

Ecole nationale supérieure d'électronique, d'électrotechnique, d'informatique,
d'hydraulique et des télécommunications de Toulouse

Département Hydraulique et mécanique des fluides



Caractérisation hydrologique du bassin de la Garonne à l'aide d'un modèle pluie-débit global

Blandine Quillat

Tuteur : Charles Perrin

Rapport de stage de 2^{ème} année

Stage réalisé du 04/06/2007 au 03/08/2007



Remerciements

Je tiens à remercier très chaleureusement Charles Perrin, mon tuteur, pour sa disponibilité et sa très grande patience.

Je remercie aussi mes collègues de bureau, Lionel Berthet pour ses nombreux coups de main et Cécile Paluch pour sa très bonne humeur.

Je remercie très sincèrement Vazken Andréassian pour tout l'intérêt qu'il a porté à mon avenir, et sa formation à l'apiculture.

Je remercie également Météo France pour la mise à disposition des données SAFRAN dans le cadre de ce stage.

Enfin merci à tous les membres de l'équipe d'hydrologie du Cemagref pour leur accueil et leurs démonstrations sportives.

Résumé

Les années 1976, 2003 et 2005 ont marqué les esprits par des étiages sévères généralisés sur le territoire français. Ces derniers épisodes ont rappelé la fragilité de nos hydrosystèmes. Les eaux du bassin de la Garonne sont par exemple fortement sollicitées par des usages multiples et leur rareté a déjà déclenché des conflits d'intérêt. C'est dans ce contexte que le projet "*Prospective 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*" a été monté par le Cemagref, l'Agence de l'Eau Adour-Garonne et EDF R&D. Ses objectifs sont de réaliser un diagnostic de la ressource en eau qui est actuellement disponible sur le bassin de la Garonne à Lamagistère et d'évaluer la pérennité du système multi-usage dans les décennies à venir en considérant des hypothèses de changements climatiques. Les études effectuées durant ce stage de 2^{ème} année portent sur la première partie du projet.

Le bassin de la Garonne à Lamagistère a été découpé en neuf sous-bassins dont nous avons dans un premier temps caractérisé les régimes hydrologiques influencés par des retenues hydroélectriques et par des transferts d'eau entre bassins.

Le travail a ensuite consisté à modéliser le fonctionnement hydrologique des sous-bassins et du bassin à Lamagistère avec le modèle empirique global GR4J. Le modèle obtient des résultats satisfaisants sur les bassins du Tarn à Millau et à Villemur, de l'Aveyron à Loubéjac ainsi que sur le bassin de la Garonne à Lamagistère. En revanche, les résultats sont peu satisfaisants sur les cinq autres sous-bassins étudiés (l'Agout à Lavar, la Garonne à Saint Gaudens et à Portet, le Salat à Roquefort et l'Ariège à Foix). Le rôle de la neige, ainsi que les influences humaines qui n'ont pu être prises en compte dans le cadre de ce travail, sont vraisemblablement à l'origine de ces faibles performances.

Abstract

The years 1976, 2003 and 2005 remain in memories because of the extreme temperature and the low flow periods over the French territory. These last events reminded the weakness of our hydrosystems. On the Garonne River basin, there is a high pressure on water resources that are used for numerous purposes and its scarcity has already led to conflicts among different users. In this context, the project "*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*" was built up by Cemagref, the Agence de l'Eau Adour-Garonne and EDF R&D. The objectives of the project were to make a diagnostic of the current water resources status at the scale of the Garonne watershed at Lamagistère and to estimate the sustainability of the multi-purposes system in the next decades considering hypotheses of climate changes. Studies made during this second year trainee concerns the first part of this project.

The watershed of the Garonne River at Lamagistère was divided into nine sub-basins. First we characterized their hydrological regimes which are influenced by hydropower reservoirs and water transfers between basins.

Then the task consisted in modeling the hydrological behaviour of the sub-basins and the total basin with the lumped empirical GR4J model. The model gets satisfactory results on the watersheds of the Tarn River at Millau and at Villemur, the Aveyron River at Loubéjac and the Garonne River at Lamagistère. However, results are disappointing on the other five studied watersheds (Agout River at Lavar, Garonne River at Saint Gaudens and at Portet, Salat River at Roquefort and Ariège River at Foix). The role of snowmelt and the influences of human activities are likely to be the cause of these poor performances.

Sommaire

Résumé	4
Abstract	4
Sommaire	5
Liste des figures	6
Liste des tableaux	7
Introduction	9
1 Le bassin versant de La Garonne à Lamagistère	10
1.1 Introduction	10
1.2 Présentation générale.....	11
1.2.1 Climatologie: précipitations et évapotranspiration	11
1.2.2 Ressources en eaux.....	11
1.2.3 Usages: prélèvements et consommations	11
1.2.4 Ouvrages.....	13
1.3 Gestion des ressources et des étiages	14
1.4 Découpage en sous bassins versants	14
1.5 Spécificités hydrologiques du bassin	15
1.5.1 Les bassins à régime pluvial océanique.....	17
1.5.2 Les bassins à régime pluvio-nival.....	18
1.5.3 Le bassin de la Garonne à Lamagistère	19
1.6 Synthèse: caractéristiques des sous-bassins versants	19
2 Méthodologie de modélisation hydrologique des débits.....	21
2.1 Présentation du modèle	21
2.1.1 La neutralisation	22
2.1.2 La fonction de rendement	22
2.1.3 La fonction de routage.....	22
2.1.4 La fonction d'échange.....	22
2.1.5 Module neige.....	22
2.2 Base de données	23
2.3 Calage et validation du modèle	24
2.4 Evaluation du modèle.....	24
3 Synthèse des performances du modèle sur l'ensemble du bassin	25
3.1.1 Des résultats satisfaisants	26
3.1.2 Des sous-bassins sur lesquels le modèle ne fonctionne pas correctement.....	27
3.1.3 Le bassin de la Garonne à Lamagistère	28
3.1.4 Analyses de sensibilité.....	29
4 Conclusion.....	31
Bibliographie	33
Annexe 1 : Glossaire	35
Annexe 2 : Liste des postes pluviométriques choisis.....	36
Annexe 3 : Les différents régimes hydrologiques.....	39
Annexe 4 : Résultats sur les neuf sous-bassins de la Garonne.....	41
Annexe 5 : Chroniques des débits simulés sur les neuf sous-bassins	50

Liste des figures

Figure 1 : Le bassin de la Garonne.....	10
Figure 2 : Répartitions de l'eau prélevée et consommée (source: http://data.eau-adour-garonne.fr).....	12
Figure 3 : Origines de l'eau prélevée sur le bassin (source: http://data.eau-adour-garonne.fr)	12
Figure 4 : Irrigation par commune sur le bassin de la Garonne à Lamagistère (source: Agosta 2007).....	13
Figure 5 : Principales retenues pour l'hydroélectricité (source: Agosta 2007).....	13
Figure 6 : Principales retenues pour le soutien d'été (source : Agosta 2007).....	14
Figure 7 : Découpage en 9 sous-bassins.....	15
Figure 8 : Relief du bassin de la Garonne à Lamagistère	15
Figure 9 : Répartitions des postes pluviométriques choisis.....	16
Figure 10 : Pluie et débits moyens sur le bassin du Tarn à Millau (code Hydro: O3401010).....	17
Figure 11 : Température et évapotranspiration moyens sur le bassin du Tarn à Millau (code Hydro: O3401010).....	17
Figure 12 : Pluie et débits mensuels moyens sur le bassin de l'Ariège à Foix (code Hydro: O1252510)	18
Figure 13 : Pluie et débits mensuels moyens sur le bassin de la Garonne à Portet (code Hydro: O1900010)	18
Figure 14 : Pluie et débits mensuels moyens sur le bassin de la Garonne à Lamagistère (code Hydro: O6140010)	19
Figure 15 : Représentation du modèle GR4J (E: ETP; P: Pluie; Q: Débit).....	21
Figure 16 : Représentation du module neige (θ_i : paramètre).....	23
Figure 17 : Comparaison des critères de Nash obtenus en contrôle sur les neuf sous-bassins avec GR4J avec et sans module neige	29
Figure 18 : Comparaison des critères de Nash obtenus en contrôle sur les neuf sous-bassins avec GR4J et Topmodel	30
Figure 19: Pluie et débits mensuels moyens sur le bassin de l'Aveyron à Loubéjac (code Hydro: O5882510)....	39
Figure 20 : Pluie et débits mensuels moyens sur le bassin du Tarn à Villemur (code Hydro: O4931010)	39
Figure 21 : Pluie et débits mensuels moyens sur le bassin de l'Agout à Lavour (code Hydro: O4931010)	39
Figure 22 : Pluie et débits mensuels moyens sur le bassin de la Garonne à Lamagistère (code Hydro:O6140010)	40
Figure 23 : Pluie et débits mensuels moyens sur le bassin de la Garonne à Saint Gaudens (code Hydro: O0200040)	40
Figure 24 : Pluie et débits mensuels moyens sur le bassin du Salat à Roquefort (code Hydro: O0592510).....	40
Figure 25 : Pluie et débits mensuels moyens sur le bassin de la Garonne à Portet (code Hydro: O1900010)	40
Figure 26 : Débits mensuels interannuels calculés et observés en calage et contrôle sur le bassin de Millau	41
Figure 27 : Débits mensuels interannuels calculés et observés en calage et contrôle sur le bassin de Loubéjac	42
Figure 28 : Débits mensuels interannuels calculés et observés en calage et contrôle sur le bassin de Villemur	43
Figure 29 : Débits mensuels interannuels calculés et observés en calage et contrôle sur le bassin de Lamagistère	44
Figure 30 : Débits mensuels interannuels calculés et observés en calage et contrôle sur le bassin de Lavour	45
Figure 31 : Débits mensuels interannuels calculés et observés en calage et contrôle sur le bassin de St Gaudens	46
Figure 32 : Débits mensuels interannuels calculés et observés en calage et contrôle sur le bassin de Roquefort	47
Figure 33 : Débits mensuels interannuels calculés et observés en calage et contrôle sur le bassin de Foix.....	48
Figure 34 : Débits mensuels interannuels calculés et observés en calage et contrôle sur le bassin de Portet	49
Figure 35 : Chroniques des débits simulés et observés et de pluie sur le bassin du Tarn à Millau	50
Figure 36 : Chroniques des débits simulés et observés et de pluie sur le bassin de l'Aveyron à Loubéjac	50
Figure 37 : Chroniques des débits simulés et observés et de pluie sur le bassin du Tarn à Villemur	51
Figure 38 : Chroniques des débits simulés et observés et de pluie sur le bassin de la Garonne à Lamagistère	51
Figure 39 : Chroniques des débits simulés et observés et de pluie sur le bassin de l'Agout à Lavour	52
Figure 40 : Chroniques des débits simulés et observés et de pluie sur le bassin de la Garonne à St Gaudens	52
Figure 41 : Chroniques des débits simulés et observés et de pluie sur le bassin du Salat à Roquefort	53
Figure 42 : Chroniques des débits simulés et observés et de pluie sur le bassin de l'Ariège à Foix	53
Figure 43 : Chroniques des débits simulés et observés et de pluie sur le bassin de la Garonne à Portet.....	54

Liste des tableaux

Tableau 1 : Synthèse des caractéristiques des neuf bassins étudiés	20
Tableau 2 : Moyennes des critères de Nash et Bilan sur l'ensemble des bassins en calage.....	25
Tableau 3 : Moyennes des critères de Nash et Bilan sur l'ensemble des bassins en contrôle.....	26
Tableau 4 : Comparaison des résultats obtenus sous CEQUEAU et sous GR4J en calage/contrôle (<i>attention les périodes d'évaluation et les données utilisées ne sont pas strictement les mêmes</i>).....	27
Tableau 5 : Moyennes des critères de Nash et Bilan sur l'ensemble des bassins en contrôle sans le module neige	29
Tableau 6: Moyennes des critères de Nash et Bilan sur les neuf sous-bassins obtenus en contrôle avec Topmodel	30
Tableau 7 : Moyennes des critères de Nash et Bilan sur l'ensemble des bassins obtenus en contrôle avec Topmodel et prise en compte des données douteuses	31
Tableau 8 : Critères de Nash et bilan sur le bassin de Millau	41
Tableau 9 : Critères de Nash et bilan sur le bassin de Loubéjac	42
Tableau 10 : Critères de Nash et bilan sur le bassin de Villemur.....	43
Tableau 11 : Critères de Nash et bilan sur le bassin de Lamagistère	44
Tableau 12 : Critères de Nash et bilan sur le bassin de Lavour.....	45
Tableau 13 : Critères de Nash et bilan sur le bassin de Saint Gaudens	46
Tableau 14 : Critères de Nash et bilan sur le bassin de Roquefort	47
Tableau 15 : Critères de Nash et bilan sur le bassin de Foix.....	48
Tableau 16 : Critères de Nash et bilan sur le bassin de Portet.....	49

Introduction

Ce stage s'inscrit dans le cadre d'un projet du programme *Risque Décision Territoire* (2006) du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, alliant l'Agence de l'Eau Adour-Garonne, le Laboratoire Nationale en Hydraulique et Environnement d'EDF R&D (LNHE) et le Cemagref (groupements d'Antony et Lyon). Le Cemagref de Lyon en est le coordinateur. Ce stage a été effectué sur le site du Cemagref d'Antony, dans l'unité de recherche HBAN (Hydrosystèmes et Bioprocédés ANtony), du 4 juin 2007 au 3 août 2007, sous la responsabilité de Charles Perrin.

Le Cemagref est un organisme public de recherche finalisée sur la gestion des eaux et des territoires. Ses recherches sont orientées vers la production de connaissances nouvelles et d'innovations techniques utilisées par les gestionnaires, les décideurs et les entreprises pour répondre à des questions concrètes de société dans les domaines de la gestion des ressources, de l'aménagement et de l'utilisation de l'espace. Les travaux de recherche de l'unité HBAN portent sur le fonctionnement hydrologique des bassins versants agricoles aménagés (relations bassins versants-débits, impact des aménagements hydro-agricoles et des pratiques agricoles), sur les écosystèmes fluviaux naturels ou anthropisés et en particulier, sur les peuplements piscicoles, sur les processus de dégradation et de transformation des eaux usées en stations d'épuration ou des eaux naturelles, et sur le fonctionnement des installations de stockage de déchets du point de vue des transferts d'eau et de lixiviats, de l'influence de ces transferts sur l'évolution des déchets et de la gestion durable du risque environnemental associé.

L'état des ressources en eau sur le bassin de l'Adour Garonne est aujourd'hui inquiétant. Les besoins croissants, accrus lors des périodes de fortes sécheresses sur le bassin, sont aujourd'hui la cause de multiples conflits d'intérêts. Après les étiages sévères de 2003 et 2005, le Cemagref, EDF et l'Agence Adour-Garonne ont proposé de réaliser un diagnostic précis de la situation actuelle du bassin et de se projeter dans les décennies à venir dans un contexte de changements climatiques.

Pour cela, il a donc été décidé de procéder à l'examen de l'état actuel du système multi-usage (irrigation, hydroélectricité...) et de sa pérennité, en envisageant des modifications climatiques, ceci dans le but de prévoir à quelle échéance la configuration en place ne pourra plus répondre aux besoins.

C'est dans ce cadre qu'a été réalisé ce stage. La modélisation pluie-débit aura un intérêt capital dans cet examen et sera la première étape de ce projet. Elle a pour objet la caractérisation du bassin par une méthode numérique qui soit capable de fournir des données de débit en un point d'un réseau hydrographique à partir d'autres données telles que la pluie observée sur le bassin versant relatif au point considéré. Pour des bassins versants fortement influencés par la fonte des neiges ou des glaciers, les températures entrent aussi en compte dans les entrées du modèle. C'est ici le cas du bassin de la Garonne bordé au sud par les Pyrénées. Nous avons utilisé le modèle GR4J, mais d'autres modèles ont déjà été mis en place par les autres partenaires du projet, en particulier le modèle CEQUEAU utilisé par EDF (Agosta, 2007). Un projet, plus ancien, mené par l'Agence de l'Eau Adour-Garonne et Météo France s'est déjà intéressé à l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau du bassin Adour Garonne (Caballero et Noilhan, 2003; Caballero et al., 2007). Durant ce stage, ces précédentes recherches ont servi de bases solides auxquelles nous nous sommes souvent référées.

1 Le bassin versant de La Garonne à Lamagistère

1.1 Introduction

La Garonne est le principal fleuve du sud ouest de la France. Elle prend sa source dans les Pyrénées espagnoles dans le Val d'Aran et se jette dans l'océan Atlantique après un parcours de 525 km à travers quatre départements français et 217 communes riveraines dont les agglomérations principales: Saint Gaudens, Toulouse, Agen, Marmande et Bordeaux (cf. Figure 1). Elle occupe un bassin d'une surface totale de 55 000 km².

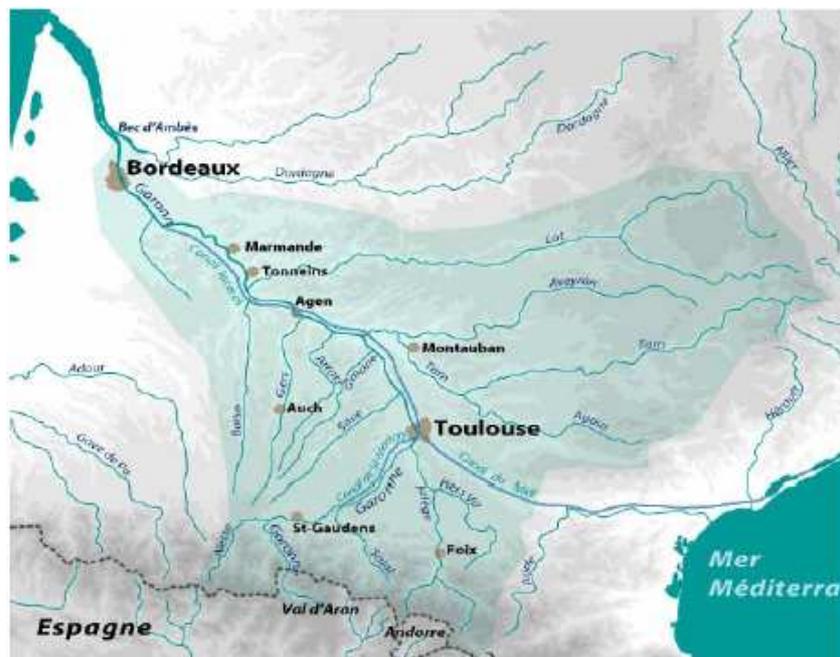


Figure 1: Le bassin de la Garonne

Le bassin auquel nous nous limiterons pour notre étude est le bassin de la Garonne à la station hydrométrique de Lamagistère qui s'étale sur environ 32 350 km². Il est composé de sous bassins (cf. Figure 7) assez différents par leurs topographies, leurs géomorphologies mais aussi par la dynamique des crues qui les touchent. La barrière pyrénéenne occupe l'ensemble du bassin amont de la Garonne. Culminant à plus de 3000 m, ceci lui confère des précipitations abondantes.

La Garonne quitte les montagnes en aval de Saint Gaudens, et reçoit l'Ariège sur sa rive droite. Elle se dirige ensuite vers le nord-ouest pour recevoir les eaux du Tarn dont les deux principaux affluents sont l'Aveyron en rive droite et l'Agout en rive gauche. Cette partie est la branche de la Garonne issue du Massif Central.

En résumé, la Garonne est alimentée par deux châteaux d'eau, les Pyrénées et le Massif central. Ceci implique donc que les variations de débit (étiages comme crues) sont la résultante de ces apports d'eau, décalés selon la saison.

1.2 Présentation générale

1.2.1 Climatologie: précipitations et évapotranspiration

Le bassin de la Garonne (Figure 1) subit deux influences climatiques. D'une part l'influence de l'Atlantique et d'autre part l'influence de la Méditerranée.

Le climat océanique a tendance à favoriser les fortes pluies sur les massifs, de mai à juin. Ce sont celles qui provoquent les plus fortes crues. L'océan influence aussi la barrière pyrénéenne et entraîne des hausses de débit de décembre à mars.

Le climat méditerranéen influence le bassin par le Massif central par des pluies cévenoles qui provoquent des pics de crue en octobre.

Deux principaux phénomènes sont observables sur le bassin en ce qui concerne l'évapotranspiration:

- Des valeurs de plus en plus fortes à l'approche du pourtour méditerranéen, liées aux températures et aux durées d'insolation élevées.
- Des valeurs plus faibles au pied des Pyrénées, liées à des durées d'insolation plus courtes dues à l'effet de blocage sur le relief par flux de nord-ouest principalement l'été.

Ces aspects seront détaillés davantage dans la partie 1.5.

1.2.2 Ressources en eaux

L'alimentation des cours d'eau est diverse, il peut s'agir:

- des précipitations directes
- des ruissellements de surface
- et des apports souterrains

Il est important de bien connaître ces derniers car dans le cas du bassin de la Garonne ils représentent près de 60% de l'écoulement annuel du bassin.

Le bassin de la Garonne est composé de nombreuses couches géologiques dont certaines, poreuses, fissurées ou karstifiées, contiennent de l'eau en quantité. Cette eau est généralement en circulation dans le sous-sol.

D'autres couches plus ou moins imperméables (notamment argiles, marnes...) les séparent et les isolent localement, créant ainsi des réservoirs que l'on qualifie de systèmes aquifères. Ces aquifères sont alimentés par les pluies qui s'infiltrent puis circulent par gravité dans le sous-sol.

Le bassin de l'Adour-Garonne, riche en eaux souterraines, possède de grands systèmes aquifères, à nappes essentiellement libres ou à nappes captives:

- des nappes profondes s'étendant sous une grande partie du Bassin, séparées de la surface par une ou plusieurs couches imperméables
- des nappes libres dans les terrains constituant la zone d'alimentation des nappes profondes sur la bordure du bassin, au nord et à l'est essentiellement ; une partie de ces nappes est située dans des terrains calcaires karstiques (Causses du Quercy, karsts de Charente...).

(source: <http://data.eau-adour-garonne.fr>)

1.2.3 Usages: prélèvements et consommations

Tout d'abord il faut bien faire la différence entre l'eau prélevée et l'eau consommée. En effet l'eau prélevée revient plus ou moins au milieu naturel, tandis que l'eau consommée est la quantité réellement utilisée et qui ne retourne donc pas dans le milieu naturel.

Les prélèvements sur le bassin sont de quatre types: l'irrigation, l'alimentation en eau potable (AEP), l'industrie et la production d'énergie (hydroélectricité). Les figures suivantes donnent la répartition de l'eau consommée et de l'eau prélevée (Figure 2).

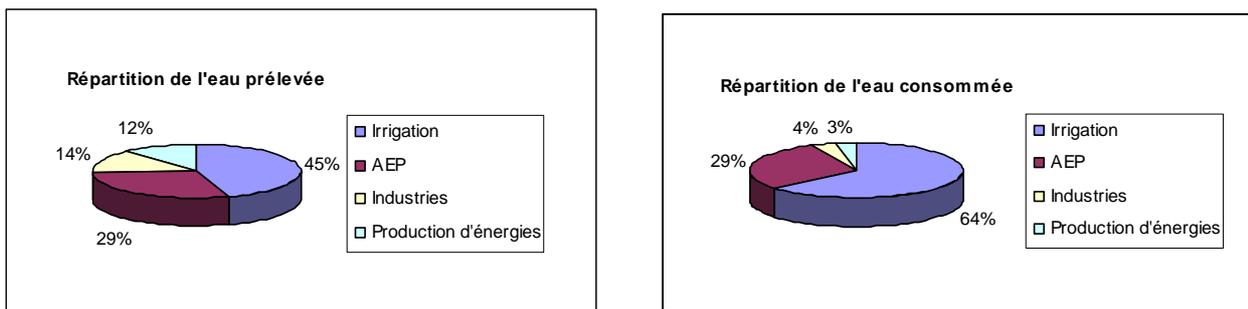


Figure 2 : Répartitions de l'eau prélevée et consommée (source: <http://data.eau-adour-garonne.fr>)

Ainsi on estime (Agence de l'eau Adour-Garonne) que l'eau prélevée pour l'irrigation retourne à 30% dans le milieu naturel. Pour les usages domestiques et industriels, respectivement 65% et 93% de l'eau prélevée est rejetée dans le milieu naturel. Quant à l'hydroélectricité, elle rejette la quasi-totalité de l'eau qu'elle a prélevée (99%).

La répartition de l'eau prélevée sur l'année est assez équilibrée. Nous pouvons voir que l'irrigation tient une place importante dans l'eau consommée. En période d'étiage c'est-à-dire entre le 1^{er} Juillet et le 31 Octobre, l'irrigation représente jusqu'à 80% des consommations.

L'origine de l'eau prélevée est de trois types (Figure 3):

- en eau de surface (cours d'eau, lacs et retenues artificielles, sources),
- en nappes phréatiques (nappes à renouvellement rapide, non séparées de la surface du sol par une couche imperméable),
- en nappes captives (nappes à renouvellement long, séparées de la surface du sol par une couche imperméable).

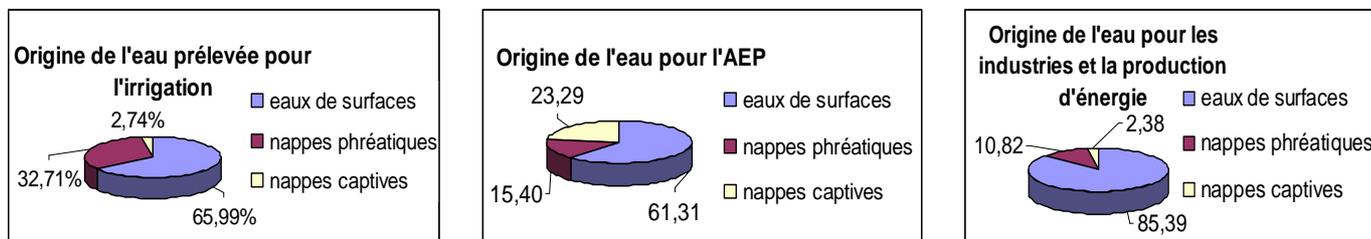


Figure 3 : Origines de l'eau prélevée sur le bassin (source: <http://data.eau-adour-garonne.fr>)

Les prélèvements se font notamment sur les cours d'eau et les canaux. Les besoins pour l'irrigation étant très importants, des barrages collinaires ont dû être construits pour répondre à ce besoin. La Figure 4 présente la répartition de l'eau prélevée par commune en m³/km² pour l'irrigation. On constate que les zones irriguées se situent principalement en zone de plaines, sur la zone intermédiaire entre les stations de Portet et Lamagistère sur la Garonne. Les prélèvements pour l'irrigation se font à 66 % sur les eaux de surface, à 32.7 % dans les nappes phréatiques et à 2.7 % dans les nappes captives.

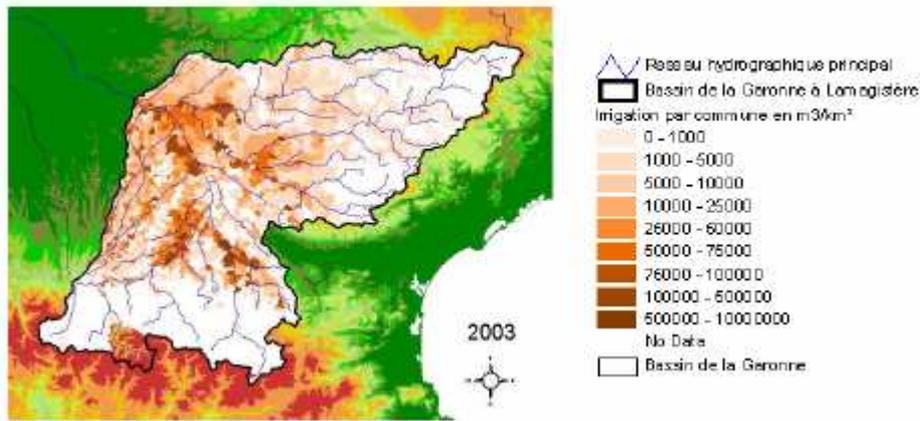


Figure 4 : Irrigation par commune sur le bassin de la Garonne à Lamagistère (source: Agosta 2007)

L'alimentation en eau potable est issue aux trois quarts de la Garonne. Les prélèvements industriels sont assez importants, mais leur consommation est très modérée. Il en est de même pour la production d'énergie, les centrales hydroélectriques rejetant la quasi-totalité de leurs prélèvements.

1.2.4 Ouvrages

Le bassin de la Garonne se caractérise par une forte densité de barrages réservoirs en raison d'une topographie, d'une hydrographie et d'un régime pluviométrique favorables conjugués avec une demande forte pour des usages qui ont évolué au fil du temps et dont les principaux sont l'hydroélectricité, l'irrigation, la production d'eau potable et soutien des étiages.

Nous ne présenterons par la suite que les ouvrages sur le bassin de la Garonne à Lamagistère. De plus nous nous limiterons aux retenues qui représentent la plus grosse partie des stockages d'eau.



Figure 5 : Principales retenues pour l'hydroélectricité (source: Agosta 2007)

Le bassin de la Garonne à Lamagistère couvrant une partie des Pyrénées et du Massif central, zones de relief à fort potentiel hydroélectrique, est caractérisé par de nombreuses retenues de grande capacité. Les plus grosses d'entre elles sont représentées sur la Figure 5; ce sont celles dont les capacités de stockage sont supérieures à 15 Mm³. Ces retenues sont principalement présentes sur les parties amont du bassin dans le sud et l'est, sur le Tarn, l'Aveyron, l'Agout, l'Ariège et la Garonne.

1.3 Gestion des ressources et des étiages

Suite à la loi sur l'eau du 3 janvier 1992, l'Agence Adour-Garonne a adopté les Schémas Directeurs d'Aménagements et de Gestion de Eaux (SDAGE).

Ces schémas, inspirés par les documents d'urbanisme existants (schéma directeurs d'aménagement et d'urbanisme, plan d'occupation des sols), établissent une planification cohérente et territorialisée (au niveau d'un bassin) de la ressource en eau et des milieux aquatiques. (*Source* : <http://data.eau-adour-garonne.fr>)

Les Plans de Gestion des Etiages (PGE) sont un outil des SDAGE. Ils visent à fixer des seuils qui maintiennent un écoulement suffisant afin de garantir le bon état écologique de la rivière. Les solutions retenues afin de satisfaire à cette condition sont par ordre de priorité décroissante :

- la maîtrise et la gestion des prélèvements,
- les économies d'eau,
- l'optimisation des ouvrages existants, avec notamment la recherche d'accord de déstockage d'eau à partir des réserves EDF,
- la constitution de nouvelles réserves.

La Figure 6 représente les principaux réservoirs qui maintiennent un débit minimal dans les différents cours d'eau du bassin de la Garonne à Lamagistère. Les données quantitatives sur les déstockages correspondent au volume disponible dans les réservoirs d'hydroélectricité pour le soutien d'étiage. Par ailleurs les valeurs à la droite des noms correspondent au volume du réservoir.



Figure 6 : Principales retenues pour le soutien d'étiage (*source* : Agosta 2007)

Comme on le voit sur la figure, le soutien d'étiage est assez important sur le bassin. Cela signifie que le bassin est très sollicité en période d'étiage. En effet, durant la période estivale, les prélèvements dans les eaux de surface peuvent par endroit être trop importants par rapport aux ressources disponibles. Ainsi, la mise en place de réservoirs a été l'une des solutions retenues dans les PGE.

1.4 Découpage en sous bassins versants

Dans le cadre du projet le bassin a été découpé en neuf sous-bassins afin de modéliser le fonctionnement hydrologique de chaque sous bassin de façon indépendante (Figure 7). Ces sous-bassins correspondent à des enjeux ou conditions particulières intéressantes pour le projet.

- Le Tarn à Millau, 2170 km²
- L'Aveyron à Loubéjac, 5170 km²
- Le Tarn à Villemur, 9100 km²
- L'Agout à Lavour, 2300 km²
- L'Ariège à Foix, 1340 km²
- Le Salat à Roquefort, 1570 km²
- La Garonne à St Gaudens, 2230 km²
- La Garonne à Portet, 9980 km²
- La Garonne à Lamagistère, 32350 km²

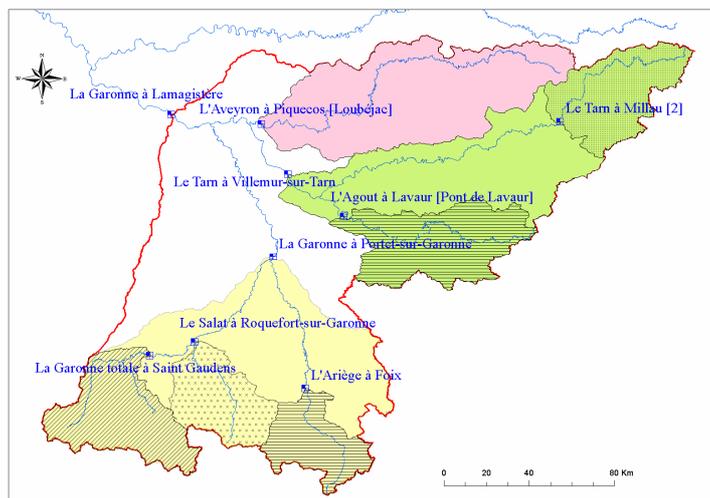


Figure 7 : Découpage en 9 sous-bassins

Il existe des bassins de petite taille comme La Garonne à Saint Gaudens, le Salat à Roquefort et l'Ariège à Foix qui couvrent la partie Pyrénéenne.

Le bassin du Tarn à Millau couvre quant à lui la partie du Massif Central. Les bassins intermédiaires du Tarn à Villemur et de l'Agout à Lavour et l'Aveyron à Loubéjac sont situés sur une zone de transition entre montagne et plaine.

Enfin les bassins de La Garonne à Portet et à Lamagistère sont eux situés en plaine (cf. Figure 8).



Figure 8 : Relief du bassin de la Garonne à Lamagistère

1.5 Spécificités hydrologiques du bassin

Sur l'ensemble du bassin considéré, nous avons choisi un réseau de postes pluviométriques (Figure 9) de manière à obtenir une densité à peu près égale sur chaque bassin, en gardant toutefois en mémoire qu'il était intéressant d'avoir des postes pluviométriques sur les parties amont du bassin, c'est-à-dire en altitude. La liste des postes retenus est donnée en annexe.

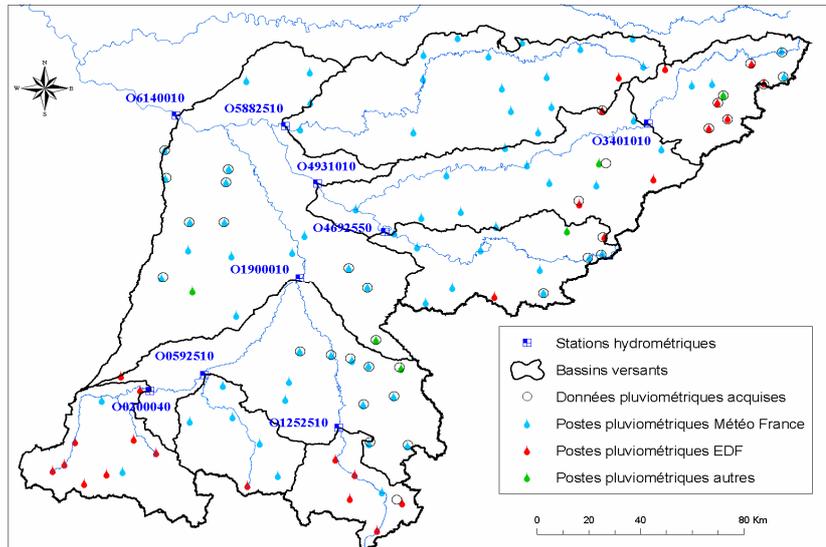


Figure 9 : Répartitions des postes pluviométriques choisis

Les données sur ces postes pluviométriques n'étant pas encore disponibles au moment du stage nous avons exploité les données Safran sur la période du 1^{er} janvier 1995 au 31 décembre 2005.

D'autre part, grâce à la banque HYDRO, nous avons recueilli les débits observés sur les sous bassins définis précédemment.

La première partie de ce stage a donc consisté à réaliser une analyse de ces données et à caractériser le fonctionnement hydrologique du bassin.

Les régimes des cours d'eau du bassin de la Garonne résultent de plusieurs composantes:

- l'une, principale, d'origine naturelle liée à l'atmosphère et à l'influence des pluies et de la température,
- l'autre, d'origine anthropique, liée aux aménagements, aux divers usages de l'eau (prélèvements et rejets) et aux variations de volumes d'eau retenus dans les barrages.

Malgré cette variabilité qui impose aux cours d'eau des écoulements très nuancés, ce bassin est caractérisé par deux principaux régimes hydrologiques: le régime nival et le régime pluvial océanique. Dans ce qui suit, nous illustrons ces deux types de régime, en nous basant sur l'analyse des chroniques dont nous disposons.

1.5.1 Les bassins à régime pluvial océanique

Les bassins de l'est c'est à dire Millau, Loubéjac, Villemur et Lavour sont caractérisés par un régime pluvial océanique. La Figure 10 représente les pluies et les débits moyens ainsi que les quantiles à 10% et à 90% pour le bassin de Millau.

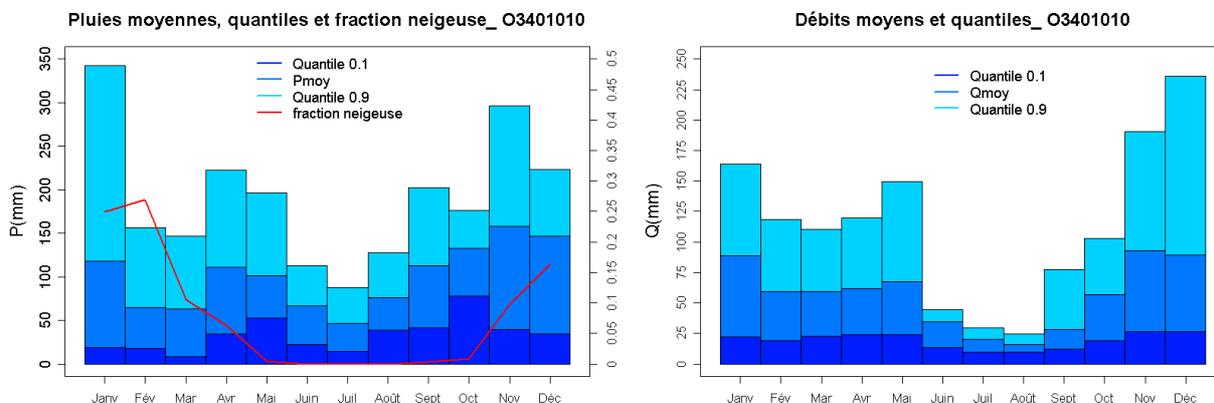


Figure 10 : Pluie et débits mensuels moyens sur le bassin du Tarn à Millau (code Hydro: O3401010)

Sur la figure de droite la saison des hautes eaux a lieu pendant l'hiver, tandis que les basses eaux ont lieu pendant l'été. Les débits mensuels moyens les plus élevés sont de l'ordre de 90 à 100 mm, et les plus faibles de 20 mm. Les pluies mensuelles moyennes quant à elles sont de l'ordre de 150 mm pour les plus élevées et de 40 mm pour les plus faibles. Cette alternance entre les hautes eaux hivernales et les basses eaux estivales ne reproduit pas la courbe des pluies mais bien celle des températures et de l'évapotranspiration donnée ci-dessous (Figure 11). Par ailleurs on remarque une légère influence de la neige qui provoque des hausses de débits durant les mois d'avril-mai.

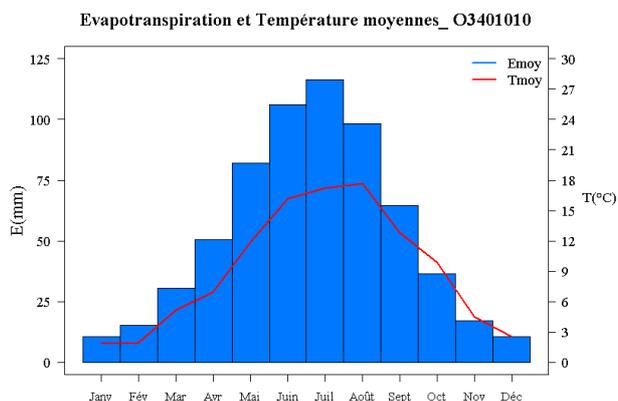


Figure 11 : Température et évapotranspiration moyennes sur le bassin du Tarn à Millau (code Hydro: O3401010)

De la même manière, pour les sous bassins en aval de Millau (Loubéjac, Villemur et Lavour), on peut aussi parler de régime pluvial océanique. Pour l'ensemble de ces bassins les débits pendant la période estivale sont très faibles. Pourtant, la quantité de pluie n'est pas nettement inférieure, on peut donc penser que l'évapotranspiration a une influence non négligeable sur ces bassins. Nous présentons les résultats pour l'ensemble de ces bassins en annexe.

1.5.2 Les bassins à régime pluvio-nival

Les bassins plus au sud sont caractérisés par ce type de régime. Ce sont les bassins de Foix, Roquefort et Saint Gaudens. La Figure 12 donne un exemple des pluies et débits mensuels moyens de ce type de régime.

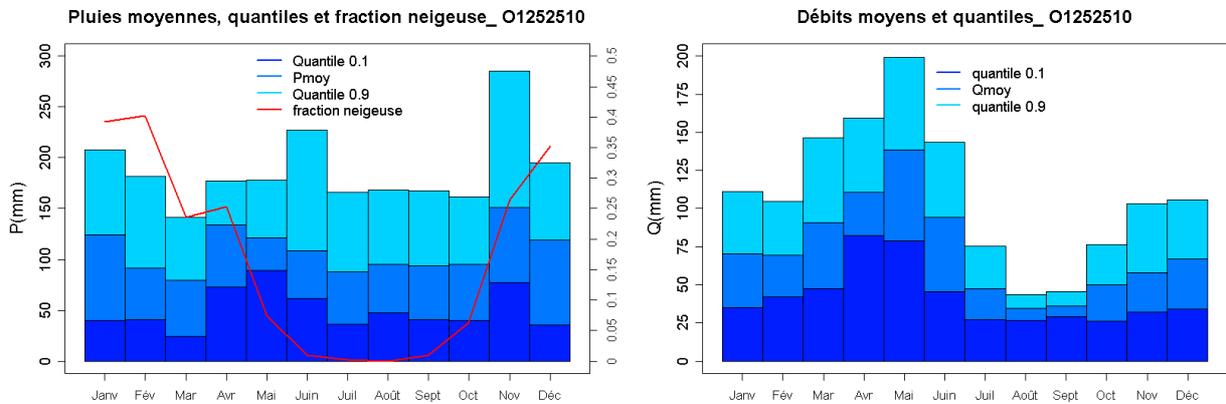


Figure 12 : Pluie et débits mensuels moyens sur le bassin de l'Ariège à Foix (code Hydro: O1252510)

Le régime pluvio-nival est caractérisé par des hautes eaux durant la saison chaude. Le maximum est assez précoce, il a lieu aux alentours des mois d'avril-mai, au début des premières chaleurs. Ceci est dû à la fonte des neiges, qui se sont accumulées pendant l'hiver. En effet, les bassins du sud sont fortement influencés par des zones montagneuses étendues.

Les débits moyens les plus élevés sont de l'ordre de 130 mm, et les plus faibles de 30 à 40 mm. Globalement, les débits sur ces bassins sont plus élevés que ceux caractérisés par un régime océanique. Les pluies moyennes, quant à elles, restent dans le même ordre de grandeur, c'est-à-dire aux alentours de 150 mm pour les plus élevées et de 60 à 70 mm pour les plus faibles.

Le bassin de Portet en aval de ces sous bassins est lui aussi caractérisé par un régime nival mais moins marqué. En effet plus on descend en altitude plus l'importance des pluies devient grande et plus on se rapproche du régime océanique.

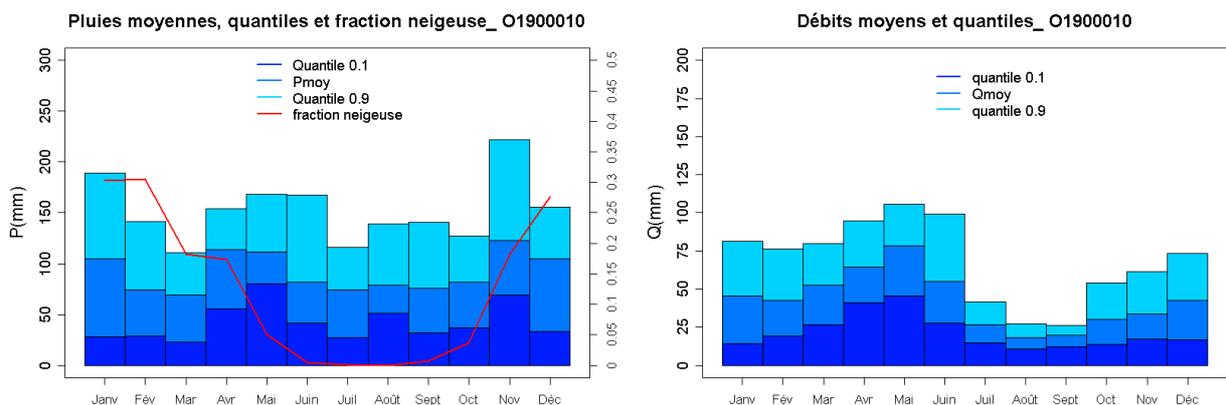


Figure 13 : Pluie et débits mensuels moyens sur le bassin de la Garonne à Portet (code Hydro: O1900010)

La Figure 13 montre effectivement que la prédominance des hautes eaux pendant le printemps est moins marquée que sur le bassin de l'Ariège à Foix. On retrouve toujours la configuration de hautes eaux pendant le printemps, mais on se rapproche plus des ordres de grandeurs des pluies et débits moyens des bassins à régime océanique.

1.5.3 Le bassin de la Garonne à Lamagistère

A l'exutoire du bassin de la Garonne, on retrouve un régime océanique avec influences nivales (Figure 14).

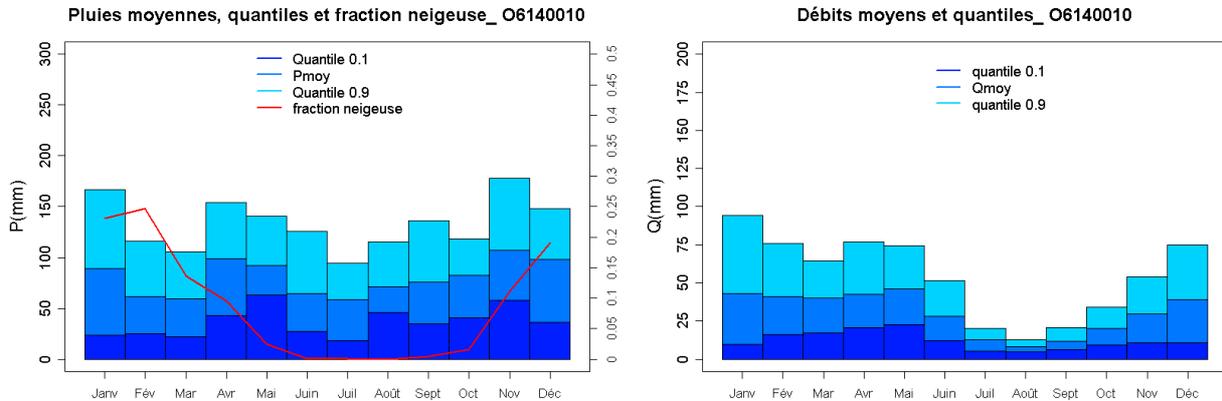


Figure 14 : Pluie et débits mensuels moyens sur le bassin de la Garonne à Lamagistère (code Hydro: O6140010)

Les hautes eaux ont bien lieu pendant l'hiver, et les basses eaux en été, mais on remarque des débits assez forts durant les mois d'avril et mai qui sont probablement dus à l'influence des bassins amont à régime nival.

L'hydrologie de la Garonne résulte donc de deux influences naturelles:

- la Garonne influencée par les Pyrénées comme son affluent en rive droite l'Ariège, qu'elle recueille à Portet. Le phénomène des basses eaux de fin d'hiver et d'été est caractéristique de ces cours d'eau à régime pluvionival. Les hautes eaux se situent au printemps, jusqu'à mai, et résultent de la fonte des neiges,
- l'influence du Massif Central est apportée par le Tarn et l'Aveyron, cours d'eau à régime pluvial océanique. La Garonne y sera donc plutôt sensible en aval de la confluence à Lamagistère. Cette influence se caractérise par des hautes eaux (de pluies) d'hiver, et un étiage en août. Le Tarn draine un grand bassin et apporte beaucoup d'eau à la Garonne, ce qui lui donne une influence assez significative sur le comportement de la Garonne, que ce soit en crue ou en étiage.

La période critique des bas débits pour la Garonne se situe donc entre la mi-juillet et la fin octobre.

1.6 Synthèse: caractéristiques des sous-bassins versants

- Le bassin du Tarn à Millau couvrant une partie du Massif central est caractérisé par un régime océanique. Il subit l'influence de la Méditerranée et sa pluviométrie est caractérisée par des pluies cévenoles qui provoquent des pics de crue au mois d'Octobre. Ce bassin est par ailleurs très peu influencé, en effet les ouvrages sont quasi inexistant.
- Les bassins de l'Aveyron à Loubéjac, du Tarn à Villemur et de l'Agout à Lavaur sont situés sur une zone de transition entre montagne et plaine. Ils sont aussi caractérisés par un régime océanique mais subissent une influence anthropique. En effet les retenues hydroélectriques sur le Tarn et l'Aveyron représentent un volume supérieur à 230 Mm^3 , et sur l'Agout supérieur à près de 124 Mm^3 .

- Les bassins au sud, de la Garonne à Saint Gaudens, du Salat à Roquefort et l'Ariège à Foix couvrent une partie des Pyrénées. Ils sont caractérisés par un régime nival très marqué, dû à la fonte des neiges au printemps. Ils subissent une influence océanique provoquant de fortes pluies d'avril à juin. Les bassins de Foix et de Saint Gaudens sont très marqués par une influence anthropique, avec de nombreuses retenues hydroélectriques avec pour l'Ariège près de 200 Mm³ et sur la Garonne près de 42 Mm³.
- La zone intermédiaire située entre les stations de Portet et de Lamagistère sur la Garonne est elle située en plaine. Elle est caractérisée par de grandes surfaces irriguées et des prélèvements importants pour l'alimentation en eau potable.

Le Tableau 1 présente une synthèse des caractéristiques de ces neuf sous-bassins.

Code	Bassins	Surfa- ce (km ²)	Pmoy (mm/an)	ETP moy (mm/an)	Qmoy (mm/an)	Qmoy/P moy	Régime	Influences humaines
O3401010	Le Tarn à Millau	2170	1100	638	675	0.61	Pluvial océanique	Quasi naturel
O5882510	L'Aveyron à Loubéjac	5170	924	737	257	0.27	Pluvial océanique	Réservoirs hydroélectriques + soutien d'étiage
O4931010	Le Tarn à Villemur	9100	1038	718	457	0.44	Pluvial océanique	Réservoirs hydroélectriques + soutien d'étiage
O4692550	L'Agout à Lavaur	2300	1095	729	623	0.57	Pluvial océanique	Réservoirs hydroélectriques + soutien d'étiage
O1252510	L'Ariège à Foix	1340	1302	567	867	0.66	Pluvio- nival	Réservoirs hydroélectriques + soutien d'étiage
O0592510	Le Salat à Roquefort	1570	1272	668	783	0.61	Pluvio- nival	Quasi naturel
O0200040	La Garonne à Saint Gaudens	2230	1336	558	721	0.54	Pluvio- nival	Réservoirs hydroélectriques
O1900010	La Garonne à Portet	9980	1094	677	509	0.46	Pluvio- nival	Prélèvements pour l'irrigation et l'eau potable
O6140010	La Garonne à Lamagistère	32350	960	729	363	0.38	Pluvial océanique	Prélèvements pour l'irrigation et l'eau potable

Tableau 1 : Synthèse des caractéristiques des neuf bassins étudiés

2.1.1 La neutralisation

Dans un premier temps, le modèle opère la neutralisation de la pluie P par une évapotranspiration potentielle E . Ceci permet de traduire le phénomène de reprise directe par l'atmosphère de l'eau de pluie tombée sur le sol ou sur la végétation. Il produit, en cas de non consommation totale de la pluie, une pluie nette qui alimentera les autres parties du modèle.

La neutralisation est assimilable à une fonction d'interception avec un réservoir de capacité nulle:

- si $P \geq E$, alors $P_n = P - E$ et $E_n = 0$
- si $P < E$, alors $P_n = 0$ et $E_n = E - P_n$

où P_n et E_n sont respectivement la pluie et l'évapotranspiration nettes.

2.1.2 La fonction de rendement

Les phénomènes qui ont engendré l'introduction de cette fonction sont directement liés au fait que les volumes d'eau écoulés correspondent à une fraction de la pluie tombée. Ainsi cette fonction a pour but de répartir la part de pluie qui alimentera le débit, celle qui sera évaporée ou perdue vers l'extérieur du bassin, et celle qui sera stockée.

Une partie de la pluie nette P_n alimente le réservoir de production, c'est la pluie P_s . Par ailleurs une quantité d'évapotranspiration E_s est retirée du réservoir, à un taux dépendant de la disponibilité en eau.

La part de pluie qui alimentera le débit est $P_n - P_s$, à laquelle on ajoute une percolation $Perc$ issue du réservoir, dont l'action se fait essentiellement sentir en été.

2.1.3 La fonction de routage

Les variations de débits sont plus lissées que les variations de pluie, et de plus interviennent avec un certain retard. L'introduction de cette fonction est issue de cette constatation. Ainsi la fonction de routage permet de réaliser une répartition temporelle des quantités d'eau.

Cette répartition s'effectue grâce aux hydrogrammes unitaires et aux réservoirs de routage. Ceux-ci permettent de reconstituer la réponse correspondant à une séquence de pluie. Ils se comportent comme une clé de répartition. Pour une pluie donnée à un pas de temps donné, l'hydrogramme donne le débit engendré par cette pluie aux différents pas de temps successifs. Ainsi il reconstitue en sortie la réponse en débit à toute séquence de pluie. La sortie Q à un pas de temps i est alors la somme des pluies jusqu'au pas de temps i pondérées par les ordonnées de l'hydrogramme (c'est en quelque sorte une convolution des impulsions de pluie et de la clé de répartition).

2.1.4 La fonction d'échange

Une dernière fonction est introduite, pour traduire les phénomènes d'apport ou de perte vers des nappes profondes ou l'extérieur topographique du bassin

2.1.5 Module neige

Dans le cadre de cette étude, un module neige a été utilisé en tête de modèle pour pouvoir tenir compte des fontes de neige, en particulier sur les bassins pyrénéens. Ce module est inspiré du modèle hydrologique suédois HBV (Lindström et al., 1997). Ses particularités sont de retenir le paquet neigeux, donc l'eau de fonte, dans un réservoir d'accumulation de la neige et ainsi induire des retards supplémentaires à l'écoulement, et de prendre en compte un phénomène de regel.

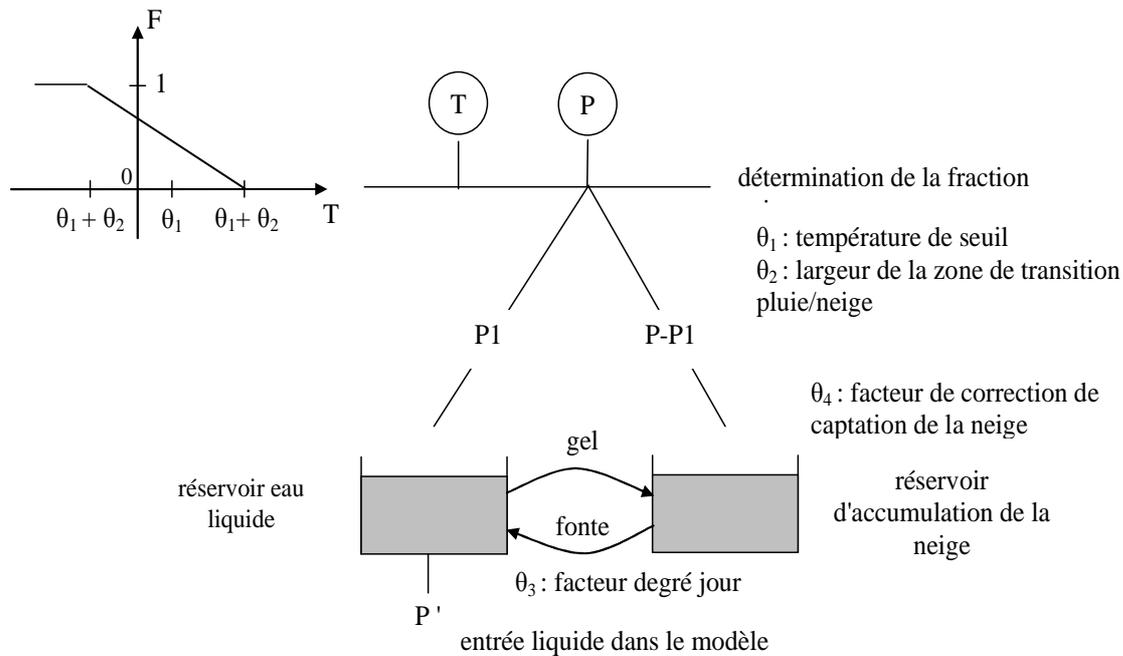


Figure 16 : Représentation du module neige (θ_i : paramètre)

La Figure 16 est une représentation de la structure du module. A l'entrée de celui-ci la fraction neigeuse de la pluie tombée est calculée en fonction de la température seuil θ_1 et de la largeur de la zone de transition pluie/neige θ_2 . Une partie $P1$ de la pluie P entre dans le réservoir d'eau liquide. La partie $P-P1$ entre dans le réservoir d'eau solide. Un échange entre le réservoir d'accumulation de la neige et le réservoir d'eau liquide permet de créer l'écoulement de la neige fondue ou inversement le regel de l'eau liquide. Enfin, l'eau liquide qui entre ensuite dans le modèle provient de la vidange P' issue du réservoir d'eau liquide.

Le module neige utilisé ici comporte quatre paramètres qui ont été optimisés en même temps que les autres paramètres du modèle pluie-débit.

2.2 Base de données

Les données nécessaires au fonctionnement de ce modèle sont les données de pluie et de températures de l'air au pas de temps journalier.

Les données de pluie et de températures utilisées pendant ce stage sont les données issues du modèle SAFRAN. En effet, faute de temps les données Météo France sur les postes pluviométriques sélectionnés (voir Figure 9) n'ont pu être récupérées avant la fin du stage. Les données SAFRAN donnant la pluie et la température moyenne journalière sur chaque sous-bassin versant ont donc été utilisées.

Les données de températures servent au calcul de la fraction neigeuse dans le module neige.

Enfin, les données de débits fournies par la banque Hydro ne sont pas des données d'entrée mais servent à optimiser les 4 paramètres du modèle. Ils sont utilisés par ailleurs à titre de comparaison entre des débits simulés et des débits calculés pour l'évaluation des performances. Le modèle exclu les débits mesurés de code validité égal à 5, I et S qui correspondent respectivement aux critères de validité 'douteux', 'Valeur inconnue faible' et 'Valeur inconnue forte'.

2.3 Calage et validation du modèle

Tout modèle nécessite dans un premier temps une phase de calage. Cette phase permet au modèle de connaître le fonctionnement hydrologique d'un bassin. Il se fait en général sur une période de plusieurs années. La méthode de calage est basée sur la modification des paramètres, fixés initialement de façon arbitraire, afin que les données de sortie soient le plus proches des données à modéliser. Dans notre cas, ces données sont les débits observés à l'exutoire de chaque sous-bassin versant.

Dans un second temps, on est amené à procéder à un examen critique de la validité du modèle. Pour cela, il est nécessaire de mettre en place une phase de validation. Cette dernière s'effectue dans une situation différente de la période de calage afin d'apprécier la qualité du modèle sur des données qui n'ont pas servi au calage.

Dans notre étude nous disposons de données sur la période 1995 à 2005. Nous avons donc séparé cette période en deux et réalisé des calages sur la période 1995-2000, que nous contrôlions sur la période 2000-2005 et inversement des calages sur la période 2000-2005, que nous contrôlions sur la période 1995-2000.

2.4 Evaluation du modèle

Les critères numériques servent à la fois de fonction objectif lors du calage mais aussi à évaluer les performances du modèle en contrôle.

Le critère retenu pour la phase de calage est le critère de Nash et Sutcliffe (1970) sur les racines carrées des débits. Ce critère découle du critère de Nash très souvent utilisé en hydrologie. Ce dernier est basé sur la somme des erreurs quadratiques et sa formulation est la suivante:

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

Où $Q_{obs,i}$, $Q_{calc,i}$ et $\overline{Q_{obs}}$ sont respectivement les débits observés et simulés au pas de temps i , et la moyenne des débits observés. n est le nombre total de pas de temps de la période d'étude. Dans notre étude, le pas de temps est journalier, et le critère est évalué sur une période de quatre ans. En effet, le modèle nécessite une période de mise en route étant donné que les conditions initiales ne sont pas connues au début de la simulation. Il est donc préférable d'attendre durant une période assez longue afin que les débits calculés soient assez fiables et calculer la fonction objectif. C'est pour cela que nous définissons ici une période de mise en route d'une année.

La fonction objectif utilisée pour le calage est donc la suivante:

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

Nous avons retenu ce critère car il est assez général pour à la fois permettre une bonne simulation des débits de crue et d'étiages. En effet, le critère de Nash sur les débits, a

tendance à donner une grande importance aux écarts entre les débits de crue simulés et observés.

Nous retenons par ailleurs un autre critère de Nash, calculé sur les logarithmes des débits. Sa formulation est la suivante:

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

Ce critère permet de donner plus d'importance aux étiages dans l'évaluation des performances du modèle. Il sera donc intéressant de s'y référer durant la phase de contrôle.

Enfin un dernier critère, qui est un critère de bilan a aussi été utilisé. Il correspond au rapport des volumes annuels simulés et calculés. Ici une formulation variant sur le même intervalle que le critère de Nash (]-∞;1[) a été utilisée:

$$Bilan = 1 - \left| \frac{\sum_{i=1}^n Q_{calc,i}}{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}} - \frac{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}}{\sum_{i=1}^n Q_{calc,i}} \right|$$

3 Synthèse des performances du modèle sur l'ensemble du bassin

Le modèle a été appliqué en mode global sur chacun des sous-bassins et sur le bassin global à Lamagistère. Le Tableau 2 et le Tableau 3 résument les performances du modèle obtenues en calage et en contrôle (critères de Nash et bilan) sur chaque sous-bassin, avec dans la première partie des tableaux les bassins où le modèle fonctionne bien et dans la seconde partie, les bassins où les résultats sont peu satisfaisants. Ils donnent également la moyenne de chaque critère pour l'ensemble des bassins. Le détail des résultats obtenus lors de la modélisation est donné dans les annexes 4 et 5. Nous présentons dans la suite une synthèse des performances du modèle obtenues sur l'ensemble du bassin.

GR4J	Nash (Q)	Nash (\sqrt{Q})	Nash (lnQ)	Bilan (rapport des volumes)
Le Tarn à Millau	0.908	0.910	0.873	0.990
L'Aveyron à Loubéjac	0.913	0.934	0.890	0.987
Le Tarn à Villemur	0.866	0.892	0.864	0.993
La Garonne à Lamagistère	0.888	0.904	0.887	0.987
L'Agout à Lavar	0.849	0.851	0.809	0.984
La Garonne à St Gaudens	0.635	0.662	0.674	0.971
Le Salat à Roquefort	0.727	0.772	0.793	0.963
L'Ariège à Foix	0.661	0.686	0.672	0.980
La Garonne à Portet	0.792	0.827	0.839	0.977
Moyenne	0.804	0.826	0.811	0.981

Tableau 2 : Moyennes des critères de Nash et Bilan sur l'ensemble des bassins en calage

GR4J	Nash (Q)	Nash (\sqrt{Q})	Nash (lnQ)	Bilan (rapport des volumes)
Le Tarn à Millau	0.900	0.899	0.855	0.955
L'Aveyron à Loubéjac	0.930	0.929	0.879	0.960
Le Tarn à Villemur	0.851	0.874	0.831	0.985
La Garonne à Lamagistère	0.870	0.865	0.815	0.905
L'Agout à Lavaur	0.715	0.741	0.675	0.921
La Garonne à St Gaudens	0.512	0.572	0.603	0.933
Le Salat à Roquefort	0.639	0.688	0.719	0.91
L'Ariège à Foix	0.318	0.372	0.396	0.795
La Garonne à Portet	0.692	0.736	0.76	0.882
Moyenne	0.714	0.742	0.726	0.916

Tableau 3 : Moyennes des critères de Nash et Bilan sur l'ensemble des bassins en contrôle

Les résultats que nous avons obtenus peuvent être classés en deux sous-ensembles:

- Les sous-bassins versants où le modèle GR4J fonctionne plutôt bien et donne des résultats tout à fait satisfaisants vis-à-vis des critères d'évaluation. Ce sont les bassins du Tarn et de l'Aveyron ainsi que le bassin de la Garonne à Lamagistère.
- Le deuxième sous-ensemble est constitué des sous-bassins où les résultats sont peu satisfaisants. Ce sont essentiellement les bassins du sud, le bassin intermédiaire de Portet mais aussi le bassin de l'Agout à Lavaur qui se situe sur la partie est du bassin.

3.1.1 Des résultats satisfaisants

Nous obtenons de bons résultats sur quatre sous-bassins: le Tarn à Millau et à Villemur, l'Aveyron à Loubéjac et la Garonne à Lamagistère. En effet, la moyenne de tous les critères de Nash de ces bassins se situe globalement au dessus de 0.85, en calage comme en contrôle. Par ailleurs le modèle fournit des volumes annuels très proches des volumes mesurés (cf. critères de bilan).

Le point marquant, et très intéressant, sur l'ensemble de ces bassins, est que le modèle semble très robuste. En effet, on ne remarque pas de dégradations très marquées du modèle en contrôle. Ceci se traduit dans le Tableau 3 par des critères d'évaluation de ces bassins tout à fait corrects.

On constate de plus que les réponses du modèle sont globalement assez bonnes sur l'ensemble de ces sous-bassins. Des écarts entre les débits simulés et observés existent sur les étiages comme sur les crues.

Pour essayer d'interpréter ces résultats, il faut bien se rappeler que l'ensemble de ces sous-bassins est très peu influencé. En effet d'une part l'influence anthropique ne se fait réellement sentir que sur les bassins du Tarn et de l'Aveyron (cf. Figure 5), et d'autre part ces bassins subissent une influence nivale que l'on a qualifiée dans la première partie de peu marquée. C'est pourquoi on peut penser que les données d'entrée du modèle GR4J, que sont la pluie et la température, peuvent suffire à représenter des débits à l'exutoire des bassins assez proches de la réalité, ou tout du moins assez proches des débits mesurés. Seuls les écarts observés sur les pics de crue et les étiages peuvent être interprétés par la non connaissance du modèle de

conditions telles que l'influence des retenues hydroélectriques, ou des prélèvements estivaux pour l'irrigation. Mais ceci reste des hypothèses car on peut aussi penser à l'éventualité qu'il existe des problèmes de validité des données d'entrée, dus par exemple à l'extrapolation de ces données sur des zones montagneuses du bassin.

Il a donc été intéressant de comparer nos résultats à ceux obtenus par l'équipe EDF, qui s'est attachée à réaliser un prétraitement de ses données d'entrée avant la modélisation. Les tests effectués sur le sous-bassin de Millau ont été réalisés sur des périodes différentes (1988-1995 et 1997-2004), mais on retrouve le fonctionnement global du bassin. En effet, ce bassin très peu influencé présentait des situations similaires sur nos différentes périodes de simulation. On présente dans le Tableau 4 une comparaison entre les moyennes des critères de Nash calculés sur les débits et les logarithmes des débits obtenus en contrôle avec CEQUEAU et GR4J.

	CEQUEAU		GR4J	
	calage	contrôle	calage	contrôle
Nash (Q)	0.91	0.92	0.91	0.90
Nash (Ln Q)	0.93	0.93	0.87	0.85

Tableau 4 : Comparaison des résultats obtenus sous CEQUEAU et sous GR4J en calage/contrôle (attention les périodes d'évaluation et les données utilisées ne sont pas strictement les mêmes)

Même si les résultats ne sont pas strictement comparables, on peut tout de même dire que les résultats obtenus avec le modèle CEQUEAU sont légèrement meilleurs en ce qui concerne les critères de Nash sur les débits en calage comme en contrôle. Ces améliorations ne sont pas significatives au point de penser que l'approche CEQUEAU serait plus intéressante ou que nos données d'entrées aient réellement des problèmes de validité sur certaines parties du bassin. On constate de plus nets écarts sur le critère de Nash calculé sur les logarithmes des débits, on peut donc penser que CEQUEAU modélise mieux les étiages. Ces différences peuvent avoir plusieurs origines: structure du modèle, données utilisées, fonction objectif utilisée pour le calage. Il serait donc intéressant de réaliser de nouveaux tests en mettant les modèles exactement dans les mêmes conditions (données d'entrée, périodes tests et fonctions objectif) pour avoir une meilleure idée des avantages respectifs des deux approches.

3.1.2 Des sous-bassins sur lesquels le modèle ne fonctionne pas correctement

Nous obtenons d'assez mauvais résultats sur les sous-bassins qui se situent généralement au sud, à l'exception d'un à l'est. Ce sont les bassins de la deuxième partie du Tableau 3: la Garonne à Saint Gaudens, le Salat à Roquefort, l'Ariège à Foix et la Garonne à Portet, et à l'est le bassin de l'Agout à Lavour. Les critères d'évaluation sur ces bassins sont plutôt mauvais. En effet on obtient des critères de Nash qui se situent tous en dessous de 0.8.

Contrairement aux bassins de la partie 3.1.1, le modèle ne s'avère pas très robuste. En effet sur l'ensemble de ces sous-bassins, on observe une dégradation du modèle assez marquée en contrôle. Si parfois les critères en calage pouvaient sembler assez corrects, notamment sur des bassins comme Roquefort, Portet et Lavour, il y avait ensuite une forte dégradation lors du contrôle du modèle.

On constate de plus de très nets écarts entre les débits simulés et calculés qui sont parfois très marqués sur les périodes de crue et d'étiages. Globalement on peut dire que le modèle n'arrive pas du tout à simuler les débits sur ces bassins. Notamment sur le bassin de Foix les résultats sont particulièrement mauvais, même le critère de bilan, qui pourtant reste tout à fait correct sur les autres bassins, est sur celui-ci très mauvais. Le modèle n'arrive donc même plus à reconstituer à l'exutoire de ce bassin les quantités d'eau qui y transitent annuellement.

Alors que sur les autres bassins, même si le modèle ne reproduit pas bien les séquences des débits, il reconstitue de manière très proche les quantités d'eau annuelles à l'exutoire.

Là encore, si on essaye d'interpréter ces résultats, il faut bien se rappeler que ces bassins subissent deux influences assez marquées :

- L'une d'origine naturelle qui est due au caractère nival de chacun de ces sous-bassins. Le module neige du modèle doit en théorie permettre au modèle de s'adapter aux pics de crue printaniers.
- Et l'autre d'origine anthropique qui concerne surtout les bassins de Saint Gaudens, de Foix et de Lavaur. Nous n'avons pas, comme l'équipe EDF, procédé à un traitement des données qui tienne compte notamment de retenues hydroélectriques d'assez grosses capacités, et donc on peut s'attendre à ce qu'une erreur importante soit introduite de ce côté là.

Ainsi la première hypothèse qui peut être faite sur les écarts rencontrés lors de la modélisation des crues est qu'il peut y avoir un dysfonctionnement au niveau du module neige. On peut penser éventuellement que les données de températures en entrée du module ne sont pas tout à fait adaptées (problèmes d'altitude), ce qui peut provoquer une mauvaise répartition de la pluie liquide et de la pluie solide.

Hormis le fait que les capacités du module neige sont assez limitées, il existe des facteurs non négligeables qui ne mettent plus en cause le modèle en lui-même. En effet il est très probable que les écarts sont aussi dus aux retenues hydroélectriques qui peuvent influencer de façon importante le régime hydrologique de ces sous-bassins. C'est notamment le cas sur les bassins de Saint Gaudens, Foix et Lavaur où les volumes d'eau retenus les plus importants représentent respectivement près de 42 Mm³, 200 Mm³ et 124 Mm³. Là encore si nous nous intéressons à l'étude de l'équipe EDF, on constate que leur approche a été différente sur le traitement de ces données. En effet, gérant presque la totalité des ouvrages hydroélectriques de ces bassins, EDF a accès à l'ensemble des données de gestion de chaque retenue. La méthode alors employée est la naturalisation des débits qui consiste à reconstituer le débit qui serait passé à l'exutoire s'il n'y avait pas eu d'activité humaine sur le bassin (voir Agosta, 2007). Cette méthode permet ensuite de modéliser le comportement hydrologique "naturel" du bassin. Les résultats obtenus notamment sur le bassin de Foix par l'équipe EDF sont globalement plus intéressants que les nôtres avec des Nash(Q) de l'ordre de 0.8 en calage comme en contrôle sur les débits naturalisés. Bien que la naturalisation puisse engendrer des incertitudes supplémentaires, on peut penser que la prise en compte de ces influences anthropiques dans le modèle est indispensable et améliorerait de façon significative les résultats.

3.1.3 Le bassin de la Garonne à Lamagistère

Ce bassin reçoit à la fois les influences des sous-bassins du sud par la Garonne et l'Ariège et de l'est par le Tarn et l'Aveyron. Les résultats des tests sur ce bassin sont assez bons alors que l'on aurait pu s'attendre à des résultats plus mauvais du fait de l'influence des sous-bassins où on a obtenu des résultats très mauvais. On obtient en réalité des critères de Nash supérieurs à 0.8. On peut donc penser que les influences amont des ouvrages ou bien de la neige deviennent plus diffuses sur la zone intermédiaire entre les stations de Portet et Lamagistère et qu'elles sont compensées par les autres bassins amont plus à l'est.

Il faut rappeler par ailleurs que cette zone intermédiaire est caractérisée par une forte densité de prélèvements pour l'irrigation et l'eau potable. A priori le modèle s'adapte donc plutôt bien à ces influences anthropiques, mais leur prise en compte explicite au sein du modèle devrait permettre d'améliorer les résultats.

3.1.4 Analyses de sensibilité

3.1.4.1 Evaluation du rôle du module neige

Afin de vérifier si le rôle du module neige est significatif dans la modélisation des débits, nous avons refait les essais sans ce module. Le Tableau 5 présente une synthèse des résultats que nous avons obtenus en contrôle sur l'ensemble des sous-bassins. Il est donc comparable au Tableau 3.

GR4J	Nash (Q)	Nash (\sqrt{Q})	Nash (lnQ)	Bilan (rapport des volumes)
Le Tarn à Millau	0.883	0.883	0.833	0.938
L'Aveyron à Loubéjac	0.910	0.929	0.880	0.955
Le Tarn à Villemur	0.839	0.866	0.821	0.993
La Garonne à Lamagistère	0.865	0.870	0.827	0.911
L'Agout à Lavaur	0.755	0.773	0.704	0.924
La Garonne à St Gaudens	0.424	0.492	0.530	0.955
Le Salat à Roquefort	0.599	0.639	0.673	0.876
L'Ariège à Foix	0.180	0.230	0.260	0.706
La Garonne à Portet	0.715	0.757	0.775	0.897
Moyenne	0.686	0.715	0.700	0.906

Tableau 5 : Moyennes des critères de Nash et Bilan sur l'ensemble des bassins en contrôle sans le module neige

La Figure 17 permet de comparer les critères de Nash calculés sur les débits et les logarithmes des débits obtenus en contrôle sur les neuf sous-bassins par GR4J avec et sans module neige.

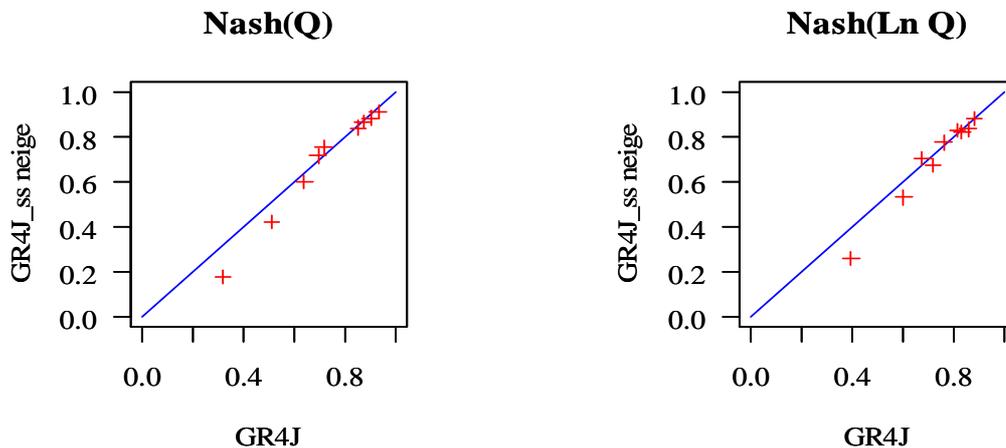


Figure 17 : Comparaison des critères de Nash obtenus en contrôle sur les neuf sous-bassins avec GR4J avec et sans module neige

On constate que les critères d'évaluation sont globalement plus mauvais sur l'ensemble de ces bassins sans le module neige. On gagne effectivement quelques points sur les critères grâce au module. Ces gains restent assez faibles au regard de la complexification importante du modèle, au terme de nouveaux paramètres à caler (4), qui visiblement s'avère peu justifiée.

On constate par ailleurs que l'effet inverse se produit parfois comme sur les bassins de la Garonne à Portet et à Lamagistère. En effet on constate que les critères d'évaluation sont

meilleurs sans le module neige. La première des raisons qui explique ces observations est que comme on vient de le dire, l'introduction de ce module complexifie le modèle et peut entraîner une perte de robustesse. On peut ensuite penser que le modèle essaie de compenser d'autres influences que la fonte de la neige en calage et ainsi lors de la phase de contrôle, le modèle ne peut plus s'y retrouver.

3.1.4.2 Sensibilité des résultats à la structure du modèle

L'étude comparative qui suit vise essentiellement à établir la sensibilité des résultats à la structure même du modèle. On présente donc dans le Tableau 6 les résultats des calages effectués avec le modèle Topmodel (Beven et Kirkby, 1979; Michel et al., 2003). Ce dernier est un modèle conceptuel dont nous utilisons une version globale à 8 paramètres, qui utilise ici le même module neige que GR4J.

Topmodel	Nash (Q)	Nash (\sqrt{Q})	Nash (lnQ)	Bilan (rapport de volumes)
Le Tarn à Millau	0.895	0.903	0.880	0.951
L'Aveyron à Loubéjac	0.871	0.905	0.870	0.911
Le Tarn à Villemur	0.871	0.902	0.877	0.990
La Garonne à Lamagistère	0.874	0.874	0.833	0.897
L'Agout à Lavour	0.786	0.783	0.695	0.892
La Garonne à St Gaudens	0.395	0.410	0.369	0.913
Le Salat à Roquefort	0.597	0.642	0.684	0.860
L'Ariège à Foix	0.324	0.339	0.338	0.730
La Garonne à Portet	0.684	0.722	0.751	0.895
Moyenne	0.700	0.720	0.700	0.893

Tableau 6: Moyennes des critères de Nash et Bilan sur les neuf sous-bassins obtenus en contrôle avec Topmodel

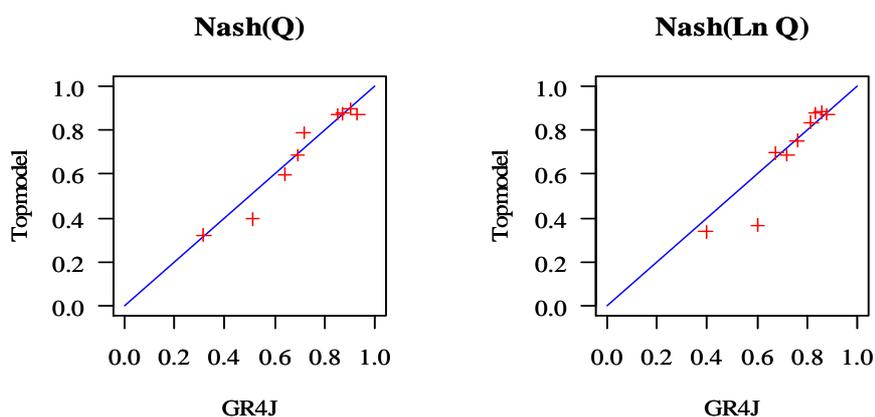


Figure 18 : Comparaison des critères de Nash obtenus en contrôle sur les neuf sous-bassins avec GR4J et Topmodel

La Figure 18 permet de comparer les critères de Nash calculés sur les débits et les logarithmes des débits obtenus en contrôle sur les neuf sous-bassins par GR4J et Topmodel.

D'après ces résultats, nous n'obtenons pas d'améliorations significatives avec Topmodel. On constate qu'il y a encore deux catégories de résultats, distinguant les bassins peu influencés et très influencés. Les ordres de grandeur des critères d'évaluation sont globalement les mêmes, avec une très légère amélioration du critère Nash (ln Q) avec Topmodel, là où les résultats sont assez satisfaisants. Les résultats sont donc très peu sensibles

aux changements de structure du modèle. On peut donc exclure une reconsidération des la structure même de GR4J.

3.1.4.3 Sensibilité des résultats avec prise en compte des données douteuses

L'étude qui suit vise à étudier la sensibilité des résultats si on prend en compte les données douteuses sur les débits (code de validité égal à '5' sur les données HYDRO). Jusqu'à présent, on avait considéré ces données comme des lacunes dans nos tests de modélisation. On présente donc dans le Tableau 7 les résultats des calages effectués en intégrant ces nouvelles données, et le pourcentage des nouvelles données prises en compte.

GR4J	Nash (Q)	Nash (\sqrt{Q})	Nash (lnQ)	Bilan (rapport de volumes)	Pourcentage de lacunes (%)
Le Tarn à Millau	0.912	0.911	0.863	0.979	7.6
L'Aveyron à Loubéjac	0.900	0.930	0.882	0.952	0.5
Le Tarn à Villemur	0.856	0.883	0.843	0.983	2.3
La Garonne à Lamagistère	0.864	0.866	0.821	0.887	0.4
L'Agout à Lavaur	0.685	0.740	0.652	0.925	0.4
La Garonne à St Gaudens	0.593	0.623	0.616	0.953	6.9
Le Salat à Roquefort	0.716	0.758	0.772	0.894	14.9
L'Ariège à Foix	0.325	0.385	0.425	0.779	4.3
La Garonne à Portet	0.698	0.757	0.773	0.892	0.8
Moyenne	0.728	0.761	0.739	0.916	4.2

Tableau 7 : Moyennes des critères de Nash et Bilan sur l'ensemble des bassins obtenus en contrôle avec Topmodel et prise en compte des données douteuses

On constate de légères améliorations des critères d'évaluation lorsque l'on simule en gardant les valeurs douteuses des débits. La prise en compte de ces valeurs n'influence donc pas les calculs. Le pourcentage de lacunes étant assez faible, on aurait pu s'abstenir de cette précaution.

4 Conclusion

Les études réalisées pendant ce stage de deuxième année d'école d'ingénieur se sont organisées en deux étapes: la réalisation d'une étude bibliographique et d'une synthèse sur la zone d'étude, et la modélisation du comportement hydrologique du bassin versant de la Garonne à Lamagistère et de huit de ses sous-bassins.

L'étude bibliographique a consisté dans un premier temps à se familiariser avec l'hydrologie. Elle a ensuite permis de comprendre les origines et les enjeux du projet dans lequel s'inscrivait ce stage. Elle a enfin permis de réaliser une étude complète de la zone d'étude et des travaux antérieurs. Cette première partie nous a menés à l'identification des différentes caractéristiques du bassin. Notamment, nous avons constaté que ce bassin est caractérisé par deux régimes hydrologiques imposés par la barrière pyrénéenne, le Massif central, les influences océaniques et méditerranéennes.

La deuxième partie de ce stage a consisté à réaliser les tests de modélisation en conditions actuelles. Ces tests ont été principalement réalisés sur le modèle conceptuel global GR4J. Nous avons travaillé en calage-contrôle sur deux périodes distinctes et de même longueur pour évaluer les performances du modèle. Au cours de ces tests, nous avons pu constater que l'on pouvait obtenir des résultats très différents les uns des autres. Pour certains bassins tels que le Tarn à Millau et Villemur ou l'Aveyron à Loubéjac, nous avons obtenu des résultats tout à fait satisfaisants. Notamment nous avons constaté que le modèle était assez robuste vis-à-vis des changements de conditions entre les deux périodes de simulation. Ainsi cette dernière constatation permettra par la suite d'évaluer les incertitudes dans les simulations de changements climatiques liées au modèle. Globalement les tests sur les bassins de l'Est tels que Millau ou encore Loubéjac ont donné des résultats qui ont prouvé l'aptitude de GR4J à modéliser des débits pas ou peu influencés.

D'autres bassins ont donné des résultats bien moins satisfaisants. Notamment l'étude sur des bassins tels que l'Ariège à Foix, la Garonne à Saint Gaudens ou le Salat à Roquefort a montré que le modèle pouvait perdre de sa robustesse face à des conditions extrêmes. Ce sont par exemple les hausses de débits intervenant au printemps à la fonte de la neige qui mettent directement en jeu le calage du module neige. Enfin la dernière et non négligeable source d'erreur provient de l'influence anthropique qui, avec des retenues de grande capacité et des prélèvements importants, peut modifier de manière très significative le comportement hydrologique d'un bassin. Elle n'a pas pu être prise en compte dans le cadre de ce stage mais il sera intéressant de le faire grâce à la méthode de prise en compte des barrages-réservoirs développée au Cemagref pour les modèles globaux. Cette étape paraît indispensable pour les tests de changements climatiques dans la suite du projet.

Les résultats obtenus dans le cadre de ce stage indiquent également que:

- des progrès peuvent vraisemblablement être faits au niveau du module neige, qui apparaît dans sa version testée ici trop complexe. L'exploitation des résultats de la thèse d'Audrey Valéry en cours au Cemagref sur ce sujet devrait donner des pistes d'amélioration,
- la comparaison avec le modèle CEQUEAU suggère que des améliorations de la simulation des étiages peuvent être faites. Il sera, à ce titre, intéressant de tester la nouvelle fonction d'échange en eau introduite par Nicolas Le Moine dans GR4J (thèse en cours au Cemagref).

Ces différents points doivent être traités avant de commencer à traiter les aspects de changements climatiques.

Pour finir ce stage m'a permis dans un premier temps de me familiariser avec l'hydrologie, qui pour l'instant n'a pas été abordée lors de mon parcours scolaire. Il m'a par ailleurs permis de découvrir un modèle hydrologique conceptuel qui reconstitue en sortie les débits à partir des pluies. Les tests réalisés sur le modèle m'ont permis de comprendre l'importance de deux phases très distinctes que sont le calage et le contrôle. Enfin durant ce stage, j'ai aussi pu acquérir de nouvelles compétences sur le codage en Fortran, ainsi que quelques bases de codage sous R qui ont essentiellement servies à la représentation graphique des résultats.

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.*

Beven, K. J. et M. J. Kirkby, 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrolo. Sci. Bull.*, 24(1), pp. 43-69.

Caballero, Y. et J. Noilhan, 2003. Etude de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau du bassin Adour Garonne. *Etude réalisée par l'Agence de l'Eau Adour-Garonne et Météo France, 176-p.*

Caballero, Y., S. Voirin-Morel, F. Habets, J. Noilhan, P. Lemoigne, A. Lehenaff et A. Boone, 2007. Hydrological sensitivity of the Adour-Garonne river basin to climate change. *Water Resources Research*, vol.43., W07448, doi:10.1029/2005WR004192.

Cemagref (2006). Cours d'hydrologie pour l'ingénieur. *Cemagref Antony, Rapport interne.*

Lindström, G., B. Johansson, M. Persson, M. Gardelin, et S. Bergström, 1997. Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *Journal of Hydrology*, 201, pp. 272-288.

Michel, C., C. Perrin, et V. Andréassian, 2003. The exponential store: a correct formulation for rainfall-runoff modelling. *Hydrolo. Sci. Journal*, 48(1), 109-124.

Nash, J. E., et J. V. Sutcliffe, 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 27(3), 282-290.

Perrin, C., C. Michel et V. Andréassian, 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of hydrology*, pp. 275-289.

Annexe 1 : Glossaire

(Définitions extraites du Glossaire International d'Hydrologie et du Dictionnaire Français d'Hydrologie disponibles sur <http://www.hydrologie.org>)

- bassin versant : surface d'alimentation par la pluie d'un point de la rivière. Ses limites sont le plus souvent définies par la topographie: elles sont représentées par des lignes de crête (lignes de partage des eaux), et regroupent les surfaces surplombant la rivière alimentée par ce bassin.
- karst : région de calcaires et dolomites ayant une topographie souterraine particulière due à la dissolution de certaines parties du sous-sol et au cheminement des eaux dans les galeries naturelles ainsi formées.
- nappe phréatique : nappe souterraine atteinte et exploitable par les puits ordinaires.
- nappe libre : nappe souterraine limitée au-dessus par une surface libre.
- nappe captive : nappe généralement profonde et située entre deux couches imperméables. Elle est entièrement saturée d'eau sous pression.
- modèle hydrologique : représentation mathématique simplifiée de tout ou partie des processus du cycle hydrologique par un ensemble de concepts hydrologiques exprimés en langage mathématique et reliés entre eux dans des séquences temporelle et spatiale correspondant à celles que l'on observe dans la nature.

Annexe 2 : Liste des postes pluviométriques choisis

N°_PLUVIO	NOM	OUVERTURE	Période disponible	
			Date début	Date fin
ss bassin de Millau 2170 km²				
48094001	LE MASSEGROS			
48176002	SAINT-PIERRE-DES-TRIEPERS	01/11/1987 00:00		
48019001	BARRE-DES-CEVENNES		01/01/1988	31/05/2007
48036001	CASSAGNAS		01/01/1988	31/05/2007
48061002	FLORAC		01/01/1988	31/05/2007
48096001	MEYRUEIS		01/01/1988	31/05/2007
48096004	MEYRUEIS (MEYRUEIS-FREPES)	01/04/1973 00:00	01/01/1988	31/05/2007
48116001	LE PONT-DE-MONTVERT		01/01/1988	31/05/2007
30297001	SAINT-SAUVEUR-CAMPRIEU	01/06/1963 00:00	01/01/1988	31/05/2007
30332001	TREVES	01/06/1965 00:00	01/01/1988	31/05/2007
ss bassin de Loubéjac 5170 km²				
12247001	SAINT-SATURNIN-DE-LENNE	01/01/1983 00:00		
12270002	SEVERAC-LE-CHATEAU	01/01/1976 00:00		
12294002	VEZINS-DE-LEVEZOU	01/10/1976 00:00		
12026002	BERTHOLENE	01/01/1985 00:00		
12102001	FLAVIN	01/01/1981 00:00		
12011001	ARVIEU	01/01/1979 00:00		
12254001	SALLES-LA-SOURCE	01/11/1970 00:00		
12068001	COLOMBIES	01/01/1981 00:00		
12194001	QUINS	01/02/1963 00:00		
12065001	CENTRES	01/01/1981 00:00		
12197002	REQUISTA	01/01/1984 00:00		
12121001	LANUEJOULS	01/11/1977 00:00		
12300003	VILLEFRANCHE-DE-ROUERGUE	01/01/1971 00:00		
12150001	MONTEILS	01/03/1955 00:00		
81069001	CORDES-SUR-CIEL	01/01/1942 00:00		
82174001	SAINT-VINCENT	01/06/1976 00:00		
82002001	ALBIAS	01/10/1963 00:00		
ss bassin de Villemur 4630 km²				
12145001	MILLAU	01/04/1964 00:00		
12063001	LA CAVALERIE			
12212001	SAINT-BEAULIZE	01/01/1957 00:00		
12154002	MONTLAUR (MONTLAUR-PRIVAT)	01/01/1984 00:00		
81308001	VALENCE-D'ALBIGEOIS	01/04/1944 00:00		
12023001	LA BASTIDE-SOLAGES	01/05/1977 00:00		
12248001	SAINT-SERNIN-SUR-RANCE	01/01/1967 00:00		
12154002	MONTLAUR (MONTLAUR-PRIVAT)	01/01/1984 00:00		
81284001	LE SEQUESTRE (ALBI)	01/11/1976 00:00		
81222001	REALMONT	01/05/1966 00:00		
81182004	MONTREDON-LABESSONNIE	01/06/1985 00:00		
81105002	GRAULHET	01/05/1908 00:00		
12025001	BELMONT-SUR-RANCE	01/01/1967 00:00		
12208001	SAINT-AFFRIQUE	01/01/1921 00:00		
12253001	SALLES-CURAN	01/01/1945 00:00	01/01/1988	01/01/1997

ss bassin de Lamagistère 8100 km²				
46287001	SAINT-PAUL-DE-LOUBRESSAC	01/06/1986 00:00		
82094001	LAUZERTE	01/02/1977 00:00		
31116001	CASTELGINEST	01/03/1984 00:00		
31069001	BLAGNAC (TOULOUSE-BLAGNAC)	01/01/1929 00:00		
32160001	L'ISLE-JOURDAIN	01/10/1964 00:00		
32147001	GIMONT			
32213001	LOMBEZ			
31454001	RIEUMES	01/01/1966 00:00		
31098001	CADOURS	01/01/1966 00:00	01/02/1995	31/12/2003
32249001	MAUVEZIN	01/01/1970 00:00	01/01/1988	31/12/2003
32370001	SAINT-CLAR (ST-CLAR)	01/01/1970 00:00	01/01/1994	31/12/2003
32412001	SARAMON	01/03/1972 00:00	01/01/1994	31/12/2003
82180001	SERIGNAC	01/01/1978 00:00	01/01/1995	31/12/2003
82193001	VIGUERON	01/01/1974 00:00	01/01/1995	31/12/2003
31271001	LANTA	01/01/1971 00:00	01/01/1997	31/12/2004
31540001	SEGREVILLE	01/01/1961 00:00	01/01/1988	31/12/2004
32253001	MIRADOUX	01/01/1970 00:00	01/01/1994	31/12/2003
11371001	SALLES-SUR-L'HERS	01/01/1966 00:00	01/01/1996	31/12/2004
ss bassin de Lavaur 2300 km²				
81124001	LACAUNE			
81014001	ANGLES	01/09/1956 00:00		
81163001	MAZAMET	01/04/1944 00:00		
81042001	BURLATS	01/08/1980 00:00		
81081002	DOURGNE	01/04/1956 00:00		
31451001	REVEL			
81266001	SAINT-PAUL-CAP-DE-JOUX	01/05/1966 00:00		
34046005	CAMBON-ET-SALVERGUES	01/09/1956 00:00	01/01/1988	01/01/1997
34107001	FRAISSE-SUR-AGOUT	01/04/1954 00:00		
81192001	MURAT-SUR-VEBRE	01/09/1956 00:00	01/01/1988	01/01/1997
81231001	ROUAIROUX	01/01/1985 00:00		
ss bassin de St Gaudens 2230km²				
65031001	ARREAU (ARREAU BORDERES)	01/12/1943 00:00		
65388001	SAINT-LARY-SOULAN	01/01/1944 00:00		
65017002	ARAGNOUET (EGET)	01/01/1944 00:00		
65195001	GENOS	01/01/1958 00:00		
31247001	LABARTHE-RIVIERE	01/02/1975 00:00		
65327001	NESTIER	01/01/1942 00:00		
31144001	CIERP-GAUD	01/01/1949 00:00		
31190001	FOS	01/01/1966 00:00		
31042001	BAGNERES-DE-LUCHON			
31404001	OO	01/09/1961 00:00		
ss bassin de Roquefort 1570 km²				
9094001	CERIZOLS	01/04/1980 00:00		
9289001	LORP-SENTARAILLE (ST GIRONS)	01/01/1949 00:00		
9301001	SOULAN	01/10/1975 00:00		
9029001	AULUS-LES-BAINS			
9100001	COUFLENS (COUFLENS SALAU)	01/01/1952 00:00		
31011001	ARBAS	01/02/1968 00:00		

ss bassin de Foix 1340 km²				
9306001	TARASCON-SUR-ARIEGE			
9328001	VERDUN	01/01/1928 00:00		
9283002	SAVIGNAC-LES-ORMEAUX	01/01/1988 00:00		
9024002	ASTON	01/10/1987 00:00		
9139001	L'HOSPITALET-PRES-L'ANDORRE	01/01/1959 00:00		
9220001	ORLU	01/08/1938 00:00		
ss bassin de Portet 4840 km²				
9079001	CARLA-BAYLE (CARLA BAYLE)	01/01/1976 00:00		
9181003	LE MAS-D'AZIL (LE MAS D AZIL)	01/05/1971 00:00		
31305001	ASTON (RIETE)	01/10/1987 00:00		
9022001	ARVIGNA	01/08/1987 00:00	01/01/1993	31/12/2003
9047001	BELESTA	01/01/1928 00:00	01/01/1991	31/12/2003
9185001	MAZERES	01/01/1982 00:00	01/01/1996	31/12/2003
9194001	MIREPOIX		01/01/1988	31/12/2003
9215001	NALZEN	01/01/1988 00:00	01/01/2003	31/12/2003
9277001	SAINT-YBARS (ST-YBARS)	01/11/1981 00:00	01/01/1988	31/12/2000
9282001	SAVERDUN	01/05/1966 00:00		
11033003	BELPECH	01/07/1962 00:00	01/01/1988	31/12/2003
11159002	GAJA-LA-SELVE (GAJA)	01/01/1965 00:00	01/01/1988	31/12/2003

Annexe 3 : Les différents régimes hydrologiques

Les bassins à régime pluvial océanique

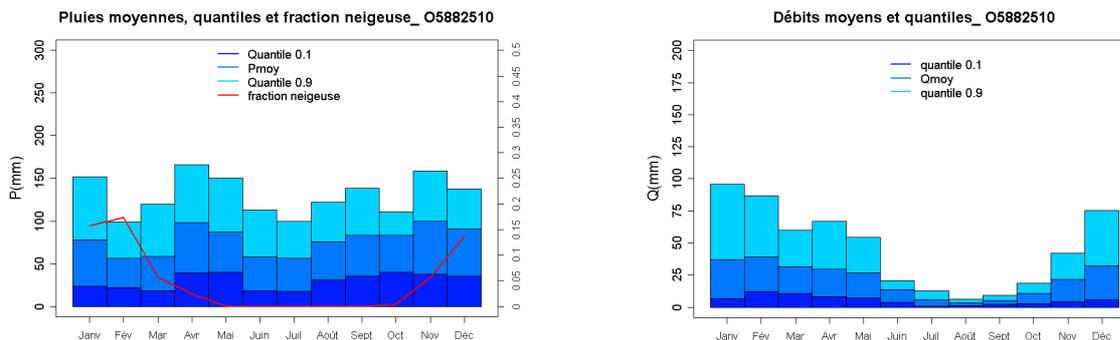


Figure 19: Pluie et débits mensuels moyens sur le bassin de l'Aveyron à Loubéjac (code Hydro: O5882510)

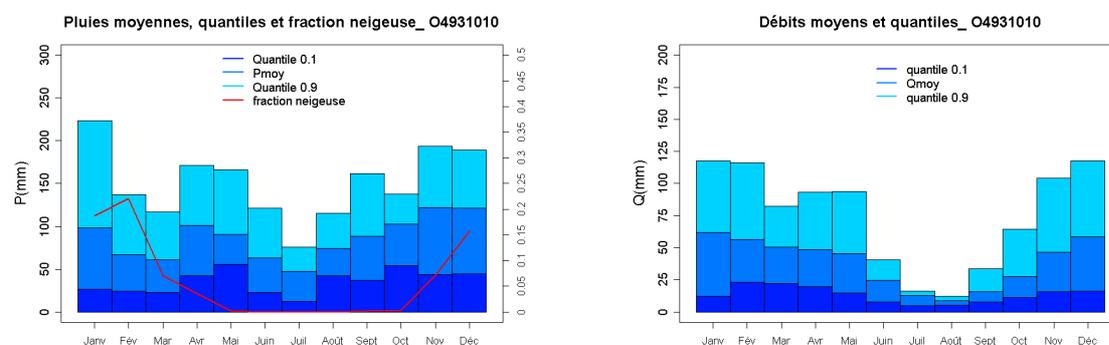


Figure 20 : Pluie et débits mensuels moyens sur le bassin du Tarn à Villemur (code Hydro: O4931010)

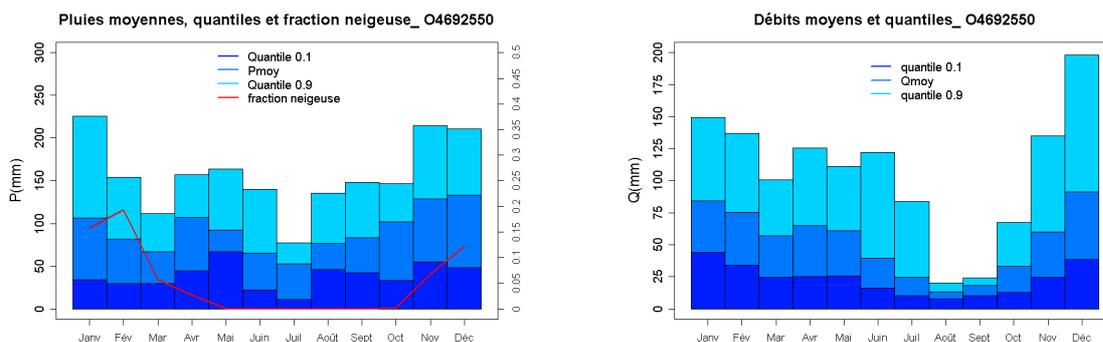


Figure 21 : Pluie et débits mensuels moyens sur le bassin de l'Agout à Lavaur (code Hydro: O4931010)

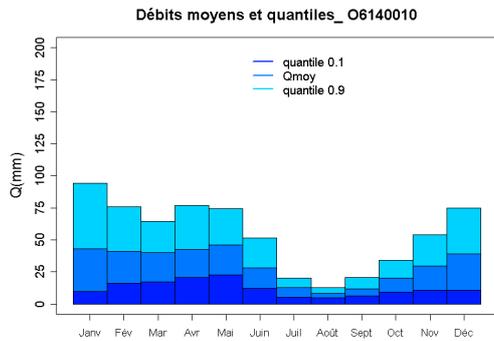
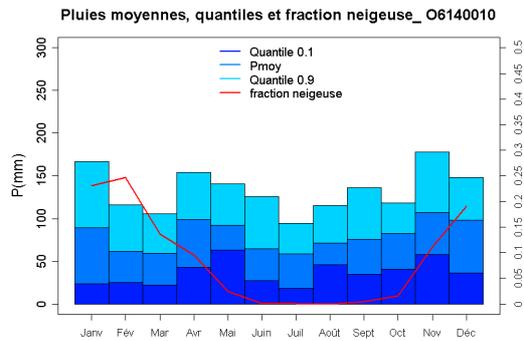


Figure 22 : Pluie et débits mensuels moyens sur le bassin de la Garonne à Lamagistère (code Hydro:O6140010)

Les bassins à régime pluvio-nival

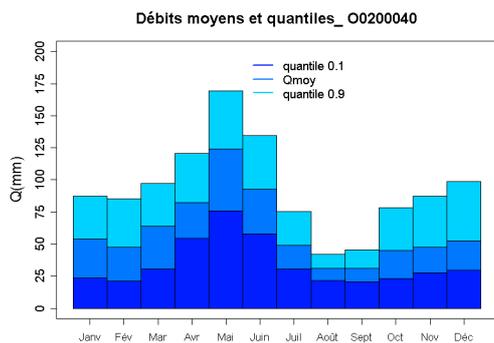
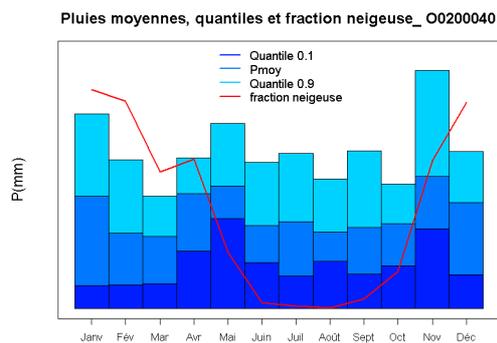


Figure 23 : Pluie et débits mensuels moyens sur le bassin de la Garonne à Saint Gaudens (code Hydro: O0200040)

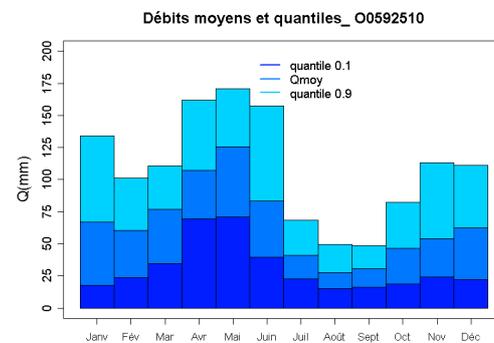
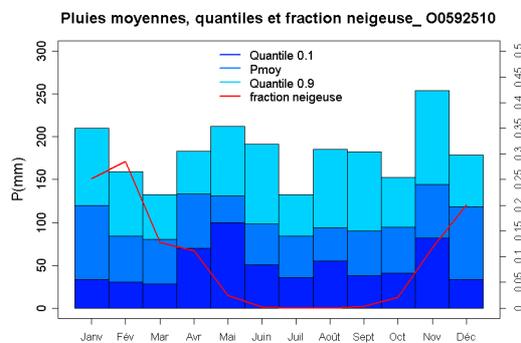


Figure 24 : Pluie et débits mensuels moyens sur le bassin du Salat à Roquefort (code Hydro: O0592510)

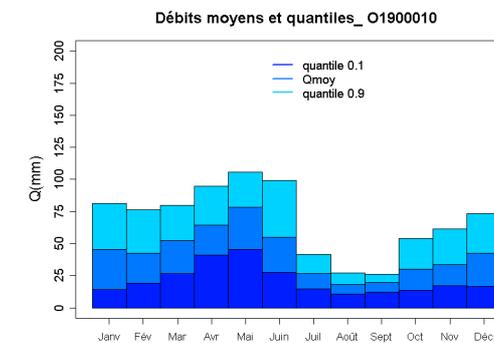
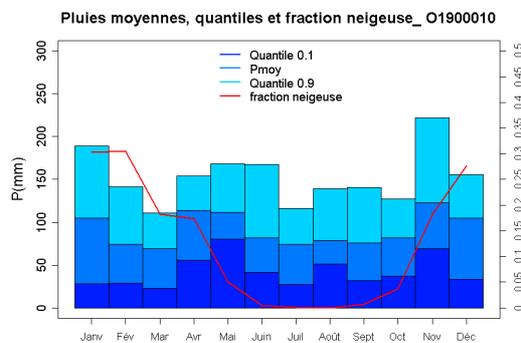


Figure 25 : Pluie et débits mensuels moyens sur le bassin de la Garonne à Portet (code Hydro: O1900010)

Annexe 4 : Résultats sur les neuf sous-bassins de la Garonne

Dans cette annexe, nous donnons les résultats du modèle GR4J sur chaque sous-bassin. Pour chacun d'eux un tableau de synthèse des critères d'évaluation est donné. Ce tableau permet d'une part de comparer les différents critères de Nash et les critères de bilan sur les périodes successives de calage et de contrôle, et d'autre part il donne une moyenne en calage et en contrôle de chaque critère. On présente aussi une figure pour chacun de ces sous-bassins permettant de comparer les débits mensuels moyens simulés et mesurés, sur les deux périodes, en calage et en contrôle.

Le bassin du Tarn à Millau

GR4J	Calage (1996- 2000)	Contrôle (2001- 2005)	Calage (2001- 2005)	Contrôle (1996- 2000)	Moyenne en calage	Moyenne en contrôle
Nash (Q)	0.897	0.905	0.919	0.896	0.908	0.900
Nash (\sqrt{Q})	0.914	0.898	0.907	0.901	0.910	0.899
Nash (ln Q)	0.887	0.878	0.860	0.833	0.873	0.855
Rapport des volumes annuels Calculés/Observés	0.985	0.966	0.996	0.944	0.990	0.955

Tableau 8 : Critères de Nash et bilan sur le bassin de Millau

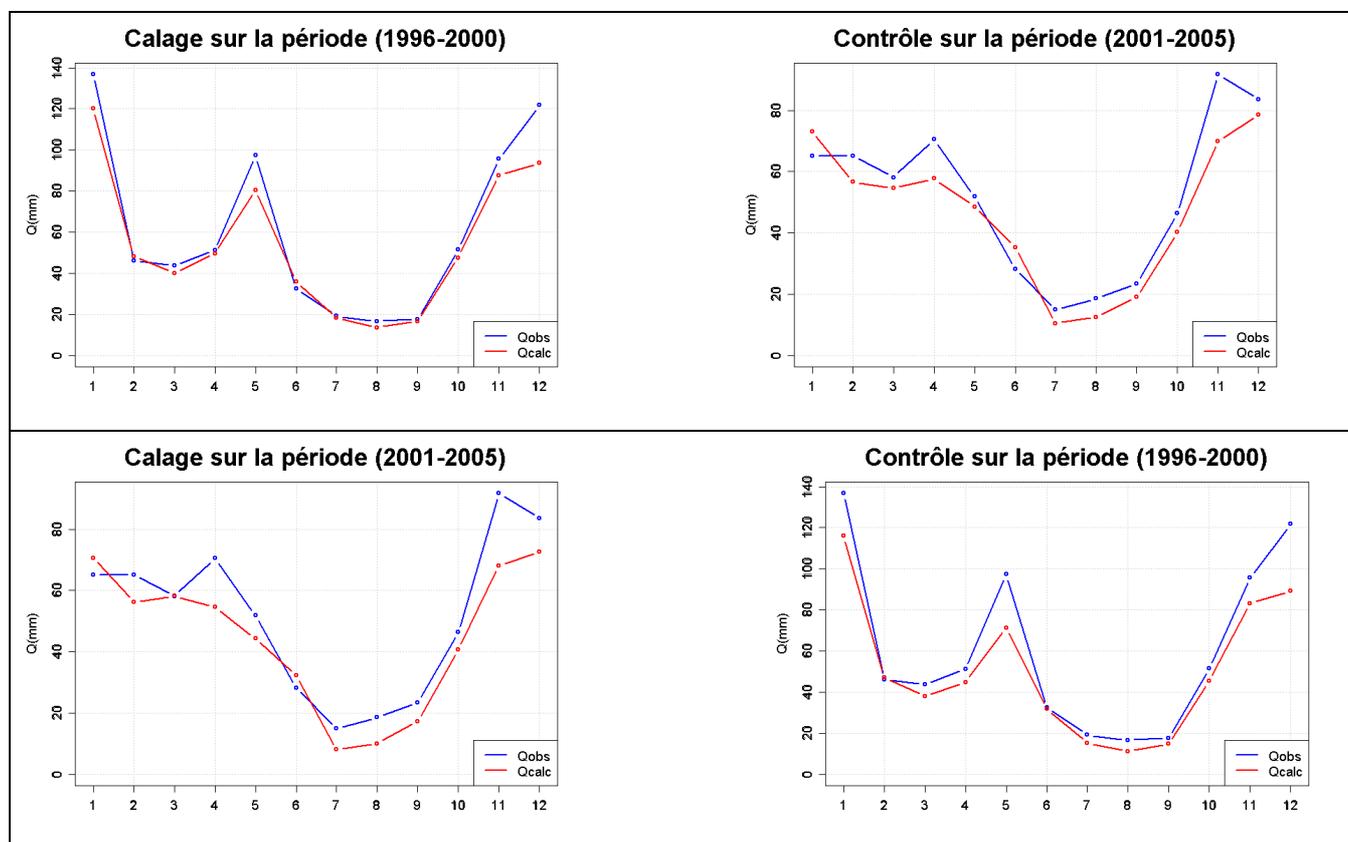


Figure 26 : Débits mensuels interannuels calculés et observés en calage et contrôle sur le bassin de Millau

Le bassin de l'Aveyron à Loubéjac

GR4J	Calage (1996-2000)	Contrôle (2001-2005)	Calage (2001-2005)	Contrôle (1996-2000)	Moyenne en calage	Moyenne en contrôle
Nash (Q)	0.896	0.931	0.931	0.898	0.913	0.914
Nash (\sqrt{Q})	0.938	0.927	0.931	0.932	0.934	0.929
Nash (ln Q)	0.915	0.845	0.865	0.914	0.890	0.879
Rapport des volumes annuels Calculés/Observés	0.982	0.952	0.993	0.969	0.987	0.960

Tableau 9 : Critères de Nash et bilan sur le bassin de Loubéjac

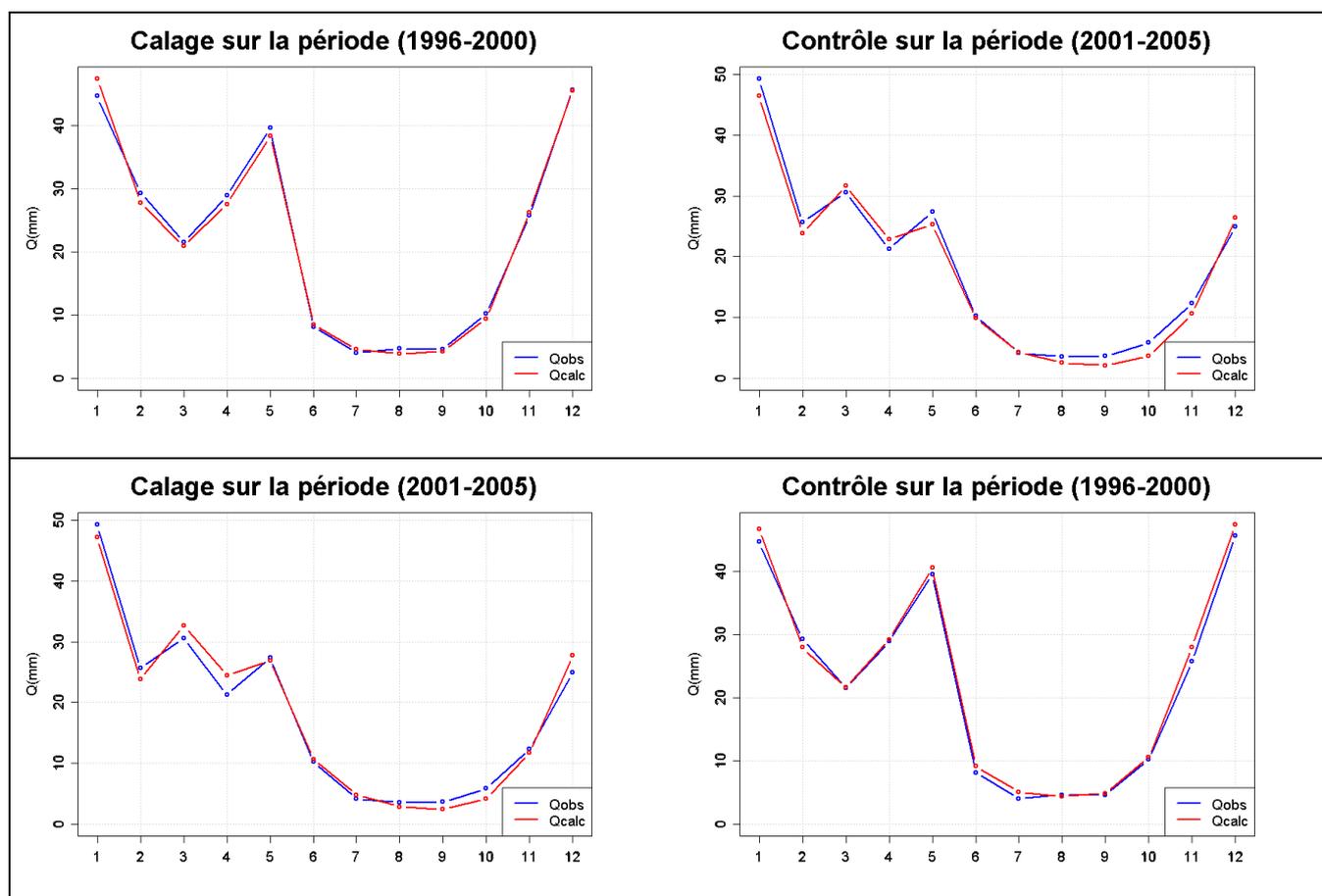


Figure 27 : Débits mensuels interannuels calculés et observés en calage et contrôle sur le bassin de Loubéjac

Le bassin du Tarn à Villemur

GR4J	Calage (1996-2000)	Contrôle (2001-2005)	Calage (2001-2005)	Contrôle (1996-2000)	Moyenne en calage	Moyenne en contrôle
Nash (Q)	0.876	0.816	0.856	0.887	0.866	0.851
Nash (\sqrt{Q})	0.887*	0.855	0.897	0.893*	0.892	0.874
Nash (ln Q)	0.846	0.794	0.882	0.868	0.864	0.831
Rapport des volumes annuels Calculés/Observés	0.988	0.997	0.998	0.974	0.993	0.985

Tableau 10 : Critères de Nash et bilan sur le bassin de Villemur

* Nash plus grand en contrôle qu'en calage, ce qui pourrait indiquer un problème de calage

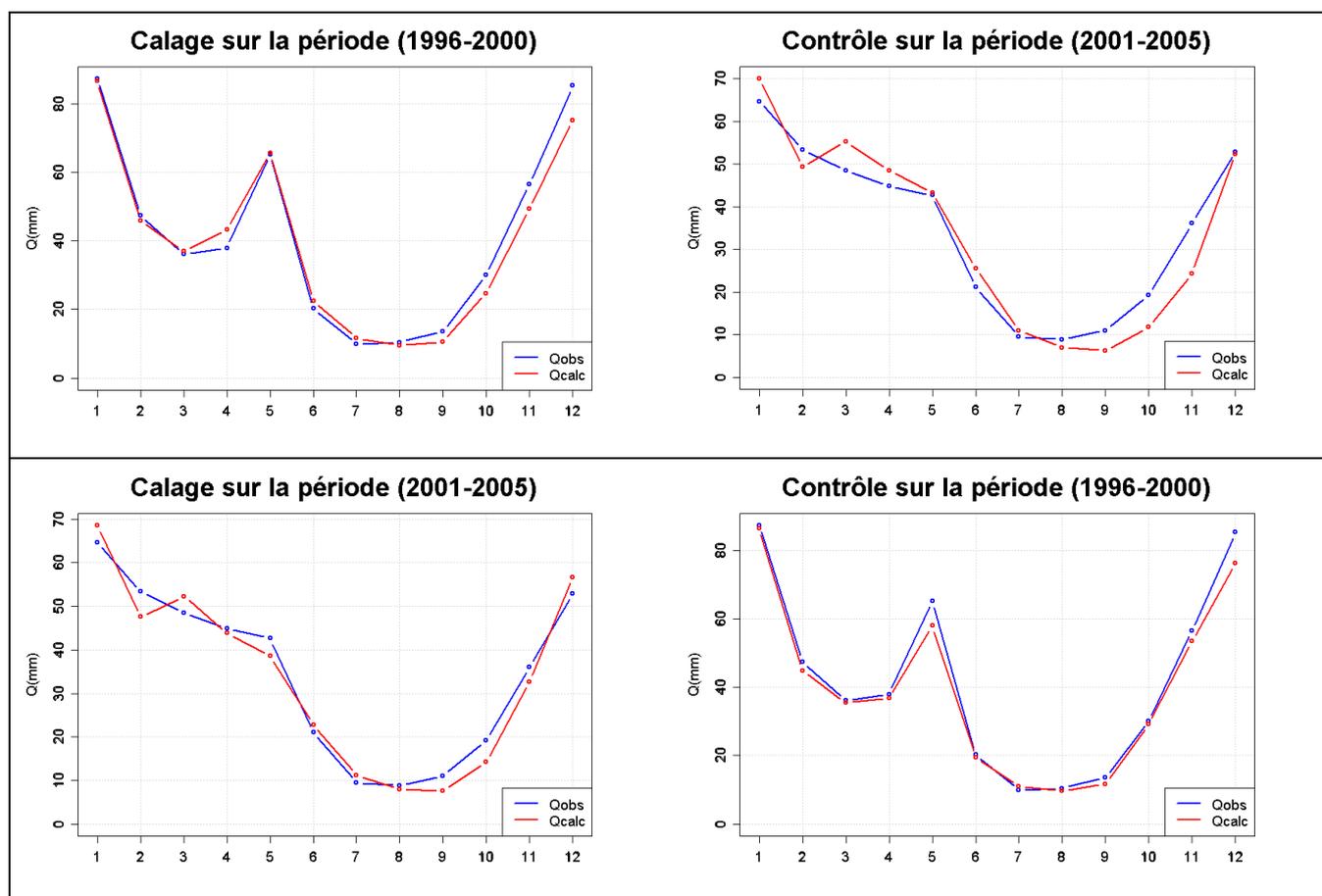


Figure 28 : Débits mensuels interannuels calculés et observés en calage et contrôle sur le bassin de Villemur

Le bassin de La Garonne à Lamagistère

GR4J	Calage (1996-2000)	Contrôle (2001-2005)	Calage (2001-2005)	Contrôle (1996-2000)	Moyenne en calage	Moyenne en contrôle
Nash (Q)	0.904	0.878	0.873	0.863	0.888	0.870
Nash (\sqrt{Q})	0.911	0.857	0.897	0.874	0.904	0.865
Nash (ln Q)	0.891	0.778	0.884	0.853	0.887	0.815
Rapport des volumes annuels Calculés/Observés	0.985	0.879	0.989	0.931	0.987	0.905

Tableau 11 : Critères de Nash et bilan sur le bassin de Lamagistère

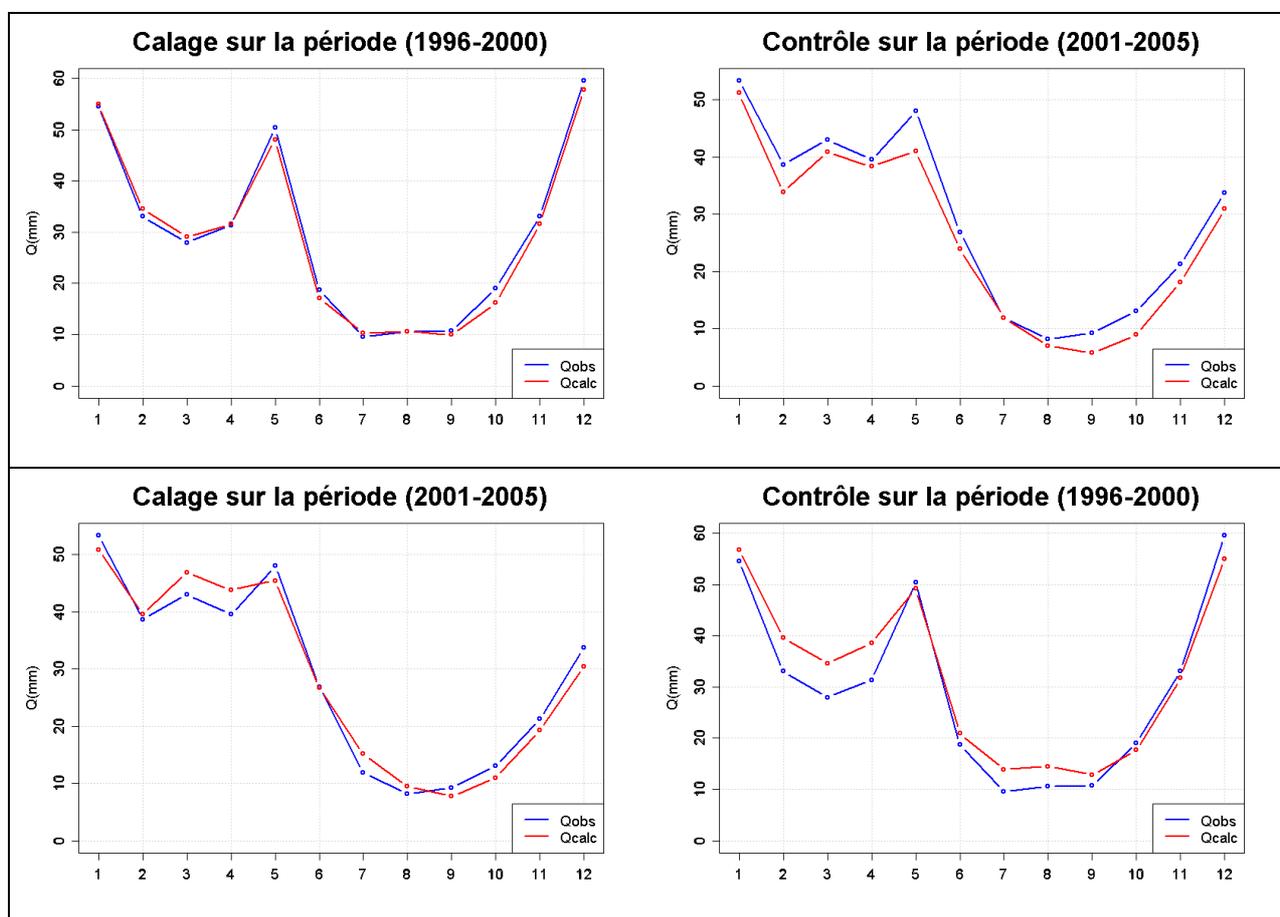


Figure 29 : Débits mensuels interannuels calculés et observés en calage et contrôle sur le bassin de Lamagistère

Le bassin de l'Agout à Lavaur

L'étude sur ce bassin a été un peu différente des autres dans le sens où les données disponibles s'arrêtaient en 2001. Nous avons choisis de réduire les périodes de calage et de contrôle aux périodes 1995-1998 et 1998-2001.

GR4J	Calage (1996-1998)	Contrôle (1998-2001)	Calage (1998-2001)	Contrôle (1995-1998)	Moyenne en calage	Moyenne en contrôle
Nash (Q)	0.879	0.661	0.820	0.770	0.849	0.715
Nash (\sqrt{Q})	0.907	0.706	0.796	0.776	0.851	0.741
Nash (ln Q)	0.880	0.660	0.738	0.690	0.809	0.675
Rapport des volumes annuels Calculés/Observés	0.991	0.936	0.978	0.907	0.984	0.921

Tableau 12 : Critères de Nash et bilan sur le bassin de Lavaur

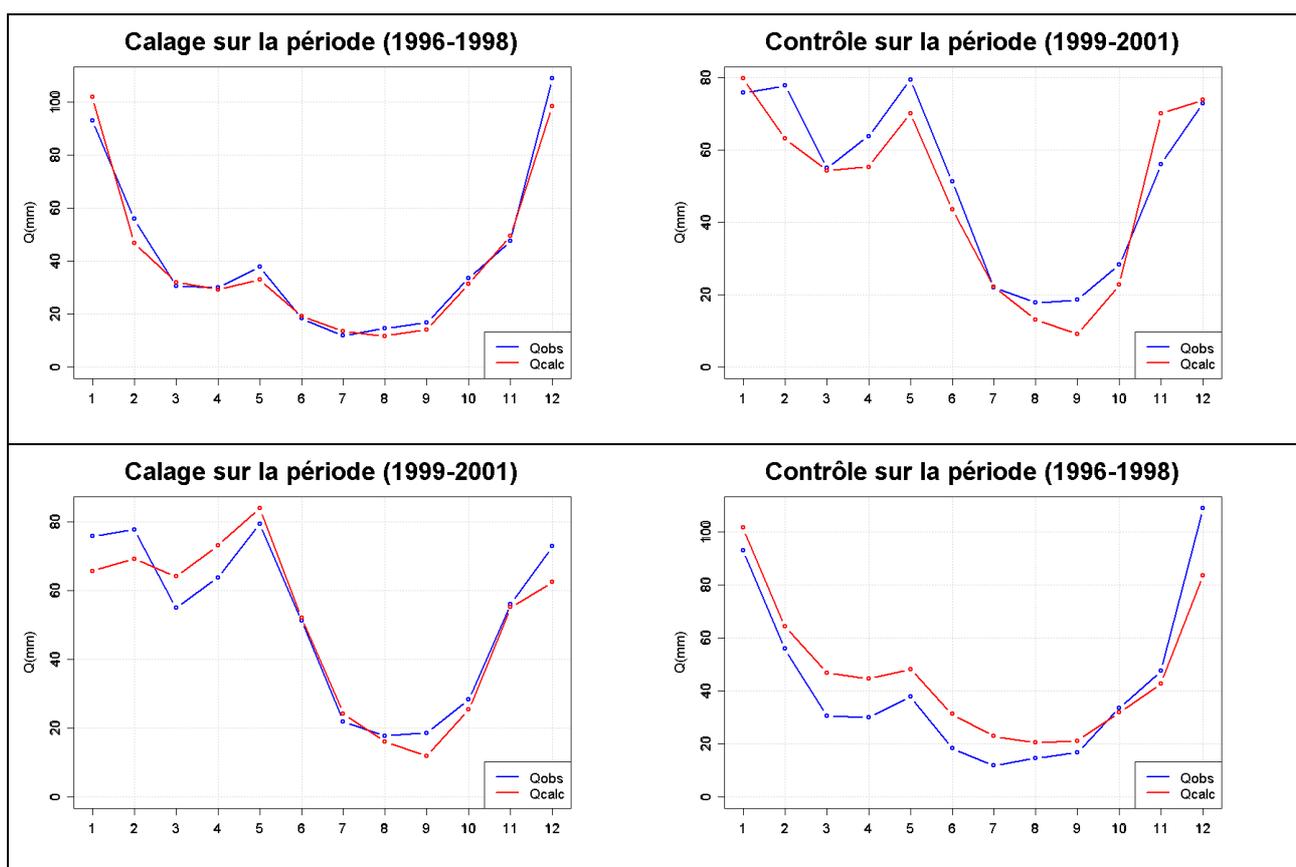


Figure 30 : Débits mensuels interannuels calculés et observés en calage et contrôle sur le bassin de Lavaur

Le bassin de La Garonne à Saint Gaudens

GR4J	Calage (1996-2000)	Contrôle (2001-2005)	Calage (2001-2005)	Contrôle (1996-2000)	Moyenne en calage	Moyenne en contrôle
Nash (Q)	0.652	0.514	0.619	0.511	0.635	0.512
Nash (\sqrt{Q})	0.649	0.577	0.676	0.568	0.662	0.572
Nash (ln Q)	0.638	0.627	0.711	0.579	0.674	0.603
Rapport des volumes annuels Calculés/Observés	0.970	0.876	0.973	0.991	0.971	0.933

Tableau 13 : Critères de Nash et bilan sur le bassin de Saint Gaudens

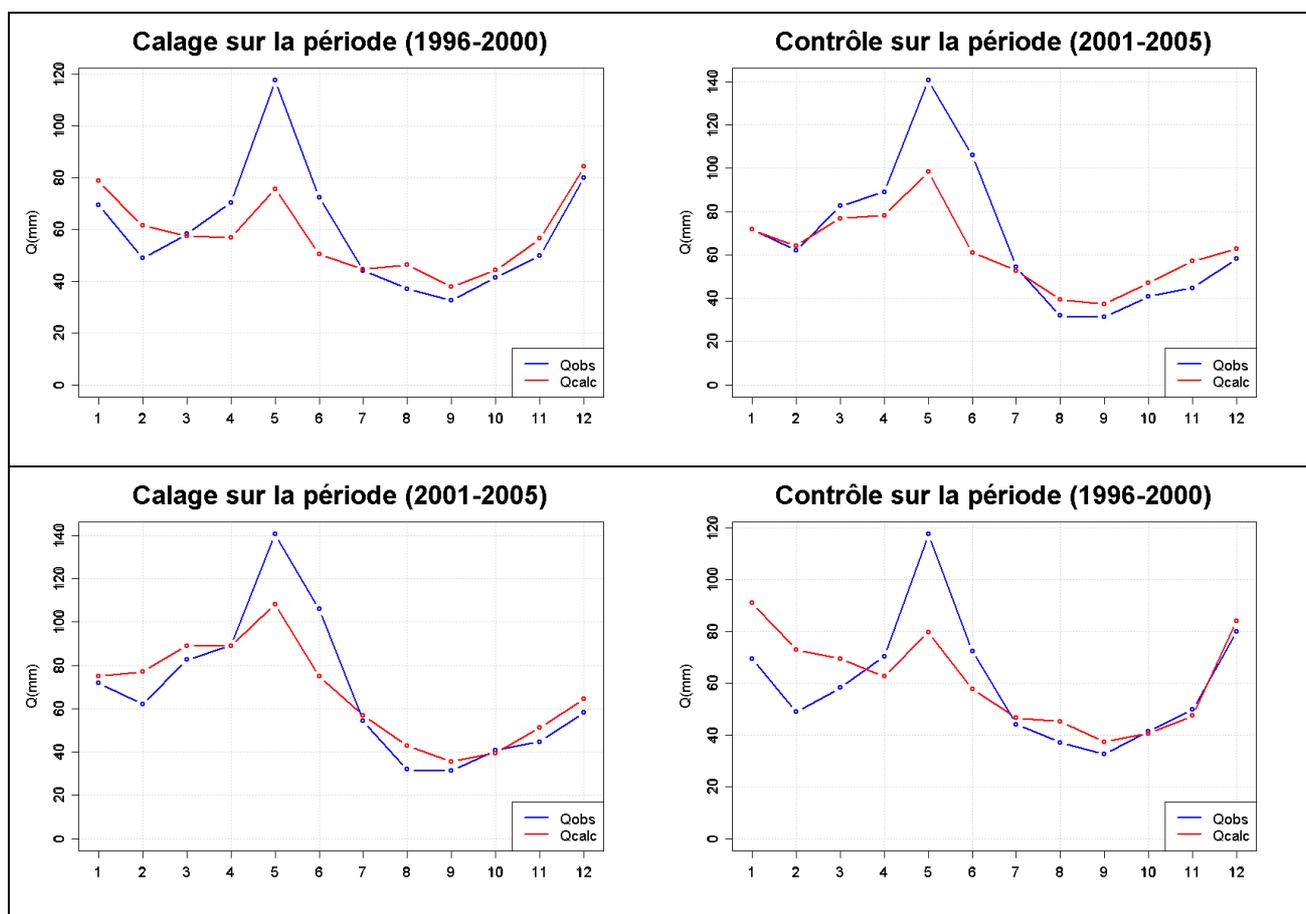


Figure 31 : Débits mensuels interannuels calculés et observés en calage et contrôle sur le bassin de St Gaudens

Le bassin du Salat à Roquefort

GR4J	Calage (1996-2000)	Contrôle (2001-2005)	Calage (2001-2005)	Contrôle (1996-2000)	Moyenne en calage	Moyenne en contrôle
Nash (Q)	0.779	0.601	0.676	0.677	0.727	0.639
Nash (\sqrt{Q})	0.818	0.635	0.726	0.738	0.772	0.688
Nash (ln Q)	0.832	0.672	0.754	0.767	0.793	0.719
Rapport des volumes annuels Calculés/Observés	0.969	0.822	0.958	0.999	0.963	0.910

Tableau 14 : Critères de Nash et bilan sur le bassin de Roquefort

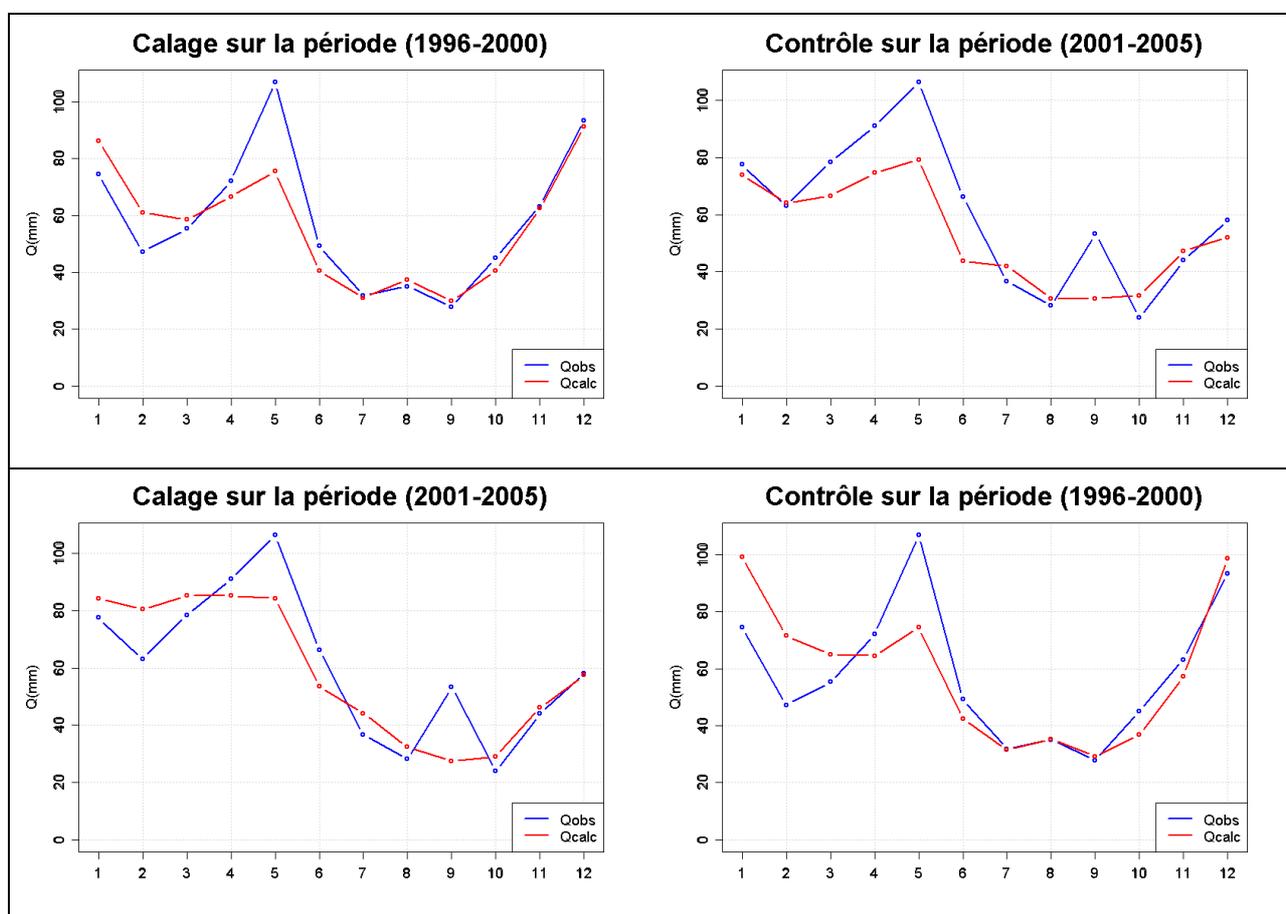


Figure 32 : Débits mensuels interannuels calculés et observés en calage et contrôle sur le bassin de Roquefort

Le bassin de l'Ariège à Foix

GR4J	Calage (1996-2000)	Contrôle (2001-2005)	Calage (2001-2005)	Contrôle (1996-2000)	Moyenne en calage	Moyenne en contrôle
Nash (Q)	0.755	0.254	0.567	0.382	0.661	0.318
Nash (\sqrt{Q})	0.727	0.318	0.645	0.427	0.686	0.372
Nash (ln Q)	0.665	0.358	0.680	0.435	0.672	0.396
Rapport des volumes annuels Calculés/Observés	0.985	0.739	0.975	0.852	0.980	0.795

Tableau 15 : Critères de Nash et bilan sur le bassin de Foix

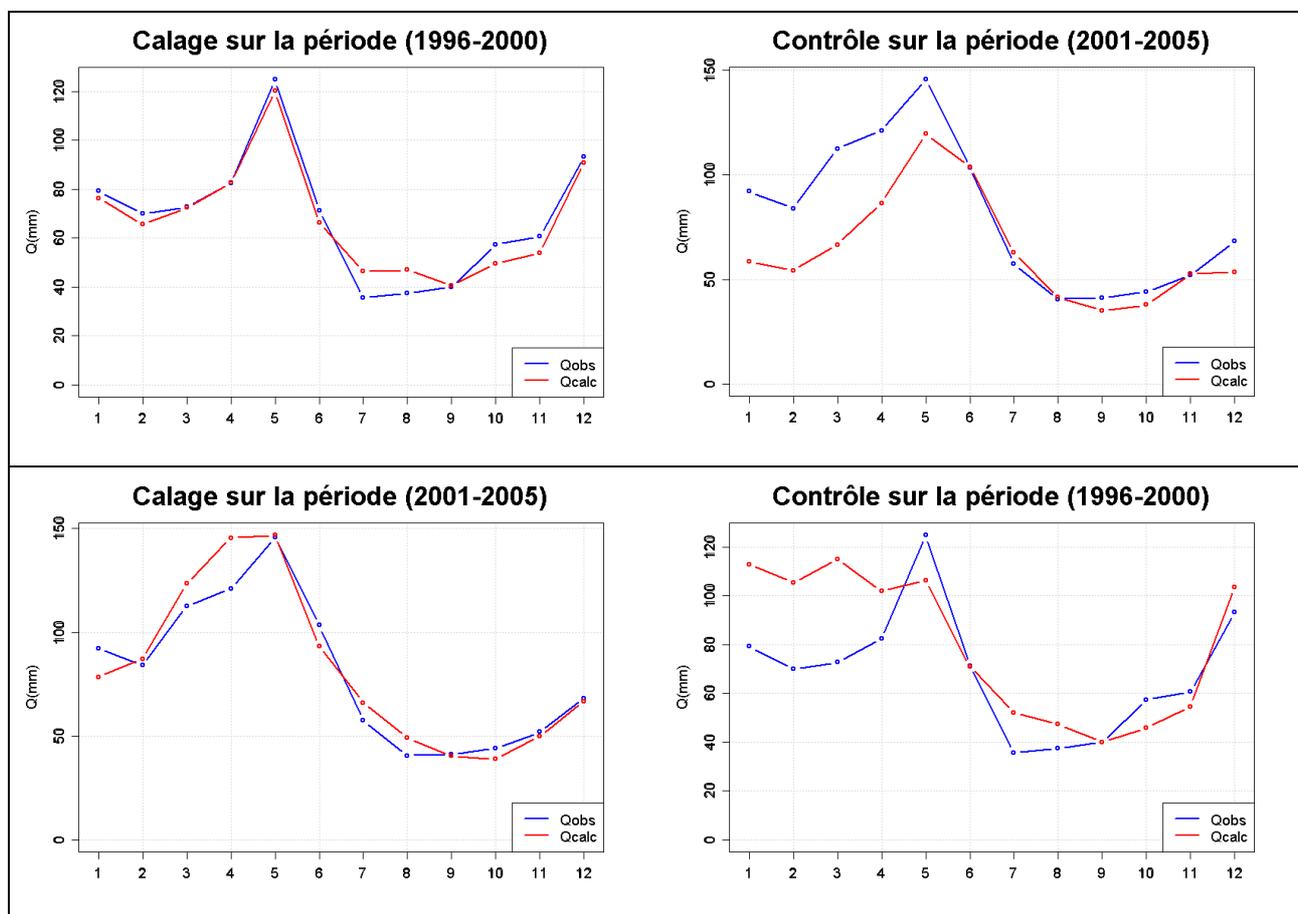


Figure 33 : Débits mensuels interannuels calculés et observés en calage et contrôle sur le bassin de Foix

Le bassin de La Garonne à Portet

GR4J	Calage (1996-2000)	Contrôle (2001-2005)	Calage (2001-2005)	Contrôle (1996-2000)	Moyenne en calage	Moyenne en contrôle
Nash (Q)	0.826	0.668	0.759	0.717	0.792	0.692
Nash (\sqrt{Q})	0.836	0.714	0.819	0.758	0.827	0.736
Nash (ln Q)	0.831	0.748	0.848	0.773	0.839	0.760
Rapport des volumes annuels Calculés/Observés	0.981	0.820	0.973	0.945	0.977	0.882

Tableau 16 : Critères de Nash et bilan sur le bassin de Portet

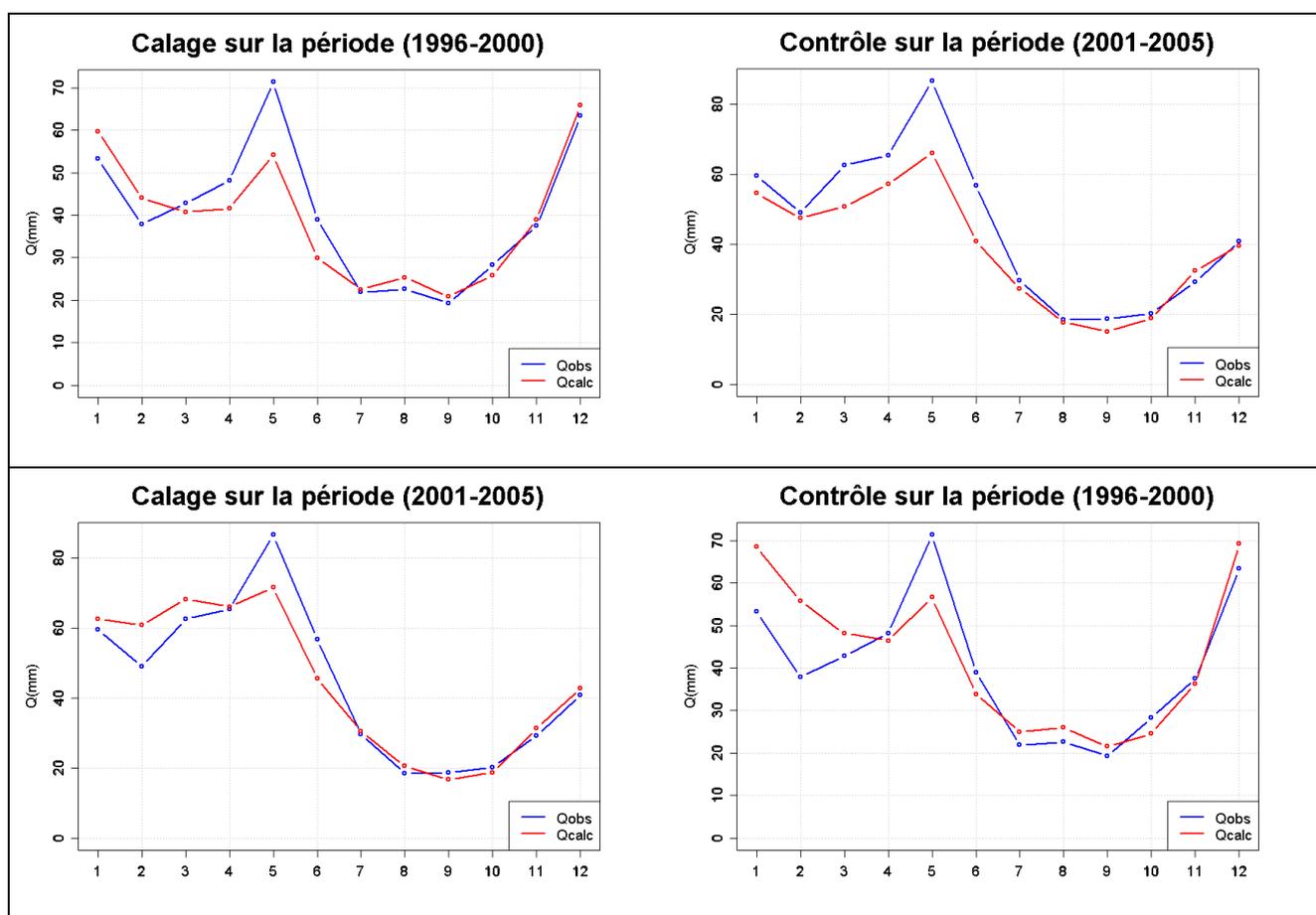


Figure 34 : Débits mensuels interannuels calculés et observés en calage et contrôle sur le bassin de Portet

Annexe 5 : Chroniques des débits simulés sur les neuf sous-bassins

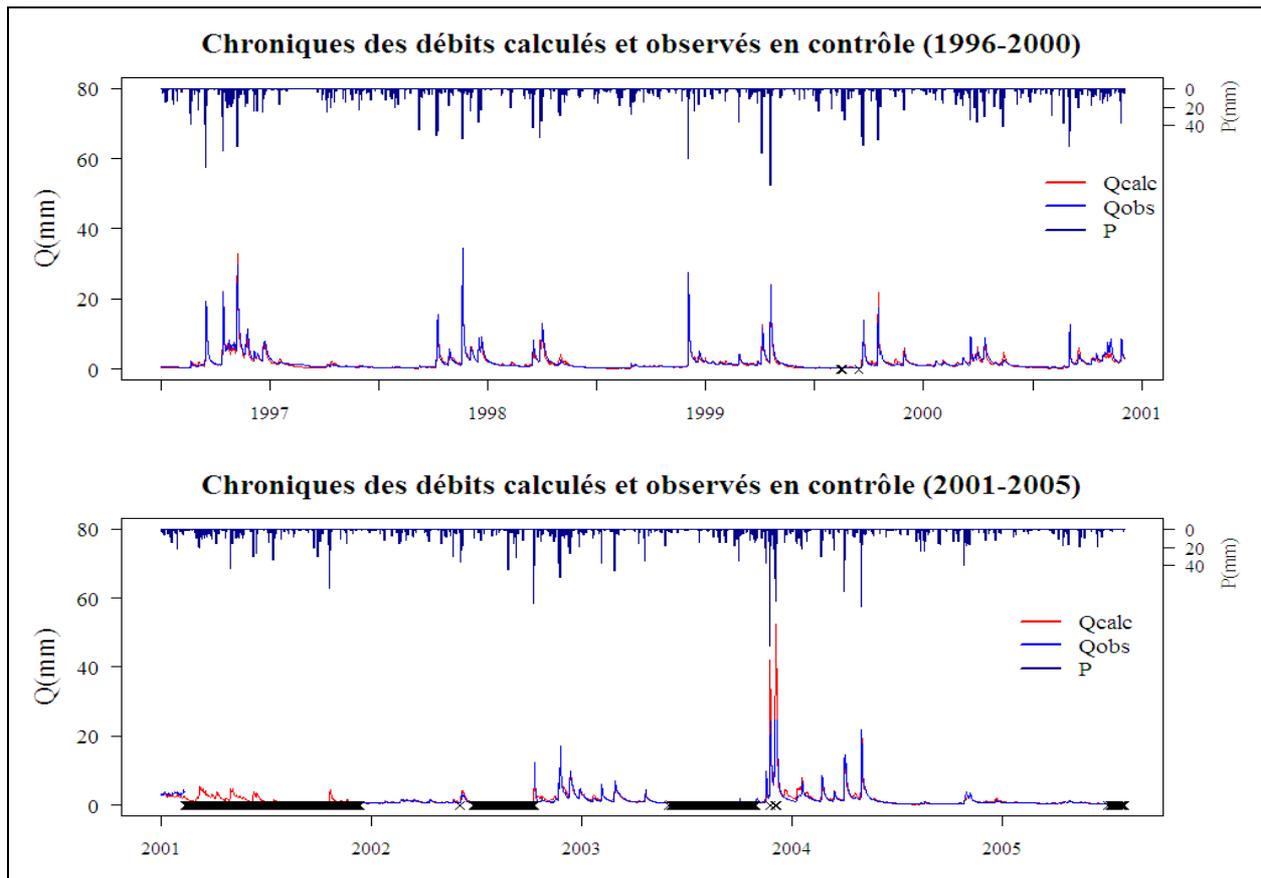


Figure 35 : Chroniques des débits simulés et observés et de pluie sur le bassin du Tarn à Millau

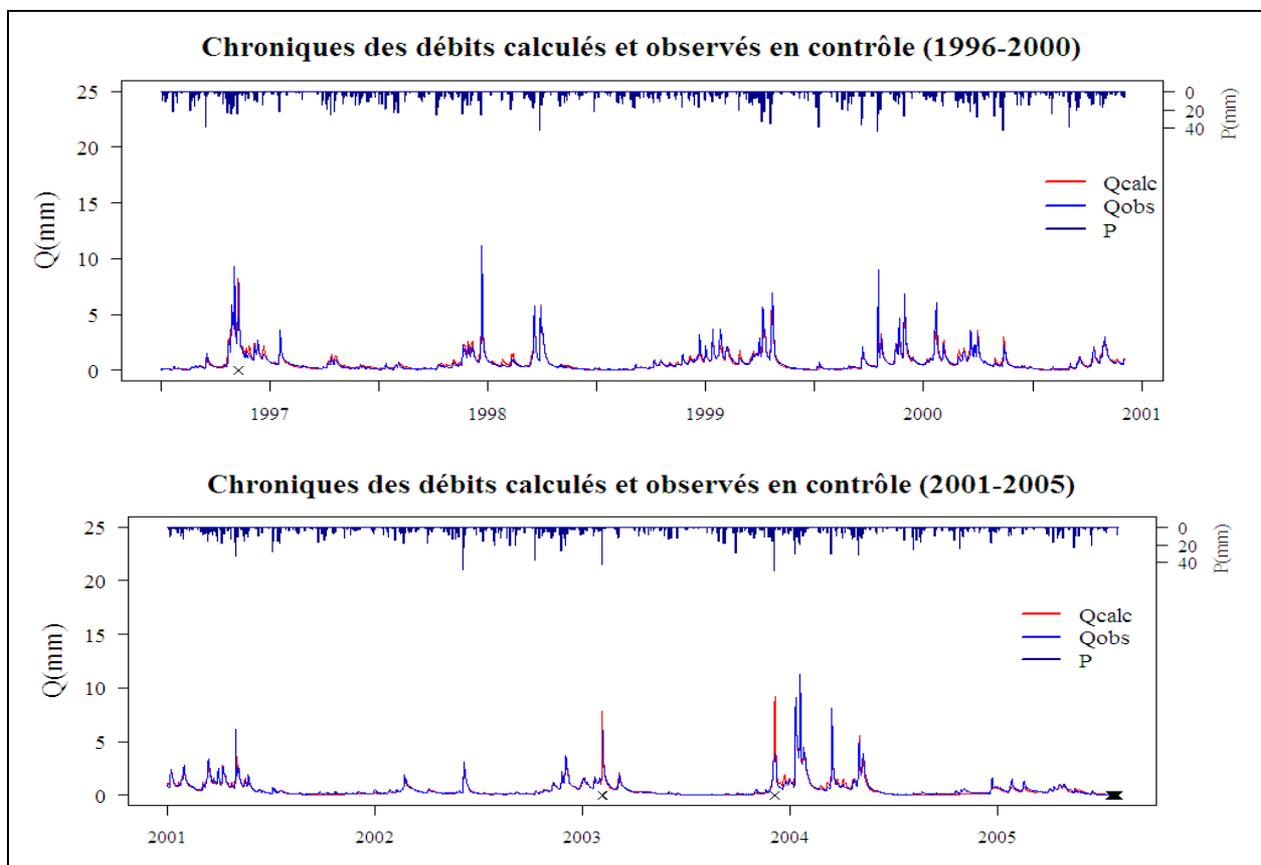


Figure 36 : Chroniques des débits simulés et observés et de pluie sur le bassin de l'Aveyron à Loubéjac

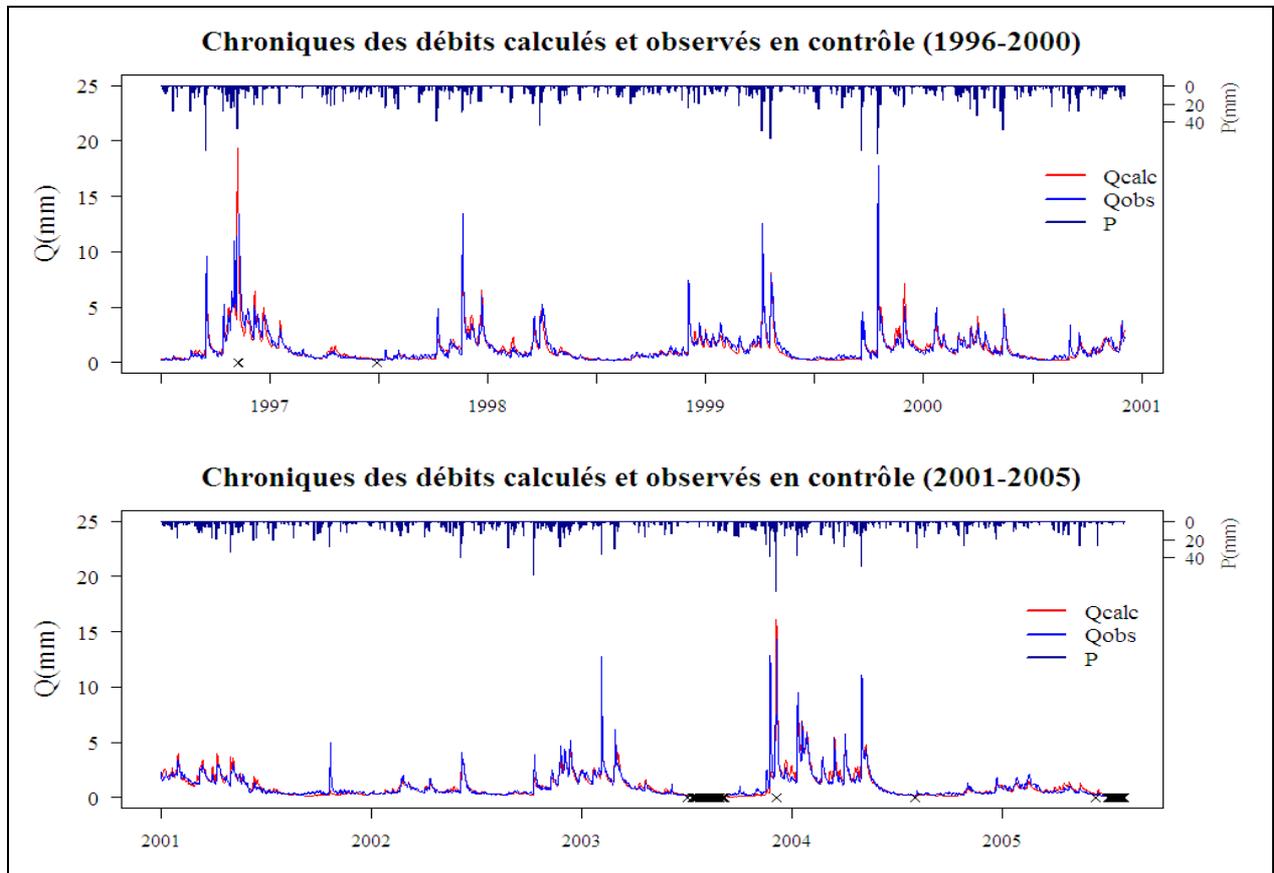


Figure 37 : Chroniques des débits simulés et observés et de pluie sur le bassin du Tarn à Villemur

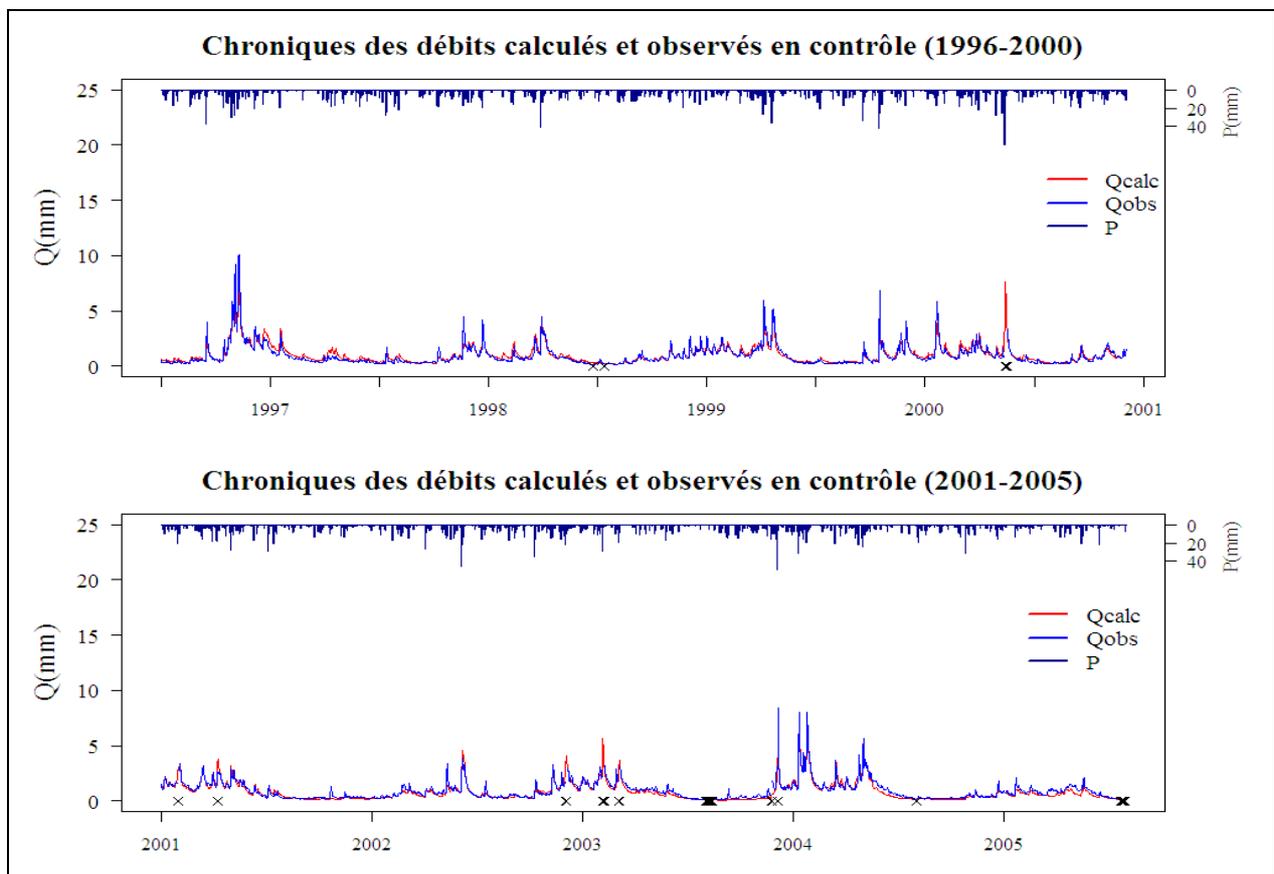


Figure 38 : Chroniques des débits simulés et observés et de pluie sur le bassin de la Garonne à Lamagistère

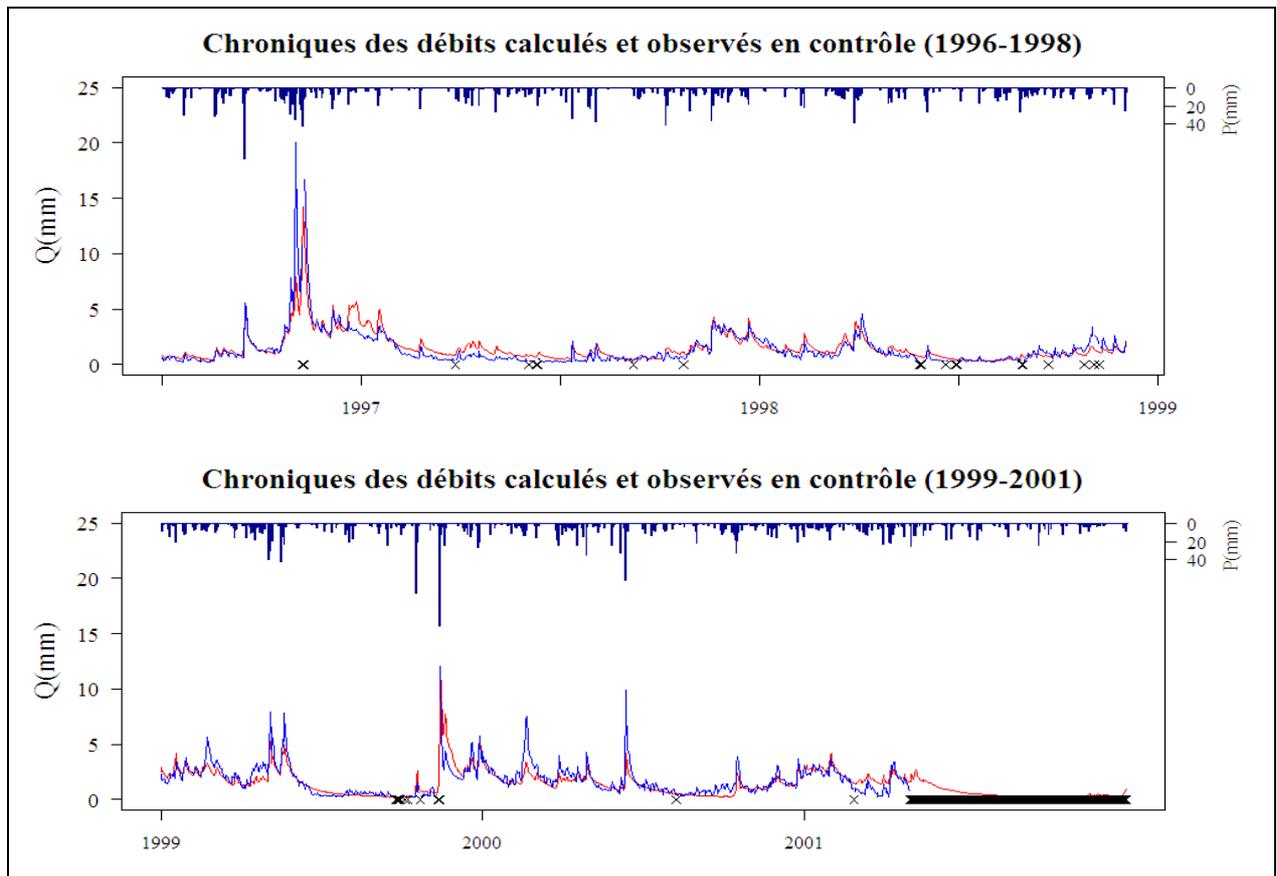


Figure 39 : Chroniques des débits simulés et observés et de pluie sur le bassin de l'Agout à Lavaur

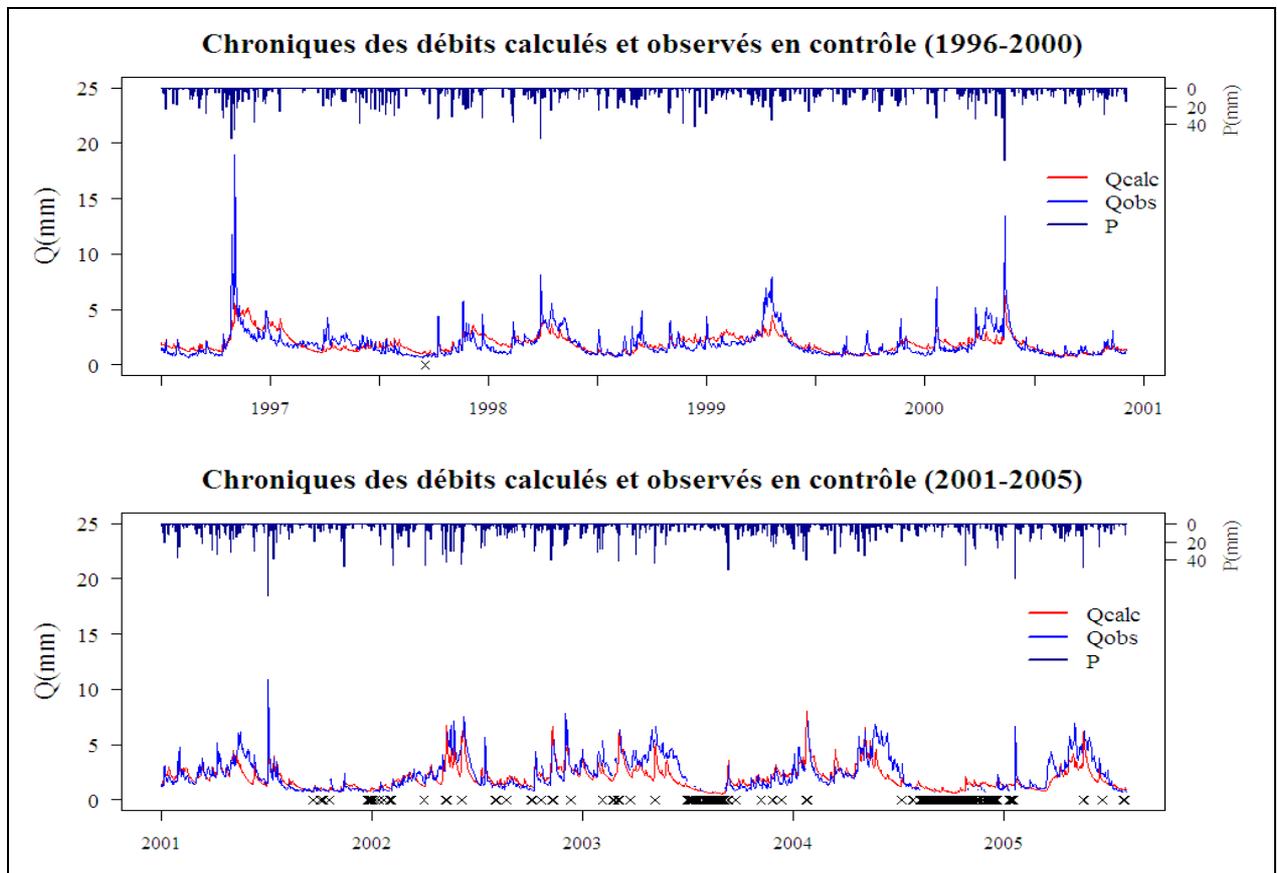


Figure 40 : Chroniques des débits simulés et observés et de pluie sur le bassin de la Garonne à St Gaudens

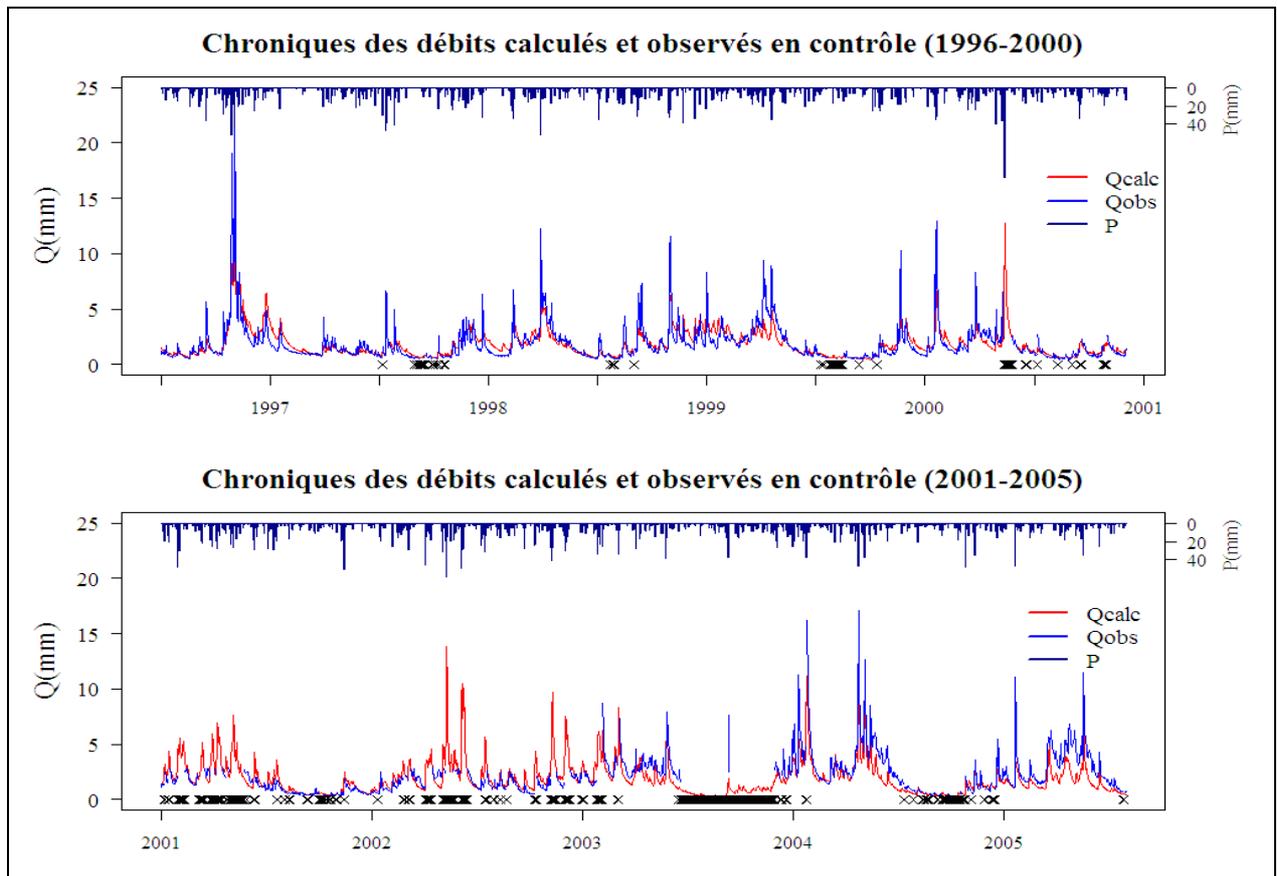


Figure 41 : Chroniques des débits simulés et observés et de pluie sur le bassin du Salat à Roquefort

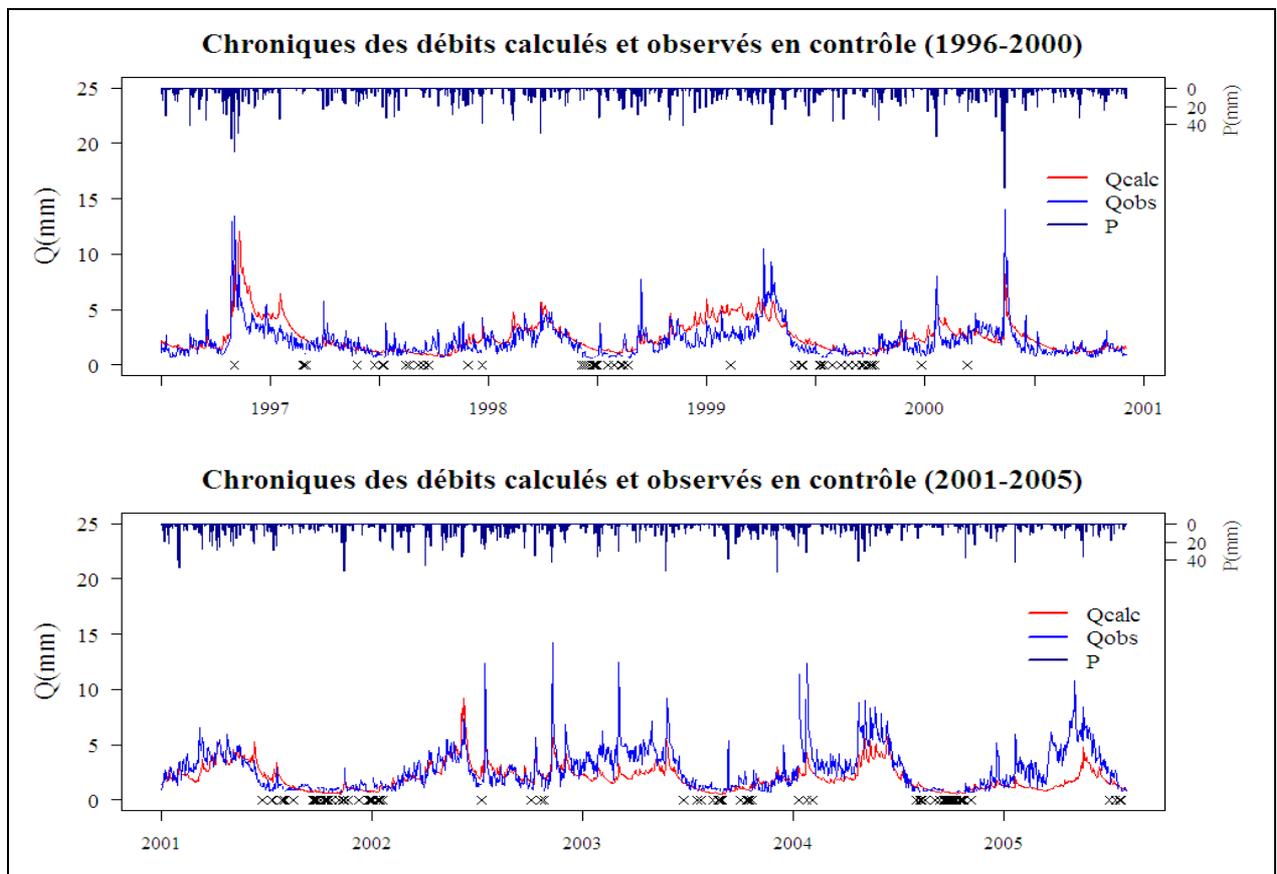


Figure 42 : Chroniques des débits simulés et observés et de pluie sur le bassin de l'Ariège à Foix

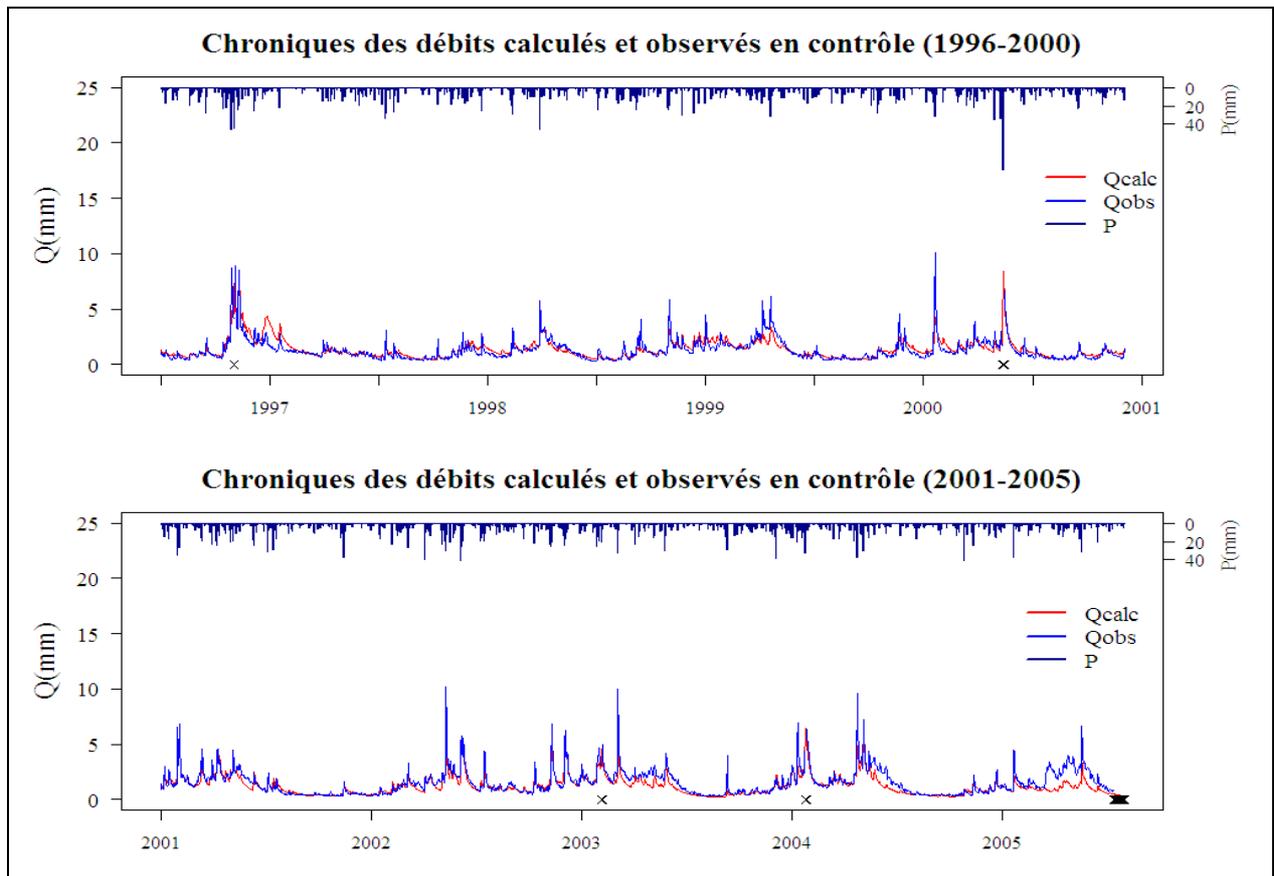


Figure 43 : Chroniques des débits simulés et observés et de pluie sur le bassin de la Garonne à Portet