



HAL
open science

Impact de la variabilité de l'information pluviométrique sur des statistiques hydrologiques extrêmes

G. Patry

► **To cite this version:**

G. Patry. Impact de la variabilité de l'information pluviométrique sur des statistiques hydrologiques extrêmes. Sciences de l'environnement. 2019. hal-02609913

HAL Id: hal-02609913

<https://hal.inrae.fr/hal-02609913v1>

Submitted on 16 May 2020

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

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

Guillaume Patry

Impact de la variabilité de l'information pluviométrique sur des statistiques hydrologiques extrêmes

Fevrier-Juillet 2019



Sommaire

Introduction

| | | |
|------|--|----|
| I) | Introduction | 6 |
| 1) | Contexte | 6 |
| 2) | Le laboratoire | 6 |
| 3) | Organisation du projet | 7 |
| II) | Données et modèles..... | 8 |
| 1) | Données pluviométriques | 8 |
| 2) | Échantillon de bassins versants | 9 |
| 3) | Modèle pluie/débit..... | 9 |
| a) | GRLoiEau2J | 10 |
| b) | GRD..... | 11 |
| c) | GR4J..... | 12 |
| d) | Fonction objectif utilisée | 13 |
| e) | Utilisation des données de débits..... | 13 |
| 4) | Méthodologie d'évaluation | 13 |
| a) | Evaluation des données..... | 13 |
| b) | Évaluation des modèles | 14 |
| c) | Régionalisation | 14 |
| III) | Evaluation des précipitations | 15 |
| 1) | Choix des données spatiales..... | 15 |
| 2) | Méthode "AURELHY " | 17 |
| 3) | Comparaison entre les séries Coméphore, Safran et Pluviométrique | 18 |
| a) | Analyse en fonction de la résolution | 18 |
| b) | Analyse en fonction de la quantité de précipitations | 19 |
| c) | Analyse par altitude..... | 20 |
| d) | Analyse par mois | 22 |
| 4) | Pluies de bassins..... | 23 |
| IV) | Analyse des modèles GRD, GRLoieau2J et GR4J | 25 |
| 1) | Etude des critères Nash en fonction l'altitude et la surface | 25 |
| a) | Comparaison entre Coméphore 1km ² et 64 km ² | 25 |
| b) | Comparaison entre Coméphore 1km ² et Safran | 26 |
| 2) | Étude des critères de Nash et des statistiques d'étiages | 28 |
| a) | L'ensemble des bassins | 28 |

| | |
|--|----|
| b) Les altitudes..... | 29 |
| c) Les surfaces | 30 |
| d) Régime hydrologique..... | 30 |
| V) Efficacité des modèles vis-à-vis de la restitution d'un quantile de crue journalière..... | 33 |
| 1) Évaluation en critère de crue..... | 33 |
| 2) Comparaison en calage avec CruCal | 34 |
| 3) Régionalisation | 36 |

Résumé

S'il existe un consensus sur le fait que l'incertitude des données de précipitations en entrée des modèles hydrologiques pluie/débit ont un impact sur la précision des données en sortie, la quantification de cet impact est encore source de débat (Emmanuel et al., 2015). Le but de ce stage est d'évaluer cette quantification sur les modèles GRLoieau2J, GR4J et GRD qui sont actuellement utilisés ou développés par IRSTEA.

Obtenir des données de précipitation précises implique un investissement conséquent. De plus, les données antérieures à l'apparition de meilleures techniques de mesures ne peuvent pas être améliorées. Sachant que certains calculs statistiques nécessitent une longue période de données pour être précis, il est donc inévitable de devoir utiliser des données de précipitations qui ne sont pas les plus précises possibles. La quantification de l'erreur qui résulte de l'utilisation de ces informations est donc un sujet important car cela pourrait remettre en cause l'utilisation de longues périodes de données considérées comme imparfaites.

La première partie de ce projet consiste en l'étude des données pluviométriques à disposition pour en estimer la variabilité, que ce soit à partir de données ponctuelles ou au niveau de bassins versants. Ensuite, des modélisations pluie/débit seront effectuées pour évaluer la variabilité des débits selon l'entrée utilisée. Pour finir, la capacité des modèles à reproduire un critère de crues sera aussi testée.

Abstract

If there is a consensus on the fact rainfall data uncertainty in entry of hydrological rain/flow model have an impact on the accuracy of the output, the quantification of this impact is still a source of debate (Emmanuel et al., 2015). This internship's objective is to evaluate this quantification on the model GRLoiEau2J, GR4J and GRD which are currently used or developed by IRSTEA.

Getting accurate rainfall data involve a consequent investment. Furthermore, data prior the emergence of better measurement technique are unlikely to being improved. Knowing that some statistical computing need a big data period to be accurate, it is unavoidable to have to use data which aren't as precise as possible. The quantification of the error resulting of the use of this information therefor an important subject because it could question the utilization of imperfect data, chosen for the length of their period.

The first part of this project consists in studying the rainfall data at use to estimate its variability, either from ponctual data or at the scope of a watershed. Then, modelization rain/flow will be done to evaluate the variability depending of the input. Eventually, the efficiency of the model to reproduce flood criterion will be tested too.

l) Introduction

1) Contexte

La démographie actuelle crée une augmentation de la demande en eau, qui se traduit par une augmentation du pompage ou de l'irrigation. Et ces besoins ne diminuent pas en périodes d'étiages, où la ressource est la plus faible. Le phénomène d'étiage est donc une préoccupation majeure, notamment sur la gestion de la ressource. De plus, avec le réchauffement climatique, il devient essentiel de prévoir des seuils qui vont servir pour l'élaboration de limitations légale de prélèvements.

Les crues sont, elles aussi, une préoccupation. L'impact économique et sociale des crues en France fait de sa prédétermination un domaine au cœur de l'hydrologie. En effets, les inondations des dernières décennies ont provoqué des pertes humaines ainsi que des dégâts collatéraux s'élevant à plusieurs milliards d'euros. De plus, l'aménagement du territoire rural et urbain, pour la construction d'ouvrages hydrauliques, se doit de prendre en compte la variable « crue ».

Les modèles pluies/débits permettent d'évaluer le débit à tout instant à l'exutoire de bassins versants à l'aide des précipitations et d'autres variables (évapotranspiration, température...). Il existe de multiples modèles pour calculer les débits, et cette étude impliquera les modèles conceptuels globaux à réservoirs de type « GR », à savoir GRLoiEau2J et GR4J ainsi qu'un modèle conceptuel distribué GRD, en phase de développement.

2) Le laboratoire

Après avoir suivi une formation en 2ème année en Génie de l'eau à l'école de Polytech Nice Sophia, j'ai réalisé mon stage au sein de IRSTEA, sur un sujet de recherche en hydrologie, la modélisation de la ressource en eau.

IRSTEA, L'Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture, est un institut recherche français créé il y a 30 ans en 1981. Cet institut, acteur majeur spécialisé dans la recherche appliquée en sciences et techniques pour l'ingénierie de l'environnement, développe des outils et technologies pour la gestion des eaux et des territoires.

Il fait partie des 9 établissements publics à caractère scientifique et technique français (EPST) qui regroupent d'autres instituts de recherche tels que le CNRS, l'INRA, ou encore l'IFSTTAR.

Ses travaux de recherches appliquées pour l'ingénierie sont concentrés essentiellement sur les thématiques suivantes :

- La surveillance des milieux aquatiques continentaux, des ressources en eau, et de l'usage de l'eau
- Le développement de technologies environnementales : écotechnologies, éco-évaluation, écotoxicologie, traitement et valorisation énergétique des déchets organiques.
- L'économie et la sociologie de l'environnement : observatoire de la biodiversité, télédétection, trames verte et bleue...
- L'aménagement du territoire

- La gestion des risques environnementaux : crues, inondations, avalanches, feux de forêt, pollutions...

Le centre d'Aix-en-Provence compte 80 permanents et accueille chaque année environ une trentaine de doctorants et de stagiaires. Il y a 5 unités de recherche rassemblées dans l'UMR RECOVER :

ouvrages Hydrauliques (OHAX), Hydrobiologie (HYAX), Ecosystèmes Méditerranéens et risques (EMAX), le Laboratoire d'Essai et de Recherche des matériels d'Irrigation (LERMI) et l'unité Risques Hydrologiques (RHAX).

J'ai réalisé mon stage sur le site d'Aix-en-Provence dans l'unité Risques Hydrologiques (RHAX). Les recherches de l'équipe s'articulent notamment autour de la problématique de la prédétermination et de la prévision des débits de crue, et de la prédétermination de la ressource en eau notamment en sites non jaugés. L'unité RHAX, dirigée par Patrick Arnaud, a pour domaine d'étude les transferts quantitatifs au sein des bassins versants et du réseau hydrographique. Ses recherches portent sur une meilleure compréhension des phénomènes hydrologiques et sur leur modélisation. L'équipe dispose aussi d'un site de terrain expérimental (le bassin versant du Réal Collobrier) situé dans le Massif des Maures permettant le développement de connaissances hydrologiques. Des modélisations sont donc mises en œuvre afin d'améliorer la connaissance des risques hydrologiques en tout point du territoire (crues et étiages): estimation des débits de référence d'étiage, connaissance des débits de crue, prévision et anticipation en temps réel des débits dans les cours d'eau.

Les recherches sont donc articulées selon 3 axes principaux : la connaissance régionale de la ressource en eau avec la Base Web LOIEAU, la prédétermination des débits de crue avec la méthode SHYPRE et la base de données SHYREG, et la prévision des débits de crue avec la méthode AIGA. Ces méthodes sont régionalisées pour être applicable partout en France, et fournissent une information indispensable à la mise en œuvre des politiques règlementaires en lien avec la gestion des risques liés à l'eau.

3) Organisation du projet

Ce mémoire est divisé en 3 parties. En premier lieu nous commencerons par présenter les données pluviométriques à disposition, les différents modèles utilisés de modélisation hydrologique de la ressource en eau, les zones d'études ainsi que la méthodologie mise en œuvre.

Ensuite, les variabilités entre les séries pluviométriques à dispositions seront étudiées pour pouvoir les relier aux résultats des modèles. Une partie du chapitre sera consacrée aux précipitations sur les bassins versants.

Puis nous étudierons la variabilité des débits issus de différentes modélisations en fonction des données d'entrée ainsi que la variabilité des paramètres des modèles.

Enfin, nous évaluerons la capacité des modèles à reproduire des statistiques de crues.

II) Données et modèles

1) Données pluviométriques

Les pluies à notre disposition sont les séries spatiales Safran, Antilope, Reana et Coméphore, ainsi que des séries ponctuelles de pluviomètres.

Safran (Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques pour la Nivologie) a été élaboré par le Centre d'Étude de la Neige (Durand et al., 1993). Ce sont des données de pluies solides et liquides journalières de Météo France qui se présentent sous la forme de lames d'eau spatiales ayant une résolution de $8 \times 8 \text{ km}^2$ sur la France entière. Ces données sont accessibles entre 1958 et 2018, soit 61 ans de mesures. Ces lames d'eau sont construites à l'aide de 7 paramètres : la vitesse du vent, l'humidité relative, la température de l'air, la nébulosité, les rayonnements solaire et atmosphérique, et la pluie solide. Safran utilise une méthode d'interpolation optimale pour analyser la plupart de ces paramètres (Gandin 1963). L'une des caractéristiques principales de SAFRAN est qu'elle est basée sur des zones climatiques homogènes et prend en compte les variations verticales (Quintana-Seguí et al., 2008). Safran contient à la fois les pluies solides et liquides.

Les pluies des stations pluviométriques proviennent de 3414 stations pluviométriques de Météo France, qui se présentent sous la forme de pluie journalière ponctuelle. La plage de données dépend des stations utilisées, allant de 1958 à 2014.

Les pluies Antilope, Reana et Coméphore sont des données spatiales de pluies horaires avec une résolution de 1 km^2 sur la France entière, issues des radars avec une éventuelle correction réalisée à partir des stations pluviométriques.

Reana est accessible entre 1997 et 2006, soit 10 ans de mesures.

Antilope, accessible de 2006 à 2018, soit 12 ans de mesures, est produite à l'aide du réseau radar ARAMIS (24 radars répartis en France, ainsi que 6 radars dans des pays voisins) et du réseau de pluviomètres RADOME (environ 550 stations). Il s'agit d'un produit hybride entre la lame d'eau PANTHERE et d'un krigeage des pluviomètres (Tabary, 2007). Il existe sous 2 versions : Le "temps réel" correspondant à une fabrication à H+20 avec les pluviomètres disponibles à ce moment-là. Le "J+1" correspondant à une fabrication à J+1 de meilleure qualité car ayant plus de pluviomètres disponibles pour le krigeage. C'est la version J+1 que nous utilisons.

Coméphore est la fusion des données radar et des pluviomètres disponibles, accessible de 1997 à 2015. Les données correspondent en l'absence de radar, ou en cas de radar éloigné, au krigeage des pluviomètres existant dans la base de données de Météo-France. Cette lame d'eau correspond aux traitements antilope des années 2010 des réflectivités radars et observées de pluviomètres archivés. On profite ainsi également de l'amélioration de post-traitement sur les images brutes des radars (Tabary et al., n.d.). Les données incluent 5 jours non contigus sur lesquels il n'y a pas de données. Les modélisations n'étant pas réalisables s'il y a des lacunes, ces dernières sont remplacées par une moyenne des jours adjacents.

Les évapotranspirations utilisées dans les modèles sont calculées avec la formule proposée par (Oudin et al., 2005) et détaillée par (Oudin, 2006).

2) Échantillon de bassins versants

L'échantillon à disposition est de 691 bassins en France métropolitaine. Il regroupe des bassins de différents régimes hydrologiques : 84% de bassins pluviaux, 6 % de nivaux, 7% d'uniforme et 3% de méditerranéens. Il est nécessaire d'avoir une base de données à la fois suffisamment importante et qui regroupe des bassins versants avec des caractéristiques variées. En effet, certains auteurs mettent en garde contre la généralisation de résultats obtenus sur de petites zones (Roche, 1971) car presque n'importe quel modèle avec suffisamment de paramètres donne des résultats satisfaisants si il est appliqué sur une courte période d'un seul bassin versant (Linsley, 1982). Les résultats qui seront obtenus sont donc avant tout valides sur la France métropolitaine.

La figure 1 montre la répartition spatiale des bassins et leur régime hydrologique obtenu suivant la classification proposée par (Sauquet et al., 2008).

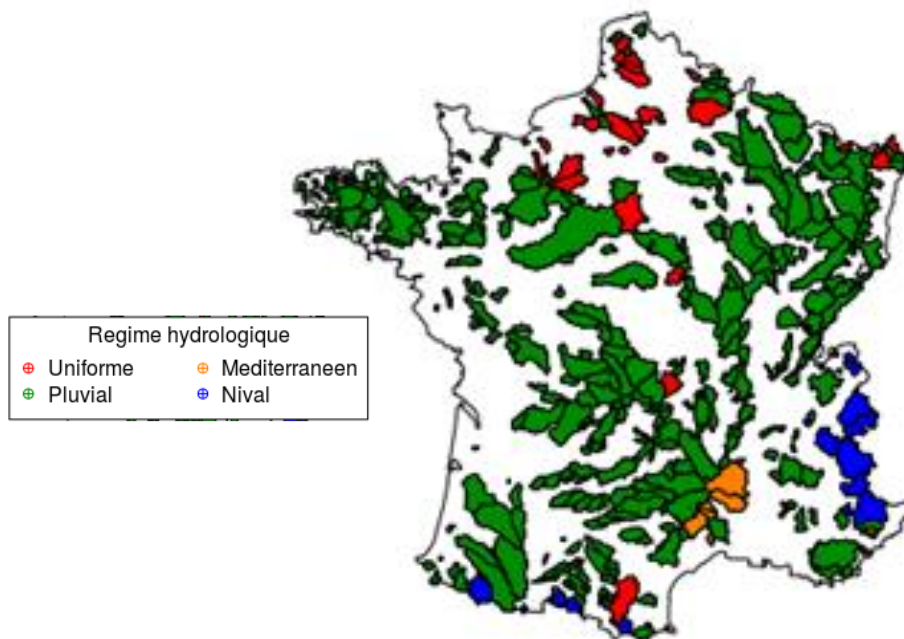


Figure 1 : Répartition spatiale et typologique des bassins versants

3) Modèle pluie/débit

Les modèles que nous utilisons en hydrologie sont une représentation concrète ou abstraite d'une réalité physique ayant pour but de décrire le comportement d'un bassin versant. Il existe plusieurs types de modèles :

-les modèles physiques qui reposent sur les lois de la physique et une maîtrise des mécanismes internes du système étudié. L'application d'un tel modèle peut s'avérer complexe, surtout à l'échelle d'un bassin versant.

-Les modèles conceptuels, que nous utilisons dans notre étude, qui ont pour but de reproduire les phénomènes physiques en utilisant une représentation simple. Ces modèles peuvent être distribués,

semi-distribués ou globaux. La différence réside dans la discrétisation plus ou moins prononcée des données du bassin versant utilisées par le modèle, le modèle global associant une valeur unique aux informations du bassin versant.

a) GRLoiEau2J

Le modèle GRLoiEau2J est un modèle journalier global à 2 paramètres. La figure 2 détaille son fonctionnement.

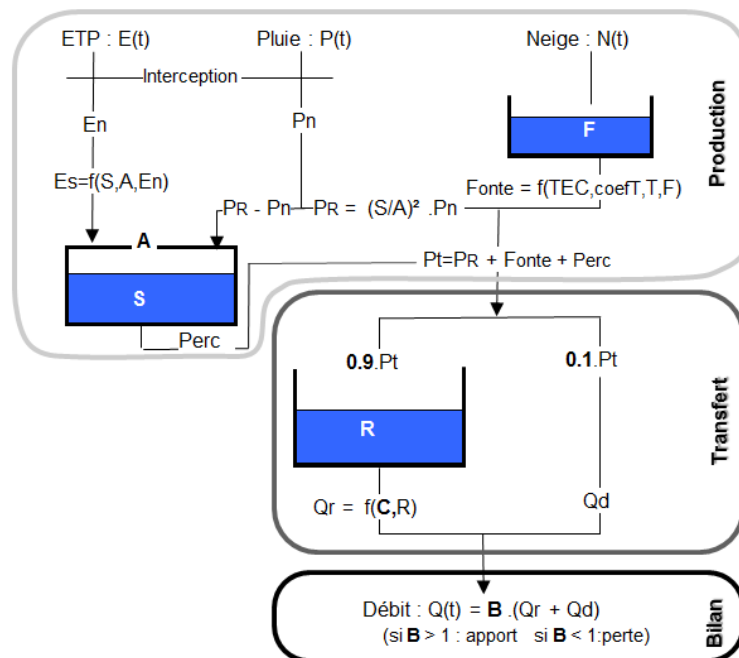


Figure 2 : Schéma de fonctionnement du modèle GRLoiEau2J

La fonction de production détermine quelle est la proportion de précipitation brute en entrée de la fonction de transfert et la fonction de transfert permet une différenciation entre la modélisation de l'écoulement de base et de l'écoulement de surface, avec ici un taux d'écoulement direct fixé à 0.1. Le réservoir de stockage de la pluie liquide est de capacité maximale A, régionalisé sur la France en fonction de l'hydrogéologie (Folton et Arnaud, 2009). Ce réservoir reçoit en entrée la pluie brute moins les pertes dues à l'environnement (transpiration, évapotranspiration, évaporation). La sortie de ce réservoir est le flux souterrain et le surplus du réservoir représente la pluie nette excédentaire. Le réservoir qui stocke la pluie solide est sans limitation de capacité, avec en sorti une quantité d'eau obtenue à partir d'un module de neige à 2 paramètres régionalisés (Folton et al., 2015). Le premier est la température de fonte fixé à -1 °C, et le second est un paramètre régionalisé par massif.

B est un paramètre à optimiser qui corrige le débit en sortie de la fonction de transfert, ce qui assure le bilan en eau. Ce paramètre permet de prendre en compte l'éventuelle surestimation ou sous-estimation des pluies qui sont dues aux approximations de l'évapotranspiration réelle (ETR) ainsi que la présence d'échanges souterrains entre les bassins versants. L'existence de ces échanges souterrains est dû à la méconnaissance de l'étendu réel des bassins versants. Actuellement, elle est obtenue à

l'aide des directions d'écoulements en surface, ce qui permet de délimiter une zone dans laquelle toutes les pluies sont censées se concentrer à l'exutoire. Mais la présence de roches imperméables dans le sol est susceptible de modifier les écoulements ce qui rend la zone estimée incorrecte. De ce fait, de l'eau qui est considérée comme appartenant à un bassin versant peut se retrouver autre part via des écoulements souterrains.

C est un paramètre à optimiser qui représente la capacité maximale du réservoir de transfert. Ce réservoir reçoit 90% de l'eau sortant de la fonction de production. C permet donc de reproduire le temps de réponse des bassins.

b) GRD

Le modèle GRD est un modèle journalier distribué avec au maximum 10 paramètres. La figure 3 détaille son fonctionnement.

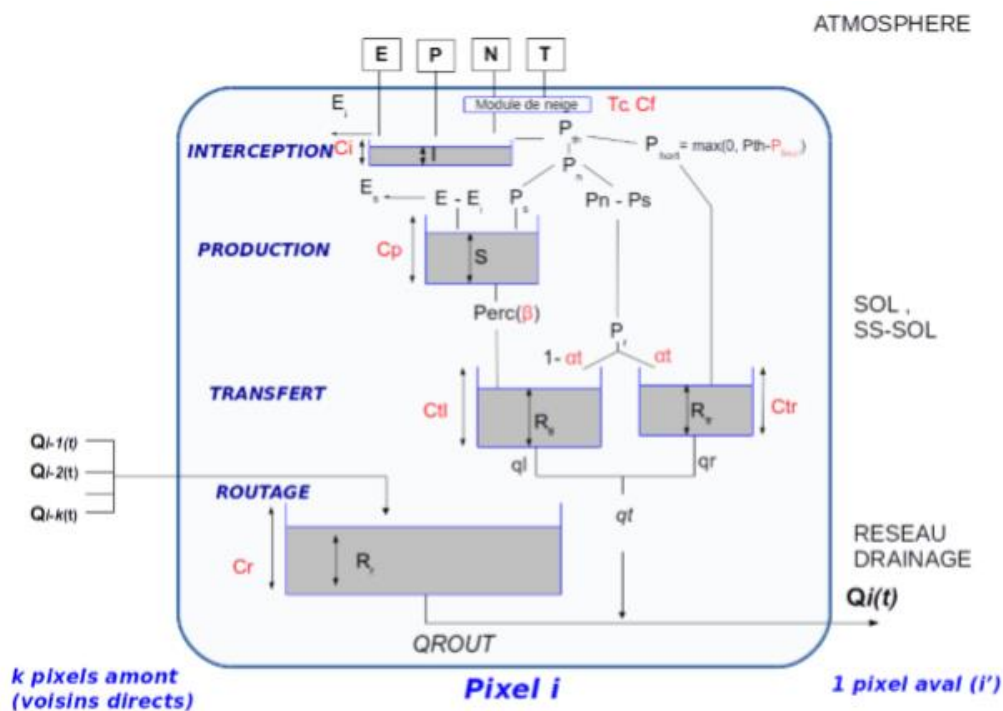


Figure 3 : Schéma de fonctionnement du modèle GRD

GRD est actuellement en développement sous plusieurs versions, qui diffèrent par le nombre de paramètres actif. Ils sont au maximum au nombre de 10 : Température critique (T_c), coefficient de fonte (C_f), capacité du réservoir d'interception (C_i), le seuil au-delà duquel la pluie qui tombe ruisselle entièrement (P_{seuil}), la capacité maximale du réservoir de production (C_p), le coefficient de percolation (β), la capacité maximale du réservoir de transfert lent (C_{tl}) et rapide (C_{tr}), le coefficient de répartition de la précipitation ruisselée (α_t) et la capacité maximale du réservoir de routage (C_r).

La version 7 est utilisée lors de cette étude car elle est actuellement considérée comme la plus performante pour notre contexte, c'est-à-dire la simulation de chroniques de débits journaliers. Cette étude permettra de tester GRD sur un grand nombre de bassins versants car la structure existante n'a

pour l'instant été testé que sur 40 bassins versants. Les paramètres à optimiser sont C_p , C_{tr} , C_{tl} . La percolation et le réservoir de routage sont considérés comme nuls, et α est de 10%.

c) GR4J

Le modèle GR4J est un modèle journalier global à 4 paramètres. La figure 4 détaille son fonctionnement.

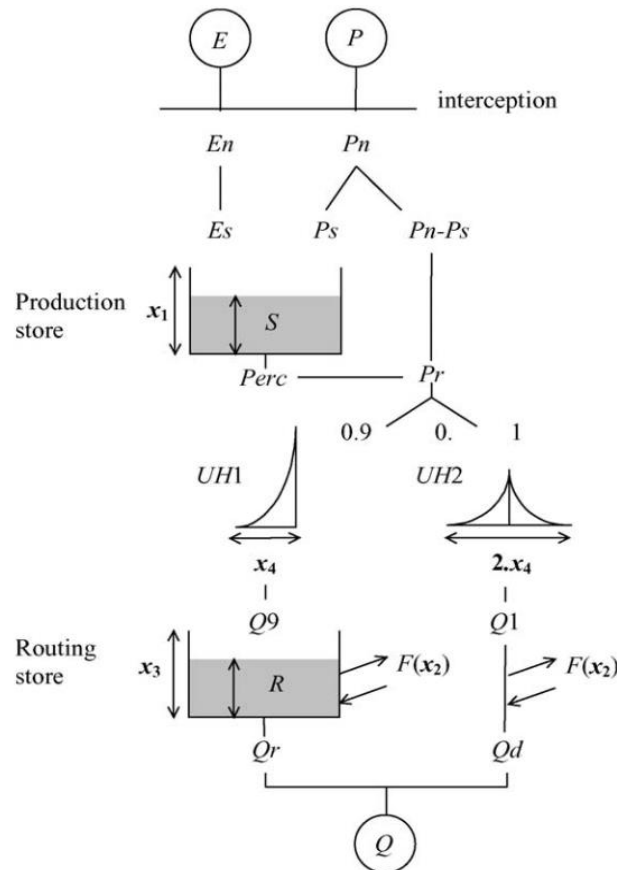


Figure 4 : Schéma de fonctionnement du modèle GR4J (Garcia, 2016)

X_1 est la capacité du réservoir de production et X_3 celle du réservoir de transfert. La particularité de ce modèle est d'inclure une fonction $F(X_2)$ qui simulera les échanges souterrains qui peuvent avoir lieu entre des bassins. De plus, de la même manière que les autres modèles, il y a une séparation des écoulements lents et rapides au niveau de la fonction de production, mais ici, le paramètre X_4 permet de moduler le temps de base des hydrogrammes unitaire UH_1 et UH_2 qui régissent les écoulements. GR4J utilise le modèle CemaNeige (Valéry et al., 2014) développé dans le but d'améliorer la prise en compte de la neige dans les modèles de précipitations.

d) Fonction objectif utilisée

Le but des modèles hydrologiques est de se rapprocher au maximum de la série de données que l'on cherche à reproduire. Le critère utilisé au cours de cette étude est une fonction du KGE : $0.5 \cdot KGE(Q) + 0.5 \cdot KGE(1/Q)$. Ce critère permet d'avoir un équilibre entre la reproduction des débits intenses et des débits faibles (Garcia et al., 2017). En effet, utiliser l'inverse des débits donne plus d'importance aux étiages et utiliser les débits donne plus d'importance aux crues.

e) Utilisation des données de débits

Lors de ce projet, des données de débits (extraits de la Banque Hydro) mesurés en continu à l'exutoire des bassins versants sont utilisées dans les modèles pluie/débit pour réaliser les simulations. Les 691 bassins présélectionnés ont été choisis avant tout pour la qualité de leurs données et la longueur de leurs chroniques. Malgré cela, la présence de lacunes n'est pas rare car toute donnée considérée comme incertaine est mise en lacune (NA).

Les chroniques continues journalières sont la plupart du temps utilisées pour les modèles continus (type GRLoiEau et GR4J). En ce qui concerne les modèles événementiels de crue (comme SHYREG), une autre série de données est utilisée : la série des extrêmes annuels journaliers et instantanés de débits. La procédure CRUCAL de la Banque Hydro permet d'en disposer. Ces extrêmes bénéficient en outre d'une attention plus particulière de la part des gestionnaires des stations hydrométriques et les lacunes sont bien moins fréquentes. Une comparaison entre les débits maximaux journaliers extraits de la chronique continue et ceux mis à disposition par CruCal sera effectuée.

4) Méthodologie d'évaluation

a) Evaluation des données

L'objectif du projet étant d'évaluer la variabilité des modélisations dans leur globalité en fonction de la variabilité des pluies, les critères utilisés seront autant basés sur les étiages que les crues, la saisonnalité ou le bilan.

Tableau 1

| | | |
|----------------------|-----------------------|--|
| Statistique de crues | QJ10 | Débit journalier décennale |
| Statistique d'étiage | QMNA X | Débit mensuel minimale annuel à T=X ans |
| | DC X | Débit caractéristique (valeur dépassé X% du temps) |
| | VCN X(Y) | Volume Consécutif Minimal pour X jours à T=Y ans |
| Module interannuel | QA | Module interannuel |
| Saisonnalité | QMM ₁ à 12 | Débits moyens mensuels de janvier à décembre |

Pour évaluer la saisonnalité ou une chronique entière sur un bassin, le critère de Nash-Sutcliffe est utilisé (Nash and Sutcliffe, 1970), qui estime l'erreur relative entre deux chroniques. Utilisé avec $1/Q$, il donnera plus d'importance aux faibles débits, et utilisé avec Q , il donnera plus d'importance aux forts débits. Ce critère peut varier entre $-\infty$ et, au mieux, 1 et s'écrit :

$$NSE = 1 - \frac{\sum(Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{\sum(Q_i^{obs} - \bar{Q}_i^{obs})^2}$$

Les statistiques d'étiages sont des valeurs uniques pour chaque bassin, le critère de Nash temporel ne peut pas s'appliquer. Pour obtenir une évaluation globale sur l'ensemble des bassins, le critère d'erreur spatiale SIE (Garcia et al., 2017) est calculé. Il s'agit de la transposition spatiale du NSE :

$$SIE = 1 - \frac{\sum(IS_i^{obs} - IS_i^{sim})^2}{\sum(IS_i^{obs} - \bar{IS}_i^{obs})^2}$$

Avec IS_i les valeurs pour chaque bassin de la statistique évaluée.

b) Évaluation des modèles

Un modèle hydrologique se distingue en deux modes : le calage et la validation. Le principe des modèles pluie/débit est de faire varier les paramètres qui sont à optimiser pour obtenir le jeu qui produira la meilleure simulation possible pour le bassin considéré, il s'agit du calage. La validation consiste à tester les paramètres obtenus en calage sur une autre période pour tester la robustesse d'un modèle. Il est d'usage de diviser la période d'étude en deux parties, chacune jouant à tour de rôle le calage et la validation

c) Régionalisation

L'objectif de la régionalisation est de réaliser une modélisation sur un site dépourvu d'informations de débits, ce qui implique de ne pas pouvoir réaliser de calage et donc de ne pas avoir de paramètres. Pour remédier à cela nous utilisons des informations obtenues sur les bassins voisins jaugés. Pour notre étude, les paramètres régionaux ont été obtenus à partir de la méthode LoiEau (Folton et al., 2009). Les résultats reposent sur l'utilisation d'une interpolation spatiale (Idw), avec les paramètres de 11 bassins voisins ayant un poids égal à l'inverse du carré de la distance.

III) Evaluation des précipitations

La série de référence utilisée pour évaluer les données spatiales est la série pluviométrique issue des postes ponctuels du réseau Météo France. Certaines données des pluviomètres étant absentes pour certains jours et pour certaines séries, toutes les valeurs manquantes sur l'une des séries sont propagées sur les valeurs correspondantes des autres séries, pour ainsi limiter les erreurs. Ainsi, il est judicieux de noter que chaque série ne possède pas le même nombre d'informations. Les postes pluviométriques ayant plus de 15% de lacunes sur leurs données journalières ont été supprimés.

Les données pluviométriques présentées sont la somme des pluies liquides et solides.

1) Choix des données spatiales

Pour étudier la variabilité des modélisations de débits, il est préférable de se concentrer sur 2 séries qui présentent le plus de chance de donner de résultats. Deux critères sont pris en compte : la longueur de la série et l'écart de précision entre les deux séries.

Safran est l'une des séries choisies car selon la bibliographie, elle présente une diminution notable de sa précision en haute altitude, et donc une grande variabilité (Gottardi et al., 2012). De plus, sa plage de données est la plus grande de toute.

En ce qui concerne les données radars, il est donc nécessaire de choisir la série avec la meilleure qualité de données.

Les figures 5 et 6 montrent la comparaison des séries Antilope et Reana par rapport à la série pluviométrique sur le cumul de leurs périodes respectives.

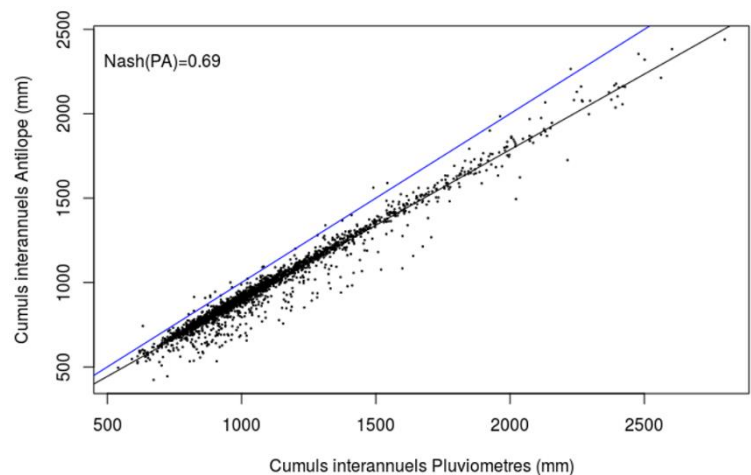
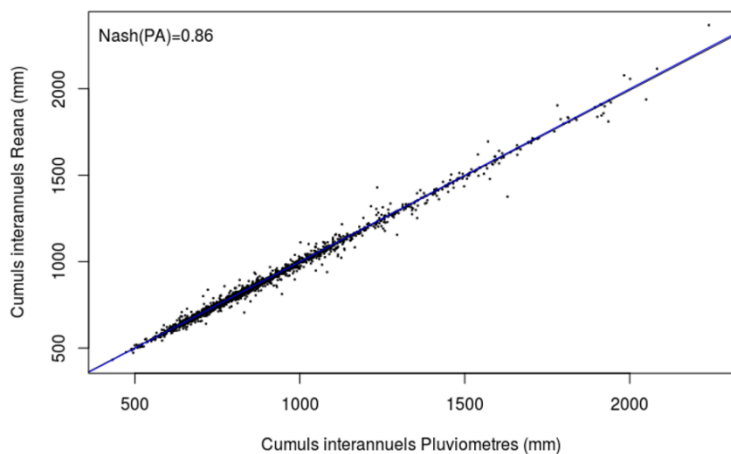


Figure 6 : Comparaison entre la série pluviométrique et la série Réana de 1997 à 2006 pour chaque station pluviométrique

Figure 5 : Comparaison entre la série pluviométrique et la série Antilope de 2007 à 2015 pour chaque station pluviométrique

Le critère de Nash de la série Réana est de 0.86 tandis que celui de la série Antilope est de 0.69. Il n'est donc pas envisageable de procéder à des analyses en couplant les deux séries radars. Coméphore est donc un meilleur candidat vis-à-vis de la longueur de sa période.

La figure 7 montre la comparaison entre les cumuls par postes de la série Coméphore avec les données pluviométriques sur la période 1997-2014.

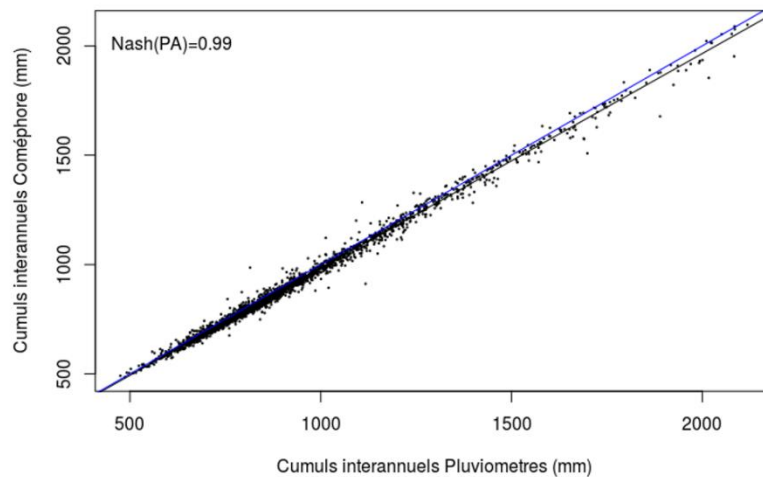


Figure 7 : Comparaison entre la série pluviométrique et la série Coméphore de 1997 à 2015

Il est donc envisageable de travailler sur la série Coméphore, qui est d'une précision supérieure à Reana, avec un critère de Nash de 0.99, tout en présentant l'avantage d'avoir une période plus étendue.

Avant de procéder à la comparaison de la série Safran et Coméphore, ces données doivent être validées. En effet, des valeurs aberrantes peuvent être présentes de manière ponctuelle. Cette variabilité concerne avant tout la série Coméphore plutôt que la série Safran, que l'on peut considérer comme étant déjà validée (Vidal et al., 2010).

Pour analyser les données Antilope, une carte des quantiles 24 heures de période de retour 1000 ans, générée à partir de la méthode SHYPRE, est utilisée. Les pixels sur lesquels les précipitations journalières sont au-dessus de ces valeurs sont considérés comme incertains. Il n'est en revanche pas cohérent de tous les supprimer, car la période d'étude, d'une durée de 20 ans, rend possible l'apparition de tels événements, à hauteur de 2% pour chaque pixel.

Ces données sont recoupées avec la liste des événements historiques exceptionnels, obtenus sur le site de météo France. La méthodologie mise en œuvre consiste à prendre note des précipitations maximales relevées pour chaque département concerné par un événement. Ainsi, toutes les valeurs Coméphore, dépassant le quantile, qui correspondent à un département concerné et à la date de l'évènement ne sont pas supprimées. Mais la valeur historique doit être égale à au moins 80% de la valeur du pixel Coméphore car certains événements ne sont pas suffisamment intenses pour expliquer des valeurs aberrantes. Une marge d'erreur d'un jour entre l'évènement historique et la valeur Coméphore est autorisée, car le site météo France n'est pas toujours précis quant à la plage horaire d'un évènement.

2) Méthode "AURELHY "

Les données de précipitations annuelles provenant des données AURELHY fournis par Météo-France, de 1981 à 2010 permettent d'obtenir une autre information pour évaluer la série Coméphore.

La figure 8 est la carte Coméphore des moyennes interannuelles de la période 1997-2010 et la figure 9 est la carte "AURELHY" des moyennes interannuelles de la période 1980-2010 (site du BRGM, rapport RP-65635-FR)

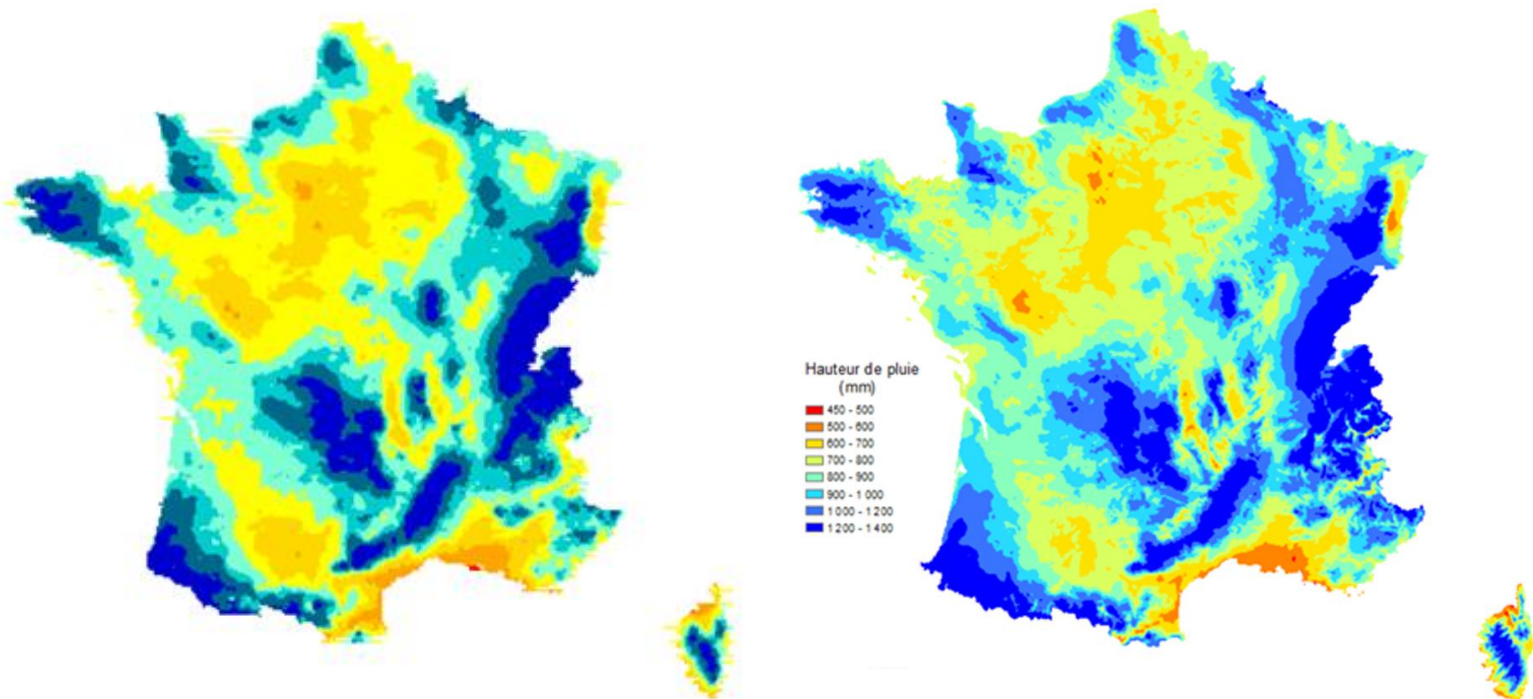


Figure 9 : Moyennes interannuelles des précipitations Coméphore en France de 1997 à 2010

Figure 8 : Moyennes interannuelles des précipitations en France de 1981 à 2010 d'après les données AURELHY fournies par Météo-France

La moyenne est de 892 mm avec un écart-type de 220 mm pour la carte Coméphore contre 925 mm avec un écart-type de 243 mm pour les données AURELHY. Les données de la figure 8 montrent que la moyenne interannuelle sur la France issue de Coméphore sur les pixels correspondant aux pluviomètres est de 908 mm, tandis que la moyenne de la série des pluviomètres est de 923 mm. Les ordres de grandeurs entre Coméphore, AURELHY et les pluviomètres sont cohérents.

Il faut prendre en compte le fait que la période des précipitations utilisée dans les deux cas n'est pas la même et que la répartition des pluviomètres ne permet pas d'obtenir une moyenne sur la France aussi précise qu'avec des données spatiales. Il est donc difficile de dire si AURELHY est plus précise que Coméphore malgré la proximité entre la moyenne de la série pluviométrique et la moyenne de la carte AURELHY.

3) Comparaison entre les séries Coméphore, Safran et Pluviométrique

a) Analyse en fonction de la résolution

En comparant la série Safran avec la série de référence, pour les cumuls de précipitations, le critère de Nash moyen est de 0.74, ce qui est plus faible que Coméphore. Cette différence pourrait s'expliquer par le fait que la série Safran est associée à des zones de 64km², tandis que la série Coméphore est associée à des zones de 1km². L'impact d'une différence de résolution est actuellement inconnu et quantifier le rôle qu'elle joue dans la variabilité des futures modélisations est nécessaire. Pour cela, la série Coméphore 64 km², créé à partir de Coméphore, servira de référence.

Les figures 10 et 11 montrent les rapports des cumuls interannuels sur la période d'étude entre la série Coméphore 64 km² et la série Safran avec la série de référence.

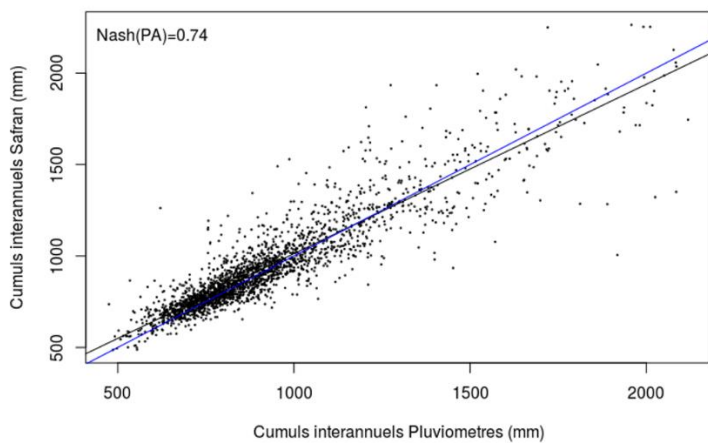


Figure 11 : Comparaison entre la série pluviométrique et la série Safran

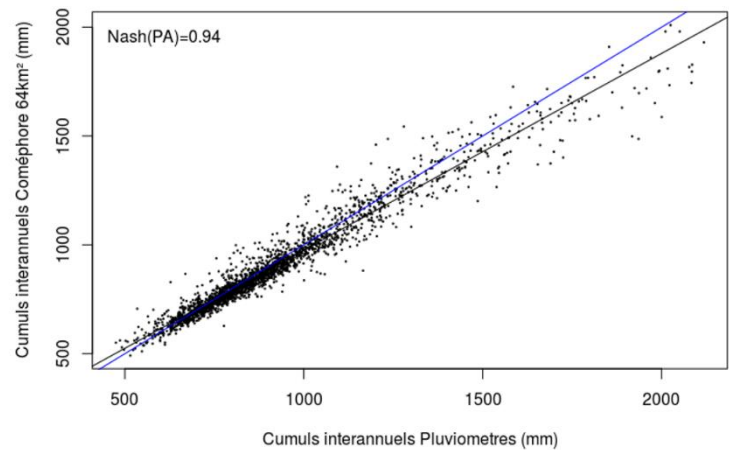


Figure 10 : Comparaison entre la série pluviométrique et la série Coméphore 64km²

Avec un critère de Nash de 0.94 pour Coméphore 64 km² contre 0.99 pour la série originale, la précision de la série Coméphore ne dépend donc pas uniquement de sa résolution, mais il y a effectivement un lien. Les valeurs de Coméphore 64 km sont moins concentrées autour de son axe que les valeurs de Coméphore originel, avec un écart-type de 59 mm contre 21 mm. La série Safran est quant à elle beaucoup plus variable, avec un écart-type de 138 mm.

b) Analyse en fonction de la quantité de précipitations

Les figures 12, 13 et 14 représentent, pour chaque série, le critère de Nash sur les chroniques des stations selon la quantité moyenne de pluie reçue sur la période d'étude. Chaque point représente une valeur de Nash associée à une station.

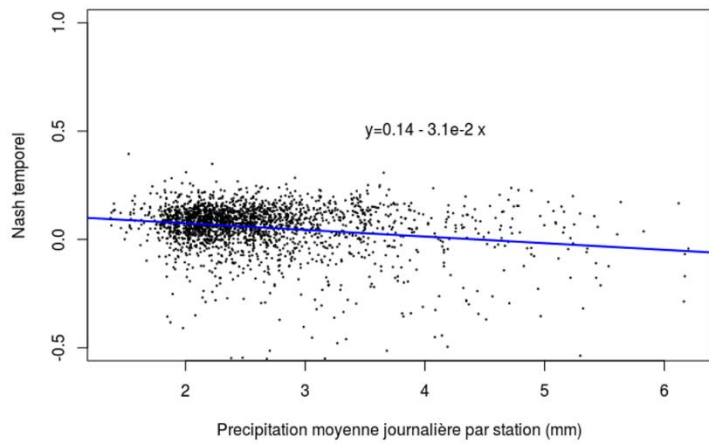


Figure 12 : Evolution du critère de Nash par station entre Safran et les pluviomètres en fonction des précipitations

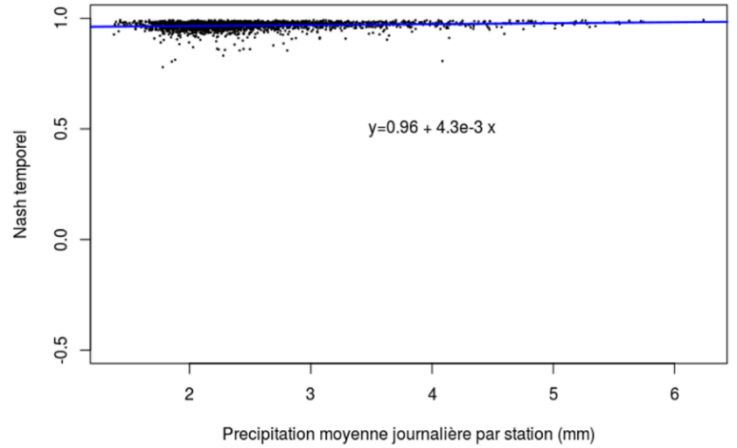


Figure 13 : Evolution du critère de Nash par station entre Coméphore et les pluviomètres en fonction des précipitations

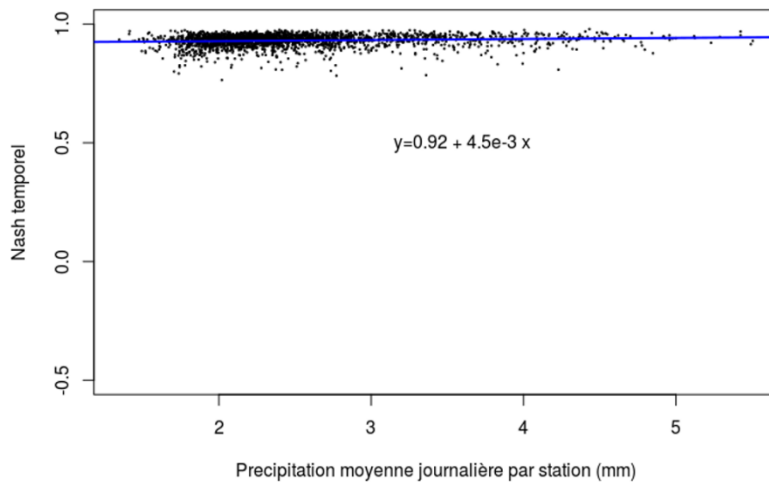


Figure 14 : Evolution du critère de Nash par station entre Coméphore 64 km² et les pluviomètres en fonction des précipitations

Les données Coméphore 1 km² et 64 km² sont très proches des valeurs ponctuelles observées et le critère de Nash en fonction de la quantité de précipitation décroît de manière négligeable. En ce qui concerne Safran, la précision de la série décroît avec la quantité de pluie et les valeurs des chroniques sont au contraire éloignées des pluies observées.

L'étude du critère de Nash montre uniquement si une série s'approche de la référence mais ne précise pas s'il y a une surestimation ou une sous-estimation. Pour compléter le graphique 12, 13 et 14, la

figure 15 représente l'évolution du biais entre la série de référence et les données spatiales en fonction de la quantité de pluie.

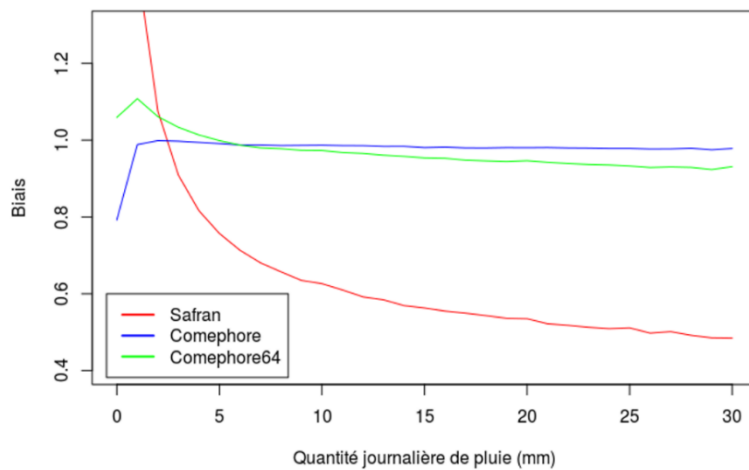


Figure 15 : Biais par intervalle de précipitation entre Safran et les séries Coméphore avec la série de référence

Pour les pluies les plus intenses, les données Safran sous-estime la série de référence, tandis que la série est surestimée pour les pluies les plus faibles. Mais la majorité de la pluie réside dans les intensités faibles, le biais sur Safran ne signifie donc pas que la série Safran est en moyenne plus faible que la série Coméphore, mais qu'elle a du mal à reproduire les pluies les plus intenses.

En ce qui concerne les séries Coméphore, les erreurs les plus importantes sur le biais se situent pour les pluies de l'ordre de 1 mm. De plus, tout comme Safran, les pluies les plus intenses sont sous-estimées mais dans une moindre mesure.

c) Analyse par altitude

Selon la bibliographie, les données Safran devraient être moins précises (Gottardi et al., 2012). La figure 16 représente l'évolution du critère de Nash temporel moyen pour les postes pluviométriques en fonctions de l'altitude, tous les 200 mètres. Les postes à plus de 1500 mètres d'altitude sont regroupés à cause de leur faible nombre.

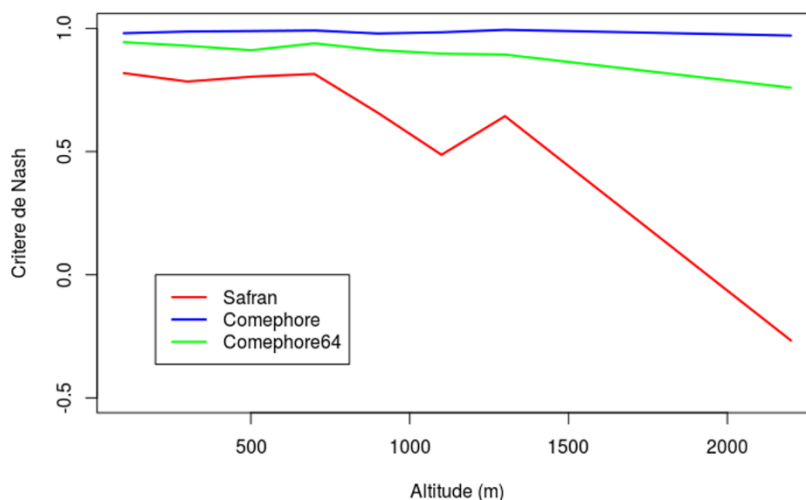


Figure 16 : Evolution du critère de Nash pour Safran et les séries Coméphore en fonction de l'altitude

La série Coméphore semble stable, avec une moyenne de 0.98 et un écart-type de 7.6×10^{-3} . On peut considérer qu'il n'y a pas de perte de précision en altitude. Pour la résolution 64 km^2 , le critère de Nash décroît avec l'altitude de 8.9×10^{-2} par km. En ce qui concerne les données Safran, la précision décroît de 5.1×10^{-1} par km, ce qui n'est pas négligeable. Mais il est difficile de savoir si les résultats en altitude sont exagérés par une forte variabilité due au faible nombre de stations.

Pour compléter la figure 16, la figure 17 montre les valeurs de précipitations pour les postes situés à plus de 1500 mètres.

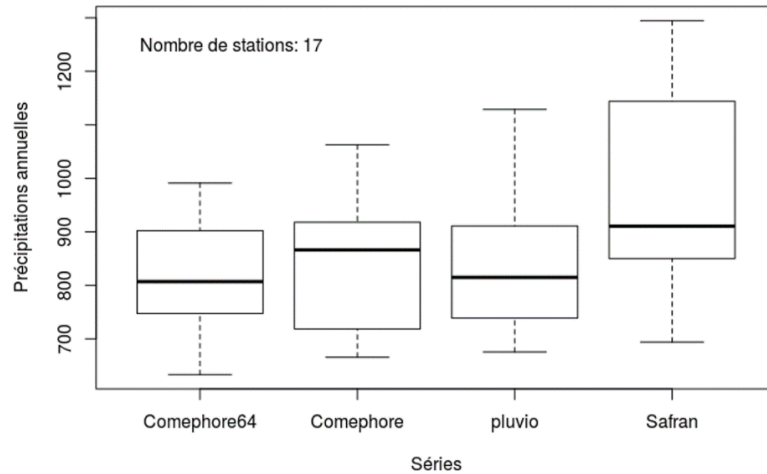


Figure 17 : Données ponctuelles des pluviomètres, Coméphore, Coméphore 64 km^2 et Safran entre 1500 et 3000 mètres d'altitude

Si l'évolution du critère de Nash confirme le manque de précision de la série Safran en haute altitude, il semblerait que les valeurs soient surestimées par rapport aux pluviomètres avec des moyennes pour Coméphore 64 km^2 , 1 km^2 , la référence et Safran respectivement de 826, 839, 836 et 972 mm. Bien qu'il n'y ait que 17 stations, ce qui impose une variabilité importante, la moyenne de Safran est 16% plus élevée que la série de référence.

Il était initialement incertain que les données provenant des pluviomètres et de Coméphore contiennent les pluies solides. Nous pouvons déduire de ces résultats que seul Safran contient des pluies solides. Il sera ainsi intéressant de constater l'impact de ce biais sur les futurs résultats des modèles.

Les graphiques 18, 19 et 20 représentent les critères de Nash pour les chroniques des stations, en fonctions de l'altitude.

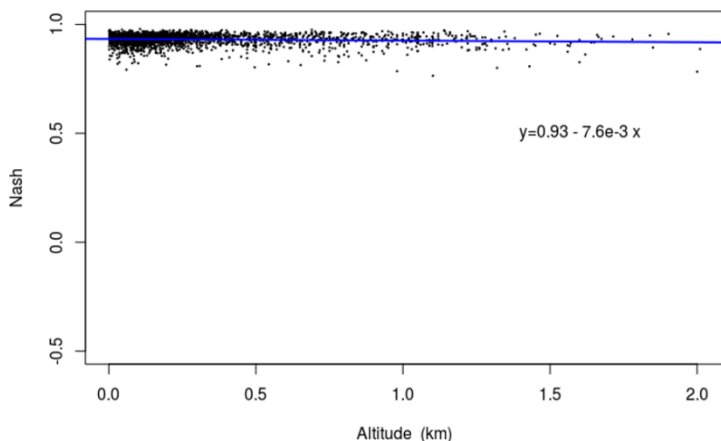


Figure 19 : Evolution du critère de Nash par station entre Coméphore 64 km^2 et les pluviomètres en fonction de l'altitude

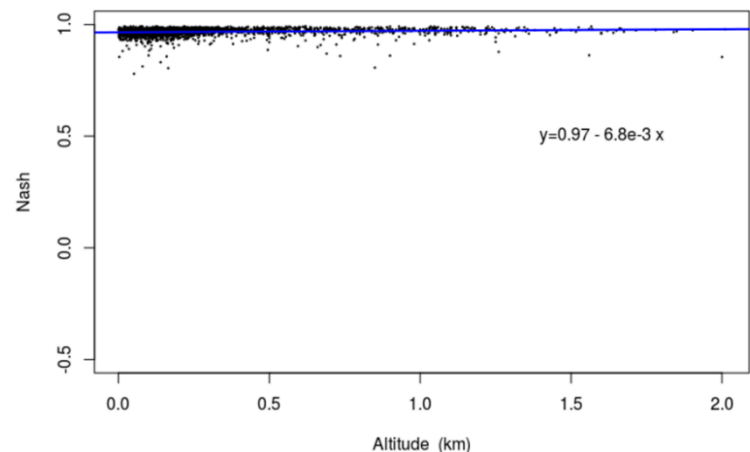


Figure 18 : Evolution du critère de Nash par station entre Coméphore et les pluviomètres en fonction de l'altitude

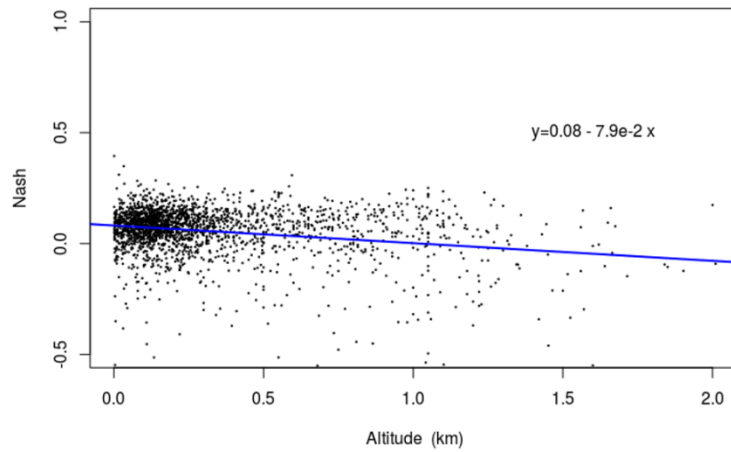


Figure 20 : Evolution du critère de Nash par station entre Safran et les pluviomètres en fonction de l'altitude

La décroissance de la précision de la série de Safran est confirmée par la figure 20, avec une diminution du critère de Nash de 7.9 E-2 par km. Pour les séries radars, la décroissance semble négligeable.

d) Analyse par mois

Procéder à une analyse inter-mensuelle permet de vérifier l'évolution de la précision pour des périodes qui favorisent l'apparition de pluies solides. La figure 21 montre l'évolution du critère de Nash pour les cumuls des données pour chaque mois.

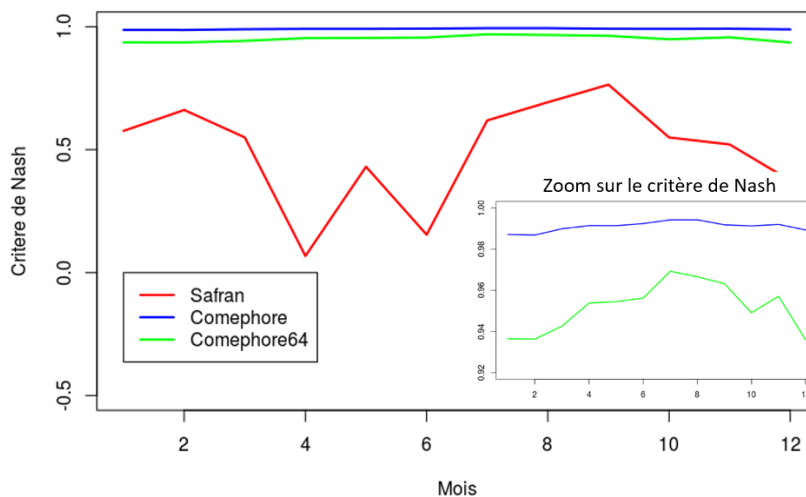


Figure 21 : Evolution du critère de Nash pour Safran et les séries Coméphore en fonction du mois

En ce qui concerne Safran, la forte variabilité en fonction du mois ne permet pas d'obtenir d'information sur le comportement des données lors de périodes favorisant l'apparition de la pluie solide.

Pour les données Coméphore, la précision des données semble être plus faible pour les mois qui favorisent l'apparition de la pluie solide, mais de manière minime, avec une variation de l'ordre de 10^{-2} sur le critère de Nash.

4) Pluies de bassins

Pour les modélisations hydrologiques, les séries Safran, Coméphore 1km^2 et 64 km^2 sont utilisées. Les pluies moyennes de bassins de chaque série sont donc calculées sur les 691 bassins répartis en France métropolitaine. Le modèle GRLoiseau2J prend comme variables d'entrée l'évapotranspiration potentielle, la température et les pluies journalières solides et liquides, or les séries Coméphore ne fournissent que la somme des pluies liquides et solides. Pour obtenir les pluies solides, les proportions entre les pluies solides et liquides pour chaque jour et chaque pixel de Safran sont appliquées aux données Coméphore. Quant au reste des informations, elles sont simplement reprises à l'identique à partir de Safran. Cette étude porte donc intégralement sur la variation des données pluviométriques.

Les figures 22 et 23 montrent le biais entre les pluies de bassins Coméphore et Safran en fonction de l'altitude moyenne des bassins versants et de la surface.

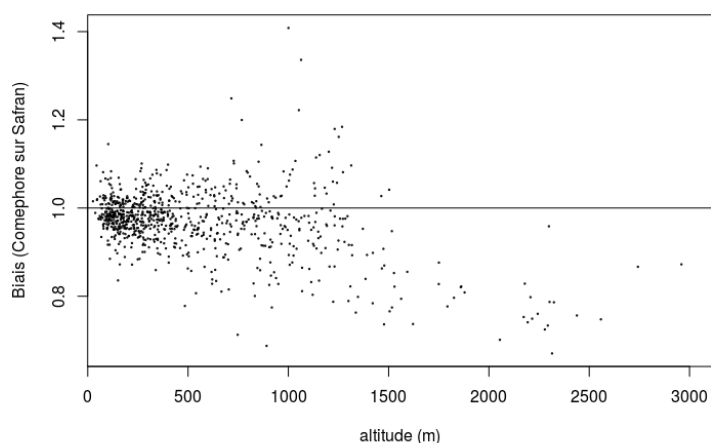


Figure 22 : Biais entre Coméphore Safran pour des pluies de bassins classées en fonction de l'altitude des bassins versants

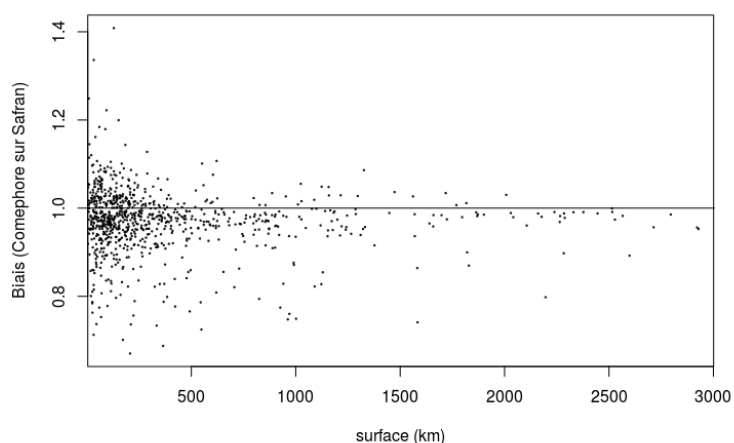


Figure 23 : Biais entre Coméphore et Safran pour des pluies de bassins classées en fonction de la surface des bassins versants

Safran a tendance à surestimer la série Coméphore, surtout pour les bassins situés en haute altitude. En effet, la moyenne des biais est de 0.98 pour les bassins à moins de 500 mètres d'altitude et de 0.78 pour les bassins au-dessus de 2000 mètres d'altitude. Pour les surfaces, les moyennes varient de manière négligeable, ce sont surtout les écart-types qui sont affectés. Pour des bassins en dessous de 100 km^2 , l'écart-type est de 8.5% contre 4.5% pour les bassins supérieurs à 2000 km^2 .

La figure 24 montre le biais entre les pluies Coméphore et Coméphore 64 km² pour des bassins versants en fonction de la surface.

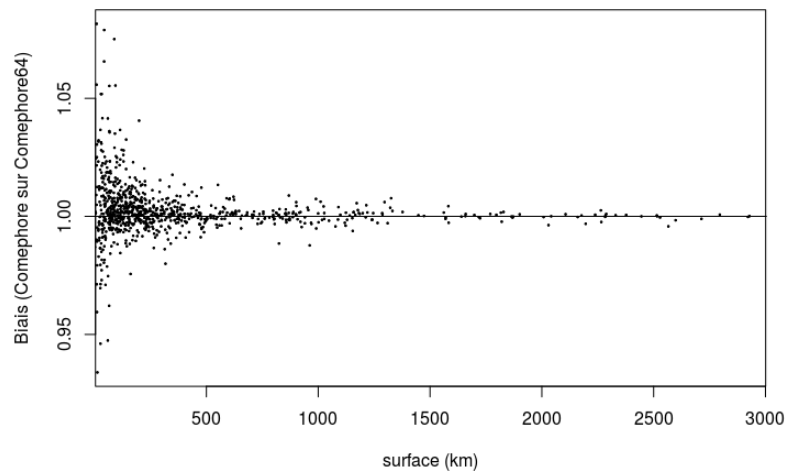


Figure 24 : Biais entre Coméphore et Coméphore 64 km² pour des pluies de bassins classées en fonction de la surface des bassins versants

Coméphore 64 km² a tendance à sous-estimer légèrement la série originale, avec un biais moyen de $1 + 2.7 \text{ E-}3$. Pour des bassins en dessous de 100 km², l'écart-type est de 1.9% contre 0.16% pour les bassins supérieurs à 2000 km². Comme prévu, l'impact d'un changement de résolution est plus important sur les bassins les plus petits, avec une variabilité 10 fois plus importante.

IV) Analyse des modèles GRD, GRLoieau2J et GR4J

La modélisation est appliquée sur 601 bassins au lieu des 691 initiaux. En effet, l'absence de certaines données sur les débits observés ne permet pas d'obtenir des statistiques sur une période assez longue. Les bassins retenus ne comptabilisent pas plus de 10% de lacunes et permettent d'obtenir 10 moyennes annuelles de débits.

En ce qui concerne GRD version 7 (en développement), le modèle donne des résultats hors normes pour certains bassins ou une absence partielle voire totale des valeurs de la série simulée. Ainsi, seuls les bassins obtenant un critère de Nash temporel minimum de -1 sont inclus dans l'étude, soit 574 bassins.

1) Etude des critères Nash en fonction l'altitude et la surface

Le critère de Nash est calculé sur l'ensemble de la chronique des débits journaliers. Mais le modèle GRLoiEau2J ne comporte pas de paramètres simulant le retard de l'écoulement autre que la vidange du réservoir de transfert, les débits simulés peuvent donc ne pas être synchronisés avec les débits observés. Le critère de Nash est donc calculé pour ce modèle sur des chroniques translatées dans le temps de plus ou moins 3 jours.

a) Comparaison entre Coméphore 1km² et 64 km²

Sachant que les écarts sur les biais de pluie entre Coméphore 1km² et 64 km² sont de l'ordre de 2% pour des surfaces inférieures à 50 km², et presque nuls pour d'autres surfaces, les variations sur les débits simulés sont eux aussi attendues comme faibles voire inexistantes.

Les graphiques 25 et 26 montrent l'évolution de la différence entre les critères de Nash journaliers et mensuels des séries Coméphore 1 et 64 km² en fonction de la surface.

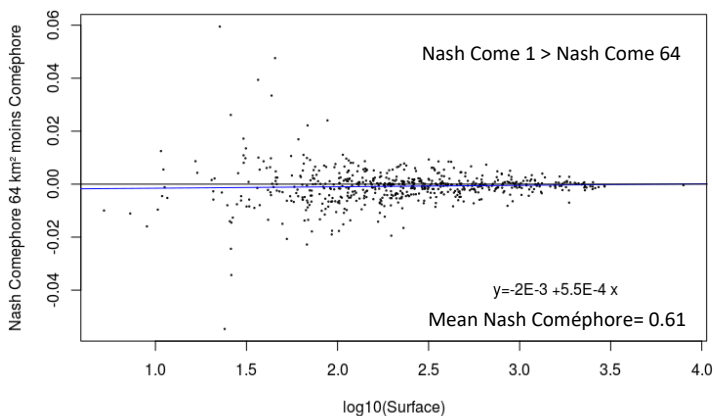


Figure 25 : Différence entre les Nash Coméphore 1 et 64 km² de GRLoiEau2J en fonction de la surface

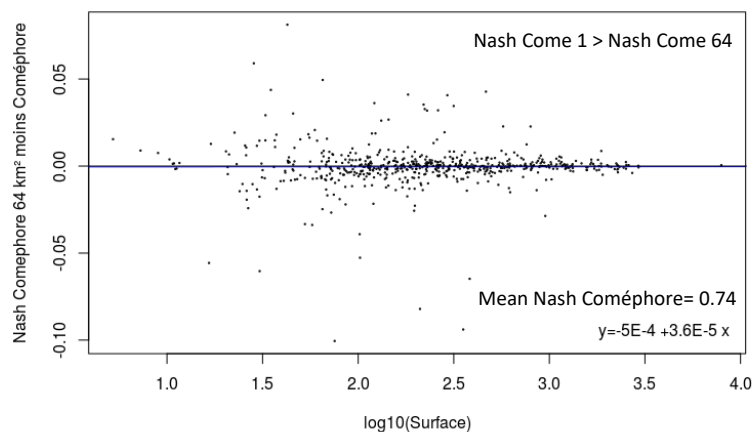


Figure 26 : Différence entre les Nash Coméphore 1 et 64 km² de GR4J en fonction de la surface

La variabilité de la précision sur les débits entre la série Coméphore et Coméphore 64 km² est minimale mais avec une valeur plus importante pour les faibles surfaces. Pour les modèles GR4J, GRLoiEau2J et GRD, les écarts-types du critère de Nash sont de 2 E-2, 1.7 E-2 pour des surfaces inférieures à 50 km², et sont de 2.5 E-3, 1.8 E-3 pour des surfaces supérieures à 1000 km²

Malgré une variabilité 10 fois plus importante pour les surfaces inférieures à 50 km² que pour les surfaces supérieures à 1000 km², la variation du critère de Nash pour les faibles surfaces reste à la fois négligeable et aléatoire.

On remarque que la variabilité de l'erreur ne décroît pas aussi rapidement pour le modèle GR4J que pour GRLoiEau2J. En effet, l'écart-type de l'erreur pour les bassins avec une surface entre 50 et 1000 km² est de 1.2 E-2 pour GR4J et 5 E-3 pour GRLoiEau2J.

b) Comparaison entre Coméphore 1km² et Safran

Les résultats obtenus lors de l'étude des données ponctuelles indiquent que les débits simulés à l'aide de Safran devraient être moins précis en altitude et montrer une variabilité importante pour les bassins avec une surface faible.

Les graphiques 27,28 et 29 montrent l'évolution de la différence entre les critères de Nash des séries Coméphore et Safran en fonction de l'altitude.

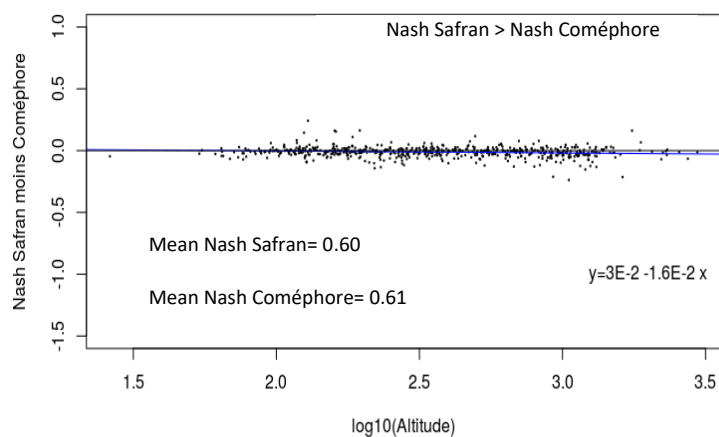


Figure 27 : Différence entre les Nash Safran et Coméphore de GRLoiEau2J en fonction de l'altitude

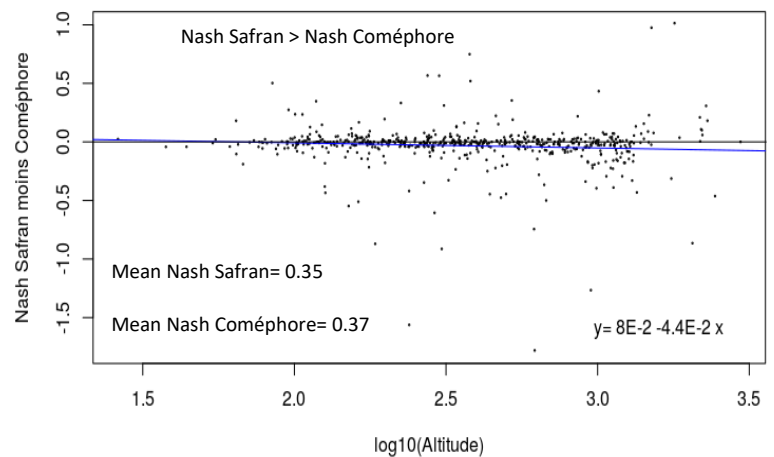


Figure 28 : Différence entre les Nash Safran et Coméphore de GRD en fonction de l'altitude

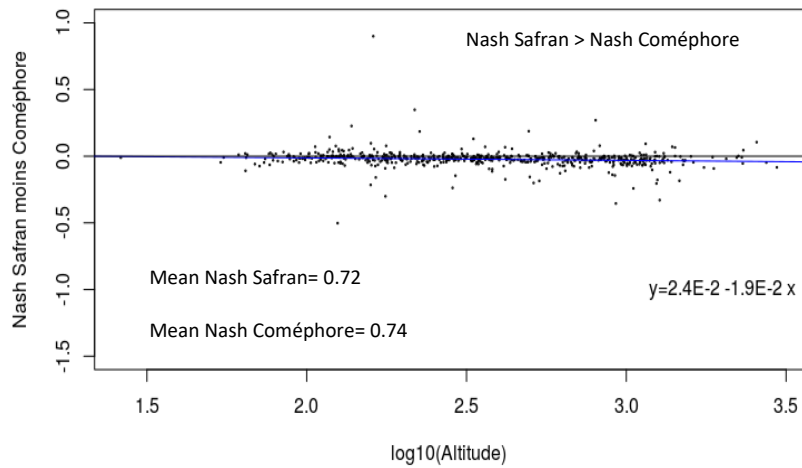


Figure 29 : Différence entre les Nash Safran et Coméphore de GR4J en fonction de l'altitude

On constate une décroissance du critère de Nash de la série Safran en fonction l'altitude par rapport à Coméphore, avec pour GR4J, GRLoiEau2J et GRD respectivement 1.9 E-2, 1.6 E-2 et 4.4 E-2 par unité d'altitude. Mais cela ne concerne pas les bassins à partir de 1500 mètres pour GRD, la plupart étant meilleurs pour la série Safran.

Les graphiques 30, 31 et 32 montrent l'évolution de la différence entre les critères de Nash GR4J, GRLoiEau2J et GR4J des séries Coméphore 1 km² et Safran en fonction de la surface.

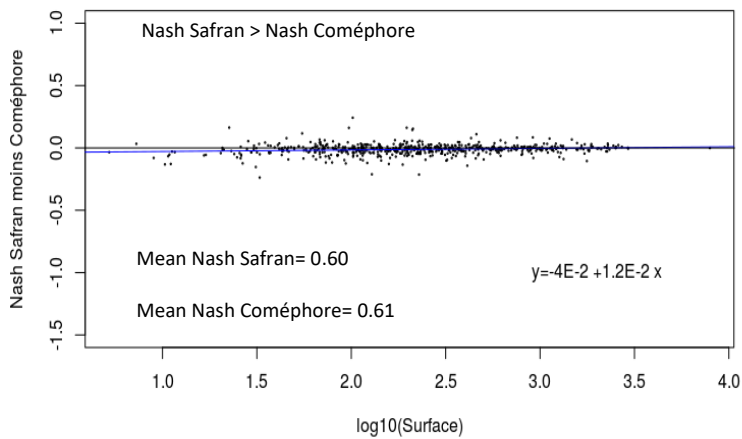


Figure 30 : Différence entre les Nash Safran et Coméphore de GRLoiEau2J en fonction de la surface

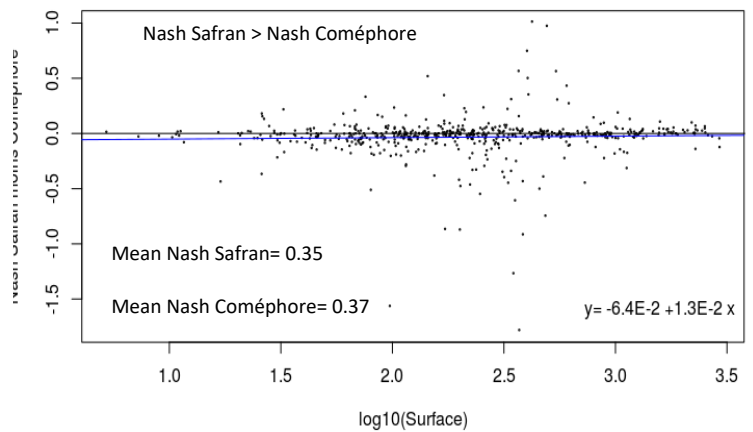


Figure 31 : Différence entre les Nash Safran et Coméphore de GRD en fonction de la surface

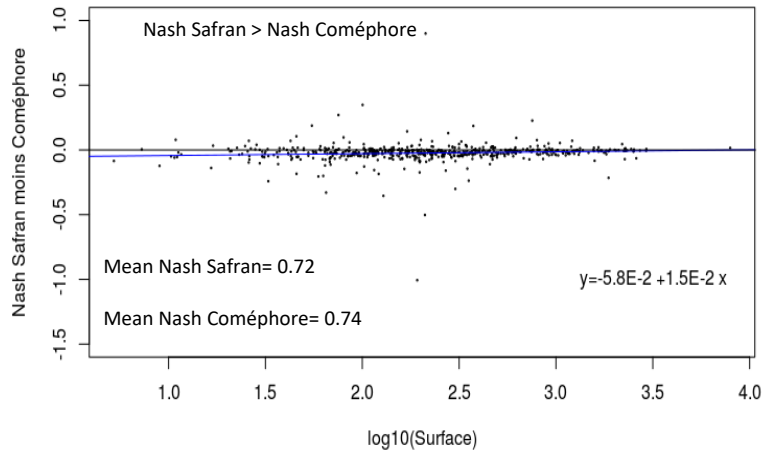


Figure 32 : Différence entre les Nash Safran et Coméphore de GR4J en fonction de la surface

Coméphore a tendance à être meilleur que Safran pour des bassins à faibles altitudes, avec pour GR4J, GRLoiEau2J et GRD une croissance de respectivement 1.5 E-2, 1.2 E-2 et 1.3 E-2 par unité d'altitude

Sur tous les bassins, les moyennes des erreurs sont pour GR4J, GRLoiEau2J et GRD : - 2.8 E-2, -1.4 E-2 et -3 E-2. Il y a donc un léger avantage pour Coméphore, mais qui semble négligeable. Les écarts-types sont quant à eux de : 9.6 E-2, 4.6 E-2 et 0.21. Le problème réside donc majoritairement dans le côté aléatoire de certains bassins.

2) Étude des critères de Nash et des statistiques d'étiages

a) L'ensemble des bassins

Si l'on regarde les résultats sur l'ensemble des bassins, sur les figures 33,34 et 35, les différences entre l'utilisation de Coméphore, Coméphore 64 km² ou Safran ne sont pas significatives, peu importe le modèle. Les statistiques représentées sont : la médiane des Nash sur les débits journaliers, la médiane des Nash sur les débits saisonniers ainsi que les Nash spatiaux sur les statistiques QMN5, VCN3_5, VCN10_5, DC97 et QMA.

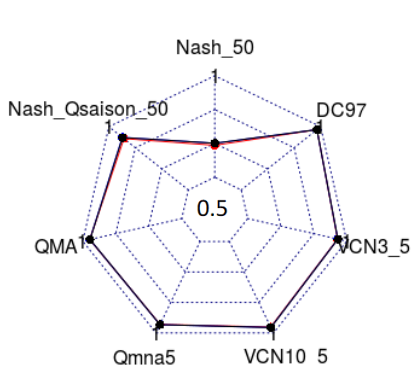


Figure 33 : Critère de Nash des statistiques GRLoiEau2J pour tous les bassins

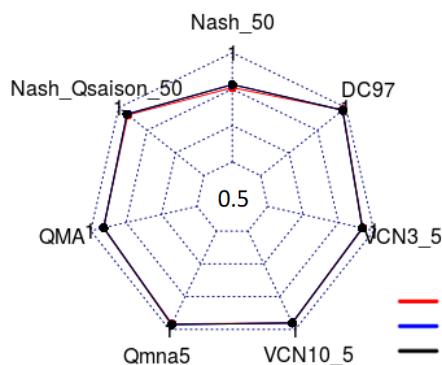


Figure 35 : Critère de Nash des statistiques GR4J pour tous les bassins

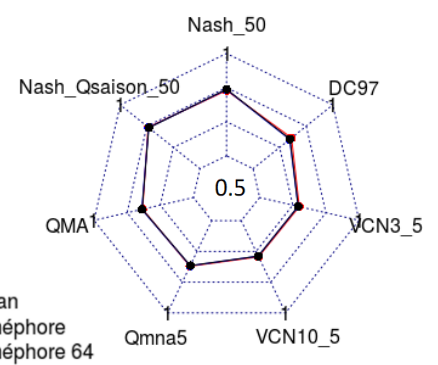


Figure 34 : Critère de Nash des statistiques GRD pour tous les bassins

Les statistiques sont légèrement en faveur de Coméphore, avec une différence entre les médianes des critères de Nash temporel pour GRLoiEau2J, GR4J et GRD de 1 E-2, 2 E-2 et 1.2 E-2. Les statistiques d'étiages sont aussi sensiblement identiques.

Pour la suite, l'échantillon de bassin est divisé selon les altitudes, les surfaces et selon le régime hydrologique. Les tableaux de l'annexe 1 sont le résultat de cette étude.

b) Les altitudes

L'étude des précipitations a montré que les écarts entre Coméphore et Safran étaient le plus important dans des conditions de hautes altitudes. Seuls les modèles GR4J et GRD montrent des résultats intéressants pour les bassins ayant une altitude supérieure à 1500 mètres.

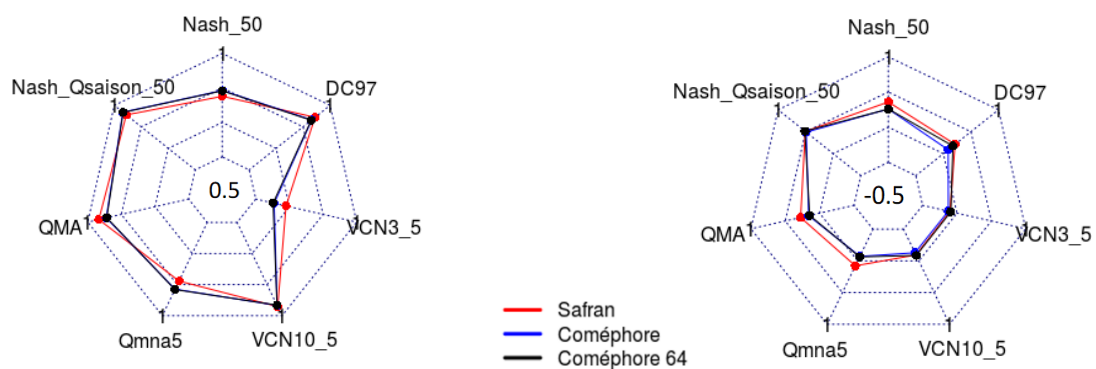


Figure 37: Critère de Nash des statistiques GR4J pour les bassins avec une altitude supérieure à 1500 mètres (22 bassins)

Figure 36 : Critère de Nash des statistiques GRD pour les bassins avec une altitude supérieure à 1500 mètres (22 bassins)

En ce qui concerne GR4J, le résultat est mitigé, avec d'un côté Coméphore étant meilleur pour les Nash temporels et le QMNA5 (respectivement de 4 E-2 et 6 E-2), et d'autre part Safran étant meilleure pour le QMA, VCN3 et DC97 (respectivement 5 E-2, 8.3 E-2, 3 E-2). En ce qui concerne GRD, les résultats sont meilleurs avec la série Safran, allant de + 2 E-2 à + 0.14.

Ces premiers résultats semblent indiquer que l'objectif d'une modélisation, que ce soit pour calculer un débit caractéristique ou un bilan, peut avoir un impact dans le choix de la donnée pluviométrique à utiliser.

c) Les surfaces

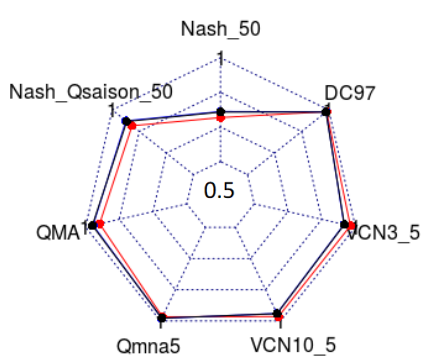


Figure 38 : Critère de Nash des statistiques GR4J pour les bassins avec une surface inférieure à 20 km^2 (13 bassins)

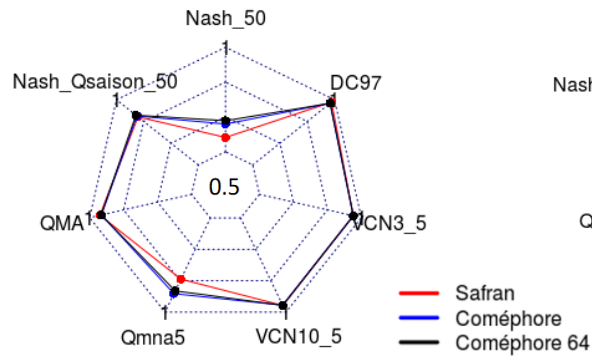


Figure 40 : Critère de Nash des statistiques GRLoiEau2J pour les bassins avec une surface inférieure à 20 km^2 (13 bassins)

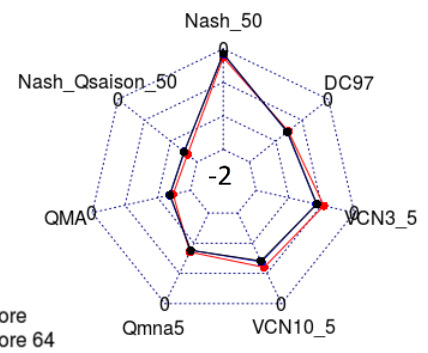


Figure 39 : Critère de Nash des statistiques GRD pour les bassins avec une surface inférieure à 20 km^2 (13 bassins)

Les bassins avec une surface inférieure à 20 km^2 sont les plus prometteurs pour évaluer des écarts entre Coméphore 1 et 64 km^2 , mais les résultats ne montrent pas de résultats significatifs. En revanche les variations entre Coméphore et Safran sont intéressantes, avec globalement une baisse de performance pour Safran sur l'ensemble des modèles, mise à part pour le VNC3 et le CVN10, avec pour GR2LoiEauJ, GR4J et GRD des écarts allant jusqu'à respectivement 7.7 E-2 , 5.3 E-2 et 9 E-2 .

Les statistiques VCN3 et VCN10 sont soit de qualités égales, soit légèrement meilleures.

d) Régime hydrologique

Parmi les régimes hydrologiques étudiés, les bassins pluviaux représentent 75% de l'échantillon. Les résultats sont approximativement identiques à l'ensemble des bassins, soit une faible variation des critères en fonction de la donnée pluviométrique en entrée.

Les bassins uniformes obtiennent eux aussi de faibles variations pour GR4J et GRLoiEau2J mais ce n'est pas le cas pour GRD. Mais parmi les bassins qui ont été rejetés sur GRD, 50% sont des bassins uniformes. Sachant que seuls 7% de l'échantillon initial sont des bassins uniformes, il est peu probable que cette répartition soit le fruit du hasard. Ainsi les résultats de GRD sur les bassins uniformes ne sont pas pris en compte, malgré le fait que le reste des bassins uniformes obtiennent des résultats dans la moyenne (par rapport à l'ensemble des bassins de GRD), l'instabilité du modèle rendant incertaine l'évaluation des bassins uniformes.

Les bassins nivaux montrent des résultats intéressants pour GR4J et GRD. Les figures 41, 42 et 43 montrent les statistiques des modélisations sur les bassins nivaux.

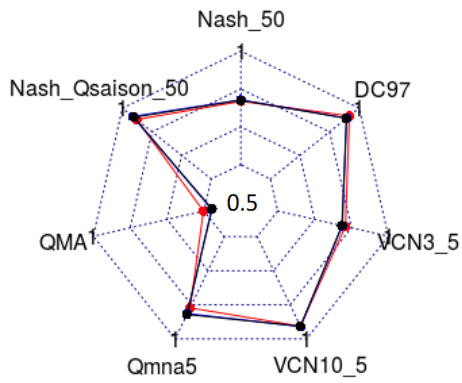


Figure 43 : Critère de Nash des statistiques GR4J pour les bassins nivaux

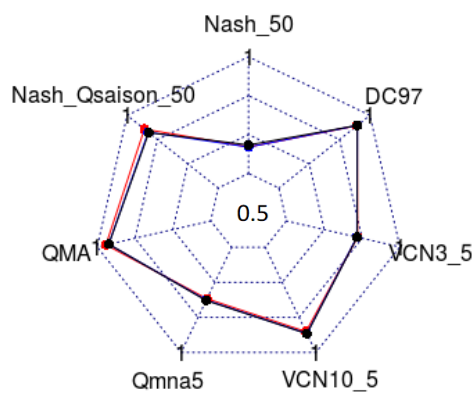


Figure 42 : Critère de Nash des statistiques GR2LoiEauJ pour les bassins nivaux

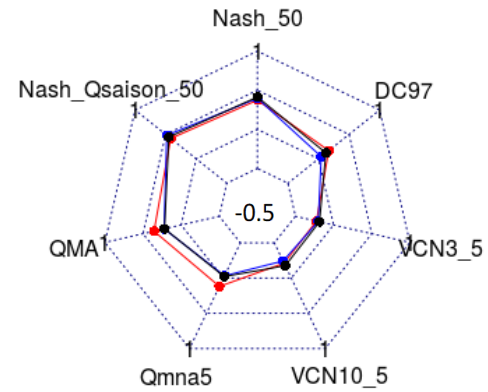


Figure 41 : Critère de Nash des statistiques GRD pour les bassins nivaux

En ce qui concerne GR4J, le QMA est meilleur de 5×10^{-2} pour Safran et le QMNA est meilleur de 4×10^{-2} pour Coméphore. Le reste des statistiques sont similaires. Pour GRD, le modèle est à l'avantage de Safran surtout pour le QMA (+0.13) et le QMNA (+0.15). Le fait que la pluie solide soit présente sur la série Safran ne semble pas être un avantage significatif pour les 2 modèles hydrologiques continus. Ce phénomène peut s'expliquer par l'étude des paramètres.

La figure 44 représente les valeurs du paramètre B du modèle GR2LoiEauJ en fonction de l'information pluviométrique en entrée. Seul GR2LoiEau sera étudié car il s'agit du modèle le plus simple et qui présente les différences les plus faibles entre Safran et Coméphore (figure 41).

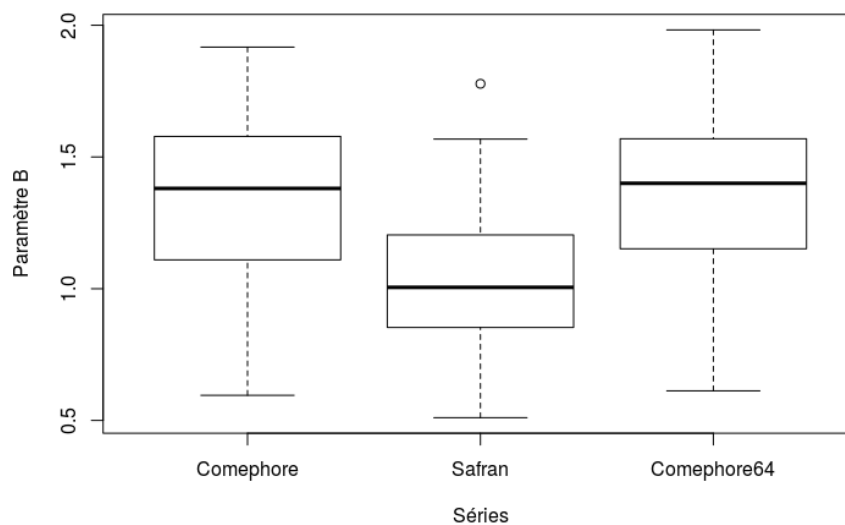


Figure 44 : Paramètre B pour Safran, Coméphore et Coméphore 64 km² pour des bassins nivaux (32 bassins)

Les médianes du paramètre B de Safran et Coméphore 1 et 64 km² sont 1, 1.38 et 1.40. Le biais causé par la neige sur la série Coméphore est donc compensé à la sortie de la fonction de transfert de GR2LoiEauJ par le rehaussement de l'hydrogramme. Si l'on regarde au niveau de l'ensemble des bassins, il n'y a en moyenne pas de différence entre Safran et Coméphore pour le paramètre B (voir annexe 3).

Pour finir, les bassins méditerranéens montrent les résultats les plus intéressants, avec des variations non négligeables pour l'ensemble des modèles.

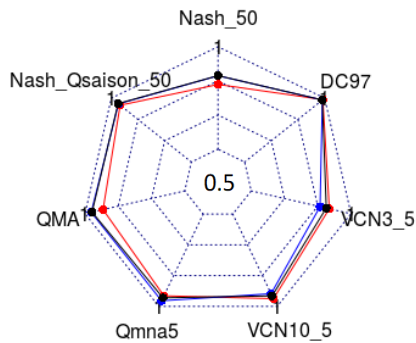


Figure 45 : Critère de Nash des statistiques GR4J pour les bassins méditerranéens

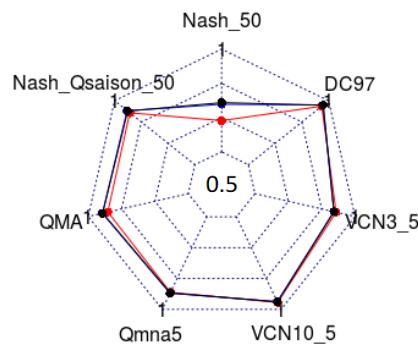


Figure 46 : Critère de Nash des statistiques GRLoiEau2J pour les bassins méditerranéens

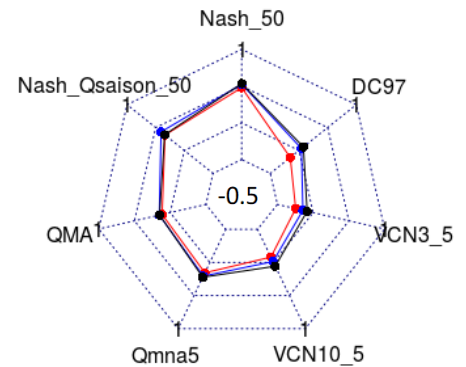


Figure 47 : Critère de Nash des statistiques GRD pour les bassins méditerranéens

Coméphore est globalement meilleure, excepté pour le VCN3 et le VCN10 de GR4J, avec des améliorations pour GRLoiEau2J, GR4J et GRD allant jusqu'à respectivement + 8 E-2, 7.3 E-2 et 0.16.

V) Efficacité des modèles vis-à-vis de la restitution d'un quantile de crue journalière

Dans cette partie, il n'est pas nécessaire de comparer les résultats entre Safran et Coméphore. En effet, nous ne nous intéressons ici qu'à l'efficacité des modèles à reproduire un quantile de crue journalière. La série de pluie SAFRAN est utilisée de 1970 à 2015 pour les modélisations car elle possède la période la plus longue.

1) Évaluation en critère de crue

Le modèle GRLoiEau2J a été développé dans l'objectif de reproduire correctement le bilan, la saisonnalité et les statistiques d'étiages sans dégrader les hautes eaux. Mais son efficacité vis-à-vis des forts débits journaliers n'a pas encore été testée et n'avait pas été intégrée dans l'objectif de développement du modèle.

Le modèle GR4J quant à lui a été développé pour reproduire l'ensemble de la chronique des débits journaliers.

Le quantile de crue retenu est le QJ10, c'est-à-dire le débit journalier maximal de période de retour 10 ans. Il est obtenu après ajustement des débits journaliers maximums à une loi exponentielle bornée. Il a été calculé sur la chronique continue des débits journaliers, mais aussi sur l'échantillonnage des maximums journaliers extraits de la procédure CruCal. La figure 48 permet de montrer les différences entre ces deux estimations du QJ10.

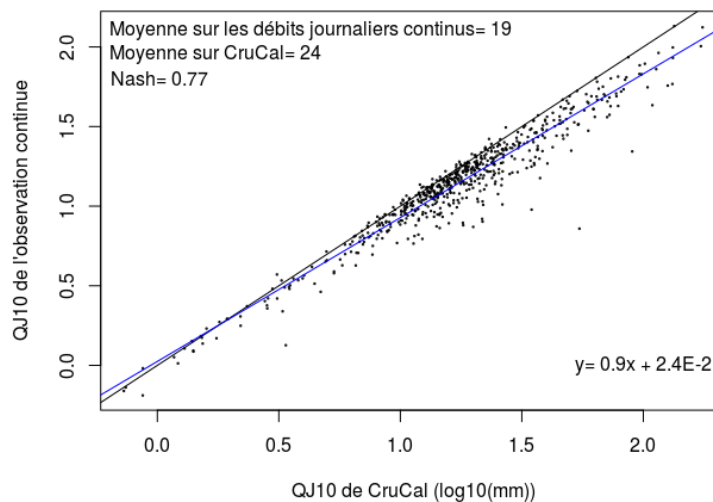


Figure 48 : Rapport entre les QJ10 de l'observation continue et les QJ10 de CruCal

On note une sous-estimation importante et systématique du QJ10 calculé à partir de la chronique continue des débits journaliers à celui calculé sur les maximums journaliers annuels extraits de la procédure CruCal. Comme énoncé plus haut, la série continue des débits journaliers comportent des lacunes qui ne permettent pas d'extraire correctement les maximums annuels, mais c'est de cette information que les modèles disposent. En étudiant les stations avec les erreurs relatives les plus

importantes, il est mis en évidence que la majorité des pics de crues sont manquants. Sur ces stations, de tels écarts au niveau des QJ10, allant jusqu'à un rapport de 1 pour 5, il n'est pas envisageable d'utiliser les modélisations pour réaliser des critères de crues.

La figure 49 montre le rapport entre les maximums annuels de l'observation continue et de CruCal pour la station Y5215020 entre 1970 et 2015. Il s'agit d'un bassin pluvial d'une surface de 33 km² et situé à 41 mètres d'altitude.

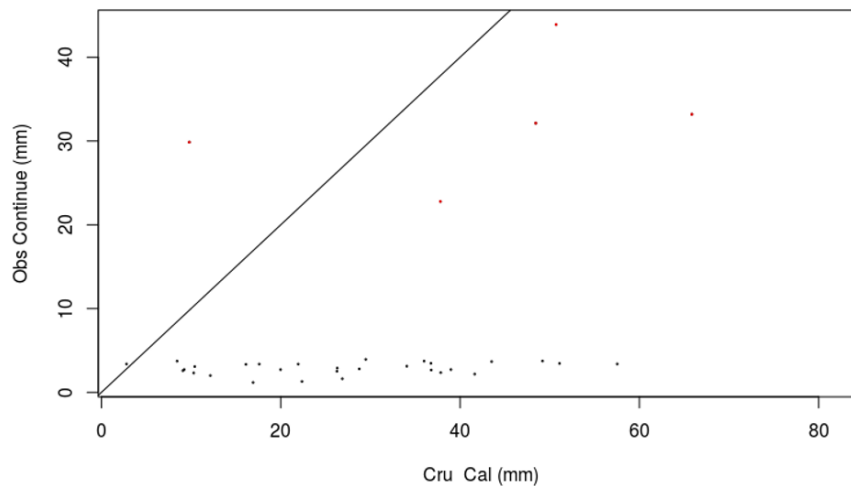


Figure 49 : Rapport des maximums annuels entre CruCal et l'observation continue pour le bassin Y5215020

De tels écarts ne peuvent pas être dus à de simples erreurs aléatoires, ce qui indique que certaines stations ne sont simplement pas adaptées à mesurer des débits trop importants. En effet, les points rouges, qui représentent les débits maximums à partir de 2008, sont bien plus proche de CruCal qu'avant 2008, ce qui indique que la technique de mesure a été améliorée de manière à limiter l'erreur sur les débits les plus forts. Bien que le résultat ne soit pas parfait, le constat est sans appel, avec avant 2008 une moyenne pour l'observation continue et CruCal de respectivement 26.9 et 2.4 mm, et à partir de 2008, une moyenne de 49.1 et 32.4 mm.

2) Comparaison en calage avec CruCal

Précédemment les modèles ont été calés avec une fonction objectif permettant de remplir les conditions d'évaluation définies dans notre contexte d'étiage. Dans le contexte des crues, il est préférable d'utiliser un critère plus approprié sur l'ensemble des débits, soit le KGE sur les débits. Les modèles ont donc tous été calés sur ce critère pour l'évaluation de leur comportement en hautes eaux.

L'annexe 2 montre la carte de la France métropolitaine de l'erreur relative des QJ10 de GR4J, GRLoiEau2J et l'observation continue par rapport à la série de référence CruCal. Les figures 50 et 51 résument les erreurs relatives présentées en annexe 2 pour les 2 modèles hydrologiques continus.

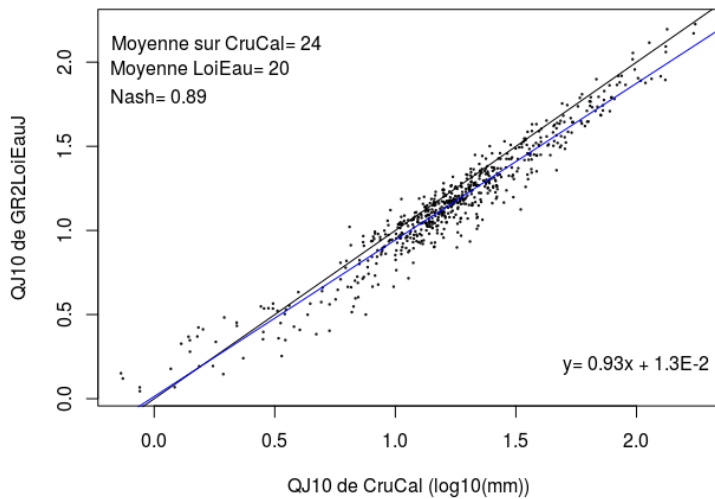


Figure 51 : Rapport entre les QJ10 obtenus à partir de CruCal et GRLoiEau2J pour tous les bassins

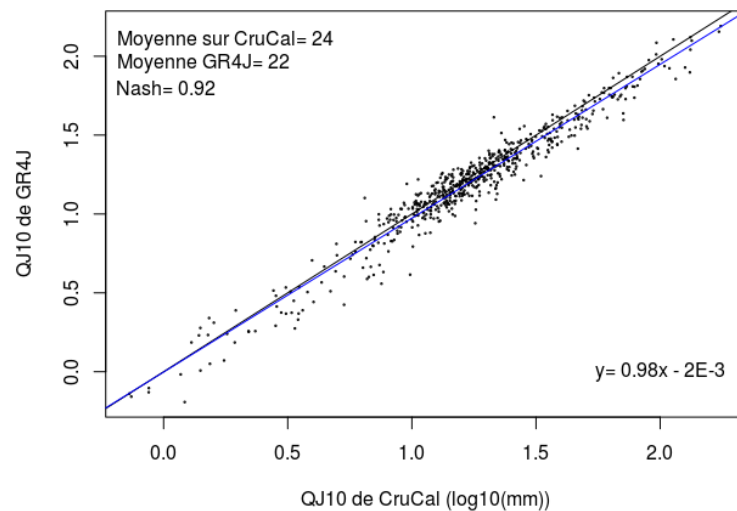


Figure 50 : Rapport entre les QJ10 obtenus à partir de CruCal et GRLoiEau2J pour tous les bassins

La moyenne des erreurs sur le quantile QJ10 à partir de l'observation continue, de GR4J, de GRLoiEau2J et de GRD sont respectivement de 0.24, 0.15, 0.20 et 0.34. Bien que l'observation des débits continus ne soit pas satisfaisante du point de vue des crues, il était attendu que les modèles hydrologiques donnent de meilleurs résultats. Le fait que la série de précipitation SAFRAN contienne les pluies qui correspondent aux débits de crue absents de l'observation continue permet de penser que les modèles sont capables de modéliser ces débits de crues mis en lacune. Il y a effectivement une amélioration avec les modèles GRLoiEau2J et GR4J mais le modèle GRD, quant à lui, dégrade sensiblement les résultats.

Les figures 52 et 53 montrent le rapport entre les QJ10 de GR4J et GRLoiEau2J avec l'observation continue.

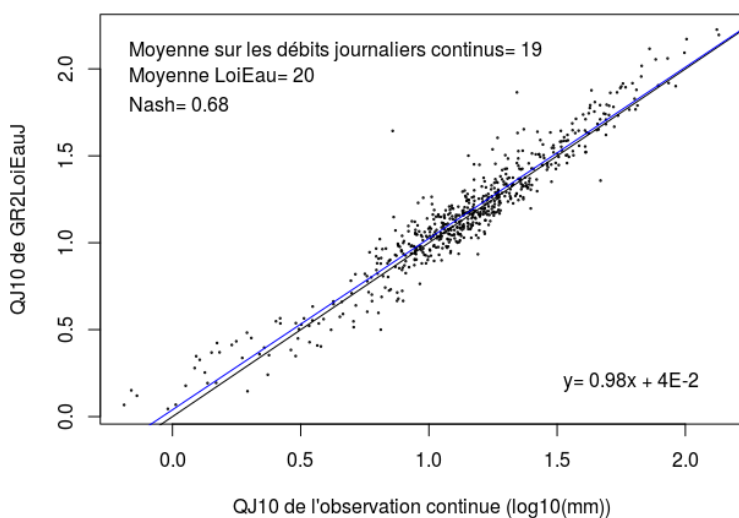


Figure 53 : Rapport entre les QJ10 observés et ceux obtenus à partir de GRLoiEau2J pour tous les bassins

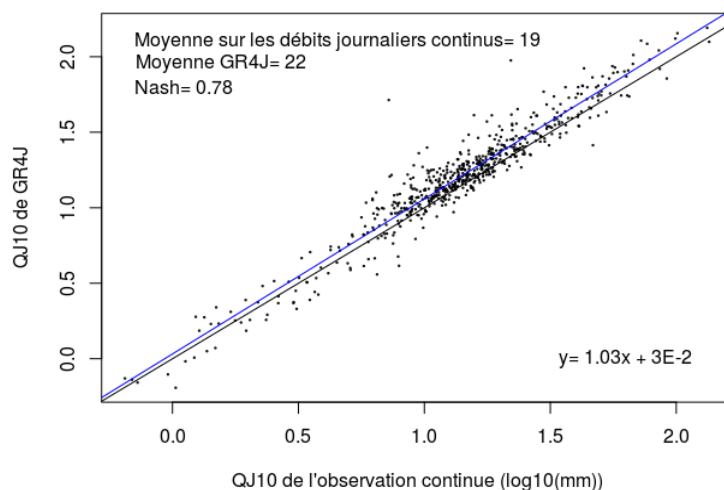


Figure 52 : Rapport entre les QJ10 observés et ceux obtenus à partir de GR4J pour tous les bassins

Ce qui nous intéresse dans ces figures sont les QJ10 les plus importants. On remarque que pour les QJ10 observés supérieurs à 50 mm (soit $x=1.7$), les modélisations de GR4J et GRLoiEau2J sont supérieures à l'observation, avec respectivement des médianes de 88.2, 78.9 et 62.1 mm. Cela implique que les modèles ne semblent pas sous-estimer les débits les plus forts. Il y a au contraire en général une surestimation des crues, probablement causée par le fait que les données de précipitations en entrée contiennent plus d'information que l'observation continue des débits.

Ainsi, les modèles sont capables de reproduire globalement les QJ10, comme l'indique les critères de Nash respectivement de 0.89 et 0.92, malgré les lacunes contenues dans les séries d'observations continues qui servent à la calibration des modèles. Les modèles sont bien plus éloignés de l'observation continue, avec un critère de Nash de 0.68 et 0.78

3) Régionalisation

Nous plaçons cette fois ci les bassins dans un contexte non jaugé. Le but est de comparer le quantile régional (QJ10) suivants plusieurs modélisations régionalisées, à savoir le modèle GRLoiEau2J et GR4J régionalisés et la méthode SHYREG (Arnaud et al., 2016) plus spécifiquement dédiée à la prédétermination des crues et développée par IRSTEA.

Les modèles GRLoiEau2J et GR4J sont régionalisés de façon identique et avec les mêmes informations. Leur régionalisation repose sur les 691 bassins versants utilisés précédemment. La méthode IDW permet d'interpoler spatialement les paramètres des deux modèles et de prédire les valeurs des paramètres sur des zones dépourvues d'information (bassin dits non jaugés). SHYREG est une méthode régionalisée. Sa régionalisation est décrite dans (Odry, 2017).

La validation des modèles régionaux est effectuée sur un échantillon de 994 bassins non jaugés sélectionnés à partir de la BNBV (Base Nationale des Bassins Versants), représentatif de l'ensemble des 691 bassins étudiés, en terme d'altitudes et de surface.

Les figures 64 et 65 montrent les rapports entre le quantile régional QJ10 simulé par SHYREG, avec celui de GRLoiEau2J et GR4J pour chaque bassin versant non jaugé.

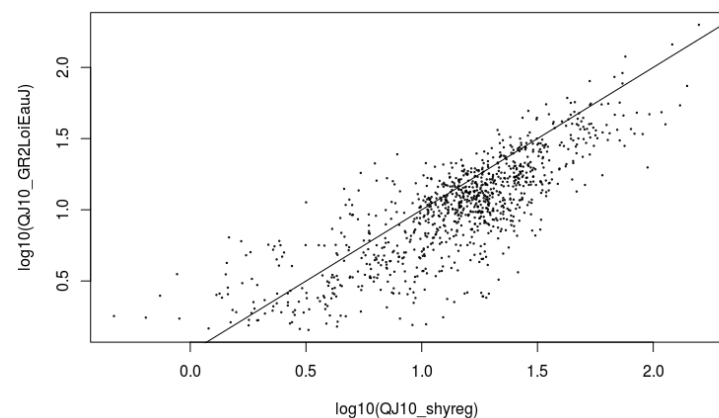


Figure 54 : Rapport entre les QJ10 de Shyreg et GRLoiEau2J

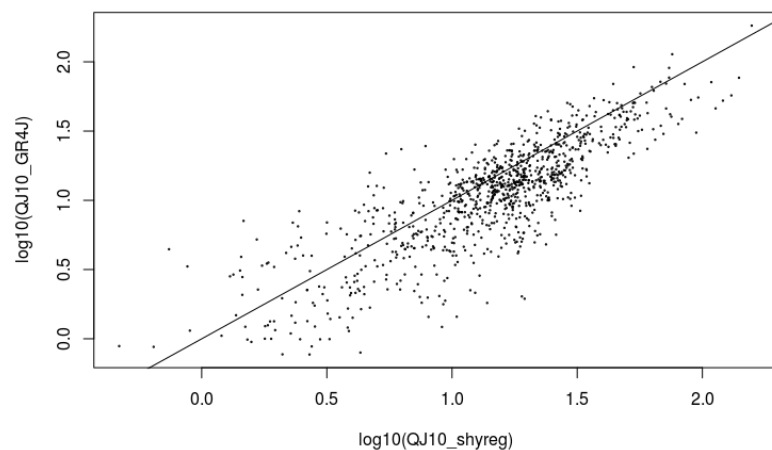


Figure 55 : Rapport entre les QJ10 de Shyreg et GR4J

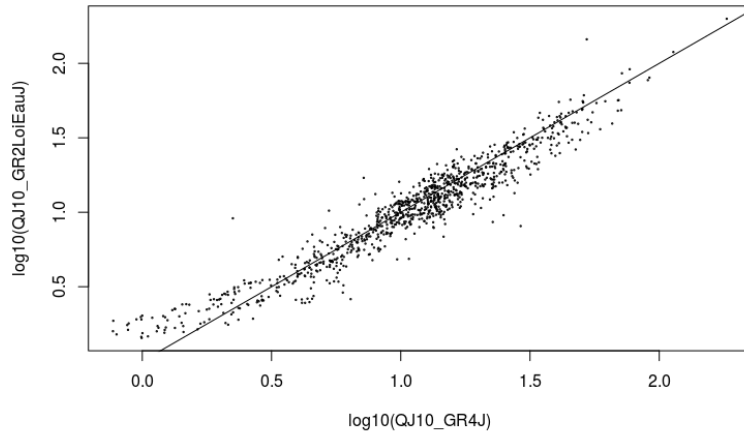


Figure 56 : Rapport entre les QJ10 de GR4J et GRLoiEau2J

Les moyennes du quantile QJ10 de SHYREG, GR4J et GRLoiEau2J sont respectivement de 19.4, 15.3 et 14.2. SHYREG détient la plus forte moyenne, ce qui était attendu car la méthode est initialement calée sur les quantiles QJ10 extraits de la procédure CruCal.

Les deux modèles hydrologiques continus indiquent des médianes similaires entre elles, cependant GR4J a tendance à surestimer GRLoiEau2J pour les moyens et forts débits. La tendance est inversée pour les QJ10 les plus faibles, avec respectivement des médianes de 1.9 et 2.3 mm pour des débits inférieurs à 3 mm, soit une augmentation de 21%.

La figure 67 représente la comparaison entre les médianes des QJ10 simulés de SHYREG, GRLoiEau2J et GR4J selon différentes spécificités des bassins (régime hydrologique, surface petite et grand, faible et forte altitude).

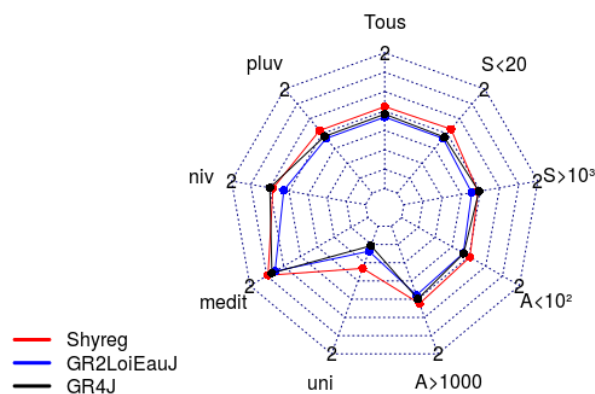


Figure 57 : Médiane des QJ10 (log10(mm)) de Shyreg, GRLoiEau2J et GR4J

Les bassins où les 2 modèles hydrologiques continus ont le plus de mal à reproduire SHYREG sont les bassins uniformes avec pour SHYREG, GRLoiEau2J et GR4J respectivement des médianes de 4.6, 2.4 et 2 mm.

Il est intéressant de constater que pour les bassins niveaux, le modèle GR4J reproduit correctement SHYREG, contrairement à GRLoiEau2J. Cela pourrait s'expliquer par l'utilisation de CemaNeige, module de neige plus complexe que celui intégré sous GR2LoiEauJ.

Conclusion

Il a été mis en évidence que la variabilité entre les séries pluviométriques Safran et Coméphore n'est pas négligeable. Mais cette différence, qui est au désavantage de la série Safran, tient en moyenne plus d'un écart type important que d'une sous-estimation ou d'une surestimation globale.

En ce qui concerne la modélisation des quantiles d'étiage, de bilan et de saisonnalité, les résultats sont en moyenne légèrement meilleurs en utilisant la série de pluie Coméphore, à l'exception de certaines valeurs des bassins niveaux. En effet, la série Coméphore ne contient pas de précipitations solides pour les hautes altitudes mais les modèles arrivent à obtenir des résultats satisfaisant en compensant au niveau des paramètres, tout particulièrement pour GR2LoiEauJ. Mais selon le modèle, et selon le choix des statistiques à reproduire, la série pluviométrique à privilégier n'est pas la même. Par exemple, pour le modèle GR4J sur les bassins avec une altitude supérieure à 1500 mètres, la série Safran est à privilégier pour reproduire le bilan, tandis qu'un critère d'étiage mensuel comme le QMNA5 sera meilleur avec la série Coméphore. Il est donc difficile de pouvoir conclure de manière absolue sur le choix de la série pluviométrique, surtout avec une amélioration, en moyenne, aussi faible.

En revanche, il semblerait que l'exploitation des données Coméphore tend à améliorer la simulation des débits des petits bassins versants (inférieurs à 20 km²) ainsi que la simulation des bassins versants méditerranéens de manière plus significative.

Concernant Coméphore 64 km², les résultats sont concluants, car aucune différence significative n'a pu être mise en évidence. De ce fait, utiliser des données avec une résolution de 64 km² n'est pas considéré comme ayant une influence significative et n'est donc pas la source des écarts entre les modélisations de Coméphore et Safran.

Vis-à-vis de l'évaluation des deux modèles hydrologiques continus sur la simulation d'un quantile de crue journalière (QJ10), les performances de GR4J et GRLoiEau2J sont satisfaisantes. Bien qu'il ne soit pas possible de reproduire exactement la série extraite de la procédure CruCal, les modèles surestiment la série de référence (QJ10 extrait des débits continus)

La simulation régionale de ce quantile de crue journalière à partir des deux modèles hydrologiques continus reste globalement similaire avec une tendance globale à une sous-estimation par rapport à la méthode SHYREG.

Table des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Répartition spatiale et typologique des bassins versants | 9 |
| Figure 2 : Schéma de fonctionnement du modèle GRLoiEau2J (ref) | 10 |
| Figure 3 : Schéma de fonctionnement du modèle GRD (ref) | 11 |
| Figure 4 : Schéma de fonctionnement du modèle GR4J | 12 |
| Figure 5 : Comparaison entre la série pluviométrique et la série Antilope de 2007 à 2015 pour chaque station pluviométrique | 15 |
| Figure 6 : Comparaison entre la série pluviométrique et la série Réana de 1997 à 2006 pour chaque station pluviométrique | 15 |
| Figure 7 : Comparaison entre la série pluviométrique et la série Coméphore de 1997 à 2015 | 16 |
| Figure 8 : Moyennes interannuelles des précipitations en France de 1981 à 2010 d'après les données AURELHY fournies par Météo-France | 17 |
| Figure 9 : Moyennes interannuelles des précipitations Coméphore en France de 1997 à 2010 | 17 |
| Figure 10 : Comparaison entre la série pluviométrique et la série Coméphore 64km ² | 18 |
| Figure 11 : Comparaison entre la série pluviométrique et la série Safran | 18 |
| Figure 12 : Evolution du critère de Nash par station entre Safran et les pluviomètres en fonction des précipitations | 19 |
| Figure 13 : Evolution du critère de Nash par station entre Coméphore et les pluviomètres en fonction des précipitations | 19 |
| Figure 14 : Evolution du critère de Nash par station entre Coméphore 64 km ² et les pluviomètres en fonction des précipitations | 19 |
| Figure 15 : Biais par intervalle de précipitation entre Safran et les séries Coméphore avec la série de référence | 20 |
| Figure 16 : Evolution du critère de Nash pour Safran et les séries Coméphore en fonction de l'altitude | 20 |
| Figure 17 : Données ponctuelles des pluviomètres, Coméphore, Coméphore 64 km ² et Safran entre 1500 et 3000 mètres d'altitude | 21 |
| Figure 18 : Evolution du critère de Nash par station entre Coméphore et les pluviomètres en fonction de l'altitude | 21 |
| Figure 19 : Evolution du critère de Nash par station entre Coméphore 64 km ² et les pluviomètres en fonction de l'altitude | 21 |
| Figure 20 : Evolution du critère de Nash par station entre Safran et les pluviomètres en fonction de l'altitude | 22 |
| Figure 21 : Evolution du critère de Nash pour Safran et les séries Coméphore en fonction du mois | 22 |
| Figure 22 : Biais entre Coméphore Safran pour des pluies de bassins classées en fonction de l'altitude des bassins versants | 23 |
| Figure 23 : Biais entre Coméphore et Safran pour des pluies de bassins classées en fonction de la surface des bassins versants | 23 |
| Figure 24 : Biais entre Coméphore et Coméphore 64 km ² pour des pluies de bassins classées en fonction de la surface des bassins versants | 24 |
| Figure 25 : Différence entre les Nash Coméphore 1 et 64 km ² de GRLoiEau2J en fonction de la surface | 25 |
| Figure 26 : Différence entre les Nash Coméphore 1 et 64 km ² de GR4J en fonction de la surface | 25 |
| Figure 27 : Différence entre les Nash Safran et Coméphore de GRLoiEau2J en fonction de l'altitude | 26 |
| Figure 28 : Différence entre les Nash Safran et Coméphore de GRD en fonction de l'altitude | 26 |
| Figure 29 : Différence entre les Nash Safran et Coméphore de GR4J en fonction de l'altitude | 27 |
| Figure 30 : Différence entre les Nash Safran et Coméphore de GRLoiEau2J en fonction de la surface | 27 |
| Figure 31 : Différence entre les Nash Safran et Coméphore de GRD en fonction de la surface | 27 |

| | |
|--|----|
| Figure 32 : Différence entre les Nash Safran et Coméphore de GR4J en fonction de la surface | 28 |
| Figure 33 : Critère de Nash des statistiques GRLoiEau2J pour tous les bassins | 28 |
| Figure 34 : Critère de Nash des statistiques GRD pour tous les bassins | 28 |
| Figure 35 : Critère de Nash des statistiques GR4J pour tous les bassins | 28 |
| Figure 36 : Critère de Nash des statistiques GRD pour les bassins avec une altitude supérieure à 1500 mètres (22 bassins) | 29 |
| Figure 37: Critère de Nash des statistiques GR4J pour les bassins avec une altitude supérieure à 1500 mètres (22 bassins) | 29 |
| Figure 38: Critère de Nash des statistiques GR4J pour les bassins avec une surface inférieure à 20 km ² (13 bassins) | 30 |
| Figure 39 : Critère de Nash des statistiques GRD pour les bassins avec une surface inférieure à 20 km ² (13 bassins) | 30 |
| Figure 40 : Critère de Nash des statistiques GRLoiEau2J pour les bassins avec une surface inférieure à 20 km ² (13 bassins) | 30 |
| Figure 41 : Critère de Nash des statistiques GRD pour les bassins niveaux..... | 31 |
| Figure 42 : Critère de Nash des statistiques GR2LoiEauJ pour les bassins niveaux..... | 31 |
| Figure 43 : Critère de Nash des statistiques GR4J pour les bassins niveaux | 31 |
| Figure 44 : Paramètre B pour Safran, Coméphore et Coméphore 64 km ² pour des bassins niveaux (32 bassins)..... | 31 |
| Figure 45 : Critère de Nash des statistiques GR4J pour les bassins méditerranéens | 32 |
| Figure 46 : Critère de Nash des statistiques GRLoiEau2J pour les bassins méditerranéens | 32 |
| Figure 47 : Critère de Nash des statistiques GRD pour les bassins méditerranéens..... | 32 |
| Figure 48 : Rapport entre les QJ10 de l'observation continue et les QJ10 de CruCal | 33 |
| Figure 49 : Rapport des maximums annuels entre CruCal et l'observation continue pour le bassin Y5215020 | 34 |
| Figure 50 : Rapport entre les QJ10 obtenus à partir de CruCal et GRLoiEau2J pour tous les bassins ... | 35 |
| Figure 51 : Rapport entre les QJ10 obtenus à partir de CruCal et GRLoiEau2J pour tous les bassins ... | 35 |
| Figure 52 : Rapport entre les QJ10 observés et ceux obtenus à partir de GRLoiEau2J pour tous les bassins..... | 35 |
| Figure 53 : Rapport entre les QJ10 observés et ceux obtenus à partir de GR4J pour tous les bassins . | 35 |
| Figure 54 : Rapport entre les QJ10 de Shyreg et GRLoiEau2J | 36 |
| Figure 55 : Rapport entre les QJ10 de Shyreg et GR4J..... | 36 |
| Figure 56 : Rapport entre les QJ10 de GR4J et GRLoiEau2J | 37 |
| Figure 57 : Médiane des QJ10 (log ₁₀ (mm)) de Shyreg, GRLoiEau2J et GR4J | 37 |
| Figure 58 : Erreur relative entre les QJ10 simulés issus de GRD et ceux issus de CruCal..... | 46 |
| Figure 59 : Erreur relative entre les QJ10 simulés issus de GRLoiEau2J et ceux issus de CruCal | 46 |
| Figure 60 : Erreur relative entre les QJ10 issus des observations continues et ceux issus de CruCal ... | 46 |
| Figure 61: Erreur relative entre les QJ10 simulés issus de GR4J et ceux issus de CruCal | 46 |

Bibliographie

- Arnaud, P., Cantet, P., Odry, J., 2016. SHYREG, a national database of flood frequency estimation. E3S Web Conf. 7, 01004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160701004>
- Durand, Y., Brun, E., Merindol, L., Guyomarc'h, G., Lesaffre, B., Martin, E., 1993. A meteorological estimation of relevant parameters for snow models. *Ann. Glaciol.* 18, 65–71.
- Emmanuel, I., Andrieu, H., Leblois, E., Janey, N., Payrastre, O., 2015. Influence of rainfall spatial variability on rainfall–runoff modelling: Benefit of a simulation approach? *J. Hydrol.* 531, 337–348.
- Folton, N., Andréassian, V., Duperray, R., 2015. Hydrological impact of forest-fire from paired-catchment and rainfall–runoff modelling perspectives. *Hydrol. Sci. J.* 60, 1213–1224.
- Garcia, F., Folton, N., Oudin, L., 2017. Which objective function to calibrate rainfall–runoff models for low-flow index simulations? *Hydrol. Sci. J.* 1–18. <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1308511>
- Gottardi, F., Oblé, C., Gailhard, J., Paquet, E., 2012. Statistical reanalysis of precipitation fields based on ground network data and weather patterns: Application over French mountains. *J. Hydrol.* 432–433, 154–167. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.02.014>
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10, 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Odry, J., 2017. Prédétermination des débits de crues extrêmes en sites non jaugés: régionalisation de la méthode par simulation SHYREG (PhD Thesis). Aix-Marseille.
- Oudin, L., 2006. Une formule simple d'évapotranspiration potentielle pour la modélisation pluie-débit à l'échelle du bassin versant. *Houille Blanche* 113–120. <https://doi.org/10.1051/lhb:2006109>
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., Loumagne, C., 2005. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model?: Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modelling. *J. Hydrol.* 303, 290–306. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.026>
- Quintana-Seguí, P., Le Moigne, P., Durand, Y., Martin, E., Habets, F., Baillon, M., Canellas, C., Franchisteguy, L., Morel, S., 2008. Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables: Validation of the SAFRAN Analysis over France. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 47, 92–107. <https://doi.org/10.1175/2007JAMC1636.1>
- Sauquet, E., Gottschalk, L., Krasovskaia, I., 2008. Estimating mean monthly runoff at ungauged locations: an application to France. *Hydrol. Res.* 39, 403–423. <https://doi.org/10.2166/nh.2008.331>
- Tabary, P., 2007. The New French Operational Radar Rainfall Product. Part I: Methodology. *Weather Forecast.* 22, 393–408. <https://doi.org/10.1175/WAF1004.1>
- Tabary, P., Dupuy, P., L'Henaff, G., Gueguen, C., Moulin, L., Laurantin, O., Merlier, C., Soubeyroux, J.-M., n.d. A 10-year (1997–2006) reanalysis of Quantitative Precipitation Estimation over France: methodology and first results 1.
- Valéry, A., n.d. L'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech) Spécialité : Hydrologie 417.
- Valéry, A., Andréassian, V., Perrin, C., 2014. 'As simple as possible but not simpler': What is useful in a temperature-based snow-accounting routine? Part 2—Sensitivity analysis of the Cemaneige snow accounting routine on 380 catchments. *J. Hydrol.* 517, 1176–1187.
- Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M., Soubeyroux, J.-M., 2010. A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *Int. J. Climatol.* 30, 1627–1644. <https://doi.org/10.1002/joc.2003>
- Gandin, L. S., 1963: Objective Analysis of Meteorological Fields (in Russian). *Gidrometeoizdat*, 238 pp. [Israel Program for Scientific Translations, 1965, 242 pp.]
- Folton, N. & Arnaud, P., 2009 Portage nationale du modèle GRLoiEau sur les bassins jaugés.

Rapport, Irstea-Onema, 17 pp.

Folton, 2019. Amélioration de la connaissance spatio-temporelle de la ressource en eau, Irstea.

Roche, M., 1971. Les divers types de modèles déterministes. La Houille Blanche(2): 111-129.

Linsley, R.K., 1982. Rainfall-runoff models - An overview. In: V.P. Singh (Editor), Rainfallrunoff relationship. Water Ressources Publications, pp. 3-22.

Annexe 1 : Résultats des 3 modèles

GRLoiEau2J

| Bassin | Série | Med50 (Nash J) | Q saison | QMA | Qmna5 | VNC3_5 | VCN10_5 | DC97 |
|--|---------|-------------------|----------|-------|-------|--------|---------|-------|
| Méditerranéen | Safran | 0.652 | 0.905 | 0.902 | 0.908 | 0.905 | 0.963 | 0.957 |
| | Comép | 0.732 | 0.921 | 0.929 | 0.912 | 0.894 | 0.959 | 0.966 |
| | Comép64 | 0.740 | 0.918 | 0.928 | 0.911 | 0.895 | 0.960 | 0.965 |
| Nival | Safran | 0.613 | 0.906 | 0.962 | 0.745 | 0.813 | 0.901 | 0.929 |
| | Comép | 0.613 | 0.884 | 0.949 | 0.751 | 0.811 | 0.910 | 0.931 |
| | Comép64 | 0.622 | 0.881 | 0.949 | 0.753 | 0.812 | 0.911 | 0.931 |
| Pluvial | Safran | 0.675 | 0.915 | 0.958 | 0.966 | 0.958 | 0.962 | 0.976 |
| | Comép | 0.686 | 0.925 | 0.956 | 0.968 | 0.961 | 0.966 | 0.977 |
| | Comép64 | 0.684 | 0.924 | 0.955 | 0.968 | 0.962 | 0.966 | 0.977 |
| Uniforme | Safran | 0.523 | 0.696 | 0.971 | 0.958 | 0.949 | 0.962 | 0.965 |
| | Comép | 0.524 | 0.703 | 0.974 | 0.953 | 0.946 | 0.958 | 0.950 |
| | Comép64 | 0.526 | 0.706 | 0.974 | 0.953 | 0.945 | 0.958 | 0.952 |
| Altitude supérieur à 1500 m | Safran | 0.557 | 0.887 | 0.947 | 0.583 | 0.738 | 0.926 | 0.891 |
| | Comép | 0.553 | 0.873 | 0.925 | 0.587 | 0.712 | 0.922 | 0.904 |
| | Comép64 | 0.559 | 0.874 | 0.925 | 0.587 | 0.713 | 0.921 | 0.903 |
| Altitudes inférieur à 100 m | Safran | 0.687 | 0.928 | 0.978 | 0.990 | 0.988 | 0.992 | 0.989 |
| | Comép | 0.693 | 0.928 | 0.979 | 0.989 | 0.987 | 0.991 | 0.988 |
| | Comép64 | 0.696 | 0.928 | 0.979 | 0.989 | 0.987 | 0.991 | 0.988 |
| Surface supérieur à 1000 km ² | Safran | 0.682 | 0.921 | 0.986 | 0.966 | 0.915 | 0.966 | 0.982 |
| | Comép | 0.669 | 0.930 | 0.986 | 0.966 | 0.915 | 0.970 | 0.982 |
| | Comép64 | 0.667 | 0.930 | 0.986 | 0.967 | 0.915 | 0.970 | 0.982 |
| Surface inférieur à 20 km ² | Safran | 0.569 | 0.869 | 0.95 | 0.825 | 0.960 | 0.965 | 0.982 |
| | Comép | 0.633 | 0.876 | 0.942 | 0.902 | 0.960 | 0.963 | 0.973 |
| | Comép64 | 0.649 | 0.881 | 0.944 | 0.887 | 0.961 | 0.964 | 0.973 |
| Tous les bassins | Safran | 0.657 | 0.905 | 0.965 | 0.954 | 0.954 | 0.968 | 0.977 |
| | Comép | 0.667 | 0.915 | 0.964 | 0.955 | 0.955 | 0.97 | 0.977 |
| | Comép64 | 0.667 | 0.914 | 0.963 | 0.955 | 0.955 | 0.97 | 0.977 |

GR4J

| Bassin | Série | Med50 (Nash J) | Q saison | QMA | Qmna5 | VNC3_5 | VCN10_5 | DC97 |
|--|---------|-------------------|----------|-------|-------|--------|---------|-------|
| Méditerranéen | Safran | 0.742 | 0.923 | 0.873 | 0.920 | 0.848 | 0.941 | 0.984 |
| | Comép | 0.802 | 0.938 | 0.956 | 0.957 | 0.783 | 0.904 | 0.980 |
| | Comép64 | 0.803 | 0.941 | 0.951 | 0.934 | 0.827 | 0.920 | 0.980 |
| Nival | Safran | 0.691 | 0.887 | 0.303 | 0.788 | 0.728 | 0.913 | 0.923 |
| | Comép | 0.700 | 0.919 | 0.251 | 0.826 | 0.709 | 0.915 | 0.901 |
| | Comép64 | 0.698 | 0.911 | 0.248 | 0.833 | 0.706 | 0.914 | 0.900 |
| Pluvial | Safran | 0.793 | 0.932 | 0.973 | 0.976 | 0.937 | 0.945 | 0.977 |
| | Comép | 0.812 | 0.939 | 0.974 | 0.974 | 0.939 | 0.947 | 0.977 |
| | Comép64 | 0.810 | 0.939 | 0.972 | 0.976 | 0.935 | 0.944 | 0.977 |
| Uniforme | Safran | 0.670 | 0.932 | 0.973 | 0.976 | 0.937 | 0.945 | 0.977 |
| | Comép | 0.648 | 0.939 | 0.974 | 0.974 | 0.939 | 0.947 | 0.977 |
| | Comép64 | 0.648 | 0.939 | 0.972 | 0.976 | 0.935 | 0.944 | 0.977 |
| Altitude supérieur à 1500 m | Safran | 0.710 | 0.896 | 0.923 | 0.740 | 0.510 | 0.932 | 0.870 |
| | Comép | 0.749 | 0.926 | 0.871 | 0.801 | 0.427 | 0.923 | 0.842 |
| | Comép64 | 0.747 | 0.924 | 0.868 | 0.804 | 0.420 | 0.921 | 0.838 |
| Altitudes inférieur à 100 m | Safran | 0.836 | 0.963 | 0.989 | 0.983 | 0.969 | 0.972 | 0.984 |
| | Comép | 0.867 | 0.961 | 0.992 | 0.984 | 0.970 | 0.972 | 0.984 |
| | Comép64 | 0.866 | 0.962 | 0.992 | 0.983 | 0.970 | 0.972 | 0.984 |
| Surface supérieur à 1000 km ² | Safran | 0.941 | 0.941 | 0.993 | 0.979 | 0.837 | 0.939 | 0.984 |
| | Comép | 0.946 | 0.946 | 0.992 | 0.977 | 0.841 | 0.939 | 0.984 |
| | Comép64 | 0.946 | 0.946 | 0.992 | 0.978 | 0.841 | 0.939 | 0.984 |
| Surface inférieur à 20 km ² | Safran | 0.597 | 0.829 | 0.903 | 0.969 | 0.965 | 0.967 | 0.982 |
| | Comép | 0.638 | 0.882 | 0.948 | 0.981 | 0.921 | 0.944 | 0.978 |
| | Comép64 | 0.634 | 0.875 | 0.953 | 0.979 | 0.923 | 0.946 | 0.976 |
| Tous les bassins | Safran | 0.776 | 0.925 | 0.917 | 0.961 | 0.926 | 0.954 | 0.976 |
| | Comép | 0.796 | 0.932 | 0.915 | 0.965 | 0.925 | 0.955 | 0.973 |
| | Comép64 | 0.796 | 0.933 | 0.914 | 0.966 | 0.923 | 0.954 | 0.973 |

GRD_v7

| Bassin | Série | Med50 (Nash J) | Q saison | QMA | Qmna5 | VNC3_5 | VCN10_5 | DC97 |
|--|---------|-------------------|----------|-------|--------|--------|---------|--------|
| Méditerranéen | Safran | 0.479 | 0.338 | 0.113 | 0.156 | -0.244 | -0.081 | -0.152 |
| | Comép | 0.527 | 0.406 | 0.153 | 0.205 | -0.143 | -0.014 | 0.042 |
| | Comép64 | 0.534 | 0.344 | 0.149 | 0.223 | 0.084 | -0.056 | 0.077 |
| Nival | Safran | 0.374 | 0.417 | 0.356 | 0.118 | -0.225 | -0.212 | 0.167 |
| | Comép | 0.397 | 0.481 | 0.223 | -0.032 | -0.2 | -0.243 | 0.044 |
| | Comép64 | 0.413 | 0.448 | 0.218 | -0.022 | -0.185 | -0.176 | 0.12 |
| Pluvial | Safran | 0.459 | 0.473 | 0.259 | 0.228 | 0.088 | 0.075 | 0.199 |
| | Comép | 0.470 | 0.461 | 0.277 | 0.241 | 0.074 | 0.072 | 0.187 |
| | Comép64 | 0.475 | 0.461 | 0.273 | 0.237 | 0.073 | 0.066 | 0.187 |
| Uniforme | Safran | 0.532 | 0.729 | 0.709 | 0.362 | 0.218 | 0.186 | 0.298 |
| | Comép | 0.519 | 0.586 | 0.631 | 0.239 | 0.124 | 0.111 | 0.121 |
| | Comép64 | 0.501 | 0.596 | 0.627 | 0.235 | 0.127 | 0.112 | 0.115 |
| Altitude supérieur à 1500 m | Safran | 0.358 | 0.506 | 0.276 | 0.077 | -0.1 | -0.095 | 0.212 |
| | Comép | 0.259 | 0.490 | 0.159 | -0.071 | -0.126 | -0.128 | 0.087 |
| | Comép64 | 0.258 | 0.513 | 0.145 | -0.063 | -0.09 | -0.086 | 0.174 |
| Altitudes inférieur à 100 m | Safran | 0.538 | 0.644 | 0.539 | 0.269 | 0.256 | 0.251 | 0.329 |
| | Comép | 0.513 | 0.626 | 0.570 | 0.177 | 0.139 | 0.145 | 0.195 |
| | Comép64 | 0.520 | 0.624 | 0.577 | 0.185 | 0.145 | 0.153 | 0.194 |
| Surface supérieur à 1000 km ² | Safran | 0.478 | 0.4 | 0.912 | 0.281 | 0.062 | 0.165 | -0.047 |
| | Comép | 0.476 | 0.357 | 0.919 | 0.153 | 0.03 | 0.127 | -0.053 |
| | Comép64 | 0.480 | 0.351 | 0.922 | 0.169 | 0.059 | 0.151 | -0.01 |
| Surface inférieur à 20 km ² | Safran | -0.171 | -1.76 | -1.65 | -1.14 | -0.619 | -0.8 | -1.02 |
| | Comép | -0.104 | -1.67 | -1.58 | -1.18 | -0.769 | -0.922 | -1.04 |
| | Comép64 | -0.096 | -1.67 | -1.58 | -1.18 | -0.762 | -0.941 | -1.04 |
| Tous les bassins | Safran | 0.459 | 0.474 | 0.267 | 0.241 | 0.098 | 0.087 | 0.223 |
| | Comép | 0.471 | 0.466 | 0.278 | 0.233 | 0.08 | 0.076 | 0.188 |
| | Comép64 | 0.475 | 0.463 | 0.274 | 0.230 | 0.082 | 0.076 | 0.195 |

Annexe 2 : Erreurs sur les QJ10

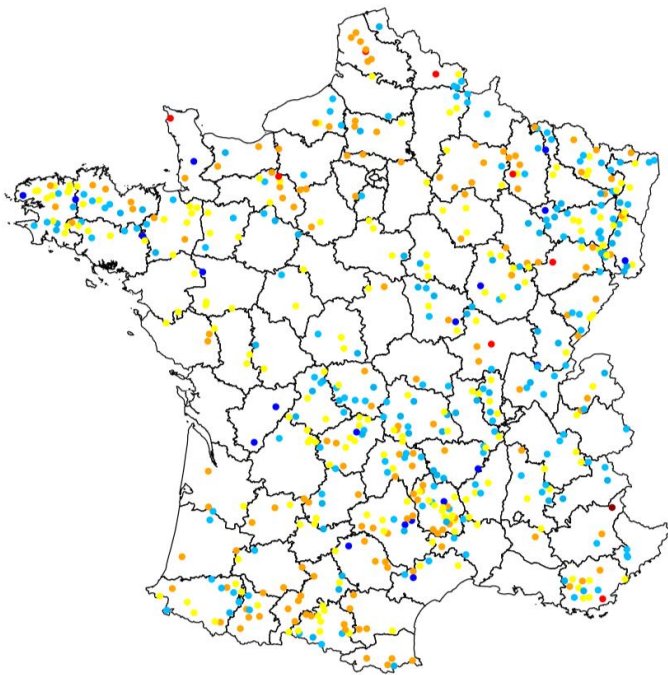


Figure 61 : Erreur relative entre les QJ10 simulés issus de GR4J et ceux issus de CruCal

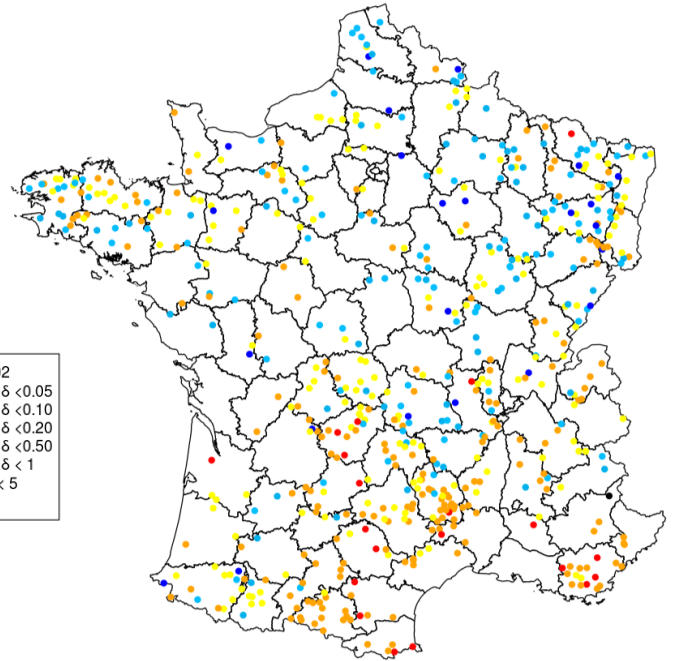


Figure 60 : Erreur relative entre les QJ10 issus des observations continues et ceux issus de CruCal

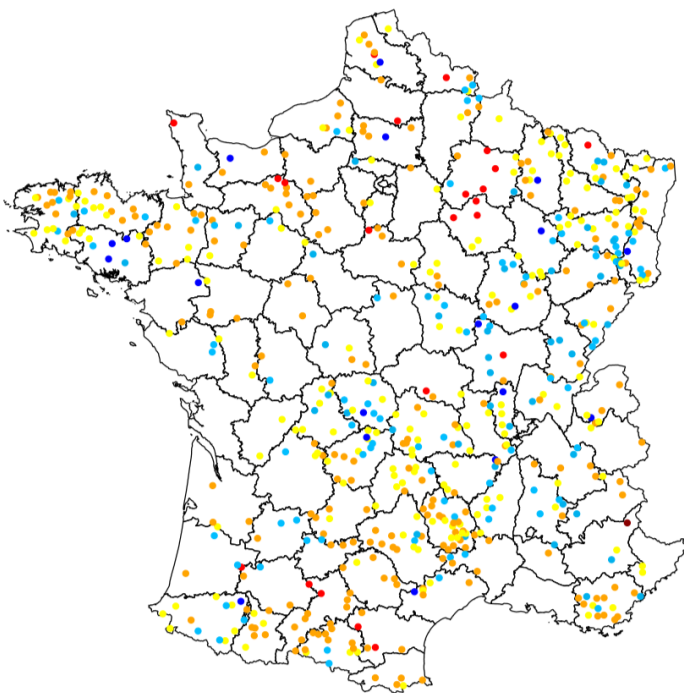


Figure 59 : Erreur relative entre les QJ10 simulés issus de GRLoiEau2J et ceux issus de CruCal

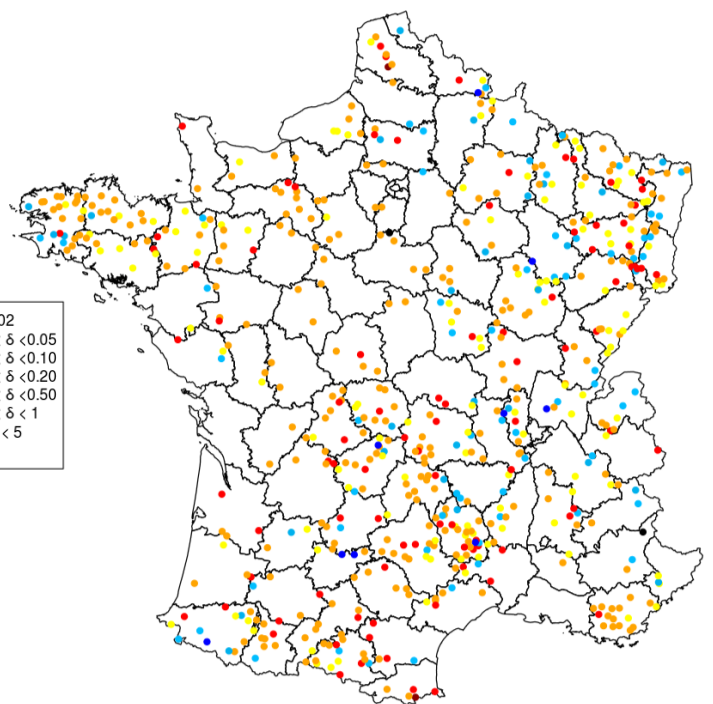


Figure 58 : Erreur relative entre les QJ10 simulés issus de GRD et ceux issus de CruCal