir image dans la structure initiale de GR4J. En d'autres termes, comment déterminer de quels points de la structure du modèle "prendre" l'eau pour remplir le réservoir image ou vers quels points la "rejeter" en cas de vidange ?

Concrètement, on doit donc répondre aux questions suivantes :

- Lorsque le volume stocké dans un barrage-réservoir diminue ($\Delta V > 0$), dans le modèle, la quantité d'eau correspondant à cette diminution va-t-elle être envoyée vers un point plutôt en tête du modèle afin de bénéficier des effets du réservoir de production et/ou des hydrogrammes unitaires ou plutôt en sortie pour un transfert quasi direct de la lâchure à l'exutoire ?
- De même, dans le cas d'une augmentation du volume stocké dans le barrage-réservoir ($\Delta V < 0$), quelle sera, dans le modèle, l'origine de l'eau qui va servir à alimenter le réservoir image ?

Nous traiterons alors ces questions en testant un grand nombre de solutions d'insertion du réservoir image dans la structure du modèle initial. Nous essaierons donc de découvrir, par les données, quels sont les points du modèle les plus judicieux à exploiter pour rendre compte de l'impact des ouvrages.

Une solution reviendra à tester une association d'un ou plusieurs points d'alimentation avec un ou plusieurs points de rejet du réservoir image (Figure 3.4). On pourra également envisager de sophistication ces solutions si nécessaire (en ajoutant de nouvelles composantes spécifiques au réservoir image, comme par exemple un hydrogramme unitaire en sortie de ce réservoir, voir annexe 5).

Comme cela a été expliqué précédemment, le critère de discrimination des solutions testées sera l'amélioration des performances par rapport à la version initiale du modèle GR4J.

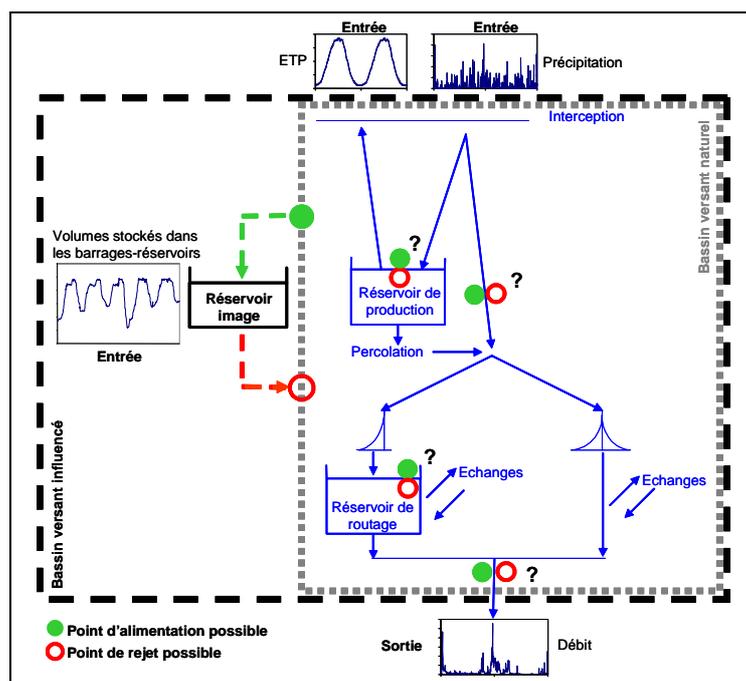


Figure 3.4 : Exemple de points d'insertion du réservoir image

Nous détaillerons l'ensemble des solutions testées au chapitre 5.

3.5. Mise en œuvre de la modélisation

3.5.1. Calage et contrôle

La procédure d'évaluation choisie pour apprécier la pertinence des différentes solutions testées est une procédure en calage-contrôle sur des périodes indépendantes (Klemeš, 1986). L'objectif est de rendre compte au mieux des débits influencés à l'aval des ouvrages sur l'ensemble des bassins versants de notre échantillon test.

La première étape consiste à caler le modèle, c'est-à-dire à extraire à partir des données d'entrées (pluie, ETP et variations de volume) et de sortie (débits mesurés) les informations nécessaires pour déterminer les paramètres du modèle reproduisant au mieux les débits observés à l'exutoire d'un bassin versant donné. Cette étape permet d'adapter le modèle au bassin étudié.

En plus de données d'entrée et de sortie citées précédemment, cette étape requiert le choix d'une méthode d'optimisation ainsi que celui d'une fonction objectif (détaillée au paragraphe 3.5.2.2).

La méthode d'optimisation retenue ici, est la méthode "pas à pas" (Michel, 1989 ; Edijatno, 1991 ; Nascimento, 1995). Il s'agit d'une méthode locale automatique, efficace et simple pour le modèle utilisé ici (Nascimento, 1995 ; Perrin, 2000 ; Andréassian, 2002 ; Oudin, 2004 ; Mathevet, 2005).

Une fois le calage réalisé, il est nécessaire de tester le jeu de paramètres obtenu sur des données différentes de celles ayant servi au calage (mêmes stations mais périodes différentes). Il s'agit du contrôle du modèle. Durant cette étape, le jeu de paramètres obtenu lors du calage n'est pas modifié. Il est alors utilisé pour simuler les débits à partir des entrées du modèle. C'est en contrôle qu'il est significatif d'apprécier les performances du modèle (calcul des critères de performance).

En pratique, une procédure de calage-contrôle systématique sur des périodes indépendantes (d'une durée moyenne de 6 à 7 ans) a été utilisée pour l'ensemble des bassins de l'échantillon (Klemeš, 1986). Pour chaque bassin, les deux périodes servent tour à tour au calage et au contrôle, si bien que l'on a une évaluation des performances en contrôle sur l'ensemble des données disponibles (Figure 3.5).

Enfin, pour s'affranchir du problème des conditions initiales, une période d'un an a été réservée à l'initialisation du modèle au début de chaque période de simulation. Les résultats

de cette année ne sont donc pas pris en compte lors de l'évaluation des performances du modèle.

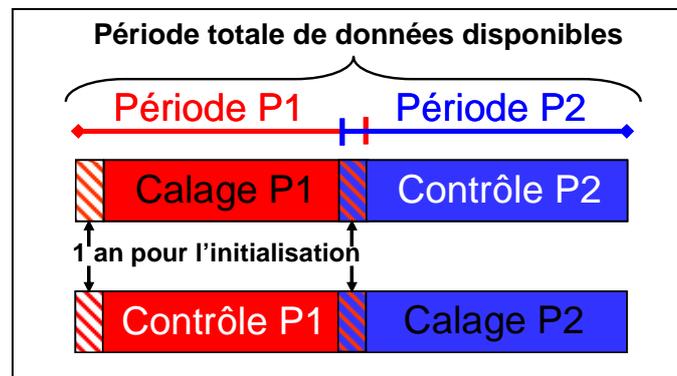


Figure 3.5 : Calage – Contrôle – Initialisation

3.5.2. Evaluation des simulations des débits

3.5.2.1. Choix des critères d'évaluation

Etant donné le nombre important de tests réalisés et la taille de l'échantillon de bassins versants, l'évaluation des simulations des débits et donc des performances des solutions testées repose principalement sur des critères numériques. Ces critères sont en effet aisément calculables et facilitent la comparaison des performances de différentes solutions.

Comme il n'existe pas un critère universel parfait permettant d'évaluer la qualité d'un modèle (Weglarczyk, 1998), trois critères complémentaires ont été sélectionnés. Ils permettent d'évaluer les performances des solutions en donnant plus ou moins d'importance à certaines gammes de débits.

Ces critères permettent d'évaluer les performances moyennes des solutions testées obtenues sur l'ensemble de l'échantillon de bassins versants.

Dans certains cas, nous avons ponctuellement eu recours à une comparaison visuelle de différentes chroniques de débit afin d'avoir des indications sur la pertinence d'une solution donnée.

3.5.2.2. Les critères sélectionnés

L'évaluation des solutions testées repose sur une adaptation du critère défini par Nash et Sutcliffe (1970) (appelé communément critère de Nash-Sutcliffe).

Le critère de Nash-Sutcliffe adimensionnel est basé sur la somme des erreurs quadratiques du modèle. Il s'écrit classiquement (Equation 3.2) :

$$NS(Q) = 100 \cdot \left(1 - \frac{N^2}{N_0^2} \right) \quad \text{Equation 3.2}$$

avec

$$N^2 = \sum_{i=1}^n [Q_{\text{mes},i} - Q_{\text{sim},i}]^2$$

$$N_0^2 = \sum_{i=1}^n [Q_{\text{mes},i} - \bar{Q}_{\text{mes}}]^2$$

$$\bar{Q}_{\text{mes}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_{\text{mes},i}$$

où $Q_{\text{mes},i}$ et $Q_{\text{sim},i}$ sont respectivement les débits mesurés et simulés au pas de temps i et n le nombre de pas de temps de la période d'étude.

Le terme N^2 est la variance résiduelle. N_0^2 permet de normer le critère afin de le rendre, si possible, indépendant du niveau moyen des valeurs observées. En effet, la valeur de N^2 est en général d'autant plus élevée que le niveau des débits est fort (les erreurs absolues étant en moyenne plus élevées).

Le critère de Nash peut être interprété comme un critère d'évaluation des performances d'un modèle par rapport à un modèle de référence parfaitement calé, qui donnerait sur toute la période considérée un débit constant (égal au débit moyen \bar{Q}_{mes}).

Ce critère varie dans l'intervalle $]-\infty ; 100]$. Une valeur de 100, indique que l'erreur du modèle est nulle. Des valeurs négatives de $NS(Q)$ indiquent que le modèle de référence (débit constant égal au débit moyen mesuré) explique mieux le comportement du bassin que le modèle utilisé.

Le rapport N/N_0 , que l'on peut désigner par ε , correspond à l'erreur relative moyenne du modèle. Lorsque ε vaut 0,2 par exemple, ceci signifie que l'erreur quadratique moyenne correspond à 20 % de l'écart-type des débits mesurés. Dans ce cas, le critère de Nash vaut 96 %. De même, pour une erreur relative de 40 %, le critère de Nash vaut encore 84 %. Ces valeurs élevées du critère pour des valeurs assez élevées de l'erreur relative donnent en fait une idée un peu optimiste de la qualité réelle du modèle. Ainsi, le critère de Nash ne permet pas de dire si un modèle peut convenir à une utilisation opérationnelle pour laquelle l'évaluation de l'écart toléré entre simulation et observation est important voire décisif.

Une transformation du critère de Nash permettant de limiter l'intervalle de variation à $]-100 ; 100]$ a été proposée par Mathevet (2005). Il s'agit du critère, noté C2MQ (Equation 3.3) :

$$C2MQ = 100 \cdot \frac{NS(Q)}{200 - NS(Q)} \quad \text{Equation 3.3}$$

L'intérêt de cette transformation est de ne pas donner trop d'importance aux valeurs fortement négatives (problématique lors du calcul de moyennes) obtenues pour certains bassins versants, tout en conservant la facilité d'interprétation du critère de Nash.

Le critère C2MQ calculé sur les débits permet de mettre l'accent sur la qualité de simulation des débits élevés (crues).

Il est possible de calculer le critère C2M sur les logarithmes népériens des débits (C2MLQ) et sur les racines carrées (C2MVQ). Le critère calculé sur les logarithmes des débits permet alors de mettre l'accent sur les débits faibles (étiages) et le critère sur les racines ne privilégie ni les épisodes de crue ni les étiages. Comme nous cherchons à simuler le mieux possible l'ensemble de la gamme de débits, nous avons choisi d'utiliser le critère C2MVQ comme fonction objectif dans la procédure de calage. En effet, cette fonction objectif est un compromis convenable entre une fonction objectif adaptée aux débits élevés (C2MQ par exemple) et une fonction objectif adaptée aux débits faibles (C2MLQ par exemple) (Oudin *et al.*, 2006).

Les critères C2MQ et C2MLQ calculés en contrôle permettent une évaluation des solutions testées sur des aspects importants de l'impact des barrages-réservoirs (crue, étiage).

Pour chaque bassin versant de l'échantillon, les critères sont calculés en contrôle sur chacune des périodes P1 et P2 (cf. Figure 3.5). Les deux valeurs obtenues pour chaque type de critère (C2MQ et C2MLQ) sont ensuite moyennées afin d'obtenir une valeur par bassin versant sur l'ensemble de la période simulée. Les valeurs moyennes des critères C2M en contrôle sur l'ensemble de l'échantillon de référence (*i.e.* la moyenne des critères obtenus pour chaque bassin versant) nous permettront alors de juger de la pertinence des solutions proposées.

3.6. Synthèse

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté l'approche empirique retenue pour prendre en compte les barrages-réservoirs en modélisation pluie-débit globale. En s'appuyant sur une large base de données de bassins versants, on cherche à exploiter au mieux dans la structure du modèle GR4J, une information simple sur les variations des quantités d'eau stockées dans les ouvrages.

Nous tentons de représenter, dans le modèle, les barrages-réservoirs par un réservoir image, dont le fonctionnement (évolution des quantités d'eau stockées) n'est pas modélisé mais uniquement régi par les variations de volumes observées sur les ouvrages réels. Ces variations vont donc constituer, pour le modèle, une nouvelle donnée d'entrée, au même titre que la pluie et l'ETP.

La procédure d'évaluation choisie est une procédure en calage-contrôle sur l'ensemble des bassins versants de la base de données. L'évaluation des solutions proposées repose sur des critères de performance mesurant la capacité des solutions à restituer les débits observés.

Chapitre 4

Chapitre 4.

Présentation de la base de données

4.1. Introduction

La collecte et la préparation de l'échantillon de données utilisé dans ce travail sont deux étapes capitales de la démarche proposée. En effet, les données vont servir à la fois comme support à l'élaboration d'un moyen d'intégration des retenues dans un modèle pluie-débit global et comme témoin de la qualité des résultats obtenus (test du modèle).

La méthodologie adoptée s'appuie sur un large échantillon de données concernant 77 bassins versants au total. Dans ce chapitre, nous exposons dans un premier temps les étapes de constitution de cet échantillon. Nous présentons ensuite un aperçu de la localisation et des principales caractéristiques des bassins et des ouvrages étudiés. Le but n'est pas de faire une description très fine des bassins et de leur fonctionnement mais de présenter des caractéristiques qui seront utiles à l'objectif de ce travail. Nous aborderons, dans la dernière partie de ce chapitre, des questions relatives aux chroniques des données et à leur qualité.

Pour le type de modélisation envisagé, les données nécessaires sont de chroniques journalières concomitantes de pluie, de débits et d'évapotranspiration potentielle (ETP). Le caractère global de la modélisation nous dispense de disposer de données décrivant l'hétérogénéité spatiale des caractéristiques des bassins. En complément de ces données classiquement utilisées en modélisation hydrologique, notre étude nécessite des données plus spécifiques qui reflètent le fonctionnement des retenues. Pour cela, nous avons choisi de fournir en entrée du modèle des chroniques journalières de volumes d'eau stockés dans les ouvrages. Parmi les différentes données pouvant renseigner sur les manœuvres des ouvrages, les variations quotidiennes des volumes stockés nous semblent être une donnée pertinente, largement disponible pour un nombre important d'ouvrages et compatible avec le degré de sophistication du modèle utilisé et disponible.

Les données d'entrée du modèle sont des moyennes arithmétiques réalisées sur plusieurs stations (pluie et ETP). Pour les volumes, lorsque plusieurs ouvrages sont présents sur le bassin, la somme des volumes journaliers des différents ouvrages est injectée en entrée du modèle.

4.2. Sources des données et constitution de l'échantillon

Les données de pluie, d'ETP et de débit au pas de temps journalier sont couramment utilisées en hydrologie et notamment en modélisation. Elles sont disponibles auprès des divers organismes chargés de leur collecte, de leur gestion et de leur diffusion. En revanche, les données relatives aux retenues, moins utilisées en modélisation, sont plus délicates à collecter. Les bases de données existantes se focalisent sur des bassins versants pas ou peu influencés. Ainsi, au commencement de la thèse, la base de données existante ne comportait que huit bassins versants (Moulin *et al.*, 2005). Il a donc fallu étoffer ce petit échantillon de départ.

En général, il n'existe pas d'organisme de centralisation des données relatives aux retenues. Chaque propriétaire ou gestionnaire d'ouvrages collecte ces données pour des besoins propres de gestion et de suivi mais leur utilisation pour des travaux de recherche est rare et peut, dans le meilleur des cas, concerner seulement un petit nombre d'ouvrages. Les données relatives aux retenues proviennent alors des différents gestionnaires d'ouvrages qui ont chacun leur format propre. Un premier travail a consisté à identifier, en plus des stations de mesures hydrométéorologiques, des ouvrages potentiellement intéressants pour notre étude ainsi que leurs gestionnaires. Afin de disposer de bassins versants aux comportements diversifiés, la recherche de sources de données n'a pas été limitée à la France. Les différentes sources ainsi que les critères de sélection des bassins retenus dans l'échantillon sont détaillés dans les paragraphes suivants.

4.2.1. Sources des données

Parmi les pays prospectés en vue de la constitution de la base de données, la France et les Etats-Unis se sont révélés les plus prometteurs. Des bassins versants situés au Brésil, en Australie et à cheval entre le Mali et le Sénégal ont également été repérés. Un système d'informations géographiques (SIG) a été construit pour chacun de ces six pays. Il regroupe plusieurs couches d'informations principalement sur le réseau hydrographique, la localisation des stations de mesures hydrométéorologiques et des barrages-réservoirs.

4.2.1.1. En France

Les données météorologiques (pluie et ETP) ont été fournies par Météo France. Les postes pluviométriques sont extraits de la banque de données PLUVIO. Les données hydrométriques sont issues de la banque de données HYDRO du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD).

Les données relatives aux barrages sont issues de sources qui ont été repérées à partir de différentes bases de données partielles recensant des informations générales sur les ouvrages (principalement localisation, caractéristiques des barrages, objectifs et propriétaire ou gestionnaire). Nous avons fait appel principalement à deux listes d'ouvrages. La première est celle du Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie. Elle regroupe les

barrages hydroélectriques pour lesquels les Directions Régionales de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement assurent une mission de contrôle et qui sont considérés comme intéressant la sécurité publique au sens de la circulaire 70-15 du 14 août 1970. Plus de 150 ouvrages y sont répertoriés. La grande majorité de ces ouvrages est gérée par les différentes unités de production d'EDF. La deuxième liste de barrages est issue de la base de données BarDignes qui a été conçue et est gérée par le Cemagref pour le MEDD. Elle recense l'ensemble des barrages autorisés intéressant la sécurité publique et des digues de protection contre les inondations. Elle compte plus de 300 barrages exploités pour divers objectifs et gérés par différents types d'exploitants.

Ces deux listes d'ouvrages nous ont alors permis d'identifier les gestionnaires susceptibles de fournir des données sur l'état de remplissage des retenues.

4.2.1.2. Aux Etats-Unis

Les données météorologiques (pluie et température) sont disponibles sur le site Internet de l'*United States Department of Agriculture* (USDA, <http://www.usda.gov>) qui regroupe des données d'un grand nombre de stations météorologiques réparties sur l'ensemble des Etats-Unis. Les données de débits sont disponibles sur le site Internet de l'*United States Geological Survey* (USGS, <http://www.usgs.gov>).

Une recherche générale sur Internet a permis d'établir une liste de gestionnaires susceptibles de fournir des données de remplissage de leurs retenues. Cette liste n'est bien sûr pas exhaustive (il existe aux Etats-Unis plus de 79 000 barrages dont plus de 8 000 ont une capacité supérieure à 30 hm³ et une hauteur supérieure à 15 m).

Parmi les gestionnaires identifiés, l'*United States Bureau of Reclamation* (USBR) a fourni la majorité des données de remplissage des réservoirs localisés aux Etats-Unis. Il s'agit d'un organisme chargé à l'origine de la construction de grands aménagements hydrauliques (barrages, canaux, centrales hydroélectriques...) afin de favoriser le développement économique des 17 Etats de l'ouest des Etats-Unis. Actuellement, l'USBR fournit de l'eau à plus de 31 millions de personnes pour des usages agricoles, industriels et domestiques. C'est également le deuxième producteur d'hydroélectricité de cette partie des Etats-Unis. Parmi l'ensemble des ouvrages dont il assure la gestion, l'USBR met à disposition des chroniques journalières de remplissage pour 152 ouvrages répartis sur l'ensemble des 17 Etats de l'ouest du pays.

Des données ont également été fournies par le *California Department of Water Resources* (CDWR) pour certains ouvrages localisés en Californie. Le CDWR est en charge de la gestion de la ressource en eau de l'Etat de Californie et dispose, à ce titre, de données de remplissage pour 80 ouvrages (différents de ceux gérés par l'USBR).

4.2.1.3. Au Brésil

Les données hydrométéorologiques sont fournies par l'*Agência Nacional de Águas* (ANA) qui est une agence du Ministère de l'environnement brésilien ayant pour mission la gestion des ressources en eau du pays ainsi que la mise en place du "système national de gestion des ressources hydriques". Elles ont été téléchargées sur le site Internet de l'ANA (<http://www.ana.gov.br>).

Les données de gestion proviennent de la société CEMIG (*Companhia Energética de Minas Gerais*) qui est un important producteur d'électricité brésilien et par conséquent gestionnaire de barrages hydroélectriques. Elles nous ont été transmises par l'intermédiaire de l'Université de Minas Gerais située à Belo Horizonte.

4.2.1.4. En Australie

Les données de gestion ainsi que les données hydrométéorologiques ont été mise à notre disposition par la société de production d'énergie Hydro Tasmania, principal producteur d'énergie de l'Etat de Tasmanie.

4.2.1.5. Bassins du fleuve Sénégal

Les données météorologiques ont été fournies par l'Institut de Géographie de l'Université de Copenhague après accord préalable des services météorologiques des pays concernés (Mali, Guinée, Sénégal et Mauritanie).

Les données de débits ainsi que les chroniques de volumes nous ont été transmises par l'Institut pour la Recherche et le Développement (IRD).

4.2.1.6. Liste complète des fournisseurs de données

La liste complète des organismes ayant contribué à la fourniture des données est présentée en annexe 1.

4.2.2. La démarche d'identification des bassins : un "tamisage" progressif (et contraignant)

L'image d'un tamisage progressif de l'ensemble des bassins versants et barrages-réservoirs repérés à travers des tamis de plus en plus fins illustre bien la démarche d'identification adoptée pour constituer l'échantillon de bassins versants utilisé dans ce travail.

4.2.2.1. Premier tamis : barrages-réservoirs de taille significative

Un premier tri de l'ensemble des barrages recensés a été réalisé en excluant les retenues d'une capacité normale inférieure à 1 hm³. Il s'agit de conserver uniquement les ouvrages susceptibles d'avoir une influence suffisamment importante sur les débits au-delà de leur aval immédiat. Nous avons exclu le cas de nombreuses petites retenues dont la somme des capacités dépassait le million de m³. Il s'agit d'un cas très intéressant à traiter mais qui

nécessite de disposer des chroniques des volumes stockés pour l'ensemble des ouvrages. Or, souvent dans ce cas, les petites retenues n'ont pas de suivi régulier des volumes.

Au terme de cette première sélection 516 ouvrages sur les 664 initialement recensés ont été conservés.

4.2.2.2. Deuxième tamis : détermination des bassins versants

En partant de la présélection précédente, nous avons alors déterminé quelles stations hydrométriques situées à l'aval des barrages pouvaient être utilisées. Lorsque cela était possible, plusieurs stations ont été retenues. Nous avons veillé à sélectionner des stations situées non directement à l'aval de l'ouvrage (influence des manœuvres très marquée) et pas trop éloignées non plus (l'influence des manœuvres doit rester décelable). La proximité de la station de jaugeage avec le barrage a été évaluée visuellement grâce au SIG. Afin de déterminer quelle sera la station de mesure la plus éloignée, nous avons calculé la lame d'eau équivalente pouvant être stockée dans la retenue ou les retenues en utilisation normale (Equation 4.1) :

$$\text{LameStockée} = 1000 \times \frac{V}{S} \quad \text{Equation 4.1}$$

avec

V : le volume normal en hm³ de la retenue ou des retenues présentes dans le bassin versant

S : la superficie du bassin versant en km²

La lame stockée est exprimée en mm. Il s'agit d'un critère de présélection élémentaire mais simple à mettre en place et adapté au traitement d'un grand nombre de bassins. Nous avons retenu l'ensemble des bassins pour lesquels la lame d'eau stockée est supérieure ou égale à 5 mm. Pour chaque station hydrométrique repérée, la disponibilité et la durée des chroniques de données ont été relevées.

4.2.2.3. Troisième tamis : bassins versants faiblement influencés par la neige

Nous avons choisi de ne pas traiter les bassins régulièrement enneigés afin d'éviter d'introduire une source supplémentaire de difficultés lors de la modélisation. Pour cela, nous avons sélectionné les bassins dont l'altitude maximale est inférieure à 1200 m et dont la durée moyenne d'enneigement reste inférieure à 20 jours par an (Edijatno, 1991).

A la fin des deux étapes précédentes, 234 ouvrages ont été retenus.

4.2.2.4. Quatrième tamis : repérage de postes pluviométriques et de stations météorologiques compatibles

Avec l'aide du SIG qui a permis de localiser l'ensemble des pluviomètres gérés par les différents organismes cités précédemment, nous avons établi une liste de postes utilisables

pour les bassins présélectionnés. Plusieurs pluviomètres ont été retenus pour décrire la pluie tombant sur chaque bassin. Une pluie de bassin, utilisée comme entrée du modèle est alors calculable (elle égale ici à la moyenne arithmétique des pluies des différentes stations). Les pluviomètres sélectionnés sont, en général, situés sur le bassin versant. Lorsque leur nombre est insuffisant, des postes complémentaires situés à proximité du bassin versant étudié ont été sélectionnés.

Le nombre de pluviomètres nécessaires à une représentation acceptable de la pluie sur un bassin est un problème délicat auquel vient s'ajouter une couverture pluviométrique souvent peu dense. Nous avons, dans la mesure du possible, respecté le critère de densité pluviométrique proposé par Schaake *et al.* (2000) et utilisé dans le cadre du groupe de travail "MOPEX" (Figure 4.1).

Superficie du bassin (km ²)	50	200	500	1200	2000	3000	6000	10000
Nb de stations pluviométriques	2	3	4	5	6	7	8	9

Figure 4.1 : Nombre de pluviomètres nécessaires à la modélisation pluie-débit en fonction de la surface du bassin (d'après Schaake *et al.*, 2000)

L'ETP a été prise en compte dans la modélisation de deux manières différentes mais quasiment équivalentes en terme de modélisation (Oudin, 2004) selon la disponibilité des données :

- soit en l'estimant à partir d'une relation issue de la formule de Oudin (2004) qui prend en compte des données journalières de température ainsi que la latitude du bassin. Dans ce cas, au moins une station météorologique proche du centre du bassin versant a été sélectionnée. La latitude de celle-ci est alors utilisée ;
- soit à partir de données d'ETP moyennes décadales interannuelles de Penman (1948) issues de stations situées sur le bassin ou à proximité.

La disponibilité ainsi que la durée des chroniques de données de pluie ont été relevées. Elles ont été croisées avec celles des stations hydrométriques afin de déterminer des périodes concomitantes d'une durée suffisante (nous reviendrons sur la durée minimale des chroniques par la suite).

A ce stade, nous disposons d'une liste d'ensembles (station hydrométrique, pluviomètres, stations d'ETP, barrage(s)) potentiellement utilisables avec des périodes identifiées. Il reste alors à vérifier la disponibilité des données de volumes journaliers stockés dans les retenues présentes sur le bassin versant.

4.2.2.5. Cinquième tamis : disponibilité et acquisition des données de remplissage des retenues sélectionnées

Lors de cette étape, nous avons contacté les gestionnaires des ouvrages présents sur les bassins sélectionnés afin de s'assurer de la disponibilité des données journalières de volumes stockés. Plus de 70 gestionnaires, propriétaires d'ouvrages et organismes en rapport avec les gestionnaires ont été contactés afin de demander des données de remplissage de plus de 200 retenues situées en France, aux Etats-Unis, au Brésil, en Australie et sur le fleuve Sénégal (Mali).

Suite aux réponses obtenues, l'échantillon final est composé de 77 bassins versants (43 barrages, Figure 4.2) pour lesquels nous disposons à la fois de données hydrométéorologiques et de remplissage des principales retenues sur des périodes communes.

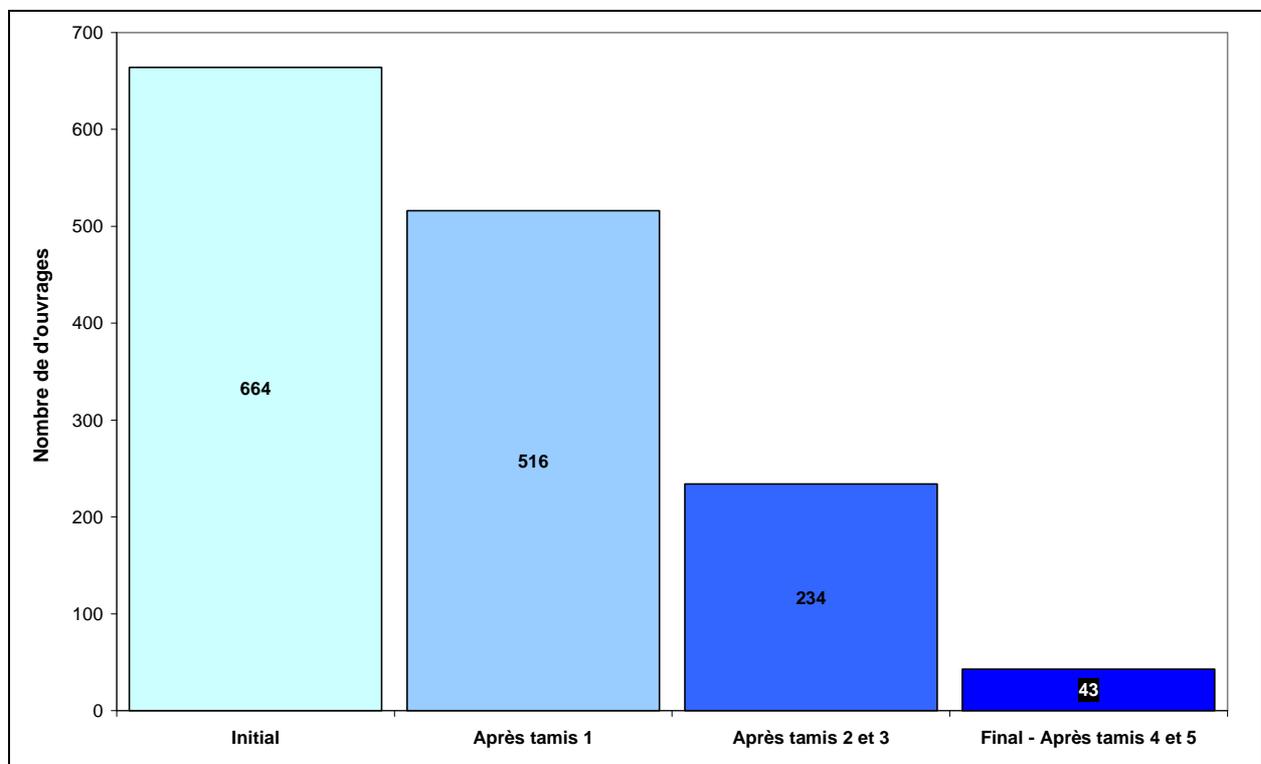


Figure 4.2 : Nombre d'ouvrages présélectionnés après chaque étape de la constitution de la base de données

Le nombre d'ouvrages effectivement inclus dans l'échantillon final est bien inférieur à celui de la liste établie avant de contacter les gestionnaires pour plusieurs raisons :

- Dans quelques cas, nous n'avons pas reçu de réponse du gestionnaire contacté ou bien la réponse était négative ;
- Pour certains ouvrages, le relevé des hauteurs d'eau (et donc des volumes) n'est pas effectué quotidiennement ou bien les chroniques disponibles sont trop courtes (lacunes importantes, pas d'archivage sur de longues périodes...) ;

- Pour certains bassins, il n'a pas été possible de trouver des périodes communes pour l'ensemble des données, ce qui a conduit à leur exclusion de l'échantillon ;
- Enfin, dans l'approche envisagée, il est nécessaire de disposer de données relatives à la majorité des stockages artificiels du bassin versant. Les bassins pour lesquels moins de 20 % des stockages artificiels étaient disponibles ont été exclus.

Une fois les données de remplissage des retenues collectées, nous avons croisé les différentes chroniques afin de déterminer pour chaque bassin la période qui sera utilisée lors de la modélisation.

4.3. Situation géographique des bassins de l'échantillon

4.3.1. Bassins versants en France

La base de données est composée de 54 bassins versants (30 barrages-réservoirs) situés en France (Figure 4.3).

L'information pluviométrique est décrite par des données provenant de 341 pluviomètres. Des données de 25 stations climatiques ont également été collectées pour l'estimation de l'ETP.

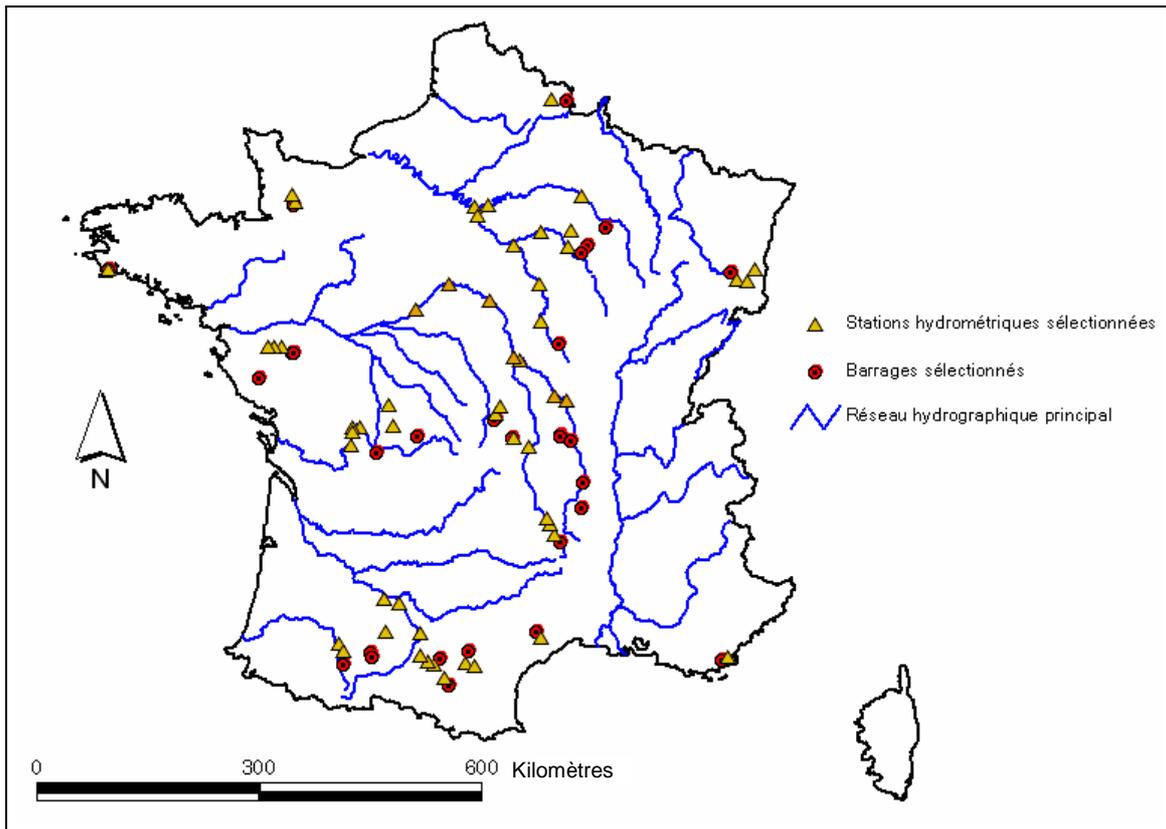


Figure 4.3 : Localisation des 54 stations hydrométriques et des 30 barrages en France

4.3.2. Bassins versants aux Etats-Unis

Aux Etats-Unis, 14 bassins versants (8 barrages-réservoirs) ont été retenus. Ils sont localisés à l'ouest et au sud du pays dans les Etats de l'Oklahoma (9 bassins), du Texas (1 bassin) et de Californie (4 bassins) (Figure 4.4).

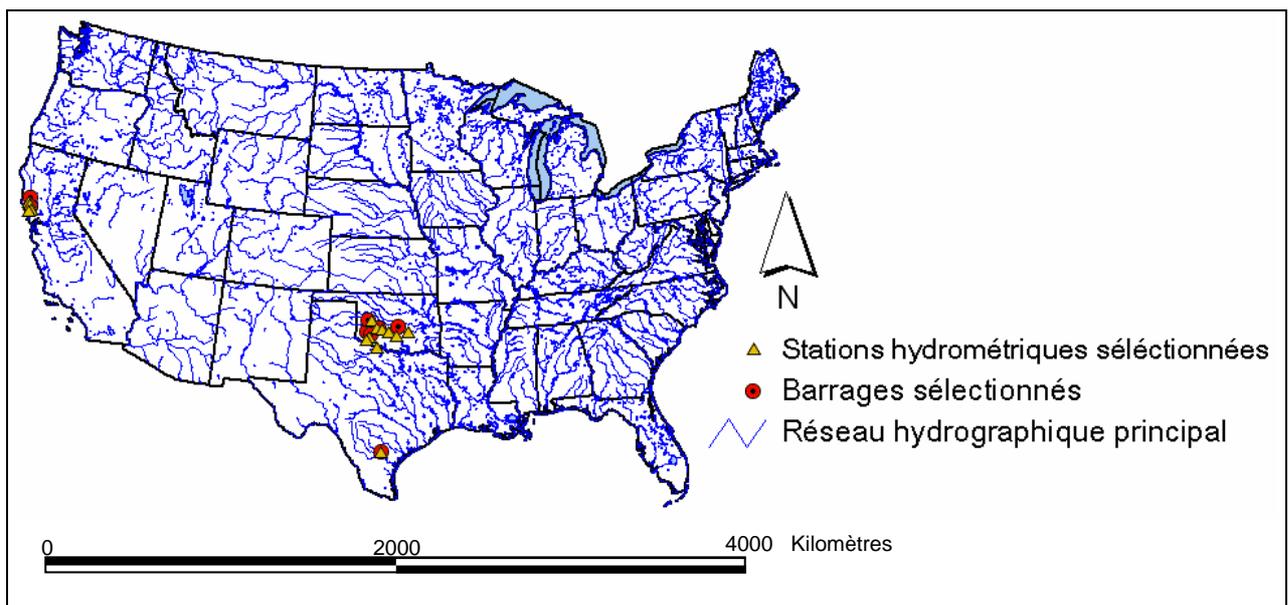


Figure 4.4 : Localisation des 14 stations hydrométriques et des 8 barrages aux Etats-Unis

Pour ces bassins, les données issues de 53 pluviomètres ainsi que des données de températures de 14 stations météorologiques ont été collectées.

4.3.3. Bassins versants au Brésil

Nous disposons de quatre bassins versants (barrage-réservoir de Três Marias) du fleuve São Francisco localisés dans l'Etat de Minas Gerais (Figure 4.5). Un ensemble conséquent de 339 pluviomètres a été constitué pour décrire l'information pluviométrique. Les données d'ETP proviennent de quatre stations climatiques.

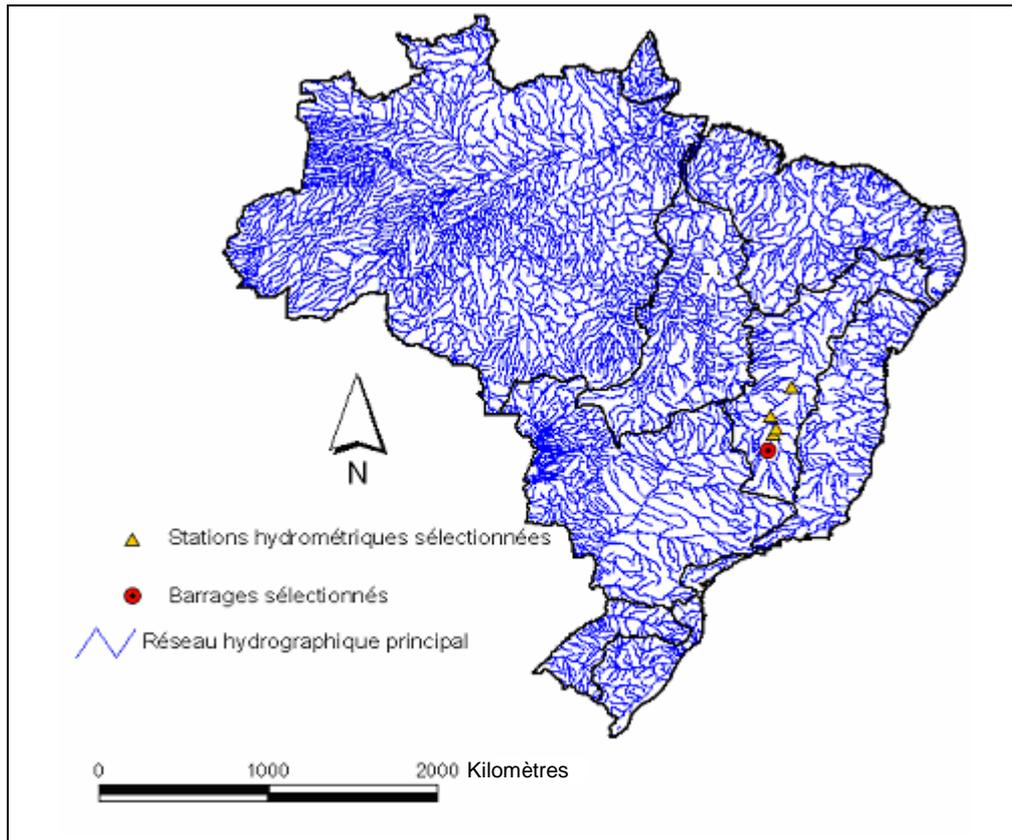


Figure 4.5 : Localisation des quatre stations hydrométriques et du barrage de Três Marias au Brésil

4.3.4. Bassins versants en Australie

En Australie, les trois bassins versants sélectionnés sont situés sur l'île de Tasmanie (Figure 4.6). Des données issues de trois barrages-réservoirs et de huit pluviomètres ont été collectées. L'ETP est calculée à partir d'une unique station météorologique.

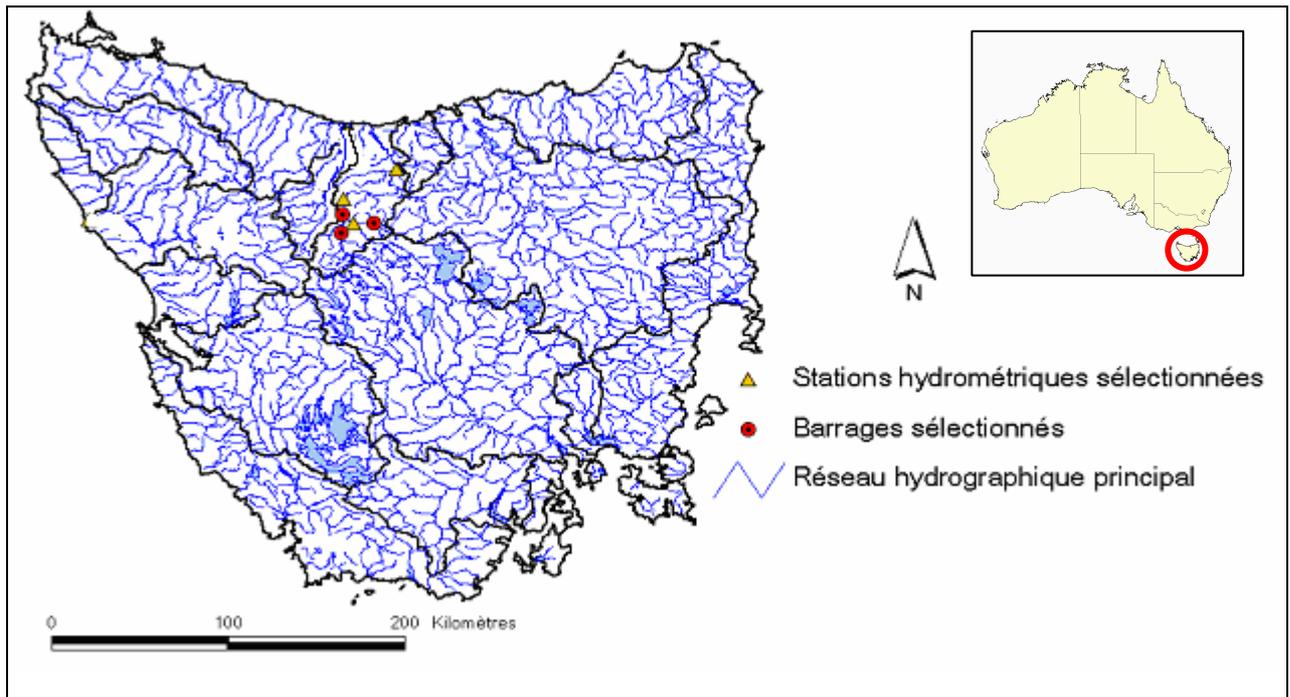


Figure 4.6 : Localisation des trois stations hydrométriques et des barrages-réservoirs en Australie

4.3.5. Bassins versants du fleuve Sénégal

Les données de deux stations hydrométriques situées sur la partie amont du fleuve Sénégal ont été collectées ainsi que les chroniques de volumes stockés dans le barrage-réservoir de Manantali (Figure 4.7). 54 postes pluviométriques et des données de températures (pour le calcul de l'ETP) ont été rassemblés.



Figure 4.7 : Localisation des deux stations hydrométriques et du barrage de Manantali (Mali) (d'après UNESCO, 2006)

4.4. Caractéristiques des bassins et des barrages sélectionnés

Les bassins versants composant la base de données couvrent un large éventail de situations hydro-climatiques. De même, les barrages sélectionnés balayent un large spectre d'objectifs de gestion et de capacités. Dans la suite de ce chapitre nous allons décrire les caractéristiques générales des bassins et des ouvrages retenus. La liste de l'ensemble des bassins versants et barrages-réservoirs sélectionnés est donnée en annexe 2.

4.4.1. Caractéristiques physiques des bassins versants

La taille des bassins versants de l'échantillon varie de 37,5 km² pour le plus petit (bassin de la rivière Fisher à l'amont du barrage-réservoir Parangana) à 218 000 km² (bassin du Sénégal à Bakel). La superficie médiane est de 1 410 km² et la moyenne est de 18 171 km². 10 % des bassins ont une superficie inférieure à 200 km² et 10 % une superficie supérieure à 40 000 km². La distribution des superficies des 77 bassins versants de l'échantillon ainsi que la superficie médiane par pays sont données en Figure 4.8.

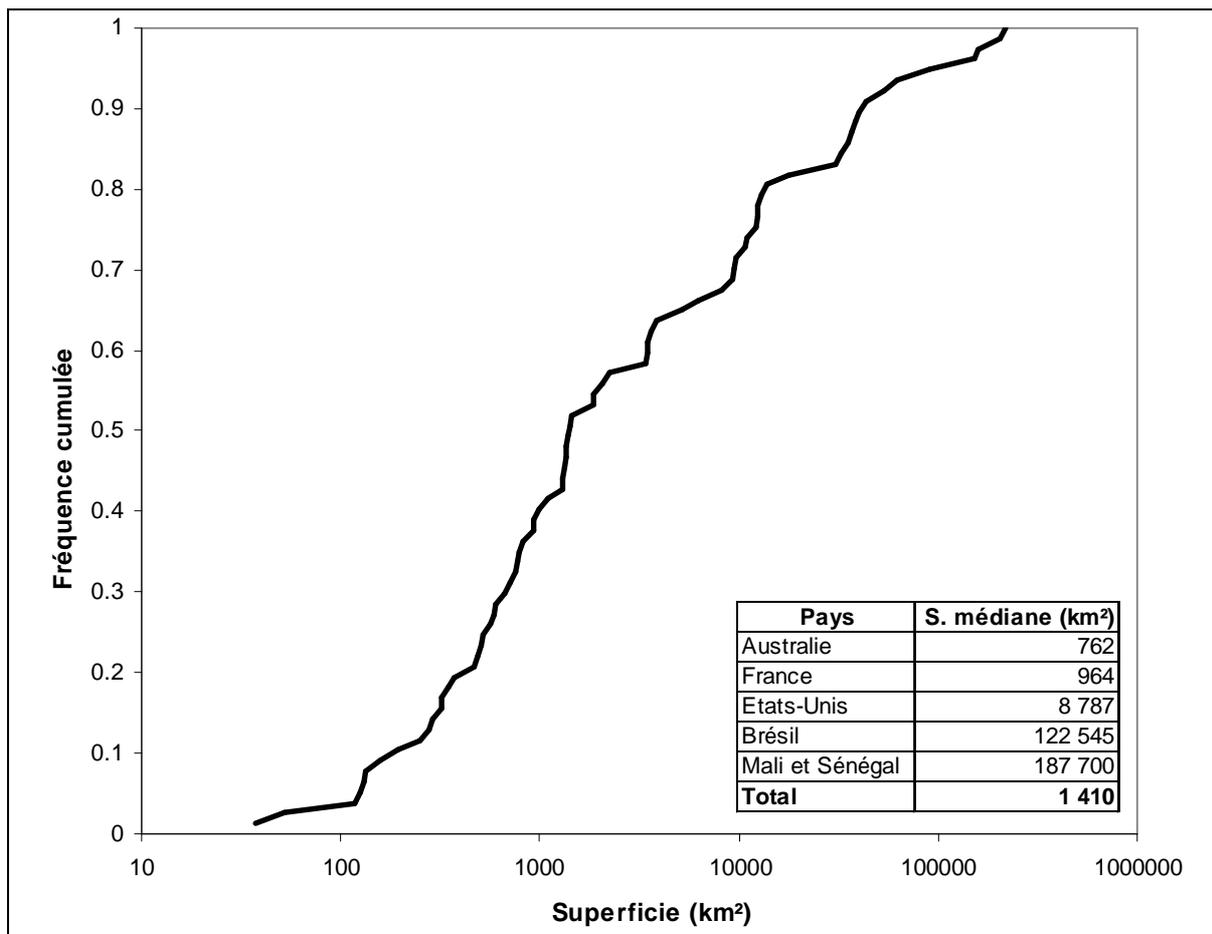


Figure 4.8 : Distribution des surfaces des bassins versants de l'échantillon

Il est à noter que les superficies des bassins versants situés au Brésil et ceux du fleuve Sénégal sont très étendues par rapport à celles des autres bassins de l'échantillon.

4.4.2. Caractéristiques hydro-climatiques

Les bassins de l'échantillon sont situés dans cinq zones climatiques différentes : zones de climat méditerranéen, continental, océanique, subtropical et tropical.

Le Tableau 4.1 synthétise les caractéristiques hydro-climatiques des bassins versants de la base de données. Afin de rendre compte du comportement hydrologique des bassins versants de la base de données, nous avons calculé leur rendement (rapport du débit moyen annuel et de la pluie moyenne annuelle) ainsi qu'un indice nommé indice d'aridité qui est le rapport de la pluie moyenne annuelle et de l'ETP moyenne annuelle.

	Australie	Brésil	Etats-Unis	France	Mali et Sénégal
Nombre de bassins	3	4	14	54	2
Précipitations moyennes annuelles (mm/an)	1874 - 1987	1255 - 1351	571 - 1089	565 - 1827	840 - 1026
Débits moyens annuels (mm/an)	585 - 1432	310 - 426	18 - 675	108 - 1054	67 - 69
ETP moyennes annuelles (mm/an)	532	983	870 - 1372	687 - 1225	1725
Rendement	0.33 - 0.72	0.25 - 0.32	0.03 - 0.62	0.16 - 0.9	0.07 - 0.08
Indice d'aridité	3.13 - 3.70	1.28 - 1.37	0.44 - 1.18	0.58 - 2.56	0.49 - 0.59

Tableau 4.1 : Caractéristiques hydro-climatiques des 77 bassins versants par pays – Valeurs minimales et maximales par pays

Le Tableau 4.1 montre la diversité climatique de l'échantillon de bassins versants collectés. Elle permet de garantir une certaine généralité aux résultats.

La Figure 4.9 représente le rendement en fonction de l'indice d'aridité. On note qu'il n'y a pas de bassins versants pour lesquels le rendement est supérieur à 1 ($Q > P$). Pour certains bassins de l'échantillon, $Q < P - E$. Ceci indique que ces bassins connaissent des pertes souterraines. Il peut également s'agir d'un problème d'estimation de la pluie ou du débit.

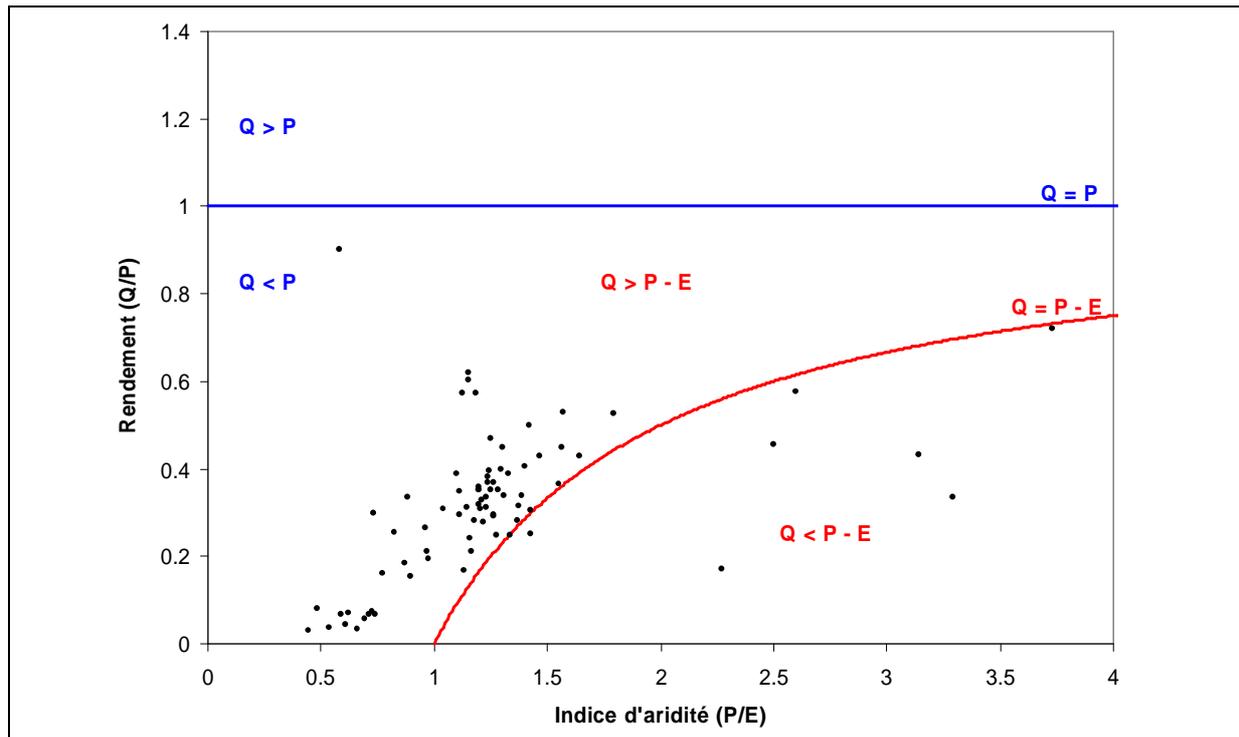


Figure 4.9 : Rendement en fonction de l'indice d'aridité pour les 77 bassins versants de l'échantillon

En complément des indices précédents, nous avons calculé deux coefficients permettant de caractériser l'irrégularité saisonnière des débits (IRRQ, Equation 4.2) et des pluies (IRRP, Equation 4.3). Ces coefficients sont inspirés des travaux de Tangara (1991) :

$$\text{IRRQ} = 100 \times \frac{Q_{\text{mx}} - Q_{\text{mn}}}{Q_{\text{m}}} \quad \text{Equation 4.2}$$

$$\text{IRRP} = 100 \times \frac{P_{\text{mx}} - P_{\text{mn}}}{P_{\text{m}}} \quad \text{Equation 4.3}$$

avec

- Q_{mx} (respectivement P_{mx}) le débit (respectivement la pluie) mensuel(le) moyen(ne) du mois qui présente le plus grand écoulement (respectivement le plus pluvieux)
- Q_{mn} (respectivement P_{mn}) le débit (respectivement la pluie) mensuel(le) moyen(ne) du mois qui présente le plus faible écoulement (respectivement le moins pluvieux)
- Q_{m} (respectivement P_{m}) le débit (respectivement la pluie) moyen(ne) mensuel(le)

Plus ces coefficients, exprimés en %, sont élevés, plus les régimes d'écoulement ou de pluie sont contrastés.

La Figure 4.10 et la Figure 4.11 donnent les valeurs de ces coefficients pour les bassins versants de l'échantillon.

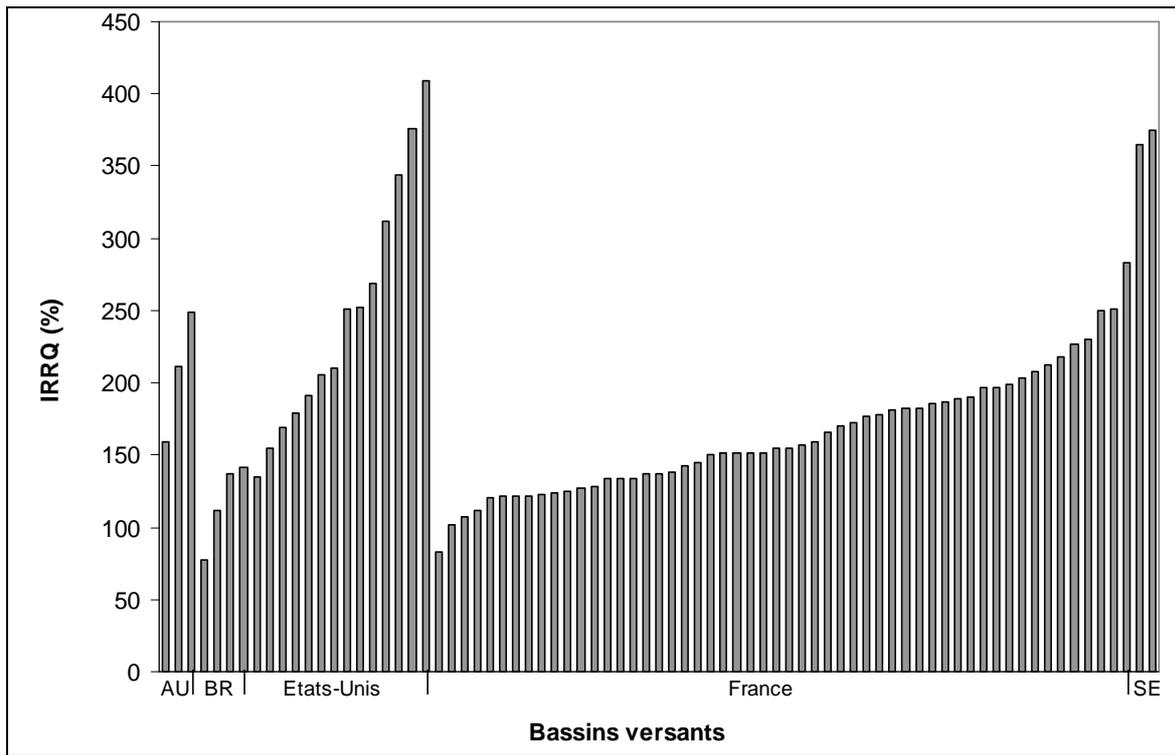


Figure 4.10 : Valeurs du coefficient d'irrégularité saisonnière des débits pour les bassins versants de l'échantillon (AU = Australie, BR = Brésil et SE = bassins du fleuve Sénégal)

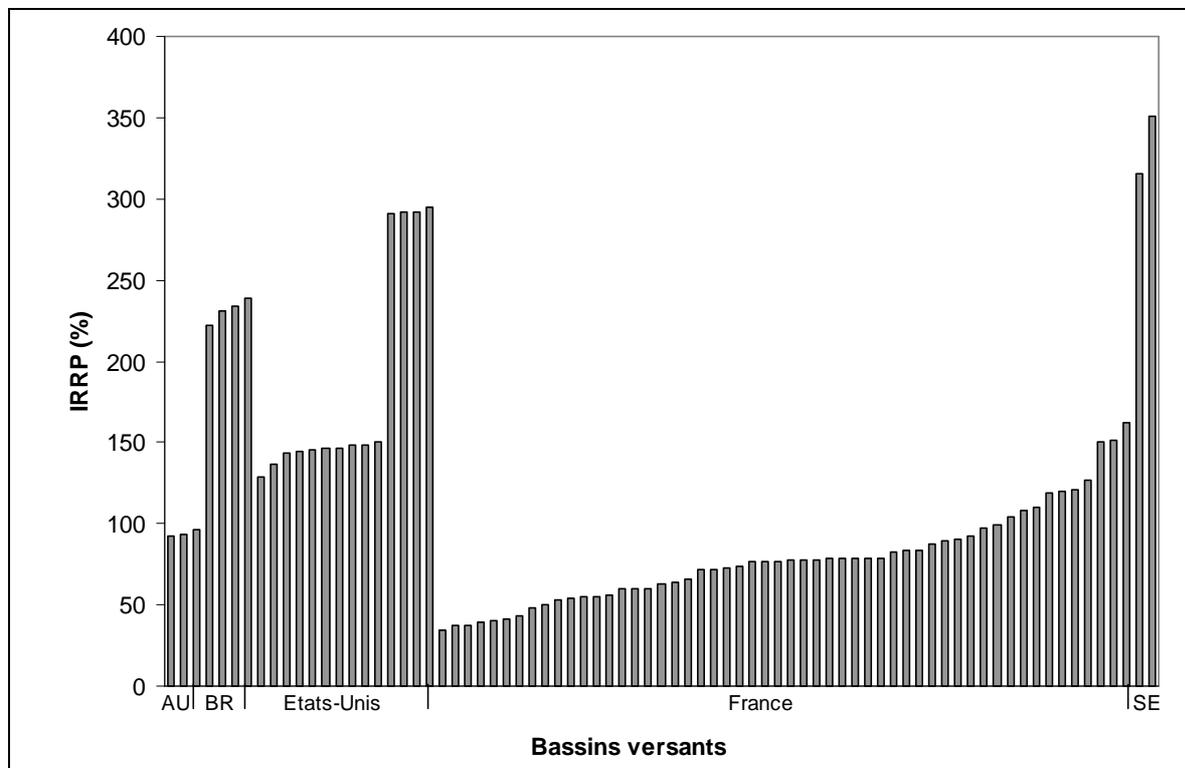


Figure 4.11 : Valeurs du coefficient d'irrégularité saisonnière des pluies pour les bassins versants de l'échantillon (AU = Australie, BR = Brésil et SE = bassins du fleuve Sénégal)

On constate que l'irrégularité saisonnière des pluies et des débits peut être très variable. Ceci confirma la grande diversité des conditions hydro-climatiques des bassins versants de la base de données.

4.4.3. Caractéristiques des retenues

Dans cette partie nous décrivons des principales caractéristiques des 43 barrages-réservoirs de la base de données.

4.4.3.1. Capacité

La Figure 4.12 représente les capacités normales des ouvrages de l'échantillon et le Tableau 4.2 donne le détail par pays.

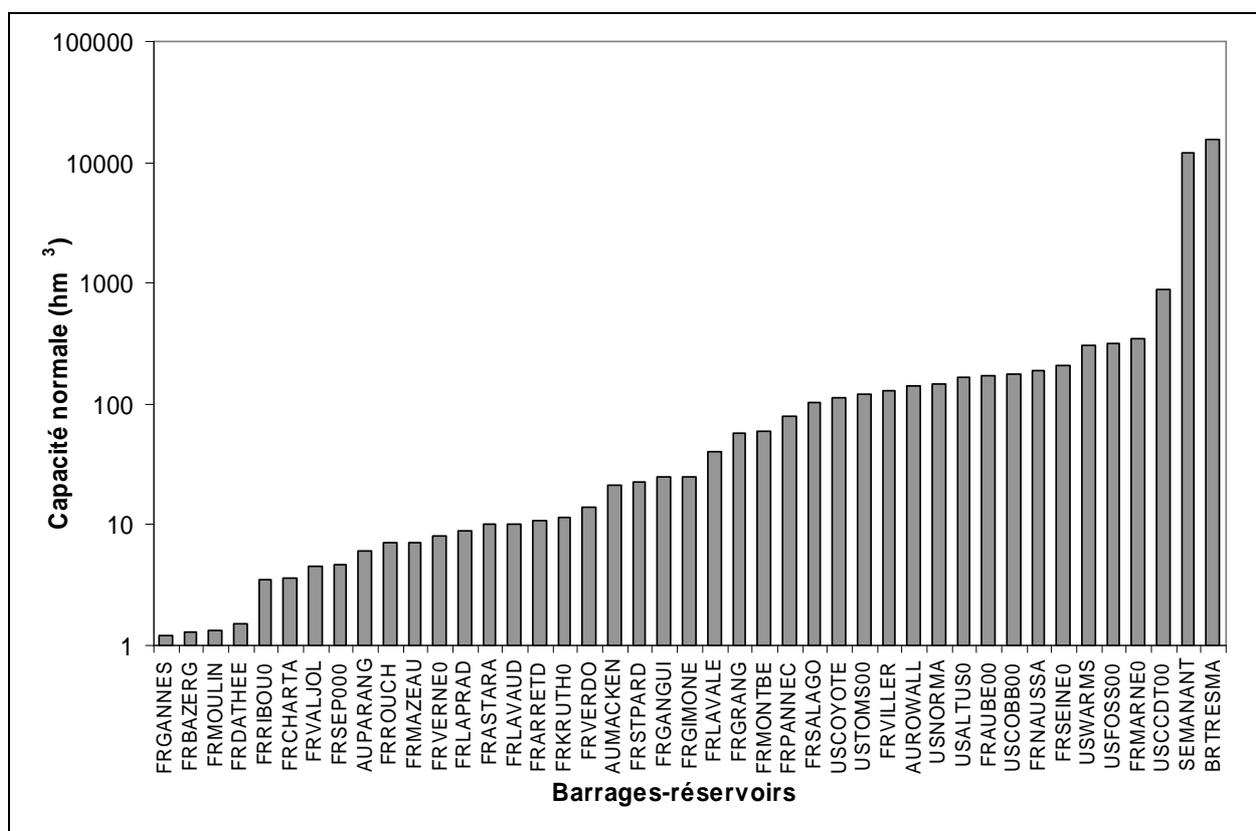


Figure 4.12 : Capacités normales des ouvrages de l'échantillon

	Australie	Brésil	Etats-Unis	France	Mali et Sénégal
Nombre de barrages	3	1	8	30	1
Capacité normale maximale (hm ³)	141	15 278	881	350	12 000
Capacité normale minimale (hm ³)	6	15 278	112	1	12 000
Capacité normale médiane (hm ³)	21	15 278	172	11	12 000

Tableau 4.2 : Capacités normales des barrages-réservoirs par pays

Les capacités normales des ouvrages varient de 1 hm³ (barrage des Gannes dans l'Allier) à 15 278 hm³ (barrage de Très Marias au Brésil). La médiane est d'environ 25 hm³. On remarque une différence importante des capacités des ouvrages situés en France, par rapport à celles des autres pays. En général, les ouvrages français de l'échantillon sont de taille moins importante que les autres ouvrages. En France seuls 20 % des ouvrages (six ouvrages) ont une capacité supérieure à 100 hm³. Cette différence est en partie liée à la manière dont les données ont été collectées. En France, il était plus aisé de travailler sur des ouvrages de taille plus modeste alors que pour les autres pays, nous nous sommes davantage concentrés sur des ouvrages de taille plus importante pour lesquels les données sont plus facilement disponibles.

La Figure 4.13 donne la répartition des bassins versants en fonction du nombre de barrages-réservoirs qu'ils comportent. On remarque que les bassins versants ayant un unique ouvrage constituent la majorité des cas (68 %).

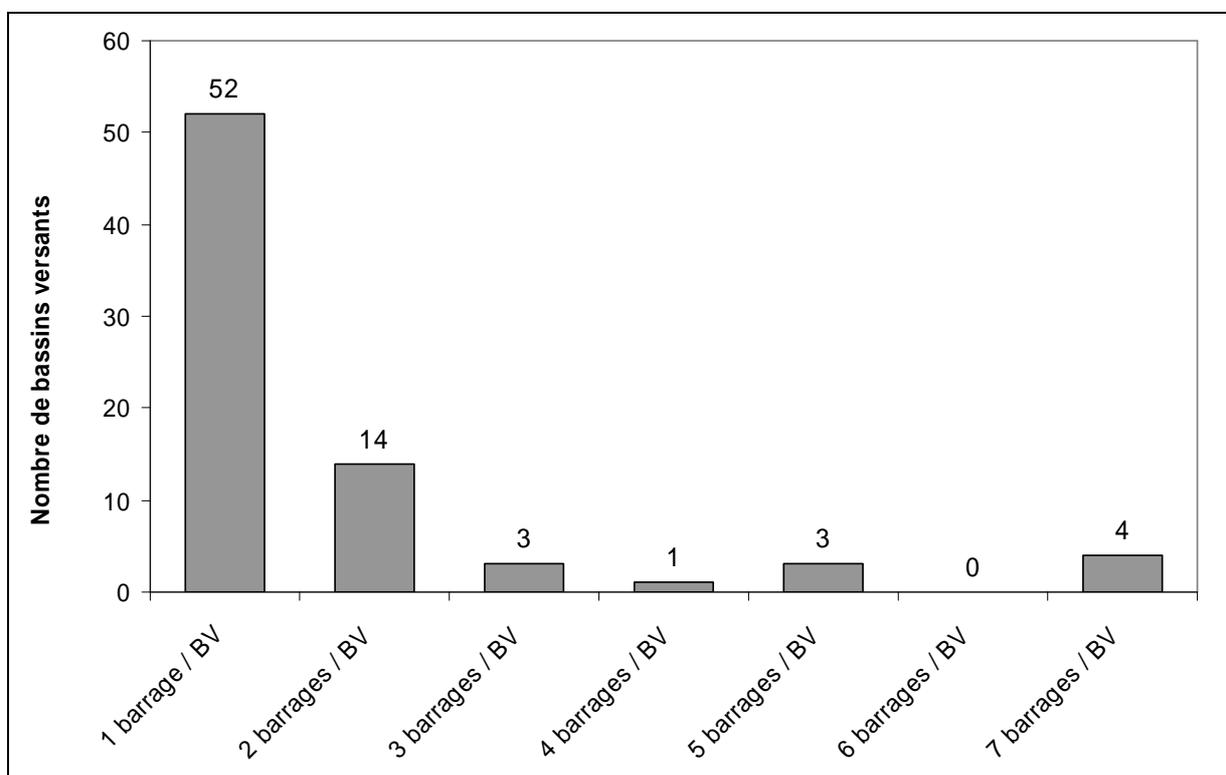


Figure 4.13 : Classement des bassins versants (BV) selon le nombre de barrages-réservoirs qu'ils comportent

4.4.3.2. Objectifs de gestion

En général, les ouvrages de la base de données sont multi-objectif, c'est-à-dire qu'ils sont gérés afin de répondre à plusieurs objectifs comme la régulation des débits (écrêtement des crues, soutien des étiages), l'alimentation en eau (eau potable, industrielle, irrigation), la production d'énergie (hydroélectricité, refroidissement de centrales), les loisirs, *etc.* La satisfaction conjointe de certains de ces objectifs pouvant se révéler délicate à cause de leur

caractère contradictoire, il y a souvent un classement des objectifs avec désignation d'objectifs prioritaires permettant de faciliter la gestion des retenues.

La Figure 4.14 représente la répartition des objectifs principaux des ouvrages de l'échantillon.

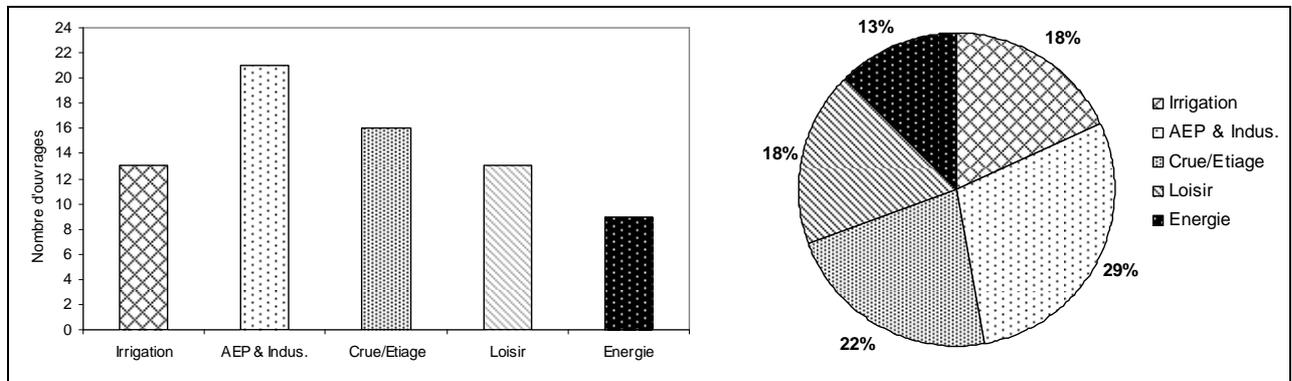


Figure 4.14 : Objectifs principaux des barrages-réservoirs de l'échantillon (un ouvrage peut être comptabilisé plusieurs fois s'il est multi-objectif)

Les cinq types d'objectifs sont représentés dans des proportions proches.

4.4.3.3. Localisation et importance des ouvrages sur les bassins versants

Les caractéristiques présentées précédemment sont spécifiques aux ouvrages, elles ne rendent pas compte de l'implantation ainsi que de l'importance des ouvrages par rapport aux autres grandeurs hydrométéorologiques (pluie et débit). Une telle description est importante car l'impact hydrologique des ouvrages dépend en partie de leur importance et de leur implantation sur le bassin. Ainsi par exemple, en général, plus le bassin s'agrandit, moins l'influence d'un ouvrage sur le débit sera marquée (Morin *et al.*, 1975 ; Peters et Prowse, 2001). De même, plus un ouvrage sera important en termes de quantité d'eau stockée par rapport aux quantités précipitées ou écoulées, plus son influence hydrologique sera forte.

Nous présentons, dans ce paragraphe, quatre descripteurs synthétisant les grandeurs précédentes. Les descripteurs calculés sont adimensionnels, ce qui permet une comparaison entre bassins versants.

Distance barrage/exutoire

Afin de rendre compte de l'implantation du ou des ouvrages sur le bassin versant, nous avons défini un indice, noté i_1 (Equation 4.4). Il caractérise l'éloignement du ou des ouvrage(s) à l'exutoire du bassin versant :

$$i1 = 1 - \frac{\sum_j dh_j \cdot Vol_j}{L \cdot \sum_j Vol_j} \quad \text{Equation 4.4}$$

avec

- j le nombre de barrages présents sur le bassin
- dh_j la distance hydraulique entre le barrage et l'exutoire du bassin (*i.e.* la distance séparant le barrage de l'exutoire en suivant le cours d'eau) ;
- Vol_j le volume maximal du barrage j ;
- L le plus long parcours hydraulique du bassin (*i.e.* la longueur du plus long cours d'eau présent sur le bassin versant).

Par définition $i1$ est compris dans l'intervalle [0 ; 1]. Plus $i1$ est proche de 0, plus l'ouvrage est éloigné de l'exutoire et plus $i1$ est proche de 1, plus l'ouvrage est proche de l'exutoire. Dans le cas de plusieurs ouvrages, la distance hydraulique est pondérée par les volumes des ouvrages.

Importance des stockages par rapport à l'écoulement

Nous avons défini un indice complémentaire, noté $i2$ (Equation 4.5), qui reflète l'importance des quantités d'eau pouvant être stockées au maximum par rapport à la quantité d'eau écoulée :

$$i2 = \frac{\text{LameExploitéeMaximale}}{\text{LameEcoulee}} \quad \text{Equation 4.5}$$

avec

- $\text{LameExploitéeMaximale} = \frac{V_{\text{Max}} - V_{\text{Min}}}{S_{\text{BV}}}$, V_{Max} et V_{Min} étant respectivement le volume total maximal et minimal enregistré sur la période simulée et S_{BV} , la superficie totale du bassin versant
- $\text{LameEcoulee} = \frac{\text{Module}}{S_{\text{BV}}}$

Plus l'indice $i2$ est élevé, plus la lame exploitée maximale est importante par rapport à la lame écoulee.

Importance de la surface contrôlée par rapport à la surface totale du bassin

L'indice $i3$ (Equation 4.6) rend compte de l'importance de la surface du bassin versant contrôlé par le ou les barrages-réservoirs par rapport à la surface totale du bassin :

$$i3 = \frac{S_C}{S_{BV}} \quad \text{Equation 4.6}$$

Avec

- S_C la superficie du bassin versant contrôlé par l'ouvrage.

Dans le cas où plusieurs ouvrages seraient présents sur le bassin, les superficies sont pondérées par les volumes des ouvrages. $i3$ est alors formulé de la manière suivante :

$$i3 = \frac{\sum_j S_{C,j} \cdot V_j}{S_{BV} \cdot \sum_j V_j}$$

$i3$ est calculé de manière à éviter de compter deux fois une même surface selon la configuration des ouvrages sur le bassin (cas des ouvrages en série).

Plus l'indice $i3$ est élevé, plus la surface contrôlée est importante par rapport à la surface totale du bassin.

Variabilité des chroniques de volumes

Les objectifs de gestion influencent la variabilité des stocks d'eau. En règle générale, les ouvrages destinés à l'alimentation en eau ou aux loisirs auront un niveau peu variable alors que pour des ouvrages de régulation des débits, les niveaux sont maintenus le plus bas possible en période de hautes eaux en prévision de crues et relevés à la fin de cette période pour le soutien d'étiage. La variation des niveaux dans les retenues hydroélectriques est en partie conditionnée par les besoins de consommation des abonnés.

Un indice ($i4$, Equation 4.7) caractérisant la variabilité des stocks d'eau à l'échelle du bassin versant, a été calculé pour chaque bassin versant de la base de données :

$$i4 = \frac{\frac{365}{N} \sum_{i=1}^N |V_i - V_{i-1}|}{V_{Max} - V_{Min}} \quad \text{Equation 4.7}$$

avec

- N le nombre de jours de la période simulée
- V_i le volume stocké dans la (ou les) retenue(s) au jour i
- V_{i-1} le volume stocké dans la (ou les) retenue(s) au jour $i-1$
- V_{Max} le volume maximum enregistré sur la période simulée
- V_{Min} le volume minimum enregistré sur la période simulée

Dans le cas de plusieurs ouvrages, i_4 est calculé avec le volume total stocké dans l'ensemble des retenues.

Plus l'indice i_4 est élevé, plus la chronique de volume est variable dans le temps.

Remarque : ces indices ont été formulés afin qu'ils varient dans le même sens, c'est-à-dire que, plus ils sont petits, moins le bassin versant est influencé par le barrage-réservoir et plus ils sont grands, plus l'influence du barrage-réservoir est importante. Ceci permet de faciliter l'interprétation des résultats.

Les distributions des quatre indices présentés sont données en Figure 4.15.

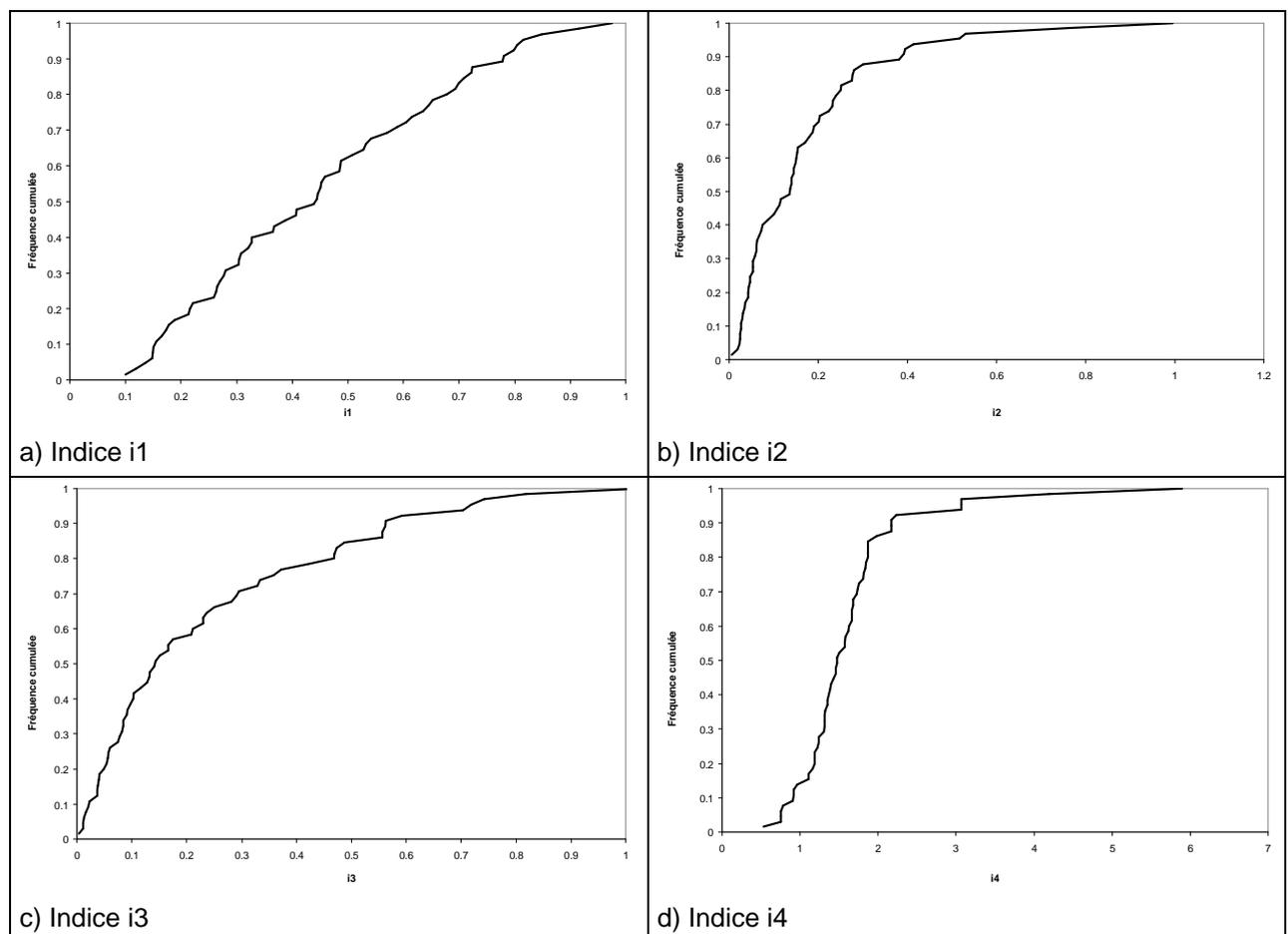


Figure 4.15 : Distributions des indices descripteurs de la localisation et de l'importance des barrages-réservoirs sur le bassin versant

4.4.4. Devenir de l'eau stockée dans les retenues

Selon les objectifs assignés aux ouvrages, l'origine et le devenir de l'eau stockée dans les retenues peuvent être différents. La Figure 4.16 illustre les différents cas de transfert qui peuvent être rencontrés.

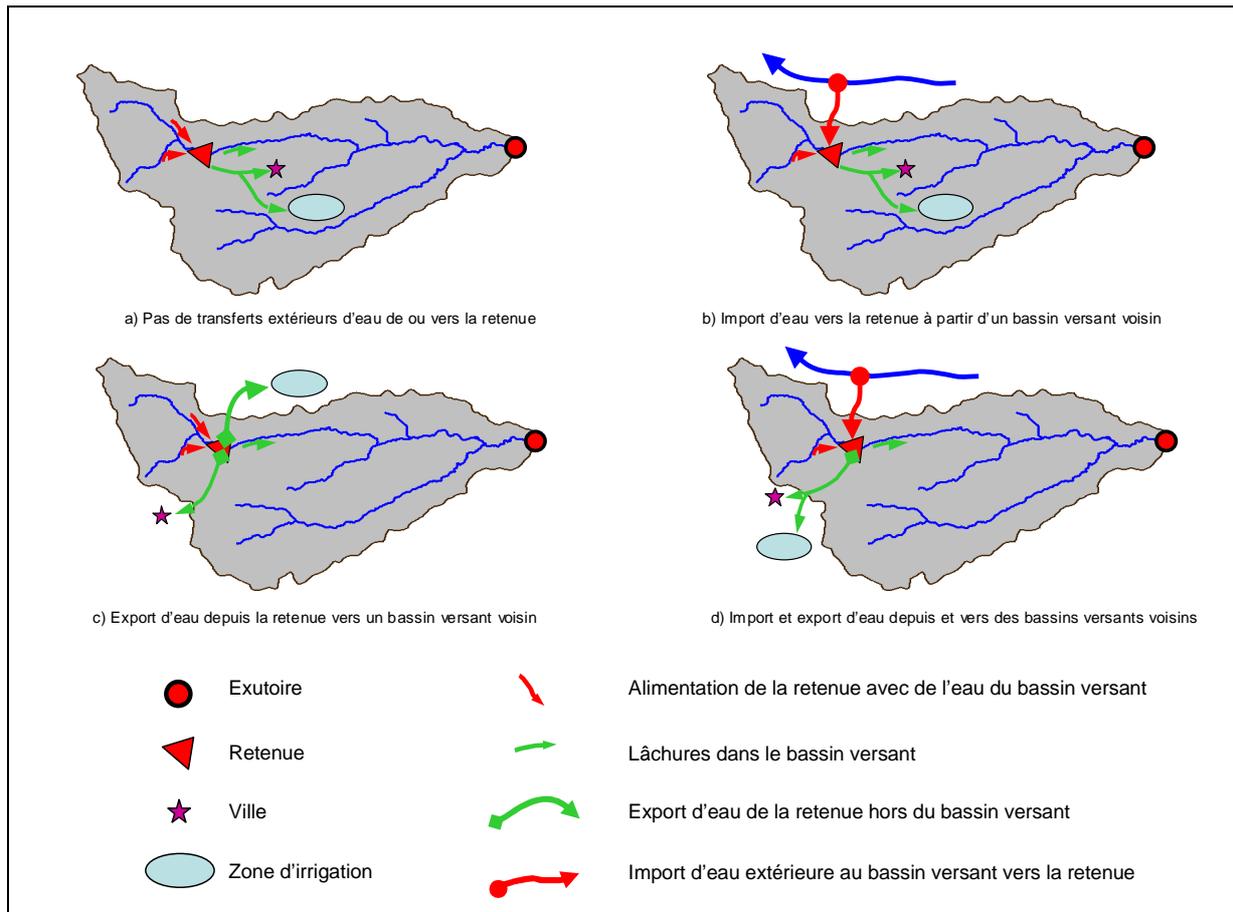


Figure 4.16 : Devenir de l'eau stockée dans une retenue

Les quatre cas présentés sont des exemples simples de transfert. Dans la réalité, les situations peuvent être des combinaisons de ces cas typiques.

Sur la Figure 4.16a, toute l'eau qui approvisionne la retenue est issue du bassin. Elle provient du bassin propre du barrage (bassin contrôlé). Dans l'exemple, la retenue est utilisée pour alimenter en eau un ville ainsi qu'un périmètre irrigué tous deux situés à l'aval de l'ouvrage. Les transferts d'eau qui ont alors lieu restent internes au bassin.

Dans le cas b), une partie de l'eau stockée dans la retenue provient d'un bassin versant voisin. Ici, le système n'est plus "fermé" car l'origine d'une partie de l'eau sur le bassin n'est plus la pluie qu'il a reçue mais une quantité d'eau importée. Le bilan en eau naturel se trouve alors faussé.

Dans le cas c), le système est également "ouvert". En revanche, une partie de l'eau stockée dans la retenue est exportée vers une ville et une zone irriguée situées à l'extérieur du bassin versant. Dans ce cas, le bilan en eau est également faussé puisqu'une partie de la pluie reçue par le bassin est exportée artificiellement vers un bassin voisin et n'est pas transformée en débit.

Le dernier cas (d) associe à la fois un import d'eau afin d'alimenter la retenue et un export vers une ville et une zone irriguée située à l'extérieur du bassin. Le système est également "ouvert" pour les mêmes raisons que dans les deux cas précédents.

Dans la démarche adoptée, il est important que les bassins versants retenus soient dans la mesure du possible des systèmes "fermés" c'est-à-dire sans transferts depuis le bassin considéré vers un bassin voisin et inversement. Nous avons donc été amenés à recenser, pour chaque bassin de l'échantillon, ces transferts ainsi que leur importance par rapport aux autres quantités d'eau mises en jeu. Durant cette analyse, qui a été longue et réalisée au cas par cas, nous avons consulté diverses sources d'informations afin de recenser les transferts pouvant avoir lieu sur un bassin versant. Nous avons une idée plus précise du devenir de l'eau issue des retenues de la base de données.

Sur environ 54 % des bassins versants de l'échantillon, des transferts inter-bassins liés à l'eau stockée dans les retenues ont lieu. Il s'agit pour la majorité des bassins concernés, d'export d'eau des retenues vers des villes ou des zones d'irrigation situées sur des bassins voisins. Il faut cependant noter que ces transferts ne sont pas tous de la même importance. Pour certains bassins, ils sont faibles par rapport aux autres quantités d'eau mises en jeu.

L'exploration détaillée des bassins versants de la base en vue de décrire les éventuels transferts inter-bassins qui ont lieu a également permis de préciser d'autres informations importantes sur les bassins et les retenues. Ainsi, nous avons précisé la présence d'autres stockages artificiels d'eau présents sur les bassins. L'information ainsi collectée a permis de compléter celle issue du repérage des ouvrages lors de l'étape initiale de constitution de la base de données.

Afin d'éviter les problèmes liés aux transferts importants et à la présence de retenues pour lesquelles nous ne disposons pas de données de gestion, nous avons classé l'ensemble des bassins versants de la base de données selon l'importance de ces transferts et du degré de connaissance des variations de stocks. L'idée est de disposer d'un sous-échantillon de bassins versants (échantillon de référence) n'ayant pas ou peu de transferts avec l'extérieur du bassin et pour lesquels nous disposons de données de gestion pour la majorité des retenues présentes. Il servira de base pour la recherche d'un moyen performant d'intégrer les retenues d'eau dans un modèle pluie-débit global. La totalité de l'échantillon sera tout de même utilisée pour tester la version proposée du modèle prenant en compte les ouvrages dans des situations délicates mais réelles (cf. chapitre 8). Le Tableau 4.3 récapitule le nombre de bassins versants et de barrages-réservoirs pour chaque échantillon.

	Pays	Nombre de bassins	Nombre de barrages
Echantillon total	Australie	3	3
	Brésil	4	1
	Etats-Unis	14	8
	France	54	30
	Mali & Sénégal	2	1
	Total	77	43
Echantillon de référence	Brésil	4	1
	Etats-Unis	3	3
	France	39	22
	Total	46	26
Echantillon complémentaire	Australie	3	3
	Etats-Unis	11	5
	France	15	8
	Mali & Sénégal	2	1
	Total	31	17

Tableau 4.3 : Répartition du nombre de bassins versants et de barrages-réservoirs entre l'échantillon de référence et l'échantillon complémentaire

L'échantillon de référence est constitué de 46 bassins versants bien connus (regroupant 26 ouvrages). C'est donc sur ce sous-échantillon que va s'appuyer la recherche d'un moyen fiable de prise en compte des retenues d'eau dans un modèle pluie-débit global.

4.5. Analyse des chroniques de données

Dans la dernière partie de ce chapitre, nous nous intéressons plus spécifiquement aux chroniques de données et à leur qualité. L'objectif est double : évaluer la qualité des données utilisées et les préparer en vue de la modélisation. Le repérage d'éventuels problèmes de qualité de données est très utile dans la critique et l'analyse des résultats de la modélisation. L'analyse des chroniques de volumes en particulier, est importante dans notre recherche car il s'agit de données peu utilisées en modélisation hydrologique et dont les sources sont très hétérogènes.

4.5.1. Sources d'erreur

La qualité des données dépend de plusieurs facteurs d'ordre métrologique, de traitement ou méthodologique.

La mesure de la pluie est délicate à cause de plusieurs éléments venant la perturber. On peut citer par exemple les problèmes de captation (influence du vent, de l'implantation du pluviomètre...) qui dans certains cas influencent fortement la mesure. L'estimation de l'ETP, dans la mesure où elle est calculée à partir d'un modèle, est également entachée d'erreur mais son importance est moindre sur les résultats du modèle (Oudin, 2004). Les débits ne sont également pas mesurés directement. Ils sont déduits de la mesure des hauteurs d'eau

en utilisant la courbe de tarage. Ainsi, le processus d'estimation des débits est ouvert à diverses sources d'incertitudes. On peut citer par exemple des problèmes liés à la précision de la mesure des hauteurs d'eau (mesure des valeurs extrêmes difficile ou absentes) et à la courbe de tarage (stationnarité des sections de référence, problème de jaugeage des événements extrêmes).

Les volumes stockés dans les retenues sont également déduits de la mesure des niveaux d'eau des retenues en utilisant une courbe hauteur-volume. Pour ces données, les principales sources d'erreurs sont liées à l'imprécision de la mesure des hauteurs d'eau (influence du vent à la surface des retenues par exemple) et la mauvaise représentativité spatiale de la cote mesurée (Rémy Garçon, communication personnelle). Pour une retenue de taille importante, une erreur de quelques centimètres dans la mesure de la cote peut entraîner une mauvaise évaluation importante du volume stocké. La mesure du volume dépend également de la précision de la courbe hauteur-volume. Cependant, comme on s'intéresse aux variations journalières des volumes stockés, ce type d'erreur n'intervient pas.

4.5.2. Démarche d'analyse des données

La qualité des données peut avoir une influence importante sur les sorties du modèle, il est donc utile de l'évaluer. Cependant, la taille de l'échantillon n'est pas compatible avec une analyse détaillée des chroniques de données car cela suppose de connaître systématiquement les conditions de mesure de l'ensemble des données de la base sur des périodes parfois longues. La démarche d'évaluation de la qualité des données adoptée dans ce travail permet d'avoir une bonne idée de la forme des chroniques tout en étant adaptée au nombre de bassins de l'échantillon. En effet, nous avons choisi d'évaluer visuellement les chroniques de données. Pour chaque bassin de la base, nous avons tracé les chroniques de pluies, de débits et volumes (la Figure 4.17 en est un exemple).

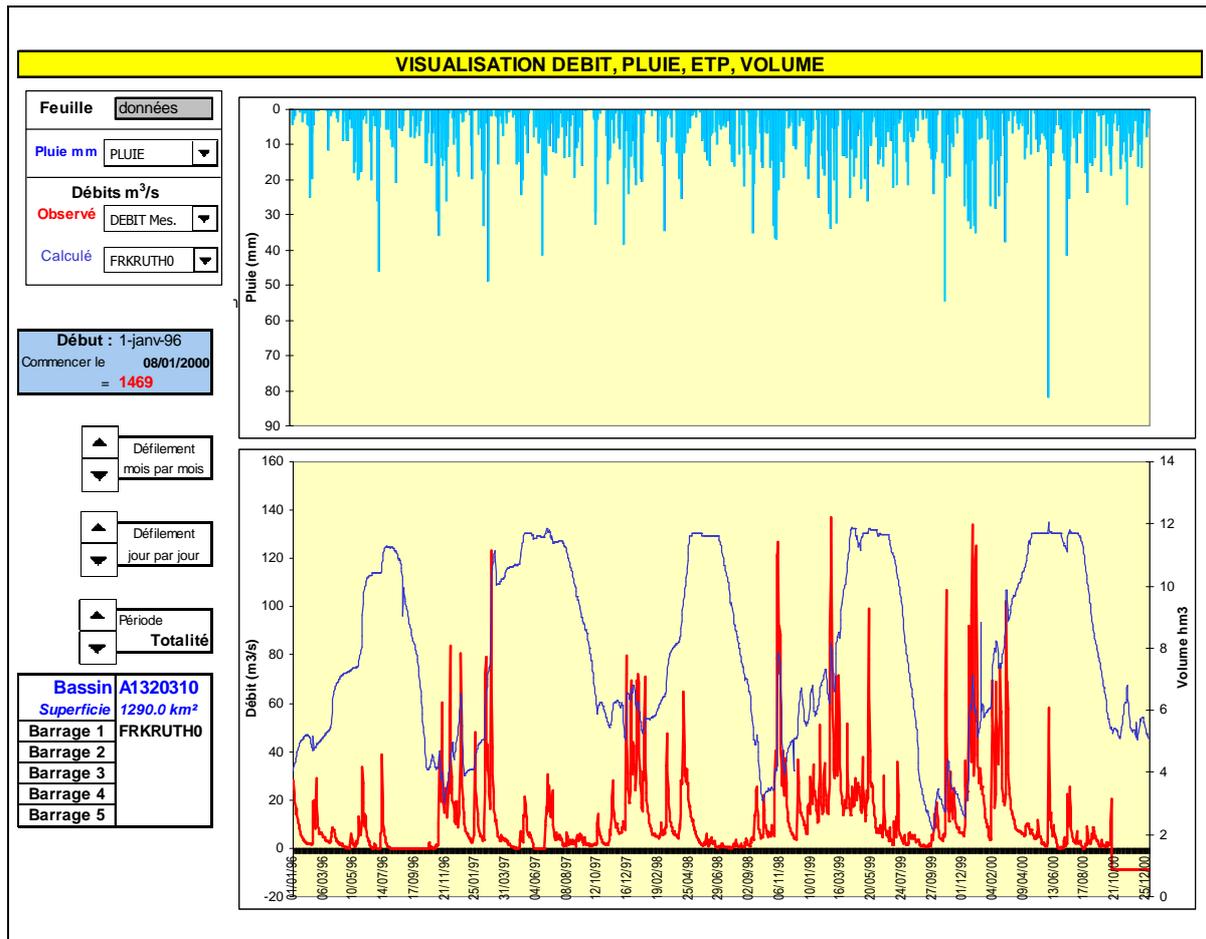


Figure 4.17 : Exemple de graphique utilisé dans la démarche d'évaluation de la qualité des données (bassin versant de l'III à Oberhergheim – 01/01/1996 – 31/12/2000)

L'analyse visuelle conjointe de ces données permet de repérer des données ou des périodes litigieuses (évolution subite et importante du volume sur une période courte, débits constants en étiage, écrêtement plat des crues, évolution linéaire des débits entre deux dates...). L'objectif est d'identifier les bassins pour lesquels certaines périodes de données sont douteuses.

La démarche d'analyse de données adoptée présente des limites. Elle est subjective car elle repose sur le jugement de l'observateur qui doit intégrer en même temps l'information de pluie, de débit et l'évolution des stocks dans les retenues. Si le repérage de problèmes flagrants dans les données peut s'avérer facile, il n'en est pas de même pour des problèmes plus insidieux. De plus, l'analyse visuelle est peu adaptée aux données de pluie dont les évolutions sont chaotiques. Les données de pluie ont servi uniquement comme aide pour détecter des problèmes dans les données de débit et de volume. Ainsi, l'analyse réalisée a porté principalement sur les chroniques de débit et de volumes.

4.5.3. Traitement des données litigieuses

Une fois les données douteuses repérées, quelle attitude adopter face à elles ? Faut-il les corriger, ne pas en tenir compte (*i.e.* les signaler comme des lacunes) ou bien les garder telles quelles ? L'attitude que nous avons adoptée dépend du type de données.

4.5.3.1. Cas de débits douteux

Les débits douteux ont été signalés comme lacunes. Souvent les données de débit sont accompagnées d'un code qualité qui renseigne sur la validité de la mesure. Lorsque ce code existe, nous l'avons pris en compte dans l'analyse de la qualité des données en remplaçant les données signalées comme douteuses par des lacunes. Dans le cas où ce code serait absent, une donnée paraissant douteuse sans ambiguïté a également été remplacée par une lacune. Les lacunes dans les chroniques de débit ne sont pas gênantes pour le fonctionnement du modèle.

4.5.3.2. Cas des volumes douteux

Le cas de données douteuses dans les chroniques de volumes a été traité différemment. En effet, les volumes journaliers d'eau stockés dans les réservoirs sont des entrées du modèle. La présence de lacunes est alors problématique, les états du modèle ne pouvant pas être calculés au pas de temps correspondant à des lacunes. Nous avons choisi d'écarter les années comportant des lacunes importantes (plus de sept jours consécutifs). Cependant, afin de ne pas "perdre" trop de chroniques de volumes difficiles à collecter, nous avons décidé de combler certaines lacunes épisodiques et de corriger des données dont nous sommes certains qu'elles sont erronées. Dans des cas litigieux, les données n'ont pas été changées.

Les variations journalières de volumes n'étant en général pas subites mais assez lisses dans le temps pour des ouvrages assez grands tels que ceux de notre base, nous avons choisi de remplacer les valeurs manquantes ou de les modifier par des interpolations linéaires.

4.5.4. Préparation des données en vue de la modélisation

En vue de préparer la modélisation, nous avons dans un premier temps homogénéisé les différentes chroniques venant de sources différentes. Cela a consisté à convertir les données collectées dans une unité commune et ensuite à formater les fichiers de la même façon. Les pluies et les ETP ont toutes été converties en mm, les débits en m³/s, les volumes en hm³ (million de m³) et les surfaces en km².

Comme nous avons recours à une procédure de type calage-contrôle sur des sous-périodes indépendantes, cela a nécessité de découper les chroniques en sous-périodes pour chaque bassin. La Figure 4.18 donne la durée totale de la chronique pour chaque bassin versant de la base.

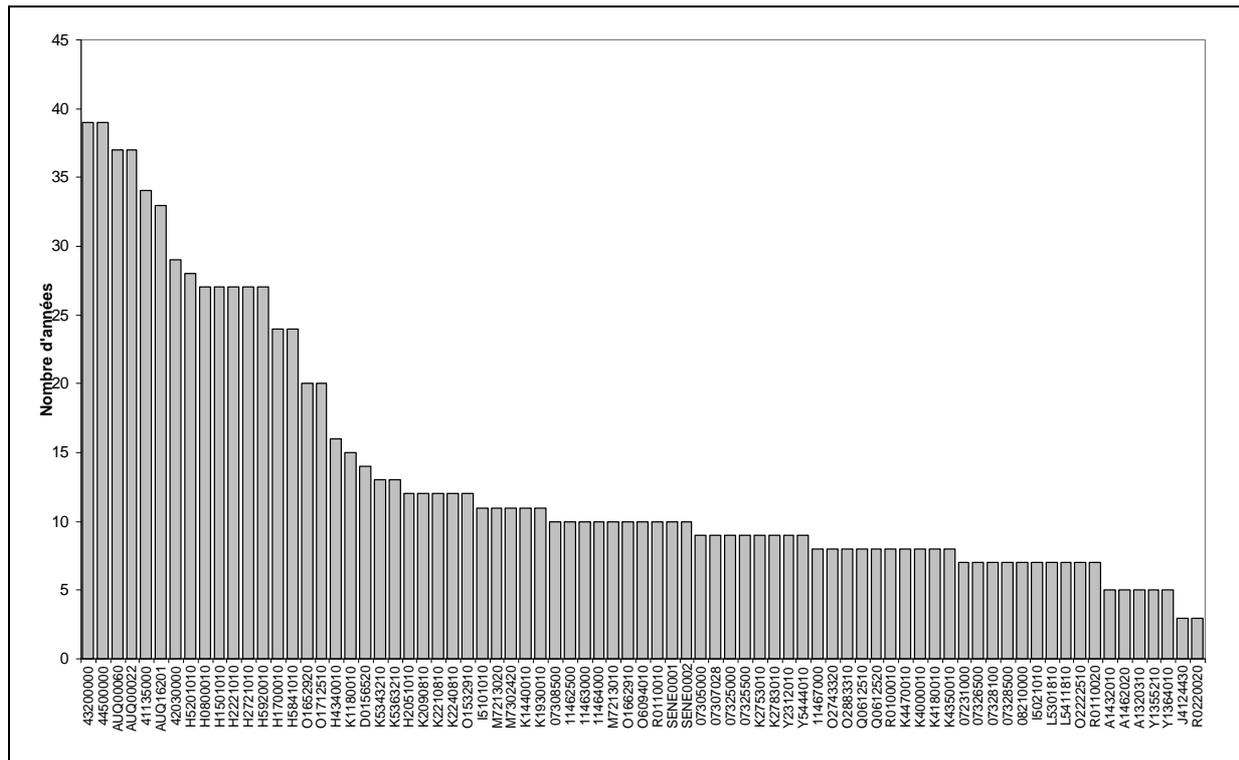


Figure 4.18 : Durée des chroniques de l'échantillon total

Nous avons découpé les chroniques en deux sous-périodes qui vont alternativement servir au calage et contrôle du modèle (chapitre 3). La durée moyenne des sous-périodes est de 7 ans, la plus courte de 2 ans et la plus longue de 20 ans. Comme cela a été expliqué au chapitre 3, une année est réservée à la mise en route du modèle.

4.6. Synthèse

Ce chapitre nous a permis de présenter la démarche de constitution de la base de données ainsi que les bassins versants qui la composent.

L'échantillon de 77 bassins versants sélectionnés représente une diversité de conditions hydro-climatiques qui permettra de tirer des conclusions peu dépendantes de caractéristiques particulières de tel ou tel bassin versant.

Un sous-échantillon de référence composé de 46 bassins versants avec peu de transferts et pour lesquels nous disposons de la majorité des stockages servira comme base au développement d'une solution performante de prise en compte des barrages-réservoirs.

Les bassins versants et les barrages-réservoirs sélectionnés ont été répertoriés dans une base de données facilitant l'archivage ainsi que la consultation de diverses informations concernant les bassins versants et les ouvrages. Des exemples de fiches signalétiques issues de cette base sont présentés en annexe 3.

Chapitre 5

Chapitre 5.

Recherche d'une solution performante de prise en compte des barrages-réservoirs

5.1. Introduction

Nous avons présenté dans la première partie de ce mémoire la méthode, les outils ainsi que les données utilisés dans la recherche d'un moyen de prise en compte des barrages-réservoirs en modélisation pluie-débit globale. Dans ce chapitre, nous détaillons l'ensemble des solutions testées et leurs résultats sur notre base de données.

Comme nous l'avons évoqué au chapitre 3, la prise en compte des barrages-réservoirs dans le modèle GR4J consiste à considérer de nouvelles entrées observées, ce qui peut être représenté par l'ajout d'un nouveau réservoir non modélisé (le réservoir image) à la structure initiale du modèle. Se pose alors la question de savoir comment "connecter" ce réservoir dans la structure initiale, c'est-à-dire déterminer les meilleurs points d'alimentation et de rejet du réservoir image.

Dans ce chapitre, nous détaillons les résultats des différents tests d'insertion du réservoir image dans la structure initiale du modèle. L'analyse de ces résultats vise à répondre aux questions suivantes :

- Comment un barrage-réservoir va-t-il modifier notre vision des bassins versants naturels ? Quelles seront les conséquences sur les composantes du modèle (fonction de production et fonction de transfert) ?
- La prise en compte des barrages-réservoirs nécessitera-t-elle d'introduire des composantes spécifiques dans la structure du modèle ou peut-on tirer profit des fonctions de simulation du bassin versant "naturel" déjà présentes dans le modèle initial ?

Rappelons que la pertinence des différentes solutions testées sera jugée sur la base de leurs performances moyennes sur l'échantillon de bassins versants de référence.

5.2. Un point d'alimentation et un point de rejet (1A1R)

5.2.1. Présentation des solutions testées

Dans la suite, on désigne par "solution" un couple formé d'un point d'alimentation et d'un point de rejet du réservoir image.

5.2.1.1. Notations

La première série de tests regroupe des solutions pour lesquelles le prélèvement d'eau pour alimenter le réservoir image est issu d'un unique point de la structure initiale de GR4J. De manière analogue, en cas de vidange, l'eau est rejetée depuis le réservoir image vers un unique point de la structure initiale de GR4J. Nous avons envisagé 14 points clé dans la structure du modèle et nous avons testé l'ensemble des combinaisons possibles de points d'alimentation et de rejet. Elles sont schématisées sur la Figure 5.1.

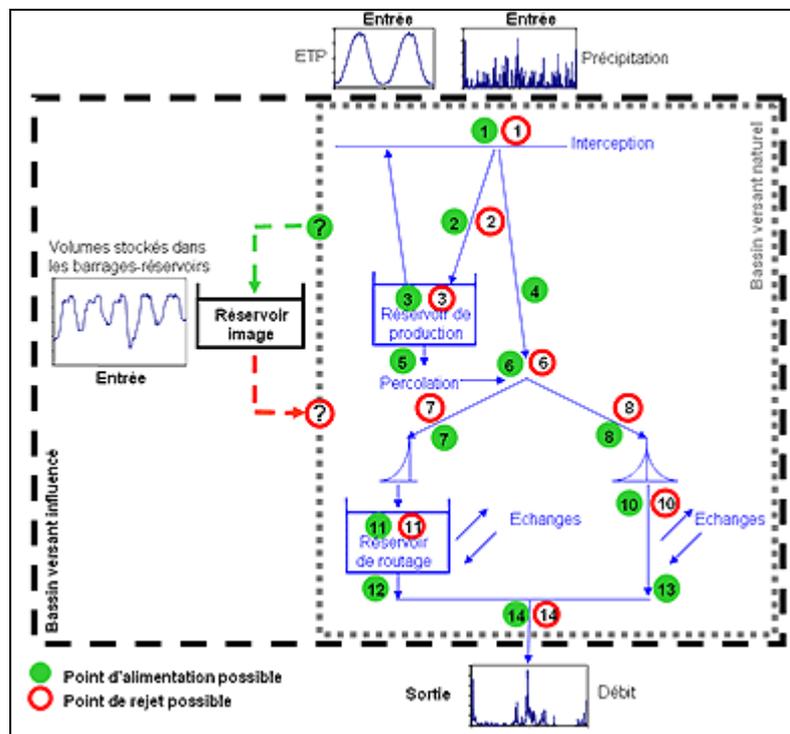


Figure 5.1 : Points d'alimentation et de rejet du réservoir image possibles pour chacune des solutions testées

Une solution sera désignée par la notation A_iR_j avec $i, j \in [1;14]$. i désigne le point d'alimentation et j le point de rejet. Par exemple, la notation A_3R_{11} désigne la solution qui consiste à alimenter le réservoir image par le réservoir de production (A_3) et à le vidanger dans le réservoir de transfert (R_{11}).

Etant donné que certaines solutions sont identiques en termes de rejet, nous avons testé au total 117 solutions (13 points d'alimentation \times 9 points de rejet). En effet, il n'y a pas de différences entre des rejets en R_4 , R_5 et R_6 . De même pour les rejets R_{12} , R_{13} et R_{14} .

Dans la suite, nous avons retenu la notation R6 pour désigner les rejets en 4, 5 ou 6 et la notation R14 pour désigner les rejets en 12, 13 ou 14.

Nous avons initialement envisagé une alimentation et un rejet à partir du réservoir de production avant des échanges (A9 et R9) afin de voir si l'ordre des opérations réalisées dans ce réservoir avait une importance sur l'alimentation ou le rejet. Il est apparu que ce point donne des résultats identiques à ceux du point 11. Dans la suite, nous avons choisi de ne conserver que le point 11. Nous avons donc au total 13 points d'alimentation possibles et 9 points de rejet.

5.2.1.2. Reports d'alimentation

Pour certaines solutions, il peut arriver qu'à certains pas de temps, il n'y ait pas suffisamment d'eau disponible pour alimenter le réservoir image à partir du point d'alimentation testé. Dans ce cas, afin de pallier ce manque d'eau, des reports de l'alimentation ont été établis vers les stocks d'eau les plus pérennes au sein de la structure du modèle. Ainsi, le réservoir image est dans un premier temps alimenté par le point d'alimentation spécifique à la solution testée. En cas de manque d'eau, pour les points 1 à 8, l'alimentation est alors complétée à partir du réservoir de production (3) et dans le cas où ce réservoir serait vide, à partir du réservoir de routage (11) (Figure 5.2a). Pour les points 10 à 14, les reports se font d'abord sur le réservoir de routage puis sur le réservoir de production (Figure 5.2b).

Ces reports d'alimentation conduisent donc à considérer des solutions où les réservoirs de production et de routage du modèle constituent des sources d'eau pérennes en complément de sources plus temporaires.

Du fait des reports d'alimentation, certaines solutions se retrouvent être équivalentes à certains pas de temps.

Notons enfin, que les incertitudes sur les données de volume ne vont pas avoir les mêmes effets sur les résultats pour les différentes solutions testées. Leurs effets seront différents selon la fonction du modèle mise en jeu (alimentation et rejet). Ainsi par exemple, les erreurs sur les données de volume peuvent avoir une influence plus marquée sur les résultats lorsque le rejet du réservoir image est fait directement en sortie du modèle (R14) que lorsqu'il a lieu dans le réservoir de routage (R11). Cependant, le nombre de bassins versants utilisés tend à atténuer globalement ces différences.

Remarque : pour suivre plus facilement les analyses des différents tests réalisés, la structure du modèle est fournie sur une feuille séparée (Figure 5.1).

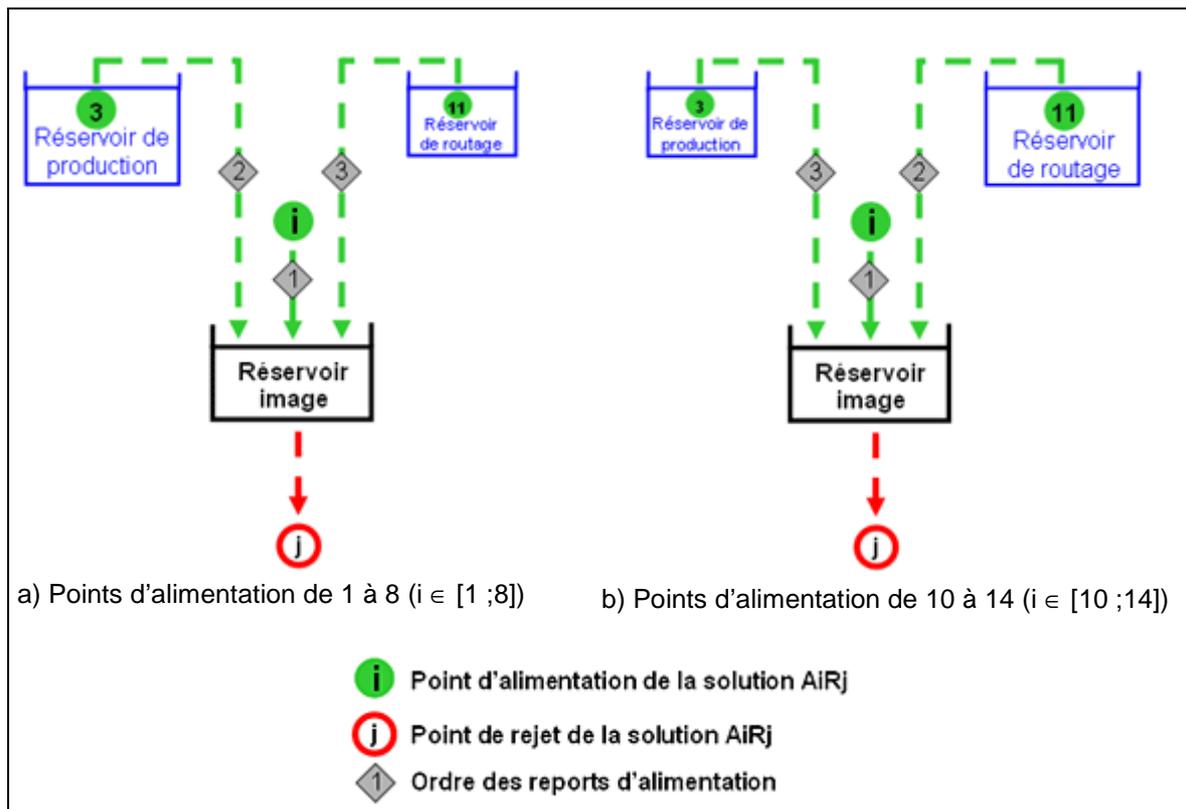


Figure 5.2 : Ordre des reports d'alimentation selon les points d'alimentation envisagés

5.2.2. Performances sur l'échantillon de bassins versants de référence

Nous présentons dans le paragraphe suivant les résultats obtenus pour les 117 solutions testées sur l'échantillon des 46 bassins versants de référence (cf. chapitre 4). Ces résultats permettent d'avoir une première idée de l'efficacité de la méthode de prise en compte des barrages-réservoirs dans le modèle GR4J.

Le Tableau 5.1 synthétise les résultats de chaque solution sur l'échantillon de bassins versants de référence. Les points d'alimentation testés correspondent aux colonnes du tableau et les points de rejet aux lignes. Chaque case du tableau correspond donc à une solution. La valeur du critère de performance est indiquée dans cette case. Il s'agit de moyennes des critères de performances en contrôle, calculées sur l'ensemble des 46 bassins versants. On a choisi de présenter les résultats en contrôle car ils sont plus représentatifs des capacités réelles du modèle que ceux obtenus en calage.

Nous présentons les résultats avec le critère C2M calculé sur les débits (C2MQ), la racine carrée des débits (C2MVQ) et sur le logarithme népérien des débits (C2MLQ). Cela permet de mettre l'accent sur différentes gammes de débits (cf. chapitre 3) dans l'évaluation des performances.

Les meilleures performances sont indiquées en gras. L'écart-type et la moyenne des lignes et colonnes sont indiqués aux extrémités du tableau. Les solutions sont classées selon le critère C2MVQ pour faciliter l'interprétation des tableaux.

	A3	A8	A5	A1	A2	A6	A7	A4	A10	A11	A13	A12	A14	σ	Moy
R11	58.5	58.5	58.3	58.4	58.3	57.7	57.7	57.6	57.5	57.4	57.0	54.7	54.4	1.33	57.4
R6	58.0	57.9	57.8	57.8	57.7	57.1	57.0	56.9	57.0	56.9	56.5	54.5	54.0	1.25	56.8
R7	58.2	58.1	58.0	58.0	57.9	57.3	57.3	57.2	57.1	57.0	56.6	54.6	54.2	1.28	57.0
R8	57.4	57.2	57.2	57.3	57.2	56.4	56.4	56.2	56.2	56.2	55.8	53.6	53.3	1.32	56.2
R10	57.1	57.1	57.0	57.0	56.9	56.3	56.3	56.0	56.1	56.1	55.6	53.2	53.1	1.35	56.0
R14	56.9	56.5	56.3	56.7	56.7	55.7	55.6	55.7	55.4	55.6	55.1	52.8	52.2	1.43	55.5
R1	55.8	55.9	55.8	55.6	55.5	55.1	55.1	54.9	54.6	54.5	54.3	52.4	52.3	1.20	54.7
R3	55.6	55.7	55.8	55.4	55.4	55.1	55.1	54.8	54.5	54.5	54.2	52.5	52.2	1.14	54.7
R2	55.9	56.0	56.0	55.6	55.6	55.1	55.2	54.6	54.5	54.6	54.3	52.3	52.1	1.27	54.7
σ	1.09	1.03	0.99	1.11	1.10	1.02	1.00	1.10	1.19	1.14	1.10	0.98	0.94		
Moy	57.0	57.0	56.9	56.8	56.8	56.2	56.2	56.0	55.9	55.9	55.5	53.4	53.1		

a) C2MQ

	A3	A8	A5	A1	A2	A6	A7	A4	A10	A11	A13	A12	A14	σ	Moy
R11	65.4	65.4	65.2	65.3	65.3	64.6	64.6	64.6	64.2	64.0	63.7	59.0	58.2	2.37	63.8
R6	65.1	65.0	65.0	65.0	64.9	64.4	64.2	64.2	64.0	63.7	63.5	59.1	58.2	2.24	63.6
R7	65.0	65.0	64.8	64.9	64.8	64.2	64.2	64.2	63.8	63.5	63.3	58.8	57.9	2.32	63.4
R8	64.3	64.1	64.2	64.2	64.2	63.5	63.5	63.4	63.0	62.8	62.6	58.1	56.7	2.41	62.7
R10	63.7	63.7	63.6	63.6	63.6	63.0	63.0	62.8	62.5	62.3	62.0	57.1	56.0	2.52	62.1
R14	62.6	62.6	62.4	62.5	62.5	61.8	61.7	61.7	61.2	61.1	60.9	56.1	54.9	2.50	60.9
R1	60.6	60.6	60.7	60.4	60.4	60.1	60.1	59.8	59.4	59.3	59.1	55.1	54.2	2.09	59.2
R3	60.5	60.5	60.7	60.3	60.3	60.1	60.0	59.7	59.3	59.2	59.1	55.3	54.1	2.07	59.2
R2	60.6	60.6	60.7	60.4	60.4	59.8	60.0	59.4	59.2	59.1	58.9	55.0	53.9	2.16	59.1
σ	2.07	2.03	1.94	2.10	2.09	1.99	1.92	2.11	2.11	2.02	2.01	1.75	1.83		
Moy	63.1	63.1	63.0	63.0	62.9	62.4	62.4	62.2	61.9	61.7	61.5	57.1	56.0		

b) C2MVQ

	A3	A8	A5	A1	A2	A6	A7	A4	A10	A11	A13	A12	A14	σ	Moy
R11	63.7	63.7	63.4	63.6	63.6	62.8	62.7	63.0	62.1	61.6	61.6	51.0	48.7	4.97	60.9
R6	63.4	63.4	63.2	63.3	63.3	62.6	62.4	62.6	61.9	61.4	61.4	51.4	48.8	4.80	60.7
R7	63.2	63.2	63.0	63.2	63.1	62.4	62.3	62.5	61.7	61.2	61.1	50.8	48.5	4.88	60.5
R8	62.1	61.9	61.8	62.0	62.0	61.2	61.0	61.1	60.2	60.0	59.7	50.0	46.2	5.05	59.2
R10	60.8	60.7	60.6	60.7	60.7	60.0	59.8	59.9	59.0	58.8	58.4	47.6	44.6	5.28	57.8
R14	58.7	58.7	58.3	58.6	58.6	57.8	57.6	57.8	56.7	56.6	56.3	45.9	43.0	5.09	55.7
R1	55.0	54.9	55.1	54.8	54.7	54.4	54.5	54.1	53.5	53.5	53.3	45.1	42.3	4.09	52.7
R3	54.9	54.8	55.0	54.7	54.7	54.5	54.5	54.1	53.5	53.4	53.4	44.7	42.0	4.19	52.6
R2	54.8	54.7	54.9	54.6	54.6	54.1	54.2	53.8	53.1	53.1	52.9	44.9	41.8	4.14	52.4
σ	3.86	3.87	3.70	3.91	3.91	3.73	3.64	3.92	3.86	3.65	3.68	2.86	3.01		
Moy	59.6	59.5	59.5	59.5	59.5	58.9	58.8	58.8	58.0	57.7	57.6	47.9	45.1		

c) C2MLQ

Tableau 5.1 : Performances moyennes des 117 solutions testées sur l'échantillon des 46 bassins versants de référence – Contrôle (performances exprimées suivant le critère C2M, variant de -100 à 100 ; 100 correspondant au modèle parfait)

5.2.2.1. Alimentation

Le classement des solutions selon les performances moyennes, montre que, pour un même rejet, le groupe des solutions les plus performantes est composé de solutions ayant les

mêmes points d'alimentation pour les trois critères. Ce groupe comprend les solutions alimentées à partir :

- de la pluie brute (A1) ;
- de la pluie nette (A2) ;
- du réservoir de production (A3) ;
- de la sortie du réservoir de production (A5) ;
- de la branche d'écoulement indirect avant l'hydrogramme unitaire (A8).

L'alimentation à partir du réservoir de production du modèle (A3) fournit les meilleurs résultats. Cette option d'alimentation est suivie de près des options d'alimentation depuis la sortie du réservoir de production (A5) et à partir du haut de la branche d'écoulement direct du modèle avant l'hydrogramme unitaire (A8). Cette proximité des performances est due aux reports d'alimentation qui peuvent avoir lieu. En effet, les solutions A1 et A2 sont des sources non pérennes d'alimentation en raison de l'intermittence de la pluie. Les quantités d'eau mobilisables aux points A5 et A8 sont également faibles en absence de pluie. Pour de nombreux pas de temps, ces quatre alimentations sont donc équivalentes à l'alimentation A3. Les points d'alimentation précédents ont en commun d'être situés dans la partie supérieure du modèle, partie dans laquelle se fait une part importante de la production d'eau.

On remarque cependant une baisse des performances lorsque l'alimentation du réservoir image est réalisée à partir des autres points de la partie supérieure du modèle (A4, A6 et A7). Ces points correspondent en fait au parcours de la majeure partie de la pluie efficace (part de la pluie allant alimenter l'écoulement). Il ne semble donc pas intéressant de mobiliser cette quantité d'eau pour alimenter le réservoir image. Les performances moyennes des solutions associées à ces points d'alimentation sont proches de celles des points d'alimentation A10, A11 et A13 situés dans la partie inférieure du modèle, dans laquelle se fait principalement le routage. Compte tenu des faibles quantités d'eau transitant par les points 10 et 13 en cas d'absence de pluie, ces alimentations sont équivalentes à A11 en raison des reports sur le réservoir de routage. C'est par ce réservoir que transite l'essentiel de l'eau alimentant l'écoulement. La moindre performance de ces solutions est donc cohérente avec les observations faites précédemment pour les alimentations A4, A6 et A7.

En fin de classement se trouvent les solutions avec des alimentations à partir de la sortie du réservoir de routage (A12) et à partir de la sortie du modèle (A14). Ces points d'alimentation sont particulièrement peu performants, en particulier pour la restitution des débits faibles comme le montre le Tableau 5.1c. On remarque une baisse de plus de 10 points sur le critère C2MLQ par rapport aux autres points d'alimentation. Ces alimentations constituent des sources pérennes d'eau (à part pour des bassins intermittents) et représentent le chemin de la majeure partie de l'écoulement. Leurs faibles performances tendent à indiquer que

l'alimentation du réservoir image ne peut pas se faire à partir de ce qui représente pratiquement le débit à l'exutoire.

5.2.2.2. Rejet

Pour une même alimentation du réservoir image, les rejets dans le réservoir de routage (R11) donnent les meilleurs résultats moyens. Le rejet avant la séparation des écoulements (R6) donne des résultats intéressants tout comme le rejet en tête de la branche d'écoulement indirect avant l'hydrogramme unitaire (R7). La proximité des performances de ces deux points de rejet, vient du fait que 90 % de l'eau passant au point 6 va ensuite en 7. Ces rejets se font en tête de la partie de transfert du modèle et plutôt dans la branche d'écoulement indirect. Le rejet en sortie de modèle (R14) donne de faibles performances moyennes par rapport aux autres rejets dans cette partie du modèle. Ceci tend à indiquer la nécessité d'avoir une phase de routage pour les rejets.

Les solutions les moins performantes globalement sont celles pour lesquelles les rejets se font en tête du modèle (R1), après neutralisation de la pluie par l'évapotranspiration potentielle (R2) ainsi que dans le réservoir de production (R3). Ces points de rejet se démarquent nettement des autres par leurs mauvaises performances quel que soit le critère considéré. Ceci indique que les rejets ne doivent pas être affectés par la fonction de rendement opérée par le réservoir de production, ni être envoyés dans ce réservoir où ils sont essentiellement repris par l'évapotranspiration.

5.2.3. Amélioration par rapport à la version initiale du modèle

Dans ce paragraphe, nous comparons les performances moyennes obtenues pour chaque solution aux performances moyennes du modèle initial ne prenant pas en compte les barrages-réservoirs. Le but est de mesurer l'amélioration de la restitution des débits apportée par la prise en compte des données de remplissage des barrages-réservoirs dans le modèle.

Nous avons considéré deux références qui n'ont pas accès à l'information sur les volumes stockés pour faire des simulations :

1. la première est le modèle GR4J initial calé sur les chroniques de débits influencés. On considère ici que le modèle, grâce à ses paramètres, peut, dans une certaine mesure, s'adapter aux conditions artificialisées. Cette comparaison permet de mesurer les apports de la prise en compte des données de remplissage des barrages-réservoirs par rapport à un calage des paramètres qui tenterait d'adapter le modèle à la présence d'un ouvrage de stockage d'eau sur le bassin versant (procédure "classique").
2. la deuxième référence consiste à caler le modèle GR4J initial sur une chronique de débit non influencé représentant le comportement hydrologique "naturel" du bassin versant, et à regarder ensuite ses performances sur la chronique influencée. Pour

cette deuxième référence, l'absence de chroniques non influencées dans notre base de données nous a conduit à utiliser les paramètres de la solution A3R11 pour faire tourner le modèle initial (sans informations sur le remplissage des barrages). On considère en effet que ces paramètres, qui n'ont pas eu à compenser l'absence d'information sur l'artificialisation des cours d'eau, se rapprochent de ce que seraient les paramètres pour le bassin versant naturel.

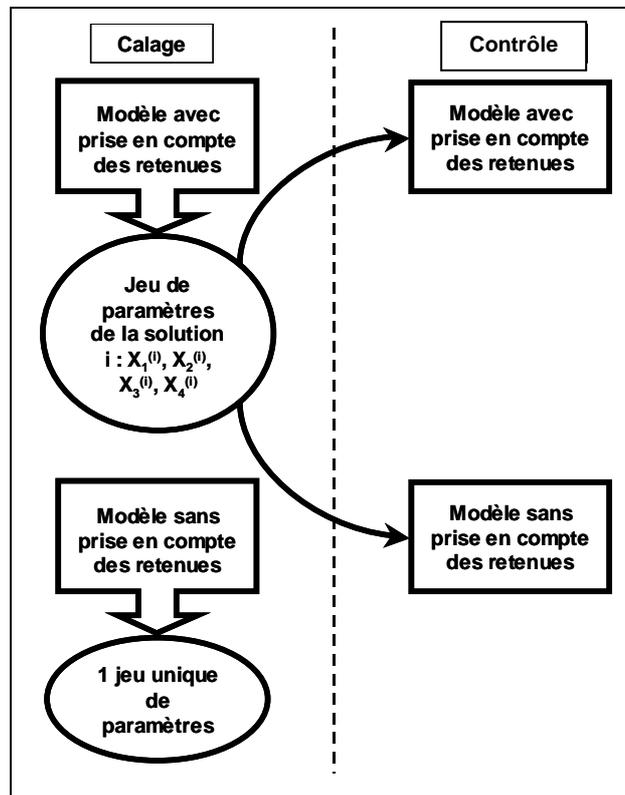


Figure 5.3 : Procédures de calage et de contrôle pour le modèle initial et les solutions de prise en compte des retenues

Il est clair que la première référence, du fait de sa capacité d'adaptation aux conditions influencées, sera plus exigeante que la seconde.

Dans le premier cas, nous vérifions en fait l'utilité d'une prise en compte spécifique des barrages-réservoirs par rapport à une prise en compte "implicite" par calage des paramètres alors que dans le deuxième cas, nous nous attachons plus à déterminer dans quelle mesure il est utile de prendre en compte les barrages-réservoirs dans le modèle.

5.2.3.1. Comparaison avec le modèle initial validé avec les paramètres issus de son calage (procédure "classique")

Le Tableau 5.2 présente les améliorations moyennes (ou détériorations dans quelques cas) obtenues pour chacune des solutions testées par rapport aux performances du modèle initial. Il s'agit des résultats en contrôle calculés pour les trois critères sur l'échantillon de bassins versants de référence.

	A3	A8	A5	A1	A2	A6	A7	A4	A10	A11	A13	A12	A14	σ	Moy
R11	2.8	2.7	2.6	2.6	2.6	1.9	2.0	1.8	1.8	1.7	1.3	-1.0	-1.3	1.33	1.6
R6	2.2	2.1	2.1	2.0	2.0	1.4	1.2	1.2	1.3	1.1	0.8	-1.3	-1.7	1.25	1.1
R7	2.4	2.4	2.2	2.3	2.2	1.6	1.6	1.5	1.4	1.3	0.9	-1.2	-1.6	1.28	1.3
R8	1.7	1.5	1.4	1.5	1.5	0.7	0.7	0.5	0.5	0.5	0.1	-2.1	-2.4	1.32	0.5
R10	1.4	1.3	1.2	1.2	1.2	0.5	0.5	0.3	0.3	0.4	-0.1	-2.5	-2.7	1.35	0.2
R14	1.1	0.8	0.6	1.0	0.9	-0.1	-0.1	0.0	-0.3	-0.1	-0.7	-2.9	-3.5	1.43	-0.3
R1	0.0	0.1	0.1	-0.2	-0.2	-0.6	-0.6	-0.9	-1.2	-1.2	-1.5	-3.4	-3.5	1.20	-1.0
R3	-0.1	0.0	0.0	-0.3	-0.4	-0.7	-0.7	-0.9	-1.2	-1.3	-1.5	-3.2	-3.6	1.14	-1.1
R2	0.1	0.2	0.2	-0.1	-0.1	-0.7	-0.5	-1.1	-1.2	-1.2	-1.5	-3.4	-3.7	1.27	-1.0
σ	1.09	1.03	0.99	1.11	1.10	1.02	1.00	1.10	1.19	1.14	1.10	0.98	0.94		
Moy	1.3	1.2	1.2	1.1	1.1	0.5	0.4	0.3	0.1	0.1	-0.2	-2.3	-2.7		

a) C2MQ, (C2MQ de référence = 55,7)

	A3	A8	A5	A1	A2	A6	A7	A4	A10	A11	A13	A12	A14	σ	Moy
R11	5.1	5.0	4.9	5.0	4.9	4.3	4.2	4.3	3.9	3.6	3.4	-1.3	-2.1	2.37	3.5
R6	4.7	4.7	4.6	4.6	4.6	4.0	3.8	3.9	3.6	3.3	3.2	-1.2	-2.1	2.24	3.2
R7	4.7	4.6	4.5	4.6	4.5	3.9	3.8	3.9	3.5	3.2	3.0	-1.5	-2.4	2.32	3.1
R8	4.0	3.8	3.8	3.9	3.9	3.2	3.1	3.0	2.7	2.4	2.2	-2.2	-3.6	2.41	2.3
R10	3.4	3.3	3.3	3.3	3.2	2.7	2.6	2.4	2.1	2.0	1.7	-3.3	-4.3	2.52	1.7
R14	2.3	2.2	2.1	2.2	2.2	1.5	1.4	1.3	0.9	0.7	0.5	-4.3	-5.5	2.50	0.6
R1	0.3	0.3	0.4	0.1	0.1	-0.3	-0.3	-0.6	-0.9	-1.1	-1.2	-5.2	-6.1	2.09	-1.1
R3	0.2	0.2	0.3	0.0	0.0	-0.3	-0.3	-0.6	-1.0	-1.1	-1.2	-5.1	-6.3	2.07	-1.2
R2	0.2	0.2	0.4	0.1	0.0	-0.5	-0.3	-0.9	-1.2	-1.2	-1.4	-5.4	-6.5	2.16	-1.3
σ	2.07	2.03	1.94	2.10	2.09	1.99	1.92	2.11	2.11	2.02	2.01	1.75	1.83		
Moy	2.8	2.7	2.7	2.6	2.6	2.0	2.0	1.9	1.5	1.3	1.1	-3.3	-4.3		

b) C2MVQ, (C2MVQ de référence = 60,3)

	A3	A8	A5	A1	A2	A6	A7	A4	A10	A11	A13	A12	A14	σ	Moy
R11	9.3	9.3	9.0	9.2	9.2	8.4	8.3	8.6	7.7	7.2	7.2	-3.4	-5.7	4.97	6.5
R6	9.0	9.0	8.8	8.9	8.9	8.2	8.0	8.2	7.5	7.0	7.0	-3.0	-5.6	4.80	6.3
R7	8.8	8.8	8.6	8.8	8.7	8.0	7.9	8.1	7.3	6.8	6.7	-3.6	-5.9	4.88	6.1
R8	7.7	7.5	7.4	7.6	7.6	6.8	6.6	6.7	5.8	5.6	5.3	-4.4	-8.2	5.05	4.8
R10	6.4	6.3	6.2	6.3	6.3	5.6	5.4	5.5	4.6	4.4	4.0	-6.8	-9.8	5.28	3.4
R14	4.3	4.3	3.9	4.2	4.2	3.4	3.2	3.4	2.3	2.2	1.9	-8.5	-11.4	5.09	1.3
R1	0.6	0.5	0.7	0.4	0.3	0.0	0.1	-0.3	-0.9	-0.9	-1.1	-9.3	-12.1	4.09	-1.7
R3	0.5	0.4	0.6	0.3	0.3	0.1	0.1	-0.3	-0.9	-0.9	-1.0	-9.7	-12.4	4.19	-1.8
R2	0.4	0.3	0.5	0.2	0.2	-0.3	-0.2	-0.6	-1.3	-1.3	-1.5	-9.5	-12.6	4.14	-2.0
σ	3.86	3.87	3.70	3.91	3.91	3.73	3.64	3.92	3.86	3.65	3.68	2.86	3.01		
Moy	5.2	5.1	5.1	5.1	5.1	4.5	4.4	4.4	3.6	3.3	3.2	-6.5	-9.3		

c) C2MLQ, (C2MLQ de référence = 54,4)

Tableau 5.2 : Comparaison des améliorations de performances des solutions testées avec celles du modèle initial en contrôle sur l'échantillon des 46 bassins versants de référence - Les solutions grisées permettent une amélioration moyenne d'au moins un point σ par rapport au modèle initial

On remarque que les écarts de performances du modèle initial et des différentes solutions testées peuvent être très variables. Les meilleures solutions permettent d'améliorer notablement les performances (amélioration d'au moins un point) alors que pour un certain nombre de solutions, l'amélioration n'est pas significative et il peut même y avoir une dégradation par rapport au modèle initial.

L'amplitude des différences de performances dépend du critère considéré : elle est relativement réduite pour le critère C2MQ (qui met l'accent sur les débits élevés), plus importante pour le critère C2MVQ et très importante pour le critère C2MLQ (qui met l'accent sur les débits faibles). Ceci indique que les solutions de prise en compte des barrages-réservoirs testées permettent une amélioration importante des simulations des faibles débits (étiages) (pour les meilleures solutions, plus de 9 points gagnés en moyenne par rapport au modèle initial) et une amélioration plus modeste des simulations des forts débits (crues) (pour les meilleures solutions, plus de 2,5 points gagnés en moyenne par rapport au modèle initial).

On retrouve que les effets des ouvrages sur les débits sont plus marqués en période d'étiage qu'en période de crue, et leur prise en compte en modélisation semble améliorer nettement la restitution des débits par rapport à la version initiale du modèle.

5.2.3.2. Comparaison avec le modèle initial utilisant les paramètres issus du calage des solutions de prise en compte des barrages-réservoirs

Le Tableau 5.3 présente les améliorations moyennes (ou détériorations dans quelques cas) obtenues pour chacune des solutions testées par rapport aux performances du modèle initial. Il s'agit des résultats en contrôle calculés pour les trois critères sur l'échantillon de bassins versants de référence. Dans ce cas, le modèle initial est validé avec les paramètres de la solution la plus performante, c'est-à-dire A3R11.

Comme pour la comparaison précédente, les résultats sont différents selon le critère considéré. Les plus fortes améliorations sont obtenues pour la restitution des faibles débits (critère C2MLQ), les meilleures solutions permettent de gagner globalement plus de 16 points par rapport aux performances du modèle initial. En revanche, lorsque l'accent est mis sur les débits élevés (C2MQ), le gain est plus modeste mais reste cependant significatif. Il est au mieux de 2,6 points.

Ces résultats indiquent que certaines solutions de prise en compte des ouvrages arrivent à utiliser convenablement l'information sur l'état de remplissage des barrages-réservoirs.

	A3	A8	A5	A1	A2	A6	A7	A4	A10	A11	A13	A12	A14	σ	Moy
R11	2.6	2.6	2.4	2.4	2.4	1.8	1.7	1.8	1.6	1.5	1.1	-1.2	-1.5	1.33	1.5
R6	2.0	2.0	1.9	1.9	1.8	1.2	1.0	1.1	1.1	1.0	0.6	-1.4	-1.9	1.25	0.9
R7	2.3	2.2	2.1	2.1	2.0	1.4	1.3	1.4	1.2	1.1	0.7	-1.3	-1.7	1.28	1.1
R8	1.5	1.3	1.3	1.3	1.3	0.5	0.3	0.5	0.3	0.3	-0.1	-2.3	-2.6	1.32	0.3
R10	1.2	1.2	1.1	1.1	1.0	0.4	0.1	0.4	0.1	0.2	-0.3	-2.7	-2.9	1.35	0.1
R14	1.0	0.6	0.8	0.4	0.8	-0.3	-0.2	-0.3	-0.5	-0.3	-0.8	-3.1	-3.7	1.43	-0.4
R1	-0.1	0.0	-0.4	-0.1	-0.4	-0.8	-1.0	-0.8	-1.3	-1.4	-1.6	-3.5	-3.7	1.20	-1.2
R3	-0.3	-0.2	-0.5	-0.2	-0.5	-0.8	-1.1	-0.8	-1.4	-1.4	-1.7	-3.4	-3.7	1.14	-1.2
R2	0.0	0.0	-0.3	0.1	-0.3	-0.8	-1.3	-0.7	-1.4	-1.3	-1.7	-3.6	-3.8	1.27	-1.2
σ	1.09	1.03	1.11	0.99	1.10	1.02	1.10	1.00	1.19	1.14	1.10	0.98	0.94		
Moy	1.1	1.1	0.9	1.0	0.9	0.3	0.1	0.3	0.0	0.0	-0.4	-2.5	-2.8		

a) C2MQ, (C2MQ de référence = 55,9)

	A3	A8	A5	A1	A2	A6	A7	A4	A10	A11	A13	A12	A14	σ	Moy
R11	7.4	7.3	7.2	7.2	7.2	6.6	6.6	6.5	6.2	5.9	5.7	1.0	0.2	2.37	5.8
R6	7.0	7.0	6.9	6.9	6.9	6.3	6.2	6.1	5.9	5.6	5.5	1.1	0.2	2.24	5.5
R7	7.0	6.9	6.8	6.8	6.8	6.2	6.2	6.1	5.8	5.5	5.3	0.7	-0.1	2.32	5.4
R8	6.3	6.0	6.2	6.1	6.1	5.5	5.3	5.4	5.0	4.7	4.5	0.1	-1.3	2.41	4.6
R10	5.7	5.6	5.6	5.6	5.5	4.9	4.7	4.9	4.4	4.3	4.0	-1.0	-2.1	2.52	4.0
R14	4.6	4.5	4.5	4.3	4.4	3.7	3.6	3.7	3.2	3.0	2.8	-2.0	-3.2	2.50	2.9
R1	2.6	2.6	2.4	2.7	2.4	2.0	1.7	2.0	1.3	1.2	1.1	-2.9	-3.8	2.09	1.2
R3	2.4	2.5	2.3	2.6	2.3	2.0	1.7	2.0	1.3	1.2	1.1	-2.8	-4.0	2.07	1.1
R2	2.5	2.5	2.3	2.7	2.3	1.7	1.4	2.0	1.1	1.1	0.9	-3.1	-4.2	2.16	1.0
σ	2.07	2.03	2.10	1.94	2.09	1.99	2.11	1.92	2.11	2.02	2.01	1.75	1.83		
Moy	5.0	5.0	4.9	5.0	4.9	4.3	4.2	4.3	3.8	3.6	3.4	-1.0	-2.0		

b) C2MVQ, (C2MVQ de référence = 58,1)

	A3	A8	A5	A1	A2	A6	A7	A4	A10	A11	A13	A12	A14	σ	Moy
R11	16.7	16.7	16.4	16.6	16.5	15.8	15.7	15.9	15.1	14.6	14.6	4.0	1.7	4.97	13.9
R6	16.4	16.3	16.2	16.3	16.3	15.6	15.4	15.6	14.9	14.4	14.4	4.4	1.8	4.80	13.7
R7	16.2	16.2	16.0	16.1	16.1	15.4	15.3	15.5	14.7	14.2	14.1	3.8	1.5	4.88	13.5
R8	15.1	14.8	14.8	15.0	15.0	14.2	14.0	14.1	13.2	13.0	12.7	2.9	-0.8	5.05	12.2
R10	13.8	13.7	13.6	13.7	13.7	13.0	12.8	12.9	12.0	11.7	11.4	0.6	-2.4	5.28	10.8
R14	11.7	11.7	11.3	11.6	11.6	10.8	10.6	10.8	9.7	9.5	9.3	-1.1	-4.0	5.09	8.7
R1	8.0	7.9	8.1	7.8	7.7	7.4	7.5	7.1	6.5	6.4	6.3	-1.9	-4.7	4.09	5.7
R3	7.9	7.8	8.0	7.7	7.6	7.5	7.4	7.1	6.5	6.4	6.3	-2.3	-5.0	4.19	5.6
R2	7.8	7.7	7.9	7.6	7.6	7.0	7.2	6.7	6.1	6.1	5.9	-2.1	-5.2	4.14	5.4
σ	3.86	3.87	3.70	3.91	3.91	3.73	3.64	3.92	3.86	3.65	3.68	2.86	3.01		
Moy	12.6	12.5	12.5	12.5	12.4	11.8	11.8	11.8	11.0	10.7	10.5	0.9	-1.9		

c) C2MLQ, (C2MLQ de référence = 47,0)

Tableau 5.3 : Comparaison des performances des solutions testées avec celles du modèle initial en contrôle avec les paramètres de la solution A3R11 sur l'échantillon des 46 bassins versants de référence - Les solutions grisées permettent une amélioration moyenne d'au moins un point par rapport au modèle initial

5.2.4. Que nous apprennent ces premiers résultats ?

Une première analyse des résultats moyens sur les 46 bassins versants de référence permet de dégager des pistes d'insertion du réservoir image dans la structure initiale du modèle GR4J :

- Il est préférable d'alimenter le réservoir image par les points situés dans la partie où a lieu une part importante de la production du modèle. Les points d'alimentation les plus performants sont A1, A2, A3, A5 et A8. Compte tenu des reports, l'efficacité du point d'alimentation A3 indique qu'il est préférable d'alimenter le réservoir image à partir du stock d'eau le plus pérenne du modèle, à savoir le réservoir de production ;
- Il est intéressant de vidanger le réservoir image dans la partie de transfert du modèle et plus particulièrement dans la branche d'écoulement indirect dans le réservoir de routage. Les points de rejet les plus performants sont R6, R7 et R11. Le classement des différents points de rejet en fonction de leurs performances indique qu'il semble important d'introduire un délai et/ou un lissage dans le transfert des rejets du réservoir image. Ainsi, les rejets les plus performants sont ceux qui font intervenir le lissage du réservoir de transfert (R6, R7 et R11). Les rejets utilisant uniquement l'hydrogramme unitaire comme routage (R8) donnent de moins bonnes performances. Elles restent tout de même meilleures que des rejets en sortie de modèle sans aucun lissage ou délai (R10 et R14).
La solution consistant à rejeter dans la fonction de production est cependant à proscrire, comme le montrent les performances de rejets R1, R2 et R3. Ces points de rejets ont en commun d'avoir lieu en amont ou dans le réservoir de production du modèle. Ce dernier a alors pour effet de tamponner énormément les rejets, ce qui semble dégrader les performances ;
- Les améliorations des performances apportées par certaines solutions testées sont plus importantes pour la restitution des faibles débits que pour les forts. En revanche, les solutions les plus performantes globalement sur l'ensemble des 46 bassins versants sont indépendantes du type de débit auquel on s'intéresse. Ceci semble indiquer que la manière de prendre en compte les barrages-réservoirs dans le modèle est indépendante de la gamme de débits considérée. En d'autres termes, un même type de solution pourra convenir à la fois à la simulation de débits forts et faibles.

A ce stade, s'il ne fallait retenir qu'une solution, qui serait la solution la plus performante globalement, on choisirait entre les deux solutions suivantes (performances en gras dans le Tableau 5.1) :

- La solution **A3R11** pour laquelle l'alimentation du réservoir image se fait à partir du réservoir de production et les rejets dans le réservoir de transfert ;
- La solution **A8R11** pour laquelle l'alimentation du réservoir image se fait à partir de la branche d'écoulement direct avant l'hydrogramme unitaire et des rejets identiques à la solution précédente (dans le réservoir de transfert).

Du fait des reports mentionnés précédemment, l'alimentation A8 est souvent proche de l'alimentation A3. On peut donc dire de ces premiers tests que la solution qui semble se dégager est la solution A3R11.

Ces premiers résultats montrent que la simple insertion d'un réservoir image dans la structure initiale du modèle GR4J peut permettre d'améliorer les performances du modèle initial. Cela conforte notre hypothèse initiale de pouvoir utiliser les informations contenues dans les variations journalières de volumes stockés dans les barrages-réservoirs afin d'améliorer la simulation des débits en modélisation pluie-débit globale. Il est alors envisageable de complexifier et d'approfondir l'analyse de ces solutions préliminaires pour tenter d'améliorer davantage les performances du modèle initial.

5.3. Analyse des meilleures solutions

La partie précédente a montré que les solutions A3R11 et A8R11 étaient les plus performantes globalement. Ces solutions sont très proches en raison des reports évoqués précédemment. Leurs performances sont très semblables pour la majorité des bassins versants (Figure 5.4).

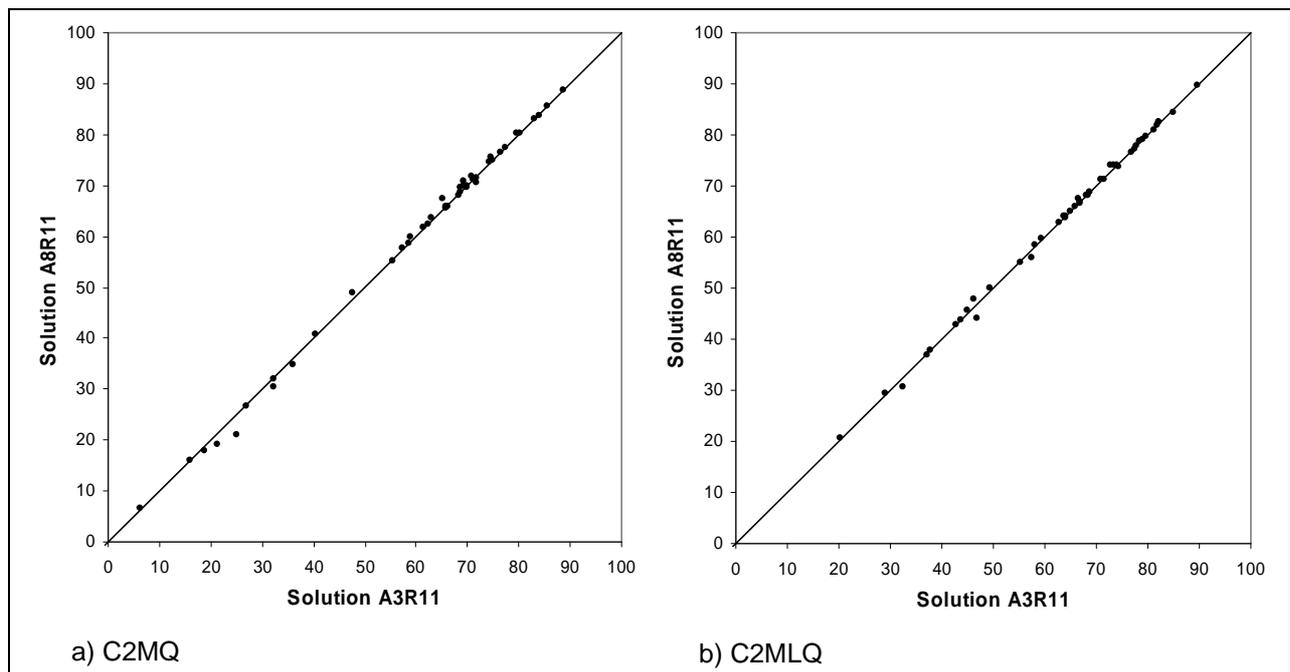


Figure 5.4 : Comparaison des performances des solution A3R11 et A8R11 sur les 46 bassins versants de référence pour les critères C2MQ et C2MLQ – Contrôle

Nous analysons plus en détails dans cette partie la solution A3R11 qui s'est révélée être la plus performante. L'analyse réalisée dans cette partie peut également s'appliquer à la solution A8R11 à cause des similitudes avec A3R11.

5.3.1. Apports de la prise en compte des barrages-réservoirs

La Figure 5.5 compare les performances moyennes en contrôle des 46 bassins de référence pour la version du modèle sans prise en compte des barrages-réservoirs et la solution A3R11.

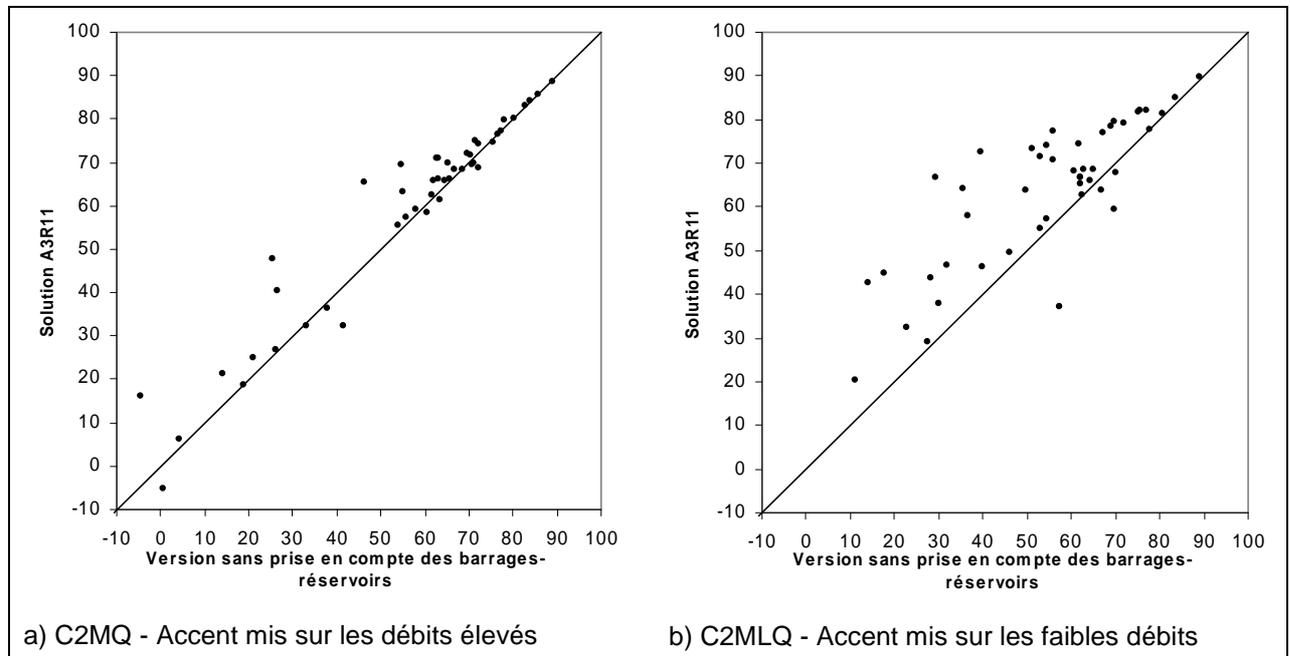


Figure 5.5 : Comparaison des performances des meilleures solutions de prise en compte des barrages-réservoirs et de la version initiale pour les critères C2MQ et C2MLQ - Contrôle

Les performances sont améliorées pour la majorité des bassins versants. Lorsque l'accent est mis sur les débits élevés (Figure 5.5a), les performances diminuent pour 16 bassins (35 % de l'échantillon) mais cette diminution des performances n'est supérieure à 2 points que pour 4 bassins (9 % de l'échantillon). Pour 12 des 16 bassins pour lesquels on note une diminution des performances, il existe au moins une solution parmi les 117 testées qui permet d'améliorer la simulation des débits. Seuls 4 des 16 bassins correspondent à des cas où la prise en compte des barrages-réservoirs n'améliore pas la simulation des débits quelle que soit la solution testée. La détérioration n'est significative (1,3 %) que pour un de ces bassins, pour lequel les performances du modèle initial étaient très mauvaises (0,5 %). Pour les trois autres bassins la baisse de performances n'est que de 0,1 %.

Lorsque l'accent est mis sur les débits faibles (Figure 5.5b), on note que l'écart de performances entre les deux versions du modèle peut être important et qu'il y a peu de bassins pour lesquels les performances sont proches (peu de points à proximité de la première bissectrice). En revanche, pour quatre bassins, les performances obtenues avec la version initiale sont significativement meilleures (écart supérieur à 2 %). Contrairement au cas précédents, les autres solutions testées permettent au mieux d'avoir des performances équivalentes à celles de la version initiale et non meilleures.

Les constatations précédentes indiquent que :

- la solution A3R11, qui s'est révélée être la plus performante globalement sur l'ensemble des bassins, permet d'améliorer significativement la simulation des débits sur la majorité des bassins versants ;
- il existe un certain nombre de bassins versants pour lesquels cette solution n'est pas la plus performante des 117 solutions testées ;

La Figure 5.6 compare les distributions des performances de différentes versions du modèle. Les distributions ont été obtenues en classant les performances d'une version par ordre croissant et en construisant la distribution expérimentale correspondante. Ce type de représentation facilite la comparaison des performances de différentes versions du modèle sur l'ensemble de l'échantillon. Plus la courbe de la distribution sera décalée à droite, plus la version correspondante sera performante (pour une fréquence au non dépassement donnée, le critère correspondant est plus élevé).

La Figure 5.6 permet d'illustrer à la fois les progrès apportés par la prise en compte des barrages-réservoirs par rapport à la version initiale du modèle et la marge de progression possible avec l'ensemble des 117 solutions testées. Nous avons en effet tracé les distributions des performances de la version initiale du modèle, de la solution A3R11 et de la solution dite "idéale". Pour comprendre à quoi renvoie la solution "idéale", plaçons nous dans la position d'un modélisateur ayant à sa disposition l'ensemble des 117 solutions testées pour modéliser la relation pluie-débit sur chaque bassin de l'échantillon. Le test de l'ensemble des solutions permettrait de déterminer la plus performante et donc la solution la plus adaptée au bassin étudié. Nous avons procédé ainsi pour les 46 bassins versants de l'échantillon, en retenant pour chaque bassin la solution la plus performante. La distribution de la solution "idéale" est donc réalisée avec les performances (en contrôle) de ces solutions. Cette solution fictive, correspond en fait, *a posteriori*, à la meilleure solution composite, association "idéale" des 117 solutions. Bien entendu, elle n'est "idéale" que dans la limite de ces 117 solutions. La distribution des performances de cette solution permet alors d'illustrer la marge de progression possible car elle constitue "l'enveloppe" (limite supérieure) des distributions de chaque solution.

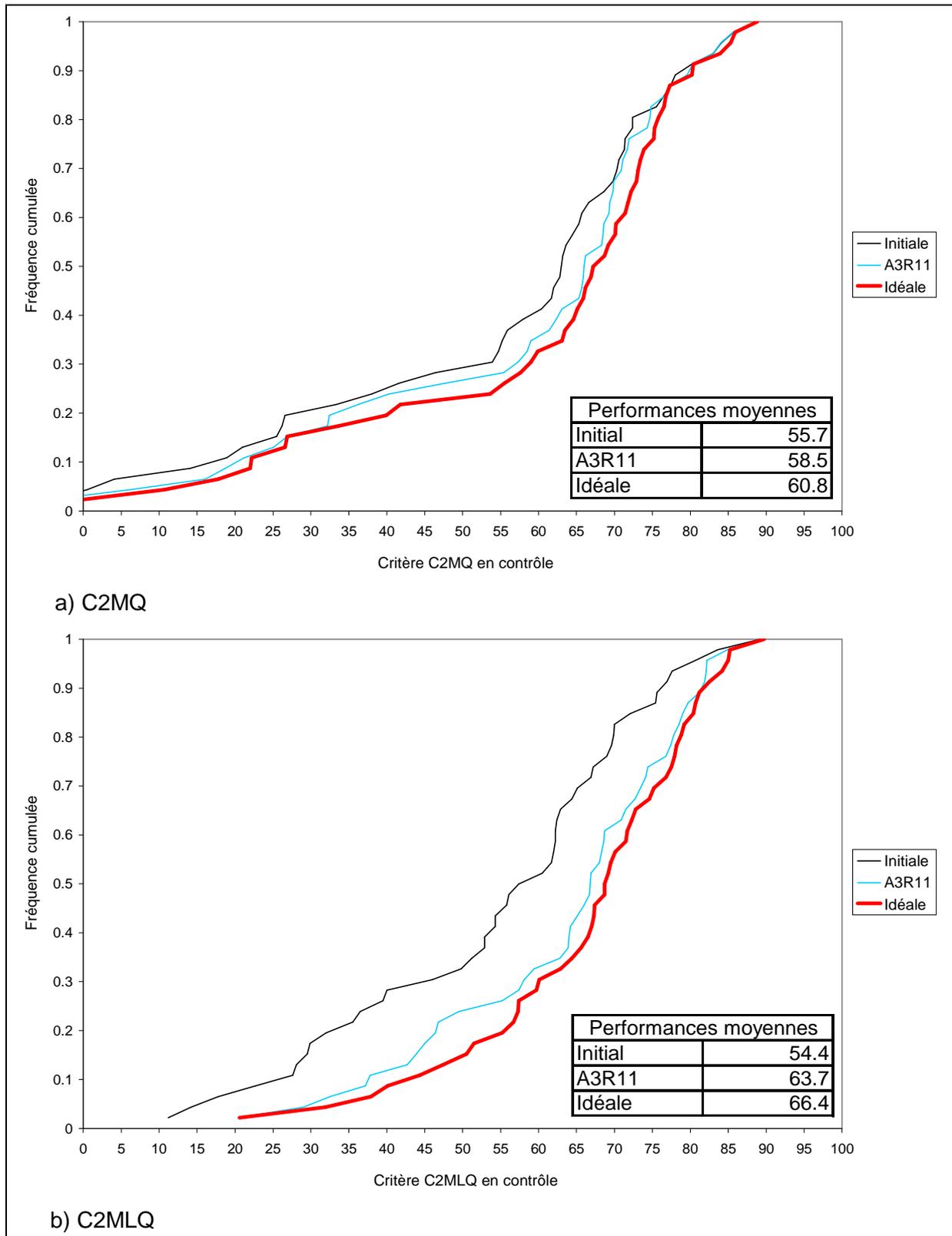


Figure 5.6 : Distributions des résultats par bassins suivant les critères C2MQ et C2MLQ pour la version initiale du modèle, la solution A3R11 et la solution "idéale"

On constate que les progrès réalisés grâce à la prise en compte des barrages-réservoirs sont significatifs, en particulier pour la simulation des étiages (Figure 5.6b). La solution A3R11, qui consiste à alimenter le réservoir image à partir du réservoir de production du

modèle et à le vidanger dans le réservoir de transfert permet de nettes améliorations des performances, proches du maximum de ce qui peut être réalisé avec les solutions testées. La différence de performance moyenne entre la solution A3R11 et la solution "idéale" est de l'ordre de 2 % pour les deux critères. La marge de progrès possible est donc assez faible.

5.3.2. Fiabilité des solutions

Nous présentons dans ce paragraphe les résultats d'une analyse simple de la fiabilité de la solution A3R11 par comparaison à d'autres solutions retenues. Pour cela, nous dénombrons, pour chaque solution, le nombre de bassins versants où elle fait partie des meilleures. Une solution sera de classe 1 si elle se place dans les 5 meilleures solutions et de classe 2 si elle fait partie des 10 meilleures solutions. On mesure ainsi la capacité d'une solution à être régulièrement classée parmi les plus performantes.

La Figure 5.7 donne le pourcentage de bassins pour lesquels une solution est de classe 1 et de classe 2. Le classement a été réalisé en utilisant les performances calculées sur la racine carrée des débits (C2MVQ) en contrôle.

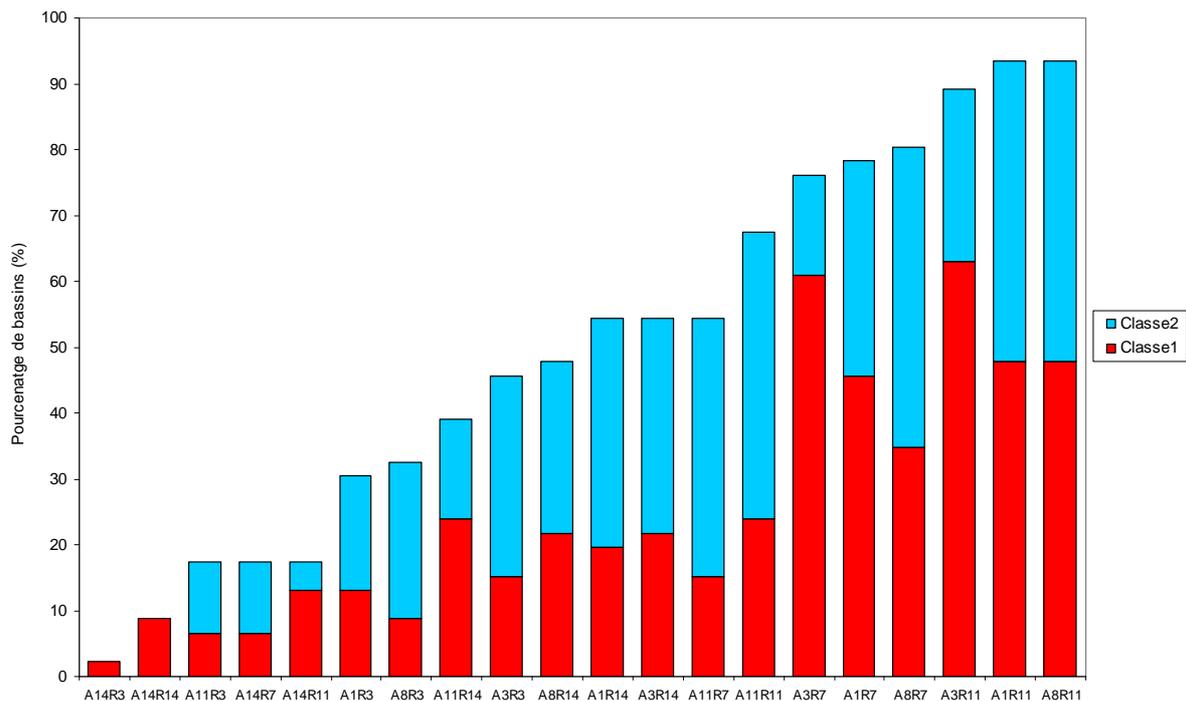


Figure 5.7 : Pourcentage de bassins pour lesquels une solution est de classe 1 et 2

La Figure 5.7 montre que les différences de fiabilité entre les solutions peuvent être importantes. Le nombre de bassins pour lesquels une solution est de classe 1 et 2 varie de 1 bassin (2 % des bassins) à 43 (plus de 93 % des bassins). Pour chaque solution, il existe toujours au moins un bassin pour lequel cette solution est parmi les meilleures. Ceci renforce l'intérêt de travailler sur un grand nombre de bassins pour avoir une solution générale.

La solution A3R11 fait partie des plus fiables puisqu'elle est classée dans les 5 meilleures pour 29 bassins (63 %) et dans les 10 meilleures pour 41 bassins (89 %). Certaines solutions, qui ont des performances moyennes un peu inférieures (A3R7) semblent également capables de se placer parmi les meilleures solutions sur un grand nombre de bassins versants.

5.3.3. En résumé

La solution A3R11 permet un gain de performance sur la majorité des 46 bassins versants de référence. Sur ces bassins, les améliorations sont significatives, notamment pour la simulation des débits faibles.

L'analyse de fiabilité indique que cette solution est régulièrement classée parmi les plus performantes. En revanche, il existe un certain nombre de bassins versants pour lesquels elle n'est pas la meilleure des 117 solutions testées. Ce point suggère que plusieurs points d'alimentation ou de rejet pourraient être intéressants. C'est ce qu'avaient indiqué les travaux de Moulin *et al.* (2005) sur le cas spécifique du bassin de la Seine.

Dans les paragraphes suivants, nous essayons donc d'évaluer les apports d'une sophistication des solutions testées jusqu'à présent, en introduisant un deuxième point de rejet ou d'alimentation.

5.4. Un point d'alimentation et deux points de rejet

Nous proposons dans ce paragraphe de tester s'il est possible d'améliorer les performances des solutions de prise en compte des barrages-réservoirs en vidangeant le réservoir image en deux points de rejet situés dans la structure initiale du modèle. En effet, considérer deux points de rejet distincts peut permettre de mieux rendre compte du devenir de l'eau issue de la diminution du volume stocké dans l'ouvrage.

5.4.1. Description et notations

Dans la suite on désigne par "solution" un triplet formé d'un point d'alimentation et deux points de rejet.

Cette série de tests regroupe des solutions pour lesquelles le prélèvement d'eau pour alimenter le réservoir image est issu d'un unique point de la structure initiale de GR4J en cas de remplissage. En revanche, en cas de vidange, l'eau est rejetée depuis le réservoir image vers deux points de la structure initiale du modèle.

5.4.1.1. Coefficient de partage

Afin de fixer la quantité d'eau envoyée depuis le réservoir image vers les deux points de rejet, nous introduisons un coefficient de partage, noté CPART.

Lors d'une vidange, une proportion CPART de cette vidange va être envoyée vers le premier point de rejet et une proportion 1-CPART vers le second (Figure 5.8).

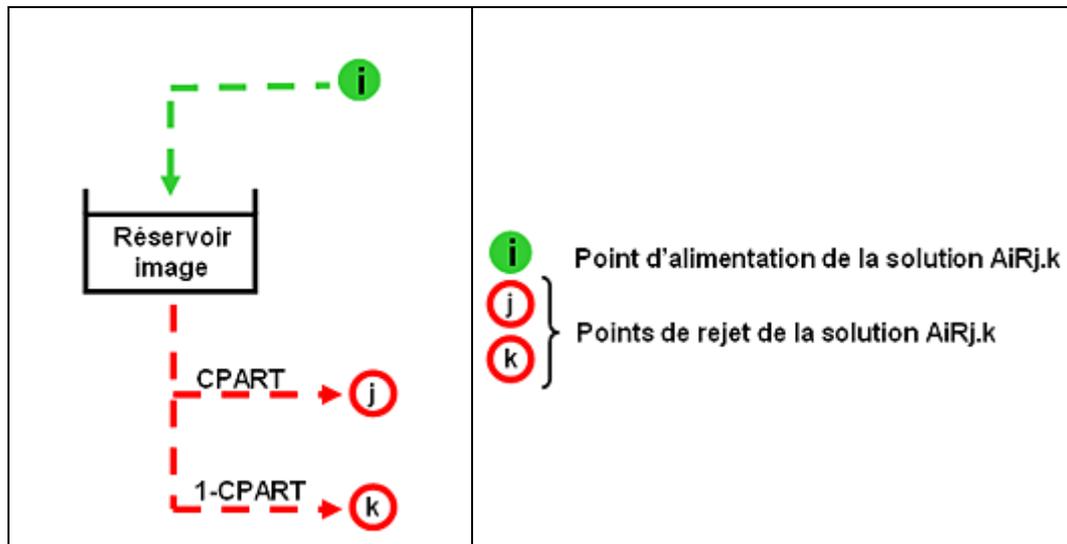


Figure 5.8 : Définition du coefficient de partage des rejets CPART

Lorsque CPART est égal à 1 (respectivement 0), la vidange est entièrement envoyée vers le point de rejet j (respectivement k).

La valeur de CPART a été déterminée pour chaque solution par optimisation avec les autres paramètres du modèle. Cela nous évite de fixer CPART arbitrairement et permet également de savoir s'il est utile de rejeter en deux points du modèle. En effet, si les valeurs de CPART sont proches de 1 ou de 0 cela indique qu'il est peu intéressant de vidanger le réservoir image en deux points distincts du modèle.

En revanche, l'introduction d'un coefficient de partage optimisé équivaut à l'ajout d'un paramètre supplémentaire au modèle. Il faudra alors s'assurer que cette complexification de la structure est justifiée par un gain de performances significatif.

5.4.1.2. Notation

Dans cette série de tests, une solution sera désignée par $A_iR_{j,k}$, i désignant le point d'alimentation du réservoir image et j et k les deux points de rejet. Par exemple la notation A3R7.11 désigne la solution qui consiste à alimenter le réservoir image par le réservoir de production (A3) et à le vidanger sur la branche d'écoulement indirect avant l'hydrogramme unitaire (R7) et dans le réservoir de transfert (R11).

Nous avons testé l'ensemble des combinaisons possibles de points d'alimentation et de rejet.

5.4.2. Performances sur l'échantillon de référence – Comparaison avec le cas une alimentation et un rejet

Le Tableau 5.4 présente le classement des solutions les plus performantes globalement sur l'échantillon des 46 bassins versants de référence.

Rang	Solution	C2MQ	CPART	Ecart-type
1	A8R11.14	58.6	0.6	0.31
1	A3R11.14	58.6	0.6	0.31
2	A3R11	58.5	-	-
2	A8R11	58.5	-	-
2	A3R7.14	58.5	0.6	0.30
3	A1R11.14	58.4	0.6	0.31
3	A8R7.14	58.4	0.6	0.30
3	A1R11	58.4	-	-
4	A5R11	58.3	-	-
4	A3R8.14	58.3	0.5	0.29
4	A2R11	58.3	-	-
4	A3R8.11	58.3	0.6	0.26
4	A1R7.14	58.3	0.6	0.30
5	A8R8.14	58.2	0.5	0.29
5	A8R8.11	58.2	0.6	0.27
5	A1R8.14	58.2	0.5	0.29
5	A3R7	58.2	-	-
5	A1R7.11	58.2	0.6	0.31
6	A8R7	58.1	-	-
6	A1R8.11	58.1	0.6	0.26
6	A3R7.8	58.1	0.6	0.31
6	A3R7.11	58.1	0.6	0.31
7	A8R7.8	58.0	0.7	0.31
7	A8R7.11	58.0	0.6	0.31
7	A1R7	58.0	-	-
7	A5R7	58.0	-	-
7	A3R6	58.0	-	-
8	A2R7	57.9	-	-
8	A8R6	57.9	-	-
9	A1R7.8	57.8	0.6	0.31
9	A5R6	57.8	-	-
9	A1R6	57.8	-	-
10	A2R6	57.7	-	-
10	A7R11	57.7	-	-
10	A6R11	57.7	-	-

a) C2MQ

Rang	Solution	C2MVQ	CPART	Ecart-type
1	A3R11.14	65.9	0.6	0.31
1	A8R11.14	65.9	0.6	0.31
2	A3R8.11	65.8	0.6	0.26
2	A1R11.14	65.8	0.6	0.31
2	A3R8.14	65.8	0.5	0.29
3	A3R7.14	65.7	0.6	0.30
3	A8R8.11	65.7	0.6	0.27
3	A1R8.11	65.7	0.6	0.26
3	A8R7.14	65.7	0.6	0.30
3	A1R8.14	65.7	0.5	0.29
4	A1R7.14	65.6	0.6	0.30
4	A8R8.14	65.6	0.5	0.29
4	A3R7.8	65.6	0.6	0.31
5	A8R7.8	65.5	0.7	0.31
5	A3R7.11	65.5	0.6	0.31
5	A8R7.11	65.5	0.6	0.31
6	A3R11	65.4	-	-
6	A1R7.8	65.4	0.6	0.31
6	A8R11	65.4	-	-
7	A1R7.11	65.3	0.6	0.31
7	A1R11	65.3	-	-
7	A2R11	65.3	-	-
8	A5R11	65.2	-	-
9	A3R6	65.1	-	-
10	A8R6	65.0	-	-
10	A3R7	65.0	-	-
10	A8R7	65.0	-	-
10	A5R6	65.0	-	-
10	A1R6	65.0	-	-

b) C2MVQ

Rang	Solution	C2MLQ	CPART	Ecart-type
1	A3R11.14	64.8	0.6	0.31
1	A8R11.14	64.8	0.6	0.31
2	A1R11.14	64.7	0.6	0.31
2	A3R8.11	64.7	0.6	0.26
3	A1R8.11	64.6	0.6	0.26
3	A8R8.11	64.6	0.6	0.27
3	A8R7.14	64.6	0.6	0.30
3	A3R7.14	64.6	0.6	0.30
4	A1R7.14	64.5	0.6	0.30
5	A3R7.8	64.4	0.6	0.31
5	A8R7.8	64.4	0.7	0.31
6	A3R8.14	64.3	0.5	0.29
6	A1R7.8	64.3	0.6	0.31
6	A1R8.14	64.3	0.5	0.29
7	A8R7.11	64.2	0.6	0.31
7	A3R7.11	64.2	0.6	0.31
7	A8R8.14	64.2	0.5	0.29
8	A1R7.11	64.1	0.6	0.31
9	A3R11	63.7	-	-
9	A8R11	63.7	-	-
10	A1R11	63.6	-	-
10	A2R11	63.6	-	-

c) C2MLQ

Tableau 5.4 : Classement des solutions les plus performantes sur les 46 bassins versants de référence en contrôle pour les trois critères – CPART optimisé (en grisé, les solutions à deux rejets)

La valeur moyenne du coefficient de partage ainsi que l'écart-type sont indiqués pour chacune de ces solutions. Ils permettent d'avoir une indication sur la quantité d'eau envoyée vers chaque point de rejet et sur la variabilité du coefficient de partage.

Les solutions classées premières sont communes aux trois critères. Il s'agit des solutions A3R11.14 et A8R11.14 ayant une alimentation soit à partir du réservoir de production (A3) soit à partir de la branche d'écoulement direct avant l'hydrogramme unitaire (A8) et rejetant 60 % de l'eau vers le réservoir de transfert et 40 % en sortie du modèle (R11.14, CPART=0,6).

L'introduction d'un point de rejet supplémentaire permet, pour certaines des solutions testées, d'obtenir une amélioration des performances moyennes sur l'échantillon des 46 bassins versants. L'importance de ces améliorations est cependant variable selon le critère considéré et donc selon la gamme de débits à laquelle on s'intéresse.

Lorsque l'accent est mis sur les débits élevés (C2MQ, Tableau 5.4a), l'amélioration des performances apportée par l'introduction d'un second point de rejet n'est que de 0,1 point par rapport aux meilleures solutions ayant un unique rejet. Cette amélioration n'est pas significative d'autant que l'on rajoute un paramètre supplémentaire.

En revanche, lorsque l'on s'intéresse à la restitution des débits faibles (C2MLQ, Tableau 5.4c), l'amélioration est plus marquée puisque l'introduction d'un second point de rejet

améliore les performances globales 1,1 point par rapport à la meilleure solution à rejet unique. L'amélioration est significative dans ce cas même si elle ne justifie probablement pas un paramètre supplémentaire.

Lorsque ni les crues ni les étiages ne sont privilégiés (C2MVQ, Tableau 5.4b), l'amélioration apportée par un second rejet est de 0,5 point.

L'introduction d'un point de rejet supplémentaire ne remet pas en cause les pistes d'insertion identifiées au paragraphe 5.2.4, mais certaines différences apparaissent.

- **Alimentation**

Les points d'alimentation les plus performants restent les points situés dans la partie de production du modèle (A1, A3 et A8). Les solutions ayant une alimentation à partir du réservoir de transfert (A11) ou de la sortie du modèle (A14) donnent des performances plus faibles.

- **Rejet**

Dans le cas de solutions ayant un unique rejet, nous avons constaté qu'il est préférable de vidanger le réservoir image dans la partie de transfert du modèle et plus particulièrement dans la branche d'écoulement indirect (R7 et R11).

Dans le cas de solutions à deux rejets, ces points restent généralement performants. Mais il est intéressant de remarquer que des solutions ayant des rejets à la fois dans la branche d'écoulement indirect et dans la branche d'écoulement direct (avant l'hydrogramme unitaire A8 ou en sortie du modèle A14) font partie des solutions les plus performantes. Ces solutions ont la particularité de combiner un rejet introduisant un lissage des transferts d'une partie de la vidange avec un rejet avec peu ou pas de délai vers la sortie du modèle. Les valeurs moyennes du coefficient de partage de ces solutions indiquent que les deux rejets sont mis à contribution ($0,4 \leq \text{CPART} \leq 0,6$). Ce n'est donc pas le rejet dans la branche d'écoulement indirect qui contribue seul aux bonnes performances de ces solutions, c'est bien la combinaison des deux rejets qui semble être bénéfique aux performances. L'écart-type du coefficient de partage indique une variabilité des valeurs par bassin.

Les solutions ayant l'un des rejets dans le réservoir de production (R3) sont les moins performantes.

5.4.3. Qu'apporte l'introduction d'un second point de rejet ?

5.4.3.1. En résumé

Les résultats précédents indiquent que l'introduction d'un point de rejet supplémentaire a des conséquences variables selon la gamme de débits considérée :

- Lorsque l'accent est mis sur la restitution des débits élevés, l'introduction d'un rejet supplémentaire ne permet pas une amélioration significative des performances par rapport au cas à rejet unique. Cette complexification de la structure du modèle n'est pas justifiée en termes de performances ;
- Les améliorations de performance apportées par la combinaison de deux points de rejet sont plus importantes lorsque l'accent est mis sur les débits faibles. Les points d'alimentation les plus performants restent ceux identifiés dans le cas d'un rejet unique, c'est-à-dire les points situés dans la partie de production du modèle (A1, A3 et A8). Les résultats montrent qu'il reste intéressant de rejeter une partie de la vidange dans la branche d'écoulement indirect (R7 ou R11) mais en combinant ce rejet à un rejet dans la branche d'écoulement direct (R8 et R14). Cette association de points de rejet permet à la fois d'introduire un lissage dans le transfert d'une partie de la vidange et de transférer l'autre partie plus rapidement vers la sortie du modèle. Les valeurs moyennes du coefficient de partage indiquent qu'en moyenne, la répartition se fait à 60 % vers la branche d'écoulement indirect et à 40 % vers la sortie du modèle.

5.4.3.2. Est-il possible d'éviter l'optimisation de CPART ?

Dans la suite, on teste les solutions à deux rejets en fixant le coefficient de partage. L'objectif est d'évaluer la perte de performances qu'implique l'absence d'optimisation de CPART. Si les performances sont peu détériorées alors ce type de solutions pourra être retenu. Dans le cas contraire, l'amélioration des performances n'est pas significative pour justifier l'ajout d'un paramètre supplémentaire à optimiser.

Le Tableau 5.5 présente les performances obtenues en fixant la valeur du coefficient de partage à sa valeur moyenne pour chaque solution.

Lorsque le coefficient de partage est fixé à sa valeur moyenne pour chaque solution, les performances diminuent et deviennent équivalentes aux performances moyennes des solutions à rejet unique. Dans ce cas, un second rejet n'apporte donc pas plus d'amélioration des performances moyennes.

Ce résultat peut découler de la variabilité de CPART. En effet, il peut prendre, pour une solution donnée, des valeurs très différentes pour chaque bassin. Le fixer à sa valeur moyenne ne semble pas être adapté. Le coefficient de partage semble être lié au bassin versant et non à une solution donnée. Nous détaillerons davantage ce point au chapitre suivant.

Rang	Solution	C2MQval46	CPARTMoy	Rang	Solution	C2MVQval46	CPARTMoy	Rang	Solution	C2MLQval46	CPARTMoy
1	A3R11.14	58.5	0.6	1	A3R11.14	65.4	0.6	1	A3R11	63.7	-
1	A3R11	58.5	-	1	A3R11	65.4	-	1	A8R11	63.7	-
1	A8R11.14	58.5	0.6	1	A8R11.14	65.4	0.6	2	A3R8.11	63.6	0.6
1	A8R11	58.5	-	1	A8R11	65.4	-	2	A1R11	63.6	-
2	A3R7.14	58.4	0.6	2	A1R11.14	65.3	0.6	2	A2R11	63.6	-
2	A1R11	58.4	-	2	A3R8.11	65.3	0.6	3	A1R8.11	63.5	0.6
3	A5R11	58.3	-	2	A1R11	65.3	-	3	A3R11.14	63.5	0.6
3	A1R11.14	58.3	0.6	2	A3R7.14	65.3	0.6	3	A3R7.8	63.5	0.6
3	A8R7.14	58.3	0.6	2	A2R11	65.3	-	3	A8R7.8	63.5	0.7
3	A2R11	58.3	-	3	A8R7.14	65.2	0.6	3	A8R11.14	63.5	0.6
4	A1R7.14	58.2	0.6	3	A5R11	65.2	-	4	A1R11.14	63.4	0.6
4	A3R7	58.2	-	3	A8R8.11	65.2	0.6	4	A8R8.11	63.4	0.6
5	A3R8.11	58.1	0.6	3	A3R7.8	65.2	0.6	4	A5R11	63.4	-
5	A8R7	58.1	-	3	A1R8.11	65.2	0.6	4	A3R6	63.4	-
5	A3R7.8	58.1	0.6	3	A1R7.14	65.2	0.6	4	A8R6	63.4	-
5	A1R7.11	58.1	0.6	4	A8R7.8	65.1	0.7	4	A1R7.8	63.4	0.6
6	A8R8.11	58.0	0.6	4	A3R6	65.1	-	5	A3R7.14	63.3	0.6
6	A1R7	58.0	-	4	A3R7.11	65.1	0.6	5	A8R7.14	63.3	0.6
6	A5R7	58.0	-	5	A3R8.14	65.0	0.5	5	A1R6	63.3	-
6	A8R7.8	58.0	0.7	5	A1R7.8	65.0	0.6	5	A1R7.14	63.3	0.6
6	A3R8.14	58.0	0.5	5	A8R6	65.0	-	5	A2R6	63.3	-
6	A3R6	58.0	-	5	A8R7.11	65.0	0.6	5	A3R7.11	63.3	0.6
7	A3R7.11	57.9	0.6	5	A3R7	65.0	-	6	A8R7.11	63.2	0.6
7	A1R8.11	57.9	0.6	5	A8R7	65.0	-	6	A8R7	63.2	-
7	A2R7	57.9	-	5	A5R6	65.0	-	6	A3R7	63.2	-
7	A8R8.14	57.9	0.5	5	A1R6	65.0	-	6	A5R6	63.2	-
7	A1R7.8	57.9	0.6	6	A1R8.14	64.9	0.5	6	A1R7	63.2	-
7	A8R6	57.9	-	6	A2R6	64.9	-	7	A1R7.11	63.1	0.6
7	A8R7.11	57.9	0.6	6	A8R8.14	64.9	0.5	7	A2R7	63.1	-
8	A1R8.14	57.8	0.5	6	A1R7.11	64.9	0.6	8	A5R7	63.0	-
8	A5R6	57.8	-	6	A1R7	64.9	-	8	A4R11	63.0	-
8	A1R6	57.8	-	7	A2R7	64.8	-	9	A6R11	62.8	-
9	A2R6	57.7	-	7	A5R7	64.8	-	9	A3R8.14	62.8	0.5
9	A7R11	57.7	-	8	A4R11	64.6	-	10	A7R11	62.7	-
9	A6R11	57.7	-	8	A6R11	64.6	-	10	A1R8.14	62.7	0.5
10	A4R11	57.6	-	8	A7R11	64.6	-				
				9	A6R6	64.4	-				
				10	A3R8	64.3	-				

a) C2MQ

b) C2MVQ

c) C2MLQ

Tableau 5.5 : Classement des solutions les plus performantes sur les 46 bassins versants de référence en contrôle pour les trois critères – CPART fixe (en grisé les solutions à deux rejets)

5.4.3.3. Les améliorations apportées par un second rejet concernent-elles l'ensemble des bassins ?

Nous cherchons à déterminer si l'amélioration apportée par le rejet supplémentaire concerne l'ensemble des 46 bassins versants. Dans ce but, nous comparons bassin par bassin les performances en contrôle de la meilleure solution à rejet unique (A3R11) avec la meilleure solution à deux rejets (A3R11.14) pour les trois critères (Figure 5.9a, Figure 5.9b et Figure 5.9c). Le coefficient de partage est optimisé. La Figure 5.9d permet de comparer les performances moyennes sur les 46 bassins versants.

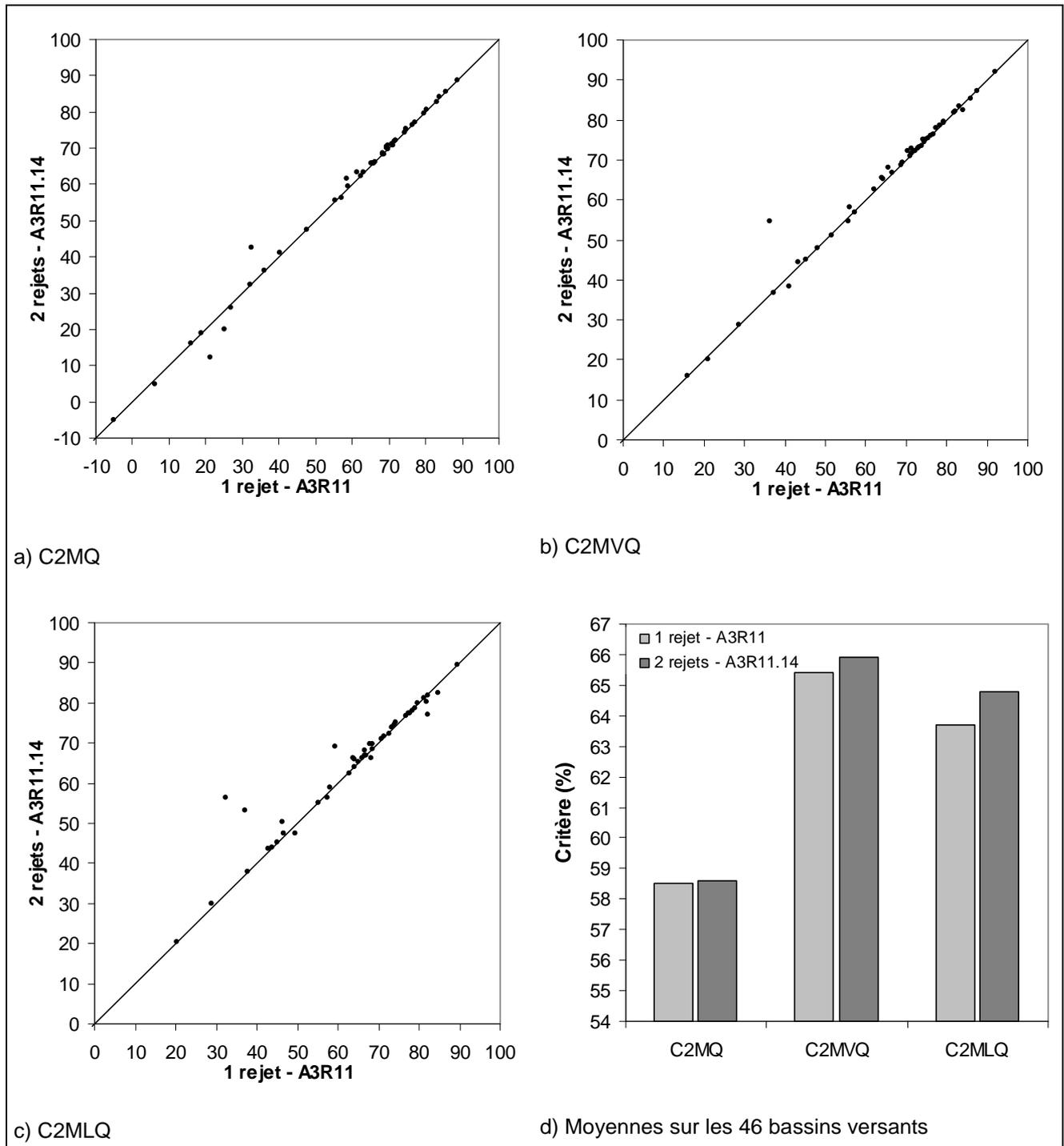


Figure 5.9 : Comparaison des performances de la meilleure solution à un rejet et celle à deux rejets en contrôle, bassin par bassin pour les trois critères (a, b, et c) et performances moyennes (d)

Les graphiques a, b et c de la Figure 5.9 montrent que les améliorations apportées par un deuxième point de rejet ne sont pas systématiques et sont significatives (supérieures ou égales à 1 %) uniquement pour un nombre réduit de bassins versants (de 11 % à 20 % des bassins selon le critère considéré). On remarque également que l'introduction d'un deuxième rejet peut détériorer les performances sur certains bassins (entre 7 % et 9 % des bassins).

Il semble que, pour tirer profit des solutions à deux rejets, il soit nécessaire de déterminer *a priori* sur quel bassin versant elles se révèlent meilleures que des solutions à rejet unique. La solution A3R11 reste plus intéressante par sa simplicité et sa généralité. Nous aborderons plus en détail, au chapitre suivant, les questions de choix d'une solution adaptée à un bassin versant donné.

5.5. Deux points d'alimentation et un point de rejet

Identiquement aux tests précédents, nous présentons dans ce paragraphe les résultats issus de solutions ayant cette fois deux points d'alimentation et un point de rejet. L'objectif est d'évaluer les apports de ce type de solutions.

5.5.1. Description et notations

Dans la suite, on désigne par "solution", un triplet formé de deux points d'alimentation et d'un point de rejet.

Cette série de tests regroupe des solutions pour lesquelles le prélèvement d'eau pour alimenter le réservoir image est issu de deux points de la structure initiale de GR4J en cas de remplissage. En revanche, en cas de vidange, l'eau est rejetée depuis le réservoir image vers un unique point de la structure initiale du modèle.

5.5.1.1. Coefficient de partage

A la manière du coefficient de partage présenté pour les solutions à deux rejets, nous définissons également, pour les solutions à deux alimentations, un coefficient de partage identique au précédent. Dans ce cas, CPART sert à fixer la quantité à prélever de chacun des points d'alimentation.

Une proportion CPART de l'alimentation va provenir du premier point et une proportion $1-\text{CPART}$ du second (Figure 5.10).

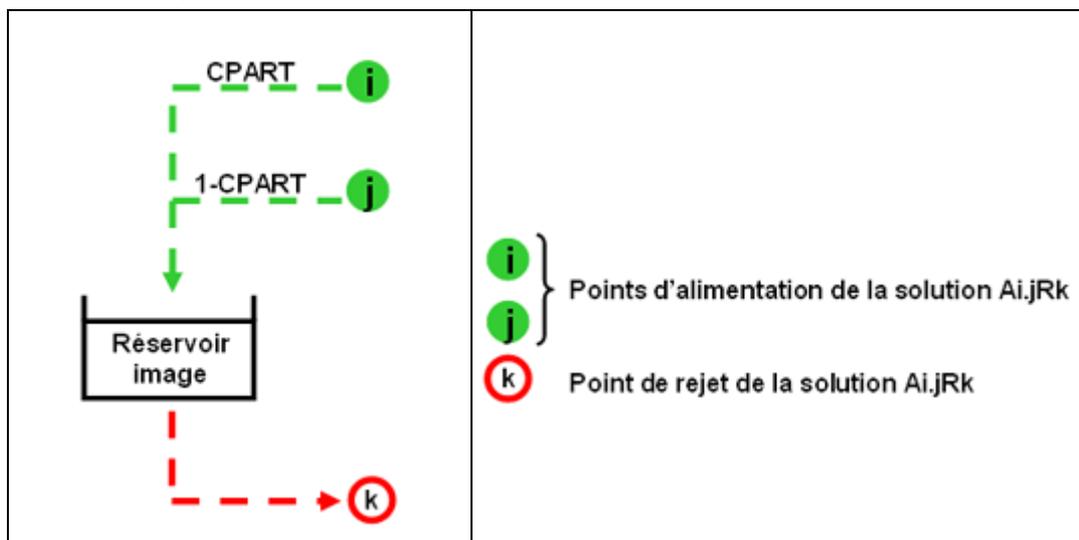


Figure 5.10 : Définition du coefficient de partage des alimentations

Lorsque CPART est égal à 1 (respectivement 0), l'alimentation provient entièrement du point i (respectivement j).

Dans un premier temps, la valeur de CPART a été déterminée pour chaque solution par optimisation avec les autres paramètres du modèle.

5.5.1.2. Notation

Dans cette série de tests, une solution sera désignée par $A_{i,jRk}$, i et j désignant les deux points d'alimentation du réservoir image et k le point de rejet.

Nous avons testé l'ensemble des combinaisons possibles des points d'alimentation et de rejet.

5.5.2. Performances sur l'échantillon de bassins versants de référence – Comparaison avec le cas à alimentation et rejet uniques

Le Tableau 5.6 présente le classement de l'ensemble des solutions à alimentation et rejets uniques et à deux alimentations et un rejet.

Rang	Solution	C2MQ	CPART	Ecart-type
1	A11.14R11	59.4	0.3	0.33
2	A3.14R11	59.3	0.5	0.35
2	A1.14R11	59.3	0.5	0.37
2	A8.14R11	59.3	0.5	0.31
3	A8.11R11	59.1	0.5	0.32
3	A11.14R7	59.1	0.3	0.33
3	A3.11R11	59.1	0.5	0.29
4	A3.14R7	59.0	0.5	0.35
4	A1.14R7	59.0	0.5	0.37
4	A1.11R11	59.0	0.5	0.31
4	A3.8R11	59.0	0.5	0.36
5	A1.8R11	58.9	0.5	0.33
5	A1.3R11	58.9	0.4	0.29
6	A8.14R7	58.8	0.5	0.32
6	A8.11R7	58.8	0.5	0.31
7	A3.11R7	58.7	0.5	0.29
7	A3.8R7	58.7	0.5	0.36
8	A1.11R7	58.6	0.5	0.31
8	A1.8R7	58.6	0.5	0.32
8	A1.3R7	58.6	0.4	0.29
9	A3R11	58.5	-	-
9	A8R11	58.5	-	-
10	A1R11	58.4	-	-

a) C2MQ

Rang	Solution	C2MVQ	CPART	Ecart-type
1	A8.14R11	66.1	0.5	0.31
1	A1.14R11	66.1	0.5	0.37
2	A3.14R11	66.0	0.5	0.35
2	A11.14R11	66.0	0.3	0.33
2	A8.11R11	66.0	0.5	0.32
3	A3.11R11	65.9	0.5	0.29
4	A1.11R11	65.8	0.5	0.31
4	A3.8R11	65.8	0.5	0.36
4	A1.8R11	65.8	0.5	0.33
5	A1.3R11	65.7	0.4	0.29
5	A3.14R7	65.7	0.5	0.35
5	A1.14R7	65.7	0.5	0.37
5	A11.14R7	65.7	0.3	0.33
6	A8.11R7	65.6	0.5	0.31
7	A3.11R7	65.5	0.5	0.29
7	A8.14R7	65.5	0.5	0.32
7	A3.8R7	65.5	0.5	0.36
8	A1.11R7	65.4	0.5	0.31
8	A1.8R7	65.4	0.5	0.32
8	A3R11	65.4	-	-
8	A8R11	65.4	-	-
8	A1.3R7	65.4	0.4	0.29
9	A1R11	65.3	-	-
9	A2R11	65.3	-	-
10	A5R11	65.2	-	-

b) C2MVQ

Rang	Solution	C2MLQ	CPART	Ecart-type
1	A8.14R11	64.2	0.5	0.31
2	A8.11R11	64.1	0.5	0.32
2	A1.14R11	64.1	0.5	0.37
2	A3.11R11	64.1	0.5	0.29
2	A3.14R11	64.1	0.5	0.35
3	A1.11R11	64.0	0.5	0.31
3	A3.8R11	64.0	0.5	0.36
3	A11.14R11	64.0	0.3	0.33
3	A1.3R11	64.0	0.4	0.29
3	A1.8R11	64.0	0.5	0.33
4	A3.14R7	63.7	0.5	0.35
4	A8.11R7	63.7	0.5	0.31
4	A1.14R7	63.7	0.5	0.37
4	A3R11	63.7	-	-
4	A3.11R7	63.7	0.5	0.29
4	A8R11	63.7	-	-
5	A8.14R7	63.6	0.5	0.32
5	A1R11	63.6	-	-
5	A11.14R7	63.6	0.3	0.33
5	A3.8R7	63.6	0.5	0.36
5	A2R11	63.6	-	-
6	A1.11R7	63.5	0.5	0.31
6	A1.8R7	63.5	0.5	0.32
6	A1.3R7	63.5	0.4	0.29
7	A5R11	63.4	-	-
7	A3R6	63.4	-	-
7	A8R6	63.4	-	-
8	A1R6	63.3	-	-
8	A2R6	63.3	-	-
9	A8R7	63.2	-	-
9	A3R7	63.2	-	-
9	A5R6	63.2	-	-
9	A1R7	63.2	-	-
10	A2R7	63.1	-	-

c) C2MLQ

Tableau 5.6 : Classement des solutions les plus performantes sur les 46 bassins versants de référence en contrôle pour les trois critères – CPART optimisé (en grisé les solutions à deux alimentations)

On note que le groupe de solutions les plus performantes est commun aux trois critères. En revanche, contrairement au cas des solutions à deux rejets, la plus forte amélioration (0,9 %) est obtenue lorsque l'accent est mis sur les crues (Tableau 5.6a). On note également que, pour cette gamme de débits, la première solution à alimentation et rejet uniques est classée en 9^{ème} position, ce qui indique que plusieurs solutions à deux alimentations sont plus performantes (ce qui est différent du cas à 2 rejets).

Il semble ainsi que la multiplication des points d'alimentation soit plus utile pour améliorer la simulation des crues.

- **Alimentation**

Dans le cas de solutions ayant une unique alimentation, on a constaté qu'il est préférable d'alimenter le réservoir image à partir des stocks d'eau pérennes et plus particulièrement à partir du réservoir de production.

Dans le cas de solutions à deux alimentations, ces points restent performants (A1, A3, A8). Cependant, on constate que la solution associant une alimentation à partir du réservoir de production et une alimentation à partir de la sortie du modèle est classée parmi les plus performantes, alors que l'alimentation à partir de la sortie donnait de faibles performances individuellement.

- **Rejet**

L'introduction d'une alimentation supplémentaire n'influence pas les points de rejet les plus performants qui restent ceux de la branche d'écoulement indirect (R7 et R11) et les moins performants, qui restent ceux situés dans la partie de production (R3).

Les résultats indiquent que la détermination du point de rejet semble être plus importante que celle du point d'alimentation. On constate en effet que les rejets des solutions les plus performantes sont toujours les points R11 ou R7 situés dans la branche d'écoulement indirect alors que les points d'alimentation sont plus hétérogènes. Ainsi, la localisation des points d'alimentation influence moins les performances que celle du point de rejet. La disponibilité d'une quantité d'eau suffisante pour alimenter le réservoir image semble être une condition importante pour garantir de bonnes performances alors que dans le cas des rejets, la localisation influence plus fortement les performances.

5.5.3. Qu'apporte l'introduction d'un second point d'alimentation ?

5.5.3.1. En résumé

Les résultats précédents indiquent que l'introduction d'un point d'alimentation supplémentaire a des conséquences variables selon la gamme de débits considérée :

- Lorsque l'accent est mis sur les débits élevés, l'amélioration est la plus importante et atteint 0,9 %. Les points de rejet les plus intéressants restent ceux situés dans la branche d'écoulement indirect (R7 et R11). Les combinaisons d'alimentations les plus intéressantes sont hétérogènes. Contrairement aux solutions à alimentation unique, il apparaît ici qu'une alimentation à partir de la sortie du modèle s'avère intéressante en association avec un autre point d'alimentation. Pour la majorité des associations les plus performantes, la valeur moyenne du coefficient de partage est de 0,5, c'est-à-dire que chaque point d'alimentation fournit la moitié de la quantité d'eau prélevée en cas d'alimentation. Les écarts-types indiquent cependant que le coefficient de partage peut prendre des valeurs très différentes selon le bassin considéré. De même que pour les solutions à deux rejets, il peut être intéressant de fixer efficacement CPART afin de bénéficier des améliorations de ce type de solutions sans avoir de paramètre libre supplémentaire ;

- Lorsque l'accent est mis sur les débits faibles, l'amélioration apportée par une alimentation supplémentaire est plus modeste (0,5 %) et pas suffisamment significative pour justifier ce degré de sophistication.

5.5.3.2. Est-il possible d'éviter l'optimisation de CPART ?

De même que pour le cas des solutions à deux rejets, nous envisageons, dans ce paragraphe, de fixer le coefficient de partage.

Le Tableau 5.7 présente le classement des performances obtenues en fixant la valeur du coefficient de partage à sa valeur moyenne pour chaque solution.

Rang	Solution	C2MQ	CPART	Rang	Solution	C2MVQ	CPART	Rang	Solution	C2MLQ	CPART
1	A3.11R11	58.8	0.5	1	A8.14R11	65.6	0.5	1	A1.3R11	63.9	0.4
2	A1.3R11	58.7	0.4	1	A11.14R11	65.6	0.3	2	A3.8R11	63.8	0.5
2	A8.11R11	58.7	0.5	1	A3.8R11	65.6	0.5	3	A1.8R11	63.7	0.5
2	A3.8R11	58.7	0.5	2	A1.14R11	65.5	0.5	3	A3R11	63.7	-
3	A1.11R11	58.6	0.5	2	A1.3R11	65.5	0.4	3	A8R11	63.7	-
4	A1.8R11	58.5	0.5	2	A3.14R11	65.5	0.5	3	A3.11R11	63.7	0.5
4	A3R11	58.5	-	3	A1.8R11	65.4	0.5	4	A1R11	63.6	-
4	A8R11	58.5	-	3	A3R11	65.4	-	4	A1.11R11	63.6	0.5
5	A3.11R7	58.4	0.5	3	A8R11	65.4	-	4	A2R11	63.6	-
5	A3.14R11	58.4	0.5	4	A1R11	65.3	-	5	A8.11R11	63.5	0.5
5	A8.11R7	58.4	0.5	4	A2R11	65.3	-	6	A5R11	63.4	-
5	A1.3R7	58.4	0.4	5	A5R11	65.2	-	6	A1.3R7	63.4	0.4
5	A3.8R7	58.4	0.5	5	A11.14R7	65.2	0.3	6	A3.8R7	63.4	0.5
5	A1R11	58.4	-	5	A1.14R7	65.2	0.5	6	A3R6	63.4	-
6	A5R11	58.3	-	5	A8.14R7	65.2	0.5	6	A8R6	63.4	-
6	A2R11	58.3	-	6	A3.8R7	65.1	0.5	7	A1.8R7	63.3	0.5
6	A11.14R11	58.3	0.3	6	A1.3R7	65.1	0.4	7	A1R6	63.3	-
6	A1.14R11	58.3	0.5	6	A3.14R7	65.1	0.5	7	A2R6	63.3	-
6	A1.11R7	58.3	0.5	6	A3R6	65.1	-	8	A8R7	63.2	-
7	A8.14R11	58.2	0.5	7	A8R6	65.0	-	8	A3R7	63.2	-
7	A1.8R7	58.2	0.5	7	A1.8R7	65.0	0.5	8	A5R6	63.2	-
7	A3R7	58.2	-	7	A3R7	65.0	-	8	A3.11R7	63.2	0.5
8	A8R7	58.1	-	7	A8R7	65.0	-	8	A1R7	63.2	-
8	A3.14R7	58.1	0.5	7	A5R6	65.0	-	9	A2R7	63.1	-
9	A1R7	58.0	-	7	A1R6	65.0	-	9	A1.11R7	63.1	0.5
9	A5R7	58.0	-	8	A2R6	64.9	-	9	A8.11R7	63.1	0.5
9	A8.14R7	58.0	0.5	8	A1R7	64.9	-	10	A5R7	63.0	-
9	A3R6	58.0	-	9	A2R7	64.8	-	10	A4R11	63.0	-
10	A11.14R7	57.9	0.3	9	A5R7	64.8	-				
10	A2R7	57.9	-	9	A3.11R11	64.8	0.5				
10	A1.14R7	57.9	0.5	10	A8.11R11	64.7	0.5				
10	A8R6	57.9	-								

a) C2MQ

b) C2MVQ

c) C2MLQ

Tableau 5.7 : Classement des solutions les plus performantes à alimentation unique et double sur les 46 bassins versants de référence en contrôle pour les trois critères – CPART fixé (en grisé les solutions à deux alimentations)

Lorsque le coefficient de partage des alimentations est fixé à sa valeur moyenne pour chaque solution, les performances diminuent mais restent légèrement meilleures que celles des solutions à alimentation unique. Selon le critère considéré, l'amélioration apportée par la

seconde alimentation avec un coefficient de partage fixé sa valeur moyenne varie de 0,2 % à 0,3 %. Ces améliorations ne sont pas significatives et ne justifient pas l'ajout d'une alimentation supplémentaire. Les améliorations constatées peuvent uniquement concerner certains bassins. Nous vérifierons ce point au paragraphe suivant.

5.5.3.3. Les améliorations apportées par une seconde alimentation concernent-elles l'ensemble des bassins ?

Nous comparons dans ce paragraphe (Figure 5.11) les performances en contrôle bassin par bassin de la meilleure solution à alimentation unique (A3R11) avec la meilleure solution à deux alimentations (A11.14R11 pour le critère C2MQ et A8.14R11 pour les critères C2MVQ et C2MLQ). Le coefficient de partage est optimisé. Les performances sont calculées en contrôle.

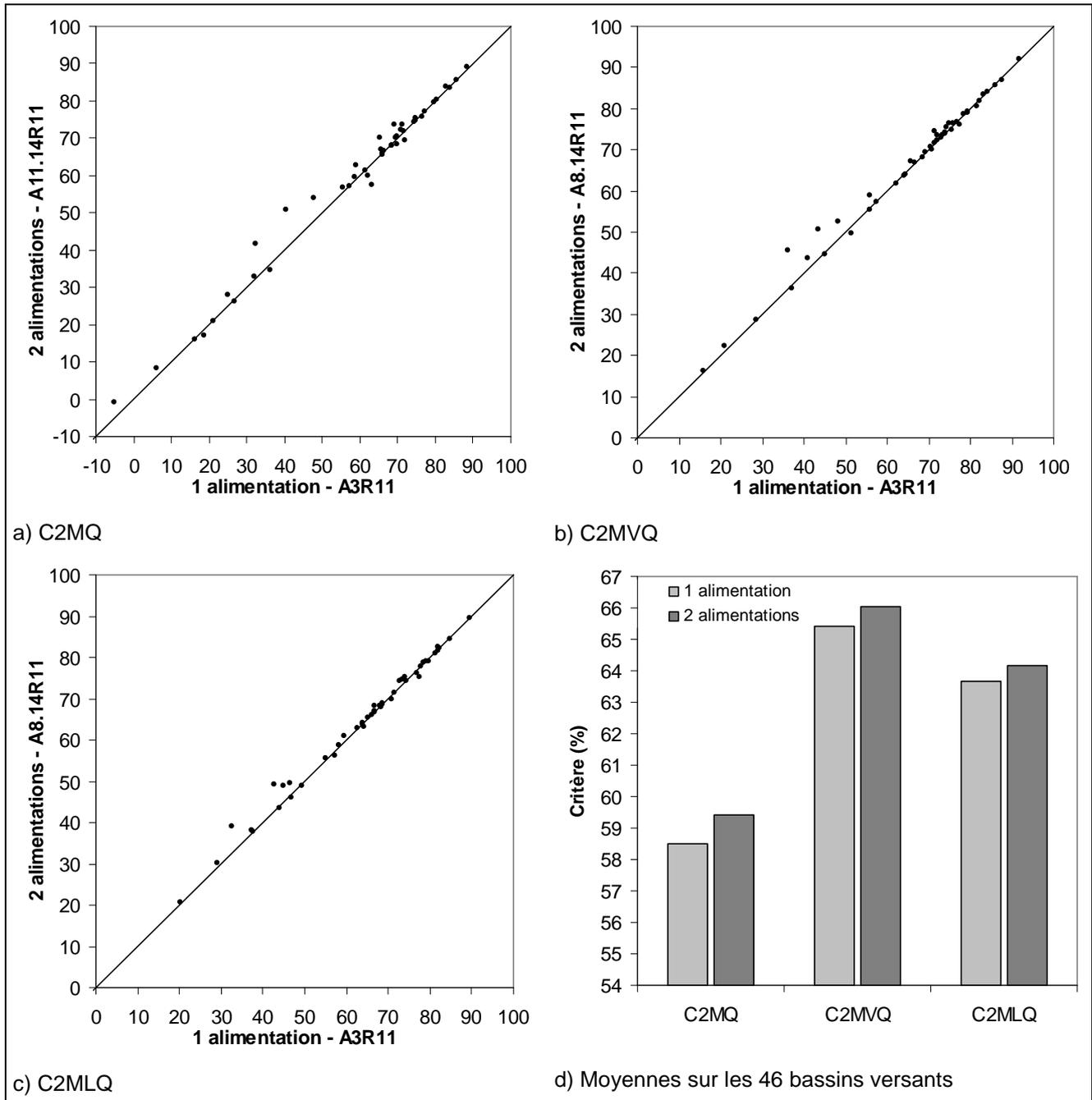


Figure 5.11 : Comparaison des performances de la meilleure solution à une alimentation et celles à deux alimentations en contrôle, bassin par bassin pour les trois critères (a, b, et c) et performances moyennes (d)

Les améliorations apportées par un second point d'alimentation ne sont pas systématiques sur l'ensemble des bassins versants. Elles sont significatives (supérieures ou égales à 1 %) pour 26 % à 35 % des bassins versants selon le critère considéré. On note que pour 11 % à 15 % des bassins, l'introduction d'une alimentation supplémentaire détériore significativement les performances (plus de 1 % de baisse).

5.6. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les solutions ainsi que les résultats de la prise en compte des barrages-réservoirs dans la structure du modèle GR4J. Notre approche a consisté à déterminer la meilleure façon d'insérer le réservoir image représentant les barrages-réservoirs dans le modèle. Pour cela nous avons systématiquement testé l'ensemble des points d'insertion de ce réservoir (alimentation et rejet) dans la structure initiale du modèle.

Les résultats de ces tests ont montré qu'il est préférable d'alimenter le réservoir image soit à partir du réservoir de production, soit à partir du haut de la branche d'écoulement direct. Des rejets dans la partie de transfert et en particulier dans le réservoir de transfert se sont révélés être les plus performants. La solution pour laquelle le réservoir image est alimenté à partir du réservoir de production et vidangé dans le réservoir de transfert s'est révélée être la meilleure solution en termes de performance, robustesse et fiabilité globalement sur l'ensemble des 46 bassins versants de référence.

Les meilleures solutions apportent des améliorations significatives des résultats par rapport à la version initiale du modèle, notamment sur la simulation des étiages confirmant donc l'intérêt de prendre en compte l'information sur les remplissages des ouvrages explicitement dans la structure d'un modèle pluie-débit global. Les meilleures solutions globales n'engendrent pas de complexification de la structure initiale du modèle puisqu'aucun ajout de paramètre n'a été nécessaire.

Les résultats ont également montré qu'une multiplication des points d'alimentation ou de rejet du réservoir image ne permet pas d'amélioration significative des performances sur l'ensemble des bassins par rapport au cas à rejet unique. En revanche, ce type de solutions peut permettre des améliorations pour certains bassins versants. Il est alors nécessaire de pouvoir déterminer dans quels cas ces solutions seront plus adaptées que des solutions à alimentation et rejet uniques. Ce point est abordé au chapitre suivant

En guise d'illustration des améliorations des simulations des débits apportées par la prise en compte des données de remplissage des barrages-réservoirs dans le modèle, nous présentons à la Figure 5.12 les hydrogrammes mesurés, et calculés sans prise en compte et avec prise en compte des barrages-réservoirs dans le modèle avec la meilleure solution identifiée précédemment (A3R11). Il s'agit ici d'un cas favorable puisque les améliorations apportées sont nettement au dessus de la moyenne des gains constatés sur l'échantillon.

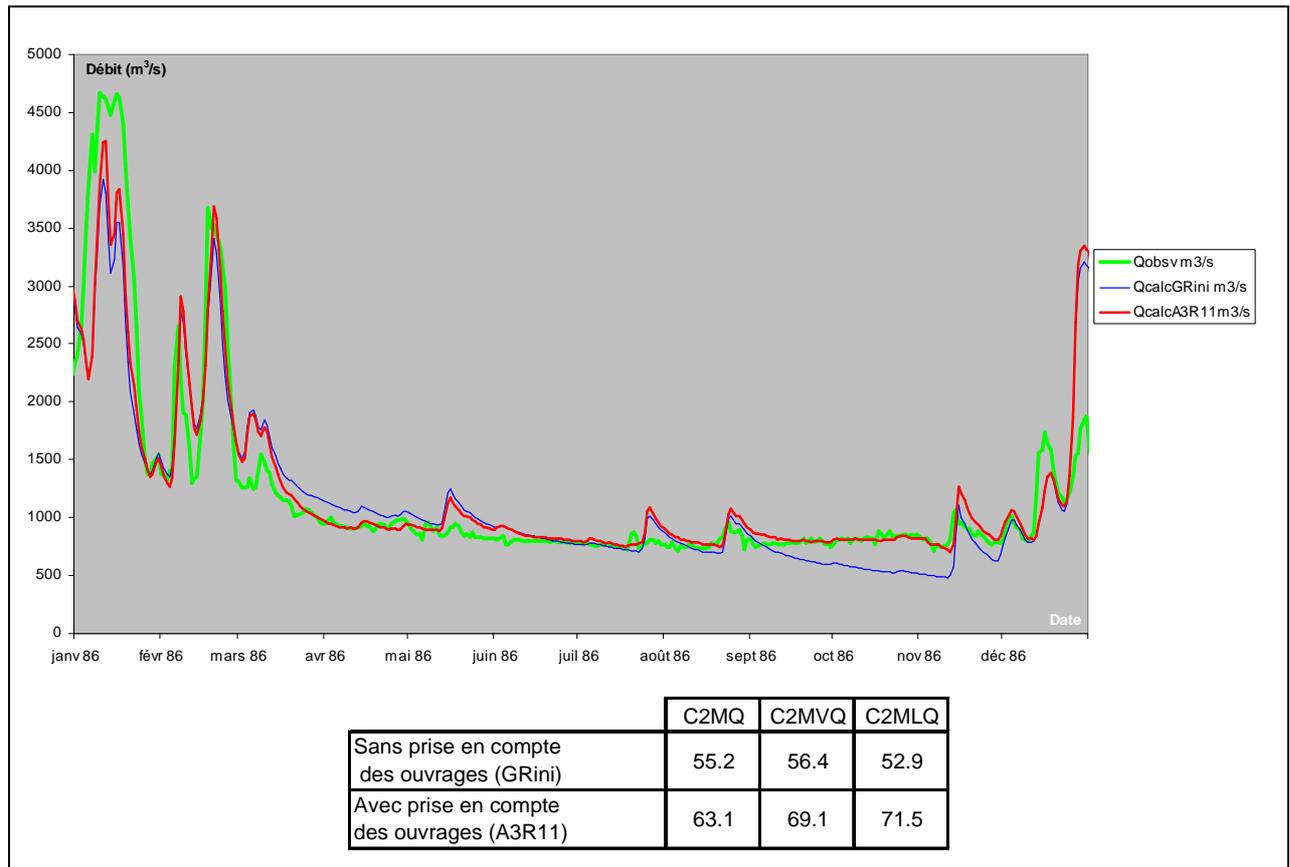


Figure 5.12 : Hydrogrammes mesuré, calculés sans prise en compte et avec prise en compte des barrages-réservoirs – Rivière São Francisco à Montante Barra do Jequitai (42030000, Brésil) - Contrôle

Les performances sur la période de contrôle (de 1977 à 1991) sont récapitulées dans le tableau en bas de la Figure 5.12 pour les deux versions du modèle.

Le graphique confirme la nette amélioration apportée par la prise en compte des barrages-réservoirs sur les débits faibles. Il montre également les très faibles progrès réalisés sur la restitution des crues qui peuvent soit être sous-estimées par les deux versions ou au contraire très fortement surestimées.

Chapitre 6

Chapitre 6.

Choix d'une solution de prise en compte des barrages-réservoirs adaptée au bassin versant

6.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté les résultats de la recherche d'une solution performante en les analysant globalement sur l'ensemble des 46 bassins versants de référence sans faire d'analyse bassin par bassin. Le but était de disposer d'une solution utilisable quel que soit le bassin. Or, cette solution ne donne pas forcément les meilleurs résultats pour chaque bassin pris individuellement.

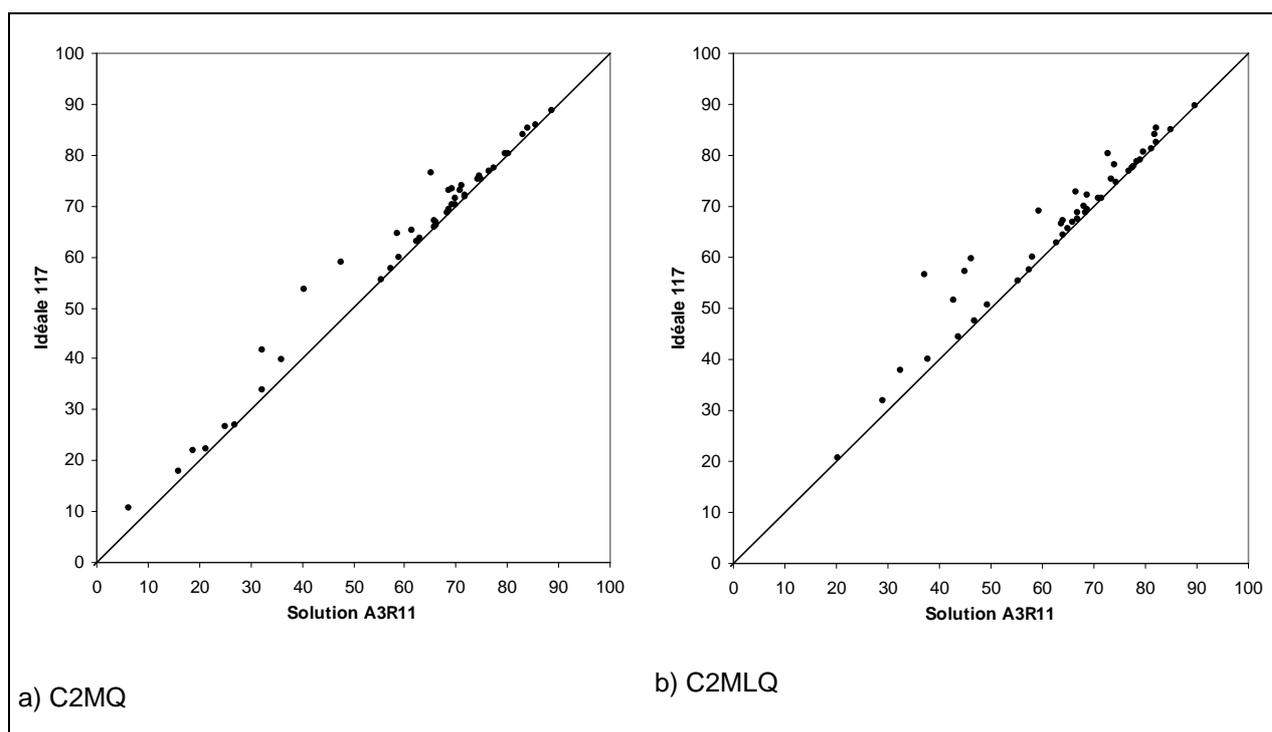


Figure 6.1 : Comparaison bassin par bassin des performances de la solution A3R11 et de la solution "idéale" - Critères C2MQ (a) et C2MLQ (b) en contrôle

Le graphique de la Figure 6.1 permet de comparer les performances (C2MQ et C2MLQ en contrôle) de la meilleure solution identifiée au chapitre 5 avec les performances de la solution "idéale" composée de la meilleure solution par bassin versant sur les 117 initialement testées (en contrôle).

On note que les performances de la solution A3R11 sont proches de celles de la solution "idéale" pour un certain nombre de bassins versants. Il existe cependant des bassins pour lesquels les performances de la solution "idéale" sont nettement meilleures que celles de la solution A3R11 notamment lorsque l'accent est mis sur les faibles débits (avec des différences de plus de 10 %). Ceci indique donc qu'il existe des solutions plus performantes que la solution A3R11 pour ces bassins versants.

Plus généralement, parmi l'ensemble des solutions testées, certaines peuvent se révéler performantes pour un bassin versant donné et peu performantes sur un autre bassin.

Les hydrogrammes de la Figure 6.2 sont issus de la simulation des débits du bassin versant de la rivière São Francisco à Pirapora (61 880 km²) au Brésil. Ils nous permettent d'illustrer le point précédent en comparant les résultats de simulation issus de la meilleure solution globale (A3R11) et de la meilleure solution spécifique à ce bassin versant (ici une alimentation avant la séparation des écoulements et un rejet dans la branche d'écoulement direct, A6R8).

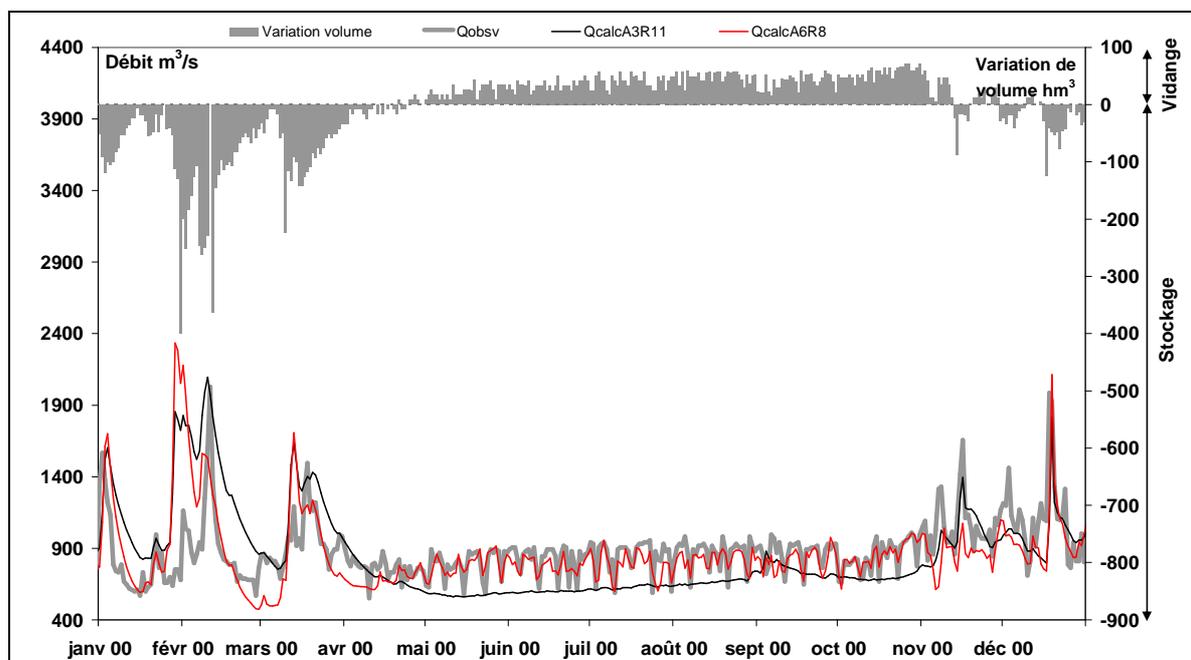


Figure 6.2 : Variations de volume mesurées et hydrogrammes mesuré et calculés avec prise en compte des barrages-réservoirs (solutions A3R11 et A6R8) – Rivière São Francisco à Pirapora (41135000, Brésil) – Contrôle

Les hydrogrammes calculés avec les deux solutions sont très différents, particulièrement pour les débits faibles. La solution A6R8 permet une meilleure restitution des variations de débit en étiage et notamment elle permet de mieux reproduire les variations rapides du débit dues aux lâchures.

Le degré d'influence de ce bassin versant (proximité de l'exutoire à l'ouvrage et importance des quantités stockées par rapport à l'écoulement) pourrait expliquer les différences de performances entre les solutions A3R11 et A6R8.

En effet, si ces deux solutions peuvent, à certains pas de temps, être semblables du point de vue de l'alimentation (du fait des reports), elles se distinguent en revanche par leur point de rejet. Pour A3R11, il a lieu dans le réservoir de transfert de la branche d'écoulement indirect (R11) alors que pour A6R8, il a lieu dans la branche d'écoulement direct avant l'hydrogramme unitaire (R8).

Cette différence va avoir des conséquences sur le transfert des rejets du réservoir image vers la sortie du modèle : pour A3R11 les variations rapides de volumes seront lissées par l'action du réservoir de transfert alors que pour A6R8 les rejets seront transférés plus directement vers la sortie du modèle après un délai introduit par l'hydrogramme unitaire.

Le rejet de la solution A6R8 est plus adapté à la simulation des débits que celui de A3R11 pour ce bassin versant.

Sur ce bassin, du fait de la proximité de l'ouvrage à l'exutoire, les lâchures sont très peu influencées par des processus pouvant avoir lieu sur la partie du bassin à l'aval de l'ouvrage. Le transfert y est donc prédominant. Dans la solution A6R8, le rejet du réservoir image semble cohérent avec cette caractéristique du bassin.

Cet exemple semble indiquer une possible dépendance du choix d'une solution à certaines caractéristiques physiques du bassin versant et des ouvrages.

Nous essayons dans ce chapitre d'expliquer les causes des différences de performances évoquées précédemment en étudiant bassin par bassin les solutions de prise en compte des barrages-réservoirs dans le modèle. L'objectif est de tenter de relier les règles optimales d'insertion du réservoir image à des caractéristiques physiques des bassins versants et des retenues. Si de telles règles sont établies, il sera possible de sélectionner la solution la plus adaptée à un bassin versant donné *a priori* en fonction de certaines de ses caractéristiques physiques et des barrages-réservoirs.

6.2. Démarche

Le choix d'une solution adaptée au bassin versant peut s'appuyer sur la détermination *a posteriori* de cette solution, c'est-à-dire en testant l'ensemble des solutions afin de sélectionner la meilleure pour le bassin versant considéré. Cela avait permis d'identifier la solution "idéale" présentée au chapitre précédent. Cette solution est composée des meilleures solutions identifiées en contrôle pour chaque bassin versant. Elle va servir de référence dans la démarche adoptée. L'objectif est d'étudier les possibilités de retrouver cette solution *a priori*, sans tester au préalable l'ensemble des solutions. Pour cela, nous cherchons s'il est possible de déterminer la solution la plus adaptée à un bassin grâce à des caractéristiques physiques des bassins et des barrages-réservoirs.

Dans la dernière partie de ce chapitre, au lieu de chercher à déterminer le type de solution le plus adapté à un bassin versant donné, nous tentons d'ajuster une solution au bassin. Pour cela, nous introduisons un coefficient exprimant la plus ou moins grande importance

accordée aux données de remplissage des barrages-réservoirs. Il sera présenté en détail au paragraphe 6.5.

Composition de la solution idéale

La Figure 6.3 donne la composition de la solution "idéale" déterminée sur l'échantillon des 46 bassins versants de référence en contrôle pour critères C2MQ et C2MLQ.

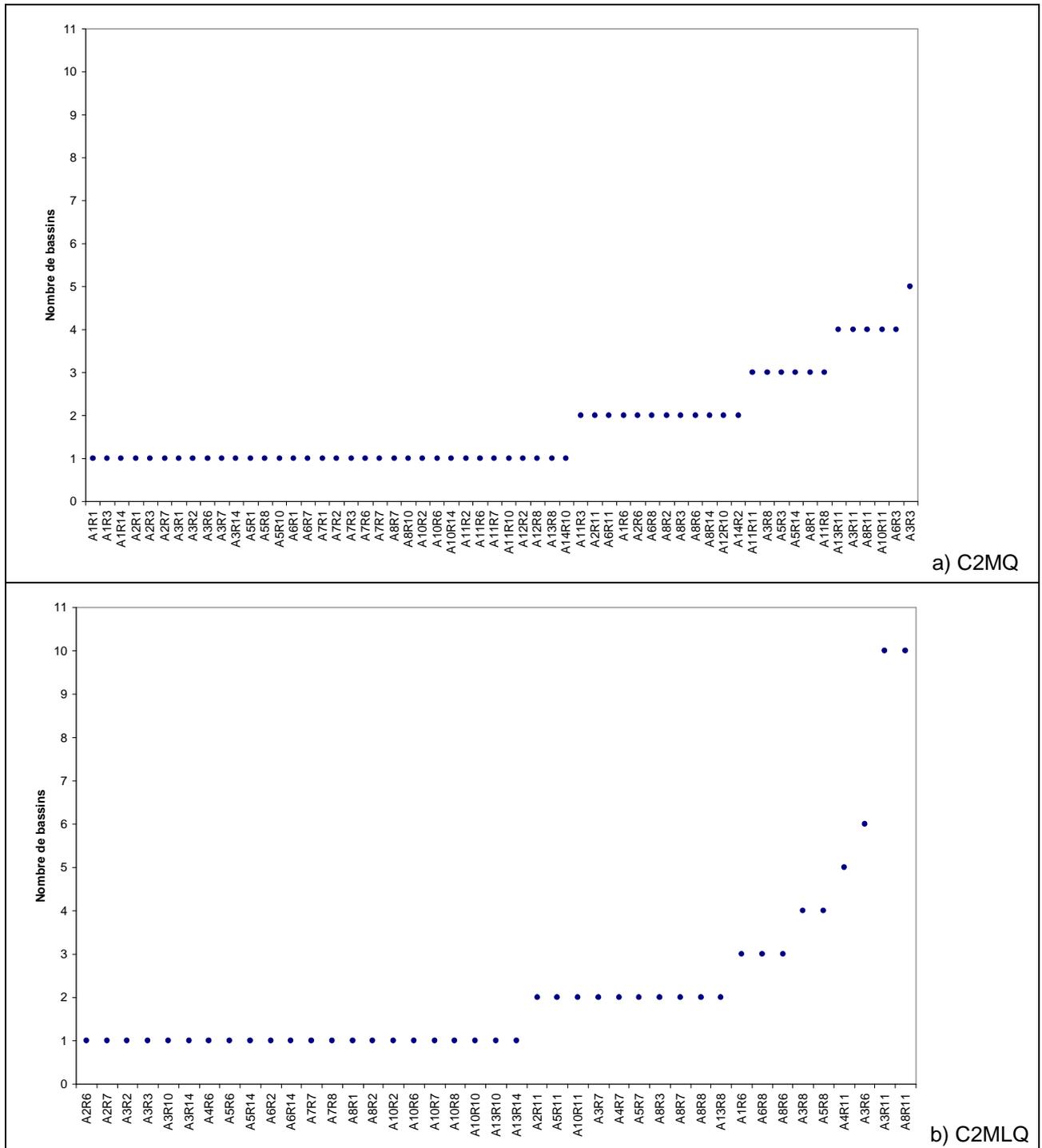


Figure 6.3 : Composition de la solution "idéale" pour les critères C2MQ et C2MLQ sur les 46 bassins versants en contrôle

Il y a des solutions qui ont des performances équivalentes sur certains bassins versants, ce qui explique que le total du nombre de solutions composant la solution idéale n'est pas égale à 46.

La composition de la solution idéale diffère selon le critère considéré. Lorsque l'accent est mis sur les débits forts, il y a 58 solutions sur les 117 qui sont classées premières sur au moins un des bassins versants alors que lorsque l'accent est mis sur les débits faibles, il y n'en reste que 41. On remarque également que pour ce critère, les solutions A3R11 et A8R11 sont classées premières sur 10 bassins versants alors que lorsqu'on considère le critère C2MQ, il n'y pas de solution qui se dégage de manière aussi marquée.

La Figure 6.4 donne la proportion de chaque alimentation et chaque rejet présents dans la solution idéale lorsque l'accent est mis sur les débits élevés (Figure 6.4a et Figure 6.4b) et sur les débits faibles (Figure 6.4c et Figure 6.4d).

La composition de la solution idéale en termes d'alimentation et de rejet est différente selon le critère considéré.

Alimentation

- Lorsque l'accent est mis sur les débits élevés, la solution idéale est composée à 70 % de points d'alimentation directement à partir du réservoir de production (A3) ou indirectement après les reports (A1, A2, A5, A6, A7 et A8) et à 30 % de points d'alimentation directement à partir du réservoir de transfert (A11) ou indirectement après les reports (A10, A12, A13 et A14). Les points d'alimentation à partir du réservoir de production (A3), à partir de la branche d'écoulement direct avant l'hydrogramme unitaire (A8) et à partir de réservoir de transfert (A11) sont les plus représentés dans la solution idéale ;
- Lorsque l'accent est mis sur les débits faibles, la proportion de points d'alimentation directement à partir du réservoir de production ou indirectement après les reports passe à 78 % alors que la proportion des points d'alimentation à partir du réservoir de transfert directement ou indirectement après les reports atteint 22 %.

Rejet

- Lorsque l'accent est mis sur les débits élevés, la solution idéale est composée à 50 % de points situés dans la partie supérieure du modèle avant la séparation des écoulements (R1, R2, R3 et R6), à 22 % de points situés sur la branche d'écoulement indirect (R7 et R11), à 19 % de points situés sur la branche d'écoulement direct (R8 et R10) et à 9 % du rejet en sortie du modèle (R14) ;

- Lorsque l'accent est mis sur les débits faibles, la solution idéale est composée à 34 % de points situés avant la séparation des écoulements (R1, R2, R3 et R6), à 32 % de points de la branche d'écoulement indirect (R7 et R11), à 24 % de points situés sur la branche d'écoulement direct (R8 et R10) et 10 % du rejet en sortie du modèle (R14).

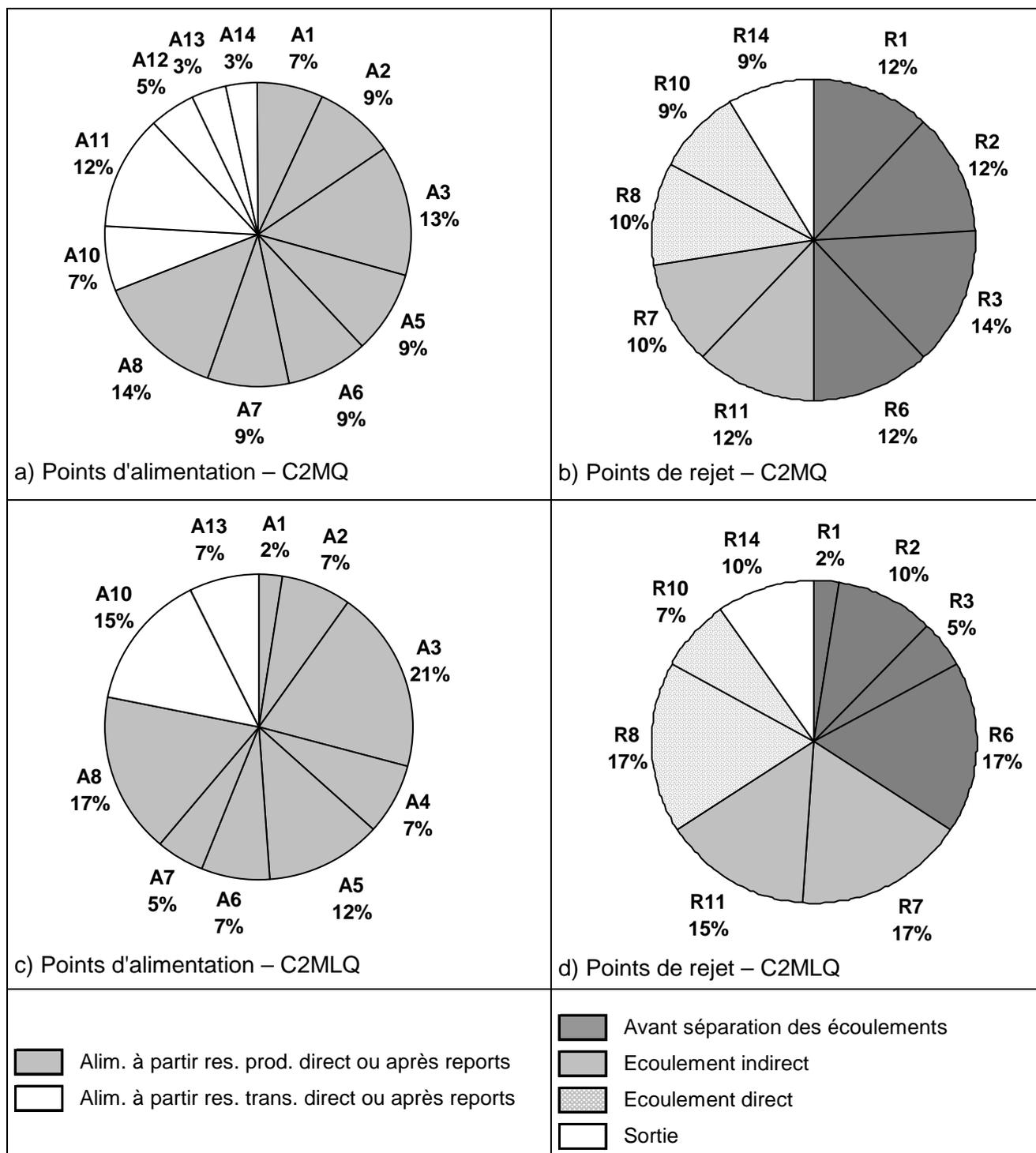


Figure 6.4 : Proportion des points d'alimentation et de rejet présents dans la solution idéale lorsque l'accent est mis sur les débits élevés (a, b) et sur les débits faibles (c, d)

Il est intéressant de constater que quasiment toutes les alimentations et l'ensemble des rejets sont représentés dans la solution idéale. Ceci semble confirmer qu'il y a une dépendance de la solution de prise en compte des barrages-réservoirs au bassin versant. Est-il possible d'expliquer cette dépendance ?

Dans le paragraphe suivant, nous tentons d'établir un lien entre la solution la plus adaptée à un bassin versant donné et certaines caractéristiques physiques du bassin et des barrages-réservoirs. L'objectif est d'essayer de confirmer et de généraliser, à l'ensemble des 46 bassins versants de référence, les observations faites en introduction pour le bassin versant du São Francisco à Pirapora.

6.3. Réduction du nombre de solutions analysées

Afin de faciliter l'analyse des résultats, nous allons nous focaliser sur un nombre réduit de solutions choisies parmi l'ensemble des 117 solutions testées précédemment.

Cette réduction est justifiée par la proximité des points d'alimentation et de rejet de certaines solutions ainsi que par les reports qui ont lieu en cas de manque d'eau et qui ont pour conséquence de rendre certaines solutions très proches.

Dans un premier temps, nous avons sélectionné certains points d'alimentation et de rejet parmi ceux qui se sont révélés être les plus performants globalement sur le sous-échantillon des 46 bassins versants de référence.

Compte tenu des reports, nous avons décidé de retenir trois points d'alimentation issus des cinq meilleurs repérés précédemment, ainsi que deux points de rejet également issus des quatre meilleurs points de rejet.

Nous avons choisi de ne pas conserver l'alimentation à partir du point après neutralisation de la pluie par l'évapotranspiration potentielle (A2) car cette option est proche de l'alimentation à partir de la pluie brute (A1). De même, l'alimentation à partir de la sortie du réservoir de production (A5) n'a pas été conservée car elle est proche de l'alimentation à partir du réservoir de production (A3).

Les alimentations à partir de la pluie brute (A1), du réservoir de production (A3) et de la branche d'écoulement direct avant l'hydrogramme unitaire (A8) ont donc été conservées.

Les rejets dans la branche d'écoulement indirect ont été conservés (R7 et R11).

Au total six solutions sur les 15 meilleures ont été conservées. En complément, nous avons ajouté à ces six solutions deux points d'alimentation et deux points de rejet qui ne figurent pas dans la liste des 15 solutions les plus performantes. Ces alimentations et rejets complémentaires permettent alors de balayer différents points d'insertion remarquables du réservoir image. Parmi cette sélection de solutions, nous avons conservé des solutions malgré les mauvaises performances moyennes obtenues. Nous avons choisi de les garder

car, même si elles se révèlent globalement peu performantes sur l'ensemble des bassins testés, elles peuvent donner de bons résultats sur certains bassins.

Les alimentations complémentaires sont situées au niveau du réservoir de transfert (A11) et à la sortie du modèle (A14). Les points de rejet sont situés au niveau du réservoir de production (R3), sur la branche d'écoulement direct avant l'hydrogramme unitaire (R8) et en sortie du modèle (R14).

Le nombre total de solutions conservées pour analyser les résultats est donc de 25 au lieu des 117 initiales (Figure 6.5). Nous avons conservé la numérotation précédente des points d'alimentation et de rejet pour plus de clarté.

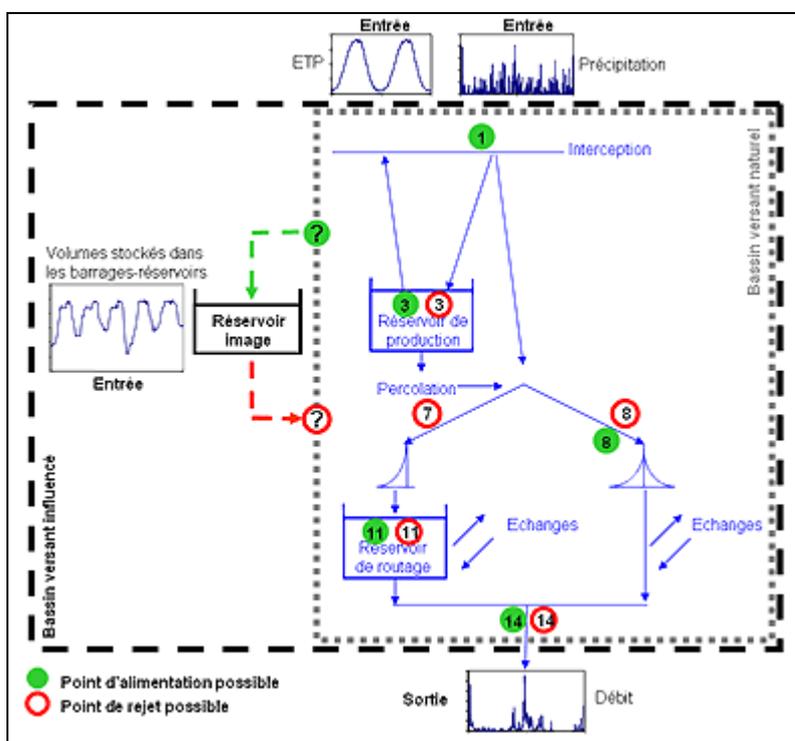


Figure 6.5 : Sélection de 25 solutions d'insertion du réservoir image parmi les 117 testées initialement

6.4. Existe-t-il un lien entre un type de solution et certaines caractéristiques des bassins versants et des ouvrages ?

6.4.1. Solutions à alimentation et rejet uniques

En première approche, pour répondre à la question posée en titre de cette partie, nous avons analysé les performances moyennes de la sélection des 25 solutions à alimentation et rejet uniques sur les 46 bassins versants de référence classés selon les descripteurs présentés au chapitre 4 (cf. 4.4.3.3). L'objectif est de voir quelles classes de bassins

versants sont les plus sensibles à la prise en compte des barrages-réservoirs et s'il y a une différence dans les types de solutions les plus performantes.

Pour mémoire, les descripteurs retenus sont :

- i1 décrivant l'éloignement du ou des barrages-réservoirs par rapport à l'exutoire ;
- i2 reflétant l'importance des quantités d'eau pouvant être stockées par rapport aux quantités écoulées ;
- i3 caractérisant l'importance de la surface du bassin contrôlé par rapport à la surface totale ;
- i4 décrivant la variabilité temporelle des chroniques de volumes.

Le Tableau 6.1 et le Tableau 6.2 présentent les performances en contrôle de la sélection de 25 solutions pour chacun des descripteurs des bassins versants. Les performances présentées sont calculées sur les débits (critère C2MQ, Tableau 6.1) et sur les logarithmes des débits (critère C2MLQ, Tableau 6.2) afin de donner plus d'importance aux crues ou aux étiages. Les bassins ont été scindés en deux groupes de même effectif selon la valeur des descripteurs (inférieur ou supérieur à la médiane). Le groupe des bassins versants ayant des descripteurs inférieurs à la médiane (a, c, e, g) correspond à des bassins moins influencés que ceux du groupe ayant des descripteurs supérieurs à la médiane (b, d, f, h). Plus ces indices ont des valeurs importantes, plus le barrage-réservoir devrait avoir un impact sur les écoulements. Les performances du modèle initial pour chaque groupe sont rappelées en bas des tableaux. Les performances des meilleures solutions sont en gras.

Les résultats indiquent que les débits des bassins versants du groupe dont les descripteurs sont inférieurs à la médiane, c'est-à-dire ceux qui sont les moins influencés, sont mieux simulés par l'ensemble des solutions testées ainsi que par le modèle ne prenant pas en compte les barrages-réservoirs. En revanche, les bassins les plus influencés ont les plus fortes améliorations de performances surtout lorsque l'accent est mis sur les faibles débits.

Les meilleures solutions restent, pour les deux critères, celles alimentées par le réservoir de production (A3 directement ou suite à des reports par exemple A8) et rejetant dans le réservoir de transfert (R11) quel que soit l'indice et la classe d'indice. Contrairement à ce que nous avons observé pour le bassin de la rivière São Francisco à Pirapora, la solution ayant un rejet dans la branche d'écoulement indirect (A3R11) reste la plus performante même pour les bassins versants ayant des ouvrages proches de l'exutoire ($i1 >$ médiane).

<p>i1<</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>61.6</td> <td>62.0</td> <td>62.0</td> <td>60.2</td> <td>57.9</td> <td>1.74</td> <td>60.7</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>62.7</td> <td>63.0</td> <td>62.8</td> <td>61.3</td> <td>59.0</td> <td>1.68</td> <td>61.8</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>62.1</td> <td>62.4</td> <td>62.2</td> <td>60.6</td> <td>58.5</td> <td>1.67</td> <td>61.2</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>62.8</td> <td>63.1</td> <td>62.9</td> <td>61.4</td> <td>59.1</td> <td>1.67</td> <td>61.9</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>60.9</td> <td>61.3</td> <td>61.1</td> <td>59.4</td> <td>57.2</td> <td>1.70</td> <td>60.0</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>0.78</td> <td>0.77</td> <td>0.74</td> <td>0.81</td> <td>0.80</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>62.0</td> <td>62.4</td> <td>62.2</td> <td>60.6</td> <td>58.4</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Ini</td> <td>62.3</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>a) i1 < médiane, amélioration max. 0,8</p>		A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	61.6	62.0	62.0	60.2	57.9	1.74	60.7	R7	62.7	63.0	62.8	61.3	59.0	1.68	61.8	R8	62.1	62.4	62.2	60.6	58.5	1.67	61.2	R11	62.8	63.1	62.9	61.4	59.1	1.67	61.9	R14	60.9	61.3	61.1	59.4	57.2	1.70	60.0	σ	0.78	0.77	0.74	0.81	0.80			Moy	62.0	62.4	62.2	60.6	58.4					Ini	62.3					<p>i1></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>49.2</td> <td>49.2</td> <td>49.5</td> <td>48.7</td> <td>46.5</td> <td>1.24</td> <td>48.6</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>53.3</td> <td>53.4</td> <td>53.4</td> <td>52.7</td> <td>49.3</td> <td>1.76</td> <td>52.4</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>52.4</td> <td>52.4</td> <td>52.2</td> <td>51.8</td> <td>48.1</td> <td>1.84</td> <td>51.4</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>53.9</td> <td>53.9</td> <td>54.0</td> <td>53.5</td> <td>49.7</td> <td>1.85</td> <td>53.0</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>52.5</td> <td>52.5</td> <td>51.9</td> <td>51.9</td> <td>47.2</td> <td>2.24</td> <td>51.2</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>1.82</td> <td>1.82</td> <td>1.73</td> <td>1.80</td> <td>1.36</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>52.2</td> <td>52.3</td> <td>52.2</td> <td>51.7</td> <td>48.2</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Ini</td> <td>49.2</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>b) i1 > médiane, amélioration max. 4,8</p>		A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	49.2	49.2	49.5	48.7	46.5	1.24	48.6	R7	53.3	53.4	53.4	52.7	49.3	1.76	52.4	R8	52.4	52.4	52.2	51.8	48.1	1.84	51.4	R11	53.9	53.9	54.0	53.5	49.7	1.85	53.0	R14	52.5	52.5	51.9	51.9	47.2	2.24	51.2	σ	1.82	1.82	1.73	1.80	1.36			Moy	52.2	52.3	52.2	51.7	48.2					Ini	49.2				
	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	61.6	62.0	62.0	60.2	57.9	1.74	60.7																																																																																																																																										
R7	62.7	63.0	62.8	61.3	59.0	1.68	61.8																																																																																																																																										
R8	62.1	62.4	62.2	60.6	58.5	1.67	61.2																																																																																																																																										
R11	62.8	63.1	62.9	61.4	59.1	1.67	61.9																																																																																																																																										
R14	60.9	61.3	61.1	59.4	57.2	1.70	60.0																																																																																																																																										
σ	0.78	0.77	0.74	0.81	0.80																																																																																																																																												
Moy	62.0	62.4	62.2	60.6	58.4																																																																																																																																												
		Ini	62.3																																																																																																																																														
	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	49.2	49.2	49.5	48.7	46.5	1.24	48.6																																																																																																																																										
R7	53.3	53.4	53.4	52.7	49.3	1.76	52.4																																																																																																																																										
R8	52.4	52.4	52.2	51.8	48.1	1.84	51.4																																																																																																																																										
R11	53.9	53.9	54.0	53.5	49.7	1.85	53.0																																																																																																																																										
R14	52.5	52.5	51.9	51.9	47.2	2.24	51.2																																																																																																																																										
σ	1.82	1.82	1.73	1.80	1.36																																																																																																																																												
Moy	52.2	52.3	52.2	51.7	48.2																																																																																																																																												
		Ini	49.2																																																																																																																																														
<p>i2<</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>62.1</td> <td>62.4</td> <td>62.2</td> <td>61.4</td> <td>60.1</td> <td>0.92</td> <td>61.6</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>63.6</td> <td>63.9</td> <td>63.6</td> <td>62.8</td> <td>61.7</td> <td>0.87</td> <td>63.1</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>62.4</td> <td>62.7</td> <td>62.5</td> <td>61.8</td> <td>60.7</td> <td>0.80</td> <td>62.0</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>63.8</td> <td>64.1</td> <td>63.9</td> <td>63.1</td> <td>61.9</td> <td>0.91</td> <td>63.4</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>62.8</td> <td>63.1</td> <td>62.3</td> <td>62.1</td> <td>60.3</td> <td>1.12</td> <td>62.1</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>0.76</td> <td>0.75</td> <td>0.80</td> <td>0.69</td> <td>0.83</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>62.9</td> <td>63.2</td> <td>62.9</td> <td>62.3</td> <td>60.9</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Ini</td> <td>62.5</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>c) i2 < médiane, amélioration max. 1,6</p>		A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	62.1	62.4	62.2	61.4	60.1	0.92	61.6	R7	63.6	63.9	63.6	62.8	61.7	0.87	63.1	R8	62.4	62.7	62.5	61.8	60.7	0.80	62.0	R11	63.8	64.1	63.9	63.1	61.9	0.91	63.4	R14	62.8	63.1	62.3	62.1	60.3	1.12	62.1	σ	0.76	0.75	0.80	0.69	0.83			Moy	62.9	63.2	62.9	62.3	60.9					Ini	62.5					<p>i2></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>48.7</td> <td>48.8</td> <td>49.3</td> <td>47.5</td> <td>44.2</td> <td>2.05</td> <td>47.7</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>52.4</td> <td>52.5</td> <td>52.6</td> <td>51.2</td> <td>46.6</td> <td>2.56</td> <td>51.1</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>52.1</td> <td>52.1</td> <td>52.0</td> <td>50.6</td> <td>45.9</td> <td>2.68</td> <td>50.5</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>52.9</td> <td>52.9</td> <td>53.1</td> <td>51.8</td> <td>47.0</td> <td>2.60</td> <td>51.5</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>50.6</td> <td>50.6</td> <td>50.7</td> <td>49.2</td> <td>44.2</td> <td>2.79</td> <td>49.1</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>1.69</td> <td>1.67</td> <td>1.54</td> <td>1.72</td> <td>1.30</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>51.4</td> <td>51.4</td> <td>51.5</td> <td>50.1</td> <td>45.6</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Ini</td> <td>49.0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>d) i2 > médiane, amélioration max. 4,1</p>		A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	48.7	48.8	49.3	47.5	44.2	2.05	47.7	R7	52.4	52.5	52.6	51.2	46.6	2.56	51.1	R8	52.1	52.1	52.0	50.6	45.9	2.68	50.5	R11	52.9	52.9	53.1	51.8	47.0	2.60	51.5	R14	50.6	50.6	50.7	49.2	44.2	2.79	49.1	σ	1.69	1.67	1.54	1.72	1.30			Moy	51.4	51.4	51.5	50.1	45.6					Ini	49.0				
	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	62.1	62.4	62.2	61.4	60.1	0.92	61.6																																																																																																																																										
R7	63.6	63.9	63.6	62.8	61.7	0.87	63.1																																																																																																																																										
R8	62.4	62.7	62.5	61.8	60.7	0.80	62.0																																																																																																																																										
R11	63.8	64.1	63.9	63.1	61.9	0.91	63.4																																																																																																																																										
R14	62.8	63.1	62.3	62.1	60.3	1.12	62.1																																																																																																																																										
σ	0.76	0.75	0.80	0.69	0.83																																																																																																																																												
Moy	62.9	63.2	62.9	62.3	60.9																																																																																																																																												
		Ini	62.5																																																																																																																																														
	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	48.7	48.8	49.3	47.5	44.2	2.05	47.7																																																																																																																																										
R7	52.4	52.5	52.6	51.2	46.6	2.56	51.1																																																																																																																																										
R8	52.1	52.1	52.0	50.6	45.9	2.68	50.5																																																																																																																																										
R11	52.9	52.9	53.1	51.8	47.0	2.60	51.5																																																																																																																																										
R14	50.6	50.6	50.7	49.2	44.2	2.79	49.1																																																																																																																																										
σ	1.69	1.67	1.54	1.72	1.30																																																																																																																																												
Moy	51.4	51.4	51.5	50.1	45.6																																																																																																																																												
		Ini	49.0																																																																																																																																														
<p>i3<</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>60.2</td> <td>60.5</td> <td>60.2</td> <td>59.7</td> <td>57.2</td> <td>1.34</td> <td>59.6</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>61.8</td> <td>62.0</td> <td>61.7</td> <td>61.2</td> <td>59.1</td> <td>1.19</td> <td>61.2</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>60.0</td> <td>60.3</td> <td>59.9</td> <td>59.5</td> <td>57.3</td> <td>1.21</td> <td>59.4</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>61.8</td> <td>62.0</td> <td>61.7</td> <td>61.3</td> <td>59.1</td> <td>1.21</td> <td>61.2</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>59.7</td> <td>60.0</td> <td>59.1</td> <td>59.1</td> <td>56.2</td> <td>1.51</td> <td>58.8</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>1.01</td> <td>0.98</td> <td>1.17</td> <td>1.01</td> <td>1.27</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>60.7</td> <td>61.0</td> <td>60.5</td> <td>60.2</td> <td>57.8</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Ini</td> <td>60.4</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>e) i3 < médiane, amélioration max. 1,6</p>		A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	60.2	60.5	60.2	59.7	57.2	1.34	59.6	R7	61.8	62.0	61.7	61.2	59.1	1.19	61.2	R8	60.0	60.3	59.9	59.5	57.3	1.21	59.4	R11	61.8	62.0	61.7	61.3	59.1	1.21	61.2	R14	59.7	60.0	59.1	59.1	56.2	1.51	58.8	σ	1.01	0.98	1.17	1.01	1.27			Moy	60.7	61.0	60.5	60.2	57.8					Ini	60.4					<p>i3></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>50.6</td> <td>50.7</td> <td>51.2</td> <td>49.3</td> <td>47.1</td> <td>1.65</td> <td>49.8</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>54.2</td> <td>54.4</td> <td>54.5</td> <td>52.8</td> <td>49.2</td> <td>2.23</td> <td>53.0</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>54.5</td> <td>54.6</td> <td>54.5</td> <td>52.9</td> <td>49.3</td> <td>2.26</td> <td>53.2</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>54.9</td> <td>55.0</td> <td>55.2</td> <td>53.6</td> <td>49.8</td> <td>2.28</td> <td>53.7</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>53.7</td> <td>53.8</td> <td>53.9</td> <td>52.1</td> <td>48.3</td> <td>2.41</td> <td>52.4</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>1.75</td> <td>1.74</td> <td>1.55</td> <td>1.69</td> <td>1.07</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>53.6</td> <td>53.7</td> <td>53.9</td> <td>52.2</td> <td>48.7</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Ini</td> <td>51.1</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>f) i3 > médiane, amélioration max. 4,1</p>		A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	50.6	50.7	51.2	49.3	47.1	1.65	49.8	R7	54.2	54.4	54.5	52.8	49.2	2.23	53.0	R8	54.5	54.6	54.5	52.9	49.3	2.26	53.2	R11	54.9	55.0	55.2	53.6	49.8	2.28	53.7	R14	53.7	53.8	53.9	52.1	48.3	2.41	52.4	σ	1.75	1.74	1.55	1.69	1.07			Moy	53.6	53.7	53.9	52.2	48.7					Ini	51.1				
	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	60.2	60.5	60.2	59.7	57.2	1.34	59.6																																																																																																																																										
R7	61.8	62.0	61.7	61.2	59.1	1.19	61.2																																																																																																																																										
R8	60.0	60.3	59.9	59.5	57.3	1.21	59.4																																																																																																																																										
R11	61.8	62.0	61.7	61.3	59.1	1.21	61.2																																																																																																																																										
R14	59.7	60.0	59.1	59.1	56.2	1.51	58.8																																																																																																																																										
σ	1.01	0.98	1.17	1.01	1.27																																																																																																																																												
Moy	60.7	61.0	60.5	60.2	57.8																																																																																																																																												
		Ini	60.4																																																																																																																																														
	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	50.6	50.7	51.2	49.3	47.1	1.65	49.8																																																																																																																																										
R7	54.2	54.4	54.5	52.8	49.2	2.23	53.0																																																																																																																																										
R8	54.5	54.6	54.5	52.9	49.3	2.26	53.2																																																																																																																																										
R11	54.9	55.0	55.2	53.6	49.8	2.28	53.7																																																																																																																																										
R14	53.7	53.8	53.9	52.1	48.3	2.41	52.4																																																																																																																																										
σ	1.75	1.74	1.55	1.69	1.07																																																																																																																																												
Moy	53.6	53.7	53.9	52.2	48.7																																																																																																																																												
		Ini	51.1																																																																																																																																														
<p>i4<</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>58.1</td> <td>58.0</td> <td>58.4</td> <td>57.0</td> <td>54.3</td> <td>1.68</td> <td>57.2</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>60.2</td> <td>60.0</td> <td>60.1</td> <td>59.1</td> <td>55.4</td> <td>2.05</td> <td>58.9</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>59.5</td> <td>59.3</td> <td>59.2</td> <td>58.1</td> <td>54.4</td> <td>2.16</td> <td>58.1</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>60.3</td> <td>60.2</td> <td>60.3</td> <td>59.3</td> <td>55.4</td> <td>2.10</td> <td>59.1</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>58.1</td> <td>58.0</td> <td>58.1</td> <td>56.7</td> <td>53.0</td> <td>2.20</td> <td>56.8</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>1.06</td> <td>1.06</td> <td>0.98</td> <td>1.18</td> <td>0.98</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>59.2</td> <td>59.1</td> <td>59.2</td> <td>58.0</td> <td>54.5</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Ini</td> <td>58.4</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>g) i4 < médiane, amélioration max. 1,9</p>		A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	58.1	58.0	58.4	57.0	54.3	1.68	57.2	R7	60.2	60.0	60.1	59.1	55.4	2.05	58.9	R8	59.5	59.3	59.2	58.1	54.4	2.16	58.1	R11	60.3	60.2	60.3	59.3	55.4	2.10	59.1	R14	58.1	58.0	58.1	56.7	53.0	2.20	56.8	σ	1.06	1.06	0.98	1.18	0.98			Moy	59.2	59.1	59.2	58.0	54.5					Ini	58.4					<p>i4></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>52.7</td> <td>53.2</td> <td>53.1</td> <td>51.9</td> <td>50.0</td> <td>1.29</td> <td>52.2</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>55.8</td> <td>56.3</td> <td>56.1</td> <td>55.0</td> <td>53.0</td> <td>1.37</td> <td>55.2</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>55.1</td> <td>55.5</td> <td>55.2</td> <td>54.3</td> <td>52.2</td> <td>1.32</td> <td>54.5</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>56.4</td> <td>56.8</td> <td>56.7</td> <td>55.6</td> <td>53.4</td> <td>1.40</td> <td>55.8</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>55.3</td> <td>55.8</td> <td>54.9</td> <td>54.6</td> <td>51.4</td> <td>1.70</td> <td>54.4</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>1.43</td> <td>1.41</td> <td>1.37</td> <td>1.39</td> <td>1.34</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>55.0</td> <td>55.5</td> <td>55.2</td> <td>54.3</td> <td>52.0</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Ini</td> <td>53.1</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>h) i4 > médiane, amélioration max. 3,7</p>		A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	52.7	53.2	53.1	51.9	50.0	1.29	52.2	R7	55.8	56.3	56.1	55.0	53.0	1.37	55.2	R8	55.1	55.5	55.2	54.3	52.2	1.32	54.5	R11	56.4	56.8	56.7	55.6	53.4	1.40	55.8	R14	55.3	55.8	54.9	54.6	51.4	1.70	54.4	σ	1.43	1.41	1.37	1.39	1.34			Moy	55.0	55.5	55.2	54.3	52.0					Ini	53.1				
	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	58.1	58.0	58.4	57.0	54.3	1.68	57.2																																																																																																																																										
R7	60.2	60.0	60.1	59.1	55.4	2.05	58.9																																																																																																																																										
R8	59.5	59.3	59.2	58.1	54.4	2.16	58.1																																																																																																																																										
R11	60.3	60.2	60.3	59.3	55.4	2.10	59.1																																																																																																																																										
R14	58.1	58.0	58.1	56.7	53.0	2.20	56.8																																																																																																																																										
σ	1.06	1.06	0.98	1.18	0.98																																																																																																																																												
Moy	59.2	59.1	59.2	58.0	54.5																																																																																																																																												
		Ini	58.4																																																																																																																																														
	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	52.7	53.2	53.1	51.9	50.0	1.29	52.2																																																																																																																																										
R7	55.8	56.3	56.1	55.0	53.0	1.37	55.2																																																																																																																																										
R8	55.1	55.5	55.2	54.3	52.2	1.32	54.5																																																																																																																																										
R11	56.4	56.8	56.7	55.6	53.4	1.40	55.8																																																																																																																																										
R14	55.3	55.8	54.9	54.6	51.4	1.70	54.4																																																																																																																																										
σ	1.43	1.41	1.37	1.39	1.34																																																																																																																																												
Moy	55.0	55.5	55.2	54.3	52.0																																																																																																																																												
		Ini	53.1																																																																																																																																														

Tableau 6.1 : Performances moyennes de la sélection de 25 solutions testées sur l'échantillon de 46 bassins versants classés en fonction des quatre descripteurs – C2MQ, contrôle

<p>$i1 <$</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>57.2</td> <td>57.5</td> <td>57.3</td> <td>55.8</td> <td>46.6</td> <td>4.70</td> <td>54.9</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>65.4</td> <td>65.6</td> <td>65.5</td> <td>62.9</td> <td>53.7</td> <td>5.09</td> <td>62.6</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>62.9</td> <td>63.1</td> <td>62.8</td> <td>60.6</td> <td>50.1</td> <td>5.57</td> <td>59.9</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>65.6</td> <td>65.8</td> <td>65.7</td> <td>63.1</td> <td>53.8</td> <td>5.14</td> <td>62.8</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>59.4</td> <td>59.7</td> <td>59.5</td> <td>57.2</td> <td>46.6</td> <td>5.62</td> <td>56.5</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>3.72</td> <td>3.65</td> <td>3.69</td> <td>3.33</td> <td>3.61</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>62.1</td> <td>62.3</td> <td>62.2</td> <td>59.9</td> <td>50.2</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Ini</td> <td>56.9</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>a) $i1 <$ médiane, amélioration max. 8,9</p>		A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	57.2	57.5	57.3	55.8	46.6	4.70	54.9	R7	65.4	65.6	65.5	62.9	53.7	5.09	62.6	R8	62.9	63.1	62.8	60.6	50.1	5.57	59.9	R11	65.6	65.8	65.7	63.1	53.8	5.14	62.8	R14	59.4	59.7	59.5	57.2	46.6	5.62	56.5	σ	3.72	3.65	3.69	3.33	3.61			Moy	62.1	62.3	62.2	59.9	50.2					Ini	56.9					<p>$i1 >$</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>52.2</td> <td>52.2</td> <td>52.3</td> <td>51.1</td> <td>37.4</td> <td>6.50</td> <td>49.0</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>60.9</td> <td>60.9</td> <td>61.0</td> <td>59.4</td> <td>43.2</td> <td>7.77</td> <td>57.1</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>61.1</td> <td>61.0</td> <td>60.9</td> <td>59.4</td> <td>42.2</td> <td>8.23</td> <td>56.9</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>61.6</td> <td>61.6</td> <td>61.6</td> <td>60.1</td> <td>43.6</td> <td>7.92</td> <td>57.7</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>57.7</td> <td>57.8</td> <td>57.9</td> <td>55.9</td> <td>39.5</td> <td>8.01</td> <td>53.8</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>3.95</td> <td>3.92</td> <td>3.90</td> <td>3.78</td> <td>2.64</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>58.7</td> <td>58.7</td> <td>58.7</td> <td>57.2</td> <td>41.2</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Ini</td> <td>51.9</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>b) $i1 >$ médiane, amélioration max. 9,7</p>		A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	52.2	52.2	52.3	51.1	37.4	6.50	49.0	R7	60.9	60.9	61.0	59.4	43.2	7.77	57.1	R8	61.1	61.0	60.9	59.4	42.2	8.23	56.9	R11	61.6	61.6	61.6	60.1	43.6	7.92	57.7	R14	57.7	57.8	57.9	55.9	39.5	8.01	53.8	σ	3.95	3.92	3.90	3.78	2.64			Moy	58.7	58.7	58.7	57.2	41.2					Ini	51.9				
	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	57.2	57.5	57.3	55.8	46.6	4.70	54.9																																																																																																																																										
R7	65.4	65.6	65.5	62.9	53.7	5.09	62.6																																																																																																																																										
R8	62.9	63.1	62.8	60.6	50.1	5.57	59.9																																																																																																																																										
R11	65.6	65.8	65.7	63.1	53.8	5.14	62.8																																																																																																																																										
R14	59.4	59.7	59.5	57.2	46.6	5.62	56.5																																																																																																																																										
σ	3.72	3.65	3.69	3.33	3.61																																																																																																																																												
Moy	62.1	62.3	62.2	59.9	50.2																																																																																																																																												
		Ini	56.9																																																																																																																																														
	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	52.2	52.2	52.3	51.1	37.4	6.50	49.0																																																																																																																																										
R7	60.9	60.9	61.0	59.4	43.2	7.77	57.1																																																																																																																																										
R8	61.1	61.0	60.9	59.4	42.2	8.23	56.9																																																																																																																																										
R11	61.6	61.6	61.6	60.1	43.6	7.92	57.7																																																																																																																																										
R14	57.7	57.8	57.9	55.9	39.5	8.01	53.8																																																																																																																																										
σ	3.95	3.92	3.90	3.78	2.64																																																																																																																																												
Moy	58.7	58.7	58.7	57.2	41.2																																																																																																																																												
		Ini	51.9																																																																																																																																														
<p>$i2 <$</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>62.3</td> <td>62.6</td> <td>62.5</td> <td>61.9</td> <td>58.1</td> <td>1.91</td> <td>61.5</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>67.0</td> <td>67.2</td> <td>67.2</td> <td>66.3</td> <td>62.6</td> <td>1.99</td> <td>66.1</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>66.7</td> <td>66.9</td> <td>66.7</td> <td>66.0</td> <td>62.1</td> <td>2.01</td> <td>65.7</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>67.3</td> <td>67.5</td> <td>67.4</td> <td>66.6</td> <td>62.7</td> <td>2.05</td> <td>66.3</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>65.3</td> <td>65.5</td> <td>65.4</td> <td>64.5</td> <td>59.8</td> <td>2.40</td> <td>64.1</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>2.05</td> <td>2.04</td> <td>2.03</td> <td>1.93</td> <td>2.02</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>65.7</td> <td>65.9</td> <td>65.8</td> <td>65.1</td> <td>61.1</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Ini</td> <td>62.5</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>c) $i2 <$ médiane, amélioration max. 5</p>		A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	62.3	62.6	62.5	61.9	58.1	1.91	61.5	R7	67.0	67.2	67.2	66.3	62.6	1.99	66.1	R8	66.7	66.9	66.7	66.0	62.1	2.01	65.7	R11	67.3	67.5	67.4	66.6	62.7	2.05	66.3	R14	65.3	65.5	65.4	64.5	59.8	2.40	64.1	σ	2.05	2.04	2.03	1.93	2.02			Moy	65.7	65.9	65.8	65.1	61.1					Ini	62.5					<p>$i2 >$</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>47.0</td> <td>47.2</td> <td>47.1</td> <td>45.0</td> <td>25.9</td> <td>9.29</td> <td>42.4</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>59.3</td> <td>59.2</td> <td>59.3</td> <td>56.0</td> <td>34.4</td> <td>10.85</td> <td>53.7</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>57.3</td> <td>57.3</td> <td>57.0</td> <td>54.0</td> <td>30.3</td> <td>11.77</td> <td>51.2</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>59.9</td> <td>59.9</td> <td>59.9</td> <td>56.7</td> <td>34.7</td> <td>10.98</td> <td>54.2</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>51.9</td> <td>52.0</td> <td>52.0</td> <td>48.6</td> <td>26.2</td> <td>11.22</td> <td>46.1</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>5.49</td> <td>5.41</td> <td>5.44</td> <td>5.08</td> <td>4.25</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>55.1</td> <td>55.1</td> <td>55.1</td> <td>52.1</td> <td>30.3</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Ini</td> <td>46.3</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>d) $i2 >$ médiane, amélioration max. 13,6</p>		A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	47.0	47.2	47.1	45.0	25.9	9.29	42.4	R7	59.3	59.2	59.3	56.0	34.4	10.85	53.7	R8	57.3	57.3	57.0	54.0	30.3	11.77	51.2	R11	59.9	59.9	59.9	56.7	34.7	10.98	54.2	R14	51.9	52.0	52.0	48.6	26.2	11.22	46.1	σ	5.49	5.41	5.44	5.08	4.25			Moy	55.1	55.1	55.1	52.1	30.3					Ini	46.3				
	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	62.3	62.6	62.5	61.9	58.1	1.91	61.5																																																																																																																																										
R7	67.0	67.2	67.2	66.3	62.6	1.99	66.1																																																																																																																																										
R8	66.7	66.9	66.7	66.0	62.1	2.01	65.7																																																																																																																																										
R11	67.3	67.5	67.4	66.6	62.7	2.05	66.3																																																																																																																																										
R14	65.3	65.5	65.4	64.5	59.8	2.40	64.1																																																																																																																																										
σ	2.05	2.04	2.03	1.93	2.02																																																																																																																																												
Moy	65.7	65.9	65.8	65.1	61.1																																																																																																																																												
		Ini	62.5																																																																																																																																														
	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	47.0	47.2	47.1	45.0	25.9	9.29	42.4																																																																																																																																										
R7	59.3	59.2	59.3	56.0	34.4	10.85	53.7																																																																																																																																										
R8	57.3	57.3	57.0	54.0	30.3	11.77	51.2																																																																																																																																										
R11	59.9	59.9	59.9	56.7	34.7	10.98	54.2																																																																																																																																										
R14	51.9	52.0	52.0	48.6	26.2	11.22	46.1																																																																																																																																										
σ	5.49	5.41	5.44	5.08	4.25																																																																																																																																												
Moy	55.1	55.1	55.1	52.1	30.3																																																																																																																																												
		Ini	46.3																																																																																																																																														
<p>$i3 <$</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>58.8</td> <td>59.0</td> <td>58.7</td> <td>57.7</td> <td>51.2</td> <td>3.34</td> <td>57.1</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>64.0</td> <td>64.2</td> <td>64.1</td> <td>62.7</td> <td>55.3</td> <td>3.82</td> <td>62.1</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>60.9</td> <td>61.1</td> <td>60.8</td> <td>59.5</td> <td>53.2</td> <td>3.37</td> <td>59.1</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>64.1</td> <td>64.3</td> <td>64.2</td> <td>62.8</td> <td>55.3</td> <td>3.84</td> <td>62.1</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>58.5</td> <td>58.7</td> <td>58.5</td> <td>56.9</td> <td>50.2</td> <td>3.64</td> <td>56.6</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>2.74</td> <td>2.70</td> <td>2.75</td> <td>2.73</td> <td>2.35</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>61.3</td> <td>61.4</td> <td>61.3</td> <td>59.9</td> <td>53.0</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Ini</td> <td>58.6</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>e) $i3 <$ médiane, amélioration max. 5,7</p>		A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	58.8	59.0	58.7	57.7	51.2	3.34	57.1	R7	64.0	64.2	64.1	62.7	55.3	3.82	62.1	R8	60.9	61.1	60.8	59.5	53.2	3.37	59.1	R11	64.1	64.3	64.2	62.8	55.3	3.84	62.1	R14	58.5	58.7	58.5	56.9	50.2	3.64	56.6	σ	2.74	2.70	2.75	2.73	2.35			Moy	61.3	61.4	61.3	59.9	53.0					Ini	58.6					<p>$i3 >$</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>50.6</td> <td>50.8</td> <td>50.8</td> <td>49.2</td> <td>32.8</td> <td>7.86</td> <td>46.8</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>62.3</td> <td>62.3</td> <td>62.4</td> <td>59.7</td> <td>41.7</td> <td>9.01</td> <td>57.7</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>63.0</td> <td>63.0</td> <td>62.9</td> <td>60.5</td> <td>39.2</td> <td>10.42</td> <td>57.7</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>63.1</td> <td>63.1</td> <td>63.2</td> <td>60.5</td> <td>42.1</td> <td>9.19</td> <td>58.4</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>58.6</td> <td>58.8</td> <td>58.8</td> <td>56.2</td> <td>35.9</td> <td>9.99</td> <td>53.7</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>5.31</td> <td>5.24</td> <td>5.21</td> <td>4.83</td> <td>3.94</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>59.5</td> <td>59.6</td> <td>59.6</td> <td>57.2</td> <td>38.3</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Ini</td> <td>50.2</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>f) $i3 >$ médiane, amélioration max. 13</p>		A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	50.6	50.8	50.8	49.2	32.8	7.86	46.8	R7	62.3	62.3	62.4	59.7	41.7	9.01	57.7	R8	63.0	63.0	62.9	60.5	39.2	10.42	57.7	R11	63.1	63.1	63.2	60.5	42.1	9.19	58.4	R14	58.6	58.8	58.8	56.2	35.9	9.99	53.7	σ	5.31	5.24	5.21	4.83	3.94			Moy	59.5	59.6	59.6	57.2	38.3					Ini	50.2				
	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	58.8	59.0	58.7	57.7	51.2	3.34	57.1																																																																																																																																										
R7	64.0	64.2	64.1	62.7	55.3	3.82	62.1																																																																																																																																										
R8	60.9	61.1	60.8	59.5	53.2	3.37	59.1																																																																																																																																										
R11	64.1	64.3	64.2	62.8	55.3	3.84	62.1																																																																																																																																										
R14	58.5	58.7	58.5	56.9	50.2	3.64	56.6																																																																																																																																										
σ	2.74	2.70	2.75	2.73	2.35																																																																																																																																												
Moy	61.3	61.4	61.3	59.9	53.0																																																																																																																																												
		Ini	58.6																																																																																																																																														
	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	50.6	50.8	50.8	49.2	32.8	7.86	46.8																																																																																																																																										
R7	62.3	62.3	62.4	59.7	41.7	9.01	57.7																																																																																																																																										
R8	63.0	63.0	62.9	60.5	39.2	10.42	57.7																																																																																																																																										
R11	63.1	63.1	63.2	60.5	42.1	9.19	58.4																																																																																																																																										
R14	58.6	58.8	58.8	56.2	35.9	9.99	53.7																																																																																																																																										
σ	5.31	5.24	5.21	4.83	3.94																																																																																																																																												
Moy	59.5	59.6	59.6	57.2	38.3																																																																																																																																												
		Ini	50.2																																																																																																																																														
<p>$i4 <$</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>57.0</td> <td>57.0</td> <td>56.9</td> <td>55.4</td> <td>41.7</td> <td>6.68</td> <td>53.6</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>65.7</td> <td>65.6</td> <td>65.6</td> <td>62.8</td> <td>47.6</td> <td>7.83</td> <td>61.5</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>64.1</td> <td>64.1</td> <td>63.8</td> <td>61.4</td> <td>44.7</td> <td>8.41</td> <td>59.6</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>65.9</td> <td>65.9</td> <td>65.8</td> <td>63.0</td> <td>47.7</td> <td>7.92</td> <td>61.7</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>60.3</td> <td>60.3</td> <td>60.2</td> <td>57.4</td> <td>42.1</td> <td>7.91</td> <td>56.1</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>3.86</td> <td>3.84</td> <td>3.83</td> <td>3.43</td> <td>2.88</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>62.6</td> <td>62.6</td> <td>62.5</td> <td>60.0</td> <td>44.8</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Ini</td> <td>56.3</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>g) $i4 <$ médiane, amélioration max. 9,6</p>		A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	57.0	57.0	56.9	55.4	41.7	6.68	53.6	R7	65.7	65.6	65.6	62.8	47.6	7.83	61.5	R8	64.1	64.1	63.8	61.4	44.7	8.41	59.6	R11	65.9	65.9	65.8	63.0	47.7	7.92	61.7	R14	60.3	60.3	60.2	57.4	42.1	7.91	56.1	σ	3.86	3.84	3.83	3.43	2.88			Moy	62.6	62.6	62.5	60.0	44.8					Ini	56.3					<p>$i4 >$</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>52.4</td> <td>52.8</td> <td>52.7</td> <td>51.5</td> <td>42.3</td> <td>4.51</td> <td>50.3</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>60.6</td> <td>60.8</td> <td>60.9</td> <td>59.6</td> <td>49.3</td> <td>5.01</td> <td>58.3</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>59.8</td> <td>60.1</td> <td>59.9</td> <td>58.6</td> <td>47.7</td> <td>5.37</td> <td>57.2</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>61.3</td> <td>61.5</td> <td>61.5</td> <td>60.2</td> <td>49.8</td> <td>5.11</td> <td>58.9</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>56.9</td> <td>57.2</td> <td>57.1</td> <td>55.7</td> <td>44.0</td> <td>5.72</td> <td>54.2</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>3.67</td> <td>3.60</td> <td>3.63</td> <td>3.58</td> <td>3.31</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>58.2</td> <td>58.5</td> <td>58.4</td> <td>57.1</td> <td>46.6</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Ini</td> <td>52.5</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>h) $i4 >$ médiane, amélioration max. 9</p>		A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	52.4	52.8	52.7	51.5	42.3	4.51	50.3	R7	60.6	60.8	60.9	59.6	49.3	5.01	58.3	R8	59.8	60.1	59.9	58.6	47.7	5.37	57.2	R11	61.3	61.5	61.5	60.2	49.8	5.11	58.9	R14	56.9	57.2	57.1	55.7	44.0	5.72	54.2	σ	3.67	3.60	3.63	3.58	3.31			Moy	58.2	58.5	58.4	57.1	46.6					Ini	52.5				
	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	57.0	57.0	56.9	55.4	41.7	6.68	53.6																																																																																																																																										
R7	65.7	65.6	65.6	62.8	47.6	7.83	61.5																																																																																																																																										
R8	64.1	64.1	63.8	61.4	44.7	8.41	59.6																																																																																																																																										
R11	65.9	65.9	65.8	63.0	47.7	7.92	61.7																																																																																																																																										
R14	60.3	60.3	60.2	57.4	42.1	7.91	56.1																																																																																																																																										
σ	3.86	3.84	3.83	3.43	2.88																																																																																																																																												
Moy	62.6	62.6	62.5	60.0	44.8																																																																																																																																												
		Ini	56.3																																																																																																																																														
	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	52.4	52.8	52.7	51.5	42.3	4.51	50.3																																																																																																																																										
R7	60.6	60.8	60.9	59.6	49.3	5.01	58.3																																																																																																																																										
R8	59.8	60.1	59.9	58.6	47.7	5.37	57.2																																																																																																																																										
R11	61.3	61.5	61.5	60.2	49.8	5.11	58.9																																																																																																																																										
R14	56.9	57.2	57.1	55.7	44.0	5.72	54.2																																																																																																																																										
σ	3.67	3.60	3.63	3.58	3.31																																																																																																																																												
Moy	58.2	58.5	58.4	57.1	46.6																																																																																																																																												
		Ini	52.5																																																																																																																																														

Tableau 6.2 : Performances moyennes de la sélection de 25 solutions testées sur l'échantillon de 46 bassins versants classés en fonction des quatre descripteurs – C2MLQ, contrôle

Lorsque l'accent est mis sur les crues (Tableau 6.1), l'amélioration maximale est significativement plus importante pour le groupe des bassins versants ayant un indice $i1$ supérieur à la médiane que pour le groupe de bassins avec un indice $i1$ inférieur à la médiane (4 % de différence). Pour les autres indices, cette différence est moins marquée (de

l'ordre de 2 %). En crue, la prise en compte des barrages-réservoirs apporte les améliorations les plus significatives pour les bassins versants ayant des ouvrages proches de l'exutoire.

Lorsque l'accent est mis sur les étiages, les différences d'améliorations entre classes d'indices sont hétérogènes mais fortes : on constate que pour les indices i_1 et i_4 , les améliorations maximales pour les deux classes d'indices sont très proches (de l'ordre de 9 %) alors que pour les indices i_2 et i_3 ces améliorations sont différentes. Pour les bassins versants ayant des indices i_2 et i_3 inférieurs à la médiane, les améliorations maximales sont de l'ordre de 5 % alors que pour les bassins ayant des indices i_2 et i_3 supérieurs à la médiane, les améliorations maximales sont de l'ordre de 13 %. Ceci indique que, pour les étiages, la prise en compte des barrages-réservoirs apporte les améliorations les plus significatives pour les bassins versants ayant des ouvrages stockant une quantité importante d'eau par rapport à l'écoulement ou contrôlant une partie importante du bassin.

Les constatations précédentes indiquent qu'en crue, la distance barrage-exutoire est un facteur jouant un rôle dans la prise en compte des barrages-réservoirs dans le modèle (processus liés au transfert). En étiage, des facteurs liés aux quantités d'eau mises en jeu semblent jouer un rôle plus marqué que la distance barrage-exutoire (indice i_1) ou le type d'exploitation (indice i_4).

Les résultats précédents n'ont cependant pas permis de dégager des pistes sur un lien fort entre les descripteurs des bassins versants et des barrages-réservoirs et les solutions de prise en compte.

Afin de s'affranchir d'un éventuel effet de moyenne qui pourrait "écraser" les classes de bassins, nous avons scindé l'échantillon en quatre classes. Les résultats, présentés en annexe 4, ont confirmé les conclusions précédentes.

Dans le paragraphe suivant, nous nous focalisons sur les solutions ayant un rejet soit dans la branche d'écoulement direct (R8) soit indirect (R11). Nous allons essayer de voir si le classement des solutions varie significativement pour les indices faibles (inférieurs à la médiane) et forts (supérieurs à la médiane) selon ces deux options de rejet.

Le graphique de la Figure 6.6 représente le rang de ces deux solutions en fonction des descripteurs (classement selon le critère C2MLQ). L'ensemble des 14 points d'alimentation initiaux est représenté. Les abscisses représentent le rang des solutions du groupe pour lequel l'indice est inférieur à la médiane et les ordonnées représentent le rang des solutions du groupe pour lequel l'indice est supérieur à la médiane. Les points proches de la première bissectrice ont des rangs quasiment identiques. A titre d'exemple, le point B (Figure 6.6a) représente une solution qui serait très performante pour les bassins versants ayant un indice

i1 supérieur à la médiane car elle est classée première pour ce groupe et dernière (117^e) pour les bassins versants ayant un indice inférieur à la médiane.

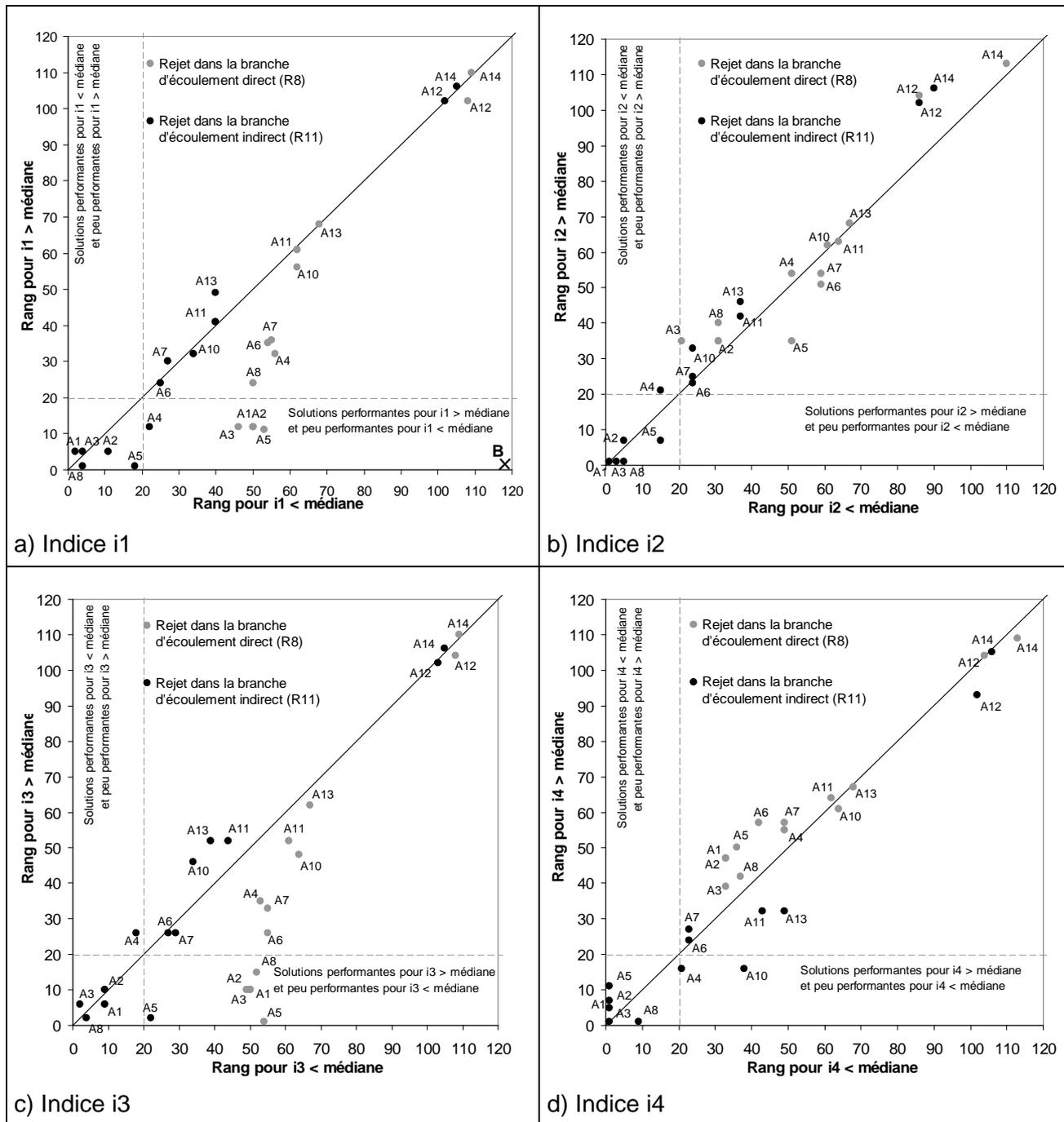


Figure 6.6 : Rang des solutions ayant un rejet dans la branche d'écoulement direct et indirect en fonction des descripteurs des bassins versants

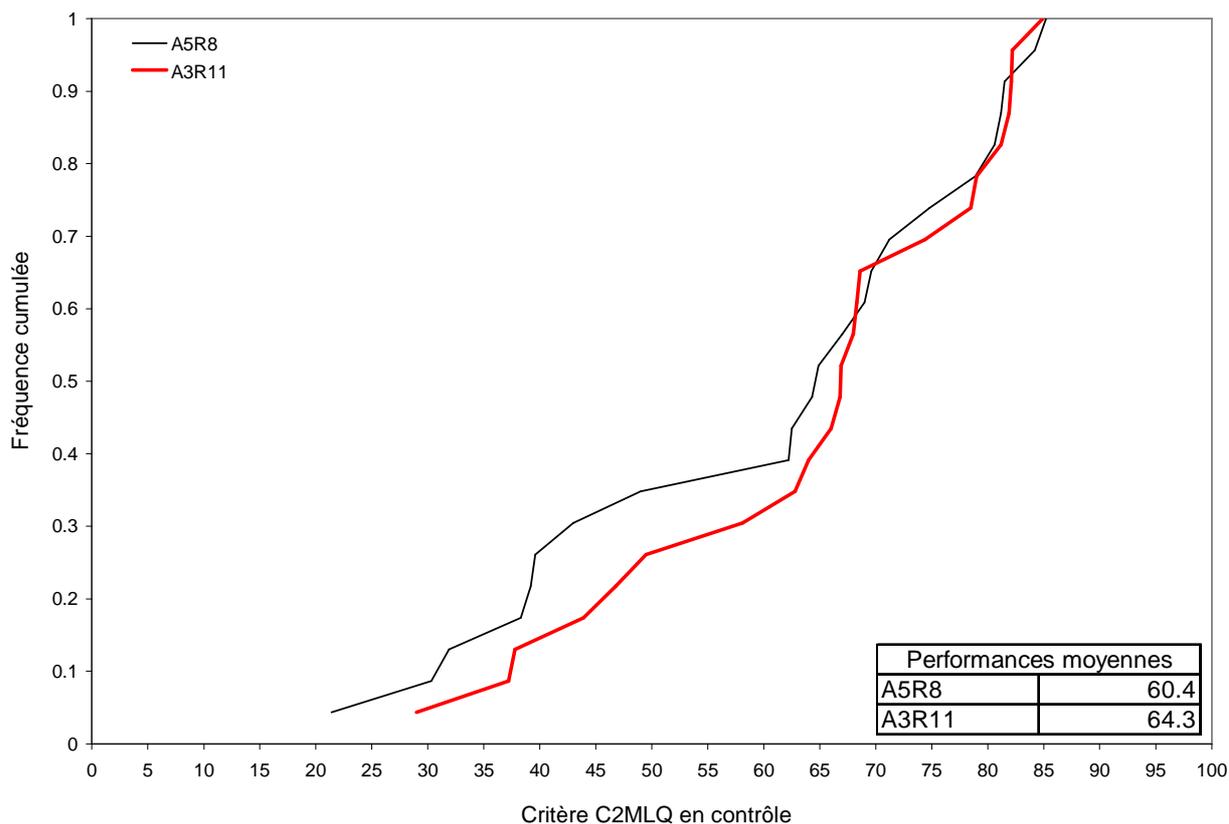
Les quatre graphiques illustrent les bonnes performances de la majorité des solutions ayant un rejet dans la branche d'écoulement indirect (R11) pour les deux groupes de bassins versants. Les points correspondant à ces solutions sont en effet proches de la première bissectrice.

Les indices les plus discriminants (*i.e.* présentant des différences nettes dans la répartition des points correspondant aux deux types de rejet) sont i_1 et i_3 . Sur les graphiques correspondant aux indices i_2 et i_4 , l'ensemble des points est situé près de la première bissectrice, ne permettant pas de distinguer de différences dans le classement des solutions selon ces indices.

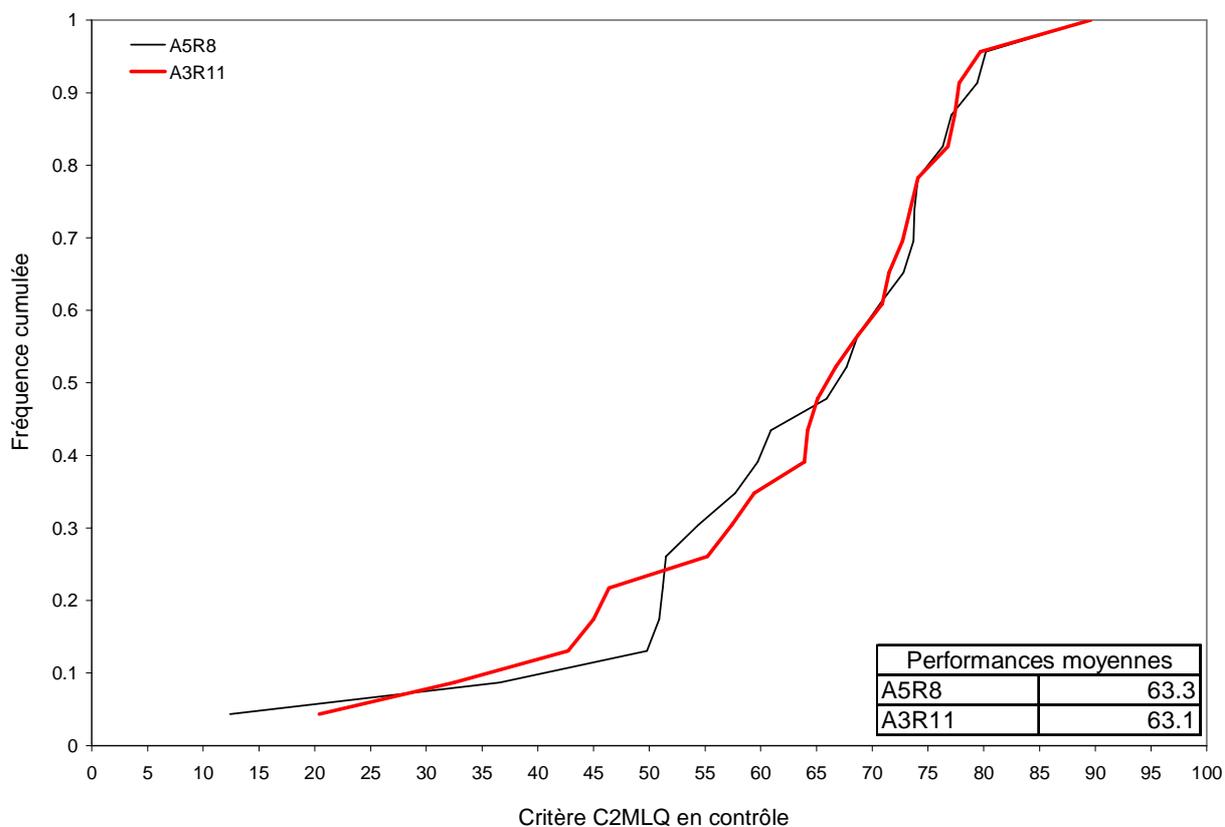
Pour les indices i_1 et i_3 (Figure 6.6a et 6.6c), la majorité des points correspondant au rejet dans la branche d'écoulement direct (R8) sont situés sous la bissectrice et a une plus grande distance que les points correspondant à R11. Ceci indique que ce type de rejet donne, relativement à l'ensemble des solutions testées, des performances meilleures pour les bassins versants dont l'exutoire est situé à proximité du barrage-réservoir ($i_1 >$ médiane) ou dont la surface contrôlée est importante par rapport à la surface totale du bassin versant ($i_3 >$ médiane). Ces solutions sont cependant moins bien classées que celles ayant leur rejet dans la branche d'écoulement indirect (R11). La solution A5R8 (alimentation à partir de la sortie du réservoir de production et rejet dans la branche d'écoulement direct) fait exception puisqu'elle est classée première pour les bassins ayant un indice i_3 supérieur à la médiane. Cette solution s'avère performante pour les bassins versants dont l'indice i_3 est supérieur à 0,14.

Les résultats précédents indiquent que la solution ayant une alimentation à partir du réservoir de production et un rejet dans le réservoir de transfert (A3R11) s'avère performante indépendamment des caractéristiques des bassins versants et des barrages-réservoirs.

Il semble cependant qu'un lien ténu existe entre le choix d'une solution et l'importance de la superficie du bassin versant contrôlé par l'ouvrage par rapport à la surface totale du bassin versant (indice i_3). Cet indice apparaît être le plus pertinent pour différencier les bassins versants. Les autres descripteurs n'ont pas permis de mettre en évidence de lien de ce type. Ainsi (Figure 6.7), pour les bassins versants ayant un indice i_3 élevé ($i_3 >$ 0,14), un rejet dans la branche d'écoulement direct (R8) s'avère être légèrement plus performant qu'un rejet dans la branche d'écoulement indirect (R11). Cependant ce lien reste faible, est n'est observé que lorsque l'accent est mis sur les débits faibles. Les distributions indiquent que la solution A5R8 est certes plus performante pour des bassins ayant un indice i_3 supérieur à la médiane (63,3 %) mais ces performances restent proches de la solution A3R11 (63,1 %), sans gain significatif.



a) $i3 < \text{médiane}$



b) $i3 > \text{médiane}$

Figure 6.7 : Distribution des performances pour les solutions A5R8 et A3R11 selon la valeur de l'indice $i3$ – Critère C2MLQ, contrôle

6.4.2. Solutions complémentaires

6.4.2.1. Complémentarité des solutions *a posteriori*

Dans ce paragraphe, nous cherchons les meilleures associations de deux solutions. L'idée est d'étudier les possibilités d'amélioration d'une solution en lui associant une autre solution ayant une alimentation et/ou un rejet complémentaires de ceux de la première. La détermination des meilleures associations peut nous renseigner sur les alimentations et les rejets complémentaires.

Nous avons donc cherché, parmi l'ensemble des solutions ayant une alimentation et un rejet, celles dont l'association par paire *a posteriori* (en contrôle) donnait les meilleurs résultats. Nous utilisons pour cela les résultats calculés grâce au critère C2MVQ en contrôle. Nous avons pris soin de considérer les solutions ayant les mêmes performances, pour ne pas biaiser les résultats.

Les meilleures associations sont obtenues dans deux cas :

- l'association de la solution ayant une alimentation à partir de la pluie brute et un rejet dans la branche d'écoulement direct avant l'hydrogramme unitaire (A1R8) et de la solution ayant une alimentation à partir du réservoir de production et un rejet dans le réservoir de transfert (branche d'écoulement indirect) (A3R11) ;
- l'association de la solution A3R11 et de la solution ayant une alimentation à partir de la branche d'écoulement direct après l'hydrogramme unitaire et un rejet dans la même branche avant l'hydrogramme unitaire (A10R8)

Pour la première association, les deux alimentations sont proches en raison des reports sur le réservoir de production. En revanche les alimentations de la seconde association sont différentes puisque pour une des solutions, elle est faite à partir du réservoir de production alors que pour la seconde, elle est faite à partir de la partie de transfert du modèle. Dans les deux cas, on a une alimentation à partir d'un stock pérenne (A3) et une alimentation à partir d'une source intermittente (A1 ou A10). L'alimentation à partir du stock non pérenne (même si ensuite il y a des reports) peut permettre une fonction d'interception (écrêtement) plus efficace.

La complémentarité des rejets corrobore les observations faites en introduction sur l'exemple du bassin du São Francisco à Pirapora. Il apparaît nécessaire de disposer d'une solution ayant un rejet dans la branche d'écoulement indirect pour profiter de l'effet de lissage du réservoir de transfert et d'une solution avec un rejet dans la branche d'écoulement direct dont le transfert vers l'exutoire n'est réalisé que par l'hydrogramme unitaire.

Afin de mesurer le progrès apporté par l'association de deux solutions par rapport au cas d'une solution unique, nous avons tracé en Figure 6.8 la distribution des performances des deux meilleures associations (A1R8-A3R11 et A10R8-A3R11) et de la meilleure solution (A3R11). Le graphique présente également la distribution des performances de la solution "idéale" afin de pouvoir juger de la marge de progression possible. Le critère utilisé est C2MVQ en contrôle.

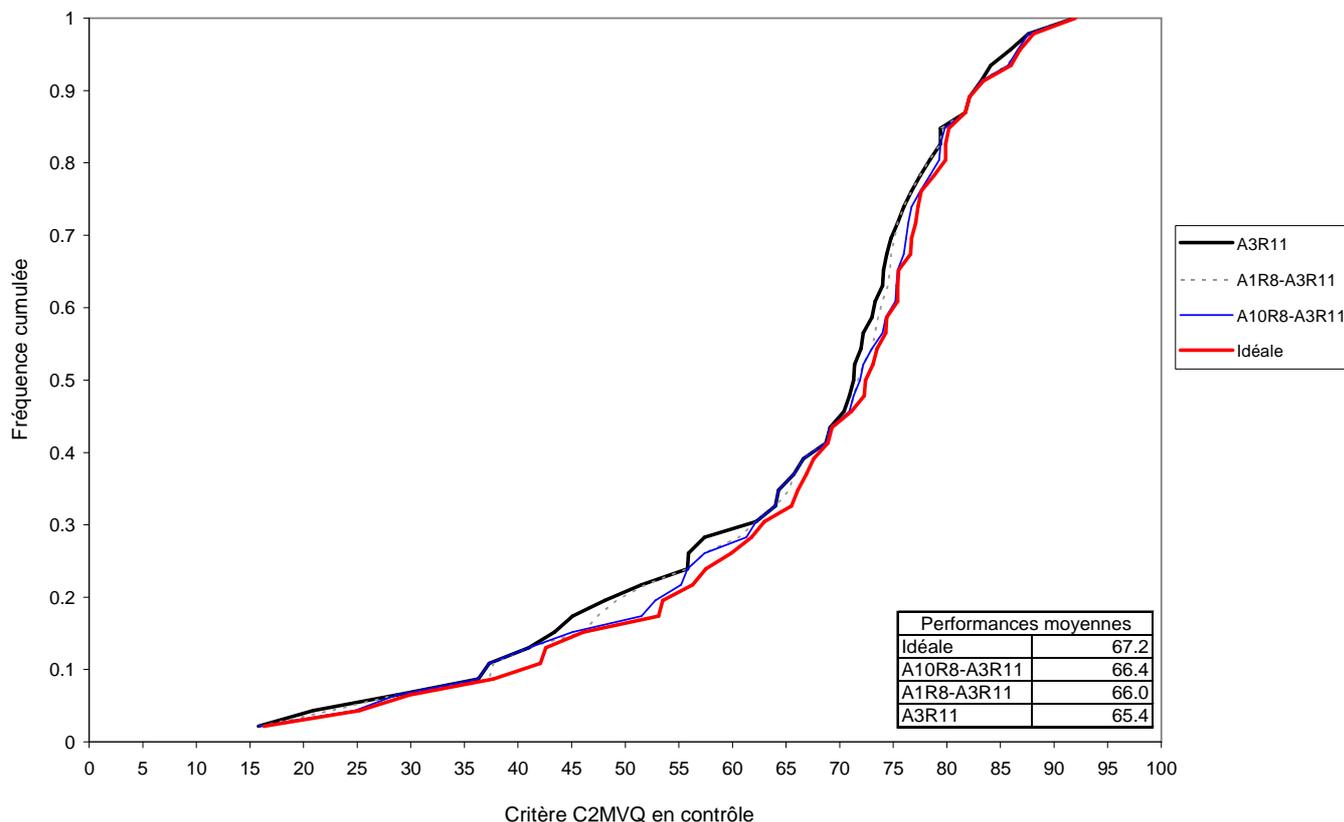


Figure 6.8 : Distributions des performances des deux meilleures associations, du meilleur modèle unique et de la solution "idéale" – C2MVQ, contrôle

On constate que l'association de deux solutions permet d'améliorer légèrement les performances de la solution à alimentation et rejet uniques (1 % au mieux). La paire de solutions A10R8-A3R11 a des performances moyennes légèrement meilleures que A1R8-A3R11. La distribution des performances de ces associations se rapproche de la solution "idéale", ce qui indique que la marge de progrès encore possible est réduite.

Le graphique de la Figure 6.9 compare les performances de l'association A10R8-A3R11 et de la solution A3R11 sur l'ensemble des 46 bassins versants de référence. Le critère retenu est C2MVQ en contrôle.

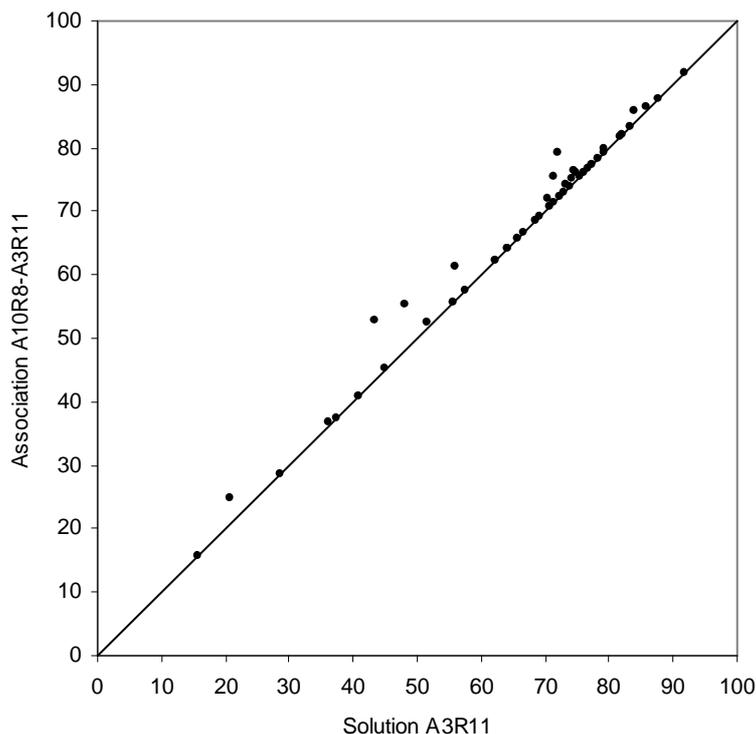


Figure 6.9 : Comparaison des performances de l'association A10R8-A3R11 et de la solution A3R11 sur les 46 bassins versants de référence – C2MVQ, contrôle

On constate que les performances sont proches pour la majorité des bassins versants. 37 % des bassins (soit 17 bassins) ont des performances meilleures avec l'association des deux solutions. L'amélioration maximale sur ces 17 bassins est de 9,4 % et l'amélioration moyenne de 3 %. Ces bassins versants ont la particularité d'être plus influencés que le reste des bassins (indices i_1 , i_2 et i_3) et ont des chroniques de remplissage moins variables (indice i_4). Les indices moyens i_1 , i_2 et i_3 sont plus élevés que ceux des 29 bassins versants non améliorés et des indices moyens de l'échantillon total (Tableau 6.3).

	i_1	i_2	i_3	i_4
Moyenne 17 BV	0.50	0.17	0.31	1.46
Moyenne 29 BV	0.37	0.14	0.18	1.69
Moyenne 46 BV	0.42	0.15	0.23	1.60

Tableau 6.3 : Comparaison des indices moyens des 17 bassins versants (BV) dont les performances sont améliorées par l'association de deux solutions avec les indices moyens des 29 bassins versants non améliorés et de l'échantillon total

Afin de pouvoir tirer profit de ces associations, il est donc nécessaire de trouver des règles qui vont permettre de déterminer *a priori* dans quel cas utiliser l'une des solutions de l'association et dans quel cas utiliser l'autre solution.

6.4.2.2. Comparaison avec les solutions à deux points de rejet

Le manque de lien fort entre le type de solution et les descripteurs des bassins versants et des retenues peut provenir du fonctionnement des solutions à alimentation et rejet uniques considérées jusqu'à présent. Il peut être intéressant de nuancer les rejets en associant au

sein de la même solution, les deux points de rejet des meilleures solutions complémentaires (R8 et R11).

Nous avons testé au chapitre précédent des solutions faisant intervenir deux points de rejet et introduisant un coefficient de partage CPART à optimiser. Nous avons conclu que le gain de performance apporté par ce type de solution ne justifiait pas cette complexification du modèle et qu'une solution à rejet unique restait préférable. L'objectif ici est d'éviter l'optimisation du coefficient de partage en cherchant un moyen de le prédéterminer grâce aux descripteurs des bassins versants et des barrages-réservoirs. Ainsi, on pourrait bénéficier du gain de performance des solutions à deux rejets sans introduire un nouveau paramètre à optimiser.

La solution ayant pour alimentation le réservoir de production et rejetant d'une part dans la branche d'écoulement direct avant l'hydrogramme unitaire et d'autre part dans le réservoir de production (branche d'écoulement indirect) (A3R8.11) était classée deuxième du point de vue des performances calculées grâce au critère C2MVQ. Cette solution est en fait très proche, en termes de performances, des meilleures solutions à deux rejets puisqu'il n'y a que 0,1 % qui sépare leurs performances moyennes.

6.4.2.3. Comparaison des performances de l'association A10R8-A3R11 et de la solution à deux rejets A3R8.11

Dans un premier temps, nous comparons les performances de la solution A3R8.11 avec la paire de solutions complémentaires A3R11-A10R8. Nous cherchons à savoir s'il est possible de se rapprocher, grâce à une solution associant deux rejets dans sa structure, des performances obtenues par une des meilleures associations de solutions déterminée *a posteriori*.

La Figure 6.10 montre que les distributions des performances de la solution à deux rejets A3R8.11 et de celle de la paire A10R8-A3R11 sont proches et se croisent. Il est difficile de déterminer les apports de la solution ayant deux rejets par rapport à la meilleure association de solutions. La solution A3R8.11 est légèrement plus performante que la solution à rejet unique A3R11 (+0,4 %).

Dans la suite, nous tentons d'établir un lien entre le coefficient de partage CPART et les descripteurs des bassins versants et des ouvrages.

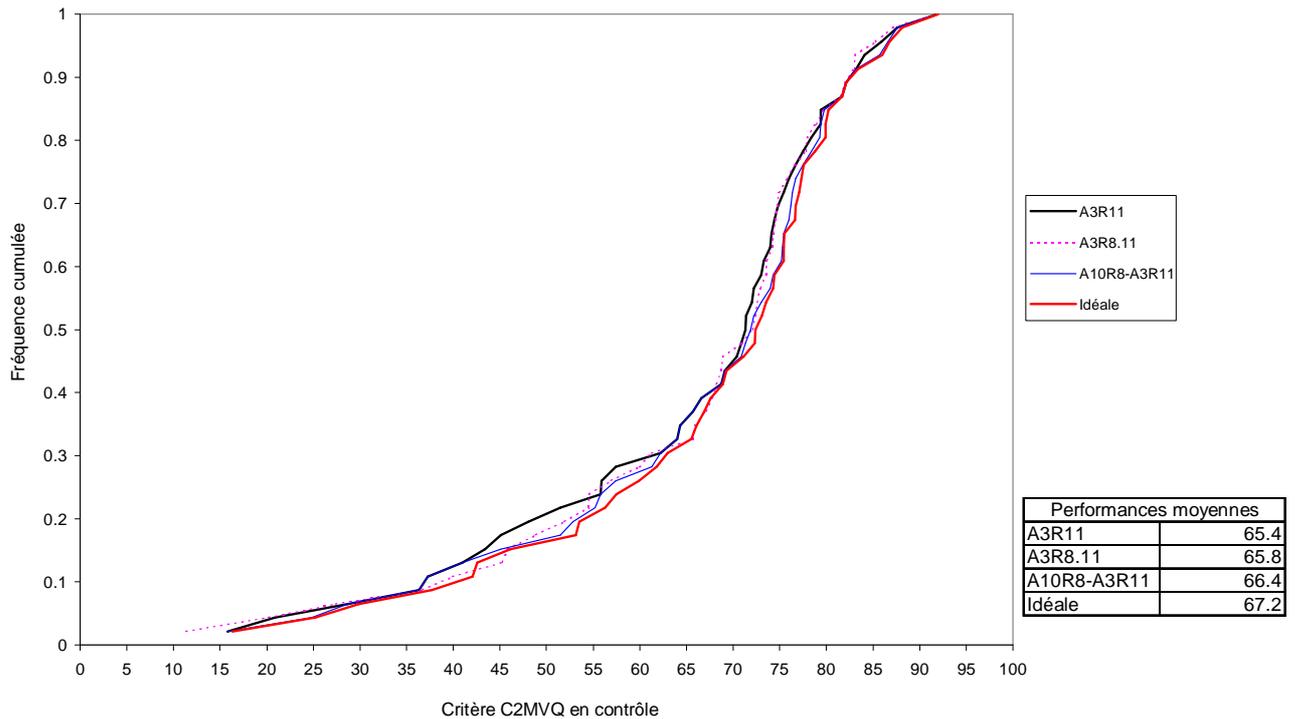


Figure 6.10 : Comparaison des performances de la paire de solutions A10R8-A3R11, et de la solution à deux rejets A3R8.11 sur les 46 bassins versants de référence – C2MVQ, contrôle

Recherche d'un lien entre le coefficient de partage et les descripteurs des bassins versants et des barrages-réservoirs

La Figure 6.11 représente les valeurs du coefficient de partage CPART de la solution A3R8.11 en fonction des quatre descripteurs i_1 , i_2 , i_3 et i_4 .

La droite de régression ainsi que le coefficient de régression (R^2) sont représentés sur chacun des graphes. Il n'apparaît pas de tendance entre les valeurs de CPART et les indices i_1 , i_2 et i_4 . Pour l'indice i_3 , une très légère tendance semble se dégager comme le montre la valeur du coefficient de régression ($R^2 = 0,1$). Plus l'indice i_3 est important, moins les valeurs de CPART ont de chance d'être proches de 0. En d'autres termes, plus la surface du bassin versant contrôlé est importante, plus la part de rejet vers la branche d'écoulement direct (R8) sera importante. Ceci est cohérent avec les constatations précédentes. Mais la relation entre la valeur du coefficient de partage et l'indice i_3 n'est pas significative et robuste (influence importante de certains points sur la tendance) pour permettre de prédéterminer CPART connaissant la surface du bassin versant contrôlé par le barrage-réservoir. Il semble alors qu'il reste nécessaire d'optimiser le coefficient de partage afin de bénéficier des avantages d'un deuxième rejet.

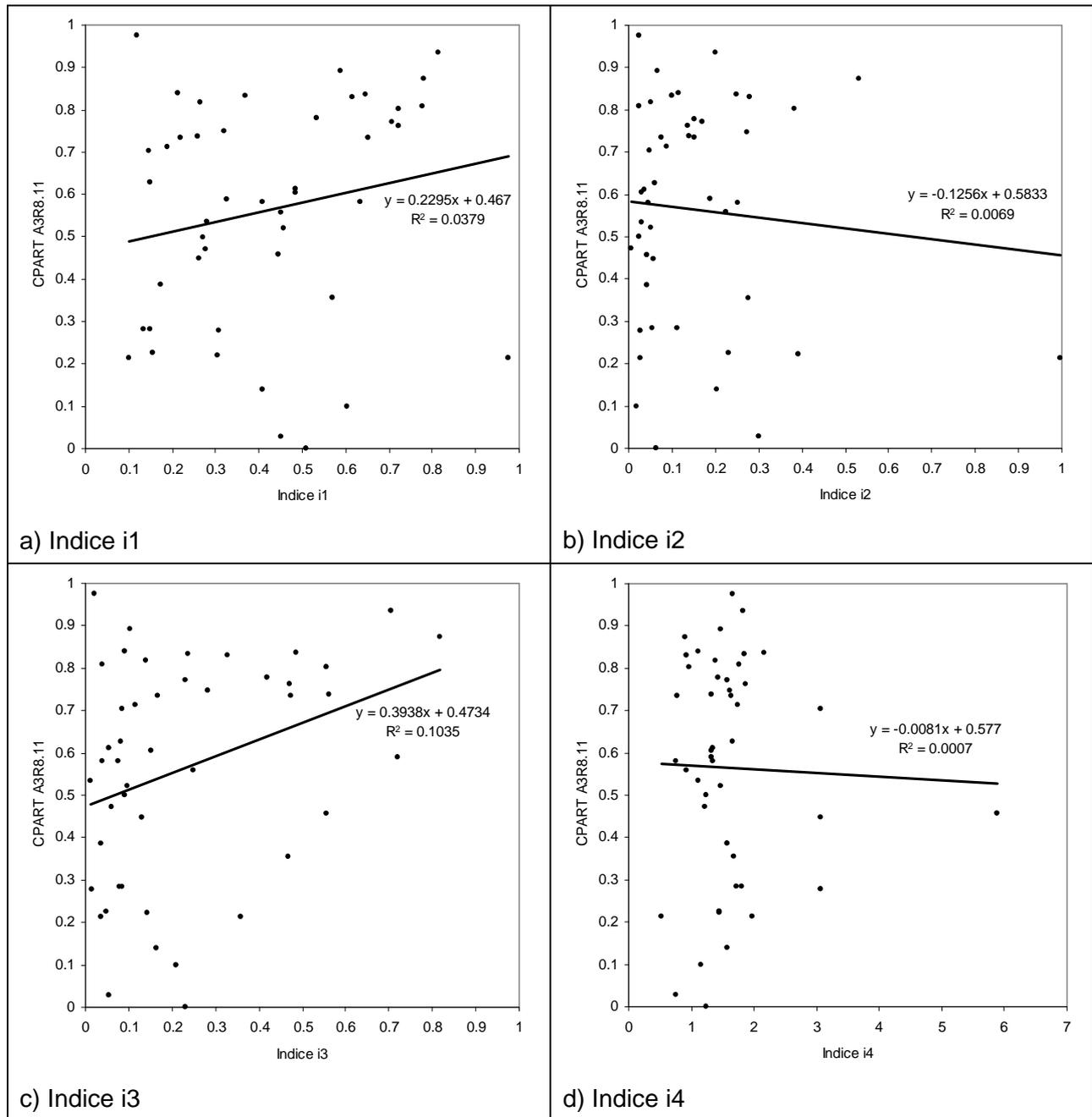


Figure 6.11 : Valeurs du coefficient de partage de la solution A3R8.11 en fonction des descripteurs i1, i2, i3 et i4

6.5. Moduler les manœuvres des barrages-réservoirs

Dans les paragraphes précédents, nous cherchions à établir un lien entre le type de solution de prise en compte des barrages-réservoirs dans le modèle et certaines caractéristiques physiques des bassins versants et des ouvrages. Les résultats ont montré qu'il n'existait pas de relation forte entre ces éléments et que la détermination *a priori* de la solution la plus adaptée à un bassin versant était difficile.

Nous avons vu au chapitre 5 (paragraphe 5.4.1) qu'il existe des bassins versants pour lesquels la solution A3R11 donne des performances plus faibles que la solution ne prenant pas en compte les barrages-réservoirs. Il peut être nécessaire de déterminer dans quels cas la prise en compte des barrages-réservoirs permettra d'améliorer les performances du modèle initial et dans quels cas le modèle initial sera plus performant.

La deuxième piste que nous explorons est de donner plus ou moins d'importance aux manœuvres des barrages-réservoirs au sein des solutions testées. L'objectif ici est d'étudier la possibilité de ne pas prendre à la lettre les données sur les stockages et destockages pour éviter toute dégradation par rapport à la solution de les ignorer complètement.

6.5.1. Coefficient de visibilité

Un coefficient exprimant la plus ou moins grande importance accordée aux données de remplissage des réservoirs a été défini. Ce coefficient, nommé "coefficient de visibilité" (noté CVISI), rend compte de la manière dont le modèle "voit" le ou les réservoirs présents sur le bassin. Il s'agit en fait d'un coefficient multiplicateur qui est préalablement appliqué aux variations de volumes réels contrôlant les variations de hauteur du réservoir image au sein du modèle (Equation 6.1).

$$\Delta V = \text{CVISI} \cdot (V_{j-1} - V_j)$$

Equation 6.1

avec

- V_{j-1} le volume réellement stocké dans le réservoir au pas de temps précédent le pas de temps courant
- V_j le volume réellement stocké dans le réservoir au pas de temps courant
- ΔV la variation de volume prise en compte par le modèle (*i.e.* la variation modulée)

On a choisi de faire varier ce coefficient dans l'intervalle [0 ; 2]. Lorsque CVISI est nul, cela revient à ne pas prendre en compte les données de remplissage. Lorsque CVISI = 1, cela revient à fournir au modèle des données de remplissage telles qu'elles ont été mesurées (comme cela était le cas jusqu'à présent). Nous proposons de ne pas limiter la valeur de CVISI à 1 afin de voir s'il n'est pas possible d'obtenir de meilleurs résultats en donnant plus d'importance aux barrages-réservoirs. Lorsque CVISI = 2, les variations journalières des volumes stockés sont doublées.

6.5.2. Intérêt de moduler les manœuvres des barrages-réservoirs

Nous étudions dans ce paragraphe les apports de l'introduction du coefficient CVISI en termes de performances.

6.5.2.1. Performances moyennes

Dans un premier temps, les valeurs du coefficient CVISI ont été optimisées pour chaque bassin versant. L'optimisation de CVISI est réalisée en fin de calage des paramètres du modèle afin d'influencer le moins possible leur optimisation. En optimisant la valeur de

CVISI, on laisse au modèle la possibilité de faire fi des données de barrage et donc de "sélectionner" la version initiale du modèle pour les bassins où elle s'avère plus performante que les solutions de prise en compte des barrages-réservoirs.

Le classement du Tableau 6.4 présente les performances moyennes des meilleures solutions à alimentation et rejet uniques pour lesquelles le coefficient de visibilité est d'une part fixé à 1, d'autre part optimisé. Les résultats sont calculés en contrôle pour les trois critères sur l'échantillon des 46 bassins versants de référence. La valeur moyenne du coefficient de visibilité ainsi que l'écart-type (σ) sont indiqués pour chacune des solutions.

L'introduction du coefficient de visibilité permet d'améliorer légèrement les performances moyennes de certaines des solutions testées. L'amélioration est de 0,7 % lorsqu'on donne plus d'importance aux crues (C2MQ), de 1,5 % lorsqu'on donne plus d'importance aux étiages et de 0,9 % lorsque ni les crues ni les étiages ne sont privilégiés. Ces améliorations sont trop modestes pour justifier l'introduction d'un paramètre supplémentaire à optimiser.

Rang	Solution	C2MQ	CVISI	σ
1	A3R11	59.2	1.02	0.52
1	A11R11	59.2	0.78	0.52
2	A1R11	59.0	1.00	0.53
2	A2R11	59.0	1.00	0.53
3	A11R7	58.9	0.75	0.53
3	A6R11	58.9	0.85	0.51
4	A5R11	58.8	0.96	0.52
4	A3R7	58.8	0.97	0.53
4	A8R11	58.8	1.02	0.52
4	A1R14	58.8	0.61	0.46
4	A2R14	58.8	0.61	0.46
4	A3R14	58.8	0.62	0.46
4	A1R7	58.8	0.96	0.54
5	A7R11	58.7	0.86	0.51
5	A2R7	58.7	0.96	0.54
5	A6R7	58.7	0.81	0.53
5	A5R14	58.7	0.59	0.44
5	A11R6	58.7	0.77	0.54
6	A5R10	58.6	0.69	0.42
6	A5R7	58.6	0.91	0.54
6	A3R6	58.6	1.02	0.54
6	A8R6	58.6	1.02	0.55
6	A4R11	58.6	0.92	0.51
6	A8R7	58.6	0.97	0.54
6	A7R7	58.6	0.83	0.52
6	A10R11	58.6	0.82	0.50
7	A3R11	58.5	1.00	0.00
7	A3R10	58.5	0.75	0.46
7	A8R10	58.5	0.74	0.48
7	A7R14	58.5	0.55	0.41
7	A8R14	58.5	0.60	0.46
7	A2R10	58.5	0.74	0.46
7	A6R14	58.5	0.54	0.40
7	A1R10	58.5	0.74	0.46
7	A3R8	58.5	0.81	0.45
7	A8R11	58.5	1.00	0.00
7	A1R6	58.5	1.00	0.56
7	A6R6	58.5	0.84	0.54
8	A4R7	58.4	0.87	0.52
8	A1R8	58.4	0.80	0.46
8	A2R6	58.4	1.00	0.56
8	A13R11	58.4	0.77	0.52
8	A8R8	58.4	0.80	0.49
8	A11R14	58.4	0.53	0.40
8	A2R8	58.4	0.80	0.46
8	A7R6	58.4	0.83	0.54
8	A5R8	58.4	0.75	0.41
8	A4R14	58.4	0.57	0.44
8	A6R10	58.4	0.63	0.39
8	A1R11	58.4	1.00	0.00
8	A7R10	58.4	0.63	0.39
9	A10R7	58.3	0.79	0.50
9	A5R11	58.3	1.00	0.00
9	A2R11	58.3	1.00	0.00
9	A5R6	58.3	0.95	0.55
9	A12R14	58.3	0.40	0.35
10	A6R8	58.2	0.67	0.39
10	A13R7	58.2	0.75	0.52
10	A3R7	58.2	1.00	0.00
10	A7R8	58.2	0.67	0.39
10	A4R6	58.2	0.91	0.54

a) C2MQ

Rang	Solution	C2MVQ	CVISI	σ
1	A8R11	66.3	1.02	0.52
1	A3R11	66.3	1.02	0.52
2	A1R11	66.2	1.00	0.53
2	A2R11	66.2	1.00	0.53
3	A5R11	66.0	0.96	0.52
4	A8R6	65.9	1.02	0.55
4	A3R6	65.9	1.02	0.54
4	A8R7	65.9	0.97	0.54
4	A3R7	65.9	0.97	0.53
5	A1R6	65.8	1.00	0.56
5	A3R8	65.8	0.81	0.45
5	A2R6	65.8	1.00	0.56
5	A1R7	65.8	0.96	0.54
5	A1R8	65.8	0.80	0.46
5	A2R7	65.8	0.96	0.54
5	A2R8	65.8	0.80	0.46
6	A8R8	65.7	0.80	0.49
6	A5R8	65.7	0.75	0.41
6	A5R14	65.7	0.59	0.44
6	A5R6	65.7	0.95	0.55
7	A6R11	65.6	0.85	0.51
7	A5R7	65.6	0.91	0.54
7	A5R10	65.6	0.69	0.42
7	A3R14	65.6	0.62	0.46
7	A1R14	65.6	0.61	0.46
7	A2R14	65.6	0.61	0.46
7	A11R11	65.6	0.78	0.52
7	A4R11	65.6	0.92	0.51
7	A3R10	65.6	0.75	0.46
8	A8R14	65.5	0.60	0.46
8	A2R10	65.5	0.74	0.46
8	A1R10	65.5	0.74	0.46
8	A8R10	65.5	0.74	0.48
8	A7R14	65.5	0.55	0.41
8	A6R14	65.5	0.54	0.40
8	A7R11	65.5	0.86	0.51
9	A3R11	65.4	1.00	0.00
9	A8R11	65.4	1.00	0.00
9	A6R8	65.4	0.67	0.39
9	A6R6	65.4	0.84	0.54
10	A6R7	65.3	0.81	0.53
10	A6R10	65.3	0.63	0.39
10	A7R6	65.3	0.83	0.54
10	A4R6	65.3	0.91	0.54
10	A1R11	65.3	1.00	0.00
10	A7R8	65.3	0.67	0.39
10	A4R7	65.3	0.87	0.52
10	A7R10	65.3	0.63	0.39
10	A11R7	65.3	0.75	0.53
10	A2R11	65.3	1.00	0.00

b) C2MVQ

Rang	Solution	C2MLQ	CVISI	σ
1	A8R11	65.2	1.02	0.52
2	A3R11	65.1	1.02	0.52
2	A1R11	65.1	1.00	0.53
2	A2R11	65.1	1.00	0.53
3	A8R6	64.8	1.02	0.55
3	A5R11	64.8	0.96	0.52
3	A3R6	64.8	1.02	0.54
4	A8R7	64.7	0.97	0.54
4	A1R6	64.7	1.00	0.56
4	A2R6	64.7	1.00	0.56
5	A3R7	64.6	0.97	0.53
5	A1R7	64.6	0.96	0.54
6	A2R7	64.5	0.96	0.54
7	A5R6	64.4	0.95	0.55
8	A4R11	64.3	0.92	0.51
8	A5R7	64.3	0.91	0.54
9	A3R8	64.2	0.81	0.45
9	A6R11	64.2	0.85	0.51
9	A2R8	64.2	0.80	0.46
9	A1R8	64.2	0.80	0.46
10	A8R8	64.1	0.80	0.49
10	A5R8	64.1	0.75	0.41
11	A7R11	64.0	0.86	0.51
11	A4R6	64.0	0.91	0.54
12	A4R7	63.9	0.87	0.52
12	A6R6	63.9	0.84	0.54
13	A7R6	63.8	0.83	0.54
13	A6R7	63.8	0.81	0.53
14	A3R11	63.7	1.00	0.00

c) C2MLQ

Tableau 6.4 : Classement des solutions les plus performantes sur les 46 bassins versants de référence en contrôle – CVISI optimisé (en grisé) et fixé à 1

6.5.2.2. Performances par bassin

Le graphique de la Figure 6.12 compare les performances bassin par bassin de la solution A3R11 obtenues d'une part avec CVISI fixé à 1 et d'autre part avec CVISI optimisé. Les résultats sont présentés pour les trois critères (Figure 6.12a, Figure 6.12b et Figure 6.12c) en contrôle.

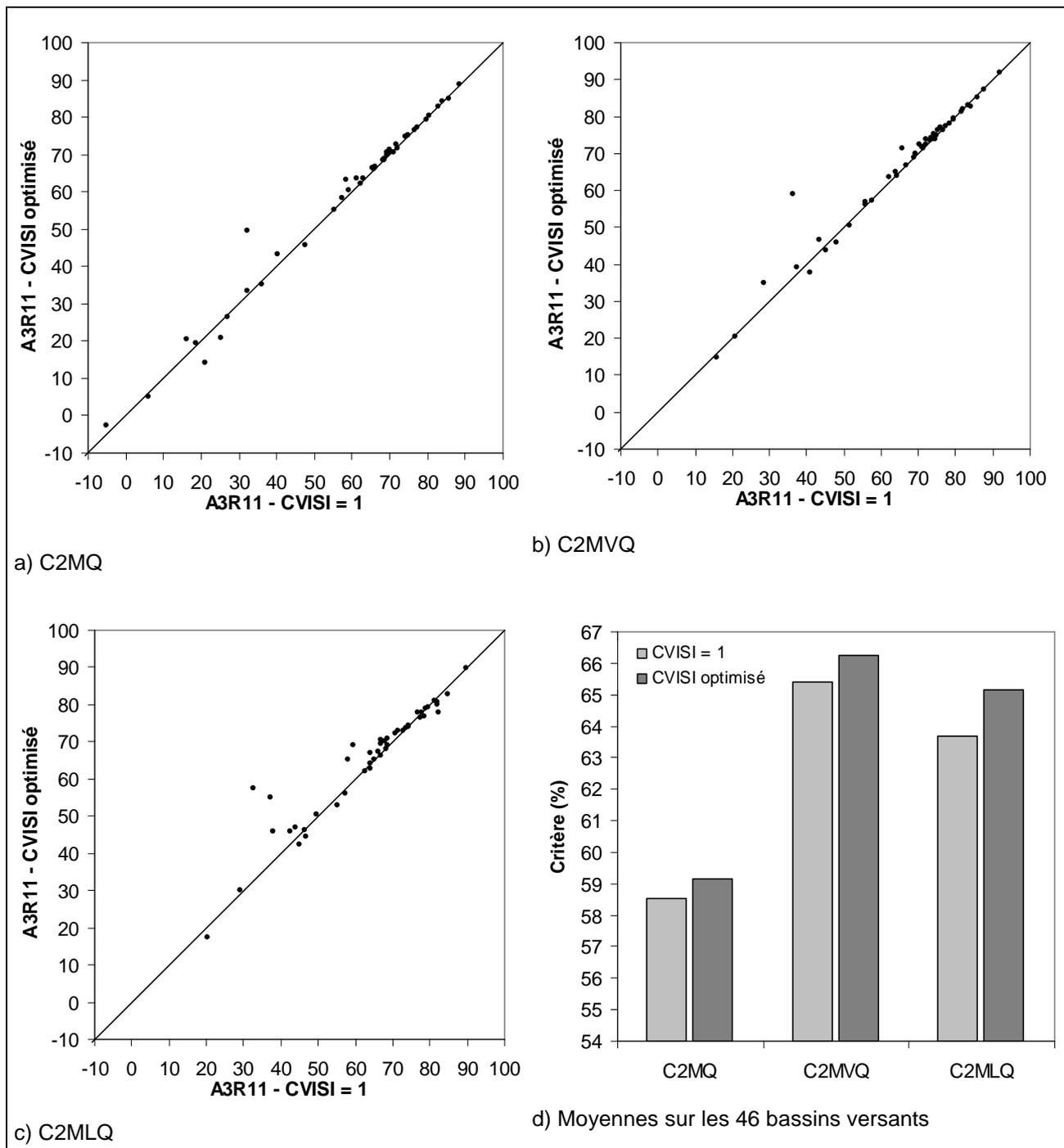


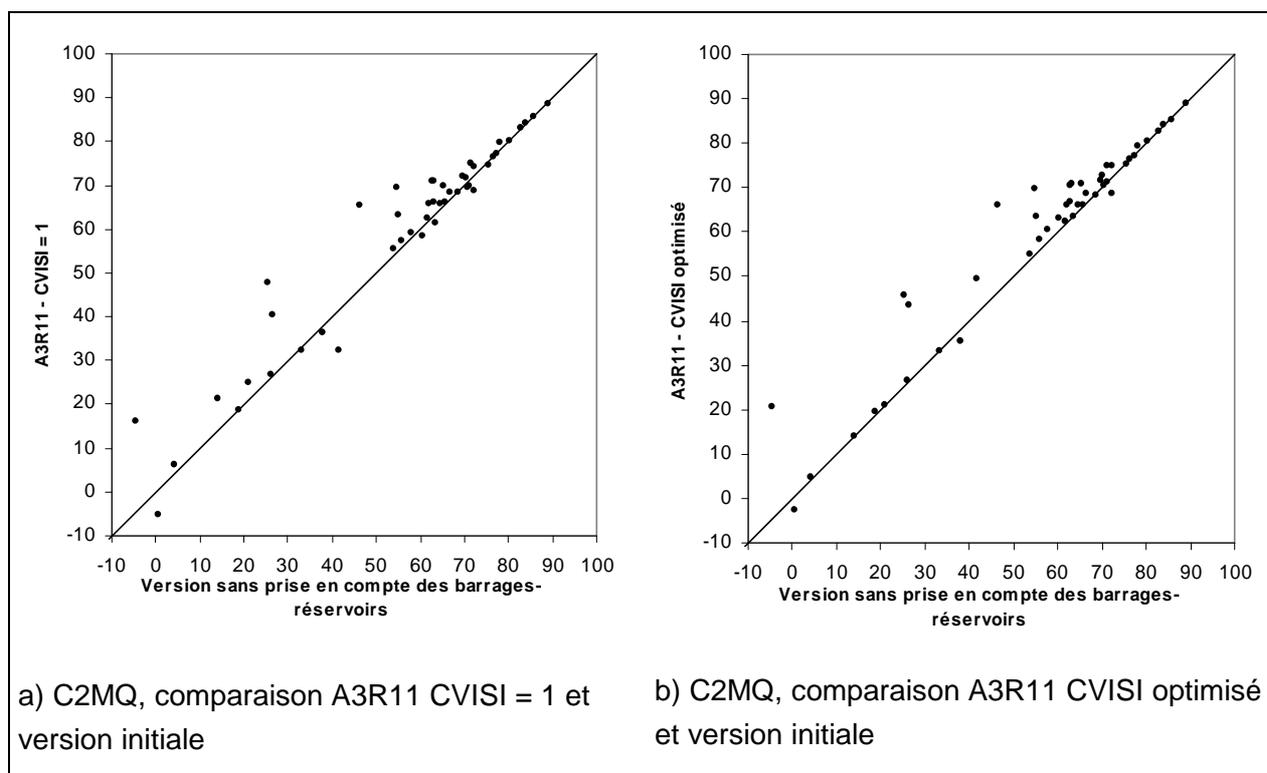
Figure 6.12 : Comparaison des performances de la solution A3R11 avec CVISI optimisé et CVISI fixé à 1 pour les trois critères – 46 bassins versants, contrôle

Les graphiques a, b et c de la Figure 6.12 montrent que les améliorations apportées par l'introduction du coefficient de visibilité ne sont pas systématiques et sont significatives uniquement sur un nombre réduit de bassins versants (de 11 % à 20 % des bassins selon le critère considéré). Les améliorations des performances moyennes (d) sont seulement dues à quelques fortes améliorations sur quelques bassins versants.

Dans les quelques cas où les améliorations sont significatives, les performances du modèle restent modestes (inférieures à 70 %). L'optimisation du coefficient de visibilité ne permet pas d'arriver à des résultats probants. Les bassins versants correctement simulés par la solution A3R11 (critères supérieurs à 70 %) lorsque le coefficient de visibilité est fixé à 1 ne sont pas significativement améliorés par l'optimisation de CVISI.

Enfin, les quelques cas où les performances diminuent en contrôle malgré l'optimisation du coefficient de visibilité indiquent que ce coefficient n'est pas toujours très robuste.

La Figure 6.13 compare les performances bassin par bassin de la solution de prise en compte des barrages-réservoirs A3R11 avec les performances du modèle initial ne prenant pas en compte les barrages lorsque le coefficient de visibilité est fixé d'une part et optimisé d'autre part.



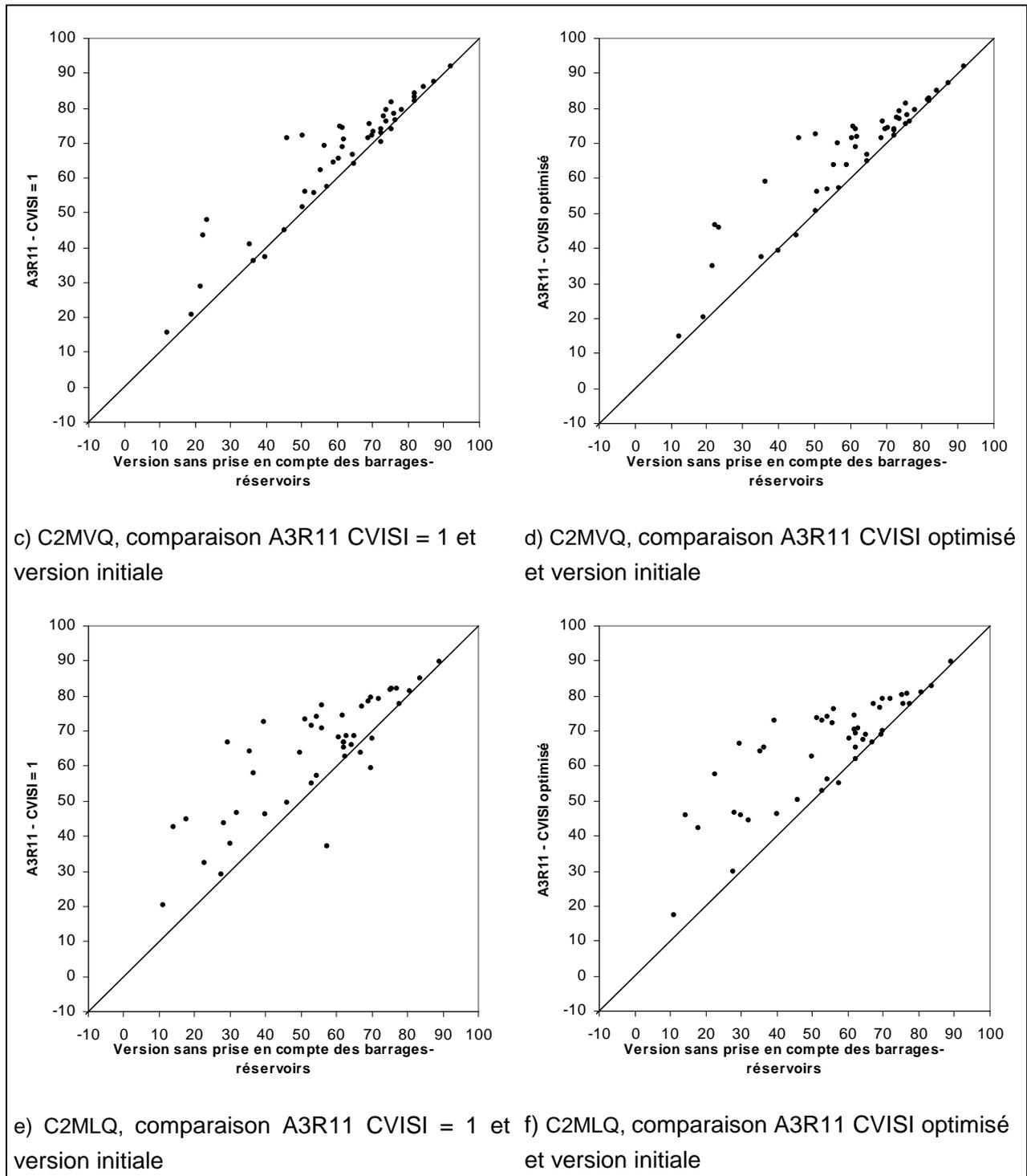


Figure 6.13 : Comparaison des performances de la solution A3R11 avec CVISI fixé à 1 et optimisé et des performances du modèle sans prise en compte des barrages-réservoirs pour les trois critères – 46 bassins versants, contrôle

Les graphiques de la Figure 6.13 indiquent que l'optimisation du coefficient de visibilité permet d'éviter ou de limiter les pertes de performances importantes obtenues avec la solution A3R11 pour certains bassins versants. En effet, lorsque CVISI est optimisé, les performances de la solution A3R11 sont soit meilleures soit égales aux performances du modèle initial quel que soit le bassin versant. Les coefficients de visibilité correspondant aux

bassins versants pour lesquels la solution A3R11 avec CVISI fixé à 1 donnait des performances inférieures au modèle initial sont nuls ou très proches de zéro.

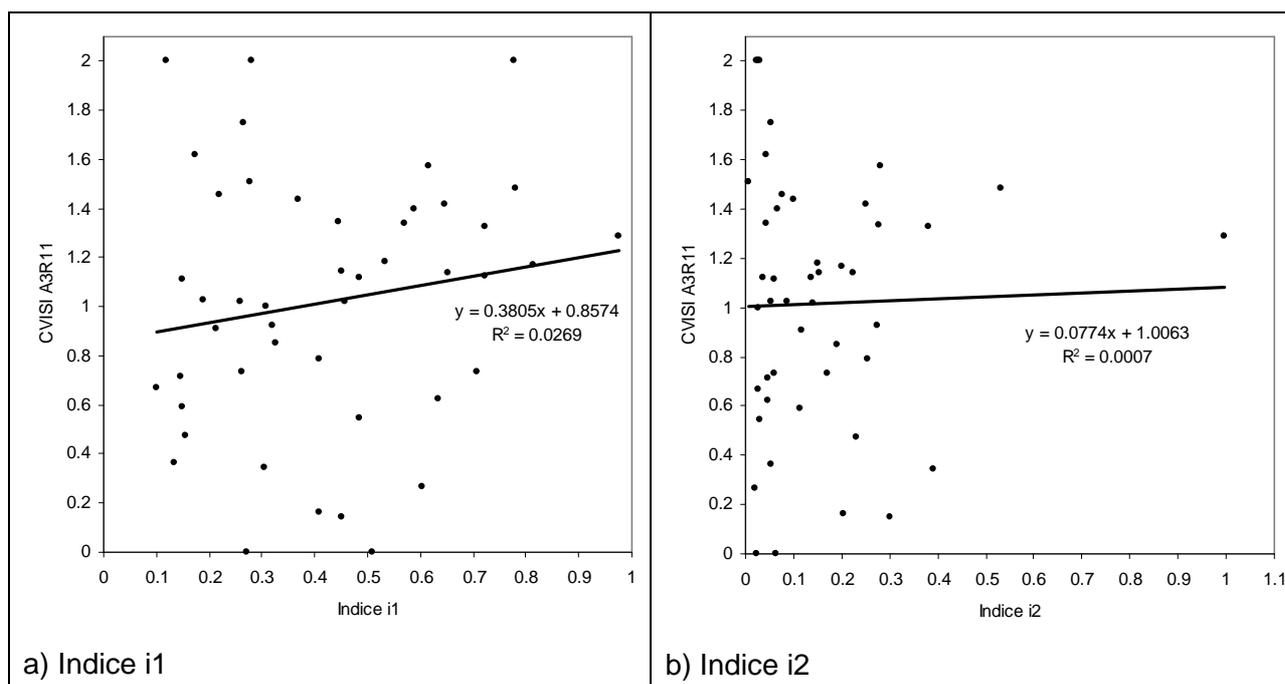
Il subsiste quelques bassins versants pour lesquels les performances de la solution A3R11 en contrôle sont améliorées mais restent légèrement inférieures à celles du modèle initial malgré l'optimisation du coefficient de visibilité. Ces cas confirment le manque de robustesse du coefficient de visibilité constaté précédemment.

En reprenant une démarche semblable à celle adoptée pour tenter de relier le coefficient de partage à certaines caractéristiques des bassins versants et des barrages-réservoirs, nous tentons dans la suite de lier les valeurs du coefficient de visibilité à ces caractéristiques. L'objectif est de chercher à déterminer *a priori* la valeur de CVISI la plus adaptée à un bassin versant donné.

La Figure 6.14 représente les valeurs du coefficient de visibilité de la solution A3R11 en fonction des quatre descripteurs i_1 , i_2 , i_3 et i_4 .

La droite et le coefficient de régression (R^2) sont représentés sur chacun des graphiques. Il n'y a pas de tendance qui se dégage entre les valeurs de coefficient de visibilité et les descripteurs des bassins versants.

Les résultats précédents indiquent qu'il n'est pas possible de prédéterminer le coefficient de visibilité grâce aux descripteurs utilisés. Ainsi, nuancer les manœuvres au sein des solutions de prise en compte n'apporte pas d'amélioration significative sur les performances. Le modèle accepte les données de remplissage telles qu'elles ont été observées.



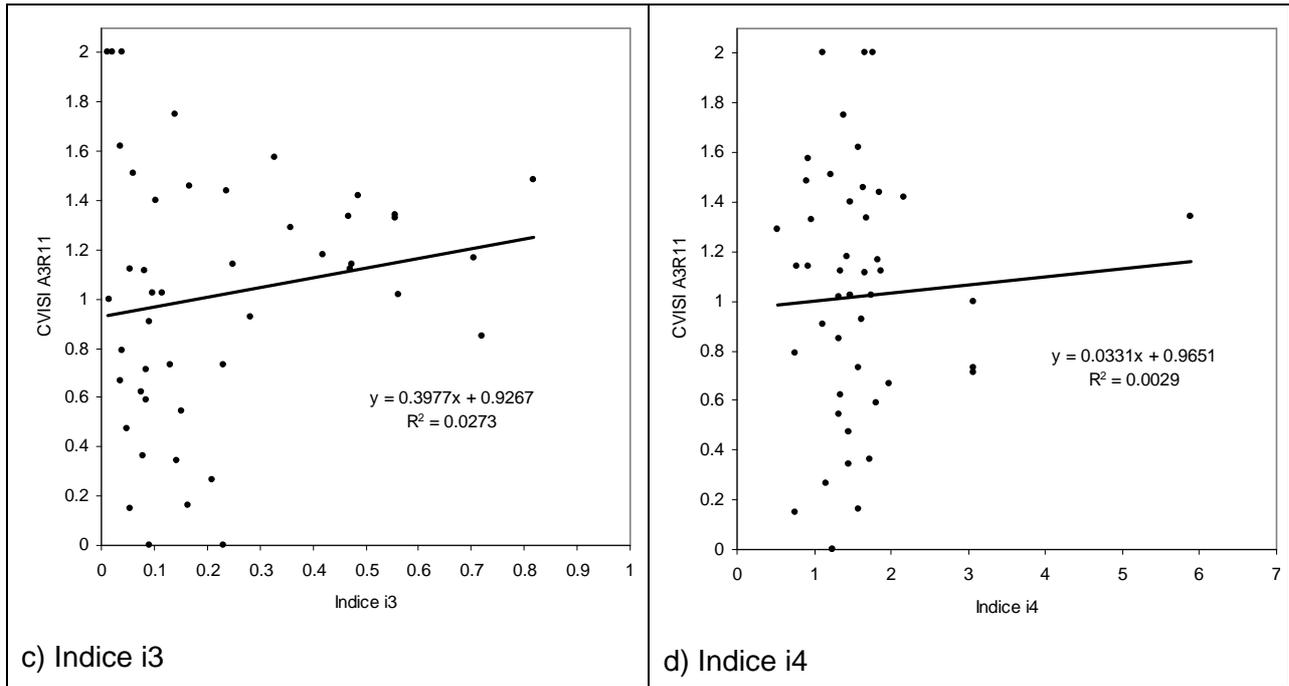


Figure 6.14 : Valeurs du coefficient de visibilité de la solution A3R11 en fonction des descripteurs i1, i2, i3 et i4

6.6. Synthèse

L'objectif de ce chapitre était de tenter d'expliquer les différences de performances de certaines solutions qui se révèlent être plus adaptées à certains bassins versants qu'à d'autres. Nous avons constaté sur un exemple, que des solutions différentes de prise en compte des barrages-réservoirs pouvaient donner des résultats significativement différents sur certains bassins versants. Cette constatation nous a amenés à rechercher des règles de choix de la solution la plus adaptée au bassin versant considéré en se basant sur certaines caractéristiques physiques décrivant la configuration des ouvrages sur le bassin versant.

La recherche d'associations de solutions par paires a montré que les associations les plus performantes étaient celles qui allient deux solutions contrastées. En effet, du point de vue des rejets, les meilleures associations trouvées sont celles qui tirent profit d'un rejet dans le réservoir de transfert (R11) qui sera très lissé et d'un rejet dans la branche d'écoulement direct qui lui sera transmis rapidement vers la sortie du modèle. Concernant les points d'alimentation, les meilleures associations trouvées font intervenir à la fois une alimentation à partir d'un stock pérenne et une alimentation à partir d'une source intermittente.

Il n'a cependant pas été possible de détecter de relations fortes et significatives qui auraient permis de choisir une solution adaptée à un type de bassin versant en s'appuyant sur certaines caractéristiques physiques. Certaines tendances semblent cependant exister. L'importance de la superficie du bassin versant contrôlé par le barrage-réservoir par rapport à la superficie totale est le seul descripteur pour lequel un très léger lien avec un type de

solution a été trouvée. Mais il n'est pas suffisamment fort pour servir de critère de choix d'un type de solution adapté à un bassin versant donné.

Nous avons testé une solution intégrant dans sa structure les deux rejets issus des meilleures associations afin de voir s'il était possible de tirer profit, pour un même bassin, des spécificités de ces deux rejets. Les résultats ont montré que, pour assurer un gain de performances, ce type de solution nécessite d'introduire un paramètre supplémentaire à optimiser. Cette sophistication n'est pas justifiée car le gain de performances reste limité.

Enfin, nous avons étudié l'intérêt d'introduire au sein des solutions de prise en compte des barrages-réservoirs un coefficient permettant de moduler l'importance donnée aux manœuvres des barrages-réservoirs. Les améliorations apportées par ce coefficient sont modestes et concernent un nombre limité de bassins versants. Il n'a également pas été possible d'établir de lien entre ce coefficient et certaines caractéristiques physiques des bassins versants et des ouvrages.

Les difficultés rencontrées dans la recherche d'un lien entre certaines caractéristiques physiques des bassins versants et des barrages-réservoirs avec le choix d'une solution de prise en compte des ouvrages de stockage peuvent être liées au caractère global du modèle. Il est en effet difficile d'identifier clairement des liens entre des phénomènes ayant lieu sur le bassin versant et certaines composantes du modèle. Les difficultés rencontrées dans notre démarche peuvent être rapprochées de celles issues des questions de régionalisation des paramètres des modèles globaux. En effet, dans ce cas, on cherche également à établir des liens entre paramètres du modèle et descripteurs du bassin versant. Les relations trouvées permettraient alors d'utiliser le modèle sur des bassins versants non jaugés, c'est-à-dire des bassins pour lesquels on ne dispose pas de données de débit pour caler les paramètres du modèle. Les questions de régionalisation ont souvent été abordées en modélisation (James, 1972 ; Magette *et al.*, 1976 ; Pirt et Bramley, 1985 ; Srikanthan et Goodspeed, 1988 ; Ando, 1990 ; Servat et Dezetter, 1992 ; Seibert, 1999 ; Perrin, 2000). Comme le mentionne Perrin (2000) "le relatif échec dans l'établissement d'équations de régression [...] réside probablement dans le fait que l'on est certainement très loin de pouvoir identifier toutes les caractéristiques qui trahiraient le comportement réel d'un bassin vis-à-vis de la transformation pluie-débit, et qui puissent en même temps être pertinentes pour le modèle". Il se pourrait que les problèmes rencontrés dans le cas de la prise en compte des barrages-réservoirs soient du même ordre.

Chapitre 7

Chapitre 7.

Transposition des résultats obtenus avec le modèle GR4J à un autre modèle pluie-débit global

7.1. Introduction

Les résultats présentés dans les chapitres précédents ont été obtenus avec le modèle GR4J. Ce modèle a été sélectionné pour servir de base à ce travail pour ses qualités de robustesse, de simplicité et d'efficacité (cf. chapitre 3). Il peut être intéressant d'évaluer dans quelle mesure les résultats obtenus avec le modèle GR4J ainsi que les pistes dégagées pour la prise en compte des barrages-réservoirs sont transposables à d'autres modèles pluie-débit globaux.

L'objectif de ce chapitre est donc de tester l'approche proposée avec le modèle GR4J en utilisant un autre modèle pluie-débit global, pour en évaluer la généralité. Nous allons principalement répondre aux deux questions suivantes :

- L'introduction d'un nouveau réservoir dans la structure d'un modèle pluie-débit global différent de GR4J afin de prendre en compte les barrages-réservoirs donne-t-elle des résultats intéressants ?
- Les règles d'introduction de ce nouveau réservoir déterminées avec le modèle GR4J sont-elles transposables à un autre modèle du même type ?

Un grand nombre de modèles pluie-débit globaux existe. Perrin (2000) a testé 38 structures de modèles de ce type sur un échantillon de 429 bassins versants. Ces tests ont montré que les modèles sont proches en termes de performances. Afin de répondre aux questions précédentes, nous avons sélectionné, parmi les nombreux modèles pluie-débit globaux disponibles, le modèle TOPMODEL (Beven et Kirkby, 1979 ; Beven *et al.*, 1995). Ce modèle, a été sélectionné car il repose sur un concept différent de GR4J (détaillé au paragraphe suivant). Il présente également l'avantage d'être performant tout en restant relativement simple avec un nombre limité de paramètres à caler. Nous présentons dans la suite la version utilisée.

7.2. Le modèle TOPMODEL

7.2.1. Le modèle initial

Le modèle TOPMODEL (TOPography-based hydrological MODEL : modèle hydrologique basé sur la topographie) a été développé en Grande-Bretagne à partir du concept de zone contributive variable d'écoulement et en se basant sur la topographie du bassin : les zones à faible pente (fond de vallée) ont plus de chance d'atteindre la saturation et de contribuer ainsi à un ruissellement rapide de surface que des zones de forte pente. Pour caractériser cette propension à la saturation, un indice topographique est calculé à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) pour chaque maille du bassin. Les mailles ayant une même valeur d'indice auront la même propension à la saturation. La distribution de cet indice, couplée à un réservoir de suivi d'humidité du sol, permet d'évaluer à chaque pas de temps la proportion du bassin contribuant à un écoulement rapide. Bien que permettant d'établir des cartes de zones saturées, le fonctionnement de ce modèle est en fait global. Proposé initialement par Beven et Kirkby (1979), ce modèle a reçu par la suite un grand intérêt dans la communauté hydrologique (voir par exemple Beven *et al.*, 1995) et c'est probablement aujourd'hui le modèle sur lequel le plus de recherches sont réalisées.

La version testée ici (nommée TOPMO pour éviter les confusions avec la version originale) est représentée à la Figure 7.1. En absence de MNT sur tous les bassins de la base de données, la distribution de l'indice topographique a simplement été paramétrée. La structure comporte huit paramètres, dont deux sont utilisés pour optimiser la distribution de l'indice topographique. Le réservoir de production, qui se vidange suivant une loi exponentielle, est traité en suivant les recommandations de Michel *et al.* (2003) permettant d'éviter les problèmes numériques. La structure comporte également un réservoir d'interception en tête du modèle, un réservoir de routage quadratique et un délai en sortie.

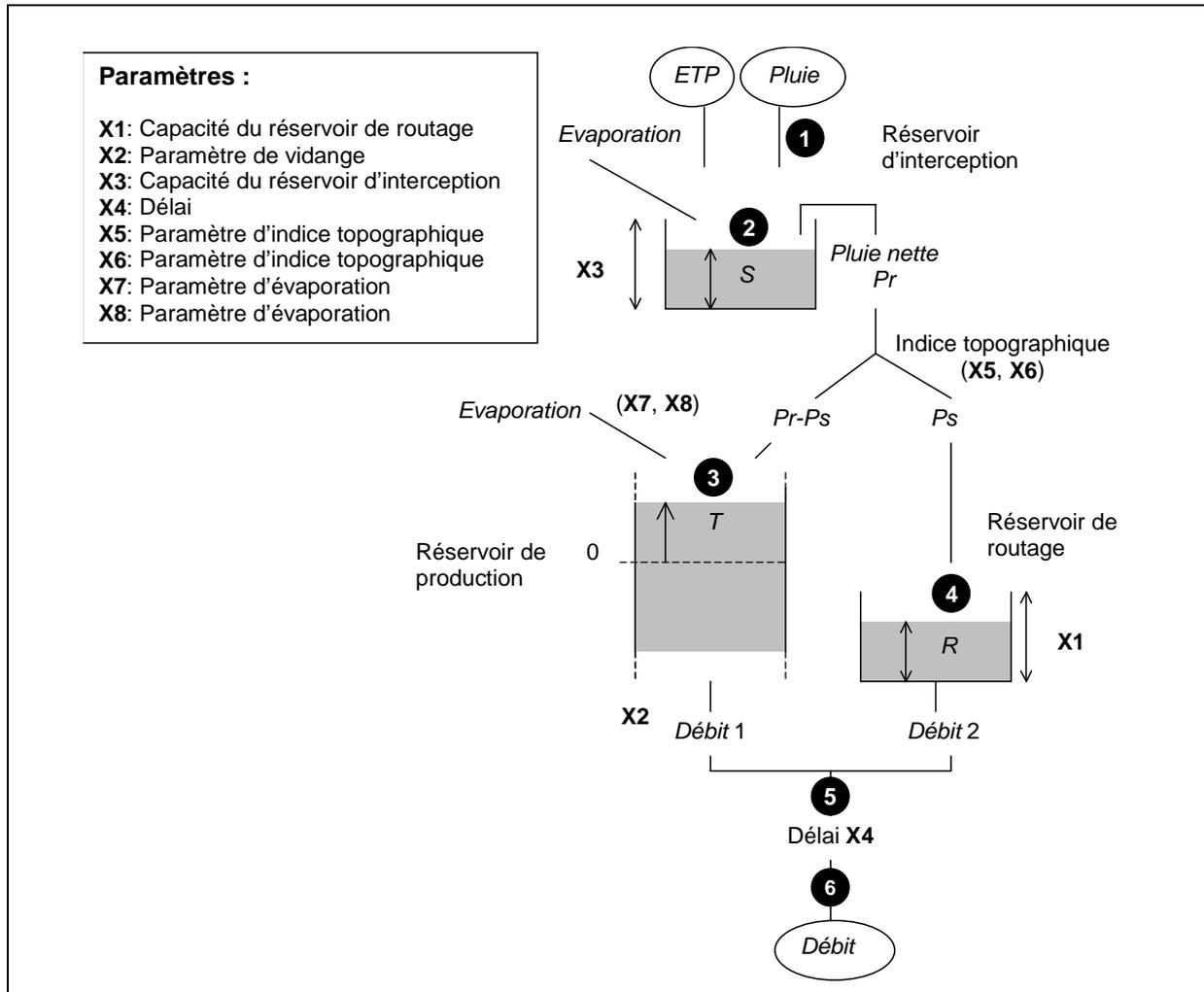


Figure 7.1 : Structure du modèle TOPMO, version modifiée du modèle TOPMODEL

Cette version a été utilisée dans de nombreux travaux d'évaluation de modèles au Cemagref (Perrin, 2000; Andréassian, 2002; Oudin, 2004; Mathevet, 2005; Rojas-Serna, 2005) et a toujours donné des résultats satisfaisants.

7.2.2. Prise en compte des barrages-réservoirs dans TOPMO

Comme pour le modèle GR4J, les stockages artificiels d'eau dans un barrage-réservoir sont représentés par l'ajout d'un nouveau réservoir dans la structure du modèle TOPMO. Le fonctionnement du nouveau réservoir est identique à celui introduit dans le modèle GR4J. A chaque pas de temps, la variation de volume du réservoir du modèle va uniquement correspondre à la variation réelle de volume enregistrée dans le barrage-réservoir (cf. chapitre 3).

Six points d'insertion (alimentation et rejet) du nouveau réservoir dans la structure de TOPMO ont été retenus. Ils sont représentés sur la Figure 7.1 par les pastilles noires. L'objectif étant de vérifier la transposabilité des conclusions obtenues avec le modèle GR4J,

nous n'avons pas testé l'ensemble des combinaisons de points d'alimentation et de rejet mais une sélection de points remarquables de la structure du modèle situés au niveau :

1. de la pluie brute (A1 et R1) ;
2. du réservoir d'interception (A2 et R2) ;
3. du réservoir de production (A3 et R3) ;
4. du réservoir de routage (A4 et R4) ;
5. de la somme des sorties des deux réservoirs précédents avant le délai (A5 et R5) ;
6. de la sortie du modèle (A6 et R6).

L'ensemble des combinaisons testées correspond donc à 36 solutions d'insertion du nouveau réservoir dans la structure du modèle TOPMO (une alimentation et un rejet).

Afin de pallier le manque d'eau qui peut arriver à certains pas de temps, en cas d'alimentation du nouveau réservoir à partir de certains points non pérennes du modèle, des reports d'alimentation ont été établis. En cas de manque d'eau à partir de l'alimentation spécifique à une solution donnée, les reports permettent d'alimenter le nouveau réservoir à partir d'une source d'eau pérenne. Dans le cas du modèle TOPMO, le réservoir de production est la source d'eau la plus pérenne. Les reports d'alimentation sont réalisés de la façon suivante :

- 1 se reporte sur 2 puis sur 3 ;
- 2 se reporte sur 3 ;
- 4 se reporte sur 3 ;
- 5 et 6 se reportent sur 4 puis sur 3.

7.3. Performances sur l'échantillon de bassins versants de référence

Nous présentons dans le paragraphe suivant les résultats obtenus pour les 36 solutions de prise en compte des barrages-réservoirs dans le modèle TOPMO.

Le Tableau 7.1 présente les performances moyennes en contrôle obtenues sur l'échantillon de bassins de référence pour chaque solution testée. Les résultats sont calculés sur les débits (C2MQ, accent mis sur les débits élevés) et sur le logarithme des débits (C2MLQ, accent mis sur les débits faibles). Les performances moyennes de la meilleure solution sont en gras. Les performances du modèle sans prise en compte des barrages-réservoirs (modèle initial) sont indiquées en bas de chaque tableau.

	A3	A1	A2	A4	A5	A6	σ	Moy		A3	A1	A2	A4	A5	A6	σ	Moy	
R4	56.6	56.1	56.1	55.1	53.4	52.4	1.28	55.4		58.5	58.2	58.2	55.3	48.9	44.4	4.08	55.8	
R5	56.1	56.0	56.1	54.4	52.2	52.6	1.70	55.0		R5	57.0	56.8	56.9	54.2	46.5	43.1	4.51	54.3
R6	55.8	55.7	55.7	54.5	52.5	52.0	1.41	54.9		R6	55.8	55.6	55.5	53.2	46.2	41.8	4.09	53.3
R1	53.6	53.3	53.5	52.8	51.9	51.8	0.68	53.0		R2	51.6	51.4	51.3	50.1	43.8	40.4	3.31	49.6
R2	53.6	53.3	53.4	52.8	52.0	51.8	0.64	53.0		R1	51.6	51.3	51.4	50.0	43.8	40.4	3.30	49.6
R3	53.7	53.6	52.9	52.6	51.7	50.8	0.82	52.9		R3	51.2	51.3	51.1	49.5	43.0	39.7	3.54	49.2
σ	1.42	1.40	1.51	1.10	0.60	0.62				σ	3.20	3.15	3.20	2.50	2.22	1.81		
Moy	54.9	54.7	54.6	53.7	52.3	51.9				Moy	54.3	54.1	54.1	52.1	45.4	41.6		
			Initial	53.9									Initial	51.4				

a) Accent mis sur les débits élevés – Critère C2MQ b) Accent mis sur les débits faibles – Critère C2MLQ

Tableau 7.1 : Performances moyennes des 36 solutions testées sur l'échantillon de bassins versants de référence – Contrôle

7.3.1. Alimentation

Le classement des solutions selon les performances moyennes montre que, pour un même rejet, le groupe des solutions les plus performantes est composé de solutions ayant les mêmes points d'alimentation pour les deux critères. Ce groupe est composé des solutions alimentées à partir :

- de la pluie brute (A1)
- du réservoir d'interception (A2)
- du réservoir de production (A3)

Ces points sont tous situés dans la partie de production du modèle. Compte tenu des reports, ils font tous appel à la source d'eau pérenne qu'est le réservoir de production du modèle. L'alimentation à partir de ce réservoir (A3) fournit d'ailleurs les meilleurs résultats.

Une baisse significative des performances (plus de 1 %) a lieu lorsque l'alimentation du réservoir image est faite à partir de la partie de transfert du modèle (A4, A5 et A6). L'alimentation à partir de la sortie du modèle (A6) donne les performances les plus faibles.

7.3.2. Rejet

Quel que soit le critère considéré, pour une même alimentation du réservoir image, les rejets dans le réservoir de transfert (R4) donnent les meilleures performances moyennes. Les rejets en fin de modèle avant le délai (R5) et à la sortie (R6) permettent également d'améliorer significativement les performances du modèle initial. On note cependant que, lorsque l'accent est mis sur les débits faibles, les différences de performances pour les rejets R4, R5 et R6 sont importantes (plus de 1 %). Dans ce cas, les solutions rejetant dans le réservoir de transfert (R4) sont nettement plus performantes.

Les solutions les moins performantes sont celles pour lesquelles les rejets se font sur la pluie brute (R1), dans le réservoir d'interception (R2) et dans le réservoir de production (R3). Ces points de rejet se démarquent nettement des autres par leurs mauvaises performances.

7.3.3. Amélioration par rapport à la version initiale du modèle

Les meilleures solutions permettent d'améliorer notablement les performances du modèle initial (calage-contrôle classique). Les graphiques de la Figure 7.2 permettent de comparer les distributions des performances du modèle sans prise en compte des barrages-réservoirs (initial) avec les performances de la meilleure solution de prise en compte des ouvrages (A3R4).

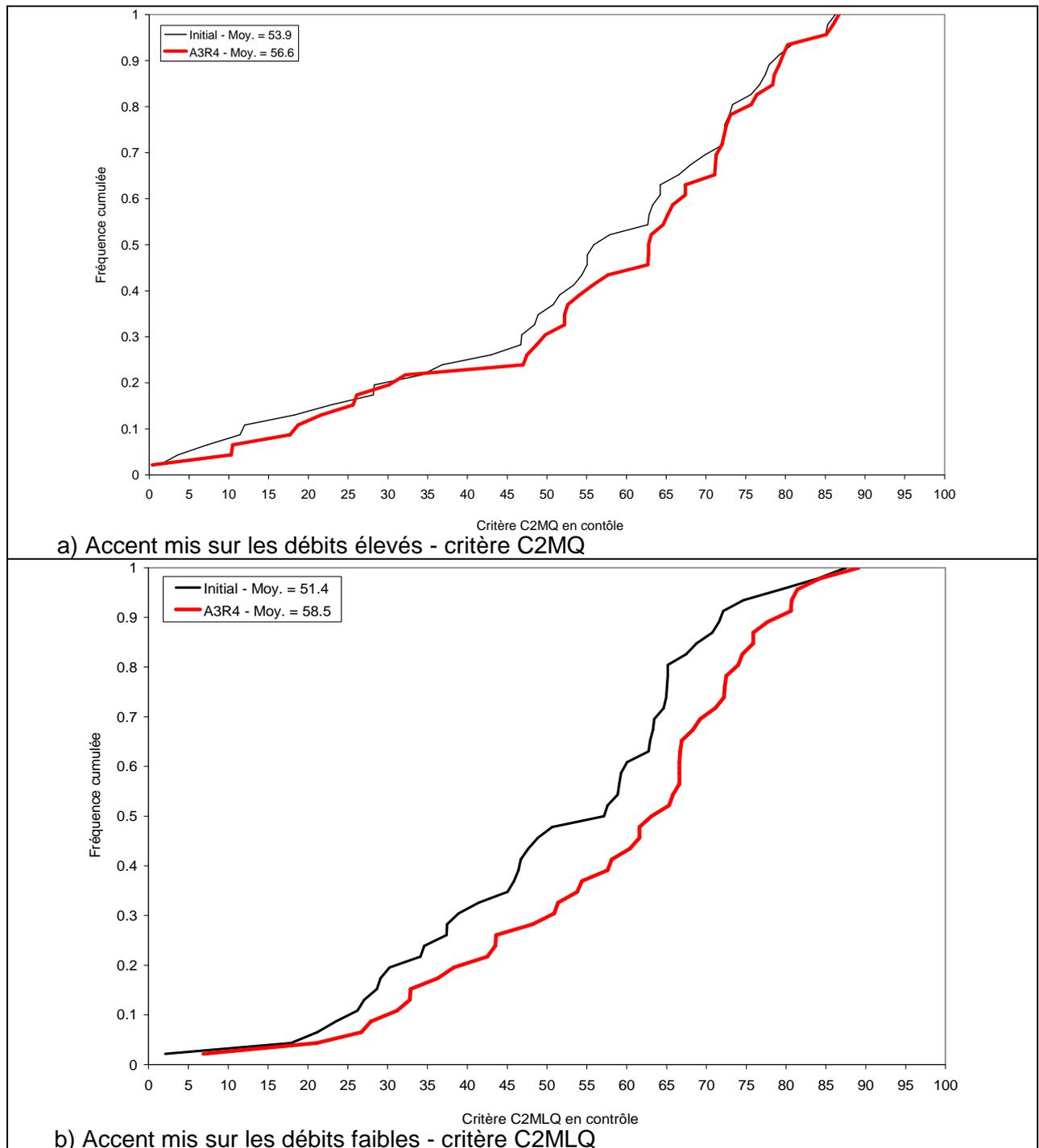


Figure 7.2 : Distributions des performances par bassin suivant les critères C2MQ et C2MLQ pour la version initiale du modèle et la solution A3R4

Comme dans le cas du modèle GR4J, l'amplitude des différences de performances dépend du critère considéré : elle est relativement réduite lorsque l'accent est mis sur les débits élevés (+ 2,7 % en moyenne) et nettement plus importante lorsque l'accent est mis sur les débits faibles (+ 7,1 % en moyenne). Ceci confirme que la prise en compte des barrages-réservoirs permet une amélioration importante des simulations des faibles débits et une amélioration plus modeste des simulations des débits élevés.

7.3.4. Comparaison avec les conclusions obtenues en utilisant le modèle GR4J

Les pistes d'insertion du nouveau réservoir dégagées en utilisant le modèle TOPMO sont cohérentes avec les règles d'insertion établies grâce au modèle GR4J :

- Il est préférable d'alimenter le nouveau réservoir à partir de stocks d'eau pérennes situés dans la partie de production du modèle et spécialement à partir du réservoir de production (A3) ;
- Il est intéressant de vidanger le nouveau réservoir dans la partie de transfert du modèle et plus particulièrement dans le réservoir de routage (R4). Les résultats obtenus avec le modèle TOPMO confirment qu'il est important d'introduire un délai et/ou un lissage dans le transfert des rejets du nouveau réservoir. En effet, les rejets faisant intervenir le réservoir de routage (R4) ou bien un délai (R5) sont plus performantes que les solutions rejetant directement en sortie du modèle (R6). De même que pour le modèle GR4J, l'action de la fonction de rendement sur les rejets du nouveau réservoir est à proscrire, comme le montrent les faibles performances des rejets en tête de modèle (R1, R2 et R3).

La solution la plus performante globalement associée, comme dans le cas du modèle GR4J, une alimentation à partir du réservoir de production et un rejet dans le réservoir de routage (A3R4). La meilleure solution est commune aux deux critères.

7.4. Conclusion

Les résultats obtenus avec le modèle TOPMO, version modifiée du modèle TOPMODEL, vont dans le sens d'une certaine généralité des résultats obtenus avec le modèle GR4J. Ils permettent de renforcer certaines conclusions clés établies en utilisant le modèle GR4J :

- La prise en compte explicite des données de remplissage des barrages-réservoirs, dans la structure d'un modèle pluie-débit global permet d'améliorer notablement les simulations des débits. Ces améliorations sont du même ordre de grandeur que celles obtenues pour le modèle GR4J et sont très substantielles pour les faibles débits ;

- L'introduction, dans la structure du modèle, d'un nouveau réservoir dont la variation de volume correspond aux variations réelles de volume enregistrées dans les barrages-réservoirs est un moyen relativement simple et performant pour tenir compte explicitement dans un modèle pluie-débit global des opérations effectuées sur des barrages-réservoirs sur un bassin versant ;
- Les règles d'insertion du nouveau réservoir ne semblent pas spécifiques au modèle GR4J. L'alimentation de ce réservoir doit être faite à partir des stocks d'eau les plus pérennes situés dans la partie de production du modèle. Les rejets doivent avoir lieu dans la partie de transfert du modèle et faire intervenir un lissage.

La cohérence des résultats obtenus avec ces deux modèles pluie-débit renforce la confiance que l'on peut accorder à la solution proposée. Une évaluation à partir d'un plus grand nombre de structures de modèles pluie-débit globaux serait cependant nécessaire pour généraliser les conclusions obtenues à partir de ces deux modèles.

Chapitre 8

Chapitre 8.

Evaluation de la meilleure solution et possible extension

8.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'évaluation de la solution la plus satisfaisante de prise en compte des barrages-réservoirs dans le modèle GR4J. Il s'agit de la solution pour laquelle le réservoir image est alimenté à partir du réservoir de production et se vidange dans le réservoir de transfert (A3R11).

L'évaluation s'articulera autour de deux points :

- Evaluation sur un échantillon de bassins versants n'ayant pas servi au développement de la solution. Il s'agit principalement de bassins moins bien connus caractérisés par des transferts interbassins d'une quantité importante d'eau et/ou par le manque de chroniques de remplissage de certains barrages-réservoirs présents (cf. chapitre 4). Cette évaluation permet de tester la robustesse de la solution dans un contexte de manque de données qui peut se présenter lors d'une utilisation opérationnelle du modèle ;
- Evaluation "interne" de la solution en termes de robustesse, fiabilité et stabilité des paramètres. Cette phase vise à étudier les changements induits par la prise en compte des données de remplissage sur le comportement du modèle et sur les variations de ses paramètres.

Trois cas "originaux" d'application de la solution développée sont ensuite utilisés pour illustrer les résultats de la méthode.

Dans la dernière partie de ce chapitre, nous testons une extension de la prise en compte des barrages-réservoirs correspondant au cas où les hydrogrammes à l'aval des barrages-réservoirs (débits restitués) sont connus.

8.2. Evaluation de la solution A3R11 sur un échantillon de bassins versants différent de celui ayant servi à son développement

8.2.1. Présentation de l'échantillon complémentaire de bassins versants - Rappels

L'échantillon complémentaire est majoritairement composé des bassins versants jugés "douteux" (22 bassins versants) quant à l'information disponible sur les stockages d'eau sur le bassin versant ou sur les transferts interbassins (cf. chapitre 4) et de bassins versants "bien connus" mais dont les données n'ont été disponibles qu'à la fin de la thèse (sept bassins de la Loire et deux bassins du fleuve Sénégal). L'échantillon complémentaire est donc composé de 31 bassins versants.

La majorité des bassins versants de l'échantillon peuvent être marqués par des transferts interbassins importants d'eau ou bien par une méconnaissance des données de stockage de barrages-réservoirs pouvant avoir une influence importante sur les débits aval. L'évaluation de la solution de prise en compte des barrages-réservoirs est ainsi faite dans un cadre contraignant. L'intérêt est d'évaluer les performances de la solution A3R11 dans des cas différents de ceux qui ont servi à son élaboration, aux limites de son domaine de développement initial. Cette évaluation a également un intérêt opérationnel, puisque, dans ce domaine, il arrive fréquemment que les bassins versants étudiés soient marqués par un manque partiel voire total de certaines données.

Dans le cas des transferts interbassins pour lesquels nous avons des données datées, nous avons utilisé les volumes transférés chaque jour comme des données d'entrée au modèle. Nous avons considéré que l'exportation d'une quantité d'eau du bassin versant revient à alimenter le réservoir image et l'importation d'eau à le vidanger.

Cet échantillon est marqué par une diversité de conditions hydroclimatiques puisqu'il regroupe des bassins versants situés aux Etats-Unis (7 dans l'Etat de l'Oklahoma et 4 en Californie), en France (15 bassins versants), en Australie (3 bassins versants en Tasmanie), au Mali (un bassin versant) et au Sénégal (un bassin versant). Ces différents contextes vont permettre d'évaluer la solution dans des contextes hydroclimatiques différents de ceux des bassins versants de l'échantillon de référence.

L'échantillon complémentaire est donc composé de 31 bassins versants dont la superficie varie de 37,5 km² à 218 000 km² (Figure 8.1) et compte 17 barrages-réservoirs au total.

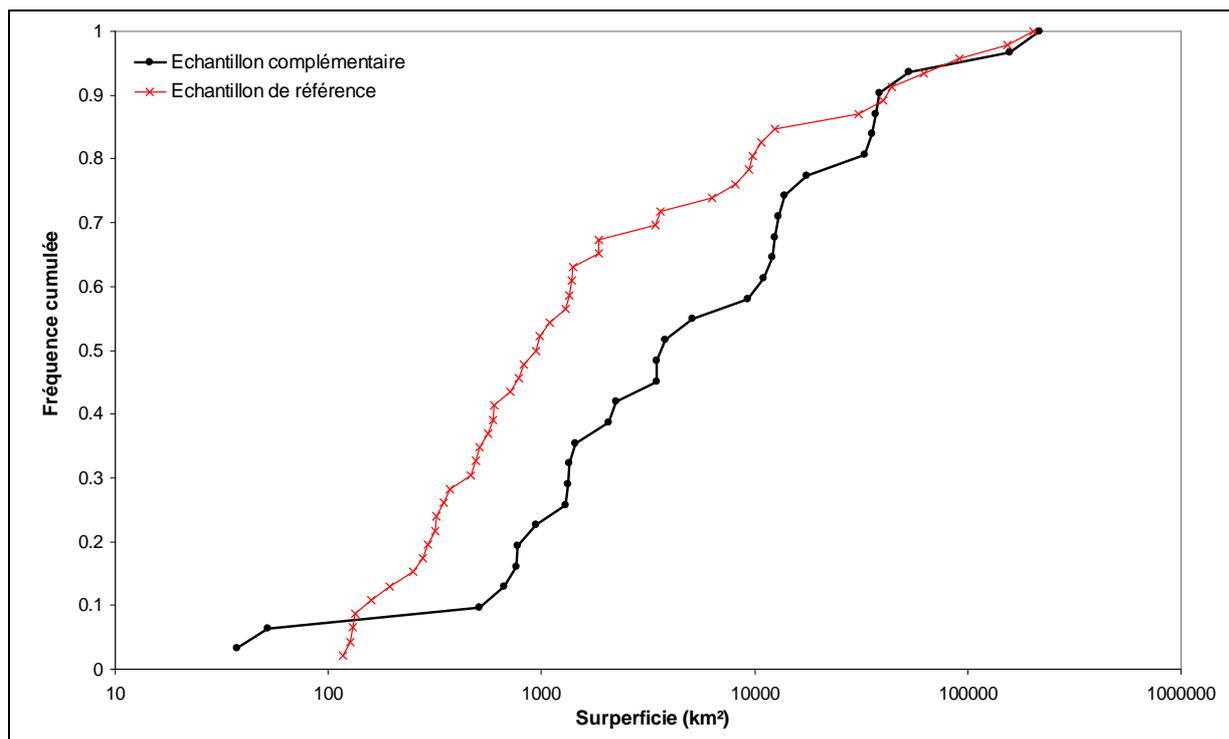


Figure 8.1 : Distributions des superficies des 31 bassins versants de l'échantillon complémentaire et des 46 bassins versants de l'échantillon de référence

L'échantillon complémentaire regroupe des bassins versants d'une superficie en moyenne supérieure à celle des bassins versants de l'échantillon de référence.

8.2.2. Performances de la solution A3R11 sur l'échantillon complémentaire de bassins versants

La Figure 8.2 permet de comparer les performances moyennes en contrôle des 31 bassins versants de l'échantillon complémentaire pour la version du modèle sans prise en compte des barrages-réservoirs (modèle initial contrôlé avec les paramètres calés avec barrages, procédure classique, cf. 5.2.3.1) et la solution A3R11.

Les résultats dépendent du critère considéré. Lorsque l'accent est mis sur les débits élevés (Figure 8.2a), les performances de la solution A3R11 sont légèrement inférieures à celles du modèle initial pour 52 % des bassins versants. Les performances moyennes sur l'ensemble des 31 bassins baissent de 45,9 % pour le modèle initial à 45,7 % pour la solution A3R11. Dans ce cas, la prise en compte des données de remplissage ne permet pas d'améliorer les performances déjà faibles du modèle initial. Les bassins versants mieux simulés grâce au modèle initial n'ont pas de points communs qui pourraient expliquer la détérioration des performances. Les bassins versants concernés ont des conditions hydroclimatiques hétérogènes (situés aux Etats-Unis, en Australie, en France, au Mali et au Sénégal) ainsi que des superficies également très différentes. Les mauvaises performances des deux versions testées sont en partie liées au manque de données sur les stockages artificiels présents et aux transferts interbassins de quantités d'eau non négligeables dans le cas des bassins versants douteux. Il est difficile d'imputer les mauvaises performances à l'une ou

l'autre des causes ou de déterminer laquelle des deux est plus significative car souvent elles se retrouvent simultanément sur les bassins versants. On note également que sur les bassins versants de la Loire et du fleuve Sénégal, pour lesquels la plupart des stockages ou des transferts sont connus, la solution A3R11 donne des résultats soit équivalents soit inférieurs à ceux du modèle initial. La diminution moyenne est de 3,3 % et est de 8,3 % au plus.

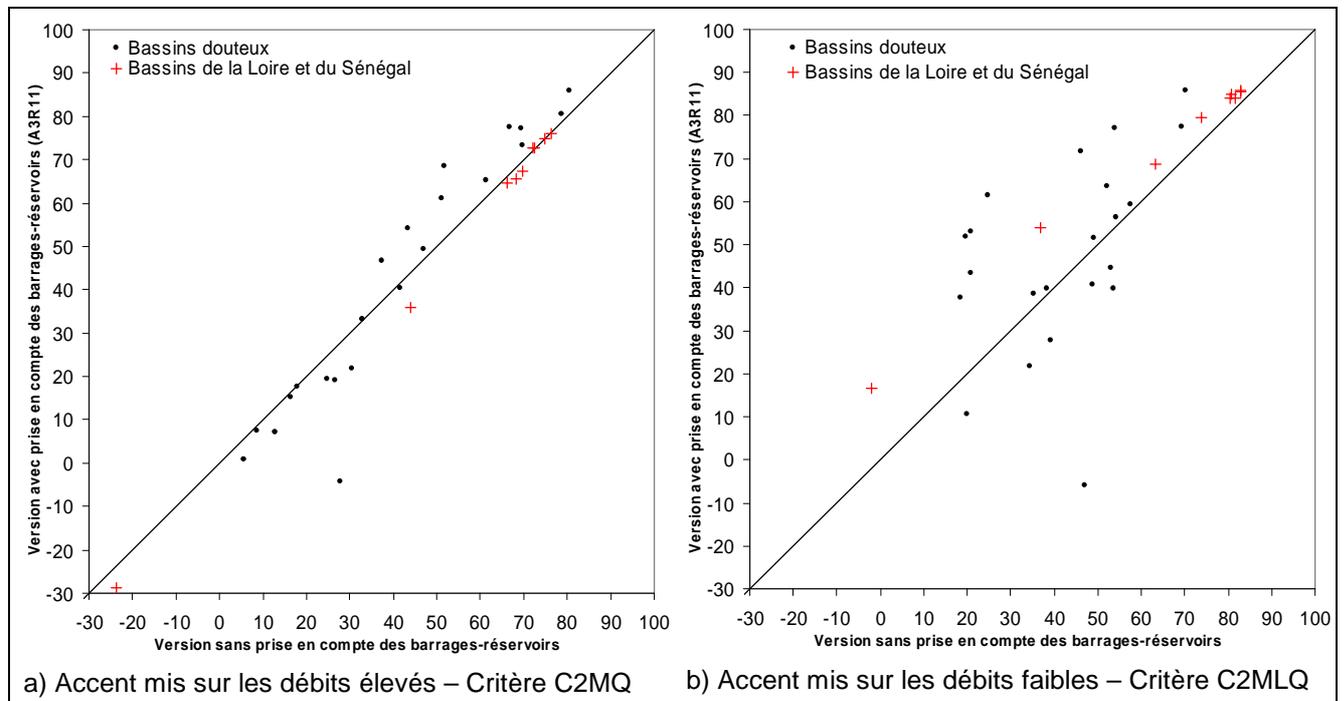


Figure 8.2 : Comparaison des performances de la solution A3R11 et de la version sans prise en compte des barrages-réservoirs sur l'échantillon complémentaire de 31 bassins versants pour les critères C2MQ et C2MLQ – Contrôle

Lorsque l'accent est mis sur les débits faibles (Figure 8.2b), le nombre de bassins versants moins bien simulés par la solution A3R11 diminue (23 % des bassins). Contrairement au cas précédent, les performances moyennes sur l'ensemble des 31 bassins versants augmentent lorsque les données de remplissage sont prises en compte dans le modèle. Elles sont de 48,6 % pour le modèle initial et de 54,6 % pour la solution A3R11. De même que dans le cas précédent, il est difficile d'identifier clairement les causes des baisses de performances lorsque les données de remplissage de certains barrages-réservoirs présents sur les bassins versants sont prises en compte. En revanche, la simulation des débits des bassins versants de la Loire et du fleuve Sénégal est améliorée lorsque les données de remplissage sont prises en compte. L'amélioration est significative puisqu'elle varie entre 2,5 % et 18,7 % avec une moyenne à 7,1 %.

Les résultats précédents illustrent la sensibilité de la méthode à la disponibilité des données d'une part et à la présence de transferts interbassins importants (par rapport aux autres quantités d'eau mises en jeu) d'autre part. Lorsque l'accent est mis sur les débits élevés, le manque de données ainsi que des transferts interbassins importants handicapent fortement

la modélisation. Ainsi, les gains que pourrait apporter la prise en compte des données de remplissage sont trop faibles par rapport à ces incertitudes.

En période d'étiage, les effets des barrages-réservoirs sur les débits sont en général plus marqués qu'en période de hautes eaux. Il peut donc être plus "urgent" d'en tenir compte en modélisation. Dans ce cas, la prise en compte des données de remplissage des ouvrages peut permettre d'améliorer les performances du modèle initial malgré le manque de données sur certains stockages artificiels ou l'existence de transferts interbassins.

8.3. Changements des paramètres du modèle induits par la prise en compte des barrages-réservoirs

Les paramètres d'un modèle sont caractéristiques d'un bassin versant donné. Les paramètres de modèles hydrologiques globaux n'ont généralement pas de correspondance simple avec des grandeurs physiques observables sur le terrain et ne sont donc pas mesurables. Ils sont déterminés par optimisation mathématique (phase de calage du modèle). Lors de l'optimisation, les paramètres vont donc être utilisés pour adapter le modèle au bassin versant étudié.

La présence d'un barrage-réservoir perturbe le comportement du bassin versant. L'optimisation du modèle ne prenant pas en compte les barrages-réservoirs peut alors être perturbée. En effet, dans ce cas, le modèle va chercher à reproduire le comportement artificialisé du bassin versant en modifiant certains de ses paramètres qui ne sont pas initialement prévus à cet effet. La structure du modèle GR4J a été mise au point pour des bassins versants non influencés. Sur des bassins influencés, certains des paramètres vont servir à compenser l'influence des barrages-réservoirs.

Nous nous intéressons, dans ce paragraphe, aux changements éventuels du comportement de certains paramètres du modèle induits par la prise en compte des données de remplissage des barrages-réservoirs. Nous cherchons en particulier à déterminer :

- quels sont les paramètres les plus sensibles à la présence d'un barrage-réservoir sur le bassin. En d'autres termes, comment le modèle initial modifie-t-il ses paramètres lors du calage pour reproduire le comportement artificialisé portant l'empreinte des barrages-réservoirs ?
- comment la prise en compte des données de remplissage des barrages-réservoirs influence-t-elle les paramètres du modèle ? Les paramètres du modèle prenant en compte les barrages-réservoirs sont-ils plus stables que ceux du modèle initial ?

Avant de répondre à ces questions nous rappelons succinctement la signification des quatre paramètres du modèle GR4J (cf. chapitre 3) :

- **X1** est la capacité maximale du réservoir de production (ou réservoir "sol") qui constitue généralement le stock d'eau le plus pérenne du modèle ;
- **X2** est un coefficient réglant les échanges d'eau entre le bassin et l'extérieur. Il est positif en cas d'apports au système et négatif en cas de sorties du système ;
- **X3** est la capacité du réservoir de transfert (ou de routage) ;
- **X4** est le temps de base des hydrogrammes unitaires.

8.3.1. Paramètres les plus sensibles à la présence de barrages-réservoirs sur le bassin versant

Dans un premier temps, nous avons déterminé pour le modèle ne prenant pas en compte les barrages-réservoirs, les paramètres les plus sensibles à la présence d'un ouvrage sur le bassin versant. Nous comparons pour cela les valeurs des paramètres obtenues sur des périodes antérieures et postérieures à la mise en eau d'un barrage-réservoir (Figure 8.3).

Cette comparaison nécessite de disposer de chroniques suffisamment longues (au moins 5 ans) de pluie et débits antérieures et postérieures à la construction d'un barrage-réservoir. Seulement cinq bassins versants de la base de données répondent à ce critère et permettent la comparaison.

Les graphiques indiquent que les paramètres obtenus sur les périodes antérieures et postérieures à la mise en service de ou des ouvrages sont différents. Le modèle utilise bien certains de ses paramètres pour s'adapter à la présence de barrages-réservoirs sur le bassin versant.

On note que le paramètre X1 est le plus affecté par la mise en service des ouvrages. Il est augmenté pour l'ensemble des bassins versants lorsque le calage est réalisé sur la période postérieure à la mise en service. Le modèle tente alors de lisser les variations plutôt brusques occasionnées par la présence de barrages-réservoirs en augmentant de manière importante la capacité du réservoir de production. Avec une capacité plus importante, le modèle dispose d'une marge de manœuvre plus importante pour contrôler la quantité de pluie allant alimenter le débit (pluie efficace).

Pour les paramètres X2 et X3, il n'y a pas de tendance franche qui se dégage. Ils peuvent augmenter ou diminuer lors du calage sur la période postérieure à la mise en service des ouvrages.

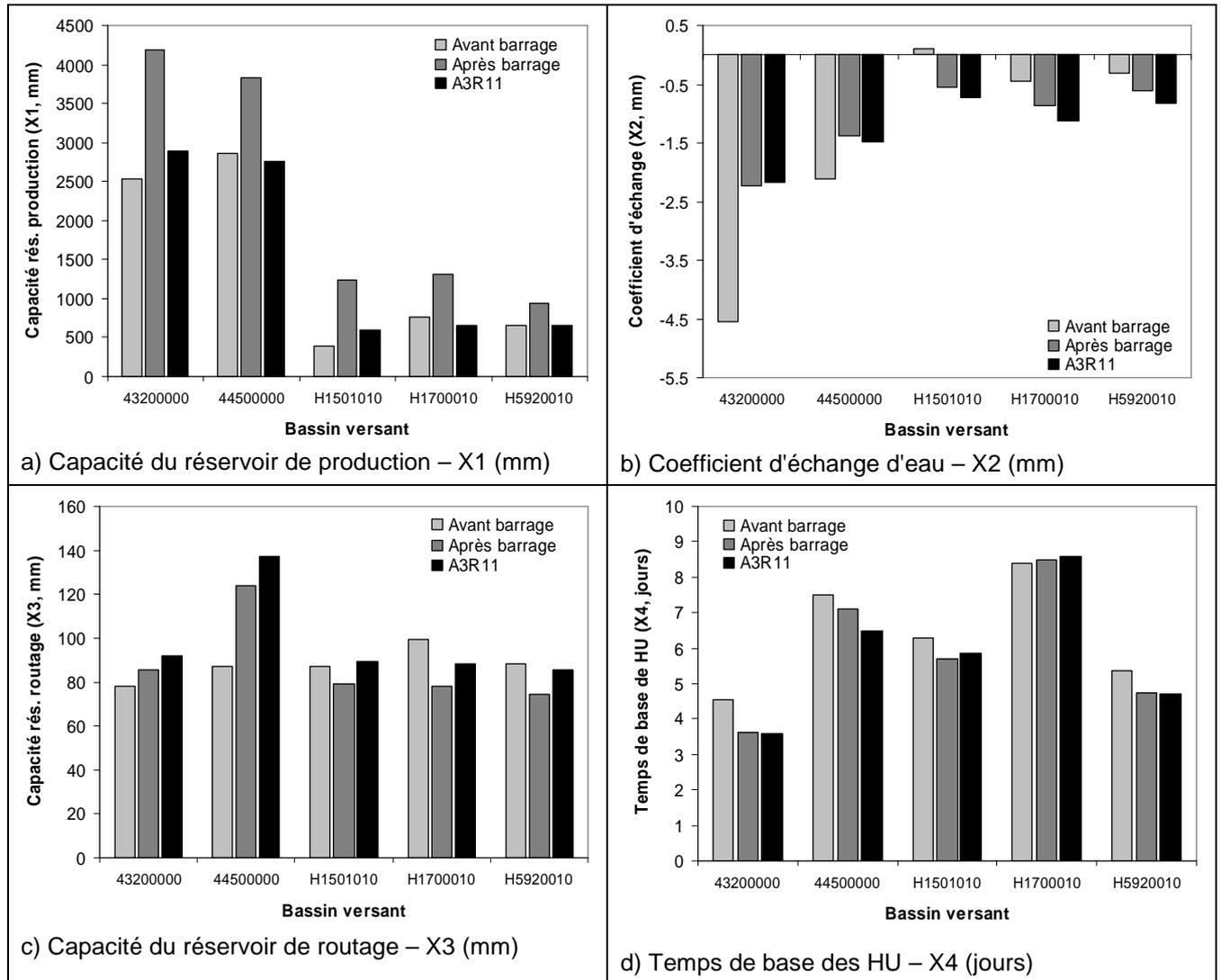


Figure 8.3 : Comparaison des valeurs des paramètres du modèle ne prenant pas en compte les barrages-réservoirs sur des périodes antérieures et postérieures à la mise en eau des ouvrages et des paramètres de la solution A3R11

Le temps de base des hydrogrammes unitaires (paramètre X4) est le moins influencé des quatre paramètres. On note une légère diminution de ce paramètre sur la période postérieure à la mise en eau des ouvrages (diminution maximale de moins d'un jour). Le temps moyen de réponse des bassins versants aux précipitations ne semble être que très légèrement affecté par la présence de barrages-réservoirs.

Le nombre de bassins versants utilisés précédemment étant réduit, les observations déduites ne sont pas généralisables mais donnent un aperçu intéressant de la manière dont sont influencés les paramètres du modèle suite à la mise en service de barrages-réservoirs.

Les constatations précédentes, notamment celles concernant le paramètre X1, peuvent être rapprochées des conclusions d'Oudin *et al.* (2006) qui se sont intéressés à l'impact d'utilisation de données d'entrées erronées (pluie et évapotranspiration) sur la performance

et l'estimation des paramètres du modèle GR4J. En effet, comme nous l'avons présenté au chapitre 1, la gestion des barrages-réservoirs introduit des variations artificielles du débit liées aux phases de stockage/destockage modifiant la réponse du bassin versant aux forçages atmosphériques. Le débit à l'exutoire d'un bassin versant influencé peut par exemple augmenter sans qu'il y ait eu de précipitations (destockage) et inversement des précipitations peuvent avoir lieu sans occasionner d'écoulement (stockage). Ces modifications peuvent s'apparenter à des données d'entrées erronées. En cas d'erreur dans la chronique de précipitation, le débit observé peut varier sans précipitations correspondantes.

Oudin *et al.* (2006) ont montré que le paramètre X1 (capacité du réservoir de production) était le plus affecté par des erreurs aléatoires sur les entrées. En cas d'erreur systématique sur les chroniques de précipitation, les paramètres X1, X2 (coefficient d'échange) et X3 (capacité du réservoir de routage) sont très influencés. Le modèle utilise ces paramètres pour réduire l'impact des erreurs sur les performances. Le paramètre X4 (temps de base des hydrogrammes unitaires) est le moins sensible aux erreurs testées.

8.3.2. Effets de la prise en compte des barrages-réservoirs sur les variations de paramètres

Dans la suite, nous examinons les effets de la prise en compte explicite des barrages-réservoirs dans le modèle sur les paramètres. Nous comparons les paramètres du modèle ne prenant pas en compte les ouvrages (calé sur la période postérieure à la mise en service des ouvrages) aux paramètres de la solution A3R11. Comme cette comparaison ne nécessite pas de données antérieures à la mise en service des ouvrages, nous avons utilisé les 46 bassins versants de l'échantillon de référence.

La Figure 8.4 permet de comparer, bassin par bassin, les valeurs des quatre paramètres du modèle ne prenant pas en compte les ouvrages d'une part et de la solution A3R11 d'autre part.

Les valeurs du paramètre X1 (Figure 8.4a) de la solution A3R11 sont inférieures à celles du paramètre X1 de la solution ne prenant pas en compte les barrages-réservoirs. La prise en compte des données de remplissage permet donc de diminuer significativement la capacité du réservoir de production du modèle. Ce résultat est en accord avec les constatations du paragraphe précédent. La prise en compte des données de remplissage permet, en effet, d'éviter l'augmentation disproportionnée et inadéquate du paramètre X1 très sensible à la présence de barrages-réservoirs. Les valeurs de ce paramètre issues du calage de la solution A3R11 se rapprochent donc davantage des valeurs qu'aurait pris le paramètre pour un bassin versant non influencé (Figure 8.3a). Ceci permet alors au modèle de réagir plus justement aux précipitations.

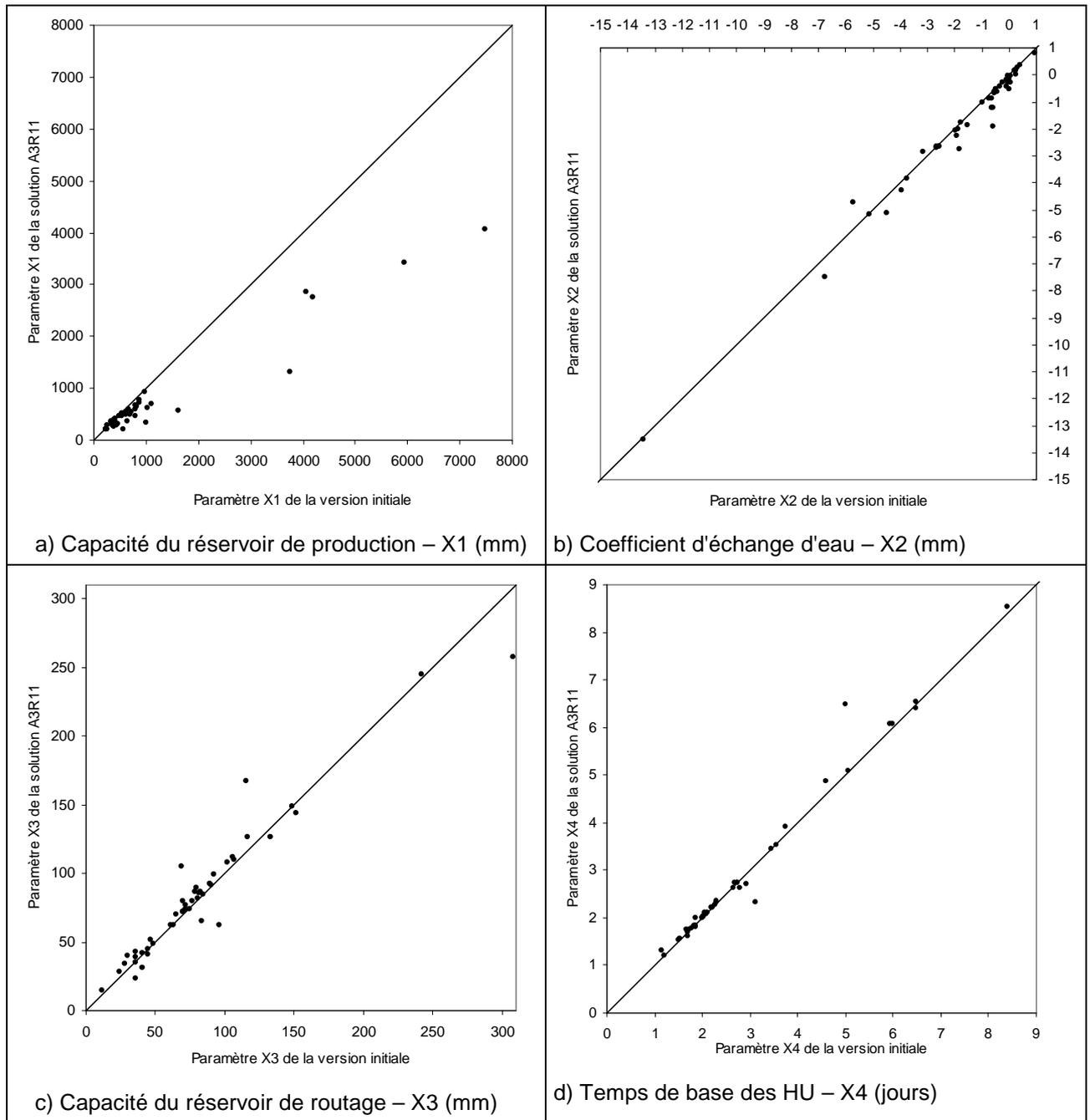


Figure 8.4 : Comparaison bassin par bassin des quatre paramètres du modèle ne prenant pas en compte les barrages-réservoirs et de la solution A3R11 obtenus pour les 46 bassins versant de référence

Les valeurs des trois autres paramètres sont très proches pour les deux versions du modèle, ce qui indique que ces paramètres sont peu affectés par la prise en compte des données de remplissage des barrages-réservoirs. Ce résultat est en accord avec les constatations faites dans le paragraphe précédent où il a été observé que ces paramètres sont peu influencés (ou de manière non monotone) par la présence de barrages-réservoirs sur le bassin versant.

La prise en compte des données de remplissage des ouvrages dans le modèle permet donc de stabiliser les valeurs du paramètre X1 (capacité du réservoir de production). Les valeurs

de la solution A3R11 sont proches des paramètres représentatifs d'un bassin versant non influencé.

8.4. Cas d'étude

Nous illustrons, dans le paragraphe suivant, les résultats de la solution de prise en compte des barrages-réservoirs A3R11 sur trois cas réels. Nous présentons à cet effet les variations de volumes sur la période simulée ainsi que les hydrogrammes mesuré et simulés avec le modèle sans prise en compte des barrages-réservoirs (en contrôle avec les paramètres de la solution A3R11) et avec la solution A3R11 (en contrôle).

Le Tableau 8.1 récapitule certaines caractéristiques des bassins versants et des barrages-réservoirs présentés.

Code	Pays (Etats-département)	Surface (km ²)	Cours d'eau	Période simulée	P _{moy} (mm/an)	Q _{moy} (mm/an)	ETP _{moy} (mm/an)
H1501010	France (Aube)	3590	Aube	1996-2001	904.2	325.5	690.9
A1462020	France (Haut-Rhin)	249	Thur	1999-2000	1757.7	834.2	703.5
11462500	Etats-Unis (Californie)	937	Russian River	1993-1997	1088.7	674.8	549.4

a) Caractéristiques des bassins versants

Code	Barrage-réservoir	Mise en service	S _{contrôlée} (km ²)	V _{normal} (hm ³)	d _h (km)	i1	i2	i3	i4	Utilisations principales
H1501010	Aube	1989	1700	170	56	0.65	0.15	0.47	0.78	Crues/Etiages
A1462020	Kruth-Wildenstein	1968	21	12	37	0.15	0.05	0.08	3.07	Crues/Etiages
11462500	Coyote Valley	1959	272	112	22	0.54	0.14	0.29	1.87	Crues/Etiages

b) Caractéristiques des barrages-réservoirs

Tableau 8.1 : Principales caractéristiques des bassins versants et des barrages-réservoirs présentés

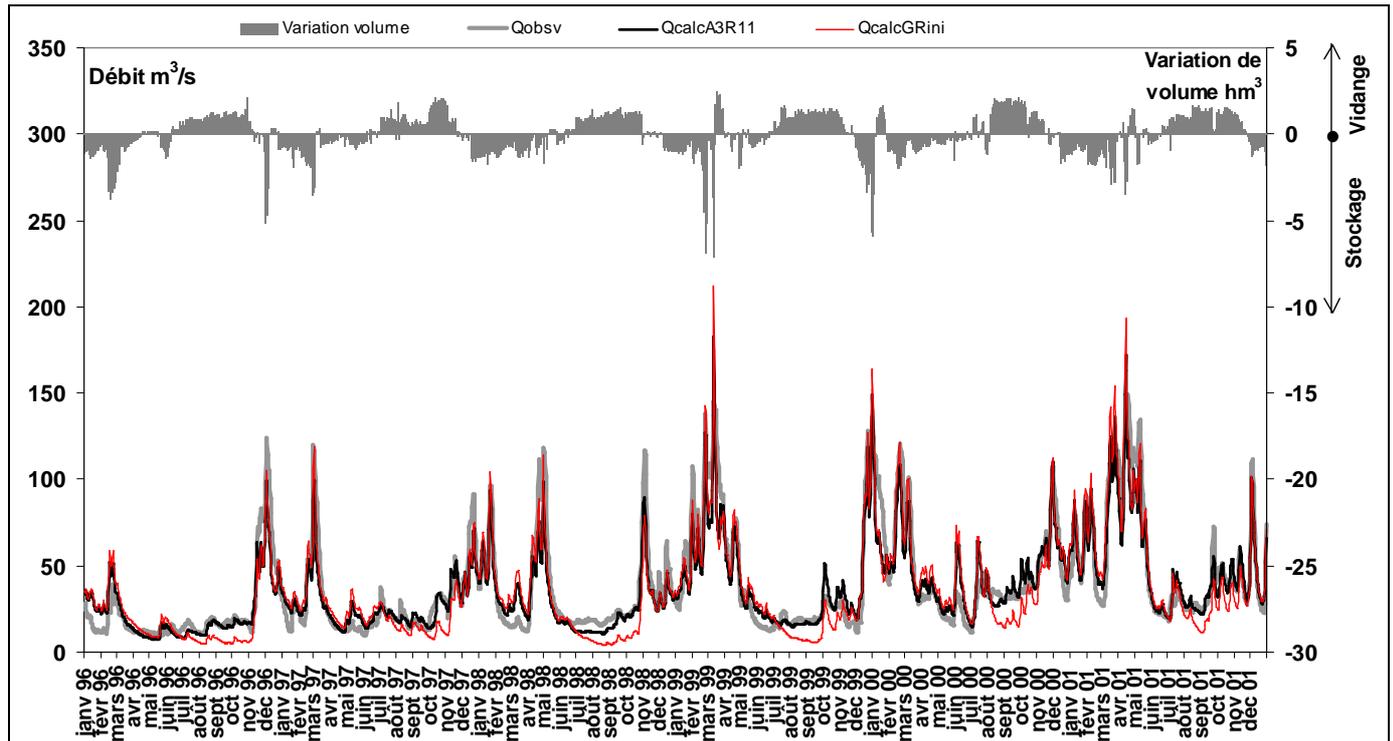
Les bassins versants retenus sont influencés à des degrés différents (indices i1, i2, i3 et i4 du Tableau 8.1b). Ceci permet d'illustrer les performances de la solution A3R11 dans des cas où l'impact du barrage-réservoir sur les débits est net (bassin versant de l'Aube à Arcis-sur-Aube, H1501010, France) ainsi que dans des cas où cet impact est plus diffus (bassin versant de la Thur à Staffelfelden, A1462020, France).

Le bassin versant de la Russian River à Hopland (11462500, Etats-Unis) a un degré d'influence intermédiaire. Ce bassin versant fait partie de l'échantillon de bassins "douteux" car il reçoit une importante quantité d'eau (237 mm/an par an en moyenne) depuis le bassin versant voisin de l'Eel River. Un tunnel relie l'Eel River à la Russian River en amont du barrage-réservoir de Coyote Valley. Le transfert a lieu principalement l'été en soutien d'étiage. Bien que nous ne disposions pas de données datées concernant ce transfert, ce cas a été sélectionné afin d'illustrer les performances de la solution A3R11 sur un bassin versant influencé et marqué par un transfert important d'eau. Ce cas peut en effet se rencontrer dans le domaine opérationnel.

Nous terminons ce paragraphe en présentant une application du modèle de prise en compte des barrages-réservoirs sur un cas à la marge des cas qui ont servi à son développement. Il s'agit du bassin versant de la Truyère à Serverette (O7202510, Lozère). D'une superficie de 72 km², ce bassin versant n'est pas influencé par la présence d'un barrage-réservoir mais est alimenté par un apport d'eau régulier depuis le bassin voisin. Nous présentons donc les résultats de l'application de la méthode de prise en compte des barrages-réservoirs dans ce cas de transfert interbassin pur.

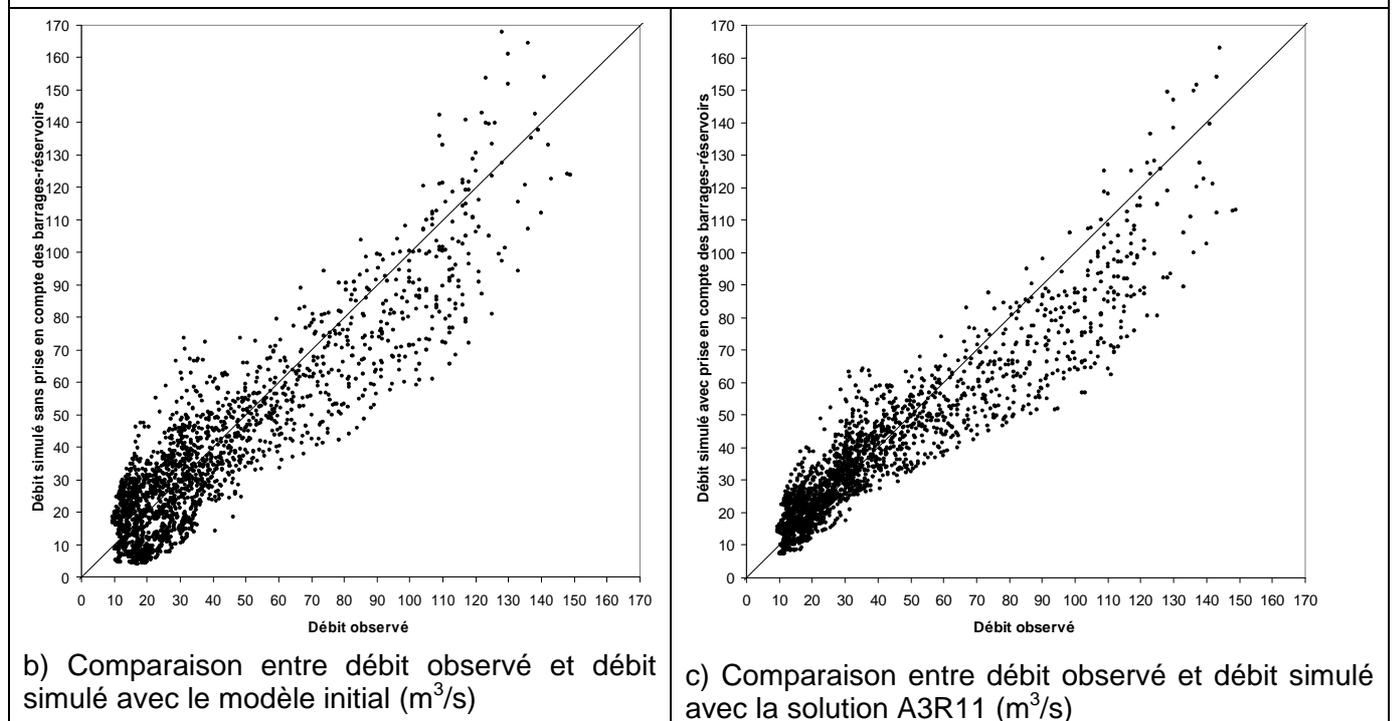
8.4.1. Cas 1 : bassin versant fortement influencé : l'Aube à Arcis-sur-Aube, France

Le barrage Aube a un double objectif d'écrêtement de crue et de soutien d'étiage. La comparaison des hydrogrammes permet de visualiser les améliorations significatives de la restitution des débits en période d'étiage apportées par la solution A3R11 par rapport au modèle sans prise en compte des barrages-réservoirs. La solution A3R11 rend mieux compte du soutien d'étiage que le modèle initial. Les progrès réalisés sont cependant moins importants pour la restitution des débits de crue. La comparaison de la Figure 8.5b et de la Figure 8.5c montrent que la surestimation de certains débits de crue par le modèle initial est diminuée lors de la prise en compte des données de remplissage. Ainsi la solution A3R11 rend légèrement mieux compte du rôle écrêteur du barrage que le modèle initial.



a) Hydrogrammes observé, simulés avec le modèle initial et la solution A3R11 – Contrôle

	C2MQ	C2MLQ
Modèle initial	64.3	42.2
Solution A3R11	75.1	69.0



b) Comparaison entre débit observé et débit simulé avec le modèle initial (m³/s)

c) Comparaison entre débit observé et débit simulé avec la solution A3R11 (m³/s)

Figure 8.5 : Hydrogrammes observé, simulés avec le modèle sans prise en compte des barrages-réservoirs et avec la solution A3R11 de prise en compte des ouvrages – L'Aube à Arcis-sur-Aube – Contrôle

8.4.2. Cas 2 : impacts plus diffus : la Thur à Staffelfelden, France

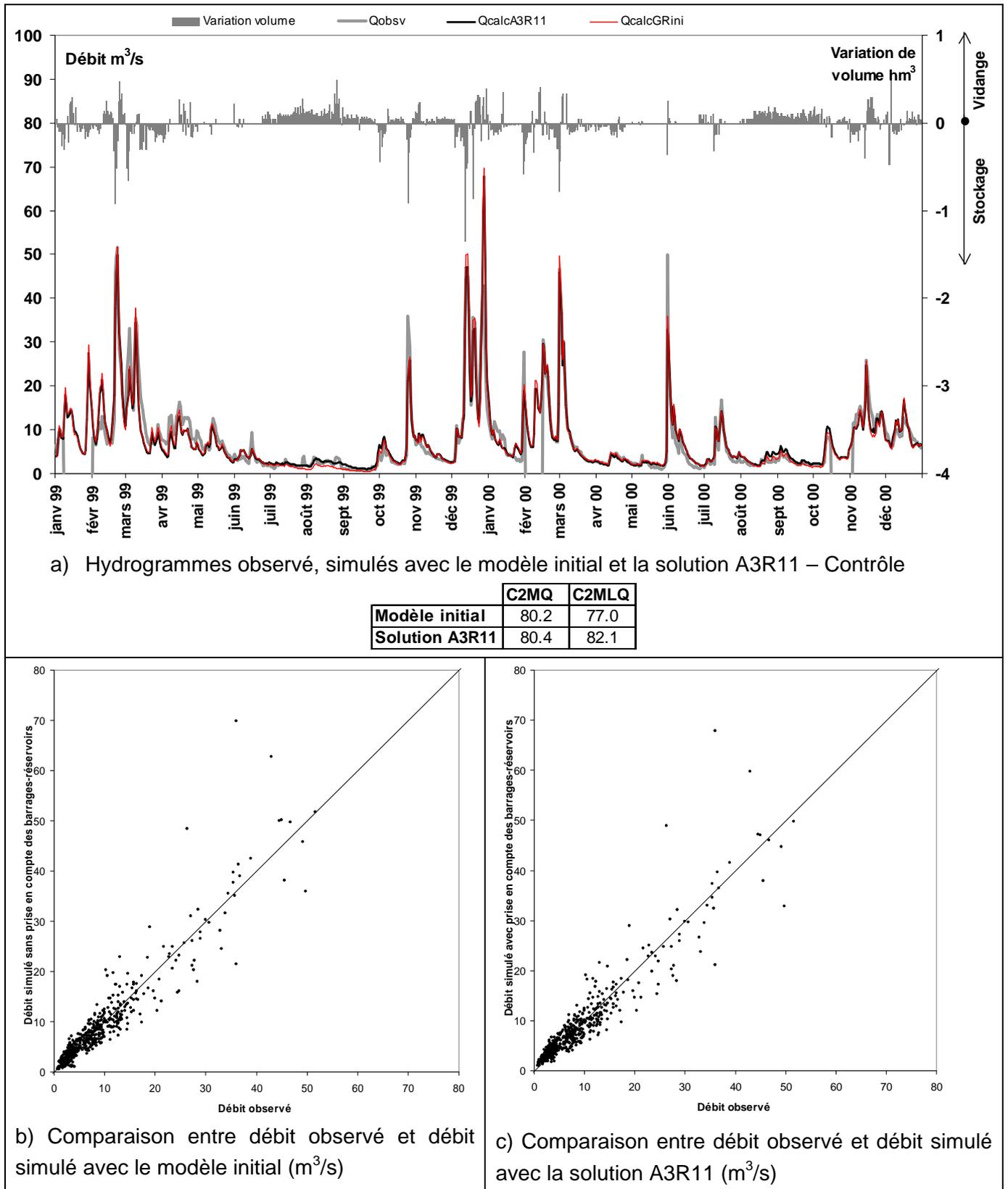


Figure 8.6 : Hydrogrammes observé, simulés avec le modèle sans prise en compte des barrages-réservoirs et avec la solution A3R11 de prise en compte des ouvrages – La Thur à Staffelfelden – Contrôle

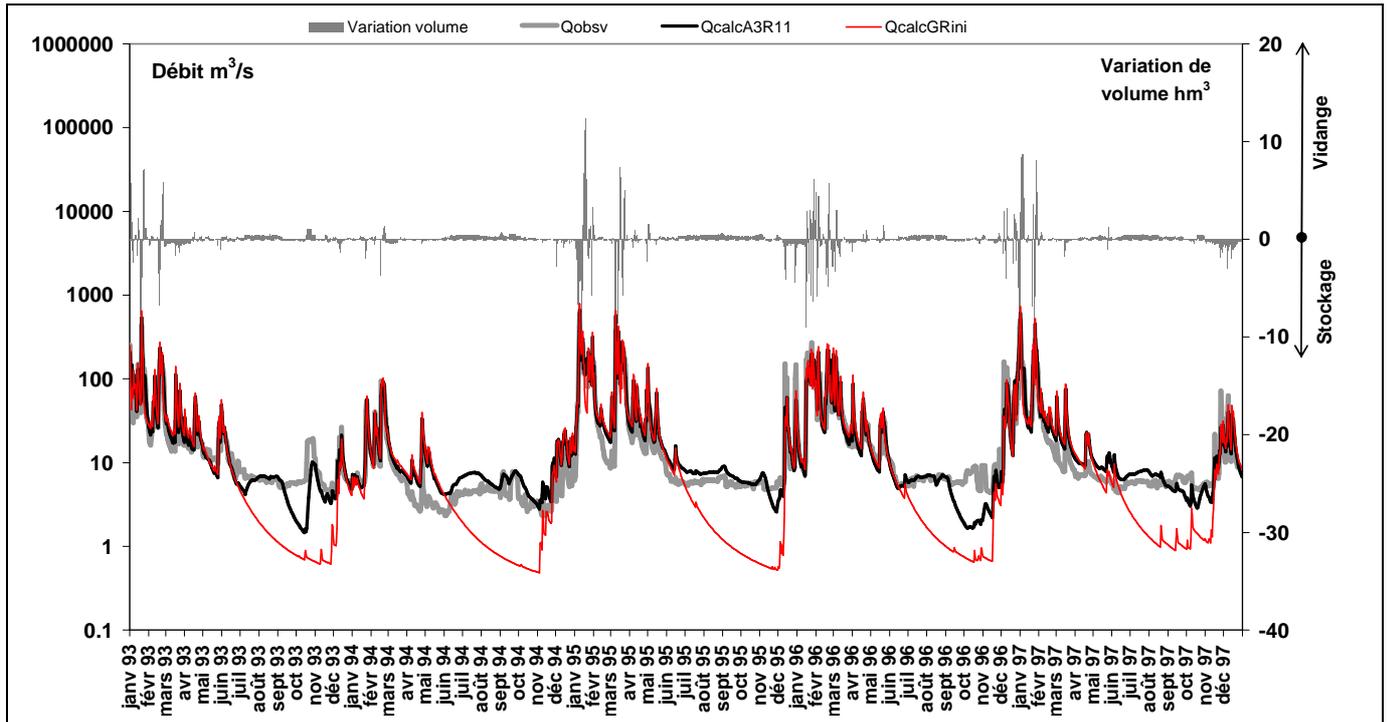
Dans le cas du bassin versant de la Thur à Staffelfelden, les indices descripteurs i_1 , i_2 et i_3 indiquent que le bassin versant est très peu influencé par le barrage-réservoir. La distance hydraulique séparant l'ouvrage et l'exutoire est importante (37 km, indice i_1), le volume stocké est très faible par rapport au volume écoulé (indice i_2) et enfin la superficie contrôlée ne représente que 8 % de la superficie totale. Les débits calculés avec le modèle initial sont proches des débits mesurés, ce qui confirme que le barrage-réservoir a un faible impact sur les débits. Sa prise en compte dans le modèle n'apporte logiquement pas de réelles améliorations mais ne détériore pas les simulations.

8.4.3. Cas 3 : Transferts interbassins importants : la Russian River à Hopland, Etats-Unis

La comparaison des débits observés et simulés avec les deux versions du modèle indique que les améliorations les plus significatives sont obtenues pour des débits observés compris entre environ $70 \text{ m}^3/\text{s}$ et $170 \text{ m}^3/\text{s}$. Ces débits sous estimés par le modèle ne prenant pas en compte le barrage-réservoir sont mieux restitués par la solution A3R11 mais restent sous-estimés. Ceci peut être dû aux apports d'eau depuis le bassin versant voisin qui ne sont pas pris en compte par le modèle.

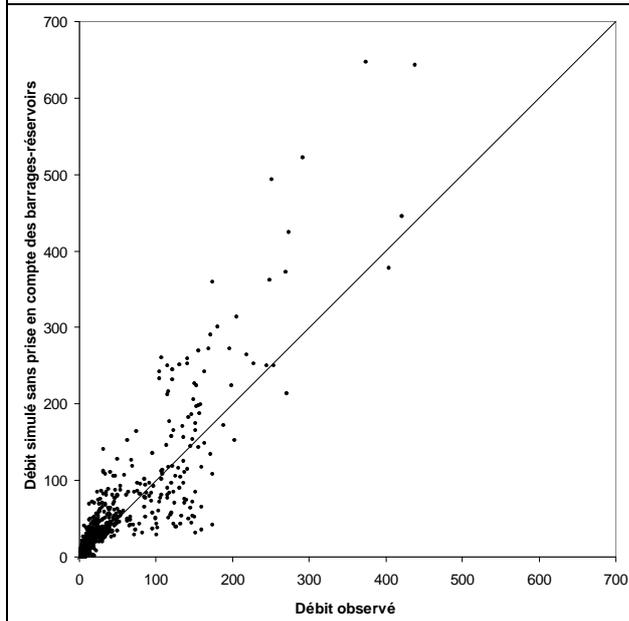
Il pourrait être envisagé de traiter ces transferts d'eau avec la solution de prise en compte des barrages-réservoirs développée durant la thèse. Cela suppose de faire l'hypothèse que les apports sont issus d'un barrage-réservoir fictif dont le niveau ne fait que diminuer et qui n'est jamais alimenté. Les quantités d'eau rejetées quotidiennement par ce réservoir sont égales aux apports journaliers observés. Il est donc nécessaire de disposer des chroniques journalières des apports au bassin versant.

Nous ne disposons pas des données sur les transferts vers le bassin versant de la Russian River pour tester les possibilités d'amélioration de la simulation des débits. Cependant, en guise de test préliminaire, nous avons appliqué la démarche précédente au bassin versant de la Truyère à Serverette qui est affecté par des apports depuis le bassin voisin.

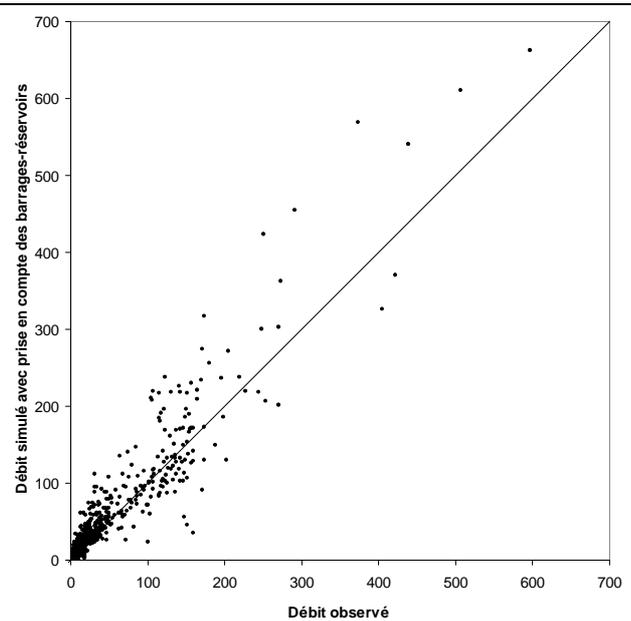


a) Hydrogrammes observé, simulés avec le modèle initial et la solution A3R11 – Contrôle

	C2MQ	C2MLQ
Modèle initial	51.8	20.8
Solution A3R11	68.4	53.1



b) Comparaison entre débit observé et débit simulé avec le modèle initial (m^3/s)



c) Comparaison entre débit observé et débit simulé avec la solution A3R11 (m^3/s)

Figure 8.7 : Hydrogrammes observé, simulés avec le modèle sans prise en compte des barrages-réservoirs et avec la solution A3R11 de prise en compte des ouvrages – La Russian River à Hopland – Contrôle

8.4.4. Cas 3 bis : transfert "pur" : La Truyère à Serverette

Le modèle sans prise en compte des apports sous-estime quasi systématiquement les débits observés. Les résultats de la Figure 8.8 montre les améliorations très nettes qu'apporte la prise en compte des apports d'eau dans le modèle.

Les résultats intéressants obtenus sur ce cas unique ne permettent bien sûr pas de conclure sur la possibilité d'étendre la méthode de prise en compte des barrages-réservoirs aux cas des transferts interbassins. Cela nécessiterait des tests sur un échantillon de bassins versants plus large avec des conditions différentes. L'exemple précédent fournit simplement une piste envisageable pour prendre en compte les transferts interbassins en modélisation pluie-débit globale.

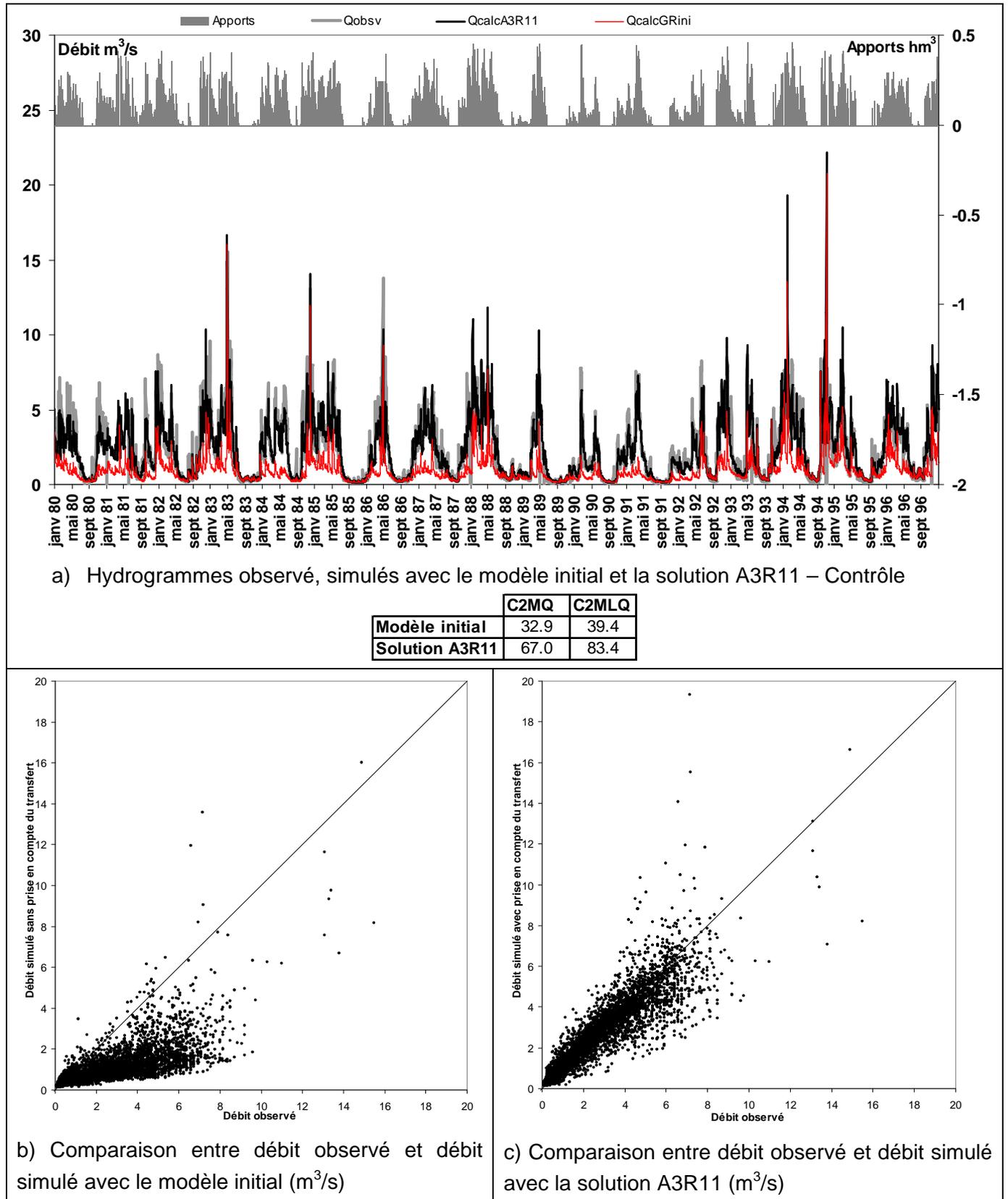


Figure 8.8 : Hydrogrammes observé, simulé avec le modèle sans prise en compte des barrages-réservoirs et avec la solution A3R11 de prise en compte des ouvrages – La Truyère à Serverette – Contrôle

8.5. Cas des barrages-réservoirs pour lesquels les débits restitués sont connus

Dans ce paragraphe, nous nous plaçons dans l'hypothèse où les débits restitués à l'aval des ouvrages sont connus. Nous tentons alors de prendre en compte les barrages-réservoirs en utilisant ces nouvelles données. L'objectif est d'évaluer les apports de la connaissance de ces données par rapport au cas où seules les variations de volume sont connues (hypothèse adoptée jusqu'à présent).

On se place ici dans un cas assez différent du cas traité jusqu'à présent dans la thèse puisque cette nouvelle donnée permet d'intégrer tout ce qui se passe à l'amont de l'ouvrage d'un point de vue hydrologique. Il ne reste plus qu'à modéliser ce qui se passe sur la partie aval du bassin. Ceci suppose donc qu'il y ait une station de jaugeage supplémentaire sur le bassin, ce qui n'est pas l'hypothèse qui avait été faite dans tout le travail précédent.

8.5.1. Présentation de l'approche adoptée (mixte)

L'approche présentée a été proposée par Julien Lerat (Cemagref) et est détaillée par Lerat *et al.* (2006). Elle consiste à adopter une démarche de modélisation pluie – débit amont / débit aval, intermédiaire entre une modélisation pluie-débit et une modélisation débit-débit, plus classiques. L'intérêt est de considérer ici explicitement l'influence de la zone intermédiaire dans la modélisation, en individualisant des sous-bassins amont pour lesquels on dispose, idéalement, de données de débit.

L'approche consiste d'abord à considérer sur le bassin versant total (de superficie S_{DOWN}) un ou plusieurs sous-bassins amont (de superficie S_{UP}) (Figure 8.9). Ces sous-bassins peuvent être définis par la présence d'un barrage-réservoir dont le débit de sortie est connu. Ce découpage définit une zone intermédiaire (de superficie S_{IN}).

La modélisation adoptée consiste à utiliser un modèle ayant comme entrée :

- le ou les débit(s) amont observé(s) Q_{UP} en sortie du ou des barrages-réservoirs;
- la pluie et l'évapotranspiration potentielle observées sur la zone intermédiaire P_{IN} et E_{IN}

pour simuler le débit aval Q_{DOWN} .

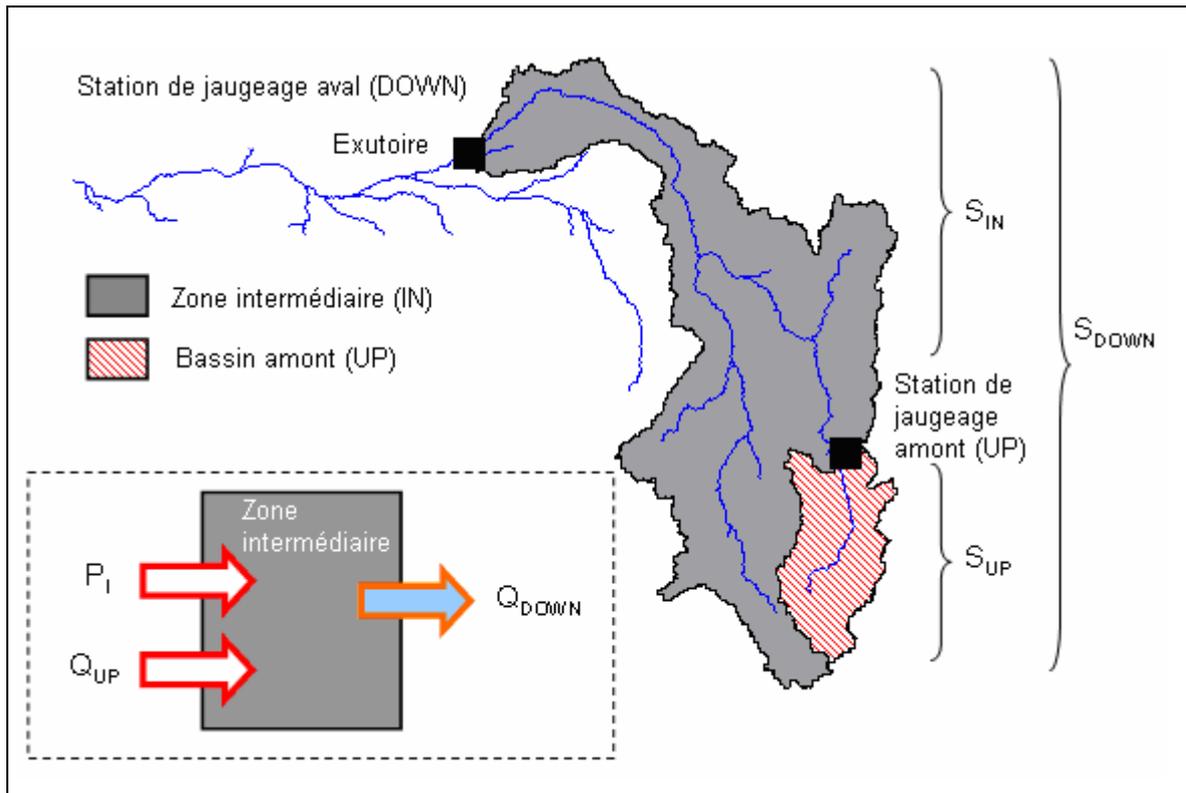


Figure 8.9 : Système à modéliser avec un seul sous-bassin amont (d'après Lerat et al., 2006)

Le modèle proposé est une combinaison linéaire de deux modèles, l'un pluie-débit, l'autre débi-débit. Le débit simulé à l'aval \hat{Q}_{DOWN} est donné par (toutes les variables étant exprimées en mm) :

$$\hat{Q}_{DOWN} = wf_{PQ} \times \text{PLUIDEB}(X_{RR}, P_{IN}, E_{IN}) + wf_{RO} \times \text{PROPAG}(X_{RO}, Q_{UP}) \quad \text{Equation 8.1}$$

où :

- PLUIDEB est un opérateur de modélisation pluie-débit ayant comme paramètres X_{PQ} et pour entrées la pluie sur la zone intermédiaire P_{IN} et l'évapotranspiration potentielle E_{IN} . Il permet de simuler le débit produit par la zone intermédiaire ;
- PROPAG est un opérateur de routage (propagation) ayant comme paramètres X_{RO} et pour entrée le débit à la station de jaugeage du bassin amont. Il permet de propager le débit du sous-bassin amont à l'exutoire ;
- wf_{PQ} et wf_{RO} sont des pondérations qui, dans le cas d'un modèle conservatif, sont égales aux rapports des superficies, S_{IN}/S_{DOWN} et S_{UP}/S_{DOWN} respectivement.

Lerat *et al.* (2006) présentent les résultats de nombreuses variantes du modèle ci-dessus. Nous utilisons ici la version suivante, qui donne de bons résultats :

- le modèle pluie-débit de la zone intermédiaire est le modèle GR4J avec ses quatre paramètres optimisés ;
- le modèle de routage du débit amont est un simple hydrogramme unitaire (l'hydrogramme symétrique de GR4J), avec un seul paramètre à caler. Notons que Lerat *et al.* (2006) proposent une formule de prédétermination de ce paramètre avec des résultats équivalents.

8.5.2. L'échantillon de bassins versants

L'approche alternative proposée nécessite la connaissance des hydrogrammes observés à l'aval des barrages-réservoirs (débit restitué). Cette donnée n'étant pas disponible pour l'ensemble des ouvrages de la base de données, la comparaison des deux approches a été réalisée sur un échantillon réduit de 16 bassins versants auxquels correspondent 7 barrages-réservoirs. Nous disposons des débits restitués à l'aval de ces 7 retenues.

8.5.3. Résultats

8.5.3.1. Apports de la prise en compte des barrages-réservoirs avec l'approche mixte

Dans un premier temps, nous comparons les performances moyennes en contrôle de la version du modèle GR4J sans prise en compte des barrages-réservoirs et ceux de l'approche mixte (Figure 8.10). L'objectif est de mesurer l'amélioration des simulations des débits apportée par l'approche mixte.

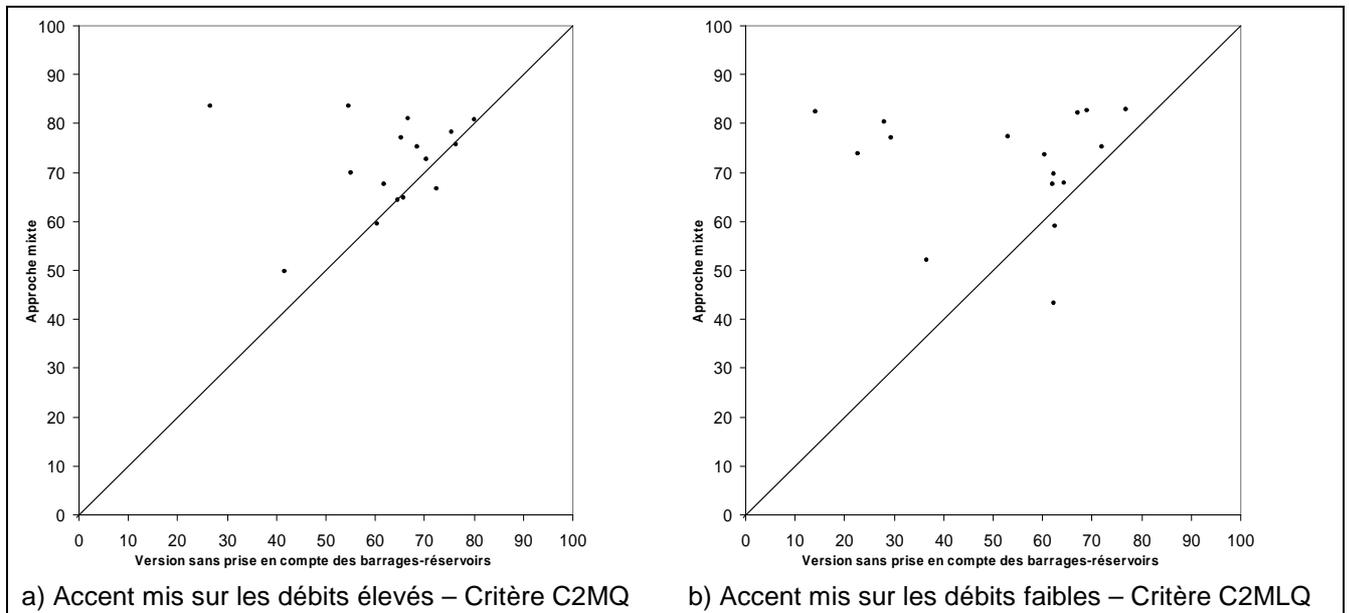


Figure 8.10 : Comparaison des performances de l'approche mixte et de la version sans prise en compte des barrages-réservoirs sur l'échantillon de 16 bassins versants pour les critères C2MQ et C2MLQ – Contrôle

Quel que soit le critère considéré, les performances obtenues avec l'approche mixte sont meilleures que celles du modèle initial sur la grande majorité des bassins versants. Lorsque l'accent est mis sur les débits élevés, les performances moyennes sur l'ensemble de l'échantillon passent de 62,9 % avec le modèle initial à 71,9 % avec l'approche mixte. L'amélioration est plus marquée lorsque l'accent est mis sur les débits faibles. Dans ce cas, le critère C2MLQ moyen est de 52,7 % pour le modèle initial et de 71,7 % pour l'approche mixte.

Il existe quelques bassins versants où la prise en compte des barrages-réservoirs détériore les performances du modèle initial (quatre pour le critère C2MQ, Tableau 8.2a et deux pour le critère C2MLQ, Tableau 8.2b).

Code BV	Département	Nom du bassin versant	Surface (km ²)	Pmoy (mm/an)	Qmoy (mm/an)	ETPmoy (mm/an)	Barrage	Volume (hm ³)	i1	i2	i3	i4
A1320310	Haut-Rhin	L'Ill à Oberhergheim	1290	1598.1	284.7	703.5	FRKRUTH0	11.6	0.26	0.06	0.13	3.07
O2883310	Tarn-et-Garonne	La Gimone à Garganvillar	827	674.7	108.4	870.9	FRGIMONE	25.0	0.16	0.23	0.05	1.46
Y1355210	Aude	La Rougeanne à Moussoulens	130	1209.7	410.8	870.9	FRLAPRAD	8.8	0.21	0.12	0.09	1.11
Y1364010	Aude	Le Fresquel à Carcassonne	939	1016.5	212.2	870.9	FRLAPRAD	8.8	0.28	0.03	0.01	1.11

a) Critère C2MQ

Code BV	Département	Nom du bassin versant	Surface (km ²)	Pmoy (mm/an)	Qmoy (mm/an)	ETPmoy (mm/an)	Barrage	Volume (hm ³)	i1	i2	i3	i4
A1320310	Haut-Rhin	L'Ill à Oberhergheim	1290	1598.1	284.7	703.5	FRKRUTH0	11.6	0.26	0.06	0.13	3.07
O6094010	Gers	L'Arrats à Saint-Antoine	600	746.7	144.3	765.6	FRASTARA	10.0	0.15	0.11	0.09	1.81

b) Critère C2MLQ

Tableau 8.2 : Principales caractéristiques des bassins versants et des barrages-réservoirs pour lesquels la prise en compte des barrages détériore les performances du modèle initial

Il ne semble pas y avoir de cause apparente pour expliquer les mauvaises performances de la prise en compte des barrages-réservoirs.

Les résultats indiquent que la prise en compte des barrages-réservoirs telle qu'elle est mise en œuvre dans l'approche mixte permet de faire progresser significativement (+ 9 % pour C2MQ et + 19 % pour C2MLQ en moyenne) les performances du modèle initial sur la plupart des 16 bassins versants de l'échantillon.

8.5.3.2. Apport de la connaissance des débits restitués à l'aval des barrages-réservoirs

Afin d'évaluer l'apport de la connaissance des débits restitués à l'aval des barrages-réservoirs par rapport au cas où seules les variations des volumes stockés sont connues, nous comparons les performances des deux approches (mixte et A3R11, Figure 8.11).

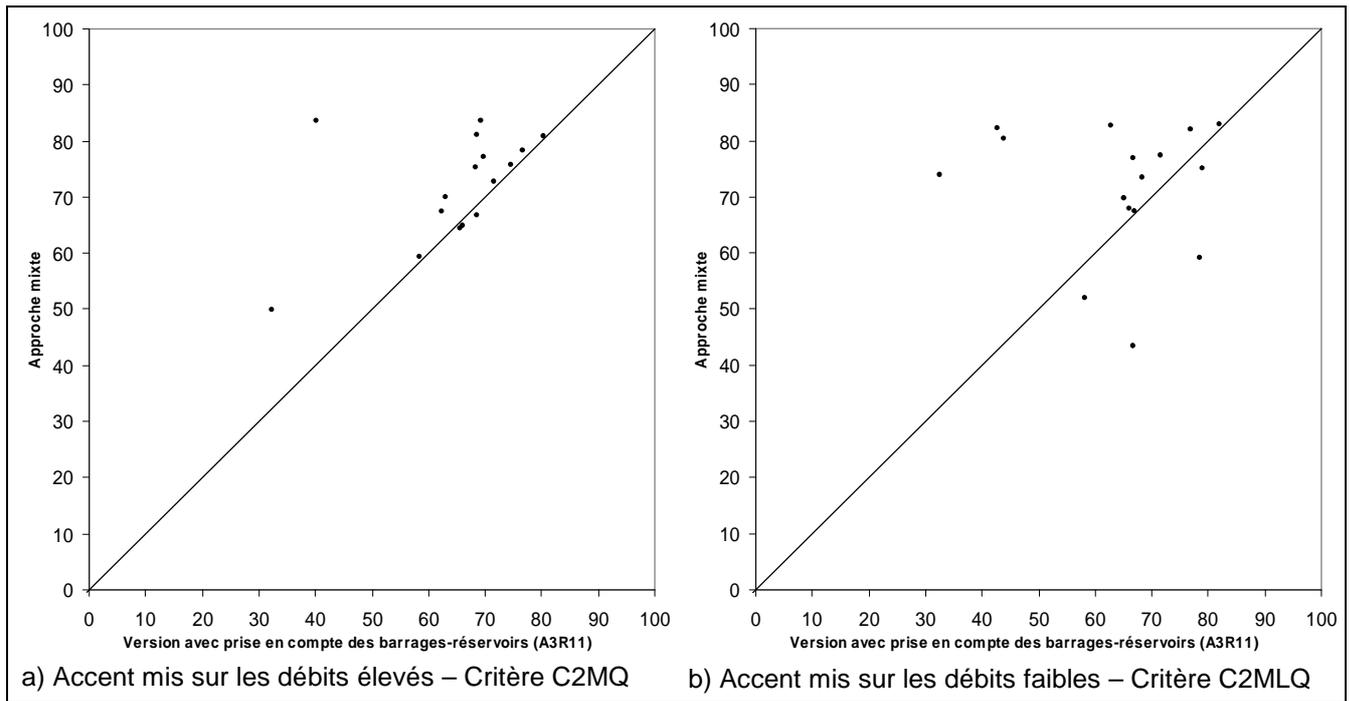


Figure 8.11 : Comparaison des performances de l'approche mixte et de la solution de prise en compte des barrages-réservoirs A3R11 sur l'échantillon de 16 bassins versants pour les critères C2MQ et C2MLQ – Contrôle

Lorsque l'accent est mis sur les débits élevés, les performances moyennes de l'approche mixte sont de 71,9 % et celles de la solution A3R11 de 64,8 %. A quelques exceptions près (trois bassins versants), l'approche mixte est nettement plus performante que la solution A3R11.

Lorsque l'accent est mis sur les débits faibles, l'approche mixte permet également d'obtenir de meilleures performances moyennes (71,7 % contre 64,2 % pour A3R11) et fournit de meilleures simulations sur la plupart des bassins versants. On note que la solution A3R11 est plus performante pour quatre bassins. Comme le montre le Tableau 8.3, ces bassins versants sont moins influencés que les autres (indices i_1 , i_2 et i_3) et présentent des chroniques de remplissage plus variables (indice i_4). Cela suggère que la solution A3R11 convient davantage à la simulation des impacts diffus des barrages-réservoirs sur les débits. Le nombre réduit de bassins versants de l'échantillon ne nous permet cependant pas de confirmer cette constatation.

	i_1	i_2	i_3	i_4
Moyenne 4 BV	0.21	0.12	0.06	1.86
Moyenne 12 BV	0.40	0.19	0.22	1.57
Moyenne 16 BV	0.37	0.18	0.19	1.63

Tableau 8.3 : Indices moyens des quatre bassins versants (BV) pour lesquels la solution A3R11 est plus performante que l'approche mixte, indices moyens des 12 bassins versants pour lesquels l'approche mixte est plus performante et indices moyens de l'échantillon total

Les résultats de la comparaison ont montré que dans le cas où les débits restitués sont disponibles, il est préférable de les exploiter dans la démarche de prise en compte des barrages-réservoirs. La connaissance de ces débits qui revient à intégrer hydrologiquement tout ce qui se passe sur le bassin amont semble être l'élément majeur responsable des améliorations constatées plus que le routage spécifique des rejets. L'information contenue dans ces données est plus riche car elles combinent les variations des volumes stockés et les apports à l'ouvrage (Figure 8.12 et Equation 8.2).

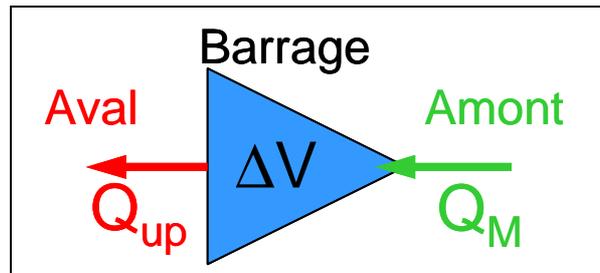


Figure 8.12 : Bilan journalier simplifié au niveau du barrage

$$Q_{up} = Q_M + \Delta V$$

Equation 8.2

Avec

- Q_{up} le débit restitué à l'aval de l'ouvrage
- Q_M la somme des apports à l'ouvrage
- ΔV la variation journalière du volume stocké dans la retenue

L'approche mixte exploite Q_{up} (i.e. Q_M et ΔV), la pluie et l'ETP sur la zone intermédiaire pour calculer le débit à l'exutoire du bassin versant alors que la solution A3R11 exploite uniquement ΔV , la pluie et l'ETP sur l'ensemble du bassin versant. Ainsi, dans l'approche mixte, le terme Q_M est une donnée observée alors que dans la solution A3R11, il est implicitement calculé par le modèle.

Il est important de rappeler que la connaissance des débits restitués à l'aval des barrages-réservoirs est indispensable à l'application de l'approche mixte. Ce type de données est moins accessible que les données de remplissage des barrages-réservoirs. Précisons également que l'approche mixte diffère de la solution A3R11, au sens où elle ne permet pas de tester des scénarios de gestion de barrages-réservoirs ou bien d'implantation de nouveaux ouvrages : elle ne peut que reproduire les conséquences de gestion historiques pour lesquelles les débits restitués existent. En revanche, la solution A3R11 peut elle, être utilisée pour tester des scénarios de gestion ou d'implantation de nouveaux ouvrages. En effet, lors de tests de scénarios, il est possible d'imposer des variations de volume ΔV fictives mais réalistes afin de déterminer l'impact du changement de gestion d'un ouvrage ou

l'implantation d'un nouveau. En revanche, il est plus délicat de calculer des débits qui seraient restitués sur un sous-bassin amont non jaugé car dans ce cas, les chroniques des apports amont (Q_M) ne sont pas disponibles.

Notons enfin, que la mise en place de l'approche mixte devient délicate en cas de présence de plusieurs barrages-réservoirs sur le même bassin versant ou bien lorsque les barrages-réservoirs sont en dérivation du cours d'eau. Dans ce cas, il faut tenir compte, en plus du débit restitué, de débit qui n'est pas dévié vers la retenue.

Les bassins versants pour lesquels la solution A3R11 est plus performante semblent être les moins influencés avec des impacts des barrages-réservoirs plus diffus. Dans l'approche mixte, le seul hydrogramme unitaire n'introduit pas forcément suffisamment de lissage des rejets ce qui peut avoir pour conséquence un transfert trop abrupt des rejets vers la sortie du modèle, notamment en période d'étiage.

8.6. Synthèse

L'évaluation de la solution A3R11 sur l'échantillon de bassins versants complémentaire n'ayant pas servi à son développement a confirmé la sensibilité du modèle aux transferts importants pouvant avoir lieu sur un bassin versant ainsi qu'au manque de données de remplissage des barrages-réservoirs. Le dernier cas d'étude (la Truyère à Serverette) indique qu'il pourrait être envisageable de prendre en compte les transferts interbassins grâce à une approche similaire à celle développée dans cette thèse à condition de disposer de données sur ces transferts.

L'étude des paramètres du modèle a montré que la capacité du réservoir de production (paramètre X1) est très affectée par la présence de barrages-réservoirs sur le bassin versant. Ce paramètre est utilisé par le modèle comme tampon pour rendre compte des ouvrages dont l'effet est souvent de réduire la variabilité des débits. Avec la solution A3R11, ce paramètre est moins influencé par la présence des barrages-réservoirs et donc plus représentatif d'un bassin versant non influencé.

L'étude des possibilités d'utilisation du débit restitué à l'aval des ouvrages a apporté des éclairages intéressants. Elle a montré d'abord qu'il était possible d'exploiter simplement l'information contenue dans les chroniques de débits restitués. Les meilleures performances obtenues par cette approche montrent également l'importance d'isoler le sous-bassin à l'amont du barrage-réservoir qui joue un rôle majeur dans la génération des débits à l'exutoire.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les bassins versants influencés par la présence de barrages-réservoirs ont constitué l'objet d'étude de ce travail. Caractérisés par une relation pluie-débit modifiée par les opérations de stockage/destockage réalisées sur les ouvrages, leur fonctionnement hydrologique comporte une part artificielle, dont l'analyse requiert des outils spécifiques. Dans ce cas, l'utilisation de modèles développés pour des bassins versants pas ou peu influencés se révèle souvent inappropriée.

Bien que les approches de modélisation hydrologique distribuée paraissent, intuitivement, les seules adaptées à la prise en compte d'ouvrages répartis sur le bassin, il nous est apparu intéressant et novateur de ne pas nous arrêter sur cet *a priori*, et d'essayer de prendre en compte l'artificialisation liée aux barrages au sein d'un modèle pluie-débit global. Pourquoi ? Essentiellement pour deux raisons :

- D'une part, parce que nous sommes convaincus qu'il est utile de "faire simple avant de faire compliqué", et qu'une solution simple, même imparfaite, constituera une référence très précieuse pour analyser, évaluer ou perfectionner une solution plus complexe ;
- D'autre part, en raison de la facilité d'utilisation en mode opérationnel des modèles globaux. Leur stabilité et leur parcimonie offrent de nombreuses possibilités de mise à jour et d'assimilation de données exogènes, ce qui a contribué à en faire des outils opérationnels précieux.

Le caractère global de ce type de modèles, *a priori* contradictoire avec l'étude d'influences localisées sur le bassin, est probablement la raison pour laquelle, jusqu'à présent, aucun auteur n'a proposé leur application à des bassins versants influencés en tenant compte explicitement de la présence d'ouvrages.

L'objectif principal de la thèse était donc d'étudier les possibilités de prendre en compte explicitement les barrages-réservoirs au sein d'une modélisation hydrologique globale. L'objectif n'était pas de chercher à modéliser le fonctionnement (la gestion) des barrages-réservoirs présents sur un bassin versant mais seulement d'utiliser, au sein du modèle, une information supplémentaire reflétant leur fonctionnement pour mieux modéliser les débits influencés à l'aval.

Nous avons choisi d'adopter une approche de développement empirique s'appuyant sur un échantillon de 46 bassins versants influencés, aux contextes hydro-climatiques différents, situés en France, aux Etats-Unis et au Brésil. Une solution performante a été mise au point,

résultat d'un grand nombre d'essais d'introduction des réservoirs au sein de la structure du modèle GR4J. La diversité des bassins versants utilisés garantit une certaine généralité aux conclusions obtenues.

Comment les barrages-réservoirs sont-ils vus par le modèle ?

1. En accord avec le caractère global du modèle, l'ensemble des barrages-réservoirs présents sur un bassin versant sont vus comme un unique stockage dont le volume correspond à la somme des volumes des barrages-réservoirs réels ;
2. A l'image des réservoirs utilisés dans les modèles pluie-débit globaux pour représenter les différents stockages naturels d'eau du bassin versant, le stockage artificiel unique associé aux barrages-réservoirs réels est également représenté dans la structure du modèle par un réservoir ;
3. A la différence des autres réservoirs du modèle hydrologique, l'évolution temporelle du niveau du nouveau réservoir n'est pas régie par des relations mathématiques mais est totalement contrôlée par les variations de volumes observées pour les barrages-réservoirs réels. Les variations journalières des volumes d'eau stockés dans les retenues artificielles, positives ou négatives suivant que les ouvrages globalement stockent de l'eau ou en vidangent, constituent donc une nouvelle donnée d'entrée du modèle. Le nouveau réservoir, appelé réservoir "image", constitue donc le reflet des barrages-réservoirs réels au sein du modèle.

Quelle solution s'est dégagée ?

L'alimentation du réservoir image sur la base des variations observées du stockage du ou des barrage(s)-réservoir(s) réel(s) nécessite de faire un choix sur le point où sera "prélevée" puis "rejetée" la quantité d'eau correspondante dans la structure du modèle.

L'ensemble des tests menés a montré qu'il est préférable d'alimenter le réservoir image à partir du réservoir de production du modèle, réservoir constituant généralement le stock d'eau le plus pérenne du modèle. Quant aux rejets du réservoir image, il est apparu bénéfique de les faire dans le réservoir de transfert du modèle, afin de bénéficier du lissage qu'il introduit. Ces tests ont également montré que la structure initiale du modèle contenait l'ensemble des composants nécessaires à la prise en compte des barrages-réservoirs. Aucune fonction ou paramètre supplémentaire ne s'est révélé nécessaire. La solution mise au point garde ainsi un niveau de complexité comparable à celui du modèle initial.

Cette solution retenue est la plus performante globalement sur l'ensemble des 46 bassins versants. Les gains de performance obtenus par rapport au modèle initial ne prenant pas en compte les barrages-réservoirs sont significatifs, particulièrement pour la simulation des faibles débits (périodes d'étiage). L'amélioration est de 2,3 % lorsque l'accent est mis sur les

débits élevés (performance moyenne globale de la solution la plus performante de 73,8 %) et de 7,4 % lorsque l'accent est mis sur les débits faibles (performance moyenne globale de 77,8 % ; les performances précédentes sont calculées en faisant appel au critère de Nash-Sutcliffe). Ceci constitue un résultat important de ce travail de recherche, à savoir qu'il est possible dans une approche de modélisation pluie-débit globale, de prendre explicitement en compte les barrages-réservoirs présents sur le bassin, pour simuler les débits influencés à l'aval.

L'évaluation de cette solution sur un échantillon complémentaire de 31 bassins versants n'ayant pas servi à son développement a confirmé son efficacité. Elle a également montré la sensibilité de la méthode à la disponibilité des données de stockage et aux transferts interbassins inconnus. Afin de garantir un niveau de performance acceptable, il est nécessaire 1) que le bassin versant ne soit pas marqué par des transferts interbassins significatifs non quantifiés et 2) de disposer des variations de volume de la totalité des stockages artificiels importants présents sur le bassin versant.

La solution de prise en compte des barrages-réservoirs peut-elle être adaptée au bassin versant considéré ?

Intuitivement, on aurait pu croire que les liens existant entre le degré d'influence d'un bassin versant et certaines de ses caractéristiques physiques comme la distance barrage/exutoire ou l'importance du stockage par rapport aux autres quantités d'eau mises en jeu, auraient un impact clair dans le choix de la solution de prise en compte des barrages-réservoirs dans le modèle. Or, bien que certaines solutions testées semblent plus performantes sur certains bassins, les tentatives réalisées pour adapter le choix de la solution à des caractéristiques physiques des bassins versants et des ouvrages se sont révélées infructueuses.

Ce résultat, étonnant car contre-intuitif, peut découler du caractère global du modèle. Il confirme la difficulté d'établir des correspondances entre le bassin versant réel et les composantes du modèle global. Il conforte l'utilité de l'approche de développement empirique basée sur les observations (données) et non sur des considérations *a priori* sur le fonctionnement du bassin versant. Il rejoint cependant les études générales réalisées sur les impacts de nombreux ouvrages, indiquant qu'il est très délicat de prédire les possibles impacts des ouvrages en fonction de descripteurs physiques simples tels que ceux utilisés au cours de notre travail.

Perspectives

Ce travail a mis en évidence la possibilité de tenir compte des barrages-réservoirs en modélisation pluie-débit globale ainsi que l'intérêt que cela a sur l'amélioration de la simulation des débits des bassins versants influencés.

Malgré les progrès réalisés, il subsiste des bassins versants pour lesquels les solutions envisagées se révèlent peu performantes, notamment pour la simulation des forts débits.

Des approfondissements sont nécessaires de ce point de vue, afin de mieux cerner les raisons de ce manque de performance et notamment de déterminer s'il est plutôt lié aux solutions de prise en compte des barrages-réservoirs ou aux capacités du modèle à simuler les débits élevés indépendamment de la prise en compte des ouvrages.

Du point de vue opérationnel, la méthode proposée constitue un moyen simple et rapide d'évaluer quantitativement l'impact de barrages-réservoirs réels et surtout projetés sur les débits à une station située à l'aval. En effet, si des solutions alternatives performantes (dans la mesure où elles s'appuient sur des observations amont) sont disponibles dans le cas de barrages existants, notre méthode semble montrer toute sa valeur dans le cas de barrages en projet. Elle peut permettre d'avoir une première approximation des effets d'un barrage-réservoir ou de la modification des règles de gestion dans le cadre d'un avant projet d'aménagement.

Des développements sont envisageables afin d'adapter la méthode à des bassins versants marqués par la présence de nombreuses petites retenues dont le niveau n'est pas suivi. Dans ce cas, l'impact d'un seul ouvrage sera sans doute négligeable mais les impacts cumulés de l'ensemble des retenues seront significatifs. Les données de variation des volumes stockés n'étant pas disponibles, il serait alors intéressant de tester la méthode avec différents scénarios d'évolution des volumes stockés dans les retenues.

Il peut également être intéressant d'adapter la méthode de prise en compte des barrages-réservoirs non plus à des bassins versants comportant ce type d'aménagements mais à des bassins marqués par des prélèvements importants (pour l'irrigation par exemple). Dans ce cas, une approche similaire peut être adoptée en utilisant les prélèvements comme nouvelle donnée d'entrée du modèle.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] **Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E. et Rasmussen, J. (1986).** An introduction to the European Hydrological System - Système Hydrologique Européen 'SHE'. *Journal of Hydrology*, **87**, 45-77.
- [2] **Ambroise, B. (1998).** La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant - Processus, Facteurs, Modèles. Bucarest, *H*G*A*, 200 p.
- [3] **Ando, Y. (1990).** Regionalization of parameters using basin geology, land-use, and soil type for use in a storm rainfall-runoff relationship. *IAHS Publication n°191*, 211-218.
- [4] **Andréassian, V. (2002).** Impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie Paris VI, Cemagref (Antony), 276 p.
- [5] **Assani, A. A., Buffin-Bélanger, T. et Roy, A. G. (2002).** Analyse d'impacts d'un barrage sur le régime hydrologique de la rivière Matawin (Québec, Canada). *Revue des Sciences de l'Eau*, **15**, 557-577.
- [6] **Avakyan, A. B. et Iakovleva, V. B. (1998).** Status of global reservoirs: The position in the late twentieth century. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, **3**, 45-52.
- [7] **Balland, P. (2004).** Impacts des barrages sur les milieux physiques et biologiques. *Ingénieries*, Supplément au n°38, 23-32
- [8] **Batalla, R. J., Gómez, C. M. et Kondolf, G. M. (2004).** Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River basin (NE Spain). *Journal of Hydrology*, **290**(1-2), 117-136.
- [9] **Beven, K. (1989).** Changing ideas in hydrology - The case of physically-based models. *Journal of Hydrology*, **105**, 157-172.
- [10] **Beven, K. (1997).** TOPMODEL: a critique. *Hydrological Processes*, **11**(9), 1069-1085.
- [11] **Beven, K., Lamb, R., Quinn, P., Romanovicz, R. et Freer, J. (1995).** TOPMODEL. In: *Computer Models of Watershed Hydrology*, Chapter 18, V. P. Singh, Water Resources Publications, 627-668.
- [12] **Beven, K. J. et Kirkby, M. J. (1979).** A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, **24**(1), 43-69.
- [13] **Black, P. E. (1972).** Flood peaks as modified by dam size and location. *Water Resources Bulletin*, **8**(4), 780-783.
- [14] **Cadier, E. et Dubreuil, P. (1986).** Influence de la taille et du nombre de retenues sur le régime hydrologique de petits bassins du Nordeste du Brésil. XIXe Journée de L'hydraulique, Société Hydrotechnique de France, I11.1-I11.6.
- [15] **Desconnets, J. C., Diallo, A., Traore, O., Chene, J. M. 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 Publication n°252*, 375-385.
- [16] **Dooge, J. C. I. (1988).** Hydrology past and present. *Journal of Hydraulic Research*, **26**(1), 5-26.
- [17] **Eckert, N. (2002).** Prise en compte des couverts neigeux temporaires au sein d'un modèle pluie débit. Mémoire de DEA HHGG, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI) / ENGREF, 72 p.
- [18] **Edijatno (1991).** Mise au point d'un modèle élémentaire pluie-débit au pas de temps journalier. Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur/ENGEEES, Strasbourg, 242 p.

- [19] **Freeze, R. A. (1980).** A stochastic conceptual analysis of rainfall-runoff processes on a hillslope. *Water Resources Research*, **16**, 391-408.
- [20] **Graf, W. L. (1999).** Dam nation: A geographic census of American dams and their large-scale hydrologic impacts. *Water Resources Research*, **35**(4), 1305-1312.
- [21] **Graf, W. L. (2006).** Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers. *Geomorphology*, **79**(3-4), 336-360.
- [22] **Güntner, A. (2002).** Large-scale hydrological modelling in the semi-arid north-east of Brazil. PhD thesis, University of Postdam, 128 p.
- [23] **IIBRBS (2006).** Institution Interdépartementale des Barrages-Réservoirs du Bassin de la Seine. <http://www.iibrbs.fr>
- [24] **Ivkovic, K. M., Croke, B. F. W., Letcher, R. A. et Evans, W. R. (2005).** The Development of a Simple Model to Investigate the Impact of Groundwater Extraction on River Flows in the Namoi Catchment, NSW Australia. Where waters meet - NZHS-IAH-NSSSS Conference Auckland, New Zealand.
- [25] **Jakeman, A. J., Littlewood, I. G. et Whitehead, P. G. (1990).** Computation of the instantaneous unit hydrograph and identifiable component flows with application to two small upland catchments. *Journal of Hydrology*, **117**, 275-300.
- [26] **James, L. D. (1972).** Hydrologic modeling, parameter estimation, and watershed characteristics. *Journal of Hydrology*, **17**, 283-307.
- [27] **Jothiyangkoon, C., Sivapalan, M. et Farmer, D. L. (2001).** Process controls of water balance variability in a large semi-arid catchment: downward approach to hydrological model development. *Journal of Hydrology*, **254**(1-4), 174-198.
- [28] **Klemeš, V. (1982).** Empirical and Causal Models in Hydrology. In: Scientific Basis of Water-Resource Management, N. R. C. G. S. Committee (Ed.), Washington D.C., National Academy Press, 95-104.
- [29] **Klemeš, V. (1986).** Dilettantism in hydrology: transition or destiny ? *Water Resources Research*, **22**(9), 177S-188S.
- [30] **Lajoie, F., Assani, A. A., Roy, A. G. et Mesfioui, M. (2006).** Impacts of dams on monthly flow characteristics. The influence of watershed size and seasons. *Journal of Hydrology*, **334** (3-4), 423-439.
- [31] **Lerat, J., Perrin, C. et Andréassian, V. (2006).** Value of upstream measured discharges in hydrological modeling: a model for intermediary areas. *Water Resources Research*, **soumis**.
- [32] **Leroy Poff, N. et Hart, D. D. (2002).** How dams vary and why it matters for the emerging science of dam removal. *BioScience*, **52** (8), 659-668.
- [33] **Linsley, R. K. (1982).** Rainfall-runoff models - An overview. In: Rainfall-runoff relationship, V. P. Singh, Water Ressources Publications, 3-22.
- [34] **López-Moreno, J. I., Beguería, S. et García-Ruiz, J. M. (2002).** Influence of the Yesa reservoir on floods of the Aragón River, central Spanish Pyrenees. *Influence of Hydrology and Earth System Sciences*, **6**(4), 753-762.
- [35] **Loumagne, C., Chkir, N., Normand, M., Ottlé, C. et Vidal-Madjar, D. (1996).** Introduction of soil/vegetation/atmosphere continuum in a conceptual rainfall-runoff model. *Hydrological Sciences Journal*, **41**(6), 889-902.
- [36] **Magette, W. L., Shanholtz, V. O. et Carr, J. C. (1976).** Estimating selected parameters for the Kentucky watershed model from watershed characteristics. *Water Resources Research*, **12**(3), 472-476.
- [37] **Magilligan, F. J. et Nislow, K. H. (2005).** Changes in hydrologic regime by dams. *Geomorphology*, **71**(1-2), 61-78.
- [38] **Makhlouf, Z. (1994).** Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de Doctorat, Université Paris XI Orsay, 426 p.
- [39] **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 de doctorat, ENGREF (Paris) / Cemagref (Antony), 463 p.
- [40] **McCully, P. (2001).** Silenced rivers, the ecology and politics of large dams, Zed Books 416 p.

- [41] **Michaud, J. et Sorooshian, S. (1994).** Comparison of simple versus complex distributed runoff models on a midsized semiarid watershed. *Water Resources Research*, **30**(3), 593-605.
- [42] **Michel, C. (1983).** Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle conceptuel à un seul paramètre ? *La Houille Blanche*, (1), 39-44.
- [43] **Michel, C. (1989).** Hydrologie appliquée aux petits bassins versants ruraux. Cemagref, Antony, 528 p.
- [44] **Michel, C., Perrin, C. et Andreassian, V. (2003).** The exponential store: a correct formulation for rainfall-runoff modelling. *Hydrological Sciences Journal*, **48**(1), 109-124.
- [45] **Morin, G. (2002).** CEQUEAU hydrological model. In: Mathematical models of large watershed hydrology, V. P. Singh et D. K. Frevert (Ed.), Highlands Ranch, Colorado, Water Resources Publications, 507-576.
- [46] **Morin, G., Fortin, J. P. et Charbonneau, R. (1975).** Utilisation du modèle hydrophysiographique CEQUEAU pour l'exploitation des réservoirs artificiels. *IASH Publication n°115*, 176-184.
- [47] **Mouelhi, S. (2003).** Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse de Doctorat, ENGREF, Cemagref Antony, France, 323 p.
- [48] **Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C. et Andréassian V. (2006a).** Linking stream flow to rainfall at the annual time step: the Manabe bucket model revisited. *Journal of Hydrology*, **328** (1-2), 283-296.
- [49] **Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C. et Andréassian V. (2006b).** Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology*, **318** (1-4), 200-214.
- [50] **Moulin, L., Perrin, C., Michel, C. et Andréassian, V. (2005).** Prise en compte de barrages-réservoirs dans un modèle pluie-débit global : application au cas du bassin de la Seine amont. *La Houille blanche* **5**, 79-87.
- [51] **Nascimento, N. O. (1995).** Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'action anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle du bassin versant. Thèse de Doctorat, CERGRENE/ENPC, Paris, 550 p.
- [52] **Nash, J. E. et Sutcliffe, J. V. (1970).** River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, **27**(3), 282-290.
- [53] **Oudin, L., Andreassian, 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), W07410.
- [54] **Oudin, L. (2004).** Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global. Thèse de Doctorat, ENGREF (Paris) / Cemagref (Antony), 495 p.
- [55] **Perrin, C. (2000).** Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de Doctorat, INPG (Grenoble) / Cemagref (Antony), 530 p.
- [56] **Perrin, C., Michel, C. et Andréassian, V. (2003).** Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, **279**(1-4), 275-289.
- [57] **Peters, D. L. et Prowse, T. D. (2001).** Regulation effects on the lower Peace River, Canada. *Hydrological Processes*, **15**, 3184-3194.
- [58] **Pirt, J. et Bramley, E. A. (1985).** The application of simple moisture accounting models to ungauged catchments. *Journal of the Institution of Water Engineers and Scientists*, **39**, 169-177.
- [59] **Reed, S., Koren, V., Smith, M., Zhang, Z., Moreda, F., Seo, D.-J. et Participants, (2004).** Overall distributed model intercomparison project results. *Journal of Hydrology*, **298**(1-4), 27-60.
- [60] **Refsgaard, J. C. et Knudsen, J. (1996).** Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. *Water Resources Research*, **32**(7), 2189-2202.

- [61] **Retkowsky, Y. et Stein, M. (1985)**. Modélisation des crues du Bassin de la Seine. Constitution du modèle, calage et premières exploitations. *Téchniques et Sciences Municipales*, **4**, 165-172.
- [62] **Rojas-Serna, C. (2005)**. Quelle connaissance hydrométrique minimale pour définir les paramètres d'un modèle pluie-débit ? Thèse de Doctorat, ENGREF (Paris) / Cemagref (Antony), 319 p.
- [63] **Roy, A. (2003)**. L'écrivain-militant. Editions Gallimard, Folio Documents, 389 p.
- [64] **Schaake, J. C., Duan, Q. Y., Smith, M. et Koren, V. (2000)**. Criteria to select basins for hydrologic model development and testing. *Conference on Hydrology AMS*. Long Beach, CA.
- [65] **Seibert, J. (1999)**. Regionalisation of parameters for a conceptual rainfall-runoff model. *Agricultural and Forest Meteorology*, **98-99**, 279-293.
- [66] **Servat, E. et Dezetter, A. (1992)**. Modélisation de la relation pluie-débit et estimation des apports en eau dans le nord-ouest de la Côte d'Ivoire. *Hydrologie Continentale*, **7(2)**, 129-142.
- [67] **Sharma, L. M. et Luxmoore, R. J. (1979)**. Soil spatial variability and its consequences on simulated water balance. *Water Resources Research*, **15**, 1567-1573.
- [68] **Sivapalan, M., Blöschl, G., Zhang, L. et Vertessy, R. (2003)**. Downward approach to hydrological prediction. *Hydrological Processes*, **17(11)**, 2101-2111.
- [69] **Sivapalan, M., Viney, N. R. et Zammit, C. (2002)**. LASCAM: LARge Scale CAthment Model. In: Mathematical models of large watershed hydrology, V. P. Singh et D. K. Frevert (Ed.), Highlands Ranch, Colorado, Water Resources Publications, 579-648.
- [70] **Smith, M., Seo, D.-J., Koren, V., Reed, S., Zhang, Z., Duan, Q. Y., Moreda, F. et Cong, S. (2004)**. The distributed model intercomparison project (DMIP): motivation and experiment design. *Journal of Hydrology*, **298(1-4)**, 4-26.
- [71] **Srikanthan, R. et Goodspeed, M. J. (1988)**. Regionalization of conceptual model parameters for meso-scale catchments in the Hunter Valley. Hydrology and Water Resources Symposium 1988, ANU, Canberra, 85-90.
- [72] **Tajjar, M. H. et Levassor, A. (1993)**. Les lâchures des barrages-réservoirs. In: La Seine et son bassin : de la recherche à la gestion, E. Fustec et G. d. Marsily (Ed.), Paris, 49-54.
- [73] **Tangara, M. (1991)**. Un ensemble de programmes de traitement de fichiers hydrologiques et de tracé graphique, réalisés en Fortran 77, en vue d'une typologie des petits bassins versants ruraux. Mémoire d'ingénieur, CNAM/CEMAGREF, 207 p.
- [74] **Tangara, M. (2005)**. Nouvelle méthode de prévision de crue utilisant un modèle pluie-débit global. Thèse de Doctorat, EPHE / Cemagref (Antony), 374 p.
- [75] **UNESCO (2005)**. Glossaire International d'Hydrologie, <http://www.cig.ensmp.fr/~hube rt/glu/aglo.htm>
- [76] **UNESCO(2006)**. Water Portal, http://www.unesco.org/water/wwap/case_studies/sene gal_river/detailed_view.shtml
- [77] **Villion, G. (1997)**. Rôle des lacs-réservoirs amont : les grands lacs de Seine. 155e session du comité scientifique et technique, Paris, Société Hydrotechnique de France, 57-66.
- [78] **WCD (2000)**. Dams and development a new framework - The report of the World Commission on Dams. World Commission on Dams. <http://www.dams.org>
- [79] **Weglarczyk, S. (1998)**. The interdependence and applicability of some statistical quality measures for hydrological models. *Journal of Hydrology*, **206**, 98-103.
- [80] **Williams, G. P. et Wolman, M. G. (1984)**. Downstream effects of dams on alluvial rivers. U.S. Geological Survey, 83 p.
- [81] **Zsuffa, I. (1999)**. Impact of Austrian hydropower plants on the flood control safety of the Hungarian Danube reach. *Hydrological Sciences Journal*, **44(3)**, 363-372.

Annexes

Annexe 1 : Liste des fournisseurs de données

Organisme	Pays
Agência Nacional de Águas (ANA)	Brésil
Agglomération Roannaise	France
BRL	France
California Department of Water Resources (CDWR)	Etats-Unis
Cemagref (Aix-en-Provence)	France
Communauté d'Agglomération du Choletais	France
Communauté de Communes du Pays Bigouden Sud	France
Commune de Commentry	France
Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne	France
Companhia Energética de Minas Gerais (Cemig)	Brésil
Conseil Général de la Haute-Vienne	France
Conseil Général de l'Aube	France
Conseil Général du Haut-Rhin	France
DIREN Centre	France
DIREN Nord-pas-de-Calais	France
EDF	France
Etablissement Public Loire	France
Hydro Tasmania	Australie
Institut de Recherche pour le Développement (IRD)	France
Institution Interdépartementale des Barrages-Réservoirs du Bassin de la Seine	France
Institution interdépartementale pour l'aménagement du barrage de Montbel	France
Institution interdépartementale pour l'aménagement du fleuve Charente et de ses affluents	France
Meteo-France	France
Services météorologiques de Guinée	Guinée
Services météorologiques de Mauritanie	Mauritanie
Services météorologiques du Mali	Mali
Services météorologiques du Sénégal	Sénégal
Syndicat intercommunal de distribution d'eau de la Corniche des Maures	France
United States Bureau of Reclamation (USBR)	Etats-Unis
United States Department of Agriculture (USDA)	Etats-Unis
United States Geological Survey (USGS)	Etats-Unis
Université Fédérale de Minas Gerais	Brésil
Univertité de Copenhague	Danemark
Ville de Limoges	France
Ville de Vire	France

Annexe 2 : Listes des bassins et barrages

Code BV	Pays	Dép/Etat	Nom du bassin versant	Surface (km²)	Pmoy (mm/an)	Qmoy (mm/an)	ETPmoy (mm/an)	Barrage(s)	V (normal, hm3)	Surface contrôlée (km²)	i1	i2	i3	i4
07231000	Etats-Unis	Oklahoma	Little River near Sasakwa	2240	966.3	149.1	658.3	USNORMAN	148.0	663.0	0.18	0.24	0.30	2.23
07305000	Etats-Unis	Oklahoma	North Fork Red River near Headrick	10992	633.0	28.3	629.7	USALTUS0	166.0	6513.8	0.80	0.52	0.59	1.32
07307028	Etats-Unis	Oklahoma	North Fork Red River near Tipton	12150	642.0	46.1	629.7	USTOMS00 USALTUS0	120.0 166.0	313.4 6513.8	0.80 0.39	0.39	0.56	1.50
07308500	Etats-Unis	Texas	Red River near Burkburnett	53276	570.6	20.4	656.8	USTOMS00 USALTUS0	120.0 166.0	313.4 6513.8	0.70	0.14	0.13	1.82
07325000	Etats-Unis	Oklahoma	Washita River near Clinton	5120	665.6	23.2	601.3	USFOSS00	316.0	3796.9	0.85	0.76	0.74	1.68
07325500	Etats-Unis	Oklahoma	Washita River at Carnegie	8104	700.0	40.4	601.3	USFOSS00	316.0	3796.9	0.57	0.28	0.47	1.68
07326500	Etats-Unis	Oklahoma	Washita River at Anadarko	9469	720.4	47.6	601.3	USFOSS00 USCOBB00	316.0 178.0	3796.9 813.3	0.65	0.25	0.49	2.17
07328100	Etats-Unis	Oklahoma	Washita River at Alex	12398	741.5	48.7	601.3	USFOSS00 USCOBB00	316.0 178.0	3796.9 813.3	0.53	0.19	0.37	2.17
07328500	Etats-Unis	Oklahoma	Washita River near Pauls Valley	13805	781.8	58.3	652.3	USFOSS00 USCOBB00	316.0 178.0	3796.9 813.3	0.36	0.14	0.33	2.17
08210000	Etats-Unis	Texas	Nueces River near Three Rivers	39956	608.2	17.5	981.8	USCCDT00	881.0	14322.6	0.98	1.00	0.36	0.53
11462500	Etats-Unis	California	Russian River near Hopland	937	1088.7	674.8	549.4	USCOYOTE	112.0	271.9	0.54	0.14	0.29	1.87
11464000	Etats-Unis	California	Russian River near Healdsburg	2054	1088.4	622.2	576.3	USCOYOTE	112.0	271.9	0.39	0.11	0.21	1.87
11463000	Etats-Unis	California	Russian River near Cloverdale	1303	1088.7	657.4	549.4	USCOYOTE	112.0	271.9	0.22	0.07	0.13	1.87
11467000	Etats-Unis	California	Russian River near Guerneville	3465	1029.4	589.7	518.9	USCOYOTE USWARMS	112.0 302.0	271.9 336.7	0.33	0.15	0.18	1.38
41135000	Brésil	Minas Gerais	São Francisco à Pirapora - Barreiro	61880	1350.9	426.4	982.9	BRTRESMA	15278.0	50600.0	0.78	0.53	0.82	0.91
42030000	Brésil	Minas Gerais	São Francisco à Montante Barra do Jequitai	90990	1346.9	380.3	982.9	BRTRESMA	15278.0	50600.0	0.72	0.38	0.56	0.91
43200000	Brésil	Minas Gerais	São Francisco à São Romão	154100	1313.6	323.8	982.9	BRTRESMA	15278.0	50600.0	0.62	0.28	0.33	0.91
44500000	Brésil	Minas Gerais	São Francisco à Manga	202400	1254.5	309.6	982.9	BRTRESMA	15278.0	50600.0	0.45	0.22	0.25	0.91
A1320310	France	Haut-Rhin	L'Ill à Oberhergheim	1290	1598.1	284.7	703.5	FRKRUTH0	11.6	21.0	0.26	0.06	0.13	3.07
A1432010	France	Haut-Rhin	La Thur à Willer-sur-Thur	159	1827.0	1070.6	703.5	FRKRUTH0	11.6	21.0	0.15	0.05	0.08	3.07
A1462020	France	Haut-Rhin	La Thur à Staffelfelden	249	1757.7	834.2	703.5	FRKRUTH0	11.6	21.0	0.31	0.03	0.02	3.07
D0156520	France	Nord	L'Helpe Majeure à Taisnières-en-Thiérache	320	859.0	399.2	686.6	FRVALJOL	4.5	178.0	0.45	0.04	0.56	5.90
H0800010	France	Aube	La Seine à Troyes	3410	887.5	313.3	690.9	FRSEINE0	205.0	2400.0	0.82	0.20	0.70	1.83
H1501010	France	Aube	L'Aube à Arcis-sur-Aube	3590	904.2	325.5	690.9	FRAUBE00	170.0	1700.0	0.65	0.15	0.47	0.78
H1700010	France	Aube	La Seine à Pont-sur-Seine	9760	875.1	260.1	690.9	FRSEINE0 FRAUBE00	205.0 170.0	2400.0 1700.0	0.53	0.15	0.42	1.43
H2051010	France	Yonne	L'Yonne à Dornecy	781	969.1	376.9	728.4	FRPANNEC	80.0	220.0	0.32	0.27	0.28	1.62
H2221010	France	Yonne	L'Yonne à Gurgy	3820	905.6	356.1	728.4	FRPANNEC	80.0	220.0	0.17	0.06	0.06	1.66
H2721010	France	Yonne	L'Yonne à Courlon	10700	850.9	304.2	710.9	FRPANNEC	80.0	220.0	0.12	0.03	0.02	1.66
H4340010	France	Val-de-Marne	La Seine à Villeneuve-Saint-Georges	30800	812.8	238.1	707.5	FRSEINE0 FRAUBE00 FRPANNEC	205.0 170.0 80.0	2400.0 1700.0 220.0	0.26	0.05	0.14	1.40
H5201010	France	Marne	La Marne à Châlons-sur-Marne	6280	987.5	397.4	705.9	FRMARNE0	350.0	2950.0	0.72	0.14	0.47	1.87
H5841010	France	Seine-et-Marne	La Marne à Noisiel	12500	873.0	271.4	708.9	FRMARNE0	350.0	2950.0	0.37	0.10	0.24	1.85
H5920010	France	Paris	La Seine à Paris (Pont d'Austerlitz)	43800	837.3	231.1	711.4	FRSEINE0 FRAUBE00 FRPANNEC FRMARNE0	205.0 170.0 80.0 350.0	2400.0 1700.0 220.0 2950.0	0.22	0.08	0.17	1.63

Annexe 2. Listes des bassins et barrages

Code BV	Pays	Dép/Etat	Nom du bassin versant	Surface (km²)	Pmoy (mm/an)	Qmoy (mm/an)	ETPmoy (mm/an)	Barrage(s)	V (normal, hm3)	Surface contrôlée (km²)	i1	i2	i3	i4
I5021010	France	Calvados	La Vire à Vire	133	1142.3	627.2	728.3	FRDATHEE	1.5	28.0	0.60	0.02	0.21	1.16
I5101010	France	Calvados	La Vire à Malloué	469	1035.7	526.4	728.3	FRDATHEE	1.5	28.0	0.28	0.01	0.06	1.23
J4124430	France	Finistère	La Rivière de Pont-l'Abbé à Tréméoc [Pen Enez]	51.8	1175.4	586.8	752.0	FRMOULIN	1.4	53.0	0.92	0.04	1.02	4.19
K2090810	France	Haute-Loire	L'Allier à Saint-Haon [Nouveau Monde]	514	1363.4	717.0	759.2	FRNAUSSA	190.0	53.0	0.68	0.41	0.10	0.76
K2210810	France	Haute-Loire	L'Allier à Monistrol-d'Allier	988	1247.6	514.3	759.2	FRNAUSSA	190.0	53.0	0.45	0.30	0.05	0.76
K2240810	France	Haute-Loire	L'Allier à Prades [amont pont]	1350	989.5	447.8	759.2	FRNAUSSA	190.0	53.0	0.41	0.25	0.04	0.76
K2753010	France	Puy-de-Dôme	La Morge à Montcel	117	803.8	236.8	721.6	FRSEP000	4.7	27.0	0.71	0.17	0.23	1.57
K2783010	France	Puy-de-Dôme	La Morge à Maringues [Côte Rouge]	713	697.5	156.4	721.6	FRSEP000	4.7	27.0	0.17	0.04	0.04	1.57
K5343210	France	Allier	L'Oeil à Malicorne [Beaufrancon]	126	835.5	201.3	721.6	FRBAZERG FRGANNES	1.3 1.2	17.0 12.0	0.51	0.06	0.23	1.24
K5363210	France	Allier	L'Oeil à Villefranche-d'Allier [Fouctière]	319	818.1	211.4	721.6	FRBAZERG FRGANNES	1.3 1.2	17.0 12.0	0.27	0.02	0.09	1.24
K1180010	France	Saône-et-Loire	La Loire à Digoïn	9315	886.1	283.0	740.4	FRLAVAL FRGRANGE FRVILLER FRCHARTR FRROUCHA	41.0 57.0 127.0 3.6 7.0	350.0 3850.0 6585.0 14.0 33.0	0.66	1.14	0.26	0.18
K1440010	France	Saône-et-Loire	La Loire à Gilly sur Loire	13007	888.3	311.7	740.4	FRLAVAL FRGRANGE FRVILLER FRCHARTR FRROUCHA	41.0 57.0 127.0 3.6 7.0	350.0 3850.0 6585.0 14.0 33.0	0.61	0.61	0.18	0.22
K1930010	France	Nièvre	La Loire à Nevers	17570	896.7	313.9	746.5	FRLAVAL FRGRANGE FRVILLER FRCHARTR FRROUCHA	41.0 57.0 127.0 3.6 7.0	350.0 3850.0 6585.0 14.0 33.0	0.49	0.45	0.14	0.22
K4000010	France	Cher	La Loire à Cours les Barres	32610	918.0	306.1	746.5	FRLAVAL FRGRANGE FRVILLER FRCHARTR FRROUCHA FRNAUSSA FRSEP000	41.0 57.0 127.0 3.6 7.0 190.0 4.7	350.0 3850.0 6585.0 14.0 33.0 53.0 27.0	0.30	0.20	0.04	0.33
K4180010	France	Loiret	La Loire à Gien	35500	912.7	253.3	750.6	FRLAVAL FRGRANGE FRVILLER FRCHARTR FRROUCHA FRNAUSSA FRSEP000	41.0 57.0 127.0 3.6 7.0 190.0 4.7	350.0 3850.0 6585.0 14.0 33.0 53.0 27.0	0.25	0.18	0.04	0.33

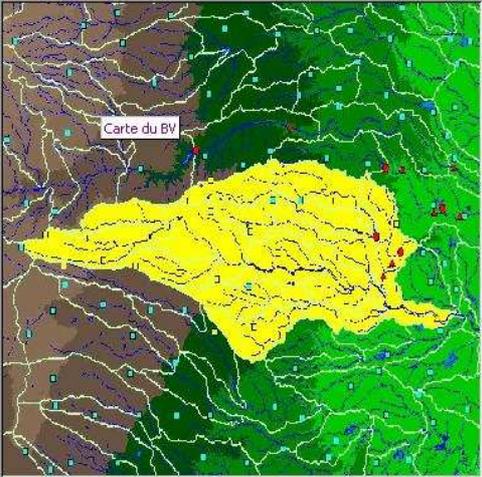
Code BV	Pays	Dép/Etat	Nom du bassin versant	Surface (km²)	Pmoy (mm/an)	Qmoy (mm/a)	ETPmoy (mm/an)	Barrage(s)	V (normal, hm³)	Surface contrôlée (km²)	i1	i2	i3	i4
K4350010	France	Loiret	La Loire à Orléans	36970	909.6	297.2	750.6	FRLAVALÉ	41.0	350.0	0.22	0.17	0.04	0.33
								FRGRANGE	57.0	3850.0				
								FRVILLER	127.0	6585.0				
								FRCHARTR	3.6	14.0				
								FRROUCHA	7.0	33.0				
								FRNAUSSA	190.0	53.0				
FRSEP000	4.7	27.0												
K4470010	France	Loir-et-Cher	La Loire à Blois	38320	906.2	278.4	750.6	FRLAVALÉ	41.0	350.0	0.20	0.16	0.03	0.33
								FRGRANGE	57.0	3850.0				
								FRVILLER	127.0	6585.0				
								FRCHARTR	3.6	14.0				
								FRROUCHA	7.0	33.0				
								FRNAUSSA	190.0	53.0				
FRSEP000	4.7	27.0												
L5301810	France	Haute-Vienne	La Gartempe à Saint-Bonnet-de-Bellac	1410	1115.6	406.0	719.4	FRSTPARD	22.9	77.0	0.64	0.05	0.07	1.35
L5411810	France	Vienne	La Gartempe à Montmorillon	1870	1053.6	387.8	719.4	FRMAZEAU	7.1	28.0				
								FRSTPARD	22.9	77.0	0.48	0.04	0.06	1.35
M7213010	France	Maine-et-Loire	La Moine à Roussay [Clopin]	292	834.5	288.0	749.2	FRRIBOU0	3.5	137.0	0.33	0.19	0.72	1.32
								FRVERDON	14.0	73.0				
M7213020	France	Maine-et-Loire	La Moine à Saint-Crespin-sur-Moine	373	823.2	306.6	749.2	FRRIBOU0	3.5	137.0	0.26	0.14	0.56	1.32
								FRVERDON	14.0	73.0				
M7302420	France	Loire-Atlantique	La Sèvre Nantaise à Clisson	1390	971.8	388.4	749.2	FRRIBOU0	3.5	137.0	0.49	0.03	0.15	1.32
								FRVERDON	14.0	73.0				
O1532910	France	Ariège	L'Hers-Vif à Roumengoux	665	1124.5	358.5	1077.3	FRMONTBE	60.0	15.0	0.69	0.23	0.02	1.30
O1652920	France	Ariège	L'Hers Vif à Mazères [nouvelle]	1330	949.2	317.5	1077.3	FRMONTBE	60.0	15.0	0.44	0.14	0.01	1.19
O1662910	France	Haute-Garonne	L'Hers-Vif à Calmont	1350	938.9	272.7	974.1	FRMONTBE	60.0	15.0	0.49	0.15	0.01	1.37
O1712510	France	Haute-Garonne	L'Ariège à Auterive	3450	564.9	510.8	974.1	FRMONTBE	60.0	15.0	0.44	0.03	0.00	1.19
O2222510	France	Haute-Garonne	L'Hers Mort à Toulouse	768	755.7	143.8	870.9	FRGANGUI	24.7	28.4	0.30	0.18	0.04	1.19
O2743320	France	Gers	La Gimone à Gimont	279	639.8	189.8	870.9	FRGIMONE	25.0	40.0	0.30	0.39	0.14	1.46
O2883310	France	Tarn-et-Garonne	La Gimone à Garganvillar (Castelferrus)	827	674.7	108.4	870.9	FRGIMONE	25.0	40.0	0.16	0.23	0.05	1.46
O6094010	France	Gers	L'Arrats à Saint-Antoine	600	746.7	144.3	765.6	FRASTARA	10.0	51.0	0.15	0.11	0.09	1.81
Q0612510	France	Gers	L'Arros à Juillac	590	1051.0	319.0	737.6	FRARRETD	10.8	57.2	0.46	0.05	0.10	1.48
Q0612520	France	Gers	L'Arros à Villecomtal-sur-Arros	560	1051.0	265.1	737.6	FRARRETD	10.8	57.2	0.59	0.07	0.10	1.48
R0100010	France	Vienne	La Charente à Charroux [Pont de Rochemeaux]	346	898.8	367.5	719.4	FRLAVALÉ	10.0	40.0	0.19	0.09	0.12	1.74
R0110010	France	Vienne	La Charente à Saint-Saviol [Pont Bridé]	492	889.8	366.6	719.4	FRLAVALÉ	10.0	40.0	0.15	0.06	0.08	1.66
R0110020	France	Charente	La Charente à Voullême [gué de Chambe]	510	889.8	376.5	719.4	FRLAVALÉ	10.0	40.0	0.14	0.05	0.08	1.73
R0220020	France	Charente	La Charente à Aunac [Pont d'Aunac]	1090	907.1	342.5	719.4	FRLAVALÉ	10.0	40.0	0.10	0.03	0.04	1.98
Y1355210	France	Aude	La Rougeanne à Moussoulens	130	1209.7	410.8	870.9	FRLAPRAD	8.8	12.0	0.21	0.12	0.09	1.11
Y1364010	France	Aude	Le Fresquel à Carcassonne [Pont Rouge]	939	1016.5	212.2	870.9	FRLAPRAD	8.8	12.0	0.28	0.03	0.01	1.11
Y2312010	France	Hérault	L'Hérault à Aspiran	1865	1112.0	654.6	897.9	FRSALAGO	102.0	76.0	0.78	0.02	0.04	1.76
Y5444010	France	Var	La Gisclé à Cogolin [Les Ajusts]	195	1012.9	215.0	1225.0	FRVERNE0	8.0	32.3	0.41	0.20	0.17	1.58
AUQ00539	Australie	Tasmanie	Fisher above Parangana	37.5	1986.5	1432.3	849.1	AUMACKEN	20.0	82.0	0.48	0.38	2.19	4.95

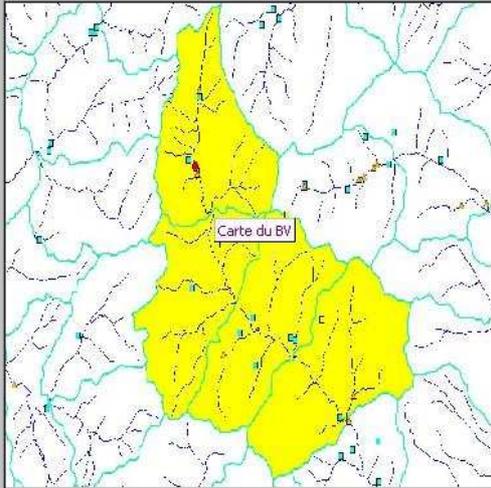
Annexe 2. Listes des bassins et barrages

Code BV	Pays	Dép/Etat	Nom du bassin versant	Surface (km²)	Pmoy (mm/an)	Qmoy (mm/a)	ETPmoy (mm/an)	Barrage(s)	V (normal, hm3)	Surface contrôlée (km²)	i1	i2	i3	i4
AUQ00060	Australie	Tasmanie	Mersey at Liena	762	1753.9	585.2	849.1	AUMACKEN AUPARANG AUROWALL	20.0 15.0 131.0	82.0 715.0 345.0	0.67	0.35	1.50	3.13
AUQ00022	Australie	Tasmanie	Mersy at Kimberley	1439	1674.3	720.8	849.1	AUMACKEN AUPARANG AUROWALL	20.0 15.0 131.0	82.0 715.0 345.0	0.38	0.15	0.79	3.13
SENE0001	Mali		Le Sénégal à Kayes	157400	1026.2	69.0	1735.3	SEMANANT	12000.0	27800.0	0.68	1.14	0.18	0.59
SENE0002	Sénégal		Le Sénégal à Bakel	218000	839.5	66.6	1724.7	SEMANANT	12000.0	27800.0	0.53	0.85	0.13	0.59

Annexe 3 : Exemples de fiches signalétiques issues de la base de données pour les bassins et barrages

a) Pour les bassins versants

Red River near Burkburnett 07308500			
Nom BV	<input type="text" value="Red River near Burkburnett"/>	Code BV	<input type="text" value="07308500"/>
Rivière	<input type="text" value="Red River"/>	Superficie	<input type="text" value="53276.10"/> km ²
Pays	<input type="text" value="Etats-Unis"/>	Dép/Etat	<input type="text" value="Texas"/>
Barrage 1	<input type="text" value="USALTU50"/>	Barrage 4	<input type="text"/>
Barrage 2	<input type="text" value="USTOMS00"/>	Barrage 5	<input type="text"/>
Barrage 3	<input type="text"/>	Barrage 6	<input type="text"/>
Nb pluviom.	<input type="text" value="22"/>	Nb stations ETP/T*	<input type="text" value="1"/>
Latitude	<input type="text" value="34.73"/>		
Remarques	<p>Partie du bassin a une altitude > 1000 m. Quelques ouvrages de capacité mineure s'ajoutent. Le barrage Umbarger (94 hm3, loisirs) est présent sur le BV mais on ne dispose pas des données.</p>		
		Pris en compte dans l'échantillon ? <input checked="" type="checkbox"/> Lien BASSIN.DAT Cliquer ici	
		Période utilisée <input type="text" value="1989-1998"/>	
			

La Thur à Willer-sur-Thur A1432010			
Nom BV	<input type="text" value="La Thur à Willer-sur-Thur"/>	Code BV	<input type="text" value="A1432010"/>
Rivière	<input type="text" value="La Thur"/>	Superficie	<input type="text" value="159.00"/> km ²
Pays	<input type="text" value="France"/>	Dép/Etat	<input type="text" value="Haut-Rhin"/>
Barrage 1	<input type="text" value="FRKRUTH0"/>	Barrage 4	<input type="text"/>
Barrage 2	<input type="text"/>	Barrage 5	<input type="text"/>
Barrage 3	<input type="text"/>	Barrage 6	<input type="text"/>
Nb pluviom.	<input type="text" value="5"/>	Nb stations ETP/T*	<input type="text" value="1"/>
Latitude	<input type="text" value="0.00"/>		
Remarques	<p></p>		
		Pris en compte dans l'échantillon ? <input checked="" type="checkbox"/> Lien BASSIN.DAT Cliquer ici	
		Période utilisée <input type="text" value="1994-2000"/>	
			

b) Pour les barrages-réservoirs

Pannecièrè

Informations générales	Données de gestion	Caractéristiques de la retenue	Caractéristiques du BV contrôlé	Commentaires/Bibliographie
Nom de l'ouvrage				
Nom de l'ouvrage: Pannecièrè		Code: FRPANNEC		
Pays: France		Dép./Etat: Nièvre		
Rivière: L'Yonne				
Gestionnaire: IIBRBS		Année de mise en service: 1949		
Utilisation(s) principale(s): Protection contre les crues et soutien d'étiage.				
Site Internet: http://www.iibrbs.fr		Pris en compte dans l'échantillon? <input checked="" type="checkbox"/> Justification: <div style="border: 1px solid black; height: 40px; width: 100%; margin-top: 5px;"></div>		



Tres Marias

Informations générales	Données de gestion	Caractéristiques de la retenue	Caractéristiques du BV contrôlé	Commentaires/Bibliographie
Nom de l'ouvrage				
Nom de l'ouvrage: Tres Marias		Code: BRTRESMA		
Pays: Brésil		Dép./Etat: Minas Gerais		
Rivière: São Francisco				
Gestionnaire: Cemig		Année de mise en service: 1962		
Utilisation(s) principale(s):				
Site Internet: http://www.cemig.com.br/		Pris en compte dans l'échantillon? <input checked="" type="checkbox"/> Justification: <div style="border: 1px solid black; height: 40px; width: 100%; margin-top: 5px;"></div>		



Annexe 4 : Résultats complémentaires sur le lien entre solution de prise en compte des barrages-réservoirs et caractéristiques physiques des bassins versants et des ouvrages

Existe-t-il un lien entre un type de solution et certaines caractéristiques des bassins versants et des ouvrages ?

Cas des solutions à alimentation et rejet unique

Nous présentons ici les résultats de l'analyse complémentaire de l'existence d'un lien entre un type de solution et certaines caractéristiques des bassins versants et des ouvrages. La démarche est identique à celle adoptée au paragraphe 6.3.1 (chapitre 6).

Contrairement au cas du chapitre 6, ici les bassins versants ont été scindés en quatre groupes selon la valeur des descripteurs. On rappelle que plus la valeur du descripteur est forte, plus le bassin versant est influencé et inversement.

L'objectif de scinder le l'échantillon de bassins versants en quatre groupes est de s'affranchir d'un éventuel effet de moyenne qui écraserait les résultats lorsque l'échantillon est séparé en deux groupes.

Les tableaux suivants présentent les performances en contrôle de la sélection de 25 solutions pour chacun des descripteurs des bassins versants (indices i_1 , i_2 , i_3 , i_4). Les performances sont calculées sur les débits (C2MQ, accent mis sur les forts débits) et sur les logarithmes des débits (C2MLQ, accent mis sur les faibles débits).

<p>1e</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>58.5</td> <td>59.1</td> <td>58.5</td> <td>58.0</td> <td>54.7</td> <td>1.73</td> <td>57.8</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>60.0</td> <td>60.4</td> <td>60.0</td> <td>59.3</td> <td>57.2</td> <td>1.28</td> <td>59.4</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>58.7</td> <td>59.2</td> <td>58.6</td> <td>58.2</td> <td>55.5</td> <td>1.47</td> <td>58.1</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>60.0</td> <td>60.4</td> <td>60.0</td> <td>59.4</td> <td>57.1</td> <td>1.31</td> <td>59.4</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>57.3</td> <td>57.7</td> <td>57.3</td> <td>56.7</td> <td>53.8</td> <td>1.59</td> <td>56.5</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>1.13</td> <td>1.10</td> <td>1.13</td> <td>1.09</td> <td>1.48</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>58.9</td> <td>59.3</td> <td>58.9</td> <td>58.3</td> <td>55.7</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="5">Initial 59.5</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>a) i1 - 1^{er} quart, amélioration max. 0,9</p>		A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	58.5	59.1	58.5	58.0	54.7	1.73	57.8	R7	60.0	60.4	60.0	59.3	57.2	1.28	59.4	R8	58.7	59.2	58.6	58.2	55.5	1.47	58.1	R11	60.0	60.4	60.0	59.4	57.1	1.31	59.4	R14	57.3	57.7	57.3	56.7	53.8	1.59	56.5	σ	1.13	1.10	1.13	1.09	1.48			Moy	58.9	59.3	58.9	58.3	55.7				Initial 59.5							<p>2e</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>67.3</td> <td>67.5</td> <td>68.0</td> <td>65.0</td> <td>64.5</td> <td>1.59</td> <td>66.5</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>68.3</td> <td>68.4</td> <td>68.5</td> <td>66.1</td> <td>65.0</td> <td>1.61</td> <td>67.3</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>68.1</td> <td>68.3</td> <td>68.6</td> <td>65.6</td> <td>65.2</td> <td>1.64</td> <td>67.2</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>68.5</td> <td>68.7</td> <td>68.7</td> <td>66.3</td> <td>65.1</td> <td>1.65</td> <td>67.5</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>67.8</td> <td>68.0</td> <td>68.1</td> <td>65.3</td> <td>64.7</td> <td>1.63</td> <td>66.8</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>0.46</td> <td>0.48</td> <td>0.30</td> <td>0.53</td> <td>0.29</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>68.0</td> <td>68.2</td> <td>68.4</td> <td>65.7</td> <td>64.9</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="5">Initial 67.8</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>b) i1 - 2^{ème} quart, amélioration max. 0,9</p>		A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	67.3	67.5	68.0	65.0	64.5	1.59	66.5	R7	68.3	68.4	68.5	66.1	65.0	1.61	67.3	R8	68.1	68.3	68.6	65.6	65.2	1.64	67.2	R11	68.5	68.7	68.7	66.3	65.1	1.65	67.5	R14	67.8	68.0	68.1	65.3	64.7	1.63	66.8	σ	0.46	0.48	0.30	0.53	0.29			Moy	68.0	68.2	68.4	65.7	64.9				Initial 67.8						
	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	58.5	59.1	58.5	58.0	54.7	1.73	57.8																																																																																																																																										
R7	60.0	60.4	60.0	59.3	57.2	1.28	59.4																																																																																																																																										
R8	58.7	59.2	58.6	58.2	55.5	1.47	58.1																																																																																																																																										
R11	60.0	60.4	60.0	59.4	57.1	1.31	59.4																																																																																																																																										
R14	57.3	57.7	57.3	56.7	53.8	1.59	56.5																																																																																																																																										
σ	1.13	1.10	1.13	1.09	1.48																																																																																																																																												
Moy	58.9	59.3	58.9	58.3	55.7																																																																																																																																												
	Initial 59.5																																																																																																																																																
	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	67.3	67.5	68.0	65.0	64.5	1.59	66.5																																																																																																																																										
R7	68.3	68.4	68.5	66.1	65.0	1.61	67.3																																																																																																																																										
R8	68.1	68.3	68.6	65.6	65.2	1.64	67.2																																																																																																																																										
R11	68.5	68.7	68.7	66.3	65.1	1.65	67.5																																																																																																																																										
R14	67.8	68.0	68.1	65.3	64.7	1.63	66.8																																																																																																																																										
σ	0.46	0.48	0.30	0.53	0.29																																																																																																																																												
Moy	68.0	68.2	68.4	65.7	64.9																																																																																																																																												
	Initial 67.8																																																																																																																																																
<p>3e</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>56.2</td> <td>56.5</td> <td>56.2</td> <td>55.7</td> <td>52.9</td> <td>1.48</td> <td>55.5</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>56.5</td> <td>56.8</td> <td>56.4</td> <td>56.0</td> <td>52.3</td> <td>1.90</td> <td>55.6</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>55.6</td> <td>55.8</td> <td>55.4</td> <td>55.0</td> <td>51.8</td> <td>1.69</td> <td>54.7</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>57.2</td> <td>57.4</td> <td>57.0</td> <td>56.6</td> <td>52.8</td> <td>1.91</td> <td>56.2</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>55.1</td> <td>55.3</td> <td>55.0</td> <td>54.4</td> <td>51.0</td> <td>1.82</td> <td>54.2</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>0.79</td> <td>0.81</td> <td>0.80</td> <td>0.87</td> <td>0.80</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>56.1</td> <td>56.4</td> <td>56.0</td> <td>55.5</td> <td>52.1</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="5">Initial 55.9</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>c) i1 - 3^{ème} quart, amélioration max. 1,5</p>		A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	56.2	56.5	56.2	55.7	52.9	1.48	55.5	R7	56.5	56.8	56.4	56.0	52.3	1.90	55.6	R8	55.6	55.8	55.4	55.0	51.8	1.69	54.7	R11	57.2	57.4	57.0	56.6	52.8	1.91	56.2	R14	55.1	55.3	55.0	54.4	51.0	1.82	54.2	σ	0.79	0.81	0.80	0.87	0.80			Moy	56.1	56.4	56.0	55.5	52.1				Initial 55.9							<p>4e</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>42.0</td> <td>41.9</td> <td>42.6</td> <td>41.5</td> <td>39.0</td> <td>1.40</td> <td>41.4</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>48.9</td> <td>48.8</td> <td>49.2</td> <td>48.2</td> <td>44.0</td> <td>2.14</td> <td>47.8</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>48.2</td> <td>48.0</td> <td>47.9</td> <td>47.6</td> <td>42.7</td> <td>2.35</td> <td>46.9</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>49.4</td> <td>49.4</td> <td>49.7</td> <td>49.0</td> <td>44.4</td> <td>2.23</td> <td>48.4</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>48.2</td> <td>48.1</td> <td>47.2</td> <td>47.6</td> <td>41.4</td> <td>2.87</td> <td>46.5</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>3.02</td> <td>3.03</td> <td>2.82</td> <td>3.00</td> <td>2.21</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>47.3</td> <td>47.2</td> <td>47.3</td> <td>46.8</td> <td>42.3</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="5">Initial 42.3</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>d) i1 - 4^{ème} quart, amélioration max. 7,4</p>		A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	42.0	41.9	42.6	41.5	39.0	1.40	41.4	R7	48.9	48.8	49.2	48.2	44.0	2.14	47.8	R8	48.2	48.0	47.9	47.6	42.7	2.35	46.9	R11	49.4	49.4	49.7	49.0	44.4	2.23	48.4	R14	48.2	48.1	47.2	47.6	41.4	2.87	46.5	σ	3.02	3.03	2.82	3.00	2.21			Moy	47.3	47.2	47.3	46.8	42.3				Initial 42.3						
	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	56.2	56.5	56.2	55.7	52.9	1.48	55.5																																																																																																																																										
R7	56.5	56.8	56.4	56.0	52.3	1.90	55.6																																																																																																																																										
R8	55.6	55.8	55.4	55.0	51.8	1.69	54.7																																																																																																																																										
R11	57.2	57.4	57.0	56.6	52.8	1.91	56.2																																																																																																																																										
R14	55.1	55.3	55.0	54.4	51.0	1.82	54.2																																																																																																																																										
σ	0.79	0.81	0.80	0.87	0.80																																																																																																																																												
Moy	56.1	56.4	56.0	55.5	52.1																																																																																																																																												
	Initial 55.9																																																																																																																																																
	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	42.0	41.9	42.6	41.5	39.0	1.40	41.4																																																																																																																																										
R7	48.9	48.8	49.2	48.2	44.0	2.14	47.8																																																																																																																																										
R8	48.2	48.0	47.9	47.6	42.7	2.35	46.9																																																																																																																																										
R11	49.4	49.4	49.7	49.0	44.4	2.23	48.4																																																																																																																																										
R14	48.2	48.1	47.2	47.6	41.4	2.87	46.5																																																																																																																																										
σ	3.02	3.03	2.82	3.00	2.21																																																																																																																																												
Moy	47.3	47.2	47.3	46.8	42.3																																																																																																																																												
	Initial 42.3																																																																																																																																																
<p>1e</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>63.7</td> <td>63.7</td> <td>63.6</td> <td>63.4</td> <td>62.7</td> <td>0.41</td> <td>63.4</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>65.5</td> <td>65.5</td> <td>65.4</td> <td>65.2</td> <td>64.4</td> <td>0.46</td> <td>65.2</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>63.7</td> <td>63.7</td> <td>63.6</td> <td>63.4</td> <td>62.7</td> <td>0.42</td> <td>63.4</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>65.5</td> <td>65.5</td> <td>65.4</td> <td>65.2</td> <td>64.4</td> <td>0.47</td> <td>65.2</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>64.5</td> <td>64.6</td> <td>63.2</td> <td>64.3</td> <td>62.3</td> <td>1.00</td> <td>63.8</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>0.90</td> <td>0.90</td> <td>1.07</td> <td>0.88</td> <td>1.01</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>64.6</td> <td>64.6</td> <td>64.2</td> <td>64.3</td> <td>63.3</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="5">Initial 63.4</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>e) i2 - 1^{er} quart, amélioration max. 2,1</p>		A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	63.7	63.7	63.6	63.4	62.7	0.41	63.4	R7	65.5	65.5	65.4	65.2	64.4	0.46	65.2	R8	63.7	63.7	63.6	63.4	62.7	0.42	63.4	R11	65.5	65.5	65.4	65.2	64.4	0.47	65.2	R14	64.5	64.6	63.2	64.3	62.3	1.00	63.8	σ	0.90	0.90	1.07	0.88	1.01			Moy	64.6	64.6	64.2	64.3	63.3				Initial 63.4							<p>2e</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>64.8</td> <td>65.2</td> <td>65.3</td> <td>64.4</td> <td>63.3</td> <td>0.83</td> <td>64.6</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>65.3</td> <td>65.8</td> <td>65.6</td> <td>64.6</td> <td>63.6</td> <td>0.90</td> <td>65.0</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>65.4</td> <td>65.9</td> <td>65.7</td> <td>64.8</td> <td>63.8</td> <td>0.85</td> <td>65.1</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>65.9</td> <td>66.3</td> <td>66.3</td> <td>65.1</td> <td>64.0</td> <td>0.99</td> <td>65.5</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>65.9</td> <td>66.3</td> <td>66.2</td> <td>65.0</td> <td>63.7</td> <td>1.08</td> <td>65.4</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>0.45</td> <td>0.44</td> <td>0.42</td> <td>0.31</td> <td>0.27</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>65.5</td> <td>65.9</td> <td>65.8</td> <td>64.8</td> <td>63.7</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="5">Initial 65.3</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>f) i2 - 2^{ème} quart, amélioration max. 1,0</p>		A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	64.8	65.2	65.3	64.4	63.3	0.83	64.6	R7	65.3	65.8	65.6	64.6	63.6	0.90	65.0	R8	65.4	65.9	65.7	64.8	63.8	0.85	65.1	R11	65.9	66.3	66.3	65.1	64.0	0.99	65.5	R14	65.9	66.3	66.2	65.0	63.7	1.08	65.4	σ	0.45	0.44	0.42	0.31	0.27			Moy	65.5	65.9	65.8	64.8	63.7				Initial 65.3						
	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	63.7	63.7	63.6	63.4	62.7	0.41	63.4																																																																																																																																										
R7	65.5	65.5	65.4	65.2	64.4	0.46	65.2																																																																																																																																										
R8	63.7	63.7	63.6	63.4	62.7	0.42	63.4																																																																																																																																										
R11	65.5	65.5	65.4	65.2	64.4	0.47	65.2																																																																																																																																										
R14	64.5	64.6	63.2	64.3	62.3	1.00	63.8																																																																																																																																										
σ	0.90	0.90	1.07	0.88	1.01																																																																																																																																												
Moy	64.6	64.6	64.2	64.3	63.3																																																																																																																																												
	Initial 63.4																																																																																																																																																
	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	64.8	65.2	65.3	64.4	63.3	0.83	64.6																																																																																																																																										
R7	65.3	65.8	65.6	64.6	63.6	0.90	65.0																																																																																																																																										
R8	65.4	65.9	65.7	64.8	63.8	0.85	65.1																																																																																																																																										
R11	65.9	66.3	66.3	65.1	64.0	0.99	65.5																																																																																																																																										
R14	65.9	66.3	66.2	65.0	63.7	1.08	65.4																																																																																																																																										
σ	0.45	0.44	0.42	0.31	0.27																																																																																																																																												
Moy	65.5	65.9	65.8	64.8	63.7																																																																																																																																												
	Initial 65.3																																																																																																																																																
<p>3e</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>55.2</td> <td>55.6</td> <td>56.3</td> <td>55.3</td> <td>55.1</td> <td>0.48</td> <td>55.5</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>61.5</td> <td>61.8</td> <td>62.2</td> <td>61.5</td> <td>60.8</td> <td>0.50</td> <td>61.6</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>61.4</td> <td>61.6</td> <td>61.8</td> <td>61.4</td> <td>60.3</td> <td>0.58</td> <td>61.3</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>62.2</td> <td>62.6</td> <td>62.8</td> <td>62.5</td> <td>61.3</td> <td>0.58</td> <td>62.3</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>61.0</td> <td>61.2</td> <td>61.4</td> <td>61.3</td> <td>59.5</td> <td>0.78</td> <td>60.9</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>2.86</td> <td>2.82</td> <td>2.62</td> <td>2.88</td> <td>2.49</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>60.3</td> <td>60.6</td> <td>60.9</td> <td>60.4</td> <td>59.4</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="5">Initial 56.8</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>g) i2 - 3^{ème} quart, amélioration max. 6,0</p>		A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	55.2	55.6	56.3	55.3	55.1	0.48	55.5	R7	61.5	61.8	62.2	61.5	60.8	0.50	61.6	R8	61.4	61.6	61.8	61.4	60.3	0.58	61.3	R11	62.2	62.6	62.8	62.5	61.3	0.58	62.3	R14	61.0	61.2	61.4	61.3	59.5	0.78	60.9	σ	2.86	2.82	2.62	2.88	2.49			Moy	60.3	60.6	60.9	60.4	59.4				Initial 56.8							<p>4e</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>40.6</td> <td>40.6</td> <td>40.5</td> <td>37.8</td> <td>31.4</td> <td>3.97</td> <td>38.2</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>42.5</td> <td>42.5</td> <td>42.2</td> <td>39.9</td> <td>31.9</td> <td>4.54</td> <td>39.8</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>41.5</td> <td>41.4</td> <td>40.6</td> <td>38.4</td> <td>30.5</td> <td>4.62</td> <td>38.5</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>42.6</td> <td>42.6</td> <td>42.3</td> <td>40.1</td> <td>32.1</td> <td>4.52</td> <td>40.0</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>38.7</td> <td>38.8</td> <td>38.5</td> <td>35.6</td> <td>27.9</td> <td>4.69</td> <td>35.9</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>1.60</td> <td>1.57</td> <td>1.56</td> <td>1.85</td> <td>1.73</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>41.2</td> <td>41.2</td> <td>40.8</td> <td>38.4</td> <td>30.8</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="5">Initial 40.3</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>h) i2 - 4^{ème} quart, amélioration max. 2,3</p>		A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	40.6	40.6	40.5	37.8	31.4	3.97	38.2	R7	42.5	42.5	42.2	39.9	31.9	4.54	39.8	R8	41.5	41.4	40.6	38.4	30.5	4.62	38.5	R11	42.6	42.6	42.3	40.1	32.1	4.52	40.0	R14	38.7	38.8	38.5	35.6	27.9	4.69	35.9	σ	1.60	1.57	1.56	1.85	1.73			Moy	41.2	41.2	40.8	38.4	30.8				Initial 40.3						
	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	55.2	55.6	56.3	55.3	55.1	0.48	55.5																																																																																																																																										
R7	61.5	61.8	62.2	61.5	60.8	0.50	61.6																																																																																																																																										
R8	61.4	61.6	61.8	61.4	60.3	0.58	61.3																																																																																																																																										
R11	62.2	62.6	62.8	62.5	61.3	0.58	62.3																																																																																																																																										
R14	61.0	61.2	61.4	61.3	59.5	0.78	60.9																																																																																																																																										
σ	2.86	2.82	2.62	2.88	2.49																																																																																																																																												
Moy	60.3	60.6	60.9	60.4	59.4																																																																																																																																												
	Initial 56.8																																																																																																																																																
	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	40.6	40.6	40.5	37.8	31.4	3.97	38.2																																																																																																																																										
R7	42.5	42.5	42.2	39.9	31.9	4.54	39.8																																																																																																																																										
R8	41.5	41.4	40.6	38.4	30.5	4.62	38.5																																																																																																																																										
R11	42.6	42.6	42.3	40.1	32.1	4.52	40.0																																																																																																																																										
R14	38.7	38.8	38.5	35.6	27.9	4.69	35.9																																																																																																																																										
σ	1.60	1.57	1.56	1.85	1.73																																																																																																																																												
Moy	41.2	41.2	40.8	38.4	30.8																																																																																																																																												
	Initial 40.3																																																																																																																																																

<table border="1"> <thead> <tr> <th>1e</th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>59.1</td> <td>59.1</td> <td>58.8</td> <td>58.9</td> <td>56.3</td> <td>1.20</td> <td>58.4</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>60.9</td> <td>60.9</td> <td>60.6</td> <td>60.8</td> <td>58.4</td> <td>1.11</td> <td>60.4</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>57.6</td> <td>57.6</td> <td>57.3</td> <td>57.5</td> <td>55.1</td> <td>1.09</td> <td>57.0</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>60.9</td> <td>60.9</td> <td>60.6</td> <td>60.8</td> <td>58.3</td> <td>1.14</td> <td>60.3</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>57.9</td> <td>58.0</td> <td>56.4</td> <td>57.8</td> <td>54.0</td> <td>1.71</td> <td>56.8</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>1.59</td> <td>1.56</td> <td>1.93</td> <td>1.62</td> <td>1.93</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>59.3</td> <td>59.3</td> <td>58.8</td> <td>59.2</td> <td>56.4</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="5">Initial 58.1</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>i) i3 – 1^{er} quart, amélioration max. 2,8</p>	1e	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	59.1	59.1	58.8	58.9	56.3	1.20	58.4	R7	60.9	60.9	60.6	60.8	58.4	1.11	60.4	R8	57.6	57.6	57.3	57.5	55.1	1.09	57.0	R11	60.9	60.9	60.6	60.8	58.3	1.14	60.3	R14	57.9	58.0	56.4	57.8	54.0	1.71	56.8	σ	1.59	1.56	1.93	1.62	1.93			Moy	59.3	59.3	58.8	59.2	56.4				Initial 58.1							<table border="1"> <thead> <tr> <th>2e</th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>60.3</td> <td>60.9</td> <td>60.5</td> <td>59.2</td> <td>56.7</td> <td>1.69</td> <td>59.5</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>61.5</td> <td>62.0</td> <td>61.6</td> <td>60.4</td> <td>58.4</td> <td>1.46</td> <td>60.8</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>61.1</td> <td>61.6</td> <td>61.2</td> <td>60.1</td> <td>57.9</td> <td>1.49</td> <td>60.4</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>61.5</td> <td>62.0</td> <td>61.7</td> <td>60.5</td> <td>58.4</td> <td>1.48</td> <td>60.8</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>60.1</td> <td>60.7</td> <td>60.4</td> <td>59.0</td> <td>56.7</td> <td>1.62</td> <td>59.4</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>0.64</td> <td>0.63</td> <td>0.61</td> <td>0.67</td> <td>0.85</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>60.9</td> <td>61.4</td> <td>61.1</td> <td>59.8</td> <td>57.6</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="5">Initial 61.5</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>j) i3 – 2^{ème} quart, amélioration max. 0,5</p>	2e	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	60.3	60.9	60.5	59.2	56.7	1.69	59.5	R7	61.5	62.0	61.6	60.4	58.4	1.46	60.8	R8	61.1	61.6	61.2	60.1	57.9	1.49	60.4	R11	61.5	62.0	61.7	60.5	58.4	1.48	60.8	R14	60.1	60.7	60.4	59.0	56.7	1.62	59.4	σ	0.64	0.63	0.61	0.67	0.85			Moy	60.9	61.4	61.1	59.8	57.6				Initial 61.5						
1e	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	59.1	59.1	58.8	58.9	56.3	1.20	58.4																																																																																																																																										
R7	60.9	60.9	60.6	60.8	58.4	1.11	60.4																																																																																																																																										
R8	57.6	57.6	57.3	57.5	55.1	1.09	57.0																																																																																																																																										
R11	60.9	60.9	60.6	60.8	58.3	1.14	60.3																																																																																																																																										
R14	57.9	58.0	56.4	57.8	54.0	1.71	56.8																																																																																																																																										
σ	1.59	1.56	1.93	1.62	1.93																																																																																																																																												
Moy	59.3	59.3	58.8	59.2	56.4																																																																																																																																												
	Initial 58.1																																																																																																																																																
2e	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	60.3	60.9	60.5	59.2	56.7	1.69	59.5																																																																																																																																										
R7	61.5	62.0	61.6	60.4	58.4	1.46	60.8																																																																																																																																										
R8	61.1	61.6	61.2	60.1	57.9	1.49	60.4																																																																																																																																										
R11	61.5	62.0	61.7	60.5	58.4	1.48	60.8																																																																																																																																										
R14	60.1	60.7	60.4	59.0	56.7	1.62	59.4																																																																																																																																										
σ	0.64	0.63	0.61	0.67	0.85																																																																																																																																												
Moy	60.9	61.4	61.1	59.8	57.6																																																																																																																																												
	Initial 61.5																																																																																																																																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>3e</th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>56.9</td> <td>57.0</td> <td>57.5</td> <td>55.2</td> <td>52.9</td> <td>1.91</td> <td>55.9</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>58.5</td> <td>58.6</td> <td>58.7</td> <td>56.5</td> <td>53.2</td> <td>2.34</td> <td>57.1</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>58.3</td> <td>58.5</td> <td>58.6</td> <td>56.0</td> <td>53.7</td> <td>2.13</td> <td>57.0</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>58.7</td> <td>58.8</td> <td>58.8</td> <td>56.6</td> <td>53.5</td> <td>2.29</td> <td>57.3</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>56.9</td> <td>57.1</td> <td>57.2</td> <td>54.7</td> <td>52.5</td> <td>2.07</td> <td>55.7</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>0.87</td> <td>0.88</td> <td>0.74</td> <td>0.84</td> <td>0.52</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>57.8</td> <td>58.0</td> <td>58.2</td> <td>55.8</td> <td>53.2</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="5">Initial 57.6</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>k) i3 – 3^{ème} quart, amélioration max. 1,2</p>	3e	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	56.9	57.0	57.5	55.2	52.9	1.91	55.9	R7	58.5	58.6	58.7	56.5	53.2	2.34	57.1	R8	58.3	58.5	58.6	56.0	53.7	2.13	57.0	R11	58.7	58.8	58.8	56.6	53.5	2.29	57.3	R14	56.9	57.1	57.2	54.7	52.5	2.07	55.7	σ	0.87	0.88	0.74	0.84	0.52			Moy	57.8	58.0	58.2	55.8	53.2				Initial 57.6							<table border="1"> <thead> <tr> <th>4e</th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>46.9</td> <td>47.0</td> <td>47.6</td> <td>46.1</td> <td>44.3</td> <td>1.27</td> <td>46.4</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>52.2</td> <td>52.3</td> <td>52.5</td> <td>51.4</td> <td>47.8</td> <td>1.95</td> <td>51.2</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>52.8</td> <td>52.8</td> <td>52.5</td> <td>52.0</td> <td>47.5</td> <td>2.27</td> <td>51.5</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>53.2</td> <td>53.3</td> <td>53.6</td> <td>52.7</td> <td>48.6</td> <td>2.11</td> <td>52.3</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>52.6</td> <td>52.6</td> <td>52.8</td> <td>51.8</td> <td>46.8</td> <td>2.56</td> <td>51.3</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>2.63</td> <td>2.61</td> <td>2.42</td> <td>2.66</td> <td>1.65</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>51.5</td> <td>51.6</td> <td>51.8</td> <td>50.8</td> <td>47.0</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="5">Initial 47.2</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>l) i3 – 4^{ème} quart, amélioration max. 6,4</p>	4e	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	46.9	47.0	47.6	46.1	44.3	1.27	46.4	R7	52.2	52.3	52.5	51.4	47.8	1.95	51.2	R8	52.8	52.8	52.5	52.0	47.5	2.27	51.5	R11	53.2	53.3	53.6	52.7	48.6	2.11	52.3	R14	52.6	52.6	52.8	51.8	46.8	2.56	51.3	σ	2.63	2.61	2.42	2.66	1.65			Moy	51.5	51.6	51.8	50.8	47.0				Initial 47.2						
3e	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	56.9	57.0	57.5	55.2	52.9	1.91	55.9																																																																																																																																										
R7	58.5	58.6	58.7	56.5	53.2	2.34	57.1																																																																																																																																										
R8	58.3	58.5	58.6	56.0	53.7	2.13	57.0																																																																																																																																										
R11	58.7	58.8	58.8	56.6	53.5	2.29	57.3																																																																																																																																										
R14	56.9	57.1	57.2	54.7	52.5	2.07	55.7																																																																																																																																										
σ	0.87	0.88	0.74	0.84	0.52																																																																																																																																												
Moy	57.8	58.0	58.2	55.8	53.2																																																																																																																																												
	Initial 57.6																																																																																																																																																
4e	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	46.9	47.0	47.6	46.1	44.3	1.27	46.4																																																																																																																																										
R7	52.2	52.3	52.5	51.4	47.8	1.95	51.2																																																																																																																																										
R8	52.8	52.8	52.5	52.0	47.5	2.27	51.5																																																																																																																																										
R11	53.2	53.3	53.6	52.7	48.6	2.11	52.3																																																																																																																																										
R14	52.6	52.6	52.8	51.8	46.8	2.56	51.3																																																																																																																																										
σ	2.63	2.61	2.42	2.66	1.65																																																																																																																																												
Moy	51.5	51.6	51.8	50.8	47.0																																																																																																																																												
	Initial 47.2																																																																																																																																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>1e</th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>44.7</td> <td>44.6</td> <td>45.0</td> <td>43.9</td> <td>39.7</td> <td>2.23</td> <td>43.6</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>48.5</td> <td>48.3</td> <td>48.5</td> <td>47.5</td> <td>41.3</td> <td>3.12</td> <td>46.8</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>47.5</td> <td>47.3</td> <td>46.9</td> <td>46.3</td> <td>39.7</td> <td>3.28</td> <td>45.5</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>48.7</td> <td>48.5</td> <td>48.7</td> <td>47.8</td> <td>41.4</td> <td>3.16</td> <td>47.0</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>46.4</td> <td>46.2</td> <td>46.3</td> <td>44.9</td> <td>38.7</td> <td>3.29</td> <td>44.5</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>1.64</td> <td>1.64</td> <td>1.52</td> <td>1.68</td> <td>1.15</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>47.2</td> <td>47.0</td> <td>47.1</td> <td>46.1</td> <td>40.2</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="5">Initial 44.4</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>m) i4 – 1^{er} quart, amélioration max. 4,3</p>	1e	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	44.7	44.6	45.0	43.9	39.7	2.23	43.6	R7	48.5	48.3	48.5	47.5	41.3	3.12	46.8	R8	47.5	47.3	46.9	46.3	39.7	3.28	45.5	R11	48.7	48.5	48.7	47.8	41.4	3.16	47.0	R14	46.4	46.2	46.3	44.9	38.7	3.29	44.5	σ	1.64	1.64	1.52	1.68	1.15			Moy	47.2	47.0	47.1	46.1	40.2				Initial 44.4							<table border="1"> <thead> <tr> <th>2e</th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>71.3</td> <td>71.3</td> <td>71.6</td> <td>69.4</td> <td>69.4</td> <td>1.12</td> <td>70.6</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>71.9</td> <td>71.9</td> <td>71.8</td> <td>70.4</td> <td>69.5</td> <td>1.09</td> <td>71.1</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>71.9</td> <td>71.9</td> <td>72.0</td> <td>70.0</td> <td>69.8</td> <td>1.12</td> <td>71.1</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>72.0</td> <td>72.1</td> <td>72.0</td> <td>70.5</td> <td>69.6</td> <td>1.13</td> <td>71.3</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>70.9</td> <td>70.9</td> <td>71.1</td> <td>69.1</td> <td>68.8</td> <td>1.13</td> <td>70.1</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>0.46</td> <td>0.48</td> <td>0.40</td> <td>0.62</td> <td>0.40</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>71.6</td> <td>71.6</td> <td>71.7</td> <td>69.9</td> <td>69.4</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="5">Initial 72.3</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>n) i4 – 2^{ème} quart, amélioration max. -0,2</p>	2e	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	71.3	71.3	71.6	69.4	69.4	1.12	70.6	R7	71.9	71.9	71.8	70.4	69.5	1.09	71.1	R8	71.9	71.9	72.0	70.0	69.8	1.12	71.1	R11	72.0	72.1	72.0	70.5	69.6	1.13	71.3	R14	70.9	70.9	71.1	69.1	68.8	1.13	70.1	σ	0.46	0.48	0.40	0.62	0.40			Moy	71.6	71.6	71.7	69.9	69.4				Initial 72.3						
1e	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	44.7	44.6	45.0	43.9	39.7	2.23	43.6																																																																																																																																										
R7	48.5	48.3	48.5	47.5	41.3	3.12	46.8																																																																																																																																										
R8	47.5	47.3	46.9	46.3	39.7	3.28	45.5																																																																																																																																										
R11	48.7	48.5	48.7	47.8	41.4	3.16	47.0																																																																																																																																										
R14	46.4	46.2	46.3	44.9	38.7	3.29	44.5																																																																																																																																										
σ	1.64	1.64	1.52	1.68	1.15																																																																																																																																												
Moy	47.2	47.0	47.1	46.1	40.2																																																																																																																																												
	Initial 44.4																																																																																																																																																
2e	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	71.3	71.3	71.6	69.4	69.4	1.12	70.6																																																																																																																																										
R7	71.9	71.9	71.8	70.4	69.5	1.09	71.1																																																																																																																																										
R8	71.9	71.9	72.0	70.0	69.8	1.12	71.1																																																																																																																																										
R11	72.0	72.1	72.0	70.5	69.6	1.13	71.3																																																																																																																																										
R14	70.9	70.9	71.1	69.1	68.8	1.13	70.1																																																																																																																																										
σ	0.46	0.48	0.40	0.62	0.40																																																																																																																																												
Moy	71.6	71.6	71.7	69.9	69.4																																																																																																																																												
	Initial 72.3																																																																																																																																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>3e</th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>57.0</td> <td>57.3</td> <td>57.1</td> <td>57.0</td> <td>54.1</td> <td>1.36</td> <td>56.5</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>58.8</td> <td>59.0</td> <td>58.9</td> <td>58.5</td> <td>55.4</td> <td>1.56</td> <td>58.1</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>58.6</td> <td>58.8</td> <td>58.5</td> <td>58.2</td> <td>55.0</td> <td>1.59</td> <td>57.8</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>58.9</td> <td>59.1</td> <td>59.1</td> <td>58.6</td> <td>55.5</td> <td>1.53</td> <td>58.2</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>56.8</td> <td>57.0</td> <td>56.8</td> <td>56.4</td> <td>53.1</td> <td>1.65</td> <td>56.0</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>1.05</td> <td>1.03</td> <td>1.06</td> <td>0.95</td> <td>1.03</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>58.0</td> <td>58.2</td> <td>58.1</td> <td>57.7</td> <td>54.6</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="5">Initial 57.1</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>o) i4 – 3^{ème} quart, amélioration max. 2,0</p>	3e	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	57.0	57.3	57.1	57.0	54.1	1.36	56.5	R7	58.8	59.0	58.9	58.5	55.4	1.56	58.1	R8	58.6	58.8	58.5	58.2	55.0	1.59	57.8	R11	58.9	59.1	59.1	58.6	55.5	1.53	58.2	R14	56.8	57.0	56.8	56.4	53.1	1.65	56.0	σ	1.05	1.03	1.06	0.95	1.03			Moy	58.0	58.2	58.1	57.7	54.6				Initial 57.1							<table border="1"> <thead> <tr> <th>4e</th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>49.5</td> <td>50.2</td> <td>50.2</td> <td>48.6</td> <td>46.6</td> <td>1.50</td> <td>49.0</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>53.6</td> <td>54.2</td> <td>53.9</td> <td>52.5</td> <td>51.1</td> <td>1.29</td> <td>53.1</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>52.0</td> <td>52.6</td> <td>52.3</td> <td>51.2</td> <td>49.4</td> <td>1.29</td> <td>51.5</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>54.4</td> <td>55.0</td> <td>54.8</td> <td>53.5</td> <td>51.7</td> <td>1.37</td> <td>53.9</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>53.4</td> <td>54.0</td> <td>52.5</td> <td>52.7</td> <td>49.0</td> <td>1.96</td> <td>52.3</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>1.90</td> <td>1.89</td> <td>1.75</td> <td>1.93</td> <td>1.97</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>52.6</td> <td>53.2</td> <td>52.7</td> <td>51.7</td> <td>49.5</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="5">Initial 50.2</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>p) i4 – 4^{ème} quart, amélioration max. 4,8</p>	4e	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	49.5	50.2	50.2	48.6	46.6	1.50	49.0	R7	53.6	54.2	53.9	52.5	51.1	1.29	53.1	R8	52.0	52.6	52.3	51.2	49.4	1.29	51.5	R11	54.4	55.0	54.8	53.5	51.7	1.37	53.9	R14	53.4	54.0	52.5	52.7	49.0	1.96	52.3	σ	1.90	1.89	1.75	1.93	1.97			Moy	52.6	53.2	52.7	51.7	49.5				Initial 50.2						
3e	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	57.0	57.3	57.1	57.0	54.1	1.36	56.5																																																																																																																																										
R7	58.8	59.0	58.9	58.5	55.4	1.56	58.1																																																																																																																																										
R8	58.6	58.8	58.5	58.2	55.0	1.59	57.8																																																																																																																																										
R11	58.9	59.1	59.1	58.6	55.5	1.53	58.2																																																																																																																																										
R14	56.8	57.0	56.8	56.4	53.1	1.65	56.0																																																																																																																																										
σ	1.05	1.03	1.06	0.95	1.03																																																																																																																																												
Moy	58.0	58.2	58.1	57.7	54.6																																																																																																																																												
	Initial 57.1																																																																																																																																																
4e	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	49.5	50.2	50.2	48.6	46.6	1.50	49.0																																																																																																																																										
R7	53.6	54.2	53.9	52.5	51.1	1.29	53.1																																																																																																																																										
R8	52.0	52.6	52.3	51.2	49.4	1.29	51.5																																																																																																																																										
R11	54.4	55.0	54.8	53.5	51.7	1.37	53.9																																																																																																																																										
R14	53.4	54.0	52.5	52.7	49.0	1.96	52.3																																																																																																																																										
σ	1.90	1.89	1.75	1.93	1.97																																																																																																																																												
Moy	52.6	53.2	52.7	51.7	49.5																																																																																																																																												
	Initial 50.2																																																																																																																																																

Tableau A4.1 : Performances moyennes de la sélection de 25 solutions testées sur l'échantillon de 46 bassins versants classés en fonction des quatre descripteurs – C2MQ, contrôle

<p>1e</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>57.3</td> <td>57.6</td> <td>57.1</td> <td>56.2</td> <td>47.2</td> <td>4.41</td> <td>55.1</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>64.9</td> <td>65.1</td> <td>64.9</td> <td>63.2</td> <td>53.0</td> <td>5.20</td> <td>62.2</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>60.0</td> <td>60.3</td> <td>59.7</td> <td>58.0</td> <td>49.3</td> <td>4.63</td> <td>57.5</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>65.0</td> <td>65.2</td> <td>65.0</td> <td>63.3</td> <td>53.1</td> <td>5.20</td> <td>62.3</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>56.2</td> <td>56.5</td> <td>56.1</td> <td>54.1</td> <td>45.1</td> <td>4.83</td> <td>53.6</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>4.15</td> <td>4.09</td> <td>4.22</td> <td>4.15</td> <td>3.54</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>60.7</td> <td>60.9</td> <td>60.6</td> <td>59.0</td> <td>49.6</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="5">Initial 57.3</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>a) i1 - 1^{er} quart, amélioration max. 7,9</p>		A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	57.3	57.6	57.1	56.2	47.2	4.41	55.1	R7	64.9	65.1	64.9	63.2	53.0	5.20	62.2	R8	60.0	60.3	59.7	58.0	49.3	4.63	57.5	R11	65.0	65.2	65.0	63.3	53.1	5.20	62.3	R14	56.2	56.5	56.1	54.1	45.1	4.83	53.6	σ	4.15	4.09	4.22	4.15	3.54			Moy	60.7	60.9	60.6	59.0	49.6				Initial 57.3							<p>2e</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>56.0</td> <td>56.4</td> <td>56.4</td> <td>54.3</td> <td>45.4</td> <td>4.72</td> <td>53.7</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>66.4</td> <td>66.5</td> <td>66.5</td> <td>63.0</td> <td>55.4</td> <td>4.83</td> <td>63.6</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>67.0</td> <td>67.1</td> <td>67.2</td> <td>64.4</td> <td>52.4</td> <td>6.39</td> <td>63.6</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>66.8</td> <td>67.0</td> <td>66.9</td> <td>63.4</td> <td>55.4</td> <td>4.97</td> <td>63.9</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>65.0</td> <td>65.2</td> <td>65.2</td> <td>62.5</td> <td>50.3</td> <td>6.45</td> <td>61.6</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>4.66</td> <td>4.57</td> <td>4.53</td> <td>4.07</td> <td>4.16</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>64.2</td> <td>64.4</td> <td>64.4</td> <td>61.5</td> <td>51.8</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="5">Initial 55.4</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>b) i1 - 2^{ème} quart, amélioration max. 11,8</p>		A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	56.0	56.4	56.4	54.3	45.4	4.72	53.7	R7	66.4	66.5	66.5	63.0	55.4	4.83	63.6	R8	67.0	67.1	67.2	64.4	52.4	6.39	63.6	R11	66.8	67.0	66.9	63.4	55.4	4.97	63.9	R14	65.0	65.2	65.2	62.5	50.3	6.45	61.6	σ	4.66	4.57	4.53	4.07	4.16			Moy	64.2	64.4	64.4	61.5	51.8				Initial 55.4						
	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	57.3	57.6	57.1	56.2	47.2	4.41	55.1																																																																																																																																										
R7	64.9	65.1	64.9	63.2	53.0	5.20	62.2																																																																																																																																										
R8	60.0	60.3	59.7	58.0	49.3	4.63	57.5																																																																																																																																										
R11	65.0	65.2	65.0	63.3	53.1	5.20	62.3																																																																																																																																										
R14	56.2	56.5	56.1	54.1	45.1	4.83	53.6																																																																																																																																										
σ	4.15	4.09	4.22	4.15	3.54																																																																																																																																												
Moy	60.7	60.9	60.6	59.0	49.6																																																																																																																																												
	Initial 57.3																																																																																																																																																
	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	56.0	56.4	56.4	54.3	45.4	4.72	53.7																																																																																																																																										
R7	66.4	66.5	66.5	63.0	55.4	4.83	63.6																																																																																																																																										
R8	67.0	67.1	67.2	64.4	52.4	6.39	63.6																																																																																																																																										
R11	66.8	67.0	66.9	63.4	55.4	4.97	63.9																																																																																																																																										
R14	65.0	65.2	65.2	62.5	50.3	6.45	61.6																																																																																																																																										
σ	4.66	4.57	4.53	4.07	4.16																																																																																																																																												
Moy	64.2	64.4	64.4	61.5	51.8																																																																																																																																												
	Initial 55.4																																																																																																																																																
<p>3e</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>63.8</td> <td>64.0</td> <td>63.9</td> <td>62.2</td> <td>52.3</td> <td>5.06</td> <td>61.2</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>65.5</td> <td>65.7</td> <td>65.6</td> <td>63.9</td> <td>52.8</td> <td>5.58</td> <td>62.7</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>63.8</td> <td>63.9</td> <td>63.8</td> <td>62.0</td> <td>50.7</td> <td>5.72</td> <td>60.8</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>66.0</td> <td>66.1</td> <td>66.1</td> <td>64.4</td> <td>53.0</td> <td>5.70</td> <td>63.1</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>60.1</td> <td>60.2</td> <td>60.2</td> <td>58.3</td> <td>47.2</td> <td>5.64</td> <td>57.2</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>2.34</td> <td>2.34</td> <td>2.32</td> <td>2.39</td> <td>2.41</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>63.8</td> <td>64.0</td> <td>63.9</td> <td>62.2</td> <td>51.2</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="5">Initial 63.9</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>c) i1 - 3^{ème} quart, amélioration max. 2,2</p>		A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	63.8	64.0	63.9	62.2	52.3	5.06	61.2	R7	65.5	65.7	65.6	63.9	52.8	5.58	62.7	R8	63.8	63.9	63.8	62.0	50.7	5.72	60.8	R11	66.0	66.1	66.1	64.4	53.0	5.70	63.1	R14	60.1	60.2	60.2	58.3	47.2	5.64	57.2	σ	2.34	2.34	2.32	2.39	2.41			Moy	63.8	64.0	63.9	62.2	51.2				Initial 63.9							<p>4e</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>43.6</td> <td>43.5</td> <td>43.7</td> <td>42.9</td> <td>25.9</td> <td>7.83</td> <td>39.9</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>56.9</td> <td>56.8</td> <td>57.0</td> <td>55.6</td> <td>35.2</td> <td>9.59</td> <td>52.3</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>57.9</td> <td>57.7</td> <td>57.5</td> <td>56.3</td> <td>34.4</td> <td>10.27</td> <td>52.8</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>57.6</td> <td>57.5</td> <td>57.7</td> <td>56.4</td> <td>35.6</td> <td>9.73</td> <td>53.0</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>53.9</td> <td>53.9</td> <td>54.0</td> <td>52.1</td> <td>31.6</td> <td>9.81</td> <td>49.1</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>6.02</td> <td>5.99</td> <td>5.95</td> <td>5.72</td> <td>4.01</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>54.0</td> <td>53.9</td> <td>54.0</td> <td>52.7</td> <td>32.6</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="5">Initial 43.0</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>d) i1 - 4^{ème} quart, amélioration max. 14,9</p>		A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	43.6	43.5	43.7	42.9	25.9	7.83	39.9	R7	56.9	56.8	57.0	55.6	35.2	9.59	52.3	R8	57.9	57.7	57.5	56.3	34.4	10.27	52.8	R11	57.6	57.5	57.7	56.4	35.6	9.73	53.0	R14	53.9	53.9	54.0	52.1	31.6	9.81	49.1	σ	6.02	5.99	5.95	5.72	4.01			Moy	54.0	53.9	54.0	52.7	32.6				Initial 43.0						
	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	63.8	64.0	63.9	62.2	52.3	5.06	61.2																																																																																																																																										
R7	65.5	65.7	65.6	63.9	52.8	5.58	62.7																																																																																																																																										
R8	63.8	63.9	63.8	62.0	50.7	5.72	60.8																																																																																																																																										
R11	66.0	66.1	66.1	64.4	53.0	5.70	63.1																																																																																																																																										
R14	60.1	60.2	60.2	58.3	47.2	5.64	57.2																																																																																																																																										
σ	2.34	2.34	2.32	2.39	2.41																																																																																																																																												
Moy	63.8	64.0	63.9	62.2	51.2																																																																																																																																												
	Initial 63.9																																																																																																																																																
	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	43.6	43.5	43.7	42.9	25.9	7.83	39.9																																																																																																																																										
R7	56.9	56.8	57.0	55.6	35.2	9.59	52.3																																																																																																																																										
R8	57.9	57.7	57.5	56.3	34.4	10.27	52.8																																																																																																																																										
R11	57.6	57.5	57.7	56.4	35.6	9.73	53.0																																																																																																																																										
R14	53.9	53.9	54.0	52.1	31.6	9.81	49.1																																																																																																																																										
σ	6.02	5.99	5.95	5.72	4.01																																																																																																																																												
Moy	54.0	53.9	54.0	52.7	32.6																																																																																																																																												
	Initial 43.0																																																																																																																																																
<p>1e</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>67.6</td> <td>67.6</td> <td>67.5</td> <td>67.3</td> <td>65.2</td> <td>1.05</td> <td>67.0</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>69.6</td> <td>69.7</td> <td>69.6</td> <td>69.5</td> <td>67.4</td> <td>1.00</td> <td>69.1</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>68.9</td> <td>68.9</td> <td>68.8</td> <td>68.7</td> <td>66.8</td> <td>0.92</td> <td>68.4</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>69.6</td> <td>69.7</td> <td>69.6</td> <td>69.5</td> <td>67.4</td> <td>1.01</td> <td>69.1</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>67.6</td> <td>67.6</td> <td>67.7</td> <td>67.4</td> <td>65.2</td> <td>1.07</td> <td>67.1</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>1.03</td> <td>1.02</td> <td>1.02</td> <td>1.06</td> <td>1.11</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>68.6</td> <td>68.7</td> <td>68.7</td> <td>68.5</td> <td>66.4</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="5">Initial 67.4</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>e) i2 - 1^{er} quart, amélioration max. 2,3</p>		A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	67.6	67.6	67.5	67.3	65.2	1.05	67.0	R7	69.6	69.7	69.6	69.5	67.4	1.00	69.1	R8	68.9	68.9	68.8	68.7	66.8	0.92	68.4	R11	69.6	69.7	69.6	69.5	67.4	1.01	69.1	R14	67.6	67.6	67.7	67.4	65.2	1.07	67.1	σ	1.03	1.02	1.02	1.06	1.11			Moy	68.6	68.7	68.7	68.5	66.4				Initial 67.4							<p>2e</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>60.7</td> <td>61.0</td> <td>61.0</td> <td>60.4</td> <td>55.5</td> <td>2.35</td> <td>59.7</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>66.5</td> <td>66.7</td> <td>66.8</td> <td>65.9</td> <td>61.0</td> <td>2.49</td> <td>65.4</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>66.6</td> <td>66.8</td> <td>66.8</td> <td>65.9</td> <td>60.6</td> <td>2.68</td> <td>65.3</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>67.0</td> <td>67.2</td> <td>67.3</td> <td>66.4</td> <td>61.1</td> <td>2.66</td> <td>65.8</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>65.5</td> <td>65.6</td> <td>65.6</td> <td>64.6</td> <td>58.0</td> <td>3.28</td> <td>63.9</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>2.62</td> <td>2.57</td> <td>2.59</td> <td>2.46</td> <td>2.41</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>65.3</td> <td>65.4</td> <td>65.5</td> <td>64.6</td> <td>59.2</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="5">Initial 60.4</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>f) i2 - 2^{ème} quart, amélioration max. 6,9</p>		A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	60.7	61.0	61.0	60.4	55.5	2.35	59.7	R7	66.5	66.7	66.8	65.9	61.0	2.49	65.4	R8	66.6	66.8	66.8	65.9	60.6	2.68	65.3	R11	67.0	67.2	67.3	66.4	61.1	2.66	65.8	R14	65.5	65.6	65.6	64.6	58.0	3.28	63.9	σ	2.62	2.57	2.59	2.46	2.41			Moy	65.3	65.4	65.5	64.6	59.2				Initial 60.4						
	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	67.6	67.6	67.5	67.3	65.2	1.05	67.0																																																																																																																																										
R7	69.6	69.7	69.6	69.5	67.4	1.00	69.1																																																																																																																																										
R8	68.9	68.9	68.8	68.7	66.8	0.92	68.4																																																																																																																																										
R11	69.6	69.7	69.6	69.5	67.4	1.01	69.1																																																																																																																																										
R14	67.6	67.6	67.7	67.4	65.2	1.07	67.1																																																																																																																																										
σ	1.03	1.02	1.02	1.06	1.11																																																																																																																																												
Moy	68.6	68.7	68.7	68.5	66.4																																																																																																																																												
	Initial 67.4																																																																																																																																																
	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	60.7	61.0	61.0	60.4	55.5	2.35	59.7																																																																																																																																										
R7	66.5	66.7	66.8	65.9	61.0	2.49	65.4																																																																																																																																										
R8	66.6	66.8	66.8	65.9	60.6	2.68	65.3																																																																																																																																										
R11	67.0	67.2	67.3	66.4	61.1	2.66	65.8																																																																																																																																										
R14	65.5	65.6	65.6	64.6	58.0	3.28	63.9																																																																																																																																										
σ	2.62	2.57	2.59	2.46	2.41																																																																																																																																												
Moy	65.3	65.4	65.5	64.6	59.2																																																																																																																																												
	Initial 60.4																																																																																																																																																
<p>3e</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>47.3</td> <td>47.6</td> <td>47.9</td> <td>47.7</td> <td>42.0</td> <td>2.51</td> <td>46.5</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>63.9</td> <td>64.2</td> <td>64.4</td> <td>63.8</td> <td>56.1</td> <td>3.56</td> <td>62.5</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>64.2</td> <td>64.4</td> <td>64.5</td> <td>64.0</td> <td>55.0</td> <td>4.14</td> <td>62.4</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>64.9</td> <td>65.2</td> <td>65.3</td> <td>64.8</td> <td>56.8</td> <td>3.67</td> <td>63.4</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>61.6</td> <td>61.9</td> <td>61.9</td> <td>61.4</td> <td>51.7</td> <td>4.46</td> <td>59.7</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>7.42</td> <td>7.39</td> <td>7.33</td> <td>7.17</td> <td>6.09</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>60.4</td> <td>60.6</td> <td>60.8</td> <td>60.3</td> <td>52.4</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="5">Initial 47.0</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>g) i2 - 3^{ème} quart, amélioration max. 18,3</p>		A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	47.3	47.6	47.9	47.7	42.0	2.51	46.5	R7	63.9	64.2	64.4	63.8	56.1	3.56	62.5	R8	64.2	64.4	64.5	64.0	55.0	4.14	62.4	R11	64.9	65.2	65.3	64.8	56.8	3.67	63.4	R14	61.6	61.9	61.9	61.4	51.7	4.46	59.7	σ	7.42	7.39	7.33	7.17	6.09			Moy	60.4	60.6	60.8	60.3	52.4				Initial 47.0							<p>4e</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>44.9</td> <td>45.0</td> <td>44.6</td> <td>40.7</td> <td>10.9</td> <td>14.83</td> <td>37.2</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>54.2</td> <td>54.1</td> <td>53.9</td> <td>48.0</td> <td>15.5</td> <td>16.77</td> <td>45.1</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>50.4</td> <td>50.3</td> <td>49.6</td> <td>44.3</td> <td>9.1</td> <td>17.85</td> <td>40.7</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>54.5</td> <td>54.4</td> <td>54.2</td> <td>48.3</td> <td>15.6</td> <td>16.87</td> <td>45.4</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>42.6</td> <td>42.7</td> <td>42.4</td> <td>36.5</td> <td>4.2</td> <td>16.66</td> <td>33.7</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>5.40</td> <td>5.29</td> <td>5.33</td> <td>5.04</td> <td>4.76</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>49.3</td> <td>49.3</td> <td>48.9</td> <td>43.6</td> <td>11.1</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="5">Initial 44.6</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>h) i2 - 4^{ème} quart, amélioration max. 9,9</p>		A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	44.9	45.0	44.6	40.7	10.9	14.83	37.2	R7	54.2	54.1	53.9	48.0	15.5	16.77	45.1	R8	50.4	50.3	49.6	44.3	9.1	17.85	40.7	R11	54.5	54.4	54.2	48.3	15.6	16.87	45.4	R14	42.6	42.7	42.4	36.5	4.2	16.66	33.7	σ	5.40	5.29	5.33	5.04	4.76			Moy	49.3	49.3	48.9	43.6	11.1				Initial 44.6						
	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	47.3	47.6	47.9	47.7	42.0	2.51	46.5																																																																																																																																										
R7	63.9	64.2	64.4	63.8	56.1	3.56	62.5																																																																																																																																										
R8	64.2	64.4	64.5	64.0	55.0	4.14	62.4																																																																																																																																										
R11	64.9	65.2	65.3	64.8	56.8	3.67	63.4																																																																																																																																										
R14	61.6	61.9	61.9	61.4	51.7	4.46	59.7																																																																																																																																										
σ	7.42	7.39	7.33	7.17	6.09																																																																																																																																												
Moy	60.4	60.6	60.8	60.3	52.4																																																																																																																																												
	Initial 47.0																																																																																																																																																
	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	44.9	45.0	44.6	40.7	10.9	14.83	37.2																																																																																																																																										
R7	54.2	54.1	53.9	48.0	15.5	16.77	45.1																																																																																																																																										
R8	50.4	50.3	49.6	44.3	9.1	17.85	40.7																																																																																																																																										
R11	54.5	54.4	54.2	48.3	15.6	16.87	45.4																																																																																																																																										
R14	42.6	42.7	42.4	36.5	4.2	16.66	33.7																																																																																																																																										
σ	5.40	5.29	5.33	5.04	4.76																																																																																																																																												
Moy	49.3	49.3	48.9	43.6	11.1																																																																																																																																												
	Initial 44.6																																																																																																																																																

<table border="1"> <thead> <tr> <th>1e</th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>59.4</td> <td>59.5</td> <td>59.2</td> <td>57.6</td> <td>50.1</td> <td>4.02</td> <td>57.1</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>62.7</td> <td>62.8</td> <td>62.6</td> <td>61.1</td> <td>52.3</td> <td>4.54</td> <td>60.3</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>58.4</td> <td>58.5</td> <td>58.2</td> <td>56.5</td> <td>49.8</td> <td>3.70</td> <td>56.3</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>62.7</td> <td>62.8</td> <td>62.7</td> <td>61.1</td> <td>52.2</td> <td>4.56</td> <td>60.3</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>56.6</td> <td>56.7</td> <td>56.6</td> <td>54.7</td> <td>48.2</td> <td>3.67</td> <td>54.5</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>2.71</td> <td>2.68</td> <td>2.72</td> <td>2.85</td> <td>1.75</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>60.0</td> <td>60.0</td> <td>59.9</td> <td>58.2</td> <td>50.5</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="5">Initial 58.9</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>i) i3 – 1^{er} quart, amélioration max. 3,9</p>	1e	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	59.4	59.5	59.2	57.6	50.1	4.02	57.1	R7	62.7	62.8	62.6	61.1	52.3	4.54	60.3	R8	58.4	58.5	58.2	56.5	49.8	3.70	56.3	R11	62.7	62.8	62.7	61.1	52.2	4.56	60.3	R14	56.6	56.7	56.6	54.7	48.2	3.67	54.5	σ	2.71	2.68	2.72	2.85	1.75			Moy	60.0	60.0	59.9	58.2	50.5				Initial 58.9							<table border="1"> <thead> <tr> <th>2e</th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>57.7</td> <td>58.0</td> <td>57.8</td> <td>57.3</td> <td>51.1</td> <td>2.97</td> <td>56.4</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>65.0</td> <td>65.2</td> <td>65.1</td> <td>63.7</td> <td>57.1</td> <td>3.46</td> <td>63.2</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>62.8</td> <td>63.1</td> <td>62.7</td> <td>61.5</td> <td>55.1</td> <td>3.36</td> <td>61.0</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>65.1</td> <td>65.4</td> <td>65.2</td> <td>63.9</td> <td>57.2</td> <td>3.48</td> <td>63.4</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>59.6</td> <td>59.8</td> <td>59.6</td> <td>58.1</td> <td>50.6</td> <td>3.94</td> <td>57.5</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>3.29</td> <td>3.27</td> <td>3.29</td> <td>3.07</td> <td>3.21</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>62.0</td> <td>62.3</td> <td>62.1</td> <td>60.9</td> <td>54.2</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="5">Initial 57.8</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>j) i3 – 2^{ème} quart, amélioration max. 7,6</p>	2e	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	57.7	58.0	57.8	57.3	51.1	2.97	56.4	R7	65.0	65.2	65.1	63.7	57.1	3.46	63.2	R8	62.8	63.1	62.7	61.5	55.1	3.36	61.0	R11	65.1	65.4	65.2	63.9	57.2	3.48	63.4	R14	59.6	59.8	59.6	58.1	50.6	3.94	57.5	σ	3.29	3.27	3.29	3.07	3.21			Moy	62.0	62.3	62.1	60.9	54.2				Initial 57.8						
1e	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	59.4	59.5	59.2	57.6	50.1	4.02	57.1																																																																																																																																										
R7	62.7	62.8	62.6	61.1	52.3	4.54	60.3																																																																																																																																										
R8	58.4	58.5	58.2	56.5	49.8	3.70	56.3																																																																																																																																										
R11	62.7	62.8	62.7	61.1	52.2	4.56	60.3																																																																																																																																										
R14	56.6	56.7	56.6	54.7	48.2	3.67	54.5																																																																																																																																										
σ	2.71	2.68	2.72	2.85	1.75																																																																																																																																												
Moy	60.0	60.0	59.9	58.2	50.5																																																																																																																																												
	Initial 58.9																																																																																																																																																
2e	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	57.7	58.0	57.8	57.3	51.1	2.97	56.4																																																																																																																																										
R7	65.0	65.2	65.1	63.7	57.1	3.46	63.2																																																																																																																																										
R8	62.8	63.1	62.7	61.5	55.1	3.36	61.0																																																																																																																																										
R11	65.1	65.4	65.2	63.9	57.2	3.48	63.4																																																																																																																																										
R14	59.6	59.8	59.6	58.1	50.6	3.94	57.5																																																																																																																																										
σ	3.29	3.27	3.29	3.07	3.21																																																																																																																																												
Moy	62.0	62.3	62.1	60.9	54.2																																																																																																																																												
	Initial 57.8																																																																																																																																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>3e</th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>58.4</td> <td>58.6</td> <td>58.8</td> <td>57.2</td> <td>45.6</td> <td>5.68</td> <td>55.7</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>65.0</td> <td>65.1</td> <td>65.2</td> <td>61.8</td> <td>51.9</td> <td>5.72</td> <td>61.8</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>66.5</td> <td>66.7</td> <td>66.9</td> <td>63.8</td> <td>49.4</td> <td>7.52</td> <td>62.7</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>65.4</td> <td>65.5</td> <td>65.7</td> <td>62.2</td> <td>52.1</td> <td>5.83</td> <td>62.2</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>62.8</td> <td>63.0</td> <td>63.1</td> <td>60.2</td> <td>46.3</td> <td>7.26</td> <td>59.1</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>3.23</td> <td>3.18</td> <td>3.17</td> <td>2.52</td> <td>3.04</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>63.6</td> <td>63.8</td> <td>64.0</td> <td>61.0</td> <td>49.0</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="5">Initial 58.8</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>k) i3 – 3^{ème} quart, amélioration max. 8,1</p>	3e	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	58.4	58.6	58.8	57.2	45.6	5.68	55.7	R7	65.0	65.1	65.2	61.8	51.9	5.72	61.8	R8	66.5	66.7	66.9	63.8	49.4	7.52	62.7	R11	65.4	65.5	65.7	62.2	52.1	5.83	62.2	R14	62.8	63.0	63.1	60.2	46.3	7.26	59.1	σ	3.23	3.18	3.17	2.52	3.04			Moy	63.6	63.8	64.0	61.0	49.0				Initial 58.8							<table border="1"> <thead> <tr> <th>4e</th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>45.0</td> <td>45.1</td> <td>45.1</td> <td>43.5</td> <td>24.4</td> <td>9.10</td> <td>40.6</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>60.4</td> <td>60.4</td> <td>60.5</td> <td>58.6</td> <td>35.1</td> <td>11.16</td> <td>55.0</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>60.5</td> <td>60.3</td> <td>59.9</td> <td>58.4</td> <td>32.8</td> <td>12.10</td> <td>54.4</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>61.5</td> <td>61.5</td> <td>61.5</td> <td>59.7</td> <td>35.7</td> <td>11.38</td> <td>56.0</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>55.8</td> <td>55.9</td> <td>55.9</td> <td>53.8</td> <td>29.6</td> <td>11.55</td> <td>50.2</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>6.88</td> <td>6.82</td> <td>6.78</td> <td>6.69</td> <td>4.65</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>56.6</td> <td>56.6</td> <td>56.6</td> <td>54.8</td> <td>31.5</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="5">Initial 44.0</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>l) i3 – 4^{ème} quart, amélioration max. 17,5</p>	4e	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	45.0	45.1	45.1	43.5	24.4	9.10	40.6	R7	60.4	60.4	60.5	58.6	35.1	11.16	55.0	R8	60.5	60.3	59.9	58.4	32.8	12.10	54.4	R11	61.5	61.5	61.5	59.7	35.7	11.38	56.0	R14	55.8	55.9	55.9	53.8	29.6	11.55	50.2	σ	6.88	6.82	6.78	6.69	4.65			Moy	56.6	56.6	56.6	54.8	31.5				Initial 44.0						
3e	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	58.4	58.6	58.8	57.2	45.6	5.68	55.7																																																																																																																																										
R7	65.0	65.1	65.2	61.8	51.9	5.72	61.8																																																																																																																																										
R8	66.5	66.7	66.9	63.8	49.4	7.52	62.7																																																																																																																																										
R11	65.4	65.5	65.7	62.2	52.1	5.83	62.2																																																																																																																																										
R14	62.8	63.0	63.1	60.2	46.3	7.26	59.1																																																																																																																																										
σ	3.23	3.18	3.17	2.52	3.04																																																																																																																																												
Moy	63.6	63.8	64.0	61.0	49.0																																																																																																																																												
	Initial 58.8																																																																																																																																																
4e	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	45.0	45.1	45.1	43.5	24.4	9.10	40.6																																																																																																																																										
R7	60.4	60.4	60.5	58.6	35.1	11.16	55.0																																																																																																																																										
R8	60.5	60.3	59.9	58.4	32.8	12.10	54.4																																																																																																																																										
R11	61.5	61.5	61.5	59.7	35.7	11.38	56.0																																																																																																																																										
R14	55.8	55.9	55.9	53.8	29.6	11.55	50.2																																																																																																																																										
σ	6.88	6.82	6.78	6.69	4.65																																																																																																																																												
Moy	56.6	56.6	56.6	54.8	31.5																																																																																																																																												
	Initial 44.0																																																																																																																																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>1e</th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>52.5</td> <td>52.3</td> <td>52.5</td> <td>51.2</td> <td>36.5</td> <td>7.02</td> <td>49.0</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>61.2</td> <td>61.0</td> <td>61.1</td> <td>58.7</td> <td>39.5</td> <td>9.45</td> <td>56.3</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>59.5</td> <td>59.2</td> <td>58.9</td> <td>56.8</td> <td>36.6</td> <td>9.90</td> <td>54.2</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>61.4</td> <td>61.2</td> <td>61.3</td> <td>58.9</td> <td>39.6</td> <td>9.50</td> <td>56.5</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>54.7</td> <td>54.7</td> <td>54.6</td> <td>51.7</td> <td>34.0</td> <td>8.99</td> <td>50.0</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>4.02</td> <td>4.00</td> <td>3.96</td> <td>3.74</td> <td>2.34</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>57.9</td> <td>57.7</td> <td>57.7</td> <td>55.4</td> <td>37.2</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="5">Initial 51.7</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>m) i4 – 1^{er} quart, amélioration max. 9,7</p>	1e	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	52.5	52.3	52.5	51.2	36.5	7.02	49.0	R7	61.2	61.0	61.1	58.7	39.5	9.45	56.3	R8	59.5	59.2	58.9	56.8	36.6	9.90	54.2	R11	61.4	61.2	61.3	58.9	39.6	9.50	56.5	R14	54.7	54.7	54.6	51.7	34.0	8.99	50.0	σ	4.02	4.00	3.96	3.74	2.34			Moy	57.9	57.7	57.7	55.4	37.2				Initial 51.7							<table border="1"> <thead> <tr> <th>2e</th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>63.0</td> <td>63.1</td> <td>63.0</td> <td>61.7</td> <td>52.2</td> <td>4.74</td> <td>60.6</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>70.8</td> <td>70.9</td> <td>70.7</td> <td>68.0</td> <td>60.6</td> <td>4.40</td> <td>68.2</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>71.8</td> <td>71.9</td> <td>71.8</td> <td>69.8</td> <td>58.8</td> <td>5.68</td> <td>68.8</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>71.1</td> <td>71.2</td> <td>71.0</td> <td>68.3</td> <td>60.7</td> <td>4.53</td> <td>68.5</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>69.5</td> <td>69.6</td> <td>69.6</td> <td>67.5</td> <td>56.5</td> <td>5.69</td> <td>66.5</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>3.60</td> <td>3.58</td> <td>3.57</td> <td>3.11</td> <td>3.57</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>69.2</td> <td>69.4</td> <td>69.2</td> <td>67.0</td> <td>57.7</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="5">Initial 62.7</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>n) i4 – 2^{ème} quart, amélioration max. -9,2</p>	2e	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	63.0	63.1	63.0	61.7	52.2	4.74	60.6	R7	70.8	70.9	70.7	68.0	60.6	4.40	68.2	R8	71.8	71.9	71.8	69.8	58.8	5.68	68.8	R11	71.1	71.2	71.0	68.3	60.7	4.53	68.5	R14	69.5	69.6	69.6	67.5	56.5	5.69	66.5	σ	3.60	3.58	3.57	3.11	3.57			Moy	69.2	69.4	69.2	67.0	57.7				Initial 62.7						
1e	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	52.5	52.3	52.5	51.2	36.5	7.02	49.0																																																																																																																																										
R7	61.2	61.0	61.1	58.7	39.5	9.45	56.3																																																																																																																																										
R8	59.5	59.2	58.9	56.8	36.6	9.90	54.2																																																																																																																																										
R11	61.4	61.2	61.3	58.9	39.6	9.50	56.5																																																																																																																																										
R14	54.7	54.7	54.6	51.7	34.0	8.99	50.0																																																																																																																																										
σ	4.02	4.00	3.96	3.74	2.34																																																																																																																																												
Moy	57.9	57.7	57.7	55.4	37.2																																																																																																																																												
	Initial 51.7																																																																																																																																																
2e	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	63.0	63.1	63.0	61.7	52.2	4.74	60.6																																																																																																																																										
R7	70.8	70.9	70.7	68.0	60.6	4.40	68.2																																																																																																																																										
R8	71.8	71.9	71.8	69.8	58.8	5.68	68.8																																																																																																																																										
R11	71.1	71.2	71.0	68.3	60.7	4.53	68.5																																																																																																																																										
R14	69.5	69.6	69.6	67.5	56.5	5.69	66.5																																																																																																																																										
σ	3.60	3.58	3.57	3.11	3.57																																																																																																																																												
Moy	69.2	69.4	69.2	67.0	57.7																																																																																																																																												
	Initial 62.7																																																																																																																																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>3e</th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>51.2</td> <td>51.4</td> <td>51.2</td> <td>49.9</td> <td>37.4</td> <td>6.10</td> <td>48.2</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>60.4</td> <td>60.5</td> <td>60.7</td> <td>59.2</td> <td>44.9</td> <td>6.86</td> <td>57.2</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>57.1</td> <td>57.2</td> <td>57.0</td> <td>55.1</td> <td>41.8</td> <td>6.65</td> <td>53.6</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>60.7</td> <td>60.8</td> <td>61.0</td> <td>59.5</td> <td>45.1</td> <td>6.90</td> <td>57.4</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>53.2</td> <td>53.4</td> <td>53.3</td> <td>51.2</td> <td>38.2</td> <td>6.58</td> <td>49.8</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>4.26</td> <td>4.18</td> <td>4.37</td> <td>4.43</td> <td>3.65</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>56.5</td> <td>56.7</td> <td>56.6</td> <td>55.0</td> <td>41.5</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="5">Initial 50.6</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>o) i4 – 3^{ème} quart, amélioration max. 10,4</p>	3e	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	51.2	51.4	51.2	49.9	37.4	6.10	48.2	R7	60.4	60.5	60.7	59.2	44.9	6.86	57.2	R8	57.1	57.2	57.0	55.1	41.8	6.65	53.6	R11	60.7	60.8	61.0	59.5	45.1	6.90	57.4	R14	53.2	53.4	53.3	51.2	38.2	6.58	49.8	σ	4.26	4.18	4.37	4.43	3.65			Moy	56.5	56.7	56.6	55.0	41.5				Initial 50.6							<table border="1"> <thead> <tr> <th>4e</th> <th>A1</th> <th>A3</th> <th>A8</th> <th>A11</th> <th>A14</th> <th>σ</th> <th>Moy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R3</td> <td>52.4</td> <td>52.9</td> <td>52.8</td> <td>51.4</td> <td>42.0</td> <td>4.69</td> <td>50.3</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>60.7</td> <td>61.0</td> <td>60.9</td> <td>59.2</td> <td>48.8</td> <td>5.24</td> <td>58.1</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>59.9</td> <td>60.2</td> <td>60.0</td> <td>58.6</td> <td>47.3</td> <td>5.58</td> <td>57.2</td> </tr> <tr> <td>R11</td> <td>61.6</td> <td>61.9</td> <td>61.7</td> <td>60.1</td> <td>49.3</td> <td>5.40</td> <td>58.9</td> </tr> <tr> <td>R14</td> <td>57.2</td> <td>57.5</td> <td>57.4</td> <td>55.9</td> <td>43.4</td> <td>6.11</td> <td>54.3</td> </tr> <tr> <td>σ</td> <td>3.69</td> <td>3.60</td> <td>3.58</td> <td>3.53</td> <td>3.29</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Moy</td> <td>58.3</td> <td>58.7</td> <td>58.6</td> <td>57.1</td> <td>46.2</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="5">Initial 52.9</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>p) i4 – 4^{ème} quart, amélioration max. 9,0</p>	4e	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy	R3	52.4	52.9	52.8	51.4	42.0	4.69	50.3	R7	60.7	61.0	60.9	59.2	48.8	5.24	58.1	R8	59.9	60.2	60.0	58.6	47.3	5.58	57.2	R11	61.6	61.9	61.7	60.1	49.3	5.40	58.9	R14	57.2	57.5	57.4	55.9	43.4	6.11	54.3	σ	3.69	3.60	3.58	3.53	3.29			Moy	58.3	58.7	58.6	57.1	46.2				Initial 52.9						
3e	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	51.2	51.4	51.2	49.9	37.4	6.10	48.2																																																																																																																																										
R7	60.4	60.5	60.7	59.2	44.9	6.86	57.2																																																																																																																																										
R8	57.1	57.2	57.0	55.1	41.8	6.65	53.6																																																																																																																																										
R11	60.7	60.8	61.0	59.5	45.1	6.90	57.4																																																																																																																																										
R14	53.2	53.4	53.3	51.2	38.2	6.58	49.8																																																																																																																																										
σ	4.26	4.18	4.37	4.43	3.65																																																																																																																																												
Moy	56.5	56.7	56.6	55.0	41.5																																																																																																																																												
	Initial 50.6																																																																																																																																																
4e	A1	A3	A8	A11	A14	σ	Moy																																																																																																																																										
R3	52.4	52.9	52.8	51.4	42.0	4.69	50.3																																																																																																																																										
R7	60.7	61.0	60.9	59.2	48.8	5.24	58.1																																																																																																																																										
R8	59.9	60.2	60.0	58.6	47.3	5.58	57.2																																																																																																																																										
R11	61.6	61.9	61.7	60.1	49.3	5.40	58.9																																																																																																																																										
R14	57.2	57.5	57.4	55.9	43.4	6.11	54.3																																																																																																																																										
σ	3.69	3.60	3.58	3.53	3.29																																																																																																																																												
Moy	58.3	58.7	58.6	57.1	46.2																																																																																																																																												
	Initial 52.9																																																																																																																																																

Tableau A4.2 : Performances moyennes de la sélection de 25 solutions testées sur l'échantillon de 46 bassins versants classés en fonction des quatre descripteurs – C2MLQ, contrôle

Accent mis sur les débits élevés (C2MQ)

Les résultats indiquent que, pour les indices i1, i2 et i3, les débits des bassins versants les moins influencés (premier et deuxième quarts), sont mieux simulés par l'ensemble des solutions testées ainsi que par le modèle ne prenant pas en compte les barrages-réservoirs. Les bassins versants ayant les indices i4 les plus faibles (chroniques de remplissage peu variables dans le temps, premier quart) donnent les performances les plus faibles des quatre groupes et les bassins versants du deuxième quart les meilleures performances.

En général, les plus fortes améliorations sont obtenues pour les bassins versants ayant les indices les plus élevés (troisième et quatrième quart). On note cependant, que les améliorations de performances obtenues pour les bassins versants ayant des indices i3 et i4 faibles (premier quart) peuvent être importantes.

Lorsque l'accent est mis sur les débits élevés, la prise en compte des barrages-réservoirs apporte les améliorations les plus significatives pour les bassins versants ayant des ouvrages proches de l'exutoire ou contrôlant une partie importante du bassin.

Les meilleures solutions restent, pour l'ensemble des indices et des classes de bassins, celles alimentées par le réservoir de production (A3 directement ou suite à des reports principalement A8) et rejetant sur la branche d'écoulement indirect (R7 et R11).

Accent mis sur les débits faibles

Lorsque l'accent est mis sur les débits faibles, il est difficile d'identifier des règles sur l'évolution des performances en fonction du degré d'influence du bassin versant.

Les résultats indiquent que, pour l'indice i2 uniquement, les débits des bassins versants les moins influencés (premier et deuxième quarts), sont mieux simulés par l'ensemble des solutions testées ainsi que par le modèle ne prenant pas en compte les barrages-réservoirs. Pour les autres indices, l'augmentation de l'influence des barrages-réservoirs n'est pas toujours accompagnée par une baisse des performances des solutions de prise en compte des barrages-réservoirs mais également du modèle initial. Pour les indices i1, i2 et i3, on note cependant que les performances les plus faibles sont obtenues pour les bassins versants du quatrième quart (les plus influencés) quel que soit le modèle. Les meilleures performances ne sont pas obtenues systématiquement pour les bassins versants du premier quart (les moins influencés).

Les améliorations apportées par la prise en compte des barrages-réservoirs sont plus importantes que dans le cas où l'accent est mis sur les débits élevés. Pour l'indice i3, plus le bassin versant contrôlé est important plus les améliorations sont élevées. En revanche, pour les autres indices, les améliorations ne sont pas toujours les plus fortes pour les bassins versants les plus influencés. Pour l'indice i1, les améliorations obtenues pour les bassins versants du 3^{ème} quart sont faibles par rapport à celles obtenues pour les autres classes.

Pour l'indice i2, les plus fortes améliorations sont obtenues pour les bassins versants du 3^{ème} quart. Les performances de ce groupe de bassins sont fortement améliorées par rapport à celles des trois autres groupes. Pour l'indice i4, les améliorations sont quasiment identiques pour les quatre classes de bassin versants.

En règle générale, la prise en compte des barrages-réservoirs permet de limiter la baisse de performance due à l'augmentation de l'influence des ouvrages. En effet, la baisse maximale de performances est plus faible entre les bassins versants du 1^{er} et du dernier quart avec les solutions de prise en compte des ouvrages qu'avec le modèle initial.

Lorsque l'accent est mis sur les débits faibles, pour certaines classes d'indices, des solutions ayant un rejet sur la branche d'écoulement direct (R8) donnent des performances meilleures que celles rejetant dans la branche d'écoulement indirect (R7 ou R11). C'est le cas pour les bassins du 2^{ème} et 4^{ème} quart pour l'indice i1 où les solutions A8R8 (pour le 2^{ème} quart) et A1R8 (pour le 4^{ème} quart) sont légèrement meilleures (+0,2 ou +0,3 % de mieux) que celles rejetant dans la branche d'écoulement indirect (R11). La solution A8R8 donne également de meilleurs résultats (+1,2 %) que les solutions rejetant en 11 pour les bassins versants du 3^{ème} quart de l'indice i3. En revanche, pour les bassins du 4^{ème} quart les solutions rejetant en 11 s'avèrent plus performantes (+1 %). On note également que pour l'indice i4, les solutions rejetant en 8 donnent de meilleures performances pour les bassins versants du 2^{ème} quart. Les constatations précédentes ne permettent cependant pas de confirmer et généraliser les observations faites en introduction du chapitre 6 à propos du bassin de la rivière São Francisco à Pirapora.

Les résultats précédents ne permettent pas de dégager de pistes sur un lien fort entre les descripteurs des bassins versants et des barrages-réservoirs et les solutions de prise en compte. Le faible nombre de bassins versants de chaque classe d'indice (une dizaine de bassins) peut être à l'origine de l'hétérogénéité des résultats obtenus et donc des difficultés pour détecter des tendances dans les résultats. Les performances obtenues pour un bassin versant peuvent influencer les performances moyennes calculées pour chaque classe d'indice.

Annexe 5 : Apport de l'introduction d'un hydrogramme unitaire spécifique au routage des rejets du réservoir image

Comme cela a été présenté au chapitre 8 (paragraphe 8.5), l'approche mixte (qui assimile directement les débits restitués par le barrage-réservoir) permet des améliorations significatives par rapport à la solution A3R11 sur la plupart des bassins versants. Elle a montré l'importance d'isoler le sous-bassin à l'amont du barrage-réservoir qui joue un rôle majeur dans la génération des débits à l'exutoire.

Dans la solution mixte, les débits restitués par le barrage-réservoir ont un routage spécifique (utilisation d'un hydrogramme unitaire). Ce résultat est à rapprocher des performances intéressantes obtenues, sur certains bassins versants, par les solutions testées au chapitre 5 pour lesquelles le rejet du réservoir image se faisait sur la branche d'écoulement direct (R8 et R10). Dans ce cas, le rejet est également routé grâce à un hydrogramme unitaire de forme similaire à celui utilisé dans l'approche mixte. Les résultats de la comparaison peuvent suggérer qu'un routage spécifique des rejets du réservoir image pourrait améliorer la simulation des débits de certains bassins versants. Cette annexe présente les résultats des tests réalisés en utilisant un routage spécifique des rejets du réservoir image.

Démarche

Nous évaluons les apports éventuels de l'introduction d'un hydrogramme unitaire spécifique au routage des rejets en introduisant un hydrogramme unitaire (HUb) à la sortie du réservoir image dans la structure du modèle GR4J (Figure A5.1). Son rôle est d'introduire un délai dans le transfert du rejet avant de qu'il ne rejoigne le point d'insertion sélectionné.

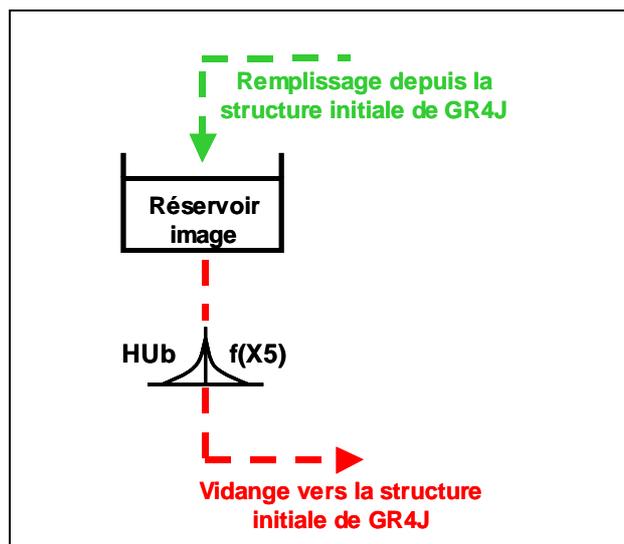


Figure A5.1 : Introduction d'un hydrogramme unitaire (HUb) spécifique au routage des rejets du réservoir image

La formulation de l'hydrogramme unitaire HUb est identique à celle de l'hydrogramme unitaire symétrique de la branche d'écoulement direct du modèle (HU2). Un paramètre supplémentaire ($X5$: temps de base de HUb) a été introduit. Il est optimisé lors du calage du modèle avec les autres paramètres.

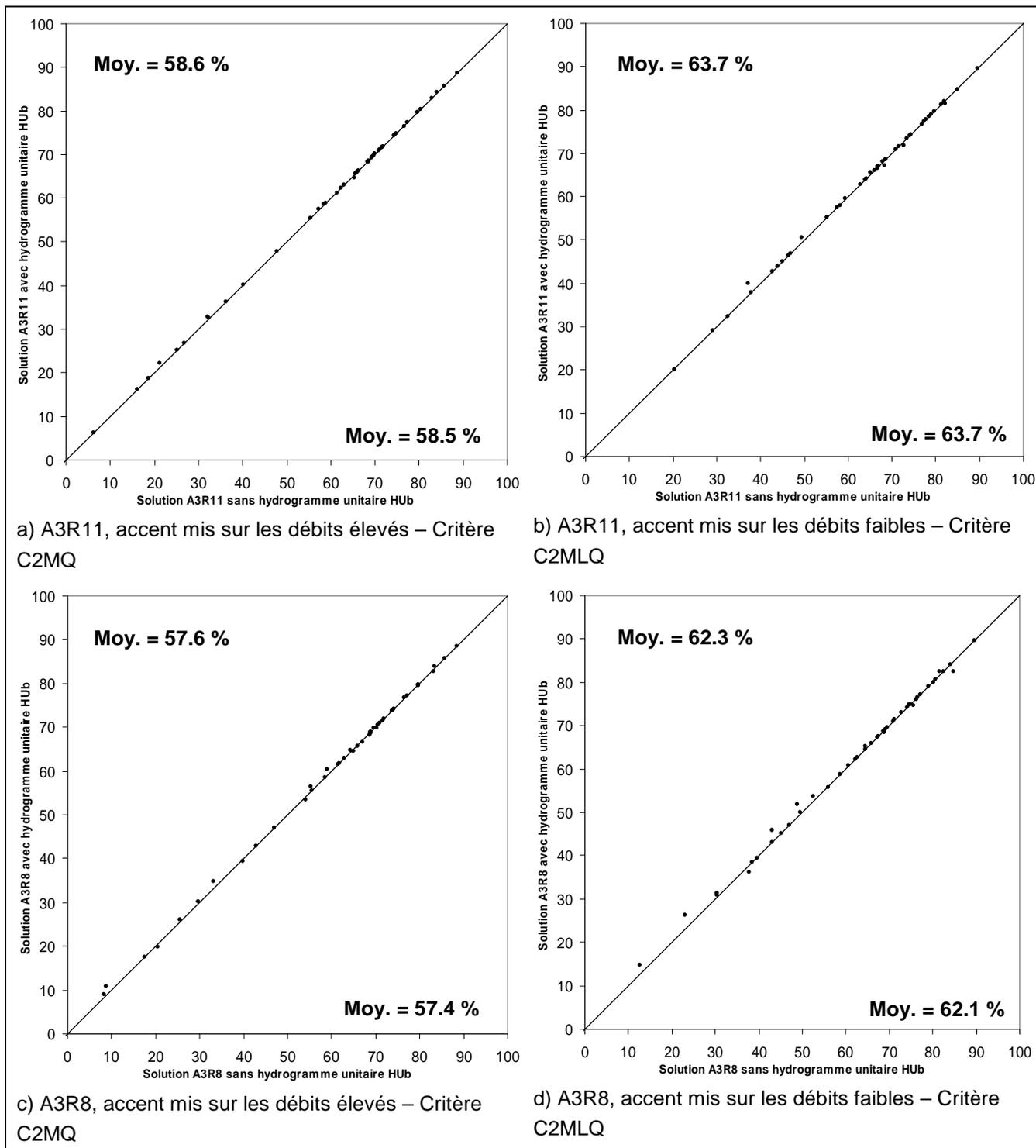
Nous avons testé l'introduction de l'hydrogramme unitaire HUb avec des solutions ayant comme alimentation le réservoir de production du modèle (A3) et des rejets différents :

- Un rejet dans le réservoir de transfert (R11) ;
- Un rejet sur la branche d'écoulement direct avant l'hydrogramme unitaire HU2 (R8) ;
- Un rejet en sortie du modèle (R14).

Ces trois solutions permettent d'avoir des rejets du réservoir image faisant intervenir différents composants de la partie de transfert du modèle. On pourra ainsi évaluer l'intérêt de combiner le délai introduit par HUb soit avec le lissage du réservoir de production, soit avec le délai de l'hydrogramme unitaire HU2. Dans la dernière solution, le rejet est uniquement retardé par HUb avant d'atteindre la sortie du modèle. Ce dernier cas s'apparente à l'approche mixte du point de vue du routage du rejet puisqu'il fait intervenir le même type de composant.

Résultats

Nous comparons les performances des trois solutions précédentes appliquées avec et sans l'hydrogramme unitaire HUb (Figure A5.2). Les résultats sont obtenus sur l'échantillon de référence de 46 bassins versants. Les performances moyennes (Moy.) de chaque solution avec ou sans l'hydrogramme unitaire HUb sont données sur les graphiques de la Figure A5.2.



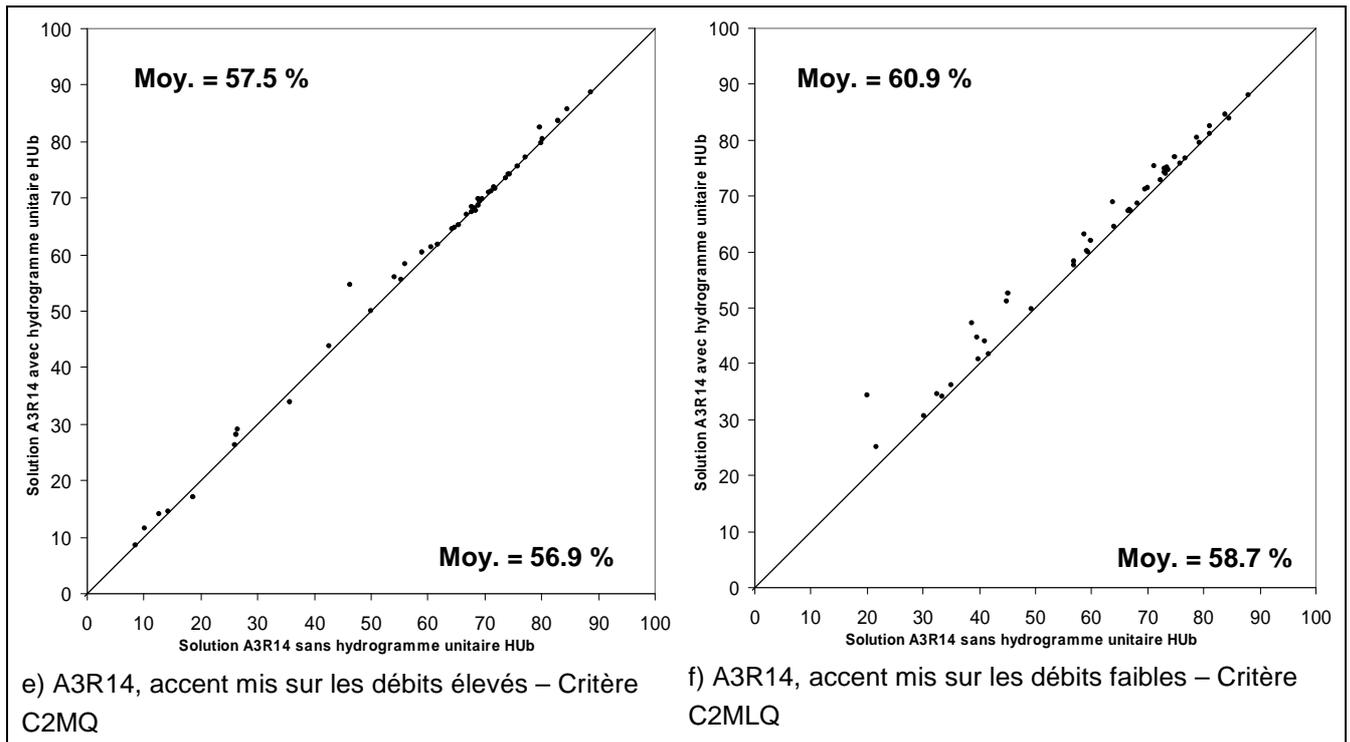


Figure A5.2 : Comparaison des performances des solutions A3R11 (a,b), A3R8 (c,d) et A3R14 (e,f) appliquées avec et sans hydrogramme unitaire spécifique aux rejets HUB sur l'échantillon de 46 bassins versants de référence – Critères C2MQ et C2MLQ calculés en contrôle

Les résultats des solutions A3R11 et A3R8 sont semblables. L'introduction de l'hydrogramme unitaire HUB apporte de très légères améliorations des performances uniquement sur un nombre réduit de bassins versants quel que soit le critère considéré. Les améliorations sont en revanche plus significatives pour la solution A3R14, notamment lorsque l'accent est mis sur les débits faibles (Figure A5.2). L'amélioration moyenne est de 1,8 %.

Les observations précédentes indiquent que la combinaison d'un hydrogramme unitaire en sortie du réservoir image avec d'autres composants de délai (hydrogramme unitaire de la branche d'écoulement direct ou réservoir de transfert) n'apporte pas d'amélioration significative des performances. Les composants introduisant un délai présents dans le modèle suffisent à assurer un routage convenable des rejets. Les améliorations apportées par l'introduction de l'hydrogramme unitaire HUB pour la solution A3R14 confirment l'importance de faire intervenir un délai dans le transfert des rejets du réservoir image. Cependant, contrairement à l'approche mixte, un délai spécifique au rejet s'avère moins intéressant que le lissage introduit par la réservoir de transfert. En effet, les performances moyennes de la solution A3R11 sans hydrogramme unitaire HUB restent meilleures que celles obtenues par la solution A3R14 avec l'hydrogramme unitaire spécifique, ne justifiant pas l'ajout d'un paramètre supplémentaire.

Les résultats obtenus avec un hydrogramme unitaire en sortie du réservoir image ont montré que l'introduction d'un composant de routage spécifique aux rejets dans la solution A3R11

n'est pas intéressant en termes de performances. Ceci indique que les composants de la structure du modèle initial conviennent à une prise en compte correcte des barrages-réservoirs. Il semble inutile de complexifier la structure du modèle en introduisant de nouvelles fonctions de routage spécifiques aux ouvrages.

Annexe 6 : Article soumis à Water Resources Research

Can we account for man-made reservoirs in a lumped rainfall-runoff model? Model development and application over 46 regulated catchments

Jean-Luc Payan, Charles Perrin*, Claude Michel, Vazken Andréassian
Cemagref, Hydrosystems and Bioprocesses Research Unit, Antony, France

Abstract

Man-made reservoirs can strongly affect catchment hydrological behaviour by modifying its response to precipitation. Generally, the impact will be significant right after the dam and will fade progressively further downstream. The evaluation of diffuse impacts is complex but very useful for water resources management and impact studies and can be done using hydrological models. Modelling the impacts of reservoirs is usually done by a spatially distributed approach, in which the cells that correspond to the reservoir are appropriately parameterised. So far lumped approaches were not used to answer this problem, probably because the lumped mode is seen as a major obstacle to account for water works that are at specific locations within the catchment.

Here we propose a way to explicitly account for artificial storages in a lumped hydrological model. The approach was developed starting from the structure of a simple rainfall-runoff model. It is simple and requires as only new inputs the water volumes stored in the artificial reservoirs, without any new parameter added to the model structure. The model was tested on a large set of 46 catchments influenced by 26 reservoirs. Catchments are from six countries (France, the United States, Australia, Brazil, Mali and Senegal) and represent a wide range of climatic and hydrological conditions and various types of reservoir management objectives.

Results indicate that the new model version is more efficient than the original model to simulate downstream influenced flows, i.e. that it can effectively account for reservoirs in spite of its lumped spatial approach. The improvement of simulations is very significant for low flows, but is more limited for high flows.

Key words: rainfall-runoff modelling; reservoirs, artificialized flows; hydrological impacts; flood; low flows

1. Introduction

1.1. Problems in modelling the hydrological impacts of artificial reservoirs

The evaluation of the impacts of artificial reservoirs at the catchment scale is often a difficult but crucial problem, especially when it comes to the optimisation of water resources, the study of the potential impacts of future dams or the test of planning scenarios.

The downstream impacts of artificial water storage are the most significant on the reaches close to the dam. In this case (see Figure 1), the problem of relating the discharge QB

observed at station B to the dam behaviour in A is quite straightforward and can be solved by only using simple propagation or hydraulic models (see e.g. (Bentura & Michel, 1997).

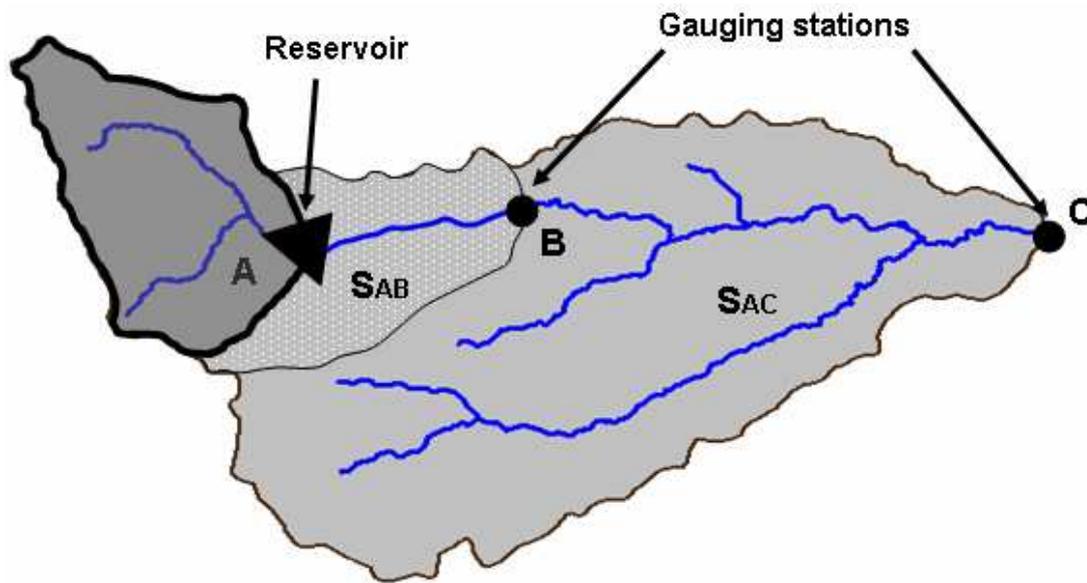


Figure 1: Schematic representation of the cases where influenced streamflow must be simulated downstream an artificial reservoir at a station close to the dam (B) and at a station far downstream (C)

However, when going further downstream to station C, the influence of the intermediary zone S_{AC} (i.e. the zone between points A and C contributing to flow) becomes more important (Morin et al., 1975; Peters & Prowse, 2001) because of a number of mixed hydraulic and hydrological processes such as the point inputs from tributaries, the diffuse inputs from neighbouring hill slopes or the transmission water losses or gains. Therefore the link between A and C becomes weaker and the impact of the artificial reservoir on the remote downstream station is more diffuse. This means that the modifications undergone by the outputs from A will go far beyond the classical modifications observed during pure hydraulic propagation (i.e. time delay and diffusion). Therefore accounting for the impact of the artificial storage in C becomes more difficult to model.

In these conditions, hydrological models can be very helpful to simulate the diffuse impact of reservoirs far downstream the dam, without requiring an exhaustive description of the hydraulic characteristics of the channel network.

1.2. Limits of existing models

Artificial reservoirs are intrinsically designed to modify natural hydrological processes and they indeed affect catchment behaviour by locally changing its response to precipitation in several ways: modification of evaporation due to the water free surface, infiltrations and water transfer (see e.g. (Moulin et al., 2005)). This obviously modifies catchment behaviour downstream the dam.

Most existing hydrological models were initially designed to simulate the natural rainfall-runoff transformation at the catchment scale. To account for the role of reservoirs in the rainfall-runoff transformation, specific modules must therefore be added to the model structure. Since artificial reservoirs are local works, the more intuitive approach seems to use spatially distributed models in which the catchment is divided into cells or elementary areas. By an appropriate parameterisation of the corresponding cells, the location and the behaviour of the dams on the catchment can be explicitly taken into account in the model. A

number of distributed models use this procedure. As an example, one can mention the CEQUEAU model (Desconnets et al., 1998; Morin, 2002) that adopts such a procedure, with a specific parameterization of some model cells at the reservoir location.

However in practical applications, distributed models remain data demanding and therefore often difficult to implement. Besides, their high complexity and degree of sophistication generally do not provide better efficiencies in terms of flow simulation at the catchment outlet than more simple, lumped, approaches, as shown by several intercomparison studies (Refsgaard & Knudsen, 1996; Smith et al., 2004).

Lumped models are widely used tools for operational water resources management applications. They avoid the complexity of spatially distributed models and are less data demanding. However, it seems at first glance impossible to account for reservoirs in this kind of models. There are two main reasons for that:

- First, in a lumped approach, the catchment is considered as a homogeneous unit which means that the location of the dams within the catchment cannot be easily accounted for;
- Second, in a lumped approach, the components of the model structure (functions, parameters) have no direct physical interpretation and it is therefore not possible to identify which actual compartment they represent. So it is difficult to know which model components will be affected by the presence of an artificial reservoir.

These two difficulties probably explain why no existing lumped rainfall-runoff models can explicitly account for artificial reservoirs, to the authors' knowledge.

1.3. Scope of the article

The objective of this article is to propose a way to account for dam operations in a lumped hydrological model. To get a solution with a wide range of applicability, we used a large set of catchments influenced by artificial reservoirs, which served for model evaluation.

Section 2 describes the original rainfall-runoff model and the data we used in this research. Section 3 describes how artificial reservoirs can be accounted for in a rainfall-runoff model and the methodology we followed for model development. Section 4 presents the new model. Section 5 presents and discusses the results of the new model on our data set. Section 6 gives some conclusions and perspectives of this work.

2. Model and data

2.1. The GR4J model

In this study, we used the GR4J lumped rainfall-runoff model (Perrin et al., 2003) (see diagram in Figure 2). It is a daily continuous rainfall-runoff model developed for applications at the basin scale. We selected this model because it has a simple and parsimonious structure, which eased our research by avoiding problems of overparameterization. Only four parameters must be calibrated:

- X1 (mm): capacity of the production store;
- X2 (mm): water exchange coefficient;
- X3 (mm): capacity of the routing store;
- X4 (day): time base of the unit hydrograph.

The production module of the model consists in a soil moisture accounting store to determine effective rainfall and actual evapotranspiration, and a water exchange function (F) to simulate possible interactions with underground layers. The routing module simulates two flow components, one in which 90% of effective rainfall is routed by a unit hydrograph (UH1) and a non linear routing store, and the other in which the remaining 10% of effective rainfall are routed by a single unit hydrograph (UH2).

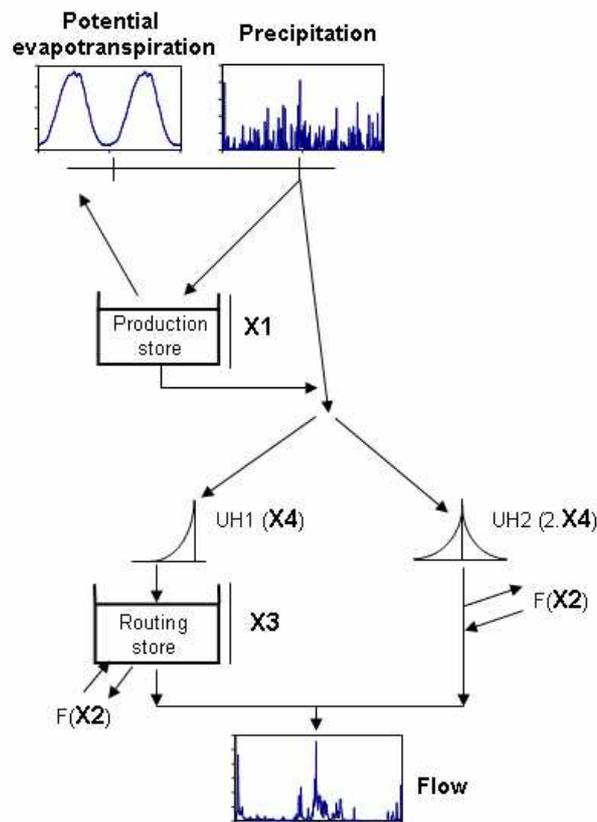


Figure 2: Structure of the original GR4J model

GR4J uses rainfall and potential evapotranspiration estimates as only inputs. Streamflow is only required for parameter optimisation and model evaluation. The model has been extensively tested in several countries and has shown good results in comparison with other rainfall-runoff models (Perrin et al., 2001; Perrin et al., 2003).

2.2. Catchments, reservoirs and data base

As argued by (Andréassian et al., 2006), models should be tested on large data sets to get a more reliable assessment of their actual capabilities and their generality. Here we collected a large database of 46 catchments influenced by 26 artificial reservoirs to get more general conclusions (in some cases, we used several downstream gauging stations for a single reservoir).

Catchments are located in France, the United States, Australia, Brazil, Senegal and Mali (see Table 1). This catchment set thus covers a wide range of climatic and hydrological conditions (tropical, temperate, continental, Mediterranean, semi-arid). Here we selected catchments without significant snowmelt influence, because we did not use any snowmelt module in the modelling. We also selected catchments for which the influence of reservoirs was significant. The criterion for selection was to have a storage capacity over the catchment (expressed in mm by dividing it by the area of the catchment at the downstream station) greater than 5 mm. We (arbitrarily) considered that under this value, the influence of the dam was likely to be very limited. The associated reservoirs also represent an interesting variety of characteristics in terms of volume, place within the catchment (close to or far from the outlet) and management objectives (flood control, low flow augmentation, irrigation,

hydropower, water supply, etc.). A detailed description of catchments and reservoirs is provided by Payan (2007).

Country	Number of catchments	Range of catchment size (km ²)	Range of mean annual precipitation (mm)	Range of mean annual PE (mm)	Number of artificial reservoirs	Range of reservoir capacities (hm ³)
Brazil	4	61 880 – 202 400	1 255 – 1 351	983	1	15 278
France	39	126 – 43 800	604 – 1 827	684 – 1 225	22	1 – 205
United States	3	8104 – 39 956	608 - 720	601 - 982	3	178 – 881

Table 1: Characteristics of the 46 catchments and the associated artificial reservoirs

Data were collected at a daily time step. For each catchment, the following data were collected:

- time series of rainfall for raingauges on or close to the catchment. The areal catchment rainfall was computed as a simple arithmetic average over the available raingauges;
- curves of average temperature to compute potential evapotranspiration (PE) following the formulation proposed by (Oudin et al., 2005a). We used long term averages instead of actual time series since it was shown not to have a significant impact on model performances (Oudin et al., 2005b). It means that the same PE curve was used every year;
- time series of streamflow at the gauging stations downstream the artificial reservoirs;

Data collected to characterize the behaviour of reservoirs are daily time series of stored volumes. These data are generally more widely available than detailed records of all the reservoir inflow and outflow series. Volumes were computed using water levels in the reservoir and the height-volume curve.

All data sets were quality checked and the obvious errors that appeared during visual inspection were corrected. Data were available on 7-year long periods on average. Times series of rainfall and stored volumes were without gaps on the test periods.

3. Model development methodology

3.1. Context and new proposal

Very few authors tackled the issue of accounting for man-originating influences in a lumped rainfall-runoff model. One can only mention the study by (Ivkovic et al., 2005) who proposed a solution to explicitly account for groundwater abstractions in the lumped IHACRES rainfall-runoff model. They modified their model structure by adding a new store representing the evolution of the groundwater table and used the groundwater abstractions as additional data. Except this study, we could not find other works attempting to account for artificial influences in a lumped hydrological model. On the specific issue of surface artificial reservoirs, there are no attempts to account for them in lumped models to our knowledge.

Given the difficulties mentioned in the introduction (lack of physical interpretation of the model structure), we had to follow an empirical research approach to discover which was the most appropriate way to account for reservoirs in the model.

We used the following ideas to develop our model:

1. since the catchment is seen as a lumped unit by the rainfall-runoff model, we tried to be in agreement with this spatial resolution by considering that the artificial reservoirs existing on the catchment can be lumped into a single reservoir. The water volume stored in this single reservoir corresponds to the sum of the volumes stored in all the reservoirs over the catchment;
2. the catchment hydrological behaviour is modelled by using stores that represent the water storages on the catchment, whose levels evolve in time following the sequence of inputs and the laws defined in the model structure. Similarly we can consider that the single artificial reservoir can be represented by a store, whose content corresponds to the total stored volume actually observed in the single reservoir defined above. The water depth in the store (in mm) corresponds to the total stored volume divided by the area of the catchment at the downstream station. For example, if the volume in the reservoir is 10 hm^3 , and the catchment area at the downstream station is 1000 km^2 , the equivalent water depth in the store will be 10 mm. Thus the content of the store is expressed in the same unit as the other internal variables of the model;
3. the temporal evolution of the water volume stored in the artificial reservoirs is not natural but depends on management practices. Therefore it cannot be easily modelled by laws as done in the structure of the model that represents the natural system. So the level in the store that represents the artificial reservoirs will not be modelled but will be simply controlled by the observations of water storages. The behaviour of this store is thus completely defined by observations without any parameterization;

Following these ideas, we can now better define how the store that represents the artificial reservoirs will work. Let us consider that the level in the store is V_i at time step i and V_{i+1} at time step $i+1$. If $V_{i+1} > V_i$, i.e. the stored volume has increased, a positive quantity of water $\Delta V = V_{i+1} - V_i$ has globally been taken by the artificial reservoirs from the natural system. Conversely, if $V_{i+1} < V_i$, i.e. the stored volume has decreased, a quantity of water $\Delta V = V_i - V_{i+1}$ has globally left the artificial reservoirs to feed the natural system. If $V_{i+1} = V_i$, there is no water exchange. Therefore one can consider that the quantity $\Delta V = V_{i+1} - V_i$ (that can be positive or negative) represents the water exchanges between the lumped representation of the catchment (i.e. the original model structure) and the lumped representation of the artificial reservoirs (i.e. the new store). ΔV is only defined by the observed values of stored volumes, and can therefore be considered as a new input to the model.

The problem we have now is to define how this input must be treated in the original model structure to account for the artificial reservoirs. Indeed, as mentioned earlier, the original rainfall-runoff model represents the natural catchment but there is no direct physical interpretation of the model components. So when ΔV is negative, we do not know a priori to which part of the model structure the water must be input. Similarly, when ΔV is positive, we do not know a priori from which part of the model water must be withdrawn. Therefore we had to answer the following questions:

- on which part(s) of the model ΔV will act? On some transfer functions, production functions or both?
- is it necessary to consider different model components when ΔV is positive or negative?
- is there a need to introduce specific functions to transform ΔV before it is used by the model?

3.2. Test of model options

To answer the previous questions, we made an extensive assessment of a large number of modelling options. They were evaluated following a split sample test scheme (Klemeš, 1986) and their quality was judged by their mean performance in simulating regulated flows over

the whole set of catchments. Among the tests we performed to identify the best way to account for the information on dam operations, we did the following:

- we tried to introduce the new model inputs ΔV at all the possible levels of the model structure. For example, it was added to raw rainfall, to the contents of the production or routing stores, etc.;
- we distinguished the cases of positive and negative inputs, by adding positive ΔV values to one part of the model structure and negative values to another part;
- we tested composite solutions where ΔV is split into two parts by a coefficient to be optimised;
- we also tried to introduce specific functions such as unit hydrographs to transform ΔV inputs before adding them to the model structure.

Given the large number of tested options, we will not give the detailed results. They are provided by Payan (2007). Surprisingly, we found that a very simple model version obtained the most satisfactory results and that sophistications did not bring significant improvements. In the next section, we describe the solution that performed best on average on our test sample.

4. Model description

The rainfall-runoff model proposed here to explicitly account for the impact of artificial reservoirs and therefore to simulate downstream influenced flows is simple. It is a daily lumped model based on the structure of the GR4J model. Its inputs are the same as GR4J's (i.e. rainfall and PE) plus the observed variation (ΔV) in the volume artificially stored globally over the catchment (expressed in mm).

The model is run like the original model, but two additions are made in the sequence of operations to account for the new model input (see Figure 3):

- if the stored volume variation ΔV is negative (i.e. the stored volume in reservoirs decreases), $|\Delta V|$ is added to the content of the routing store;
- if ΔV is positive (i.e. the stored volume increases), ΔV is subtracted from the content of the production store.

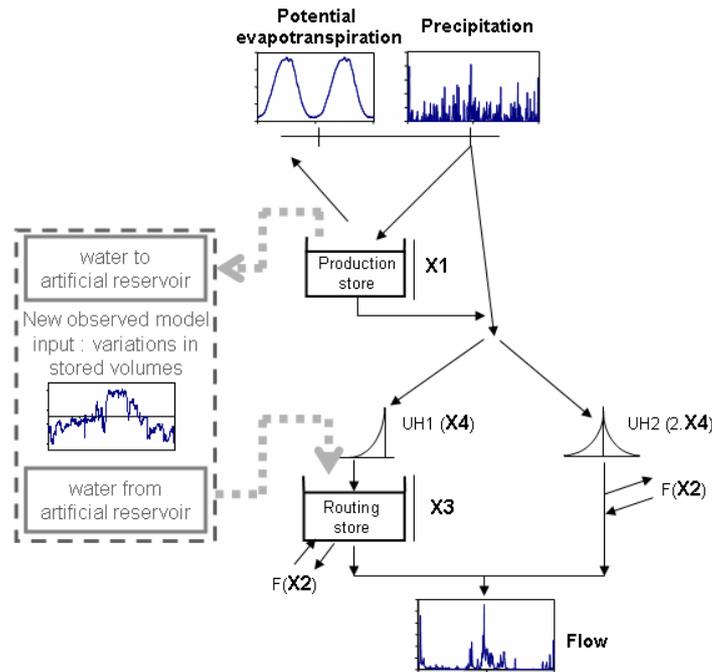


Figure 3: Structure of the modified GR4J model, with the new model inputs

Using the observed volume variations allows for accounting for the behaviour of the artificial reservoirs. This modelling solution keeps the simplicity of the original model structure since no additional parameter or function was introduced.

5. Model result over the data set

5.1. Evaluation procedure

The model was applied to each of the 46 catchments of our data set following a split sample test scheme by splitting each available data record into two independent test periods. The first year of each period was used for model warm-up.

Parameter calibration was performed using a local search algorithm (Edijatno et al., 1999), which was efficient to calibrate this parsimonious model structure. As objective function, we used the Nash-Sutcliffe (1970) criterion calculated on root square transformed flows:

$$NS_{rq} = 1 - \frac{\sum_j (\sqrt{Q_{obs,j}} - \sqrt{Q_{sim,j}})^2}{\sum_j (\sqrt{Q_{obs,j}} - \sqrt{\overline{Q_{obs}}})^2} \quad \text{Eq. 1}$$

where $Q_{obs,j}$ is the measured flow at day j , $Q_{sim,j}$ the simulated flow at day j and $\sqrt{\overline{Q}}$ the mean of transformed observed flows over the test period.

To assess model performances in validation mode, we used two other criteria: the original Nash-Sutcliffe criterion calculated on flow values and the Nash-Sutcliffe criterion calculated on log-transformed flow values. These two criteria are complementary and put more emphasis on the simulation of high flows and low flows respectively.

As reference model, we used the original GR4J model without using reservoir storage information. Our objective was therefore to build a new model that could benefit from the use of reservoir storage data, i.e. which could obtain efficiencies significantly better than the

original GR4J model that has no information on the artificial reservoirs to simulate influenced flows.

5.2. Results of model application

The results obtained by the original and new models are illustrated in Figure 4, which compares their performances obtained in validation mode on the whole set of catchments. It can be seen that the improvement achieved by the use of reservoir storage information is significant. The mean model performances raise from 67.9 % (NSq) and 68.2 % (NSIq) for the original version to 70.7 % and 76.5 % respectively for the new model. The improvements are more significant on low flow simulation, which is quite logical since the impacts of artificial reservoir are often easier to detect on low flows.

These encouraging results show that artificial water storages can actually be accounted for in lumped rainfall-runoff models. The use of the simple information of water volumes artificially stored, which is quite easily available, is sufficient to make significant improvements in the simulation of downstream flows.

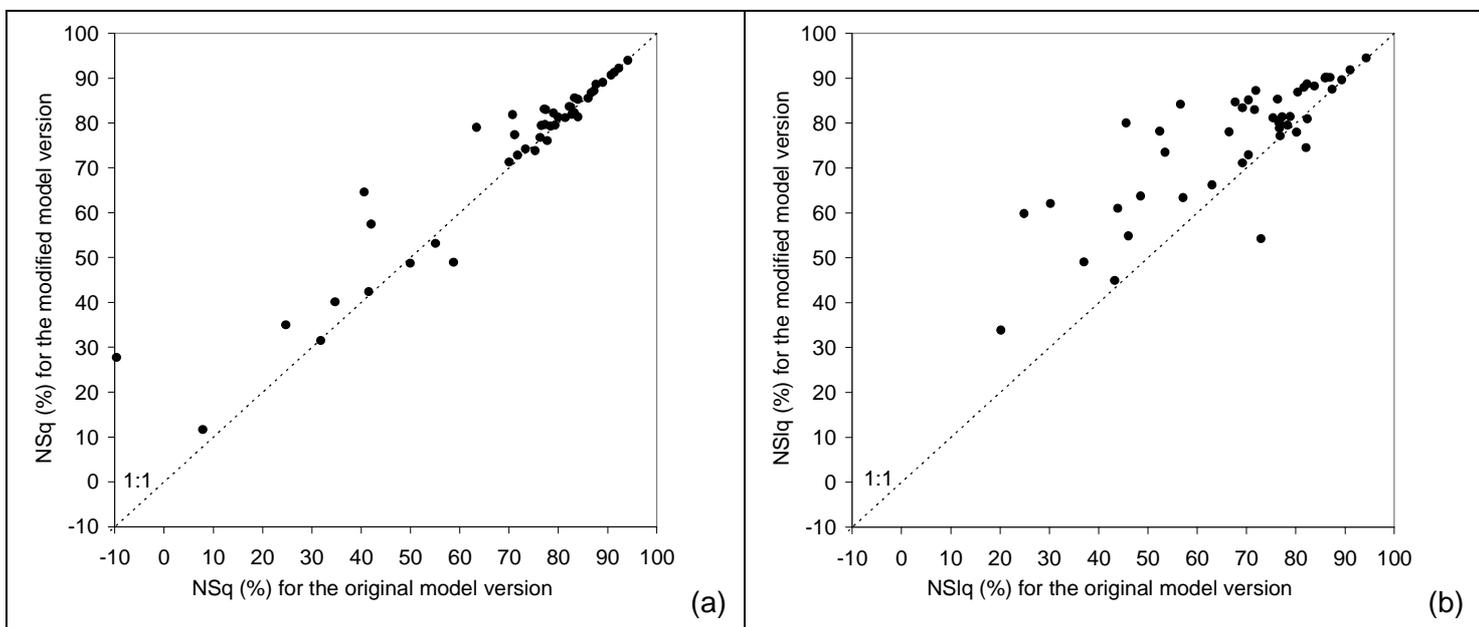


Figure 4: Comparison of the performances of the original and modified versions of the GR4J model in validation mode on the 46 catchments using the (a) NSq and (b) NSIq criteria

5.3. Limits of the proposed approach

Despite these interesting results, it can be seen in Figure 4 that in some cases, the performance of the modified solution is slightly lower than the original version. In a few cases, this drop in model performances can even be quite important. This comes from the fact that the proposed model version is not optimal in all cases, and that there may be other modelling options more suitable for some catchments. Among all the versions we tested, some versions could achieve better results than the proposed version in some catchments. One could always find one modelling option that gave performances at least as good as those obtained by the original solutions. Such a composite model would obtain 72.8 % (NSq) and 78.7 % (NSIq) as mean performances on our catchment set, which is a bit more efficient than the proposed version.

This composite model could be effectively used only if one could determine in advance (from physical catchment descriptors and reservoir characteristics) which solution must be used on

each catchment. However we could not find any clear relationship between the specificities of the reservoirs existing on the catchment (e.g. their place within the catchment) and the way the new inputs should be introduced in the model. So it was not possible to determine a priori from catchment and reservoir descriptors which solution was the most appropriate to a specific catchment.

Since the attempts to use more sophisticated model versions did not provide significant improvements, we propose to keep the single solution proposed here to account for reservoirs.

5.4. Is this approach suitable for other lumped models?

Although all our conclusions were based on the tests using a single model (GR4J), we made similar tests using the structure of another lumped model (a modified version of TOPMODEL called TOPMO; see (Michel et al., 2003) for more details). The same approach was investigated using the new model input. Results showed that we get similar conclusions, i.e. a general improvement of performances over the original structure, more significant on low flows (see Figure 5). The mean model performances raise from 66.6 % (NSq) and 65.7 % (NSIq) for the original version to 69.1 % and 71.8 % respectively for the new model version.

Interestingly, results showed that the best modelling option (the place where ΔV is introduced in the model structure) is similar to the one selected for the GR4J model, i.e. adding $|\Delta V|$ to the content of the routing store when ΔV is negative, and subtracting ΔV to the content of the SMA store when ΔV is positive).

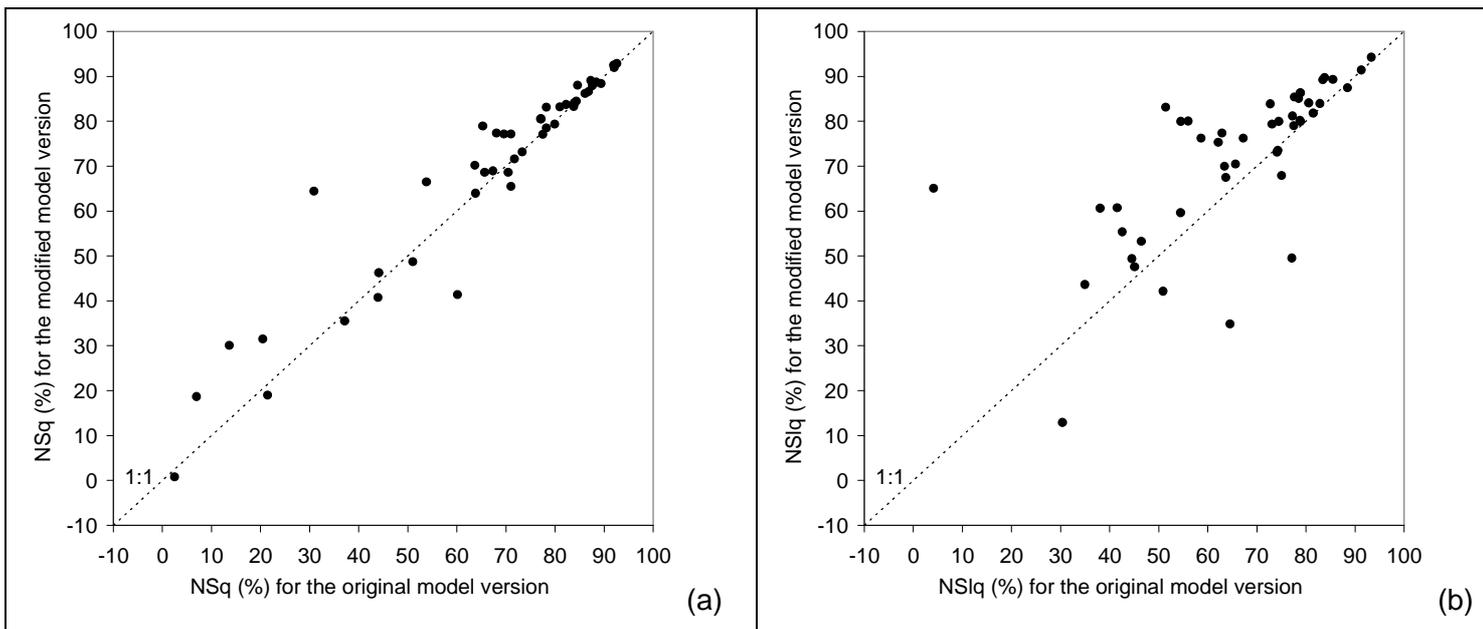


Figure 5: Comparison of the performances of the original and modified versions of the TOPMO model in validation mode on the 46 catchments using the (a) NSq and (b) NSIq criteria

This result may open ways for a wider use of this modelling approach in lumped rainfall-runoff modelling.

5.5. Illustration

It is difficult to draw a "representative" case from a large database to illustrate the results of our approach. Here we chose to illustrate the results of our model on the Aube River catchment at Arcis-sur-Aube (3590 km²). Mean annual flow is 33.9 m³/s. The catchment is

regulated by a large reservoir with a capacity of 170 hm³, which controls about 45 % of the catchment. The model was tested on the 1996-2001 period. Figure 6 compares the simulations obtained by the original and modified model versions to the observed flows. It can be seen that there is a clear improvement in the simulation of low flows while the simulation of high flows are less significantly improved. Over the test period, the NSIq criterion increases from 41.4 % to 82.9 % while the NSq criterion increases from 80.7 % to 85.3 %.

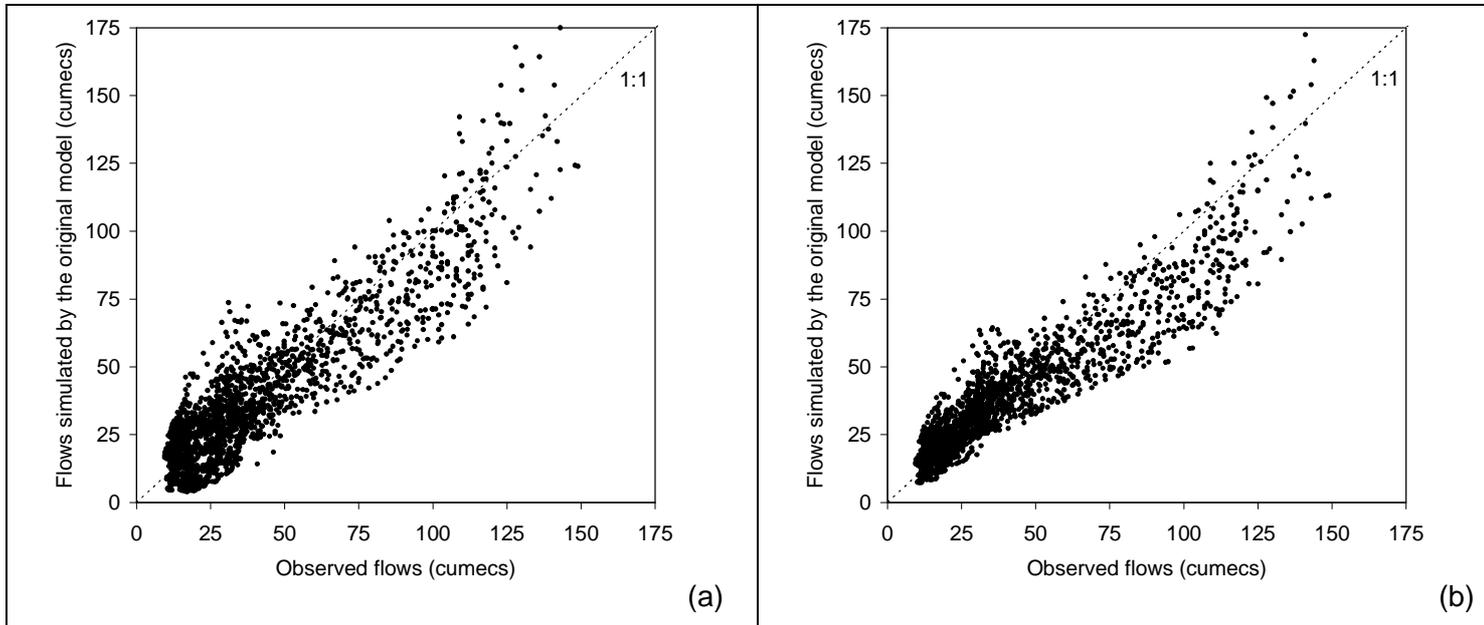


Figure 6: Comparison of the observed flows and flows simulated by (a) the original GR4J model version and (b) the modified GR4J model version for the Aube River catchment at Arcis-sur-Aube over the 1996-2001 period

6. Conclusion and perspectives

The objective of this research was to develop a way to explicitly account for the impact of artificial reservoirs in a lumped rainfall-runoff model. Despite an apparent contradiction between the lumped modelling approach and the point location of reservoirs on a catchment, we showed that it was possible to account for reservoirs by simply using the information of water volumes artificially stored over the catchment. The proposed approach considers as a new observed input to the model the day-to-day water volumes variations globally stored in reservoirs over the catchment. The introduction of this new input does not require any complexification of the model structure (no parameter or function was added).

A clear improvement of the simulation of the regulated flows downstream the dam could be achieved. This improvement was more significant on low flows than on high flows. Although we could not find a way to account for the place of reservoirs within the catchment, the proposed solution tested on a large set of 46 influenced catchments proved to be quite general. Our tests also indicate that the proposed modelling option could be used with other existing structures of rainfall-runoff models.

Acknowledgments

We wish to thank all the researchers and institutions who provided datasets for this research.

References

- Andréassian, V., Hall, A., Chahinian, N. & Schaake, J. (2006) Introduction and Synthesis: Why should hydrologists work on a large number of basin data sets? In: V. Andréassian, A. Hall, N. Chahinian and J. Schaake (Editors), Large sample basin experiments for hydrological model parameterization: Results of the Model Parameter Experiment - MOPEX. IAHS Publication n°307, pp. 1-5.
- Desconnets, J.C., Diallo, A., Traore, O., Chene, J.M. & 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 Publication n°252, 375-385.
- Edijatno, Nascimento, N.O., Yang, X., Makhlof, Z. & Michel, C. (1999) GR3J: a daily watershed model with three free parameters. *Hydrol. Sci. J.* 44(2), 263-277.
- Ivkovic, K., Croke, B., Letcher, R. & Evans, R. (2005) The development of a simple model to investigate the impact of groundwater extraction on river flows in the Namoi catchment, NSW Australia.
- Klemeš, V. (1982) Empirical and Causal Models in Hydrology. In: National Research Council Geophysics Study Committee (Editor), Scientific Basis of Water-Resource Management. National Academy Press, Washington D.C., pp. 95-104.
- Michel, C., Perrin, C. & Andréassian, V. (2003) The exponential store: a correct formulation for rainfall-runoff modelling. *Hydrol. Sci. J.* 48, 109-124.
- Morin, G. (2002) CEQUEAU hydrological model. In: V.P. Singh and D.K. Frevert (Editors), Mathematical models of large watershed hydrology. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, pp. 507-576.
- Moulin, L., Perrin, C., Michel, C. & Andréassian, V. (2005) Prise en compte de barrages-réservoirs dans un modèle pluie-débit global : application au cas du bassin de la Seine amont (Taking into account water storage data in a lumped rainfall-runoff model: case study on the Seine basin). *La Houille Blanche* 5, 79-87.
- Nash, J.E. & Sutcliffe, J.V. (1970) River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles. *J. Hydrol.* 27, 282-290.
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F. & Loumagne, C. (2005a) Which potential evapotranspiration input for a rainfall-runoff model? Part 2 - Towards a simple and efficient PE model for rainfall-runoff modelling. *J. Hydrol.* 303(1-4), 290-306.
- Oudin, L., Michel, C. & Anctil, F. (2005b) Which potential evapotranspiration input for a rainfall-runoff model? Part 1 - Can rainfall-runoff models effectively handle detailed potential evapotranspiration inputs? *J. Hydrol.* 303(1-4), 275-289.
- Payan, J.L. (2007) Prise en compte de barrages-réservoirs dans un modèle pluie-débit global. Thèse de Doctorat Thesis, ENGREF (Paris), Cemagref (Antony).
- Perrin, C., Michel, C. & Andréassian, V. (2001) Does a large number of parameters enhance model performance ? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *J. Hydrol.* 242(3-4), 275-301.
- Perrin, C., Michel, C. & Andréassian, V. (2003) Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *J. Hydrol.* 279(1-4), 275-289.
- Refsgaard, J.C. & Knudsen, J. (1996) Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. *Water Resour. Res.* 32, 2189-2202.
- Smith, M.B., Seo, D.J., Koren, V.I., Reed, S.M., Zhang, Z., Duan, Q., Moreda, F. & Cong, S. (2004) The distributed model intercomparison project (DMIP): motivation and experiment design. *J. Hydrol.* 298(1-4), 4-26.