

**Université Pierre et Marie Curie, École des Mines de Paris
& École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts**

**Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie
Parcours Hydrologie-Hydrogéologie**

**Naturalisation des débits et modélisation hydrologique
sur des sous-bassins versant de la Garonne à Lamagistère**

Cécile Agosta

Tuteurs : Anne Dupeyrat, Frédéric Hendrickx



**Laboratoire National en
Hydraulique et Environnement
EDF Recherche et Développement
Site de Chatou**

29 Juin 2007



Merci à :

- Anne Dupeyrat et Frédéric Hendrickx, mes tuteurs, qui pendant ces 5 mois m'ont guidée dans mes recherches et sur les chemins de l'île de Chatou ;
- Patrick Cosandier, mon collègue de bureau, pour son soutien dans mes moments de stress ;
- Enfin, merci aux membres du LNHE et aux stagiaires pour leur bonne humeur du matin, qui m'a permis de commencer gaiement mes journées.

Résumé

Les besoins croissants en eau sur le bassin de la Garonne ont conduit à des situations de tensions entre les différents usagers, notamment en période estivale, exacerbées par les sécheresses de 2003 et 2005. Dans ce contexte, EDF R&D, en partenariat avec le CEMAGREF et l'Agence de l'Eau Adour-Garonne, a répondu à un Appel à Proposition de Recherche du MEDD ayant pour but d'examiner l'état actuel de la ressource en eau sur le bassin versant de la Garonne à Lamagistère indépendamment des usages, et d'estimer l'évolution probable de cette ressource d'ici 2030 dans la perspective d'un réchauffement climatique. Les travaux de recherche réalisés pendant ce stage de Master 2 correspondent à la première étape de ce projet.

Après avoir découpé le bassin de la Garonne à Lamagistère en neuf sous-bassins versants, nous avons étudié les régimes hydrologiques des sous-bassins amont, influencés par la gestion des retenues pour l'hydroélectricité et par des transferts d'eau entre bassins. Parmi eux, seuls les bassins du Tarn à Millau et du Salat à Roquefort ont conservé un comportement hydrologique quasi-naturel, du fait de leur faible anthropisation.

Une méthodologie a été développée pour « naturaliser » les débits influencés par l'hydroélectricité, c'est-à-dire pour reconstituer les débits qui seraient passés à leur exutoire s'il n'y avait pas eu de gestion de la ressource par l'homme. Cette méthodologie a ensuite été appliquée au cas concret du sous-bassin versant de l'Ariège à Foix.

Le travail final a consisté à modéliser le fonctionnement hydrologique naturel des sous-bassins du Tarn à Millau et du Salat à Roquefort, puis de l'Ariège à Foix en s'appuyant sur son débit naturalisé, avec le modèle conceptuel spatialisé CEQUEAU.

Abstract

The increasing needs of water on the catchment area of the river Garonne led to situations of tensions between different users, particularly in summer, exacerbated by drynesses of 2003 and 2005. In this context, EDF R&D in partnership with CEMAGREF and the « Agence de l'Eau Adour-Garonne » answered to a proposal of research made by the MEDD, having for goal to examine the current state of water resources on the catchment area of the Garonne in Lamagistère independently of uses, and to consider the evolution of this resource from now to 2030 by taking the greenhouse effect into account. The research tasks completed during this training course of Master 2 correspond to the first stage of this project.

After having cut out the catchment area of the Garonne in Lamagistère in nine sub-basins, we studied the hydrological regimes of upstream sub-basins, influenced by the management of man-made reservoirs for hydroelectricity and by transfers of water between basins. Among them, only the basins of the Tarn in Millau and the Salat in Roquefort preserved a natural hydrological behavior, because of their weak anthropisation.

A methodology was developed to “naturalize” flows influenced by hydroelectricity, i.e. to reconstitute the flows which would have passed to their outlet if there were no stock management. This methodology was then applied to the concrete case of the sub-basin of the Ariège in Foix.

Final work consisted in simulating the natural hydrological behavior of sub-basins of the Tarn in Millau and the Salat in Roquefort, and then of the Ariège in Foix on the basis of its naturalized flow, with the conceptual model CEQUEAU.

Table des Matières

Résumé	3
Abstract	3
Table des Matières	4
Table des Figures.....	6
Introduction	7
1 Enjeux de l'étude du bassin versant de la Garonne à Lamagistère.....	8
1.1 Etat des ressources en eaux sur le bassin.....	8
1.1.1 Le contexte global	8
1.1.2 Prélèvements et consommations sur le bassin.....	9
1.1.3 Déficits hydriques et gestion des étiages.....	10
1.2 Spécificités hydrologiques du bassin.....	11
1.2.1 Transferts.....	11
1.2.2 Retenues pour l'hydroélectricité et le soutien d'étiage	12
1.2.3 Prélèvements pour l'irrigation et l'alimentation en eau potable	13
1.3 Découpage en sous-bassins versant.....	13
1.3.1 Mode de découpage du bassin.....	13
1.3.2 Caractéristiques des sous-bassins versant	14
2 Méthodologie de naturalisation et de modélisation hydrologique des débits	14
2.1 Naturalisation des Débits.....	14
2.1.1 Enjeux de la naturalisation	14
2.1.2 Principe de la naturalisation	15
2.2 Le modèle CEQUEAU	18
2.2.1 Présentation	18
2.2.2 Fonction de production.....	18
2.2.3 Fonction de transfert.....	19
2.2.4 Base de données	19
2.3 Etapes pratiques de la modélisation	20
2.3.1 Maillage du bassin versant et spatialisation des données avec ArcView	20
2.3.2 Critères d'évaluation du modèle	21
2.3.3 Stratégie d'optimisation des paramètres et de validation du modèle	22
3 Modélisation hydrologique de deux sous-bassins peu influencés.....	23
3.1 Bassin versant du Tarn à Millau	23
3.1.1 Données disponibles.....	23
3.1.2 Optimisation des paramètres et validation du modèle.....	24
3.2 Bassin versant du Salat à Roquefort	25
3.2.1 Données disponibles.....	25
3.2.2 Optimisation des paramètres et validation du modèle.....	26
4 Naturalisation des débits influencés par la gestion hydroélectrique : Etude du bassin versant de l'Ariège à Foix	28
4.1 Naturalisation	28
4.1.1 Application du principe de naturalisation au cas de Foix.....	28
4.1.2 Transferts des débits et application à la naturalisation de l'Ariège à Foix.....	31
4.1.3 Critique du débit naturalisé à Foix	35
4.2 Modélisation du fonctionnement hydrologique de l'Ariège à Foix	36
4.2.1 Modélisation du comportement hydrologique naturel du bassin	36
4.2.2 Validation de la modélisation de Foix naturalisé	38

5	Bilan et Perspectives	40
	Références bibliographiques	42
	Annexe 1 : Petit glossaire de la gestion des étiages	43
	Annexe 2 : Modèle CEQUEAU	44
	Annexe 3 : Traitement des données manquantes.....	46
	Annexe 4 : Performances du modèle hydrologique CEQUEAU en Calage/Validation sur le bassin du Tarn à Millau	47
	Annexe 5 : Performances du modèle hydrologique CEQUEAU en Calage/Validation sur le bassin du Salat à Roquefort.....	48
	Annexe 6 : Performances du modèle hydrologique CEQUEAU en Calage/Validation sur le bassin de l'Ariège naturalisé à Foix	49
	Annexe 7 : Bilan des données disponibles pour la naturalisation des sous-bassins restant à traiter	50

Table des Figures

Figure 1 : Réseau hydrographique principal du bassin de la Garonne (<i>gauche</i>) Bassin Adour-Garonne (<i>droite</i>) Bassin de la Garonne à Lamagistère.....	8
Figure 2 : Nappes captives et libres sur le bassin Adour-Garonne (AEAG).....	9
Figure 3 : Prélèvements, consommations à l'étiage et stockage de l'eau en millions de m ³ (Mm ³) sur les bassins Garonne-Ariège et Tarn-Aveyron, données de 2001 ou antérieures (PGE Garonne-Ariège et CG Tarn-Aveyron).....	10
Figure 4 : Evolution des volumes (<i>gauche</i>) prélevés sur l'ensemble du bassin Adour-Garonne (<i>droite</i>) consommés sur le bassin Garonne-Ariège ; en millions de m ³ (Mm ³) (PGE Garonne-Ariège et AEAG).....	10
Figure 5 : Rivières déficitaires d'après le SDAGE en 2003 (AEAG).....	11
Figure 6 : Transferts d'eau par canaux et dérivations sur le bassin de la Garonne à Lamagistère.....	11
Figure 7 : Principales retenues du bassin (<i>gauche</i>) pour le soutien d'étiage (<i>droite</i>) pour l'hydroélectricité (AEAG).....	12
Figure 8 : Irrigation par communes sur le bassin de la Garonne à Lamagistère.....	13
Figure 9 : Découpage en sous-bassins versants du bassin de la Garonne à Lamagistère.....	14
Figure 10 : Schéma de la fonction production d'une maille CEQUEAU (Hendrickx, 2001).....	18
Figure 11 : (<i>gauche</i>) Schéma de la fonction de transfert de CEQUEAU (Hendrickx, 2001) (<i>droite</i>) Exemple sur le bassin versant de la Garonne à Montréjeau.....	19
Figure 12 : Bassin de la Garonne à Lamagistère maillé.....	20
Figure 13 : Maillage du bassin versant du Tarn à Millau.....	23
Figure 14 : Comparaison mesure/modèle des débits mensuels interannuels à Millau en calage et validation.....	24
Figure 15 : Comparaison mesure/modèle des débits classés à Millau en calage et validation.....	25
Figure 16 : Maillage du bassin versant du Salat à Roquefort.....	26
Figure 17 : Comparaison mesure/modèle des débits mensuels interannuels à Roquefort en calage et validation.....	27
Figure 18 : Comparaison mesure/modèle des débits classés à Roquefort en calage et validation.....	27
Figure 19 : Bassin versant de l'Ariège à Foix.....	28
Figure 20 : Schéma de fonctionnement du « système l'Hospitalet ».....	30
Figure 21 : Chroniques de débits de l'Ariège à Foix.....	31
Figure 22 : Périodicité hebdomadaire de l'Ariège à Foix et des débits turbinés sur le bassin (<i>gauche</i>) Turbinés des retenues du bassin (<i>droite</i>) Foix et Somme des turbinés.....	31
Figure 23 : Comparaison de la périodicité hebdomadaire de Foix et de la somme des débits turbinés (<i>gauche</i>) bruts (<i>droite</i>) transférés d'un coefficient α	34
Figure 24 : Comparaisons entre le débit mesuré et le débit naturalisé à Foix sur la période 1990-2004 (<i>gauche</i>) Chroniques sur l'année 1999 (<i>droite</i>) Périodicités hebdomadaires.....	35
Figure 25 : Comparaisons entre le débit mesuré et le débit naturalisé lissé à Foix sur la période 1990-2004 (<i>gauche</i>) Périodicités hebdomadaires (<i>droite</i>) Débits mensuels inter-annuels.....	36
Figure 26 : Comparaison mesure/modèle des débits mensuels interannuels sur Foix naturalisé en calage et validation.....	37
Figure 27 : Comparaison mesure/modèle des débits classés sur Foix naturalisé en calage et validation.....	38
Figure 28 : Comparaison mesure/modèle des débits mensuels interannuels et des débits classés en calage et en validation pour Foix influencé.....	39
Figure 29 : Comparaison entre mesure et modèle du Tarn à Millau en calage sur 1987(1988-1995) et validation sur 1996(1997-2004).....	47
Figure 30 : Comparaison entre mesure et modèle du Tarn à Millau en calage sur 1996(1997-2004) et validation sur 1987(1988-1995).....	47
Figure 31 : Comparaison entre mesure et modèle du Salat à Roquefort en calage sur 1975(1976-1989) et validation sur 1990(1991-2004).....	48
Figure 32 : Comparaison entre mesure et modèle du Salat à Roquefort en calage sur 1990(1991-2004) et validation sur 1975(1976-1989).....	48
Figure 33 : Comparaison entre mesure et modèle de l'Ariège à Foix naturalisé en calage sur 1989(1990-1996) et validation sur 1997(1998-2004).....	49
Figure 34 : Comparaison entre mesure et modèle de l'Ariège à Foix naturalisé en calage sur 1997(1998-2004) et validation sur 1989(1990-1996).....	49
Figure 35 : Bassin de la Garonne à Montréjeau maillé.....	50
Figure 36 : Bassins de l'Agout à Lavaur et du Tarn à Villemur maillés.....	50
Figure 37 : Bassin de l'Aveyron à Loubéjac.....	51

Introduction

La « modélisation hydrologique et la naturalisation des débits de sous-bassins versant de la Garonne à Lamagistère » constituent la première étape d'un projet de recherche de plus grande ampleur regroupant l'Agence de l'Eau Adour-Garonne, le CEMAGREF et le Laboratoire National en Hydraulique et Environnement (LNHE, EDF R&D). Ce stage a été réalisé sur le site EDF de l'île de Chatou du 20 Janvier au 30 Juin 2007, sous la tutelle d'Anne Dupeyrat et de Frédéric Hendrickx.

Malgré des ressources en eau relativement abondantes sur le bassin de la Garonne, les besoins croissants en eau ont conduit à des situations de tension entre les différents usagers en période de sécheresse. Les étiages sévères de 2003 et 2005, généralisés sur le territoire français, ont exacerbé ces tensions et soulevés de nombreuses interrogations quant à la pérennité de la gestion actuelle de la ressource, dans la perspective du réchauffement de la planète. Des questions se posent notamment en ce qui concerne l'impact du changement climatique sur la quantité de la ressource et sur l'évolution de la fréquence des événements de sécheresse critiques.

C'est dans ce contexte que le CEMAGREF, EDF et l'Agence de l'Eau Adour-Garonne ont répondu à un Appel à Proposition de Recherche « Risque Décision Territoire » (RDT) lancé par le (feu) Ministère de l'Environnement et du Développement Durable concernant « l'évolution de la disponibilité en eau et des usages et leurs conséquences pour la gestion de la ressource superficielle » sur le bassin de la Garonne à Lamagistère à l'horizon 2030. Le CEMAGREF travaillera sur ce projet de recherche en collaboration avec le pôle hydrologie d'EDF pendant une durée de 2 ans. Le bassin de la Garonne à Lamagistère est en effet un bassin à fort intérêt pour EDF par la présence de nombreuses retenues hydroélectriques et de la Centrale nucléaire de Golfech à proximité de son exutoire.

Les recherches effectuées pendant ce stage correspondent à la première étape de ce projet, consistant à effectuer un bilan quantitatif des ressources disponibles sur le bassin de la Garonne indépendamment des usages, en modélisant le fonctionnement hydrologique naturel du bassin. Pendant ces 5 mois, nous avons travaillé sur un modèle pluie-débit CEQUEAU, mais d'autres modèles seront mis en place par la suite par les autres partenaires du projet pour multiplier les résultats et mieux encadrer les incertitudes.

L'étape suivante du projet consistera à projeter jusqu'en 2030 des chroniques de pluie et de température, en s'appuyant sur les sorties des Modèles de Circulation Générale. Ces chroniques permettront d'obtenir en sortie des modèles pluie-débit la ressource en eau naturelle qui sera disponible à cette échéance. Il s'agira ensuite d'élaborer des scénarios de gestion de la ressource et d'évaluer leur pérennité en les appliquant aux résultats obtenus en sortie des modèles.

1 Enjeux de l'étude du bassin versant de la Garonne à Lamagistère

1.1 Etat des ressources en eaux sur le bassin

1.1.1 Le contexte global

La Garonne prend sa source dans le Val d'Aran, dans les Pyrénées espagnoles, et parcourt 575 km avant de se jeter dans l'Océan Atlantique. La surface totale du bassin versant est de 55 000 km², mais nous nous restreindrons à son étude jusqu'à Lamagistère, soit un bassin de 32 250 km². Cette partie du bassin versant contient les zones amont situées dans les Pyrénées et le Massif Central, ainsi qu'une grande proportion de plaines cultivées.

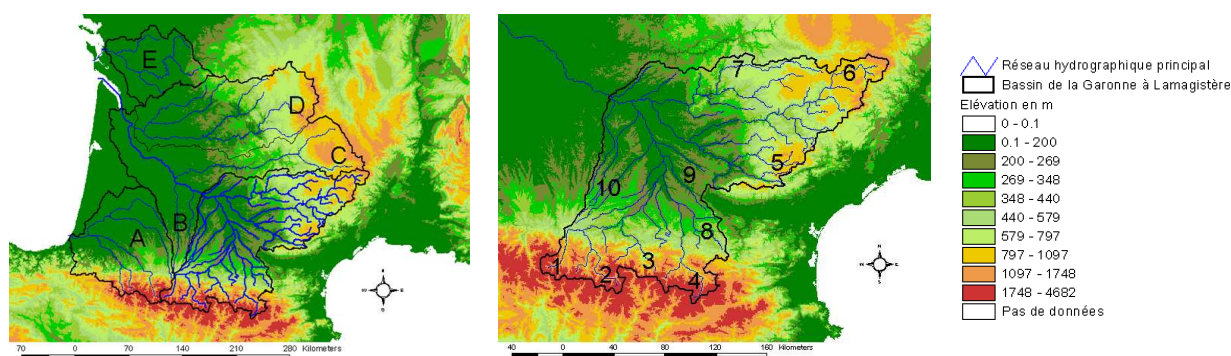


Figure 1 : Réseau hydrographique principal du bassin de la Garonne (*gauche*) Bassin Adour-Garonne (*droite*) Bassin de la Garonne à Lamagistère

Ci-dessous, les chiffres et lettres en gras entre parenthèses renvoient à la localisation des bassins sur la [Figure 1](#).

Le bassin de la Garonne à Lamagistère est formé de deux branches :

- **Une branche « Pyrénées »**, constituée de la Garonne elle-même (**2**), avec, en rive droite, des affluents relativement importants comme le Salat (**3**) et l'Ariège (**4**), et plus modestes comme l'Hers Mort (**9**). En rive gauche, la Garonne reçoit la Neste (**1**) et les rivières de Gascogne, composées d'amont en aval du Touch, de la Save, de la Gimone et de l'Arrats (**10**).
- **Une branche « Massif Central »**, formée par le Tarn (**6**) et ses principaux affluents, qui sont, en rive gauche, l'Agout (**5**) et, en rive droite, l'Aveyron (**7**).

Les principaux cours d'eau situés aux alentours de ce bassin sont l'Adour (**F**), la Charente (**E**), la Dordogne (**D**) et le sous-bassin aval de la Garonne composé des rivières de Gascogne (**B**) et du Lot (**C**).

Ce vaste bassin versant occupe une position de carrefour climatique ; il est soumis à des influences multiples dues à la présence de l'Atlantique et de la Méditerranée, des Pyrénées et du Massif Central, de régions de plaines et de montagnes.

Du point de vue climatique, la Garonne subit deux influences principales :

- **Atlantique**, par la branche « Pyrénées » en amont de Toulouse : les flux océaniques de Nord-ouest ou Nord entraînent généralement des hausses de débits sur tous les bassins pyrénéens.
- **Méditerranéenne**, par la branche « Massif Central » en amont de Montauban : les flux de Sud ou les retours d'Est, avec minimum dépressionnaire en Méditerranée, entraînent des épisodes cévenols, susceptibles de faire monter significativement les débits du Tarn et, par propagation, ceux de la Garonne à Lamagistère.

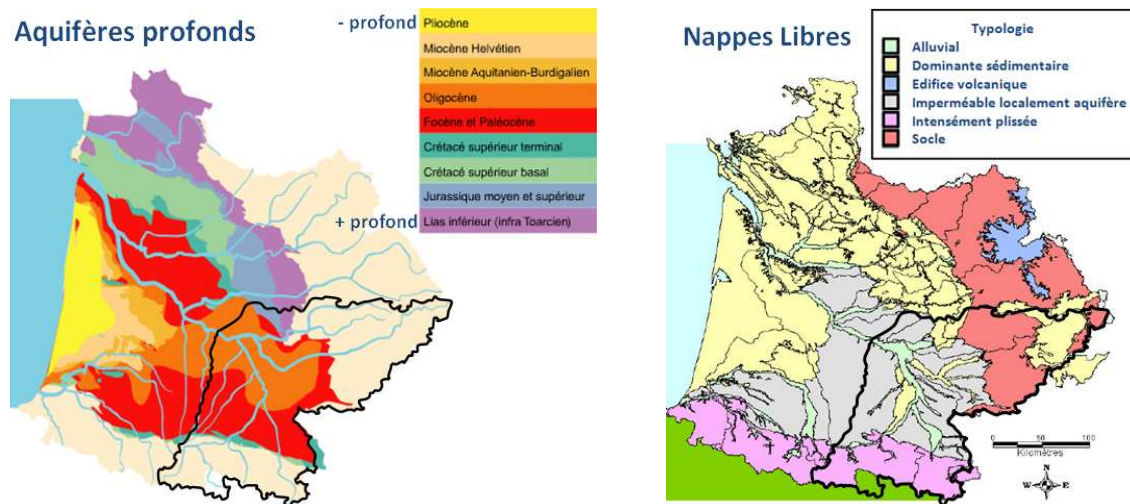


Figure 2 : Nappes captives et libres sur le bassin Adour-Garonne (AEAG*)
Contour noir : limite du bassin de la Garonne à Lamagistère

Les aquifères du bassin de la Garonne à Lamagistère sont également divisés en deux grands ensembles :

- **Les Pyrénées et le Massif Central**, aux ressources en eau souterraine en général peu importantes, sauf localement avec notamment les karsts des Grands Causses et les massifs calcaires pyrénéens, d'extension réduite ;
- **Le bassin aquitain**, empilement successif de couches géologiques dont une partie renferme des ressources importantes en eau souterraine.

Les principaux aquifères localisés sur le bassin sont présentés en Figure 2. Les aquifères profonds, séparés de la surface et entre eux par des couches imperméables, s'étendent sur une grande partie du bassin aquitain. Les nappes libres alimentant ces aquifères sont situées en bordure du bassin, à l'est essentiellement. Une partie de ces nappes se trouve sur les plateaux calcaires karstiques du Massif Central (Grands Causses). Enfin, au nord-ouest de notre bassin versant et au sud/sud-est du bassin Adour-Garonne, se trouvent des terrains globalement imperméables, appelés « molasse », sur lesquels s'étendent des nappes alluviales importantes le long des grands cours d'eau.

1.1.2 Prélèvements et consommations sur le bassin

Les chiffres de prélèvement et de consommation en eau présentés ici concernent le bassin Tarn-Aveyron et le bassin Garonne-Ariège, qui comprend le linéaire de la Garonne jusqu'à Bordeaux et les sous-bassins de la Garonne amont, de la Neste, du Salat et de l'Ariège. Les données disponibles sur ces deux bassins, présentées en Figure 3, ne correspondent donc pas exactement aux limites du bassin de la Garonne à Lamagistère, mais elles donnent une bonne approximation de sa situation. Les volumes indiqués concernent les eaux prélevées dans les rivières et les nappes d'accompagnement, et leur consommation en période d'étiage, c'est-à-dire entre le 1^{er} Juillet et le 31 Octobre.

Selon les utilisations, l'eau prélevée revient plus ou moins au milieu naturel. La notion de « consommation » est donc différente de celle de « prélèvement ». Le prélèvement recouvre toute l'eau captée dans un milieu naturel pour un usage, tandis que la consommation représente l'eau réellement utilisée et qui ne retourne pas par conséquent au milieu naturel. Sur une année, on estime que l'eau prélevée pour l'irrigation ne retourne qu'à 30% dans le milieu naturel, le reste étant évaporé ou transpiré par les cultures, alors que 65% de l'eau prélevée pour

* AEAG : Agence de l'Eau Adour-Garonne (voir Ressources bibliographiques)

l'Alimentation en Eau Potable (AEP) et 93% des volumes prélevés pour l'industrie retournent dans le milieu naturel après utilisation.

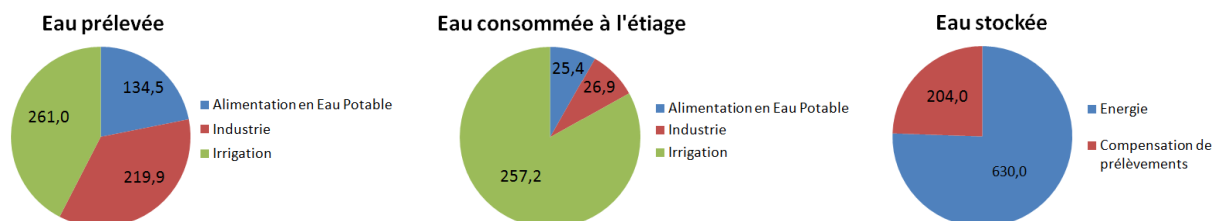


Figure 3 : Prélèvements, consommations à l'étiage et stockage de l'eau en millions de m3 (Mm3) sur les bassins Garonne-Ariège et Tarn-Aveyron, données de 2001 ou antérieures (PGE Garonne-Ariège et CG Tarn-Aveyron)

On peut remarquer sur la Figure 3 que les prélèvements sont répartis de manière assez équilibrée sur l'année entre l'AEP, l'industrie et l'irrigation. Il n'en est pas de même en période d'étiage, où plus de 80% des volumes d'eau consommés couvrent les besoins de l'irrigation. Quant à l'eau stockée dans les retenues, elle l'est à 80% pour la production d'électricité, mais elle n'induit aucune consommation, la quasi-totalité (99%) des volumes prélevés étant rejetés en rivière.

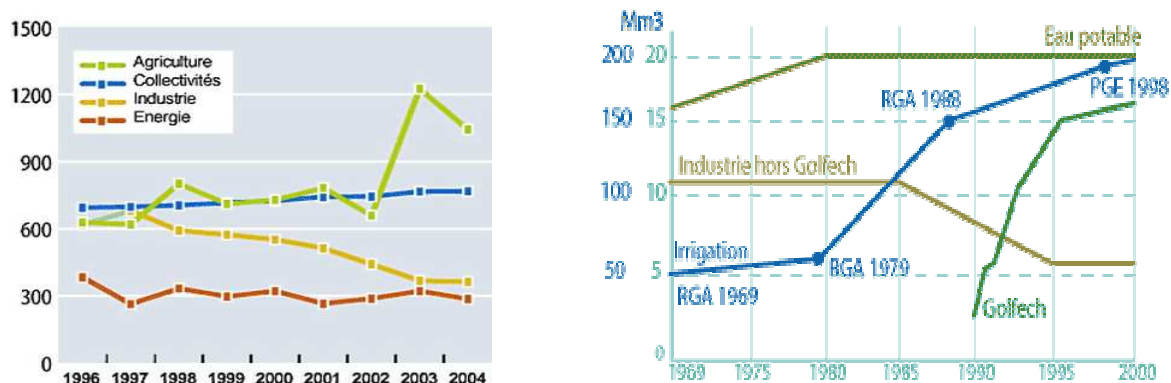


Figure 4 : Evolution des volumes (*gauche*) prélevés sur l'ensemble du bassin Adour-Garonne (*droite*) consommés sur le bassin Garonne-Ariège ; en millions de m3 (Mm3) (PGE Garonne-Ariège et AEAG) – RGA : Recensement Général de l'Agriculture –

Les prélèvements pour l'AEP et l'industrie sont stables voir en baisse depuis 1980 sur le bassin Adour-Garonne, comme le montre les courbes de la Figure 4 (*gauche*). Il en est de même pour les consommations associées sur le bassin Garonne-Ariège (Figure 4, *droite*). On remarque que sur la figure de droite, la proportion entre l'échelle bleue foncée correspondant à l'irrigation et l'échelle bleue claire valable pour les autres usages est de 10 pour 1. Sur 30 ans, l'irrigation s'est nettement intensifiée sur le bassin de la Garonne-Ariège, mais on observe un ralentissement de la croissance de la surface irriguée depuis une dizaine d'année. Cependant, depuis l'étiage sévère de 2003, les volumes consommés pour l'irrigation ont sensiblement augmentés et ne sont pas encore redescendus aux niveaux d'avant 2003.

1.1.3 Déficiets hydriques et gestion des étiages

L'Agence de l'Eau Adour Garonne, sur le territoire de laquelle se situe le bassin de la Garonne à Lamagistère, a élaboré et adopté un Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE*) depuis 1996. Le SDAGE Adour-Garonne recommande l'élaboration de Plans de Gestion des Etiages (PGE*) par grandes unités hydrographiques.

* Voir Annexe 1 : Petit glossaire de la gestion des étiages

Ces PGE se basent sur la définition de débits minima à maintenir dans les cours d'eau en différents points nodaux. Ces débits objectifs d'été (DOE*) et débits de crise (DCR*) sont imposés par le SDAGE aux points stratégiques des grandes entités hydrographiques (points nodaux).

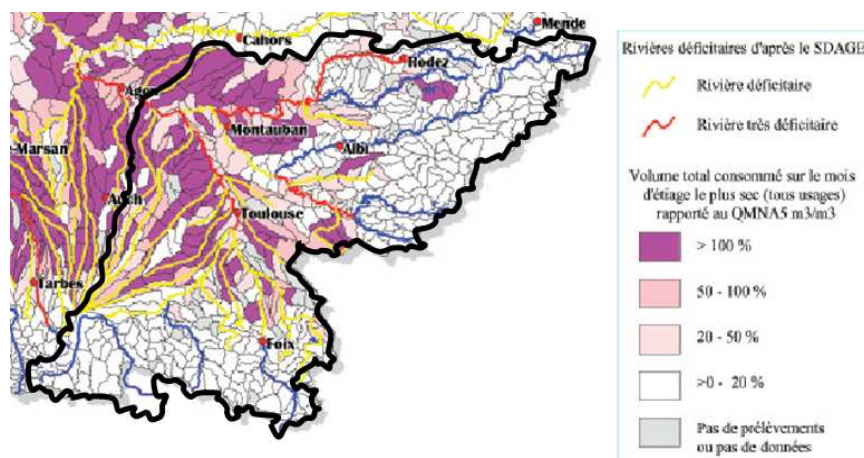


Figure 5 : Rivières déficitaires d'après le SDAGE* en 2003 (AEAG)

Les tronçons aval des rivières du bassin de la Garonne à Lamagistère sont tous déficitaires, voire très déficitaires sur la Garonne à l'aval de Toulouse, sur l'Aveyron à l'aval de Rodez et sur une partie de l'Agout (Figure 5). Cela signifie qu'aux points nodaux de ces rivières les débits se trouvent trop souvent en deçà des DOE et DCR définis par le SDAGE. On constate également sur la Figure 5 que les tronçons déficitaires se trouvent pour leur majorité sur des communes où la consommation totale en eau sur le mois d'été le plus sec est supérieure au débit moyen mensuel sec de récurrence 5 ans (QMNA5), sur lequel sont basés les calculs de DOE et de DCR.

1.2 Spécificités hydrologiques du bassin

1.2.1 Transferts

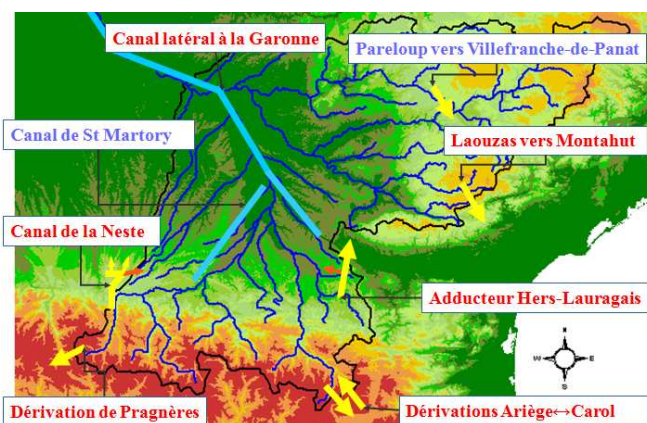


Figure 6 : Transferts d'eau par canaux et dérivations sur le bassin de la Garonne à Lamagistère.

Trois canaux parcourent le bassin de la Garonne à Lamagistère:

- **Le canal d'irrigation de Saint-Martory**, qui transporte 84 millions de m³ du 1^{er} Juillet au 31 Octobre. Il effectue un transfert d'eau interne au bassin depuis Saint-Martory, lieu de la prise d'eau dans la Garonne, jusqu'à Toulouse ;

* Voir Annexe 1 : Petit glossaire de la gestion des étiages

- **Le canal latéral à la Garonne** qui relie Toulouse à Bordeaux. Il transfère vers l'extérieur du bassin 79 millions de m³ du 1^{er} Juillet au 31 Octobre, qui sont prélevés dans la Garonne à Toulouse ;
- **Le canal d'irrigation de la Neste**, qui dérive l'eau de la Neste d'Aure à Sarrancolin pour réalimenter les rivières de Gascogne. Le volume détourné est de 97 millions de m³ entre le 1^{er} Juillet et de 31 Octobre. Une faible portion de cette eau revient à la Garonne dans notre bassin par l'intermédiaire du Touch, de la Save, de la Gimone et de l'Arrats.

Plusieurs dérivations transfèrent des volumes d'eau entre les bassins :

- **La dérivation de Pragnères** transfère 25 millions de m³ depuis le barrage de Cap-de-Long sur la Neste vers le Gave de Pau, à l'extérieur du bassin.
- **L'adducteur Hers-Lauragais** dérive 26 millions de m³ depuis le barrage de Montbel pour l'irrigation du Lauragais audois situé sur le bassin méditerranéen. 1 million de m³ reviennent vers le bassin de l'Hers Vif, via la Vixiège.
- **La dérivation de l'eau de la retenue de Laouzas**, sur le bassin de l'Agout, vers l'usine de Montahut située sur le versant méditerranéen.
- **La dérivation de l'eau de la retenue de Pareloup**, sur le bassin de l'Aveyron, vers la retenue de Villefranche-de-Panat, sur le bassin du Tarn, pour être turbinée à l'usine du Pouget.
- **Les dérivations Ariège-Carol**. Un transfert s'effectue depuis la retenue du Lanoux sur le versant de l'Ebre vers l'usine de l'Hospitalet sur le bassin de l'Ariège. Une dérivation de l'Ariège vers le Carol restitue l'année suivante le volume prélevé.

Ces canaux et dérivations sont localisés sur la carte de la Figure 6. Les noms en bleu indiquent les transferts internes au bassin de la Garonne à Lamagistère, et ceux en rouge les transferts vers d'autres bassins-versant.

1.2.2 Retenues pour l'hydroélectricité et le soutien d'étiage

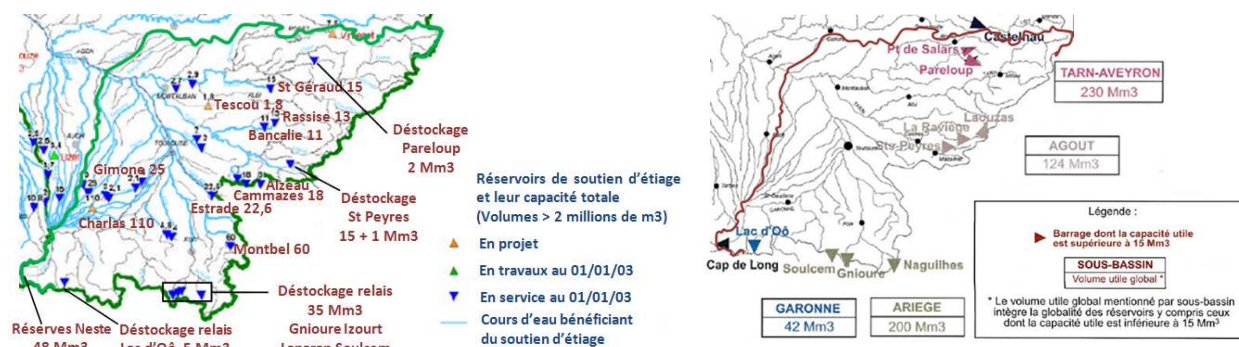


Figure 7 : Principales retenues du bassin (gauche) pour le soutien d'étiage (droite) pour l'hydroélectricité (AEAG)

Les stockages artificiels permettent un transfert d'eau d'une période à une autre. Trois types d'ouvrage peuvent être distingués :

- **Les ouvrages collinaires**, à vocation agricole, dont le nombre et les caractéristiques sont mal connus. Ceux dépassant une capacité d'un million de m³ sont rattachés aux ouvrages de soutien d'étiage dans la mesure où ils alimentent le réseau hydrographique.
- **Les réservoirs de soutien d'étiage** (et les ouvrages hydro-agricoles supérieurs à 1 Mm³), qui participent au maintien d'un débit minimum dans les cours d'eau. Ils sont répertoriés dans la Figure 7 (gauche). Le chiffre indiqué à côté du nom de chaque réservoir correspond à son volume, et les Déstockages correspondent aux volumes disponibles pour le soutien d'étiage dans les retenues hydroélectriques.

- **Les réservoirs hydroélectriques**, qui font tous l'objet d'une concession. Seuls les ouvrages autorisés à fonctionner par écluses sont considérés comme des ouvrages de stockage. Le bassin de la Garonne à Lamagistère couvrant une partie des Pyrénées et du Massif Central, zones de relief à fort potentiel hydroélectrique, il contient de nombreuses retenues de grande capacité qui sont réparties sur les zones amont du bassin. Les plus importantes d'entre elles sont présentées sur la carte de la [Figure 7](#) (droite).

1.2.3 Prélèvements pour l'irrigation et l'alimentation en eau potable

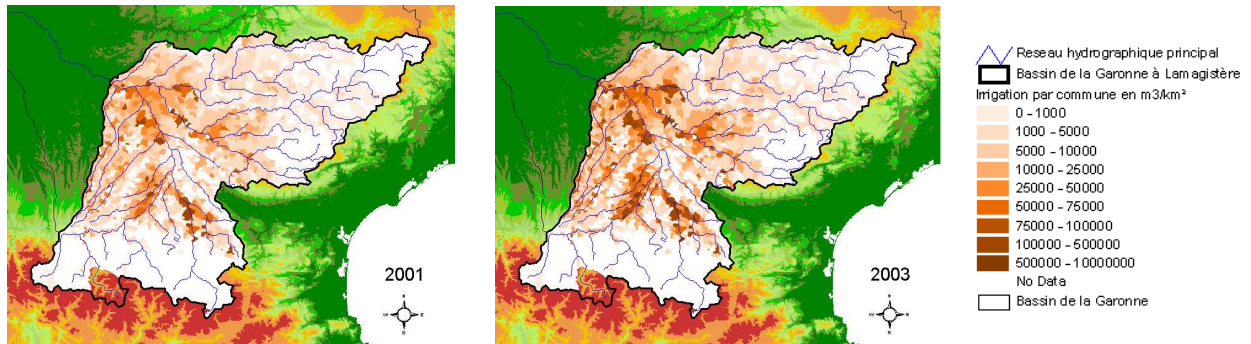


Figure 8 : Irrigation par communes sur le bassin de la Garonne à Lamagistère. Cartes établies d'après des données fournies par l'Agence de l'eau Adour-Garonne.

Les surfaces irriguées du bassin se situent en zone de plaines, sur les nappes alluviales des principaux cours d'eau. Les données concernant les prélèvements pour l'irrigation sont issues des relevés de compteur ou de volumes forfaitaires attribués aux exploitants. Entre 2001 et 2005, la proportion des volumes décomptés par forfaits par rapport aux volumes totaux relevés sur le bassin de la Garonne à Lamagistère a fortement diminuée, passant de 31,7% à 5,6%. Cette amélioration permet de connaître plus précisément les volumes prélevés par les exploitants agricoles pour l'irrigation, mais ces chiffres montrent aussi les incertitudes existant sur cette donnée avant les années 2000.

En moyenne entre 2001 et 2005, 5% des surfaces cultivées ont été irriguées depuis des pompages en nappe profonde, 35% depuis des nappes phréatiques et 20% depuis des réservoirs collinaires. Le reste des surfaces, soit 40% d'entre elles, sont irriguées depuis la Garonne, sa nappe d'accompagnement et ses affluents.

La pression sur la ressource augmente en période de sécheresse, coïncidant avec la diminution des débits dans les cours d'eau. 499 millions de m³ (Mm³) ont été prélevés dans les eaux de surfaces (rivières et nappes d'accompagnement) en 2003, contre 334 Mm³ en 2001 et 414 Mm³ en 2005. Les cartes de la [Figure 8](#) illustrent la répartition de cette pression dans l'espace et le temps.

1.3 Découpage en sous-bassins versant

1.3.1 Mode de découpage du bassin

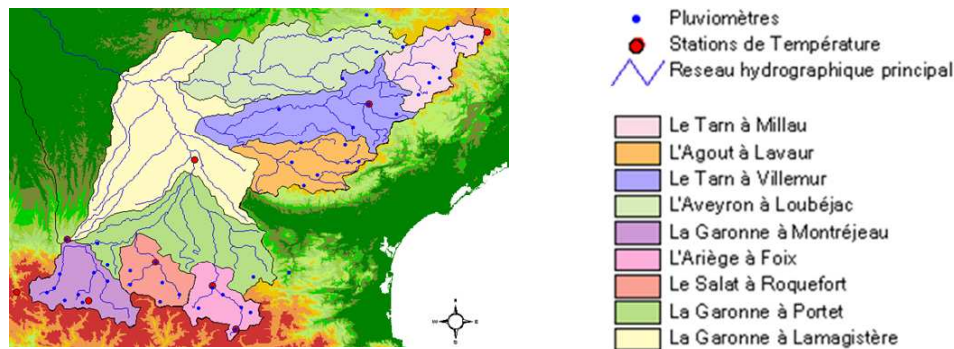


Figure 9 : Découpage en sous-bassins versants du bassin de la Garonne à Lamagistère

Nous avons effectué un découpage du bassin versant de la Garonne à Lamagistère en sous-bassins versant afin de travailler sur de plus petites entités, en modélisant de façon indépendante le fonctionnement hydrologique de chaque sous-bassin. Ce découpage, présenté en Figure 9, s'est appuyé avant tout sur les stations de mesure de débit existantes, en utilisant de préférence les stations des points nodaux choisis par le SDAGE Adour-Garonne. Nous avons ensuite tenu compte des zones de relief, définissant des caractéristiques climatiques et hydrogéologiques particulières, ainsi que des facteurs spécifiques influençant le fonctionnement hydrologique du bassin (transferts d'eau, retenues, surfaces irriguées).

1.3.2 Caractéristiques des sous-bassins versants

Au final, le bassin de la Garonne à Lamagistère a été découpé en neuf sous-bassins versants.

- Les bassins de petite surface de la Garonne à Montréjeau, du Salat à Roquefort et de l'Ariège à Foix couvrent les reliefs pyrénéens. Ils sont caractérisés par une forte pluviosité, un caractère nival marqué et des ressources souterraines peu importantes. La gestion de la ressource sur cette zone se résume essentiellement aux transferts d'eau depuis les nombreuses retenues, pour l'hydroélectricité ou le soutien d'étiage. Il faut noter qu'une partie du bassin de la Garonne à Montréjeau est située en Espagne.
- Le bassin amont du Tarn à Millau couvre une partie du Massif Central et connaît une très faible influence anthropique. Son fonctionnement hydrologique est par conséquent quasiment naturel.
- Le bassin de l'Aveyron à Loubéjac et les bassins intermédiaires du Tarn à Villemur et de l'Agout à Lavaur sont situés sur une zone intermédiaire entre plaines et montagnes. Les débits aux exutoires de ces bassins sont donc influencés à la fois par la gestion de retenues et par les prélèvements pour l'irrigation.
- Enfin, les bassins intermédiaires de la Garonne à Portet et de la Garonne à Lamagistère sont caractérisés par une grande proportion de surfaces irriguées, des transferts d'eau importants et des prélèvements non négligeables pour l'alimentation en eau potable de la ville de Toulouse.

2 Méthodologie de naturalisation et de modélisation hydrologique des débits

2.1 Naturalisation des Débits

2.1.1 Enjeux de la naturalisation

Comme au l'a vu dans la section 1.1, les débits de la Garonne à Lamagistère sont fortement influencés par les activités anthropiques. Pour projeter l'état des ressources, la solution la plus

simple consisterait à modéliser le débit influencé brut. Le modèle représenterait alors à la fois la réponse hydrologique naturelle du bassin et la gestion de l'eau par l'homme. Cette solution n'est pas satisfaisante dans le cadre du projet pour plusieurs raisons.

Tout d'abord, estimer l'évolution des ressources demande de connaître de façon précise leur état actuel. Pour cela, on ne peut pas utiliser la donnée brute puisque la gestion modifie de façon non négligeable le cycle hydrologique (retenue de l'eau à la fonte des neiges, irrigation en été, turbinage en hiver pour l'hydroélectricité, etc.). « Naturaliser » le débit, c'est-à-dire reconstituer le débit qui serait passé à l'exutoire s'il n'y avait pas d'activité humaine sur le bassin, permettra de se baser sur une donnée objective, indépendante des usages.

De plus, le débit « naturalisé » pourra servir de référence pour la modélisation du comportement hydrologique naturel des bassins, ce qui permettra de projeter l'état des ressources indépendamment des usages.

Enfin, il faut noter que le modèle que nous utilisons cherche à traduire des phénomènes naturels. Par conséquent, le construire à partir de débits influencés, c'est prendre le risque d'une mauvaise interprétation de la dynamique naturelle.

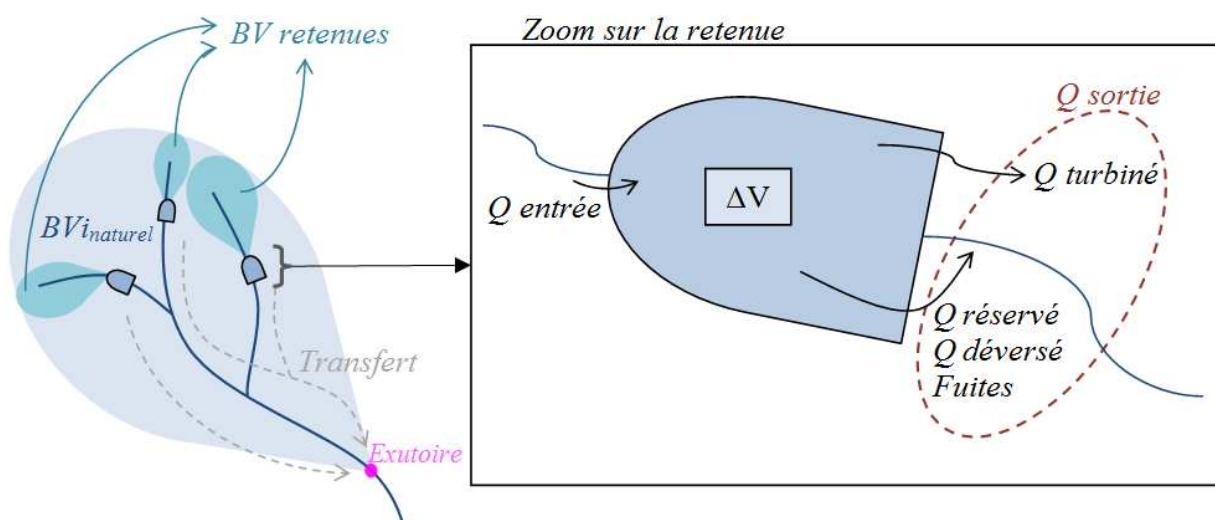
La naturalisation des débits servira donc de base à l'ensemble de l'étude.

2.1.2 Principe de la naturalisation

La naturalisation des débits se fait à l'exutoire de chaque sous-bassin versant, de façon à pouvoir ensuite modéliser leur comportement hydrologique « naturel ». Durant ce stage, nous nous sommes focalisés sur la naturalisation des débits influencés par les retenues hydroélectriques et les transferts d'eau. Nous avons donc étudié les sous-bassins amont, sur lesquels sont situées les retenues du fait du relief et de la plus grande pluviosité. Par ailleurs, l'agriculture, pour laquelle les données n'étaient pas disponibles, représente une portion négligeable des terres sur ceux-ci. Enfin, la majorité des retenues étant ou ayant été gérée par EDF, nous disposons de données sur leur gestion au pas de temps journalier et sur plusieurs dizaines d'années.

Dans la suite, tous les débits exprimés sont des débits journaliers moyens.

Le principe de base pour naturaliser les débits influencés par l'hydroélectricité est d'effectuer un bilan au niveau de chaque retenue :



- $Q_{entrée}$ est le débit naturel du bassin versant capté par la retenue.
- $\Delta V = V_{entrée} - V_{sortie}$ représente la variation de volume dans la retenue. Elle est positive lorsque le volume d'eau augmente, et négative lorsqu'il diminue. Le volume est obtenu à

partir de l'observation du niveau de l'eau dans la retenue et de la courbe de capacité hauteur d'eau/volume, établie en général au moment des travaux d'aménagement à partir de relevés topographiques. La stabilité de cette courbe dans le temps est conditionnée par l'importance des apports solides dans la retenue.

- On appelle **variation de réserve** de la retenue pendant un temps Δt la quantité $\Delta Res = \frac{\Delta V}{\Delta t}$. Comme nous travaillons au pas de temps journalier, pour nous $\Delta t = 24H$.
- **Q turbiné** correspond au débit d'eau transféré par conduites depuis la retenue jusqu'à l'usine hydroélectrique située plus en aval.
- **Q déversé** est le débit passant au-dessus du barrage par un déversoir lorsque les apports en eau dépassent la capacité de la retenue. Cela peut arriver lors de gros orages, à la fonte des neiges ou bien pour les retenues de petite capacité.
- **Q réservé** est le débit minimal que doit obligatoirement conserver l'exploitant dans le lit de la rivière court-circuitée depuis la mise en application de la loi Pêche de Juin 1984. Il est en général constant par saisons.
- Les **fuites** sont les écoulements d'eau au travers du barrage ou de sa fondation.
- **Q sortie** est le débit total lâché au niveau de la retenue :

$$Q_{sortie} = Q_{turbiné} + Q_{déversé} + Q_{réservé} + Fuites .$$
- **BVi naturel** est le bassin versant intermédiaire ayant un fonctionnement hydrologique naturel. Il correspond à la différence entre le bassin versant total et les sous-bassins versants captés par les retenues.

Pour chaque jour J de la période étudiée, on obtient le bilan suivant à l'exutoire du bassin :

$$Q_{observé}^{(J)} = Q_{BVi\ naturel}^{(J)} + \sum_{Rtn \in \{Retenues\}} (Q_{sortie\ Rtn})_{transféré}^{(J)}$$

$(Q_{sortie\ Rtn})_{transféré}^{(J)}$ est le débit de sortie de la retenue Rtn qui passe à l'exutoire du bassin le jour J . Le **temps de transfert** dépend bien sûr de la distance linéaire que parcourt l'eau entre la retenue et l'exutoire, mais aussi du débit de sortie : plus celui-ci est grand, et plus le transfert est rapide.

Sur le bassin versant d'une retenue Rtn , on a :

$$\begin{aligned} Q_{sortie\ Rtn} &= Q_{entrée\ Rtn} - (Q_{entrée\ Rtn} - Q_{sortie\ Rtn}) \\ &= Q_{entrée\ Rtn} - \frac{Q_{entrée\ Rtn} \cdot \Delta t - Q_{sortie\ Rtn} \cdot \Delta t}{\Delta t} \\ &= Q_{entrée\ Rtn} - \frac{V_{entrée\ Rtn} - V_{sortie\ Rtn}}{\Delta t} \\ &= Q_{entrée\ Rtn} - \underbrace{\left(\frac{\Delta V}{\Delta t} \right)_{Rtn}}_{\text{Variation de réserve}} \\ &= Q_{entrée\ Rtn} - \Delta Res_{Rtn} \end{aligned}$$

De plus, $Q_{entrée\ Rtn} = Q_{BV\ Rtn\ naturel}$

Donc finalement :

$$\begin{aligned}
Q_{\text{observé}}^{(J)} &= Q_{\text{BVi naturel}}^{(J)} + \sum_{Rtn \in \{\text{Retenues}\}} \left(Q_{\text{BV Rtn naturel}} - \Delta Res_{Rtn} \right)_{\text{transféré}}^{(J)} \\
&= \left(Q_{\text{BVi naturel}}^{(J)} + \sum_{Rtn \in \{\text{Retenues}\}} \left(Q_{\text{BV Rtn naturel}} \right)_{\text{transféré}}^{(J)} \right) - \sum_{Rtn \in \{\text{Retenues}\}} \left(\Delta Res_{Rtn} \right)_{\text{transféré}}^{(J)} \\
&= Q_{\text{naturel}}^{(J)} - \sum_{Rtn \in \{\text{Retenues}\}} \left(\Delta Res_{Rtn} \right)_{\text{transféré}}^{(J)}
\end{aligned}$$

Et donc :

$$\boxed{Q_{\text{naturel}}^{(J)} = Q_{\text{observé}}^{(J)} + \sum_{Rtn \in \{\text{Retenues}\}} \left(\Delta Res_{Rtn} \right)_{\text{transféré}}^{(J)}}$$

Équation 1

La Division Technique Générale (DTG), service opérationnel d'EDF, est chargé de la prévention des risques au niveau des ouvrages hydroélectriques et du diagnostic d'impact environnemental des ouvrages en exploitation. Afin de quantifier l'influence de la gestion hydroélectrique sur les débits, elle calcule le débit naturel capté (débit d'entrée) par les plus grandes retenues d'EDF. Ces débits sont appelés Apports Naturels Reconstitués (ANR).

Le calcul des séries d'ANR au pas de temps journalier se base sur la relation établie plus haut :

$$\begin{aligned}
Q_{\text{entrée}} &= Q_{\text{sortie}} + \Delta Res \\
\text{avec } Q_{\text{sortie}} &= Q_{\text{turbiné}} + Q_{\text{déversé}} + Q_{\text{réservé}} + \text{Fuites}
\end{aligned}$$

Cependant, cette relation peut conduire à des débits d'entrée anormalement bas voir négatifs en période d'étiage, du fait d'erreurs de mesure sur les variations de réserve notamment. En effet, on a vu que les variations de réserve sont calculées à partir du niveau de l'eau dans les retenues. Bien que ce niveau soit mesuré au moins une fois par jour dans les grandes retenues, la donnée peut manquer quelques jours dans l'année, être imprécise du fait de la présence de vagues ou de vent (basculement de surface), ou mal interprétée si les courbes de capacité ne sont plus exactes.

Pour remédier à cela, EDF utilise un logiciel maison (ELECTRODE) qui lisse le débit ainsi calculé en se basant sur un témoin de débit naturel. Ce logiciel ne lisse pas les crues importantes et il est vérifié que le lissage n'entraîne pas de transfert de volume écoulé d'un mois sur l'autre.

Ainsi,

$$\boxed{ANR = \left(Q_{\text{turbiné}} + Q_{\text{déversé}} + Q_{\text{réservé}} + \text{Fuites} + \Delta Res \right)_{\text{Lissé}}}$$

Si on connaît le débit de sortie des retenues (somme des débits turbinés, déversés, réservés et des fuites), le lissage menant aux ANR revient à corriger les données de variations de réserve. C'est pourquoi, pour naturaliser les débits à l'exutoire du bassin versant, nous avons préféré répartir directement des ANR plutôt que d'utiliser les données brutes de variations de réserve :

$$\left(\Delta Res \right)_{\text{Lissé}} = ANR - \left(Q_{\text{turbiné}} + Q_{\text{déversé}} + Q_{\text{réservé}} + \text{Fuites} \right)$$

Au final, la relation que nous utiliserons pour naturaliser les débits à l'exutoire des sous-bassins versants étudiés est la suivante :

$$\boxed{Q_{\text{naturalisé}}^{(J)} = Q_{\text{observé}}^{(J)} + \sum_{Rtn \in \{\text{Retenues}\}} \left(ANR_{Rtn} - \left(Q_{\text{turbiné } Rtn} + Q_{\text{déversé } Rtn} + Q_{\text{réservé } Rtn} + \text{Fuites}_{Rtn} \right) \right)_{\text{transféré}}^{(J)}}$$

Équation 2

2.2 Le modèle CEQUEAU

2.2.1 Présentation

CEQUEAU est un modèle hydrologique conceptuel spatialisé développé depuis 1971 par l'Institut National de la Recherche Scientifique Eau Terre et Environnement du Canada (Charbonneau et al., 1977). Il est utilisé par EDF R&D depuis la fin des années 1990 pour des études de changements climatiques sur de grands bassins (Rhône, Loire). La sortie du modèle correspond à un débit à l'exutoire du bassin versant étudié, calculé à partir de données de pluie et de température de l'air.

Pour la mise en place du modèle, le bassin versant est divisé en carreaux élémentaires, appelés « mailles », dont la surface est à définir en fonction de la taille du bassin ainsi que de la répartition des données sur celui-ci. A chaque maille est associée la pluie et la température de la station la plus proche de son centre. Ces données d'entrée sont ensuite modulées en fonction de la différence d'altitude entre la maille et la station.

Le pas de temps choisi pour notre étude est la journée. Un bilan hydrologique est effectué sur chaque maille et à chaque pas de temps à l'aide de la fonction de production détaillée au paragraphe suivant. Cette fonction dépend d'une vingtaine de paramètres qui sont identiques sur toutes les mailles du bassin. Une fonction de transfert régit ensuite les écoulements de maille en maille jusqu'à l'exutoire. Le choix des paramètres se fait de façon à optimiser un critère, appelé critère de calage, qui caractérise la différence entre la sortie du modèle et les valeurs mesurées de débit.

2.2.2 Fonction de production

La fonction de production a pour but de représenter les différentes voies que suit l'eau atmosphérique depuis l'instant où elle touche le sol jusqu'à celui où elle atteint la rivière. L'eau atmosphérique mise en jeu a deux origines possibles, la pluie ou la neige. La création et la fonte du stock de neige sont modélisées à partir des données de pluviométrie et de température. Ensuite, quelle que soit l'origine de l'eau atmosphérique arrivant au niveau du sol, elle subit une série de processus influençant son écoulement jusqu'à la rivière.

Ces processus sont schématisés dans CEQUEAU par une succession de réservoirs communiquant entre eux par un système de vidange (voir [Figure 10](#)). Ils ont pour but de reproduire de manière simplifiée les composantes du bilan hydrologique. Les 27 paramètres régissant la fonction de production du modèle CEQUEAU sont présentés en [Annexe 2](#).

A l'origine, les réservoirs sont vides, et la première année de fonctionnement du modèle sert à initialiser leurs niveaux. On ne tiendra donc pas compte de cette première année pour évaluer les performances du modèle.

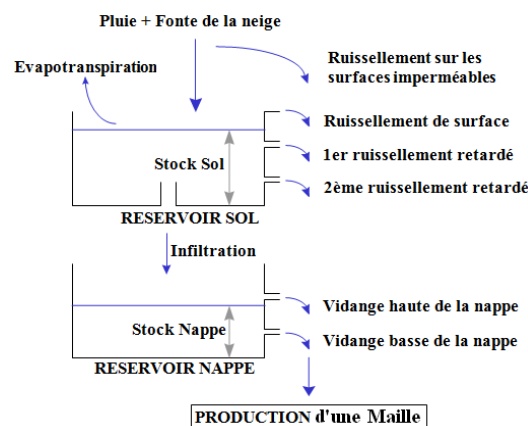


Figure 10 : Schéma de la fonction production d'une maille CEQUEAU (Hendrickx, 2001)

2.2.3 Fonction de transfert

A partir du schéma de production décrit ci-dessus, on obtient pour chaque maille un volume d'eau disponible pour le transfert en rivière. Ce transfert se fait de maille amont à maille aval selon le réseau hydrographique, calculé à partir de la topographie. Au volume d'eau d'une maille s'ajoute les volumes d'eau transférés depuis les mailles situées directement en amont de celle-ci. Le volume résultant devient le volume disponible pour le transfert vers la maille directement en aval (voir [Figure 11](#)). Ce processus est répété de maille en maille jusqu'à l'exutoire. Cet algorithme de transfert est détaillé en [Annexe 2](#).

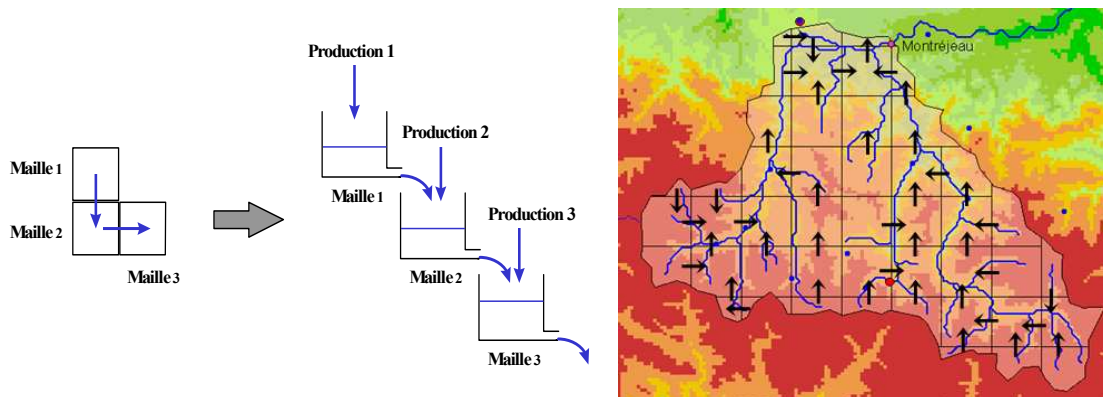


Figure 11 : (gauche) Schéma de la fonction de transfert de CEQUEAU (Hendrickx, 2001) (droite) Exemple sur le bassin versant de la Garonne à Montréjeau

2.2.4 Base de données

Les entrées indispensables au fonctionnement de CEQUEAU sont les données de pluie et de température de l'air au pas de temps journalier, cette dernière servant à la fois à estimer l'évapotranspiration et la formation ou la fonte du stock de neige.

Les données de débit journalier n'ont d'intérêt dans la modélisation que dans le cas de l'existence d'un bassin versant en amont du bassin versant à modéliser. Les données de débit journalier à l'exutoire n'ont aucune influence sur le fonctionnement du modèle, mais servent à optimiser les 27 paramètres présentés en [Annexe 2](#).

Les données utilisées pendant mon stage ont été fournies par la DTG, qui assure la gestion d'un réseau de pluviomètres et de stations de débits répartis en altitude pour prévenir les risques de crues au niveau des barrages. De plus, suite à des accords d'échanges, elle peut profiter de l'ensemble des données de débits récoltées par la Banque HYDRO (Banque nationale de données pour l'hydrométrie et l'hydrologie). Les données de température, par contre, ont fait l'objet d'achats auprès de Météo France.

La critique de données est un travail préliminaire fastidieux mais indispensable à toute étude hydrologique. De la qualité des données va dépendre la qualité du modèle, puisqu'une aberration dans les données d'entrée peut provoquer des variations non négligeables du débit de sortie et biaiser ainsi le calage des paramètres.

L'ensemble des données disponibles avait déjà subi une critique préalable, avec élimination des valeurs aberrantes. Avant de les utiliser, il a tout de même fallu s'assurer qu'il ne restait aucune aberration, relever les données manquantes et compléter les séries de façon à obtenir un jeu de données complet sur la plus grande période possible entre 1969 et 2004.

Le remplissage des données manquantes de température de l'air s'est fait par interpolation linéaire lorsque la donnée manquante était ponctuelle. Lorsqu'il manquait plus de quelques jours

de données, les séries ont été reconstituées par régression linéaire multiple à partir des 2 ou 3 stations les plus proches. Les données de pluie manquantes ont toujours été complétées par régression linéaire multiple.

Vous trouverez en Annexe 3 un exemple de feuille de suivi de remplissage de données, précisant les changements faits sur les données brutes et les méthodes employées.

2.3 Etapes pratiques de la modélisation

2.3.1 Maillage du bassin versant et spatialisation des données avec ArcView

La modélisation CEQUEAU demande un travail préalable de découpage du bassin versant et de spatialisation des données de pluie et de température qui est réalisé à l'aide du Système d'Information Géographique (SIG) ArcView 3.2a. Il permet, comme tout SIG, de représenter plusieurs couches d'informations sur une même carte, ces informations pouvant être issues du logiciel lui-même (topographie), ou bien de données propres à l'utilisateur (dans notre cas localisation des stations pluviométriques, de température et de débit).

EDF a développé différents outils spécifiques à l'hydrologie. Ces outils permettent en particulier de :

- 1 Dessiner les contours du bassin versant à partir d'un point d'exutoire donné, en connaissant les directions et les accumulations des écoulements ainsi que la topographie (données connues sur la France entière avec une précision de 530 mètres de côté) ;
- 2 Dessiner la ligne d'écoulement d'une goutte d'eau depuis un point désigné jusqu'à la mer, à partir des données de direction et d'accumulation des écoulements et de la topographie ;
- 3 Mailler un bassin versant par intersection d'une grille et du bassin versant étudié (tracé grâce à l'outil 1) ;
- 4 Attribuer à chaque maille (définie par l'outil 3) le pluviomètre et la station de température la plus proche de son centre ;
- 5 Attribuer à chaque maille – exceptée celle où se trouve le point exutoire – une maille aval, à partir du tracé du réseau hydrographique sur le bassin versant (outils 2 et 3). Une maille peut ainsi avoir plusieurs mailles amont, mais elle ne possède qu'une seule maille aval ;

A partir de ces outils, on extrait d'ArcView des fichiers textes formatés intégrant toutes les informations géographiques dont CEQUEAU a besoin pour reconstituer le fonctionnement hydrologique du bassin étudié.

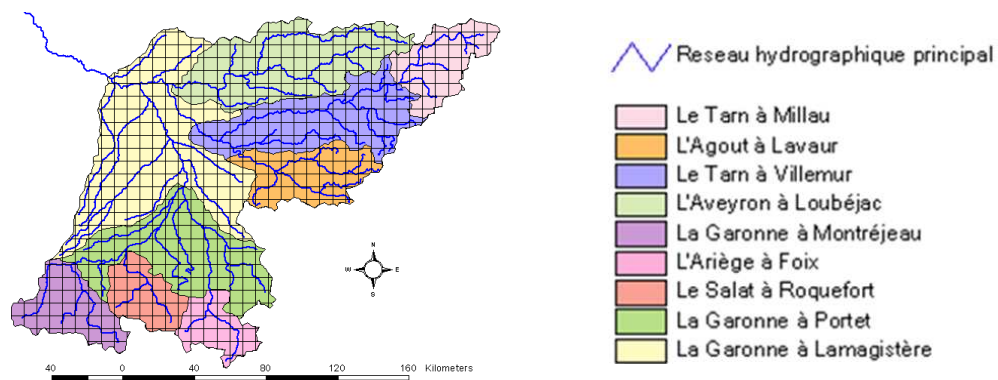


Figure 12 : Bassin de la Garonne à Lamagistère maillé

Dans le cas du bassin de la Garonne à Lamagistère, nous avons décidé d'appliquer une grille à mailles carrées de 8 km de côté sur l'ensemble du bassin, de façon à ce qu'il y ait un nombre suffisant mais non excessif de mailles sur chaque sous-bassin (voir [Figure 12](#)).

2.3.2 Critères d'évaluation du modèle

L'optimisation (ou calage) des paramètres du modèle, qu'elle soit manuelle ou algorithmique, nécessite la définition d'une fonction objectif quantifiant l'erreur du modèle, c'est-à-dire la différence entre les débits observés et les débits simulés.

Le critère d'optimisation que nous avons choisi est celui de **Nash et Stutcliffe** (Nash & Stutcliffe, 1970), qui est très utilisé en hydrologie pour évaluer les performances des modèles Pluie-Débit :

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{J \in \{Période\ de\ calage\}} (Q_{sim}^{(J)} - Q_{obs}^{(J)})^2}{\sum_{J \in \{Période\ de\ calage\}} (Q_{sim}^{(J)} - \overline{Q_{obs}})^2}$$

Où $Q_{sim}^{(J)}$ et $Q_{obs}^{(J)}$ sont respectivement les débits simulés et observés un jour J de la période de calage, et $\overline{Q_{obs}}$ est la moyenne des observations sur l'ensemble de la période de calage.

Ce critère de performance représente la part de variance des débits expliquée par le modèle. Il prend des valeurs entre $-\infty$ et 1 et est positif lorsque le modèle représente mieux les valeurs observées que le modèle de référence (ici égal à la moyenne des observations). Plus le Nash est proche de 1, plus les débits simulés sont proches des observations. Un Nash nul signifie que les deux modèles ont les mêmes performances, et un Nash égal à 1 indique que le modèle est parfait.

Même si le critère de Nash est en général un bon indicateur, il se peut qu'il ne représente pas bien certains types d'erreurs entre les débits calculés et observés. Ainsi, afin de valider l'optimisation du jeu de paramètres à partir du Nash, nous avons également analysé les critères de contrôle suivants :

Ecart entre les modules :

Comparaison entre la moyenne des débits journaliers simulés et la moyenne des débits journaliers observés sur la période considérée pour estimer le biais global engendré par le modèle.

Nash sur le logarithme des débits :

Comme l'objectif principal de l'étude est de connaître les évolutions du système hydrologique en période d'étiage – période où les tensions entre les différents acteurs du bassin sont les plus importantes – il est important que notre modèle représente bien les faibles débits. Or, le critère de Nash et Stutcliffe donne un poids beaucoup plus grand aux hauts débits qu'aux bas débits. Nous avons donc également regardé le critère de Nash sur le logarithme des débits, qui donne un poids plus grands aux petites valeurs de débits :

$$Nash(\ln(Q)) = 1 - \frac{\sum_{J \in \{Période\ de\ calage\}} (\ln(Q_{sim}^{(J)} + \varepsilon) - \ln(Q_{obs}^{(J)} + \varepsilon))^2}{\sum_{J \in \{Période\ de\ calage\}} (\ln(Q_{sim}^{(J)} + \varepsilon) - \ln(\overline{Q_{obs}} + \varepsilon))^2}$$

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

Ecarts entre les Débits Mensuels Interannuels :

Comparaison des valeurs moyennes sur chaque mois de l'année des débits journaliers simulés et des débits journaliers observés, afin de vérifier que le modèle représente bien le fonctionnement hydrologique global du bassin (fonte des neiges, étiages, etc.).

Biais relatif :

Observation graphique des débits simulés et fonction des débits mesurés, et du biais relatif entre simulé et observé en fonction des débits simulés, afin de visualiser les sous-estimations ou surestimations tendancielle.

$$\text{Biais relatif} = \frac{Q_{\text{Calculé}} - Q_{\text{observé}}}{Q_{\text{calculé}}}$$

Ecarts entre les Débits Classés :

Comparaison des courbes de débits classés (Q_i) en fonction de leur fréquence de Gumbel pour les simulés et les observés.

$$\begin{cases} f_{\text{Gumbel}}(Q_i) = -\ln(-\ln(f(Q_i))) \\ f(Q_i) = 1 - \frac{i - 0,3}{n + 0,4} \text{ fréquence au dépassement de Chegodayev, } n \text{ nombre de débits indicés} \end{cases}$$

L'observation de tous ces critères s'est fait conjointement à la visualisation **des chroniques** de débits simulés et de débits observés sur l'ensemble de la période considérée.

2.3.3 Stratégie d'optimisation des paramètres et de validation du modèle

La modélisation des bassins a pour but de projeter les évolutions des débits d'ici à 2030. Afin de valider les performances du modèle, nous avons découpé les chroniques en deux périodes indépendantes. Nous avons ensuite optimisé un jeu de paramètres initial sur la première période (période de calage), et vérifié que la modélisation n'était pas dégradée sur la seconde période (période de contrôle), ce qui donne un premier jeu de paramètres. Un deuxième jeu est obtenu en intervertissant les périodes de calage et de contrôle.

Ces deux jeux ne sont souvent pas très éloignés, mais ils ne sont jamais égaux. Ils permettront dans la suite du projet d'estimer l'ambiguïté du modèle et d'évaluer l'erreur due à la paramétrisation.

La première et principale méthode d'optimisation des paramètres est le calage à la main, à partir de la visualisation des différents critères présentés au 2.3.2. Le modèle CEQUEAU est conceptuel, mais on a vu que ses paramètres représentent les différentes composantes du bilan hydrologique. On peut donc leur donner une interprétation physique, et chercher à les ajuster en fonction des décalages observés entre les débits simulés et les débits observés.

Une fois que la modélisation semble satisfaisante au niveau dynamique (fonte des neiges, courbe de tarissement, étiages, pics de crues), on peut utiliser une méthode d'optimisation automatique :

Méthode de l'Algorithme Génétique : cette méthode fournit plusieurs générations de jeux de paramètres. Pour la première génération, chaque jeu est obtenu en prélevant aléatoirement chaque paramètre dans un intervalle donné autour d'un paramètre initial. Chaque nouvelle génération est composée des meilleurs jeux de la génération précédente (ceux correspondant aux meilleurs critères de Nash), de jeux provenant d'un tirage aléatoire (génération spontanée) et de fusions entre les meilleurs jeux (mariages).

Cette méthode permet d'explorer un grand champ de jeux de paramètres, pour éviter d'atteindre un optimum local et non global.

Méthode pas à pas ARVA: c'est une méthode d'optimisation pragmatique et robuste, utilisée pour finaliser l'optimisation d'un jeu de paramètres obtenu par calage manuel et par Algorithme Génétique. Elle consiste à se placer sur un paramètre et à l'incrémenter ou le décrémenter tant que le critère de Nash augmente. Lorsqu'il n'augmente plus, on passe au paramètre suivant et on procède de même. Les pas d'incrémentation dépendent de chaque paramètre et sont à définir au début de la procédure d'optimisation. Cette procédure s'arrête lorsque l'on est passé un certain nombre de fois sur chaque paramètre. En général, on réalise au moins 20 tours sur le jeu de façon à ce que l'ordre de passage n'influence pas trop l'optimisation.

Ces calages se font de façon à optimiser le critère de Nash et Stutcliffe. Les paramètres du réservoir nappe sont remodifiés après cette optimisation, afin de mieux représenter les périodes d'étiages. En général, ces modifications dégradent très peu le Nash, qui dépend essentiellement des hauts débits, mais entraîne une augmentation sensible du Nash sur le logarithme des débits.

3 Modélisation hydrologique de deux sous-bassins peu influencés

3.1 Bassin versant du Tarn à Millau

3.1.1 Données disponibles

Le bassin versant du Tarn à Millau constitue un bassin amont de la Garonne de 2150 km², situé au sud-ouest du Massif Central. Le débit à Millau est naturel car il n'existe aucune retenue sur le bassin et les prélèvements pour l'agriculture y sont négligeables.

Les entrées du modèle sont les données de température et de précipitation au pas de temps journalier. Après traitement des données, nous disposons de 12 pluviomètres répartis sur le bassin et d'une station de température à Saint Affrique sur la période 1975-2004. Seuls 2 séries pluviométriques, au Nant et à Saint Maurice, ont été complétés sur de longues périodes (respectivement 1an¹/₂ et 2 ans).

Afin de caler le modèle, nous avons aussi besoin de chroniques journalières de débit du Tarn à Millau. Celles-ci nous ont été fournies par la DTG sur la période 1988-2004. Il existe également une station DIREN à Millau depuis 1969, mais sa corrélation avec la station DTG n'est pas excellente, particulièrement en étiage. Après vérification auprès des services DTG de la validité de leurs mesures, nous avons préféré nous restreindre à leurs données.

La plus grande période commune des données disponibles est donc 1988-2004.

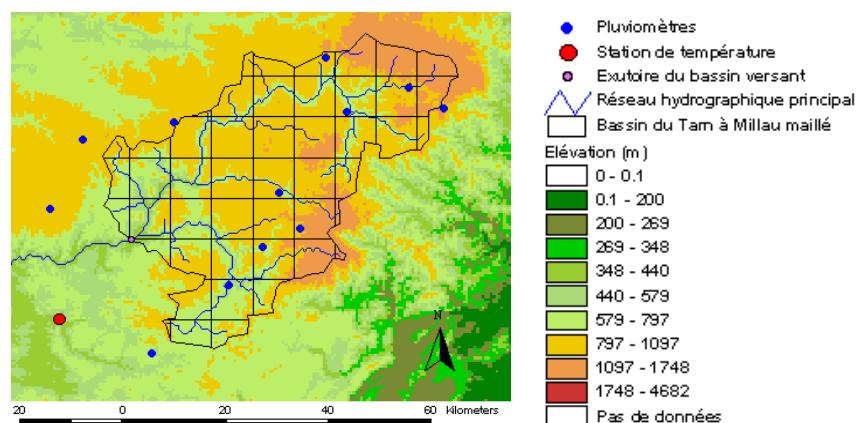


Figure 13 : Maillage du bassin versant du Tarn à Millau

Nous avons décidé de travailler en calage-validation sur les deux périodes complémentaires de 9 ans 1987(1988-1995) et 1996(1997-2004). L'année indiquée en indice est l'année d'initialisation des niveaux dans les réservoirs de la fonction de production.

3.1.2 Optimisation des paramètres et validation du modèle

L'optimisation des paramètres sur les périodes de calage s'est fait selon la procédure présentée en 2.2.3, à partir d'un jeu de paramètre initial issu d'une étude analogue sur la Loire.

Le Tableau 1 permet de comparer le débit moyen journalier interannuel mesuré et calculé pour les périodes successives de calage et de validation. Il donne aussi la valeur du critère de Nash et Stutcliffe et du Nash sur le logarithme des débits. On constate qu'il n'y a pas de dégradation du modèle sur les périodes de validation, et que les débits journaliers interannuels calculés restent assez proches des mesurés (Ecart maximum d'1,6 m³/s, soit une erreur de 3.7%).

	CALAGE 1987(1988-1995)	VALIDATION 1996(1997-2004)	CALAGE 1996(1997-2004)	VALIDATION 1987(1988-1995)
Moyenne Millau Mesuré [m ³ /s]	43.6	42.7	42.7	43.6
Moyenne Millau Simulé [m ³ /s]	43.2	44.3	43.2	42.2
Critère de Nash	91.5 %	92.3 %	95.2 %	91.5 %
Nash (ln(Q))	92.2 %	93.7 %	94.5 %	93.2 %

Tableau 1 : Débit journalier interannuel mesuré et calculé, et critères de Nash à Millau

Les Figure 14 et Figure 15 permettent de comparer d'une part les débits mensuels interannuels mesurés et calculés par le modèle hydrologique calé et d'autre part les valeurs classées mesurées et calculées par le modèle hydrologique calé, et ce pour les 2 périodes de calage et de validation. On constate que si les réponses sont globalement assez bonnes, le modèle CEQUEAU a plus de mal à représenter les débits sur la période 1988-1995 que sur la période 1997-2004, en calage comme en validation. De plus, en validation sur la période 1987(1988-1995), on observe que les débits classés décrochent pour les petites valeurs.

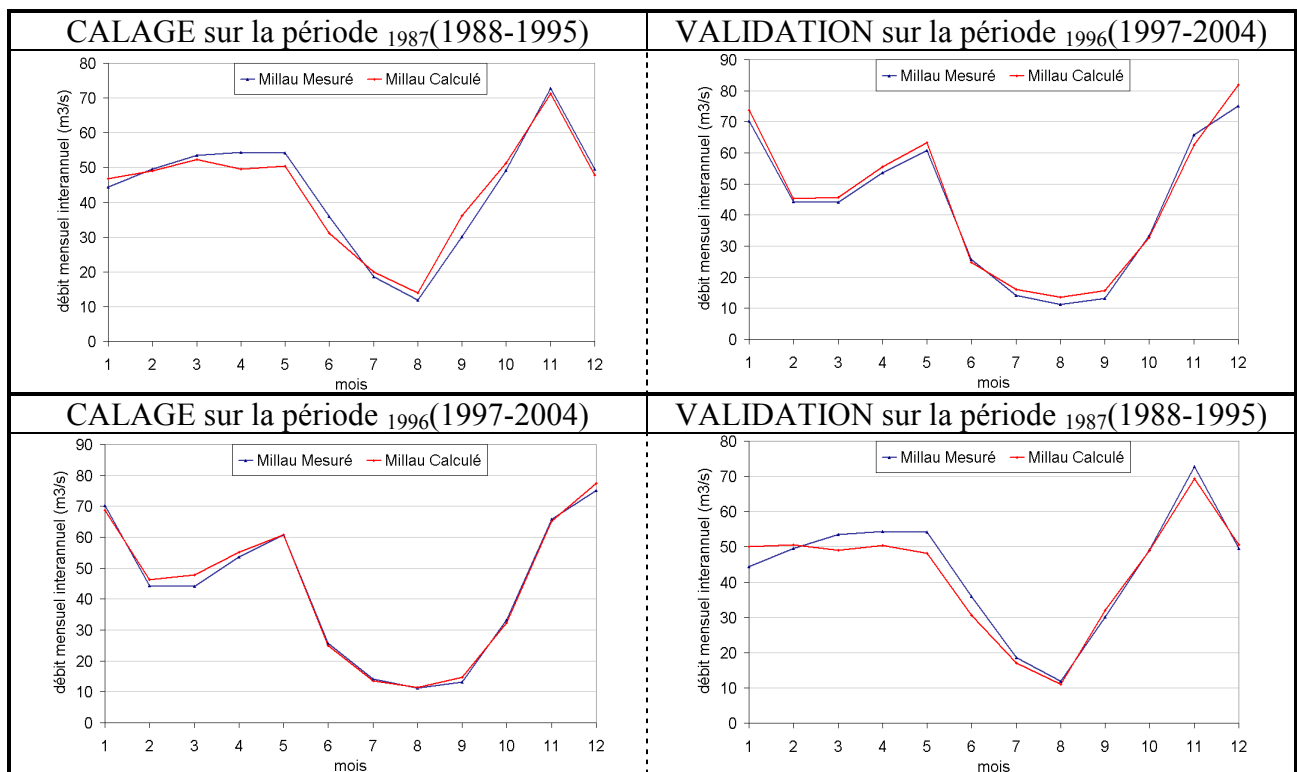


Figure 14 : Comparaison mesure/modèle des débits mensuels interannuels à Millau en calage et validation

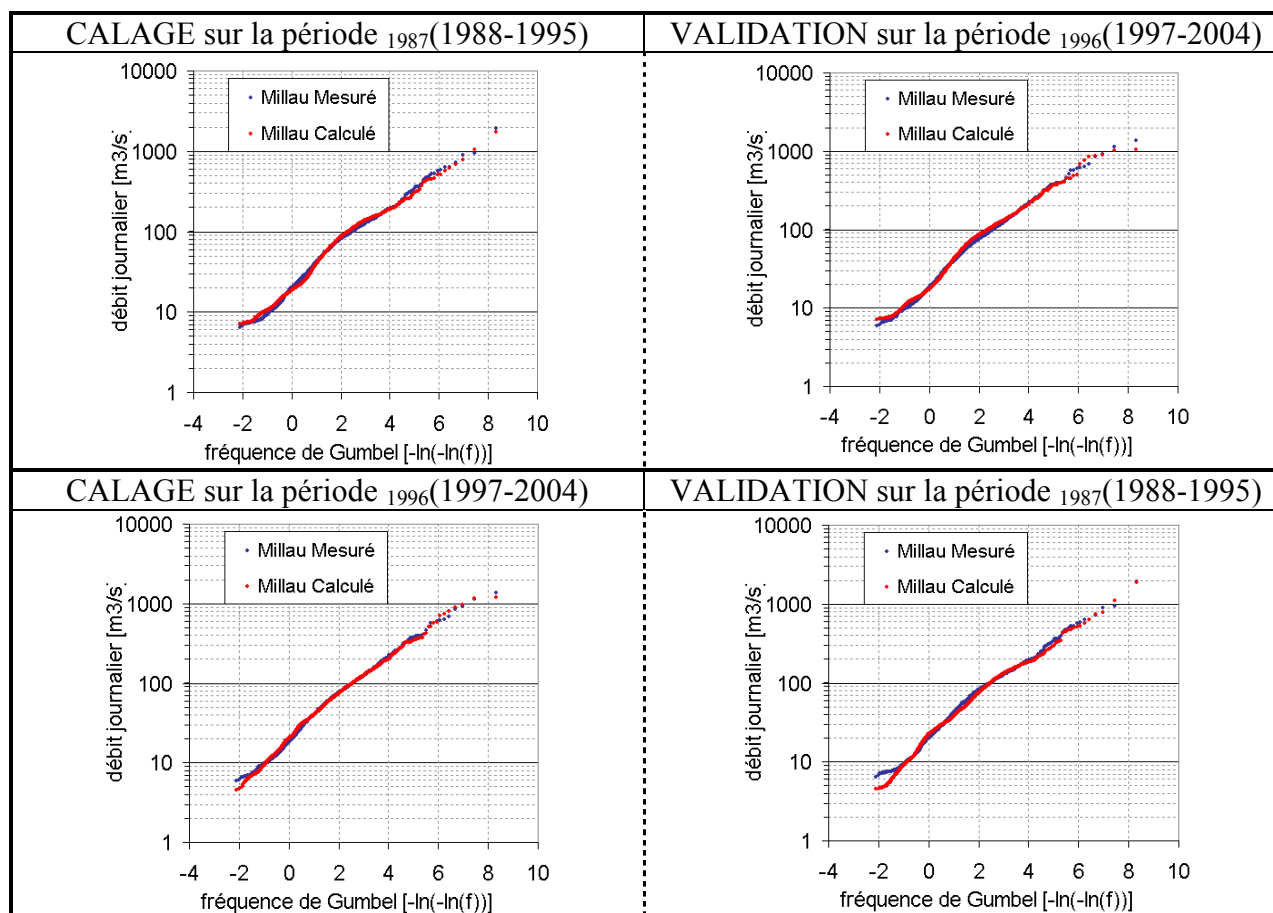


Figure 15 : Comparaison mesure/modèle des débits classés à Millau en calage et validation

Les résultats des autres critères analysés sur les périodes de calage et de validation du modèle sont présentés en [Annexe 4](#).

3.2 Bassin versant du Salat à Roquefort

3.2.1 Données disponibles

Le sous-bassin du Salat à Roquefort présente une superficie de 1580 km², sur laquelle on ne compte qu'une seule retenue, de faible capacité. Son fonctionnement hydrologique est donc quasiment naturel.

Six pluviomètres ayant fonctionné entre 1975 et 2004 sont répartis à proximité du bassin. Pour deux d'entre eux, Eylie et Orgibet, les données ont été complétées sur 21 et 327 jours respectivement. Deux stations de températures, St Girons (complet sur 1975-2004) et Tarascon (complété sur 238 jours entre 1975 et 2004), ont également été utilisées en entrée du modèle.

Enfin, par l'intermédiaire de la banque Hydro, nous avons obtenu les débits journaliers du Salat à Roquefort sur la période 1969-2004

La période commune à l'ensemble des données étant 1975-2004, nous l'avons découpée en deux périodes de 15 ans chacune, 1975(1976-1989) et 1990(1991-2004), sur lesquelles nous avons travaillé en calage/Validation.

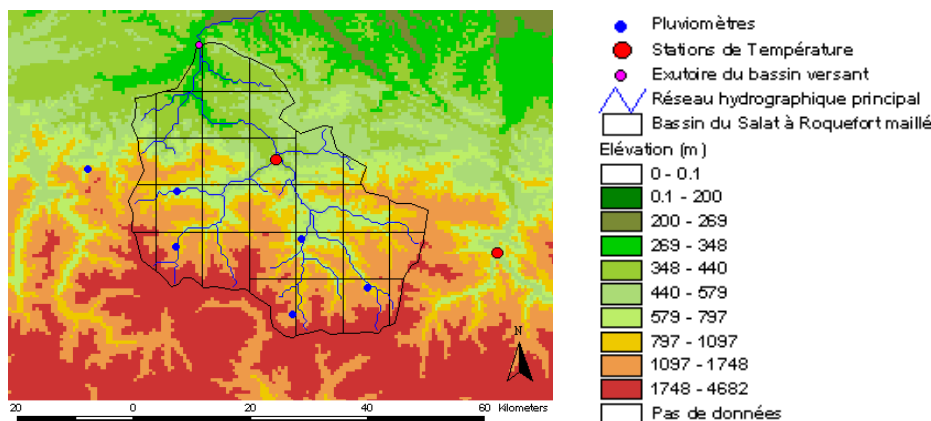


Figure 16 : Maillage du bassin versant du Salat à Roquefort

3.2.2 Optimisation des paramètres et validation du modèle

Comme pour Millau, l'optimisation des paramètres sur les périodes de calage s'est fait selon la procédure présentée en 2.2.3, à partir d'un jeu de paramètre initial issu d'une étude analogue sur la Loire.

Le Tableau 2 permet de comparer le débit moyen journalier interannuel mesuré et calculé pour les périodes successives de calage et de validation. Il donne aussi la valeur du critère de Nash et Stutcliffe et du Nash sur le logarithme des débits.

On constate que les résultats obtenus sont moins bon que ceux de Millau, avec une dérive des modules entre le calage et la validation. Les critères de Nash sont également dégradés, mais le Nash sur le logarithme des débits est lui assez robuste.

	CALAGE 1975(1976-1989)	VALIDATION 1990(1991-2004)	CALAGE 1990(1991-2004)	VALIDATION 1975(1976-1989)
Moyenne Millau Mesuré [m ³ /s]	45.4	41.1	41.1	45.4
Moyenne Millau Simulé [m ³ /s]	44.2	42.1	41.9	43.9
Critère de Nash	81.2 %	76.9 %	82.8 %	78.7 %
Nash (ln(Q))	89.7 %	88.2 %	88.8 %	89.4 %

Tableau 2 : Débit journalier interannuel mesuré et calculé, et critères de Nash à Roquefort

Les Figure 17 et Figure 18 permettent de comparer d'une part les débits mensuels interannuels mesurés et calculés par le modèle hydrologique calé et d'autre part les valeurs classées mesurées et calculées par le modèle hydrologique calé, et ce pour les 2 périodes de calage et de validation.

Les étiages sont globalement mieux représentés sur la période 1991-2004, mais les débits de Février y sont toujours surestimés. De plus, on n'arrive pas à simuler les très hauts débits, qui sont globalement sous-évalués. Ces écarts peuvent provenir de la modélisation, mais on a vu sur l'exemple de Millau qu'il était possible de les réduire. Cependant, dans le cas de Roquefort, les erreurs peuvent aussi provenir de la mesure des hauts débits, des données pluviométriques et de température de l'air qui ont été complétées, ou bien encore de la gestion de l'unique retenue du bassin que nous avons négligée.

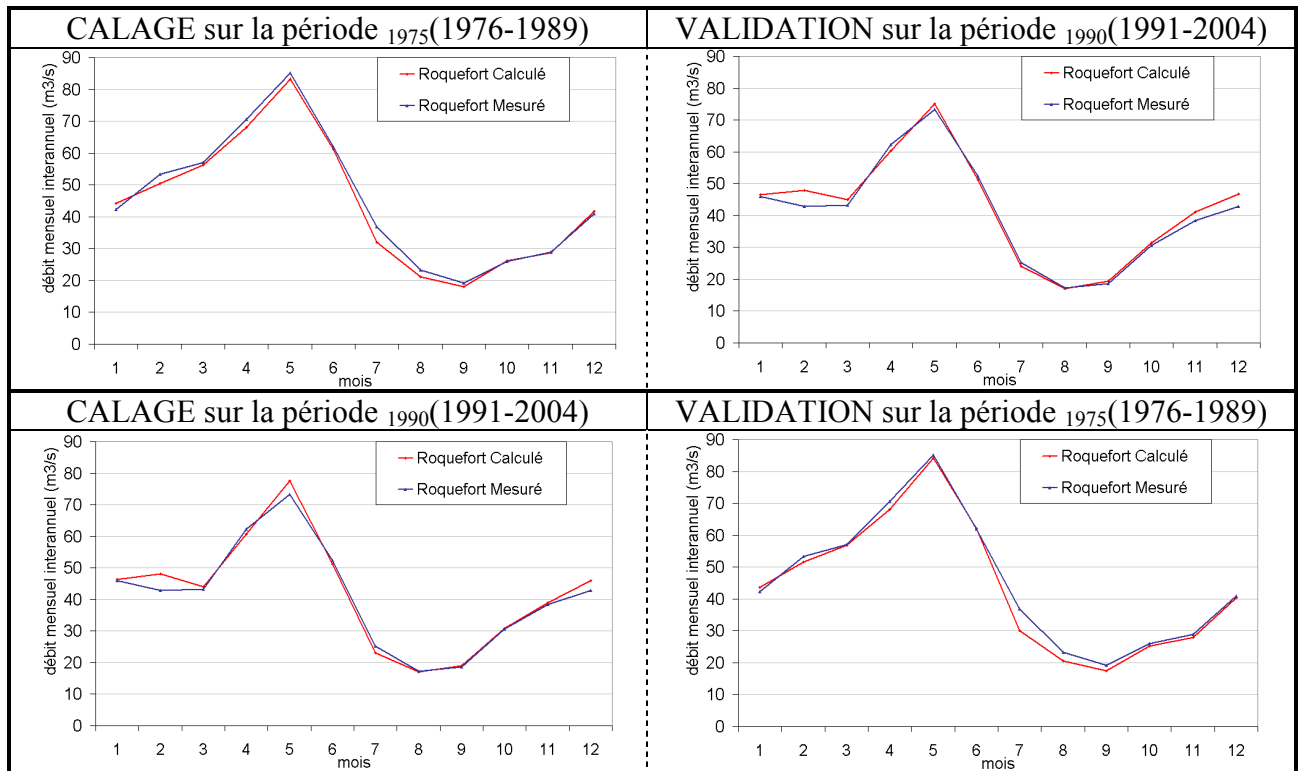


Figure 17 : Comparaison mesure/modèle des débits mensuels interannuels à Roquefort en calage et validation

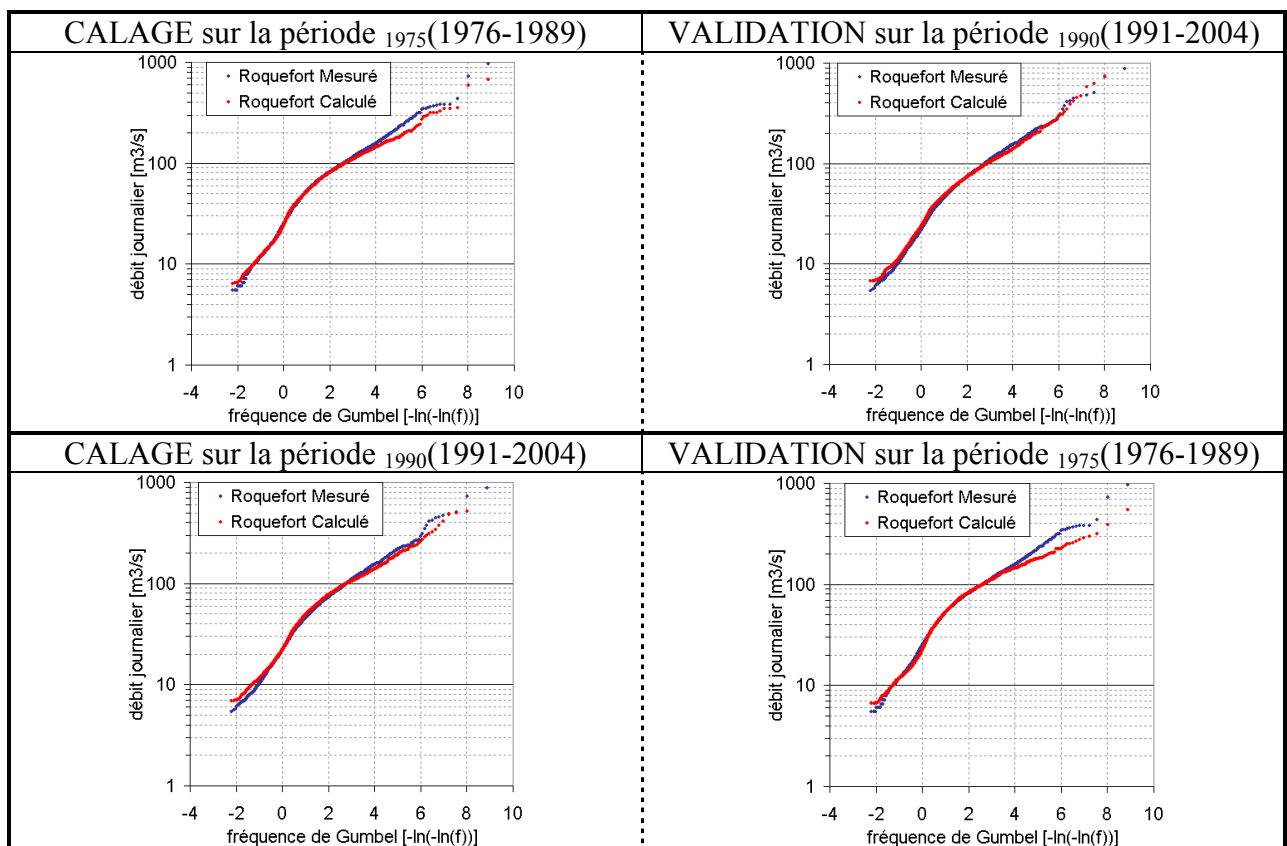


Figure 18 : Comparaison mesure/modèle des débits classés à Roquefort en calage et validation

Les résultats des autres critères analysés sur les périodes de calage et de validation du modèle sont présentés en Annexe 5.

4 Naturalisation des débits influencés par la gestion hydroélectrique : Etude du bassin versant de l'Ariège à Foix

4.1 Naturalisation

4.1.1 Application du principe de naturalisation au cas de Foix

Le bassin de l'Ariège à Foix est un sous-bassin amont de la Garonne couvrant une partie des Pyrénées sur une superficie de 1360 km². Le débit à Foix est principalement influencé par la gestion des retenues pour l'hydroélectricité, les surfaces irriguées étant négligeables sur le bassin.

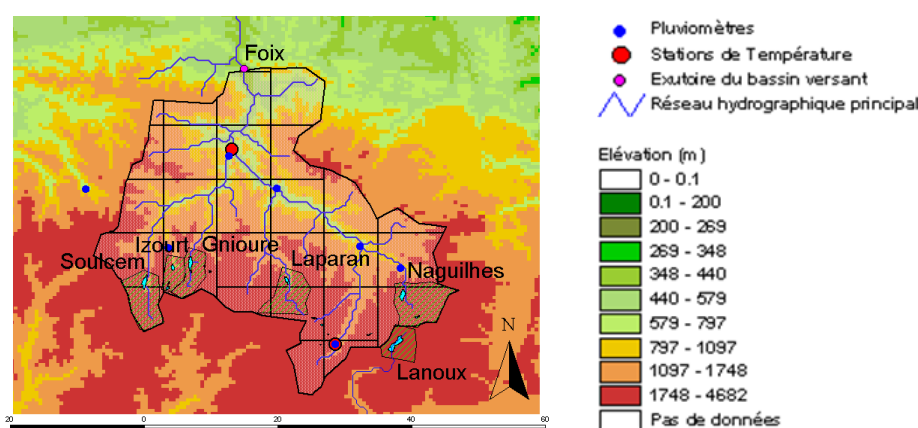


Figure 19 : Bassin versant de l'Ariège à Foix

Le principe de naturalisation développé dans la section 2.4.2 s'applique donc ici. Nous rappelons qu'il s'écrit :

$$Q_{\text{naturalisé}}^{(J)} = Q_{\text{observé}}^{(J)} + \sum_{Rtn \in \{\text{Retenues}\}} \left(ANR_{Rtn} - (Q_{\text{turbiné } Rtn} + Q_{\text{déversé } Rtn} + Q_{\text{réservé } Rtn} + Fuites_{Rtn}) \right)_{\text{transféré}}^{(J)}$$

Le module de l'Ariège à Foix est de 38 m³/s, ce qui représente un volume d'eau annuel de 1190 Millions de m³ (Mm³). Nous n'avons considéré que les retenues de grande capacité (volume > 3 Mm³), qui peuvent effectuer des transferts d'eau inter-saisonniers et influencer de façon importante le régime hydrologique à Foix. Celles-ci sont localisées sur la Figure 19, et vous trouverez leurs principales caractéristiques dans le Tableau 3 ci-dessous.

Nom de la retenue	Laparan	Soulcem	Naguilhes	Izourt	Gnioure	« Système L'Hopitalet »	Total
Année de mise en service	1985	1984	1961	1940	1950	1962	
Surface du bassin versant [km ²]	34.8	44.3	11.8	14.9	18.0	14.9	138.7
[Surface BV / Surface BV Foix]	2.6 %	3.3 %	0.9 %	1.1 %	1.3 %	1.1 %	10.2 %
Volume de la retenue [Mm ³]	15.7	29.3	43.0	7.9	28.4	70.7	195.0
[Volume Retenue / Volume Foix] moyenné par année	1.3 %	2.5 %	3.6 %	0.7 %	2.4 %	6.0 %	16.4 %
Volume d'eau turbiné [Mm ³ /an]	94.8	57.2	46.2	20.6	41.1	55.7	315.7
Volume d'eau ANR [Mm ³ /an]	111.1	58.8	48.9	21.5	42.4	65.1	347.9
[Volume Turbinés / Volume Foix] moyenné par année	9.4 %	5.0 %	4.1 %	1.8 %	3.6 %	5.5 %	26.6 %

Tableau 3 : Caractéristiques des principales retenues sur le bassin de l'Ariège à Foix.

Les ANR sont disponibles au pas de temps journalier de 1962 à 2004 pour chacune de ces retenues. On dispose également des débits journaliers turbinés au niveau des usines entre 1969 et 2004, sauf pour Laparan et Soulcem qui ont été mis en service au milieu de cette période, les données de turbinés de Laparan commençant en 1990 et celles de Soulcem en 1986.

Enfin, le service opérationnel d'EDF nous a fourni deux séries de débits journaliers à Foix ; une première, de 1969 à 2004, issue d'une station DTG, avec des données manquantes entre le 1^{er} Janvier 1996 et le 6 Juillet 1999, et la deuxième, de 1996 à 2004, provenant de la banque hydro. La corrélation étant excellente sur la période de recouvrement des données (coefficient de détermination de 0,99), nous avons complété les données DTG par les données DIREN sur la période manquante. Nous disposons donc au final de données journalières de débits de l'Ariège à Foix de 1969 à 2004.

En analysant le Tableau 3, on constate que chaque retenue prise indépendamment des autres ne peut avoir que peu d'influence sur le débit total à Foix, alors que la somme des volumes turbinés sur le bassin représente une part non négligeable du volume d'eau passant à cet exutoire. Ainsi, alors que la surface des bassins versants captés par les retenues ne représente que 10% du bassin versant total, le volume d'eau turbiné sur l'année représente en moyenne 27% du débit total à Foix, ce qui s'explique par la grande pluviosité sur les reliefs. On peut aussi noter que les retenues sont remplies et vidées plus d'une fois dans l'année.

Par ailleurs, on voit qu'il existe une différence de 32 Millions de m³ entre les débits turbinés et les ANR. Les débits turbinés représentent donc 91% des ANR, tandis que les débits déversés, les débits réservés et les fuites n'en représentent que 9%. Il est de plus à noter que les débits réservés et les fuites sont constants dans l'année, tandis qu'il n'y a de débits déversés qu'en cas de fortes crues, ou lors de la fonte des neiges.

En première approximation, faute de données de qualité, nous avons décidé de négliger les déversés, réservés et fuites face aux turbinés, ce qui revient à écrire :

$$\begin{cases} Q_{\text{naturalisé}}^{(J)} = Q_{\text{observé}}^{(J)} + \sum_{Rtn \in \{\text{Retenues}\}} (ANR_{Rtn} - (Q_{\text{turbiné } Rtn} + Q_{\text{déversé } Rtn} + Q_{\text{réservé } Rtn} + Fuites_{Rtn}))_{\text{transféré}}^{(J)} \\ (Q_{\text{déversé}} + Q_{\text{réservé}} + Fuites) \ll Q_{\text{turbiné}} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \boxed{Q_{\text{naturalisé}}^{(J)} = Q_{\text{observé}}^{(J)} + \sum_{Rtn \in \{\text{Retenues}\}} (ANR_{Rtn} - Q_{\text{turbiné } Rtn})_{\text{transféré}}^{(J)}}$$

Pour le bassin de Foix, une particularité s'ajoute à la gestion habituelle des retenues, dont nous n'avons pas encore parlé : la retenue du Lanoux est située sur le bassin du Carol, rivière coulant hors du bassin de l'Ariège vers l'Ebre. L'eau est transportée par conduites jusqu'à l'Hospitalet, dans le bassin de l'Ariège, où elle est turbinée. Cette usine est appelée Hospitalet Haute Chute (HC). Les eaux provenant des petites retenues du bassin de l'Ariège à l'amont de l'Hospitalet (Balardques, Besines, Sisca) sont turbinées à l'Hospitalet Basse Chute. D'autre part, pour des questions de coût de l'électricité, une partie de l'eau arrivant à l'Hospitalet BC est pompé pendant les heures creuses vers le Lanoux.

Le prélèvement de cette eau au bassin de l'Ebre, qui n'a pas d'usine hydroélectrique sur son versant, se fait avec l'obligation de restituer le même volume d'eau l'année suivante. Cette restitution se fait par une dérivation de l'Ariège vers le Carol, au moment de la fonte des neiges. Cela permet à EDF de profiter du stockage de l'eau dans le Lanoux et de répartir le turbinage de ce volume sur toute l'année.

Ce qui est appelé « Système l'Hospitalet » dans le Tableau 3 correspond à l'ensemble de ce système de gestion, le volume turbiné correspondant à la somme des turbinés à l'Hospitalet HC et BC, et le volume d'ANR à la somme des ANR du Lanoux et des petites retenues de l'Ariège. Le fonctionnement global de ce système est résumé dans le schéma de la Figure 20.

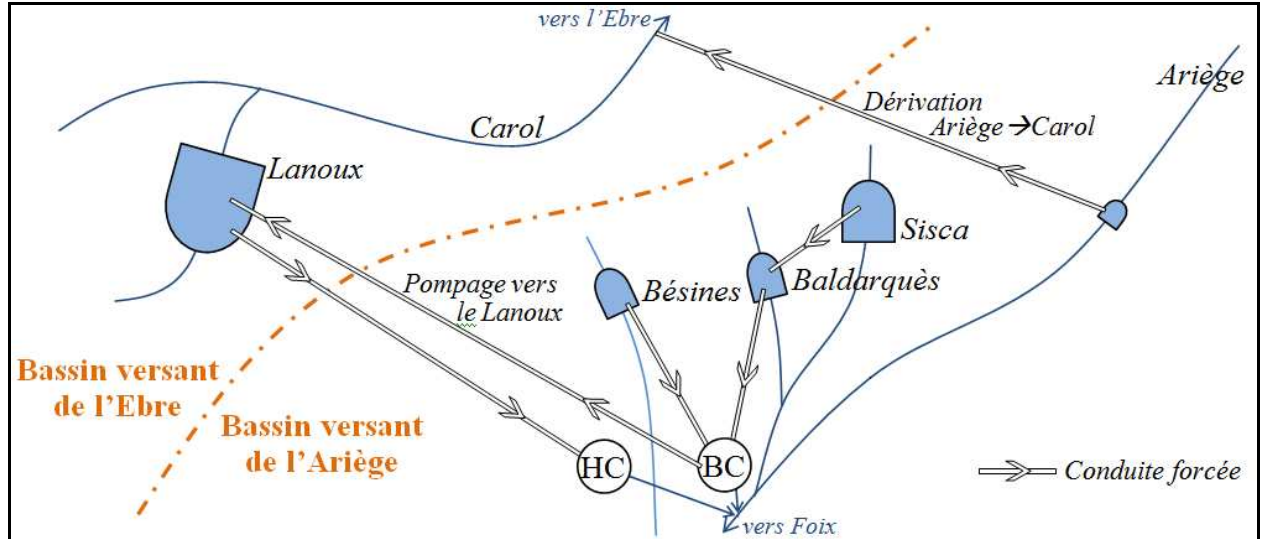


Figure 20 : Schéma de fonctionnement du « système l'Hospitalet »

La prise en compte de cette spécificité pour la naturalisation se traduit par la relation :

$$Q_{\text{naturalisé}}^{(J)} = Q_{\text{observé}}^{(J)} + \sum_{R_{tm} \in \{\text{Retenues}\} - \{\text{Hospitalet BC et HC}\}} (ANR_{R_{tm}} - Q_{\text{turbiné } R_{tm}})^{(J)}_{\text{transféré}}$$

$$+ \left(\begin{array}{c} \Delta Res_{\text{Hospitalet BC}} \\ - Q_{\text{Dérivés Carol} \rightarrow \text{Ariège}} \\ + Q_{\text{Dérivés Ariège} \rightarrow \text{Carol}} \end{array} \right)^{(J)}_{\text{transféré}}$$

Or :

$$\begin{cases} \Delta Res_{\text{Hospitalet BC}} = Q_{\text{entrée}} - Q_{\text{sortie}} = ANR_{\text{Hospitalet BC}} - (Q_{\text{turbins Hospitalet BC}} + Q_{\text{pompés vers le Lanoux}}) \\ Q_{\text{Dérivés Carol} \rightarrow \text{Ariège}} = Q_{\text{turbins Hospitalet HC}} \\ Q_{\text{Dérivés Ariège} \rightarrow \text{Carol}} = Q_{\text{pompés vers le Lanoux}} + Q_{\text{Dérivation Ariège-Carol}} \end{cases}$$

Donc :

$$Q_{\text{naturalisé}}^{(J)} = Q_{\text{observé}}^{(J)} + \sum_{R_{tm} \in \{\text{Retenues}\} - \{\text{Hospitalet BC et HC}\}} (ANR_{R_{tm}} - Q_{\text{turbiné } R_{tm}})^{(J)}_{\text{transféré}}$$

$$+ \left(\begin{array}{c} ANR_{\text{Hospitalet BC}} - Q_{\text{turbins Hospitalet BC}} - Q_{\text{pompés vers le Lanoux}} \\ - Q_{\text{turbins Hospitalet HC}} \\ + Q_{\text{Dérivation Ariège-Carol}} + Q_{\text{pompés vers le Lanoux}} \end{array} \right)^{(J)}_{\text{transféré}}$$

$$\Rightarrow \boxed{\begin{aligned} Q_{\text{naturalisé}}^{(J)} = Q_{\text{observé}}^{(J)} + & \sum_{R_{tm} \in \{\text{Retenues}\} - \{\text{Hospitalet BC et HC}\}} (ANR_{R_{tm}} - Q_{\text{turbiné } R_{tm}})^{(J)}_{\text{transféré}} \\ & + (ANR_{\text{Hospitalet BC}} - Q_{\text{turbins Hospitalet BC}})^{(J)}_{\text{transféré}} \\ & - (Q_{\text{turbins Hospitalet HC}})^{(J)}_{\text{transféré}} \\ & + (Q_{\text{Dérivation Ariège-Carol}})^{(J)}_{\text{transféré}} \end{aligned}}$$

Équation 3

4.1.2 Transferts des débits et application à la naturalisation de l'Ariège à Foix

Entre 1990 et 2004, nous disposons de toutes les données pour appliquer l'Équation 3 à Foix au pas de temps journalier. Cependant, la question des temps et des modes de transfert se pose. Nous avons donc observé les chroniques de débits pour trouver un moyen de les estimer.

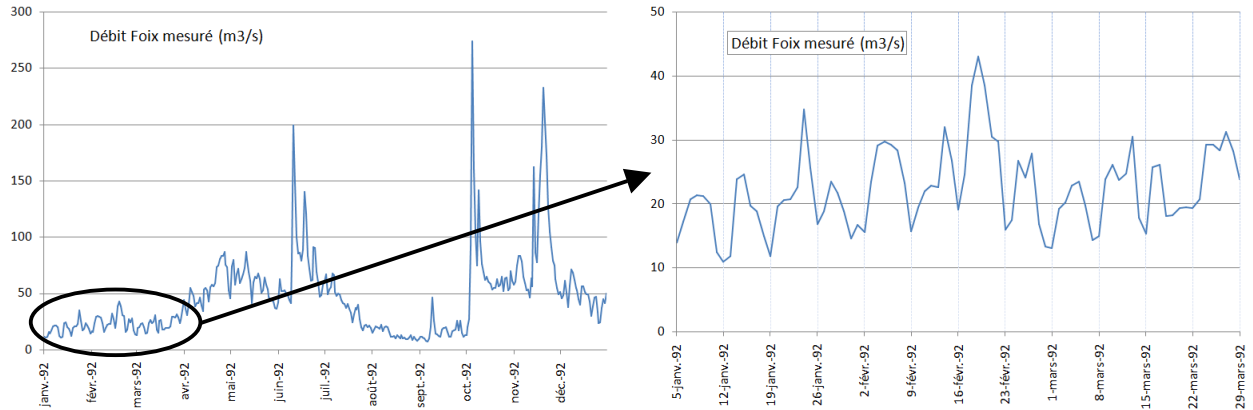


Figure 21 : Chroniques de débits de l'Ariège à Foix

Sur les chroniques de la Figure 21, on observe clairement des créneaux de débits sur les semaines calendaires. Ceux-ci peuvent être expliqués par la diminution des volumes turbinés le week-end, du fait des besoins réduits en électricité (fermeture des bureaux). Pour s'assurer de ce fait, nous avons analysé la périodicité hebdomadaire du débit de l'Ariège à Foix, en la comparant à celle des débits turbinés sur tout le bassin.

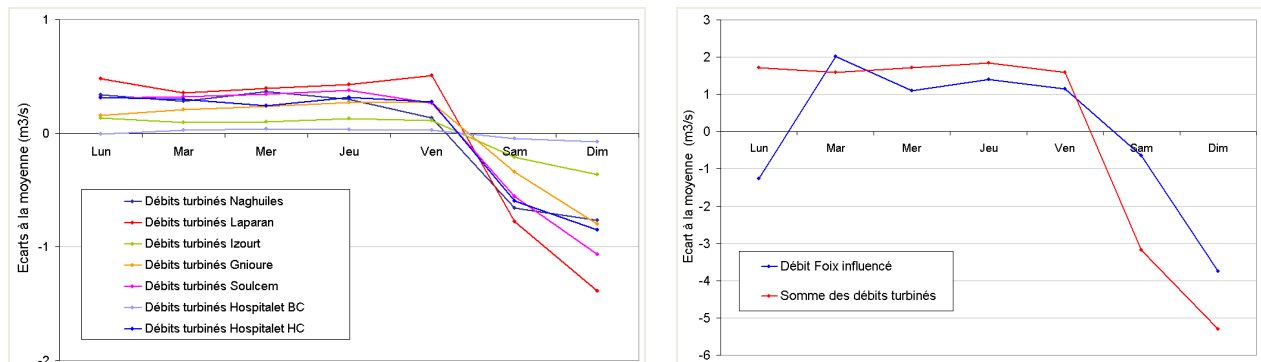


Figure 22 : Périodicité hebdomadaire de l'Ariège à Foix et des débits turbinés sur le bassin (gauche) Turbinés des retenues du bassin (droite) Foix et Somme des turbinés

Nous appellerons « périodicité hebdomadaire » d'un débit les écarts existant entre les moyennes par jour de la semaine de ce débit et son module sur la période d'étude.

On constate effectivement une forte décroissance des débits turbinés en fin de semaine (Samedi et Dimanche) sur la Figure 22. On observe que les débits à Foix présentent eux aussi une périodicité hebdomadaire, avec des débits plus bas en moyenne les Samedi, Dimanche et Lundi (Figure 22, droite).

Les écarts à la moyenne du débit de Foix sur une semaine sont du même ordre de grandeur que ceux de la somme des turbinés. De plus, ces écarts sont nuls sur les témoins naturels, ainsi que sur la dérivation Ariège-Carol, qui se fait indépendamment du jour de la semaine. On peut donc penser que ces écarts sont dus au transfert des débits turbinés depuis les retenues jusqu'à l'exutoire. Le décalage d'un jour entre la périodicité des turbinés et celle de Foix indique que le temps de transfert n'est pas négligeable, et est inférieur à 24 heures.

On retrouve ces mêmes conclusions en analysant la périodicité hebdomadaire à partir de l'Équation 3. En effet, la moyenne se distribuant sur l'addition et la soustraction, on a pour chaque jour de semaine S :

$$\forall S \in \{\text{Lundi}, \text{Mardi}, \text{Mercredi}, \text{Jeudi}, \text{Vendredi}, \text{Samedi}, \text{Dimanche}\};$$

$$\underbrace{\left(\overline{Q_{\text{naturalisé}}^{(S)}} - \overline{Q_{\text{naturalisé}}} \right)}_{\mathbf{0}} = \left(\overline{Q_{\text{observé}}^{(S)}} - \overline{Q_{\text{observé}}} \right) + \sum_{Rtn \in \{\text{Retenues}\} - \{\text{Hospitalet BC et HC}\}} \left(\overline{(ANR_{Rtn})_{\text{transféré}}^{(S)}} - \overline{ANR_{Rtn}} \right) - \sum_{Rtn \in \{\text{Retenues}\} - \{\text{Hospitalet BC et HC}\}} \left(\overline{(Q_{\text{turbiné } Rtn})_{\text{transféré}}^{(S)}} - \overline{Q_{\text{turbiné } Rtn}} \right) + \left(\begin{array}{l} \left(\overline{(ANR_{\text{Hospitalet BC}})_{\text{transféré}}^{(S)}} - \overline{ANR_{\text{Hospitalet BC}}} \right) \\ - \left(\overline{(Q_{\text{turbiné Hospitalet BC}})_{\text{transféré}}^{(S)}} - \overline{Q_{\text{turbiné Hospitalet BC}}} \right) \end{array} \right) - \left(\overline{(Q_{\text{turbiné Hospitalet HC}})_{\text{transféré}}^{(S)}} - \overline{Q_{\text{turbiné Hospitalet HC}}} \right) + \left(\overline{(Q_{\text{Dérivation Ariège-Carol}})_{\text{transféré}}^{(S)}} - \overline{Q_{\text{Dérivation Ariège-Carol}}} \right)$$

Avec $\overline{X}^{(S)}$ la moyenne de X sur le jour de la semaine S , $\overline{X}_{\text{transféré}}^{(S)}$ la moyenne de X passant à l'exutoire du bassin le jour de la semaine (S), et \overline{X} la moyenne de X sur l'ensemble de la période (\overline{X} module de X).

Les débits transférés sont les débits provenant de l'amont que l'on voit passer à l'exutoire. En première approximation, on considère que ce transfert correspond uniquement à un décalage dans le temps. Leur module reste donc inchangé, i.e. $\overline{X}_{\text{transféré}} = \overline{X}$.

On peut donc écrire :

$$\begin{aligned}
& \left(\overline{Q_{\text{naturalisé}}^{(S)}} - \overline{Q_{\text{naturalisé}}} \right) = \left(\overline{Q_{\text{observé}}^{(S)}} - \overline{Q_{\text{observé}}} \right) \\
= & \mathbf{0} \text{ (pas de périodicité hebdo. des débits naturels)} \\
& + \sum_{Rtn \in \{\text{Retenues}\} - \{\text{Hospitalet BC et HC}\}} \left(\overline{(ANR_{Rtn})_{\text{transféré}}^{(S)}} - \overline{(ANR_{Rtn})_{\text{transféré}}} \right) \\
& \quad \quad \quad = \mathbf{0} \text{ (pas de périodicité hebdo. des débits naturels)} \\
& - \sum_{Rtn \in \{\text{Retenues}\} - \{\text{Hospitalet BC et HC}\}} \left(\overline{(Q_{\text{turbiné } Rtn})_{\text{transféré}}^{(S)}} - \overline{(Q_{\text{turbiné } Rtn})_{\text{transféré}}} \right) \\
& + \left(\begin{aligned} & \left(\overline{(ANR_{\text{Hospitalet BC}})_{\text{transféré}}^{(S)}} - \overline{(ANR_{\text{Hospitalet BC}})_{\text{transféré}}} \right) \\ & \quad \quad \quad = \mathbf{0} \text{ (pas de périodicité hebdo. des débits naturels)} \\ & - \left(\overline{(Q_{\text{turbiné Hospitalet BC}})_{\text{transféré}}^{(S)}} - \overline{(Q_{\text{turbiné Hospitalet BC}})_{\text{transféré}}} \right) \end{aligned} \right) \\
& - \left(\overline{(Q_{\text{turbiné Hospitalet HC}})_{\text{transféré}}^{(S)}} - \overline{(Q_{\text{turbiné Hospitalet HC}})_{\text{transféré}}} \right) \\
& + \left(\overline{(Q_{\text{Dérivation Ariège-Carol}})_{\text{transféré}}^{(S)}} - \overline{(Q_{\text{Dérivation Ariège-Carol}})_{\text{transféré}}} \right) \\
& \quad \quad \quad = \mathbf{0} \text{ (pas de périodicité hebdo. des débits dérivés vers le Carol)}
\end{aligned}$$

En notant $\mathcal{E}_{xxx}^{(S)}$ la quantité $\left(\overline{Q_{xxx}^{(S)}} - \overline{Q_{xxx}} \right)$,
et $(\mathcal{E}_{xxx})_{\text{transféré}}^{(S)}$ la quantité $\left(\overline{(Q_{xxx})_{\text{transféré}}^{(S)}} - \overline{(Q_{xxx})_{\text{transféré}}} \right)$, on a donc :

$$\begin{aligned}
\mathcal{E}_{\text{observé}}^{(S)} = & \sum_{Rtn \in \{\text{Retenues}\} - \{\text{Hospitalet BC et HC}\}} \left(\mathcal{E}_{\text{turbiné } Rtn} \right)_{\text{transféré}}^{(S)} \\
& + \left(\mathcal{E}_{\text{turbiné Hospitalet BC}} \right)_{\text{transféré}}^{(S)} \\
& + \left(\mathcal{E}_{\text{turbiné Hospitalet HC}} \right)_{\text{transféré}}^{(S)}
\end{aligned}$$

i.e.

$$\boxed{\mathcal{E}_{\text{observé}}^{(S)} = \sum_{Rtn \in \{\text{Retenues}\}} \left(\mathcal{E}_{\text{turbiné } Rtn} \right)_{\text{transféré}}^{(S)}}$$

Équation 4

$\mathcal{E}_{xxx}^{(S)}$ représente l'écart entre la moyenne du débit xxx sur le jour de la semaine S et son module sur la période d'étude. L'Équation 4 traduit donc bien le fait que la périodicité hebdomadaire du débit observé à Foix est égale à la somme des périodicités hebdomadaires des débits turbinés transférés à l'exutoire.

Soit T le temps de transfert entre les retenues et l'exutoire en heures ($T \leq 24H$, cf. paragraphe plus haut). En première approximation, on considère que T est constant pour l'ensemble des retenues et quelque soit le débit.

Soit $Q^{(J-1)}$ le débit turbiné le jour (J-1) au niveau d'une retenue. La dernière goutte turbinée le jour (J-1) va donc mettre le temps T pour arriver jusqu'à Foix. Ainsi, le jour J, on voit arriver à l'exutoire l'eau turbinée la veille pendant T Heures, et l'eau turbinée le jour même pendant (24-T) Heures. Le débit turbiné transféré à l'exutoire s'écrit donc :

$$(Q)_{\text{transféré}}^{(J)} = \underbrace{\left(\frac{T}{24}\right)}_{1-\alpha} \cdot Q^{(J-1)} + \underbrace{\left(\frac{24-T}{24}\right)}_{\alpha} \cdot Q^{(J)}$$

$\alpha = 1 - \frac{T}{24}$ est appelé *coefficient de transfert*. Comme $T \leq 24H$, on a $0 < \alpha \leq 1$.

Cette formulation des débits transférés en fonction de α permet de réécrire l'Équation 3 de la façon suivante :

$$Q_{\text{naturalisé}}^{(J)} = Q_{\text{observé}}^{(J)} + \sum_{Rtm \in \{\text{Retenues}\} - \{\text{Hospitalet HC}\}} \left((1-\alpha) \cdot ANR_{Rtm}^{(J-1)} + \alpha \cdot ANR_{Rtm}^{(J)} \right) - \sum_{Rtm \in \{\text{Retenues}\}} \left((1-\alpha) \cdot Q_{\text{turbiné } Rtm}^{(J-1)} + \alpha \cdot Q_{\text{turbiné } Rtm}^{(J)} \right) + (1-\alpha) \cdot Q_{\text{Dérivation Ariège-Carol}}^{(J-1)} + \alpha \cdot Q_{\text{Dérivation Ariège-Carol}}^{(J)}$$

Équation 5

Pour naturaliser les débits à partir de l'Équation 5, il ne reste plus qu'à déterminer le coefficient α . Pour cela on réinjecte α dans l'Équation 4, ce qui donne :

$$\varepsilon_{\text{observé}}^{(S)} = \sum_{Rtm \in \{\text{Retenues}\}} \left((1-\alpha) \cdot \varepsilon_{\text{turbiné } Rtm}^{(S-1)} + \alpha \cdot \varepsilon_{\text{turbiné } Rtm}^{(S)} \right)$$

(S-1) étant le jour de la semaine précédent le jour S.

On cherche donc à minimiser l'écart entre la périodicité hebdomadaire du débit à Foix et la périodicité hebdomadaire des débits turbinés transférés à l'exutoire.

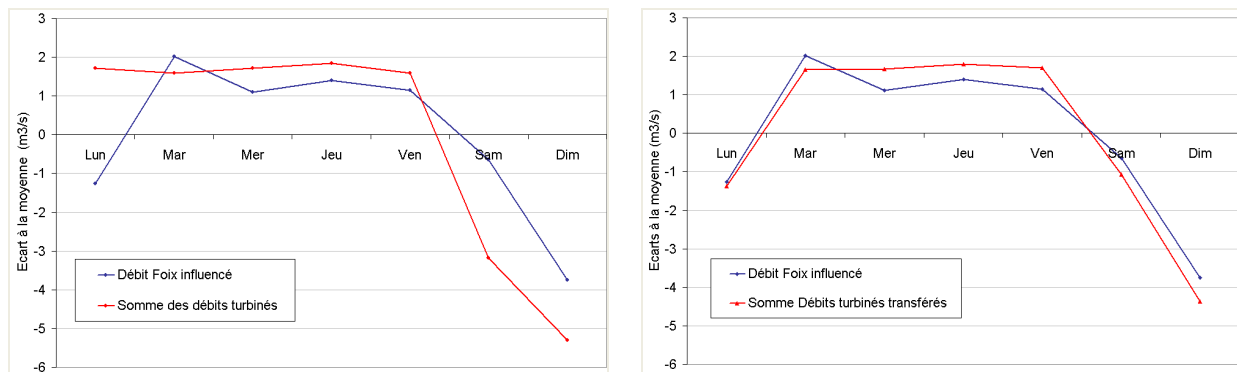


Figure 23 : Comparaison de la périodicité hebdomadaire de Foix et de la somme des débits turbinés (gauche) bruts (droite) transférés d'un coefficient α

Cette minimisation, faite par la méthode des moindres carrés, donne $\alpha = 0.56$, ce qui représente un temps de transfert T de $24 \cdot (1 - \alpha) \approx 10H30$. Etant donné la superficie du bassin (1360 km²), cette valeur est dans le bon ordre de grandeur. La Figure 23 montre les périodicités hebdomadaires obtenues avant et après le transfert des turbinés.

Avec le coefficient α déterminé ci-dessus, nous pouvons calculer un débit naturalisé à Foix en appliquant l'Équation 5 sur la période 1990-2004. Cette naturalisation peut encore être améliorée en tenant compte des débits déversés et réservés, en calculant un coefficient de

transfert variable dans l'année pour chaque retenue, et en tenant compte de l'influence des retenues de faibles volumes.

Nous avons cependant conservé ces approximations dans un premier temps, car la plupart d'entre elles concernent des transferts de très courtes durées devant le pas de temps considéré d'une journée. Seule la non prise en compte des déversés peut jouer de façon importante sur la représentation des pointes de crues, mais les données disponibles n'étaient pas assez précises pour apporter une véritable amélioration.

4.1.3 Critique du débit naturalisé à Foix

Après avoir calculé le débit naturalisé à Foix, nous avons vérifié sa cohérence en regardant dans un premier temps les chroniques de débits et la périodicité hebdomadaire.

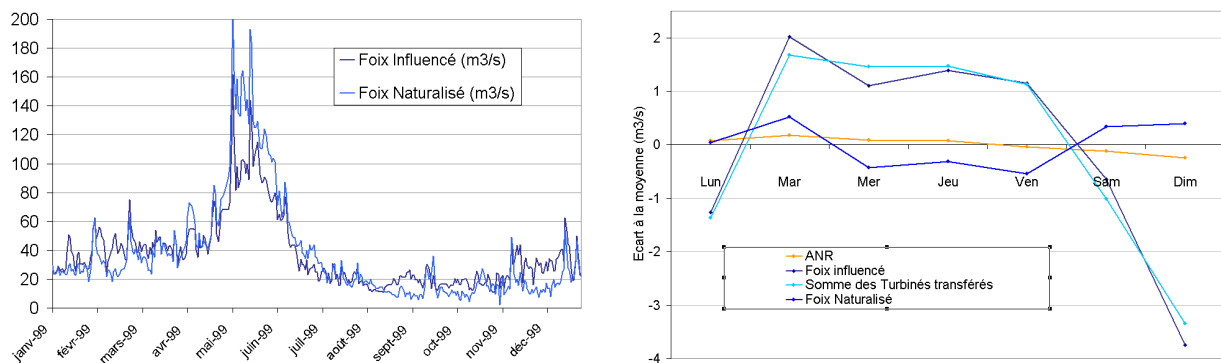


Figure 24 : Comparaisons entre le débit mesuré et le débit naturalisé à Foix sur la période 1990-2004 (gauche) Chroniques sur l'année 1999 (droite) Périodicités hebdomadaires

On constate sur la Figure 24 (droite) que le signal de périodicité hebdomadaire du débit naturalisé est nettement plus faible que celui du débit observé à Foix, même s'il reste plus important que celui des ANR.

On voit de plus sur la chronique présentée en Figure 24 (gauche) que le débit naturalisé est très chahuté. Après vérification des calculs et des hypothèses faites, nous avons remarqué que la retenue de Garrabet (volume de 30 000 m³), située à seulement 10 km en amont de Foix, pouvait expliquer en partie ces variations. Nous avons donc ajouté les variations de réserves de Garrabet à la formule de calcul du débit naturalisé afin de lisser le signal :

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{naturalisé}}^{(J)} = & Q_{\text{observé}}^{(J)} + \sum_{Rtn \in \{\text{Retenues}\} - \{\text{Hospitalet HC}\}} \left((1 - \alpha) \cdot ANR_{Rtn}^{(J-1)} + \alpha \cdot ANR_{Rtn}^{(J)} \right) \\
 & - \sum_{Rtn \in \{\text{Retenues}\}} \left((1 - \alpha) \cdot Q_{\text{turbiné } Rtn}^{(J-1)} + \alpha \cdot Q_{\text{turbiné } Rtn}^{(J)} \right) \\
 & + (1 - \alpha) \cdot Q_{\text{Dérivation Ariège-Carol}}^{(J-1)} + \alpha \cdot Q_{\text{Dérivation Ariège-Carol}}^{(J)} \\
 & + \Delta Res_{\text{Garrabet}}
 \end{aligned}$$

Équation 6

Garrabet étant très proche de Foix, on peut considérer que le temps de transfert des variations de réserves de la retenue jusqu'à l'exutoire est négligeable devant le pas de temps considéré d'une journée. Cependant, étant donné que ces variations présentent une périodicité hebdomadaire importante, un nouveau calcul de α tenant compte de celles-ci a été réalisé sur la période 1994-2004, période de disponibilité des données de Garrabet. Ce calcul a consisté à minimiser l'expression suivante pour chaque jour de la semaine S par la méthode des moindres carrés :

$$\left| \mathcal{E}_{\text{observé}}^{(S)} - \left[\sum_{Rtn \in \{\text{Retenues}\}} \left((1-\alpha) \cdot \mathcal{E}_{\text{turbiné } Rtn}^{(S-1)} + \alpha \cdot \mathcal{E}_{\text{turbiné } Rtn}^{(S)} \right) + \left(\overline{\Delta Res}_{\text{Garrabet}}^{(S)} - \overline{\Delta Res}_{\text{Garrabet}} \right) \right] \right|$$

Le nouveau coefficient de transfert α trouvé est égal à 0.66, ce qui correspond à un temps de transfert de **8H10** environ.

Nous avons ainsi pu réaliser un nouveau calcul du débit naturalisé à Foix avec l'Équation 6 et le coefficient $\alpha=0.66$ sur la période 1994-2004. Entre 1990 et 1993, le débit a été naturalisé sans le lissage par Garrabet (Équation 5) avec le nouveau coefficient α .

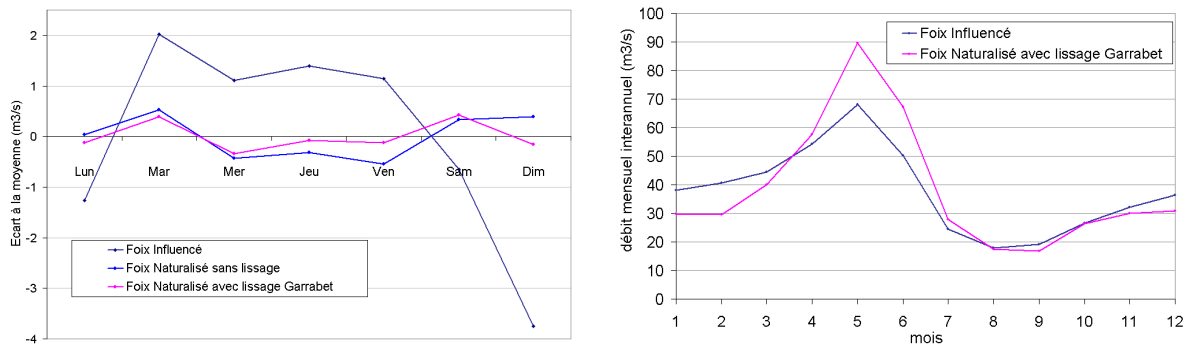


Figure 25 : Comparaisons entre le débit mesuré et le débit naturalisé lissé à Foix sur la période 1990-2004 (gauche) Périodicités hebdomadaires (droite) Débits mensuels inter-annuels

Le débit naturalisé ainsi calculé est plus satisfaisant qu'avant le lissage, même si les chroniques restent un peu chahutées. Le signal de périodicité hebdomadaire est plus faible que sur la naturalisation sans Garrabet, l'écart à la moyenne maximal étant de 0.8 m³/s, contre 3.3 pour le débit influencé et 1.2 pour le naturalisé sans Garrabet (Figure 25, gauche). Les courbes présentées à droite de la Figure 25 traduisent bien la modification du régime hydrologique entre le « naturel » et l'influencé, avec plus d'eau pour le débit influencé en automne et en hiver du fait des débits turbinés depuis les retenues pour le chauffage, moins d'eau lors de la fonte des neiges au printemps, moment de remplissage des ouvrages, et plus d'eau en Aout et Septembre grâce au soutien d'étiage. On peut également voir ces écarts sur les chroniques de débits présentées en Figure 24 (gauche).

4.2 Modélisation du fonctionnement hydrologique de l'Ariège à Foix

4.2.1 Modélisation du comportement hydrologique naturel du bassin

Nous disposons sur le bassin de 7 pluviomètres pour lesquels les données journalières sont complètes de 1975 à 2004. Les stations de température de l'air utilisées sont celles de Tarascon et de l'Hospitalet. Elles ont été complétées sur 238 jours pour Tarascon entre 1980 et 2001 et sur 742 jours pour l'Hospitalet entre 1990 et 1992 avec les données de la station de St Giron, de façon à avoir des séries journalières complètes entre 1975 et 2004. Ces stations sont localisées sur la Figure 19 de la section 4.1.1.

Compte tenu des données de débit naturalisé, on ne pourra optimiser le modèle que sur la période 1990-2004, que nous avons découpée en deux sous-périodes de 8 ans, 1989(1990-1996) et 1997(1998-2004). Comme pour les autres bassins, nous avons travaillé en calage/validation sur chacune d'entre elles, à partir d'un unique jeu de paramètre initial.

Le Tableau 4 permet de comparer le débit moyen journalier interannuel mesuré et calculé pour les périodes successives de calage et de validation. Il donne aussi la valeur du critère de Nash et Stutcliffe et du Nash sur le logarithme des débits.

On observe, comme pour le Salat à Roquefort, une dérive sur les modules entre le calage et la validation. De plus, il semble que le comportement hydrologique du bassin soit plus facilement modélisable sur la période 1997-2004 que sur la période 1988-1995. On peut supposer que la qualité des données y est pour quelque-chose, puisque les données de température de l'air ont été complétées de façon importante entre 1990 et 1992.

	CALAGE 1989(1990-1996)	VALIDATION 1997(1998-2004)	CALAGE 1997(1998-2004)	VALIDATION 1989(1990-1996)
Moyenne Millau Mesuré [m3/s]	39.7	38.9	38.9	39.7
Moyenne Millau Simulé [m3/s]	40.0	36.1	38.5	42.8
Critère de Nash	79.5 %	81.5 %	83.2 %	77.3 %
Nash (ln(Q))	84.4 %	87.0 %	88.4 %	82.9 %

Tableau 4 : Débit journalier interannuel mesuré et calculé, et critères de Nash sur Foix naturalisé

Les Figure 26 et Figure 27 permettent de comparer d'une part les débits mensuels interannuels mesurés et calculés par le modèle hydrologique calé et d'autre part les valeurs classées mesurées et calculées par le modèle hydrologique calé, et ce pour les 2 périodes de calage et de validation.

Les dérives des modules se traduisent par un décalage des courbes de débits mensuels interannuels. D'autre part, on remarque que les débits classés de Foix naturalisé atteignent des valeurs extrêmement basses, qui ne sont pas réaliste. L'erreur ne provient donc pas uniquement de la modélisation, mais aussi de la naturalisation des débits qui reste à améliorer.

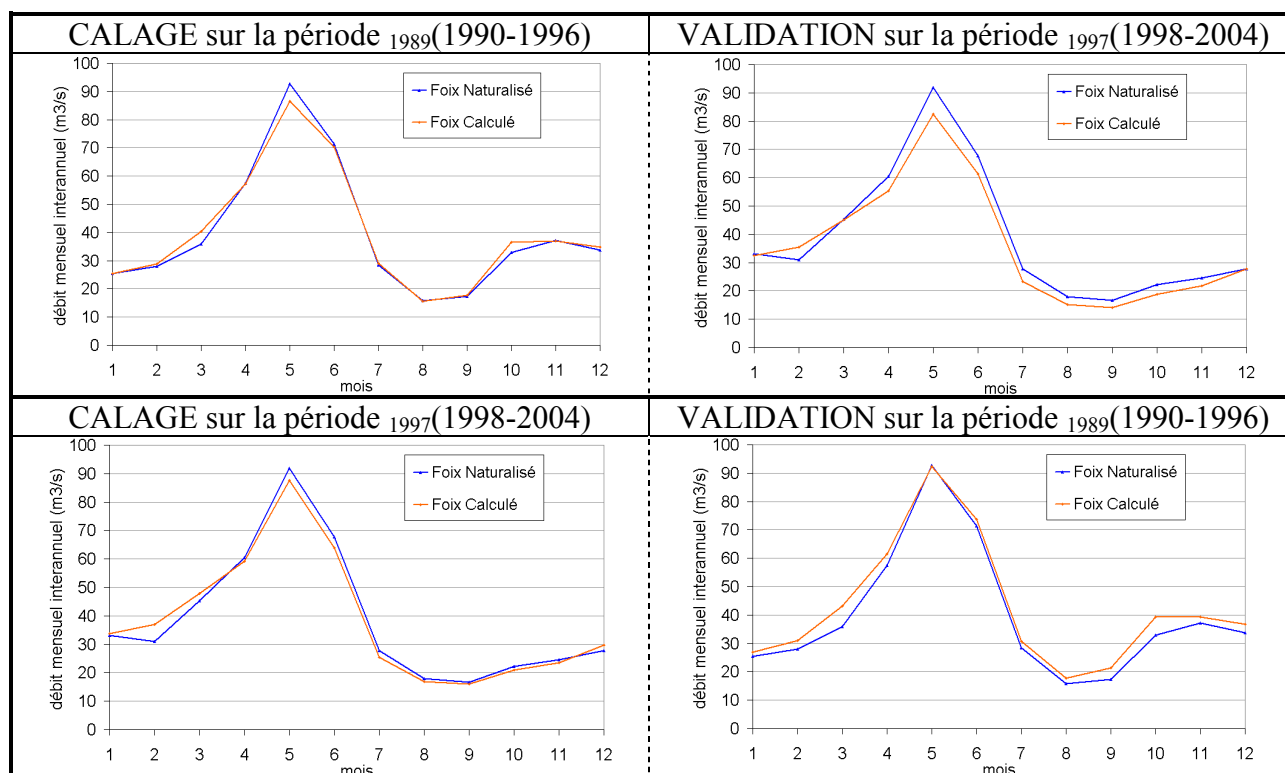


Figure 26 : Comparaison mesure/modèle des débits mensuels interannuels sur Foix naturalisé en calage et validation

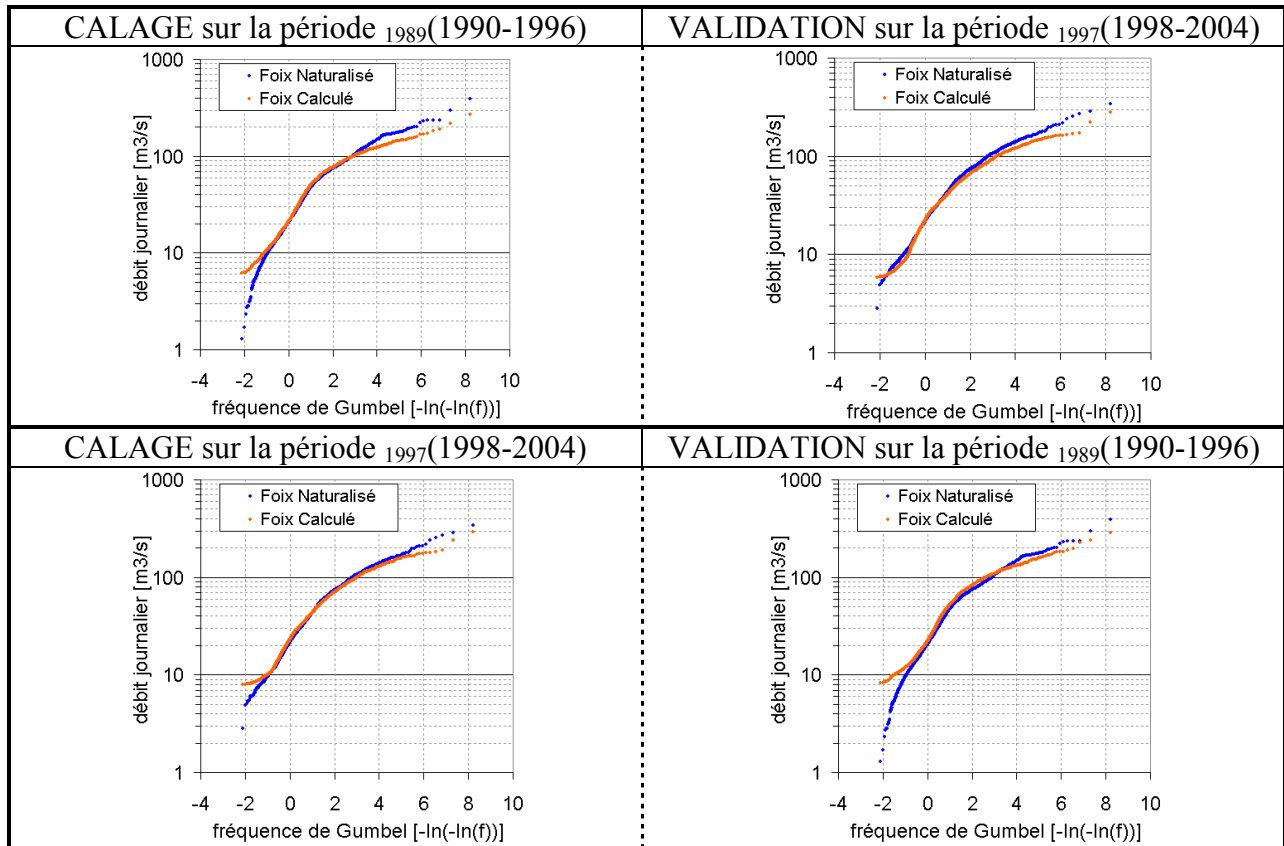


Figure 27 : Comparaison mesure/modèle des débits classés sur Foix naturalisé en calage et validation

Les résultats des autres critères analysés sur les périodes de calage et de validation du modèle sont présentés en [Annexe 6](#).

4.2.2 Validation de la modélisation de Foix naturalisé

Afin d'évaluer la modélisation effectuée sur les débits naturalisés à Foix, nous avons reconstruit un débit influencé à partir du débit naturalisé **simulé** en inversant l'Equation 6. Nous appellerons ce débit « Naturalisé modélisé inversé ». Nous n'avons réalisé cette inversion que sur la sous-période 1998-2004, sur laquelle le forçage météorologique est plus fiable.

Nous avons ensuite calé un modèle CEQUEAU sur les débits influencés, sur la même période 1997(1998-2004), afin de comparer ses performances avec celles du « Naturalisé modélisé inversé ».

Le [Tableau 5](#) permet de comparer le débit moyen journalier interannuel mesuré et calculé sur la période de calage et donne la valeur du critère de Nash et Stutcliffe et du Nash sur le logarithme des débits.

On constate que les performances du naturalisé modélisé inversé sont moins bonnes en Nash qu'un calage direct sur l'influencé. Cependant, le premier semble mieux représenter les périodes d'étiages que le second, puisqu'il a un meilleur Nash sur le logarithme des débits. C'est effectivement le cas sur la chronique de débit présentée en [Figure 28](#).

	CALAGE sur le débit influencé 1997(1998-2004)	Naturalisé modélisé inversé (1998-2004)
Moyenne Foix Mesuré [m3/s]	37.8	37.8
Moyenne Foix Simulé [m3/s]	37.3	37.4
Critère de Nash	73.6 %	72.0 %
Nash (ln(Q))	75.9 %	78.4 %

Tableau 5 : Débit journalier interannuel mesuré et calculé, et critères de Nash pour Foix influencé

La Figure 28 permet de comparer d'une part les débits mensuels interannuels mesurés et calculés par le modèle hydrologique calé et d'autre part les valeurs classées mesurées et calculées par le modèle hydrologique calé, sur la période de calage.

On retrouve chez le naturalisé modélisé inversé la décroissance rapide dans les petites valeurs de débit que l'on avait chez les débits naturalisés. On peut donc penser qu'une amélioration de la naturalisation pourrait également permettre une meilleure représentation du débit influencé. De plus, on voit que les deux simulations ne représentent pas bien les mois d'hiver (février, mars), et que de plus le modèle calé sur les débits influencés a du mal à simuler les débits de septembre et d'octobre, influencés par les turbinages pour l'hydroélectricité.

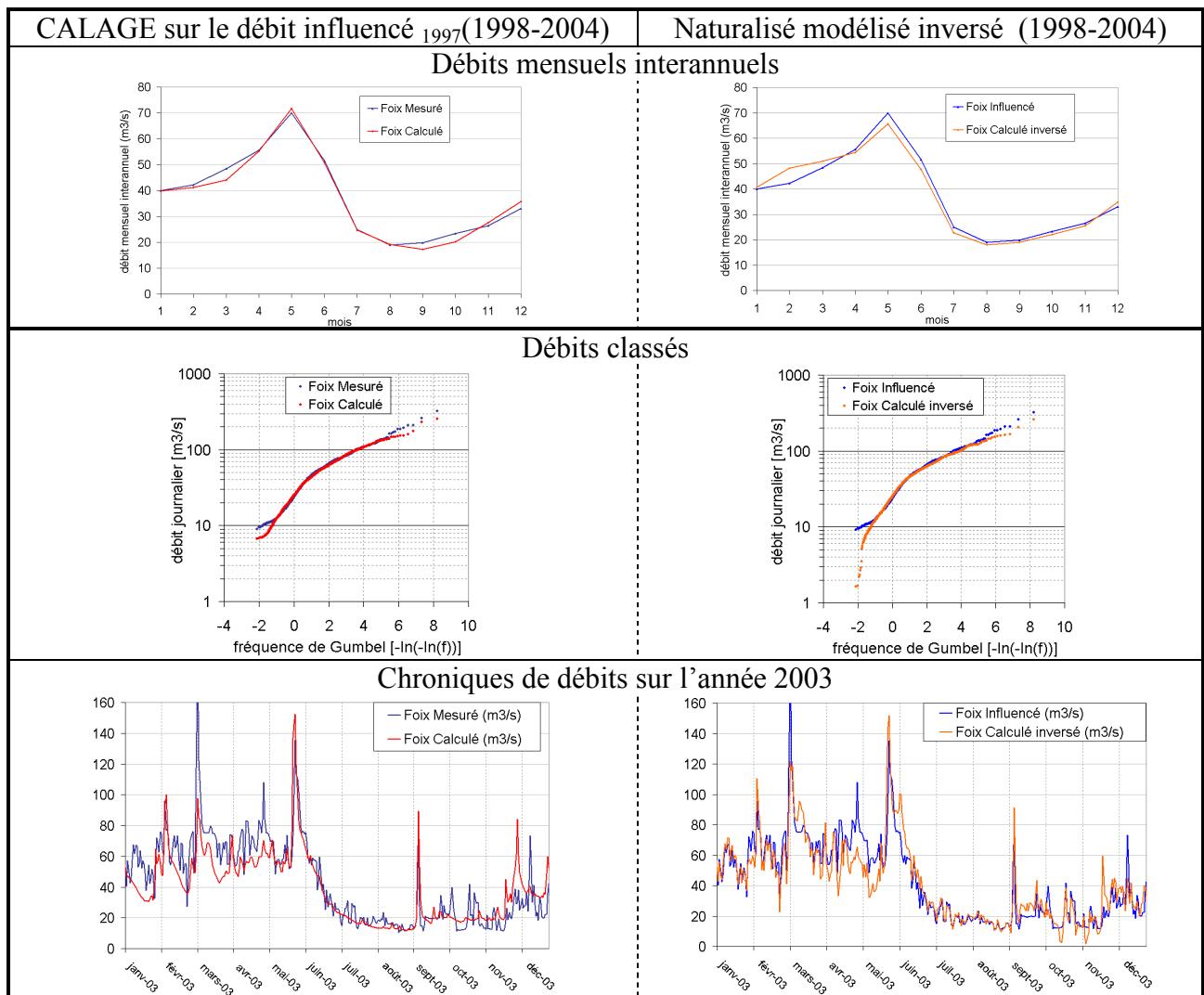


Figure 28 : Comparaison mesure/modèle des débits mensuels interannuels et des débits classés en calage et en validation pour Foix influencé

5 Bilan et Perspectives

Les recherches effectuées durant ce stage de Master 2 se sont orientées vers deux pôles : la naturalisation de débits influencés par la gestion des ressources en eau par l'homme, et la modélisation du comportement hydrologique naturel de sous-bassins versants de la Garonne à Lamagistère.

La naturalisation du débit, c'est-à-dire l'estimation du débit qui serait passé à l'exutoire d'un bassin-versant si le régime n'était pas perturbé par des activités anthropiques telles que l'irrigation ou la production d'hydroélectricité, pourrait constituer un objet d'étude indépendant. Elle permet de faire un bilan de l'état des ressources en eau et d'évaluer l'impact des activités humaines sur le régime hydrologique.

Une méthodologie générale, basée sur les données dont nous disposons, a été proposée pour désinfluencer le débit mesuré des transferts d'eau dans le temps et dans l'espace (stockages et déstockages depuis des retenues, dérivations). Le désinfluencement de régimes perturbés par l'irrigation n'a pas pu être abordé, faute de données et de temps.

L'application de cette méthodologie au cas concret du sous-bassin de l'Ariège à Foix a conduit à une réflexion concernant la prise en compte des temps de transfert à l'intérieur du bassin. Elle a abouti à une analyse de la périodicité des influences et de la transmission de celle-ci au débit à l'exutoire, à partir de laquelle nous avons pu estimer un coefficient de transfert global sur l'année pour tous les ouvrages situés à l'amont du bassin. Ce type de raisonnement ne pourra s'appliquer sur d'autres bassins que si les influences présentent une périodicité, ce qui n'est pas le cas pour les dérivations permanentes par exemple. De plus, il peut encore être affiné en calculant un coefficient de transfert spécifique pour chaque ouvrage en fonction de son éloignement à l'exutoire, et en faisant évoluer ce coefficient par gamme de débit.

La dynamique hydrologique des débits naturalisés obtenus montre des transferts de volumes importants entre la fonte des neiges et les étiages d'hiver. Cependant, à une échelle plus réduite, on observe un bruit de quelques m^3/s sur les chroniques, qui mène à des débits ponctuellement très bas en période d'étiage. Cela se traduit par une courbe des débits classés décroissant très rapidement pour les petites valeurs. On pourra essayer de réduire ce bruit en affinant la naturalisation, mais pour l'éliminer complètement il serait intéressant d'effectuer un lissage sur les petits débits en se basant sur un témoin naturel, comme le fait EDF lors du calcul des Apports Naturels Reconstitués.

Il faut noter enfin que nous avons négligé les déversés lors de la naturalisation, ce qui revient à les compter deux fois (dans le débit influencé et dans les ANR). Ainsi, les très hauts débits sont certainement surestimés.

Les informations récoltées sur les sous-bassins qui n'ont pas pu être étudiés pendant ce stage, et notamment les facteurs pouvant influencer leurs débits, sont présentés en [Annexe 7](#).

Le deuxième volet des recherches a consisté à réaliser des modèles hydrologiques du comportement naturel des sous-bassins versants de la Garonne à Lamagistère à partir du modèle conceptuel spatialisé CEQUEAU. Les seuls sous-bassins pas ou peu influencés sont ceux de Tarn à Millau et du Salat à Roquefort, sur lesquels nous avons travaillé en calage-validation sur deux périodes complémentaires de même longueur. Les deux jeux de paramètres ainsi obtenus permettront par la suite d'évaluer l'incertitude dans la simulation du changement climatique liée à l'ambiguïté du modèle, c'est-à-dire à sa capacité à modéliser le fonctionnement hydrologique des bassins de façon performante avec des jeux différents. Par ailleurs, le calage sur Millau a prouvé que CEQUEAU était apte à représenter des processus naturels. Cependant, à Roquefort, on constate que la qualité de la modélisation dépend également de la qualité des données

d'entrée. Il serait intéressant par la suite d'utiliser des données de température de l'air fiables sur ce bassin, afin de voir si elles entraînent une amélioration des performances du modèle ou non.

Nous avons également cherché à modéliser le régime hydrologique naturel du bassin de l'Ariège à Foix, en calant le modèle sur le débit naturalisé. Les incertitudes liées à la naturalisation et à modélisation s'additionnent alors. Le lissage du débit naturalisé proposé plus haut devrait permettre de réduire les erreurs de naturalisation. De plus, les calages peuvent encore être poussés, ce qui sera certainement fait dans les prochaines semaines.

Enfin, le but du projet de recherche étant de projeter l'évolution de la ressource jusqu'en 2030 dans la perspective d'une augmentation des températures, il aurait été intéressant de tester la capacité du modèle à représenter l'hydrologie d'une période plus sèche en étant calé sur une période humide. Pour cela, on aurait pu choisir une période humide et une période sèche parmi les chroniques disponibles, afin de caler le modèle sur la première et de le valider sur la deuxième. Cependant, pour effectuer une projection sur 30 ans, il faut un calage sur une période suffisamment longue, et les intervalles de disponibilité des données étaient trop courts pour isoler de telles périodes.

On peut remarquer que nous n'avons pas profité de tous les avantages que la spatialisation de CEQUEAU pouvait apporter. Il aurait été intéressant par exemple d'extraire les stocks de neige des mailles amont du bassin de Foix naturalisé et de les comparer avec des données de perche à neige, pour vérifier que la dynamique globale de stockage et de fonte de la neige était bien représentée. Nous ne l'avons pas fait faute de données, mais celles-ci existent et devraient être disponibles prochainement.

Par ailleurs, une autre démarche de naturalisation aurait pu être adoptée, se basant sur l'intégration des variations de réserve directement dans les mailles du modèle CEQUEAU au niveau des retenues, ce qui permettrait de ne pas avoir à construire une fonction de transfert qui fait doublon avec celle de CEQUEAU. Cependant, cette option demanderait une réflexion et un travail de programmation importants, et donc quelques mois supplémentaires.

Nous avons vu que la naturalisation et la modélisation engendrent des incertitudes dont il faudra évaluer l'ordre de grandeur pour valider les résultats de la projection. A celles-ci s'ajouteront les incertitudes liées au modèle climatique et aux scénarios de pluie et de température de l'air. Enfin, l'évolution de la gestion hydroélectrique et des besoins pour l'irrigation risque d'être délicate à modéliser, puisqu'elle ne sera certainement pas indépendante de ce que sera la ressource.

Pour finir, ce stage m'a permis de me familiariser avec un modèle hydrologique conceptuel, et de comprendre en premier lieu que le traitement et la mise en forme des données sont toujours payants, même s'ils demandent un gros effort d'endurance, puisque des données d'entrée douteuses peuvent mener à de grandes incertitudes sur le calage du modèle. Par les nombreux calages que j'ai réalisés, j'ai également appris à interpréter l'influence des paramètres de CEQUEAU sur la réponse du modèle, et à faire des compromis entre l'interprétation physique d'un jeu de paramètre et les résultats des critères de contrôle. En effet, CEQUEAU étant sur-paramétré, le calage automatique peut mener à un Nash excellent avec des valeurs de paramètres peu réalistes. Enfin, j'ai pu acquérir de nouvelles compétences sur SIG en spatialisant les données sur ArcView.

D'autre part, la réflexion sur la naturalisation des débits a été très enrichissante, car elle m'a permis d'estimer à quel point l'homme pouvait influencer le régime hydrologique des cours d'eau, et de me rendre compte de la complexité que pouvait atteindre la gestion sur certains bassins. Les politiques mises en place actuellement pour préserver les milieux naturels laissent envisager une préoccupation de plus en plus grande pour la quantification des influences exercées par les usagers sur la ressource en eau.

Références bibliographiques

- CABALLERO Y., HABETS F., NOILHAN J. & MOOR J.F., 2004. Le changement climatique : Etude de l'impact sur les ressources en eau du bassin Adour-Garonne. *Revue de l'Agence de l'Eau*, 88, pp. 5-11.
- CABALLERO Y. & NOILHAN J., 2003. Etude de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau du bassin Adour Garonne. *Etude réalisée pour l'Agence de l'Eau Adour-Garonne*, 176 p.
- CHARBONNEAU R., FORTIN J.P. & MORIN G., 1977. The CEQUEAU Model : description and examples of its use in problemes related to water ressource management. *Bull. Sc. Hydrologiques*, 22, pp. 93-202.
- COMITE DU BASSIN ADOUR-GARONNE, 2004. Plan de Gestion des Etiages « Garonne-Ariège ». Février 2004, 77 p.
- COMMISSION GEOGRAPHIQUE TARN-AVEYRON, 2004. Etat des lieux du territoire Version 2, Synthèse, Document provisoire. Juin 2004, 60 p.
- DUPEYRAT A. & BERTIER C., 2006. Impact du changement climatique sur les régimes hydrologiques et thermiques de la Loire. *Publication interne EDF*, 90 p.
- GALEA G., VASQUEZ-PAULUS S., RENARD B. & BREIL P., 2006. L'impact des prélèvements d'eau pour l'irrigation sur les régimes hydrologiques des sous-bassins du Tescou et de la Séoune. *Etude réalisée pour l'Agence de l'Eau Adour-Garonne*, 26 p.
- HENDRICKX F., 2001. Impact hydrologique d'un changement climatique sur le bassin du Rhône. *Hydroécol. Appl.*, Tome 13 Vol. 1, pp. 77-100.
- JONES R.N., 2000. Analysing the risk of climate change using an irrigation demand model. *CLIMATE RESEARCH*, Vol. 14, pp. 89-100.
- MATHEVET T., 2005. Quels modèles pluie-débit globaux au pas de temps horaire ? Développements empiriques et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants. *Thèse de Doctorat*, ENGREF (Paris), CEMAGREF (Antony), 463 p.
- MOOR J.F., 2001. Les Plans de Gestion des Etiages. *Revue de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne*, 82, pp. 3-12.
- MOREAU F., 2004. Gestion des étiages sévères : l'exemple de la Loire. *La Houille Blanche*, N°4, pp. 70-76.
- MANOHA B., HENDRICKX F., DUPEYRAT A., BERTIER C. & PAREY S., 2007. Impact des évolutions climatiques sur les activités d'EDF (Projet IMPEC). *Congrès SHF-29*, 8 p.
- NASH J.E. & STUTCLIFFE J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models, part 1 : a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), pp. 282-290.
- PAYAN J.L., PERRIN C., ANDREASSIAN V. & MICHEL C., 2007. Can we account for man-made reservoirs in a lumped rainfall-runoff model ? *En cours de publication dans Water Ressources Research*, 24 p.
- SAUQUET E., LEBLOIS E., RENARD B., HAOND M. & JOUVE D., 2005. Examen de la vulnérabilité de la ressource en eau vis-à-vis des fluctuations climatiques, Application aux étiages du bassin du Rhône. Août 2005, 57 p.

Sites internet :

Site de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne : www.eau-adour-garonne.fr

Site de l'Institut National de la Recherche Scientifique : www.inrs-ete.uquebec.ca

Annexe 1 : Petit glossaire de la gestion des étiages

SDAGE (Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux) : outil de planification à l'échelle du bassin créé par la loi sur l'eau du 3 Janvier 1992 et mis en place par les Agences de l'Eau. Le SDAGE Adour-Garonne intégrera d'ici à 2009 un document de planification pour l'atteinte d'un bon état des milieux aquatiques en 2015, conformément aux objectifs de la Directive Cadre sur L'Eau (DCE*).

PGE (Plan de Gestion des Etiages) : outil instauré par un SDAGE ayant pour but de définir un mode de gestion équilibré des ressources en eau à l'échelle d'un sous-bassin versant, en réunissant les différents acteurs de ce sous-bassin : maître d'ouvrage, Etat (établissements publics locaux et collectivités) et usagers (associations et organisations professionnelles).

DOE (Débit Objectif d'Etiage) : « débit au dessus duquel sont assurés la coexistence normale de tous les usages et le bon fonctionnement du milieu aquatique. Il doit en conséquence être garanti chaque année pendant l'étiage, avec un niveau de tolérances préalablement défini. »

DCR (Débit de CRise) : « débit au dessous duquel sont mis en péril l'alimentation en eau potable et la survie des espèces présentes dans le milieu. Il doit en conséquence être impérativement sauvegardé par toutes mesures préalables, notamment de restriction des usages. »

DCE (Directive Cadre sur l'Eau) : directive adoptée en 2000 par le conseil et le parlement européen fixant des objectifs pour la préservation et la restauration des eaux superficielles et souterraines, notamment la surveillance de l'état qualitatif et quantitatif de ces eaux.

Annexe 2 : Modèle CEQUEAU

Les paramètres du modèle CEQUEAU associés à chacune des composantes hydrologiques sont les suivants :

- La formation et la fonte du stock de neige :
 - o STRNE Seuil de transformation pluie-neige (°C)
 - o JoNei Jour de l'année au maximum d'ensoleillement pour la fonte de la neige
 - o TF Taux potentiel de fonte (mm/°C/jour)
 - o TS Seuil de température de fonte (°C)
 - o TTD Coefficient de déficit calorifique
 - o TTS Température du murissement du stock de neige (°C)
- L'évapotranspiration :
 - o Th1 Formule de Thornthwaite ($ETP \sim (Tair/Th1)^{Th2}$)
 - o Th2 Formule de Thornthwaite ($ETP \sim (Tair/Th1)^{Th2}$)
 - o Culture Coefficient cultural moyen (sur tout le bassin)
 - o JoEva Jour de l'année au maximum d'ensoleillement pour l'ETP
 - o HSeuil Seuil d'évapotranspiration du réservoir Sol (mm)
 - o HNapSeuil Seuil d'évapotranspiration du réservoir Sol (mm)
 - o EvNap Fraction d ETP prélevée sur la nappe
- Les écoulements dans la zone non saturée (Sol) :
 - o Imper Proportion de bassin imperméable (%)
 - o HSolMx Hauteur maximale du réservoir Sol (mm)
 - o VSolH Coefficient de Vidange Haut du Sol (j-1)
 - o VSolB Coefficient de Vidange Bas du Sol (j-1)
 - o HInter Hauteur intermédiaire du réservoir Sol (mm)
 - o HInfil Hauteur d'infiltration du réservoir Sol (mm)
 - o Infil Coefficient d'infiltration Sol->Nappe (j-1)
- Les écoulements dans la zone saturée (Nappe) :
 - o VNapH Coefficient de Vidange Haut de la Nappe (j-1)
 - o VNapB Coefficient de Vidange Bas de la Nappe (j-1)
 - o HNapMx Hauteur maximale du réservoir Nappe (mm)

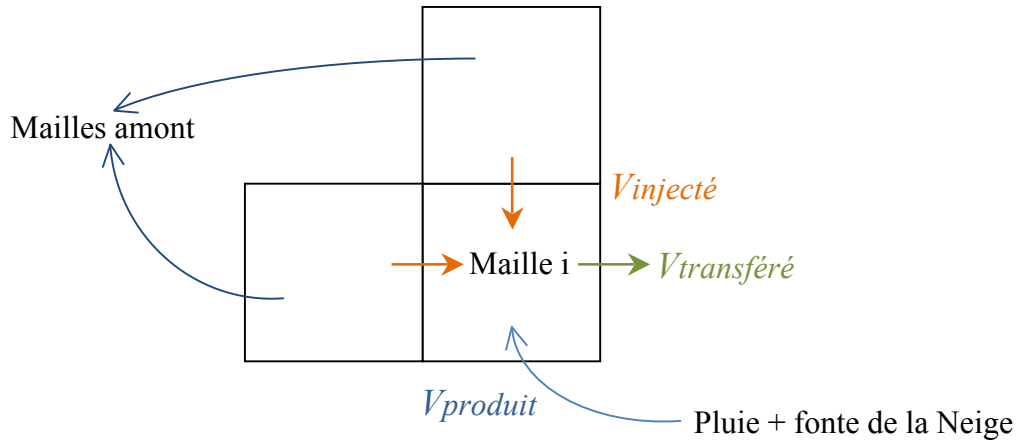
A ces paramètres s'ajoutent les coefficients de correction des pluies et températures en fonction de l'altitude :

- o COEP Coefficient de correction des précipitations (mm/mètre/an)
- o COET Coefficient de correction des températures (°C/1000m)

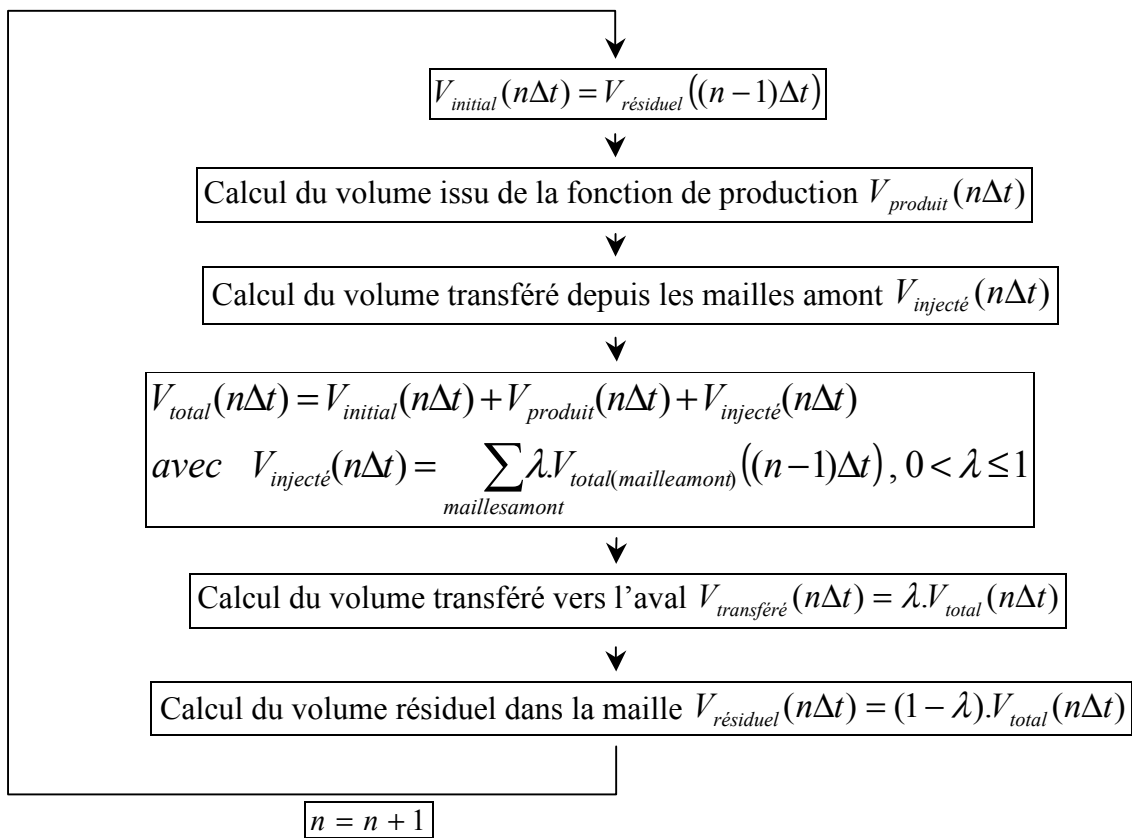
Enfin, deux paramètres régissent les transferts entre mailles :

- o NPas Nombre de sous pas de temps
- o Transfert Coefficient de vidange d'une Maille à l'autre

Ci-dessous se trouve le schéma algorithmique régissant le mode de transfert de l'eau d'une maille à l'autre. Dans ce schéma, le paramètre CEQUEAU « Transfert » est équivalent au coefficient λ , et le paramètre « NPas » indique le nombre de mailles auquel est appliqué l'algorithme par pas de temps.



Algorithme pour une maille i et un pas de temps Δt :



Annexe 3 : Traitement des données manquantes

Méthode de traitement des données :

$$P_{\text{manquant}} = \alpha' . P_1 + \beta' . P_2$$

$$\begin{cases} T \text{ max}_{\text{manquant}} = \alpha' . T_1 \text{ max} + \beta' \\ T \text{ min}_{\text{manquant}} = \alpha' . T_1 \text{ min} + \beta' \end{cases}$$

Avec X_i stations de donnée les plus proche de X et α et β des coefficients calculé par la méthode des moindres carrés sur la période de donnée commune entre X et X_i .

Exemple de traitement sur la station pluviométrique de Bouloc :

Bouloc - Station Pluvio DTG P4676

Données manquantes

du	au	durée
14/04/2004	18/04/2004	5
03/10/2004	31/10/2004	29

Stations utilisées

Alrance DTG P4634, Vezins DTG P4670, Massegros DTG P4610, Rodez DTG P4660

Modèle utilisé

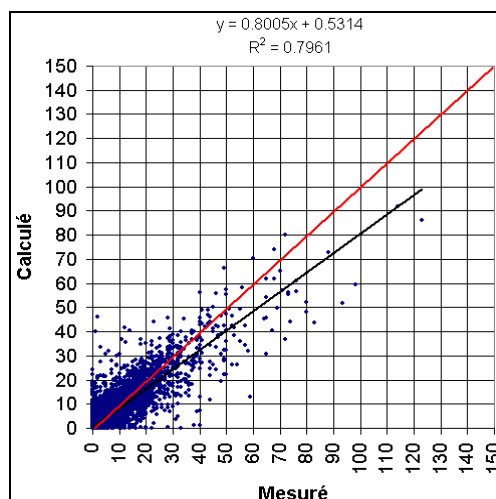
Formule : $H = ax_1 + bx_2$

Optimisation par la méthode des moindres carrés grâce au solveur excel.

Du 14/04/2004 au 18/04/2004, et du 10/10/2004 au 30/10/2004

$P \text{ Bouloc} = 0.42 * P \text{ Alrance} + 0.53 * P \text{ Vezins}$

RESULTATS



Ecart moyen	13.0 (1/10 ^{ème} mm)
Biais	0.82 (1/10 ^{ème} mm)
Coefficient de détermination R ²	0.80

Annexe 4 : Performances du modèle hydrologique CEQUEAU en Calage/Validation sur le bassin du Tarn à Millau

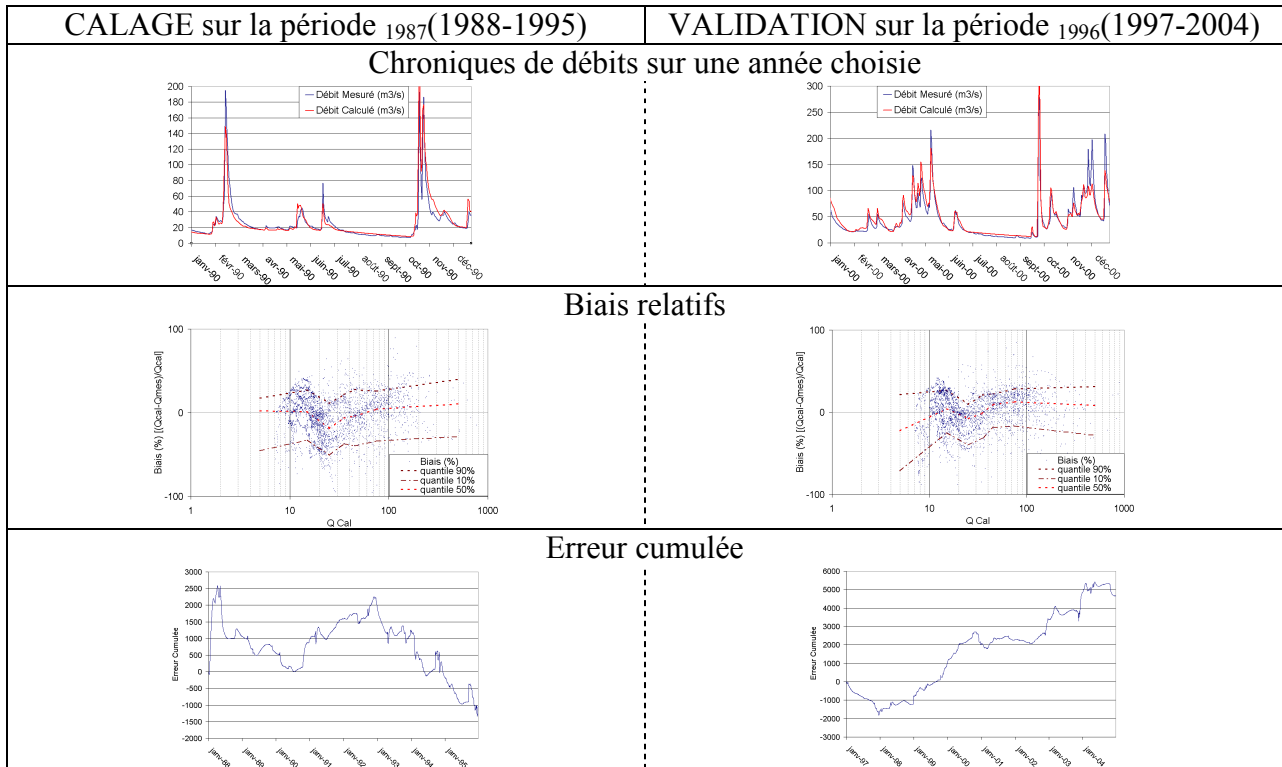


Figure 29 : Comparaison entre mesure et modèle du Tarn à Millau en calage sur 1987(1988-1995) et validation sur 1996(1997-2004)

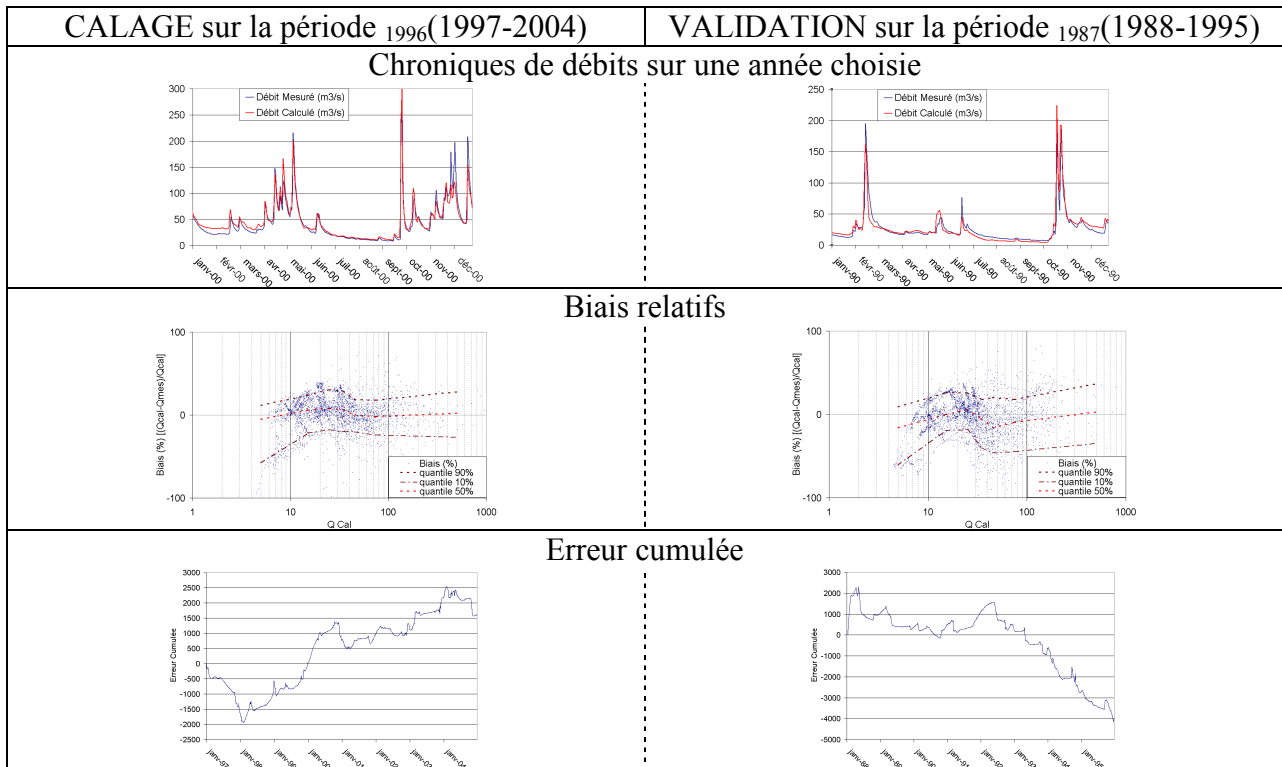


Figure 30 : Comparaison entre mesure et modèle du Tarn à Millau en calage sur 1996(1997-2004) et validation sur 1987(1988-1995)

Annexe 5 : Performances du modèle hydrologique CEQUEAU en Calage/Validation sur le bassin du Salat à Roquefort

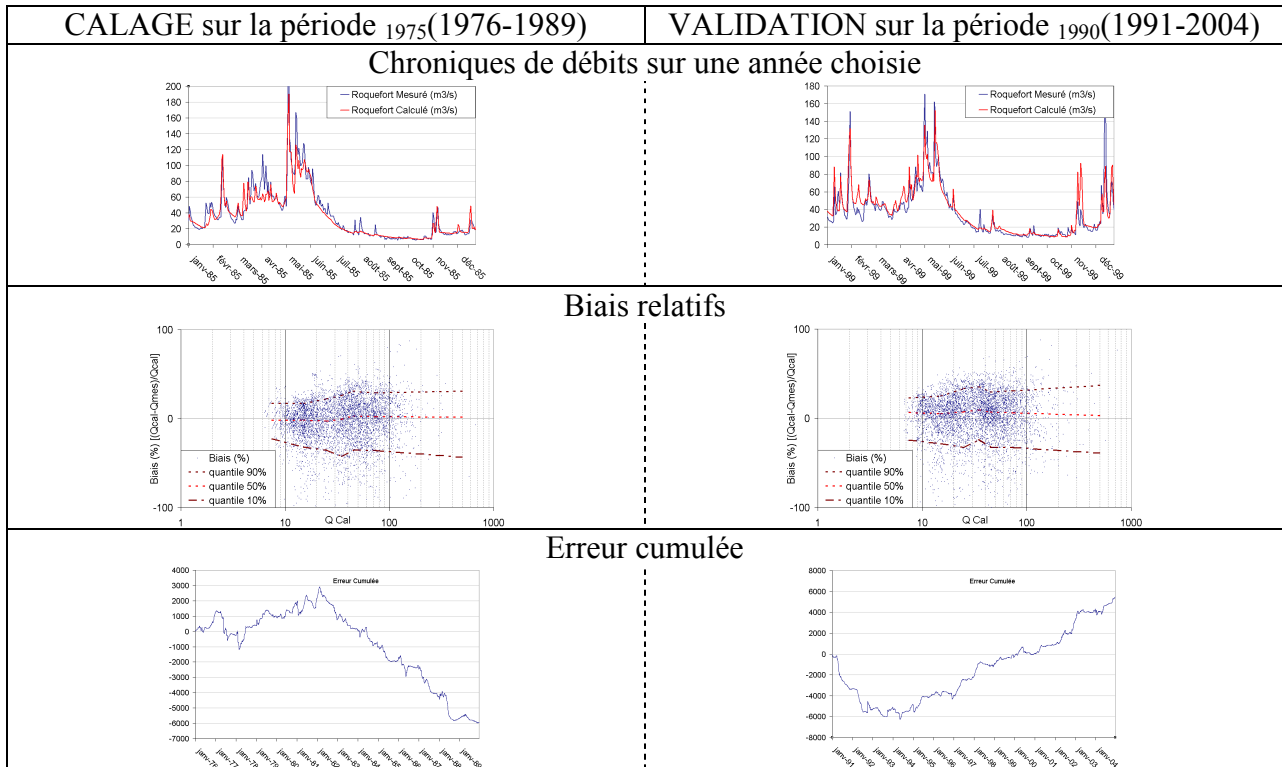


Figure 31 : Comparaison entre mesure et modèle du Salat à Roquefort en calage sur 1975(1976-1989) et validation sur 1990(1991-2004)

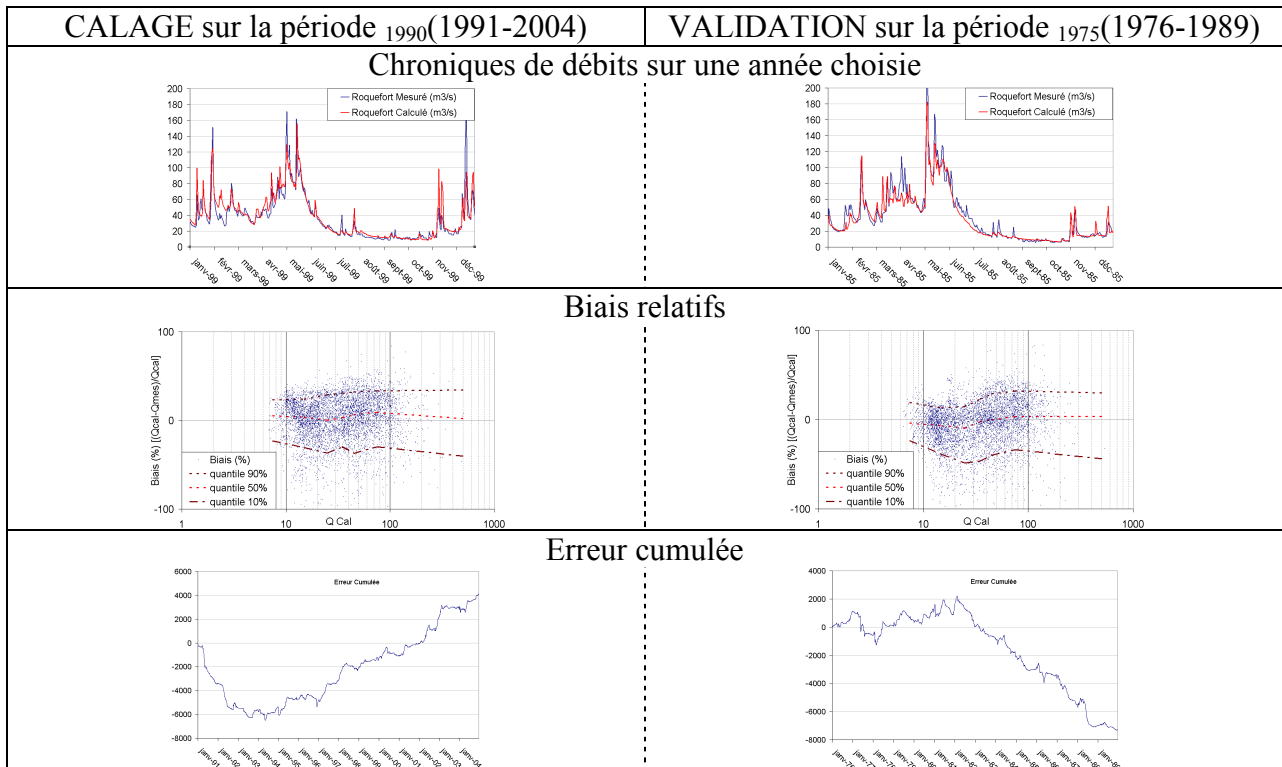


Figure 32 : Comparaison entre mesure et modèle du Salat à Roquefort en calage sur 1990(1991-2004) et validation sur 1975(1976-1989)

Annexe 6 : Performances du modèle hydrologique CEQUEAU en Calage/Validation sur le bassin de l'Ariège naturalisé à Foix

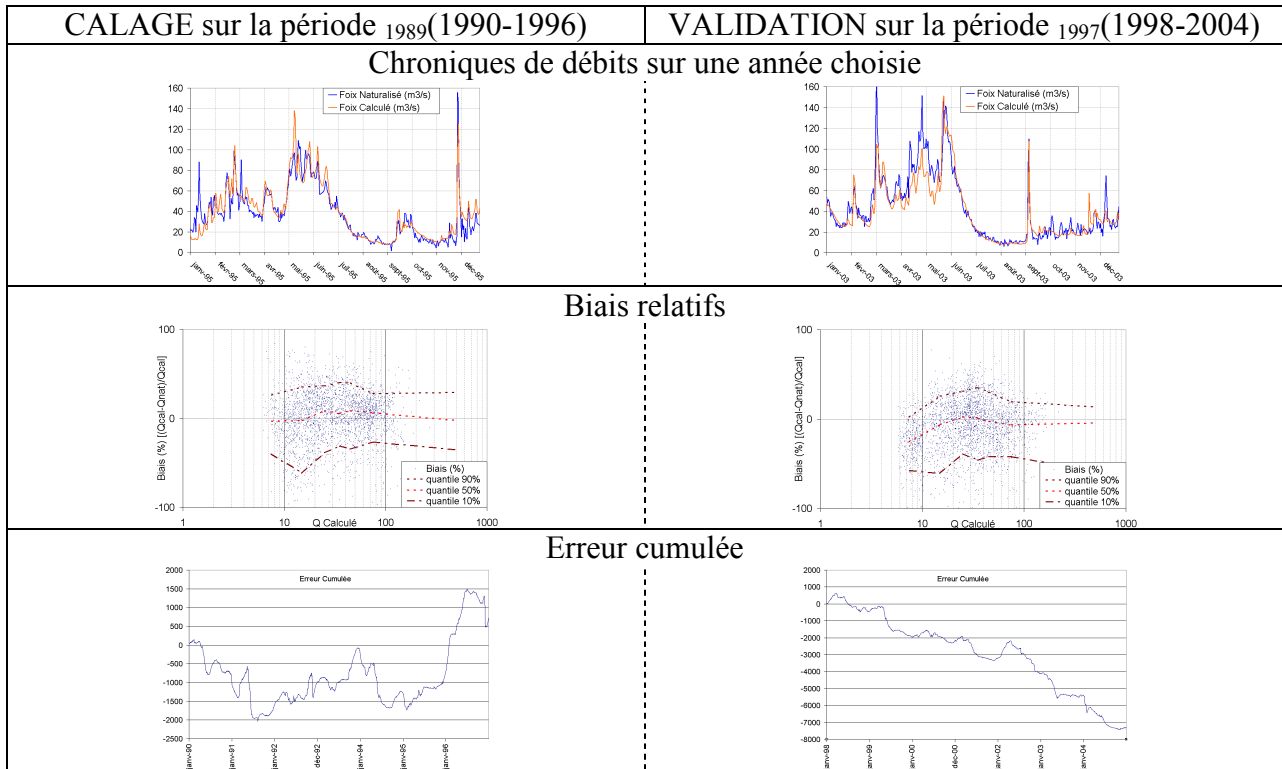


Figure 33 : Comparaison entre mesure et modèle de l'Ariège à Foix naturalisé en calage sur 1989(1990-1996) et validation sur 1997(1998-2004)

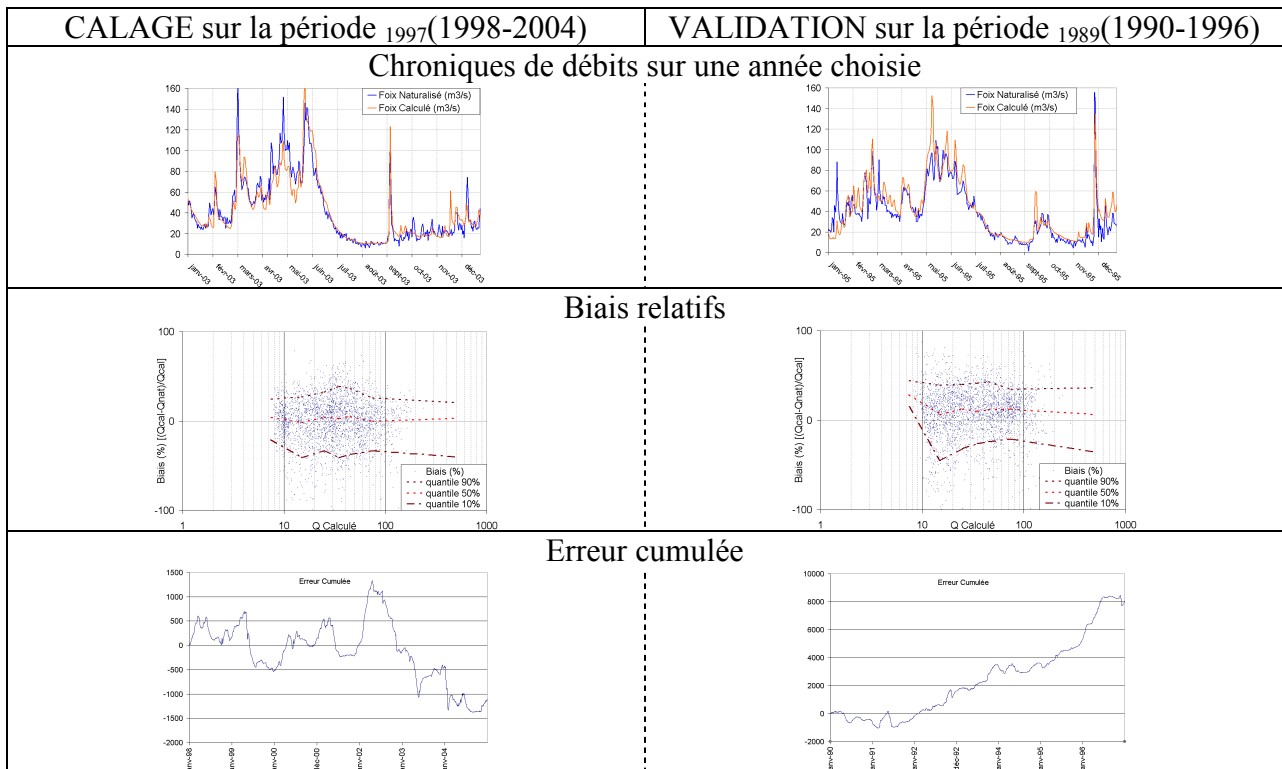


Figure 34 : Comparaison entre mesure et modèle de l'Ariège à Foix naturalisé en calage sur 1997(1998-2004) et validation sur 1989(1990-1996)

Annexe 7 : Bilan des données disponibles pour la naturalisation des sous-bassins restant à traiter

Le Bassin de la Garonne à Montréjeau

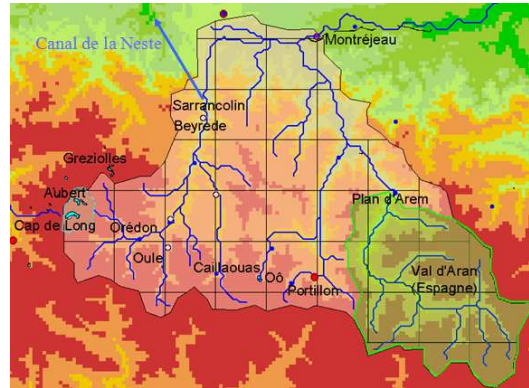


Figure 35 : Bassin de la Garonne à Montréjeau maillé

24 retenues, d'un volume total de 22,6 millions de m³, sont réparties sur la portion du bassin de la Garonne à Montréjeau située côté espagnol. Les seules informations dont nous disposons sur ces retenues sont des influences mensuelles à la frontière fournies par le gestionnaire espagnol.

La gestion du lac d'Oô, localisé sur un affluent de la Garonne, est elle aussi mal connue, aucun ANR n'ayant été calculé sur ce barrage. On sait d'autre part qu'il est chargé de déverser 5 Mm³ dans la Garonne pendant les périodes d'étiage sévère.

Les ouvrages d'Oule, d'Orédon et de Caillaouas sont gérés par la Shem, concurrent d'EDF, mais des données concernant leur gestion pourraient être disponibles par convention avec EDF.

Les volumes retenus dans les barrages de Cap-de-Long et d'Aubert sont dérivés vers le Gave de Pau pour être turbinés à l'usine hydroélectrique de Pragnères. Comme les débits prélevés ne sont pas mesurés, l'ANR du bassin de ces retenues est calculé à partir d'un témoin naturel en faisant un rapport de surfaces de bassins versants.

Enfin, le canal d'irrigation de la Neste prélève 97 Mm³ dans la Neste en période d'étiage pour réalimenter les Coteaux de Gascogne.

Les bassins de l'Agout à Lavour, du Tarn à Villemur et de l'Aveyron à Loubéjac

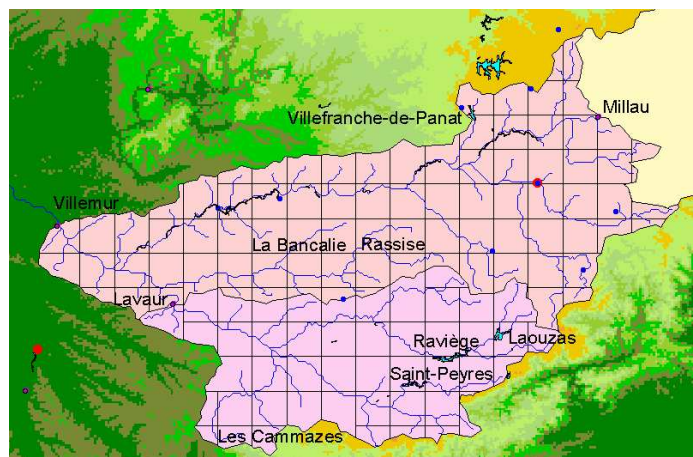


Figure 36 : Bassins de l'Agout à Lavour et du Tarn à Villemur maillés

L'Agout à Lavour est un point nodal du SDAGE Adour-Garonne, mais sa station de débit a été déplacée en 1990. Nous disposons donc de deux chroniques de débits journaliers distinctes à

cet endroit, l'une de 1972 à 1990 et l'autre de 1991 à 2001, qui sont peu fiables. C'est pourquoi il a été décidé de regrouper le bassin intermédiaire du Tarn à Villemur et de l'Agout à Lavaur en un unique bassin intermédiaire à Villemur.

Les principaux ouvrages de ces bassins, Saint-Peyres, la Raviège et Laouzas, se trouvent sur l'Agout et sont gérés par EDF. Saint-Peyres participe également au soutien d'étiage. L'eau de Laouzas est dérivée vers le bassin méditerranéen pour être turbinée à l'usine de Montahut. Les retenues de la Bancalie et la Rassisse sont gérées par la S.M.E., nous n'avons donc pas de données sur leur gestion.

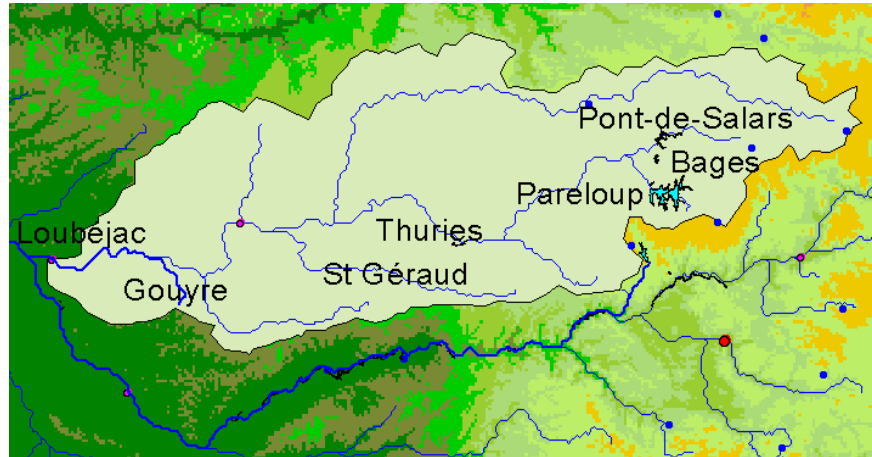


Figure 37 : Bassin de l'Aveyron à Loubéjac

La retenue de Pareloup sur le bassin de l'Aveyron est aussi gérée par EDF. Elle collecte l'eau des retenues de Pont-de-Salars et de Bages et la transfère vers l'usine du Pouget sur le bassin du Tarn. Elle participe aussi au soutien d'étiage de l'Aveyron. Les retenues de Thuriès, Gouyres et St Géraud, de capacités non négligeables, ne sont pas gérées par EDF.