



## **Rapport de Stage**

# **France : impact d'une rupture observée dans les températures de surface sur les débits de 28 cours d'eau**

**Lucile HAMMOU**

**Master 1 Sciences de l'Environnement**

**Promotion 2014/2015**

**Maître de stage : Etienne BRULEBOIS**

## **Table des matières**

|                                                                                                                |       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Présentation de l'organisme d'accueil .....                                                                    | 1     |
| Introduction .....                                                                                             | 2     |
| I. Contexte de l'étude.....                                                                                    | 3     |
| II. Matériels et méthodes.....                                                                                 | 5     |
| 1. Origine des données .....                                                                                   | 5     |
| 2. Traitement des séries temporelles .....                                                                     | 5     |
| 3. Etude du ratio Pluie/Débit .....                                                                            | 6     |
| 4. Etude adimensionnelle des paramètres hydroclimatiques.....                                                  | 7     |
| 5. Le modèle GR4J.....                                                                                         | 8     |
| a. Présentation du modèle.....                                                                                 | 8     |
| b. Stratégie de calibration .....                                                                              | 9     |
| c. Performance du modèle .....                                                                                 | 9     |
| III. Résultats.....                                                                                            | 10    |
| 1. Ratios P/Q .....                                                                                            | 10    |
| a. Fréquence cumulée des ratios Pluie-Débit .....                                                              | 10    |
| b. Evolution du ratio P/Q .....                                                                                | 11    |
| c. Analyse statistique .....                                                                                   | 12    |
| 2. Représentation adimensionnelle des paramètres hydroclimatiques .....                                        | 14    |
| 3. Résultats du modèle GR4J .....                                                                              | 14    |
| IV. Discussion.....                                                                                            | 19    |
| V. Conclusion.....                                                                                             | 21    |
| Bibliographie.....                                                                                             | 22    |
| <br>ANNEXES .....                                                                                              | <br>I |
| Annexe 1 : carte de localisation des 28 bassins versants étudiés.....                                          | II    |
| Annexe 2 : informations sur les bassins versants.....                                                          | III   |
| Annexe 3 : nombres de stations pluviométriques et de points de grille Météo France (valeurs d'ETP) .....       | IV    |
| Annexe 4 : résultats statistiques pour le ratio P/Q (été) .....                                                | V     |
| Annexe 5 : résultats statistiques pour le ratio P/Q (automne).....                                             | VI    |
| Annexe 6 : résultats statistiques pour le ratio P/Q (hiver) .....                                              | VII   |
| Annexe 7 : résultats statistiques pour le ratio P/Q (printemps).....                                           | VIII  |
| Annexe 8 : hydrogrammes des débits observés et simulés au pas de temps journalier pour une année choisie ..... | IX    |

## Table des illustrations

|                                                                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1 : graphique de fréquence cumulée des surfaces des bassins versants.....                                                                                                         | 4  |
| Figure 2 : exemple de fichier des données de débit, précipitation et ETP .....                                                                                                           | 6  |
| Figure 3 : représentation adimensionnelle des paramètres hydroclimatiques.....                                                                                                           | 7  |
| Figure 4 : diagramme de fonctionnement de GR4J (Brulebois, 2013, d'après Perrin 2003).....                                                                                               | 8  |
| Figure 5: fréquence cumulée des valeurs du ratio P/Q, avant (bleu) et après (rouge) 1988 .....                                                                                           | 10 |
| Figure 6 : Evolution cumulative de ratio P/Q avant (bleu) et après (rouge) 1988, pour les bassins versants du Blavet (A), de la Meuse (B), du Gave d'Oloron (C) et de la Loire (D) ..... | 11 |
| Figure 7 : Evolution du ratio P/Q de 1970 à 2009, Pour les bassins versants du Blavet (A), de la Meuse (B), du Gave d'Oloron (C) et de la Loire (D) .....                                | 12 |
| Figure 8 : carte des ruptures et des tendances dans les ratios P/Q annuels pour les 28 bassins versants étudiés .....                                                                    | 13 |
| Figure 9 : représentation adimensionnelle des paramètres hydroclimatiques des 28 bassins versants étudiés, avant (bleu) et après (rouge) 1988 .....                                      | 14 |
| Figure 10: représentation graphique du paramètre X1, comparaison entre la période 1 et la période 2 .....                                                                                | 15 |
| Figure 11: représentation graphique du paramètre X2, comparaison entre la période 1 et la période 2 .....                                                                                | 16 |
| Figure 12: représentation graphique du paramètre X3, comparaison entre la période 1 et la période 2 .....                                                                                | 16 |
| Figure 13: représentation graphique du paramètre X4, comparaison entre la période 1 et la période 2 .....                                                                                | 17 |
| Figure 14 : hydrogrammes moyens obtenus grâce à GR4J, pour la période 1 (1) et la période 2 (2), pour les bassins versant du Blavet (A), du Gave d'Oloron (B) et de la Loire (C) .....   | 18 |
| <br>Tableau 1: tableau croisé des indices de Nash et Sutcliffe, selon les périodes de calibration et de validation.....                                                                  | 9  |
| Tableau 2: tableau croisé des indices NSE, pour les bassins versants du Blavet, de la Meuse, du Gave d'Oloron et de la Loire .....                                                       | 15 |

## **Remerciements**

Je voudrais tout d'abord remercier mon maître de stage Etienne Brulebois, pour son soutien, son aide précieuse et sa patience.

Je voudrais également remercier Yves Richard pour avoir partagé avec moi ses connaissances et pour m'avoir beaucoup aidée dans le travail de collecte des données.

Enfin je remercie toute l'équipe du CRC de m'avoir accueillie dans ses locaux.

## **Présentation de l'organisme d'accueil**

L'organisme d'accueil de ce stage est le laboratoire Biogéosciences, qui est une unité mixte de recherche du CNRS (UMR n°6282). Les locaux du laboratoire sont situés dans le bâtiment Sciences Gabriel de l'Université de Bourgogne, à Dijon (21). Le personnel du laboratoire (environ 110 personnes au 1<sup>er</sup> Janvier 2012) se compose de chercheurs, d'enseignants chercheurs, de doctorants, de personnel de recherche et de personnel technique, dépendant de l'université de Bourgogne, du CNRS ou d'AgroSup.

Le laboratoire Biogéosciences se décompose en quatre équipes de recherche :

- SEDS (Systèmes, Environnements et Dynamique Sédimentaire),
- CRC (Centre de Recherche de Climatologie),
- BioME (Biodiversité, Macroécologie, Evolution),
- Eco/Evo (Ecologie Evolutive).

Le stage s'est déroulé au sein de l'équipe de recherche SEDS, dans les locaux du CRC où j'ai été aimablement accueillie.

L'équipe SEDS est sous la responsabilité de M<sup>me</sup> Emmanuelle VENNIN, et se compose de 14 membres du personnel de recherche permanent (maîtres de conférences et professeurs de l'uB) et de 4 membres du personnel technique. On compte également des doctorants.

Les grands axes de recherche de l'équipe SEDS sont :

- production et transfert de matières à la surface des continents,
- paléoclimats,
- architecture stratigraphique des réservoirs carbonatés : fracturation et diagenèse.

## **Introduction**

L'hydrologie est la science qui traite des propriétés mécaniques, physiques et chimiques des eaux. L'étude des paramètres hydroclimatiques fait partie de cette science. Les paramètres hydroclimatiques sont les paramètres influant sur le cycle hydrologique comme la température, les précipitations ou l'évapotranspiration, et les paramètres qui en résultent comme le débit ou la qualité de l'eau (Durand et al., 1993). On distingue l'évapotranspiration réelle (perte en eau d'une région par évaporation et transpiration) de l'évapotranspiration potentielle (ETP) qui représente la quantité maximale d'eau susceptible d'être évaporée au niveau d'un couvert végétal continu, en phase active de croissance, lorsqu'il est abondamment alimenté en eau (Eldin et al., 1969). Ces paramètres climatiques ayant subi des variations à l'échelle mondiale dans le cadre du changement climatique (GIEC, 2008), les sociétés humaines doivent se demander quel en sera l'impact sur les cours d'eau, d'un point de vue qualitatif et quantitatif.

L'eau est un élément essentiel pour les sociétés modernes. Il est non seulement vital pour tout organisme vivant, mais il est également devenu indispensable au fonctionnement des sociétés actuelles. L'eau est utilisée pour produire de l'électricité grâce aux barrages hydroélectriques et aux centrales nucléaires. Certains cours d'eau sont dédiés au commerce fluvial, qui représente une part non négligeable du transport de marchandise en France (8 % du transport de marchandises dans les départements irrigués par une voie d'eau navigable) (Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, 2011). Certains secteurs comme l'industrie et l'agriculture sont de grands consommateurs en eau, et le tourisme de certaines régions comme l'Ardèche dépend fortement de la ressource en eau de baignade ou de loisir. Toutes ces utilisations très différentes de la ressource en eau rendent sa bonne gestion essentielle mais source de nombreuses tensions.

La hausse des températures pourrait impacter les cours d'eau qualitativement et quantitativement. La gestion future de l'eau dépend de la capacité des scientifiques à prédire l'évolution du climat et des débits des cours d'eau pour les années à venir, c'est pourquoi il est important d'étudier les outils de modélisation climatique et hydrologique.

***L'objet de ce rapport est d'étudier les relations entre des paramètres climatiques observés (précipitations et ETP) et le débit des cours d'eau mesurés à l'exutoire, à l'échelle du bassin versant, de 1970 à 2009, en considérant l'impact d'une rupture observée dans les températures de surface en 1987/1988. L'efficacité d'un modèle hydrologique choisi (GR4J) à simuler des débits observés sera également discutée.***

## **I. Contexte de l'étude**

Il a été constaté une rupture dans les températures de surface en Europe en 1987-1988, nommée « European Climate Shift » (ECF) (de Laat et Crok, 2013). D'après le document technique VI du GIEC (2008), les ressources en eau douce sont très vulnérables au changement climatique, ce qui aura des conséquences sur les écosystèmes, et sur les sociétés humaines. Sous nos latitudes, plusieurs changements hydrologiques liés au changement climatique ont déjà été observés. Il a été observé, malgré de grandes difficultés à quantifier ce phénomène, une augmentation de l'évapotranspiration. Des épisodes pluvieux plus intenses ont lieu, augmentant les risques de crues et de sécheresse ; un apport trop brutal en eau par les précipitations ne permettant pas aux nappes de se recharger, l'eau va simplement ruisseler sans alimenter les sols et les nappes phréatiques. En Europe, la fonte des neiges se fait plus précoce, et la ressource en eau constituée par les glaciers diminue. Les simulations climatiques prévoient, pour un grand nombre de régions, une augmentation des épisodes pluvieux intenses au cours du XIXème siècle, ainsi que le recul des glaciers, ce qui va modifier le régime hydrologique des bassins versants, et diminuer la ressource en eau fournie par les glaciers pendant les périodes les plus chaudes. Tous ces changements vont compromettre la qualité et la quantité de la ressource en eau disponible, ce qui aura des effets sur les écosystèmes mais aussi sur les sociétés humaines qui devront s'adapter à ces changements, c'est pourquoi il est devenu très important de simuler numériquement l'impact du changement climatique observé puis projeté sur les cours d'eau. La première étape peut être faite grâce à l'étude des phénomènes et observations passés, à l'aide de modèles hydrologiques.

La rupture dans les températures de surface décrite par De Laat et Crok a également été observée dans différentes régions de France : en Bourgogne (Castel et al., 2014; Cuccia et al., 2010; Richard et al., 2014), dans les Préalpes (Bigot and Rome, 2010) et dans le Val de Loire (Bonnefoy et al., 2010). L'augmentation des températures pourrait entraîner une augmentation de l'évapotranspiration, ce qui, à volume de précipitations égal, pourrait entraîner une diminution des débits des cours d'eau français. Dans ce rapport seront étudiées les relations entre 3 paramètres hydroclimatiques (le débit, les précipitations et l'ETP) de 1970 à 2009, et l'impact éventuel de la rupture observée dans les températures de surface en 1988/1987, à l'aide notamment d'un modèle hydrologique.

Un modèle hydrologique permet de « reproduire la réponse en débit d'un bassin versant à l'aide d'un modèle mathématique en exploitant la connaissance des conditions climatiques environnantes » (IRSTEA, 2015).

Le modèle GR4J utilisé dans cette étude est issu des modèles hydrologiques du Génie Rural GR développés par le Cemagref. Les modèles GR fonctionnent au pas de temps annuel (GR1A), mensuel (GR2M) ou journalier (GR4J). Ils permettent de faire le lien entre les précipitations journalières sur un bassin versant et le débit à l'exutoire de ce bassin. Ces modèles sont des modèles globaux et non distribués, c'est-à-dire qu'ils n'ont pas d'existence physique, les processus sont regroupés au travers d'équations empiriques.

L'étude présentée dans ce rapport prend la suite de l'étude menée par Brulebois et al. (2015, subm), au sujet des éventuelles réponses hydrologiques à une rupture dans les températures de surface en 1987-1988. Lors de cette étude, les précipitations, l'évapotranspiration et les débits à

l'exutoire de 30 bassins versants répartis sur toute la France ont été étudiés. Ici, 28 de ces bassins versants sont étudiés (annexe 1), les deux autres bassins étant d'une surface trop importante. Ces bassins versants ont des surfaces comprises entre 150 km<sup>2</sup> et 8000 km<sup>2</sup>, avec une surface moyenne de 1400 km<sup>2</sup> (fig. 1). La plupart sont de taille moyenne, avec deux bassins d'une surface supérieure à 6000km<sup>2</sup>, la Loire à Villerest et l'Adour à Saint-Vincent-de-Paul.

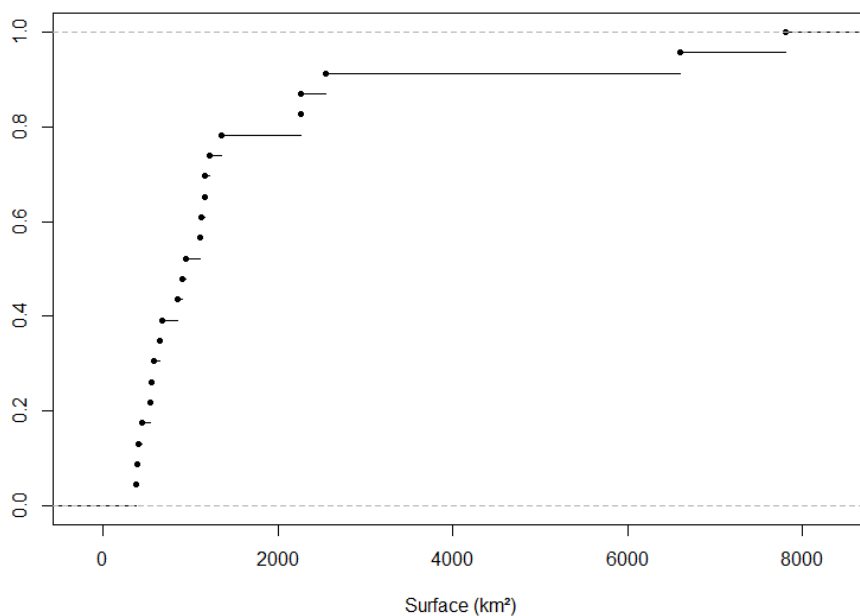


Figure 1 : graphique de fréquence cumulée des surfaces des bassins versants

Ils présentent des climats variés (Choisnel and Payen, 1988), ainsi que des régimes hydrologiques très différents. Le sol est majoritairement occupé par des territoires agricoles ou des forêts (Corinne Land Cover, 2006) (annexe 2).

## **II. Matériels et méthodes**

### **1. *Origine des données***

Dans le but d'étudier conjointement l'évolution du débit, de l'ETP et des précipitations, des données brutes sont extraites de différentes bases de données, dans les délimitations physiques des bassins versants. Les bassins versants ont été délimités par Vincent Bonnard lors de son stage dans le cadre du Master 1 TMEC à l'Université de Bourgogne. Les limites des bassins versants sont des limites topologiques.

Les valeurs de débit sont issues de la Banque hydro, fournies par la DREAL Bourgogne. Ce sont des données quotidiennes, exprimées en litre par seconde (l/s). Elles seront transformées en mm/j afin de pouvoir être mise en relation avec les valeurs de pluviométrie et d'évapotranspiration. Ces valeurs de débit sont mesurées par des stations hydrométriques à l'exutoire du bassin versant. Nous utilisons des données quotidiennes du 01/01/1969 au 31/12/2009.

Les valeurs de précipitations ont été fournies par Météo France. Chaque bassin versant dispose de plusieurs stations de pluviométrie, dont les données sont exprimées en mm/j. Dans l'objectif de nos analyses, pour chaque bassin est calculée une moyenne arithmétique de l'ensemble des postes pluviométriques situés dans le périmètre du bassin versant. Nous utilisons des données quotidiennes du 01/01/1961 au 31/12/2009.

Les valeurs d'évapotranspiration potentielle (ETP) sont des données observées et interpolées à la maille 0,5° par Météo France. Les données sont quotidiennes, exprimées en mm/j. Dans l'objectif de nos analyses, pour chaque bassin versant est calculée une donnée moyenne journalière d'évapotranspiration. Les données utilisées s'étendent du 01/01/1970 au 31/12/2009.

L'annexe 3 résume le nombre de stations pluviométriques et de point de grille d'ETP qui ont fourni des valeurs quotidiennes de précipitation et d'ETP.

Les fichiers de données finaux se composent des données moyennes journalières de précipitation, débit et évapotranspiration, du 1<sup>er</sup> Janvier 1970 au 31 Décembre 2009.

### **2. *Traitement des séries temporelles***

Toute la gestion des données a été faite avec le logiciel R® et l'interface Rstudio®. Les différentes données de pluviométrie (P), d'ETP (E) et de débit (Q) ont été réunies sous un seul et même fichier, à raison d'un fichier par bassin versant (*fig. 2*).

```

"" , "Q" , "E" , "P"
"1970-01-01",0.54790243902439,0.48333333333333,0
"1970-01-02",0.486790243902439,0.56666666666667,0
"1970-01-03",0.448858536585366,0.66666666666667,0
"1970-01-04",0.438321951219512,0.46666666666667,0
"1970-01-05",0.436214634146341,1,0
"1970-01-06",0.366673170731707,0.31666666666667,0

```

Figure 2 : exemple de fichier des données de débit, précipitation et ETP

Ces fichiers ont ensuite été séparés en deux, un fichier pour la période n°1 (1970-1987) que nous appellerons P1 dans la suite de ce rapport, et un second fichier pour la période n°2 (1988-2009) que nous appellerons par la suite P2. La date 1987-1988 a été choisie d'après la date de rupture dans les températures de surface déterminée par de Laat et Crok (2013).

Sous le logiciel R®, différents packages ont été utilisés. Le package Zoo (Zeileis et al., 2015) est utilisé pour traiter les séries temporelles et indexer les observations aux dates correspondantes. Le package HydroTSM (Zambrano-Bigiarini, 2014) regroupe les fonctions utiles pour la manipulation, l'analyse, l'interpolation et le traçage graphiques, pour des séries temporelles de données utilisées en hydrologie. Le package Hydromad (Andrews, 2010) est utilisé pour les fonctions de GR4J. Le package FactoMineR (Husson et al., 2015) est nécessaire pour l'agglomération de données en fichiers .csv.

Les séries temporelles ont été analysées à l'aide de deux tests statistiques :

- Le test de Pettitt (Pettitt, 1979), qui permet de déterminer l'existence d'une rupture dans les données. Le script utilisé sous R pour créer la fonction Pettitt a été écrit par Pascal Hänggi, docteur en Sciences naturelles de l'Université de Bern (Hänggi, 2015).
- Le test de Mann-Kendall (Kendall, 1977), qui permet de détecter une tendance à la hausse ou à la baisse de l'évolution des données. Une tendance correspond à une évolution significative des ratios P/Q. Le test de Mann-Kendall existe sous R, dans le package Kendall (McLeod, 2011).

### 3. Etude du ratio Pluie/Débit

La relation entre les précipitations sur un bassin versant et le débit à l'exutoire, soit la transformation des pluies en débit, est étudiée grâce au ratio Pluie/Débit P/Q. Il est important de prendre en compte la relation entre la pluie et le débit car ces deux paramètres sont étroitement liés, le débit d'un bassin versant dépendant fortement de la pluviométrie. Ces deux paramètres évoluent ensemble, et les valeurs que peuvent prendre les ratios P/Q permettent de faire des hypothèses sur d'éventuels impacts d'autres paramètres, comme l'évapotranspiration et la température. L'hypothèse de départ ici est que la température a augmenté en 1987/1988, année où l'on observe une franche rupture dans les températures, et que la pluviométrie reste sensiblement la même depuis 50 ans (Moisselin et al., 2002).

L'étude du ratio P/Q a été faite à l'échelle du bassin versant afin de pouvoir regarder précisément, bassin versant par bassin versant, les différentes évolutions du ratio, en fonction de la géographie et de l'hydrologie du bassin versant. Les échelles temporelles choisies sont l'échelle

annuelle et l'échelle saisonnière. Le pas de temps journalier n'est pas retenu pour le ratio P/Q car des variations trop importantes sont observées, le temps de réponse du bassin versant aux précipitations devant être pris en compte. Une rupture dans les températures de surface a été observée au printemps mais pas en automne (Brulebois et al., 2015, subm.); l'échelle saisonnière est donc choisie dans le but de vérifier si les mêmes observations s'appliquent au débit. Des moyennes annuelles et saisonnières sont faites sur les données journalières de pluie, de débit et d'ETP, et le ratio P/Q est ensuite calculé à partir des données moyennes annuelles et saisonnières.

#### 4. Etude adimensionnelle des paramètres hydroclimatiques

D'après Le Moine et al. (2007), il est possible de représenter graphiquement de manière adimensionnelle les relations Débit/Pluie et Pluie/ETP, afin d'évaluer le caractère conservatif d'un bassin versant, c'est-à-dire les gains et les pertes dans le bassin versant (fig. 3).

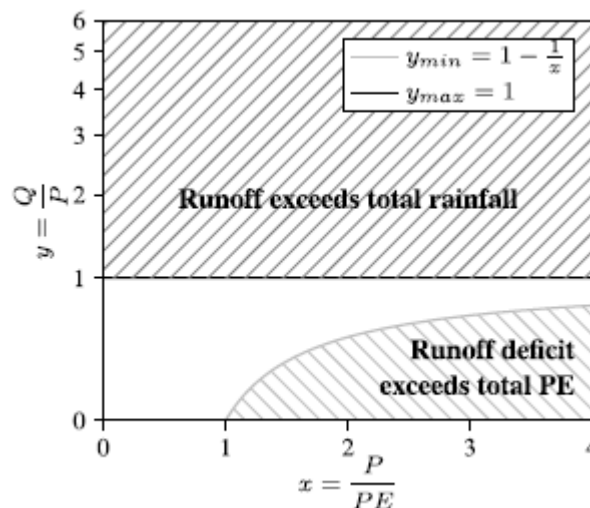


Figure 3 : représentation adimensionnelle des paramètres hydroclimatiques (Lemoine 2007)

Un bassin versant naturel fermé (ni perte ni gain en eau) devrait se trouver entre la limite supérieure où  $y=1$  et la limite inférieure où  $y=1-1/x$ . Si le bassin versant est au-delà de la limite supérieure, cela signifie qu'il y a un gain en eau, le débit est supérieur aux précipitations. Si le bassin versant est en deçà de la limite inférieure, cela signifie qu'il y a une perte en eau, les précipitations sont supérieures à la somme du débit et de l'ETP (Le Moine et al., 2007). L'objectif est de comparer la position des bassins versants dans cet espace adimensionnel, avant et après la rupture observée en 1987/1988.



### *b. Stratégie de calibration*

Dans l'objectif de nos analyses, les données sont séparées en deux périodes. La première période P1 est constituée des données journalières du 1<sup>er</sup> janvier 1970 au 31 décembre 1987. La seconde période (P2) est constituée des données journalières du 1<sup>er</sup> janvier 1988 au 31 décembre 2009. L'objectif est de calibrer GR4J sur la période P1, et à l'aide des paramètres obtenus, de simuler l'évolution des débits sur la période P2. Ensuite le modèle GR4J sera calibré sur la période P2, afin de valider la période P1 avec les paramètres de P2. Enfin, la calibration sera faite sur la période totale. Il est important de caler le comportement du modèle à celui du bassin modélisé, grâce à l'optimisation des paramètres du modèle. Une fonction critère permet de quantifier la similitude entre ces deux comportements et est appelée fonction objectif (Rojas Serna, 2005). La fonction objectif utilisée pour la calibration est le logarithme.

### *c. Performance du modèle*

Le modèle permet de calculer une valeur d'indice d'efficacité de Nash-Sutcliffe (NSE) (Nash and Sutcliffe, 1970), qui va permettre de déterminer la capacité du modèle à reproduire les débits observés. Un indice de Nash positif indiquera que le modèle fonctionne. On comparera les indices NSE entre les calibrations et les validations, et une différence de plus de 0,1 sera considérée importante. Grâce aux indices NSE, il sera possible de déterminer la robustesse du modèle (comparaison des indices NSE dans le rectangle rouge du tableau 1) ainsi qu'un éventuel changement dans les hydroclimats (comparaison des indices NSE dans le rectangle bleu du tableau 1). Les indices NSE sur fond rouge pâle sont obtenus lors des calibrations sur les différentes périodes. Ces indices devraient être supérieurs aux autres indices obtenus lors des phases de validation.

Tableau 1: tableau croisé des indices de Nash et Sutcliffe, selon les périodes de calibration et de validation

| Bassin versant        |      | Période de calibration |     |      |
|-----------------------|------|------------------------|-----|------|
|                       |      | P1                     | P2  | Ptot |
| Periode de validation | P1   | NSE                    | NSE | NSE  |
|                       | P2   | NSE                    | NSE | NSE  |
|                       | Ptot | NSE                    | NSE | NSE  |

L'évolution des paramètres entre P1 et P2 sera représentée graphiquement.

Un hydrogramme avec les valeurs de débit simulées et observées sera également réalisé pour déterminer l'efficacité du modèle, au pas de temps journalier sur une année, ou au pas de temps mensuel (moyenne mensuelle sur toute la période).

### III. Résultats

#### 1. Ratios P/Q

##### a. Fréquence cumulée des ratios Pluie-Débit

Les graphiques de fréquence cumulée des ratios P/Q d'un bassin versant permettent d'étudier l'évolution de ce ratio entre deux périodes. La figure 5 montre les fréquences cumulées des ratios P/Q pour l'ensemble des bassins versants, pour les périodes 1970-1987 (P1) et 1988-2009 (P2). On observe que, pour une même fréquence (c'est-à-dire à période de retour égale), le ratio est plus important en P2 qu'en P1, et ce pour l'ensemble des fréquences.

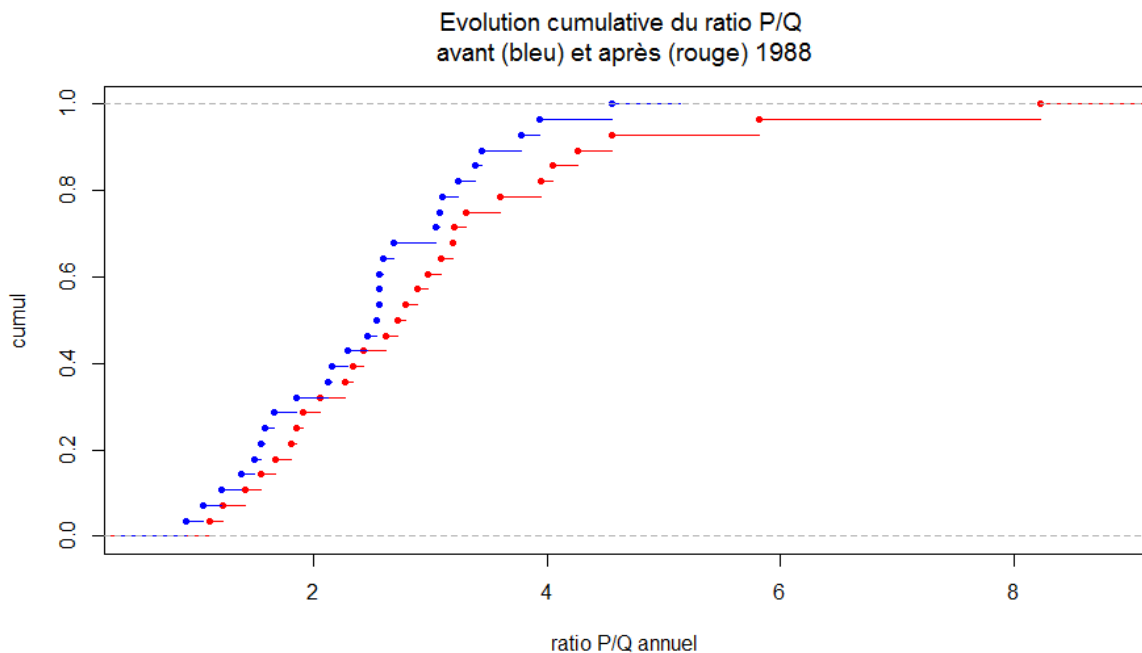


Figure 5: fréquence cumulée des valeurs du ratio P/Q, avant (bleu) et après (rouge) 1988

La figure 6 montre les graphiques de quelques bassins versants représentatifs ou remarquables. Le choix de ces quatre bassins versants s'est basé sur la fiabilité des données (nombreuses stations pluviométriques, également réparties sur toute la surface du bassin versant), sur la situation géographique des bassins versants (Nord/Sud, Est/Ouest) et sur la réponse des données face aux analyses effectuées (comportements différents représentant les différentes observations faites sur les 28 bassins versants).

Les ratios P/Q de P2 sont plus élevés que les ratios P/Q de P1 pour tous les bassins versants. La différence entre ces deux périodes est généralement plus importante pour les valeurs de P/Q importantes, à fréquence égale.

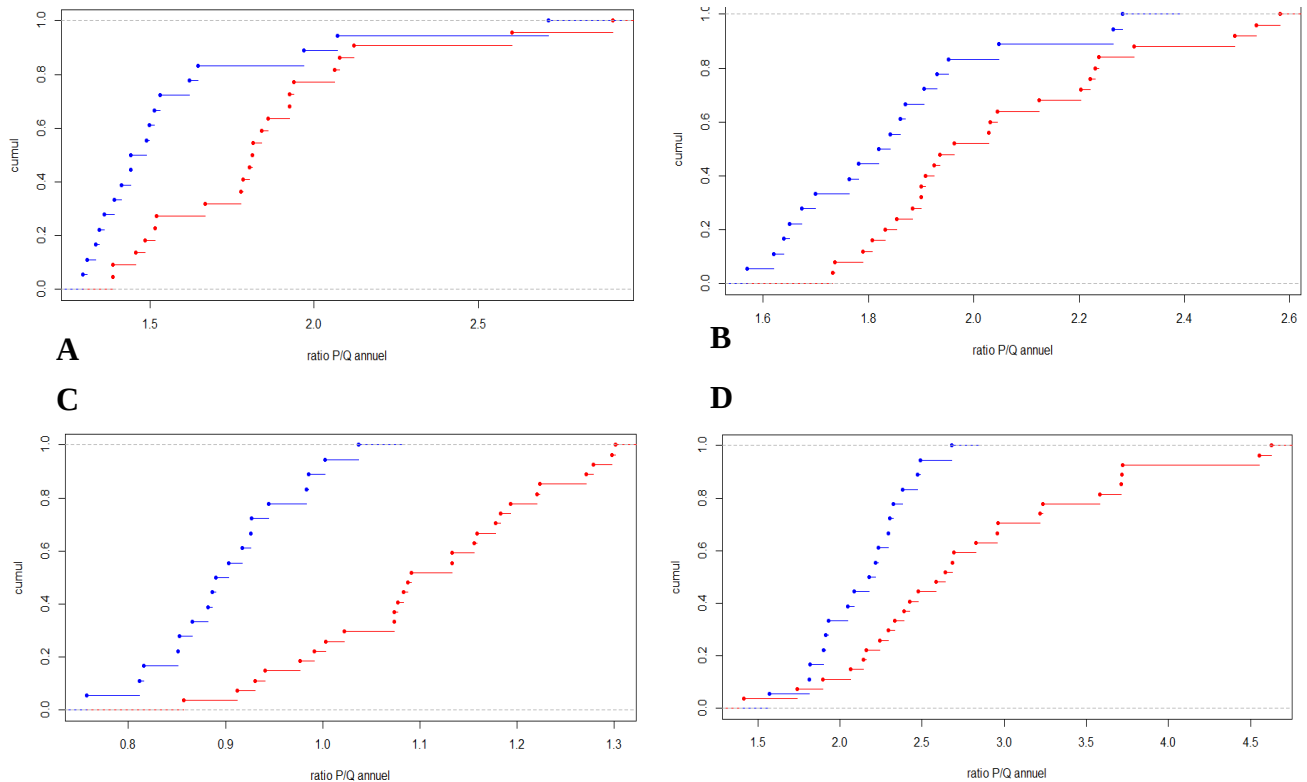


Figure 6 : Evolution cumulative de ratio P/Q avant (bleu) et après (rouge) 1988, pour les bassins versants du Blavet (A), de la Meuse (B), du Gave d'Oloron (C) et de la Loire (D)

### b. Evolution du ratio P/Q

La figure 7 montre l'évolution du ratio P/Q annuel sur ces mêmes bassins versants. Le ratio P/Q semble augmenter pour les bassins versants de la Loire et du Gave d'Oloron, c'est-à-dire que la transformation des pluies en débit est moins efficace.

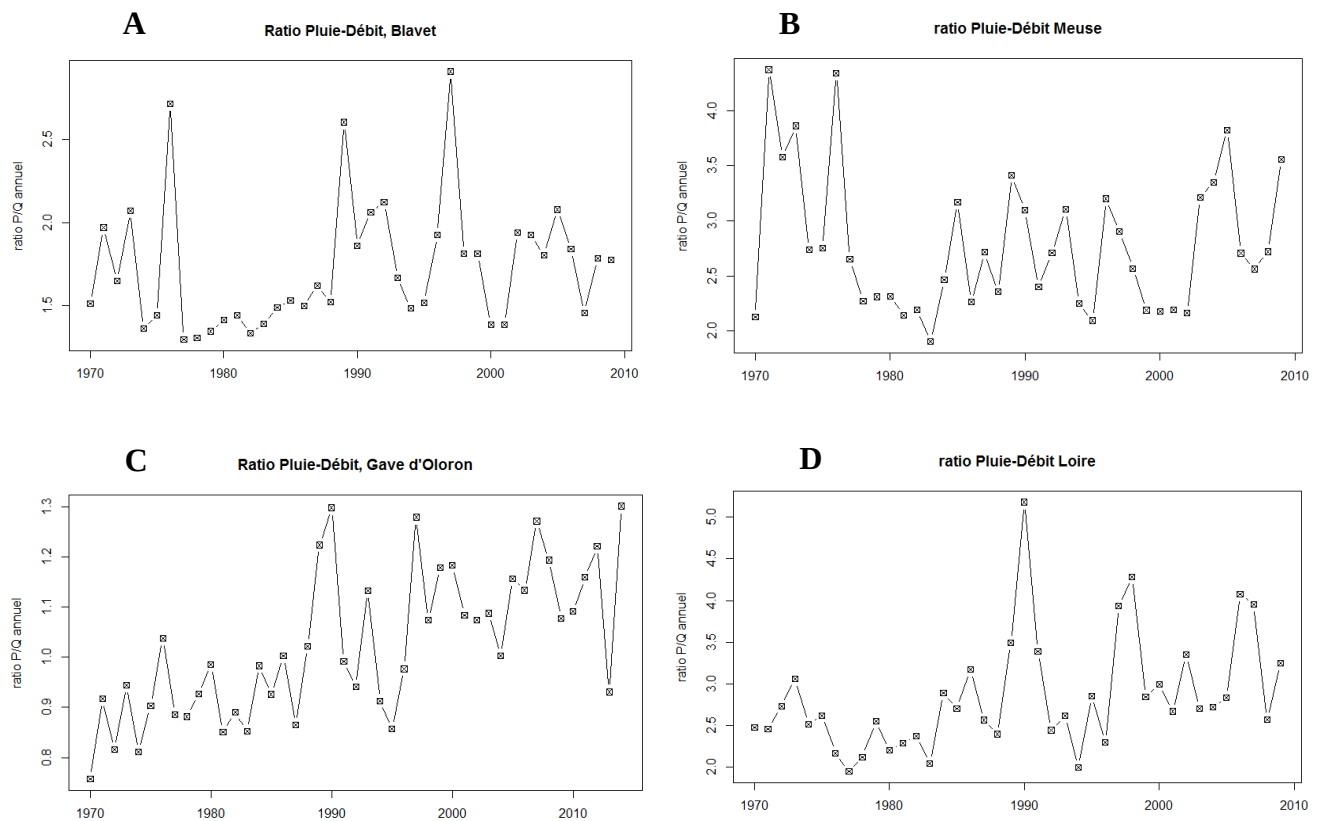


Figure 7 : Evolution du ratio P/Q de 1970 à 2009, Pour les bassins versants du Blavet (A), de la Meuse (B), du Gave d'Oloron (C) et de la Loire (D)

### c. Analyse statistique

Il est difficile de confirmer une augmentation du ratio P/Q pour les bassins du Blavet de la Meuse par la seule observation de ces graphiques. Afin de définir la significativité de l'évolution des ratios P/Q, deux tests statistiques ont été appliqués : le test de Pettitt et le test de Mann-Kendall. Les données ont été testées au pas de temps annuel et au pas de temps saisonnier. Les résultats sont présentés sous forme de carte. Les résultats des tests sur les données au pas de temps annuel sont présentés en figure 8.

Le test de Pettitt montre que sur un total de 28 bassins versants, une rupture significative à 95% a été observée pour 14 d'entre eux, pour des années de rupture allant de 1979 à 1996. Parmi ces 14 bassins versants, 9 présentent une rupture en 1987-88, soit la période où une rupture dans les températures a été observée (de Laat et Crok, 2013).

Le test de Mann-Kendall, adapté à la détection de tendances, montrent que seulement 10 bassins versants sur 28 présentent une augmentation significative à 95% du ratio P/Q au cours du temps.

A l'échelle saisonnière on observe une rupture significative pour 12 bassins versant au printemps et en été, soit un nombre plus important qu'en automne et en hiver où seulement 6 et 5 bassins versants présentent une rupture significative (annexe 4 à 7).

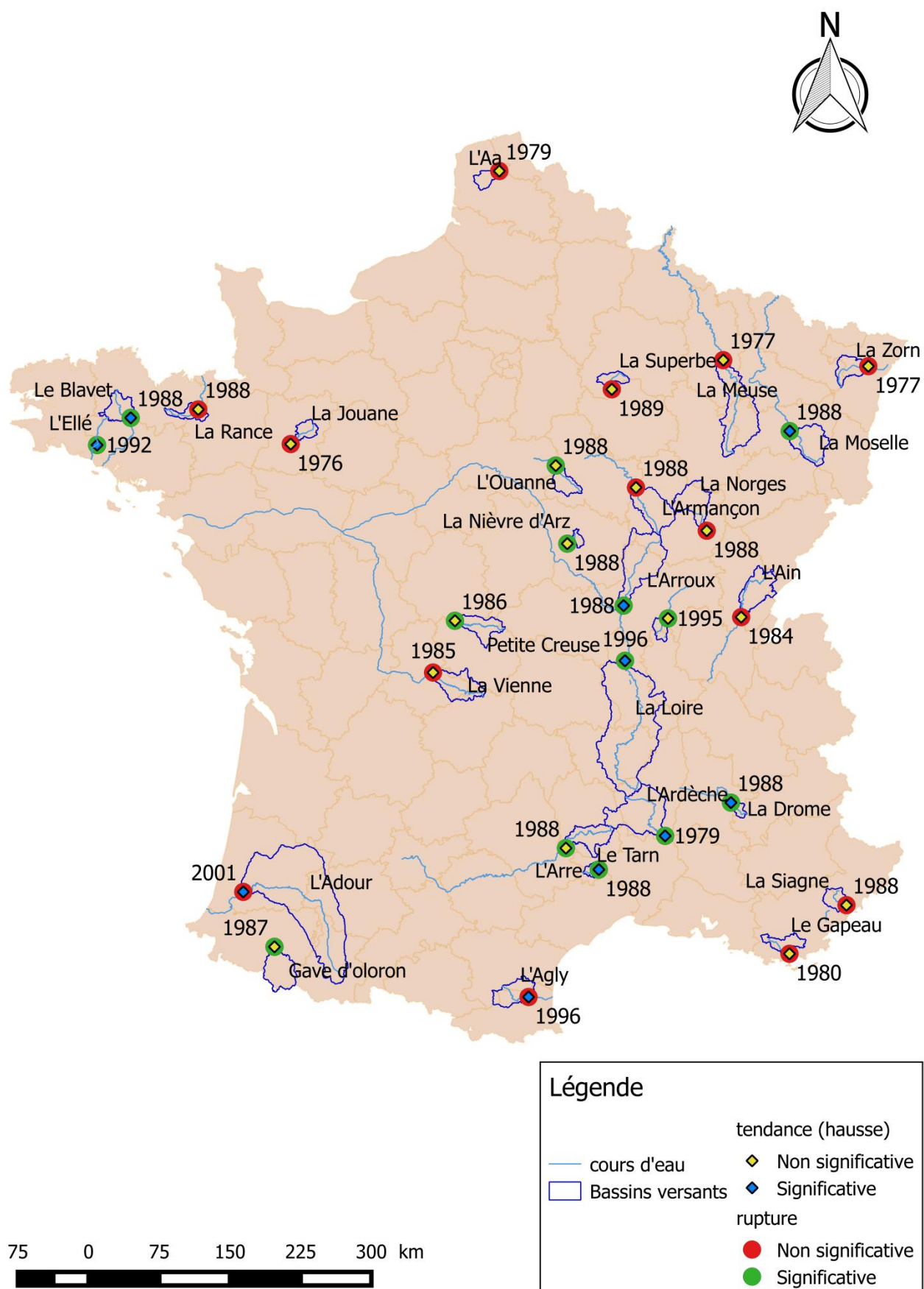


Figure 8 : carte des ruptures et des tendances dans les ratios P/Q annuels pour les 28 bassins versants étudiés

## 2. Représentation adimensionnelle des paramètres hydroclimatiques

La figure 9 représente graphiquement de manière adimensionnelle les paramètres hydroclimatiques étudiés. Il semble que, pour la deuxième période (en rouge), les bassins versants se sont décalés vers la limite inférieure, ce qui signifie que les pluies sont supérieures à la somme du débit et de l'ETP, et donc qu'il y aurait des pertes en eau au sein des bassins versants.

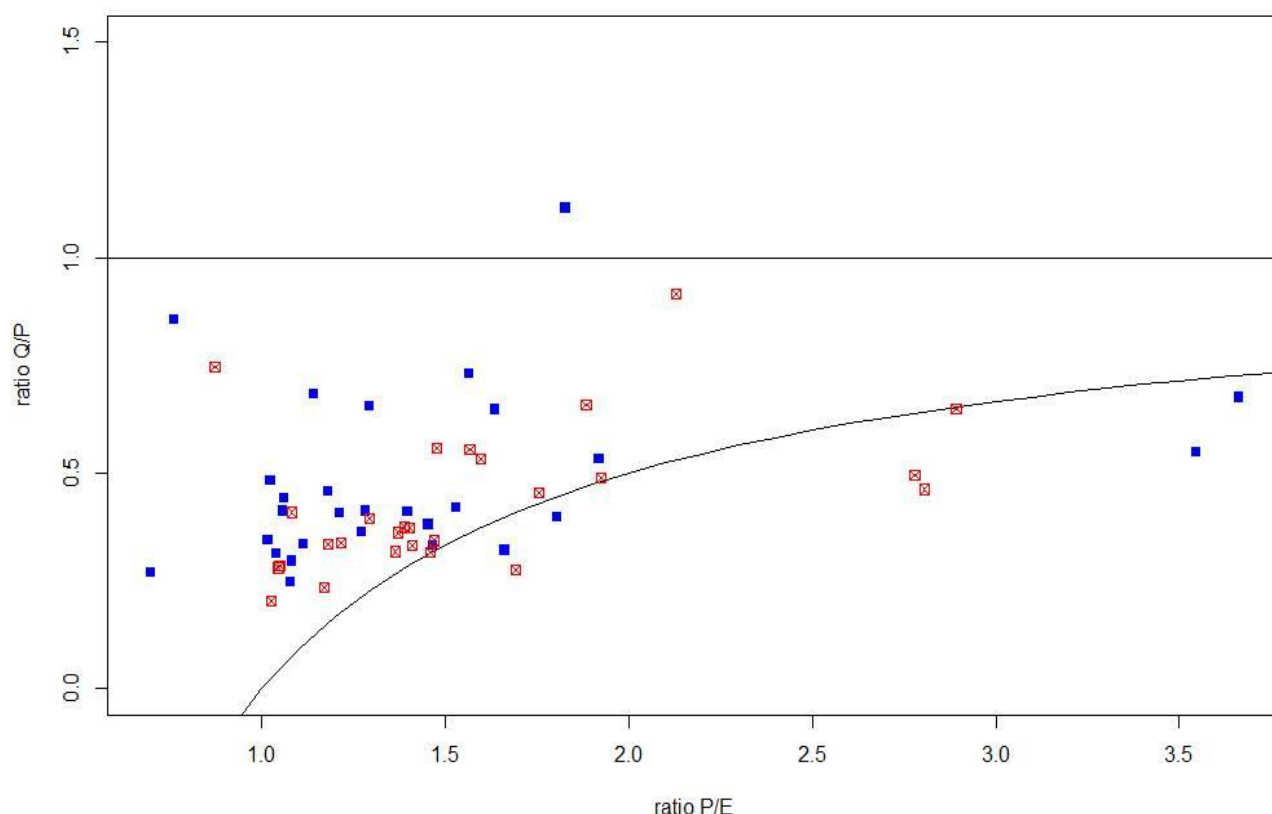


Figure 9 : représentation adimensionnelle des paramètres hydroclimatiques des 28 bassins versants étudiés, avant (bleu) et après (rouge) 1988

## 3. Résultats du modèle GR4J

Il est convenu dans ce rapport que la période totale  $P_{tot}$  correspond à la période 1970-2009, la période P1 à 1970-1987 et la période P2 à 1988-2009.

Les indices de Nash (NSE) pour les bassins versants du Blavet, de la Meuse, du Gave d'Oloron et de la Loire sont répertoriés dans le tableau 2. Les indices NSE pour les bassins versants du Blavet et de la Meuse sont bons, avec de très faibles différences entre la calibration et la validation sur les autres périodes. Les indices de Nash pour la Loire et le Gave d'Oloron sont moins bons, avec de grandes différences ( $>0,1$ ) entre les indices obtenus lors des calibrations et les indices obtenus lors des validations. Le modèle peut être considéré robuste pour les bassins versants du Blavet et de la Meuse, et non robuste pour la Loire et le Gave d'Oloron. Etudier les indices de Nash peut aussi permettre de détecter un effet de la variabilité hydroclimatique. En effet, pour la Meuse,

les indices NSE pour une même période de validation sont très similaires (0,001), et ne semblent donc pas indiquer de changement dans les paramètres hydroclimatiques. Cependant une telle similarité des indices de Nash peut indiquer une erreur dans le traitement des données. En revanche, pour le bassin versant du Blavet, la différence entre les indices de Nash pour une même période de validation est de l'ordre de 0,09, ce qui est suffisant pour supposer une évolution significative des débits.

Tableau 2: tableau croisé des indices NSE, pour les bassins versants du Blavet, de la Meuse, du Gave d'Oloron et de la Loire

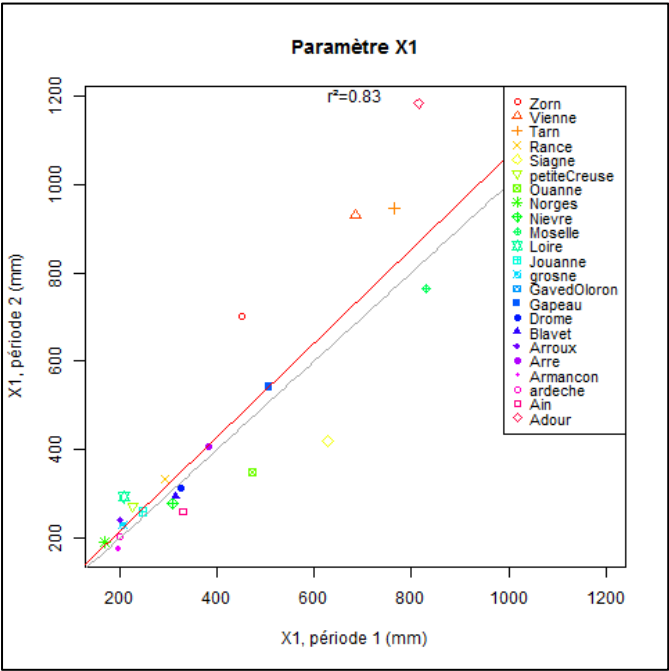
|                       |      | Période de calibration |       |       |                       |      | Période de calibration |       |       |
|-----------------------|------|------------------------|-------|-------|-----------------------|------|------------------------|-------|-------|
| Blavet                |      | P1                     | P2    | Ptot  | Meuse                 |      | P1                     | P2    | Ptot  |
| Periode de validation | P1   | 0,894                  | 0,819 | 0,872 | Periode de validation | P1   | 0,920                  | 0,919 | 0,920 |
|                       | P2   | 0,816                  | 0,887 | 0,873 |                       | P2   | 0,936                  | 0,937 | 0,936 |
|                       | Ptot | 0,852                  | 0,860 | 0,874 |                       | Ptot | 0,928                  | 0,927 | 0,928 |

|                       |      | Période de calibration |       |       |                       |      | Période de calibration |       |       |
|-----------------------|------|------------------------|-------|-------|-----------------------|------|------------------------|-------|-------|
| Gave d'Oloron         |      | P1                     | P2    | Ptot  | Loire                 |      | P1                     | P2    | Ptot  |
| Periode de validation | P1   | 0,578                  | 0,509 | 0,543 | Periode de validation | P1   | 0,802                  | 0,766 | 0,795 |
|                       | P2   | 0,622                  | 0,687 | 0,683 |                       | P2   | 0,673                  | 0,702 | 0,693 |
|                       | Ptot | 0,614                  | 0,628 | 0,637 |                       | Ptot | 0,738                  | 0,735 | 0,744 |

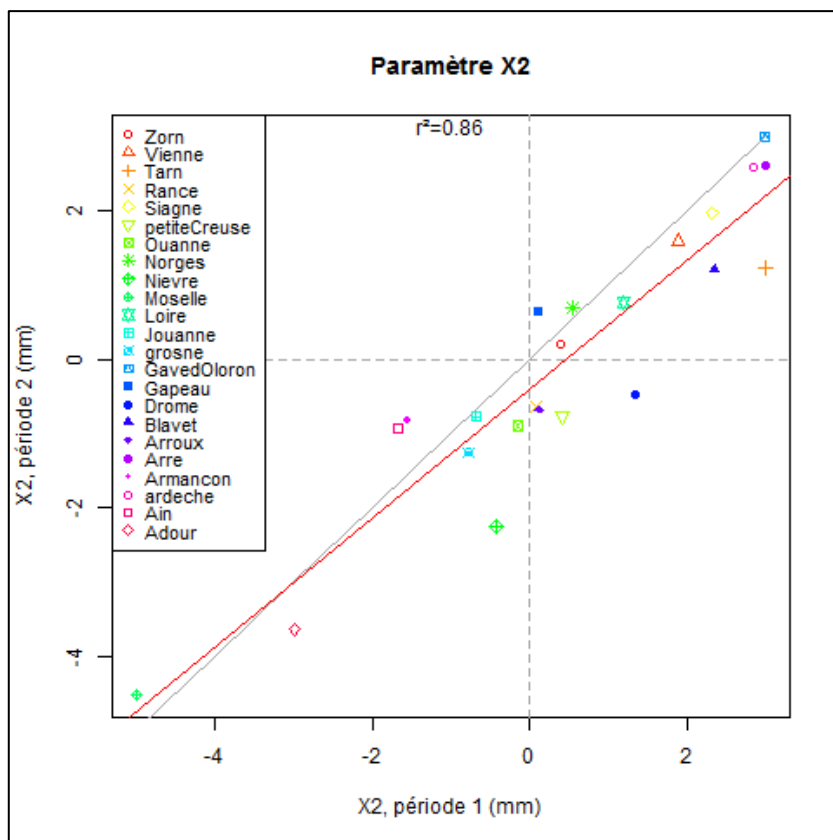
Ces tableaux croisés ont été effectués pour les 28 bassins versants. Parmi ces 28, le modèle peut être considéré robuste pour 17 d’entre eux, et un effet de la variabilité hydroclimatique peut être supposé pour 8 bassins versants parmi ces 17.

Les graphiques ci-dessous présentent l’évolution des 4 paramètres entre la période 1 et la période 2 (fig. 10 à fig. 13).



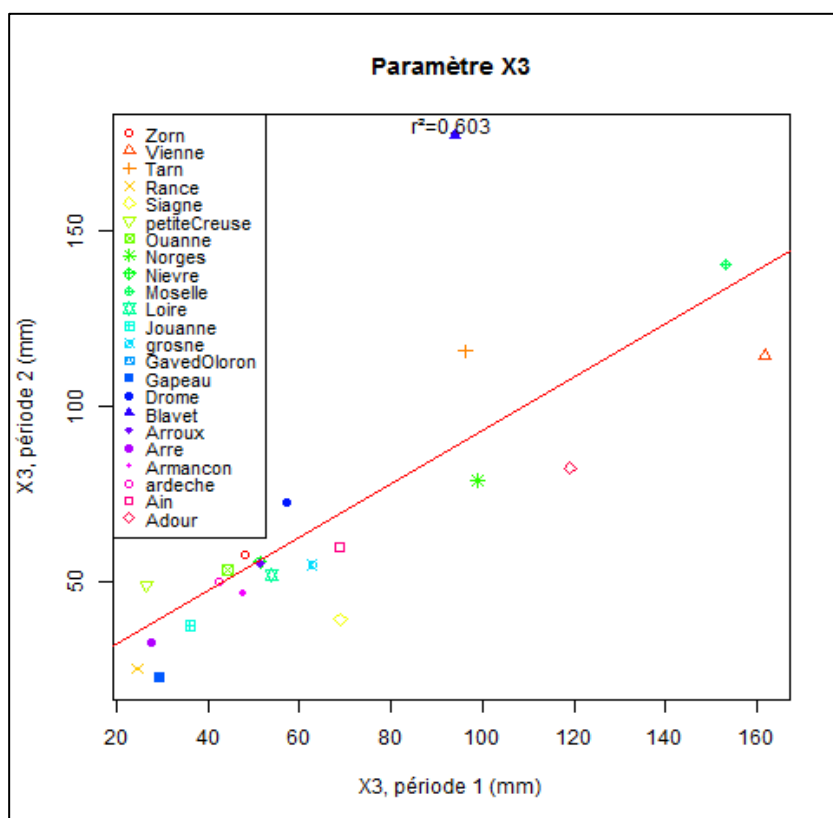
Le paramètre X1 est pour la plupart des bassins plus grands sur la deuxième période que sur la première, et plus particulièrement pour l’Adour, le Tarn, la Vienne et la Zorn.

Figure 10: représentation graphique du paramètre X1, comparaison entre la période 1 et la période 2



Le paramètre X2 simule des apports ou des pertes en eau au sein du bassin versant. La plupart des bassins versants étudiés présente des valeurs de X2 plus importantes en P1 qu'en P2. Le modèle cherche à compenser un apport en eau trop important étant donné le débit observé.

Figure 11: représentation graphique du paramètre X2, comparaison entre la période 1 et la période 2



Les paramètres X3 sont faibles et varient très peu, la période de calibration a peu d'effet sur le paramètre X3.

Figure 12: représentation graphique du paramètre X3, comparaison entre la période 1 et la période 2

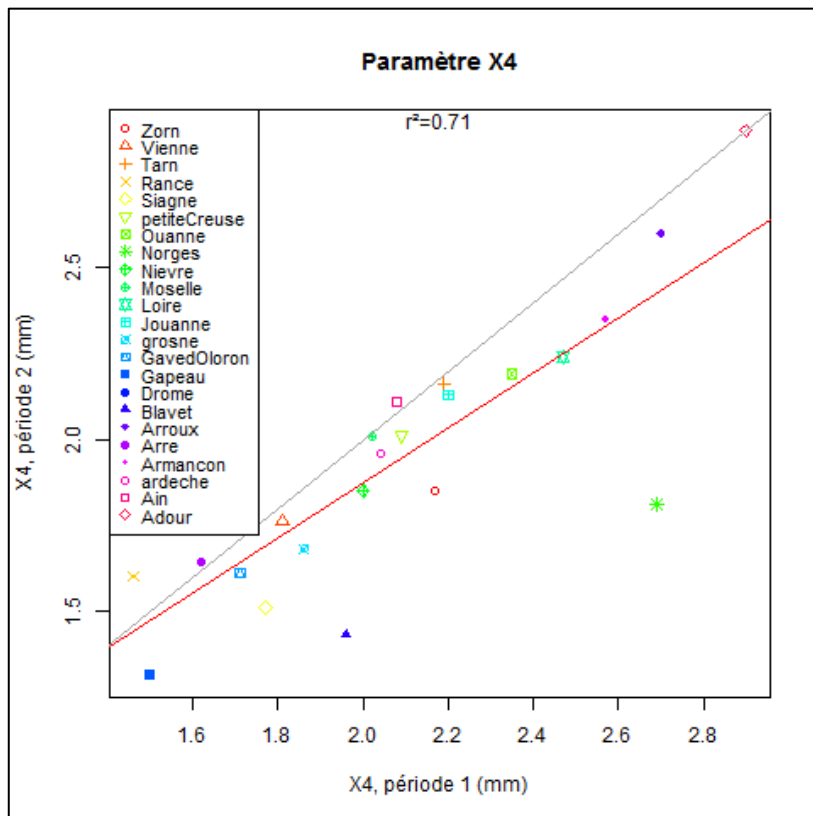


Figure 13: représentation graphique du paramètre X4, comparaison entre la période 1 et la période 2

Le paramètre X4 est, à l'exception de la Rance, de l'Arre et de l'Ain, toujours plus important lors de la période 1 que lors de la période 2, ces différences pouvant aller du simple au double (Norges et Blavet). Cela signifie que les débits des bassins versants répondent plus rapidement aux précipitations, c'est-à-dire qu'ils ont un effet tampon plus faible.

Les hydrogrammes journaliers pour l'année 1986 et l'année 1990, choisies au hasard, pour les bassins versants du Blavet, de la Meuse, du Gave d'Oloron et de la Loire sont regroupés en annexe 8. L'erreur dans le traitement des données de la Meuse semble se confirmer, les deux courbes de calibration étant identiques, ce bassin versant ne sera donc pas traité dans la suite de ce rapport. Les diagrammes au pas de temps journalier montrent que le modèle GR4J ne prend pas en compte les événements pluvieux exceptionnels (crues).

La figure 14 présente les hydrogrammes moyens des bassins versants du Blavet (A), du Gave d'Oloron (B) et de la Loire (C), pour la période 1 (1) et la période 2 (2). La courbe noire représente les débits observés, la courbe bleue les débits simulés après calibration P1 et la courbe rouge représente les débits simulés après calibration sur P2. On constate que les débits simulés après calibration sur P1 sont toujours plus importants que les débits simulés après calibration sur la P2. Cela signifie que les paramètres calculés par le modèle lors de la calibration sur P1 simulent des débits plus importants, ce qui laisse supposer que les débits étaient plus importants pendant la période 1 que pendant la période 2.

Pour le bassin versant du Blavet, on remarque que lors pour la période 1, la calibration sur P2 sous-estime les débits. La simulation est meilleure en été à l'étiage qu'en hiver. Pour la période 2, la calibration sur P1 donne des débits surestimés, et la simulation est bonne toute l'année. Pour le bassin versant du Gave d'Oloron, la simulation est très mauvaise, particulièrement au printemps. Pour le bassin versant de la Loire, les débits simulés de la première période après calibration sur P2 sont mal simulés en hiver et au printemps, mais plutôt bien simulés à l'étiage. Les débits de la deuxième période sont mal simulés en hiver.

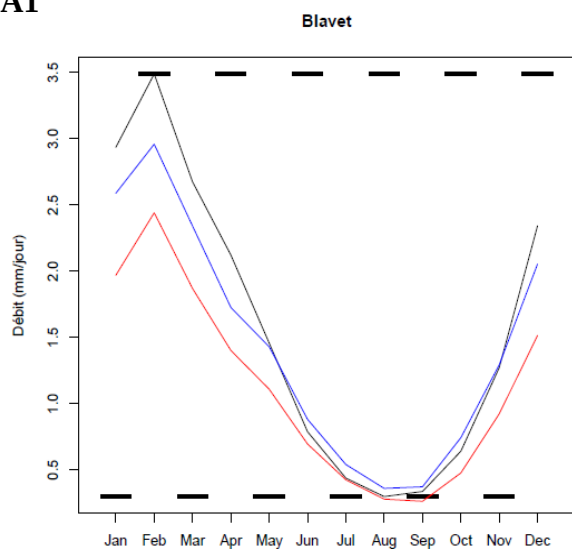
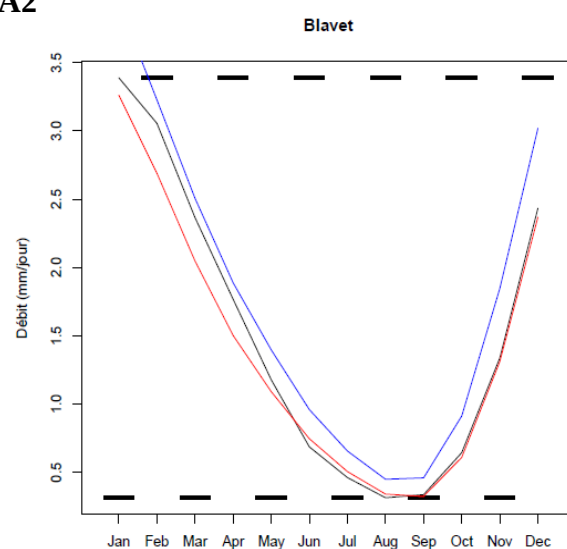
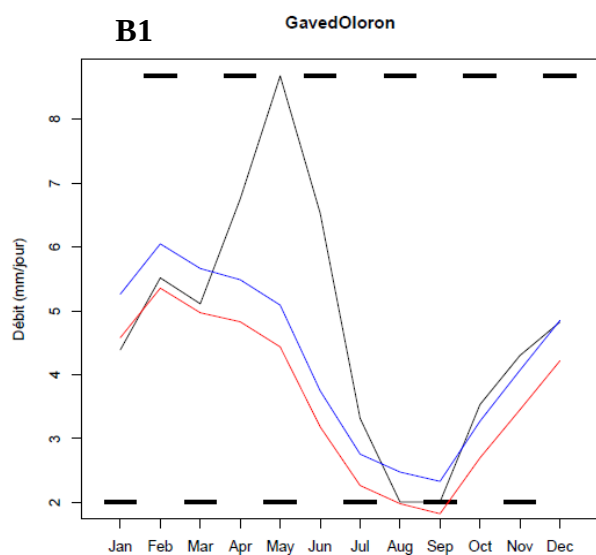
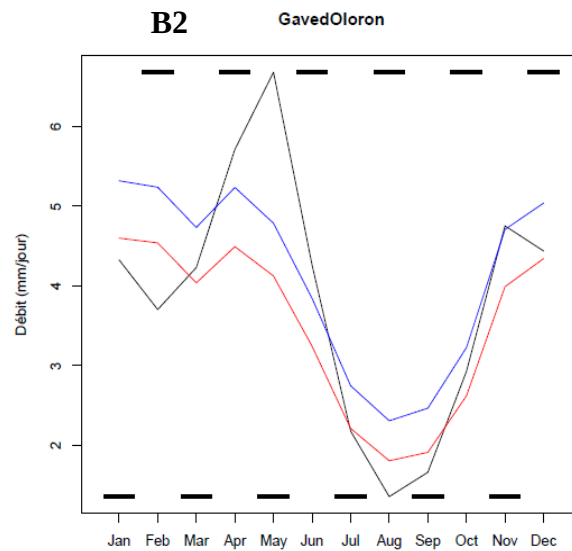
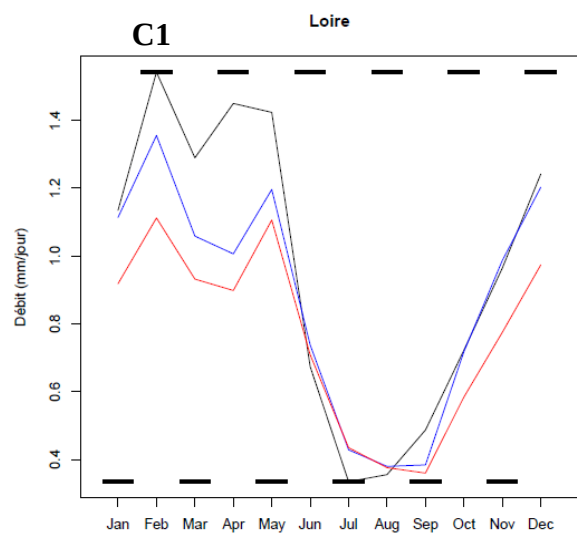
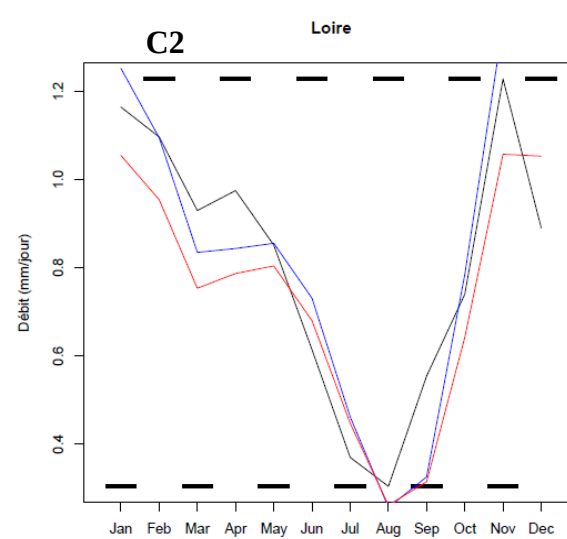
**A1****A2****B1****B2****C1****C2**

Figure 14 : hydrographes moyens obtenus grâce à GR4J, pour la période 1 (1) et la période 2 (2), pour les bassins versant du Blavet (A), du Gave d'Oloron (B) et de la Loire (C)

#### **IV. Discussion**

L'étude des ratios P/Q cumulés et leur évolution de 1970 à 2009 montre une hausse des valeurs de ces ratios, qui n'est cependant pas significative pour tous les bassins versants. Cette hausse indique un changement dans la transformation des pluies en débit, plus précisément une diminution du débit par rapport aux pluies. Les précipitations sont moins transformées en débit, il y a des pertes en eau au sein de ces bassins. Ceci peut s'expliquer par l'augmentation de l'ETP. Le graphique adimensionnel semble montrer que les bassins versants étudiés deviennent moins conservatifs, dans le sens des pertes en eau. C'est-à-dire que la somme des débits et de l'ETP a tendance à devenir inférieure aux précipitations pour un même bassin versant. Cela indiquerait une perte en eau du bassin liée à un autre paramètre que l'ETP. Il faut cependant prendre ces observations avec beaucoup de précautions, car l'étude menée ici sur le graphique adimensionnel ne fait pas l'objet d'analyses statistiques. Une des hypothèses possibles serait que l'augmentation de la température entraîne l'augmentation de l'ETP, ce qui entraîne une diminution du débit, tout en prenant en compte que d'autres paramètres peuvent entrer en jeu, comme l'anthropisation du cours d'eau (installation de barrages, captage AEP). La question se pose de la qualité de nos données brutes : les données d'ETP sont-elles réellement représentatives de la réalité ? On peut également se demander si une rupture a été observée dans nos données d'ETP.

Cette augmentation apparaît comme brutale selon les bassins versants, puisqu'une rupture significative dans les valeurs des ratios P/Q annuels a été observée pour la moitié des bassins versants étudiés. Cela signifie que sur ces bassins versants, les relations entre les paramètres hydroclimatiques ont changé à partir d'une date précise, soit 1987/1988 pour la majorité d'entre eux. Cette rupture dans les ratios P/Q correspond à celle observée dans les températures de surface. A l'échelle saisonnière, le nombre de bassins versants présentant une rupture significative est deux fois plus important au printemps qu'en automne. Cela correspond aux observations faites à l'échelle saisonnière dans les températures de surface, qui présentent une rupture significative au printemps mais pas en automne. Cette observation vient appuyer notre hypothèse selon laquelle la rupture dans les températures de surface de 1987/1988 impactent le débit des cours d'eau.

L'application du modèle hydrologique GR4J d'abord sur la période P1 puis sur P2 permet également de détecter des modifications de la relation pluie-débit.

Les hydrogrammes obtenus avec GR4J montrent en effet une différence importante entre les débits simulés selon leur période de calibration (P1 ou P2), traduisant des performances diminuées du modèle, et des paramétrisations bien distinctes selon la période utilisée en calibration (diminution des paramètres X2 et X4 entre les deux périodes notamment). Ces résultats pourraient indiquer des différences importantes dans les données brutes de la période 1 et de la période 2 fournies à l'entrée du modèle. Les observations semblent donc aller dans le sens d'un impact de la rupture dans les températures de surface de 1987/1988 sur les débits des cours d'eau. Le paramètre X4 a diminué entre la période 1 et P2, ce qui signifie que le temps d'écoulement de l'eau dans le bassin versant est plus court sur P2 que sur P1. On pourrait supposer une diminution de la contribution de la nappe au débit du cours d'eau par rapport à celle des ruissellements de surface.

Cependant, il y a des limites à ces observations. Le nombre de bassins présentant cette rupture est trop faible pour pouvoir affirmer que la rupture observée dans les températures de

surface a réellement un impact sur les relations entre les paramètres hydroclimatiques, et sur le débit des cours d'eau, et la significativité de la différence entre les débits simulés calibrés sur P1 ou sur P2 n'est pas calculée. De plus, le nombre des bassins versants étudiés est trop faible pour établir la significativité des observations faites lors de cette étude.

Les bassins versants présentant une rupture ont tous des climats très différents, et il n'est pas possible ici de relier la rupture dans les ratios P/Q à un climat en particulier, ni à une occupation du sol majoritaire (territoires agricoles ou forêts). Cependant, tous les bassins versants ayant un régime hydrologique de type cévenol présentent une rupture dans les ratios P/Q, ainsi que le seul bassin versant présentant un régime nival (Bassin versant du Gave d'Oloron). On pourrait supposer que les bassins versants dépendant plus fortement de conditions climatiques exceptionnelles sont plus sensibles à la hausse des températures de surface.

Le modèle GR4J simule mieux les débits en été, à l'étiage, qu'en hiver et pendant les périodes de plus fortes précipitations. Ceci s'explique par la difficulté du modèle à simuler les débits de crues, du fait du manque de fiabilité des données hydrologiques (débit) et des données pluviométriques en cas d'épisodes pluvieux intenses (débordement des pluviomètres, mauvaise estimation de l'intensité). Le choix de la fonction objectif (log) peut également expliquer les problèmes de simulation. Enfin, de par son fonctionnement, le modèle GR4J a du mal à reproduire les crues : GR4J est un modèle global non distribué, il n'y a donc pas de spatialisation des pluies, et l'échelle journalière est trop lâche pour reproduire des crues. Toutes ces conditions font qu'il est difficile de reproduire une onde de crue.

Les données utilisées ne sont pas toujours représentatives du bassin versant, ce qui explique la mauvaise simulation des débits par GR4J pour certains bassins versant tels que l'Adour ou le Gapeau.

Cette étude connaît de nombreuses limites, dans le choix des bassins versants, la sélection des données brutes et dans le fonctionnement du modèle GR4J.

Tout d'abord, dans la délimitation physique des bassins versants, qui a été faite d'après les limites topographiques (lignes de crête). Ce type de délimitation ne prend pas en compte les flux d'eau souterrains et les limites hydrogéologique du bassin versant. Un important apport en eau par les précipitations est donc négligé. Ensuite, il y a des limites dans la spatialisation des données brutes d'ETP et de précipitations. Pour les données de précipitations, les stations pluviométriques disponibles ne sont pas toujours réparties sur le bassin versant de manière homogène, et pour certains petits bassins versant il est difficile de trouver plusieurs stations pluviométriques. La sélection des stations pluviométriques sur le site de Météo France est également à revoir pour certains bassins versants comme l'Adour, n'ayant que 4 stations pluviométriques, toutes réunies à l'amont du bassin (en zone montagneuse). Les données d'ETP sont le résultat d'interpolations, et sont extraites des grilles de météo France. Certains points de la grille sélectionnée sont situés hors des limites du bassin versant. Tout cela aboutit à une mauvaise représentation des données.

Le modèle GR4J présente aussi des limites. L'étude de l'ensemble des hydrogrammes moyens des 28 bassins versants semble montrer que le modèle simule mal les débits pour les bassins versants soumis à un régime différent du régime pluvial, et ce quel que soit la période de calibration considérée. Le modèle GR4J ne semblent pas adapté pour les bassins versants soumis à des régimes nival et pluvial de type cévenol (le Gave d'Oloron, le Tarn, l'Arre, l'Ardèche). De plus, le

fonctionnement des bassins versant est très simplifié, il omet de nombreux paramètres et ne correspond pas à la réalité physique.

Le fait que le niveau d'anthropisation des bassins versants sélectionnés n'est pas connu est une autre limite de cette étude. La présence de barrage, de captage AEP et la chenalisation du cours d'eau ne sont pas prises en compte.

## **V. Conclusion**

La relation "pluie-débit" des bassins a été modifiée entre les périodes P1 (1970-1987) et P2 (1988-2009); comme en témoigne le graphique adimensionnel et l'évolution des ratios pluie-débit. Les ratios pluie-débit ont été calculés pour chaque BV à l'échelle annuelle et saisonnière. Ils ont montré des tendances à la hausse significatives pour 10 bassins versants à l'échelle annuelle. Cette évolution n'est pas que tendancielle, car des ruptures significatives ont été observées à l'échelle annuelle et saisonnière. On peut relier cette rupture à celle observée dans les températures, puisque la saisonnalité observée correspond aux observations de Brulebois et al. (2015). Il y aurait donc un changement dans la transformation des pluies en débit entre la période 1 et la période 2. Ce changement peut s'expliquer par l'augmentation de l'ETP, ou par d'autres paramètres non pris en compte dans cette étude, comme l'anthropisation du cours d'eau par exemple.

La modification de la relation pluie-débit entre P1 et P2 a également pu être observée avec GR4J, les paramètres fixés par le modèle ayant changés entre les deux périodes. Cependant, on assiste à une mauvaise représentation des débits pour les périodes de crue et pour les régimes niveaux et pluviaux de type cévenol. Il faut cependant rester prudent sur l'interprétation de ces résultats, car le nombre de bassins étudiés ne permet pas d'établir la significativité de nos observations.

Il est difficile de déterminer s'il serait possible d'utiliser GR4J pour simuler les débits futurs. Le modèle semble fonctionner pour des bassins versants simples, mais peu fiable pour des bassins versant soumis à des régimes plus complexes. De plus, l'augmentation des épisodes pluvieux intenses prévus par le GIEC ne serait pas prise en compte par GR4J, ce qui aboutirait à une mauvaise simulation des débits. Le choix des données brutes joue un rôle primordial dans la bonne simulation des débits par GR4J, elles doivent être représentatives de tout le bassin versant.

Pour rendre cette étude plus pertinente, il serait intéressant de faire des tests statistiques sur les résultats avant et après 1988 du graphique adimensionnel, et sur les débits observés et simulés selon la période de calibration, afin de déterminer la significativité des différents résultats sur la période 1 et sur la période 2. Etendre l'étude sur plus de bassins versants permettrait d'avoir des résultats plus significatifs en termes de rupture. Il faudrait également prendre en compte les flux souterrains, ainsi que l'occupation du sol et l'anthropisation du cours d'eau. Il faudrait également étudier l'évolution temporelle des données d'ETP, afin de constater ou non la présence d'une rupture dans les valeurs d'ETP.

## **Bibliographie**

- Andrews, F., 2010. Package Hydromad.
- Beltrando, G., 2010. Les géographes-climatologues français et le changement climatique aux échelles régionales. *EchoGéo*.
- Bigot, S., Rome, S., 2010. Contraintes climatiques dans les Préalpes françaises: évolution récente et conséquences potentielles futures. *EchoGéo*.
- Bonnefoy, C., Quenol, H., Planchon, O., Barbeau, G., 2010. Températures et indices bioclimatiques dans le vignoble du Val de Loire dans un contexte de changement climatique. *EchoGéo*.
- Bourgin, P.-Y., Lobligois, F., Peschard, J., Andréassian, V., Le Moine, N., Coron, L., Perrin, C., Ramos, H., Khalifa, A., 2010. Description des caractéristiques morphologiques, climatiques et hydrologiques de 4436 bassins versants français. Guide d'utilisation de la base de données hydro-climatique.
- Brulebois, E., 2013. Impact du changement climatique sur la ressource en eau en Bourgogne, analyse du couplage entre une modélisation climatique régionale distribuée et une modélisation pluie-débit globale (GR4J).
- Brulebois, E., Castel, T., Richard, Y., Chateau-Smith, C., Amiotte-Suchet, P., 2015. Hydrological response to an abrupt shift in surface air temperature over France in 1987/88. *Submitt. J. Hydrol.*
- Castel, T., Lecomte, C., Richard, Y., Lejeune-Hénaut, I., Larmure, A., 2014. Le réchauffement climatique diminue-t-il le risque de dégâts par le gel pour les cultures de climat tempéré ?
- Choisnel, E., Payen, D., 1988. Les climats de la France.
- Cuccia, C., Richard, Y., Bois, B., Castel, T., Thevenin, D., 2010. Changement climatique: impacts sur la phénologie du pinot noir en Bourgogne, in: *Actes Du 23e Colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC)*. pp. 143–148.
- De Laat, A.T.J., Crok, M., 2013. A late 20th Century European Climate Shift: Fingerprint of Regional Brightening? *Atmospheric Clim. Sci.* 291–300.
- Durand, J.R., Dufour, P., Guiral, D., Zabi, S.G.F. (Eds.), 1993. *Environnement et ressources aquatiques de Côte d'Ivoire*. Editions de l'ORSTOM, Paris.
- Eldin, M., Daudet, A., Quincey, P., 1969. L'évapotranspiration potentielle : applications, définition, principales évaluations, mesure. *Agron. Trop.* 24, 174–180.
- GIEC, 2008. Le changement climatique et l'eau, document technique VI du GIEC.
- Hänggi, P., 2015. R script.
- Husson, F., Josse, J., Le, S., Mazet, J., 2015. Package FactoMineR.
- IRSTEA, 2015. Equipe de recherche "Hydrologie des bassins versants" d'Irstea à Antony [WWW Document]. URL <http://webgr.irstea.fr/> (accessed 5.31.15).
- Kendall, M., 1977. Multivariate Analysis. *Biom. J.* 19, 309.
- Le Moigne, P., n.d. Description de l'analyse des champs de surface sur la France par le système Safran. Note de centre GMME, Météo-France.
- Le Moine, N., 2008. Le bassin versant de surface vu par le souterrain : une voie d'amélioration des performances et du réalisme des modèles pluie-débit ? Université Pierre et Marie Curie.
- Le Moine, N., Vazken, A., Perrin, C., Michel, C., 2007. How can rainfall-runoff models handle intercatchment groundwater flows ? Theoretical study based on 1040 French catchments. *Water Resour. Res.* 43.
- Lupo, A., Kininmonth, W., n.d. Global climate models and thier limitations.
- McLeod, A.I., 2011. Package Kendall.
- Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, 2011. Le réseau fluvial français.
- Moisselin, J.-M., Schneider, M., Canellas, C., 2002. Les changements climatiques en France au XXè siècle. Etude des longues séries homogénéisées de données de température et de précipitations. *La météorologie* 8, 45–46.

- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10, 282–290. doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6
- Perrin, C., 2000. Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Institut national polytechnique de Grenoble, Unité de Recherche Qualité et Fonctionnement Hydrologique des Systèmes Aquatiques, Cemagref, Antony.
- Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V., 2007. Modèles hydrologiques du génie rural (GR).
- Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V., 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *J. Hydrol.* 275–289.
- Pettitt, A.N., 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. *Appl. Stat.* 28, 126–135.
- Richard, Y., Castel, T., Bois, B., Cuccia, C., Marteau, R., Rossi, A., Thévenin, D., Toussaint, H., 2014. Évolution des températures observées en Bourgogne (1961-2011). *Bourgogne Nat.* 19, 110–117.
- Rojas Serna, C., 2005. Quelle connaissance hydrométrique minimale pour définir les paramètres d'un modèle pluie-débit ? Ecole nationale du génie rural des eaux et des forêts.
- Wild, M., Gilgen, H., Roesch, A., Ohmura, A., Long, C.N., Dutton, E.G., Forgan, B., Kallis, A., Russak, V., Tsvetkov, A., 2005. From Dimming to Brightening: Decadal Changes in Solar Radiation at Earth's Surface. *Science* 308, 847–850. doi:10.1126/science.1103215
- Zambrano-Bigiarini, M., 2014. Package HydroTSM.
- Zeileis, A., Grothendieck, G., Ryan, J.A., Andrews, F., 2015. Package Zoo.

# **ANNEXES**

## Annexe 1 : carte de localisation des 28 bassins versants étudiés



75 0 75 150 225 300 km

### Légende

- cours d'eau
- Bassins versants
- Exutoire

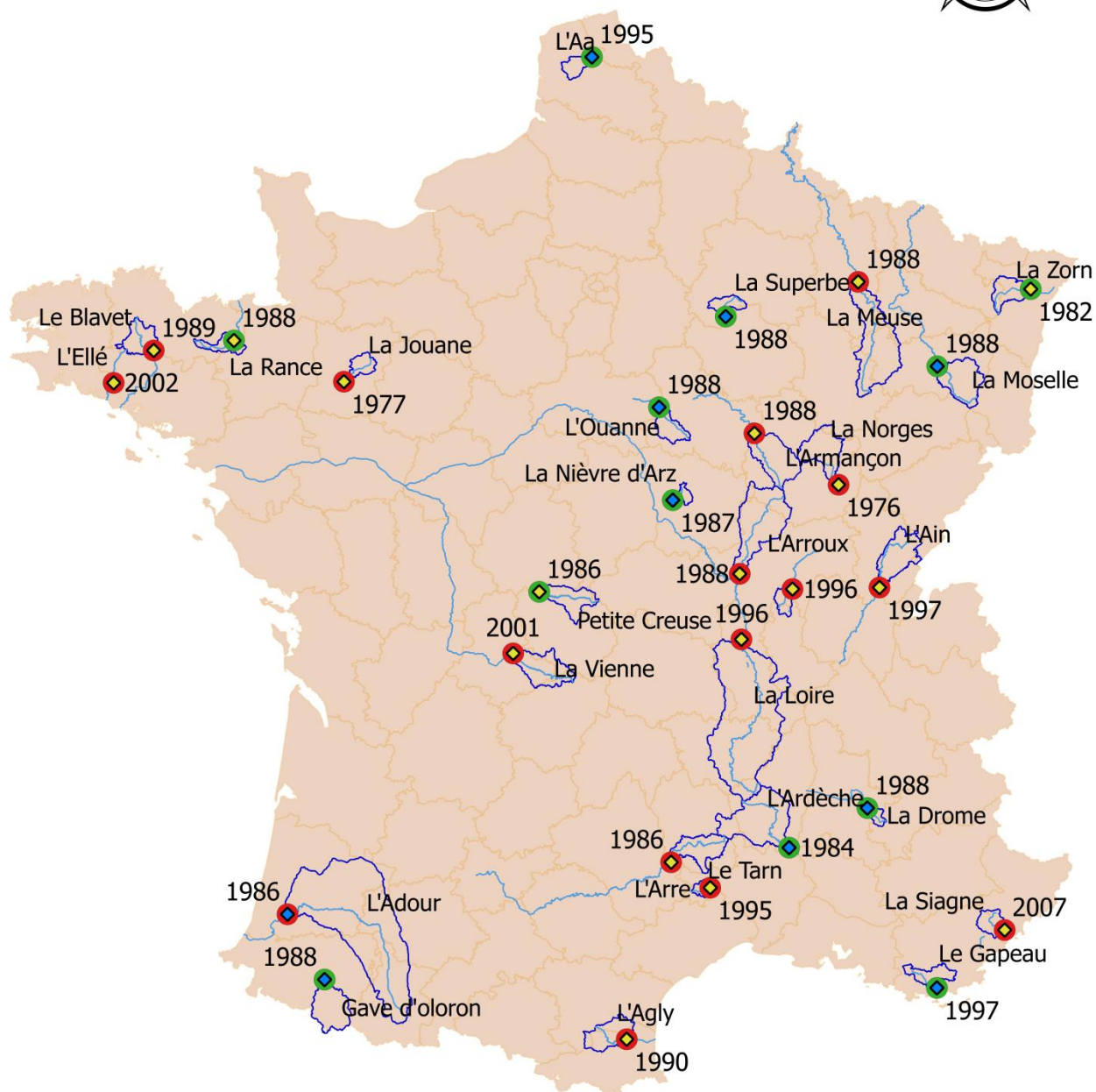
## Annexe 2 : informations sur les bassins versants

| Cours d'eau      | Exutoire                    | Surface (km <sup>2</sup> ) | Climat                                  | Régime hydrologique          | Occupation du sol majoritaire |
|------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| L'Arre           | Le Vigan (46)               | 155                        | Sud-Est du massif central               | Pluvial de type Cévenol      |                               |
| La Nièvre d'Arz  | Poiseux (58)                | 171                        | Centre et contreforts du Massif central | Pluvial                      | Territoires agricoles         |
| La Drome         | Luc-en-Diois (26)           | 194                        | Alpes du Sud                            | Pluvial                      | Forêts                        |
| La Grosne        | Jalogny (71)                | 330                        | Nord-Est du Massif central              | Pluvial                      | Territoires agricoles         |
| La Superbe       | St-Saturnin (51)            | 344                        | Nord-Est du bassin parisien             | Pluvial                      | Territoires agricoles         |
| La Rance         | Guenroc (22)                | 373                        | Bretagne orientale et méridionale       | Pluvial, fort étiage en Août | Territoires agricoles         |
| L'Aa             | Wizerne (62)                | 392                        | Côte de la manche orientale             | Pluvial                      | Territoires agricoles         |
| La Jouane        | Force (11)                  | 403                        | Moyenne vallée de la Loire              | Pluvial, fort étiage en Août | Territoires agricoles         |
| La Siagne        | Pegomas (06)                | 444                        | Var-Alpes maritimes                     | Pluvial, fort étiage en Août | Forêts                        |
| Le Gapeau        | Hyères (83)                 | 539                        | Var-Alpes maritimes                     | Pluvial, fort étiage en Août | Forêts                        |
| L'Ouanne         | Charny (89)                 | 561                        | Centre et contreforts du Massif central | Pluvial                      |                               |
| L'Elle           | Arzano (29)                 | 578                        | Bretagne orientale et méridionale       | Pluvial, fort étiage en Août | Territoires agricoles         |
| La Zorn          | Waltenheim-sur-Zorn (67)    | 648                        | Vosges                                  | Pluvial                      | Territoires agricoles         |
| Le Blavet        | Mur de Bretagne (22)        | 675                        | Finistère Nord                          | Pluvial                      | Territoires agricoles         |
| La petite Creuse | Fresselines (23)            | 853                        | Ouest de Nord-Ouest du Massif central   | Pluvial                      | Territoires agricoles         |
| L'Agly           | Estagel (66)                | 908                        | Pyrénées orientales                     | Pluvial, fort étiage en Août | Forêts                        |
| Le Tarn          | Mostuejous (12)             | 947                        | Sud-Est du massif central               | Pluvial de type Cévenol      | Forêts                        |
| La Norges        | Genlis (21)                 | 1117                       | Lorraine, plateau de Langres, Morvan    | Pluvial                      | Territoires agricoles         |
| La Gave d'oloron | Oloron-Ste-Marie (64)       | 1118                       | Pyrénées atlantiques                    | Nival                        | Forêts                        |
| La Vienne        | St-Priest-Taurion (87)      | 1160                       | Ouest de Nord-Ouest du Massif central   | Pluvial                      | Forêts                        |
| L'Ain            | Cernon (39)                 | 1161                       | Jura                                    | Pluvial                      | Forêts                        |
| La Moselle       | Epinal (88)                 | 1218                       | Vosges                                  | Pluvial                      | Forêts                        |
| L'Armençon       | Aisy-sur-Armençon (89)      | 1353                       | Lorraine, plateau de Langres, Morvan    | Pluvial, fort étiage en Août |                               |
| L'Ardèche        | Saint-Martin-d'Ardèche (07) | 2258                       | Sud-Est du massif central               | Pluvial de type Cévenol      | Forêts                        |
| L'Arroux         | Rigny-sur-Arroux (71)       | 2266                       | Lorraine, plateau de Langres, Morvan    | Pluvial                      | Territoires agricoles         |
| La Meuse         | St-Mihiel (55)              | 2552                       | Lorraine, plateau de Langres, Morvan    | Pluvial, fort étiage en Août | Territoires agricoles         |
| La Loire         | Villerrest (42)             | 6601                       | Nord-Est du Massif central              | Pluvial                      | Territoires agricoles         |
| L'Adour          | St-Vincent-de-Paul (40)     | 7803                       | Aquitaine, Gascogne                     | Pluvio-nival                 | Territoires agricoles         |

### **Annexe 3 : nombres de stations pluviométriques et de points de grille Météo France (valeurs d'ETP)**

| <b>BV</b>          | <b>Nombre stations pluviométrique</b> | <b>Nombre de points de grille ETP</b> |
|--------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Zorn               | 2                                     | 8                                     |
| Vienne             | 9                                     | 15                                    |
| Tarn               | 7                                     | 15                                    |
| Superbe            | 1                                     | 8                                     |
| Siagne             | 2                                     | 6                                     |
| Rance              | 2                                     | 10                                    |
| Petite Creuse      | 3                                     | 18                                    |
| Ouanne             | 4                                     | 9                                     |
| Norges             | 3                                     | 20                                    |
| Nièvre d'Arzembouy | 2                                     | 4                                     |
| Moselle            | 1                                     | 18                                    |
| Meuse              | 6                                     | 42                                    |
| Loire              | 39                                    | 77                                    |
| Jouanne            | 3                                     | 6                                     |
| grosne             | 4                                     | 4                                     |
| Gave d'Oloron      | 4                                     | 41                                    |
| Gapeau             | 3                                     | 5                                     |
| Elle               | 4                                     | 8                                     |
| Drome              | 11                                    | 4                                     |
| Blavet             | 2                                     | 6                                     |
| Arroux             | 7                                     | 36                                    |
| Arre               | 4                                     | 2                                     |
| Armancon           | 9                                     | 20                                    |
| ardeche            | 17                                    | 28                                    |
| Ain                | 4                                     | 15                                    |
| Agly               | 3                                     | 117                                   |
| Adour              | 2                                     | 8                                     |
| Aa                 | 1                                     | 8                                     |

## Annexe 4 : résultats statistiques pour le ratio P/Q (été)



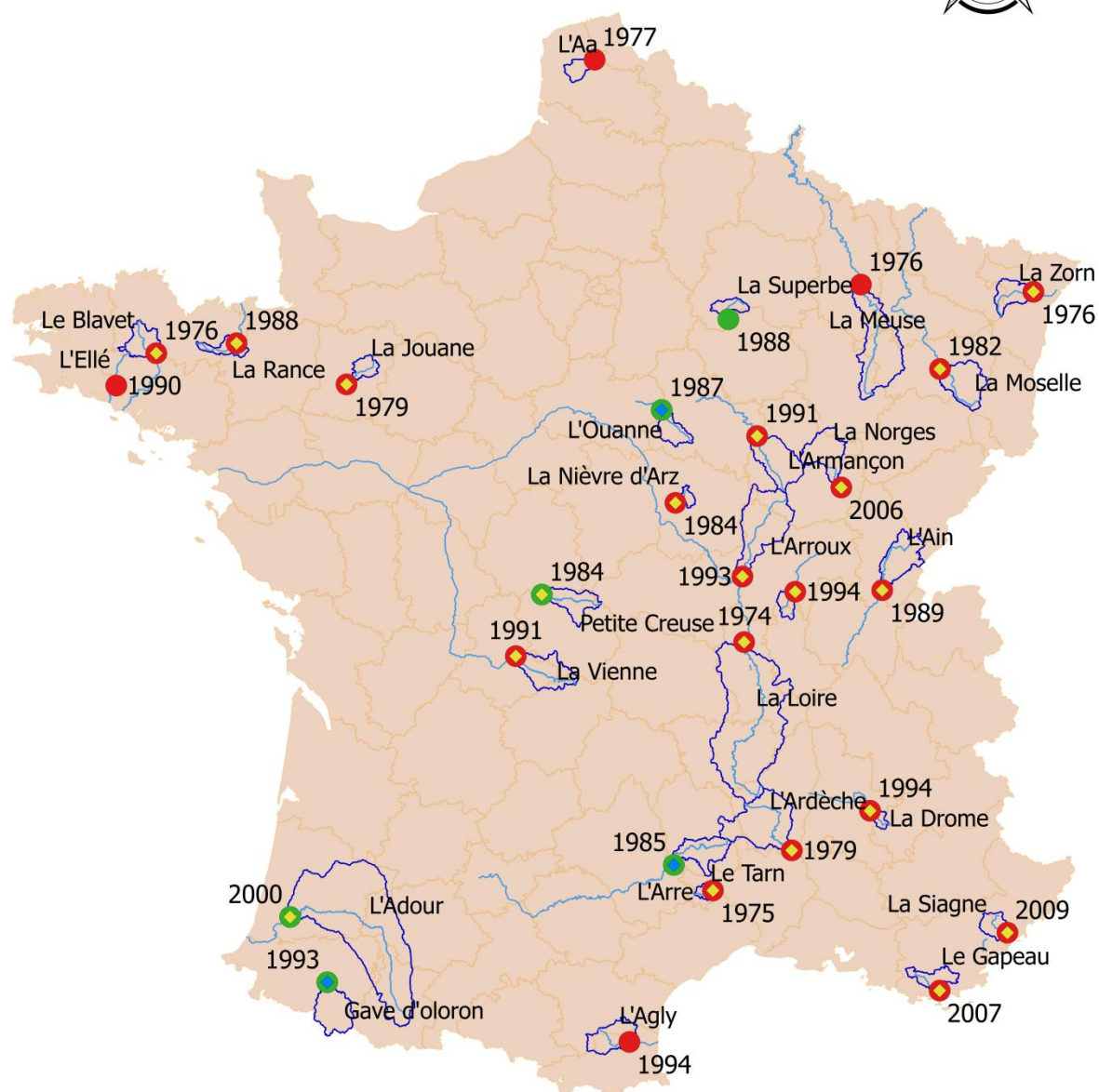
75 0 75 150 225 300 km



### Légende

|                  |                     |
|------------------|---------------------|
| cours d'eau      | tendance (hausse)   |
| Bassins versants | ◆ non significative |
|                  | ◆ significative     |
|                  | rupture             |
|                  | ● non significative |
|                  | ● significative     |

## Annexe 5 : résultats statistiques pour le ratio P/Q (automne)

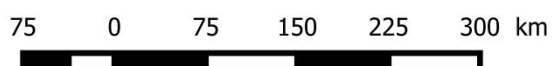
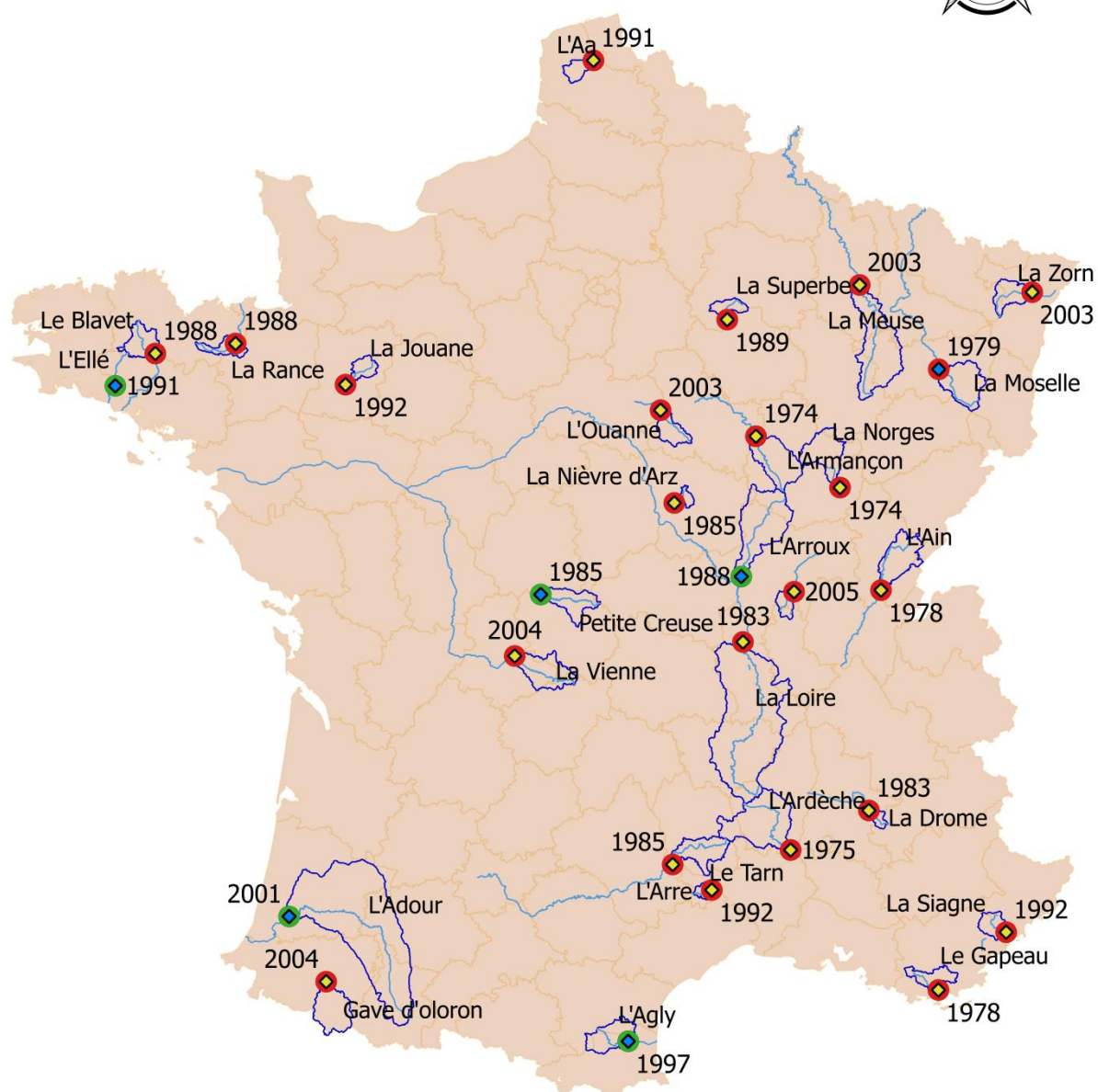


75 0 75 150 225 300 km

### Légende

- cours d'eau
- Bassins versants
- tendance (hausse)
  - non significative
  - significative
- rupture
  - non significative
  - significative

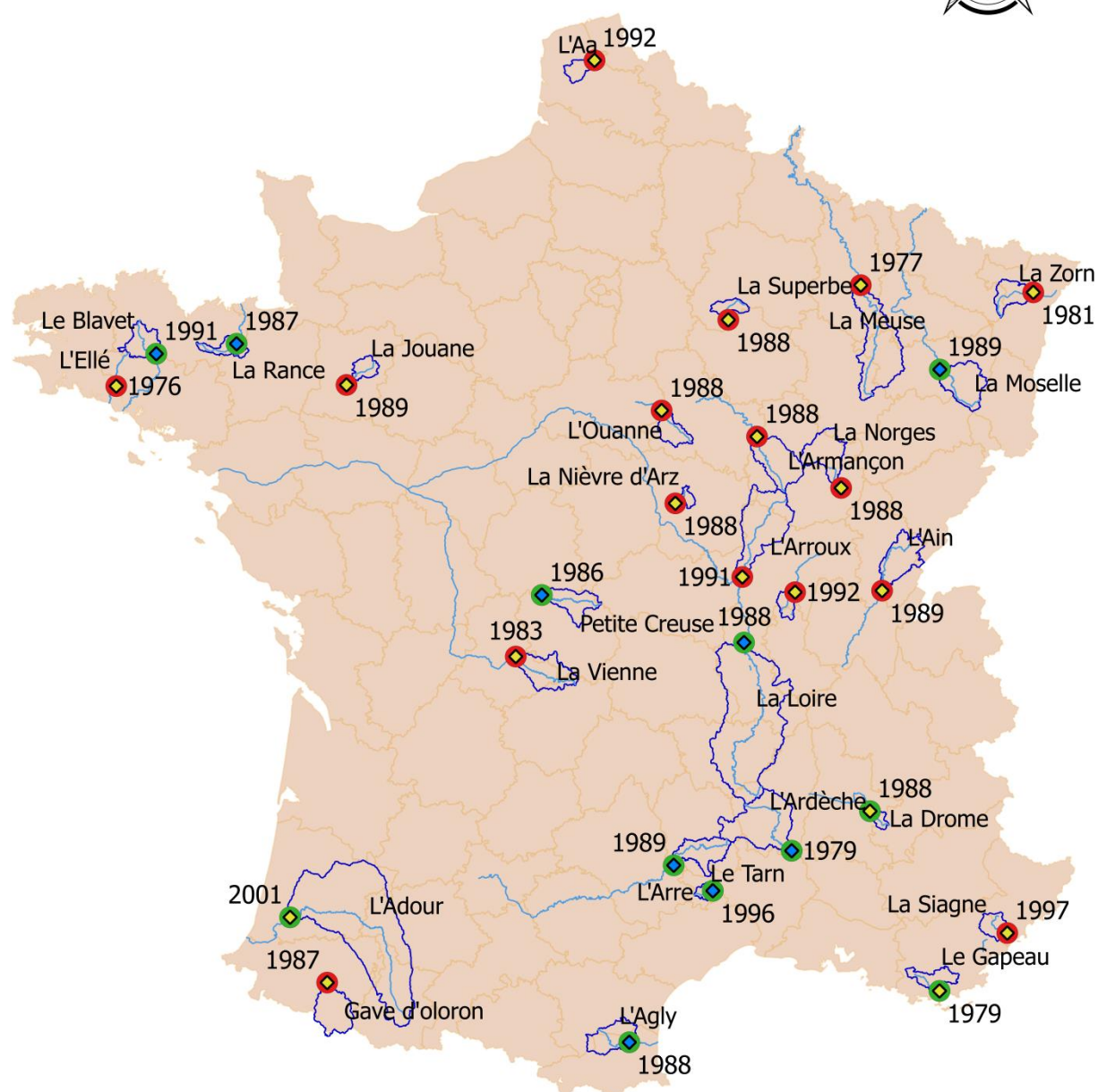
## Annexe 6 : résultats statistiques pour le ratio P/Q (hiver)



### Légende

|                  |                   |
|------------------|-------------------|
| cours d'eau      | tendance (hausse) |
| Bassins versants | non significative |
|                  | significative     |
|                  | rupture           |
|                  | non significative |
|                  | significative     |

## Annexe 7 : résultats statistiques pour le ratio P/Q (printemps)

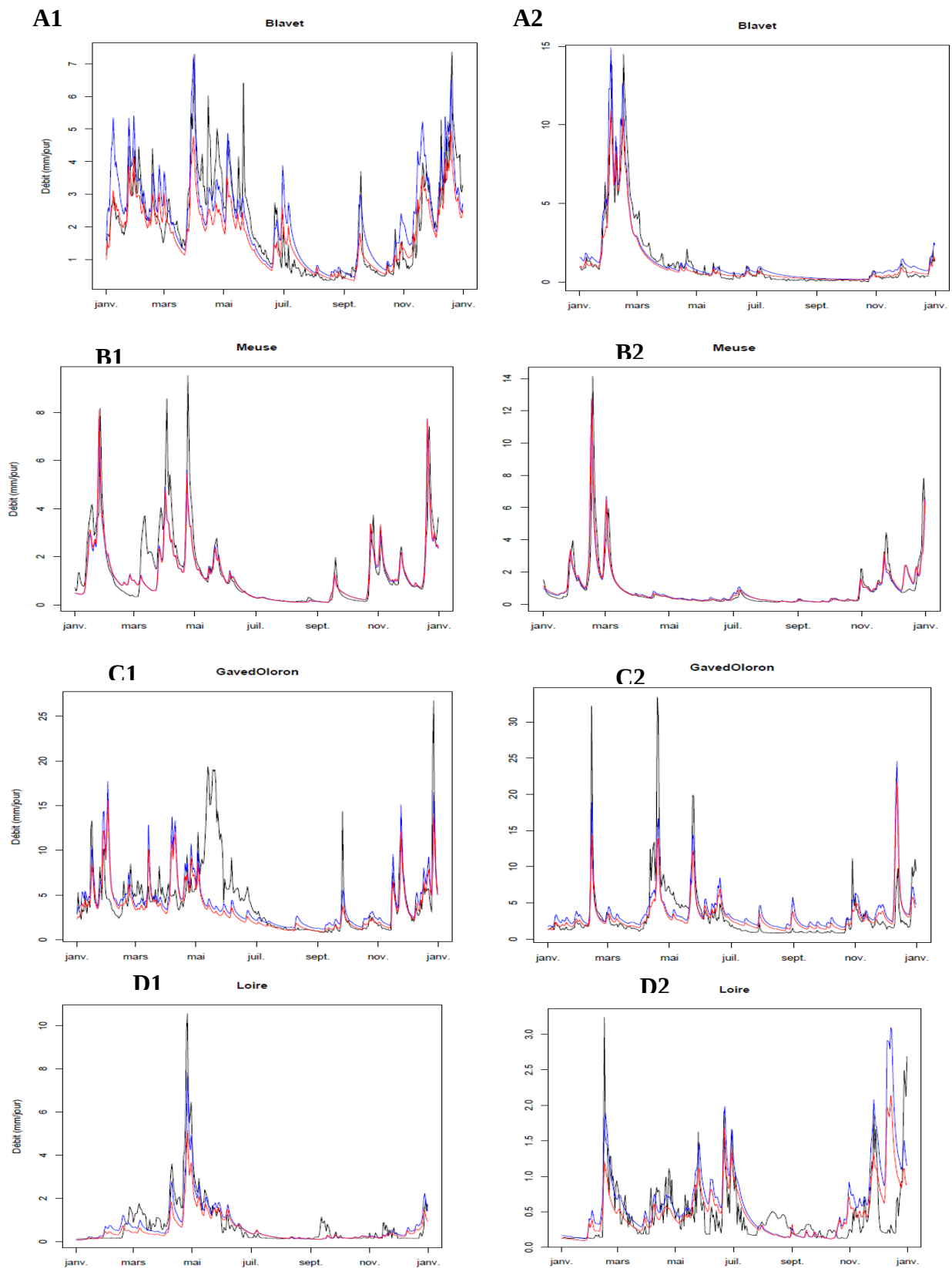


75 0 75 150 225 300 km

### Légende

- cours d'eau
- Bassins versants
- rupture\_printemps
  - non significative
  - significative
- tendance\_printemps
  - ◆ non significative
  - ◆ significative

## Annexe 8 : hydrogrammes des débits observés et simulés au pas de temps journalier pour une année choisie





# **France : impact d'une rupture observée dans les températures de surface sur les débits de 28 cours d'eau**

A l'heure actuelle, les sociétés humaines doivent se demander quel sera l'impact du changement climatique sur l'environnement, et notamment sur les cours d'eau, d'un point de vue qualitatif et quantitatif. En effet l'eau est un élément essentiel pour le fonctionnement des sociétés modernes, et est souvent source de conflits, c'est pourquoi gérer au mieux la ressource en eau dans les années à venir est important. La modélisation hydrologique peut permettre de simuler les débits pour les années futures.

Dans ce rapport sont étudiées les relations entre des paramètres climatiques observés (précipitations et ETP) et le débit des cours d'eau mesurés à l'exutoire, à l'échelle du bassin versant, de 1970 à 2009, en considérant l'impact d'une rupture observée dans les températures de surface en 1987/1988. L'efficacité d'un modèle hydrologique choisi (GR4J) à simuler des débits observés est également discutée.

Malgré le manque de significativité de certains résultats, il a été observé une rupture dans les ratios pluie-débit annuels pour la moitié des bassins versants étudiés, et une tendance générale à la hausse de ce même ratio. Une différence dans les paramètres hydroclimatiques avant 1988 et après 1988 a également été détectée. Il a été observé que le modèle hydrologique GR4J est peu efficace pour simuler les débits de crues et la fonte des neiges, et donc peu efficace sur les bassins versants ayant un régime pluvial de type cévenol ou nival.

Mots-clefs : *changement climatique, paramètres hydroclimatiques, rupture, modélisation hydrologique*