

# *Imagine 2030*

## **Modélisation hydrologique des sous-bassins versants de la Garonne à l'aide d'un modèle pluie-débit global**

Meggy Hau

Tuteur : Charles Perrin

*Stage effectué du 12/11/2007 au 25/04/2008*



Unité Hydrosystèmes et Bioprocédés  
Equipe TRANSFEAU  
Parc de Tourvoie - BP 44  
92163 Antony Cedex

---

## Remerciements

---

Je tiens à remercier Cécile Loumagne et Vazken Andréassian, de m'avoir accueillie en stage au sein de l'unité Hydrostèmes et Bioprocédés du CEMAGREF d'Antony.

Mes remerciements vont ensuite à mon tuteur de stage, Charles Perrin, qui m'a donné l'opportunité de découvrir la "VRAIE Hydrologie" comme me l'a souvent répété un de mes professeurs, Roger Moussa.

Je suis reconnaissante à Maria-Helena Ramos de s'être toujours souciée de ma compréhension des problèmes abordés. Merci pour tes conseils, ton aide précieuse en anglais et puis surtout... pour les entraînements piscine que je n'aurais probablement pas eu le courage d'effectuer sans toi !

Un grand merci à Lionel Berthet pour sa disponibilité et son soutien dans mes débuts en "R". Merci d'avoir pris le temps de répondre à mes questions et résoudre mes bugs si fréquents...

Je remercie également Jean-Louis Rosique pour ces heures passées à tenter de comprendre les mystères des SIG...

Merci à Alba, stagiaire de l'équipe Poisson pour sa bonne humeur et ses traductions espagnoles, qui ne seront pas utilisées dans ce rapport mais que je garde néanmoins en mémoire.

Enfin, j'aimerais remercier tous les membres de l'équipe d'hydrologie pour leur accueil et leur bonne humeur.

---

## Résumé

---

Faire face à des besoins croissants en eau dans un contexte de raréfaction de la ressource est un défi majeur des prochaines années. Le bassin versant de la Garonne à Lamagistère n'échappe pas à ce dilemme. Les étiages sévères des années 2003, 2005 et 2006, ont souligné les potentiels conflits autour du partage de l'eau. Hydroélectricité, irrigation, alimentation en eau potable, loisirs, tourisme : les enjeux sur le bassin sont nombreux.

Dans ce contexte, le Cemagref et EDF en partenariat avec l'Agence de l'Eau Adour-Garonne, ont répondu à un Appel à Proposition de Recherche du MEDD. Baptisé "*Imagine 2030 : Perspectives Ressources en Eau : Evolution de la disponibilité en eau, évolution des usages et conséquences pour la gestion de la ressource superficielle – Application au bassin de la Garonne*", le projet doit permettre d'établir un diagnostic sur la pérennité de la ressource en eau sous l'hypothèse de changement climatique.

Deux approches de modélisation hydrologique sont utilisées dans le cadre du projet : l'équipe d'EDF a travaillé sur une version dérivée du modèle hydrologique conceptuel spatialisé CEQUEAU développé par l'INRS-Eau du Canada (*Charbonneau et al.*, 1977). L'équipe du Cemagref a choisi d'utiliser GR4J, un modèle hydrologique empirique global (*Perrin et al.*, 2003).

Les travaux réalisés durant ce stage de césure portent sur la première partie du projet, et concerne principalement la modélisation hydrologique de sous-bassins de la Garonne et des tests de sensibilité au module neige, aux données d'entrée et à la prise en compte des barrages.

---

## Abstract

---

Facing up growing water needs in a context of resources decrease will be a major challenge in the next years. The Garonne River basin at Lamagistère does not avoid this dilemma. The severe low flow periods of 2003, 2005 and 2006, underlined the possible conflicts around the distribution of water. Indeed, water is used for several purposes on the catchment: hydropower, irrigation, water supply, leisure and tourism.

In this context, Cemagref and EDF R&D in partnership with the Water Agency Adour-Garonne answered a Call for Research proposal of the Ministry for Ecology. Called "*Imagine 2030: Prospective in water resources: evolution of water availability, evolution of water use and consequences on the management of surface water – Application to the Garonne basin*", the project should provide a diagnosis on water resources availability under the hypothesis of climate change.

Two approaches of hydrological modelling are evaluated in the project: the EdF team works on a version of the spatialized conceptual hydrological CEQUEAU model developed by INRS-Eau in Canada (*Charbonneau et al.*, 1977). The Cemagref team chose to use GR4J, an empirical lumped hydrological model (*Perrin and al.*, 2003).

The work done in this training period is part of the first half of the project plan, and deals with the hydrological modelling of sub-catchments of the Garonne basin and sensitivity tests to the snow module, the input data and dam accounting.

---

## Sommaire

---

Remerciements .....	1
Résumé .....	2
Abstract.....	2
Sommaire.....	3
Introduction .....	6
1. Le bassin versant de la Garonne à Lamagistère .....	7
1.1. <i>Présentation générale</i> .....	7
1.2. <i>Découpage en sous-bassins et spécificités hydrologiques</i> .....	7
1.3. <i>Présentation de deux des sous-bassins</i> .....	8
1.3.1. L'Ariège à Foix .....	8
1.3.2. L'Aveyron à Loubéjac.....	9
2. Modélisation hydrologique des débits et tests de sensibilité .....	10
2.1. <i>Méthodologie</i> .....	10
2.1.1. Le modèle GR4J.....	10
2.1.2. Procédure de calage-contrôle .....	11
2.1.3. Fonction objectif et critères d'évaluation .....	11
2.2. <i>Tests de sensibilité au module neige</i> .....	12
2.2.1. Présentation des modules .....	13
2.2.2. Résultats .....	13
2.2.2.1. <i>Sur l'ensemble des bassins</i> .....	13
2.2.2.2. <i>Sur le bassin de l'Ariège à Foix</i> .....	14
2.2.2.3. <i>Sur le bassin de l'Aveyron à Loubéjac</i> .....	15
2.3. <i>Tests de sensibilité aux données d'entrées du modèle hydrologique</i> .....	16
2.3.1. Données disponibles .....	16
2.3.2. Modélisations effectuées.....	17
2.3.3. Résultats .....	17
2.3.3.1. <i>Sur l'ensemble des bassins</i> .....	17
2.3.3.3. <i>Sur le bassin de l'Aveyron à Loubéjac</i> .....	19
2.4. <i>Prise en compte des ouvrages dans la modélisation hydrologique</i> .....	20
2.4.1.1. <i>Sur le bassin de l'Ariège à Foix</i> .....	20
2.4.1.2. <i>Sur le bassin de l'Aveyron à Loubéjac</i> .....	23
3. Extrapolation.....	24
3.1. <i>Méthodologie</i> .....	24
3.2. <i>Méthode d'évaluation des modèles</i> .....	25
3.3. <i>Résultats</i> .....	27
3.3.1. Calage sur années avec pluie moyenne faible .....	27
3.3.2. Calage sur années avec pluie moyenne forte .....	27
3.3.3. Première interprétation des résultats .....	27
Perspectives.....	29
Bibliographie.....	30
Glossaire .....	31
Annexes .....	32

## Liste des figures

Figure 1 – Présentation de l'aire d'étude.....	7
Figure 2 – Découpage en sous-bassins.....	8
Figure 3 – Présentation du bassin de l'Ariège à Foix.....	8
Figure 4 – Pluie et débits mensuels moyens sur le bassin de l'Ariège à Foix (Source: Quillat, 2007).....	9
Figure 5 – Présentation de l'Aveyron à Loubéjac.....	9
Figure 6 – Pluie et débits mensuels moyens sur le bassin de l'Aveyron à Loubéjac (Source : Quillat, 2007).....	10
Figure 7 – Représentation schématique du modèle GR4J (Perrin et al., 2003).....	10
Figure 8 – Débits simulés en fonction des débits observés, en contrôle en fonction du module neige appliqué.....	15
Figure 9 – Débits mensuels interannuels observés et simulés en calage et en contrôle sur le sous-bassin de l'Ariège à Foix (Utilisation des données de pluviométrie et de température SAFRAN en présence du module neige MORDOR ou sans module neige dans le modèle hydrologique GR4J).....	15
Figure 10 – Débits simulés en fonction des débits observés, en contrôle en fonction du module neige appliqué.....	16
Figure 11 – Débits mensuels interannuels observés et simulés en calage et en contrôle sur le sous-bassin de l'Aveyron à Loubéjac (Utilisation des données de pluviométrie et de température SAFRAN en présence du module neige MORDOR ou sans module neige dans le modèle hydrologique GR4J calé sur les racines des débits).....	16
Figure 12 – Débits mensuels interannuels observés et simulés en calage et en contrôle sur le sous-bassin de l'Ariège à Foix (Utilisation du module neige MORDOR).....	19
Figure 13 – Débits mensuels interannuels observés et simulés en calage et en contrôle sur le sous-bassin de l'Aveyron à Loubéjac (Utilisation du module neige MORDOR).....	20
Figure 14 – Schéma de fonctionnement du système l'Hospitalet (Source : Agosta, 2007).....	21
Figure 15 – Comparaison des moyennes mensuelles interannuelles observées et simulées, en calage et en contrôle sur le bassin de l'Ariège à Foix, en présence ou non d'un module barrage en utilisant les données de pluies spatialisées Edf et la pluie SAFRAN ainsi que le module neige MORDOR.....	22
Figure 16 – Représentation des débits simulés en fonction des débits observés en prenant ou non en compte les barrages, comparaison des débits simulés.....	22
Figure 17 – Comparaison des moyennes mensuelles interannuelles observées et simulées, en calage et en contrôle sur le bassin de l'Aveyron à Loubéjac, en présence ou non d'un module barrage, sans module neige et en utilisant les données de pluies spatialisées EDF et la température SAFRAN.....	23
Figure 18 – Représentation des débits simulés en fonction des débits observés en prenant ou non en compte les barrages, comparaison des débits simulés.....	24
Figure 19 – Représentation de la méthodologie de sélection des années.....	25
Figure 20 – Moyennes mensuelles interannuelles naturalisées et simulées à partir des débits naturalisés fournis par EDF R&D sur le bassin de l'Ariège à Foix.....	37
Figure 21 : Schéma de sélection des périodes test pour application du "split sample test".....	39

## Liste des tableaux

Tableau 1 – Tests de sensibilité au module neige : Performances moyennes obtenues en contrôle du modèle GR4J utilisant la température et la pluie SAFRAN pour chaque sous-bassin .....	14
Tableau 2 – Performances moyennes obtenues en contrôle en utilisant le modèle GR4J calé sur les racines des débits, avec un module neige dérivé de MORDOR et selon les données de pluviométrie et de température .....	18
Tableau 3 – Performances en contrôle obtenues sur le sous bassin de l'Ariège à Foix, en contrôle du modèle hydrologique GR4J, selon le module neige choisi et en présence ou non d'un module barrage.....	21
Tableau 4 – Performances obtenues sur le sous bassin de l'Aveyron à Loubéjac, en contrôle du modèle hydrologique GR4J, avec ou sans module neige et en présence ou non d'un module barrage.....	23
Tableau 5 - Tests réalisés .....	26
Tableau 6 – Critères moyens obtenus à partir d'un calage sur des années avec une pluie moyenne annuelle faible...	27
Tableau 7 – Critères moyens obtenus à partir d'un calage sur des années avec une pluie moyenne annuelle forte ....	27
Tableau 8 - Liste des postes pluviométriques et des stations de température fournis par la DTG.....	33
Tableau 9 – Test de sensibilité au module neige utilisé : Performances moyennes de chaque sous-bassin obtenues en calage du modèle hydrologique GR4J avec la température et la pluviométrie SAFRAN selon module neige employé	34
Tableau 10 - Test de sensibilité aux données d'entrée du modèle : Performances moyennes de chaque sous-bassin obtenues en calage du modèle hydrologique GR4J en présence du module neige dérivé de MORDOR.....	35
Tableau 11 – Performances obtenues en calage sur le bassin de l'Ariège à Foix.....	36
Tableau 12– Performances obtenues en calage sur le bassin de l'Aveyron à Loubéjac.....	36
Tableau 13 – Performances obtenues sur le bassin de l'Ariège à Foix en travaillant à partir des débits naturalisés fournis par EdF R&D.....	37

## Liste des annexes

Annexe 1: Postes pluviométriques et stations de température fournis par la DTG.....	33
Annexe 2: Résultats en calage des tests présentés dans le paragraphe 2.2 .....	34
Annexe 3 : Résultats en calage des tests présentés dans le paragraphe 2.3 .....	35
Annexe 4 : Résultats en calage des tests présentés dans le paragraphe 2.4 .....	36
Annexe 5 : Essai de modélisation du bassin de l'Ariège à Foix à partir des débits naturalisés .....	37
Annexe 6: Protocole d'évaluation des modèles hydrologiques utilisés dans le cadre du projet IMAGINE2030.....	38

---

## Introduction

---

Ce stage de modélisation hydrologique s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche du programme Risque Décision Territoire du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable. Baptisé **"Imagine 2030"**, le projet réunit l'Agence de l'Eau Adour Garonne, le Laboratoire National en Hydraulique et Environnement (LNHE, EDF R&D) ainsi que deux groupements du Cemagref (Lyon et Antony). Le stage s'est déroulé sur le site du Cemagref d'Antony, au sein de l'équipe TRANSFEAU de l'Unité de Recherche Hydrosystèmes et Bioprocédés (HBAN), du 12 novembre 2007 au 25 avril 2008, sous la tutelle de Charles Perrin.

Les sévères étiages des années 2003, 2005 et 2006, ont mis en évidence les tensions qui pouvaient exister entre les différents utilisateurs de l'eau sur le Bassin de la Garonne.

Ces situations de crise ont déclenché une prise de conscience et une volonté de réflexion sur l'état actuel des ressources et leur gestion et sur un devenir dans une perspective de changement climatique. Dans ce contexte, le projet Imagine 2030 a été initié avec pour objectif une prospection de la ressource en eau et un diagnostic des usages.

Ce stage fait suite aux travaux de C. Agosta (2007) et B. Quillat (2007), qui ont respectivement réalisé leur stage au sein des équipes d'EDF et du Cemagref.

Suite aux premières modélisations hydrologiques réalisées par B. Quillat, nous avons tenté d'apporter des améliorations sur les modélisations hydrologiques des neuf sous-bassins en réalisant des tests de sensibilité au module neige et aux données d'entrée. De plus, pour les sous-bassins de l'Ariège à Foix et de l'Aveyron à Loubéjac, nous avons tenté de prendre en compte l'influence anthropique à travers la modélisation des principaux barrages pour lesquels nous disposons de données. Conscients des limites de la modélisation globale, notre objectif était de disposer d'un modèle de référence dans le cadre du projet Imagine 2030 auquel nous pourrions comparer d'autres approches hydrologiques. Il faut aussi noter, en plus de la différence globale/distribuée des modèles utilisés, que deux approches différentes ont été menées par les équipes d'EDF et du Cemagref. Alors que nous avons travaillé à partir des débits influencés pour le calage du modèle, l'équipe d'EDF s'est intéressée à la naturalisation des débits. "Naturaliser" des débits signifie reconstituer les débits qui seraient passés à l'exutoire si le bassin n'avait pas été soumis à des influences anthropiques. En d'autres termes, il s'agit de réaliser un bilan de tous les mouvements d'eau sur le bassin pour pouvoir reconstituer un débit "naturel" et ainsi s'affranchir des différents usages de l'eau sur le bassin, dans la modélisation hydrologique réalisée par la suite.

Il est intéressant de voir que sur des bassins versants très peu influencés, les performances de GR4Jet de CEQUEAU sont proches, tandis que pour des bassins anthropisés, CEQUEAU obtient de meilleures performances.

D'autre part, une réflexion sur les capacités d'extrapolation des modèles hydrologiques dans un contexte de changement climatique a été menée. Elle s'est déroulée en deux étapes : une recherche bibliographique sur l'état de l'art des modèles hydrologiques sous changement climatique et une série de tests effectuée sur environ 600 bassins français, destinés à évaluer différents modèles hydrologiques globaux tels que GR4J, un modèle dérivé de IHACRES ou encore un modèle dérivé de TOPMODEL.

# 1. Le bassin versant de la Garonne à Lamagistère

## 1.1. Présentation générale

Le bassin versant de la Garonne à Lamagistère s'étend sur 32 250 km<sup>2</sup> (voir **Figure 1**). Il comprend des zones amont situées dans les Pyrénées et le Massif central qui entourent une large zone de plaines cultivées.

Sa localisation lui confère une position de carrefour climatique; il subit ainsi des influences multiples liées à la présence de l'Atlantique, de la Méditerranée, des Pyrénées et du Massif central.

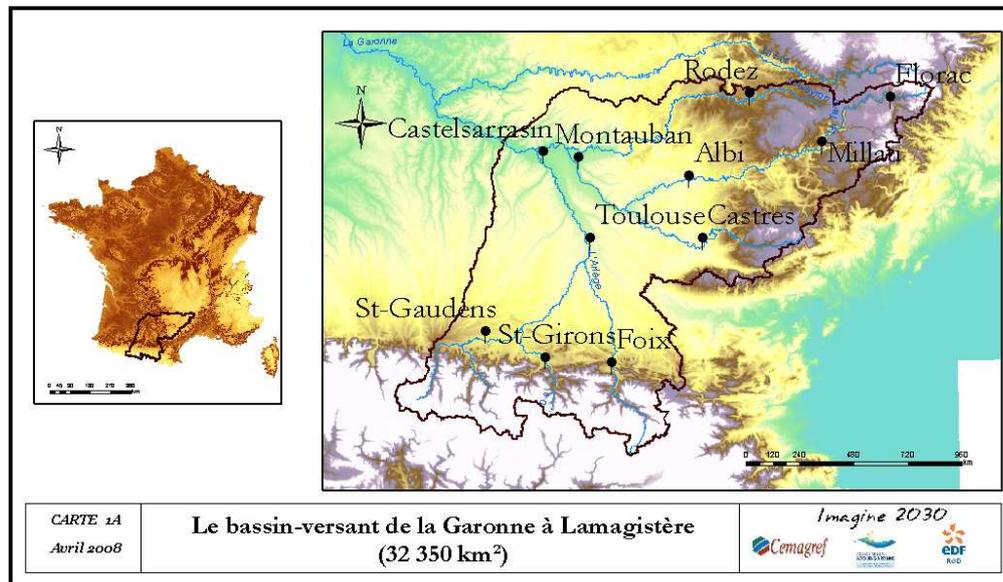


Figure 1 – Présentation de l'aire d'étude

D'autre part, le bassin est soumis à des pressions anthropiques importantes :

- Irrigation dues aux nombreuses exploitations agricoles sur la zone de plaine
- Retenues collinaires et hydroélectriques sur les bassins amont
- Tourisme

Toutes ces influences font de ce bassin, une entité complexe à modéliser. Néanmoins, compte-tenu des épisodes de sécheresse des dernières années, il a semblé nécessaire de s'intéresser à son comportement hydrologique afin d'essayer de comprendre son fonctionnement et de pouvoir, dans un contexte de changement climatique, fournir des aides à la décision quant à la gestion de la ressource en eau.

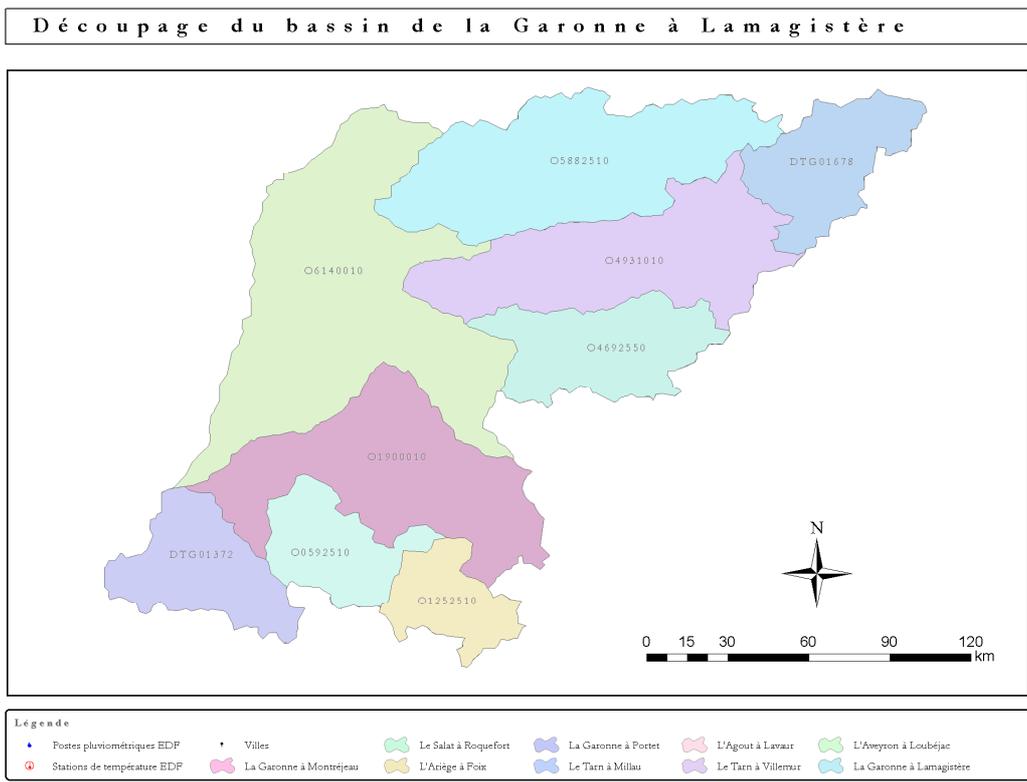
## 1.2. Découpage en sous-bassins et spécificités hydrologiques

Un découpage en neuf sous-bassins versants a été réalisé en s'appuyant sur les stations de mesures de débits existantes et en utilisant de préférence les stations des points nodaux choisies par le SDAGE Adour-Garonne.

Cependant, le découpage tient aussi compte des caractéristiques climatiques et hydrogéologiques particulières observées.

Ce morcellement du bassin facilite l'exercice de modélisation puisqu'il nous permet de modéliser, de façon indépendante, le comportement hydrologique de chaque sous-bassin.

Les différents sous-bassins sont présentés sur la **Figure 2**.

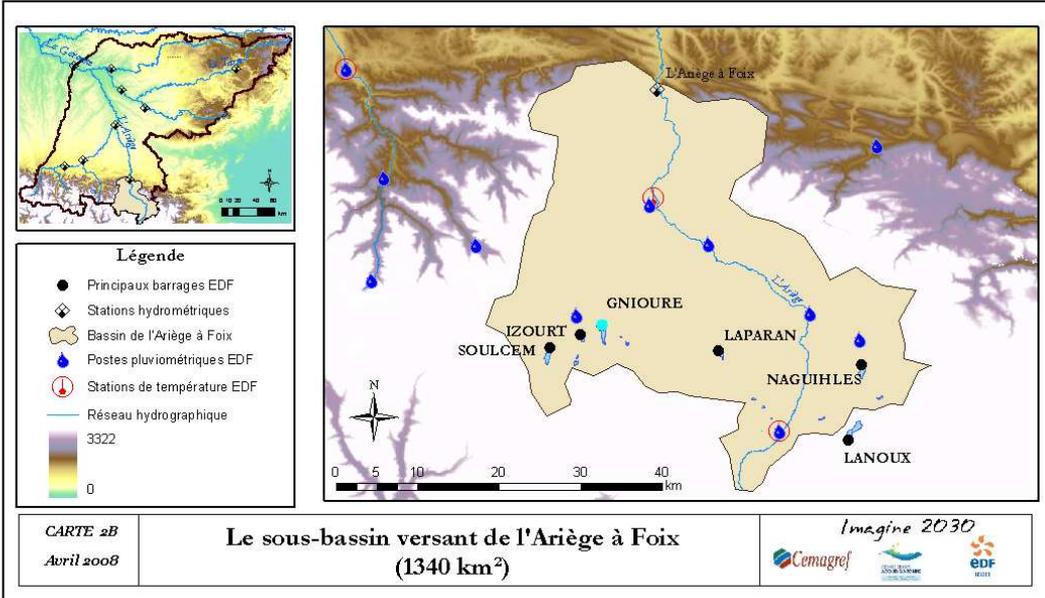


*Figure 2 – Découpage en sous-bassins*

Les caractéristiques des différents sous-bassins étant données dans le rapport de **Quillat (2007)**, nous ne présenterons dans le paragraphe suivant que les sous-bassins de l'Ariège à Foix et de l'Aveyron à Loubéjac, pour lesquels des modélisations plus approfondies ont été réalisées ici.

**1.3. Présentation de deux des sous-bassins**

**1.3.1. L'Ariège à Foix**



*Figure 3 – Présentation du bassin de l'Ariège à Foix*

Le bassin de l'Ariège à Foix s'étend sur les reliefs pyrénéens (voir Figure 3). C'est un petit bassin de 1340 km<sup>2</sup> caractérisé par un régime pluvio-nival marqué. Les pluies moyennes mensuelles sont comprises entre 60 à 150 mm.

Les débits moyens les plus élevés sont de l'ordre de 130 mm et sont observés au début du printemps lors de la fonte des neiges tandis que les débits les plus faibles avoisinent les 30 à 40 mm lors des basses eaux (voir Figure 4).

Le débit à Foix est principalement influencé par les retenues hydroélectriques. On peut estimer à environ 200 Mm<sup>3</sup> le volume des retenues présentes sur le bassin. Ceci représente une lame d'eau équivalente de 149 mm, ce qui est tout à fait significatif.

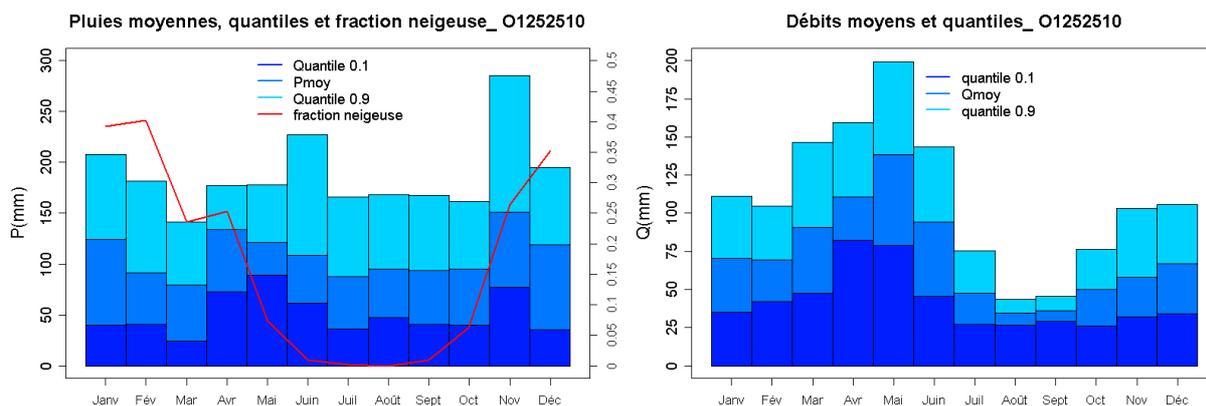


Figure 4 – Pluie et débits mensuels moyens sur le bassin de l'Ariège à Foix (Source: Quillat, 2007)

### 1.3.2. L'Aveyron à Loubéjac

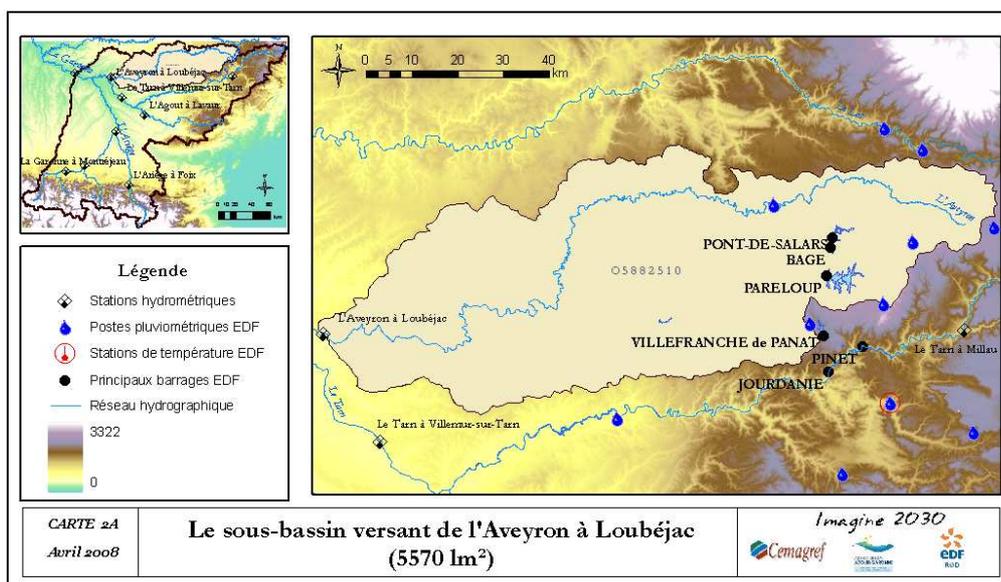


Figure 5 – Présentation de l'Aveyron à Loubéjac

Couvrant une superficie de 1370 km<sup>2</sup>, sur une zone intermédiaire entre plaine et montagne, le bassin de l'Aveyron à Loubéjac est caractérisé par un régime pluvial océanique (voir Figure 5 et Figure 6).

Les hautes eaux ont lieu pendant l'hiver avec un débit moyen maximum d'environ 40 mm tandis que les plus faibles débits moyens observés en été, sont inférieurs à 10 mm.

De par sa localisation entre plaine et montagne, ce bassin est influencé par la gestion des retenues d'hydroélectricité et de soutien d'étiages, mais aussi par les prélèvements agricoles.

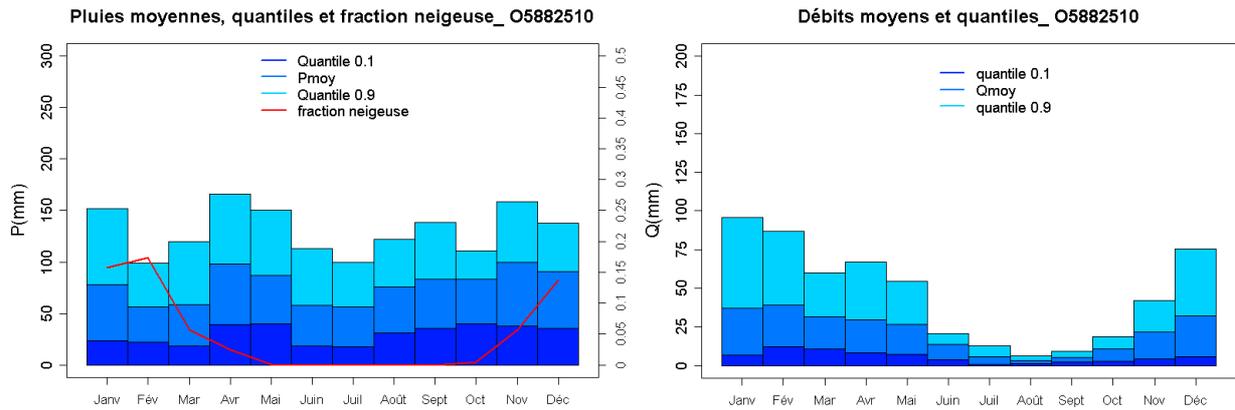


Figure 6 – Pluie et débits mensuels moyens sur le bassin de l'Aveyron à Loubéjac (Source : Quillat, 2007)

## 2. Modélisation hydrologique des débits et tests de sensibilité

### 2.1. Méthodologie

#### 2.1.1. Le modèle GR4J

La version utilisée au cours de ce projet est celle décrite par Perrin et al. (2003). Elle est schématisée sur la Figure 7.

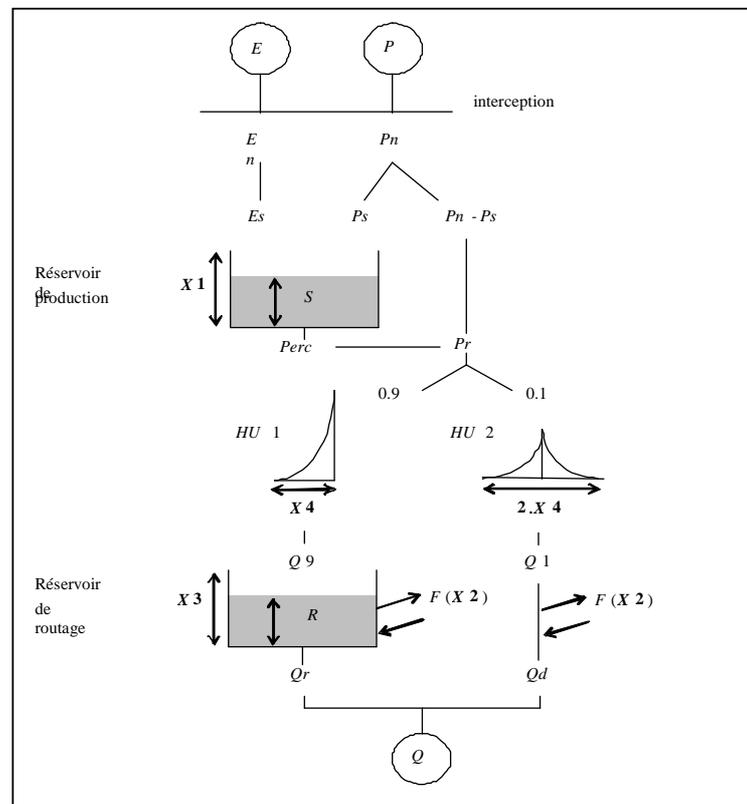


Figure 7 – Représentation schématique du modèle GR4J (Perrin et al., 2003)

GR4J est un modèle hydrologique empirique global à quatre paramètres qui permet de reproduire à partir des données de pluie, d'évapotranspiration potentielle la réponse en débit d'un bassin versant. Des fonctions de production, de routage, d'échange permettent de simuler le comportement hydrologique du bassin. Les paramètres sont déterminés par un calage qui vise à minimiser les écarts entre les séries observées et calculées.

### 2.1.2. Procédure de calage-contrôle

Pour évaluer les performances du modèle, une procédure de calage-contrôle croisés (Klemeš, 1986) a été appliquée : pour chaque bassin, les données ont été partagées en deux sous-périodes indépendantes et de taille similaire. Puis, le modèle a été calé sur une sous-période et contrôlé sur la seconde sous-période avant d'effectuer l'opération inverse : calage sur la seconde sous-période et contrôle sur la première. L'intérêt de cette procédure est qu'elle permet d'avoir une évaluation du modèle en contrôle sur l'ensemble des données disponibles.

Le protocole de test des modèles hydrologiques est fourni en **Annexe 6**.

### 2.1.3. Fonction objectif et critères d'évaluation

#### *Fonction objectif*

Le **critère de Nash et Sutcliffe** (1970) est couramment employé en hydrologie comme fonction objectif.

Il est basé sur la somme des erreurs quadratiques et sa formule est la suivante :

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{calc,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (1)$$

$Q_{obs,i}$  : Débits observés au pas de temps  $i$ ,

$\overline{Q_{obs}}$  : Moyenne des débits observés sur la période,

$Q_{calc,i}$  : Débits simulés au pas de temps  $i$ ,

$n$  : Nombre total de pas de temps de la période d'étude.

Néanmoins, ce critère a tendance à donner une grande importance aux écarts entre les débits de crue simulés et observés. Aussi, il est nécessaire de ne pas se limiter à l'étude de cette fonction objectif si l'on souhaite travailler à la fois sur des périodes de crues et d'étiages.

Or, dans le cadre de ce projet, nous nous intéressons justement aux crues et aux étiages, il nous a donc semblé cohérent de retenir, comme fonction objectif, le critère de Nash-Sutcliffe calculé sur les racines carrées des débits. Ce critère est assez général et donne un poids similaire à la simulation des débits de crues et d'étiages :

$$Nash(\sqrt{Q}) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_{obs,i}} - \sqrt{Q_{calc,i}})^2}{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_{obs,i}} - \sqrt{\overline{Q_{obs}}})^2} \quad (2)$$

#### *Critères d'évaluation des performances*

Plusieurs critères ont été retenus afin d'apprécier les capacités du modèle à reproduire le comportement des sous-bassins versants :

En plus des critères de Nash-Sutcliffe calculés sur les débits et sur les racines des débits définis dans le paragraphe précédent, nous avons choisi d'utiliser le critère de Nash-Sutcliffe basé sur les logarithmes des débits.

Ce dernier donne plus d'importance aux étiages, ce qui le rend intéressant dans l'évaluation des performances du modèle.

Il est calculé selon la formule (3) :

$$Nash(Ln(Q)) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Ln(Q_{obs,i} + \varepsilon) - Ln(Q_{calc,i} + \varepsilon))^2}{\sum_{i=1}^n (Ln(Q_{obs,i} + \varepsilon) - \overline{Ln(Q_{obs} + \varepsilon)})^2} \quad (3)$$

Avec  $\varepsilon = \overline{Q_{obs}}/40$  pris au cas où il existerait un débit nul.

D'autre part, pour faciliter l'interprétation des résultats obtenus sur un grand nombre de bassins (Test en extrapolation), quatre autres critères d'évaluation ont été calculés. Trois d'entre eux dérivent de la formule de Nash et permettent de limiter l'impact des valeurs de critères de Nash fortement négatives dans le calcul de la moyenne.

La formule générale pour calculer les C2M est donnée par :

$$C2M = \frac{Nash}{2 - Nash} \quad (4)$$

Elle est applicable aux formules de Nash (1), (2) et (3) développées au **paragraphe 2.1.3**. Ces critères varient entre -1 et 1.

Le quatrième critère d'évaluation est un critère de bilan. Il correspond au rapport des volumes annuels simulés et calculés. Une formulation variant sur le même intervalle que le critère de Nash ( $]-\infty;1]$ ) a été utilisée:

$$Nash = 1 - \left| \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n Q_{calc,i}}{i=1}}}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}}{i=1}}} - \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}}{i=1}}}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n Q_{calc,i}}{i=1}}} \right| \quad (5)$$

Dans un souci de concision, nous ne présenterons dans ce rapport que les résultats obtenus sur les critères de Nash et de Bilan pour les tests sur les bassins de la Garonne.

## 2.2. Tests de sensibilité au module neige

Les conclusions des premiers tests de modélisation menés par B. Quillat, lors de son stage, ont montré que le modèle hydrologique ne prenait pas correctement en compte les phénomènes neigeux : le module neige utilisé, n'arrivait pas à gérer le stockage de la neige puis sa fonte au printemps. En d'autres termes, les débits en période hivernale étaient surestimés alors qu'à la fonte des neiges, on observait une sous-estimation des volumes d'eau écoulés.

Il nous a donc semblé important d'améliorer le module neige. Pour cela, nous avons modifié le module neige initialement utilisé avant de le comparer à un autre module. Ainsi, nous avons travaillé avec un module dérivé de HBV à 4 paramètres au lieu des 2 initiaux. De plus, la stratégie adoptée

par le modèle MORDOR nous a paru intéressante, ce qui nous a incités à tester un module neige dérivé du modèle hydrologique MORDOR.

### 2.2.1. Présentation des modules

GR4J ne dispose pas actuellement d'un module neige spécifique. Compte-tenu de l'importance de la neige sur les bassins pyrénéens, nous avons ajouté au modèle des modules de prise en compte des fontes neigeuses dérivés de deux autres modèles, HBV et MORDOR.

#### *Module dérivé de HBV à 6 paramètres*

Ce module est inspiré du modèle suédois HBV (**Lindström et al.**, 1997) initialement développé au SMHI (Swedish Meteorological and Hydrological Institute) en Suède par **Bergström et Forsman** (1973).

#### *Module dérivé de MORDOR à 8 paramètres*

Ce module est inspiré du modèle hydrologique MORDOR (**Garçon**, 1996) utilisé à EDF-DTG en prévision opérationnelle, ainsi que pour des études hydrologiques. MORDOR est un modèle conceptuel global à réservoirs : les principaux processus hydrologiques sont décrits, à l'échelle du bassin, par des formulations simples. Il fonctionne en continu, avec pour données d'entrée une pluie spatiale et une température de l'air. Les principaux processus hydrologiques sont représentés : évapotranspiration, ruissellement, infiltration, vidange de nappe, accumulation et fonte de neige, transfert retardé.

### 2.2.2. Résultats

#### *2.2.2.1. Sur l'ensemble des bassins*

Pour des raisons de clarté, seuls les critères de Nash et le bilan sont présentés. Les résultats obtenus en calage sont présentés en **Annexe 2**.

Il ressort du **Tableau 1** que l'introduction d'un module neige améliore les performances, ce qui est un résultat attendu. Les améliorations les plus significatives sont visibles sur les bassins pyrénéens tels que la Garonne à Montréjeau, le Salat à Roquefort et l'Ariège à Foix.

Pour ces quatre bassins dont les premières simulations ont abouti à de mauvaises performances, la prise en compte d'un module neige plus adapté permet des améliorations importantes des critères d'évaluation. Ainsi le critère de Nash-Sutcliffe calculé sur les débits est amélioré d'environ 0.05 avec le module dérivé de HBV tandis que l'utilisation d'un module dérivé de MORDOR permet d'obtenir une amélioration de 0.12 en moyenne en contrôle.

Sur les bassins situés plus en aval ou sur la partie Massif Central, la sensibilité au module neige est moins marquée. Ainsi l'Aveyron à Loubéjac, le Tarn à Villemur ou encore la Garonne à Lamagistère voient les performances du modèle hydrologique augmenter de 0.02 à 0.03.

Pour résumer sur l'ensemble des stations, le critère de Nash-Sutcliffe calculé sur les débits est amélioré de près de 0.04 en utilisant le module neige dérivé de HBV alors que l'emploi du module dérivé de MORDOR permet une amélioration de 0.08.

Pour la suite des tests, nous avons choisi d'utiliser le module neige dérivé de MORDOR dans les modélisations hydrologiques afin de ne pas multiplier les tests.

GR4J en CONTRÔLE	Module neige	Nash(Q)	Nash( $\sqrt{Q}$ )	Nash(Ln Q)	BILAN	Module optimum
<i>Tarn à Millau</i> DTG01678	SANS	0.848	0.876	0.835	<b>0.995</b>	MORDOR
	dérivé de HBV	0.917	0.886	0.838	0.986	
	dérivé de MORDOR	<b>0.926</b>	<b>0.916</b>	<b>0.868</b>	0.938	
<i>Aveyron à Loubéjac</i> O5882510	SANS	0.892	0.927	<b>0.882</b>	<b>0.947</b>	HBV
	dérivé de HBV	<b>0.900</b>	<b>0.930</b>	0.880	0.946	
	dérivé de MORDOR	0.893	0.922	0.877	0.934	
<i>Tarn à Villemur</i> O4931010	SANS	0.848	0.876	0.835	<b>0.995</b>	MORDOR
	dérivé de HBV	<b>0.870</b>	0.886	0.838	0.986	
	dérivé de MORDOR	0.866	<b>0.894</b>	<b>0.867</b>	0.980	
<i>Garonne à Lamagistère</i> O6140010	SANS	0.859	0.868	<b>0.833</b>	0.887	HBV
	dérivé de HBV	<b>0.872</b>	<b>0.871</b>	0.829	<b>0.893</b>	
	dérivé de MORDOR	0.869	0.869	0.832	0.881	
<i>Agout à Lavaur</i> O4692550	SANS	0.736	0.786	0.705	<b>0.934</b>	MORDOR
	dérivé de HBV	<b>0.755</b>	0.795	0.706	0.933	
	dérivé de MORDOR	0.748	<b>0.797</b>	<b>0.720</b>	0.918	
<i>Garonne à Montréjeau</i> DTG01372	SANS	0.493	0.530	0.544	0.912	MORDOR
	dérivé de HBV	0.557	0.597	0.622	0.889	
	dérivé de MORDOR	<b>0.769</b>	<b>0.784</b>	<b>0.780</b>	<b>0.929</b>	
<i>Salat à Roquefort</i> O0592510	SANS	0.678	0.721	0.739	<b>0.877</b>	MORDOR
	dérivé de HBV	0.738	0.758	0.763	0.876	
	dérivé de MORDOR	<b>0.793</b>	<b>0.808</b>	<b>0.806</b>	0.876	
<i>Ariège à Foix</i> O1252510	SANS	0.431	0.505	0.530	0.823	MORDOR
	dérivé de HBV	0.495	0.546	<b>0.552</b>	<b>0.833</b>	
	dérivé de MORDOR	<b>0.555</b>	<b>0.564</b>	0.532	0.816	
<i>Garonne à Portet</i> O1900010	SANS	0.702	0.903	0.867	<b>0.945</b>	HBV
	dérivé de HBV	0.720	<b>0.916</b>	<b>0.871</b>	0.935	
	dérivé de MORDOR	<b>0.810</b>	0.824	0.818	0.884	

Tableau 1 – Tests de sensibilité au module neige : Performances moyennes obtenues en contrôle du modèle GR4J utilisant la température et la pluie SAFRAN pour chaque sous-bassin

#### 2.2.2.2. Sur le bassin de l'Ariège à Foix

Situé sur le relief pyrénéen, le bassin de l'Ariège à Foix est fortement influencé par le climat montagnard. Ainsi, la prise en compte des phénomènes de fonte et regel dans le modèle hydrologique à travers l'utilisation du module neige dérivé de MORDOR permet d'améliorer de 0.12 le critère de Nash-Sutcliffe calculé sur les débits. On reste cependant sur ce bassin à des niveaux de performances relativement faible. Ce relatif échec est dû en partie à l'influence des ouvrages sur le bassin. La Figure 8 et la Figure 9 illustrent la légère amélioration obtenue en introduisant un module neige à la modélisation.

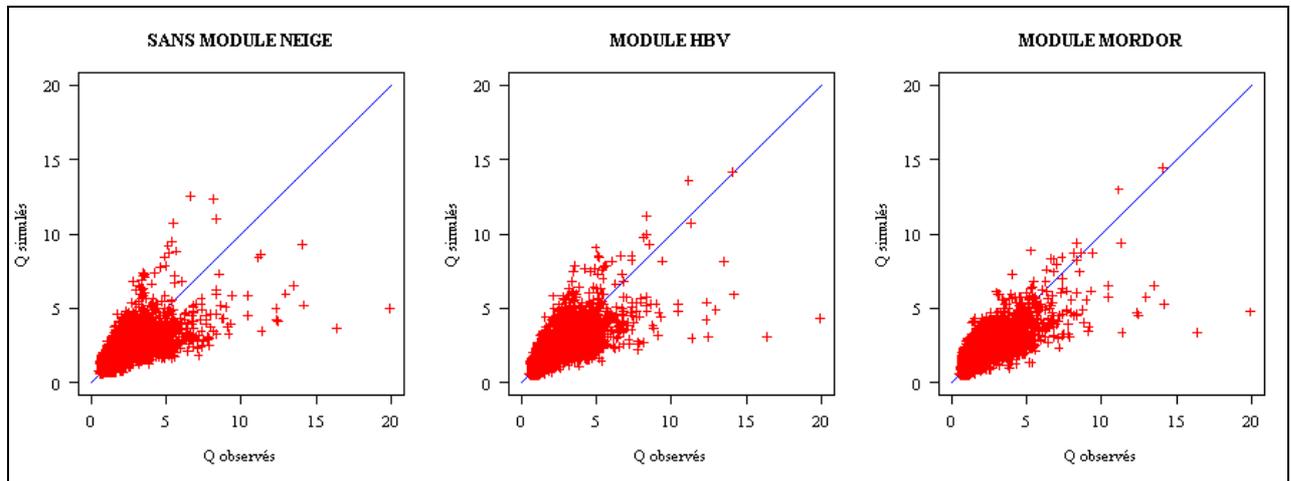


Figure 8 – Débits simulés en fonction des débits observés, en contrôle en fonction du module neige appliqué

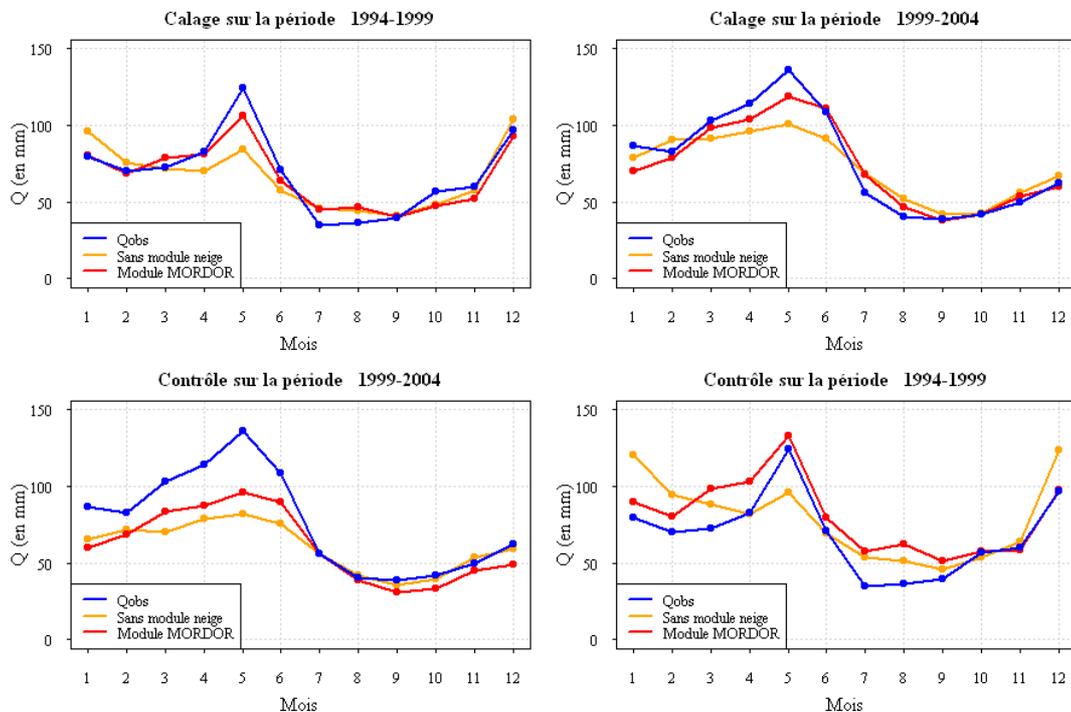


Figure 9 – Débits mensuels interannuels observés et simulés en calage et en contrôle sur le sous-bassin de l'Ariège à Foix (Utilisation des données de pluviométrie et de température SAFRAN en présence du module neige MORDOR ou sans module neige dans le modèle hydrologique GR4J)

### 2.2.2.3. Sur le bassin de l'Aveyron à Loubéjac

Le comportement du bassin de l'Aveyron à Loubéjac est peu dépendant des phénomènes de fonte et regel. Ainsi, la mise en place d'un module neige dans le modèle hydrologique n'a pas d'effet réel sur les performances. Il a même tendance à les dégrader légèrement sur certains critères, ceci indiquant probablement une difficulté à identifier des valeurs robustes des paramètres sur le bassin (voir Figure 10 et Figure 11).

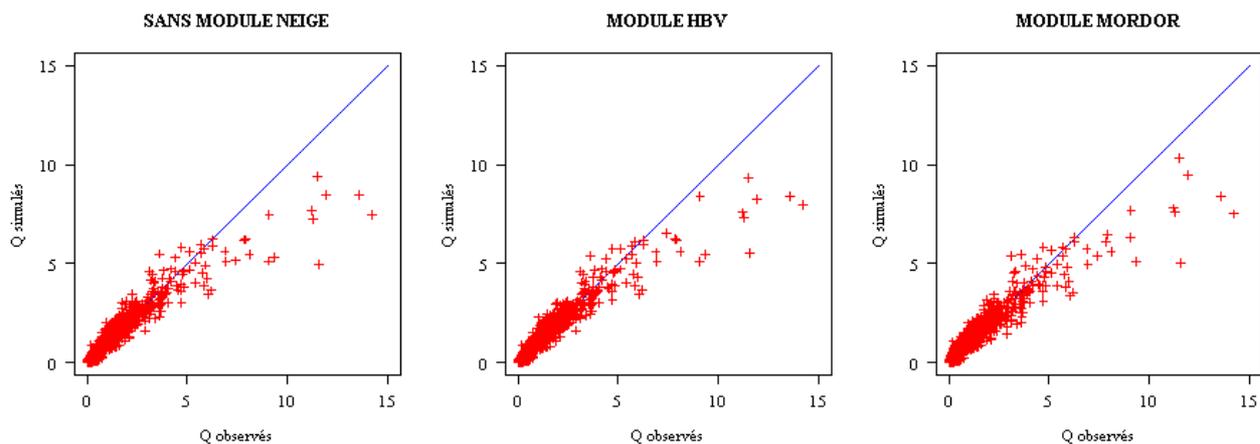


Figure 10 – Débits simulés en fonction des débits observés, en contrôle en fonction du module neige appliqué

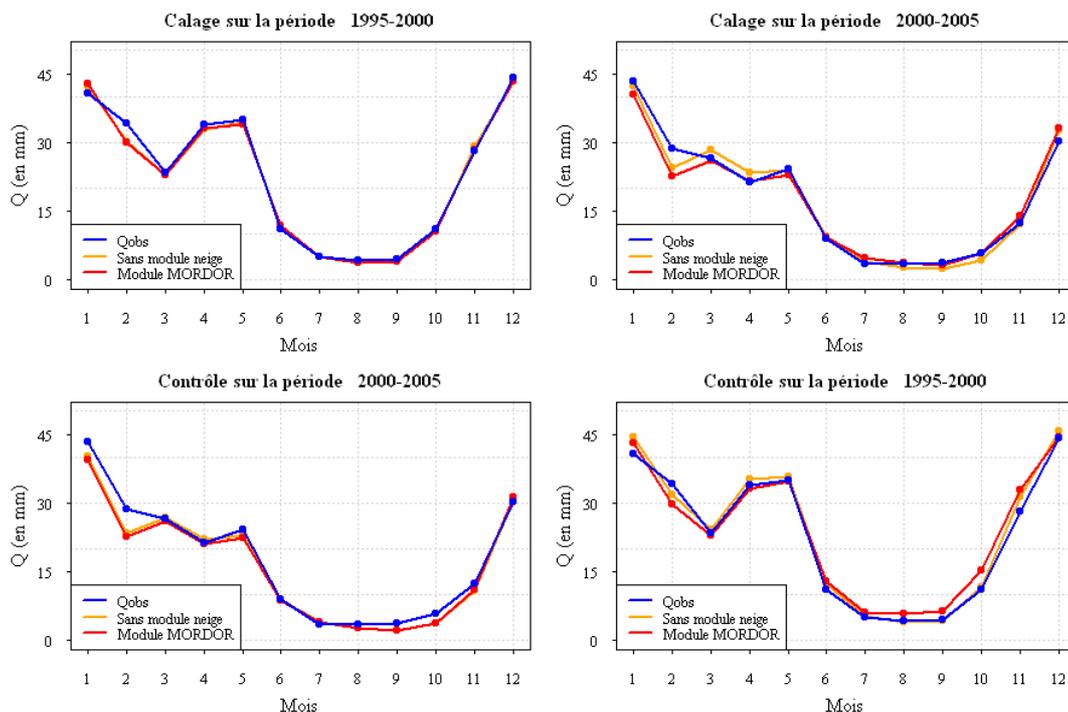


Figure 11 – Débits mensuels interannuels observés et simulés en calage et en contrôle sur le sous-bassin de l'Aveyron à Loubéjac (Utilisation des données de pluviométrie et de température SAFRAN en présence du module neige MORDOR ou sans module neige dans le modèle hydrologique GR4J calé sur les racines des débits)

### 2.3. Tests de sensibilité aux données d'entrées du modèle hydrologique

Dans cette partie, nous nous sommes intéressés à la sensibilité des résultats aux données utilisées en entrées du modèle.

#### 2.3.1. Données disponibles

Dans le cadre du projet, EDF a mis à disposition du Cemagref, des chroniques de données sur des stations pluviométriques et de température gérées par la Division Technique Générale. Ces stations

sont d'une aide précieuse car elles sont souvent situées en zone montagneuse, à proximité des installations d'hydroélectricité et permettent d'avoir des suivis réels de température et précipitations là où Météo France ne possède pas de postes.

Le **Tableau 8** situé en **Annexe 1** présente les différents postes pluviographiques et stations de température EDF disponibles pour chaque sous-bassin.

### 2.3.2. Modélisations effectuées

Pour tous les sous-bassins qui disposaient de postes pluviométriques et stations de température EDF, il nous a paru intéressant de réaliser un diagnostic des données d'entrées du modèle hydrologique afin d'établir la combinaison de pluviométrie et de température qui optimise les performances des critères d'évaluation.

Ainsi, cinq tests ont été réalisés :

- en utilisant la pluviométrie SAFRAN et la température SAFRAN
- en utilisant les postes pluviométriques EDF et les stations de température EDF
- en utilisant les postes pluviométriques EDF et la température SAFRAN
- en utilisant la lame d'eau spatialisée EDF et les stations de température EDF
- en utilisant la lame d'eau spatialisée EDF et la température SAFRAN.

### 2.3.3. Résultats

#### *2.3.3.1. Sur l'ensemble des bassins*

Le **Tableau 2** résume les performances du modèle obtenues en contrôle pour chaque sous-bassin. Les résultats obtenus en calage sont présentés en **Annexe 3**.

Globalement, à l'exception des tests qui prennent en compte la température issue des stations EdF, les différences entre les données SAFRAN et EdF sont de l'ordre de 0.03 à 0.04.

Pourtant, il faut noter qu'il existe un biais de 15 % en volume entre les données fournies par Météo France via SAFRAN et les données apportées par la DTG. Bien que nous n'ayons pas le temps de nous pencher sur cette différence, il serait intéressant d'en comprendre l'origine. Est-elle due à un problème de volume d'eau tombé sur le bassin ou à une représentation dynamique des événements hydrologiques qui fait défaut ?

GR4J en CONTRÔLE	Température	Pluviométrie	Nash(Q)	Nash( $\sqrt{Q}$ )	Nash(Ln Q)	BILAN	Données de température optimales	Données de pluie optimales
<i>Tarn à Millau</i> DTG01678	SAFRAN	SAFRAN	<b>0,926</b>	<b>0,916</b>	0,868	0,938	SAFRAN	SAFRAN
	EDF	EDF postes au sol	0,917	0,905	0,834	<b>0,950</b>		
	SAFRAN	EDF postes au sol	0,920	0,895	0,801	0,914		
	SAFRAN	EDF spatialisé	0,813	0,878	<b>0,856</b>	0,911		
	EDF	EDF spatialisé	0,840	0,894	<b>0,875</b>	0,945		
<i>Aveyron à Loubéjac</i> O5882510	SAFRAN	SAFRAN	<b>0,893</b>	<b>0,922</b>	<b>0,877</b>	<b>0,934</b>	SAFRAN	SAFRAN
	SAFRAN	EDF spatialisé	0,880	0,911	0,865	0,905		
<i>Tarn à Villemur</i> O4931010	SAFRAN	SAFRAN	0,866	0,894	0,867	0,980	SAFRAN	EDF spatialisé
	EDF	EDF postes au sol	0,829	0,886	0,872	0,967		
	SAFRAN	EDF postes au sol	0,812	0,876	0,868	0,946		
	SAFRAN	EDF spatialisé	0,876	0,903	<b>0,883</b>	<b>0,989</b>		
	EDF	EDF spatialisé	<b>0,878</b>	<b>0,904</b>	0,880	0,974		
<i>Garonne à Lamagistère</i> O6140010	SAFRAN	SAFRAN	0,869	0,869	0,832	0,881	SAFRAN	EDF spatialisé
	SAFRAN	EDF spatialisé	<b>0,885</b>	<b>0,884</b>	<b>0,852</b>	<b>0,909</b>		
<i>Agout à Lavaur</i> O4692550	SAFRAN	SAFRAN	<b>0,748</b>	0,797	0,720	0,918	EDF	EDF postes au sol
	EDF	EDF postes au sol	0,718	<b>0,798</b>	<b>0,779</b>	<b>0,975</b>		
	SAFRAN	EDF postes au sol	0,702	0,782	0,754	0,972		
	SAFRAN	EDF spatialisé	0,555	0,705	0,669	0,985		
	EDF	EDF spatialisé	0,574	0,721	0,680	0,984		
<i>Garonne à Montréjeau</i> DTG01372	SAFRAN	SAFRAN	<b>0,769</b>	0,784	0,780	0,929	SAFRAN	EDF postes au sol
	EDF	EDF postes au sol	0,322	0,636	0,735	0,981		
	SAFRAN	EDF postes au sol	0,736	<b>0,790</b>	<b>0,799</b>	<b>0,985</b>		
	SAFRAN	EDF spatialisé	0,706	0,743	0,749	0,883		
	EDF	EDF spatialisé	0,591	0,669	0,700	0,909		
<i>Salat à Roquefort</i> O0592510	SAFRAN	SAFRAN	<b>0,793</b>	0,808	0,806	0,876	SAFRAN	EDF postes au sol
	EDF	EDF postes au sol	0,697	0,792	0,832	0,938		
	SAFRAN	EDF postes au sol	0,724	<b>0,817</b>	<b>0,848</b>	<b>0,956</b>		
	SAFRAN	EDF spatialisé	0,763	0,779	0,773	0,919		
	EDF	EDF spatialisé	0,725	0,751	0,758	0,918		
<i>Ariège à Foix</i> O1252510	SAFRAN	SAFRAN	0,555	0,564	0,532	0,816	SAFRAN	EDF spatialisé
	EDF	EDF postes au sol	0,651	<b>0,691</b>	0,676	0,899		
	SAFRAN	EDF postes au sol	<b>0,674</b>	0,689	0,651	0,907		
	SAFRAN	EDF spatialisé	0,652	0,681	0,658	<b>0,969</b>		
	EDF	EDF spatialisé	0,638	0,686	<b>0,677</b>	0,968		
<i>Garonne à Portet</i> O1900010	SAFRAN	SAFRAN	0,810	0,824	0,818	0,884	SAFRAN	EDF spatialisé
	SAFRAN	EDF spatialisé	<b>0,823</b>	<b>0,853</b>	<b>0,851</b>	<b>0,942</b>		

Tableau 2 – Performances moyennes obtenues en contrôle en utilisant le modèle GR4J calé sur les racines des débits, avec un module neige dérivé de MORDOR et selon les données de pluviométrie et de température

### 2.3.3.2. Sur le bassin de l'Ariège à Foix

On appelle témoin, la simulation réalisée avec le modèle GR4J calé sur les racines des débits et dont on teste les performances obtenues en contrôle en utilisant les données de pluviométrie et de température SAFRAN.

Le bassin de l'Ariège à Foix est sensible aux données utilisées en entrée du modèle hydrologique comme en témoigne la **Figure 12**. Il apparaît que les postes pluviométriques EDF au sol et la lame d'eau spatialisée EDF combinées à la température SAFRAN apportent les meilleures améliorations avec respectivement, une augmentation de 0.12 et 0.10 points sur la moyenne du critère de Nash-Sutcliffe, en contrôle, calculé sur les débits par rapport au témoin.

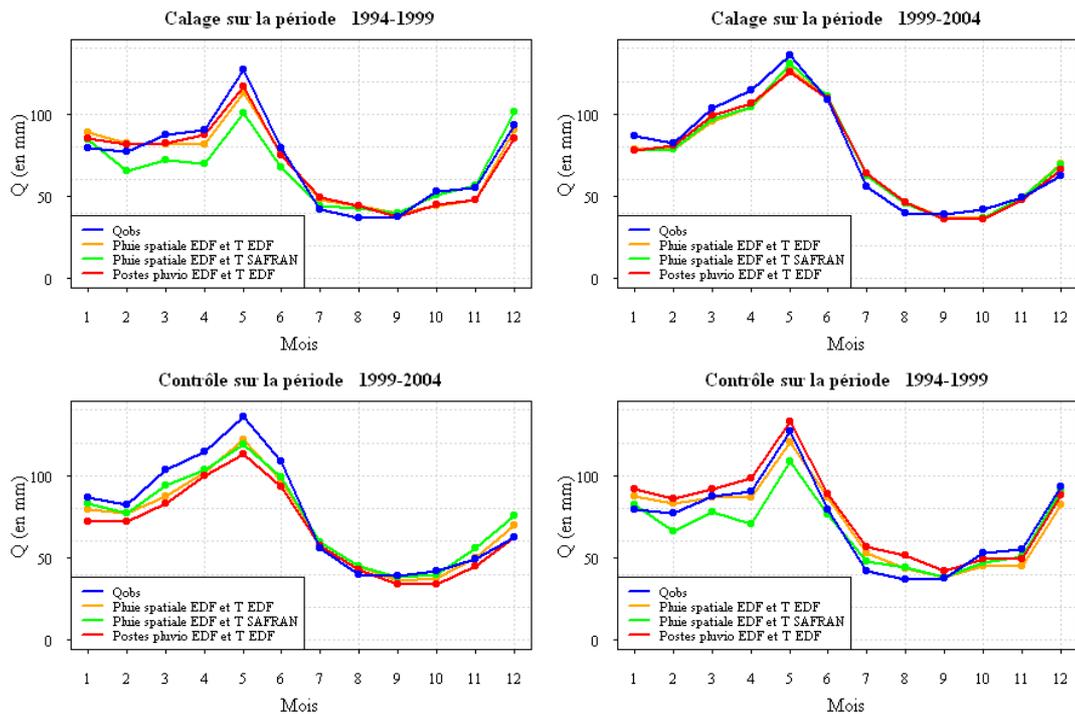


Figure 12 – Débits mensuels interannuels observés et simulés en calage et en contrôle sur le sous-bassin de l'Ariège à Foix (Utilisation du module neige MORDOR)

### 2.3.3.3. Sur le bassin de l'Aveyron à Loubéjac

Sur le bassin de l'Aveyron à Loubéjac, nous n'avions pas à notre disposition de données pluviométriques et de température issues des postes EDF. Néanmoins, nous avons pu utiliser les pluies spatialisées d'EDF ainsi que les données de température et de pluie SAFRAN.

Sur ce petit bassin peu influencé, il y a peu de différences entre les performances obtenues avec les données SAFRAN et les données EDF. Néanmoins, si l'on se réfère à la **Figure 13**, il semble que le modèle hydrologique représente mieux le comportement hydrologique du bassin lorsque l'on utilise les données SAFRAN.

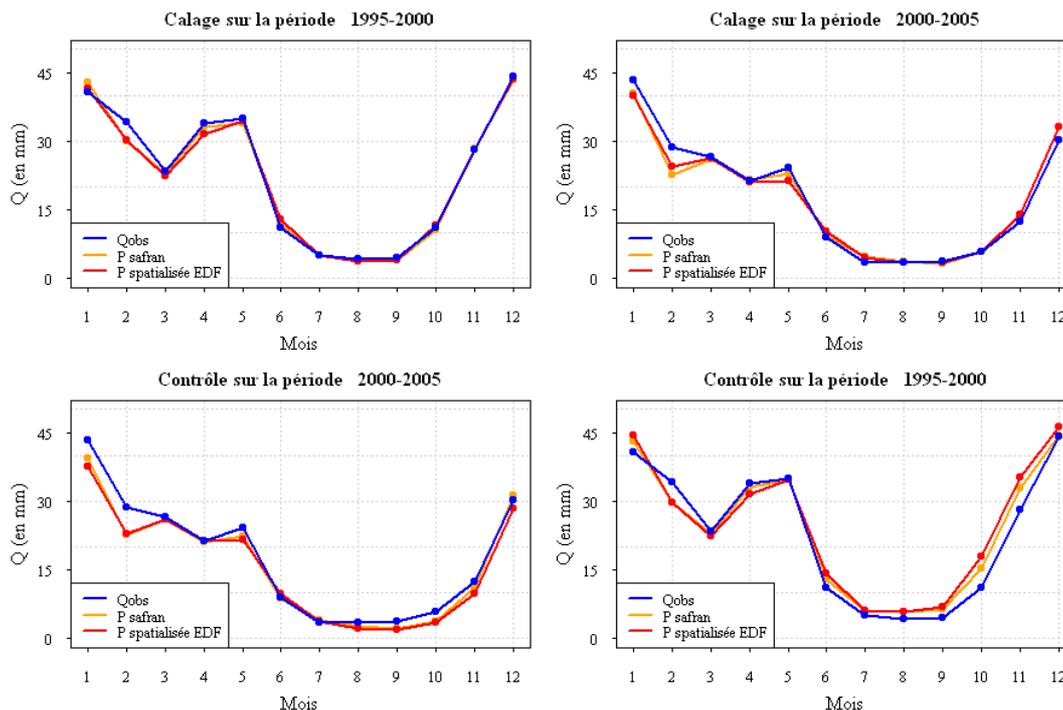


Figure 13 – Débits mensuels interannuels observés et simulés en calage et en contrôle sur le sous-bassin de l'Aveyron à Loubéjac (Utilisation du module neige MORDOR)

#### 2.4. Prise en compte des ouvrages dans la modélisation hydrologique

L'objectif de la prise en compte des barrages par un modèle global n'est pas d'aboutir à une modélisation parfaite du comportement du bassin versant étudié, ce qui serait, naturellement impossible et utopique. Dans le cadre du projet, il est néanmoins très intéressant d'avoir un élément de référence, auquel nous pourrions confronter les résultats obtenus avec le modèle CEQUEAU. L'idée est de réussir à mettre en évidence une tendance, et voir si les résultats obtenus avec les deux modèles hydrologiques sont comparables ou non. La méthode de prise en compte des ouvrages est celle proposée par **Payan et al.** (2008)

##### 2.4.1.1. Sur le bassin de l'Ariège à Foix

Les retenues destinées à l'hydroélectricité ou au soutien d'étiage représentent un volume d'au moins  $195 \text{ Mm}^3$  sur le bassin de l'Ariège à Foix. Nous n'avons considéré que les retenues dont les capacités étaient supérieures à  $3 \text{ Mm}^3$  dans le cadre de la modélisation hydrologique. Ainsi les retenues de Lapan, Soulcem, Naguilhes, Izourt, Gnioure ont été prises en compte. A celles-ci s'ajoute le système complexe de l'Hospitalet qui est représenté sur la **Figure 14**. L'eau du Lanoux, situé sur le bassin de la Carol est transportée jusqu'à l'usine de l'Hospitalet Haute Chute sur le bassin de l'Ariège pour y être turbinée. Les eaux provenant des retenues de Sisca, Baldarquès et Bésines sont turbinées à l'Hospitalet Basse Chute. Puis, une partie de ces eaux est pompée pendant les heures creuses afin d'alimenter la retenue du Lanoux. Pour compenser le prélèvement d'eau effectué sur le bassin de l'Ebre, un volume d'eau identique à celui qui a été prélevé doit être restitué via la conduite forcée de l'Ariège-Carol.

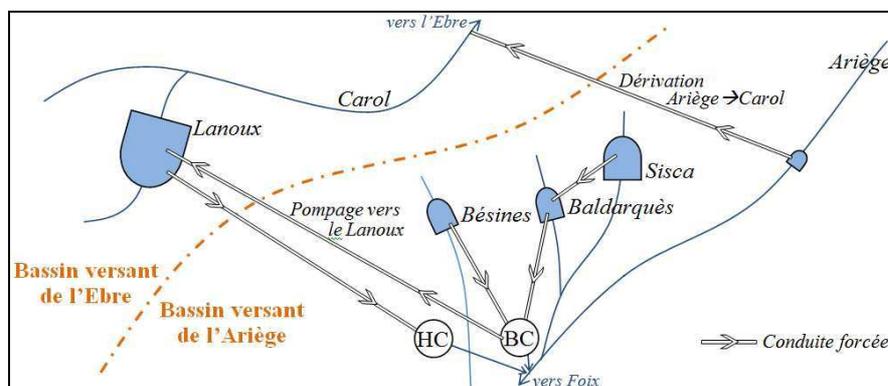


Figure 14 – Schéma de fonctionnement du système l'Hospitalet (Source : Agosta, 2007)

Le **Tableau 3** récapitule les performances obtenues en calage et en contrôle selon que le modèle tient compte ou non des barrages sur le bassin, en présence du module neige MORDOR, ou sans module neige.

GR4J en contrôle	Prise en compte des barrages	Module neige	Nash(Q)	Nash( $\sqrt{Q}$ )	Nash(Ln Q)	BILAN
$P_{EDF}$ spatialisée et $T_{SAFRAN}$	NON	SANS module neige	0.556	0.628	0.653	0.969
	OUI		0.520	0.600	0.622	0.960
$P_{EDF}$ spatialisée et $T_{SAFRAN}$	NON	Dérivé de MORDOR	0.694	0.716	0.687	0.979
	OUI		0.662	0.671	0.633	0.982

Tableau 3 – Performances en contrôle obtenues sur le sous bassin de l'Ariège à Foix, en contrôle du modèle hydrologique GR4J, selon le module neige choisi et en présence ou non d'un module barrage

Il semble que la prise en compte des barrages dans le sous-bassin de l'Ariège à Foix n'apporte pas d'amélioration du modèle hydrologique. Dans un premier temps, aux vues des résultats obtenus avec le module neige MORDOR, nous nous sommes interrogés sur un éventuel biais des résultats dû à la présence du module neige. Nous avons donc réalisés d'autres tests, sans module neige afin de voir si la même tendance s'observait. Il apparait que le module neige n'explique pas la légère dégradation des performances. A partir des chroniques de débits obtenues lors des simulations, nous avons pu représenter les débits moyens interannuels en calage et en contrôle. Les graphiques sont présentés dans la **Figure 15**.

On observe peu de différences visuelles entre les débits interannuels simulés avec un modèle prenant en compte les barrages et sans la prise en compte. Il est cependant possible que le choix de la représentation des débits interannuels ne soit pas avantageux : il a tendance à lisser les résultats, ce qui ne permet pas de voir les possibles améliorations lors d'événements particuliers.

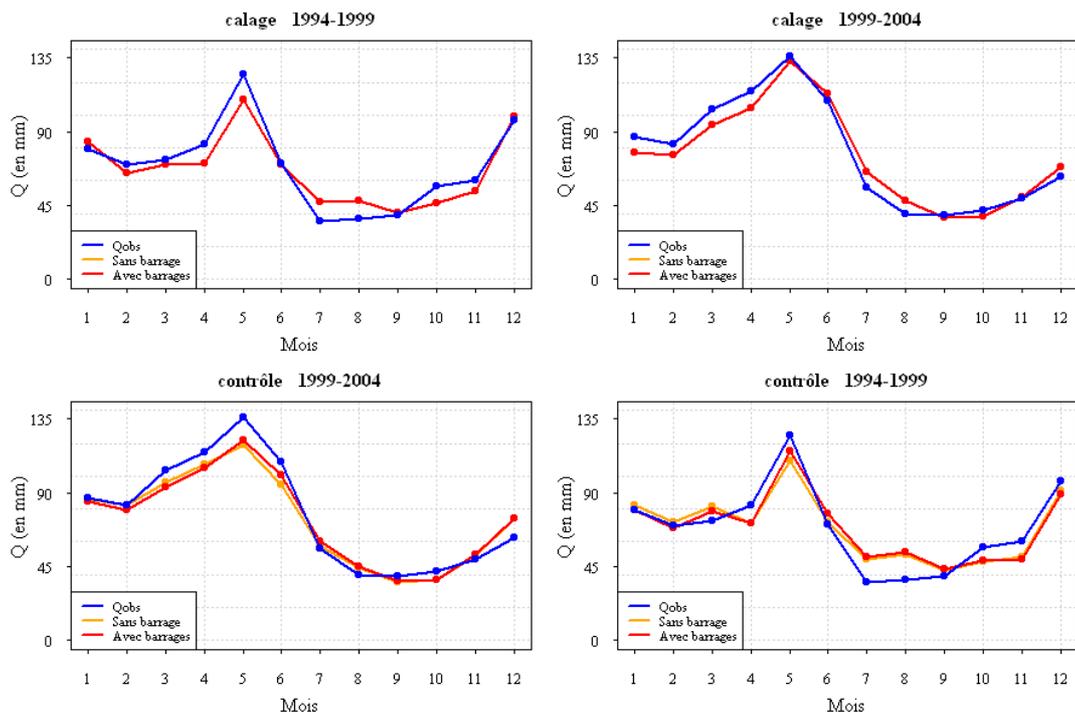


Figure 15 – Comparaison des moyennes mensuelles interannuelles observées et simulées, en calage et en contrôle sur le bassin de l'Ariège à Foix, en présence ou non d'un module barrage en utilisant les données de pluies spatialisées Edf et la pluie SAFRAN ainsi que le module neige MORDOR

La représentation des débits simulés en fonction des débits observés peut dans ce cas se révéler intéressante. La Figure 16 représente les débits simulés en fonction des débits observés en prenant en compte ou non les barrages. Le troisième graphique permet de mettre en évidence les différences de débits selon les simulations effectuées. La droite bleue est la droite d'équation  $y=x$ . Il est flagrant que la prise en compte du barrage telle que nous l'avons modélisée n'a qu'un impact très faible sur les débits puisque la majorité des débits simulés se situent sur ou à proximité de la droite. En prenant en compte les retenues du bassin, nous nous attendions à observer des faibles débits situés sur le dessus de la droite bleue; c'est-à-dire des débits d'étiage qui attendraient au moins le DOE grâce aux retenues prévues pour le soutien d'étiage. D'autre part, en période de hautes eaux, le rôle des retenues devrait être d'écrêter les crues ou au moins de lisser les pics de crues. Ainsi, les points pour les forts débits devraient se trouver sous la droite bleue.

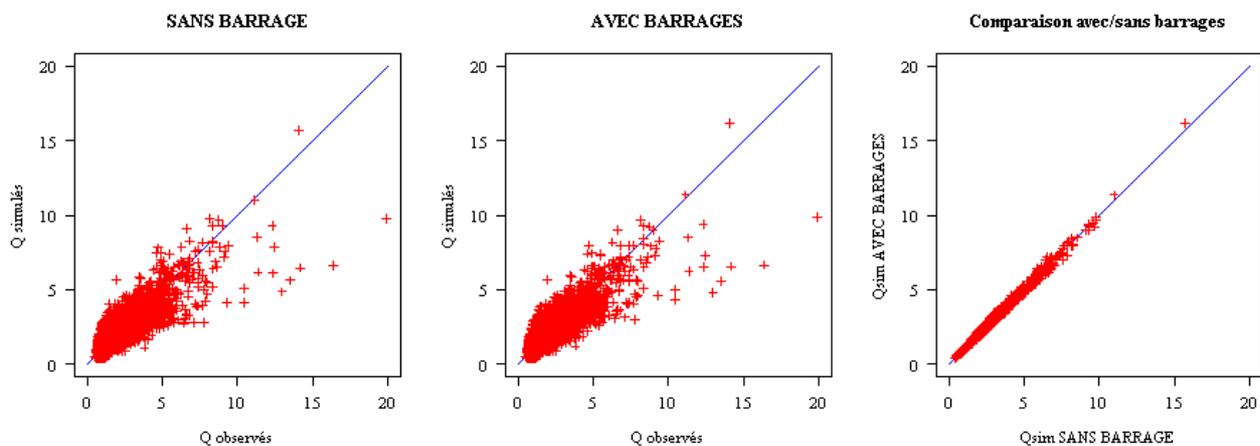


Figure 16 – Représentation des débits simulés en fonction des débits observés en prenant ou non en compte les barrages, comparaison des débits simulés

Cependant, le bassin de l'Ariège à Foix étant un bassin soumis à de multiples influences, l'échec partiel de sa modélisation à l'aide d'un modèle globale n'est pas étonnant. Pour la suite de l'étude, l'équipe du Cemagref travaillera sur les débits naturalisés fournis par EDF.

#### 2.4.1.2. Sur le bassin de l'Aveyron à Loubéjac

La retenue de Pareloup collecte l'eau des retenues de Pont-de-Salars et de Bages avant de la transférer sur le bassin du Tarn, vers l'usine de Pouget. Pareloup participe aussi au soutien d'étiage. Trois autres retenues de capacités non négligeables sont présentes sur le bassin. Il s'agit de Thuries, St Géraud et Gouyre. Néanmoins, ces retenues n'étant pas gérées par EDF, nous n'avons pu récupérer aucune information quant à leur mode de gestion.

Nous avons donc choisi de concentrer nos efforts sur la prise en compte des trois principaux ouvrages EDF dans la modélisation hydrologique. Les performances obtenues en contrôle sont synthétisées dans le **Tableau 4**.

GR4J en contrôle	Prise en compte des barrages	Module neige	Nash(Q)	Nash( $\sqrt{Q}$ )	Nash(Ln Q)	BILAN
P <sub>EDF</sub> spatialisée et T <sub>SAFRAN</sub>	NON	SANS module neige	0.909	0.934	0.896	0.987
	OUI		0.893	0.921	0.875	0.954
P <sub>EDF</sub> spatialisée et T <sub>SAFRAN</sub>	NON	Dérivé de MORDOR	0.909	0.941	0.917	0.977
	OUI		0.897	0.918	0.872	0.934

Tableau 4 – Performances obtenues sur le sous bassin de l'Aveyron à Loubéjac, en contrôle du modèle hydrologique GR4J, avec ou sans module neige et en présence ou non d'un module barrage

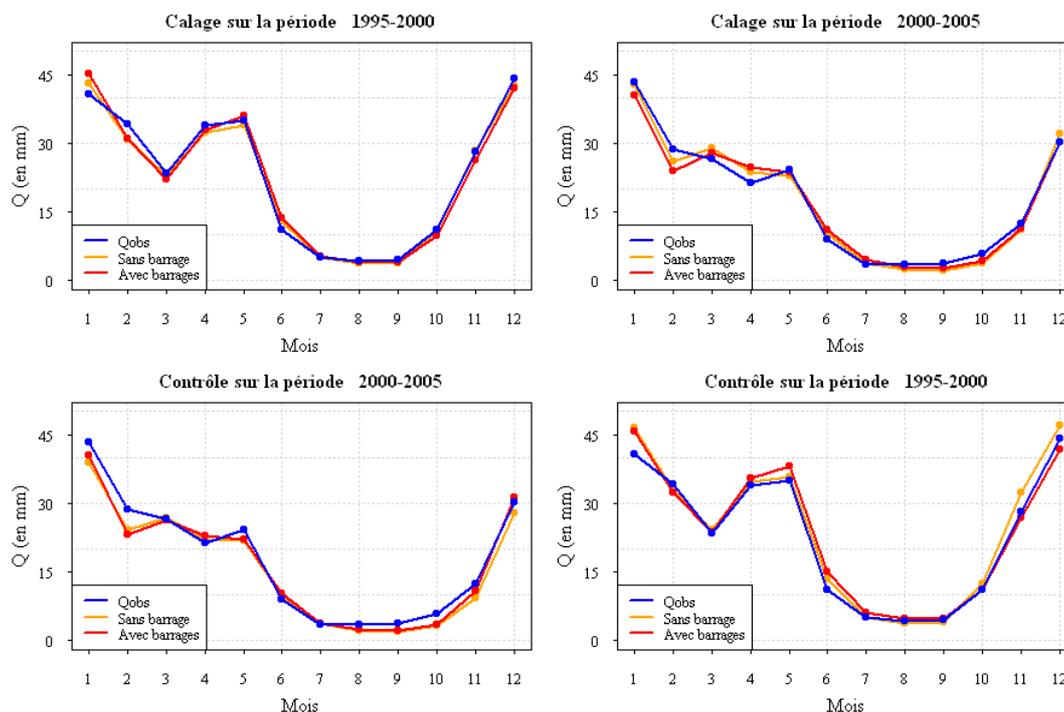


Figure 17 – Comparaison des moyennes mensuelles interannuelles observées et simulées, en calage et en contrôle sur le bassin de l'Aveyron à Loubéjac, en présence ou non d'un module barrage, sans module neige et en utilisant les données de pluies spatialisées EDF et la température SAFRAN

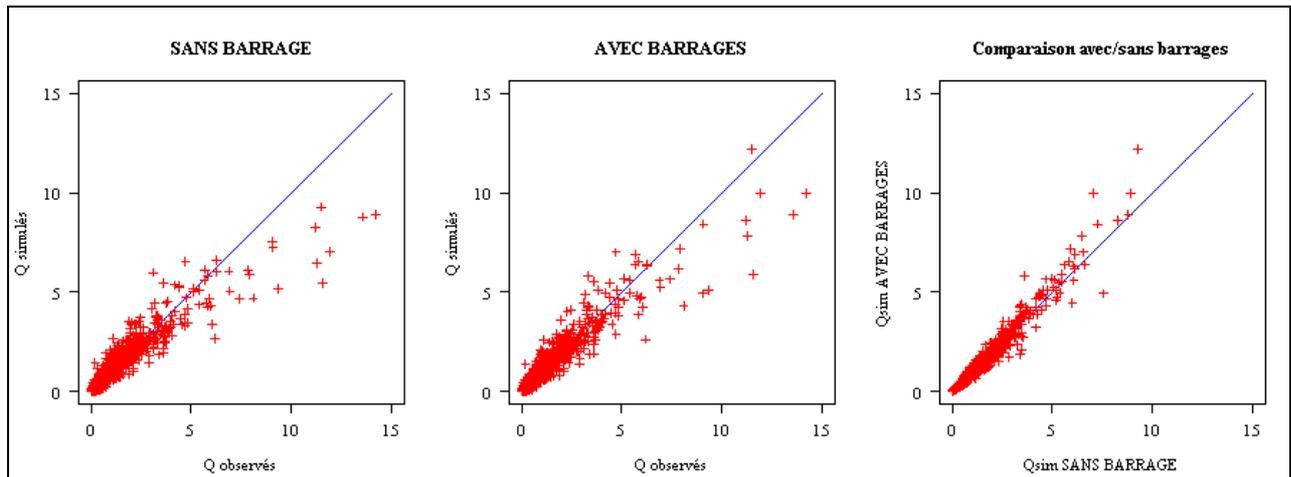


Figure 18 – Représentation des débits simulés en fonction des débits observés en prenant ou non en compte les barrages, comparaison des débits simulés

Dans le cas du bassin de l'Aveyron à Loubéjac, la prise en compte des barrages dans un modèle hydrologique global tel que GR4J permet une sensible amélioration des débits simulés en période de calage. Cela est notamment observable en période de basses eaux, le modèle hydrologique permet de mieux restituer les faibles débits. Néanmoins les améliorations observées ne sont pas significatives. D'autre part, en contrôle, il apparaît que la prise en compte des barrages dégrade les résultats de modélisation. On peut donc supposer que l'amélioration en calage est due à des paramètres insuffisamment robustes qui compensent partiellement la modélisation. Cependant, en contrôle, les paramètres ne sont pas adaptés et détériorent les résultats.

Deux hypothèses peuvent alors être posées: la prise en compte incomplète des ouvrages présents sur le bassin ne permet pas d'avoir une idée globale de la gestion de l'eau au niveau du bassin et ainsi la modélisation est biaisée. Une autre possibilité est que la prise en compte des ouvrages par la méthode décrite par **Payan et al.** (2008) n'est pas adaptée à notre bassin versant et plus généralement à l'aire d'étude, soumise à de multiples influences.

### 3. Extrapolation

Il existe de nombreuses publications qui traitent du changement climatique et proposent des méthodes pour essayer d'en évaluer les conséquences au niveau hydrologique. Néanmoins, peu d'études ont réellement abordé les problèmes de non stationnarité dus au changement climatique au niveau des modèles hydrologiques.

*Diskin et Simon* (1977), *Green et Stephenson* (1986), *Servat et Dezetter* (1993) ont montré que les paramètres du modèle hydrologique dépendent de la fonction-objectif utilisée durant la phase de calage. Ainsi, certaines fonctions permettent de mieux modéliser les périodes de crues tandis que d'autres seront mieux adaptées aux périodes d'étiage.

Ici, l'objectif des tests est de voir s'il existe une influence significative des conditions de calage sur les performances du modèle dans des conditions climatiques non stationnaires.

#### 3.1. Méthodologie

Dans le cadre de ces travaux, nous avons, en première approche, étudié le modèle GR4J présenté par **Perrin et al.** (2003). Une représentation de ce modèle est donnée dans le paragraphe 2.1.1.

Nous avons travaillé sur 608 bassins français pour lesquels nous disposons des données journalières de pluie, de débit et d'ETP durant au moins 22 ans.

Dans un premier temps, nous avons choisi d'étudier la sensibilité des résultats à une sélection des périodes de calage.

Cette sélection est obtenue en choisissant une condition de calage qui est ici la pluie moyenne annuelle. Le calage est réalisé en sélectionnant, parmi les onze années de la période test, celles ayant les plus faibles précipitations annuelles (ce qu'on appellera par la suite sélection des années avec pluie moyenne faible) ou celles dont les précipitations annuelles sont les plus abondantes (sélection des années avec pluie moyenne forte). On a ici utilisé des périodes de 5 ans.

Une fois le modèle calé, il est testé en contrôle sur des périodes plutôt humides ou plutôt sèches sélectionnées de la même façon.

Pour tester la sensibilité du modèle hydrologique à cette sélection de périodes de calage, nous avons décidé, dans le même temps, de faire varier la fonction objectif. Ainsi, la série de tests réalisée doit permettre de définir les conditions de calage les plus adaptées pour modéliser des événements extrêmes (période humide avec des épisodes de crues ou à l'inverse période d'étiage).

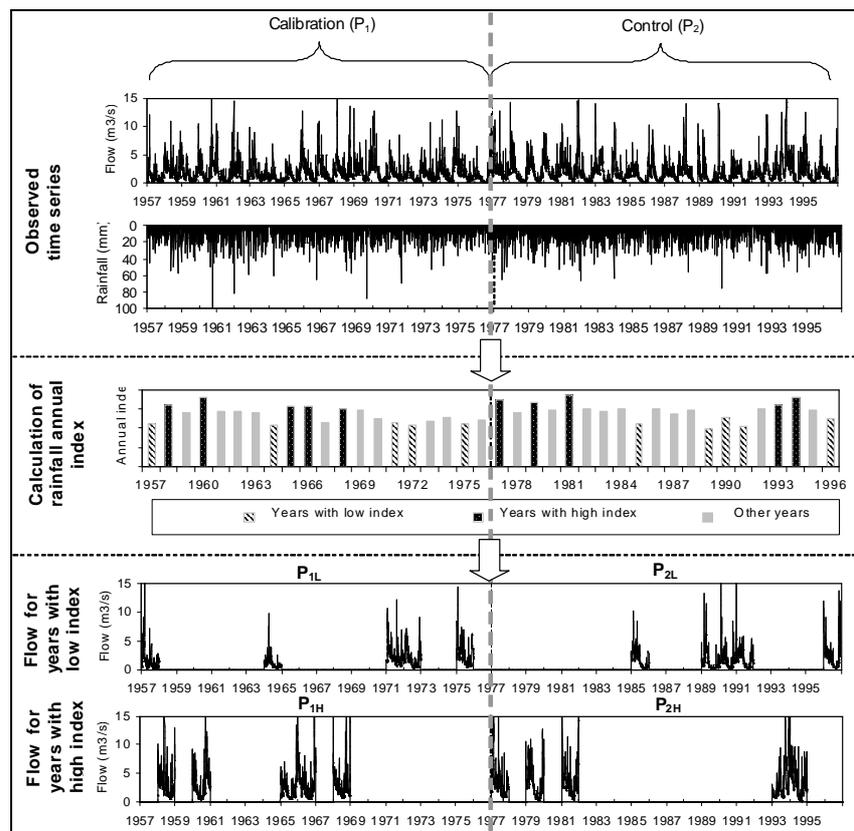


Figure 19 – Représentation de la méthodologie de sélection des années

### 3.2. Méthode d'évaluation des modèles

Pour l'interprétation des résultats, les critères classiques d'évaluation des performances ont été calculés. Leurs formules sont présentées dans le paragraphe 2.1.3.

D'autre part, afin de mieux caractériser les performances du modèle, il nous avons aussi calculé des critères spécifiques aux hautes ou basses eaux. Ces indices CRUEM, VCRUE, ETIAM VETIA mettent en évidence les capacités du modèle à représenter des événements extrêmes. Ils nécessitent la détermination d'un seuil de crue et d'étiage et sont calculés de la façon suivante :

- Critères associés aux périodes de crue :

CRUEM est un critère qui permet d'évaluer la restitution des crues annuelles moyennes. Le critère VCRUE permet quant à lui d'évaluer les capacités du modèle à restituer les volumes en crue.

$$CRUEM = 1 - \left| 1 - \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (Q_j^{annuel}) \right]_{sim}}{\left[ \sum_{i=1}^n (Q_j^{annuel}) \right]_{obs}} \right| \qquad VCRUE = 1 - \left| 1 - \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (Q_{sim} > Q_{crue}) \right]}{\left[ \sum_{i=1}^n (Q_{obs} > Q_{crue}) \right]} \right|$$

- Critères associés aux périodes de basses eaux :

Le critère ETIAM évalue le rapport des étiages moyens. Il est complété par le critère VETIAM qui correspond au rapport des déficits de volume d'étiage.

$$ETIAM = 1 - \left| 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{j,annuel}^{sim} < Q_{étiage})}{\sum_{i=1}^n (Q_{j,annuel}^{obs} < Q_{étiage})} \right| \qquad VETIAM = 1 - \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (Q_{sim} < Q_{étiage}) \right]}{\left[ \sum_{i=1}^n (Q_{obs} < Q_{étiage}) \right]}$$

Les seuils de crue et d'étiage sont définis comme les quantiles 0.9 et 0.1 de la courbe des débits classés sur la période d'évaluation.

Pour évaluer les performances du modèle, une procédure de calage-contrôle (Klemeš, 1986) a été appliquée : la chronique de débit est scindée en deux périodes de même longueur. La première période permet le calage du modèle avant son contrôle sur la seconde période. L'opération est répétée en inversant première et deuxième période.

Au total, 1216 contrôles ont été réalisés sur les 608 bassins.

Pour des raisons de simplicité, nous avons choisi d'évaluer les performances des modèles en comparant les moyennes obtenues pour chacun des critères d'évaluation selon les conditions de calage.

Par la suite, nous considérerons que lorsque la différence des moyennes d'un critère d'évaluation est inférieure à 0.01, les performances des deux simulations sont semblables.

En d'autres termes, différentes conditions de calage peuvent permettre les mêmes performances. Il sera alors intéressant de voir s'il existe des similitudes entre les conditions de calage ou de contrôle choisies qui peuvent expliquer des performances proches.

Le **Tableau 5** récapitule les différentes simulations effectuées :

Test	Pas de tps		Modèle	Fonction objectif			Critère	Caractéristiques calage	
	jour	mois		Q	Q½	ln(Q+M/40)		Faibles	Fortes
3001	•		GR4J	•			Pmoy annuelle	•	
3002	•		GR4J	•			Pmoy annuelle		•
3007	•		GR4J		•		Pmoy annuelle	•	
3008	•		GR4J		•		Pmoy annuelle		•
3013	•		GR4J			•	Pmoy annuelle	•	
3014	•		GR4J			•	Pmoy annuelle		•

Tableau 5 - Tests réalisés

### 3.3. Résultats

Les **Tableau 6** et **Tableau 7** présentent les performances moyennes des quatre critères d'évaluation selon la fonction objectif choisie et les caractéristiques des années utilisées pour le calage (Années à faible pluviométrie pour le **Tableau 6** ou années à forte pluviométrie pour le **Tableau 7**).

#### 3.3.1. Calage sur années avec pluie moyenne faible

Les résultats sont donnés dans l'ordre suivant :

- Le premier tiers du tableau donne les performances des critères d'évaluation en calage,
- Le second tiers représente les résultats en contrôle sur des années dont les pluies moyennes sont faibles.
- La dernière partie du tableau donne les résultats en contrôle sur des années dont les pluies moyennes sont fortes.

		critère d'évaluation				
		C2M(Q)	C2M(VQ)	C2M(lnQ)	Bilan	
fonction obj	NsQ	<b>0.664</b>	0.656	0.553	<b>0.952</b>	résultats en CALAGE (CN)
	NsVQ	0.631	<b>0.691</b>	0.653	0.945	
	NsLnQ	0.547	0.659	<b>0.684</b>	0.866	
fonction obj	NsQ	<b>0.582</b>	0.594	0.507	0.842	résultats en contrôle faible (CNVN)
	NsVQ	0.576	<b>0.631</b>	0.591	<b>0.851</b>	
	NsLnQ	0.512	0.606	<b>0.613</b>	0.816	
fonction obj	NsQ	<b>0.613</b>	0.656	0.599	<b>0.869</b>	résultats en contrôle fort (CNVX)
	NsVQ	0.595	<b>0.665</b>	<b>0.652</b>	0.859	
	NsLnQ	0.523	0.619	0.643	0.812	

Tableau 6 – Critères moyens obtenus à partir d'un calage sur des années avec une pluie moyenne annuelle faible

#### 3.3.2. Calage sur années avec pluie moyenne forte

		critère d'évaluation				
		C2M(Q)	C2M(VQ)	C2M(lnQ)	Bilan	
fonction obj	NsQ	<b>0.697</b>	0.708	0.626	<b>0.969</b>	résultats en CALAGE (CX)
	NsVQ	0.675	<b>0.731</b>	0.701	0.956	
	NsLnQ	0.610	0.706	<b>0.728</b>	0.886	
fonction obj	NsQ	0.564	0.562	0.464	0.822	résultats en contrôle faible (CXVN)
	NsVQ	<b>0.581</b>	0.611	0.542	<b>0.849</b>	
	NsLnQ	0.545	<b>0.615</b>	<b>0.587</b>	0.827	
fonction obj	NsQ	<b>0.633</b>	0.660	0.586	0.877	résultats en contrôle fort (CXVX)
	NsVQ	0.630	<b>0.685</b>	0.649	<b>0.879</b>	
	NsLnQ	0.578	0.664	<b>0.670</b>	0.839	

Tableau 7 – Critères moyens obtenus à partir d'un calage sur des années avec une pluie moyenne annuelle forte

#### 3.3.3. Première interprétation des résultats

Il est important de noter que les critères d'évaluation ne sont comparables que lorsqu'ils sont calculés sur les mêmes périodes.

- En calage, les performances de chaque critère d'évaluation sont optimales lorsque le critère d'évaluation est le même que la fonction objectif. Ceci est un résultat attendu. Il confirme la dépendance des paramètres du modèle hydrologique à la fonction objectif choisie.

D'autre part, le meilleur bilan en eau est obtenu pour la fonction objectif basée sur le débit. Ceci est un résultat logique puisque le critère de Nash sur les débits permet de mieux simuler les périodes de crues (*Oudin et al.*, 2006), qui constituent à elles-seules une part importante si ce n'est majoritaire, des quantités d'eau qui transitent sur un bassin.

- Puisque les performances obtenues sont différentes selon les conditions de calage, l'hypothèse d'une sensibilité selon la caractéristique de sélection des années utilisées pour le calage semble justifiée.

Une première observation des **Tableau 6** et **Tableau 7** semble indiquer qu'en général les performances des critères d'évaluation sont meilleures lorsque les étapes de calage et de contrôle ont été réalisées sur la même caractéristique de sélection des années.

Ces premiers résultats mériteraient d'être approfondis, mais on peut d'ores et déjà indiquer qu'un changement de conditions climatiques vers des années plus sèches (passage d'un calage sur périodes humides à un contrôle sur périodes sèches) engendrera probablement une plus grande difficulté de simulation des étiages. Inversement, un changement de conditions climatiques vers des années plus humides (passage d'un calage sur périodes sèches à un contrôle sur périodes humides) engendrera probablement une plus grande difficulté de simulation des crues.

Cette incertitude liée aux conditions de calage sera certainement augmentée par le fait que l'hypothèse de stationnarité des paramètres du modèle (c'est-à-dire des descripteurs physiques du bassin) ne sera certainement pas vérifiée à long terme en raison des changements sur le bassin (végétation, occupation des sols,...).

Les travaux menés durant ce stage ont été organisés en deux grands axes. Dans un premier temps, une étude bibliographique sur les capacités d'extrapolation des modèles hydrologiques en conditions de changement climatique a révélé la complexité de la modélisation hydrologique. Doit-on faire l'hypothèse d'une stationnarité du comportement du bassin versant étudié ? Comment prendre en compte les influences anthropiques et leur devenir ?

Pour tenter de répondre partiellement à ces questions, une analyse de sensibilité du modèle hydrologique a été réalisée. Elle nous a permis d'apprécier l'importance de certains paramètres et de mettre en évidence des problèmes de modélisation. Ainsi, l'étude de sensibilité au module neige a clairement mis en évidence que le choix du module neige n'est pas anodin. C'est sur les bassins pyrénéens, qui sont fortement influencés par les précipitations neigeuses, que les améliorations par ajout d'un module neige type MORDOR sont les plus significatives. A l'inverse, les performances des bassins situés plus en aval, tels que la Garonne à Lamagistère ou le Tarn à Millau, peuvent être légèrement dégradées par l'ajout d'un module neige non adapté et pas assez robuste. La thèse actuellement menée au sein de l'équipe TRANSFEAU du Cemagref d'Antony devrait apporter des précisions sur la façon dont doit être prise en compte la partie neigeuse des bassins de montagne dans la modélisation hydrologique.

D'autre part, une étude de sensibilité aux données utilisées en entrée du modèle hydrologique a permis de mettre en évidence des différences significatives entre les données issues de la banque SAFRAN et celles provenant des postes pluviométriques et de température EDF. Ainsi, il semble qu'en zone de montagne, les données de pluviométrie fournies par SAFRAN soient moins intéressantes pour la modélisation que celles provenant des postes EDF. En termes de températures, les données des stations EDF n'ont cependant pas apporté de plus-value par rapport aux données SAFRAN pour la modélisation. Un important travail de comparaison des combinaisons de données d'entrée a été effectué afin de pouvoir optimiser, pour la suite du projet, les jeux de données à utiliser. Cependant, par manque de temps, la comparaison des données issues de SAFRAN et EDF n'a pas pu être menée. Il serait pourtant intéressant de voir si les différences observées (15% en plus en volume d'eau avec SAFRAN) entre les deux sources sont liées à un problème de volume d'eau ou à une représentation dynamique incorrecte des événements.

Enfin, des tests de sensibilité aux ouvrages hydroélectriques ont été menés sur deux bassins fortement anthropisés : l'Ariège à Foix et l'Aveyron à Loubéjac. Cependant, les modélisations n'ont pas apporté d'amélioration significative. Cet échec peut s'expliquer par le manque de données disponibles. En conséquence, nous n'avons pas pu réaliser une étude exhaustive des ouvrages présents sur les bassins. De plus, il est possible que la méthode de prise en compte des barrages décrite par **Payan** (2007) ne soit pas adaptée à ce projet et ne permette pas une bonne restitution des débits sur les sous-bassins de la Garonne. Enfin, nous avons fait le choix de travailler sur un modèle global qui peut expliquer une partie des difficultés de modélisation rencontrées.

En parallèle, une analyse générique de sensibilité aux influences des conditions de calage a été effectuée. Elle est un préalable nécessaire avant la réalisation de projections du modèle avec des scénarii climatiques. En effet, les projections seront probablement sujettes à des incertitudes liées à la non-stationnarité des paramètres des modèles hydrologiques. Le but de cette analyse est donc de quantifier les incertitudes sur les extrêmes liées aux conditions de calage.

---

## Bibliographie

---

- Agosta, C., 2007, *Naturalisation des débits et modélisation hydrologique sur des sous-bassins versants de la Garonne à Lamagistère: Rapport de stage, Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie, Université Pierre et Marie Curie, Paris, LNHE EDF R&D, 51 p.*
- Caballero, Y., and J. Noilhan, 2003, *Etude de l'impact hydrologique du changement climatique sur les ressources en eau du bassin Adour Garonne, in R. d. l. A. d. l. E. Adour-Garonne, ed., p. 176.*
- Caballero, Y., S. Voirin-Morel, F. Habets, J. Noilhan, P. LeMoigne, A. Lehenaff, and A. Boone, 2007, *Hydrological sensitivity of the Adour-Garonne river basin to climate change: Water Resources Research, v. 43.*
- Galea, G., P. Breil, and A. Renaux, 2002, *Impact des retenues collinaires sur le régime hydrologique - sous bassins du Tescou et de la Séoune (Bassin Adour-Garonne), p. 84.*
- Galea, G., S. Vasquez-Paulus, B. Renard, and P. Breil, 2005, *L'impact des prélèvements d'eau pour l'irrigation sur les régimes hydrologiques des sous-bassins du Tescou et de la Séoune (bassin Adour-Garonne, France): Revue des sciences de l'eau, v. 18, p. 273-305.*
- Klemes, V., 1986, *Operational testing of hydrological simulation models: Hydrological Sciences Journal, v. 31, p. 13-24.*
- Lindström, G., B. Johansson, M. Persson, M. Gardelin, and S. Bergström, 1997, *Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model: Journal of Hydrology, v. 201, p. 272-288.*
- Moulin, L., 2003, *Prise en compte des barrages-réservoirs dans un modèle pluie-débit global: DEA Hydrologie hydrogéologie géostatistique et géochimie, Filière hydrologie et hydrogéologie quantitatives, Université Pierre et Marie Curie, Université Paris Sud, Ecole des Mines de Paris, ENGREF Paris, CEMAGREF ANTONY QHAN, 55 p.*
- Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe, 1970, *River flow forecasting through conceptual models, part 1 : a discussion of principles: Journal of Hydrology, v. 10, p. 282-290.*
- Paquet, E., 2004, *A new version of the hydrological model MORDOR : Snowpack model at different elevations: Evolution du modèle hydrologique MORDOR : modélisation du stock nival à différentes altitudes, p. 75-82.*
- Paquet, E., J. Gailhard, and R. Garçon, 2006, *Evolution of the GRADEX method: Improvement by atmospheric circulation classification and hydrological modelling: Evolution de la méthode du gradex: Approche par type de temps et modélisation hydrologique, p. 80-90.*
- Payan, J. L., 2007, *Prise en compte de barrages-réservoirs dans un modèle global pluie-débit: DOCTEUR de l'ENGREF, Paris thesis, 256 p.*
- Payan, J. L., C. Perrin, C. Michel, V. Andreassian, and B. Chastan, 2006, *Accounting for reservoirs in a lumped rainfall-runoff model, evaluation of artificial reservoirs diffuse impacts on downstream flows, Q.87 - R.37, Vol. IV: 22ème congrès des grands barrages, Barcelone, juin 2006, p. 543-560.*
- Perrin, C., 2000, *Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative: Doctorat Mécanique des milieux géophysiques et environnement, INP Grenoble thesis, 530 p.*
- Perrin, C., C. Michel, and V. Andréassian, 2003, *Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation: Journal of hydrology, v. 279, p. 275-289.*
- Quillat, B., 2007, *Caractérisation hydrologique du bassin de la Garonne à l'aide d'un modèle pluie-débit global: Rapport de stage de 2ème année Département Hydraulique et mécanique des fluides ENSEEIHT Toulouse, CEMAGREF ANTONY HBAN, 54 p.*
- Sauquet, E., E. Leblois, B. Renard, M. Haond, and D. Jouve, 2005, *Examen de la vulnérabilité de la ressource en eau vis à vis des fluctuations climatiques. Application aux étiages du bassin du Rhône, p. 57.*
- Voirin-Morel, S., 2003, *Modélisation distribuée des flux d'eau et d'énergie et des débits à l'échelle régionale du bassin Adour Garonne.*

---

## Glossaire

---

- AEP :** Alimentation en Eau Potable
- APR :** Appel à Proposition de Recherche
- DCE :** Directive Cadre sur l'Eau
- DOE :** Débits Objectifs d'Étiage
- MEDD :** Ministère de l'Écologie et du Développement Durable  
(Aujourd'hui devenu MEDDAT : Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire)
- PGE :** Plan de Gestion des Étiages
- SDAGE :** Schéma Directeur Aménagement et de Gestion des Eaux
- SIG :** Système d'Information Géographique
- SAFRAN :** SAFRAN est un système de réanalyse des conditions météorologiques adaptées aux régions montagneuses développé par Météo-France. Il utilise pour cela toutes les données disponibles observées.  
A partir des modèles utilisés pour les prévisions météorologiques et les observations en altitude et au sol (stations météorologiques et climatologique), SAFRAN fournit tous les termes permettant de calculer un bilan de surface : rayonnement, vent, température, humidité, précipitation pour des zones considérées comme homogènes du point de vue des conditions météorologiques.

---

## Annexes

---

**Annexe 1: Postes pluviométriques et stations de température fournis par la DTG**  
Paragraphe 2.3.1 Données disponibles

	<i>Garonne à Montréjeau</i>	<i>Tarn à Millau</i>	<i>Salat à Roquefort</i>	<i>Ariège à Foix</i>	<i>Agout à Lavaur</i>	<i>Tarn à Villemur</i>
CODE STATION	<b>DTG01372</b>	<b>DTG01678</b>	<b>O0592510</b>	<b>O1252510</b>	<b>O4692550</b>	<b>O4931010</b>
Pluvio	BORDERES CIERP EGET EYLIE FOS JUZET LANNEMEZAN LEPORTILLON OO POINTIS SAINTLARY SALAU TRAMEZAYGUES	BOULOC CAMPRIEU FLORAC ISPAGNAC MASSEGROS MEYRUIS NANT PTMONTVERT STBEAULIZE STMAURICE TREVES VEZINS	AULUS EYLIE JUZET ORGIBET SALAU SEIX	AULUS AXLESTHERMES HOSPITALET ORLU PRADIERES SABART VERDUN	ALBI ALRANCE BELMONT BOULOC CASTRES FRAISSE LACAUNE LEVINTROU MONTAGNES MONTREDON SALVETAT STAFRIQUE STBEAULIZE VEZINS	ALBI ALRANCE BELMONT BOULOC CASTRES FRAISSE LACAUNE LEVINTROU MONTAGNES MONTREDON SALVETAT STAFRIQUE STBEAULIZE VEZINS
Température	GEDRE USINE LANNEMEZAN VALLEE DU LYS	ST AFRIQUE	ST GIRONS TARASCON	L'HOSPITALET TARASCON	ST AFRIQUE TOULOUSE BLAGNAC	ST AFRIQUE TOULOUSE BLAGNAC

*Tableau 8 - Liste des postes pluviométriques et des stations de température fournis par la DTG*

**Annexe 2: Résultats en calage des tests présentés dans le paragraphe 2.2**  
**Tests de sensibilité au module neige**

<b>GR4J en CALAGE</b>	<b>Module neige</b>	<b>Nash(Q)</b>	<b>Nash(<math>\sqrt{Q}</math>)</b>	<b>Nash(Ln Q)</b>	<b>BILAN</b>
<i>Tarn à Millau</i> DTG01678	SANS	0.855	0.883	0.844	0.988
	dérivé de HBV	0.930	0.931	0.904	0.982
	dérivé de MORDOR	0.930	0.929	0.900	0.990
<i>Aveyron à Loubéjac</i> O5882510	SANS	0.898	0.933	0.890	0.986
	dérivé de HBV	0.904	0.935	0.891	0.987
	dérivé de MORDOR	0.901	0.939	0.913	0.976
<i>Tarn à Villemur</i> O4931010	SANS	0.855	0.883	0.844	0.988
	dérivé de HBV	0.883	0.897	0.853	0.982
	dérivé de MORDOR	0.884	0.905	0.885	0.981
<i>Garonne à Lamagistère</i> O6140010	SANS	0.874	0.897	0.887	0.987
	dérivé de HBV	0.892	0.906	0.891	0.991
	dérivé de MORDOR	0.890	0.907	0.897	0.987
<i>Agout à Lavaur</i> O4692550	SANS	0.790	0.831	0.786	0.983
	dérivé de HBV	0.804	0.838	0.789	0.981
	dérivé de MORDOR	0.799	0.841	0.802	0.977
<i>Garonne à Montréjeau</i> DTG01372	SANS	0.585	0.632	0.663	0.960
	dérivé de HBV	0.742	0.780	0.790	0.975
	dérivé de MORDOR	0.810	0.827	0.826	0.979
<i>Salat à Roquefort</i> O0592510	SANS	0.707	0.760	0.789	0.958
	dérivé de HBV	0.788	0.806	0.814	0.965
	dérivé de MORDOR	0.819	0.852	0.860	0.976
<i>Ariège à Foix</i> O1252510	SANS	0.560	0.622	0.633	0.962
	dérivé de HBV	0.673	0.704	0.686	0.968
	dérivé de MORDOR	0.651	0.692	0.672	0.971
<i>Garonne à Portet</i> O1900010	SANS	0.757	0.806	0.822	0.974
	dérivé de HBV	0.785	0.823	0.833	0.977
	dérivé de MORDOR	0.849	0.877	0.877	0.985

*Tableau 9 – Test de sensibilité au module neige utilisé : Performances moyennes de chaque sous-bassin obtenues en calage du modèle hydrologique GR4J avec la température et la pluviométrie SAFRAN selon modèle neige employé*

**Annexe 3 : Résultats en calage des tests présentés dans le paragraphe 2.3**  
**Tests de sensibilité aux données d'entrées du modèle hydrologique**

GR4J en CALAGE	Température	Pluviométrie	Nash(Q)	Nash( $\sqrt{Q}$ )	Nash(Ln Q)	BILAN
<i>Tarn à Millau</i> DTG01678	SAFRAN	SAFRAN	0.930	0.929	0.900	<b>0.990</b>
	EDF	EDF postes au sol	<b>0.937</b>	<b>0.936</b>	<b>0.911</b>	0.983
	SAFRAN	EDF postes au sol	0.928	0.929	0.892	0.985
	SAFRAN	EDF spatialisé	0.843	0.902	0.885	0.982
	EDF	EDF spatialisé	0.858	0.911	0.904	0.986
<i>Aveyron à Loubéjac</i> O5882510	SAFRAN	SAFRAN	0.901	0.939	0.913	0.976
	SAFRAN	EDF spatialisé	<b>0.909</b>	<b>0.941</b>	<b>0.917</b>	<b>0.977</b>
<i>Tarn à Villemur</i> O4931010	SAFRAN	SAFRAN	0.884	0.905	0.885	0.981
	EDF	EDF postes au sol	0.855	0.897	0.882	0.978
	SAFRAN	EDF postes au sol	0.863	0.895	0.880	0.979
	SAFRAN	EDF spatialisé	0.888	0.909	0.890	<b>0.987</b>
	EDF	EDF spatialisé	<b>0.891</b>	<b>0.912</b>	<b>0.892</b>	0.983
<i>Garonne à Lamagistère</i> O6140010	SAFRAN	SAFRAN	0.890	0.907	0.897	0.987
	SAFRAN	EDF spatialisé	<b>0.899</b>	<b>0.913</b>	<b>0.909</b>	<b>0.989</b>
<i>Agout à Lavaur</i> O4692550	SAFRAN	SAFRAN	<b>0.799</b>	<b>0.841</b>	<b>0.802</b>	0.977
	EDF	EDF postes au sol	0.745	0.815	0.793	0.974
	SAFRAN	EDF postes au sol	0.741	0.808	0.778	0.974
	SAFRAN	EDF spatialisé	0.708	0.779	0.755	0.968
	EDF	EDF spatialisé	0.725	0.795	0.779	<b>0.980</b>
<i>Garonne à Montréjeau</i> DTG01372	SAFRAN	SAFRAN	<b>0.810</b>	<b>0.827</b>	<b>0.826</b>	0.979
	EDF	EDF postes au sol	0.657	0.739	0.768	0.976
	SAFRAN	EDF postes au sol	0.750	0.804	0.814	0.982
	SAFRAN	EDF spatialisé	0.766	0.804	0.809	<b>0.984</b>
	EDF	EDF spatialisé	0.687	0.745	0.768	0.974
<i>Salat à Roquefort</i> O0592510	SAFRAN	SAFRAN	<b>0.819</b>	0.852	0.860	0.976
	EDF	EDF postes au sol	0.775	0.840	0.863	0.977
	SAFRAN	EDF postes au sol	0.798	<b>0.855</b>	<b>0.870</b>	0.979
	SAFRAN	EDF spatialisé	0.792	0.818	0.813	<b>0.980</b>
	EDF	EDF spatialisé	0.757	0.799	0.808	0.977
<i>Ariège à Foix</i> O1252510	SAFRAN	SAFRAN	0.651	0.692	0.672	0.971
	EDF	EDF postes au sol	0.705	<b>0.740</b>	<b>0.720</b>	<b>0.976</b>
	SAFRAN	EDF postes au sol	<b>0.707</b>	0.733	0.699	0.973
	SAFRAN	EDF spatialisé	0.694	0.727	0.707	0.973
	EDF	EDF spatialisé	0.679	0.721	0.707	0.975
<i>Garonne à Portet</i> O1900010	SAFRAN	SAFRAN	<b>0.849</b>	<b>0.877</b>	0.877	<b>0.985</b>
	SAFRAN	EDF spatialisé	0.847	<b>0.877</b>	<b>0.881</b>	<b>0.985</b>

*Tableau 10 - Test de sensibilité aux données d'entrée du modèle : Performances moyennes de chaque sous-bassin obtenues en calage du modèle hydrologique GR4J en présence du module neige dérivé de MORDOR*

**Annexe 4 : Résultats en calage des tests présentés dans le paragraphe 2.4**  
***Prise en compte des ouvrages dans la modélisation hydrologique***

	GR4J en calage	Prise en compte des barrages	Module neige	Nash(Q)	Nash( $\sqrt{Q}$ )	Nash(Ln Q)	BILAN
<b><i>Ariège à Foix</i></b> <b><i>O1252510</i></b>	P <sub>EDF</sub> spatialisée et T <sub>SAFRAN</sub>	NON	SANS module neige	0.547	0.616	0.640	0.921
		OUI		0.586	0.649	0.662	0.969
<b><i>Ariège à Foix</i></b> <b><i>O1252510</i></b>	P <sub>EDF</sub> spatialisée et T <sub>SAFRAN</sub>	NON	Dérivé de MORDOR	0.741	0.758	0.723	0.962
		OUI		0.694	0.716	0.687	0.979

*Tableau 11 – Performances obtenues en calage sur le bassin de l'Ariège à Foix*

	GR4J en calage	Prise en compte des barrages	Module neige	Nash(Q)	Nash( $\sqrt{Q}$ )	Nash(Ln Q)	BILAN
<b><i>Aveyron à Loubéjac</i></b> <b><i>O5882510</i></b>	P <sub>EDF</sub> spatialisée et T <sub>SAFRAN</sub>	NON	SANS module neige	0.894	0.923	0.849	0.912
		OUI		0.900	0.927	0.888	0.983
<b><i>Aveyron à Loubéjac</i></b> <b><i>O5882510</i></b>	P <sub>EDF</sub> spatialisée et T <sub>SAFRAN</sub>	NON	Dérivé de MORDOR	0.881	0.918	0.848	0.894
		OUI		0.905	0.932	0.903	0.976

*Tableau 12– Performances obtenues en calage sur le bassin de l'Aveyron à Loubéjac*

## Annexe 5 : Essai de modélisation du bassin de l'Ariège à Foix à partir des débits naturalisés

Pour réaliser ce test, la pluviométrie SAFRAN ainsi que la température SAFRAN ont été utilisées en entrées du modèle GR4J calé sur les racines des débits. Les résultats présentés ci-dessous sont ceux obtenus en utilisant le module neige MORDOR pour lequel on obtient les meilleures performances.

Performances obtenues (en %)	L' Ariège à Foix O1252510					
	CALAGE 1994(1995-1999)	CONTRÔLE 1999(2000-2004)	CALAGE 1999(2000-2004)	CONTRÔLE 1994(1995-1999)	Moyenne CALAGE	Moyenne CONTRÔLE
Nash(Q)	0.727	0.731	0.778	0.706	0.753	0.719
Nash(LnQ)	0.762	0.845	0.868	0.717	0.815	0.781
C2M(Q)	0.572	0.576	0.637	0.546	0.605	0.561
C2M(LnQ)	0.616	0.731	0.768	0.559	0.692	0.645
BILAN	0.976	0.887	0.971	0.929	0.974	0.908

Tableau 13 – Performances obtenues sur le bassin de l'Ariège à Foix en travaillant à partir des débits naturalisés fournis par EdF R&D

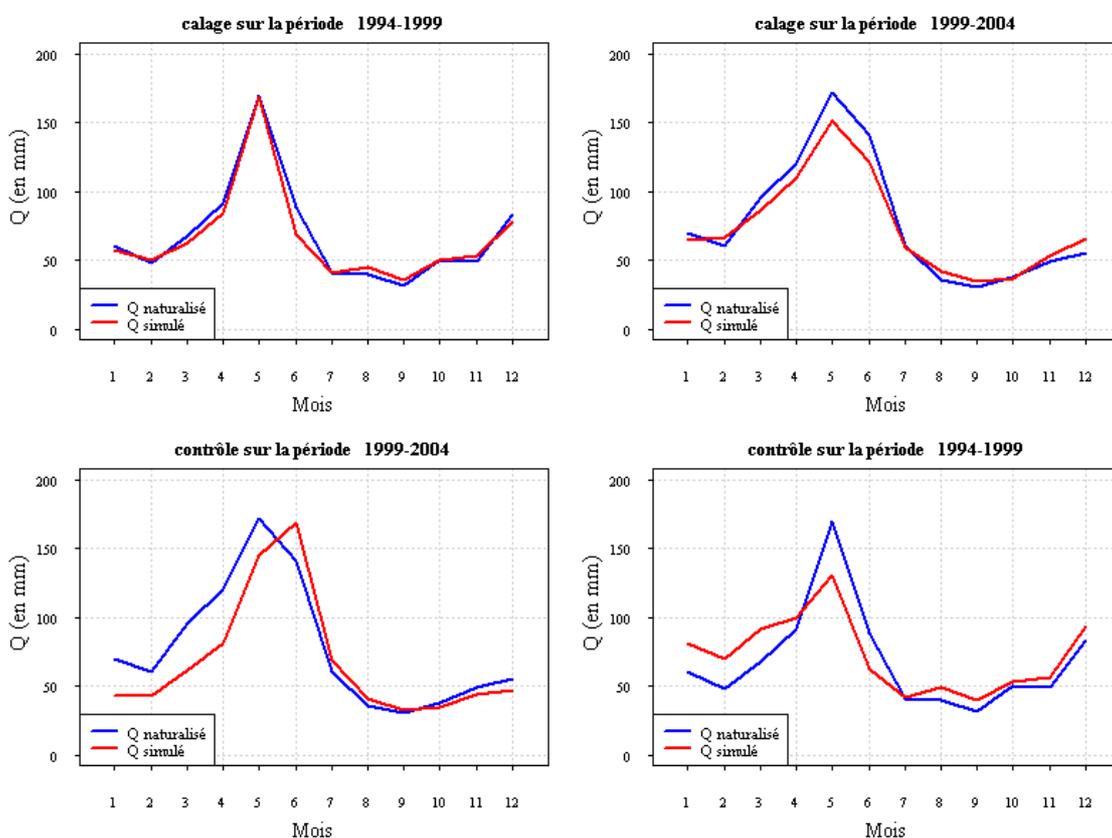


Figure 20 – Moyennes mensuelles interannuelles naturalisées et simulées à partir des débits naturalisés fournis par EDF R&D sur le bassin de l'Ariège à Foix

## Annexe 6: Protocole d'évaluation des modèles hydrologiques utilisés dans le cadre du projet IMAGINE2030

### Objectifs

La confiance que l'on peut accorder aux projections hydrologiques qui seront faites à l'horizon 2030 dépend en partie de la capacité des modèles hydrologiques à reproduire correctement le comportement hydrologique des bassins versants dans les conditions actuelles. Dans le cadre du projet, plusieurs modèles seront testés, ce qui permettra d'avoir une évaluation des incertitudes liées à l'approche de modélisation hydrologique choisie.

Pour atteindre cet objectif, il semble intéressant de pouvoir évaluer les modèles dans des conditions permettant la comparaison objective de leur efficacité.

Cette note présente donc un protocole objectif d'évaluation et de comparaison des différents modèles qui seront testés dans le cadre du projet.

### Définitions

Dans la suite, on désignera par :

- modèle hydrologique ou modèle pluie-débit : l'ensemble des équations permettant à partir d'entrées météorologiques (pluie, évapotranspiration potentielle (ETP), température...) de simuler un débit à l'exutoire. Les modèles pourront être globaux, semi-distribués ou distribués. Ici, le pas de temps de fonctionnement sera journalier.
- simulation : le calcul d'un débit à partir des entrées du modèle
- calage du modèle : phase au cours de laquelle on détermine les paramètres du modèle sur la base des informations disponibles (séries hydrométéorologiques). Cette phase peut faire intervenir calage automatique et/ou manuel. Elle repose sur l'optimisation d'une ou plusieurs fonctions objectifs numériques et éventuellement de critères graphiques.
- contrôle du modèle : phase au cours de laquelle on évalue le modèle avec des données différentes de celles utilisées en calage, en utilisant les paramètres déterminés en phase de calage. Les périodes de calage et de contrôle doivent être indépendantes. On préférera le terme contrôle à celui de validation qui est plus ambitieux. Les performances du modèle obtenues en contrôle sont jugées plus représentatives des réelles capacités du modèle que les performances en calage, souvent trop optimistes. C'est donc sur les performances en contrôle que portera l'essentiel des analyses.
- période de mise en route : période de simulation en début de période test (calage ou contrôle) au cours de laquelle les erreurs du modèle ne sont pas prises en compte dans le calcul des critères d'évaluation. Cette période permet de limiter les erreurs du modèle dues à la méconnaissance des conditions initiales. Les erreurs du modèle n'étant pas calculées en phase de mise en route, il n'est pas nécessaire de disposer de données de débit sur cette période. Dans le cadre du projet, une période de 365 jours sera adoptée.

### Protocole de test

Nous adopterons ici la procédure du "split sample test" proposée par Klemesš (1986) pour le test des modèles hydrologiques. Il s'agit d'un test en calages-contrôles croisés sur périodes indépendantes. La série totale disponible est divisée en deux périodes, P1 et P2, ayant des longueurs similaires. Le test consiste à réaliser :

- un calage du modèle sur la période P1 puis un contrôle sur la période P2 ;
- un calage du modèle sur la période P2 puis un contrôle sur la période P1.

Le modèle sera jugé acceptable sur le bassin si les résultats en contrôle sur les deux périodes sont acceptables au regard des critères d'évaluation utilisés. L'intérêt de cette procédure est qu'elle permet d'avoir une évaluation du modèle en contrôle sur l'ensemble des données disponibles.

### Périodes test

La détermination des périodes P1 et P2 peut se faire en suivant le découpage illustré à la Figure 21. On peut autoriser un recouvrement entre les périodes 1 et 2 correspondant à la période d'initialisation de la période 2. Ceci permet de ne pas "perdre" une année de test en début de seconde période.

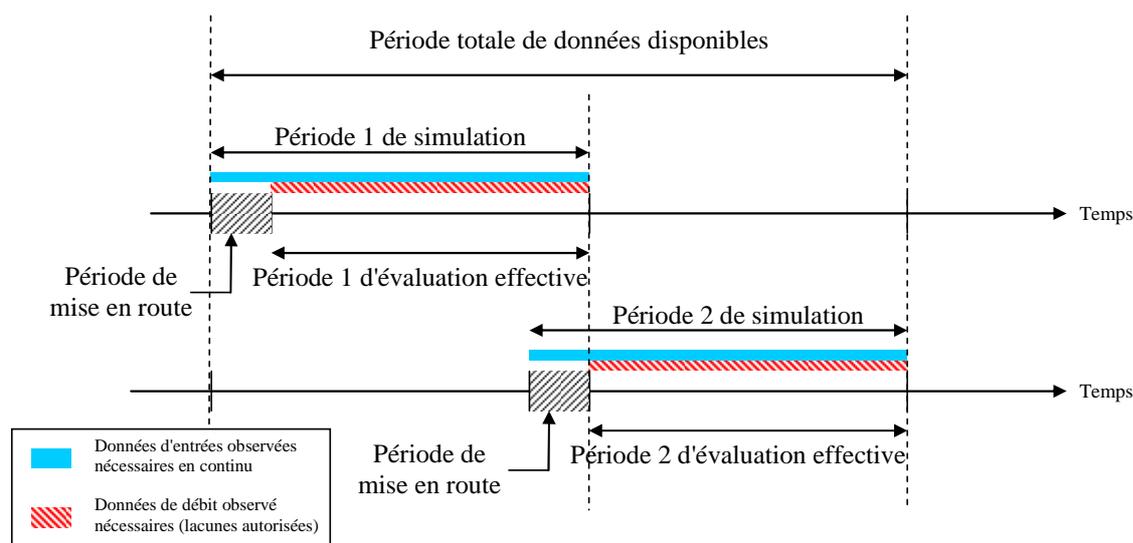


Figure 21 : Schéma de sélection des périodes test pour application du "split sample test"

Les modèles testés dans le cadre du projet étant continus, les séries d'entrées du modèle (pluie, ETP, température) doivent être continues sur les périodes tests. On peut en revanche autoriser des lacunes de débit, les débits n'étant utilisés que pour le calcul des critères. On essaiera cependant, dans la mesure du possible, d'identifier des périodes avec le moins de lacunes possible, afin d'avoir des calculs de critères significatifs. Notons que, les erreurs sur la période de mise en route n'étant pas prises en compte dans le calcul des critères, on peut autoriser une absence complète de données de débit sur cette période de mise en route. Dans le schéma de la Figure 21, cela peut être intéressant au niveau de la période 1 pour allonger la plage de test s'il existe des données d'entrées du modèle antérieures à celles de débit.

La période totale sur laquelle on va réaliser les tests va dépendre essentiellement de la disponibilité des données, à savoir :

- données de pluie, température, ETP (et éventuellement autres entrées),
- données de débit.

L'Annexe 1 récapitule les données disponibles pour réaliser les tests d'évaluation des modèles.

L'Annexe 2 donne les périodes sélectionnées pour tester les modèles sur chaque bassin.

### Procédure de calage

Les modèles testés étant relativement différents, l'algorithme d'optimisation et la fonction objectif restent au choix de chaque équipe de modélisation.

Pour avoir une évaluation des performances des modèles à ce stade, les deux critères suivants seront cependant calculés, sans devoir être explicitement utilisés au cours du calage :

(1) Critère de Nash-Sutcliffe

$$NSQ = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - Q_{s,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \overline{Q_o})^2} \quad \text{avec} \quad \overline{Q_o} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_{o,i}$$

où  $Q_{o,i}$  et  $Q_{s,i}$  sont les débits observés et simulés au pas de temps  $i$  et  $n$  est le nombre de pas de temps de la période d'évaluation. Ce critère varie sur  $]-\infty, 1]$ , 1 correspondant à des simulations parfaitement en adéquation avec les observations. Ce critère évalue préférentiellement la restitution des débits de crue.

(2) Critère de Nash-Sutcliffe calculé sur les logarithmes des débits

$$NSLQ = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\ln(Q_{o,i} + \varepsilon) - \ln(Q_{s,i} + \varepsilon))^2}{\sum_{i=1}^n (\ln(Q_{o,i} + \varepsilon) - \overline{\ln(Q_o + \varepsilon)})^2} \quad \text{avec} \quad \overline{\ln(Q_o + \varepsilon)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(Q_{o,i} + \varepsilon)$$

où  $\varepsilon = \frac{1}{40.n} \sum_{i=1}^n Q_{o,i}$  est une constante faible permettant d'éviter les problèmes numériques en cas de débit nul. Ce critère varie sur  $]-\infty, 1]$ , 1 correspondant à des simulations parfaitement en adéquation avec les observations. Ce critère donne plus d'importance à la restitution des étiages.

### Evaluation des tests en contrôle

Les modèles seront essentiellement évalués sur les deux tests de contrôle sur les périodes P1 et P2 (en utilisant les paramètres issus des calages sur les périodes P2 et P1 respectivement). L'évaluation se fera en fonction de critères numériques. Des graphiques permettront d'illustrer les résultats.

#### ❖ Critères numériques :

On privilégie ici des critères adimensionnels, permettant une comparaison plus facile des résultats entre bassins.

(1) Critère de Nash-Sutcliffe (cf. partie calage)

(2) Critère de Nash-Sutcliffe calculé sur les logarithmes des débits (cf. partie calage)

(3) Critère de Nash sur les débits mensuels moyens sur la période :

On calcule, pour les 12 mois de l'année, les débits moyens observés et simulés sur l'ensemble de la période d'évaluation, puis on calcule le critère de Nash sur ces douze valeurs :

$$NSM = 1 - \frac{\sum_{m=1}^{12} (Q_{o,m} - Q_{s,m})^2}{\sum_{m=1}^{12} (Q_{o,m} - \overline{Q_m})^2} \quad \text{avec} \quad \overline{Q_m} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} Q_{o,m}$$

(4) Critère de bilan

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{s,i}}{\sum_{i=1}^n Q_{o,i}}$$

Ce critère, basé sur l'erreur cumulée, permet de mesurer les sur- ou sous-estimations des volumes sur la période. Des valeurs de  $B$  supérieures à 1 correspondent à des débits simulés surestimés, des valeurs inférieures à 1 à des débits sous-estimés.

Ce critère donne une évaluation de la capacité du modèle à bien restituer le régime moyen d'écoulement.

En plus de ces critères calculés sur toute la période, on ajoute deux critères plus spécifiques aux crues et aux étiages. Pour éviter des problèmes de calcul de ces critères, on définit un seuil de crue et un seuil d'étiage relatif à la période test. Ils sont définis par :

- seuil d'étiage  $S_e$ : valeur du débit observé non dépassée 10 % du temps sur la période test
- seuil de crue  $S_c$ : valeur du débit observé non dépassée 90 % du temps sur la période test

(5) Rapport des volumes d'étiage

$$BE = \frac{\sum_{i \in [1, n] | Q_{o,i} \leq S_e} Q_{s,i}}{\sum_{i \in [1, n] | Q_{o,i} \leq S_e} Q_{o,i}}$$

Similaire au critère B, ce critère évalue la bonne restitution des volumes d'étiage crue.

(6) Rapport du nombre de jour d'étiages

$$NE = \frac{\sum_{i \in [1, n] | Q_{o,i} \leq S_e} \delta_i}{nt_e} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \delta_i = 0 & \text{si } Q_{s,i} > S_e \\ \delta_i = 1 & \text{si } Q_{s,i} \leq S_e \end{cases}$$

où  $nt_e$  est le nombre total de pas de temps où le débit observé est inférieur ou égal au seuil d'étiage. Ce critère permet d'évaluer la bonne restitution des durées d'étiage.

(7) Rapport des volumes en crue

$$BC = \frac{\sum_{i \in [1, n] | Q_{o,i} \geq S_c} Q_{s,i}}{\sum_{i \in [1, n] | Q_{o,i} \geq S_c} Q_{o,i}}$$

Similaire au critère B, ce critère évalue la bonne restitution des volumes de crue.

(8) Rapport des crues annuelles

$$RCA = \frac{\sum_{k=1}^q \max_{l_{sk} \leq t \leq l_{ek}} (S_i)}{\sum_{k=1}^q \max_{l_{sk} \leq t \leq l_{ek}} (O_i)}$$

où  $l_{sk}$  et  $l_{ek}$  sont les pas de temps de début et de fin de l'année k et q est le nombre d'année de simulation. Ce critère permet d'apprécier la capacité du modèle à bien restituer les forts événements de crue.

❖ **Illustrations graphiques :**

Les graphiques synthétiques suivants seront utilisés pour illustrer les performances du modèle :

1. comparaison des débits observés et simulés, en m<sup>3</sup>/s, en utilisant une échelle logarithmique pour mieux mettre en évidence la restitution des débits d'étiage ;
2. comparaison des courbes des débits mensuels moyens observés et simulés, en m<sup>3</sup>/s ;
3. comparaison des courbes de débits classés observés et simulés. Pour la représentation on utilisera une fréquence expérimentale F au non dépassement donnée par :

$$F = \frac{i - 0.3}{n + 0.4}$$

où  $i$  est le rang de la valeur classée et n le nombre totale de valeurs. On tracera ensuite les valeurs de débit (en m<sup>3</sup>/s, échelle log) en fonction de la variable de Gumbel  $-\ln(-\ln(F))$ .

Ces graphiques seront réalisés pour les deux tests en contrôle.  
Que ce soit pour les critères numériques ou graphiques, ne sont pris en compte que les pas de temps où les débits observés ne sont pas en lacune.

### **Fiche synthétique de résultats**

Pour la comparaison des performances des modèles, les résultats seront présentés sous la forme d'une fiche type, dont un exemple est présenté en Annexe 3.

### **Bibliographie**

**Klemeš, V. (1986).** Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, **31**(1), 13-24.

Annexe 1 : Disponibilité des données dans le cadre du projet IMAGINE2030 (pas de temps journalier)

Remarque : La disponibilité des forçages de pluie et de température SAFRAN, homogène sur tous les bassins (1<sup>er</sup> septembre 1970 – 31 août 2006) n'a pas été incluse dans le tableau

Bassin	Code Hydro	Débit				Pluviométrie	
		Type station (DIREN/EDF)	Période disponible débit observé	Débit naturalisé existant (oui / non)	Période disponible débit naturalisé	Code poste ou pluie spatialisée EDF (PSEDF)	Période disponible
la Garonne à Montréjeau	DTG01372	EDF	01/01/1969 31/12/2005			PSEDF	01/01/1953-31/12/2005
le Tarn à Millau	DTG01678	EDF	01/01/1988 31/12/2005	oui	01/01/1988 31/12/2005	PSEDF	01/01/1953-31/12/2005
le Salat à Roquefort	O0592510	DIREN	01/01/1988 31/05/2007	oui	01/01/1976 31/12/2004	PSEDF	01/01/1953-31/12/05
l'Ariège à Foix	O1252510	DIREN	01/01/1988 31/05/2007	oui	01/01/1990 31/12/2004	PSEDF	01/01/1953-31/12/2005
la Garonne à Portet	O1900010	DIREN	01/01/1988 31/05/2007			PSEDF	01/01/1953-31/12/2005
l'Agout à Lavour	O4692550	DIREN	01/01/1991 31/05/2007			PSEDF	01/01/1953-31/12/2005
le Tarn à Villemur	O4931010	DIREN	01/01/1988 31/05/2007			PSEDF	01/01/1953-31/12/2005
l'Aveyron à Loubéjac	O5882510	DIREN	01/01/1988 31/05/2007			PSEDF	01/01/1953-31/12/2005
la Garonne à Lamagistère	O6140010	DIREN	01/01/1988 31/05/2007			PSEDF	01/01/1953-31/12/2005

Annexe 2 : Périodes test choisies dans le cadre du projet IMAGINE2030 (pas de temps journalier)

Bassin	Code Hydro	Période totale disponible pour les tests	Périodes test (les 365 premiers pas de temps étant réservés pour la mise en route)	
			Période 1	Période 2
la Garonne à Montréjeau	DTG01372			
le Tarn à Millau	DTG01678	01/01/1988 - 31/12/2005	01/01/1987 - 31/12/1995	01/01/1995 - 31/12/2005
le Salat à Roquefort	O0592510			
l'Ariège à Foix	O1252510	01/01/1990 - 31/12/2004 01/01/1994-31/12/2004 *	01/01/1989 - 31/12/1997 01/01/1994 - 31/12/1999	01/01/1997 - 31/12/2004 01/01/1999 - 31/12/2004
la Garonne à Portet	O1900010			
l'Agout à Lavour	O4692550			
le Tarn à Villemur	O4931010			
l'Aveyron à Loubéjac	O5882510	01/01/1990 - 31/12/2005	01/01/1989 - 31/12/1997	01/01/1997 - 31/12/2005
la Garonne à Lamagistère	O6140010			

\* si l'on tient compte du Garrabet

Annexe 3 : Fiche type utilisée pour la présentation des résultats

<b>Bassin</b>		<b>Code HYDRO</b>		<b>Superficie (km<sup>2</sup>)</b>					
L'Ariège à Foix		O1252510		1340					
<b>Origine des données</b>									
Pluie		Température		ETP					
EDF		SAFRAN		Oudin interannuelle					
<b>Périodes d'évaluation (hors mise en route)</b>									
Période 1 (P1)		01/01/1995 – 31/12/2000							
Période 2 (P2)		01/01/2001 – 31/12/2005							
<b>Type de débit utilisé pour l'évaluation</b>									
Débit observé		Débit naturalisé		Autre :					
		X							
<b>Critères au calage</b>									
		NSQ		NSLQ					
P1		0.926		0.915					
P2		0.932		0.905					
Moyenne		0.929		0.910					
<b>Critères au contrôle</b>									
		NSQ	NSLQ	NSM	B	BE	NE	BC	RCA
P1		0.897	0.903	0.926	1.070	1.002	1.070	1.080	1.071
P2		0.914	0.910	0.937	0.998	1.056	1.110	1.043	1.056
Moyenne		0.906	0.907	0.932	1.034	1.029	1.090	1.062	1.064
<b>Illustrations graphiques (contrôle)</b>									
		Période 1			Période 2				
Comparaison des débits observés et simulés									