



HAL
open science

IMAGINE 2030, climat et aménagements de la Garonne : quelles incertitudes sur la ressource en eau en 2030 ?

Eric Sauquet, A. Dupeyrat, F. Hendrickx, Charles Perrin, R. Samie,
Jean-Philippe Vidal

► **To cite this version:**

Eric Sauquet, A. Dupeyrat, F. Hendrickx, Charles Perrin, R. Samie, et al.. IMAGINE 2030, climat et aménagements de la Garonne : quelles incertitudes sur la ressource en eau en 2030 ?. [Rapport de recherche] irstea. 2010, pp.149. hal-02593270

HAL Id: hal-02593270

<https://hal.inrae.fr/hal-02593270>

Submitted on 15 May 2020

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

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



AGENCE DE L'EAU
ADOUR-GARONNE

ETABLISSEMENT PUBLIC DU MINISTÈRE
DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

Imagine 2030

CLIMAT ET AMENAGEMENTS DE LA GARONNE : QUELLES INCERTITUDES SUR LA RESSOURCE EN EAU EN 2030 ?

CLIMATE AND WATER MANAGEMENT : UNCERTAINTIES ON WATER RESOURCES FOR THE GARONNE RIVER BASIN IN 2030?

Programme RDT¹ volet 2
Rapport de fin de contrat

Cemagref
Unité de Recherche Hydrologie-
Hydraulique
SAUQUET Eric
Chargé de recherche
eric.sauquet@cemagref.fr
Tel. 04 72 20 89 13

Date : 14/12/2009

N° de contrat : 07-0000796
Date du contrat : 27/06/2007

TABLE DES MATIERES

Table des matières	2
Synthèse	6
Résumés	17
Rapport scientifique	18
Introduction	19
Secteur d'étude et bassins d'intérêt.....	20
Données.....	21
Météorologie.....	21
Hydrométrie.....	21
Données relatives aux usages.....	22
Analyse exploratoire des données relatives aux usages	24
Occupation des sols.....	24
Tissus industriel.....	25
Agriculture	26
Synthèse des principaux prélèvements par usage	30
Consommation par usage de l'eau	33
Origine des principaux prélèvements	33
Renaturalisation des débits.....	37
Correction des effets des grands ouvrages hydrauliques.....	37
Correction des échanges avec les canaux.....	40
Correction de l'irrigation.....	41
Conclusion	44
Les outils de simulation	46
Modélisation pluie-débit	46
Modélisation de la neige.....	47
Tests des modèles hydrologiques	49
Modélisation des usages.....	54
Modèle de prélèvement – consommation d'eau	63
Eléments d'incertitudes.....	66
Conclusion	68
Construction de scénarios de changement climatique	71
Générateur KNN.....	71
Génération de projections climatiques à haute résolution sur la France au pas de temps mensuel....	72
Discussion.....	81
Conclusion	84
Le bassin à l'épreuve du changement climatique	86
Le facteur neige.....	86
Ressource naturelle.....	89
Impact combiné du changement climatique et des actions humaines	93
Discussion et positionnement par rapport aux études antérieures.....	98
Conclusions	107
Remerciements.....	109
Références.....	111
Annexe 1 : Protocole d'évaluation des modèles hydrologiques	116
Annexe 2 : Séminaire de restitution (09/12/2009, Toulouse)	122
Annexe 3 : Tirés à part des publications.....	125

En français

CONTEXTE GENERAL

La gestion des ressources en eau à l'échelle d'un grand bassin versant est particulièrement complexe. Ces bassins sont généralement caractérisés par de fortes pressions sur les ressources en eau pendant les étiages. Ces ressources sont nécessaires à la vie aquatique, la production d'eau potable, la production industrielle, la production d'électricité, l'agriculture... Les besoins des nombreux acteurs agissant sur ces bassins ne sont pas toujours concordants et peuvent aboutir à des situations difficiles autour du partage de l'eau, comme lors des étiages sévères de 2003, 2005 et 2006. Il apparaît d'ores et déjà nécessaire de se doter d'outils pour établir un diagnostic sur les pressions dans l'état actuel et maîtriser les tensions pesant sur la ressource en eau, dans la perspective de changements globaux annoncés (modifications des usages, évolution du climat, etc.).

OBJECTIFS GENERAUX DU PROJET

Ce projet veut apporter des réponses scientifiques à **la caractérisation des bassins versants vis à vis des risques de sécheresse et sur la gestion des étiages sévères**. Nous souhaitons apporter des éléments de **diagnostic de la situation actuelle** sur un cas d'application mais également en se projetant dans les décennies futures en considérant des hypothèses de modification du climat, cependant avec des modes de gestion équivalents. Les actions de recherche proposées sont les suivantes :

- quantification et représentation des influences dans une modélisation conceptuelle ;
- caractérisation de la réponse hydrologique aux fluctuations climatiques ;
- construction des scénarios climatiques désagrégés à l'échelle des bassins versants ;
- identification des incertitudes inhérentes aux outils employés.

Ces éléments méthodologiques seront finalement combinés pour **examiner l'état actuel du système multi-usage et sa pérennité** sur un cas d'application : la Garonne à Lamagistère. Outre la réponse à Lamagistère, le projet s'est attaché à décrire le devenir du régime hydrologique pour huit sous-bassins.

Les contributions reposent sur l'UR Hydrosystèmes et Bioprocédés, Cemagref Antony (Charles Perrin, Meggy Hau, Blandine Quillat, Pierre-François Staub, Houda Boudraa), l'UR Hydrologie-Hydraulique, Cemagref Lyon (Eric Sauquet, Jean-Philippe Vidal, Mohamed Rafik Hajjem), EDF R&D, LNHE (Anne Dupeyrat, Frédéric Hendrickx, Laure Santoni, René Samie, Cécile Agosta, Rémi Labedade) et EDF, DTG Grenoble (Frédéric Gottardi, Thibault Mathevet). Les développements réalisés ont reçu le soutien technique de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne (Martine Gaëckler, Jean-François Moor, Mathias Daubas, Françoise Goulard).

RESULTATS OBTENUS

Le projet a permis de rassembler des éléments sur les usages de l'eau, l'hydrologie et la climatologie du secteur étudié. Ces données ont permis de comprendre le fonctionnement du bassin dans sa configuration naturelle et influencée, puis de mettre en oeuvre des modélisations pour reconstituer ce fonctionnement en neuf sous bassins versants. Des scénarios climatiques ont été élaborés pour appréhender les forçages climatiques du XXI^{ème} siècle. Le projet étant ambitieux et le secteur complexe, nous n'avons pas pu modéliser l'ensemble des usages ; nous nous sommes concentrés sur un bassin pyrénéen pour examiner le devenir de l'hydroélectricité et sur l'usage agricole, le plus consommateur en eau. Les résultats sont comparés à ceux identifiés dans la littérature récente.

PARTENARIATS MIS EN PLACE

Collaboration informelle avec : Pascal Osselin, Jean Comby, Philippe Lasnier, Estelle Fistarol (EDF), Jean Verdier (SMEAG Garonne), Husheng Lin et Alain Villocel (CACG - Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne), Marie-Pierre Belmonte (DIREN Midi Pyrénées), Christelle Bernes (Service Navigation Toulouse VNF), Julien Lavaud, Bénédicte Riey et Cécile Bedel (Agence Régionale Pour l'Environnement de Midi Pyrénées), Bruno Coupry (Eaucéa).

POUR EN SAVOIR PLUS (QUELQUES REFERENCES)

Site internet :

<http://www.cemagref.fr/le-cemagref/lorganisation/les-centres/lyon/ur-hhly/hydrologie-des-bassins-versants/projets/programme-abrisque-decision-territoirebb-du-ministere-de-12019ecologie-et-du-developpement-durable-ressources-en-eau-sur-le-bassin-de-la-garonne>

LISTE DES OPERATIONS DE VALORISATION ISSUES DU CONTRAT (ARTICLES DE VALORISATION, PARTICIPATIONS A DES COLLOQUES, ENSEIGNEMENT ET FORMATION, COMMUNICATION, EXPERTISES...)

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES	
Publications scientifiques parues	Dupeyrat, A., Agosta, C., Sauquet, E., Hendrickx, F., 2008. Sensibilité aux variations climatiques d'un bassin à forts enjeux : le cas de la Garonne. Actes du 13th IWRA World Water Congress 2008 (Montpellier, France, 1-4 septembre 2008), 15 pages. Sauquet, E., Dupeyrat, A., Hendrickx, F., Labeledade, R., Samie, R., Vidal, J-P., Perrin, C., Boudhraa, H. et Gaëckler, M, 2009. Impacts anthropiques et étiages de la Garonne à l'horizon 2030. Actes du Colloque 193 SHF : «Etiages, Sécheresses, Canicules rares et leurs impacts sur les usages de l'eau», Lyon, 7-8 octobre 2009.
Publications scientifiques paraître	Vidal J.-P et Hendrickx, F. Case study: Impact of climate change and hydropower management on low-flows for the Ariège River, France. Dans : Modelling the Impact of Climate Change on Water Resources (F. Fung, A. Lopez et M. New, eds.), Blackwell Publishing, sous presse.
Publications scientifiques prévues	Hendrickx, F., Dupeyrat, A., Agosta, C., Sauquet, E., 2009. Modelling impacts of hydropower water management on river flow regime. A case study in south-west France. Climatic Change ou Journal of Hydrology, en préparation. Vidal, J.-P. et Sauquet, E., 2008, Multimodel climate trajectories for the Garonne river basin, France. Geophysical Research Letters, en préparation.
COLLOQUES	
Participations passées à des colloques	13th IWRA World Water Congress 2008 (Montpellier, France, 1-4 septembre 2008) Summer School on Hydrological Drought and global Change (Trieste, Italy, 22-27 June 2008) Northern European FRIEND & AMHY Joint Low Flow and Drought Meeting (Bratislava, Slovaquie, novembre 2008) Colloque 193 SHF «Etiages, Sécheresses, Canicules rares et leurs impacts sur les usages de l'eau» (Lyon, France, octobre 2009) Colloque de restitution du projet IMAGINE2030 (Toulouse, France, décembre 2009)
Participations futures à des colloques	Water 2010 (Québec, Canada, juillet 2010),
ARTICLES DE VALORISATION-VULGARISATION	
Articles de valorisation prévus	Revue de l'Agence de l'Eau Adour Garonne
AUTRES	
Site internet	http://www.cemagref.fr/le-cemagref/lorganisation/les-centres/lyon/ur-hhly/hydrologie-des-bassins-versants/projets/programme-abrisque-decision-territoirebb-du-ministere-de-l2019ecologie-et-du-developpement-durable-ressources-en-eau-sur-le-bassin-de-la-garonne

SYNTHESE

CLIMAT ET AMENAGEMENTS DE LA GARONNE : QUELLES INCERTITUDES SUR LA RESSOURCE EN EAU EN 2030 ?

PROGRAMME RDT VOLET 2

Nom du responsable scientifique du projet : Eric SAUQUET (Cemagref, Lyon)
Noms des autres partenaires scientifiques bénéficiaires : Agence de l'Eau Adour Garonne

INTRODUCTION

Le bassin de la Garonne est un bassin complexe par nature : les influences climatiques multiples (océaniques, montagnardes, méditerranéennes) donnent lieu à des réponses hydrologiques différenciées. S'y greffe une complexité d'origine anthropique. La répartition des prélèvements en eau est de 32% pour l'agriculture, 14% pour l'industrie, 26% pour la production électrique (alimentation des circuits de refroidissement de la centrale nucléaire de Golfech) et de 28% pour l'alimentation en eau potable. L'agriculture est le secteur qui consomme le plus d'eau. L'irrigation représente ainsi plus de 65% des volumes d'eau consommés chaque année sur la zone d'étude, contre 20% pour la production d'eau potable, 12% pour la production d'énergie (consommation par évaporation des circuits fermés de la centrale nucléaire de Golfech) et 2% pour le secteur industriel. Dans le cadre du projet IMAGINE2030 financé par le MEEDDM, le Cemagref, EDF et l'Agence de l'Eau Adour-Garonne ont examiné l'évolution des étiages, des usages et leurs conséquences pour la gestion de la ressource superficielle du bassin de la Garonne en amont de Lamagistère. Outre la réponse à Lamagistère, le projet s'est attaché à décrire le devenir du régime hydrologique pour huit sous-bassins (Figure 1).

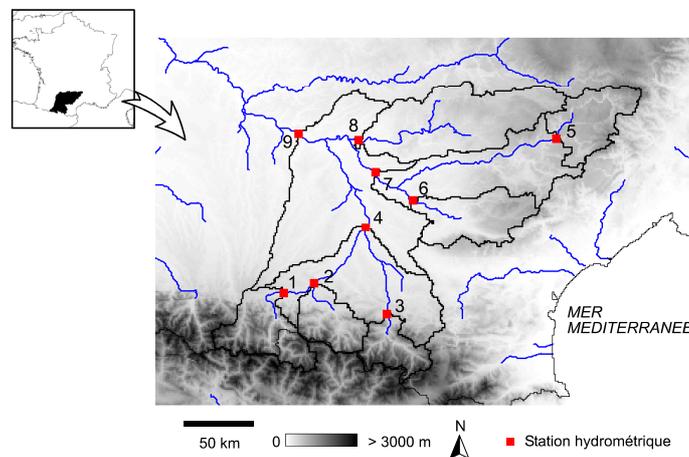


Figure 1 : Le bassin de la Garonne à Lamagistère et les huit sous-bassins étudiés (1 : la Garonne à Valentine (2230 km²) ; 2 : le Salat à Roquefort-sur-Garonne (1570 km²) ; 3 : l'Ariège à Foix (1340 km²) ; 4 : la Garonne à Portet-sur-Garonne (9980 km²) ; 5 : le Tarn à Millau (2170 km²) ; 6 : l'Agout à Lavaur (2300 km²) ; 7 : le Tarn à Villemur-sur-Tarn (9100 km²) ; 8 : l'Aveyron à Loubejac (5170 km²) ; 9 : la Garonne à Lamagistère (32350 km²))

LE FONCTIONNEMENT ACTUEL DU BASSIN

Un effort notable de collecte de données a permis d'identifier et de quantifier les influences anthropiques (prélèvements agricoles, principales dérivations et gestion des réservoirs). Par une approche de type bilan comptable de l'eau en entrée-sortie des différents sous-bassins, nous avons pu reconstituer le signal hydrologique naturel. Cet investissement a été indispensable pour approcher le fonctionnement naturel du bassin et pour engager ensuite des modélisations.

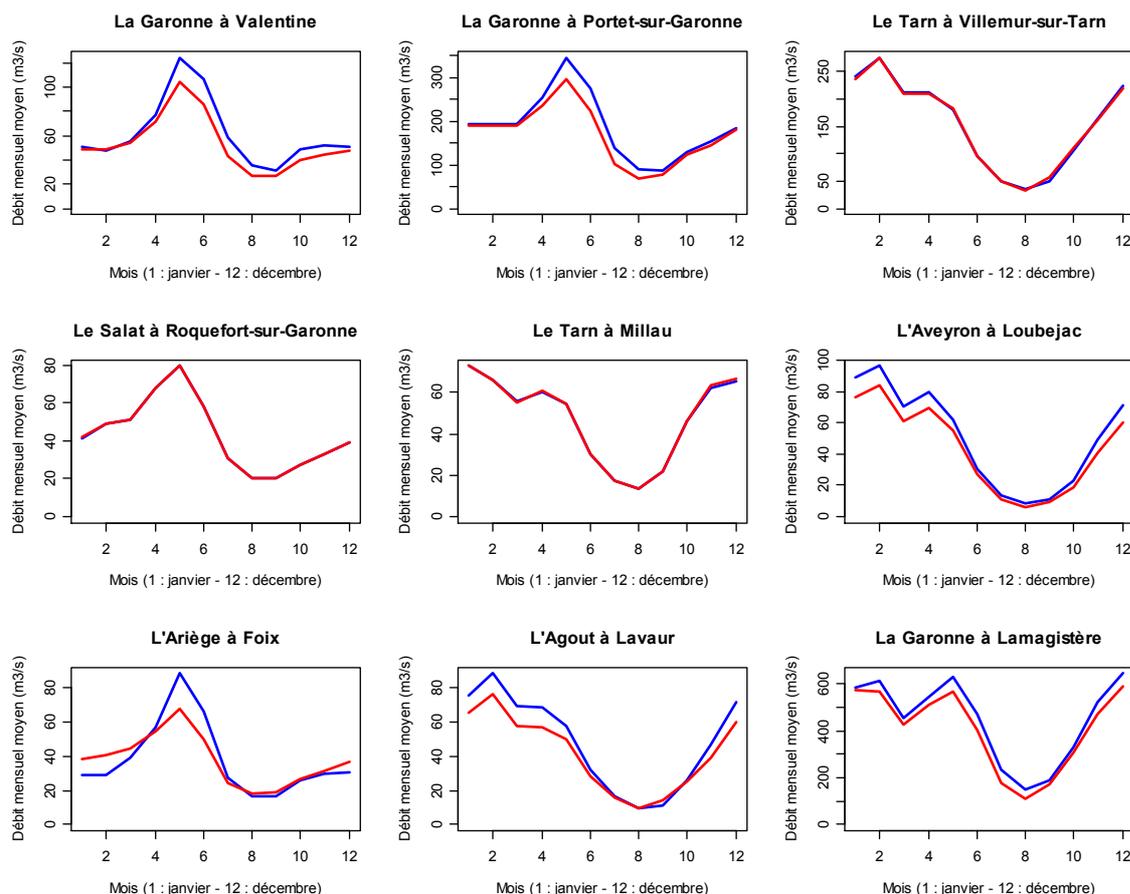


Figure 2 : Débits mensuels moyens observés et naturels reconstitués sur la période 1970-2005 (en bleu : régime naturel ; en rouge : débits observés aux stations)

La Figure 2 montre ainsi les écarts entre débits observés et naturels reconstitués. Le Salat à Roquefort est notre témoin pyrénéen naturel ; les hydrogrammes sont donc confondus. Les débits de l'Ariège à Foix sont principalement influencés par la gestion des retenues pour l'hydroélectricité et les contraintes liées au respect du Plan de Gestion des Etiages [1], les surfaces irriguées étant négligeables sur le bassin. La surface en amont des retenues représente 10% de la surface du bassin à Foix et le volume total des retenues est loin d'être négligeable (environ 16% du volume annuel écoulé à Foix). On peut identifier ainsi la phase de stockage au moment de la fonte des neiges au printemps (différence entre obs. et nat. négative), la phase de déstockage pour la production d'électricité en hiver et pour le soutien d'étiage en été (différence entre obs. et nat. positive). Le bassin du Tarn à Villemur comporte de nombreux ouvrages hydrauliques de faible capacité, principalement de type « fil de l'eau » ou « éclusée ». Ces retenues ont été négligées, car leurs capacités n'ont pas d'effet au delà de la semaine. Les débits renaturalisés sont corrigés des activités agricoles et de la dérivation majeure, celle qui détourne une partie des eaux de l'Aveyron vers le bassin du Tarn. Les écarts entre débits observés et naturels reconstitués de la Garonne à Lamagistère reflètent l'ensemble des activités anthropiques sur le secteur. Le débit mensuel minimal annuel de fréquence quinquennale sèche (QMNA5) est égal à 97 m³/s dans sa configuration naturelle contre 75 m³/s dans le contexte de gestion actuelle.

CLIMAT ET HYDROLOGIE DU BASSIN EN 2030

L'approche classique pour réaliser une étude d'impact a été appliquée à neuf sous-bassins de la Garonne. Elle consiste à alimenter les modèles hydrologiques calés sur le passé en s'appuyant sur les projections de différents modèles de circulation générale (GCMs).

Nous nous sommes appuyés sur les résultats du dernier exercice de l'Intergovernmental Panel on Climate Change [2]. Une base de données de projections climatiques au pas de temps mensuel à haute résolution sur la France a donc été élaborée à partir de 19 sorties de GCMs. Nous avons considéré un échantillon de 12 projections sous scénarios d'émission de gaz à effet de serre SRES A1B et de 7 sous SRES A2, réputé le plus « pessimiste » en termes d'impact. L'approche utilisée pour construire ces projections est une méthode de descente d'échelle statistique multimodèles [3]. La réanalyse atmosphérique SAFRAN [4] est notre référence pour le climat présent et définit le support spatial de restitution des scénarios climatiques (maille de 8 km × 8 km). Des séries de précipitations et de températures journalières ont été créées par ré-échantillonnage dans SAFRAN selon l'algorithme KNN [5], afin de simuler un climat stationnaire cohérent sur la région pour le XXI^e siècle. Nous leur avons appliqué une approche de type « méthode des anomalies » pour construire des séries journalières sur chaque maille élémentaire de 8 km × 8 km. Chaque sortie de GCMs est ainsi déclinée en cinq projections climatiques possibles issues du rééchantillonnage. Les projections sous scénario A1B et A2 fournissent des évolutions semblables à l'horizon 2030. De manière globale, les GCMs annoncent une augmentation des températures prononcée en été (en moyenne +2°C à l'échelle du bassin) et plus limitée en hiver (en moyenne +1°C à l'échelle du bassin) à l'horizon 2030. Cet écart s'accroît à l'horizon 2080 : on note +4°C sur la température annuelle moyenne pour les scénarios A1B et +5°C pour les scénarios A2 (Figure 3). Le signal sur les précipitations est moins cohérent, une tendance à la diminution est perceptible en dehors de l'hiver, mais non généralisée à l'ensemble des GCMs.

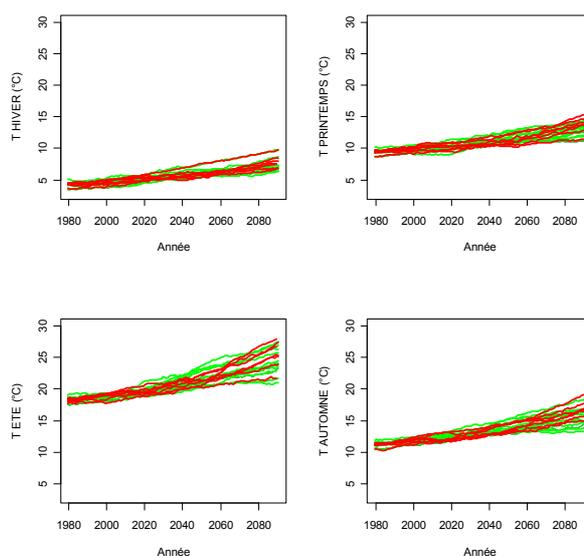


Figure 3 : Températures moyennes par saison (°C) pour la Garonne à Lamagistère (en rouge A2, en vert A1B)

Ces évolutions impactent les étiages et les risques de sécheresses hydrologiques de manière différenciée selon les processus hydrologiques. Deux modèles hydrologiques différents ont été exploités : CEQUEAU, modèle conceptuel distribué spatialement [6] et GR4J, modèle empirique global [7]. Le fait d'utiliser deux approches de modélisation permet de quantifier une partie des incertitudes liées au schéma de modélisation choisi. Une procédure de calage-contrôle sur des périodes indépendantes [8] a permis de vérifier la qualité des simulations en temps présent, au pas de temps journalier.

La réponse hydrologique au changement climatique est caractérisée par les variables descriptives des étiages calculées sur des fenêtres glissantes de 20 ans : le débit annuel QA, le débit saisonnier juin-juillet-août moyen (QJJA), le débit saisonnier septembre-octobre-novembre moyen (QSON)

et le débit mensuel minimal annuel de fréquence quinquennale sèche (QMNA5). Les projections climatiques à l'horizon 2030 différant peu selon le scénario SRES, nous les avons regroupées dans notre analyse. Les écarts sont mesurés par rapport aux débits de référence obtenus par les modèles hydrologiques forcés par SAFRAN ; nous mesurons ainsi les réponses hydrologiques sous changement climatique, en occultant les biais de modélisation.

Les deux modèles hydrologiques alimentés par les projections s'accordent sur une réduction progressive des apports annuels et des débits caractéristiques des étiages. Le débit annuel chute de l'ordre de 10% pour CEQUEAU et de 20% pour GR4J. Les écoulements estivaux sont diminués du fait d'une évapotranspiration accrue. S'ajoutent les effets d'une fonte de la neige plus précoce sur les bassins de montagne. Sur les bassins pyrénéens, la réduction est plus prononcée que celle sur le module QA. Sur les bassins méditerranéens, les évolutions sur le QSON sont plus marquées que sur le QJA, conséquence d'un allongement des étiages et de recharge retardée. Les baisses sur le QJA pour un bassin donné sont sensiblement équivalentes d'un modèle à l'autre. Les diminutions les plus fortes sont observées sur les bassins de tête pyrénéens (en moyenne proche de 25%). Les bassins sous influence méditerranéenne semblent moins impactés. La réduction médiane sur QJA est inférieure à 10% pour CEQUEAU et inférieure à 20% pour GR4J. n supposant le QMNA5 actuel valeur seuil déclencheur de restrictions à l'horizon 2030, le changement climatique induirait une fréquence accrue des épisodes critiques pour la gestion de la ressource et poserait de manière récurrente la question du partage de l'eau.

Les tendances globales sur le module et les écoulements estivaux (QJA et QMNA5) sont partagées par les modèles. Cependant, des réponses hydrologiques distinctes sont perceptibles du fait de la grande variabilité des scénarios et des structures différentes de modèles pluie-débit (Figures 3 et 4). Sur les graphiques suivants, les incertitudes liées aux forçages climatiques et à leurs traitements sont mesurables par l'intervalle de confiance identifié par les courbes bleues sur les débits mensuels (50% des réponses se situent entre les bornes qu'elles définissent). La médiane des anomalies est donnée par la courbe noire. En complément est indiquée la valeur du module pour comparaison aux anomalies calculées. Les bassins pyrénéens sont entourés de rouge.

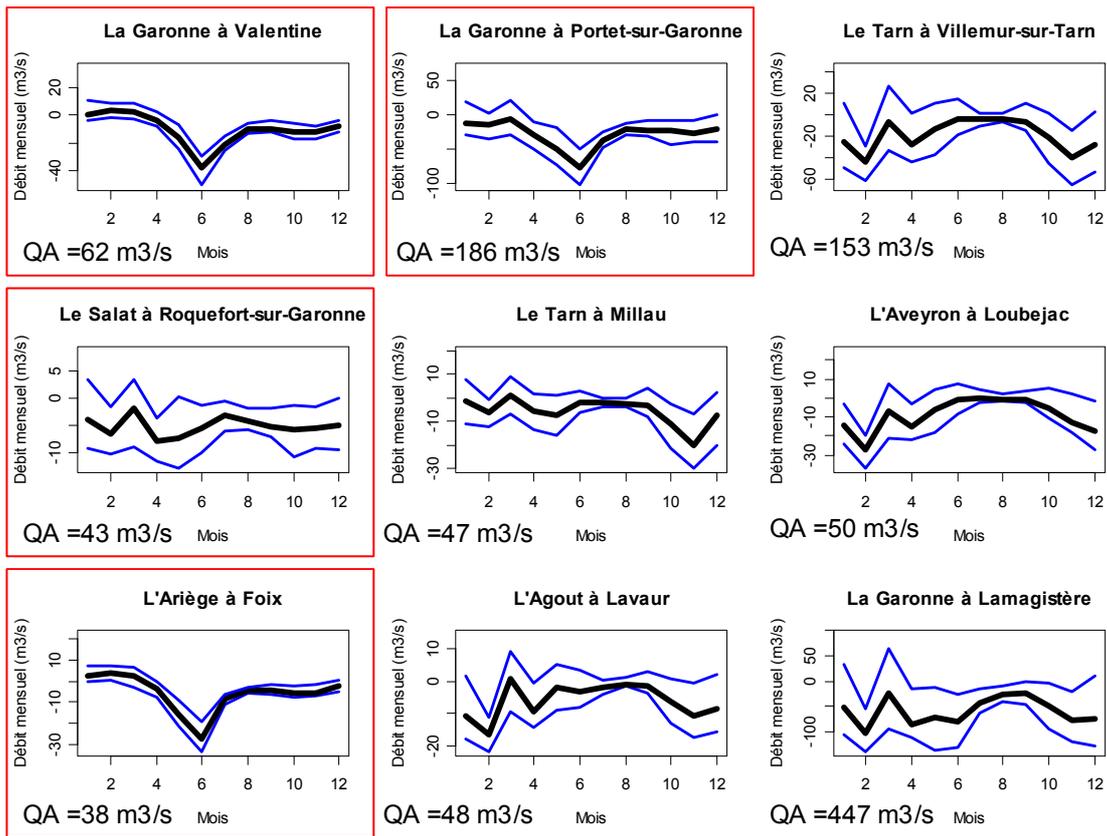


Figure 3 : Anomalie de débits mensuels à l'horizon 2030 - modèle CEQUEAU

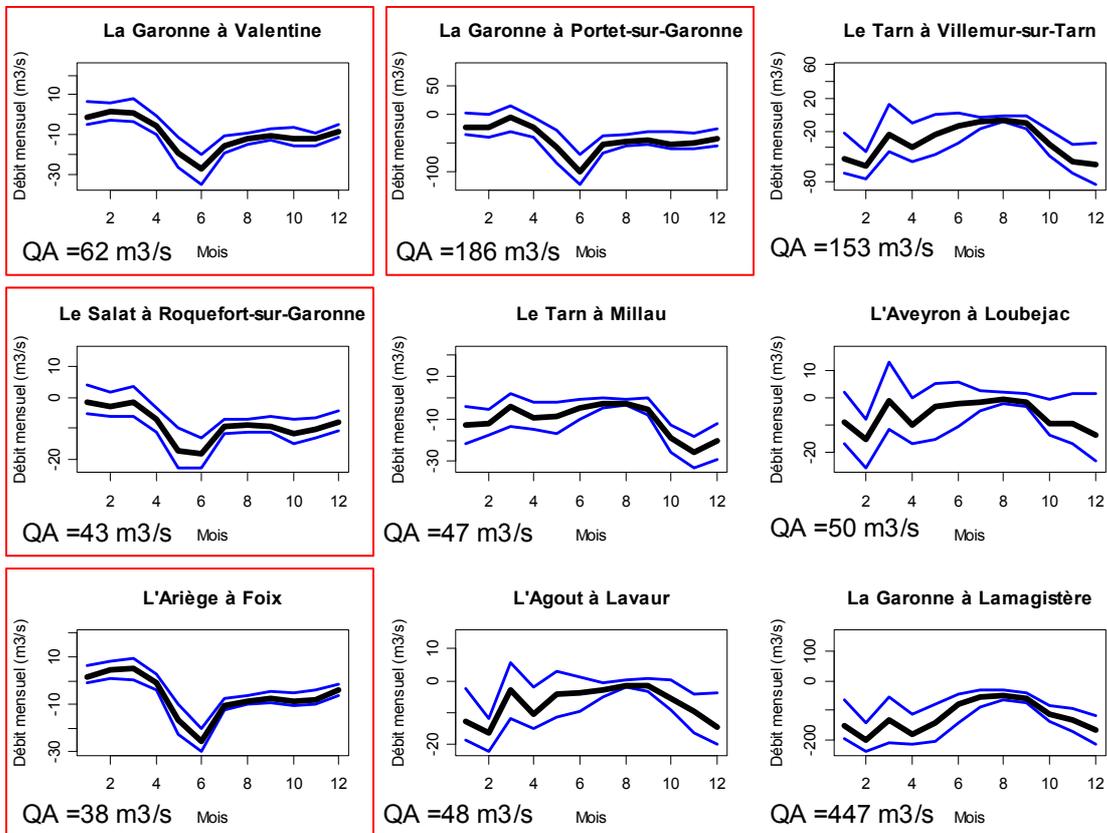


Figure 4 : Comme pour la Figure 3, mais avec le modèle hydrologique GR4

IMPACT COMBINÉ DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET DES ACTIONS HUMAINES

Peu d'études ont été réalisées à ce jour sur le devenir des modes de gestion sous changement climatique à une échelle locale, du fait de la rareté de données relatives aux usages et d'une complexité, de fait, accrue de modélisation. Nous avons souhaité intégrer une représentation des deux usages dominants sur le bassin : l'hydroélectricité et l'irrigation. Nous avons choisi de considérer des modes de gestion future identiques à ceux du présent. En effet, cette représentation est – déjà – délicate à mettre en œuvre en temps présent. De plus, l'élaboration de scénarios quantitatifs d'évolution des pratiques n'est pas aisée à l'échelle des sous-bassins étudiés, du fait de l'évolution probable des politiques publiques nationales ou européennes (pilotées par la Directive Cadre sur l'Eau, la Directive Energies Renouvelables, la Politique Agricole Commune, etc.).

ÉVOLUTION DE L'HYDROELECTRICITE

Notre étude se concentre dans un premier temps sur un module de gestion simplifiée de l'hydroélectricité, développé spécifiquement pour modéliser l'influence des aménagements sur le régime naturel. Ce module s'appuie sur un processus dynamique basé sur des valeurs de Bellman [9]. Il s'agit ici de reproduire grossièrement la stratégie de l'hydroélectricien recherchant à valoriser au mieux sa réserve hydraulique vis-à-vis des besoins en électricité et de son espérance d'apport futur d'eau. Ce module s'appuie sur un vecteur « intérêt à turbiner » dépendant de la température moyenne de l'air en France qui vise à tenir compte de la sensibilité de la consommation électrique au chauffage (consommation d'autant plus grande que la température est sous les 15°C) et par conséquent de l'intérêt à placer dans ces moments de pointe l'énergie hydraulique. Naturellement plus complexes et notamment complétés de dimensions économiques et financières liées au fonctionnement des marchés de l'énergie, les outils opérationnels utilisés dans la gestion de la production s'appuient sur des approches mathématiques similaires, ce qui rend le module utilisé assez réaliste pour l'exercice recherché. Plus de détails sur le module ont été publiés récemment dans [10].

L'application présentée concerne le bassin de l'Ariège à Foix. Nous avons de plus tenu compte d'une contrainte de respect d'un débit environnemental en aval. Le modèle de pression a tout d'abord été calé sur le passé afin de reconstruire le régime influencé sur les dernières années 1990-2004. Nous avons vérifié le réalisme des débits issus de l'assemblage (CEQUEAU ou GR4J et module de gestion) en alimentant cet ensemble avec des forçages météorologiques représentatif du climat présent sur la Garonne et la France, obtenus par rééchantillonnage KNN dans la réanalyse SAFRAN. La Figure 5 montre la bonne cohérence des résultats à l'échelle saisonnière (écarts acceptables entre simulations et observations).

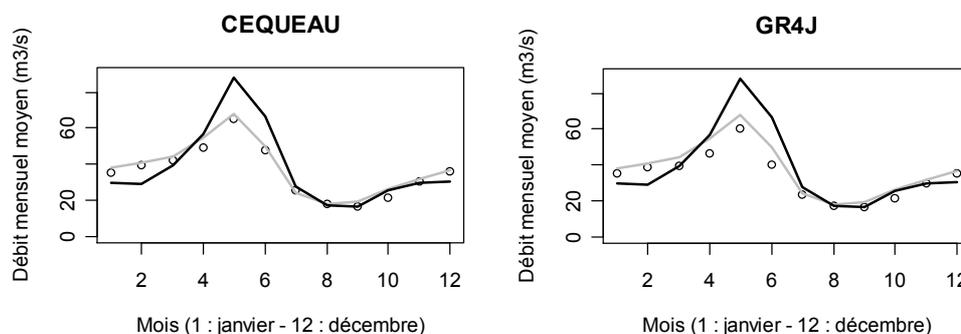


Figure 5 : Débits observés influencés sur la période 1990-2004 (○), débits naturels reconstitués (—) et débits obtenus avec le module de pression (○) couplé avec les modèles hydrologiques sous forçages représentatifs du temps présent

Nous avons ensuite exploité les scénarios climatiques futurs. CEQUEAU et GR4J fournissent les débits naturels sous changement climatique. Les débits influencés sont obtenus à partir du même modèle de gestion à partir d'une chronique de température journalière France entière simulée au même horizon et cohérente avec la situation météorologique du jour sur le bassin de la Garonne. La Figure 6 montre d'une part la diminution du pic de fonte en juin et un écart aux débits naturels moindre que dans la situation actuelle.

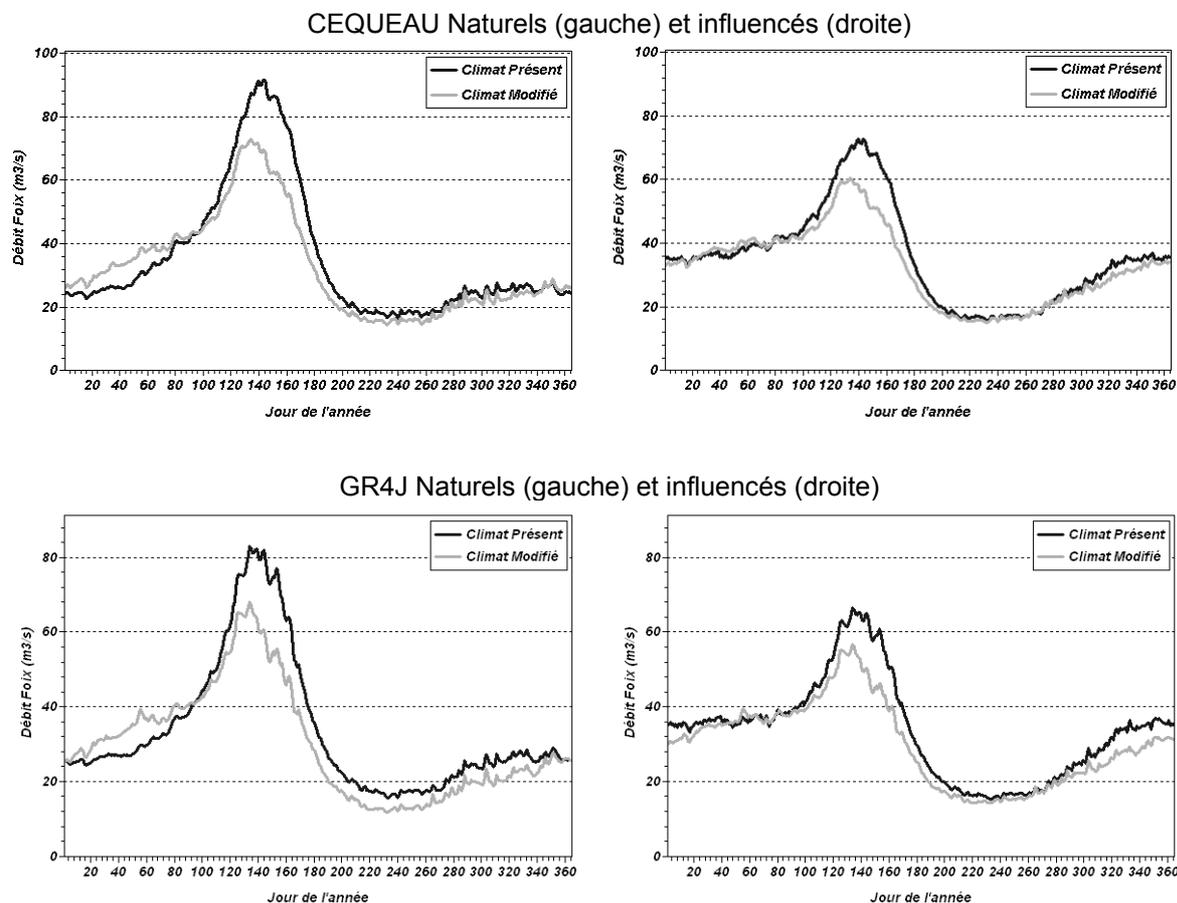


Figure 6 : Régimes hydrologiques naturels reconstitués et influencés de l'Ariège à Foix (moyenne sur la période 2021-2040, tous scénarios confondus)

En complément, nous avons tracé l'évolution du volume de remplissage de la réserve agrégée (Figure 7). Les trajectoires varient selon le scénario climatique envisagé. Les résultats suggèrent la nécessité d'un remplissage printanier plus précoce de la réserve pour assurer des débits estivaux suffisants tout en permettant de disposer d'un stock énergétique en entrée d'hiver. L'amplitude des variations en hiver plus faible à l'horizon 2030 qu'actuellement laisse entendre une moindre valorisation énergétique, double conséquence de la baisse du débit annuel et de sollicitations estivales accrues.

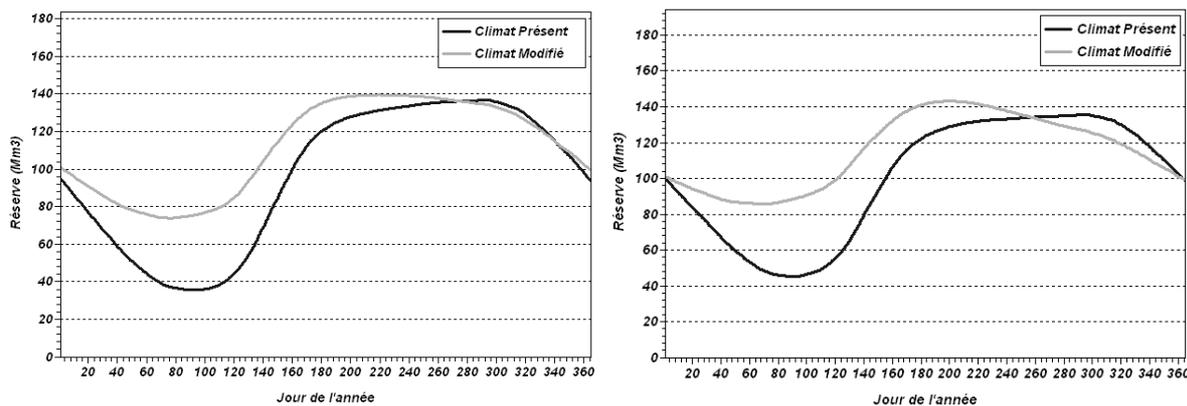


Figure 7 : Trajectoires de la macro réserve en amont de Foix sur la période 2021-2040 et sous climat présent

ÉVOLUTION DE L'IRRIGATION

Pour représenter l'usage agricole, un modèle classique de bilan hydrique à un horizon a été développé. Ce modèle permet d'estimer au pas de temps journalier le besoin théorique en eau d'irrigation, en sus de l'apport par les précipitations et de l'eau contenue dans le réservoir sol, nécessaire afin d'obtenir un développement optimal de la culture. Il s'appuie sur une équation du bilan hydrique à la parcelle. La comparaison des résultats sous climat présent montre une bonne cohérence avec les séries chronologiques établies sur le secteur [11] entre 1980 et 2005. Le sous-bassin de l'Aveyron a été privilégié dans cette application. Sans aller jusqu'à entreprendre une véritable démarche prospective impliquant l'ensemble des acteurs régionaux, l'étude a cherché à analyser l'incidence des scénarios de changement climatique (évolution des températures et des précipitations) sur le besoin en eau théorique des cultures. Nous présentons ici les évolutions des besoins des plantes (ici le maïs) au cours du XXI^e siècle par rapport à la situation de référence (sous climat actuel). La Figure 8 suggère une hausse de la demande sous scénario A1B, en moyenne de plus de 10% à l'horizon 2030 tous scénarios confondus (+20% sur la pointe entre climat présent et climat futur). Une évolution similaire est identifiée sous scénario A2 jusqu'en 2045. Si ces besoins devaient être satisfaits par irrigation, les prélèvements devraient être augmentés d'autant. Nous accédons ici à un ordre de grandeur de la pression supplémentaire sur la ressource en période estivale. Les chiffres sont discutables, dans la mesure où d'autres facteurs comme l'évolution des surfaces irriguées ou la nature des cultures n'ont pas été intégrés.

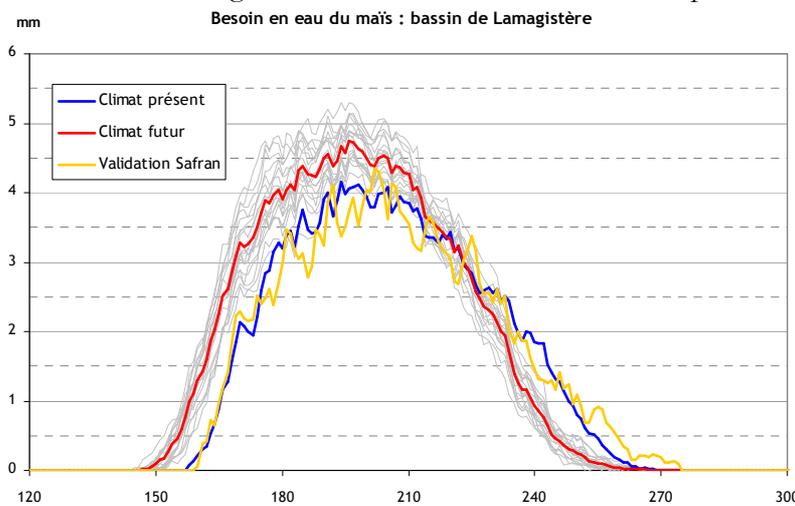


Figure 8 : Besoin en eau du maïs sur le bassin de Lamagistère (moyenne 2015-2045) en fonction du jour de l'année

CONCLUSION

Les travaux menés dans le cadre du projet IMAGINE2030 ont abouti à une représentation hydrologique cohérente du fonctionnement naturel de la Garonne sur la base de séries de débits désinfluencés des principales actions anthropiques et de modèles pluie-débit. Ceci nous a permis d'examiner l'évolution des étiages à l'horizon 2030. L'augmentation des températures en moyenne de +2°C en été induit une diminution marquée des débits estivaux (sur les moyennes saisonnières et sur les extrêmes) et un allongement des événements sous le seuil actuel de référence QMNA5. Ce résultat est cohérent avec ceux issus des études récentes (par exemple [12]) exploitant la même base de données de l'IPCC mais désagrégée de manière différente. Les bassins sous influence méditerranéenne ont une sensibilité distincte des bassins pyrénéens aux évolutions climatiques. Les modèles hydrologiques et le grand nombre de scénarios climatiques considérés permettent de quantifier en partie les incertitudes pesant sur le futur du bassin.

Reproduire parfaitement la gestion des eaux est un exercice hors de portée faute de données exhaustives sur l'ensemble du territoire. Nous avons donc choisi de comprendre la dynamique du système en place et les interactions entre usages et rivière, puis, sur cette base, d'engager des modélisations simplifiées de la gestion hydroélectrique et des pratiques agricoles.

Un cas test - l'Ariège à Foix - permet d'illustrer les effets des ouvrages hydroélectriques sur les débits en 2030, tenant compte de leur optimisation et du respect d'un débit environnemental. Cependant, il faut préciser que les débits influencés calculés sont le résultat d'une gestion optimale qui n'intègre pas de défaillance (par exemple : disponibilité de l'ensemble des ouvrages) et qui s'appuie sur une météorologie parfaitement connue.

La demande en irrigation est quantifiée au travers d'un modèle exprimant les besoins en eau des plantes. Sans surprise, l'augmentation de la température entraîne une augmentation de la demande en eau du maïs notamment si les pratiques n'évoluent pas. La pression sera plus forte sur la ressource en eau qui vraisemblablement sera diminuée à l'horizon 2030.

Les exercices réalisés dans le cadre d'IMAGINE2030 sont académiques. Les seuls déterminants régissant l'évolution des usages considérés sont d'origine physique. Ils sont insuffisants (il faut inclure à terme la dimension socio-économique) mais permettent de donner des premiers ordres de grandeur avec un mode de gestion non modifié. Les modèles et les données sont un premier pas vers la construction d'un outil d'aide à la décision pour les acteurs de l'eau pour anticiper des probables tensions sur la ressource.

REFERENCES

- [1] Comité du Bassin Adour-Garonne (2004). *Plan de Gestion des Etiages Garonne-Ariège*. 77 pages.
- [2] Meehl, G.A., Stocker, T.F., Collins, W.D., Friedlingstein, P., Gaye, A.T., Gregory, J.M., Kitoh, A., Knutti, R., Murphy, J. M., Noda, A., Raper, S.C.B., Watterson, I.G., Weaver, A.J., Zhao, Z.C. (2007). Global Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M, Averyt, K.B., Tignor, M., & Miller H.L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [3] Vidal, J.P., Wade, S.D. (2008). A framework for developing high-resolution multi-model climate projections: 21st century scenarios for the UK. *International Journal of Climatology*, **28**(7) : 843-858.

- [4] Quintana-Seguí, P., Le Moigne, P., Durand, Y., Martin, E., Habets, F., Baillon, M., Canellas, C., Franchisteguy, L., Morel, S. (2008). Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables: Validation of the SAFRAN Analysis over France. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **47** : 92–107.
- [5] Lall, U., Sharma, A. (1996). A nearest neighbor bootstrap for resampling hydrologic time series. *Water Resources Research*, **32**(3): 679-693.
- [6] Charbonneau, R., Fortin, J.P., & Morin, G. (1977). The CEQUEAU model: description and examples of its use in problems related to water resource management. *Hydrol. Sci. Bull.*, **22**(1) : 93-202.
- [7] Perrin, C. (2002). Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. *La Houille Blanche*, **6/7** : 84-91.
- [8] Klemesš, V. (1986). Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, **31**(1) : 13-24.
- [9] Bellman, R. (1957). *Dynamic Programming*. Princeton University Press.
- [10] Dupeyrat, A., Agosta, C., Sauquet, E., Hendrickx, F. (2008). Sensibilité aux variations climatiques d'un bassin à forts enjeux : le cas de la Garonne. *Actes du 13th IWRA World Water Congress 2008* (Montpellier, France, 1-4 septembre 2008), 15 pages.
- [11] Teyssier, F. (2006). Les consommations d'eau pour irrigation en Midi-Pyrénées sur 2001-2005. DRAF Midi-Pyrénées, août 2006.
- [12] Boé, J. (2007). Changement global et cycle hydrologique : une étude de régionalisation sur la France, Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III – Paul Sabatier, 256 pages + Annexes.

RESUMES

En français

RESUME

Ce rapport fait état des travaux réalisés dans le cadre du projet IMAGINE2030 qui examine l'évolution de la ressource en eau et ses conséquences sur la gestion sur le bassin de la Garonne à Lamagistère à l'horizon 2030. Cette étude d'impact repose sur les scénarios climatiques de l'exercice AR4 de l'IPCC. Deux modèles hydrologiques, GR4J et CEQUEAU, calés sur des données de débits désinfluencés, permettent de caractériser le devenir du bassin et de ses affluents majeurs dans un contexte naturel. Les résultats montrent des apports annuels en baisse et une sévérité accrue des étiages (en termes d'intensité et de durée) en réponse à des températures plus élevées dès 2030. Des modules spécifiques ont été développés pour mesurer les effets combinés d'une modification du climat, de contraintes environnementales, de la production hydroélectrique et des prélèvements agricoles pour l'irrigation. Nous les avons appliqués en 2030 en considérant une gestion « business as usual ». Sur le bassin de l'Ariège, la production hydroélectrique est actuellement la source principale de modification du régime hydrologique. Nous y percevons une diminution de la production électrique pendant l'hiver en lien avec la nécessité d'une contribution plus forte des réservoirs amont au soutien d'étiage en aval. Sur l'ensemble du bassin à Lamagistère, un modèle de besoin en eau des plantes a été appliqué. Sous changement climatique, les besoins en eau du maïs, culture prédominante sur le bassin, seraient augmentés jusqu'à +20% à l'horizon 2030. Si ces besoins devaient être satisfaits par irrigation, la gestion des étiages sur une ressource diminuée serait de fait plus difficile entre acteurs.

MOTS CLES

GARONNE, RESSOURCE EN EAU, MODELISATION HYDROLOGIQUE, CHANGEMENT CLIMATIQUE

In English

ABSTRACT

This report details the main results obtained within the IMAGINE2030 project. IMAGINE2030 is a French national project that aims at assessing future water availability in the 2030s by accounting for changes in both climate and water management. Climate projections for the Garonne basin are generated from IPCC AR4 monthly precipitation and temperature scenarios. A multimodel downscaling framework is applied to derive basin-scale transient daily time series from 1950 to 2050. The two rainfall-runoff models GR4J and CEQUEAU calibrated under present climate conditions, provide natural river flows. A warmer climate over the basin induces a decrease in mean annual runoff, a shift in snowmelt in mountainous areas and more severe low flows. The magnitude of changes differs from one basin to another. Two models were developed to simulate the impact of a business-as-usual water management (including reservoir operations, environmental constraint, irrigation practices) on river discharges. Results for the Ariège River at Foix show (1) a decrease in energy production, (2) an earlier filling of reservoirs and (3) an increase in water release in summer to fully respect the imposed minimum discharge downstream to reservoirs. Agricultural demand for irrigation water is assessed within the whole River basin at Lamagistère. The increase in temperature leads to an increase in the irrigation requirement for maize up to 20% in the 2030s. In this context, the supply of water beyond irrigation in this area should be managed cautiously to sustain all the types of demand.

KEY WORDS

GARONNE RIVER, WATER RESOURCES, HYDROLOGICAL MODELING, CLIMATE CHANGE

RAPPORT SCIENTIFIQUE

Imagine 2030

CLIMat et Aménagements de la Garonne :
quelles INCertitudes sur la ressource en Eau en 2030 ?

PROGRAMME RDT VOLET 2

Responsable scientifique du projet : Eric SAUQUET

Partenaires scientifiques bénéficiaires :
UR Hydrologie-Hydraulique, Cemagref, Lyon
UR Hydrosystèmes et Bioprocédés, Cemagref, Antony
EDF R&D, LNHE, Chatou

INTRODUCTION

La gestion des grands bassins versants à l'étiage est particulièrement complexe. Les besoins des nombreux acteurs ne sont pas toujours concordants et peuvent rendre le partage de l'eau délicat, comme lors des étiages sévères de 2003, 2005 et 2006. La perspective des changements globaux annoncés, évolution du climat et modifications des pratiques en particulier, rend donc nécessaire de se doter d'outils de diagnostic des pressions sur la ressource en eau afin de mieux anticiper les risques de tensions dans le futur. Peu d'études ont été réalisées à ce jour sur le devenir des modes de gestion sous changement climatique à une échelle locale, du fait de la rareté de données relatives aux usages et d'une complexité, de fait, accrue de modélisation.

Notre objectif est d'initier une démarche prospective sur un bassin test : celui de la Garonne à l'amont de Lamagistère intégrant une représentation des deux usages dominants sur le bassin : l'hydroélectricité et l'irrigation. Les efforts de recherche portent sur le devenir des étiages et les risques de sécheresse à l'horizon 2030.

Nous avons repris la démarche devenue standard pour l'étude d'impact (Carter *et al.*, 1994). Les étapes sont les suivantes :

- 1- mise en place d'un modèle de fonctionnement du bassin, validé par les observations ;
- 2- application de ce modèle alimenté par des séries représentatives du futur ;
- 3- examen des conséquences sur le régime hydrologique par comparaison aux statistiques passées.

Ce projet a requis la mise en place d'une chaîne de simulation comportementale appuyée par des observations intégrant la question des usages et des modes de gestion, reproduisant le passé et susceptible de décrire le futur (point 1). Par « comportementale », nous signifions que les modèles employés reposent sur une description simplifiée des liens de causalité entre la variable à reproduire (sortie du modèle) et ses principaux déterminants (entrées des modèles). Le projet a nécessité également :

- la construction des séries de débits renaturalisés, c'est-à-dire corrigés des influences humaines. Ces chroniques permettent de reconstituer le fonctionnement naturel, de donner une référence pour les statistiques (point 3) et de caler les modèles ;
- des scénarios climatiques de température et de pluie futures, cohérents avec les échelles spatiales et temporelles des modèles (point 2).

Nous avons choisi de considérer des modes de gestion future, identiques à ceux du présent. En effet, cette représentation est – déjà – délicate à mettre en œuvre en temps présent. De plus, l'élaboration de scénarios quantitatifs d'évolution des pratiques n'est pas aisée à l'échelle des sous-bassins étudiés du fait de l'évolution probable des politiques publiques nationales ou européennes (pilotees par la Directive Cadre sur l'Eau, la Directive Energies Renouvelables, la Politique Agricole Commune, etc.).

SECTEUR D'ETUDE ET BASSINS D'INTERET

Le bassin de la Garonne est un bassin complexe par nature : les influences climatiques multiples (océaniques, montagnardes, méditerranéennes) donnent lieu à des réponses hydrologiques différenciées. S'y greffe une complexité d'origine anthropique. Le bassin présente en effet sur son territoire de nombreuses exploitations agricoles et plusieurs retenues hydroélectriques ou à usage agricole dont certaines sont sollicitées pour soutenir les étiages.

Le secteur couvert par le projet est le bassin versant de la Garonne en amont de la station hydrométrique de Lamagistère.

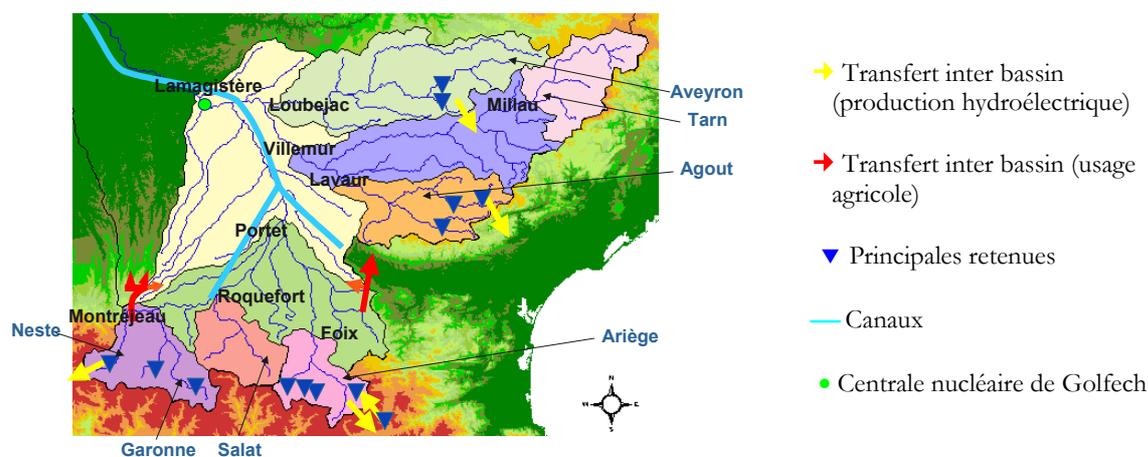


Figure 1 : Secteurs d'études, localisation des bassins versants d'intérêt et des principales sources de perturbation des débits

Pour les besoins de l'étude, le secteur a été découpé en neuf sous-bassins versants définis par des stations hydrométriques en fonctionnement. Ce choix permet de caler/valider les modèles sur des données existantes au droit des points de jaugeage et de se rapprocher des points nodaux d'intérêt pour le Plan de Gestion des Etiages (Comité du Bassin Adour-Garonne, 2004). Les stations hydrométriques examinées sont donc les suivantes :

- la Garonne à Saint-Gaudens (ou Montréjeau) ;
- la Garonne à Portet ;
- la Garonne à Lamagistère ;
- le Salat à Roquefort ;
- l'Ariège à Foix ;
- l'Agout à Lavarur ;
- le Tarn à Millau ;
- le Tarn à Villemur ;
- l'Aveyron à Loubejac.

La sélection finale permet de distinguer les comportements des affluents de la Garonne : l'Agout, le Tarn et l'Aveyron sont représentatifs des bassins à dominante pluviale océanique influencés par l'usage agricole ; le Salat à Roquefort situé dans les Pyrénées est un témoin nival non influencé à la différence de l'Ariège à Foix et de la Garonne à St-Gaudens dont les écoulements sont à dominante nivale et modulés par la production hydroélectrique.

DONNEES

METEOROLOGIE

Les données traitées sont issues des réseaux d'observation de Météo-France et d'EDF.

Nous avons exploité la réanalyse atmosphérique SAFRAN (Quintana-Segui *et al.*, 2008), transmise aux partenaires à titre gracieux par Météo-France. Elle fournit des forçages météorologiques (pluie, température, vent, rayonnement...) au pas de temps horaire sur les éléments 8 X 8 km d'une grille couvrant le territoire. Les variables sont obtenues à partir d'un réseau étendu d'observations en France : soit plus de 1000 stations pour la température et l'humidité, plus de 3500 pluviomètres journaliers).

SAFRAN repose en premier lieu sur un découpage en zones climatiques homogènes à l'intérieur desquelles les variables atmosphériques sont réputées ne varier qu'en fonction de la topographie. Les secteurs construits sont pour la plupart de taille inférieure à 1000 km². Un unique profil vertical de la variable avec une résolution verticale de 300 m est attribué par interpolation optimale à chaque zone homogène. Les variables sont ensuite estimées en fonction de l'altitude des points de grille. 580 mailles SAFRAN émergent au bassin versant de la Garonne à Lamagistère. Dans ce projet, nous n'exploiterons pas la décomposition des précipitations en neige et pluie liquide proposée par SAFRAN, car sous changement climatique, les modèles devront se satisfaire des précipitations totales sans connaître leur nature (liquide ou solide).

En complément, nous disposons de données aux stations Météo-France et EDF localisées sur la Figure 2. La couverture spatiale étant incomplète, SAFRAN est notre référence pour le climat présent et définit le support spatial de restitution des scénarios climatiques, comme nous le verrons plus loin. Les entrées des modèles seront les données de température et de précipitations SAFRAN agrégées au pas de temps journalier.

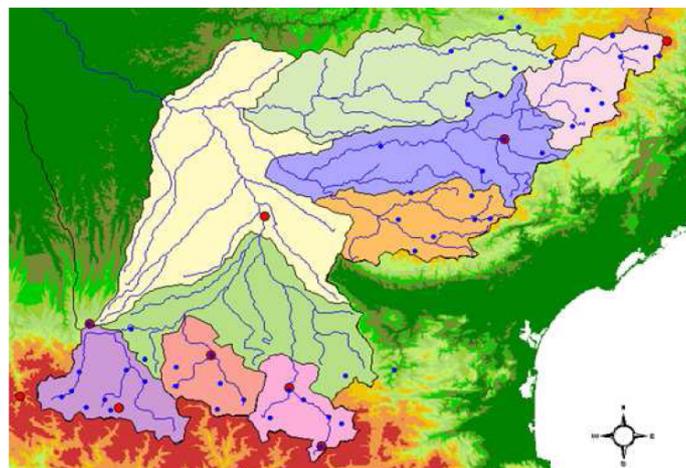


Figure 2 : Postes locaux de suivi de la température (●) et des précipitations (●) acquis par EDF

HYDROMETRIE

Les différentes chroniques de débits exploitées sur la période 1970-2005 sont celles relatives aux neuf bassins examinés :

- la Garonne à Portet-sur-Garonne (période 1970-2005) ;

- le Salat à Roquefort-sur-Garonne (période 1970-2004) ;
- l'Ariège à Foix (période 1970-2005) ;
- la Garonne à Valentine (période 1970-2005) ;
- l'Agout à Lavaur, deux stations DIREN, la première disponible sur la période 1972-1990 et la seconde sur la période 1991-2001 ; les deux chroniques ont été concaténées ;
- le Tarn à Millau, une station EDF (période 1988-2005) et une station DIREN du (période 1970-2005) ;
- le Tarn à Villemur (période 1970-2005) ;
- l'Aveyron à Loubejac (période 1970-2005) ;
- la Garonne à Lamagistère (période 1970-2005).

Pour parfaire notre connaissance régionale ou pour reconstituer les débits naturels, nous avons également intégré dans notre projet :

- l'Hers-Vif à Mazères (période 1970-2000) ;
- l'Arize à Rieux-Volvestre (période 1970-2005) ;
- le canal Saint Martory (période 1971-2005) ;
- le canal de la Neste (période 1961-2002) ;
- la réalimentation de la Louge et du Noue (période 1989-1993) ;
- l'Arrats à Saint-Antoine (période 1970-2005) ;
- la Save à Larra (période 1970-2005) ;
- le Girou à Cepet (période 1970-2005) ;
- le Touch à Saint-Martin-du-Touch (période 1970-2005) ;
- la Gimone à Castelferrus (période 1970-2005) ;
- la Barguelonne à Valence (période 1970-2005) ;
- le Lemboulas à Lunel (période 1970-2005) ;
- l'alimentation de la Gimone et de l'Arrats (période 1970-1993) ;
- l'alimentation de la Gesse (période 1970-1993) ;
- l'alimentation de la Save (période 1970-1990).

DONNEES RELATIVES AUX USAGES

Données de prélèvements

L'Agence de l'Eau Adour-Garonne a fourni les données :

- sur les prélèvements pour l'alimentation en eau potable (AEP), qu'elle collecte pour calculer les redevances des usagers ;
- sur les prélèvements industriels, qu'elle collecte pour calculer les redevances des industries ;
- sur les prélèvements agricoles, qu'elle collecte pour calculer les redevances des irrigants. En complément, les données du Recensement Général Agricole (RGA) de 2000 permettent de déterminer pour chaque canton du bassin la surface irriguée, les types de culture et les types de culture irriguée.

Il est précisé s'il s'agit de prélèvements en eau de surface, en nappe phréatique, en retenue collinaire ou en nappe profonde et si le volume déclaré est basé sur une mesure ou un forfait. Ces données se présentent sous la forme de volumes annuels au niveau de chaque commune du bassin pour les années 1998 à 2006. S'ajoute la connaissance des volumes de prélèvement

pendant l'étiage (de juillet à octobre) pour les usages industriels, agricoles et d'alimentation en eau potable AEP.

Données d'occupation du sol

Les usages sont partiellement liés à l'occupation du sol et aux activités exercées sur le territoire. Nous avons donc collecté des informations dans la base de données CORINE Land Cover.

Données sur les ouvrages hydrauliques

EDF et la SHEM ont fourni pour les besoins de l'étude les débits turbinés et les variations de réserve pour les barrages exploités sur le bassin. Ces données sont au pas de temps journalier, sur des périodes variables selon les ouvrages.

Débits naturalisés

Ces données résultent de traitements de débits observés et pour partie de données de prélèvements. Elles sont issues de travaux antérieurs au présent projet. Il s'agit :

- de débits naturalisés par Eaucéa pour l'élaboration du Plan de Gestion des Etiages Tarn. Ces données sont au pas de temps journalier sur les périodes du 1^{er} juin au 31 octobre pour les années 1970 à 2006 ;
- d'apports naturels reconstitués au droit des barrages exploités par EDF sur le bassin (source EDF). Ces données sont au pas de temps journalier sur des périodes variables selon les ouvrages ;
- de débits naturalisés pour l'élaboration du Plan de Gestion des Etiages Garonne-Ariège (source SMEAG). Ces données sont au pas de temps journalier sur les périodes d'étiage (juillet à octobre) des années 1969 à 1998 au niveau des stations de Valentine, Portet, Verdun et Lamagistère ;
- de débits naturalisés issus du rapport « Hydrologie des rivières réalimentées par le Canal de la Neste » (source CACG). Ces données sont au pas de temps mensuel de 1960 à 2004 au niveau des stations de Beyrède (Neste), Lafitte (Loue), Francon (Nère), Fousseret (Louge), Peguilhan (Gesse), Espaon (Save), Larra (Save), Gimont (Gimone), Castelferrus (Gimone), St Antoine (Arrats).

ANALYSE EXPLORATOIRE DES DONNEES RELATIVES AUX USAGES

L'objet de cette section est de fournir des éléments de synthèse sur les usages. Nous commençons par une description de l'occupation du sol avant d'en venir aux données relatives aux pratiques agricoles et enfin aux données brutes de prélèvements. Nous présentons les statistiques relatives aux sous-bassins délimités par les neuf stations hydrométriques (cf. « Secteur d'étude et bassins d'intérêt »). Ces secteurs sont identifiés par le nom de la station aval (Figure 3). L'appellation « Bassin Imagine » désigne dans cette section la totalité du secteur, c'est-à-dire le bassin en amont de Lamagistère.

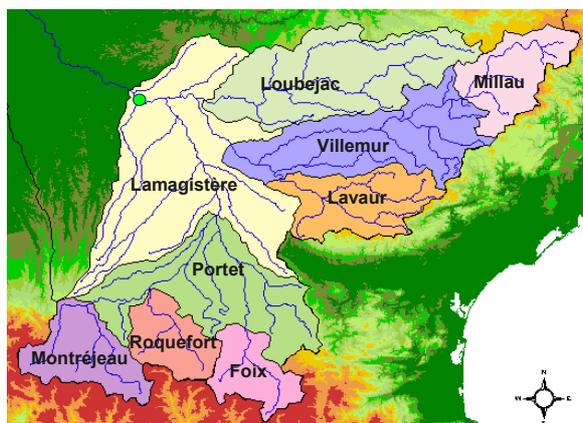


Figure 3 : Dénomination des sous bassins versants d'étude

OCCUPATION DES SOLS

Le territoire d'étude représente une superficie de 31 600 km². Il est en majeure partie occupé par des terres agricoles (environ 51%) et des espaces naturels (47%). Les espaces naturels sont situés sur les contreforts des Pyrénées (bassin de Foix et de Montréjeau) où ils couvrent jusqu'à 90% de la surface.

La bordure des Pyrénées (nord du bassin hydrographique de Portet) et les contreforts de la moyenne vallée de l'Aveyron et du Tarn (extrémité nord de Lamagistère et bassins de Saint-Antonin, Loubejac et Villemur) sont principalement recouverts de prairies artificielles temporaires et de systèmes culturaux et parcellaires.

Les forêts de feuillus et, à un degré moindre, des forêts mixtes feuillus – conifères occupent la partie montagneuse des Pyrénées (bassins de Montréjeau, Roquefort et Foix), le haut Languedoc (Est du bassin de Lavour) ainsi que les grandes causses entre Millau et Albi (partie est du bassin Villemur). Toute une zone située à l'Est de Millau est couverte par une vaste forêt de conifères (forêt domaniale du Causse Noir).

Les milieux de végétations arbustives et herbacées se trouvent surtout en tête de bassin versant sur les causses des gorges du Tarn en bordure de la corniche des Cévennes (bassin de Millau) et dans la haute vallée de l'Ariège (bassin de Foix).

Les espaces artificialisés ne représentent qu'une très faible partie du domaine d'étude (moins de 2%) et se situent principalement sur le bassin de Lamagistère autour de l'agglomération de Toulouse.

La population résidente est de 2 017 899 habitants, soit une densité de 64 habitants/km², avec de fortes disparités selon les sous-bassins hydrographiques : moins de 20 habitants/km² dans les zones montagneuses et les causses des bassins amont du Tarn, de la Garonne et de l'Ariège (bassins de Foix, Roquefort, Valentine et Millau), entre 40 et 60 habitants/km² dans les moyennes vallées (bassins de Villemur, Portet, Loubejac et Lavaur) et, plus de 130 habitants/km² dans la campagne toulousaine du fait de la présence de la métropole de Toulouse mais aussi des agglomérations de Montauban et Moissac (bassin de Lamagistère). Les densités de population de la France et du bassin Adour Garonne sont respectivement de 104 et 57 habitants/km².

Hormis la métropole régionale de Toulouse, le tissu urbain est très discontinu. La population est concentrée sur quelques agglomérations de taille moyenne comme Albi, Millau, Castres, Montauban ou Rodez. L'habitat rural est éparpillé essentiellement le long des couloirs économiques que forment les principaux cours d'eau, Garonne, Ariège, Tarn, Aveyron et Agout.

Les principales agglomérations par sous-bassins sont :

- Lamagistère : Toulouse (443 103 habitants, l'agglomération urbaine totalise deux fois plus d'habitants soit 871 800 individus), Montauban (54 421 hab.), Moissac (12 321 hab.),
- Millau : Millau (21 329 hab.),
- Villemur : Albi (47 800 hab.) et Graulhet (12 656 hab.),
- Loubejac : Rodez (23 707 hab.), Villefranche-de-Rouergue (11 919 hab.) et Carmaux (10 231 hab.),
- Lavaur : Castres (42 064 hab.) et Mazamet (10 539 hab.),
- Portet : Pamiers (13 463 hab.) et Saint-Gaudens (11 587 habitants),
- Foix : Foix (9 100 habitants),
- Valentine : Bagnères-de-Luchon (2 619 hab.).

TISSU INDUSTRIEL

Dans l'ensemble, le territoire d'étude est à vocation agricole. En dehors de la métropole Toulousaine, le domaine est faiblement industrialisé.

Les filières traditionnelles comme l'industrie du cuir, du textile et de la peau sont implantées à proximité des agglomérations moyennes du Tarn et de l'Ariège (Graulhet, Castres, Mazamet et Millau). En aval de la filière, la confection et l'habillement sont positionnés dans la région de Toulouse. Ces secteurs qui, il y a quelques années, étaient encore importants, sont en déclin. L'activité charbonnière (Albi - Carmaux) a quant à elle disparue.

Situées principalement sur l'Ariège et la Haute-Garonne, les industries du bois (charpente et menuiserie pour le bâtiment) et du papier s'appuient sur l'exploitation des richesses forestières locales. Ces activités sont aussi en forte diminution depuis quelques années.

Les industries de haute technologie, aéronautique, électronique et transformation des métaux, seuls secteurs à fort développement, sont implantées au cœur de l'agglomération toulousaine. Ce bassin d'emploi concentre une grande partie de l'emploi et de l'activité économique du territoire d'étude.

L'activité agroalimentaire est une composante majeure du système productif de la région. Très diversifié, ce secteur est présent sur l'ensemble du territoire, dans les zones d'élevages de la lisière des Pyrénées et des bassins amont du Tarn et de l'Aveyron ainsi que dans les zones de cultures céréalières et d'arboricultures des moyennes et basses vallées des cours d'eau (Garonne, Tarn, Aveyron, Agout et rivières de Gascogne).

Enfin, la production d'électricité constitue une activité importante de la région. La production d'hydroélectricité est très présente dans les sous bassins amont pyrénéens et dans les bassins versant du Tarn et de l'Aveyron. Enfin, à l'extrémité septentrionale du domaine se trouve la centrale de production électronucléaire de Golfech.

AGRICULTURE

Les éléments présentés ci-dessous sont extraits du Recensement Général de l'Agriculture (RGA 2000) et de la Statistique Agricole Annuelle de l'année 2006 (SAA – résultats 2006). Ces données agrégées au niveau des cantons pour le RGA 2000 ou au niveau des départements pour la SAA-2006 ont été extrapolées aux sous-bassins du modèle hydrologique au prorata des surfaces.

Comme l'ensemble de l'agriculture française, l'agriculture dans le domaine d'étude a subi une profonde mutation depuis les années 1960 suite à la mise en œuvre de la Politique Agricole Commune. Avant les années 1950, le système de production agricole très diversifié associait polyculture et élevage et était adapté aux caractéristiques naturelles comme le climat, le relief et la nature des sols. Entre les années 1960 et 1980, ce système traditionnel a évolué vers une plus grande spécialisation régionale des types de production agricole. Il s'est adapté aux nouvelles conditions de production dictées par l'état du marché, le développement des réseaux de collecte des industries agroalimentaires, l'évolution du coût des intrants et la mécanisation qui a imposé le regroupement des parcelles. En favorisant certains types de culture, la PAC a joué aussi un rôle important dans la mutation de l'espace agricole.

Aujourd'hui, les terres arables occupent principalement les moyennes et basses vallées de la Garonne et du Tarn-Agout. Les cultures fourragères se sont développées principalement dans les moyennes vallées du Tarn et de l'Aveyron (bassins de Saint Antonin et de Villemur) et à un degré moindre au pied des Pyrénées (sud du sous bassin de Montréjeau) et aux alentours de Millau (sous bassin de Millau). Les cultures céréalières sont majoritairement présentes dans la campagne toulousaine de la moyenne vallée de la Garonne et de l'Ariège (sous bassins de Portet et de Lamagistère) ainsi que sur les basses vallées aval de l'Agout (sous bassin de Lavaur) et de l'Aveyron (sous bassin de Loubejac). La superficie toujours en herbe, prairies permanentes destinées au pâturage du bétail principalement, représente un peu moins de 30% (SAU). Les autres cultures sont pour l'essentiel le fourrage 21% et les oléagineux, 11%. Quant aux cultures spécialisées (maraîchages, vignes, vergers), celles-ci représentent 3-4% de la superficie agricole utile.

Les vignobles, peu développés, sont regroupés autour des villages de Gaillac / Castelnau de Montmirail (extrémité ouest du sous bassin de Villemur) et de Fronton. L'arboriculture (vergers et petits fruits) est principalement implantée sur les côteaux de Moissac, à la confluence du Tarn et de la Garonne et le long du canal de la Garonne (sous bassin de Lamagistère).

La modernisation de l'agriculture a aussi entraîné une concentration des exploitations. En 2005, le nombre d'exploitations dans le domaine d'étude s'élève à 55 882 et représente 25% du nombre d'exploitations du bassin Adour Garonne. La superficie agricole moyenne par exploitation est de moins de 30 ha. Cette valeur varie significativement suivant les bassins, entre 10 ha sur le bassin hydrographique de Montréjeau et 82 ha sur celui de Millau. En comparaison, la SAU moyenne par exploitation sur le territoire national est actuellement de 55 hectares (donnée 2007) contre seulement 14 hectares en 1955.

La répartition des exploitations sur le domaine est aussi assez inégale. Rapporté à la surface des bassins, le nombre d'exploitations par ha est compris entre moins de 0.005 sur les têtes des

bassins du Tarn et de l'Ariège (bassins de Foix et Millau) et plus de 0.025 sur la plaine Toulousaine et la vallée de l'Aveyron (bassins de Loubejac et Lamagistère, malgré la présence de la métropole toulousaine). La moyenne dans le domaine d'étude et sur le bassin Adour Garonne est inférieure à 0.02 exploitations/ha (0.019).

Entre 1970 et 2000, la surface irriguée moyenne a été multipliée par cinq. Depuis, cette superficie s'est stabilisée, voire a diminué sur certains secteurs (Figure 4).

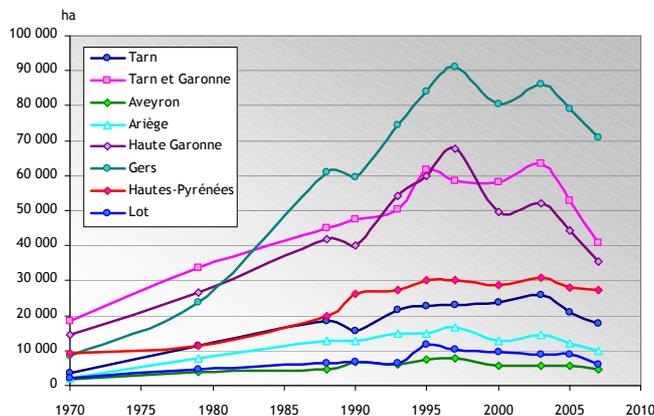


Figure 4 : Evolution des surfaces irriguées selon les départements

La principale culture irriguée est le maïs semence qui représente plus de 50% des surfaces irriguées suivie par la culture d'oléagineux (environ 12%). Le maïs fourrage occupe 10% des surfaces irriguées. Cumulées, les cultures maïs semence et maïs fourrage représentent une surface irriguée de 103 323 ha, soit plus de 62% de la surface totale irriguée du domaine d'étude (Tableau 1). La part de l'agriculture spécialisée dans les surfaces irriguées est de 8%.

	<i>Surface de maïs semence et fourrage irriguées (ha)</i>	<i>Proportion par rapport à la surface irriguée totale (%)</i>
Bassin Imagine	103232	62.03
Foix	19	73.86
Lamagistère	53752	57.80
Lavaur	5042	56.56
Loubejac	11 540	78.26
Millau	36	11.84
Montréjeau	251	58.02
Portet	23797	72.05
Roquefort	214	83.60
Villemur	10145	64.58

Tableau 1 : Statistiques relatives à l'agriculture

Le Tableau 2 et le Tableau 3 présentent les principales données agricoles pour les différents bassins.

Données en ha	Nombre d'exploitations	SAU	Surfaces irriguées	Culture principale		2 ^{ème} culture		Principale culture irriguée		2 ^{ème} culture irriguée	
				Nature	Surface	Nature	Surface	Nature	Surface	Nature	Surface
Adour Garonne	220 442	5 434 626	645 980								
Bassin Imagine 2030	55 895	1 597 740	166 412	Céréales dont blé et autres	492 272 163 927 150 747	Prairies	433 381	Céréales dont maïs et autres	99 179 89 915 9 240	Oléagineux	20 687
Foix	498	15 467	25	Prairies	15 079	Fourrages	264	Fourrages dont maïs	14 14	Céréales dont maïs	5 5
Lamagistère	18 589	519 171	92 997	Céréales dont blé	235 660 89 733	Oléagineux (Soja ?)	112 956	Céréales dont maïs	55 434 49 814	Oléagineux	11 567
Lavaur	3 744	110 469	8 915	Céréales dont autres	33 819 13 642	Prairie	29 051	Céréales dont maïs	4 485 3 888	Fourrages dont maïs	1 425 1 154
Loubejac	12 148	313 617	14 745	Fourrages	121 810	Prairie	105 525	Céréales dont maïs	7 099 6 545	Fourrages dont maïs	4 259 3 432
Millau	932	76 559	304	Prairies	58 309	Fourrages	12 066	Prairies	188	Fourrages dont maïs	68 34
Montréjeau	1 959	21 470	432	Prairies	16 631	Fourrages	2 526	Céréales dont maïs	209 209	Prairies	123
Portet	7 810	239 985	33 030	Céréales dont autres	79 405 27 308	Prairie	73 690	Céréales dont maïs	22 748 21 188	Oléagineux	3 990
Roquefort	1 853	35 565	257	Prairies	29 642	Fourrages	3 414	Céréales dont maïs	144 131	Fourrages dont maïs	86 83
Villemur	8 320	265 436	15 709	Fourrages	88 374	Céréales dont blé	70 262 24 184	Céréales dont maïs	9 055 8 133	Fourrages dont maïs	2 520 2 011

Tableau 4 : Répartition des principales cultures par sous-bassin

Données en ha	SAU / surface totale	Surfaces irriguées / SAU	Culture principale / SAU		2 ^{ème} culture / SAU		Principale culture irriguée / S. irriguée		2 ^{ème} culture irriguée / S. irriguée	
			Nature	Surface	Nature	Surface	Nature	Surface	Nature	Surface
Adour Garonne										
Bassin Imagine 2030	50,57%	10,42%	Céréales dont blé et autres	30,81% 10,26% 9,43%	Prairies	27,12%	Céréales dont maïs et autres	59,60% 54,03% 5,55%	Oléagineux	12,43%
Foix	11,32%	0,16%	Prairies	97,49%	Fourrages	1,70%	Fourrages dont maïs	55,52% 55,19%	Céréales dont maïs	18,67% 18,67%
Lamagistère	64,98%	17,91%	Céréales dont blé	45,39% 17,28%	Oléagineux (Soja ?)	21,76%	Céréales dont maïs	59,61% 53,56%	Oléagineux	12,44%
Lavaur	42,94%	8,07%	Céréales dont autres	30,61% 12,35%	Prairie	26,30%	Céréales dont maïs	50,31% 43,62%	Fourrages dont maïs	15,99% 12,94%
Loubejac	61,40%%	4,70%	Fourrages	38,84%	Prairie	33,65%	Céréales dont maïs	48,14% 44,39%	Fourrages dont maïs	28,89% 23,27%
Millau	41,23%	0,40%	Prairies	76,16%	Fourrages	15,76%	Prairies	62,08%	Fourrages dont maïs	22,32% 11,33%
Montréjeau	12,40%	2,01%	Prairies	77,46%	Fourrages	11,77%	Céréales dont maïs	48,38% 48,38%	Prairies	28,59%
Portet	51,32%	13,76%	Céréales dont autres	33,09% 11,38%	Prairie	30,71%	Céréales dont maïs	68,87% 64,15%	Oléagineux	12,08%
Roquefort	22,02%	0,72%	Prairies	83,34%	Fourrages	9,60%	Céréales dont maïs	55,96% 51,12%	Fourrages dont maïs	33,39% 32,48%
Villemur	56,77%	5,92%	Fourrages	33,29%	Céréales dont blé	26,47% 9,11%	Céréales dont maïs	57,64% 51,71%	Fourrages dont maïs	16,04% 12,80%

Figure 5 : Répartition des principales cultures pluviales et irriguées selon les sous-bassins

SYNTHESE DES PRINCIPAUX PRELEVEMENTS PAR USAGE

En 2006, la quantité d'eau prélevée sur le territoire d'étude était de 827 Mm³, et représentait 36% des prélèvements du bassin Adour Garonne (2 322 Mm³). Les principaux usages de l'eau sont les activités industrielles (essentiellement pour un usage de production d'électricité), la production d'eau potable et l'irrigation (Figure 5, Tableau 2). Tous usages confondus, les prélèvements sont relativement stables depuis quelques années, l'augmentation des prélèvements agricoles suite à la succession d'années sèches étant compensée par la réduction importante des prélèvements de l'industrie.

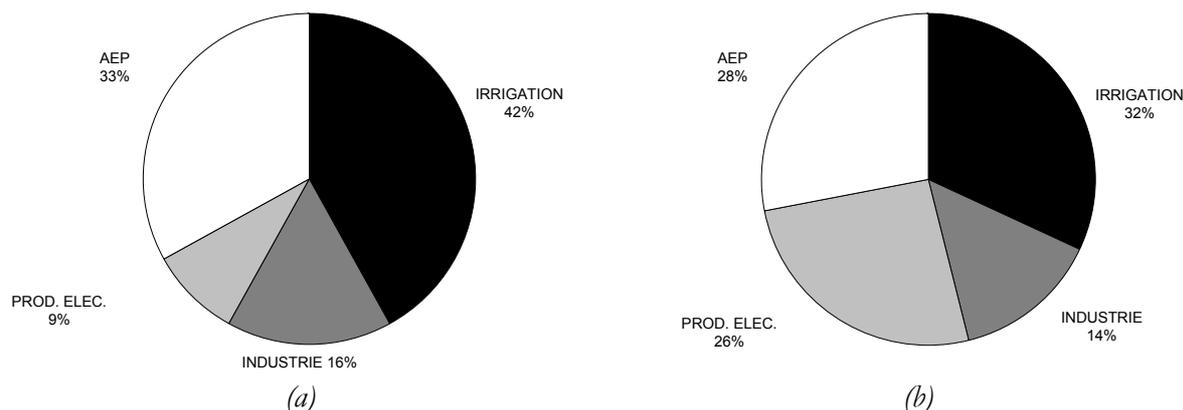


Figure 5 : Quantités prélevées pour chacun de ces usages sur le bassin de gestion Adour Garonne (a) et sur le bassin versant de Lamagistère (b)

	Volume prélevé		Irrigation		Industrie		Eau potable	
	Mm ³	Mm ³	%	Mm ³	%	Mm ³	%	
Bassin Imagine	826,4	259,2	31,37	336,7	40,74	230,4	27,89	
Foix	5,8	0,0	0,17	2,6	43,91	3,3	55,92	
Lamagistère	426,3	113,1	26,54	230,2	54,01	82,9	19,46	
Lavaur	42,5	14,9	34,91	3,3	7,75	24,4	57,34	
Loubejac	43,9	23,6	53,76	1,1	2,51	19,1	43,51	
Millau	4,8	0,0	0,81	0,2	4,75	4,5	94,44	
Montréjeau	20,0	0,4	2,05	13,7	68,51	5,9	29,44	
Portet	172,2	73,2	42,53	39,2	22,78	59,7	34,69	
Roquefort	10,9	0,3	2,51	5,5	50,45	5,1	47,03	
Villemur	100,0	33,7	33,73	40,8	40,83	25,4	25,44	

Tableau 2 : Volumes d'eau prélevés par usage suivant les sous-bassins définis par les stations hydrométriques

Prélèvements en eau potable

La pression de l'AEP sur la ressource n'est pas négligeable. Elle représente pour le bassin plus du quart des prélèvements totaux. Après avoir connu une forte augmentation entre les années 1970-1990, le taux d'accroissement des prélèvements est plus faible. Depuis le début des années 2000,

l'augmentation annuelle moyenne est de 1.1% (moyenne des départements concernés par le domaine d'étude).

L'eau potable ne sert pas seulement à l'usage domestique mais approvisionne aussi une multitude d'activités productives ayant des comportements de consommation d'eau très contrastés. En dehors des ménages, les utilisateurs d'eau potable sont principalement :

- les entreprises de services, les petits commerces (boulangeries, pressing...), l'artisanat, les très petites entreprises industrielles raccordées au réseau sans contrat spécifique, les collectivités communales (consommations des ouvrages et appareils publics tels que les bornes-fontaines, les lavoirs, les abreuvoirs, les urinoirs publics, les bouches de lavage, d'arrosage et d'incendie, les réservoirs de chasse des égouts, etc.) et services publics. Ces activités sont, en général, domestiques (APAD),
- les industries dont l'activité de production dépasse un certain seuil de consommation d'eau dans la mesure où les installations de service le permettent,
- les établissements agricoles (notamment les bâtiments et abreuvoirs destinés à l'élevage). Dans certaines régions rurales, une grande partie du bétail est ainsi abreuvé à partir du réseau d'eau potable.

Concrètement, il est difficile de distinguer les volumes consommés selon le type d'usages (domestiques ou non). Hors enquête spécifique, la seule distinction possible est celle faite à travers le mode de tarification entre abonnés ordinaires et abonnés spéciaux. Selon les données disponibles (sources : IFEN et INSEE), les abonnés « domestiques » sont destinataires de plus de 80% de l'eau potable distribuée. Les activités productives représentent quant à elles moins de 20% de la consommation totale. Toutefois, ces valeurs peuvent varier significativement selon les départements.

D'autres facteurs comme les caractéristiques climatiques, le niveau de vie, les pertes sur le réseau souvent plus importantes en zone rurale, l'afflux de touristes en périodes estivales (ou hivernales) interviennent aussi dans le niveau de prélèvements. Ces éléments expliquent pourquoi des régions moins peuplées que d'autres prélèvent des volumes d'eau tout aussi importants.

Ramenés à la population sédentaire, les prélèvements d'eau unitaires dans le domaine d'étude varient considérablement suivant les départements : entre 95 m³/an/habitant en Haute-Garonne et 134 m³/an/habitant dans le Lot.

Prélèvements en eau industrielle

Les usages possibles de l'eau dans le secteur de l'industrie sont très variés et il serait difficile d'en faire une liste exhaustive. En général, on distingue :

- les « eaux de process », eaux qui rentrent, directement ou indirectement, dans la fabrication du produit,
- les eaux de refroidissement,
- les eaux d'alimentation des chaudières et de transport de chaleur,
- les eaux utilisées pour les usages autres que la production (lavages des surfaces, protection contre les incendies, etc.).

Depuis 1970, les prélèvements d'eau de l'industrie diminuent régulièrement. Plusieurs éléments sont à l'origine de cette diminution :

- une réglementation de plus en plus contraignante dans le domaine des prélèvements : bouclage des circuits de refroidissement, amélioration des process,

- des contrôles et un encadrement plus strict des rejets dans le milieu naturel et des pollutions accidentelles,
- des avancées dans les technologies de traitements des effluents industriels ainsi qu'une diminution des coûts associés qui font qu'une grande partie de ceux-ci sont aujourd'hui recyclés.
- une aspiration des grandes entreprises à améliorer leurs performances environnementales.

Les mutations industrielles importantes ont aussi contribué à la baisse des prélèvements.

Sur le territoire d'étude, le déclin du secteur habillement – cuir – textile et peau, grand consommateur d'eau, l'amélioration des process et le recours croissant à des circuits de refroidissement fermés ont permis de diminuer les prélèvements industriels de plus de 40% entre 1998 et 2005.

Prélèvements agricoles

Actuellement, les volumes en eau destinés à l'usage agricole représentent en moyenne 32% des prélèvements tous usages confondus (230 millions de m³), mais plus de 70% de la consommation totale. En termes de quantités consommées, cet usage se place donc très largement en tête. La ressource est utilisée essentiellement à des fins d'irrigation pour les cultures mais aussi pour l'abreuvement du bétail, le nettoyage des bâtiments d'élevage ou encore la dilution des produits à épandre.

Une des particularités importantes de cet usage est que la majorité des prélèvements intervient en période d'étiage, période sensible où la disponibilité de la ressource est moindre. Indispensable sur le plan économique et social, cette pratique ne va pas sans poser de réelles difficultés d'allocation de l'eau entre les besoins des différentes activités humaines, eau potable, industries, agriculture, production d'électricité, loisirs et ceux nécessaires au fonctionnement et à la préservation des milieux aquatiques. Les besoins en eau des cultures ont aussi une variabilité infra et inter annuelle très importante, comparés aux autres usages de l'eau.

Environ la moitié des exploitations agricoles irriguées utilise un réseau collectif, l'autre moitié utilise une ressource individuelle.

L'irrigation par aspersion qui intègre tous les systèmes actuels d'enrouleurs et de rampes d'arrosage est très largement représentée (97% de la surface irrigable). Ce type d'irrigation est fiable, la consommation peut être aisément contrôlée et la qualité de l'irrigation est très bonne. L'efficacité de ce système est de l'ordre de 85 à 100%.

Sur le bassin Adour Garonne, les prélèvements effectivement réalisés sont très inférieurs aux besoins théoriques en eau d'irrigation des cultures. Dans le domaine d'étude, le ratio prélèvements sur besoins se situe entre 50 et 85%. Ce ratio prend en compte le comportement des agriculteurs, la capacité technique du matériel et les arrêtés de restriction et d'interdiction de prélèvement qui, selon les années, limitent drastiquement les prélèvements.

Dans la suite de l'étude, nous considérons que les volumes prélevés pour l'irrigation sont entièrement consommés par les cultures.

Prélèvements du CNPE de Golfech

Concernant la production d'électricité, la consommation d'eau est entièrement due à la centrale nucléaire de Golfech qui se situe à l'extrémité aval du domaine d'étude.

Mise en service en 1994, le CNPE de Golfech comprend deux réacteurs de 1300 MWe. Le circuit de refroidissement des réacteurs est de type circuit fermé. Les échanges avec l'air ambiant à l'intérieur des réfrigérants atmosphériques permettent de refroidir l'eau en sortie des condenseurs. De 20 à 25% de l'énergie est dissipée par convection (réchauffement de l'air atmosphérique) et de 75 à 80% par transfert de masse (évaporation de l'eau dans l'air atmosphérique). L'évaporation d'eau dans l'air atmosphérique ainsi que les purges réalisées pour limiter la concentration en sels minéraux et en matières organiques qui risqueraient d'entartrer les aéro-réfrigérants induisent une perte d'eau dans le circuit de refroidissement qui nécessite des apports d'eau réguliers. Pour un réacteur de 1300 MWe en fonctionnement nominal, le débit d'appoint (débit prélevé dans le milieu) est de l'ordre de 2 m³/s. Celui-ci se décompose en moyenne en un débit de purge de 1.25 m³/s et un débit d'eau évaporée (donc consommée) de 0.75 m³/s.

CONSOMMATION PAR USAGE DE L'EAU

Selon les utilisations, l'eau prélevée revient plus ou moins au milieu naturel. La notion de « consommation », qui représente l'eau effectivement utilisée sans retour au milieu, est donc différente de celle de « prélèvement ». Il n'est pas facile de comptabiliser précisément la fraction de l'eau prélevée qui est restituée au milieu et donc d'évaluer la consommation réelle d'eau par usage.

La Figure 6 montre les consommations réelles estimées par type d'usage, en prenant un taux de 100% pour l'irrigation, de 25% pour l'AEP, de 7% pour l'industrie et de 1.5 m³/s pour les deux tranches en service à Golfech.

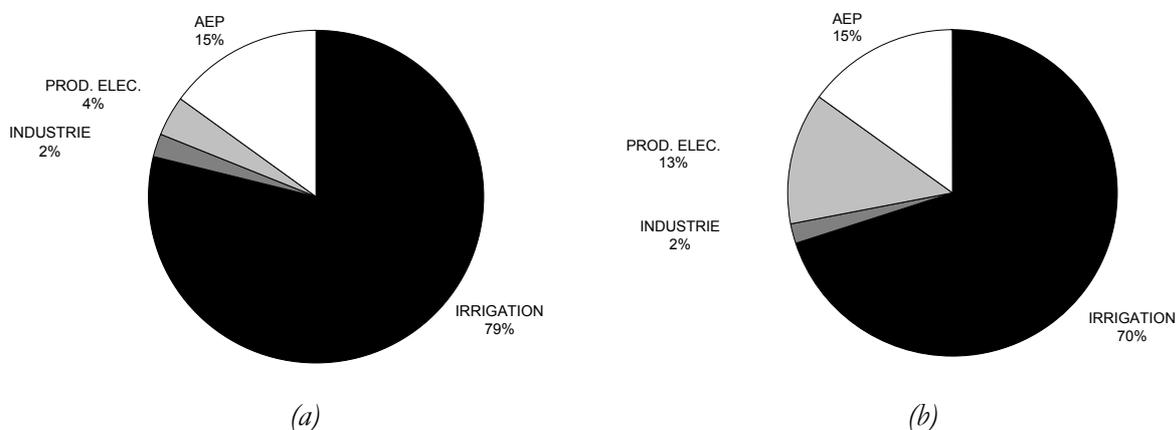


Figure 6 : Consommation réelle par type d'usage sur le bassin de gestion Adour Garonne (a) et sur le bassin versant de Lamagistère (b)

ORIGINE DES PRINCIPAUX PRELEVEMENTS

Les volumes d'eau pour les différents usages sont de différentes natures. Ils peuvent être prélevés soit à partir des eaux de surface, soit à partir des nappes phréatiques ou des nappes profondes, soit encore prélevés dans des retenues permettant de stocker l'eau en période de fortes eaux afin de la restituer durant les périodes critiques comme les périodes d'étiage.

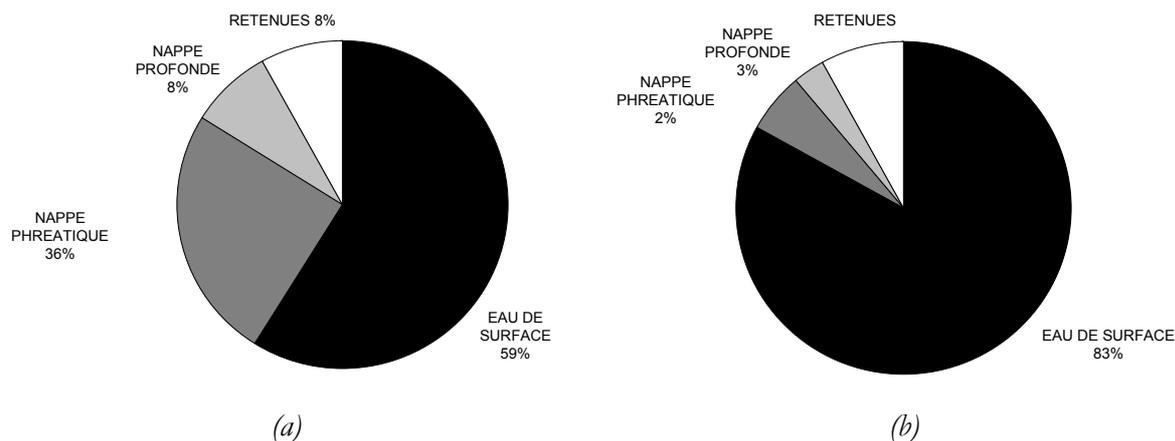


Figure 7 : Répartition des volumes prélevés par origine de l'eau sur le bassin de gestion Adour Garonne (a) et sur le bassin versant de Lamagistère (b)

Tous usages confondus, les volumes prélevés en surface sont prépondérants, suivis par les prélèvements dans les nappes phréatiques (Figure 7, Tableau 3). La différence de répartition entre le bassin Adour Garonne et le territoire d'étude s'explique par les prélèvements plus importants effectués dans les nappes phréatiques des sables des Landes et nappes profondes de Gironde.

	Volume prélevé		Eau de surface		Nappe phréatique		Nappe profonde		Retenues	
	Mm ³		Mm ³	%	Mm ³	%	Mm ³	%	Mm ³	%
Bassin Imagine	826,4		683,3	82,68	46,6	5,64	28,8	3,48	67,7	8,20
Foix	5,8		5,0	86,43	0,0	0,00	0,0	0,44	0,8	13,13
Lamagistère	426,3		365,4	85,71	20,3	4,76	8,0	1,89	32,6	7,64
Lavaur	42,5		33,6	78,94	1,7	4,04	0,7	1,74	6,5	15,29
Loubejac	43,9		31,7	72,21	2,2	5,01	0,4	0,91	9,4	21,41
Millau	4,8		4,6	95,27	0,0	0,16	0,2	4,56	0,0	0,02
Montréjeau	20,0		19,1	95,27	0,4	2,24	0,3	1,37	0,2	1,12
Portet	172,2		130,7	75,93	18,6	10,80	12,5	7,26	10,4	6,01
Roquefort	10,9		9,5	87,30	0,9	7,85	0,5	4,24	0,1	0,61
Villemur	100,0		83,7	83,69	2,4	2,42	6,1	6,09	7,8	7,80

Tableau 3 : Volumes d'eau prélevés par source suivant les sous-bassins définis par les stations hydrométriques

Toutefois, la répartition des volumes prélevés en fonction de l'origine de l'eau dépend fortement de son usage. A titre d'exemple, le Figure 8 et le Tableau 4 montrent la répartition pour l'usage irrigation.

	Volume prélevé		Eau de surface		Nappe phréatique		Nappe profonde		Retenues	
	Mm ³	Mm ³	%	Mm ³	%	Mm ³	%	Mm ³	%	
Bassin Imagine	259,24	164,0	63,23	28,76	11,09	0,02	0,01	66,55	25,67	
Foix	0,01	0,01	100,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Lamagistère	113,13	67,26	59,45	13,27	11,73	0,01	0,01	32,59	28,81	
Lavour	14,85	7,41	49,86	1,08	7,25	0,00	0,00	6,37	42,89	
Loubejac	23,58	12,36	52,42	1,85	7,85	0,00	0,00	9,37	39,74	
Millau	0,04	0,03	78,45	0,01	19,46	0,00	0,00	0,00	2,10	
Montréjeau	0,41	0,36	88,76	0,05	11,24	0,00	0,00%	0,00	0,00	
Portet	73,22	51,87	70,84	11,00	15,02	0,00	0,00%	10,35	14,14	
Roquefort	0,27	0,19	69,85	0,02	5,80	0,00	0,00	0,07	24,35	
Villemur	33,73	24,43	72,42	1,50	4,44	0,01	0,02%	7,80	23,12	

Tableau 4 : Répartition des prélèvements par origine de l'eau pour l'irrigation suivant les sous-bassins

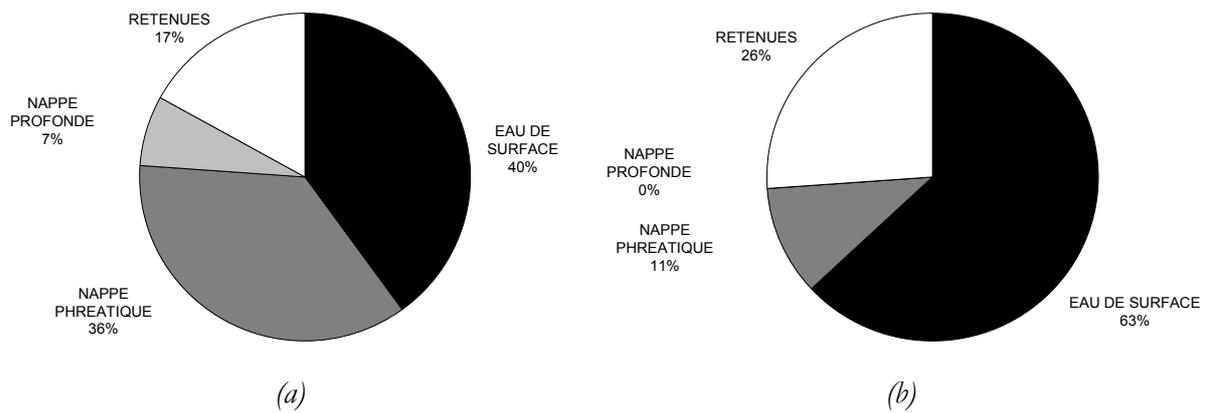


Figure 8 : Répartition des prélèvements pour l'usage irrigation sur le bassin de gestion Adour Garonne (a) et sur le bassin versant de Lamagistère (b)

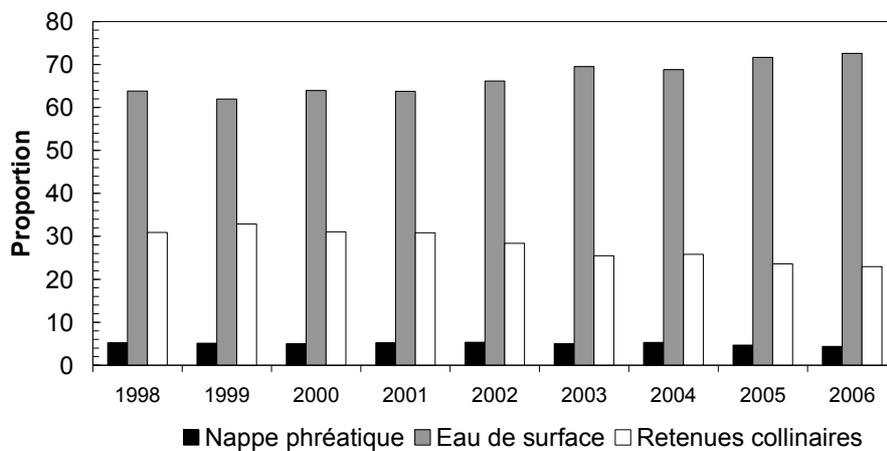


Figure 9 : Origine de l'eau prélevée pour l'irrigation sur le bassin versant du Tarn à Villemur

La Figure 9 offre un regard temporel sur l'origine des prélèvements sur le Tarn à Villemur, représentatif du secteur d'étude. Nous constatons peu de modifications de l'origine de l'eau pour l'irrigation sur la période 1998-2006. Les prélèvements en rivière sont dominants (supérieurs à 60%) et ceux en nappe phréatique sont minoritaires. L'eau stockée dans les retenues collinaires est sollicitée en second lieu (à hauteur de plus de 20%), puis viennent finalement les prélèvements dans les nappes.

Dans le projet, l'origine des eaux prélevées sera modulée par les proportions moyennes calculées sur la période 1998-2006.

RENATURALISATION DES DEBITS

Le fonctionnement du bassin de la Garonne est très modifié par les actions humaines. Caler les outils hydrologiques sur des débits influencés pour projeter l'état des ressources n'est pas satisfaisant pour plusieurs raisons :

- les modèles hydrologiques ont été conçus pour représenter le fonctionnement naturel des bassins versants. A priori, ils ne sont pas aptes à reproduire des débits naturels « bruités » par les modes de gestion ;
- en isolant la part naturelle des débits de la part anthropique, nous pourrions examiner l'évolution du régime hydrologique en réponse aux modifications du climat, indépendamment des usages ;
- si, malgré tout, ce choix devait être retenu, les influences anthropiques actuelles seraient intégrées dans les paramètres calés de la transformation pluie-débit. Cette composante anthropique non maîtrisée pourrait alors conduire à des projections futures de débits irréalistes en réponse à des forçages climatiques inédits.

Nous avons donc procédé à une renaturalisation des débits, c'est-à-dire une reconstitution des écoulements qui aurait été observés en l'absence d'activité humaine. Les séries temporelles obtenues seront les références pour la modélisation du comportement hydrologique naturel des bassins versants. Nous présentons dans les paragraphes qui suivent les procédures mises en place, pour corriger les débits influencés par les grands ouvrages hydrauliques, par des échanges avec des canaux et par les prélèvements agricoles.

CORRECTION DES EFFETS DES GRANDS OUVRAGES HYDRAULIQUES

Méthode

Le principe de base est décrit dans (Agosta, 2007). Il repose sur un bilan effectué au droit des retenues, de la quantité d'eau qui entre dans les réserves et de celle qui en sort.

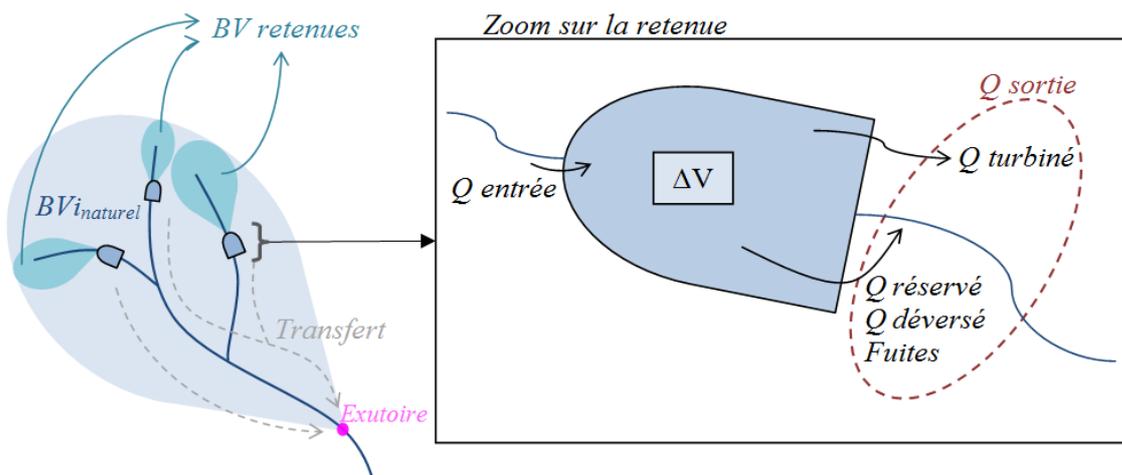


Figure 10 : Identification des éléments de base pour la reconstitution des débits aux exutoires de bassins influencés par des grandes retenues hydrauliques (Agosta, 2007)

La Figure 10 fait apparaître :

- le débit naturel du bassin versant capté par la retenue $Q_{\text{entrée}}$;

- le débit sortant Q_{sortie} dont le détail est donné par :

$$Q_{sortie} = Q_{turbiné} + Q_{déversé} + Q_{réservé} + Fuites$$

où

- $Q_{turbiné}$ correspond au débit d'eau transféré par les conduites depuis la retenue jusqu'à l'usine de production hydroélectrique située plus en aval ;
- $Q_{déversé}$ est le débit évacué par le déversoir de la retenue lorsque les apports en eau dépassent la capacité du barrage, en cas de forts orages, d'épisodes de fonte important...
- $Q_{réservé}$ est le débit dans le lit de la rivière court-circuitée.
- Les *Fuites* sont les écoulements d'eau au travers du barrage ou de sa fondation.
- la contribution $Q_{BV\ i\ naturel}$ du bassin versant intermédiaire (*BV*i naturel**) au fonctionnement hydrologique naturel. *BV*i naturel** correspond à la différence entre le bassin versant total et les sous-bassins versants captés par les retenues.

En complément, nous introduisons : $\Delta V = V_{entrée} - V_{sortie}$ qui représente la variation de volume dans la retenue, positive quand le volume d'eau augmente, négative dans le cas contraire et la variation de réserve durant un temps Δt est notée : $\Delta Res = \Delta V / \Delta t$. Le débit corrigé de la retenue à l'exutoire du bassin versant $Q_{corrHydro}$ est :

$$Q_{corr\ Re\ tenue}(t) = Q_{entrée}(t - \delta) + Q_{BV\ i\ naturel}(t) \quad (Qnat)$$

où δ est le temps de parcours entre la retenue et l'exutoire

Pour chaque jour, le bilan d'eau au droit de la retenue est :

$$Q_{sortie}(t) = Q_{entrée}(t) - \Delta V(t) / \Delta t = Q_{entrée}(t) - \Delta Res(t) \quad (Res)$$

A l'exutoire du bassin versant, le débit observé est la somme de la contribution du bassin versant intermédiaire et des débits observés au droit des retenues :

$$Q_{obs}(t) = Q_{BV\ i\ naturel}(t) + \sum_{i=1}^m Q_{sortie}^{Retenne\ i}(t - \delta_i) \quad (Qobs)$$

avec $Q_{sortie}^{Retenne\ i}$ débit de sortie de la retenue i parmi les m que contient le bassin versant. En manipulant (Res), (Qobs) et (Qnat), il vient :

$$Q_{corr\ Re\ tenue}(t) = Q_{obs}(t) + \sum_{i=1}^m \Delta Res^{Retenne\ i}(t - \delta_i)$$

Dans une situation plus complexe de transferts entre bassins, il faut ajouter des termes rendant compte des débits exportés $Q_{exporté}$, des débits importés $Q_{importé}$ et du stockage de cette eau dans une éventuelle retenue ΔRes . La relation précédente devient :

$$Q_{corrHydro}(t) = Q_{obs}(t) + \sum_{i=1}^m \Delta Res^{Retenne\ i}(t - \delta_i) + \Delta Res_{excl}(t - \delta_{excl}) - Q_{exporté}(t - \delta_{exporté}) + Q_{importé}(t - \delta_{importé}) \quad (CorrH)$$

Application pour la gestion hydroélectrique

Les variations de réserve au niveau des ouvrages à vocation hydroélectrique, n'étant pas totalement fiables (difficulté de mesure, lacune...), nous avons préféré nous appuyer sur les Apports Naturels Reconstitués (ANR), calculés par la Division Technique Générale d'EDF :

$$ANR = Q_{turbiné} + Q_{déversé} + Q_{réservé} + Fuites + \Delta Res$$

Les ANR résultent d'un traitement des données relevées sur le site et de débits en provenance d'un témoin naturel voisin. Nous retiendrons la formulation suivante :

$$Q_{corrHydro}(t) = Q_{obs}(t) + \sum_{i=1}^m (ANR^{Retenue\ i} + Q_{turbiné} + Q_{déversé} + Q_{réservé} + Fuites)(t - \delta_i) \quad (Qnat)$$

Dans une situation plus complexe de transferts entre bassins, il faut ajouter des termes rendant compte des débits exportés $Q_{exporté}$, des débits importés $Q_{importé}$ et du stockage de cette eau dans une éventuelle retenue ΔRes . La relation précédente devient :

$$Q_{corrHydro}(t) = Q_{obs}(t) + \sum_{i=1}^m (ANR^{Retenue\ i} + Q_{turbiné} + Q_{déversé} + Q_{réservé} + Fuites)(t - \delta_i) \quad (CorrH) \\ + \Delta Res_{ext}(t - \delta_{ext}) - Q_{exporté}(t - \delta_{exporté}) + Q_{importé}(t - \delta_{importé})$$

La méthodologie est illustrée sur deux bassins : l'Ariège à Foix et le Tarn en amont de Villemur.

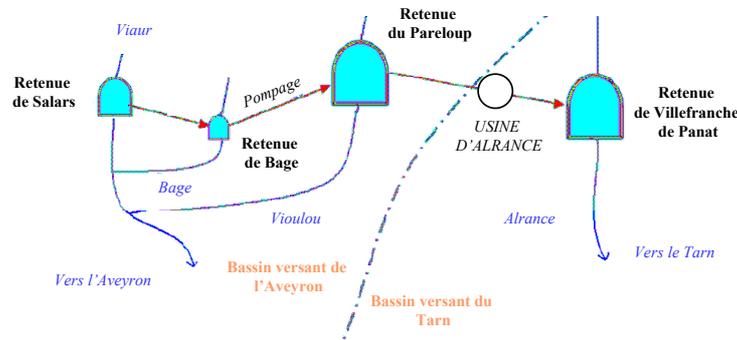


Figure 11 : Schéma hydraulique Tarn-Aveyron (Labedade, 2009)

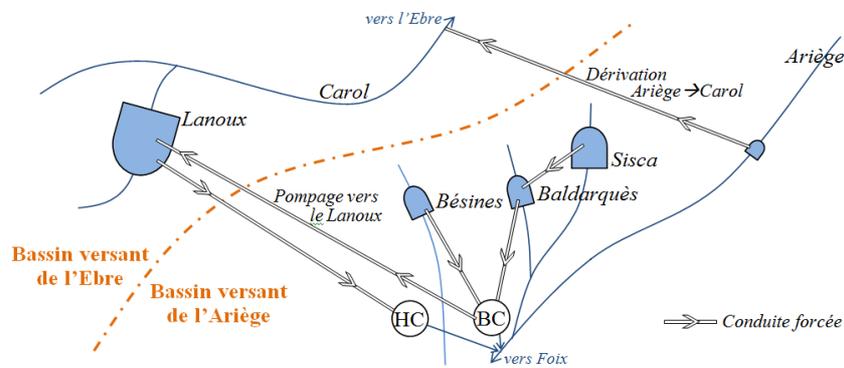


Figure 12 : Schéma hydraulique Ariège (Agosta, 2007)

Le bassin du Tarn à Villemur comporte de nombreux ouvrages hydrauliques, de type fil de l'eau ou éclusée. Ils stockent peu d'eau du fait de leur faible capacité, qui plus est, sur des laps de temps courts. De ce fait, leur influence est faible. L'influence est due à la dérivation majeure, celle qui détourne une partie des eaux de l'Aveyron vers le bassin du Tarn. Dans ce cas, la relation à l'aval immédiat de la retenue, en considérant des temps de transfert négligeables s'écrit :

$$Q_{corrHydro}(t) = Q_{obs}(t) - Q_{turbiné\ Alrance}(t)$$

La configuration est beaucoup plus complexe pour le bassin de l'Ariège à Foix. Les débits de ce bassin sont principalement influencés par la gestion des retenues pour l'hydroélectricité et les contraintes liées au respect du Plan de Gestion des Etiages, les surfaces irriguées étant négligeables sur le bassin. En se concentrant sur les retenues de grande capacité (volume

supérieur à 3 Mm³), la surface drainée par ces ouvrages représente 10.2% de la surface drainée à Foix. En termes de volume, la capacité totale représente 16.4% du volume écoulé à Foix. En plus du système sur le territoire français, de l'eau transite vers l'Espagne (du bassin de l'Ariège vers l'Ebre), puis restitué (de l'Ebre vers l'Ariège) avec un stockage temporaire dans la retenue de Lanoux. Pour ce bassin, les temps de transfert sont inférieurs à la journée mais ne sont pas négligeables. Ce temps de transfert sur les données s'obtient en se calant sur les traces de cycle hebdomadaire du débit. Par « cycle hebdomadaire », nous entendons la composante périodique constatée sur les débits mesurés à Foix, résultante de la gestion différenciée selon le jour de la semaine (turbines préférentiels du lundi au vendredi ; stockage le samedi et le dimanche). Sur la Figure 13, nous pouvons identifier la phase de stockage au moment de la fonte des neiges au printemps (différence entre Obs. et Nat. négative), la phase de déstockage pour la production d'électricité en hiver et pour le soutien d'étiage en été (différence entre Obs. et Nat. positive).

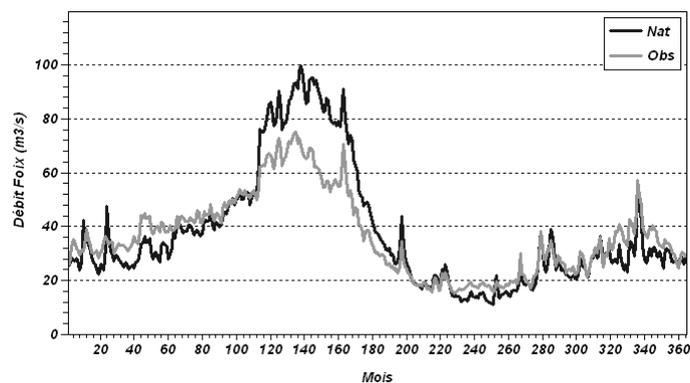


Figure 13 : Moyennes des débits naturalisés et observés selon le jour de l'année pour l'Ariège à Foix

(la valeur 1 correspond au 1^{er} janvier de l'année et la valeur 365 au 31 décembre)

Application pour les ouvrages à usage agricole

Les retenues à usage agricole sont moins documentées que les ouvrages hydroélectriques.

Nous n'avons pas pu obtenir des données d'influence de l'adducteur Hers-Lauragais (qui dérive une partie de l'eau du bassin vers le bassin de l'Aude) et du réservoir de Montbel (60 Mm³). Seuls des chiffres globaux ont été accessibles : l'adducteur Hers-Lauragais transfère ainsi 26 Mm³ depuis le barrage de Montbel pour l'irrigation du Lauragais audois situé sur le bassin méditerranéen. 1 Mm³ reviennent vers le bassin de l'Hers Vif, via la Vixiège. La solution adoptée a consisté à « effacer » le réservoir de Montbel en calant un des modèles hydrologiques (cf. partie suivante) sur des données antérieures à l'entrée en fonctionnement de la retenue (avant 1985) et en conservant les paramètres pour reconstituer en aval de l'emplacement du barrage un signal naturel.

Par manque de données, d'autres retenues parfois importantes ont été finalement négligées. Il s'agit des réservoirs :

- de La Bancalie (10.5 Mm³) et de La Rassisse (13 Mm³) sur le bassin du Tarn à Villemur ;
- de la Gimone (24 Mm³) et de l'Astarac (10 Mm³) sur l'Arrats présentes sur le bassin intermédiaire de la Garonne à Lamagistère.

CORRECTION DES ECHANGES AVEC LES CANAUX

Nous traitons les cas où les dérivations ne sont pas connectées à une réserve. Dans le cas contraire, elles sont intégrées dans le fonctionnement d'une retenue.

Méthode

L'approche est similaire à celle relative à l'hydroélectricité. Nous avons repris (CorrH) en ne faisant apparaître que les termes liés aux transferts. A l'aval des points d'échange, le débit corrigé $Q_{corrCanal}$ à la station Q_{obs} enregistrant les débits influencés est donné par :

$$Q_{corrCanal}(t) = Q_{obs}(t) - Q_{exporté}(t - \delta_{exporté}) + Q_{importé}(t - \delta_{importé})$$

où $Q_{exporté}$ représente les débits exportés et $Q_{importé}$ les débits importés.

Trois grands canaux sont présents sur le bassin de la Garonne à Lamagistère :

- le canal d'irrigation de Saint-Martory, qui transporte 84 Mm³ du 1^{er} juillet au 31 octobre. Il effectue un transfert d'eau interne au bassin depuis la prise d'eau de Saint-Martory jusqu'à Toulouse ;
- le canal latéral à la Garonne de Toulouse, lieu des prélèvements, à Bordeaux, qui transfère vers l'extérieur du bassin 79 Mm³ du 1^{er} juillet au 31 octobre ;
- 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 Mm³ entre le 1^{er} juillet et de 31 octobre. Une portion de cette eau revient à la Garonne par l'intermédiaire du Touch, de la Save, de la Gimone et de l'Arrats.

Application

Les stations hydrométriques enregistrant les débits du canal Saint-Martory et du système Neste (canal et ré-alimentation des affluents des Coteaux de Gascogne) ont permis de mettre en œuvre la procédure. Nous nous sommes heurtés à l'absence de données descriptives du fonctionnement du Canal latéral à la Garonne. Ainsi, les chiffres exploités sont issus du rapport « Etude de définition d'une stratégie d'aide à la décision pour l'optimisation de la gestion de l'eau sur le canal de Garonne » (Hydratec, 2007). L'hypothèse est faite que le débit du canal de Garonne vaut 4.4 m³/s sauf pour les mois d'été (juillet et août) pendant lesquels il vaut 5 m³/s du fait de l'apport de la prise de Pommevic.

CORRECTION DE L'IRRIGATION

Nous avons été confrontés à l'absence de séries des prélèvements journaliers : les volumes déclarés sont fournis globalement, à l'échelle annuelle, et nous ne connaissons pas la répartition au fil des saisons. De ce fait, nous n'avons pas pu renaturaliser les débits sans faire appel à la modélisation hydrologique. L'approche finalement retenue repose sur une quantification journalière des besoins en eau de la plante (module d'irrigation décrit plus loin dans le rapport page 56). Il faut traduire ces apports par irrigation en prélèvements, éventuellement différés dans le temps, en différenciant les origines de l'eau puis à corriger les débits influencés.

Méthode

La première opération consiste à estimer la consommation en eau réelle. Dans le cas d'une irrigation efficace, la consommation est strictement égale aux apports (ceci peut être discuté dans le cas d'une irrigation de type gravitaire qui n'est pas dominante sur le secteur Garonne) : rien ne retourne au milieu naturel.

Il faut émettre des hypothèses concernant l'impact des prélèvements sur les débits :

- le total des prélèvements se partage selon leur origine selon les répartitions moyennes interannuelles ;
- pour les prélèvements effectués dans les eaux de surface ($Q_{PrélèVSurf}$), le débit est diminué immédiatement du volume destiné à l'irrigation ;
- pour les prélèvements effectués en nappe ($Q_{PrélèVNappe}$), on imagine bien que l'influence se répercute sur le débit de manière décalée et diffuse dans le temps. En l'absence d'information¹ sur ce point et en considérant la connexion étroite de ces nappes avec le réseau de surface nous avons considéré que le débit aussi diminuait immédiatement du volume destiné à l'irrigation ;
- pour les prélèvements effectués à partir des retenues collinaires ($Q_{PrélèVColl}$), les phases de remplissage et vidange doivent être distinguées : ces retenues sont alimentées en période hivernale précédant la campagne d'irrigation, puis sollicitées en été.

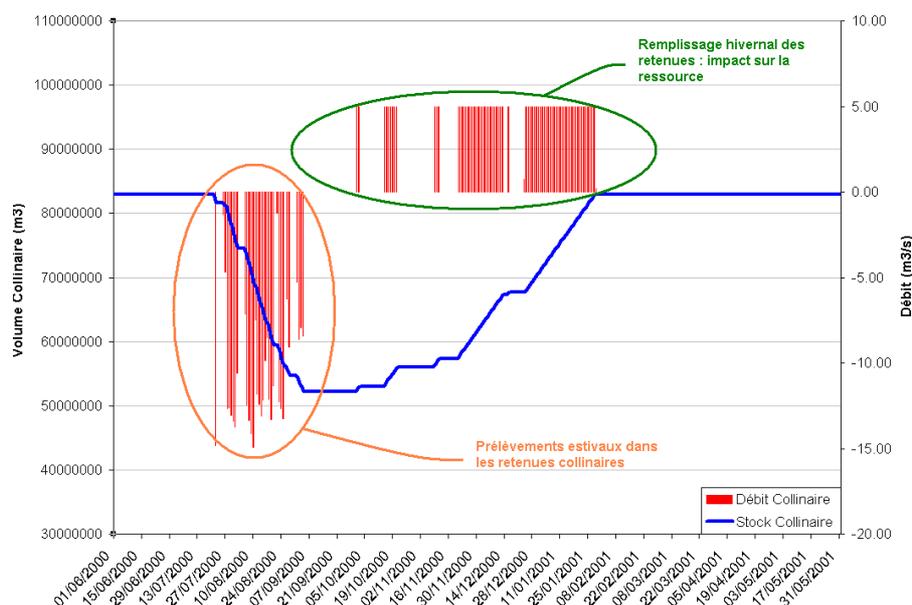


Figure 14 : Fonctionnement type d'une retenue collinaire

La naturalisation des débits influencés par l'irrigation est différente, selon la saison :

- **Naturalisation des débits pendant la campagne d'irrigation** (prélèvement direct en nappe et en eau de surface) :

$$Q_{corrIrrig}(t) = Q_{obs}(t) + Q_{PrélèVSurf}(t) + Q_{PrélèVNappe}(t)$$

avec : $Q_{corrIrrig}$ le débit corrigé de l'irrigation, Q_{obs} le débit observé influencé.

- **Naturalisation des débits hivernaux** (prélèvement pour le remplissage des retenues collinaires) : la première opération consiste à déterminer le volume annuel correspondant à ces prélèvements. Ce volume va être soustrait à la rivière pendant l'hiver précédent. Le remplissage va se faire en supposant que les retenues collinaires sont alimentées à débit constant lorsque le débit du cours d'eau dépasse un certain seuil et que les retenues doivent se remplir le plus rapidement possible. De ce fait,

$$Q_{corrIrrig}(t) = Q_{obs}(t) + Q_{PrélèVColl}(t)$$

¹ Certains auteurs avaient considéré que l'irrigation depuis la nappe n'influe sur le débit que pour la moitié du prélèvement (Monneréau *et al.*, 1996) ; cette proportion peut se comprendre sur l'influence instantanée, toutefois elle ne fait pas sens une fois intégrée sur l'année.

Deux paramètres conditionnent la phase de remplissage : la date de début de remplissage, la capacité maximale des retenues collinaires, Q_{Seuil} seuil à partir duquel les réservoirs collinaires commencent à être remplis et Q_{Max} le débit maximum auquel peut se faire ce remplissage. Q_{Seuil} et Q_{Max} ne sont pas renseignés dans les bases de données. Ils sont calculés approximativement après expertise des chroniques influencées, puis ajustés de manière itérative de telle sorte que le stock dans le réservoir collinaire ne devienne pas négatif pour certaines années. Les retenues ne sont pas modélisées individuellement. Nous avons considéré une macro-réserve pour chaque sous-bassin étudié qui modélise l'ensemble des stocks.

Application

Les volumes maximaux des retenues et la date de début de remplissage (prise par défaut comme la date d'autorisation) sont extraits de la base de données de l'Agence de l'Eau. Pour le Tarn à Villemur, l'origine de l'eau prélevée pour l'irrigation est répartie comme suit (cf. Figure 9, page 35) :

- eaux de surface = 67%,
- retenues collinaires = 28%,
- nappes = 5%.

Une influence apparaît les mois d'hiver lorsque le débit est de l'ordre de $150 \text{ m}^3/\text{s}$.

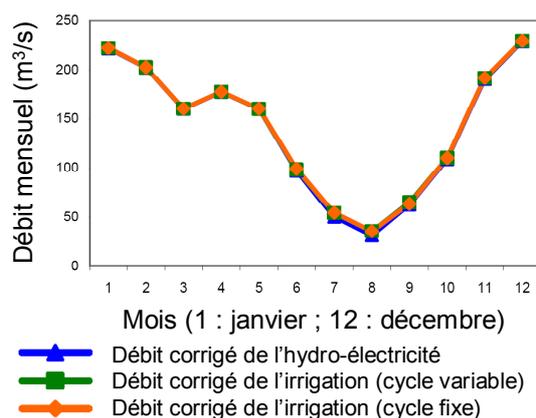


Figure 15 : Essai de correction de l'irrigation pour le Tarn à Villemur, avec deux variantes de calcul des apports par irrigation (cycle variable, cycle fixe) (d'après Labedade, 2008)

Sur la Figure 15, le débit corrigé de l'hydroélectricité reste influencé par les usages agricoles. Les deux autres séries sont, elles, corrigées de l'irrigation. Sur ce bassin, à l'échelle mensuelle, l'écart entre chroniques le plus significatif apparaît pour les mois de juillet et d'août. Il est de quelques m^3/s sur la journée, ce qui peut représenter jusqu'à 20% du débit naturel. Les prélèvements en rivière pour le remplissage des retenues collinaires peuvent atteindre près de $10 \text{ m}^3/\text{s}$, fraction négligeable pendant les hautes eaux.

La Figure 16 montre l'évolution dans l'année des débits alimentant les retenues collinaires. La date du début de remplissage est le 30 septembre. L'essentiel des prélèvements a lieu en automne conformément à notre hypothèse de remplissage précoce pendant la période autorisée.

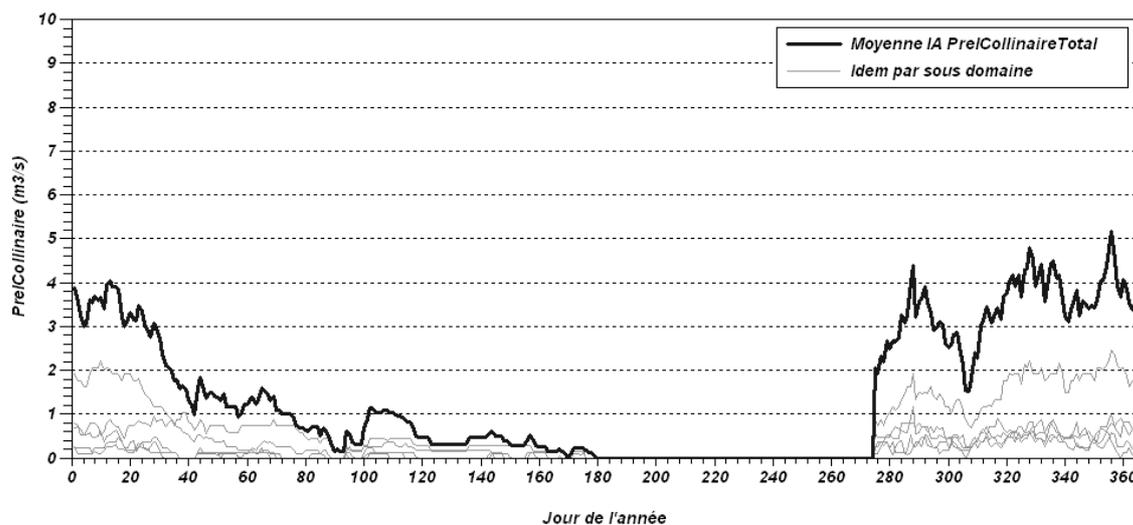


Figure 16 : Résultats de la modélisation du remplissage des retenues collinaires sur le bassin de Lamagistère (trait noir gras : stockage cumulé en moyenne interannuelle (LA) ; trait gris fin stockage en moyenne interannuelle sur chacun des sous domaines)

CONCLUSION

La Figure 17 montre les écarts entre débits observés et naturels reconstitués sur les bassins d'intérêt. Le Salat à Roquefort et le Tarn à Millau sont nos deux témoins naturels ; les hydrogrammes sont donc confondus. Les influences les plus significatives à l'échelle saisonnière sont celles liées à l'hydroélectricité. Remarquons que les transferts Aveyron-Tarn compensent approximativement les volumes exportés hors du bassin de l'Agout vers l'Orb. Les écarts entre débits observés et naturels reconstitués de la Garonne à Lamagistère reflètent l'ensemble des activités anthropiques sur le secteur. Le débit mensuel minimal annuel de fréquence quinquennale sèche (*QMNA5*) et le débit moyen d'août sont respectivement égaux à $100 \text{ m}^3/\text{s}$ et $150 \text{ m}^3/\text{s}$ dans sa configuration naturelle contre $80 \text{ m}^3/\text{s}$ et $110 \text{ m}^3/\text{s}$ dans le contexte de gestion actuelle (période 1990-2000).

Ce travail de renaturalisation a nécessité un effort de collecte de données conséquent compte tenu de la taille du secteur d'étude. La priorité a été donnée à la correction des grandes influences saisonnières et transferts inter-bassins.

La principale difficulté est la représentation de l'irrigation. En effet, les données sur la gestion des réservoirs (qu'il s'agisse de grands ouvrages ou des retenues collinaires) n'ont pas pu être collectées : leur comportement de remplissage/vidange pourrait de ce fait être amélioré. Nous avons dû créer de l'information en nous appuyant sur un modèle hydrologique et un modèle de gestion plausible.

Finalement, à l'échelle du territoire et sur la période 1970-2006, nous ne disposons que d'une fenêtre temporelle réduite $[1990-1997] \cup [1999-2000]$ sur laquelle le régime désinfluencé est reconstitué. De ce fait, les modèles représentant la ressource naturelle auront une période d'apprentissage relativement courte. Nous devons nous satisfaire d'une correction sommaire. L'ensemble reste toujours perfectible (exhaustivité).

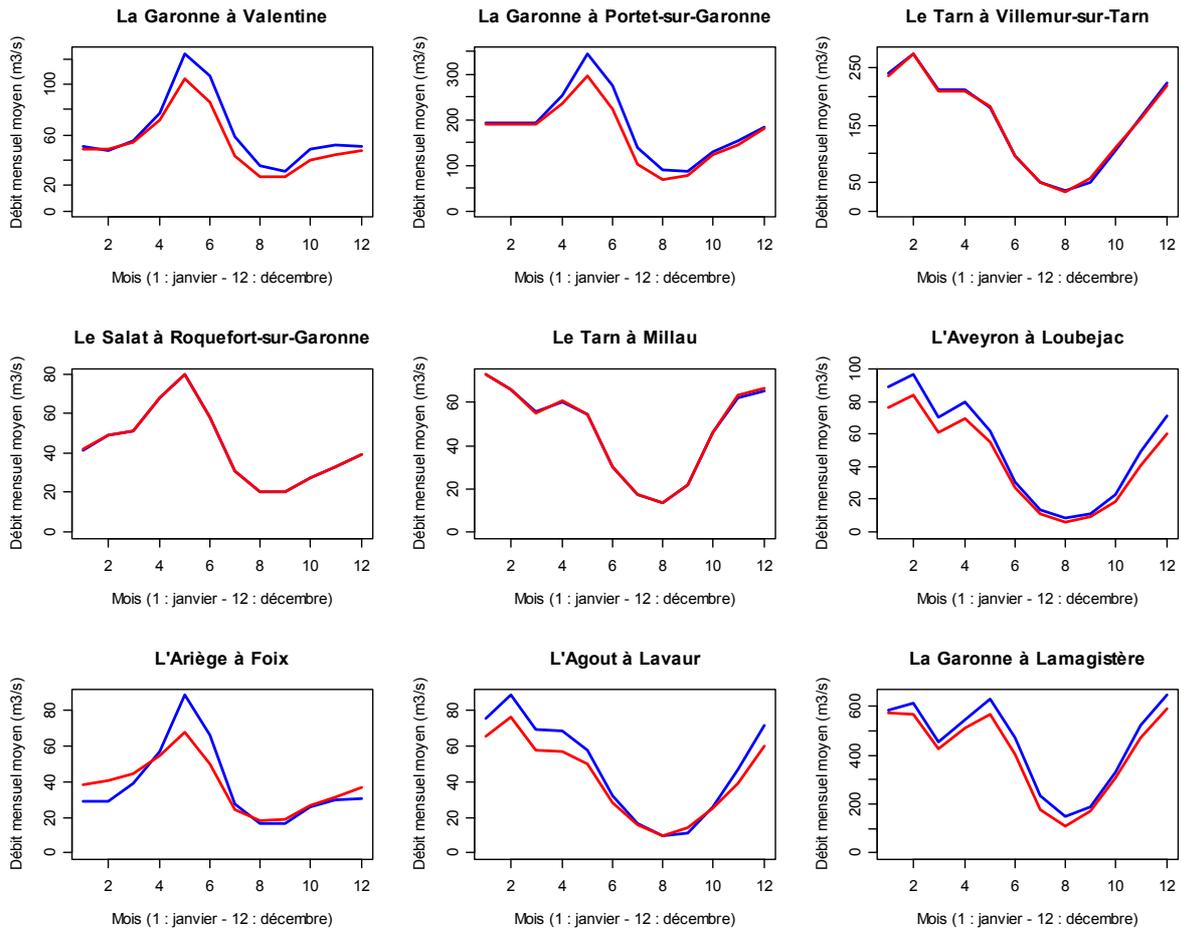


Figure 17 : Débits mensuels moyens observés et naturels reconstitués pour ce qui est disponible sur la période 1970-2005
 (en bleu : régime naturel ; en rouge : débits observés aux stations)

LES OUTILS DE SIMULATION

MODELISATION PLUIE-DEBIT

La modélisation hydrologique permet, à partir d'un ensemble de forçages climatiques (essentiellement pluie, évapotranspiration potentielle et température), de simuler les débits à l'exutoire du bassin versant (Figure 18).

Dans le cadre du projet, elle a permis de simuler les évolutions des débits des bassins étudiés en fonction des chroniques qui leur seront fournies en entrée. Cette procédure simple soulève en fait de nombreuses difficultés car elle est sujette à des sources d'incertitudes variées. Parmi celles strictement liées au modèle hydrologique, on trouvera les incertitudes liées à la structure du modèle et à ses paramètres.

La confiance que l'on peut accorder aux projections hydrologiques à l'horizon 2030 ciblées dans le projet dépend en partie de la capacité des modèles hydrologiques à :

- reproduire correctement le comportement hydrologique des bassins versants dans les conditions actuelles : il est peu probable qu'un modèle très en défaut en conditions actuelles puisse fournir des simulations pertinentes dans des conditions futures ;
- produire des simulations pertinentes dans des conditions différentes de celles rencontrées dans la phase de détermination des paramètres : les modèles utilisés ici requièrent un calage de leurs paramètres sur des séries observées. Or, les projections de scénarios de changement climatique fournissent des forçages dont les caractéristiques statistiques (moyennes, quantiles extrêmes) sont souvent très différentes des conditions actuelles. Il est donc nécessaire d'évaluer *a priori* la capacité des modèles à se projeter dans de telles conditions, c'est-à-dire à fonctionner en extrapolation par rapport aux conditions de calage. Le fait d'utiliser plusieurs approches de modélisation permet de quantifier une partie des incertitudes qui seront liées au schéma de modélisation choisi.

Pour répondre à ce double objectif, nous avons choisi :

- d'utiliser deux modèles hydrologiques différents fonctionnant au pas de temps journalier : CEQUEAU, modèle conceptuel distribué spatialement (Charbonneau *et al.*, 1977) et GR4J, modèle empirique global (Perrin, 2002). Agosta (2007) fournit une description détaillée du modèle CEQUEAU et Hau (2008) celle du modèle GR4J. Ces modèles suivent le schéma classique illustré à la Figure 18. Dans le cadre de cette étude, ces modèles ont été utilisés avec des modules de fonte de neige, comme nous le détaillons dans la suite ;
- d'établir un protocole d'évaluation des modèles : il a pour objectif de caractériser objectivement le fonctionnement des modèles en conditions actuelles et d'évaluer leur fiabilité. Il fait intervenir une procédure de calage-contrôle sur des périodes indépendantes (Klemeš, 1986) et définit des critères d'évaluation numériques (critères sur les crues, étiages, volumes, saisonnalité, etc.) et graphiques. Ce protocole est détaillé par Hau (2008) et en Annexe 1 (page 116).

Dans ce qui suit, nous présentons tout d'abord la façon dont sont prises en compte les influences neigeuses dans les modèles. Nous comparons ensuite les performances des deux modèles pour simuler les débits naturels sur les bassins (débits issus de la renaturalisation des débits observés détaillée dans la partie précédente). Nous présentons ensuite les méthodes de modélisation des usages développées ici.

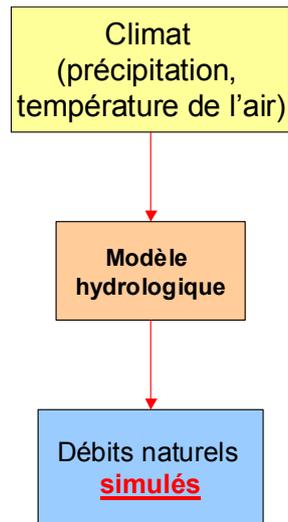


Figure 18 : Schéma de fonctionnement des modèles hydrologiques

MODELISATION DE LA NEIGE

La neige est un facteur important pour les bassins de montagne. Son expansion ou sa réduction modifie profondément les processus de genèse des écoulements (forme des crues, saisonnalité). Nous nous sommes intéressés à cette composante du cycle hydrologique pour interpréter les évolutions des régimes hydrologiques.

Modélisation de la neige dans le modèle CEQUEAU

Le modèle CEQUEAU est un modèle distribué déterministe et conceptuel. De ce fait, il permet de tenir compte explicitement de l'information spatialisée en provenance de SAFRAN et des effets du relief sur l'hydrologie et de suivre l'évolution du manteau neigeux sur les différentes tranches d'altitude, selon les conditions météorologiques en cours.

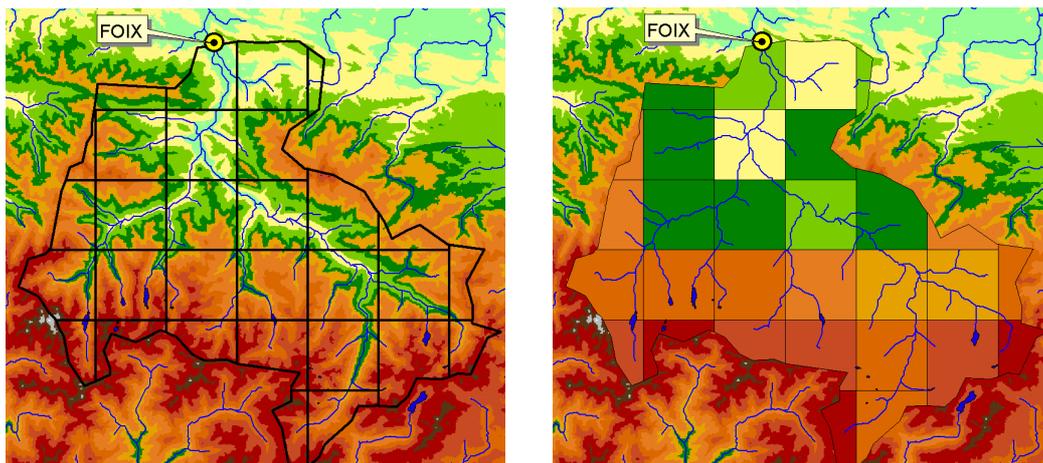


Figure 19 : Maillage du modèle CEQUEAU sur l'Ariège à Foix

(à gauche relief réel ; à droite relief vu par SAFRAN et par le modèle hydrologique)

Dans CEQUEAU, chaque maille contient un stock de neige dont le suivi est modélisé par réservoir conceptuel. L'information nécessaire en entrée du module neige est constituée par des séries météorologiques, à savoir la série de précipitation journalière et la série de température de

l'air journalière. Les équations de base du calcul de la fonte de neige sont extraites du rapport “*Snow Hydrology*” (U.S. Army. Corps of Engineers, 1956) et sont globalement très proches d'une modélisation type « degrés jour ». Ainsi, le module neige est défini par cinq paramètres qui qualifient :

- le seuil de température pour la transformation pluie / neige ;
- le seuil de température de fonte du manteau neigeux ;
- le taux potentiel de fonte par jour ;
- le seuil de température de mûrissement ;
- le coefficient de déficit calorifique.

Les données d'observation de neige sont rares, et quand elles sont disponibles ne permettent pas de construire une bonne vision spatialisée du stock de neige. Aussi, le calage de ces paramètres se fait habituellement en considérant l'optimisation des paramètres sur le critère de Nash appliqué au débit (cf. « Tests des modèles hydrologiques », page 49). Nous n'avons pas, non plus, cherché à valider en s'appuyant sur les données de SAFRAN (ces dernières sont le résultat d'un modèle également). Finalement, le manteau neigeux est le résultat intermédiaire du calcul des débits, cohérent avec ces derniers.

Modélisation de la neige dans le modèle GR4J

Dans le modèle GR4J, nous avons adopté le module neige développé par Valéry (2010, thèse en cours). Comme le module neige de CEQUEAU décrit précédemment, ce module est basé sur une approche de type « degré-jour » et la modélisation d'un stock représentant le couvert neigeux. Il utilise la température de l'air comme entrée. La distinction entre précipitations solides et liquides se fait en fonction d'une température seuil fixée à 0°C. Ce seuil est également utilisé pour la fonte du manteau, qui est calculée par une approche degré-jour et dépend d'un paramètre optimisable (coefficient de fonte). Le mûrissement du manteau est pris en compte via un indice thermique, dont l'évolution dépend également d'un coefficient optimisable. Ce module simple dépend donc seulement de deux paramètres libres, qui sont ajustés en même temps que les paramètres du modèle hydrologique. Pour tenir compte des variations altitudinales, le bassin est découpé en cinq zones d'altitude sur la base de la courbe hypsométrique du bassin. Sur chacune de ces zones, un stock de neige permet de représenter l'évolution du manteau sur la tranche d'altitude considérée.

Exemple d'application avec le modèle CEQUEAU

Nous considérons ici quatre mailles du modèle CEQUEAU sur le bassin de Foix pour quatre altitudes différentes : 2000 m, 1600 m, 1250 m et 1100 m (Figure 20). Les quatre mailles ont été choisies au sein d'une même vallée de manière à pouvoir visualiser les effets de l'altitude plus que les effets de microclimats locaux entre les différentes vallées.

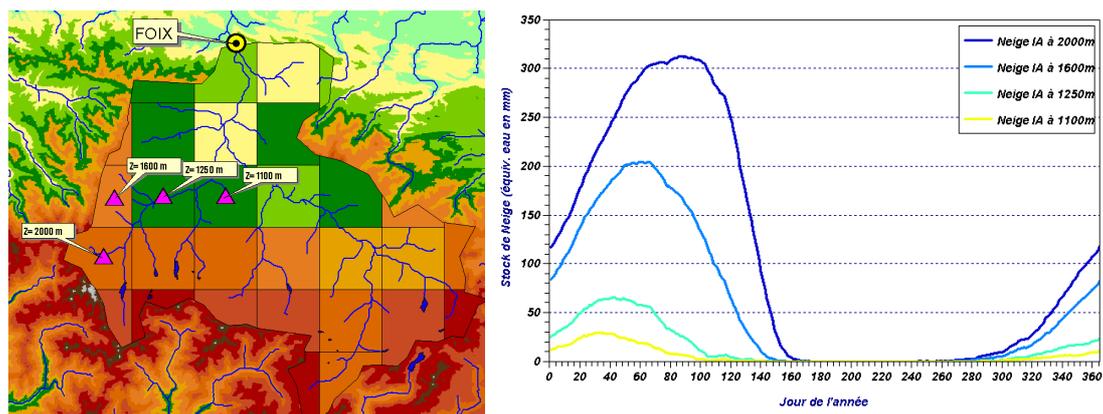


Figure 20 : Stock de neige interannuel simulé pour quatre mailles du modèle CEQUEAU sur le bassin de l'Ariège à Foix

En climat présent, nous pouvons vérifier que le modèle traduit bien de manière différenciée le stock de neige en fonction de l'altitude. Un stockage important se réalise en interannuel sur les mailles les plus hautes. Cette forte accumulation traduit à la fois le caractère plus froid de la météorologie pour ces altitudes mais aussi des quantités précipitées supérieures à celles de la plaine. L'accumulation maximale de neige vue par le modèle diminue très rapidement avec l'altitude puisque à 1600 m, il est déjà réduit du tiers par rapport à 2000 m en moyenne interannuelle. A 1250 m, il est réduit d'un facteur presque quatre par rapport à l'altitude 2000 m. Ces constats permettent de bien voir le rôle joué par les zones d'altitude dans la détermination du régime hydrologique au travers de la fonte de la neige.

TESTS DES MODELES HYDROLOGIQUES

Conditions de test

Dans cette partie, nous présentons une synthèse des résultats des deux modèles hydrologiques CEQUEAU et GR4J appliqués aux neuf bassins versants étudiés ici. Nous utilisons les débits naturalisés comme référence. Ils seront donc considérés comme les "observés" dans les critères d'évaluation présentés ci-dessous.

Pour ces tests, les deux modèles ont été alimentés avec les données pluviométriques et de température SAFRAN. Les données sont distribuées pour le modèle CEQUEAU (en suivant la grille SAFRAN), moyennées à l'échelle du bassin pour le modèle GR4J (malgré le découpage en bandes d'altitudes, des entrées moyennes à l'échelle du bassin ont été considérées ici). Les entrées d'ETP (Evapotranspiration Potentielle) utilisées par les deux modèles sont légèrement différentes : le modèle CEQUEAU a été alimenté avec des données d'ETP calculées par la formule de Thornthwaite et ajustée en cumul sur les valeurs de la formule d'Oudin et al. (2005), tandis que le modèle GR4J a été alimenté directement par les valeurs d'ETP issues de la formule d'Oudin et al. (2005). Ces données d'ETP, grâce à l'ajustement des cumuls sur une même formule, sont donc suffisamment proches pour considérer que les deux modèles fonctionnent avec des entrées quasi-identiques en climat présent.

Dans le cadre de ce projet, il n'a pas été possible d'appliquer au modèle CEQUEAU une procédure de test en calage-contrôle sur l'ensemble des bassins. Nous avons donc réalisé une comparaison des performances des modèles CEQUEAU et GR4J sur les résultats obtenus en phase de calage. Nous illustrons ensuite les évolutions de performance que l'on peut attendre de la modélisation lorsque l'on passe du calage au contrôle.

Critères d'évaluation

Nous avons utilisé pour cette analyse une série de huit critères numériques, dont la définition est fournie en Annexe 1. Ces critères sont les suivants :

- (1) critère de Nash-Sutcliffe (NSQ) ;
- (2) critère de Nash-Sutcliffe calculé sur les logarithmes des débits (NSLQ) ;
- (3) critère de Nash sur les débits mensuels moyens sur la période (NSM) ;
- (4) critère de bilan (B) ;
- (5) rapport des volumes d'étiage (BE) ;
- (6) rapport du nombre de jour d'étiages (NE) ;
- (7) rapport des volumes en crue (BC) ;
- (8) rapport des crues annuelles (RCA).

Les quatre premiers critères peuvent être qualifiés de critères "globaux" dans le sens où ils tiennent compte des erreurs du modèle sur toute la période. Les critères (5) et (6) sont, eux, relatifs aux périodes d'étiages, et les critères (7) et (8) aux périodes de crues. Le calcul de ces critères a été fait relativement à des seuils sur les débits observés correspondant respectivement aux quantiles 10 % et 90 % des débits classés sur la période. On s'intéresse donc à la restitution des 10 % des débits les plus faibles et aux 10 % les plus forts.

Comparaison des modèles en calage

Le Tableau 5 présente les valeurs des huit critères obtenus par CEQUEAU et GR4J. Ces tests correspondent à des calages réalisés sur les données disponibles. En moyenne sur les neuf bassins, le modèle CEQUEAU est meilleur que le modèle GR4J, quel que soit le critère utilisé. Les différences de performance moyenne sont significatives, même si elles sont moins marquées sur les critères globaux que sur les critères calculés sur crue et étiage. Ceci tendrait à indiquer que l'avantage du modèle CEQUEAU sur le modèle GR4J tient en partie d'une meilleure modélisation des conditions extrêmes. Le modèle GR4J tend à sous-estimer les volumes ou pointes de crues (critères BC et RCA) davantage que CEQUEAU. Cela peut en partie venir du fait que le modèle CEQUEAU a été optimisé sur une fonction objectif (NSQ) donnant plus d'importance aux crues que la fonction objectif utilisée pour l'optimisation de GR4J (Nash sur les racines des débits).

L'avantage de CEQUEAU par rapport à GR4J n'est cependant pas systématique : sur les stations de Roquefort et Lavaur par exemple, le modèle GR4J semble plus fiable que CEQUEAU. Notons enfin que le modèle GR4J obtient des performances peu satisfaisantes sur la station de Valentine.

Lorsqu'on analyse ces performances par zones, on constate que les deux modèles font jeu égal en moyenne sur la partie Tarn–Aveyron (Millau, Lavaur, Villemur, Loubéjac) mais que les différences sont plus marquées sur la partie pyrénéenne du bassin à l'avantage de CEQUEAU.

Code	Station	Période		Modèle	NSQ	NSLQ	NSM	B	BE	NE	BC	RCA
O0592510	Roquefort	1988	2006	CEQUEAU	0.779	0.825	0.848	0.992	0.211	0.188	0.961	1.179
				GR4J	0.829	0.859	0.970	0.970	0.912	1.013	0.776	0.814
O1252510	Foix	1990	2004	CEQUEAU	0.790	0.818	0.980	1.010	0.511	0.471	0.962	0.865
				GR4J	0.745	0.804	0.952	0.964	0.644	0.646	0.745	0.875
O0200030	Valentine	1987	2004	CEQUEAU	0.792	0.771	0.956	1.032	0.860	0.826	1.050	0.942
				GR4J	0.639	0.595	0.661	0.791	1.955	2.094	0.339	0.652
O1900010	Portet	1990	2004	CEQUEAU	0.867	0.889	0.982	1.008	1.038	1.014	0.983	0.827
				GR4J	0.835	0.861	0.980	0.981	0.917	0.973	0.866	0.776
O3401010	Millau	1988	2005	CEQUEAU	0.928	0.921	0.954	1.018	0.900	0.964	1.033	0.973
				GR4J	0.910	0.894	0.977	0.981	1.314	1.709	0.935	0.795
O4692550	Lavaur	1972	2001	CEQUEAU	0.839	0.861	0.984	0.963	1.165	1.263	1.037	1.030
				GR4J	0.873	0.916	0.996	0.980	1.168	1.008	0.926	0.861
O4931010	Villemur	1972	2000	CEQUEAU	0.902	0.923	0.968	0.954	1.111	1.058	0.905	0.837
				GR4J	0.884	0.884	0.995	0.987	1.395	1.666	0.913	0.750
O5882510	Loubéjac	1985	2005	CEQUEAU	0.914	0.841	0.995	1.014	0.000	0.000	1.032	0.953
				GR4J	0.906	0.915	0.989	0.976	1.443	1.546	0.912	0.758
O6140010	Lamagistère	1990	2000	CEQUEAU	0.922	0.944	0.957	0.939	1.007	0.940	0.774	0.816
				GR4J	0.886	0.901	0.963	0.984	1.141	1.268	0.919	0.738
Moyenne ^(*) sur partie pyrénéenne (Roquefort, Foix, Valentine, Portet)				CEQUEAU	0.807	0.826	0.942	0.986	0.636	0.618	0.964	0.864
				GR4J	0.762	0.780	0.891	0.927	0.630	0.628	0.682	0.779
Moyenne ^(*) sur partie Tarn-Aveyron (Millau, Lavaur, Villemur, Loubéjac)				CEQUEAU	0.896	0.887	0.975	0.971	0.656	0.661	0.951	0.933
				GR4J	0.893	0.902	0.989	0.981	0.670	0.518	0.922	0.791
Moyenne ^(*) sur les 9 bassins				CEQUEAU	0.859	0.866	0.958	0.974	0.685	0.673	0.937	0.889
				GR4J	0.834	0.848	0.943	0.957	0.673	0.591	0.815	0.780

Tableau 5 : Comparaison des critères de performance obtenus avec les modèles CEQUEAU et GR4J sur les 9 bassins d'étude. Résultats en phase de calage sur l'intégralité de la période où l'on dispose de débits naturalisés (*): pour les critères B à RCA, la moyenne a été faite sur une transformée des critères, pour éviter des compensations entre critères supérieurs et inférieurs à 1; la transformée est donnée par : $1 - \text{abs}(1 - cr)$, où cr est le critère initial et $\text{abs}(\cdot)$ désigne la valeur absolue

Interprétation de la comparaison des performances en calage

L'avantage comparatif de CEQUEAU sur GR4J en phase de calage peut avoir plusieurs origines :

- le plus grand nombre de degrés de liberté de CEQUEAU, qui représente en phase de calage un avantage : bien que les paramètres de CEQUEAU ne soient ici pas optimisés par maille, le modèle comporte davantage de paramètres que le modèle GR4J ;
- une meilleure adéquation de la structure du modèle : à l'échelle de la maille, la structure du modèle CEQUEAU s'apparente à un modèle à réservoir. CEQUEAU intègre en plus des fonctions de transfert, créant ainsi une architecture plus détaillée que celle de GR4J, ce qui peut donner au modèle plus de souplesse pour s'adapter aux conditions du bassin ;
- l'utilisation par CEQUEAU d'un schéma de modélisation distribué, que ce soit au niveau du modèle ou au niveau de l'utilisation d'entrées distribuées, alors que GR4J est global et n'utilise que des moyennes de bassin. Etant donnée la variabilité des conditions sur le bassin (notamment sur la partie pyrénéenne), cela pourrait contribuer à de meilleurs résultats de CEQUEAU ;
- l'utilisation d'un schéma d'optimisation plus adapté pour CEQUEAU : le choix de la fonction objectif, différente entre les deux modèles, pourrait expliquer une partie des résultats.

Il n'est cependant pas possible, sans analyse de sensibilité complémentaire, d'identifier le (ou les) facteur(s) prépondérant(s). Cela sort du cadre de cette étude.

Illustration sur le bassin de la Garonne à Lamagistère

A côté des critères numériques précédents, un certain nombre d'illustrations graphiques ont été réalisées. Nous en donnons un exemple sur la Figure 21 pour le bassin de la Garonne à Lamagistère pour les deux modèles. Il s'agit de :

- (a) la comparaison des débits observés et simulés ;
- (b) la comparaison des courbes de régime observée et simulée ;
- (c) la comparaison des courbes de débits classés observée et simulée.

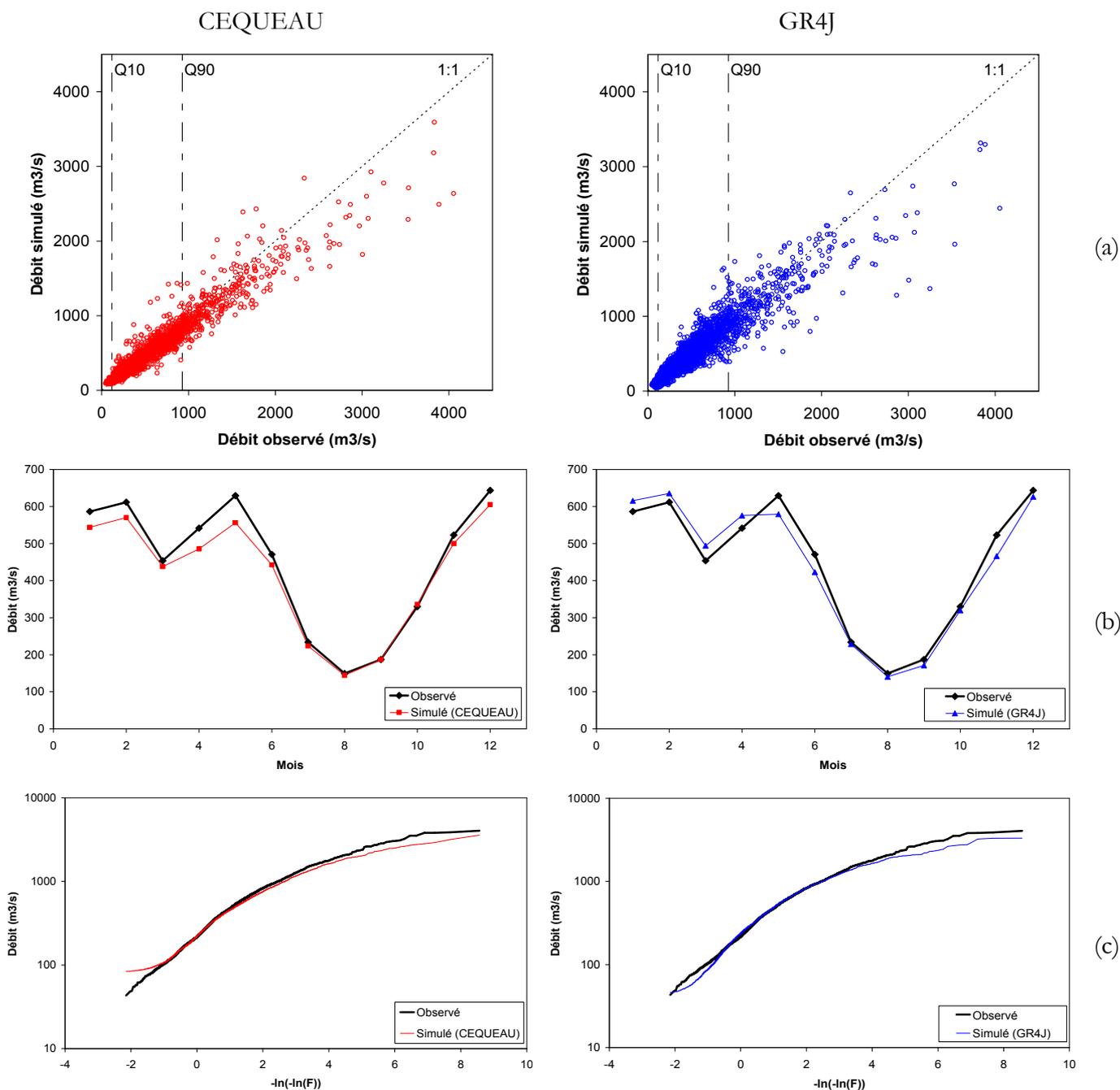


Figure 21 : Illustration des résultats de simulation obtenus en calage avec les modèles CEQUEAU et GR4J sur le bassin de la Garonne à Lamagistère : (a) comparaison des débits observés et simulés, (b) comparaison des courbes de régime observée et simulée, (c) comparaison des courbes de débits classés observée et simulée. Le débit "observé" correspond au débit naturalisé

On retrouve sur ces graphiques une illustration de la signification des critères calculés précédemment :

- les critères NSQ et NSLQ sont meilleurs pour le modèle CEQUEAU, ce qu'on retrouve sur le graphe (a) avec une moindre dispersion du nuage de points pour ce modèle, que ce soit en hautes eaux ou en basses eaux ;
- le critère NSM est très proche pour les deux modèles, ce que l'on voit sur le graphe (b) où les courbes de régimes simulées semblent globalement à peu près de même qualité. On constate cependant une tendance plus marquée à la sous-estimation des débits mensuels de la part du modèle CEQUEAU, que l'on retrouve dans le critère de bilan B ;
- la tendance de GR4J à surestimer les étiages (en durée et volume, critères BE et NE) peut être observée sur la partie basse de la courbe des graphes (b) et (c) ;
- la tendance à sous-estimer les principaux pics de crue par les deux modèles (critère RCA) peut être observée sur les graphes (a) et (c), le graphe (a) montrant que le modèle GR4J semble meilleur pour la restitution des volumes en crue (critère BC).

Test en calage-contrôle

La comparaison des performances des modèles en phase de calage telle qu'elle a été réalisée précédemment ne donne qu'une vision partielle des performances relatives des modèles. En effet, en phase de calage, les paramètres libres laissent la possibilité au modèle de s'adapter aux conditions de la période de calage, possibilité qu'il n'a plus ensuite en phase de contrôle (validation) où le modèle est utilisé avec les paramètres précédemment calés. Cela induit généralement en phase de contrôle une perte de performance, qui peut varier suivant les modèles. Dans cette étude, les modèles étant appliqués hors calage pour réaliser les simulations, il est intéressant de quantifier les ordres de grandeur des erreurs que l'on peut attendre dans ce mode de fonctionnement. Cela est d'autant plus vrai que les simulations avec des scénarios de changement climatique vont être réalisées dans des conditions non rencontrées jusqu'à présent. Il faut donc évaluer les capacités des modèles en dehors des conditions rencontrées en calage.

Nous n'avons pas pu réaliser une comparaison systématique des performances des deux modèles en phase de contrôle, en raison de schémas de test légèrement différents. Nous montrons donc ici des résultats obtenus indépendamment sur CEQUEAU et GR4J, qui permettent cependant de donner des ordres de grandeurs sur les évolutions possibles des performances entre calage et contrôle.

Le Tableau 6 donne les performances moyennes obtenues par GR4J sur les neuf bassins d'étude. La baisse de performance entre calage et contrôle est significative, mais correspond aux évolutions de performance généralement constatées avec ce modèle lorsqu'il est testé sur un grand nombre de bassins. Le critère BE indique cependant que l'erreur relative moyenne sur les volumes d'étiage est de l'ordre de 35 % en phase de validation.

	NSQ	NSLQ	NSM	B	BE	NE	BC	RCA
Calage	0.861	0.876	0.976	0.981	0.737	0.636	0.881	0.810
Contrôle	0.843	0.858	0.945	0.935	0.657	0.537	0.829	0.814

Tableau 6 : Performances moyennes obtenues sur les neuf bassins d'étude en calage-contrôle par le modèle GR4J

Le Tableau 7 présente les performances moyennes obtenues sur trois bassins (stations de Millau, Roquefort et Foix) par le modèle CEQUEAU. Ces résultats sont issus des tests préparatoires réalisés par Agosta (2008). Seuls deux critères ont été calculés. Comme pour GR4J, on constate pour ces deux critères une baisse de performance entre calage et contrôle. Cette baisse est

cependant très faible sur le critère NSLQ, indiquant une bonne robustesse du modèle sur les périodes de faible débit.

	NSQ	NSLQ
Calage	0.856	0.897
Contrôle	0.830	0.891

Tableau 7 : Performances moyennes obtenues sur les stations de Millau, Roquefort et Foix en calage-contrôle par le modèle CEQUEAU (d'après Agosta, 2008)

Ces résultats indiquent que les performances sont, pour les deux modèles, globalement un peu moins bonnes en phase de validation qu'en phase de calage, ce qui était un résultat attendu. La baisse de performance correspond à ce qui est généralement constaté avec ce type de modèle. Même si les tests présentés ici ne sont pas directement comparables, ils semblent indiquer que la baisse de performance est du même ordre de grandeur pour les deux modèles. La hiérarchie qui s'est dessinée en phase de calage, avec de meilleures performances de CEQUEAU, semble donc se confirmer en phase de contrôle.

MODELISATION DES USAGES

Les modèles de pression sont une représentation de premier ordre des pressions des actions humaines. Ces modèles seront validés sur le passé avant d'être exploités pour simuler le régime hydrologique des bassins sous climat futur. Nous les avons conçus pour qu'ils soient applicables dans le futur. Les données d'entrée seront le climat et la ressource naturelle.

Hydroélectricité

Approche développée

Pour les besoins de ce projet, un module de gestion simplifiée de l'hydroélectricité, a été développé spécifiquement pour modéliser l'influence des aménagements sur le régime naturel (Dupeyrat *et al.*, 2008). Il vise à reproduire grossièrement la stratégie de l'hydroélectricien recherchant à valoriser au mieux sa réserve hydraulique vis-à-vis des besoins en électricité et de son espérance d'apport futur d'eau. Naturellement plus complexes et notamment complétés de dimensions économiques et financières liées au fonctionnement des marchés de l'énergie, les outils opérationnels utilisés dans la gestion de la production s'appuient sur des approches mathématiques similaires, ce qui rend le module utilisé assez réaliste pour l'exercice recherché.

Le module cherche à résoudre la question : « ai-je plus d'intérêt à turbiner l'eau aujourd'hui ou à la réserver pour une utilisation ultérieure ? ». La réponse est, bien entendu, dépendante de l'expression des besoins immédiats, de l'anticipation des besoins à venir, des apports futurs dans la retenue et d'autres contraintes de gestion (ex. débit réservé à maintenir). La question peut être résolue en s'appuyant sur les bases théoriques de la programmation dynamique (Bellman, 1957).

L'élaboration de la stratégie se traduit en programmation dynamique par la constitution de la matrice des valeurs de Bellman (VB) telle que :

$$VB(t, V_{stock}) = \max_{V_{turb}} (VIT(t) V_{turb} + VB(T+1, V_{stock} - V_{turb} + V_{entrant}))$$

avec V_{stock} , volume dans la retenue ; VIT , vecteur d'intérêt à turbiner ; V_{turb} , volume journalier turbiné ; $V_{entrant}$, volume journalier entrant dans la retenue

La valeur de Bellman traduit l'utilité économique à l'instant t d'une réserve de volume V_{stock} et pour l'horizon de temps final que l'on se fixe. Les valeurs d'usage sont alors définies comme les dérivées par rapport à l'état des valeurs de Bellman. Elles traduisent l'intérêt à faire croître le stock et par-là même l'intérêt à garder l'eau pour plus tard.

La Figure 22 présente de manière synthétique les différents aspects de cette modélisation.

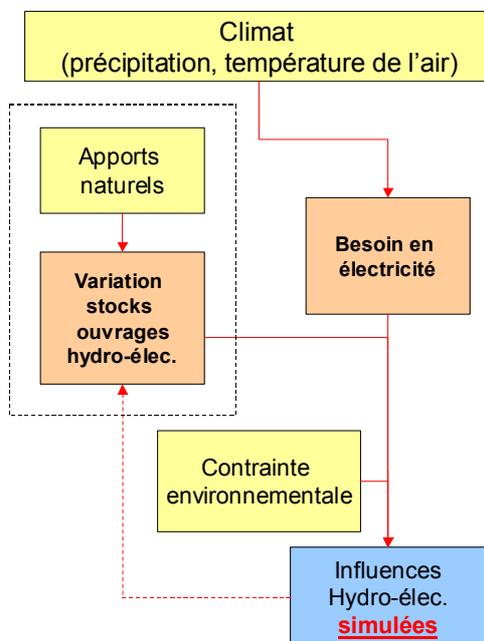


Figure 22 : Schéma de fonctionnement du module d'hydroélectricité (en pointillé les éléments connectés à l'hydrologie)

Application

L'application présentée concerne le bassin de l'Ariège à Foix. Nous avons de plus tenu compte d'une contrainte de respect d'un débit environnemental en aval. Dans notre cas, l'analyse des écarts entre débits naturalisés et débits observés montre que le vecteur VIT dépend de la température moyenne de l'air en France. Ce vecteur rend compte de la sensibilité de la consommation électrique dont entre autres le chauffage (consommation d'autant plus grande que la température est sous les 15°C) et par conséquent de l'intérêt à placer dans ces moments de pointe, l'énergie hydraulique. Ainsi établi, nous avons vérifié le réalisme des débits issus de l'assemblage (CEQUEAU ou GR4J et module de gestion) (Figure 23).

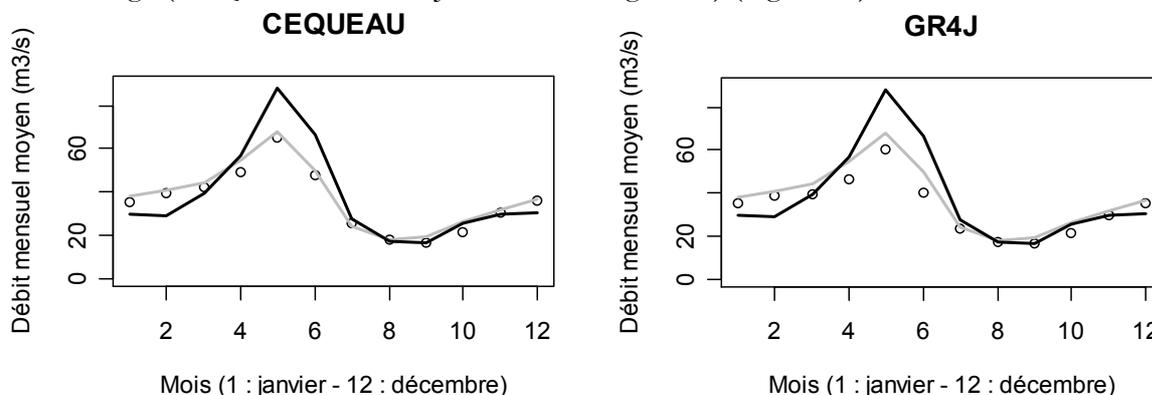


Figure 23 : Débits observés influencés sur la période 1990-2004 (—), débits naturels reconstitués (---) et débits obtenus avec le module de pression (O) couplé avec les modèles hydrologiques sous climat présent

Irrigation

Approches développées

Deux représentations de l'irrigation s'appuyant sur les besoins en eau ont été mises en œuvre. La première établit des passerelles avec la modélisation hydrologique. La seconde raisonne à la parcelle et est donc plus autonome.

La première, basée sur la « philosophie » du modèle hydrologique CEQUEAU, a servi pour la naturalisation des débits (cf. « Correction de l'irrigation », page 41). L'étalonnage d'une hauteur cible permet de caler directement le modèle afin d'obtenir les prélèvements mesurés pour l'usage irrigation dans les différents sous bassin.

La seconde est un modèle agronomique classique. Il estime le besoin en eau d'irrigation des cultures en fonction des données climatiques (pluie, température), de la texture des sols et de la nature de la culture (maïs dans le cadre de cette étude). L'ajustement d'un coefficient cultural permet de caler le modèle afin d'obtenir les prélèvements mesurés. Ce coefficient, qui est le rapport entre le prélèvement mesuré et le besoin en eau de la culture, intègre le comportement des agriculteurs, le niveau des équipements d'irrigation et les restrictions d'eau éventuelles.

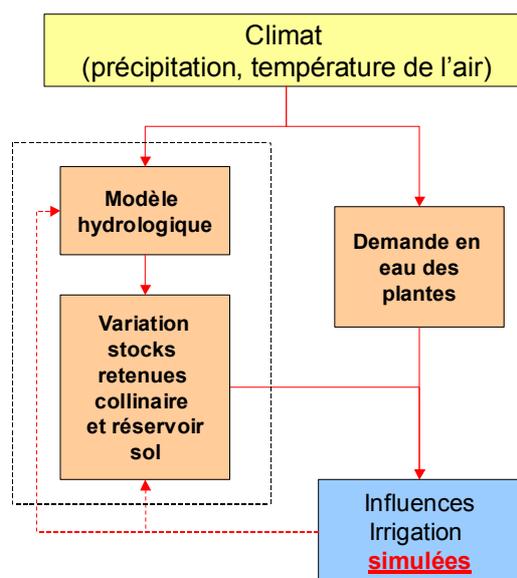


Figure 24 : Schéma de fonctionnement du module d'irrigation (en pointillé les éléments connectés à l'hydrologie)

Méthode 1 : Représentation de l'irrigation à partir du schéma de surface de CEQUEAU

Le premier module d'irrigation s'appuie sur un bilan en eau au niveau d'un réservoir sol conceptuel, avec en données d'entrée la pluie et la température d'air, couplé avec un des deux modèles hydrologiques. Ce réservoir conceptuel correspond au réservoir sol du modèle hydrologique CEQUEAU, il permet d'obtenir une hauteur d'eau dans le sol ($HSol$). Nous avons considéré que l'agriculteur déclenche l'irrigation dès que $HSol$ est inférieur à une valeur seuil $HCible$ en dessous de laquelle la plante est en stress hydrique. Son objectif est de combler le déficit hydrique à hauteur de $HCible$, dans la limite des capacités techniques, fixée à 5 mm par jour (Deumier *et al.*, 2006).

Plusieurs paramètres sont à définir. La principale inconnue est la hauteur cible d'irrigation $HCible$. Le second paramètre est le coefficient cultural Kc (qui dépend de la plante et de la période de l'année). Kc corrige la valeur de l'ETP et intervient dans le calcul de l'évapotranspiration réelle ETR . La plante fonctionne en suivant une ETR dépendant de la réserve en eau du sol selon la formule suivante :

$$ETR(t) = \min\left(ETM(t); ETM(t)\left(\frac{H_{sol}(t)}{H_{Seuil}}\right)\right) H_{Seuil}$$

avec $ETM = Kc \times ETP$. Cette valeur d' ETR remplace la valeur calculée par le modèle sur la maille présentant des cultures pendant la période d'irrigation.

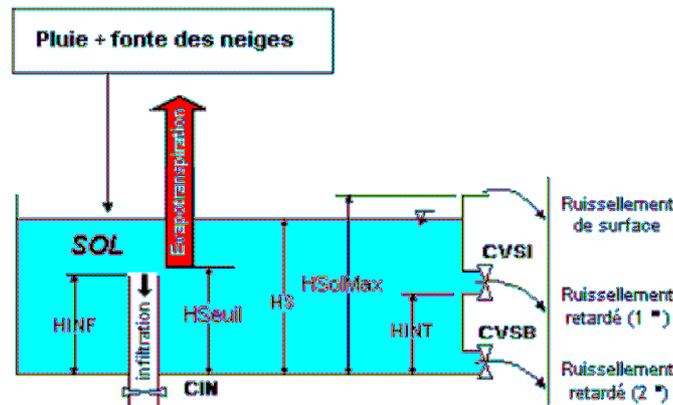


Figure 25 : Réservoir sol de CEQUEAU avec $HSolMax$: hauteur maximale (en mm) du réservoir sol, $HInf$: hauteur (en mm) du sol qui participe à l'infiltration de l'eau vers les couches plus profondes, $HInt$: hauteur (en mm) qui sépare le sol en deux compartiments répondant à deux dynamiques différentes, $HSeuil$: seuil (en mm) d'évapotranspiration du réservoir : si $HSol > Hseuil$, l'ET sera maximale, alors que dans le cas contraire, $ET = ETR$.

L'optimisation des paramètres s'appuie sur les données annuelles de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne. Les paramètres sont optimisés de telle sorte que les volumes annuels d'irrigation ainsi calculés soient comparables aux données de prélèvements annuels. Nous avons été amenés à nuancer les données selon l'année. En effet, elles n'ont pas la même représentativité selon leur mode de mesure (mesure à l'aide d'un compteur ou par forfait). Le décompte au forfait ne tient pas compte des prélèvements réels qui dépendent des conditions climatiques de chaque année. Les deux types de mesures ont perduré sur toute la période 1998-2006. A partir de 2002, la mesure au compteur, plus fiable, devient dominante ; de ce fait, un plus grand poids a été donné aux années post 2002 pour le calage des modèles.

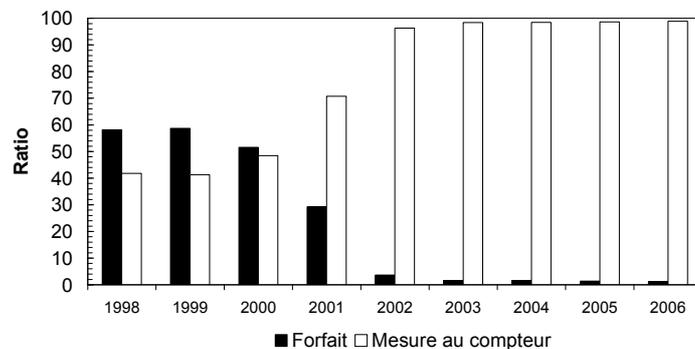


Figure 26 : Evolution du ratio forfait/mesure pour le Tarn à Villemur

Différentes hypothèses simplificatrices ont été considérées :

1. l'ensemble des cultures irriguées présentes sur la région considérée est du maïs ;
2. les restrictions de prélèvements dues aux arrêtés préfectoraux sont négligées ;
3. quelle que soit la méthode, K_c et ses composantes dépendent de la formulation utilisée pour calculer l' ETP . Les coefficients culturaux déterminés d'après une table de valeur à partir d'une somme de température de base 6°C (Le Bas *et al.*, 2006) (méthode Cycle Variable). Sachant que les coefficients culturaux sont établis de façon à correspondre à l' ETP de Penman, les valeurs ont été retabulées de façon à correspondre aux évapotranspirations de référence définies par Thornthwaite ou Oudin.

Depuis 30 ans, les superficies irriguées ont fortement augmenté sur le bassin Adour Garonne (source RGA-Agreste). Nous avons intégré cette évolution en faisant l'hypothèse que l'évolution des surfaces irriguées sur tous les bassins est identique à celle observée sur le bassin Adour-Garonne (Figure 27 pour le bassin intermédiaire entre la station du Tarn à Villemur et les deux stations amont du Tarn à Millau et de l'Agout à Lavaur).

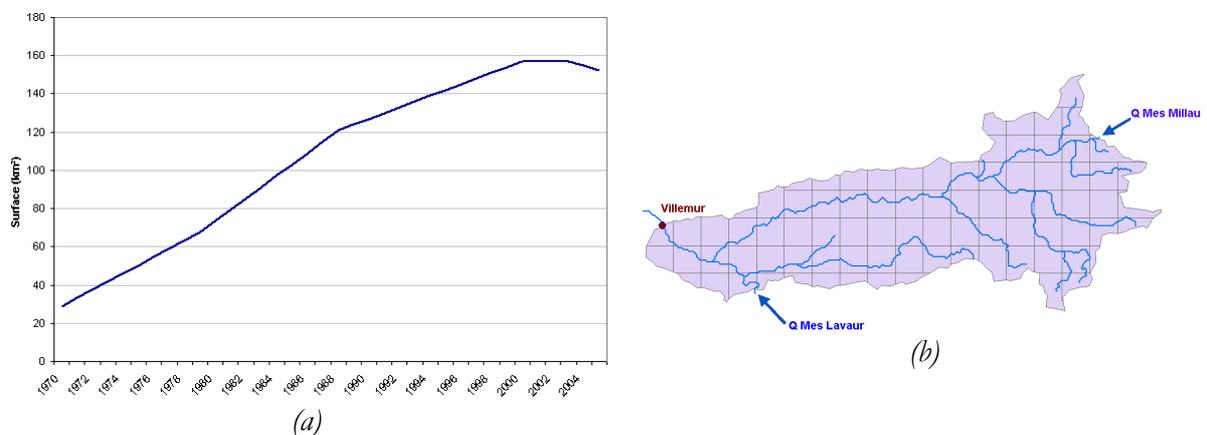


Figure 27 : Evolution des superficies irriguées (a) sur le bassin versant intermédiaire du Tarn à Villemur (décrit schématiquement en (b))

Labedade (2008) a testé deux estimations pour le coefficient cultural K_c propre au maïs. Il est de fait variable selon le stade de développement de la plante et peut être apprécié selon les températures des jours antérieurs (méthode Cycle Variable) ou le mois de l'année (méthode Cycle Fixe). Finalement, les choix retenus sont :

- la valeur de HS_{enil} , en accord avec la bibliographie (Deumier *et al.*, 2006) est fixée à 90 mm ; le calage du modèle se fait en modulant le paramètre HC_{ible} ;
- l'évapotranspiration est calculée d'après la formule de Thornthwaite par le modèle CEQUEAU et calée sur la formulation de Oudin (2004).

Les modèles sont calés sur des portions intermédiaires entre stations pour mieux localiser les prélèvements.

Les résultats sont présentés pour le bassin intermédiaire du Tarn à Villemur. La validation s'opère à l'échelle annuelle. La cible d'irrigation HC_{ible} a été ajustée à 70 mm, soit 78% des 90 mm de HS_{enil} . La méthode Cycle variable a été retenue finalement (plus adaptée à une prise en compte d'une dérive du climat et du cycle végétal dans l'année).

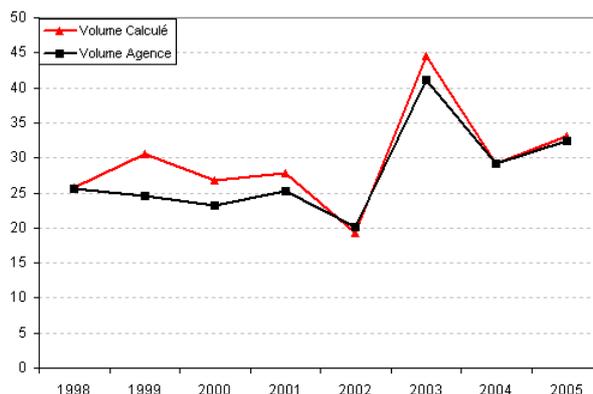


Figure 28 : Résultat du calage des volumes prélevés (en Mm3) sur le bassin intermédiaire du Tarn à Villemur

Par la suite, les paramètres gérant la répartition de l'irrigation au cours de l'année – Q_{Seuil} et Q_{Max} - doivent être calés (cf. « Correction de l'irrigation », page 41). Q_{Seuil} correspond au débit seuil à partir duquel les réservoirs collinaires commencent à être remplis et Q_{Max} est le débit maximum auquel peut se faire ce remplissage. Le débit seuil est déterminé après une analyse entre débit calculé et débit mesuré. Une influence apparaît les mois d'hiver lorsque le débit est de l'ordre de 150 m³/s. Par la suite, le débit seuil et le débit maximal sont modifiés de telle sorte que le stock dans le réservoir collinaire ne devienne pas négatif pour certaines années.

La représentation de l'irrigation est satisfaisante. Le modèle parvient à s'ajuster aux données de prélèvements de l'Agence de l'Eau. En particulier, il faut noter la sensibilité à l'année exceptionnelle 2003.

Méthode 2 : Représentation du besoin en eau à partir des approches agronomiques

Pour cette étude, un modèle classique de bilan hydrique à un horizon a été développé. Ce modèle permet d'estimer, au pas de temps journalier, le besoin en eau d'irrigation des cultures de façon simple et avec des incertitudes raisonnables, pour peu que les valeurs des paramètres d'entrée soient bien choisies. L'objectif est de pouvoir caractériser, au mieux, l'évolution des besoins en eau pour différents scénarios de changement climatique par rapport à une situation de référence qui est celle du climat présent.

Les principales variables intervenant dans le calcul du bilan hydrique sont les caractéristiques climatiques (températures et précipitations) qui conditionnent l'évapotranspiration de référence, la texture moyenne du sol qui détermine la réserve utile du sol ainsi que le rapport entre la réserve facilement utilisable et la réserve utile accessible par la plante.

Les paramètres techniques sont la date de semis des cultures, les dates de fin et de début de la campagne d'irrigation, le coefficient cultural de base du maïs et le coefficient d'évaporation au sol qui interviennent dans le calcul de l'évapotranspiration maximale de la culture bien irriguée et la valeur limite du développement racinaire de la plante.

Le modèle résout donc l'équation de bilan au pas de temps journalier. Cette équation est la base de tous les modèles de bilan hydrique :

$$S(t) = S(t-1) + P(t) + Irr(t) - ETR(t) - D(t)$$

avec :

- S : stock d'eau dans la réserve utile (RU),
- P : précipitations,

- Irr : éventuellement apports par irrigation,
- ETR : évaporation réelle de la culture,
- D : part d'eau perdue par drainage au-delà de la limite exploitable par les racines de la plante.

Les pertes par ruissellement, drainage et remontée capillaire sont négligées.

Le calcul devant être effectué sur un grand nombre d'années, il est important de bien considérer l'ensemble du cycle cultural. Les principales hypothèses de travail entrant dans le bilan hydrique sont développées ci-dessous.

- l'évapotranspiration de référence ET_{ref} est calculée par le modèle CEQUEAU à partir de la formulation empirique de Thornthwaite ;
- l'évapotranspiration maximale de la culture ETM est estimée à partir de l' ET_{ref} au moyen de la formule :

$$ETM = Kc \times ET_{ref}$$

Kc est le coefficient cultural décomposé ici en deux termes, le terme Kcb coefficient cultural de base représentant la transpiration propre à la plante et le terme Ke , coefficient tenant compte de l'évaporation directe du sol humide non couvert par la végétation après une pluie ou une irrigation :

$$Kc = Kcb + Ke$$

La prise en compte de ce dernier terme est important hors période de culture et en début de culture quand le couvert végétal est faible. Durant ces périodes, le processus d'évaporation du sol est en effet prépondérant sur celui de la transpiration des plantes.

→ Les valeurs du coefficient cultural de base Kcb qui dépendent du stade d'évolution de la plante sont ceux utilisés par le système Osiris. Les valeurs sont données par rapport à l'évolution des degrés jours (somme des températures journalières supérieures à 6°C) depuis la date de semis (Collectif, 2006).

Il est important de préciser que ces valeurs dépendent de la formulation utilisée pour calculer ET_{ref} . Dans Osiris, les valeurs ont été établies sur la base de la formule de Penman. Pour cette étude, les valeurs Kcb d'Osiris ont été adaptées afin de pouvoir être utilisés avec les ET_{ref} calculées par CEQUEAU à partir de la formule de Thornthwaite :

$$Kcb_{Thornthwaite} = Kcb_{Penman} \frac{ET_{ref\ Penman}}{ET_{ref\ Thornwaite}}$$

$ET_{ref\ Penman}$ et $ET_{ref\ Thornwaite}$ sont les évapotranspirations de référence moyennes estimées entre 1971 et 2005 pour chacun des sous bassins.

→ Le coefficient d'évaporation du sol humide Ke , est donné par la formule de Wright (1982) et est fonction du stade de développement de la plante et du dernier jour d'apport en eau :

$$Ke = (1 - Kcb) \times (1 - \sqrt{t / \Delta t}) \times f_{sol}$$

t : nombre de jours écoulés depuis le dernier apport d'eau,

Δt : temps caractéristique du type de sol pour l'évaporation (pour un sol limoneux, Δt est d'environ 5 jours),

f_{sol} : fraction du sol mouillée (pour une irrigation par aspersion $f_{sol} = 1$).

- l'évaporation réelle ETR de la culture est calculée à partir de ETM :

$$ETR = K_s \times ETM$$

K_s est le coefficient de sécheresse ou de stress hydrique. Ce coefficient dépend du stock d'eau disponible dans le sol. Quand celui-ci n'est plus suffisant, le développement de la culture ne peut être optimal, l'activité de transpiration est alors limitée à l'évapotranspiration réelle ETR :

- s'il y a un manque d'eau appelé stress hydrique : $ETR < ETM$ (croissance réduite de la plante) ;
- s'il y a suffisamment d'eau : $K_s = 1$ et $ETR = ETM$ (croissance optimale de la plante).

- dans la plupart des modèles, l'évolution du stock d'eau exploitable par les cultures est gérée en considérant un réservoir dit réserve utile (RU), décomposé en deux parties : une réserve facilement utilisable (RFU) et une réserve de survie ou réserve en eau difficilement exploitable par la culture (RS).

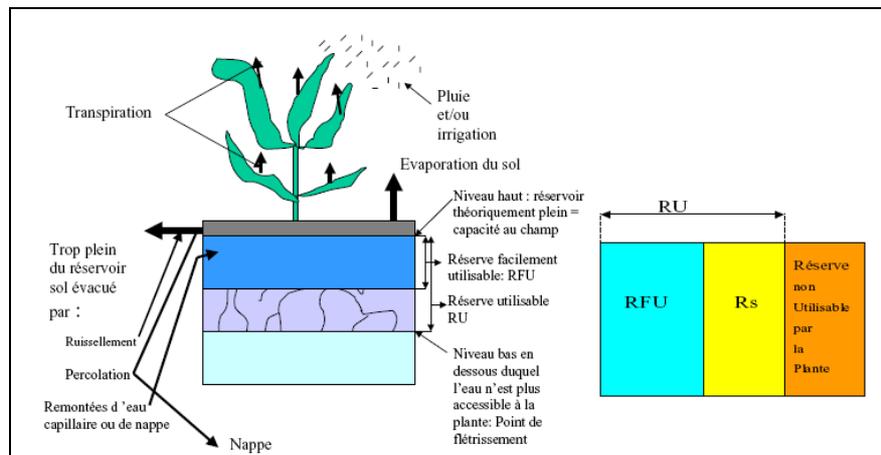


Figure 29 : Schéma de principe du modèle de besoin en eau

La réserve utile, qui représente le volume maximal d'eau dans le sol pouvant être exploité par la plante, est une caractéristique essentielle de l'ensemble sol – culture. Celle-ci dépend de nombreux paramètres notamment des propriétés hydrodynamiques du sol (sa richesse en matières organiques, sa texture (% en argiles et en limon) ainsi que de sa structure) et de la profondeur de la rhizosphère (profondeur à laquelle les racines peuvent aller chercher l'humidité). La réserve utile évolue donc avec le développement racinaire de la plante.

Pour notre étude, nous avons utilisé le triangle de Jamagne et Bétrémieux (Jamagne *et al.*, 1977) qui propose un taux d'humidité du sol (en mm d'eau/cm de profondeur) en fonction de sa teneur en limons, en argiles et en sable (%). Sur le domaine d'étude, le sol est globalement de type limono-argileux, ce qui donne une réserve utile par unité de profondeur d'environ 1.8 (mm/cm). La profondeur typique de la rhizosphère du maïs est comprise entre 50 cm en début de culture et 110 cm lorsque le développement de la plante est à son maximum, ce qui donne un volume du réservoir utile qui augmente avec la croissance racinaire de 90 mm à 198 mm.

Le rapport RFU/RU , réserve en eau dans le sol facilement utilisable par la culture sur réserve utile est un paramètre important du modèle car il détermine le seuil p à partir duquel la plante ne peut plus se développer à l' ETM et subit un stress hydrique. On attribue souvent une valeur de 0.5 à cette fraction.

Toutefois, ce seuil dépend de la capacité physiologique de la plante à absorber l'eau du sol à des potentiels hydriques plus ou moins fort et de l'intensité de la demande évaporatrice. Dans le cadre de cette étude, les valeurs proposées dans le rapport "Sécheresse et agriculture" de l'ESCO (2006, Chapitre : « sécheresse et agriculture : état des lieux et enjeux ») sont utilisées. Ces valeurs sont données en fonction du niveau d'évapotranspiration pour quatre groupes de plantes :

- Groupe 1 : oignon, poivre, pomme de terre ;
- Groupe 2 : banane, chou, vigne, pois, tomate ;
- Groupe 3 : luzerne, haricot, citron, arachide, ananas, tournesol, melon, blé ;
- Groupe 4 : coton, maïs, olivier, sorgho, soja, betterave à sucre, canne à sucre, tabac.

Pour notre cas, des fonctions ont été estimées (courbes de tendance polynomiale d'ordre 2) à partir des valeurs fournies :

- Groupe 1 : $RFU/RU = 0.0063 ETM^2 - 0.1122 ETM + 0.715$ $R^2 = 0.9991$
- Groupe 2 : $RFU/RU = 0.007 ETM^2 - 0.1362 ETM + 0.9162$ $R^2 = 0.996$
- Groupe 3 : $RFU/RU = 0.0077 ETM^2 - 0.1488 ETM + 1.0688$ $R^2 = 0.9955$
- Groupe 4 : $RFU/RU = 0.00595 ETM^2 - 0.13155 ETM + 1.12470$ $R^2 = 0.9963$

En deçà du seuil p , le stock d'eau contenu dans la réserve utile ne permet pas à la plante de prélever la quantité d'eau nécessaire pour être à l' ETM , la plante va puiser dans la réserve de survie et passer à l' ETR . Elle subit un stress hydrique égal au rapport

$$K_s = ETR/ETM$$

Ce rapport décroît linéairement jusqu'à s'annuler avec la quantité d'eau restante dans la réserve de survie.

- enfin en dernière hypothèse, on considère que les apports d'eau de pluie et éventuellement d'irrigation bénéficient en priorité à la RFU . Si la RFU est pleine, le surplus est reversé à la RS .

Les besoins en eau d'irrigation estimés par le modèle pour le sous-bassin étudié et pour la région de la Neste (sous bassin de Lamagistère) ont été confrontés aux séries chronologiques établies par le Cemagref sur la Neste entre 1980 et 2003 et par OSIRIS sur l'ensemble des départements de la région Midi-Pyrénées entre 1993 et 2005 (Teyssier, 2006). Il est précisé que nous n'avons pas cherché à caler le modèle par rapport à ces historiques du fait que ceux-ci ont aussi été obtenus à partir de modèles ayant leurs propres hypothèses. L'intérêt était essentiellement de vérifier si le modèle développé permettait de reproduire des évolutions et des ordres de grandeur de besoin en eau identiques. Ces résultats sont présentés sur la Figure 30 :

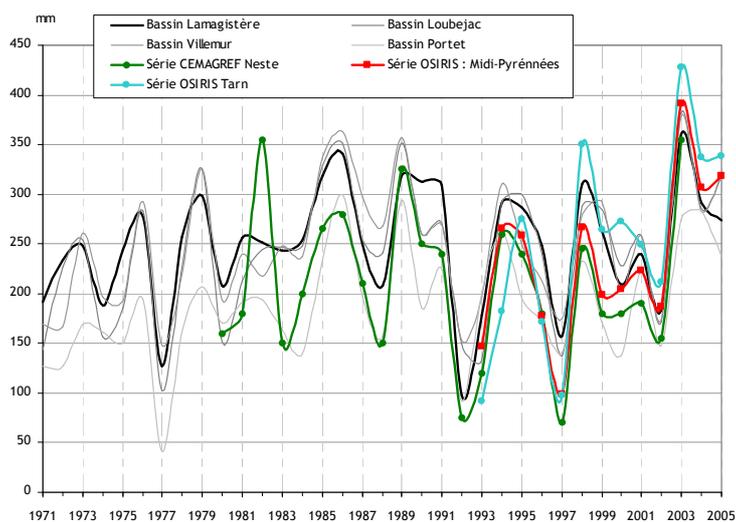


Figure 30 : Résultats du modèle agronomique sur le système Neste et le bassin intermédiaire de Loubejac et comparaison avec les séries chronologiques de Teysier (2006)

La Figure 31 donne un aperçu des résultats obtenus par le modèle sur une année particulière, avec des besoins importants qui apparaissent au cœur de l'été.

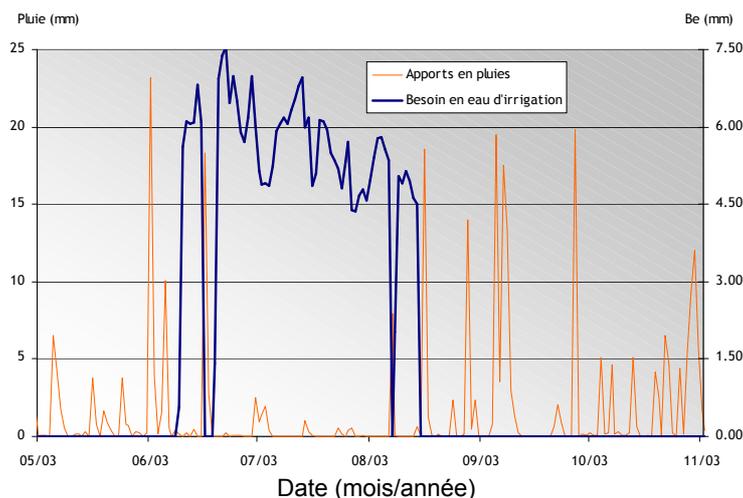


Figure 31 : Résultats du modèle agronomique : évolution de la pluie et du besoin en eau Be du maïs (année 2003)

MODELE DE PRELEVEMENT – CONSOMMATION D’EAU

Le modèle de prélèvement – consommation d’eau associe le modèle agronomique et des fonctions simples de demande en eau des autres usages : eau potable, eaux industrielles et production d’électricité (CNPE de Golfech).

Par la suite, nous supposons que les volumes d’eau non consommés, sont restitués dans les cours d’eau là où ils ont été prélevés. Les taux de consommation en eau sur prélèvements effectués sont ceux proposés par l’IFEN : 100% pour l’irrigation par aspersion, 25% pour l’AEP, 7% pour l’industrie. Pour Golfech, la consommation d’eau est de 1,5 m³/s. Les valeurs utilisées représentent des consommations d’eau et non pas des prélèvements. Elles ont déjà été présentées dans la section « Consommation par usage de l’eau » (page 33).

Concernant les prélèvements pour l'irrigation, l'évolution de la surface irriguée est prise en compte (Figure 32). Pour chacun des sous-bassins, cette évolution est estimée à partir des données de surfaces irriguées par département entre 1970 et 2007 de l'IFEN au prorata de la surface occupée par chacun de ces départements dans le sous-bassin considéré.

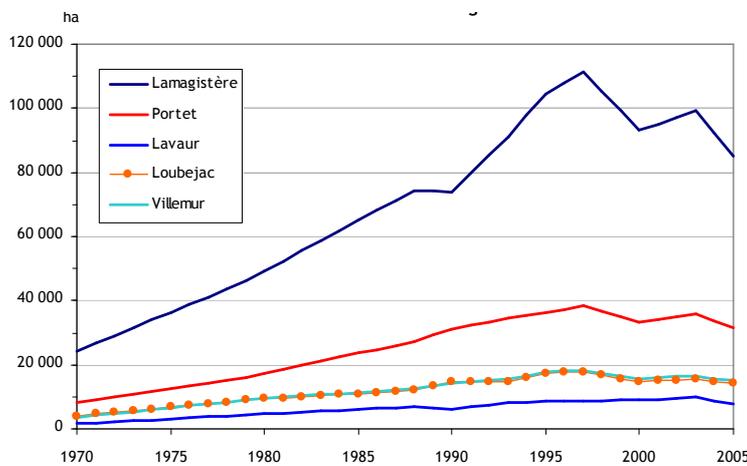


Figure 32 : Evolution des surfaces irriguées par sous bassin

Ce modèle a été testé sur la période 1970 – 2005.

La Figure 33 présente les prélèvements intra annuels obtenus par les modèles avec les données de l'Agence de l'Eau. Pour l'irrigation, les résultats obtenus par le modèle agronomique (courbe rouge) et le modèle CEQUEAU (courbe bleue) sont aussi représentés pour comparaison. Concernant l'irrigation, l'approche « hydrologique » et l'approche « agronomique » fournissent une bonne estimation des prélèvements annuels. Toutefois quelques différences sont à noter. Ainsi en 2003, la modélisation reposant sur l'approche hydrologique tend à légèrement surestimer les volumes prélevés sur le bassin de Lamagistère par rapport à l'approche agronomique qui semble plus apte à représenter la réalité.

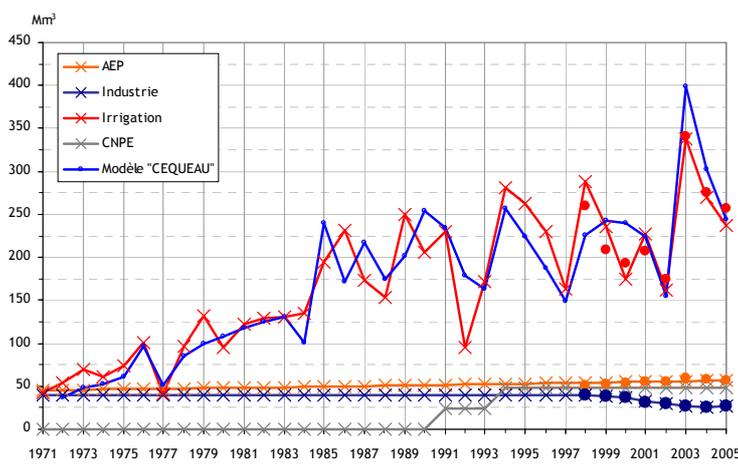


Figure 33 : Evolution des prélèvements d'eau d'irrigation (les points sont les données Agence de l'Eau)

En intra annuel (Figure 34), les différences entre les deux approches sont un peu plus marquées. En dehors des écarts sur les remplissages des réserves collinaires liés à la prise en compte des dates réglementaires des prélèvements dans le cas approche « agronomique » et non prise en compte dans le cas approche « hydrologique », nous notons un besoin de prélèvement pour l'irrigation plus précoce dans l'approche « agronomique ». Cet écart peut s'expliquer par la

représentation différente de la réserve en eau accessible par la plante : un réservoir unique dans l'approche « hydrologique » et deux réservoirs pour l'approche « agronomique ».

De plus, dans l'approche « hydrologique », la réserve disponible est importante et constante sur toute la durée du cycle. On fait aussi l'hypothèse que cette réserve est pleine au début de chaque période culturale.

Dans le modèle agronomique, la réserve utile dépend du stade de développement de la plante. La faible réserve utile exploitable par la rhizosphère en début du cycle du maïs peut conduire à un recours plus rapide à l'irrigation même si la demande en eau de la plante est plus faible en début de cycle. Le stock d'eau dans les deux réservoirs dépend aussi des conditions climatiques antérieures au début de période culturale. Il est possible notamment que la réserve facilement utilisable par la plante ne soit pas entièrement pleine en début de cycle, ce qui peut alors entraîner un besoin en irrigation plus rapide.

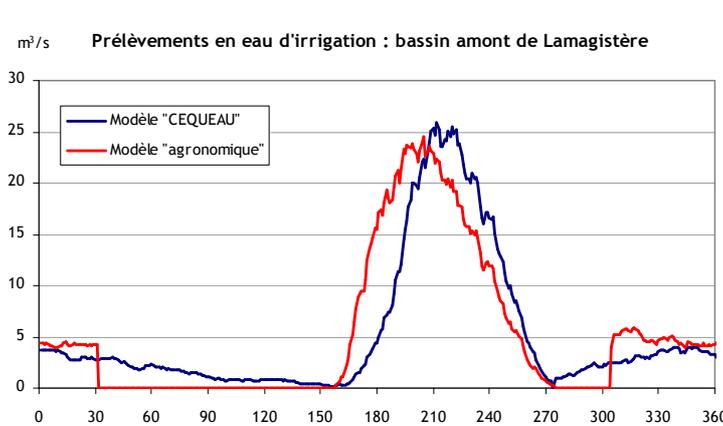


Figure 34 : Prélèvements en eau d'irrigation en fonction du jour de l'année (0 : 1er janvier)

La Figure 35 compare les débits naturels obtenus par le modèle CEQUEAU, les débits reconstitués et les débits mesurés au point nodal de Lamagistère entre 1971 et 2005. Les débits reconstitués intègrent les consommations effectuées par les différents usages. Les soutiens d'étiage et la gestion hydroélectrique ne sont pas pris en compte, ce qui explique en partie les écarts constatés entre les débits reconstitués et les débits mesurés.

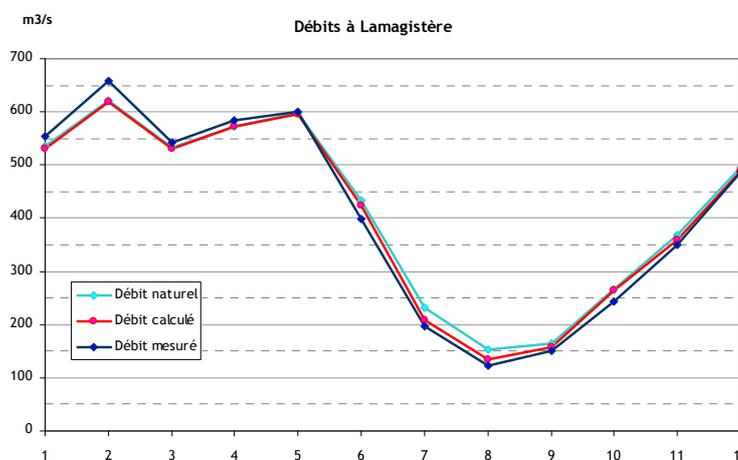


Figure 35 : Débits moyens mensuels à Lamagistère en fonction du mois de l'année

ELEMENTS D'INCERTITUDES

Les incertitudes apparaissent à tous les niveaux de la modélisation. Nous avons analysé ici les incertitudes liées à la caractérisation climatique en condition actuelle et aux conditions de calage des modèles hydrologiques.

Incertitudes liées à la nature des entrées en conditions actuelles

Le climat présent n'est connu que partiellement aux points de mesure. Les données de précipitations issues de différentes sources ont été comparées. C'est *a priori* ce terme qui est le plus difficile à connaître sur un grand secteur, en particulier en zone de montagne où le maintien et le suivi d'un réseau de mesure est plus délicat.

Deux études sur les pluies ont été menées :

- Hajjem (2008) a réalisé des comparaisons à l'échelle des bassins entre les données de pluie et de température SAFRAN et des données locales interpolées de manière sommaire par un module spécifique de CEQUEAU exploité par Agosta (2007) pour l'application de CEQUEAU ;
- Gottardi (2009) a développé une nouvelle technique, baptisée SPAZM, pour interpoler des précipitations. Celle-ci s'appuie sur des ébauches de répartition des précipitations par type de temps et valorise les informations sur le manteau neigeux pour améliorer la connaissance des apports en haute montagne. Gottardi a comparé dans sa thèse, pour les besoins d'IMAGINE2030, les valeurs de précipitations moyennes sur six sous-bassins de bassins de la Garonne calculées à partir de SPAZM à celles obtenues à partir de SAFRAN. Les analyses de corrélation montrent que les estimations selon SPAZM sont en moyenne supérieures de 10 à 15% à celles de SAFRAN. Ceci est dû principalement au fait que les mesures des précipitations corrigées aux postes grâce à l'information neige sont supérieures aux valeurs homogénéisées utilisées par SAFRAN.

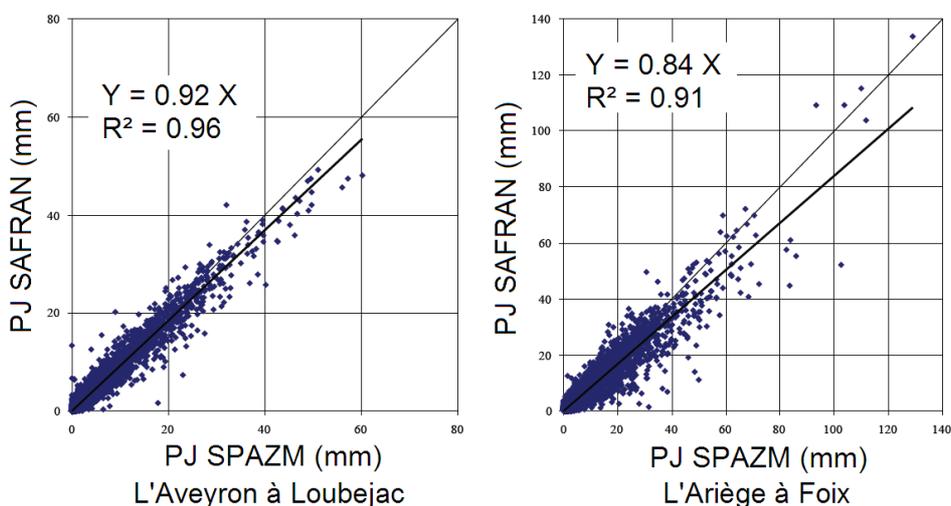


Figure 36 : Comparaison à l'échelle des bassins des pluies journalières selon deux sources de données
(extrait de Gottardi (2009))

Pour des raisons de comparaison entre modèles et de disponibilité des données à la date de début du projet, il a été convenu de travailler uniquement avec les pluies et les températures fournies

par SAFRAN. La propagation des sources d'incertitude dues à la représentation du climat ne sera pas examinée.

Concernant le climat, différents niveaux d'appréciation existent depuis le modèle physique d'assimilation de données (de type SAFRAN) jusqu'aux modèles statistiques exploitant des liens entre l'environnement (la topographie) et les variables météorologiques (de type SPAZM). Les premiers modèles sont les plus lourds car ils recherchent une cohérence entre toutes les variables représentées. Il faut souligner que tous les modèles utilisent la même information de base : celle disponible localement aux stations de mesures, donc les résultats sont proches dans les secteurs bien instrumentés, c'est en extrapolation spatiale que les estimations divergent.

Dans notre étude, nous avons retenu un modèle physique pour décrire le présent. L'incertitude serait globalement de l'ordre de 10%. L'incertitude sur l'ETP n'a pu être quantifiée et elle constitue l'autre élément important du bilan hydrologique pour le calcul des écoulements. Cette méconnaissance du forçage occupe et occupera encore des générations d'hydrologues et il n'était possible d'investir dans ce projet cette question difficile. Toutefois, les modèles ont su intégrer ces méconnaissances exhaustives des forçages et biais éventuels en présentant des performances très correctes et un comportement satisfaisant en calage-contrôle (cf. section « Tests des modèles hydrologiques », page 49). Il a donc été considéré que le choix initial de notre référence climatique n'est pas pour autant un choix à remettre en cause pour la suite de ce travail.

Incertitudes liées aux conditions de calage

Comme cela a été mentionné précédemment, les projections de changement climatique indiquent que les modèles fonctionneront largement en extrapolation, c'est-à-dire dans des conditions qui vont bien au-delà des conditions passées pour lesquelles nous ne disposons pas d'enregistrements. Or il est aujourd'hui admis que le calage des modèles tels que ceux que nous utilisons ici, dépend en partie des conditions hydroclimatiques de la période de calage (variabilité des événements et des alternances de conditions humides et sèches). Autrement dit, il est probable qu'un modèle utilisé dans des conditions très différentes des conditions de calage ne sera pas optimal dans ces nouvelles conditions. Il est donc intéressant de quantifier les incertitudes liées à l'utilisation des modèles en dehors de leur plage de calage.

Pour cela, nous avons testé un des modèles, le modèle GR4J, dans des conditions différentes, en sélectionnant intentionnellement des périodes présentant des caractéristiques particulières. Il s'agit du *differential split sample test* proposé par Klemeš (1986), qui consiste à évaluer le modèle sur des périodes contrastées, par exemple en calant sur des périodes humides et en contrôlant sur des périodes sèches.

Pour cela, nous avons comparé les performances du modèle GR4J obtenues en validation lorsque le modèle est calé :

- sur des années à pluviométrie forte, avec un contrôle sur des années médianes : cela va dans le sens d'une baisse probable de la pluviométrie sur le bassin ;
- sur des années à évapotranspiration potentielle plutôt faible, avec contrôle sur des années médianes : cela va dans le sens d'une augmentation probable des températures (et donc de l'ETP sur les bassins).

Nous avons utilisé ici comme descripteurs la pluie moyenne annuelle et l'ETP moyenne annuelle, mais d'autres pourraient être utilisés (par exemple des valeurs par saison). Pour permettre de forcer les contrastes, nous avons sélectionné des périodes de calage non continues. Notons que malgré ce raffinement, les caractéristiques des périodes de calage ainsi sélectionnées sont encore

loin de pouvoir représenter celles des successions d'années rencontrées dans les projections de changement climatique.

Pour que les résultats soient comparables, seules les conditions de calage changent, les validations sont réalisées sur les mêmes périodes. Le Tableau 8 récapitule les performances obtenues dans ces diverses conditions. Nous constatons que les performances du modèle sont, globalement, d'une sensibilité limitée à ces conditions de calage. Cependant, lorsque nous regardons les résultats de manière plus détaillée bassin par bassin, nous constatons que les impacts sur la simulation des étiages peuvent être significatifs. Un calage sur des conditions plutôt humides (plus humides que les années de contrôle) conduira à une surestimation des volumes d'étiage de l'ordre de 5 % en moyenne par rapport à un calage en conditions médianes. Un calage sur des années à *ETP* faible (moins chaudes que les années de contrôle), conduira de même à une surestimation des étiages de l'ordre de 5 % en moyenne.

Avec calage sur des années à :	Performances en contrôle sur années médianes			
	NSQ	NSLQ	NSM	B
pluviométrie médiane	0.841	0.856	0.939	0.967
pluviométrie forte	0.839	0.851	0.934	0.964
ETP médiane	0.839	0.855	0.937	0.966
ETP faible	0.837	0.856	0.940	0.965

Tableau 8 : Comparaison des performances du modèle GR4J avec des conditions de calage différentes

Ces résultats indiquent que le fait de caler les modèles en conditions actuelles pourrait conduire à des surestimations des volumes d'étiage de l'ordre de quelques pourcents. Il ne s'agit là que d'un ordre de grandeur, mais qui permet de donner un caractère relatif à ces conditions de calage. Notons que la sensibilité limitée du modèle aux conditions de calage est en partie liée à sa parcimonie. Un autre modèle, avec un plus grand nombre de paramètres, pourrait avoir tendance à être plus sensible à ces conditions et donc à être moins bon en extrapolation. Mais cette question mériterait davantage d'investigations.

CONCLUSION

La mise au point de modélisations hydrologiques satisfaisantes sur le bassin de la Garonne est une entreprise délicate, notamment en raison d'influences artificielles importantes sur certains sous-bassins (barrages, transferts, prélèvements) mais également de processus naturels dont il est délicat de rendre compte (neige, karst, variabilité spatiale des forçages météorologiques...). Les résultats obtenus sur le calage et l'évaluation des modèles hydrologiques indiquent que la reproduction du comportement hydrologique actuel des sous-bassins étudiés est globalement satisfaisante même si elle reste soumise à des incertitudes parfois importantes.

Pour ce qui concerne la modélisation hydrologique, le point délicat est la prise en compte des phénomènes neigeux sur le bassin, qui influencent particulièrement le régime hydrologique des sous-bassins pyrénéens. La comparaison des résultats des deux modèles en temps présent indique de bonnes performances des deux modélisations CEQUEAU et GR4J avec un léger avantage sur les étiages pour le premier modèle. La Figure 37 permet de comparer les débits mensuels minimaux annuels de fréquence quinquennale sèche *QMNA5* obtenus sur les chroniques reconstituées par modélisation aux valeurs obtenues sur les chroniques des débits naturels. Les points relatifs à CEQUEAU sont plus près de la première bissectrice tracée en trait épais noir. Les points relatifs à GR4J se situent sous la droite de référence, indiquant une tendance à sous estimer les débits d'étiage en temps présent.

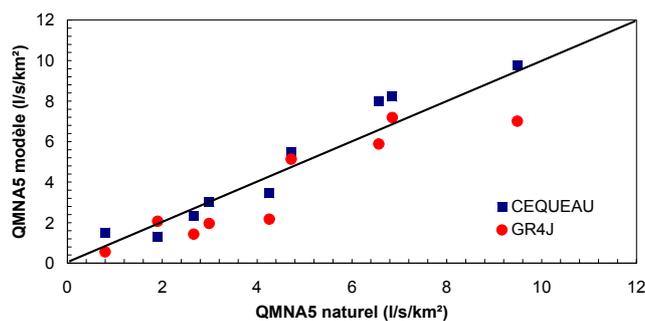


Figure 37 : Reconstitution des débits d'étiages selon les deux modèles, chaque point représente un bassin versant modélisé

L'utilisation des deux modèles pluie-débit pour établir les projections hydrologiques fournira un niveau de confiance relative à chacune pour les projections de scénarios de changement climatique et en sus, une idée de l'incertitude liée au choix de l'approche de modélisation.

Concernant les usages, il est important de pouvoir estimer de façon fiable l'évolution de la demande en eau aux échelles infra-annuelles dans le cadre d'exercices de prospective où les demandes concomitantes modifiées peuvent conduire à de forts risques de pénurie.

Les modèles d'usage ont cherché à approcher le comportement de l'agriculteur et de l'électricien, les deux usages dominant pour le premier en termes de consommation d'eau, pour le second en termes de volumes d'eau transférés entre saisons.

La modélisation de l'hydroélectricité n'est pas en soi une nouveauté, nous l'évoquerons plus loin, d'autres sites ont fait l'objet d'études d'impact. L'originalité réside dans la prise en compte explicite d'une demande au travers d'un « proxy », la température moyenne de la France et dans la construction d'un modèle adapté à la France (l'hydroélectricité assure les pointes de consommation). La plupart des autres études proposent une évolution de la production indépendamment de toute demande, sur la base des apports dans la réserve et des contraintes de gestion des ouvrages (marnage autorisé). Dans notre cas, les conditions de fonctionnement n'ont pas été intégrées car la gestion est faite au travers d'une macro-réserve conceptuelle dont le volume est réparti entre les retenues. Comme mentionné dans l'introduction, l'avantage de ce modèle est d'être piloté par une variable bien modélisée par les modèles climatiques et facilement accessible.

Deux modèles dédiés aux pratiques d'irrigation ont été mis en œuvre.

Le premier modèle, directement connecté au modèle hydrologique, fournit une vision agrégée des prélèvements et cohérente avec le suivi des stocks superficiels et plus profonds. Sa nature est ici conceptuelle ; ce premier modèle a été construit initialement pour le travail de naturalisation car il permettait d'avancer rapidement sur ce volet support aux travaux de modélisation hydrologique.

Le second modèle d'irrigation, à base agronomique, permet de calculer le bilan hydrique en fonction de différentes données : date de semis, type de cultures, dates de début et de fin de campagne d'irrigation, textures des sols, caractéristiques climatiques. Il permet de calculer le besoin en eau théorique des cultures situées sur un bassin versant en agrégeant les superficies irriguées en fonction du type de culture et de la nature des sols. Il offre aussi la possibilité de prendre en compte les choix faits par l'agriculteur (assolement, superficies irriguées, rendement recherché...) et des termes simples de gestion de l'eau gestion volumétrique par unité de gestion... Ce modèle moins conceptuel et donc plus réaliste de la problématique agricole permet d'exprimer des variables physiques (ratio ETR/ETM , RU , RFU) qui font sens pour l'agriculture

comme le rendement, la nature et la profondeur des sols, les réserves en eau du sol à l'échelle d'une parcelle.

Dans les deux cas, les modèles fournissent des résultats réalistes et cohérents. Les deux modélisations pourront être reprises dans les simulations sous climat futur, avec potentiellement un avantage pour la représentation plus physique du sol, pour laquelle on pourrait s'attendre à plus de robustesse.

CONSTRUCTION DE SCENARIOS DE CHANGEMENT CLIMATIQUE

L'objectif est l'élaboration de projections climatiques à une échelle adaptée aux outils de simulation présentés dans les sections précédentes. Nous avons choisi d'exploiter les sorties des GCMs (modèles de climat) du dernier exercice de l'IPCC (Meehl *et al.*, 2007) qui décrivent le contexte climatique de 2030. Ces projections alimenteront les modèles hydrologiques pour examiner la sensibilité des régimes hydrologiques à des modifications du climat.

La construction de ces projections se déroule en deux temps. Des séries mensuelles sont proposées pour chaque maille de la grille SAFRAN. Pour les désagréger, nous leur avons appliqué une approche de type « méthode des anomalies ». Des séries de précipitations et de températures journalières ont été créées par ré-échantillonnage dans SAFRAN selon l'algorithme KNN, afin de simuler un climat stationnaire cohérent sur la région pour le XXI^e siècle. Nous leur avons appliqué l'anomalie mensuelle (additive pour les températures et multiplicative pour les précipitations) pour construire des séries journalières sur chaque maille élémentaire. Chaque sortie de GCMs est ainsi déclinée en cinq projections climatiques possibles issues du rééchantillonnage.

GENERATEUR KNN

Le générateur KNN pour K Nearest Neighbours (Lall et Sharma, 1996 ; Harrold *et al.*, 2003) est un algorithme de ré-échantillonnage par proches voisins se fondant sur le principe de similitude. Il appartient ainsi à la famille des générateurs stochastiques non paramétriques.

A partir de P chroniques disponibles (pluie et températures confondues) en M sites, l'algorithme crée N ensembles de P chroniques aux mêmes M sites, représentatives du climat passé, en respectant la structure spatiale, la liaison entre variables et l'auto-corrélation d'ordre 1. Chaque jour simulé j , le générateur identifie une liste de jours dans la base de donnée pluviométrique sur des critères de similitude avec j (dans notre cas, la pluviométrie et la température moyenne journalières sur les M sites équivalentes). Un voisin identifié par la date k est tiré aléatoirement dans cette liste et les conditions météorologiques aux M sites de la date $k+1$ sont affectées à $j+1$. Le principe de ce générateur a été rappelé récemment par Sauquet *et al.* (2008b).

La procédure de ré-échantillonnage peut être biaisée pour construire des climats plus chauds, plus froids, plus secs ou plus humides, en favorisant respectivement le tirage des séquences chaudes, froides, sèches ou humides (Sharif et Burn, 2006). Ce générateur a été appliqué aux secteurs définis par les bassins du Tarn à Millau, du Roquefort à Salat et de l'Ariège à Foix. Les données simulées ont été exploitées pour mesurer la sensibilité des régimes hydrologiques à des perturbations autour du point de fonctionnement actuel (Dupeyrat *et al.*, 2008).

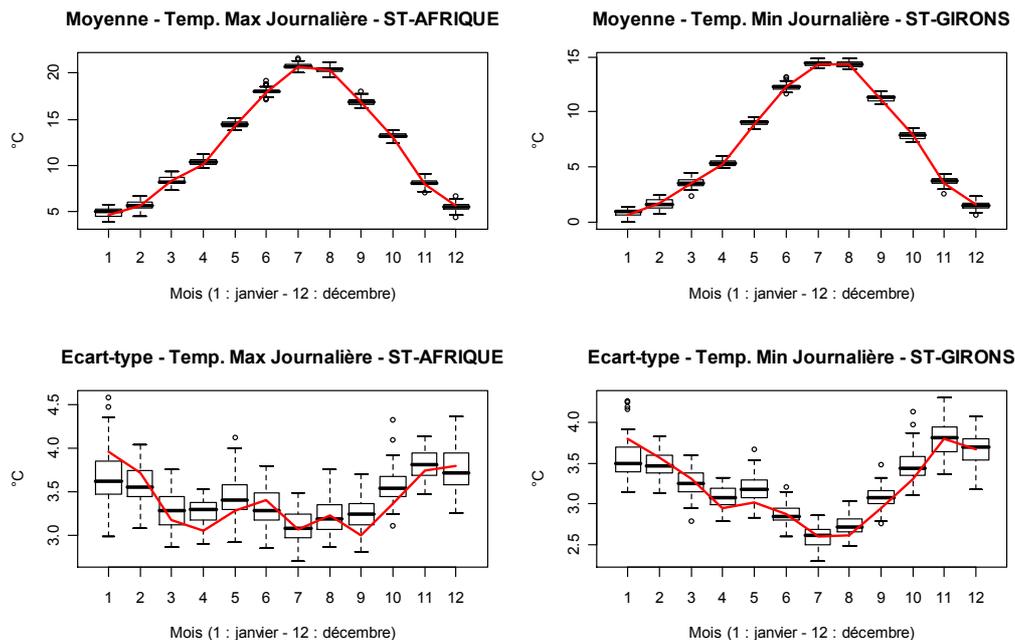


Figure 38 : Caractéristiques mensuelles simulées par ré-échantillonnage selon l'algorithme KNN (en rouge : données de référence sur la période 1975-2004), exemples de restitution sur deux stations St-Affrique dans le Massif Central et St-Girons dans les Pyrénées. Le rectangle est défini par les premier et troisième quartiles et coupé par la médiane, la longueur des moustaches correspond à 1,5 fois l'écart interquartile

GENERATION DE PROJECTIONS CLIMATIQUES A HAUTE RESOLUTION SUR LA FRANCE AU PAS DE TEMPS MENSUEL

Un des objectifs annoncés dans le projet est de construire une base de données de projections climatiques à haute résolution sur la France, à partir des simulations climatiques globales utilisées dans le cadre du dernier exercice de l'Intergovernmental Panel on Climate Change. Nous en extrairons les données pour la zone d'étude. La réanalyse atmosphérique SAFRAN (Quintana Seguí *et al.*, 2008) est notre référence pour le climat présent et définit le support spatial de restitution des scénarios climatiques (maille de 8 km × 8 km). Les calculs seront effectués en exploitant la période de décembre 1972 à fin novembre 2002 et fournissent des valeurs mensuelles pour chaque maille de la grille.

Données

Les simulations climatiques prises en compte ici sont détaillées dans le Tableau 9. Pour chacun des scénarios économiques indiqués (A2, A1B et B1), une chronique spatio-temporelle à pas de temps mensuel a été reconstruite en mettant bout à bout la simulation de référence pour le XX^e siècle et la projection sur le XXI^e siècle sous ce scénario socio-économique.

Centre	Pays	Nom	A2	A1B	B1
Bjerknes Centre for Climate Research	Norvège	BCCR-BCM2.0	(✓)	(✓)	(✓)
Canadian Center for Climate Modelling and Analysis	Canada	CGCM3.1(T47)		✓	✗
Canadian Center for Climate Modelling and Analysis		CGCM3.1(T63)		✗	✗
Centre National de Recherches Météorologiques	France	CNRM-CM3	✓	✓	✓
Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation	Australie	CSIRO-Mk3.0	✓	✓	✓
Max-Planck-Institut for Meteorology	Allemagne	ECHAM5/MPI-OM	(✓)	(✓)	(✓)
Meteorological Institute, University of Bonn (Germany), Meteorological Research Institute of KMA (Korea), Model and Data Groupe at MPI-M (Germany)		ECHO-G	✓	✓	
Institute of Atmospheric Physics	Chine	FGOALS-g1.0		✓	✓
Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	USA	GFDL-CM2.0	✓	✓	✓
Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	USA	GFDL-CM2.1	✓	✓	✓
Goddard Institute for Space Studies	USA	GISS-AOM		✓	✓
Goddard Institute for Space Studies	USA	GISS-EH		✓	
Goddard Institute for Space Studies	USA	GISS-ER	✓		✓
Institute for Numerical Mathematics	Russie	INM-CM3.0		✓	✓
Institut Pierre Simon Laplace	France	IPSL-CM4	✓	✓	✓
National Institute for Environmental Studies	Japon	MIROC3.2(hires)		✗	(✓)
National Institute for Environmental Studies	Japon	MIROC3.2(medres)	✓	✓	✓
National Centre for Atmospheric Research	USA	PCM	✓	(✓)	
UK Met. Office	RU	UKMO-HadCM3	✓	✓	✓
UK Met. Office	RU	UKMO-HadGEM1	(✓)	(✓)	

Tableau 9 : Liste des simulations climatiques globales et des scénarios socio-économiques correspondants pour le XXI^e siècle (✓ : scénarios élaborés ; (✓) : données rapatriées mais non traitées ; ✗ : séries rapatriées mais présentant des anomalies)

Méthode

L'approche utilisée pour construire ces projections est une méthode de descente d'échelle statistique multimodèles inspirée de Vidal et Wade (2008). Cette méthode permet d'obtenir des projections spatio-temporelles continues de température et de précipitations à l'échelle requise pour des études d'impact et a été raffinée dans le cadre du projet. La version appliquée ici se compose de trois étapes détaillées dans les paragraphes ci-dessous : (1) gestion du masque continental, (2) correction des biais des projections globales et (3) désagrégation spatiale.

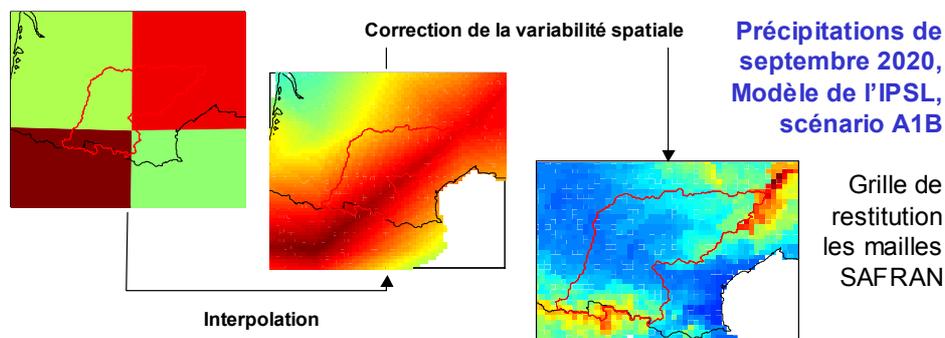


Figure 39 : Schéma de principe de désagrégation spatiale des scénarios de l'IPCC

Gestion du masque continental

Le masque continental des GCMs, dont un exemple est représenté sur la Figure 40, regroupe des cellules terrestres, maritimes et mixtes, sur lesquelles sont représentés des processus physiques différents. Comme seules les variables « terrestres » sont d'intérêt dans le cadre d'une étude d'impact sur l'hydrologie de surface, il importe de construire de telles variables pour les cellules maritimes. Dans cette étude, les cellules maritimes sont celles présentant un pourcentage de terre inférieur à 50%. L'approche consiste à attribuer à chaque cellule maritime une moyenne pondérée des cellules terrestres adjacentes.

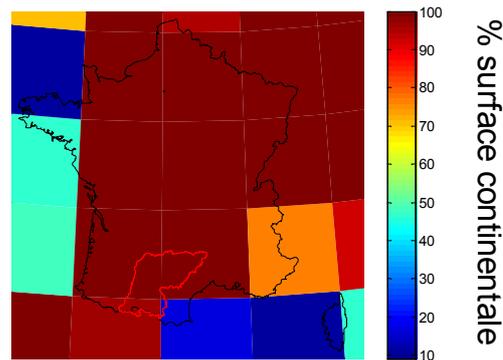


Figure 40 : Masque du modèle de l'IPSL. Le bassin versant de la Garonne à Lamagistère est représenté en rouge

Correction des biais des projections globales

La deuxième étape consiste à comparer à l'échelle des GCMs les distributions statistiques mensuelles simulées et observées, ici construites à partir des variables issues de l'analyse SAFRAN. Celles-ci sont tout d'abord agrégées à l'échelle des GCMs en moyennant les observations sur la surface de la maille considérée. Sur la base de cette comparaison, une correction quantile-quantile est appliquée sur l'ensemble de la chronique simulée (1901-2100) afin d'obtenir des projections dont les propriétés statistiques sont identiques à celles des observations sur la période de référence 1972-2003. Cette méthode permet de réaliser une correction différenciée suivant la valeur de la variable considérée. L'exemple de la correction de la température de la cellule du modèle de l'IPSL centrée sur les Pyrénées est présenté sur la Figure 41. La température corrigée est généralement plus basse que la température brute en raison de la sous-estimation du relief pyrénéen dans l'orographie du modèle (Figure 42).

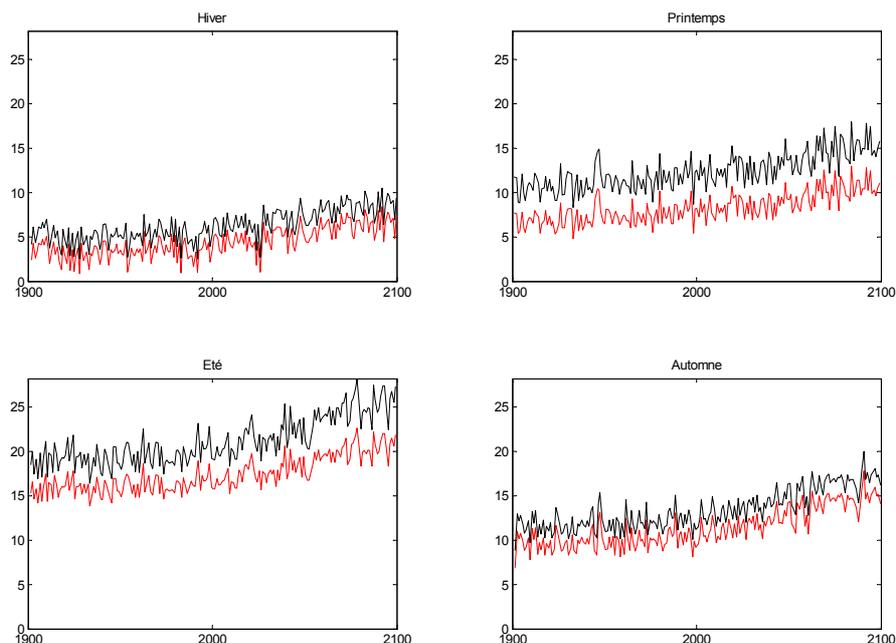


Figure 41 : Évolution de la température moyenne saisonnière (scénario A1B) de la cellule du modèle de l'IPSL centrée sur les Pyrénées. En noir : chronique brute ; en rouge : chronique corrigée

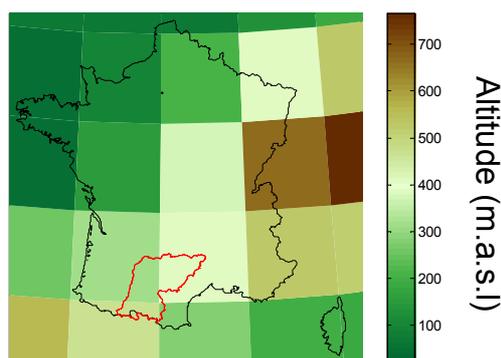


Figure 42 : Orographie du modèle de l'IPSL. Le bassin versant de la Garonne à Lamagistère est représenté en rouge

Désagrégation spatiale

La troisième étape consiste à désagréger spatialement les chroniques corrigées jusqu'à la grille SAFRAN de 8 km. La première opération consiste à interpoler bilinairement les champs depuis les centres des mailles des GCMs vers les centres des mailles de la grille SAFRAN. Vidal et Wade (2008) appliquaient ensuite des anomalies spatiales mensuelles aux champs interpolés pour disposer d'une variabilité spatiale réaliste basée sur celle représentée par les observations à échelle locale. Dans la présente étude, une nouvelle transformation quantile-quantile est appliquée à l'échelle de la maille SAFRAN. Similaire techniquement à celle de l'étape précédente, cette transformation permet non plus de corriger le biais intrinsèque des projections, mais la variabilité spatiale à l'intérieur d'une maille de GCM. L'utilisation de deux transformations quantile-quantile consécutives plutôt qu'une seule permet, d'une part, de différencier les deux types de corrections nécessaires (biais et variabilité spatiale) et, d'autre part, de prendre en compte au travers de l'interpolation les valeurs des mailles adjacentes.

Désagrégation temporelle

Nous avons adopté la démarche la plus simple, la méthode dite « des perturbations ».

L'algorithme KNN fournit des réalisations cohérentes du climat sur les Pyrénées aux caractéristiques similaires à celle du climat présent, par rééchantillonnage dans SAFRAN. Nous avons défini cinq ensembles de séries stationnaires de température $T_{air\ KNN}^i$ et de précipitations P_{KNN}^i de 75 ans entre 1970 et 2045 pour chaque maille i , $i=1, \dots, 580$ mailles qui émargent au bassin versant de la Garonne à Lamagistère.

La différence entre le climat présent et le climat modifié tous deux restitués par le GCM est calculée à l'échelle mensuelle pour chaque maille SAFRAN. Pour chaque maille, nous avons calculé les moyennes mensuelles interannuelles pour chaque mois $MM=1, \dots, 12$ sur les sorties de chaque GCM : $\bar{T}_{air\ présent\ GCM}^i(MM)$ et $\bar{P}_{présent\ GCM}^i(MM)$.

La perturbation mensuelle de chaque cellule est imposée aux séries des pluies et températures de bassin KNN, de façon soit additive (écart de température), soit multiplicative (% de variation des précipitations), ainsi :

$$T_{air\ futur}^i(JJ, MM, AA) = T_{air\ KNN}^i(JJ, MM, AA) + T_{air\ futur\ GCM}^i(MM, AA) - \bar{T}_{air\ présent\ GCM}^i(MM)$$

$$P_{futur}^i(JJ, MM, AA) = P_{KNN}^i(JJ, MM, AA) \frac{P_{futur\ GCM}^i(MM, AA)}{\bar{P}_{présent\ GCM}^i(MM)}$$

pour chaque date JJ/MM/AA entre 1970 et 2045.

Résultats

Nous nous sommes appuyés sur les résultats de 19 sorties de GCMs : 12 projections sous scénarios d'émission de gaz à effet de serre SRES A1B et de 7 sous SRES A2, réputé le plus « pessimiste » en termes d'impact.

Le Tableau 10 décrit les écarts attendus par différence, en relatif ou absolu, entre les valeurs actuelles selon SAFRAN et les moyennes saisonnières des variables de précipitations et de température de l'air sur une fenêtre centrée de 20 ans autour des horizons visés. Les projections sous scénario A1B et A2 fournissent des évolutions semblables à l'horizon 2030. De manière globale, les GCMs annoncent une augmentation des températures prononcée en été (en moyenne +2°C à l'échelle du bassin), et plus limitée en hiver (en moyenne +1°C à l'échelle du bassin) à l'horizon 2030. Cet écart s'accroît à l'horizon 2080 : on note +4°C sur la température annuelle moyenne pour les scénarios A1B et +5°C pour les scénarios A2. Le signal sur les précipitations est moins cohérent, une tendance à la diminution est perceptible en dehors de l'hiver, mais non généralisée à l'ensemble des GCMs.

	Horizon	Δ PDJF (%)			Δ PMAM (%)			Δ PJJA (%)			Δ PSON (%)			Δ TDJF (°C)			Δ TMAM (°C)			Δ TJJA (°C)			Δ TSON (°C)		
A1B (60)	2030	-3.6	6.3	14.9	-15.5	-5.0	3.5	-23.6	-3.6	0.8	-9.2	-4.9	0.6	1.0	1.2	1.4	0.7	1.1	1.4	1.5	1.7	2.2	1.2	1.5	1.7
	2080	-11.8	1.8	16.4	-29.0	-13.9	-7.7	-52.8	-32.8	-25.8	-18.3	-15.9	-7.1	2.4	2.7	3.0	2.8	3.2	3.9	4.5	5.5	7.4	3.2	4.1	5.2
A2 (35)	2030	1.3	3.8	5.0	-9.5	-1.0	11.7	-22.5	-10.2	-0.1	-9.2	-3.4	-1.2	0.9	1.0	1.4	0.8	1.1	1.3	1.2	1.8	2.2	0.9	1.1	1.6
	2080	-3.8	-0.8	2.0	-40.0	-24.4	-13.8	-67.9	-39.6	-22.0	-23.7	-20.6	-10.7	2.9	3.3	3.9	3.7	4.2	4.8	6.0	7.0	8.5	4.6	5.3	5.9

Tableau 10 : Évolution des précipitations (P) et des températures (T) de la Garonne à Lamagistère pour différents horizons et scénarios, exprimée en écart relatif (les chiffres en gras sont les médianes ; les chiffres de part et d'autre de la valeur centrale définissent l'intervalle interquartile ; DJF : décembre à février, MAM : mars à mai ; JJA : juin à août ; SON : septembre à novembre ; entre parenthèses est indiqué le nombre de projections examinées par scénario)

Nous avons replacé les 19 projections dans l'ensemble des 34 disponibles (Figure 43). Les scénarios sont représentés par les anomalies de températures et les écarts relatifs de précipitations sur les quatre saisons sur la fenêtre de 20 ans centrée sur 2030. Les 19 projections choisies se répartissent uniformément dans le nuage des points : ils explorent la gamme des avenir possibles. Notons que nous avons intégré les scénarios les plus extrêmes en température et en pluviométrie.

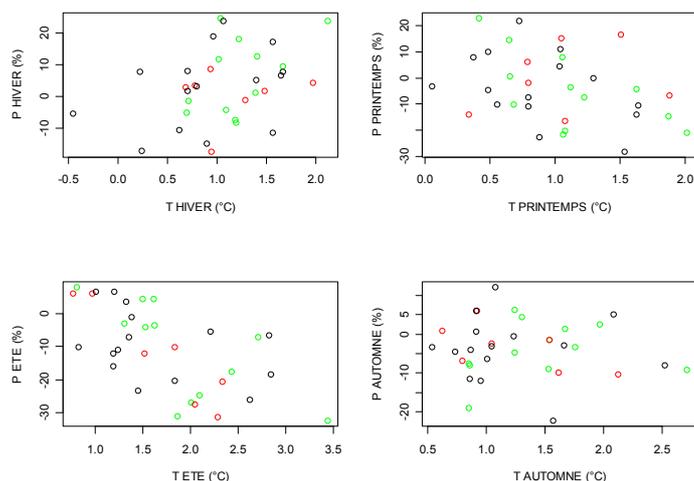


Figure 43 : Positionnement des scénarios choisis en termes de précipitations et températures moyennes par saison (en rouge A2, en vert A1B, en bleu B1)

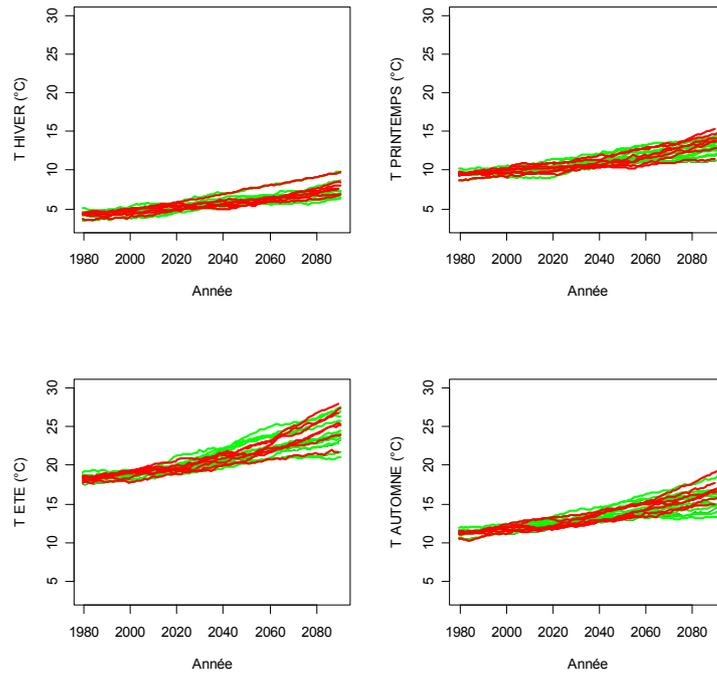


Figure 44 : Températures moyennes par saison (°C) pour la Garonne à Lamagistère (en rouge A2, en vert A1B)

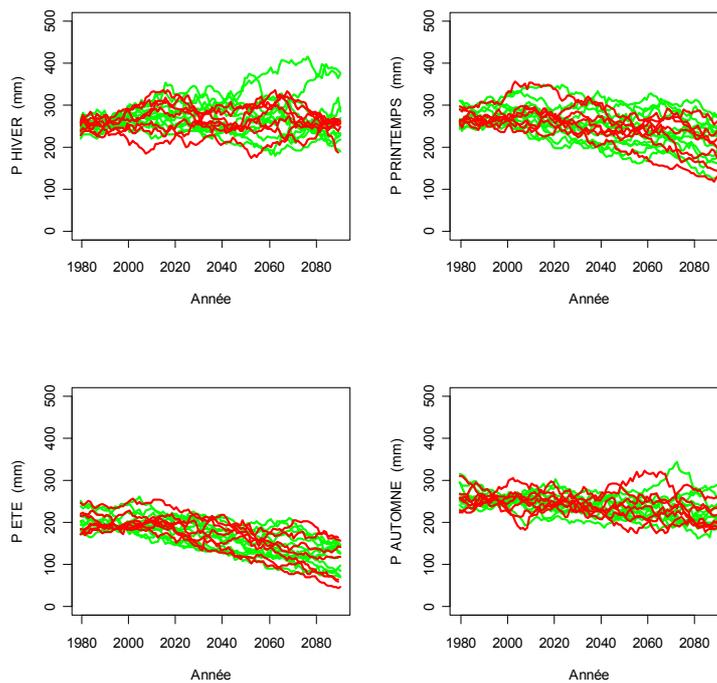


Figure 45 : Comme pour la Figure 44, pour les précipitations

La Figure 46 et la Figure 47 montrent les changements attendus à l'échelle annuelle sur les différents secteurs. Nous avons ici considéré les 34 scénarios désagrégés. Les cartes représentent les valeurs moyennes, minimales et maximales calculées sur une fenêtre de 20 ans autour de 2030 pour chaque maille (en valeur brute ou anomalie par rapport à la donnée SAFRAN).

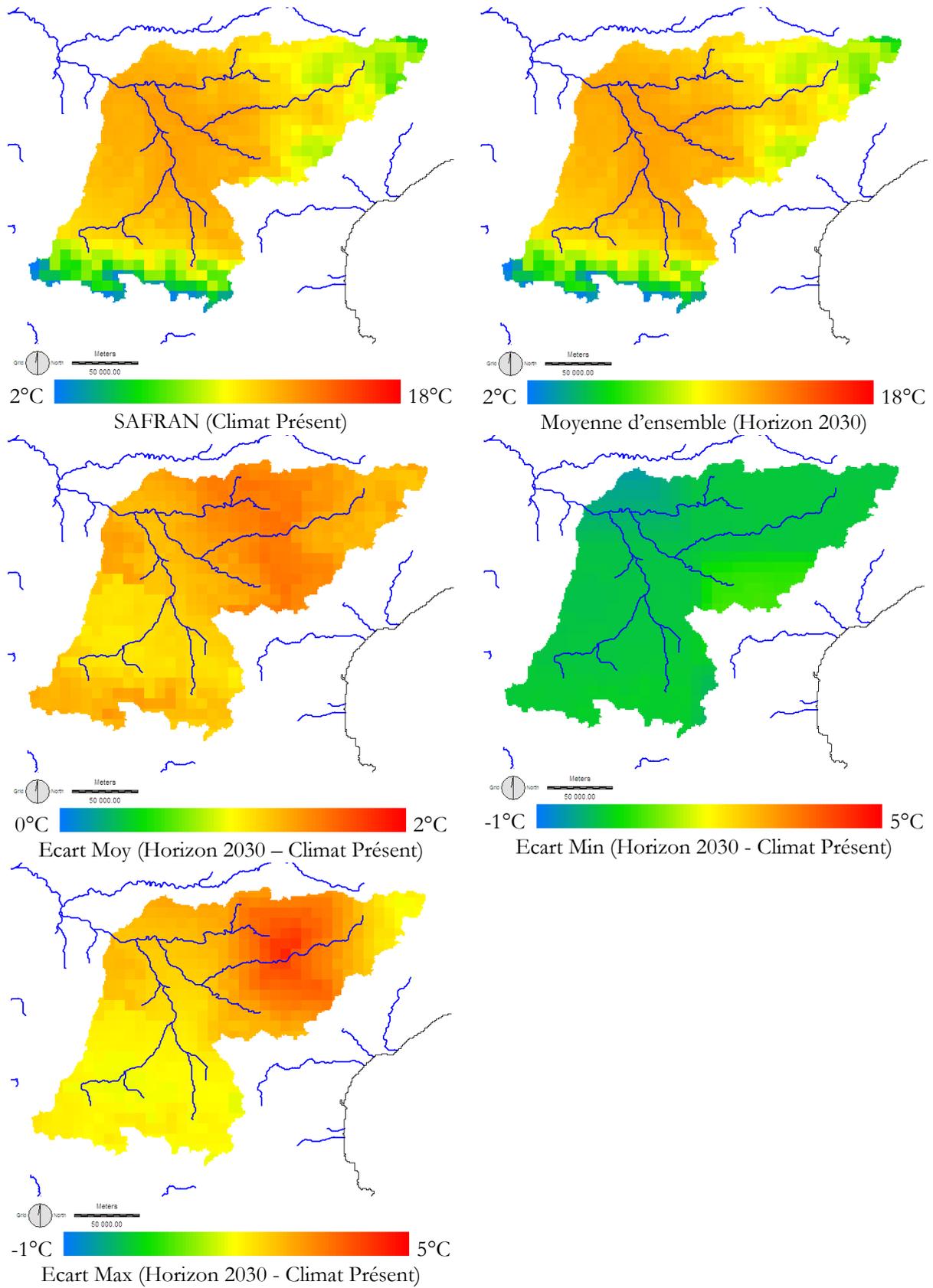


Figure 46 : Température annuelle sous climat présent et statistiques associées à l'horizon 2030

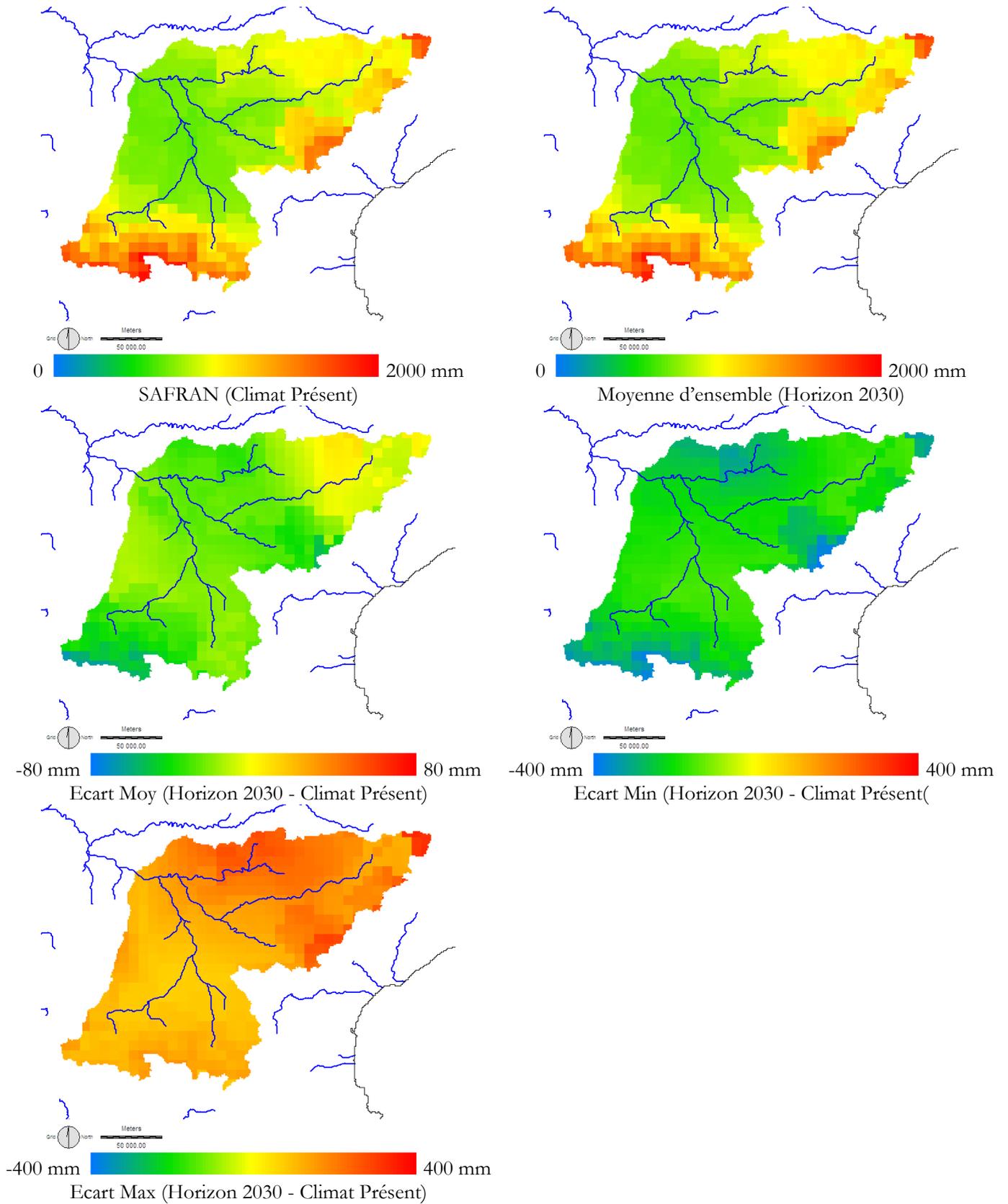


Figure 47 : Précipitations annuelles sous climat présent et statistiques associées à l'horizon 2030

Nous constatons que les grands contrastes sont préservés entre les zones de plaine et les secteurs à relief. Les cartes des différences font apparaître des changements uniformes en termes de températures et un léger gradient sud-ouest/nord-est avec des évolutions positives en marge des

Cévennes. L'examen des valeurs extrêmes indique que les anomalies de températures minimales sont presque toutes positives à l'exception du secteur nord-ouest du bassin. La carte « Ecart Min (Horizon 2030 - Climat Présent) » pour la température fait apparaître un zonage rectangulaire, il s'agit de l'empreinte du maillage du GCM responsable de la tendance à la baisse. Pour ce qui est des extrêmes sur les pluies, nous constatons que les plus importants écarts concernent les secteurs à relief (donc les incertitudes y sont également les plus fortes). La carte « Ecart Max (Horizon 2030 - Climat Présent) » affiche des valeurs entre 80 mm et 350 mm, celle « Ecart Min (Horizon 2030 - Climat Présent) » des valeurs entre -400 et -140 mm à l'échelle du secteur.

DISCUSSION

Des éléments génériques sur l'évolution du climat sont donnés dans le rapport de l'IPCC (Meehl *et al.*, 2007). A l'échelle du globe, le réchauffement observé atteindrait en fin de XXI^{ème} siècle +1.8°C (entre 1.1°C et 2.9°C) pour les scénarios B1, +2.4°C (entre 1.4°C et 3.8°C) pour les scénarios B2 et +3.4°C (entre 2.0°C et 5.4°C) pour les scénarios A2 par rapport aux années 1980-1999 (Figure 48).

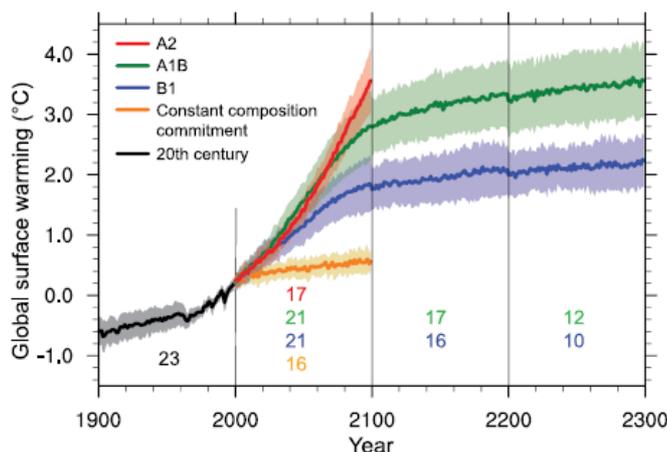


Figure 48 : Prédiction multimodèles de la moyenne de la température de surface (référence 1980–1999) pour les scénarios A2, A1B et B1 (extrait de Meehl *et al.*, 2007)

Il est intéressant de noter que peu de différences sont perceptibles entre les scénarios avant 2030. Au delà de cette date, le choix du scénario a plus de poids que le choix du GCM. Ceci explique pourquoi, dans la suite, dans les synthèses statistiques sur les débits, nous ne ferons pas de distinction entre scénarios SRES.

Des statistiques sont disponibles à une échelle plus locale dans Christensen *et al.* (2007). Pour la plupart, elles concernent la fin de siècle et les scénarios « intermédiaires » A1B. La Figure 49 montre une évolution forte sur les surfaces continentales autour de la Mer Méditerranée. Sur le secteur associé au bassin de la Garonne, les modèles s'accordent sur une diminution des précipitations annuelles et des précipitations estivales.

Saison	Ecart de température (°C)					Evolution relative des précipitations (%)				
	Min	25	50	75	Max	Min	25	50	75	Max
DJF	1.7	2.5	2.6	3.3	4.6	-16	-10	-6	-1	6
MAM	2	3	3.2	3.5	4.5	-24	-17	-16	-8	-2
JJA	2.7	3.7	4.1	5	6.5	-53	-35	-24	-14	-3
SON	2.3	2.8	3.3	4	5.2	-29	-15	-12	-9	-2
Année	2.2	3	3.5	4	5.1	-27	-16	-12	-9	-4

Tableau 11 : Evolution moyenne des températures et des précipitations selon 21 GCMs selon le scénario A1B en Europe sur le domaine défini par les points (30N, 10W) (48N, 40E). Sont reportés : le minimum, le maximum, la médiane et les premiers et derniers quartiles des écarts absolus ou relatifs entre moyennes restituées par les modèles sur la période (1980-1999) et celles projetées par ces modèles sur la période (2080-2099)

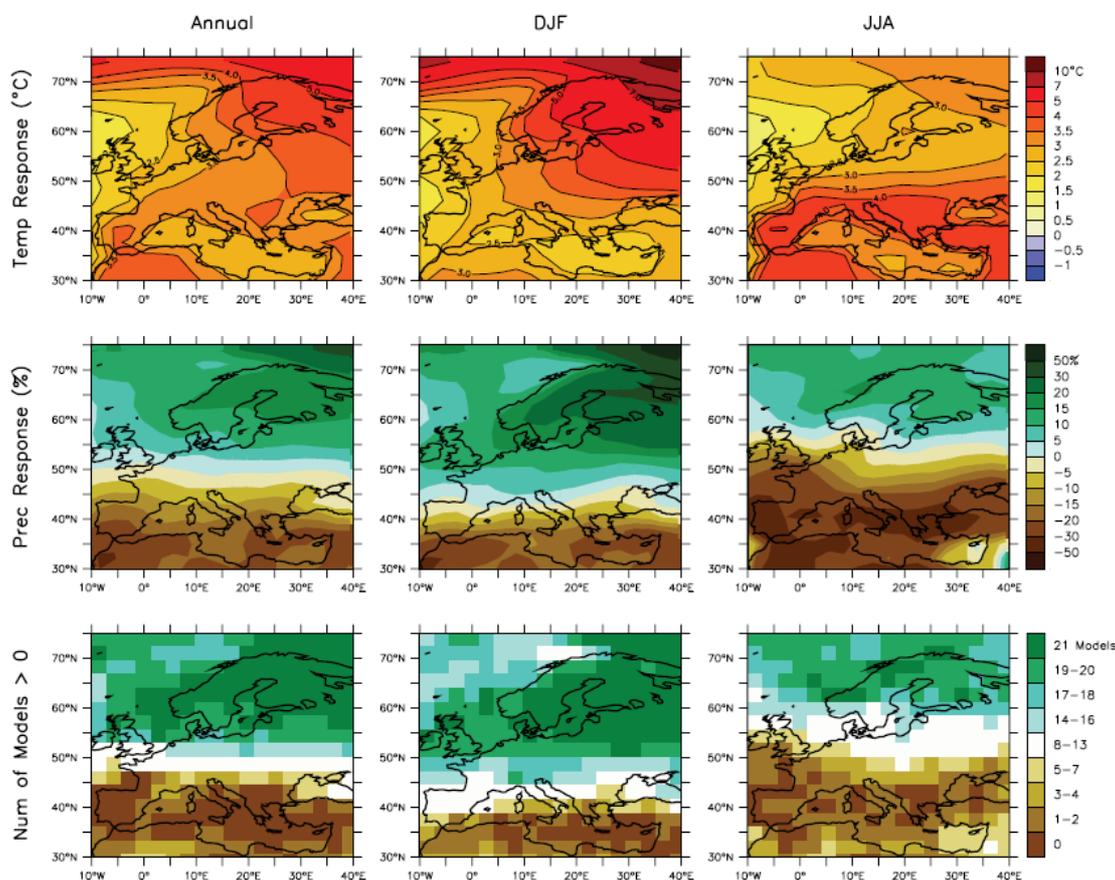


Figure 49 : Carte des évolutions des températures et des précipitations selon 21 GCMs selon le scénario A1B (écarts absolus ou relatifs entre moyennes restituées par les modèles sur la période (1980-1999) et celles projetées par ces modèles sur la période (2080-2099)) et nombre de modèles donnant une augmentation de précipitations (extrait de Christensen et al., 2007)

Parmi les dernières expériences numériques, le projet européen PRUDENCE « Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects » (<http://prudence.dmi.dk/>) a fourni des scénarios à haute résolution pour l'Europe en y associant

leurs incertitudes. Ces projections sont obtenues par désagrégation dynamique des modèles à grande échelle. Une des conclusions est que la situation en température observée en 2003 devrait s'inscrire dans la moyenne des situations de la fin du XXI^{ème} siècle. Les périodes de sécheresse débuteraient plus tôt et dureraient plus longtemps (Beniston *et al.*, 2006). Boé (2007) souligne malgré tout que ces scénarios sont optimistes (Christensen et Christensen, 2007), du fait du forçage préférentiel par un modèle couplé océan-atmosphère de grande échelle très particulier qui favorise des circulations zonales et augmente les précipitations sur la partie Nord de la France. Les projections obtenues suggèrent ainsi une augmentation sensible sur le Nord de la France en hiver qui n'est pas partagée par les simulations de l'IPCC. Douze projections ont été exploitées pour les besoins de l'étude dans les Pyrénées de López-Moreno *et al.* (2008). Il s'agit des sorties de six modèles régionaux sous deux scénarios SRES A2 et B2.

Le secteur d'intérêt est approximativement repéré par l'ellipse en Figure 50. Il recoupe en partie les bassins pyrénéens du bassin de la Garonne à Lamagistère. López-Moreno *et al.* (2008) ont calculé les statistiques de précipitations et de température en fin de XXI^{ème} siècle, en relatif par rapport au temps présent (période 1960/1961–1990) reportées dans le Tableau 12.

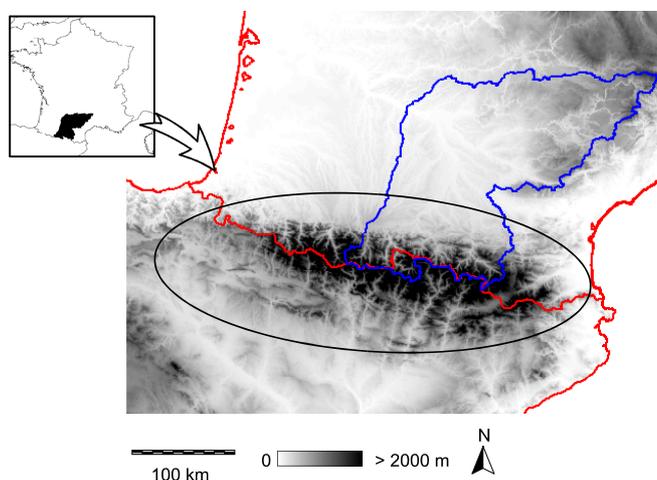


Figure 50 : Délimitation de la zone d'intérêt de López-Moreno *et al.* (2008) – le contour du bassin de la Garonne à Lamagistère est identifié en bleu, les surfaces continentales espagnoles et françaises sont signalées en rouge

		A2			B2					A2			B2		
Saison		Moy	Min	Max	Moy	Min	Max	Saison		Moy	Min	Max	Moy	Min	Max
Ecart de température (°C)	DJF	3.1	2.3	3.5	1.8	0.8	2.7	Evolution relative des précipitations (%)	DJF	1.4	-13.7	9.5	-0.2	-2.4	6.7
	MAM	3	2.8	3.2	1.9	1.4	2.8		MAM	-18.4	-22.6	-13.1	-6.9	-23.2	-0.3
	JJA	5.5	4.9	5.9	4.4	3.6	4.9		JJA	-43.7	-48.4	-38.1	-38.4	-42.7	-31.4
	SON	4.3	4	4.7	2.9	2.3	3.4		SON	-7.1	-15.5	-2.1	-9.3	-27.4	4.6
	Année	4	3.6	4.3	2.8	2.1	3.4		Année	-14.8	-20.1	-10	-10.7	-16	-3.2

Tableau 12 : Evolution moyenne des températures et des précipitations selon douze projections élaborées dans le projet PRUDENCE sur le domaine défini par Figure 50 en fin de XXI^{ème} siècle par comparaison à la période (1960-1990)

Les projections annoncent une réduction des précipitations annuelles d'environ 15% pour les scénarios A2 et de l'ordre de 11% pour les scénarios B2. Les évolutions les plus notables

concernent l'été sous scénario A2 : augmentation des températures de plus de 5°C et réduction des précipitations de l'ordre de 45%.

Enfin, dernièrement, Boé (2007) a développé une nouvelle procédure de descente d'échelle statistique sur la base des types de temps. Cette approche a été utilisée pour construire des projections climatiques en France à partir des simulations de l'AR4 (Meehl *et al.*, 2007). Boé *et al.* (2009) proposent une synthèse des principaux résultats pour le milieu du XXI^{ème} siècle sans distinction de famille SRES. Quatorze sorties des GCMs sont désagrégées et des valeurs représentatives de bassins ont été construites. Les précipitations diminuent entre 10 et 30% en été et en automne sur les quatre grands bassins français (Loire, Seine, Rhône et Garonne). Les scénarios ne s'accordent pas tous sur le signe de la tendance en hiver et au printemps sauf pour la Garonne : pour ce bassin, la tendance à la baisse est marquée (en moyenne 10%).

Il n'est pas aisé de faire des comparaisons. Les scénarios et statistiques associées ont été établis soit pour le milieu de siècle, soit pour la fin de siècle. Nous avons procédé à des comparaisons sur la fin de siècle qui fournit les valeurs extrêmes.

Par rapport aux chiffres annoncés par Boé (2007) en milieu de siècle pour le bassin de la Garonne, nous constatons que les anomalies à l'horizon 2030 sont moins prononcées sur les précipitations. La comparaison des statistiques du Tableau 11 au Tableau 10 (scénarios A1B - 2080) montre que les températures moyennes saisonnières des scénarios construits pour les besoins du projet sont plus élevés en été et en automne que celles sur un domaine plus large défini par les points (30N, 10W) (48N, 40E). En comparant aux évolutions annoncées par (López-Moreno *et al.*, 2008), trois saisons sur les quatre sont plus chaudes et l'automne voit ses précipitations beaucoup plus fortement diminuées selon notre méthode de désagrégation (scénarios A2 - 2080). Les ordres de grandeur sont équivalents.

CONCLUSION

Nous avons, pour les besoins du projet, amélioré une méthode mise en œuvre en Grande Bretagne. Cette approche a bénéficié de la mise à disposition de la réanalyse SAFRAN. Elle est conditionnée par la résolution temporelle des sorties des modèles climatiques. Ici, elle désagrège spatialement les précipitations et températures mensuelles, extraites de la base de données de l'IPCC, en corrigeant les biais des GCMs.

Nous avons préféré multiplier le nombre des GCMs alimentant les scénarios désagrégés, suivant les conseils de Boé *et al.* (2009), plutôt que de décliner le même GCM selon différentes procédures de descente d'échelle. La seule méthode de désagrégation appliquée est celle des perturbations, pour obtenir des valeurs journalières compatibles avec les modèles hydrologiques et les modèles de pression. Il s'agit d'une technique statistique ; elle permet de donner une vision du climat au premier ordre et est moins légitime en extrapolation (fin de siècle) et pour décrire des événements intenses car certainement moins contrôlée/bornée par la physique des processus. Cette approche simple fournit des résultats pas forcément en contradiction avec des méthodes plus sophistiquées (cf. résultats de RExHySS²). Une variante a été introduite en exploitant les opportunités offertes par la méthode de ré-échantillonnage KNN, c'est-à-dire la possibilité de construire plusieurs visions du climat futur sur la base de réalisations possibles du climat passé. Cette déclinaison sera certainement améliorée dans de futurs travaux.

Dans notre application, nous avons pu vérifier que les projections obtenues s'inscrivent dans la gamme des futurs construits dans le cadre de projets de recherche antérieurs au voisinage de

² <http://www.sisyphes.jussieu.fr/~agnes/rexhyss/>

notre périmètre d'étude. Nous avons noté que les climats d'IMAGINE2030 à l'horizon souhaité sont plus chauds et plus secs en automne que ceux récemment publiés dans la littérature scientifique internationale. L'étape suivante est d'alimenter les modèles par ces scénarios.

LE BASSIN A L'EPREUVE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Nous avons donc repris les modèles présentés dans le chapitre « Les outils de simulation » (page 46). Les schémas de fonctionnement sont similaires avec cette fois en entrée des climats perturbés et les écoulements naturels associés (Figure 51).

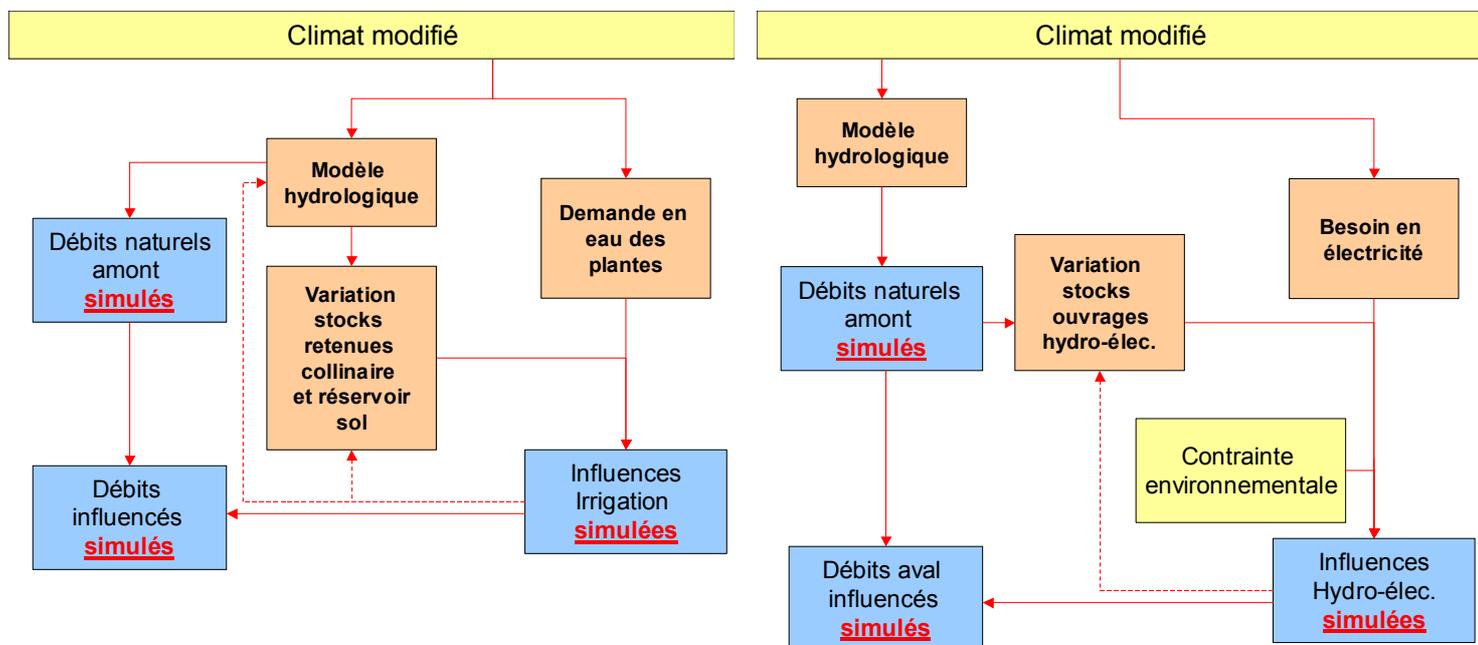


Figure 51 : Modélisation sous changement climatique

LE FACTEUR NEIGE

L'analyse porte sur les sorties de CEQUEAU pour le bassin de l'Ariège à Foix pour les quatre altitudes : 2000 – 1600 - 1250 – 1100 m présentées précédemment (Figure 20, page 49).

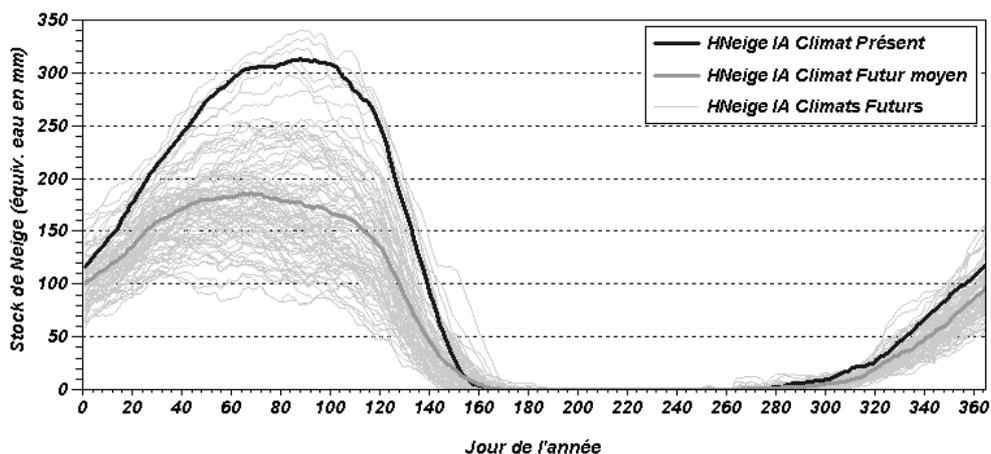


Figure 52 : Stock de neige à 2000 m en climat présent (1975-2005) et climats futurs (2015-2045)

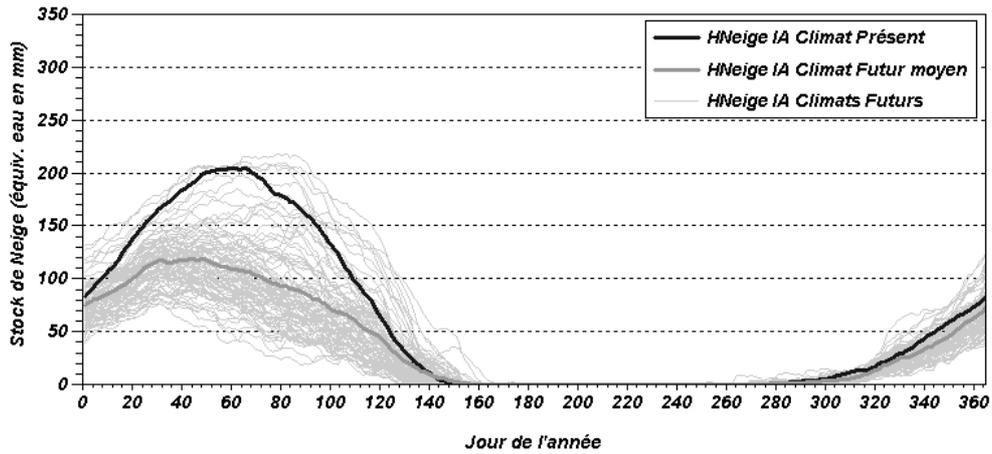


Figure 53 : Stock de neige à 1600 m en climat présent (1975-2005) et climats futurs (2015-2045)

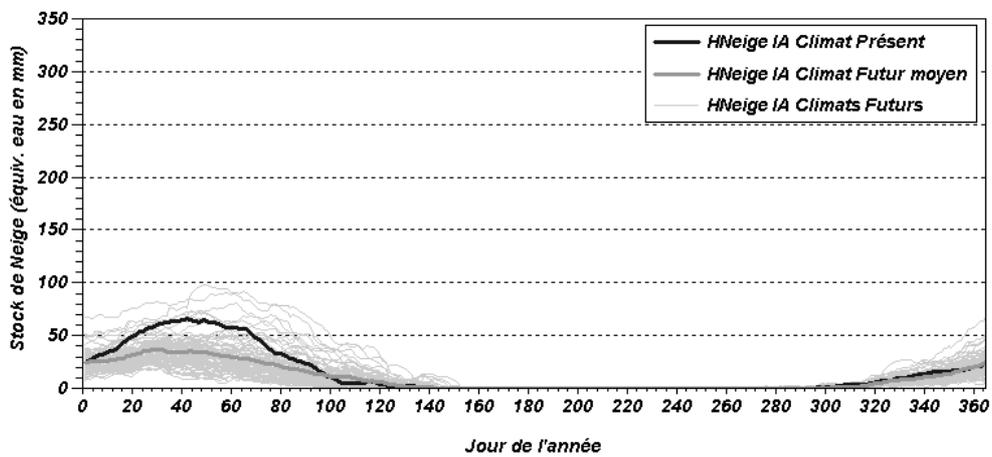


Figure 54 : Stock de neige à 1250 m en climat présent (1975-2005) et climats futurs (2015-2045)

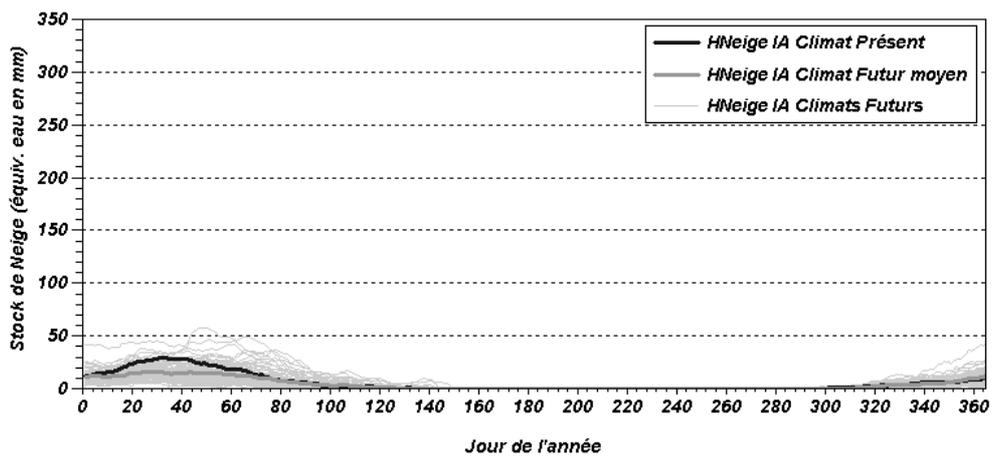


Figure 55 : Stock de neige à 1100 m en climat présent (1975-2005) et climats futurs (2015-2045)

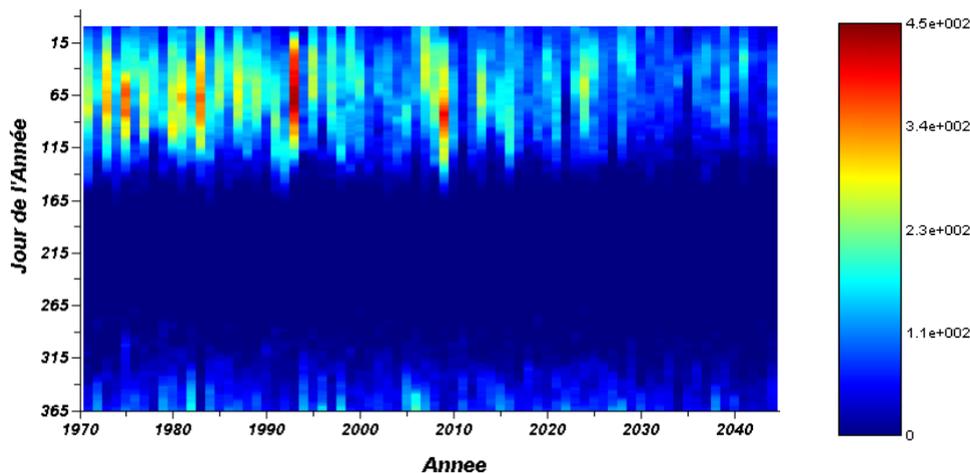


Figure 56 : Présence et stock de neige en moyenne sur les climats futurs possibles (équivalent en eau en mm)

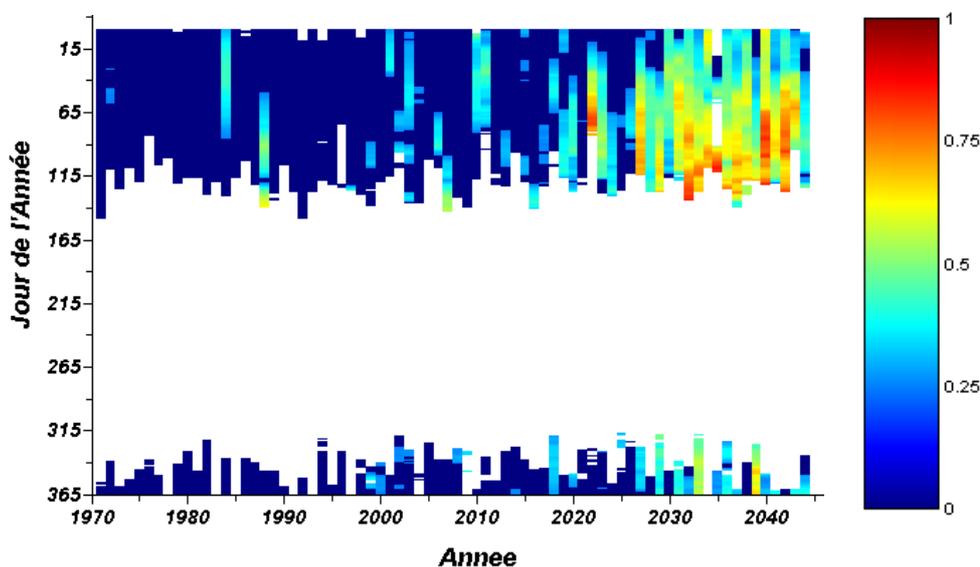


Figure 57 : Réduction en % du stock de neige par rapport à un climat stable à 1600 m d'altitude en moyenne sur tous les climats futurs

En moyenne, le stock maximal sera diminué de l'ordre de 40 % et ce de manière assez homogène sur les différentes tranches d'altitude. Des nuances apparaissent :

- à 2000 m (Figure 52), le maximum d'enneigement est atteint au 70^{ème} jour de l'année à l'horizon 2030 contre 95^{ème} en climat présent : la fonte est donc avancée d'environ 1 mois ;
- à 1600 m (Figure 53), le maximum d'enneigement est atteint au 45^{ème} jour de l'année à l'horizon 2030 contre 65^{ème} en climat présent : la fonte est donc avancée d'environ 20 jours.

D'autres figures relatives à des altitudes plus faibles montrent une même tendance (Figure 54, Figure 55). Globalement, nous observons une réduction du manteau neigeux, avec fonte anticipée de 20 jours à 1 mois en moyenne selon les scénarios et les altitudes. Nous notons une dispersion des résultats autorisant pour certains scénarios la possibilité d'être sur les trajectoires climat actuel : ces scénarios restent peu nombreux (un seul modèle de climat, le modèle GFCM).

La Figure 56 permet de constater la disparition des années avec stock de neige important ainsi que la réduction de la durée de présence de la neige à 1600 m (présence au sol réduite dans une

proportion supérieure à 30 jours). La Figure 57 montre l'intensité de la réduction du stock de neige / climat présent : à partir de 2025 la réduction s'intensifie (souvent supérieure à 50 % en premier lieu sur le mois de mars et éventuellement sur celui de février).

RESSOURCE NATURELLE

La réponse hydrologique au changement climatique est caractérisée par les variables descriptives des étiages calculées sur des fenêtres glissantes de 20 ans : le débit annuel QA , le débit saisonnier juin-juillet-août moyen ($QJJA$), le débit saisonnier septembre-octobre-novembre moyen ($QSON$) ; le débit $Q90$ extrait de la courbe des débits classés (valeur dépassée 90% du temps) ; le débit mensuel minimal annuel de fréquence quinquennale sèche ($QMNA5$) et la fiabilité définie par rapport à un seuil de débit X_s , qui est la proportion de valeurs observées dans la chronique au-dessus de ce seuil X_s . Nous avons fixé X_s aux valeurs de $QMNA5$, calculées par les modèles hydrologiques alimentés par les forçages issus de SAFRAN. En France, la fiabilité avec $X_s = QMNA5$ évolue entre 95% et 99%, c'est-à-dire que le débit est supérieur au $QMNA5$ entre 95% et 99% du temps selon le bassin. Les projections climatiques à l'horizon 2030 différant peu selon le scénario SRES, nous les avons regroupées dans notre analyse. Les écarts sont mesurés par rapport aux débits de référence obtenus par les modèles hydrologiques forcés par SAFRAN ; nous mesurons ainsi les réponses hydrologiques sous changement climatique, en occultant les biais de modélisation.

Les deux modèles hydrologiques alimentés par les projections s'accordent sur une réduction progressive des apports annuels et des débits caractéristiques des étiages. Le débit annuel chute en moyenne de 11% pour CEQUEAU et de 18% pour GR4J. Les écoulements estivaux sont diminués du fait d'une évapotranspiration accrue. S'ajoutent les effets d'une fonte de la neige plus précoce sur les bassins de montagne. Sur les bassins pyrénéens, la réduction est plus prononcée que celle sur le QA . Sur les bassins méditerranéens, les évolutions sur le $QSON$ sont plus marquées que sur le $QJJA$, conséquence d'un allongement des étiages et de recharge retardée. Cette tendance globale est partagée par les modèles. Cependant, des réponses hydrologiques distinctes sont perceptibles du fait de la grande variabilité des scénarios et des structures différentes des modèles pluie-débit. La dispersion des courbes des Figures 3 et 4 et l'intervalle interquartile des Tableaux 2 et 3 le montrent.

Bassin	ΔQA (%)			$\Delta QJJA$ (%)			$\Delta QSON$ (%)			$\Delta Q90$ (%)			$\Delta QMNA5$ (%)			Δ Fiabilité (jour)		
La Garonne à Valentine	-20	-12	-9	-38	-29	-22	-30	-21	-13	-44	-41	-37	-57	-52	-46	-65	-57	-50
Le Salat à Roquefort-sur-Garonne	-17	-9	-5	-24	-14	-5	-26	-14	-7	-34	-30	-26	-40	-37	-31	-60	-51	-41
L'Ariège à Foix	-20	-13	-8	-40	-32	-22	-26	-19	-11	-44	-40	-36	-53	-49	-44	-69	-60	-29
La Garonne à Portet-sur-Garonne	-20	-11	-7	-33	-24	-15	-27	-16	-10	-43	-39	-35	-52	-49	-44	-69	-61	-52
Le Tarn à Millau	-18	-8	0	-23	-7	4	-31	-17	-8	-46	-37	-30	-47	-39	-28	-50	-34	-26
L'Agout à Lavar	-18	-9	-2	-23	-8	7	-31	-14	-1	-61	-54	-43	-69	-61	-52	-38	-31	-22
Le Tarn à Villemur-sur-Tarn	-17	-10	-1	-21	-6	11	-31	-16	1	-40	-34	-27	-42	-33	-26	-53	-43	-31
L'Aveyron à Loubéjac	-21	-14	-4	-14	2	19	-30	-12	12	-37	-24	-18	-39	-29	-22	-67	-44	31
La Garonne à Lamagistère	-19	-11	-4	-26	-17	-8	-28	-15	-3	-40	-34	-31	-46	-42	-37	-70	-57	-49

Tableau 13 : Évolution des débits de référence pour l'horizon 2030 selon différentes projections climatiques – Modèle hydrologique CEQUEAU (les chiffres en gras sont les médianes ; les chiffres de part et d'autre de la valeur centrale définissent l'intervalle interquartile)

Bassin	ΔQA (%)			ΔQJJA (%)			ΔQSON (%)			ΔQ90 (%)			ΔQMNA5 (%)			ΔFiabilité (jour)		
La Garonne à Valentine	-25	-17	-12	-40	-32	-23	-37	-31	-23	-69	-64	-61	-61	-58	-52	-88	-77	-68
Le Salat à Roquefort-sur-Garonne	-27	-19	-14	-45	-36	-26	-42	-33	-26	-72	-67	-63	-70	-66	-61	-83	-72	-64
L'Ariège à Foix	-24	-16	-10	-46	-38	-29	-39	-32	-19	-63	-60	-54	-67	-63	-58	-90	-81	-70
La Garonne à Portet-sur-Garonne	-29	-20	-14	-46	-36	-27	-42	-36	-27	-67	-60	-56	-70	-66	-61	-98	-87	-77
Le Tarn à Millau	-31	-20	-12	-32	-19	-2	-48	-36	-25	-74	-68	-62	-59	-51	-40	-67	-45	-35
L'Agout à Lavaur	-21	-13	-6	-29	-12	2	-36	-23	-2	-37	-31	-24	-46	-42	-34	-57	-47	-35
Le Tarn à Villemur-sur-Tarn	-28	-19	-11	-33	-16	-2	-47	-37	-16	-72	-67	-62	-58	-52	-43	-67	-51	-40
L'Aveyron à Loubéjac	-18	-10	1	-28	-5	17	-38	-21	2	-79	-75	-71	-56	-48	-39	-52	-40	-29
La Garonne à Lamagistère	-37	-28	-18	-39	-26	-15	-51	-43	-30	-77	-71	-67	-69	-64	-57	-94	-78	-62

Tableau 14 : Comme pour le Tableau 2, mais avec le modèle hydrologique GR4J

Les baisses sur le *QJJA* pour un bassin donné sont sensiblement équivalentes d'un modèle à l'autre. Nous retrouvons une réponse spatiale différenciée pour cette variable. Les plus fortes diminutions sont observées sur les bassins de tête pyrénéens (en moyenne proche de 25%). Les bassins sous influence méditerranéenne semblent moins impactés. La réduction médiane sur *QJJA* est de 11% pour CEQUEAU et de 26% pour GR4J. GR4J suggère de manière générale des évolutions plus conséquentes : ainsi, *Q90* et *QMNA5* sont diminués respectivement de 67% et de 58% pour GR4J contre respectivement 37% et 42% pour CEQUEAU. Les écoulements moyens d'automne sont également diminués, du fait d'étiages prolongés (perceptible sur la fiabilité). Nous notons moins de différence entre les bassins que sur *QJJA* : GR4J propose une baisse plus importante que CEQUEAU (33% contre 16%). Sous climat présent, le *QMNA5* est dépassé 95% du temps, soit en moyenne 18 jours. Les résultats des modélisations montrent que la fiabilité (le nombre de jours avec le seuil défini par *QMNA5* actuel) augmente significativement (en médiane entre 31 et 87 jours). En considérant le *QMNA5* actuel comme valeur seuil déclencheur de restrictions à l'horizon 2030, le changement climatique induirait une fréquence accrue des épisodes critiques pour la gestion de la ressource et poserait de manière récurrente la question du partage de l'eau. Les différences sur les écarts relatifs de débit doivent être nuancées. Elles s'expliquent en partie par des étiages peu soutenus par GR4J sous climat actuel (cf. Figure 37, page 69). Dès lors qu'on exprime les changements en relatif, un même écart de débit proposé par deux modèles peut se transformer en variations relatives bien distinctes.

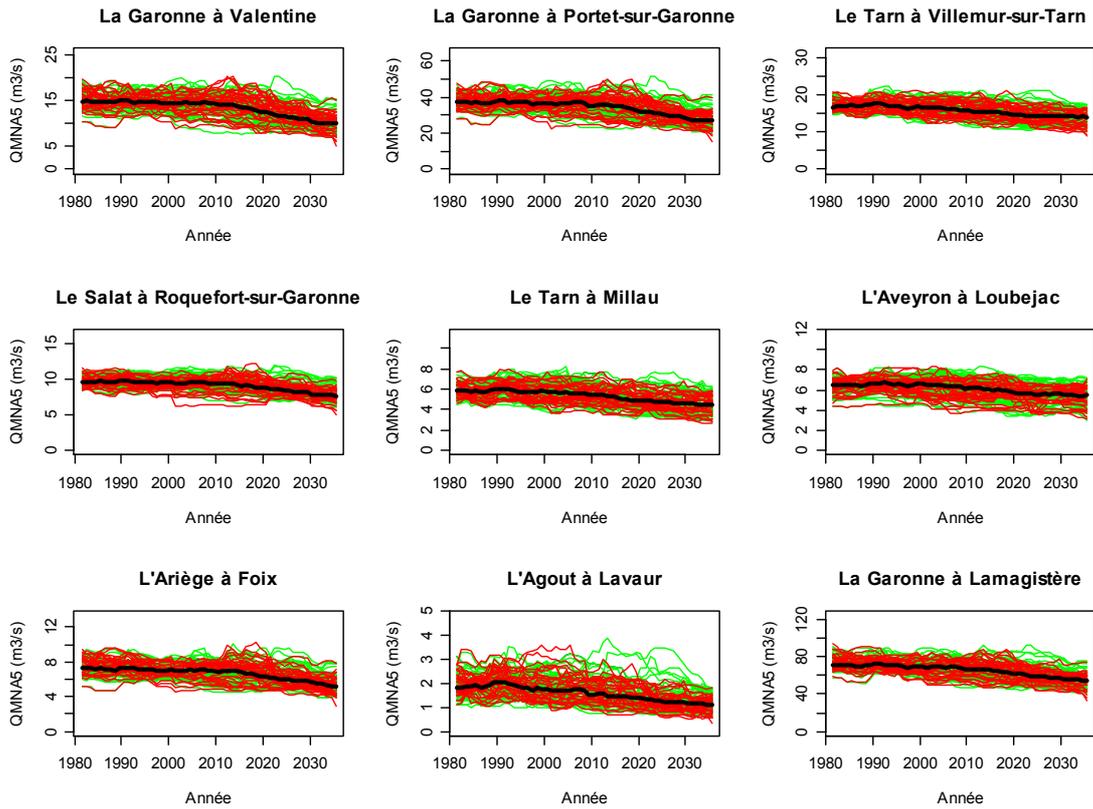


Figure 58 : Évolution du QMNA5 aux neuf stations dans une configuration naturelle – Moyenne mobile sur 20 ans, avec en rouge pour A2 et en vert pour A1B, modèle hydrologique CEQUEAU

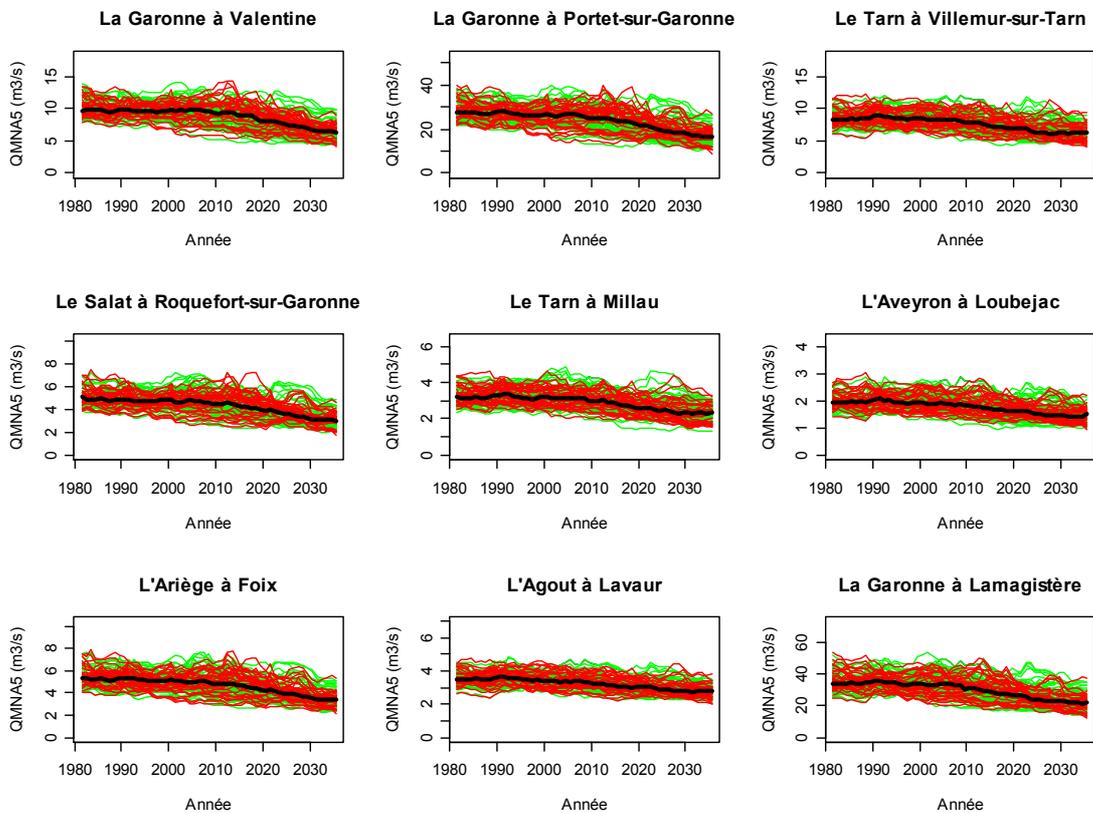


Figure 59 : Comme pour la Figure 58, mais avec le modèle hydrologique GR4J

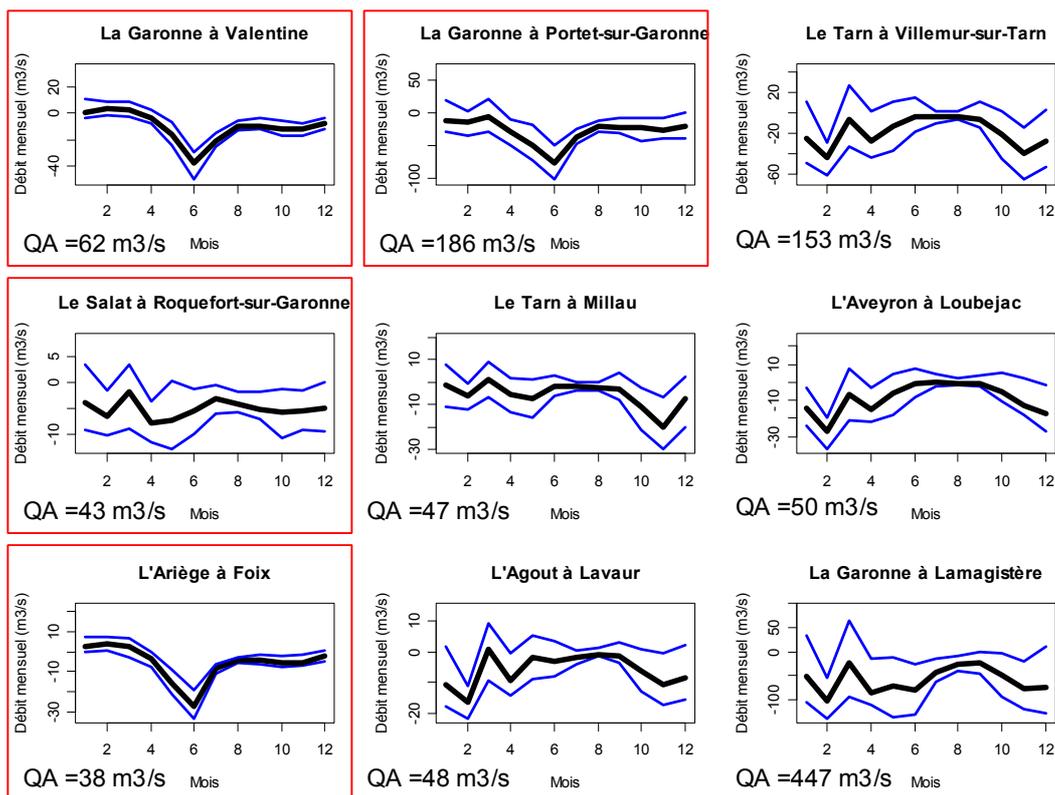


Figure 60 : Anomalie de débit mensuel (en bleu 1er et 3^{ème} quartile, en noir médiane tout scénario confondu), modèle hydrologique CEQUEAU (indication du module actuel en m³/s)

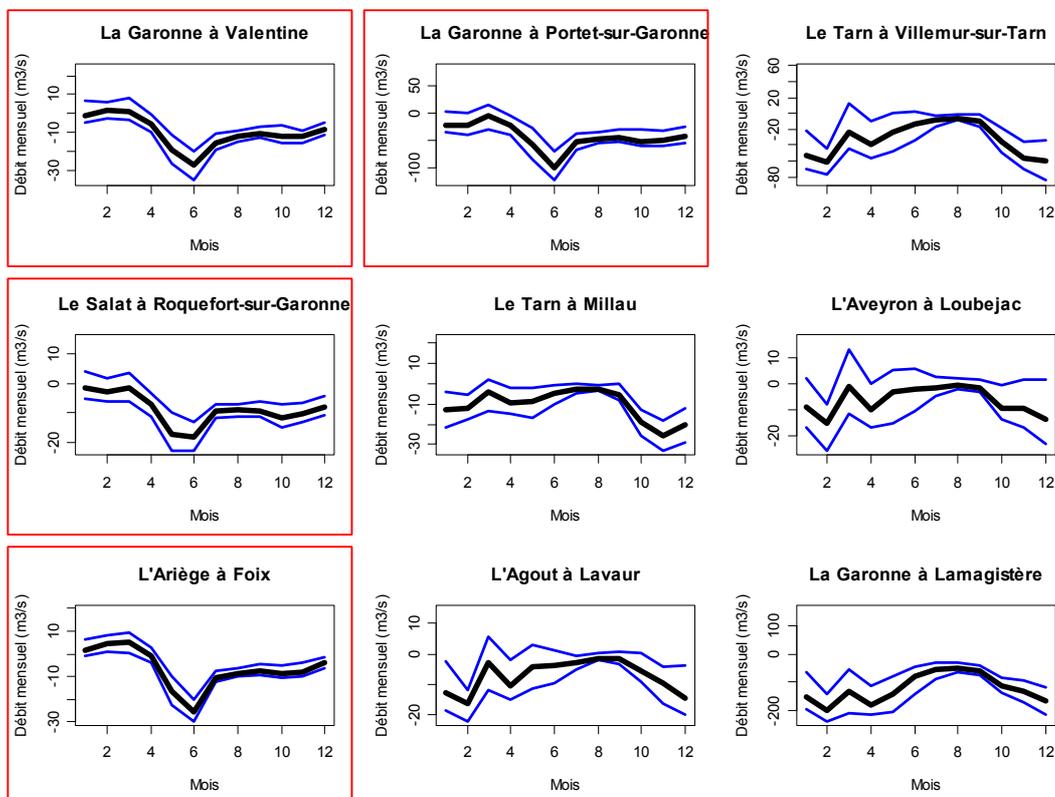


Figure 61 : Comme pour la Figure 60, mais avec le modèle hydrologique GR4

La Figure 59 et la Figure 60 offrent une autre vision des résultats, en faisant apparaître les anomalies des débits mensuels. Sur ces graphiques, nous avons entouré les bassins à composante nivale. Nous identifions clairement une chute des débits mensuels en juin. Les écoulements de fonte sont fortement diminués tandis que ceux attendus en hiver sont plus stables (diminution des précipitations mais ces dernières se font sous forme liquide). Notons que cette réduction est moins prononcée sur le Salat à Roquefort selon CEQUEAU. Sur les autres bassins, les évolutions sont les plus sensibles en hautes eaux et les incertitudes (mesurées par les deux courbes bleues) varient dans l'année (fortes en hiver et réduites en été, du fait d'une limite physique à zéro et d'été prononcée). Il faut noter que les deux modèles suggèrent les mêmes tendances sur ces deux types de régime (avec des intensités différentes). La réponse de la Garonne à Lamagistère est la résultante de la combinaison des évolutions des grands affluents, de ce fait son anomalie n'appartient ni à la catégorie des bassins pyrénéens ni à celle à dominante pluviale. Elle se situe entre les deux.

IMPACT COMBINÉ DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET DES ACTIONS HUMAINES

Évolution de l'hydroélectricité

Nous avons ensuite exploité les scénarios climatiques futurs. CEQUEAU et GR4J fournissent les débits naturels sous changement climatique. Les débits influencés sont obtenus à partir du même modèle de gestion alimenté par une chronique de température journalière France entière simulée au même horizon et cohérente avec la situation météorologique du jour sur le bassin de la Garonne. La Figure 62 montre d'une part la diminution du pic de fonte en juin et un écart aux débits naturels moindre que dans la situation actuelle.

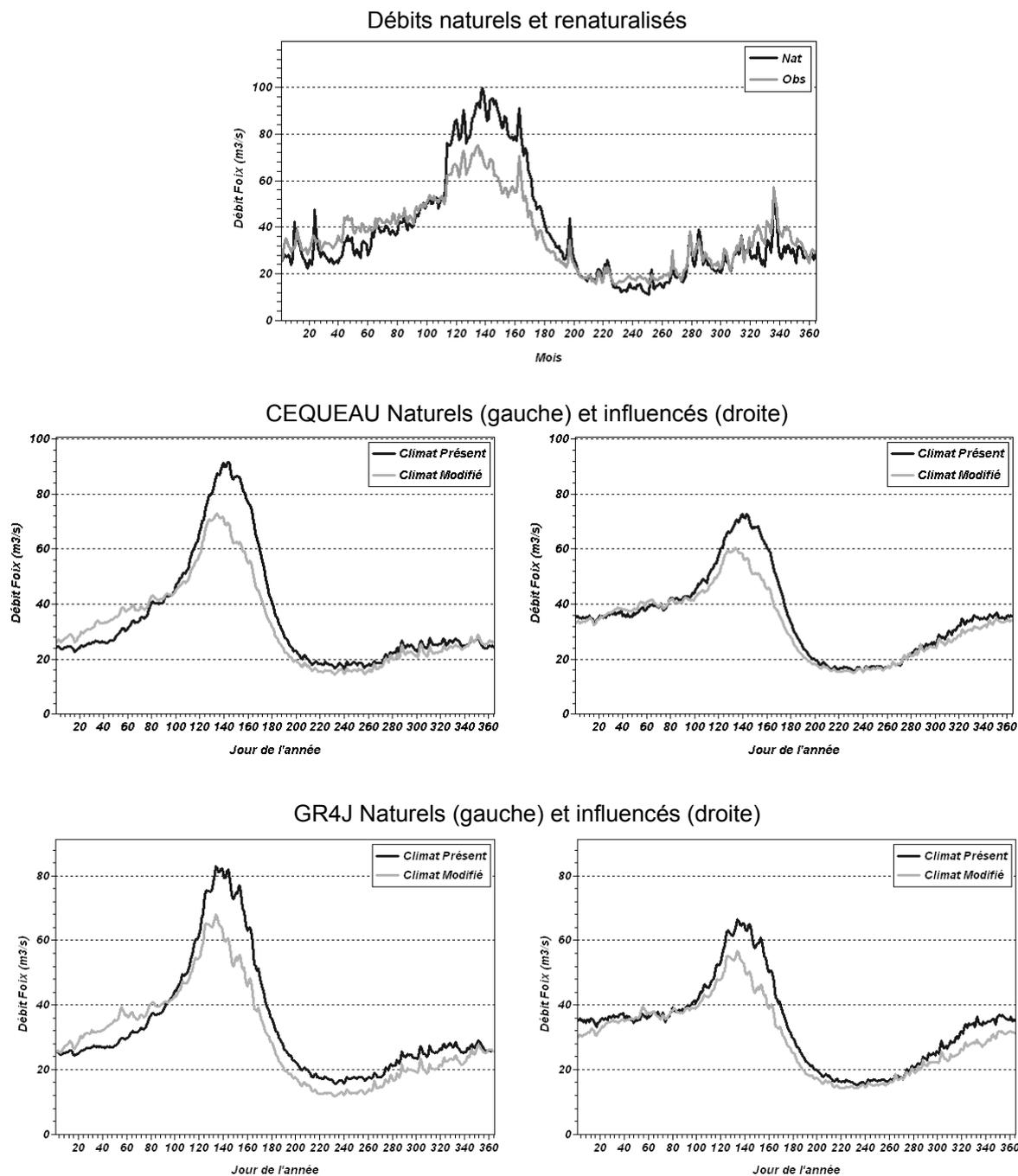


Figure 62 : Régimes hydrologiques naturels reconstitués et influencés de l'Ariège à Foix (temps présent et horizon 2030, tout scénario confondu)

En complément, nous avons tracé l'évolution moyenne du volume de remplissage de la réserve agrégée (Figure 63). Les trajectoires varient selon le scénario climatique envisagé. Les résultats suggèrent la nécessité d'un remplissage printanier plus précoce de la réserve pour assurer des débits estivaux suffisants tout en permettant de disposer d'un stock énergétique en entrée d'hiver. L'amplitude des variations en hiver plus faible à l'horizon 2030 qu'actuellement laisse entendre une moindre valorisation énergétique, double conséquence de la baisse du débit annuel et de sollicitations estivales accrues.

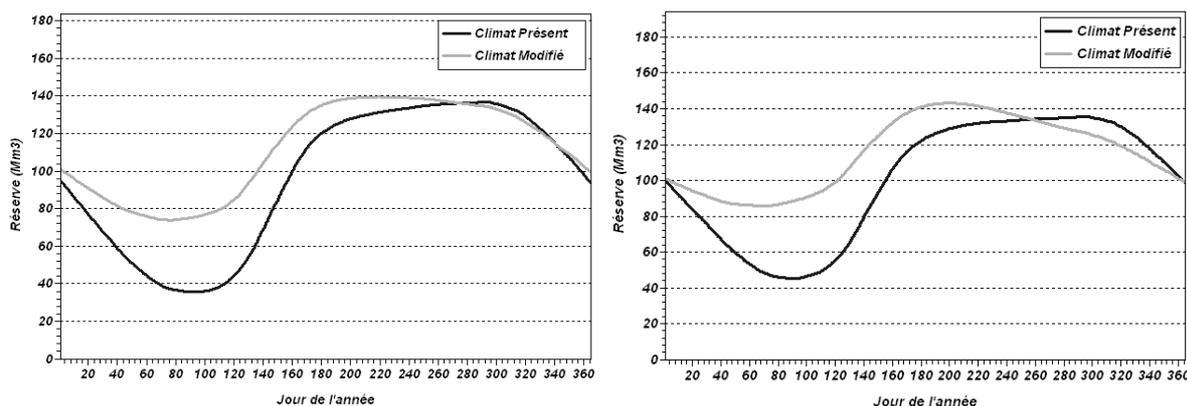


Figure 63 : Trajectoire moyenne de la macro réserve en amont de Foix à l'horizon (—) et sous climat présent (—) (à gauche CEQUEAU ; à droite GR4J) selon le jour de l'année (1 : 01/01 – 365 :31/12)

Évolution de l'irrigation

Le modèle agronomique a été utilisé pour estimer le demande future en eau d'irrigation pour les différents scénarios climatiques.

La Figure 70 compare l'évolution intra annuelle du besoin en eau du maïs sur le bassin de Lamagistère obtenue pour les scénarios climat présent et climat futur (moyenne 2015-2045) et lors de la validation du modèle (moyenne années 1971-2005).

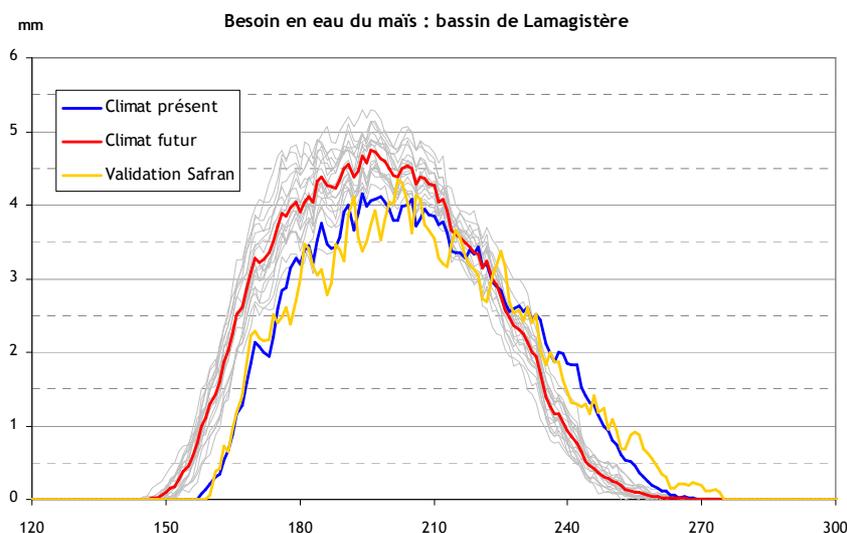


Figure 64 : Besoin en eau du maïs sur le bassin de Lamagistère (moyenne 2015-2045) en fonction du jour de l'année (1 : 1^{er} janvier – 365 : 31 décembre)

Les résultats montrent une augmentation moyenne des besoins en eau d'un peu plus de 10%. Du fait de l'augmentation des températures, le besoin en eau se fait sentir plus tôt, environ une dizaine de jours.

Les figures suivantes montrent l'évolution intra annuelle des besoins en eau et de l'indice de satisfaction des besoins de la culture (évapotranspiration réelle – évapotranspiration maximum, ETR/ETM) qui donne une indication de l'intensité de la sécheresse subie par la culture.

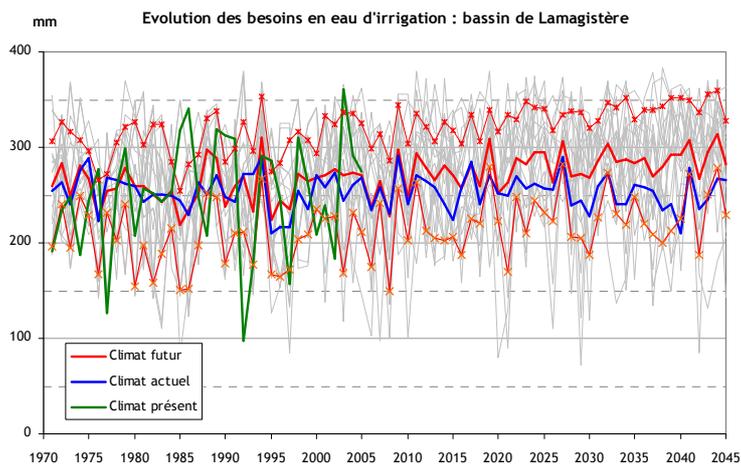


Figure 61 : Evolution du besoin en irrigation du maïs sur le bassin de Lamagistère entre 1971 et 2045 (en trait fin rouge, l'intervalle de confiance à 70% des scénarios climat futur)

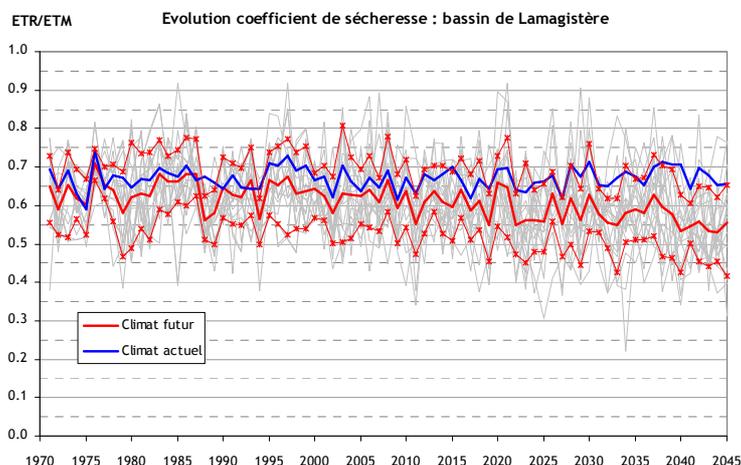


Figure 62 : Evolution de l'indice de sécheresse du maïs sur le bassin de Lamagistère entre 1971 et 2045 (en trait fin rouge, l'intervalle de confiance à 70% des scénarios climat futur).

Sous climat actuel, le besoin annuel en eau d'irrigation est en moyenne de 250 mm. Les scénarios de changement climatique induisent une augmentation sensible du besoin principalement après 2010. A l'horizon 2030, le besoin en eau est de 280 mm (moyenne de tous les scénarios), soit une augmentation de 12%. Parallèlement, l'indice de satisfaction ETR/ETM passe de 0.67 à 0.60, soit une diminution de 10%.

Pour finir, un cas test a été réalisé afin d'estimer l'évolution des prélèvements en eau sur le bassin amont de Lamagistère et leur impact sur les débits. Ce cas test a pour objectif de donner une indication sur l'incidence des prélèvements effectués par les usages sur la ressource. On suppose que l'eau non consommée va alimenter les écoulements de surface. Les ratios consommation sur prélèvement sont identiques à ceux utilisés précédemment : 100% pour l'irrigation, 25% pour l'AEP, 7% pour l'industrie et 1.5 m³/s pour le CNPE de Golfech.

Plusieurs hypothèses ont été faites :

- Pour les prélèvements agricoles, nous avons considéré l'évolution « réelle » de la surface irriguée entre 1970 et 2007 puis une baisse de cette surface d'environ 20% à l'horizon 2015. Cette baisse est justifiée par les nouvelles modalités de la PAC qui réduit le

différentiel d'aide par hectare en cultures irriguées et cultures non irriguées. D'après le MEEDDM et la CACG, cette modification devrait entraîner une réduction de la surface irriguée de 20% dans les prochaines années. De plus, un ratio apport en eau sur besoin en eau du maïs qui représente l'intensité de l'irrigation par rapport à la demande théorique est utilisé. Ce ratio intègre de façon globale le comportement des agriculteurs, le niveau d'équipement et les restrictions éventuelles. Les coefficients utilisés sont ceux ayant servi au calage du modèle agronomique (cf. « Méthode 2 : Représentation du besoin en eau à partir des approches agronomiques », page 59) et varient de 40 et 75% selon les sous-bassins considérés. La Figure 65 présente l'évolution des prélèvements pour l'irrigation dans le bassin à l'amont de Lamagistère (en trait fin, l'intervalle de confiance à 70%).

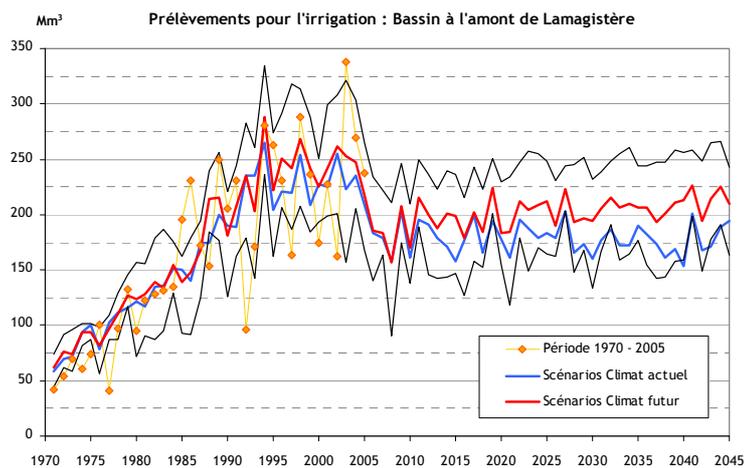


Figure 65 : Evolution des prélèvements pour l'irrigation sur le bassin de la Garonne à Lamagistère

- Pour l'AEP, on a considéré une croissance de la population d'environ 0.8% par an, croissance qui est celle estimée par l'INSEE pour la région Midi-Pyrénées. Cette croissance est différenciée selon les bassins. Les prélèvements en eau sont obtenus à partir des prélèvements unitaires (prélèvements par an et par habitants) de 2007 des différents sous-bassins.
- Les autres demandes en eau (industries et production d'électricité de Golfech) sont supposées constantes après 2005.

La Figure 66 illustre les résultats de cette application.

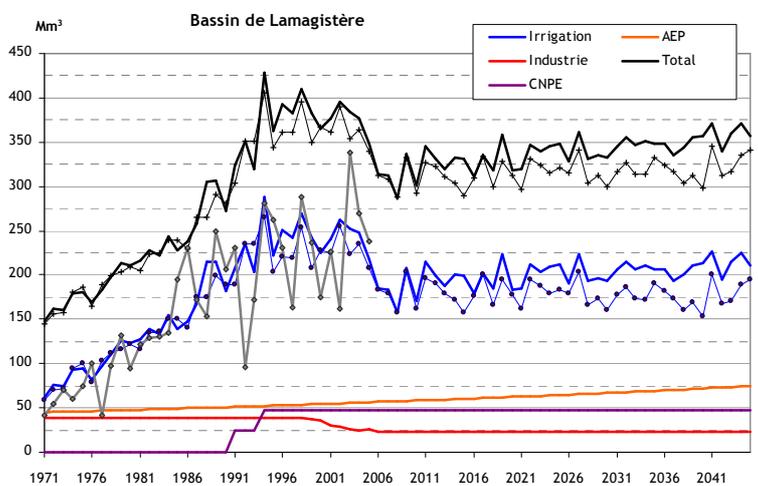


Figure 66 : Cas test - évolution des consommations

En gras, les demandes en eau sous scénario de changement climatique. En trait fin, les demandes sous climat actuel. En trait gris, la demande en eau d'irrigation obtenue avec les données climatiques 1970 – 2005.

Rappel : dans notre cas test, seule la demande pour l'irrigation est affectée par le changement climatique.

La Figure 67 et la Figure 68 montrent l'incidence des prélèvements / consommations sur le débit à Lamagistère (principalement des étiages plus précoces et plus étendus, plus accentués).

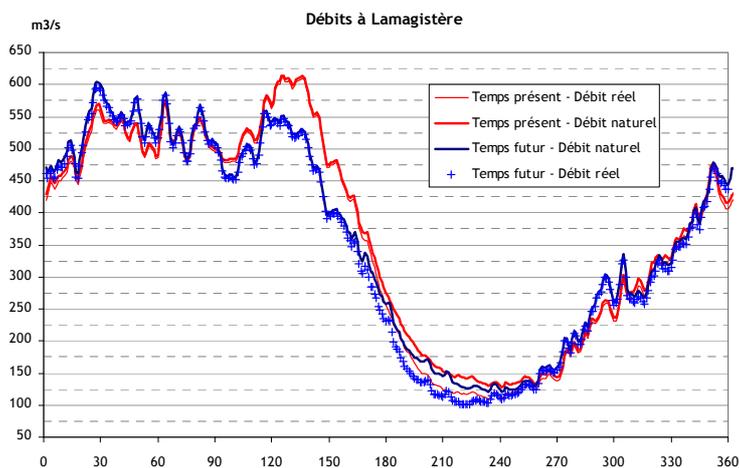


Figure 67 : Débits à Lamagistère

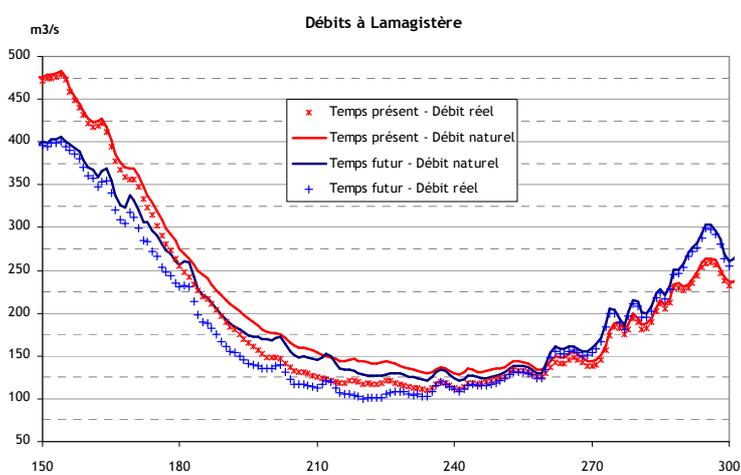


Figure 68 : Débits à Lamagistère (zoom sur la période d'étiage)

DISCUSSION ET POSITIONNEMENT PAR RAPPORT AUX ETUDES ANTERIEURES

Evolution du manteau neigeux et de la ressource naturelle

Le facteur neige

Les études de référence les plus pertinentes sont celles de Boé (2007) et de López-Moreno *et al.* (2009) qui ont examiné les modifications de la couverture neigeuse sur les Pyrénées.

La Figure 69, extraite de la thèse de Boé (2007), montre la diminution notable de l'épaisseur du manteau en milieu de siècle pour toutes les tranches d'altitude. Le maximum de l'enneigement est moins prononcé (réduction de plus de 50% pour des altitudes inférieures à 2000 mètres) et décalé dans le temps (plus précoce d'un mois très sensible sur les altitudes les plus élevées : au mois d'avril sous climat présent et au mois de mars sur la période 2046-2065), la durée est réduite de près de deux mois. Globalement, une plus forte sensibilité aux évolutions du climat se manifeste aux altitudes faibles.

López-Moreno *et al.* (2009) s'appuient sur les sorties d'un seul RCM pour reconstituer et prédire l'évolution du manteau à l'aide d'un modèle de neige en 20 points localisés dans les Pyrénées ou dans leur voisinage immédiat. Les résultats sont présentés par tranche altitudinale (1500, 2000, 2500 et 3000 m). Les forçages sont issus du projet PRUDENCE. La couverture neigeuse est fortement impactée par l'évolution du climat, en particulier aux faibles altitudes. Les conclusions rejoignent celles de Boé (2007) : sur les vingt points modélisés, réduction de 78% de la durée d'enneigement à 1500 m (10% à 3000 m) et de 70% l'épaisseur maximale (11% à 3000 m) sous scénario A2 en fin de siècle et réduction de 44% de la durée d'enneigement à 1500 m (11% à 3000 m) et de 32% l'épaisseur maximale (5% à 3000 m) sous scénario B2 en fin de siècle. Les impacts sont les plus prononcés dans les parties centrale et orientale des Pyrénées (versant espagnol). Ces résultats sont potentiellement optimistes : les auteurs se sont appuyés sur les projections du RCM HIRHAM fournies par le Danish Meteorological Institute, qui prévoient la plus importante hausse des précipitations en hiver et les réductions les plus faibles sur les autres saisons (López-Moreno *et al.*, 2008).

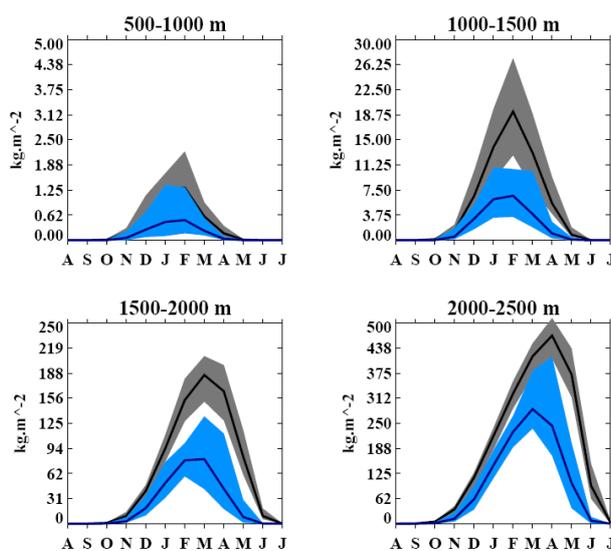


Figure 69 : Evolution saisonnière du manteau neigeux par tranches d'altitude de 500 m pour le climat présent (1970-1999, en gris et noir) et en milieu de siècle (2046-2065 en bleu clair et bleu foncé). La zone colorée est délimitée par les valeurs maximales et minimales des 14 modèles, les traits épais sont les moyennes d'ensemble (extrait de Boé (2007))

La ressource naturelle

Un grand nombre d'études de modification du régime hydrologique existe (Tableau 15). Des projets sont actuellement en cours sur la Loire, sur la Meuse et sur la Drôme. Ils explorent pour partie la réponse du bassin sous changement climatique et les impacts attendus sur la qualité de l'eau (HydroQual), sur le régime des crues (AMICE) et sur la biologie (Créateurs de Drôme).

<i>Bassin</i>	<i>Référence</i>	<i>Nombre de modèles hydrologiques</i>	<i>Nombre de forçages climatiques</i>
Seine (GICC-Seine)	Ducharne <i>et al.</i> (2004)	2	12
Seine et Somme (RExHySS)	Ducharne <i>et al.</i> (2009)	7	21
Rhône (GICC-Rhône)	Hendrickx (2001) Leblois <i>et al.</i> (2004)	5	6
Rhône (RDT)	Sauquet <i>et al.</i> (2008a)	1	19
Loire	Dupeyrat et Bertier (2006)	1	6
Garonne	Caballero <i>et al.</i> (2007)	1	7
France	Boé (2007)	1	37
Meuse	De Wit <i>et al.</i> (2007)	1	9
Loire (HydroQual)	Moatar <i>et al.</i> (en cours)	2	?
Drôme (Créateurs de Drôme)	Bouleau <i>et al.</i> (en cours)	1	> 19
Meuse (AMICE)	Droque <i>et al.</i> (en cours)	?	?

Tableau 15 : Synthèse des études sur les grands bassins français

Nous évoquons ici les principaux résultats des études régionales récentes réalisées sur les grands bassins versants français.

L'expérience GEWEX-Rhône et son prolongement dans le cadre du programme « Gestion des Impacts du Changement Climatique » du MEDD (GICC) mettent en évidence un contraste saisissant entre le Nord du bassin du Rhône qui voit ses écoulements annuels amplifiés tandis qu'au sud, les débits annuels sont réduits jusqu'à - 40% sur le bassin de l'Ardèche (Leblois *et al.*, 2004). Ces conclusions doivent être relativisées compte tenu de la faible capacité des modèles à reconstituer les étiages du passé. Cette étude est une des premières à réunir des scientifiques de divers horizons (hydrologie, météorologie, biologie) pour mesurer les impacts des évolutions du climat. Compte tenu des faiblesses des modèles exploités dans GICC-Rhône en reconstitution des débits des basses eaux, d'autres modèles de transformation pluie-débit ont été mis en œuvre pour examiner les étiages de trois affluents du Rhône en exploitant les résultats de l'IPCC (2001) dans le cadre du premier APR RDT (Sauquet *et al.*, 2008).

Sur le bassin Adour Garonne, l'Agence de l'Eau en collaboration avec le CNRM a engagé une réflexion prospective sur les étiages sous changement climatique (Caballero *et al.*, 2007). Une réduction de 11% des débits d'étiage est annoncée à horizon 2050, conséquence d'une diminution des précipitations et d'une augmentation des températures de l'air marquée en été. Cette diminution est faible car les évolutions du climat en été, pénalisantes pour la ressource, sont partiellement compensées en début d'été par des pluies plus importantes en hiver. Pour le reste, on note une réduction des débits automnaux et printaniers et une augmentation des débits d'hiver. Ce comportement est lié à la fois à des précipitations d'hiver accrues, à une contribution neigeuse atténuée et à un décalage de la période de fonte. Comme pour le Rhône, la couverture neigeuse est fortement impactée par la hausse des températures avec une réduction de 50% de la hauteur des neiges et de la durée de l'enneigement. Les stocks de neige étant plus faibles, le soutien des débits n'est plus assuré. Une autre conséquence est une période d'étiage plus longue et plus précoce dans l'année. Deux bassins (l'Ariège à Foix et de l'Adour à Aire) illustrent les différentes réponses selon le régime hydrologique actuel et les incertitudes autour des principaux impacts.

L'étude GICC-Seine a examiné le fonctionnement hydrologique et la qualité biogéochimique du bassin de la Seine soumis à des changements anthropiques directs (évolution des pratiques

agricoles et des rejets ponctuels dans les cours d'eau) et indirects (changement climatique). Les résultats ont montré que le changement climatique entraîne une intensification des contrastes saisonniers avec une diminution des débits d'étiages affirmée par tous les modèles.

Ces premières études ont bien entendu quelques points communs :

- la démarche classique d'étude d'impact (calage de modèles sous climat présent et utilisation avec des forçages météorologiques perturbés) ;
- la démarche de construction la plus simple des projections climatiques, la méthode dite « des perturbations » (Xu, 1999) ;
- l'usage des sorties de modèles climatiques disponibles à l'époque.

Les conclusions obtenues sont certainement à nuancer du fait de nouvelles générations de modèles climatiques. Les études les plus récentes ont pu bénéficier également des derniers développements en matière de descente d'échelle (Ducharne *et al.* (2009) dans le cadre de RExHySS, Boé (2007)).

La tendance identifiée sur la Seine lors du projet GICC-Seine est confirmée par les nouveaux exercices réalisés dans le cadre du projet RExHySS (Ducharne *et al.*, 2009). La variable $QMNA5$ présente une évolution à la baisse au cours du siècle sur tous les bassins avec cependant des nuances locales. A l'horizon 2080-2100, la réduction du $QMNA5$ de la Seine à Paris serait de l'ordre de 30% quel que soit le modèle hydrologique (si on exclut un des modèles CLSM, considéré comme horsain), les prévisions les plus pessimistes affichent une réduction de -45% (elles concernent un des scénarios A2). L'évolution de la Seine à Paris sur les $QMNA5$ est similaire à celle observée sur le débit annuel moyen : il n'y a pas d'amplification nette sur les étiages sévères.

Sur la base des simulations obtenues par le modèle SIM alimenté par 14 scénarios désagrégés de l'IPCC, Boé *et al.* (2009) suggèrent des diminutions des débits généralisées en été et en automne, comprises entre 20% et 45%, au milieu du XXI^{ème} siècle, dans une configuration naturelle. La diminution en hiver est la plus appuyée sur la Garonne à son exutoire (par comparaison avec les réponses attendues des autres grands bassins français), conséquence d'une réduction significative des précipitations (en moyenne de l'ordre de 10%).

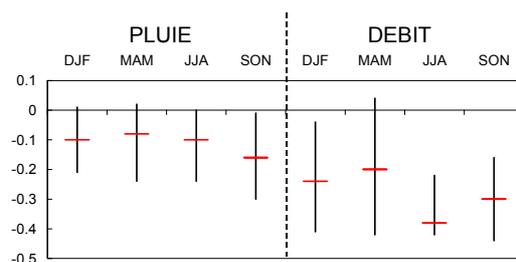


Figure 70 : Evolution des pluies de bassin et débits à l'exutoire de la Garonne en milieu de XXI^{ème} siècle par rapport à la période 1971-2000. Les extrémités des barres verticales indiquent les minimum et maximum, la barre horizontale la moyenne sur les quatorze projections.

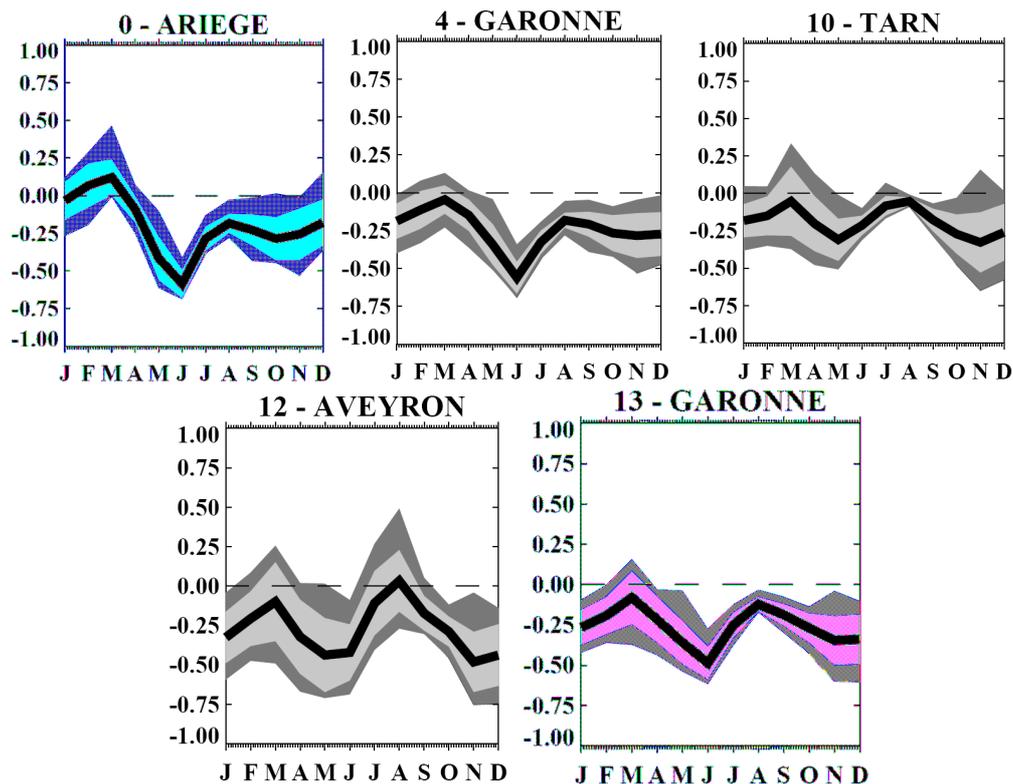


Figure 71 : Evolution des débits mensuels en relatif entre les périodes 2046-2065 et 1970-1999 Le trait noir est la moyenne d'ensemble, la zone en gris clair est délimitée par la moyenne d'ensemble plus ou moins un écart-type intermodèle, la zone en gris foncé est délimitée par les valeurs maximales et minimales parmi les 14 GCMs. Extrait de Boé (2007) pour les cinq stations du secteur d'étude 1 : l'Ariège à Foix ; 4 : la Garonne à Portet ; 10 : le Tarn à Marsal ; 12 : l'Aveyron à Piquecos [Loubejac] ; 13 : la Garonne à Lamagistère

D'autres résultats sont présentés sur la Garonne et ses affluents (Figure 71). Le Tarn à Marsal ($S= 4500 \text{ km}^2$) est modélisé ; la station de jaugeage est située entre Villemur et Millau. Sur la base de la moyenne d'ensemble,

- les bassins pyrénéens sont les plus impactés (réduction de 50% en juin) ;
- les tendances sont à la baisse sauf pour l'Ariège en février et mars ;
- le Tarn est le moins modifié ;
- les réductions sont plus homogènes sur les affluents rive droite à influence méditerranéenne que sur les cours d'eau de tête dans les Pyrénées ;
- les incertitudes sont fortes : plus de 50% pour l'Aveyron.

Conclusion

Les études s'accordent sur une réduction notable de la ressource superficielle en eau au cours du XXI^{ème} siècle sur les zones continentales en moyenne latitude et au climat tempéré :

- une sévérité accrue des étiages pour les cours d'eau à régime pluvial, du fait d'une forte augmentation de l'évapotranspiration (même si une augmentation des précipitations en hiver est prévue) ;
- une réduction de la contribution de la neige dans les cours d'eau de montagne (déplacement de l'onde de fonte quand les précipitations solides persistent) mais pas de convergence sur l'évolution des extrêmes en crue.

Pour un même secteur, les chiffres varient d'un « assemblage » à un autre du fait des représentations non exhaustives (seuls quelques processus supposés dominants sont maîtrisés) ; tous les modèles fonctionnent en extrapolation (GCMs, descente d'échelle, modèles hydrologiques) : ils ont donc des sensibilités différentes qui s'expriment fortement sur les extrêmes. Il n'y a pas lieu de s'inquiéter des écarts entre études, ils font partie des incertitudes.

Nos résultats s'inscrivent dans les tendances déjà évoquées, tant sur la partie neigeuse que sur l'hydrologie naturelle. Ils sont donc cohérents avec ceux publiés récemment : impact différencié selon le régime hydrologique et ordre de grandeur des modifications.

Evolution des usages et impact sur les débits en rivière

Dans une configuration de bassin versant complexe avec des usages multiples, il est difficile de se projeter dans les prochaines années quant à l'évolution de l'ensemble de ces activités et des transformations du bassin versant (occupation du sol, aménagements...). Il existe des études à l'échelle mondiale (ex. Alcamo *et al.*, 2007 ; Shen *et al.*, 2008) qui utilisent des hypothèses et des outils grossiers. Le modèle de pression utilisé par Alcamo *et al.* (2007), WaterGAP, s'appuie sur une consommation domestique par habitant fonction du revenu, sur une consommation industrielle fonction de la production électrique et sur des prélèvements pour l'agriculture (élevage fonction de la taille du cheptel et irrigation des cultures fonction de l'ETP). Les résultats suggèrent une augmentation du stress hydrique à l'horizon 2050, principalement due à une augmentation des prélèvements d'origine domestique stimulés par la croissance mondiale. Les prélèvements agricoles restent prédominants, mais évoluent peu du fait des hypothèses (constance des surfaces irriguées) et d'effets de compensation : augmentation induite par des températures de l'air plus élevées et diminution grâce aux progrès techniques attendus et l'hypothèse de constance des surfaces irriguées. Shen *et al.* (2008) se fondent sur l'évolution de la population pour estimer la croissance des surfaces irriguées, fonction linéaire de la population sous contrainte qu'elles ne dépassent pas la surface continentale disponible. La demande agricole est le produit de la surface irriguée par des coefficients liés aux pratiques agricoles. La demande en eau agricole suit alors la croissance de la population, indépendamment du climat. Les chiffres obtenus sont différents de Alcamo *et al.* (2007) ; en particulier l'usage agricole est à la hausse pour Shen *et al.* (2008), du fait d'hypothèses de travail très différentes.

Ces études sont « intéressantes »³ mais non exploitables ; en aucune manière, les résultats sont suffisants pour mettre en place des stratégies d'adaptation. Des études à l'échelle de la gestion doivent être menées, pour se rapprocher au mieux des différents usages et de leurs déterminants.

Le devenir de l'hydroélectricité

Des chiffres globaux sur l'évolution du potentiel hydroélectrique au cours du XXI^{ème} siècle sont annoncés par Lehner *et al.* (2005). Aux alentours des années 2070 sous scénario modéré (A1B), ce potentiel sera diminué de 6% à l'échelle de l'Europe. Des particularités régionales apparaissent du fait de la réponse différenciée du climat. La réduction serait de 20 à 50% sur le pourtour méditerranéen et de 15 à 30% en Europe du Nord et de l'Est. Aucune modification significative n'est attendue en Europe de l'Ouest et en Europe Centrale.

Peu d'études complètes à ce jour ont été réalisées à l'échelle des grands bassins, échelle de référence pour les gestionnaires (Bates *et al.*, 2008). En Grèce, Mimikou et Baltas (1997) ont examiné la fiabilité d'un ensemble de réservoirs dédiés à la production hydroélectrique, l'irrigation

³ Qualificatif diplomatique

et l'alimentation en eau, selon trois scénarios climatiques issus de GCMs. Harrison et Whittington (2002) ont analysé la viabilité économique de projets hydroélectriques au Zambèze et Bergström *et al.* (2001) ont examiné le potentiel hydroélectrique en Suède sous évolution climatique. Bergström *et al.* (2007) ont étendu l'analyse à l'Europe du Nord. Graham *et al.* (2007) ont détaillé l'application à un des bassins en Suède. La production d'hydroélectricité est obtenue par simple corrélation avec le débit annuel.

Plus récemment, Schaeffli *et al.* (2007) ont examiné le devenir de l'hydroélectricité en Suisse. Ils ont mené une étude similaire à celles de Payne *et al.* (2004) et de Christensen *et al.* (2004) réalisées dans l'ouest américain. Un système composé d'une retenue est analysé : la retenue de Mauvoisin, dans le sud des Alpes Suisses, qui draine 169 km². Le cas examiné a la particularité d'être recouvert à 41% par un glacier. Un modèle hydrologique est couplé à un modèle de gestion assez sommaire. Ce dernier distingue effet saisonnier des effets journaliers. Le débit turbiné du jour est la somme d'une composante déterministe, *i.e.* la moyenne différenciée selon la période de l'année (en période de fonte ou non) multipliée par un coefficient selon le jour de la semaine (dans le week-end ou non) et d'une composante stochastique résiduelle représentant la variabilité journalière, tirée d'une loi log-weibull. Cette dernière pourrait être conditionnée par la demande, mais ne l'est pas dans l'application proposée. L'ensemble est contraint par des règles de gestion du plan d'eau (marnage). Les résultats en fin de siècle (2070-2099) indiquent une réduction moyenne de 36% en moyenne de la production hydroélectrique en réponse à une augmentation des températures et une diminution des précipitations.

Vicuña *et al.* (2008) ont couplé un module de fonctionnement d'une chaîne de onze réservoirs au modèle hydrologique VIC. Le module de gestion est une vision simplifiée de la réalité. Une optimisation des volumes à turbiner est faite sur la base d'une prévision des apports des douze prochains mois et du prix de l'électricité (qui représente implicitement la consommation). Le changement climatique en fin de siècle est apprécié par quatre scénarios, deux plus secs et deux plus humides que le climat actuel. Les résultats montrent que, dans la configuration actuelle :

- la production d'énergie et les débits naturels entrant suivent la même évolution ;
- malgré la chute des apports annuels, un gain est toujours assuré grâce à des capacités de stockage conséquentes et un placement optimal des volumes turbinés (*i.e.* au moment où le prix de l'énergie est au plus haut) ;
- les gains financiers ne peuvent augmenter du même ratio que les débits entrants sous climats plus humides, du fait de nombreux déversements.

Une étude de sensibilité a été menée en modifiant la capacité de stockage et le prix de l'énergie pour imaginer une stratégie d'adaptation.

Markoff et Cullen (2008) ont examiné le devenir de l'hydroélectricité dans le Nord-Ouest des Etats Unis. Les sorties du modèle hydrologique VIC alimenté par des projections climatiques sont les entrées de deux outils de gestion : Colsim (Hamlet et Lettenmaier, 1999) et Genesys (NPCC, 2003), qui cherchent à suivre les courbes guides de remplissage des ouvrages. Ici, il n'y a pas d'optimisation recherchée. De ce fait, les auteurs considèrent leurs résultats pessimistes. Des formules empiriques entre anomalie climatique et production hydroélectrique se fondent sur les sorties de modèles obtenues pour un jeu réduit de scénarios climatiques. Elles fournissent des abaques et offrent une vision plus étendue des évolutions énergétiques avec d'autres sorties de GCMs. Les auteurs montrent une plus grande sensibilité du système de production hydroélectrique à l'évolution des précipitations qu'à celle des températures. A l'horizon 2020, les résultats sont déjà inquiétants pour les gestionnaires : il y a plus de 9 chances sur 10 de voir la production diminuer.

Fortin *et al.* (2007) ont projeté le fonctionnement des lacs Saint François et Aylmer au sud du Québec. Les usages sont multiples : ils incluent la protection contre les crues, les activités récréatives et la production hydroélectrique, tout en considérant la garantie d'un niveau suffisant pour le frai au printemps. Ces contraintes sont déclinées en niveaux de remplissage minimal et maximal acceptables et les règles de gestion sont simulées en aval des modèles hydrologiques. Sous changement climatique, les auteurs montrent que l'évolution du climat du scénario le plus « sec » pourrait entraîner des situations plus fréquentes de non respect des contraintes de hauteur minimale. Ce diagnostic étant établi, des nouvelles règles de gestion ont été suggérées, chacune adaptée à un des scénarios climatiques pour en limiter l'impact. Elles consistent, par exemple, à avancer les périodes de remplissage, à raccourcir la gestion hivernale ou à réviser les cotes d'exploitation.

Minville *et al.* (2009a ; 2009b) ont examiné le devenir des ouvrages sur la rivière Peribonka au sud-est du Québec (Canada) en termes de production hydroélectrique et d'efficacité en laminage des crues. Dans les deux études, un modèle hydrologique aux entrées perturbées fournit les apports et un module de gestion représente le fonctionnement des ouvrages. Chaque étude a un couple (modèle hydrologique ; module de gestion) qui lui est propre. La tendance est à la diminution de la production annuelle d'électricité et une augmentation des déversements si les règles de gestion sont identiques à celles en cours actuellement. En revanche, si les procédures sont optimisées et adaptées aux évolutions du climat (Minville *et al.*, 2009b), il est possible à terme d'augmenter la production d'énergie. Pour ce système et sur la base d'un seul scénario examiné, les recommandations sont les suivantes : abaisser les niveaux de printemps pour contenir et atténuer les crues de printemps ; conserver des niveaux hauts en été pour maximiser les hauteurs de chute ; modérer les niveaux en hiver pour éviter de dépasser les seuils limites d'exploitation.

Le devenir de l'irrigation

La difficulté de mesurer les impacts sur l'irrigation et ses conséquences sur les ressources en eau est due notamment à un problème de gestion des échelles dans la modélisation : les objets examinés par les modèles agronomiques sont les parcelles et un « nouveau » saut en termes d'échelles spatiales est nécessaire pour les études d'impact sur les bassins versants. Pour espérer mesurer les impacts sur l'irrigation et puis de l'irrigation sur la disponibilité en eau dans les rivières et les nappes, et examiner les interactions entre les pratiques agricoles (passées et futures) et les différents compartiments du cycle de l'eau, un travail d'intégration des modules descriptifs des usages dans une modélisation hydrologique distribuée, qui passerait forcément par un dialogue entre spécialistes, doit être réalisé.

L'expérience réalisée dans le cadre du projet GICC-Rhône (Leblois *et al.*, 2004) illustre l'impact du changement climatique sur le bassin de la Drôme. Ce secteur a enregistré un déficit pluviométrique et des températures en moyenne de 2°C plus élevées en été durant la dernière décennie et, par voie de conséquence, des étiages très marqués. Les scénarios de doublement de CO₂ appliqués à un modèle agronomique (STICS), développé par l'INRA, entraînent une réduction du cycle de culture du maïs de 21% et de fait une perte du rendement de 15% (Gonzalez Gamacho *et al.*, 2007).

Le projet de recherche RExHySS⁴ a examiné l'évolution de l'irrigation et ses impacts sur les ressources en eau sur la Seine. Sur ce bassin, les prélèvements agricoles s'effectuent majoritairement dans les nappes, à la différence de la Garonne. STICS a été appliqué sous climat présent et sous projections climatiques pour estimer les doses d'irrigation à apporter aux cultures pour atteindre différents rendements. Les résultats montrent que STICS fournit des résultats

⁴ <http://www.sisyphes.jussieu.fr/~agnes/rexhyss/>

réalistes en reconstitution du passé, mais des écarts apparaissent du fait de contraintes/conditions locales non intégrées. STICS est malgré tout utile pour appréhender des tendances. Sur la base de trois scénarios, en fin de siècle, sans modification des pratiques agricoles, les doses à apporter seraient accrues de 50 à 60%. Sur la Beauce, des simulations à pratiques agricoles égales montrent que le rabattement induit par cette augmentation appliquée sous climat actuel est d'un ordre de grandeur inférieur à celui qu'induirait le seul changement climatique. La question se pose quant à l'évolution des pratiques agricoles du fait d'une recharge des nappes diminuée de 30% en fin de siècle.

Conclusion

Nous avons pu vérifier grâce à la revue bibliographique que les outils appliqués sont adaptés à l'étude d'impact du changement climatique. Le modèle agronomique développé s'apparente à STICS utilisé sur la Seine et sur la Drôme.

Il est délicat de faire des comparaisons entre études, du fait des spécificités des modes de gestion de production hydroélectrique et de pratiques agricoles.

Pour ce qui est de l'hydroélectricité, la France se distingue des autres pays, du fait de la « thermo-sensibilité » de la consommation énergétique métropolitaine. Nous avons pu vérifier que les ouvrages peuvent théoriquement se remplir, mais leur fonction est peut-être à revoir avec une part croissante consacrée au soutien d'étiage au détriment de la production électrique. Cependant, il faut préciser que les débits influencés calculés sont le résultat d'une gestion optimale qui n'intègre pas de défaillance (par exemple : disponibilité des groupes) et qui s'appuie sur une météorologie parfaitement connue.

Pour ce qui est de l'irrigation, nos résultats sont conformes aux tendances attendues. L'augmentation des températures induit une augmentation des besoins en eau des cultures en place. Les simulations sont pessimistes car elles n'intègrent pas de modification des pratiques (ex. décalage de l'arrosage vers le printemps) qui pourraient réduire les prélèvements en août, mois le plus critique en termes de débit dans la rivière.

CONCLUSIONS

Les travaux menés dans le cadre de ce projet ont abouti à une représentation hydrologique cohérente du fonctionnement naturel de la Garonne sur la base de séries de débits désinfluencés des principales actions anthropiques et de modèles pluie-débit. Ceci nous a permis d'examiner l'évolution des étiages à l'horizon 2030.

L'augmentation des températures en moyenne de +2°C en été induit une diminution marquée des débits estivaux (sur les moyennes saisonnières et sur les extrêmes) et un allongement des événements sous le seuil actuel de référence *QMNA5*. Ce résultat est cohérent avec ceux issus des études récentes exploitant la même base de données de l'IPCC mais désagrégée de manière différente. Les bassins sous influence méditerranéenne ont une sensibilité distincte des bassins pyrénéens aux évolutions climatiques. Les modèles hydrologiques et le grand nombre de scénarios climatiques considérés permettent de quantifier en partie les incertitudes pesant sur le futur du bassin.

Reproduire parfaitement la gestion des eaux est un exercice hors de portée faute de données exhaustives sur l'ensemble du territoire. Nous avons donc choisi de comprendre la dynamique du système en place et les interactions entre usages et rivière, puis, sur cette base, d'engager des modélisations simplifiées de la gestion hydroélectrique et des pratiques agricoles.

Le cas test décrit sur l'Ariège à Foix permet d'illustrer les effets des ouvrages hydroélectriques sur les débits en 2030, tenant compte de leur optimisation et du respect d'un débit environnemental. Les résultats obtenus suggèrent une diminution de la production électrique, conséquence d'apports annuels réduits, ainsi qu'une augmentation des lâchures estivales pour assurer le soutien d'étiage. Les ordres de grandeur varient selon le scénario envisagé.

La demande en irrigation est quantifiée au travers d'un modèle exprimant les besoins en eau des plantes. Sans surprise, l'augmentation de la température entraîne une augmentation de la demande en eau du maïs, notamment si les pratiques n'évoluent pas. Si ces besoins devaient être satisfaits par irrigation, les prélèvements devraient être augmentés d'autant, donnant un ordre de grandeur de la pression supplémentaire sur la ressource en période estivale.

Peu d'études ont été réalisées à ce jour sur le devenir des modes de gestion sous changement climatique à une échelle locale, ce qui donne au projet son caractère tout à fait novateur. Si la représentation du bassin de la Garonne reste imparfaite, elle propose néanmoins une vision cohérente avec ses usages dominants. Les exercices réalisés dans le cadre d'IMAGINE2030 sont académiques. Des chiffres annoncés, qu'ils concernent l'hydroélectricité ou l'agriculture, restent discutables dans la mesure où d'autres facteurs de changement n'ont pas été intégrés. Les seuls déterminants régissant l'évolution des usages considérés sont d'origine climatique. Ils sont insuffisants (il faut inclure à terme la dimension socio-économique) mais permettent de donner des ordres de grandeur avec un mode de gestion non modifié. Ce projet a permis la construction de modèles et la collecte de données qui sont un premier pas vers la construction d'un outil d'aide à la décision pour la mise en place d'une stratégie d'adaptation.

Le 9 décembre 2009, les partenaires ont procédé à une restitution de ces travaux réalisés dans le cadre du projet à l'Agence de l'Eau Adour Garonne.

La volonté principale était de diffuser les principaux résultats obtenus aux acteurs locaux. Ce séminaire a également été l'opportunité d'engager une discussion entre scientifiques, politiques et

gestionnaires de l'eau du bassin de la Garonne sur l'évolution de la ressource en eau et les stratégies d'adaptation possibles.

Nous avons également souhaité élargir la discussion en sollicitant des personnes extérieures au projet à présenter leurs travaux récents sur le secteur pyrénéen. Cette journée s'est décomposée en deux parties : le matin était consacré au projet ; l'après midi à la présentation des travaux et réflexions similaires engagés en Espagne et sur l'évolution des populations piscicoles sur le bassin Adour Garonne. Enfin, cette journée s'est clôturée par une table ronde animée par François SIMONET (Agence de l'Eau). 72 personnes se sont inscrites à ce séminaire. Des éléments sur ce séminaire sont donnés en Annexe 2.

Le projet ouvre des perspectives intéressantes. Il a posé des premiers jalons ; les valeurs et évolutions suggérées par les modèles indiquent les grandes tendances, notamment l'application finale intégrant les consommations à Lamagistère (Figure 66) permet de montrer en l'état la capacité des modèles à intégrer l'ensemble des modèles. Les tendances restent à confirmer dans des suites à donner à IMAGINE2030. Des tentatives de poursuivre les collaborations en complétant par une forte composante socio-économique dans l'analyse et dans les exercices ont jusqu'à présent avorté (APR GICC 2009). L'avenir nous dira si d'autres opportunités se manifestent. La priorité à court terme (courant 2010) sera donnée à la valorisation des résultats (publications scientifiques) puis à plus long terme à faire vivre les outils développés.

REMERCIEMENTS

Merci à tous les acteurs locaux (SMEAG, VNF, ARPE, DIREN, CACG, EDF-DTG, Eaucéa) impliqués dans le « Comité de Pilotage » mis en place pour le suivi de ce projet. Ils ont permis de construire nos représentations en lien avec le terrain. Merci également à Météo-France, au SMEAG, à la CACG et à la SHEMA pour la mise à disposition de données pour les besoins de recherche, à Julien BOE pour nous avoir autorisés à extraire des figures de son mémoire de thèse.

**COMPOSITION, TEMPS AFFECTE A LA RECHERCHE ET RESPONSABILITE DE CHAQUE
MEMBRE DE L'EQUIPE ET DE CHAQUE PARTENAIRE**

Le projet a bénéficié d'une équipe de chercheurs et d'un soutien fort de l'opérateur majeur en termes de gestion de l'eau sur le territoire d'étude.

Le Cemagref de Lyon a joué son rôle de coordination pendant les 30 mois du projet et a apporté son expertise hydro-climatique sur les projections climatiques et ses compétences statistiques sur les simulations hydrologiques. Le Cemagref d'Antony a mis en place la stratégie de validation des modèles hydrologiques et a appliqué le modèle GR4J sous climats présent et perturbés. EDF s'est impliqué doublement au travers de sa composante R&D et sa composante opérationnelle : le LNHE (R&D) a mis en œuvre le modèle CEQUEAU sur le secteur, a naturalisé les débits influencés et a développé les modules représentant les influences sur la ressource en eau ; la DTG et la Délégation de bassin Adour-Garonne ont, quant à eux, fortement contribué à la collecte de données hydrologiques sur le secteur. L'Agence de l'Eau a assuré un rôle de fournisseur de données et a facilité le dialogue entre acteurs de l'eau et partenaires du projet. Elle a présidé les différents comités de pilotage qui ont jalonné le projet et enfin elle a organisé en collaboration avec le responsable du projet, le colloque de restitution finale à Toulouse en décembre 2009.

<i>Equipes</i>	<i>Personnes</i>	<i>Statut</i>	Nb mois	Domaine d'intervention
Cemagref Lyon	Eric SAUQUET	Chargé de recherche	3	Hydrologie/Climatologie Coordination
	Mohamed Rafik HAJJEM	Etudiant	6	Hydrologie/Climatologie
	Jean-Philippe VIDAL Rémi LABEDADE	CDD	1.5 6.5	Hydrologie/Climatologie
Cemagref Antony	Charles PERRIN	TTR	1.5	Hydrologie/Modélisation
	Blandine QUILLAT Meggy HAU	Etudiant	2 6	Hydrologie/Modélisation
	Pierre-François STAUB Houda BOUDHRAA	CDD	3 6	Hydrologie/Modélisation
EDF/LNHE	Anne DUPEYRAT	Ingénieur de recherche	1	Hydrologie/Climatologie
	Frédéric HENDRICKX	Ingénieur de recherche	1.5	Hydrologie/Climatologie
	Cécile AGOSTA Rémi LABEDADE	Etudiant Etudiant	2 6	Hydrologie/Climatologie Hydrologie/Climatologie
	Laure SANTONI	Ingénieur de recherche	0.5	Economie
	René SAMIE	Ingénieur de recherche	1	Economie
Agence de l'Eau	Martine GAECKLER Françoise GOULARD	Conseiller recherche et prospective		Appui aux choix méthodologiques Données sur les usages de prélèvements
Dans le cadre de la mission technique commune Agence –EDF	Jean-François MOOR	Responsable unité hydroélectricité		Appui à la valorisation et à la communication des résultats du projet

Cette fiche de temps ne représente que la partie justifiable (compte tenu des financements accordés). Les temps effectivement consacrés au projet sont largement supérieurs.

REFERENCES

- Agosta, C. (2007). Naturalisation des débits et modélisation hydrologique sur des sous-bassins versants de la Garonne à Lamagistère. Rapport de stage, Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie, Université Pierre et Marie Curie, 51 pages.
- Alcamo, J., Flörke M., et Märker, M. (2007). Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic changes. *Hydrological Sciences Journal*, 52 (2) : 247-275.
- Bates, B., Kundzewicz, Z.W., Wu, S., Arnell, N., Burkett, V., Döll, P., Gwary, D., Hanson, C., Heij, B., Jiménez, B., Kaser, G., Kitoh, A., Kovats, S., Kumar, P., Magadza, C., Martino, D., Mata, L.J., Medany, M., Miller, K., Oki, T., Osman, B., Palutikof, J., Prowse, T., Pulwarty, R., Räisänen, J., Renwick, J., Tubiello, F., Wood, R., Zhao, Z.C., Arblaster, J., Betts, R., Dai, A., Milly, C., Mortsch, L., Nurse, L., Payne, R., Pinskiwar, I., Wilbanks, T. (2008) Technical Paper on Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change IV, IPCC, IPCC Secretariat, Geneva.
- Bellman, R. (1957). *Dynamic Programming*. Princeton University Press.
- Beniston, M., Stephenson, D.B., Christensen, O.B., Ferro, C.A.T., Frei, C., Goyette, S., Halsnaes, K., Holt, T., Jylha, K., Koffi, B., Palutikof, J., Scholl, R., Semmler, T., Woth, K. (2006). Future Extreme Events in European Climate: An Exploration of Regional Climate Model Projections. *Climatic Change*, 81:71–95.
- Bergström, S., Carlsson, B., Gardelin, M., Lindstrom, G., Pettersson, A. and Rummukainen, M. (2001). Climate change impacts on runoff in Sweden - assessments by global climate models, dynamical downscaling and hydrological modelling. *Climate Research*, 16(2): 101-112.
- Bergström, S., Jóhannesson, T., Aðalgeirsdóttir, G., Ahlström, A., Andreassen, L. M., Andréasson, J., Beldring, S., Björnsson, H., Carlsson, B., Crochet, P., de Woul, M., Einarsson, B., Elvehøy, H., Flowers, G.E., Graham, P., Gröndal, G.O., Guðmundsson, S., Hellström, S.S., Hock, R., Holmlund, P., Jónsdóttir, J.F., Pálsson, F., Radic, V., Roald, L.A., Rosberg, J., Rogozova, S., Sigurðsson, O., Suomalainen, M., Thorsteinsson, T., Vehviläinen, B., Veijalainen, N. (2007). Impacts of climate change on river runoff, glaciers and hydropower in the Nordic area. Joint final report from the CE Hydrological Models and Snow and Ice Groups CE-6, Climate and Energy, Reykjavík.
- Boé, J., Terray, L., Martin E., Habets, F. (2009). Projected changes in components of the hydrological cycle in French river basins during the 21st century. *Water Resources Research*, 45, doi:10.1029/2008WR007437.
- Boé, J. (2007). *Changement global et cycle hydrologique : une étude de régionalisation sur la France*. Thèse de doctorat, Toulouse III Paul Sabatier, 256 pages.
- Caballero, Y., Voirin-Morel, S., Habets, F., Noilhan, J., Le Moigne, P., Lehenaff, A., Boone, A. (2007). Hydrological sensitivity of the Adour-Garonne river basin to climate change. *Water Resources Research*, 43, W07448.
- Carter, T.R., Parry, M.L., Harasawa, H., Nishioka, S. (1994). *Technical Guidelines for Assessing Impacts of Climate Change*. Special Report 0904813118. Intergovernmental Panel on Climate Change, WMO and UNEP, Geneva., 59 pp.

Charbonneau, R., Fortin, J.P., & Morin, G. (1977). The CEQUEAU model: description and examples of its use in problems related to water resource management. *Hydrol. Sci. Bull.*, 22(1) : 93-202.

Christensen, J.H., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., Jones, R., Kolli, R.K., Kwon, W.-T., Laprise, R., Magaña Rueda, V., Mearns, L., Menéndez, C.G., Räisänen, J., Rinke, A., Sarr A., Whetton, P. (2007). Regional Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Christensen, J.H., Christensen, O.B. (2007). A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. *Climatic Change*, 81(1): 7-30.

Christensen, N.S., Wood, A., Voisin, N., Lettenmaier, D.P., Palmer, R. N. (2004). The effects of climate change on the hydrology and water resources of the Colorado River Basin. *Climatic Change* 62, 337–363.

Collectif (2006). Guide d'utilisation d'OSIRIS – Outil de suivi d'un indicateur régional d'irrigation spatialisé. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, Cahier Agreste n°181, août 2006, 34 pages.

Comité du Bassin Adour-Garonne (2004). Plan de Gestion des Etiages Garonne-Ariège. 77 pages.

Deumier, J.M., Lacroix, B., Bouthier, A., Verdier, J.L., Mangin, M. (2006). Stratégies de conduite de l'irrigation du maïs et du sorgho dans les situations de ressource en eau restrictive. www.irrinov.arvalisinstitutduvegetal.fr

de Wit M.J.M., van den Hurk B., Warmerdam, P.M.M., Torfs, P.J.J.F., Roulin E., van Deursen, W.P.A. (2007). Impact of climate change on low-flows in the river Meuse. *Climatic Change*, 82: 351–372.

Ducharne A. *et al.* (2004). Influence du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique et biogéochimique du bassin de la Seine, Rapport final du projet GICC-Seine, 60 pages.

Ducharne, A., Habets, F., Déqué, M., Evaux, L., Hachour, A., Lepaillier, A., Lepelletier, T., Martin, E., Oudin, L., Pagé, C., Ribstein, P., Sauquet, E., Thiéry, D., Terray, L., Viennot, P., Boé, J., Bourqui, M., Crespi, O., Gascoin, S., Rieu, J. (2009). Projet RExHySS : Impact du changement climatique sur les Ressources en eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme. Rapport de fin de contrat, programme GICC, septembre 2009, 62 pages.

Dupeyrat, A., Agosta, C., Sauquet, E., Hendrickx, F. (2008). Sensibilité aux variations climatiques d'un bassin à forts enjeux : le cas de la Garonne. Actes du 13th IWRA World Water Congress 2008 (Montpellier, France, 1-4 septembre 2008), 15 pages.

Dupeyrat, A., Bertier, C. (2006). Impact du changement climatique sur les régimes hydrologiques et thermiques de la Loire, note interne EDF R&D, H-P76-2006-01987, 90 pages.

ESCO (2006). Sécheresse et agriculture – Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Rapport d'Expertise scientifique collective INRA, Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, 76 pages.

Fortin, L.G., Turcotte, R., Pugin, S., Cyr, J.F. and Picard, F. (2007). Impact des changements climatiques sur les plans de gestion des lacs Saint-François et Aylmer au sud du Québec. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 34(8) : 934-945(12).

González-Camacho J.M., Mailhol J.C., Ruget F. (2008). Impacts locaux attendus de l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère sur la productivité de l'eau du maïs dans la Drôme, France. *Irrigation and Drainage*, 57: 229–243 (2008)

Gottardi, F. (2009). Estimation statistique et réanalyse des précipitations en montagne - Utilisation d'ébauches par types de temps et assimilation de données d'enneigement - Application aux grands massifs montagneux français. Thèse de doctorat, INPG, Grenoble, 261 pages.

Graham, L.P., Andréasson, J., Carlsson, B. (2007). Assessing climate change impacts on hydrology from an ensemble of regional climate models, model scales and linking methods. A case study on the Lule river basin. *Climatic Change* 81 (Suppl. 1), 293–307.

Hajjem, M.R. (2008). Étude des précipitations et de la température du bassin de la Garonne à Golfech selon le modèle CEQUEAU et selon la base SAFRAN. Mémoire de Master 2^{ème} année, Université Claude Bernard, Lyon 1, 39 pages.

Harrison, G.P., Whittington, H.W. (2002). Susceptibility of the Batoka Gorge hydroelectric scheme to climate change. *Journal of Hydrology*, 264 : 230–241.

Harrold, T.I., Sharma, A., Sheather, S.J. (2003). A nonparametric model for stochastic generation of daily rainfall occurrence. *Water Resources Research*, 39(10), 10.1029/2003WR002182.

Hau, M. (2008). Modélisation hydrologique des sous-bassins versants de la Garonne à l'aide d'un modèle pluie-débit global. Mémoire de stage de 2^{ème} année, PolyTech'Montpellier, 45 pages.

Hamlet, A.F., Lettenmaier, D.P. (1999) Effects of climate change on hydrology and water resources in the Columbia River Basin. *Journal of the American Water Resources Association*, 35(6): 1597–1623.

Hendrickx, F. (2001). Impact hydrologique d'un changement climatique sur le bassin du Rhône. *Hydroécol. Appl.*, 13(1) : 77-100.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2001). *Climate Change 2001 : Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. McCarthy J.J., Canziani O.F., Leary N.A., Dokken D.J. et White K.S. (Eds). Cambridge University Press, Cambridge, U.K, 1032 pages.

Jamagne, M., Bétrémieux, R., Bégon, J.C., Mori, A. (1977). Quelques données sur la variabilité dans le milieu naturel de la réserve en eau des sols. *Bulletin Technique d'Information*. 324-325, 627-641.

Klemeš, V. (1986). Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrol. Sci. J.*, 31(1): 13-24.

- Labeledade, R. (2008). Naturalisation des débits influencés par l'irrigation et modélisation hydrologique sur des sous-bassins versants de la Garonne à Lamagistère. Mémoire de stage de fin d'étude, INP, ENSEEIHT, 60 pages.
- Labeledade, R. (2009). Naturalisation des débits et modélisation hydrologique de sept sous-bassins versants de la Garonne à Lamagistère. Note interne EDF-Cemagref, 40 pages.
- Lall, U., Sharma, A. (1996). A nearest neighbor bootstrap for resampling hydrologic time series. *Water Resources Research*, 32(3): 679-693.
- Leblois E. *et al.*, 2004. Projet GICC-Rhône. Rapport final, octobre 2004, 184 pages.
- Lehner, B., Czisch, G., Vassolo, S. (2005). The impact of global change on the hydropower potential of Europe: a model-based analysis. *Energy Policy* 33, 839–855.
- López-Moreno, J.I., Goyette, S., Beniston, M. (2008). Climate change prediction over complex areas: spatial variability of uncertainties and expected changes over the Pyrenees from a set of regional climate models. *International Journal of Climatology*, 28: 1535–1550.
- López-Moreno, J.I., Goyette, S., Beniston, M. (2009). Impact of climate change on snowpack in variability and vertical gradients. *Journal of Hydrology*, 374: 384–396.
- Markoff, M.S., Cullen, A.C. (2008). Impact of climate change on Pacific Northwest hydropower. *Climatic Change*, 87: 451–469.
- Meehl, G.A., Stocker, T.F., Collins, W.D., Friedlingstein, P., Gaye, A.T., Gregory, J.M., Kitoh, A., Knutti, R., Murphy, J.M., Noda, A., Raper, S.C.B., Watterson, I.G., Weaver, A.J., Zhao Z.C. (2007.) Global Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Mimikou, M.A., Baltas, E.A. (1997). Climate change impacts on the reliability of hydroelectric energy production. *Hydrological Sciences Journal*, 42(5): 661-678.
- Minville, M., Brissette, F., Leconte, R. (2009a). Impacts and uncertainty of climate change on water resource management of the Peribonka River. *Journal of Water Resources Planning and Management*, in press.
- Minville, M., Krau, S., Brissette, F., Leconte, R. (2009b). Adaptation to climate change in the management of a Nordic Canadian water-resources system exploited for hydropower. *Water Resources Management*, 23: 2965-2986.
- NPCC (Northwest Power and Conservation Council) (2003). Genesys northwest power generation system model, version 2.7. <http://nwcouncil.org/GENESYS/>
- Oudin, L. (2004). Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global. Thèse de doctorat, ENGREF, Paris, France, 495 pages.

- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., Loumagne, C. (2005). Which potential evapotranspiration input for a rainfall-runoff model? Part 2 - Towards a simple and efficient PE model for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology*, 303(1-4): 290-306.
- Payne, J.T., Wood, A.W., Hamlet, A.F., Palmer, R.N., Lettenmaier, D.P. (2004). Mitigating the effects of climate change on the water resources of the columbia river basin. *Climatic Change*, 62, 233–256.
- Perrin, C. (2002). Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. *La Houille Blanche*, 6/7 : 84-91.
- Quintana-Seguí, P., Le Moigne, P., Durand, Y., Martin, E., Habets, F., Baillon, M., Canellas, C., Franchisteguy, L., Morel, S. (2008). Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables: Validation of the SAFRAN Analysis over France. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 47: 92–107.
- Sauquet E., Leblois E., Haond M., Jouve D. (2008a). Examen de la vulnérabilité de la ressource en eau vis à vis des fluctuations climatiques - Application aux étiages du bassin du Rhône. *Techniques Sciences Méthodes*, 3: 35-47.
- Sauquet, E., Lerat, J., Prudhomme, C. (2008b). La prévision hydro-météorologique à 3-6 mois - Etat des connaissances et applications. *La Houille Blanche*, 6: 77-84.
- Schaeffli, B., Hingray, B., Musy, A. (2007) Climate change and hydropower production in the Swiss Alps: quantification of potential impacts and related modelling uncertainties. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1191–1205.
- Sharif, M., Burn, D.H. (2006). Simulating climate change scenarios using an improved K-nearest neighbor model. *Journal of Hydrology*, 325: 179–196.
- Shen, Y., Oki, T., Utsumi, N., Kanae, S., Hanasaki, N. (2008). Projection of future world water resources under SRES scenarios: water withdrawal. *Hydrological Sciences Journal*, 53(1) : 11-33.
- Teyssier, F. (2006). Les consommations d'eau pour irrigation en Midi-Pyrénées sur 2001-2005. DRAF Midi-Pyrénées, août 2006.
- U.S. Army. Corps of Engineers (1956). *Snow Hydrology*. Portland: North Pacific Division Corps of Engineers. pp. 1-35, 262-268, 291-317.
- Valéry, A. (2010). *Prise en compte du phénomène neigeux dans les modèles pluie-débit*. Thèse de doctorat, Cemagref, ENGREF, Paris (soutenance prévue en février 2010).
- Vicuña, S., Leonardson, R., Hanemann, M.W., Dale, L.L., Dracup, J.A. (2008) Climate change impacts on high elevation hydropower generation in California's Sierra Nevada: A case study in the upper American River. *Climatic Change* 87 (Suppl. 1), 123–137.
- Vidal, J.-P., Wade, S. D. (2008) A framework for developing high-resolution multi-model climate projections: 21st century scenarios for the UK. *International Journal of Climatology*, 28(7): 843-858, doi:10.1002/joc.1593.
- Xu, C.Y. (1999). From GCMs to river flow: a review of downscaling methods and hydrologic modelling approaches. *Progress in Physical Geography*, 23(2): 229-249.

ANNEXE 1 : PROTOCOLE D'ÉVALUATION DES MODELES HYDROLOGIQUES

OBJECTIFS

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

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

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

DEFINITIONS

Dans la suite, on désigne par :

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

PROTOCOLE DE TEST

Nous adopterons ici la procédure du « split sample test » proposée par Klemeš (1986) pour le test des modèles hydrologiques. Il s'agit d'un test en calages-contrôles croisés sur périodes

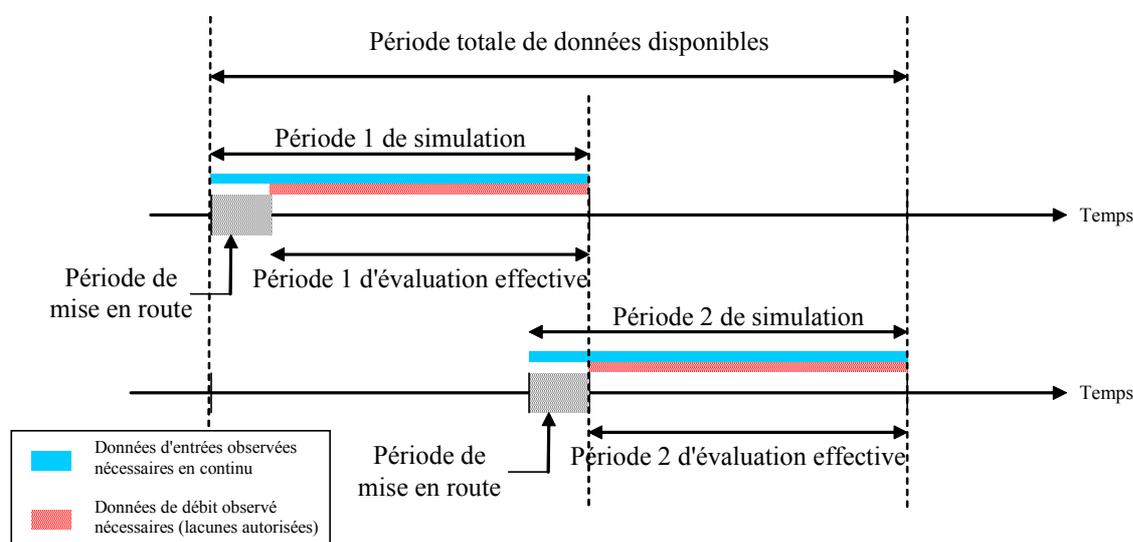
indépendantes. La série totale disponible est divisée en deux périodes, P1 et P2, ayant des longueurs similaires. Le test consiste à réaliser :

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

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

PERIODES TEST

La détermination des périodes P1 et P2 peut se faire en suivant le découpage illustré à la Figure 72. On peut autoriser un recouvrement entre les périodes 1 et 2 correspondant à la période d'initialisation de la période 2. Ceci permet de ne pas « perdre » une année de test en début de seconde période.



Les modèles testés dans le cadre du projet étant continus, les séries d'entrées du modèle (pluie, ETP, température) doivent être continues sur les périodes tests. On peut en revanche autoriser des lacunes de débit, les débits n'étant utilisés que pour le calcul des critères. On essaiera cependant, dans la mesure du possible, d'identifier des périodes avec le moins de lacunes possibles, afin d'avoir des calculs de critères significatifs. Notons que, les erreurs sur la période de mise en route n'étant pas prises en compte dans le calcul des critères, on peut autoriser une absence complète de données de débit sur cette période de mise en route. Dans le schéma de la Figure 72, cela peut être intéressant au niveau de la période 1 pour allonger la plage de test s'il existe des données d'entrées du modèle antérieures à celles de débit.

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

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

L'Annexe 1 récapitule les données disponibles pour réaliser les tests d'évaluation des modèles. L'Annexe 2 donne les périodes sélectionnées pour tester les modèles sur chaque bassin.

PROCEDURE DE CALAGE

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

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

(1) Critère de Nash-Sutcliffe

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

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

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

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

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

EVALUATION DES TESTS EN CONTROLE

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

Critères numériques :

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

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

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

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

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

(4) Critère de bilan

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n \mathcal{Q}_{s,i}}{\sum_{i=1}^n \mathcal{Q}_{o,i}}$$

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

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

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

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

(5) Rapport des volumes d'étiage

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

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

(6) Rapport du nombre de jour d'étiages

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

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

(7) Rapport des volumes en crue

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

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

(8) Rapport des crues annuelles

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

où l_k et l_{k+1} sont les pas de temps de début et de fin de l'année k et q est le nombre d'année de simulation. Ce critère permet d'apprécier la capacité du modèle à bien restituer les forts événements de crue.

Illustrations graphiques

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

1. comparaison des débits observés et simulés, en m³/s, en utilisant une échelle logarithmique pour mieux mettre en évidence la restitution des débits d'étiage ;
2. comparaison des courbes des débits mensuels moyens observés et simulés, en m³/s ;
3. comparaison des courbes de débits classés observés et simulés. Pour la représentation on utilisera une fréquence expérimentale F au non dépassement donnée par :

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

où i est le rang de la valeur classée et n le nombre total de valeurs. On tracera ensuite les valeurs de débit (en m³/s, échelle log) en fonction de la variable de Gumbel $-\ln(-\ln(F))$.

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

FICHE SYNTHETIQUE DE RESULTATS

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

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

ANNEXE 2 : SEMINAIRE DE RESTITUTION (09/12/2009, TOULOUSE)

PROGRAMME

Horaire	Contenu	Orateur
9 h	ACCUEIL	
9 h 30	Ouverture	M. ABADIE (Agence de l'Eau AG)
9 h 40	L'usage énergétique de l'eau : l'enjeu de recherche d'une ressource partagée	P. POULHE (EDF-LNHE)
9 h 50	Présentation du programme RDT	J. M. GRESILLON (<i>excusé</i>) (Président du Conseil Scientifique, APR RDT)
10 h	Objectifs du projet	E. SAUQUET (Cemagref)
10 h 15	Les données du problème (10 minutes de discussion)	F. HENDRICKX (EDF-LNHE) & J. P. VIDAL (METEO France/Cemagref)
10 h 45	Les outils du projet (10 minutes de discussion)	C. PERRIN (Cemagref) & R. SAMIE (EDF)
11 h 15	Le devenir du bassin (10 minutes de discussion)	E. SAUQUET (Cemagref)
11 h 45	Echanges et débats avec la salle	E. SAUQUET (Cemagref)
12 h 15	PAUSE DEJEUNER	
13 h 30	Impact potentiel du changement climatique sur les poissons du bassin Adour Garonne (10 minutes de discussion)	C. TISSEUIL (Laboratoire Evolution et Diversité Biologique, CNRS)
13 h 55	L'intégration des effets prévisibles du changement climatique dans la planification et la gestion hydraulique du bassin de l'Ebre (10 minutes de discussion)	J. M. ARNAL LIZARRAGA & M. Á. GARCIA VERA (Confédération Hydrographique de l'Ebre)
14 h 30	Les actions et interrogations des gestionnaires (10 minutes de discussion)	F. GOULARD (Agence de l'Eau AG) & S. ROCQ (SMEAG)
15 h 00	Table ronde : <i>Changement climatique et gestion de l'eau : quelles pistes pour adapter les politiques locales ?</i>	Animateur : F. SIMONET (Agence de l'Eau AG) J. CAMBON (SMEAG) A. RENARD (CG33) S. DUFOUR (DREAL MP) B. VERDIER (CG31) T. SUAUD (C. Régional MP)
15 h 45	Clôture du colloque	E. SAUQUET (Cemagref)

LISTE DES PARTICIPANTS

Entité	Nom		Fonction
AGENCE EAU AG	ABADIE	Marc	Directeur
Confédération Hydrographique de l'Ebre	ARNAL LIZARRAGA	Juan Manuel	Directeur du Cabinet du Président
SEPANSO	ARNAULD	Elizabeth	
Cemagref	AYPHASSORHO	Hugues	Directeur Régional pour l'Aquitaine
AGENCE EAU AG	AZIMONT	Michel	Membre du Conseil National de l'Eau Administrateur de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne
AGENCE EAU AG	BAYCHE	Valérie	Directrice département Communication
Conseil Général de Lot et Garonne	BAYOU	Christophe	Directeur Agriculture, Forêt et Environnement
ARPE	BEDEL	Cécile	Mission Eau
E.D.F. - D.T.G.	BROSSARD	Denis	
SMEAG	CAMBON	Jean	Président
EDF R&D	CAUSSE	Alain	Responsable Programme R&D
AGENCE EAU AG	CHABAUD	Caroline	Technicienne redevance Agence de l'Eau Adour Garonne
AGENCE EAU AG	CHALABERT	Nadine	Assistante Administrative Espace Rural
EDF CIDEN	CLERC	Camille	Ingénieur chargé d'études environnement
AGENCE EAU AG	COMEAU	Aline	Directrice Département Espace Rural
EAUCEA	COUPRY	Bruno	Directeur
MEEDDM	de LACAZE	Xavier	Chargé de mission « ressources en eau et changement climatique
Université de Liège	DELIEGE	Jean-François	Directeur AQUAPOLE
EDF UP Sud-Ouest	DOMENGET	Alain	Ingénieur Eau Titre Environnement
DREAL Midi-Pyrénées	DUFOUR	Sylvie	Chef de service, Connaissances Évaluation Climat
EDF COPM	DUPEYRAT	Anne	Hydrologue
AEAG	DUPUIS	Céline	Chargée d'études
AEAG	ESTRADE	Robert	Chargé de communication
Université de Liège	EVERBECQ	Etienne	AQUAPOLE
Confédération Hydrographique de l'Ebre	GARCIA VERA	Miguel Angel	Directeur de Plans et d'Etudes et du Bureau de Planification
EDF R&D	GOSSE	Philippe	Ingénieur de Recherche LNHE
AGENCE EAU AG	GOULARD	Françoise	Conseiller Recherche et Prospective
EDF DTG	HAUT	Alexandre	Ingénieur équipe Etudes et Prestations
AGENCE EAU AG	HEBERT	Nicolas	Chef de Service Gestion quantitative
EDF R&D	HENDRICKX	Frédéric	Ingénieur de Recherche LNHE
DRAAF	JEANNIN	Guy	Chargé de Mission Hydraulique
DREAL Midi-Pyrénées	JOLY	Emmanuel	Chargé de mission climat énergie
ARPE	LAVAUD	Julien	Conseiller technique Changement climatique
EDF Direction Développement Durable	LAVEU	Claude	Chargé de mission
CONSEIL REGIONAL AQUITAINE	LAVIE	Eric	Chargé de Mission Politique de l'Eau
INRA	LEENHARDT	Delphine	Chercheur
SMEAG	LEROY	Bernard	Chargé de mission
Université de Liège	MAGERMANS	Poï	AQUAPOLE
Météo-France	MARTIN	Eric	Chercheur METEO France - CNRM-GAME/GMME/MOSAYC
EDF DTG	MATAIX	Vincent	Responsable Equipe Réseau de Mesure et Production de données
ONEMA	MAUGIS	Pascal	Chargé de mission en hydrologie et Impact du changement climatique
AEAG	MOOR	Jean-François	Chargé de mission
EDF DTG	MOULIN	Laetitia	Ingénieur Hydrologue
EDF R&D	NOGAJ	Marta	Chef de projet LNHE
EDF Délégation de bassin Adour-Garonne	OSSELIN	Pascal	Attaché bassin Adour-Garonne
CACG	PAUTHIER	Maud	Ingénieur Hydrologue
EDF DTG	PERRET	Christian	Expert
Cemagref UR HBAN	PERRIN	Charles	Hydrologue Chercheur
AGENCE EAU AG	PIQUES	Isabelle	Chargée de Communication
EDF R&D	POULHE	Pascal	Chef de projet LNHE
EDF	RAVEL-SIBILLOT	Frédéric	attaché de bassin Loire Bretagne
Conseil Général de la Haute-Garonne	RAYNAL	Claude	Conseiller général en charge de l'environnement et du développement durable
Conseil Général de la Gironde	RENARD	Alain	Conseiller général du canton de Saint-Savin et Vice-président
SMEAG	ROCG	Sylvie	Directrice générale des services
ONEMA	SAINT-MICHEL	Matthieu	Chargé de mission
EDF R&D	SAMIE	René	Ingénieur de Recherche LNHE
CICT	SANCHEZ PEREZ	José Miguel	Directeur de Recherche
SMEAG	SANS	Fabienne	Chargée de mission
EDF R&D	SANTONI	Laure	Ingénieur de Recherche LNHE
Cemagref UR HHLY	SAUQUET	Eric	Hydrologue Chercheur
CICT	SAUVAGE	Sabine	Ingénieur de Recherche
EDF DTG	SCOPEL	Didier	Assistant Technique équipe Réseau de Mesure et Production de données
AGENCE EAU AG	SIMONET	François	Responsable du département Département Planification, Prospective & Evaluation
Conseil Régional Midi-Pyrénées	SUAUD	Thierry	Maire de Portet-sur-Garonne et Conseiller Régional
EDF R&D	THEVENET	Régis	Chef de Groupe LNHE
CICT	TISSEUIL	Clément	Docteur
EDF DPIH	TOURASSE	Patrick	Chargé de mission à la Coordination de l'Eau
CETESO	TREINSOUTROT	Didier	Directeur laboratoire régional des ponts et chaussées
CACG	TROUVAT	Jean-Luc	Responsable du Pôle Etudes International et Gestion des Eaux
Conseil Général de la Haute-Garonne	VERDIER	Blandine	Directrice de l'environnement
ECOBAG	VERVIER	Philippe	Directeur
Météo-France / Cemagref HHLY	VIDAL	Jean-Philippe	Hydro-climatologue Chercheur
DREAL Midi-Pyrénées	WALTHER-VIELLEDENT	Louise	Chef de la division Climat –promotion du développement durable
ARPE	XERRI	Christophe	Mission Eau

RETOUR SUR L'ÉVÉNEMENT

La journée de restitution a fait l'objet d'un article sur le site internet de l'Agence de l'Eau Adour Garonne (<http://www.eau-adour-garonne.fr/article.asp?id=1837>).



[<http://www.eau-adour-garonne.fr/>]

CLIMAT ET AMÉNAGEMENT DE LA GARONNE : QUELLES INCERTITUDES SUR LA RESSOURCE EN EAU EN 2030 ?



C'est le thème de la journée organisée ce 9 décembre 2009 à l'Agence. Divers intervenants y présentent les conclusions de l'étude "IMAGINE 2030".

Cette étude, réalisée dans le cadre d'un projet national financé par le ministère du Développement durable, le CEMAGREF, EDF et l'Agence, se proposait d'examiner, à l'horizon de 2030, l'évolution des étiages, des usages et de leur importance pour la gestion de la ressource superficielle du bassin amont de la Garonne (amont de Lamagistère -47-).

Peu d'études ont été réalisées à ce jour sur le devenir des modes de gestion de l'eau sous changement climatique à une échelle locale. D'où le côté novateur de cette restitution.

Marc Abadie, directeur général de l'agence de l'eau Adour-Garonne, s'est félicité de l'opportunité de cette restitution au moment même où la planète, à Copenhague, tente de "réfléchir globalement" à la question du changement climatique, mais rappelant aussi la nécessité pour le gestionnaire "d'agir localement".

"Il me paraît particulièrement utile de réfléchir tous ensemble à l'avenir du fleuve Garonne, à ses besoins propres de milieu aquatique et aux besoins des usages économiques qui dépendent de lui. Le gestionnaire a besoin d'outils de diagnostic tels que celui qui est aujourd'hui présenté. L'Agence de l'eau Adour-Garonne, au carrefour de ses missions de sensibilisation, de recherche, de prospective et de gestion, se félicite de pouvoir ouvrir, sur de telles questions de société, un débat prospectif, utile, objectif, dût-il être aussi interrogatif".

IMAGINE 2030 : Climat et aménagement de la Garonne : quelles incertitudes sur la ressource en eau en 2030

ANNEXE 3 : TIRES A PART DES PUBLICATIONS

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES PREVUES

Hendrickx, F., Dupeyrat, A., Agosta, C., Sauquet, E., 2009. Modelling impacts of hydro power water management on river flow regime. A case study in south-west France. Climatic Change ou Journal of Hydrology, en préparation.

Cet article est centré sur le module développé pour décrire la gestion hydroélectrique des ouvrages sous contrainte de respect des débits objectifs d'étiage en aval des retenues. L'application concerne l'Ariège à Foix, sous climats présent et perturbé.

Vidal, J.-P. et Sauquet, E. (2008), Multimodel climate trajectories for the Garonne river basin, France. Geophysical Research Letters, en préparation.

Cet article propose une évaluation des futures trajectoires climatiques sur le bassin de la Garonne. Ces proposent une extension du cadre développé et appliqué précédemment au Royaume-Uni, par l'utilisation des projections transitoires ayant supporté la rédaction du 4e rapport d'évaluation du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat et par la mise en place de nouvelles techniques de désagrégation statistique.

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES PARUES

Dupeyrat, A., Agosta, C., Sauquet, E., Hendrickx, F., 2008. Sensibilité aux variations climatiques d'un bassin à forts enjeux : le cas de la Garonne. Actes du 13th IWRA World Water Congress 2008 (Montpellier, France, 1-4 septembre 2008), 15 pages.

Sauquet, E., Dupeyrat, A., Hendrickx, F., Labedade, R., Samie, R., Vidal, J.-P., Perrin, C., Boudbraa, H. et Gaëckler, M., 2009. Impacts anthropiques et étiages de la Garonne à l'horizon 2030. Actes du Colloque 193 SHF : «Étiages, Sécheresses, Canicules rares et leurs impacts sur les usages de l'eau», Lyon, 7-8 octobre 2009.



Sensitivity to climate variation of a catchment with high stakes - Case of the Garonne River, France

A. Dupeyrat ⁽¹⁾, C. Agosta ⁽¹⁾, E. Sauquet ⁽²⁾, F. Hendrickx ⁽¹⁾

(1) EDF R&D, National Hydraulics and Environment Laboratory, 6 quai Watier 78400 Chatou – France
 (2) Cemagref, Hydrology-Hydraulics Research Unit, 3 bis quai Chauveau – CP 220, 69336 Lyon Cedex 09 – France

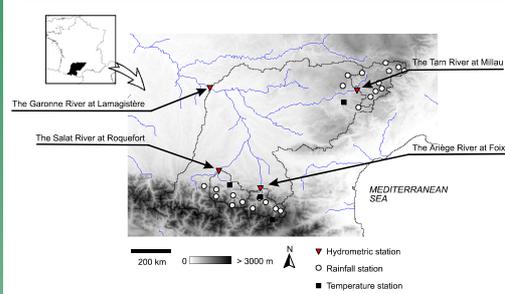


Figure 1. Location of the Garonne River catchment at Lamagistère.

Data

Three streamflow series with more than 15 years of records are used. For the Ariège basin, 25% of the annual volume at Foix come from release of six large reservoirs located upstream. Unaltered daily streamflow (naturalised streamflow) are estimated using observed discharges and reservoir storage variations (Figure 2)
 Four temperature stations and 24 precipitation stations provide daily measurements between 1975 and 2004.

Rainfall runoff modelling

The distributed rainfall-runoff model CEQUEAU (Charbonneau et al., 1977) is calibrated using the split sample test procedure suggested by (Klemeš, 1986 ; Perrin et al., 2001). The objective function selected is the Nash-Sutcliffe criterion calculated at daily time step (Nash and Sutcliffe, 1970) (Figure 3, Figure 4, Figure 5). The Nash criteria indicate a good performance of the hydrological model under current climate (especially during the low flow period)

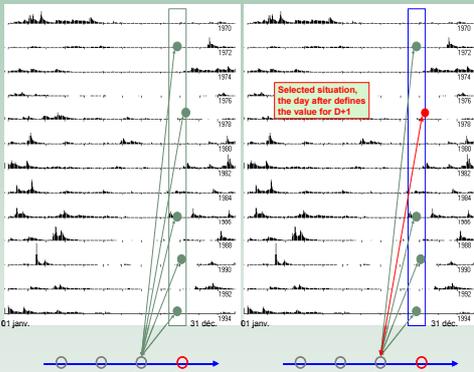


Figure 6. Principle of the weather generator by nearest neighbor bootstrap

Conclusion

Considering the modified climate and its impacts on streamflow (Figure 7)

- The annual runoff volume decreases (-15% -20%) for the Pyrenean basins; no evolution is detected for the Tarn River at Millau.
- The snow storage and the snowmelt contribution to runoff are both reduced
- The increase of temperature induces more severe low flows

The next steps will be investigated

- To use the IPCC scenarios for climate change ;
- To introduce of a simple model to simulate water management (including reservoir, irrigation and the other main water usages) ;
- To calibrate the model on the other sub-basins ;
- To perform uncertainties analysis at each step of the study before combining them.

References

Charbonneau R., Fortin J.P., and Morin G. (1977). The CEQUEAU Model : description and examples of its use in problems related to water resource management. *Bull. Sc. Hydrologiques*, 22, pp 93-202.
 Klemeš V. (1986). Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrol. Sci. J.*, 31(1): 13-24.
 Lall U. and Sharma A. (1996). A nearest neighbor bootstrap for resampling hydrologic time series. *Water Resour. Res.*, 32(3): 679-693.
 Manoha B., Hendrickx F., Dupeyrat A., Bertier C. and Paret S. (2008). Impact des évolutions climatiques sur les activités d'EDF (projet IMPEC). La Houille Blanche N°02-2008, 10.1051/mb:2008018
 Nash J.E. and Sutcliffe J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. 1. A discussion of principles. *J. Hydrol.*, 10, 257-274.
 Perrin C., Michel C. and Andreassian V., 2001. Does a large
 Sharif M. and Burn D.H. (2006). Simulating climate change scenarios using an improved K-nearest neighbor model. *J. Hydrol.*, 325: 179–196.

Context

During the severe hydrological drought periods between 2003 and 2006 the Garonne Basin, located in the South-West of France, experienced conflicts regarding water usage (irrigation for maize crop, hydropower production, water supply...). A national project IMAGINE2030 (Climate and water Management: uncertainties on water resources for the Garonne river basin in 2030 ?) involves Cemagref, the Adour-Garonne Water Agency and EDF, one of the major water stakeholder as manager of reservoirs in Pyrenees. The main objective of this project is to assess water availability and the risks of water shortage in 2030 taking climate change and human activities into account.

The basins under study

Three sub-basins are examined : the Ariège River at Foix (1360 km²), the Salat River at Roquefort (1580 km²) and the Tarn River at Millau (2150 km²) (Figure 1).

- Streamflows observed Ariège River at Foix are altered by hydropower production in winter and influenced by water releases in summer.
- The river flow regimes of the two other basins may be consider free from human impact.

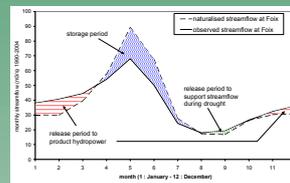


Figure 2. Naturalised and observed monthly streamflow over period 1990-2004 at Foix.

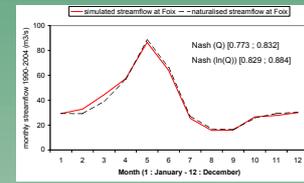


Figure 3. Naturalised and simulated monthly streamflow over period 1990-2004 at Foix.

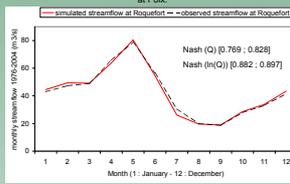


Figure 4. Observed and simulated monthly streamflow over period 1976-2004 at Roquefort.

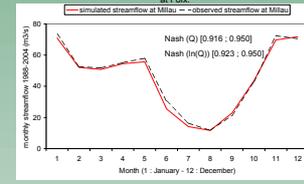


Figure 5. Observed and simulated monthly streamflow over period 1988-2004 at Millau.

Method for deriving realizations of distinct climates

The K-nearest neighbour KNN algorithm (Lall and Shama, 1996)

Let us consider day D in the month M and the year Y. The vector composed by temperature and precipitation characterise the D day. The 30 nearest neighbours of day D are identified among a moving window of 60 days centred around the Dth day of all the years in the meteorological database. The Mahalanobis distance is considered to measure similarity between days. One of the 30 nearest neighbours is randomly selected. The day after determines the vector of the day D+1 (Figure 6). The time series are obtained iteratively at each meteorological station.

50 realisations of 30 years are obtained to represent current climate.

How to obtain a modified climate ?

The selection procedure is biased to give, for instance, more weight to the warm days among the nearest neighbours (Sharif and Burn, 2006).

For this application, 50% of the nearest neighbours of day D are chosen in the two warmest months M of the meteorological database 1975-2004. The modified KNN algorithm is applied to provide 50 daily meteorological scenarios of 30 years representing a stationary but warmer climate (+1°C on average, compared to the 1975-2004 period).

The bias introduced leads to a warmer and drier climate.

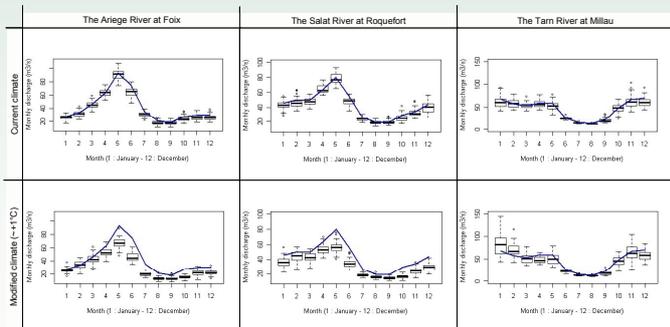


Figure 7. Sensitivity of the river flow regime to climate variations

SENSIBILITE AUX VARIATIONS CLIMATIQUES D'UN BASSIN A FORTS

ENJEUX – LE CAS DE LA GARONNE

Anne Dupeyrat (1), Cécile Agosta (1), Eric Sauquet (2), Frédéric Hendrickx (1)

(1) EDF – R&D – LNHE, 6 quai Watier, 78400 Chatou - France

Tel : +33 (0)1 30 87 70 04, Fax : +33 (0)1 30 87 81 09

Email: anne.dupeyrat@edf.fr

(2) Cemagref, UR Hydrologie-Hydraulique, 3 bis quai Chauveau, 69009 Lyon- France

INTRODUCTION

La gestion des ressources en eau à l'échelle d'un grand bassin versant, comme celui de la Garonne, est particulièrement complexe. Les grands bassins fluviaux subissent bien souvent de fortes pressions pendant la période d'étiage. La Garonne n'échappe pas à cette règle. Les besoins exprimés par les nombreux acteurs de l'eau sur ce secteur peuvent aboutir à des situations difficiles autour du partage de l'eau, comme lors des étiages sévères de 2003, 2005 et 2006. Ces situations de crise récentes ont fait émerger le besoin d'établir un diagnostic sur la gestion de la ressource à l'échelle du bassin et d'engager une réflexion prospective sur la disponibilité de l'eau sous hypothèse de changement climatique et en considérant les usages sur le territoire. Une étude d'impact a donc été initiée dans le cadre d'un projet de recherche baptisé IMAGINE2030, associant le Cemagref, EDF et l'Agence de l'Eau Adour Garonne, avec le soutien financier du MEDAD.

Plusieurs études ont déjà été menées sur des grands bassins fluviaux français : la Seine (Ducharne *et al.*, 2004), le Rhône (Leblois *et al.*, 2004) dans le cadre du programme « Gestion des Impacts du Changement Climatique » du MEDD (GICC) et la Garonne (Caballero *et al.*, 2005) en réponse à une demande spécifique de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne. L'étude GICC-Seine examinait le fonctionnement hydrologique et la qualité biogéochimique du bassin de la Seine soumis à des changements anthropiques directs (évolution des pratiques agricoles et des rejets ponctuels dans les cours d'eau) et indirects (changement climatique). Le projet GICC-Rhône était centré sur l'hydrologie du Rhône et de ses affluents mais abordait les aspects biologiques. Enfin, les travaux de Caballero *et al.* (2005) exploraient les aspects ressources en eau du bassin Adour-Garonne à l'horizon 2025 et 2050. Ces différentes études ne prenaient que très peu en compte les usages de l'eau et les perturbations que ceux-ci engendrent sur les régimes hydrologiques. L'étude présentée ici a pour objectif de prendre en compte de façon explicite les perturbations introduites par les activités anthropiques sur les régimes hydrologiques.

Dans le cadre de cette communication, nous nous concentrerons sur l'étude de sensibilité aux variations climatiques menée sur deux bassins peu influencés, aux comportements hydrologiques différents (le Tarn à Millau et le Salat à Roquefort) et sur un bassin fortement influencé par la production hydroélectrique (l'Ariège à Foix). Elle s'appuie sur les sorties du modèle hydrologique CEQUEAU couplé à un générateur de situations climatiques. Les résultats sont examinés au travers des variables hydrologiques classiques de débit mais également des indicateurs caractérisant les risques de défaillance du système faisant appel aux débits objectifs à maintenir définis dans le plan de

gestion des étiages du bassin. Enfin, nous présenterons l'approche employée pour mesurer les effets combinés d'une modification du climat et la gestion multi-contraite des barrages. Les premiers résultats obtenus pour l'Ariège à Foix seront commentés.

SECTEUR D'ETUDE ET BASE DE DONNEES HYDRO-METEOROLOGIQUES

Le bassin versant de la Garonne à Lamagistère est soumis à des influences climatiques multiples (atlantique, méditerranéenne et climat de montagne), donnant lieu à des réponses hydrologiques différenciées. A cette diversité naturelle s'ajoute une complexité d'origine anthropique. Le bassin présente en effet sur son territoire de nombreuses exploitations agricoles et plusieurs retenues hydroélectriques dont certaines sont sollicitées pour soutenir les étiages.

Neuf sous-bassins sont examinés dans le projet. La présente étude se concentre sur trois d'entre eux ayant des surfaces drainées du même ordre de grandeur. Ils sont représentatifs de la variabilité des régimes hydrologiques rencontrés sur le bassin de la Garonne :

- le Tarn à Millau situé au sud-ouest du Massif Central (2150 km²) : les écoulements mesurés sont considérés naturels car il n'existe aucune retenue majeure et les prélèvements pour l'agriculture y sont négligeables ;
- le Salat à Roquefort situé dans les Pyrénées (1580 km²) : en amont de Roquefort, on ne recense qu'une seule retenue de faible capacité. Le fonctionnement hydrologique résultant est, en première approximation, quasiment naturel ;
- l'Ariège à Foix situé dans les Pyrénées (1360km²) : le régime hydrologique de ce cours d'eau est principalement influencé par la production hydroélectrique, les surfaces irriguées étant négligeables sur le bassin.

Le climat sur ces secteurs est décrit par un réseau de points de mesure sol sur la période 1975-2004. Les séries de pluie journalières ont été fournies par la Division Technique Générale (EDF - DTG). Les données de températures maximum et minimum journalières de l'air (source Météo France) permettent d'accéder à une moyenne journalière et de calculer l'évapotranspiration potentielle (ETP) journalière, selon une formulation inspirée de Thornthwaite. En complément, une température moyenne journalière pour la France est calculée à partir de la base de données SAFRAN (Quintana-Segui *et al.*, 2008).

Les séries de débits journaliers sont issues de la banque nationale de données pour l'hydrométrie et l'hydrologie (<http://www.hydro.eaufrance.fr/>). Des chroniques et mesures complémentaires ont été fournies par EDF - DTG. Pour évaluer l'impact de l'évolution du climat sur le régime hydrologique de l'Ariège, et ainsi projeter l'état des ressources indépendamment des pratiques liées à l'hydroélectricité et au soutien d'étiage, une série de débits naturels a été reconstituée à Foix. Cette opération de « renaturalisation » effectuée à partir des débits observés influencés repose sur un bilan comptable minutieux à l'aval de chaque ouvrage hydraulique des volumes transférés en dehors du ou vers le bassin (débits turbinés au droit de la station, débits évacués en crue par les ouvrages de décharge, débits réservés et débits perdus par fuite au travers du barrage) et accumulés dans la retenue.

Les contours des bassins versants et les différents points de mesure sont reportés en Figure 1.

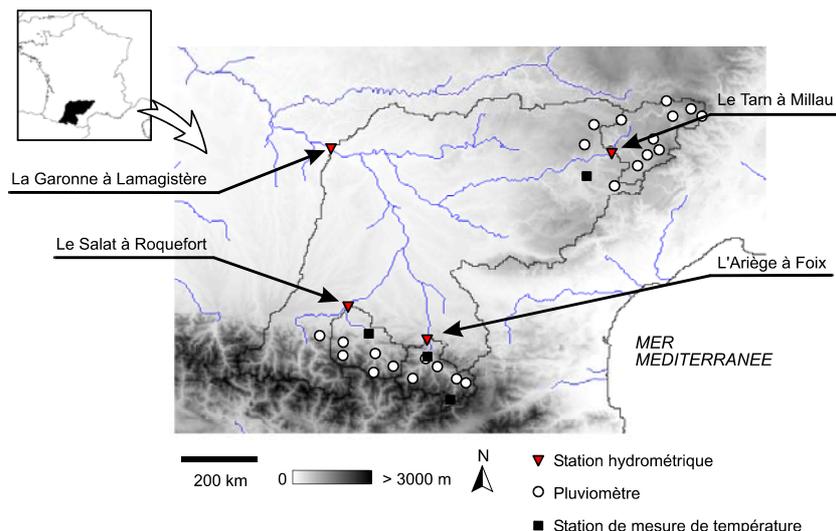


Figure 1 : Bassins étudiés et localisation des stations hydro-météorologiques

RESTITUTION DU PASSE PAR MODELISATION

Le modèle pluie-débit CEQUEAU

CEQUEAU est un modèle hydrologique conceptuel spatialisé développé par l’Institut National de la Recherche Scientifique Eau Terre et Environnement du Canada (Morin *et al.*, 1981). Il est utilisé par EDF R&D depuis la fin des années 1990 pour des études de changements climatiques sur de grands bassins français (Hendrickx, 2001 ; Manoha *et al.*, 2008). CEQUEAU fournit en sortie des chroniques de débit en différents points considérés comme exutoires, à partir de séries de pluie et de température de l’air. Pour la mise en oeuvre du modèle, les bassins versants sont discrétisés en mailles élémentaires. A chaque maille, sont associées la pluie et la température de la station la plus proche, affectées de coefficients fonctions des écarts en altitude entre la maille et la station météorologique. La fonction de production estime les différentes composantes du bilan hydrologique sur chaque cellule élémentaire et à chaque pas de temps. Une fonction de transfert régit ensuite les écoulements de maille en maille de l’amont à l’exutoire selon le réseau hydrographique défini par la topographie.

Qualité des reconstitutions

L’utilisation de ce modèle requiert une phase de calage des paramètres utilisés par les fonctions internes. Ceci est réalisé par optimisation pour adapter la structure aux spécificités du bassin étudié. Le choix des valeurs des paramètres s’appuie sur deux critères numériques, qui mesurent de manière agrégée la différence entre la sortie du modèle et les valeurs mesurées de débit : le critère de Nash et Sutcliffe (1970) calculé sur les débits $Nash(Q)$ et le même critère calculé sur le logarithme de la quantité $Q(t) + \overline{QA} / 40$ où $Q(t)$ et \overline{QA} sont respectivement le débit observé à l’instant t et la moyenne des débits sur la période d’étude. Ce deuxième critère $Nash(\ln(Q))$ met davantage l’accent sur la restitution des basses eaux que le critère de Nash sur les valeurs brutes.

La procédure d’évaluation est celle de calage –contrôle (Klemeš, 1986). La chronique de débit est scindée en deux portions de longueurs sensiblement égales, la première portion est utilisée pour caler le modèle ; les paramètres obtenus sont ceux conservés sur la seconde portion dite « de contrôle » pour la validation. De la même manière, le calage du modèle est réalisé sur la deuxième sous-série et on

applique le modèle sur la première. Finalement, nous obtenons des chroniques simulées sur deux périodes indépendantes que nous comparons aux observations. Ainsi, nous mesurons les capacités du modèle à reproduire les débits dans une configuration inédite. Le pas de temps choisi pour l'étude est la journée. Les résultats concernant cette phase de calage – contrôle sont donnés dans le Tableau 1 et la Figure 2.

Dans l'ensemble le modèle restitue assez bien les débits sur les bassins versants étudiés. Le modèle appliqué au Tarn à Millau est le plus performant au sens des critères choisis. Le fait de n'avoir quasiment aucun stock de neige sur ce bassin explique grandement ce très bon résultat. Les modèles restituent globalement bien les étiages même s'il semble y avoir une légère surestimation des bas débits pour les bassins du Tarn à Millau et du Salat à Roquefort.

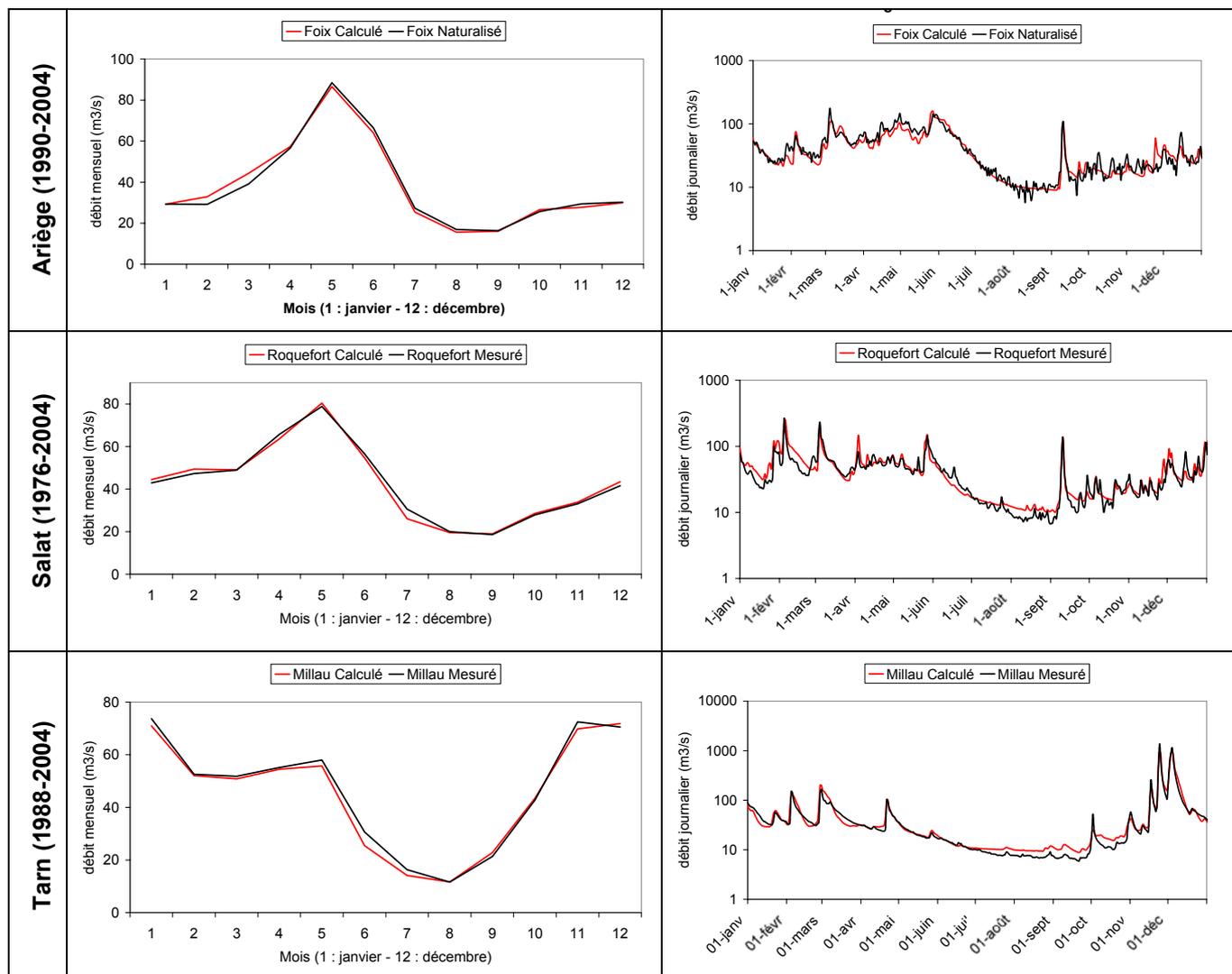


Figure 2 : Débits mensuels interannuels sur la plus longue période de calage possible et débits journaliers de l'année 2003 du Tarn à Millau, du Salat à Roquefort et de l'Ariège à Foix (noir : débits observés et rouge : débits calculés par le modèle)

Bassin	Calage		Contrôle			
L'Ariège à Foix (débit naturalisé)	1989-1996	\overline{QA} Mes/ \overline{QA} Calc	0.981	1997-2004	\overline{QA} Mes/ \overline{QA} Calc	1.073
		Nash (Q)	0.785		Nash (Q)	0.821
		Nash (ln(Q))	0.828		Nash (ln(Q))	0.882
	1997-2004	\overline{QA} Mes/ \overline{QA} Calc	1.002	1989-1996	\overline{QA} Mes/ \overline{QA} Calc	0.916
		Nash (Q)	0.831		Nash (Q)	0.762
		Nash (ln(Q))	0.881		Nash (ln(Q))	0.824
Le Salat à Roquefort	1975-1989	\overline{QA} Mes/ \overline{QA} Calc	1.027	1990-2004	\overline{QA} Mes/ \overline{QA} Calc	0.975
		Nash (Q)	0.812		Nash (Q)	0.769
		Nash (ln(Q))	0.899		Nash (ln(Q))	0.885
	1990-2004	\overline{QA} Mes/ \overline{QA} Calc	0.981	1975-1989	\overline{QA} Mes/ \overline{QA} Calc	1.033
		Nash (Q)	0.828		Nash (Q)	0.787
		Nash (ln(Q))	0.890		Nash (ln(Q))	0.896
Le Tarn à Millau	1987-1995	\overline{QA} Mes/ \overline{QA} Calc	1.002	1996-2004	\overline{QA} Mes/ \overline{QA} Calc	0.947
		Nash (Q)	0.936		Nash (Q)	0.925
		Nash (ln(Q))	0.934		Nash (ln(Q))	0.941
	1996-2004	\overline{QA} Mes/ \overline{QA} Calc	1.006	1987-1995	\overline{QA} Mes/ \overline{QA} Calc	1.055
		Nash (Q)	0.946		Nash (Q)	0.916
		Nash (ln(Q))	0.946		Nash (ln(Q))	0.925

Tableau 1 : Débits moyens mesurés et calculés par le modèle, valeurs du critère de Nash sur les débits et les logarithmes des débits en période de calage et contrôle pour les bassins du Tarn à Millau, du Salat à Roquefort et de l'Ariège à Foix.

LES SCENARIOS CLIMATIQUES ENVISAGES

L'approche classique pour réaliser une étude d'impact consiste à alimenter les modèles hydrologiques en s'appuyant sur les prédictions des GCMs. Une autre démarche est adoptée ici : les séries alimentant les modèles sont construites de manière stochastique à partir d'observations. Le générateur choisi (Lall et Sharma, 1996 ; Harrold *et al.*, 2003) réalise un ré-échantillonnage par proches voisins. Plaçons nous au $J^{\text{ème}}$ jour de l'année de simulation, pour lequel les p valeurs de pluie et de températures sont connues sur les sites d'intérêt ; nous recherchons alors les p valeurs pour $J+1$. Ce p -uplet est obtenu comme suit :

- les situations sur une fenêtre temporelle centrée autour des jours $n^{\circ}J$ des années d'observation disponibles sont extraites ;
- la ressemblance entre ces situations et le jour J est mesurée au travers d'une distance globale entre le vecteur considéré et ceux des situations extraites ;
- finalement, sur la base de la distance, seules les K plus proches, $i=1, \dots, K$ sont conservées ;
- chaque p -uplet ainsi sélectionné i est affecté d'une probabilité conditionnelle de tirage (\sim inverse de la distance, de telle sorte que les situations les plus proches ont plus de chance de sortir) ;
- un voisin i^* est ensuite choisi aléatoirement dans la liste des K candidats potentiels ;
- les valeurs de la journée suivante i^*+1 définissent celles du p -uplet du jour $J+1$;
- le processus est réitéré autant de fois que nécessaire.

Le tirage simultané dans les p séries permet de préserver la liaison spatiale entre sites et la cohérence entre les variables météorologiques. Le critère d'analogie permet lui de reconstituer la dynamique

temporelle. Il est possible de conditionner le générateur de telle sorte qu'il privilégie des voisins dans les mois les plus chauds, créant ainsi une chronologie représentative d'un climat plus chaud (Sharif et Burn, 2006).

Dans le cadre de notre application, la fenêtre temporelle de sélection est de 60 jours centrée sur le jour $n^{\circ}J$, $K=30$ voisins sont sélectionnés et $p=33$ chroniques sont générées ; il s'agit des 8 séries de températures minimales et maximales des quatre stations météorologiques, des pluies aux 24 postes de la Figure 1 et de la température journalière moyenne représentative de la France métropolitaine, calculée à partir de la base de données SAFRAN. Nous avons considéré cinquante réalisations de 29 ans représentatives du climat sur la plus longue période commune août 1975 - juillet 2004 ; cet ensemble est désigné dans la suite par « ClimRef » (Figure 3).

Deux climats plus chauds sont simulés avec deux biais distincts dans la procédure de sélection des voisins. Ainsi le premier exercice de simulation conduit à sélectionner 50% des K candidats potentiels du mois M dans les huit mois M parmi les plus chauds ; il résulte des températures mensuelles moyennes sur la région supérieures de 0.85°C à celles de la période 1975-2004 (« Clim1 »). Dans le second exercice, les deux mois M les plus chauds concentrent 50% des K candidats du mois M ; la hausse des températures atteint 1.25°C (« Clim2 »).

La Figure 4 relative à Clim2 montre que :

- le biais dans le ré-échantillonnage conduit à une pluviométrie moins abondante sur les Pyrénées (cf. la station de Pradières), tandis que sur le secteur du Massif Central (cf. la station de Montvert), les étés simulés sont certes plus secs mais les automnes peuvent enregistrer des cumuls mensuels importants du fait d'épisodes cévenols toujours présents dans le panier de situations candidates ;
- corrélativement à la diminution d'épisodes pluvieux sur les Pyrénées, la variabilité mesurée par l'écart-type des précipitations journalières est plus faible sous climat plus chaud que celle prévalant dans la période 1975-2004. Le signal température présente peu de modification en termes de variabilité captée à l'échelle mensuelle.

Les mêmes tendances sont perceptibles pour Clim1.

LES IMPACTS SUR LE REGIME DES EAUX

Les 50 simulations de 29 ans Climref, Clim1 et Clim2 ont alimenté le modèle CEQUEAU sur les trois bassins (Figure 5). Nous en retenons une distribution des débits mensuels de référence prenant en compte la variabilité du climat actuel. Les écoulements annuels des deux cours d'eau pyrénéens diminuent (de l'ordre de -15% pour Clim1 et -20% pour Clim2). Plus en détail, l'Ariège à Foix voit ses débits d'hiver légèrement croître (la part des précipitations liquides est plus abondante) et des débits de fonte de printemps diminuer (le manteau neigeux est moins épais). Les débits estivaux calculés sur la période juin-août obtenus s'effondrent de l'ordre de -20% pour Clim1 et -30% pour Clim2 conséquence d'une évapotranspiration accrue. Sur le bassin du Tarn à Millau, en revanche, le module est stable : la chute des débits estivaux est compensée par des débits d'hiver accrus.

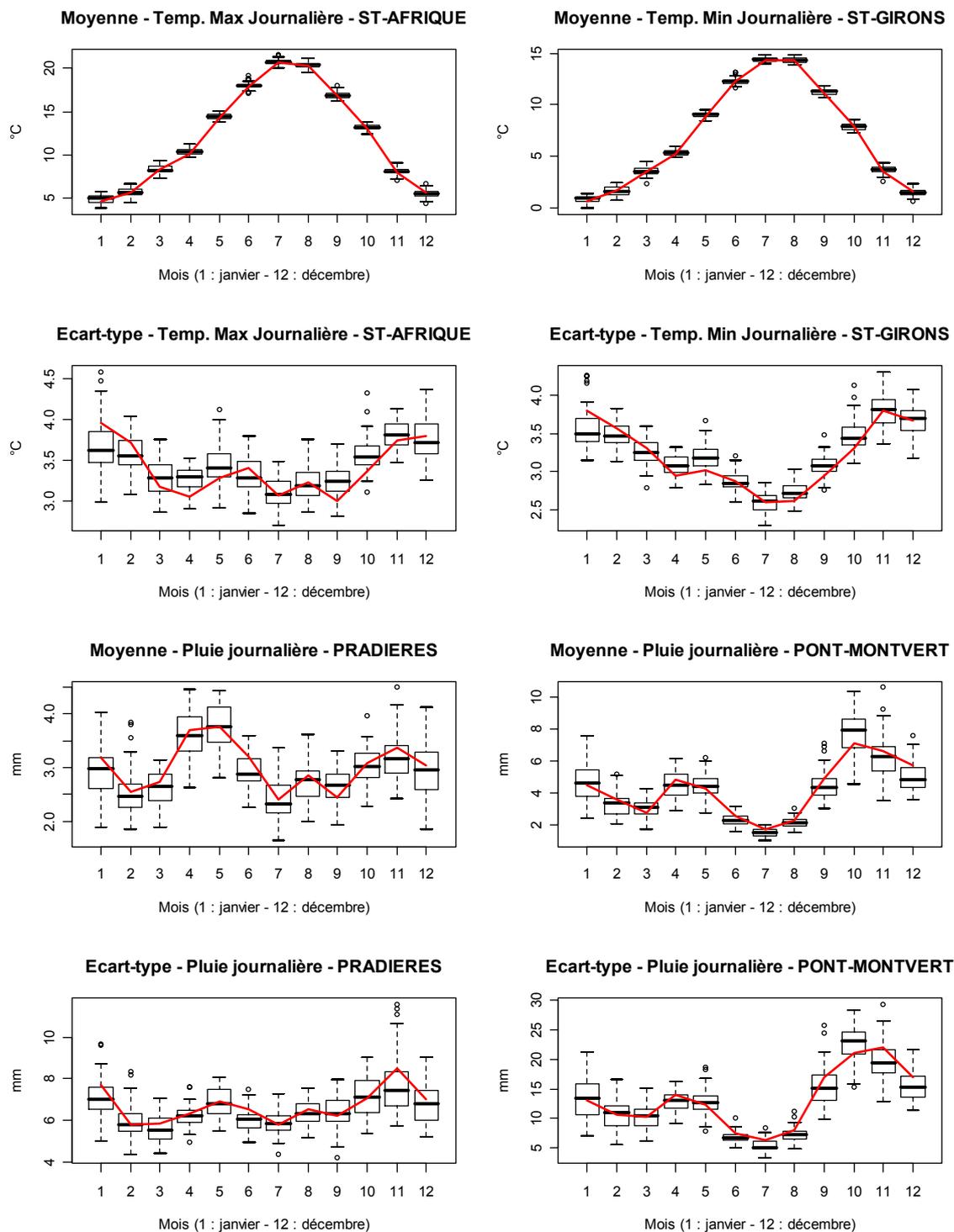


Figure 3 : Caractéristiques mensuelles simulés par ré-échantillonnage selon l’algorithme KNN sans biais (en rouge : données de référence sur la période 1975-2004), exemples de restitution sur quatre stations réparties dans le Massif Central (St-Afrique et Pont-Montvert) et dans les Pyrénées (St-Girons et Pradières). Le rectangle est défini par les premier et troisième quartiles et coupé par la médiane, la longueur des moustaches correspond à 1,5 fois l’écart interquartile

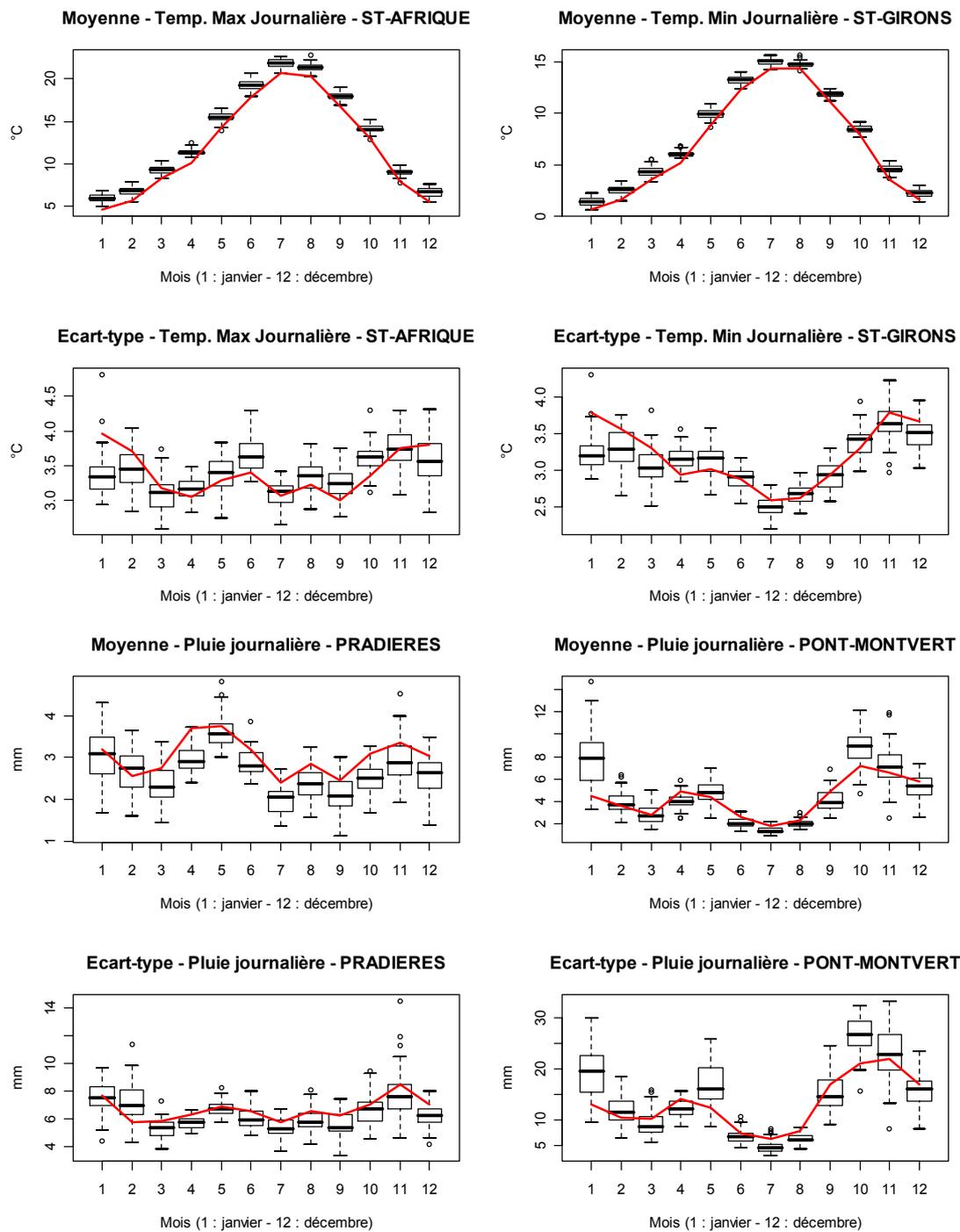


Figure 4 : Mêmes graphiques qu'en Figure 3 pour l'exercice Clim2.

Pour évaluer plus en détail les conséquences sur la gestion des eaux, nous avons examiné les fréquences d'apparition des crises et leur persistance. Dans le cadre spécifique des étiages, ces situations entraînent des procédures de restrictions et de limitations des usages. Elles correspondent à des séquences de débits inférieurs à une valeur réglementaire S . Deux variables proposées par (Loucks, 1997) participent au diagnostic :

- la fiabilité F , proportion de valeurs au-dessus du seuil S ; F renseigne la probabilité d'observer le système dans un état satisfaisant ;
- la résilience R , définie dans la littérature comme l'inverse de la durée moyenne des épisodes sous le seuil. Nous lui avons préféré un indicateur basé sur la durée médiane des épisodes L_{med} , statistique plus robuste : $R = 1/L_{med}$. R quantifie la capacité du système à revenir dans un état satisfaisant.

Le Plan de Gestion d'Etiage (PGE) Garonne-Ariège établi en février 2004 fournit des valeurs pour S au travers des Débits Objectifs d'Etiage (DOE) spécifiés en différents points du réseau hydrographique. Le DOE est la « valeur de débit fixée [...] au-dessus de laquelle sont assurés la coexistence normale de tous les usages et le bon fonctionnement naturel du milieu naturel aquatique [...]. Ce débit doit, en conséquence, être garanti chaque jour de chaque année ». Il est proche du débit moyen sur 10 jours minimal annuel $VCN10$ de fréquence quinquennale sèche, dans une configuration naturelle de bassin versant. Nous avons donc fixé en conséquence la valeur de S : $8.5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ pour le Salat à Roquefort et $8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ pour le Tarn à Millau et pour l'Ariège à Foix (ajustement à la loi log normale).

Les valeurs pour les différents exercices sont présentées dans le Tableau 2. Ces statistiques donnent une vision différente de celle fournie par les débits mensuels. Tout d'abord, il est possible de comparer les valeurs observées (Obs.) sur la période de calage du modèle hydrologique aux valeurs simulées (Rec.) sur cette même période et sur la période 1975-2004 entre parenthèses. Nous pouvons constater que la fiabilité est relativement bien prédite par CEQUEAU, avec une valeur F élevée pour le Salat et le Tarn et un peu plus faible pour l'Ariège. Pour la résilience, CEQUEAU restitue la hiérarchie observée entre les bassins, cependant, les valeurs restituées sont plus faibles : elles révèlent des séquences de crise plus longues. Le modèle peine à reproduire des oscillations autour du seuil de référence.

Dans le Tableau 2 nous avons résumé les valeurs des trois climats, par la médiane en gras, encadrée par les deux quartiles empiriques sur la base des 50 réalisations. Un climat plus chaud entraîne des crises plus longues. Le Tarn est hors situation de crise 99% du temps et ce chiffre reste constant quelle que soit la hausse de température. L'Ariège est le bassin le plus sensible. Le débit journalier est inférieur au $VCN10$ de fréquence quinquennale sèche 10% du temps pour le climat le plus extrême, ce qui signifie que la proportion de jours de crise est multipliée par deux. Le Salat est un bassin intermédiaire. Pour ce qui concerne la résilience, les valeurs évoluent à la baisse avec la hausse des températures, signe d'une augmentation de la durée des épisodes sous le seuil. Il faut noter un écart important entre la résilience observée et celle reconstituée via le modèle pour l'Ariège. Malgré tous les efforts de reconstitution d'un débit quasi-naturel, des oscillations parasites persistent d'où une durée médiane sous le seuil de 1 jours, et une valeur de 1 pour la résilience.

Sur la base de ces deux indicateurs, ce sont les bassins à composante neigeuse qui évoluent le plus. Nous pouvons soupçonner le fait qu'outre une réduction des apports, les bassins subissent une modification profonde de régime (caractère nival moins prononcé) ; le Tarn est actuellement pluvial méditerranéen, il le demeure et ne donc subit qu'un contre-coup de la modification du climat.

		Obs	Rec.	ClimRef	Clim1	Clim2
FIABILITE	L'Ariège à Foix	95.8	96.5 (98.1)	97.3 [96.5 ; 98.2]	93.5 [91.9 ; 95.0]	90.6 [88.5 ; 92.9]
	Le Salat à Roquefort	97.9	99.4 (99.4)	99.0 [98.7 ; 99.5]	97.0 [95.7 ; 98.1]	94.9 [92.9 ; 96.6]
	Le Tarn à Millau	97.7	99.1 (99.3)	99.8 [99.1 ; 100.]	99.3 [98.4 ; 99.8]	98.8 [98.2 ; 99.7]
RESILIENCE	L'Ariège à Foix	1.00	0.20 (0.18)	0.13 [0.11 ; 0.17]	0.12 [0.11 ; 0.15]	0.11 [0.10 ; 0.13]
	Le Salat à Roquefort	0.50	0.18 (0.17)	0.20 [0.16 ; 0.29]	0.20 [0.16 ; 0.25]	0.17 [0.16 ; 0.22]
	Le Tarn à Millau	0.17	0.04 (0.07)	0.16 [0.10 ; 1.00]	0.16 [0.07 ; 0.33]	0.14 [0.09 ; 0.18]

Tableau 2 : Résultats des exercices de modélisation sur les critères de fiabilité et de résilience

QUELLE GESTION POUR LE FUTUR ?

Peu d'études ont été réalisées à ce jour sur le devenir de l'hydroélectricité sous changement climatique à une échelle locale. Une des plus récentes (Schaeffli *et al.*, 2007) porte sur le fonctionnement de la retenue de Mauvoisin (Alpes Suisses). Elle s'est inspirée des travaux américains de Payne *et al.* (2004) et de Christensen *et al.* (2004). Un modèle hydrologique représente les apports naturels dans le réservoir. Le débit turbiné du jour à l'aval de l'ouvrage est la somme d'une composante déterministe, *i.e.* la moyenne différenciée selon la période de l'année (en période de fonte ou non) et selon le jour de la semaine (dans le week-end ou non) et d'une composante stochastique, tirée aléatoirement dans une distribution statistique. Les paramètres des modèles sont calés sur le passé. Le modèle hydrologique est alimenté par différents scénarios climatiques et les auteurs vérifient le respect des règles de marnage du plan d'eau dans les prochaines décennies.

La représentation des influences sur le bassin de l'Ariège proposée ici est un peu différente. En effet, l'hypothèse de débits en sortie de retenue conditionnés pour l'essentiel par le hasard nous paraît trop simpliste. En France, la production hydroélectrique vient en soutien de celle d'origine nucléaire pour garantir l'équilibre entre l'offre et la demande d'électricité, mais aussi pour assurer la sécurité du système en permettant l'ajustement temps réel de la production à la consommation. Le placement de l'eau dans l'année vise en particulier à disposer d'une réserve maximale face aux plus grandes demandes de consommation comme les vagues de froid intense en lien avec le chauffage électrique.

Pour représenter ces éléments nous avons considéré un indicateur de température comme marquant la saisonnalité de la consommation électrique. Pour ce besoin, nous avons constitué un premier vecteur (P) considéré constant lorsque la température moyenne France est supérieure à 15 °C et égal à l'écart à 15°C quand la température moyenne France de l'air passe sous ce seuil. Ce vecteur P caractérise l'intérêt saisonnier à faire appel à l'hydroélectricité. On peut noter que cette définition, ne tient pas compte de l'incidence que peut avoir le développement de la climatisation en France. L'hypothèse que la climatisation a un effet moindre que le chauffage électrique sur la consommation d'électricité est vérifiée aujourd'hui mais sera probablement à ré-interroger dans un contexte de réchauffement climatique.

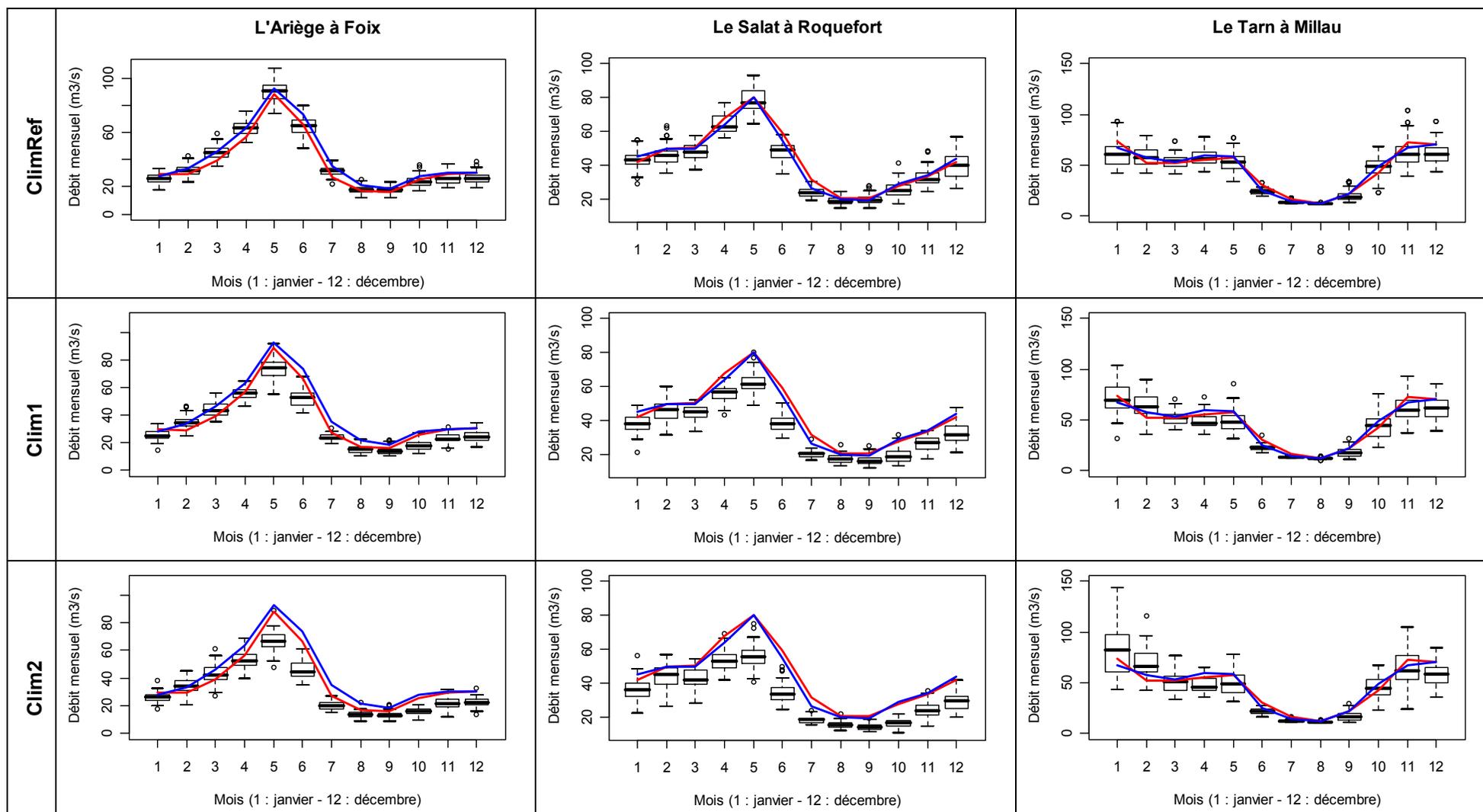


Figure 5 : Restitutions du modèle CEQUEAU sur les trois bassins tests pour les différents climats simulés (en rouge : données observées qui ont participé au calage du modèle, en bleu : valeurs issues de CEQUEAU sur la période 1975-2004)

La question classique d'un gestionnaire d'une réserve hydroélectrique peut s'exprimer à tout instant t par la question suivante : « ai-je plus d'intérêt à turbiner aujourd'hui ou à réserver mon volume d'eau pour une utilisation ultérieure ? ». On sent bien que la réponse à cette question sera conséquence à la fois de l'expression immédiate des besoins du système électrique, de l'anticipation des besoins ultérieurs de ce même système mais aussi de l'espérance d'apport à la retenue ou encore des contraintes s'appliquant aux retenues comme par exemple des objectifs de soutien d'étiage.

Usuellement, la résolution d'une telle question, ou plutôt la recherche de la commande optimale se fait en s'appuyant sur les bases théoriques de la programmation dynamique (Bellman, 1957 ; Borne *et al.*, 1990), et notamment le principe de Bellman qui s'exprime dans sa forme discrète par : « Dans un problème de décision, tout sous ensemble de décisions optimales est optimal dans les mêmes conditions ».

Pour rechercher le chemin optimal d'un état initial de stock A , à un état final pour un horizon donné, on détermine tout d'abord la stratégie de gestion du stock. Elle vise à définir les valeurs d'usage de l'eau pour tous les instants t de la simulation et ce quel que soit l'état du stock. Cette valeur permet notamment l'arbitrage entre l'appel immédiat par le système électrique et l'intérêt de réserver le volume d'eau pour un usage ultérieur.

L'élaboration de la stratégie se traduit en programmation dynamique par la constitution de la matrice des valeurs de Bellman (VB) telle que :

$$VB(t, Vstock) = \max_{Vturb} [P(t) \cdot Vturb + VB(t+1, Vstock - Vturb + Ventrant)]$$

avec $Vstock$: volume dans la retenue ; P : vecteur d'intérêt à turbiner ; $Vturb$: volume journalier turbiné ; $Ventrant$: volume journalier entrant dans la retenue

La valeur de Bellman traduit l'utilité économique à l'instant t d'une réserve de volume $Vstock$ et pour l'horizon de temps final que l'on se fixe. Les valeurs d'usage sont alors définies comme les dérivées par rapport à l'état des valeurs de Bellman. Elles traduisent l'intérêt à faire croître le stock et par là même l'intérêt à garder l'eau pour plus tard.

Pour notre application plusieurs hypothèses de modélisation ont été prises :

- l'ensemble des réserves de l'Ariège à Foix a été agrégé de manière à limiter la dimension du problème à la gestion d'un seul stock ;
- on se place en avenir connu, c'est-à-dire qu'on fait l'hypothèse que nos apports entrants et la température d'air servant à la construction du vecteur d'intérêt P sont parfaitement connus ;
- une contrainte de soutien du débit à Foix à la valeur objectif de 8 m³/s définie précédemment est aussi intégrée dans notre modélisation.

La simulation de la trajectoire de cette macro réserve est ensuite réalisée sur la base des valeurs d'usage calculées qui permettent à tout instant et quel que soit l'état de la réserve d'arbitrer entre l'utilisation immédiate ou ultérieure de l'eau.

Ces choix de modélisation étant faits, il convient dans une première étape de vérifier le réalisme de cette représentation dans les situations passées, notamment l'influence saisonnière qu'exerce l'hydroélectricité sur la ressource naturelle. Les débits mensuels influencés et la trajectoire moyenne de la macro-réserve sont donc calculés en exploitant les relations établies plus haut alimentées par les débits et températures des 50 simulations de ClimRef (Figure 6 et Figure 7 courbe rouge). Le modèle de gestion est globalement satisfaisant, il fournit des débits mensuels influencés sous ClimRef comparables à ceux observés. Il restitue bien la phase de stockage au moment de la fonte des neiges et la phase de déstockage pour la production d'électricité en hiver. La réserve est un peu sollicitée en août sans doute en lien avec l'objectif de soutien d'étiage mis dans le modèle. Ces résultats cohérents nous ont permis d'exploiter le modèle de pression sous climat modifié.

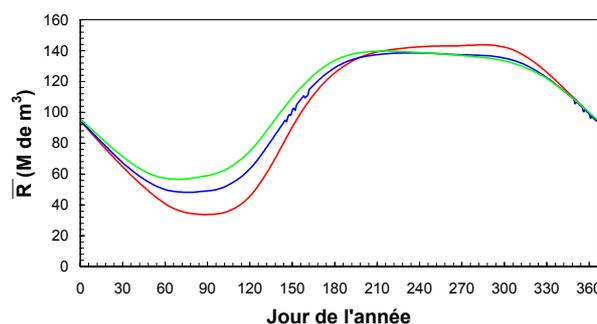
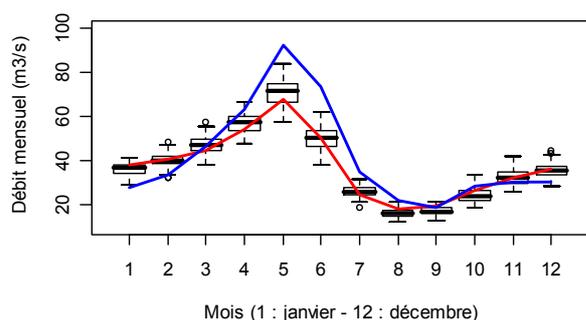


Figure 6 : Débits mensuels naturels reconstitués issus du modèle sur la période 1975-2004 (en bleu) et influencés sur la période de calage (en rouge), les box plots représentent les résultats sur les 50 simulations de ClimRef

Figure 7 : Règle de gestion, issue de l'analyse des débits naturels reconstitués et observés influencés de l'Ariège à Foix (en rouge : ClimRef ; en bleu : Clim1 ; en vert : Clim2).

Les débits mensuels influencés et la trajectoire moyenne de la macro-réserve sont donc calculés en exploitant les relations établies plus haut alimentées par les débits et températures des 50 simulations de Clim1 et Clim2 (Figure 7 et Figure 8).

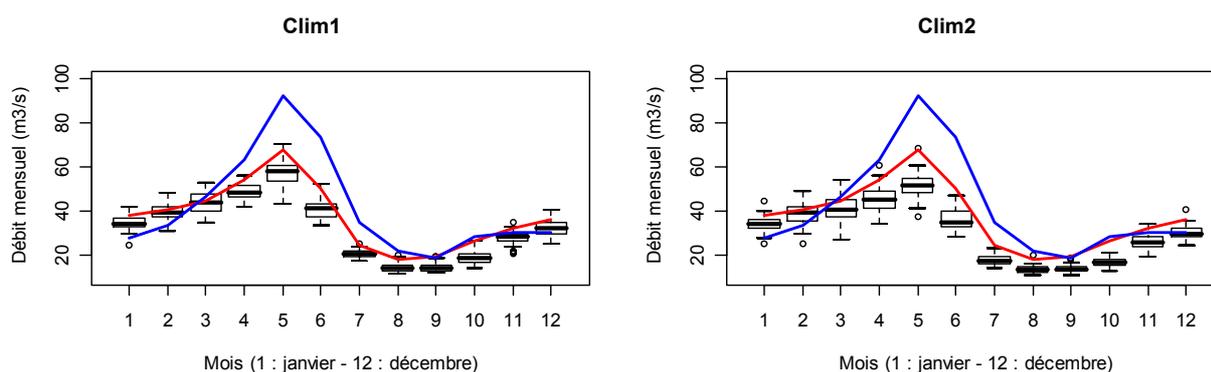


Figure 8 : Débits mensuels naturels reconstitués issus du modèle sur la période 1975-2004 (en bleu) et influencés sur la période de calage (en rouge), les box plots représentent les résultats sur les 50 simulations des climats modifiés

Force est de constater sous climat perturbé que la fluctuation de la réserve est moindre, conséquence d'une réduction des apports. On observe également que le remplissage de la macro-réserve semble avoir lieu plus tôt dans l'année sous climat modifié, conséquence de l'avancée de l'onde de fonte. Les soutiens d'étiage semblent également plus forts (déstockage l'été observé sur la Figure 7) sous climat modifié en cohérence avec les résultats obtenus sur la fiabilité.

CONCLUSIONS

Les résultats préliminaires montrent des résultats très satisfaisants en termes de modélisation hydrologique dans une configuration naturelle et sous influence. L'analyse de sensibilité aux perturbations du climat montre des évolutions particulièrement marquées sur les bassins pyrénéens, certainement du fait d'une fonte avancée du manteau neigeux et des précipitations moins abondantes. Le Tarn reste relativement stable grâce à des pluies d'automne et d'hiver toujours abondantes. En l'état actuel de nos travaux, la cohérence des exercices de simulations de climat devra être vérifiée en s'appuyant sur les sorties des modèles climatiques (scénarios de l'AR4).

Des indicateurs de défaillance ont été calculés sur les chroniques naturelles. Ils permettent d'appréhender les risques d'apparition des crises et leur persistance ; bien évidemment, ils sont dépendants de la qualité de la modélisation et du réalisme des forçages au pas de temps journalier.

Les analyses des sous bassins apporteront des éléments de comparaison et permettront de mesurer les bassins les plus sensibles. Un autre point clé sera la combinaison des contributions des différents secteurs, des déséquilibres locaux pourraient bien apparaître malgré un comportement jugé globalement satisfaisant au niveau de la Garonne à Lamagistère.

Le dernier volet est consacré aux usages sur le bassin. Nous avons mis en place une méthode sur le bassin de l'Ariège. L'existence de chroniques observées et renaturalisées a permis d'appréhender la gestion des ouvrages. Le remplissage et la vidange des stocks d'eau sont gouvernés par la production d'électricité et le soutien des étiages. Le fonctionnement a été approché par un modèle de pression, alimenté par des variables internes (apports et niveaux de remplissage) et climatiques (température France). Le modèle a été jugé satisfaisant. En supposant les paramètres de ce modèle stationnaires, nous l'avons appliqué aux scénarios futurs. La réduction des apports naturels entraîne une diminution de la fluctuation de la réserve agrégée. Il restera à vérifier la capacité de généralisation d'une telle approche sur les autres secteurs où l'influence de l'irrigation pourra dominer, puis à combiner l'ensemble de ces influences à l'échelle d'un grand bassin versant comme la Garonne.

REMERCIEMENTS

Ces travaux contribuent au projet IMAGINE2030 dans le cadre de l'appel à proposition « Risque, Décision, Territoire » lancé en 2006. Merci à l'ensemble des partenaires du projet et à Météo-France pour la mise à disposition de la base de données SAFRAN pour les besoins de recherche.

REFERENCES

- Bellman R. (1957). *Dynamic Programming*. Princeton Univ. Press.
- Borne P., Dauphin-Tanguy G., Richard J.P., Rotella F. et Zambetakis I. (1990). *Commande et Optimisation des Processus*. Ed. Technip, 303 pages.

- Caballero Y., Voirin-Morel S., Habets F., Noilhan J., Le Moigne P., Lehenaff A. et Boone A. (2005). Hydrological sensitivity of the Adour-Garonne river basin to climate change. *Water Resour. Res.*, 43, 10.1029/2005WR004192
- Christensen N.S., Wood A.W., Voisin N., Lettenmaier D.P. et Palmer R.N. (2004). The effects of climate change on the hydrology and water resources of the Colorado River basin. *Clim. Change*, 62(1-3): 337-363.
- Ducharne A., et 22 coauteurs (2004). Influence du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique et biogéochimique du bassin de la Seine, Rapport final du projet GICC-Seine, 60 pages.
- Harrold T.I., Sharma A. et Sheather S.J. (2003). A nonparametric model for stochastic generation of daily rainfall occurrence. *Water Resour. Res.*, 39(10), 10.1029/2003WR002182
- Hendrickx F. (2001). Impact hydrologique d'un changement climatique sur le bassin du Rhône. *Hydroécol. Appl.*, 13(1), 77-100.
- Klemeš V. (1986). Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrol. Sci. J.*, 31(1): 13-24.
- Lall U. et Sharma A. (1996). A nearest neighbor bootstrap for resampling hydrologic time series. *Water Resour. Res.*, 32(3): 679-693.
- Leblois E. et al. (2004). Projet GICC-Rhône. Rapport final, octobre 2004, 184 pages.
- Loucks P. (1997). Quantifying trends in system sustainability. *Hydrol. Sci. J.*, 42(4): 513-530.
- Manoha B., Hendrickx F., Dupeyrat A., Bertier C. et Parey S. (2008). Impact des évolutions climatiques sur les activités d'EDF (projet IMPEC). *La Houille Blanche* N°02-2008, 10.1051/lhb:2008018
- Morin G., Couillard D., Cluis D., Jones H.G. et Gauthier J.M. (1981). Prédiction des températures de l'eau en rivière à l'aide d'un modèle conceptuel. *Hydrol. Sci. J.*, 32(1) : 31-41.
- Payne J.T., Wood A.W., Hamlet A.F., Palmer R.N. et Lettenmaier D.P. (2004). Mitigating the effects of climate change on the water resources of the Columbia river basin. *Clim. Change*, 62(1-3): 233-256.
- Nash J.E. et Sutcliffe J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. 1. A discussion of principles. *J. Hydrol.*, 10, 257-274.
- Quintana-segui P., Le Moigne P., Durand Y., Martin E., Habets F., Baillon M., Franchisteguy L., Morel S. et Noilhan J. (2008). The SAFRAN atmospheric analysis : Description and validation. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(1) : 92–107, doi: 10.1175/2007JAMC1636.1.
- Schaefli B., Hingray B. et Musy A. (2007). Climate change and hydropowerproduction in the Swiss Alps: quantification of potential impacts and related modelling uncertainties. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11, 1191-1205.
- Sharif M. et Burn D.H. (2006). Simulating climate change scenarios using an improved K-nearest neighbor model. *J. Hydrol.*, 325: 179–196.

IMPACTS ANTHROPIQUES ET ETIAGES DE LA GARONNE A L'HORIZON 2030

Anthropogenic impact on low flows in the Garonne Basin in the 2030

Eric Sauquet (1)

(1) Cemagref, UR Hydrologie-Hydraulique, 3 bis quai Chauveau, 69009 Lyon, France

Tél: +33 (0)4 72 20 89 13, Fax: +33 (0)4 78 47 78 75, e-mail: eric.sauquet@cemagref.fr

Anne Dupeyrat (2), Frédéric Hendrickx (2), Rémi Labedade (1,2), René Samie (2)

(2) EDF – R&D – LNHE, 6 quai Watier, 78400 Chatou, France

Tél: +33 (0)1 30 87 72 44, Fax: +33 (0)1 30 87 81 09

Jean-Philippe Vidal (1,3)

(3) CNRM/GAME, Météo-France/CNRS, 42 avenue Coriolis, 31057 Toulouse Cedex 1, France

Tél: +33 (0)5 61 07 85 62, Fax: +33 (0)5 61 07 83 09

Charles Perrin (4), Houda Boudhraa (4)

(4) Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés, Parc de Tourvoie, BP 44, 92163 Antony cedex, France

Tél: +33 (0)1 40 96 65 52, Fax: +33 (0)1 40 96 61 99

Martine Gaëckler (5)

(5) Agence de l'Eau Adour-Garonne, Département Industries, 90 rue du Férétra, 31078 Toulouse Cédex 4, France

Tél: +33 (0)5 61 36 37 38, Fax: +33 (0)5 61 36 36 91 33

Résumé : Cet article résume les travaux réalisés dans le cadre du projet IMAGINE2030 qui examine l'évolution de la ressource en eau et ses conséquences sur la gestion sur le bassin de la Garonne à Lamagistère à l'horizon 2030. Cette étude d'impact repose sur les scénarios climatiques de l'exercice AR4 de l'IPCC. Deux modèles hydrologiques, GR4J et CEQUEAU, calés sur des données de débits désinfluencés, permettent de caractériser le devenir du bassin et de ses affluents majeurs dans un contexte naturel. Les résultats montrent des apports annuels en baisse et une sévérité accrue des étiages (en termes d'intensité et de durée) en réponse à des températures plus élevées dès 2030. Des modules spécifiques ont été développés pour mesurer les effets combinés d'une modification du climat, de contraintes environnementales, de la production hydroélectrique et des prélèvements agricoles pour l'irrigation. Nous les avons appliqués en 2030 en considérant une gestion « business as usual ». Sur le bassin de l'Ariège, la production hydroélectrique est actuellement la source principale de modification du régime hydrologique. Nous y percevons une diminution de la production électrique pendant l'hiver en lien avec la nécessité d'une contribution plus forte des réservoirs amont au soutien d'étiage en aval. Sur le bassin de l'Aveyron, un modèle de besoin en eau des plantes a été appliqué. Sous changement climatique, les besoins en eau du maïs, culture prédominante sur le bassin, seraient augmentés de 20% à l'horizon 2030. Si ces besoins devaient être satisfaits par irrigation, la gestion des étiages sur une ressource diminuée serait de fait plus difficile entre acteurs.

Abstract: This article details the main results obtained within the IMAGINE2030 project. IMAGINE2030 is a national project that aims at assessing future water availability in the 2030s by taking account of changes in both climate and water management. Climate projections for the Garonne basin are generated from IPCC AR4 monthly precipitation and temperature scenarios. A multimodel downscaling framework is applied to derive basin-scale transient daily time series from 1950 to 2050. The two rainfall-runoff models GR4J and CEQUEAU calibrated under present climate conditions, provide natural river flows. A warmer climate over the basin induces a decrease in mean annual runoff, a shift in snowmelt in mountainous areas and more severe low flows. The magnitude of changes differs from one basin to another. Two models were developed to simulate the impact of a business-as-usual water management (including reservoir operations, environmental constraint, irrigation practices) on river discharges. Results for the Ariège River at Foix show (1) a decrease in energy production, (2) an earlier filling of the reservoir and (3) an increase in water release in summer to fully respect the imposed minimum discharge downstream to the reservoir. Agricultural demand for irrigation water is assessed within the Aveyron River basin. The increase in temperature leads to an increase in the irrigation requirement for maize by 20% in the 2030s. In this context, the supply of water beyond irrigation in this area should be managed cautiously to sustain all the types of demand.

I INTRODUCTION

Le bassin de la Garonne est un bassin complexe par nature : les influences climatiques multiples (océaniques, montagnardes, méditerranéennes) donnent lieu à des réponses hydrologiques différenciées. S'y greffe une complexité d'origine anthropique. La répartition des prélèvements en eau est de 32% pour

l'agriculture, 14% pour l'industrie, 26% pour la production électrique (alimentation des circuits de refroidissement de la centrale nucléaire de Golfech) et de 28% pour l'alimentation en eau potable. L'agriculture est le secteur qui consomme le plus d'eau. L'irrigation représente ainsi plus de 65% des volumes d'eau consommés chaque année sur la zone d'étude, contre 20% pour la production d'eau potable, 12% pour la production d'énergie (consommation par évaporation des circuits fermés de la centrale nucléaire de Golfech) et 2% pour le secteur industriel. Dans le cadre du projet IMAGINE2030 financé par le MEEDDM, le Cemagref, EDF et l'Agence de l'Eau Adour-Garonne ont examiné l'évolution des étiages, des usages et leurs conséquences pour la gestion de la ressource superficielle du bassin de la Garonne en amont de Lamagistère. Outre la réponse à Lamagistère, le projet s'est attaché à décrire le devenir du régime hydrologique pour huit sous-bassins (Figure 1).

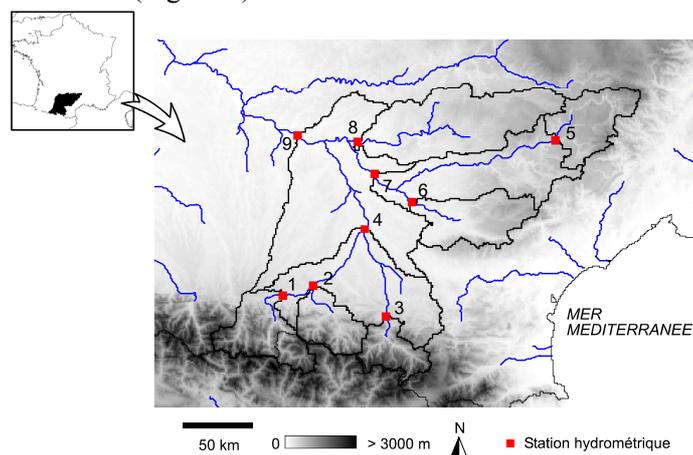


Figure 1 : Le bassin de la Garonne à Lamagistère et les huit sous-bassins étudiés (1 : la Garonne à Valentine (2230 km²) ; 2 : le Salat à Roquefort-sur-Garonne (1570 km²) ; 3 : l'Ariège à Foix (1340 km²) ; 4 : la Garonne à Portet-sur-Garonne (9980 km²) ; 5 : le Tarn à Millau (2170 km²) ; 6 : l'Agout à Lavaur (2300 km²) ; 7 : le Tarn à Villemur-sur-Tarn (9100 km²) ; 8 : l'Aveyron à Loubejac (5170 km²) ; 9 : la Garonne à Lamagistère (32350 km²))

II LE FONCTIONNEMENT ACTUEL DU BASSIN

Un effort notable de collecte de données a permis d'identifier et de quantifier les influences anthropiques (prélèvements agricoles, principales dérivations et gestion des réservoirs). Par une approche de type bilan comptable de l'eau en entrée-sortie des différents sous-bassins, nous avons pu reconstituer le signal hydrologique naturel. Cet investissement a été indispensable pour approcher le fonctionnement naturel du bassin et pour engager ensuite des modélisations.

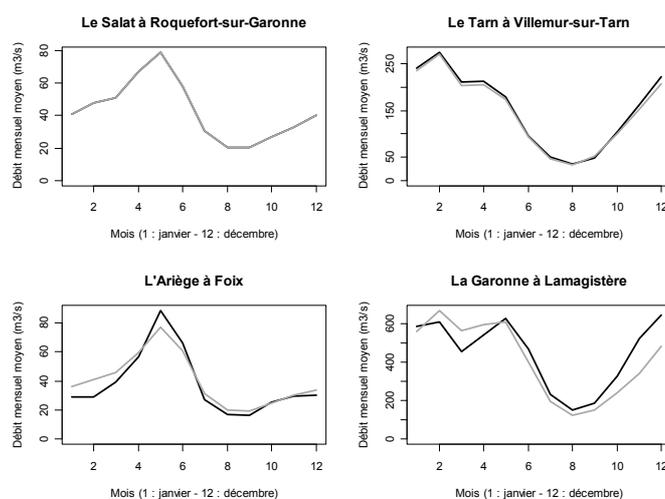


Figure 2 : Débits mensuels moyens observés et naturels reconstitués sur la période 1970-2005 (en noir : régime naturel ; en gris : débits observés aux stations)

La Figure 2 montre ainsi les écarts entre débits observés et naturels reconstitués. Le Salat à Roquefort est notre témoin pyrénéen naturel ; les hydrogrammes sont donc confondus. Les débits de l'Ariège à Foix sont principalement influencés par la gestion des retenues pour l'hydroélectricité et les contraintes liées au respect

du Plan de Gestion des Etiages [1], les surfaces irriguées étant négligeables sur le bassin. La surface en amont des retenues représente 10% de la surface du bassin à Foix et le volume total des retenues est loin d'être négligeable (environ 16% du volume annuel écoulé à Foix). On peut identifier ainsi la phase de stockage au moment de la fonte des neiges au printemps (différence entre obs. et nat. négative), la phase de déstockage pour la production d'électricité en hiver et pour le soutien d'étiage en été (différence entre obs. et nat. positive). Le bassin du Tarn à Villemur comporte de nombreux ouvrages hydrauliques de faible capacité, principalement de type « fil de l'eau » ou « écluse ». Ces retenues ont été négligées, car leur capacité n'ont pas d'effet au delà de la semaine. Les débits renaturalisés sont corrigés des activités agricoles et de la dérivation majeure, celle qui détourne une partie des eaux de l'Aveyron vers le bassin du Tarn. Les écarts entre débits observés et naturels reconstitués de la Garonne à Lamagistère reflètent l'ensemble des activités anthropiques sur le secteur. Le débit mensuel minimal annuel de fréquence quinquennale sèche (QMNA5) est égal à 97 m³/s dans sa configuration naturelle contre 75 m³/s dans le contexte de gestion actuelle.

III CLIMAT ET HYDROLOGIE DU BASSIN EN 2030

L'approche classique pour réaliser une étude d'impact a été appliquée à neuf sous-bassins de la Garonne. Elle consiste à alimenter les modèles hydrologiques calés sur le passé en s'appuyant sur les projections de différents modèles de circulation générale (GCMs). Nous nous sommes appuyés sur les résultats du dernier exercice de l'Intergovernmental Panel on Climate Change [2]. Une base de données de projections climatiques au pas de temps mensuel à haute résolution sur la France a donc été élaborée à partir de 19 sorties de GCMs. Nous avons considéré un échantillon de 12 projections sous scénarios d'émission de gaz à effet de serre SRES A1B et de 7 sous SRES A2, réputé le plus « pessimiste » en termes d'impact. L'approche utilisée pour construire ces projections est une méthode de descente d'échelle statistique multimodèles [3]. La réanalyse atmosphérique SAFRAN [4] est notre référence pour le climat présent et définit le support spatial de restitution des scénarios climatiques (maille de 8 km × 8 km). Des séries de précipitations et de températures journalières ont été créées par ré-échantillonnage dans SAFRAN selon l'algorithme KNN [5], afin de simuler un climat stationnaire cohérent sur la région pour le XXI^e siècle. Nous leur avons appliqué une approche de type « méthode des anomalies » pour construire des séries journalières sur chaque maille élémentaire de 8 km × 8 km. Chaque sortie de GCMs est ainsi déclinée en cinq projections climatiques possibles issues du rééchantillonnage. Le Tableau 1 décrit les écarts attendus par différence, en relatif ou absolu, entre les valeurs actuelles selon SAFRAN et les moyennes saisonnières des variables de précipitations et de température de l'air sur une fenêtre centrée de 20 ans autour des horizons visés. Les projections sous scénario A1B et A2 fournissent des évolutions semblables à l'horizon 2030. De manière globale, les GCMs annoncent une augmentation des températures prononcée en été (en moyenne +2°C à l'échelle du bassin), et plus limitée en hiver (en moyenne +1°C à l'échelle du bassin) à l'horizon 2030. Cet écart s'accroît à l'horizon 2080 : on note +4°C sur la température annuelle moyenne pour les scénarios A1B et +5°C pour les scénarios A2. Le signal sur les précipitations est moins cohérent, une tendance à la diminution est perceptible en dehors de l'hiver, mais non généralisée à l'ensemble des GCMs.

	Horizon	Δ PDJF (%)			Δ PMAM (%)			Δ PJJA (%)			Δ PSON (%)			Δ TDJF (°C)			Δ TMAM (°C)			Δ TJJA (°C)			Δ TSON (°C)		
A1B (60)	2030	-3.6	6.3	14.9	-15.5	-5.0	3.5	-23.6	-3.6	0.8	-9.2	-4.9	0.6	1.0	1.2	1.4	0.7	1.1	1.4	1.5	1.7	2.2	1.2	1.5	1.7
	2080	-11.8	1.8	16.4	-29.0	-13.9	-7.7	-52.8	-32.8	-25.8	-18.3	-15.9	-7.1	2.4	2.7	3.0	2.8	3.2	3.9	4.5	5.5	7.4	3.2	4.1	5.2
A2 (35)	2030	1.3	3.8	5.0	-9.5	-1.0	11.7	-22.5	-10.2	-0.1	-9.2	-3.4	-1.2	0.9	1.0	1.4	0.8	1.1	1.3	1.2	1.8	2.2	0.9	1.1	1.6
	2080	-3.8	-0.8	2.0	-40.0	-24.4	-13.8	-67.9	-39.6	-22.0	-23.7	-20.6	-10.7	2.9	3.3	3.9	3.7	4.2	4.8	6.0	7.0	8.5	4.6	5.3	5.9

Tableau 1 : Évolution des précipitations (P) et des températures (T) de la Garonne à Lamagistère pour différents horizons et scénarios exprimée en écart relatif (les chiffres en gras sont les médianes ; les chiffres de part et d'autre de la valeur centrale définissent l'intervalle interquartile ; DJF : décembre à février, MAM : mars à mai ; JJA : juin à août ; SON : septembre à novembre ; entre parenthèses est indiqué le nombre de projections examinées par scénario)

Ces évolutions impactent les étiages et les risques de sécheresses hydrologiques de manière différenciée selon les processus hydrologiques. Deux modèles hydrologiques différents ont été exploités : CEQUEAU, modèle conceptuel distribué spatialement [6] et GR4J, modèle empirique global [7]. Le fait d'utiliser deux approches de modélisation permet de quantifier une partie des incertitudes liées au schéma de modélisation choisi. Une procédure de calage-contrôle sur des périodes indépendantes [8] a permis de vérifier la qualité des simulations en temps présent, au pas de temps journalier.

La réponse hydrologique au changement climatique est caractérisée par les variables descriptives des étiages calculées sur des fenêtres glissantes de 20 ans : le débit annuel QA, le débit saisonnier juin-juillet-

août moyen (QJJA), le débit saisonnier septembre-octobre-novembre moyen (QSON) ; le débit Q90 extrait de la courbe des débits classés (valeur dépassée 90% du temps) ; le débit mensuel minimal annuel de fréquence quinquennale sèche (QMNA5) et la fiabilité définie par rapport à un seuil de débit X_S , qui est la proportion de valeurs observées dans la chronique au-dessus de ce seuil X_S . Nous avons fixé X_S aux valeurs de QMNA5, calculées par les modèles hydrologiques alimentés par les forçages issus de SAFRAN. En France, la fiabilité avec $X_S = QMNA5$ évolue entre 95% et 99%, c'est-à-dire que le débit est supérieur au QMNA5 entre 95% et 99% du temps selon le bassin. Les projections climatiques à l'horizon 2030 différant peu selon le scénario SRES, nous les avons regroupées dans notre analyse. Les écarts sont mesurés par rapport aux débits de référence obtenus par les modèles hydrologiques forcés par SAFRAN ; nous mesurons ainsi les réponses hydrologiques sous changement climatique, en occultant les biais de modélisation.

Les deux modèles hydrologiques alimentés par les projections s'accordent sur une réduction progressive des apports annuels et des débits caractéristiques des étiages. Le débit annuel chute en moyenne de 11% pour CEQUEAU et de 18% pour GR4J. Les écoulements estivaux sont diminués du fait d'une évapotranspiration accrue. S'ajoutent les effets d'une fonte de la neige plus précoce sur les bassins de montagne. Sur les bassins pyrénéens, la réduction est plus prononcée que celle sur le QA. Sur les bassins méditerranéens, les évolutions sur le QSON sont plus marquées que sur le QJJA, conséquence d'un allongement des étiages et de recharge retardée. Cette tendance globale est partagée par les modèles. Cependant des réponses hydrologiques distinctes sont perceptibles du fait de la grande variabilité des scénarios et des structures différentes de modèles pluie-débit. La dispersion des courbes des Figures 3 et 4 et l'intervalle interquartile des Tableaux 2 et 3 le montrent.

Bassin	ΔQA (%)			$\Delta QJJA$ (%)			$\Delta QSON$ (%)			$\Delta Q90$ (%)			$\Delta QMNA5$ (%)			Δ Fiabilité (jour)		
La Garonne à Valentine	-20	-12	-9	-38	-29	-22	-30	-21	-13	-44	-41	-37	-57	-52	-46	-65	-57	-50
Le Salat à Roquefort-sur-Garonne	-17	-9	-5	-24	-14	-5	-26	-14	-7	-34	-30	-26	-40	-37	-31	-60	-51	-41
L'Ariège à Foix	-20	-13	-8	-40	-32	-22	-26	-19	-11	-44	-40	-36	-53	-49	-44	-69	-60	-29
La Garonne à Portet-sur-Garonne	-20	-11	-7	-33	-24	-15	-27	-16	-10	-43	-39	-35	-52	-49	-44	-69	-61	-52
Le Tarn à Millau	-18	-8	0	-23	-7	4	-31	-17	-8	-46	-37	-30	-47	-39	-28	-50	-34	-26
L'Agout à Lavaur	-18	-9	-2	-23	-8	7	-31	-14	-1	-61	-54	-43	-69	-61	-52	-38	-31	-22
Le Tarn à Villemur-sur-Tarn	-17	-10	-1	-21	-6	11	-31	-16	1	-40	-34	-27	-42	-33	-26	-53	-43	-31
L'Aveyron à Loubejac	-21	-14	-4	-14	2	19	-30	-12	12	-37	-24	-18	-39	-29	-22	-67	-44	31
La Garonne à Lamagistère	-19	-11	-4	-26	-17	-8	-28	-15	-3	-40	-34	-31	-46	-42	-37	-70	-57	-49

Tableau 2 : Évolution des débits de référence pour l'horizon 2030 selon différentes projections climatiques – Modèle hydrologique CEQUEAU (les chiffres en gras sont les médianes ; les chiffres de part et d'autre de la valeur centrale définissent l'intervalle interquartile)

Bassin	ΔQA (%)			$\Delta QJJA$ (%)			$\Delta QSON$ (%)			$\Delta Q90$ (%)			$\Delta QMNA5$ (%)			Δ Fiabilité (jour)		
La Garonne à Valentine	-25	-16	-10	-28	-18	-10	-34	-27	-22	-53	-44	-39	-50	-45	-40	-99	-85	-70
Le Salat à Roquefort-sur-Garonne	-28	-20	-15	-36	-25	-15	-41	-33	-25	-64	-57	-52	-64	-60	-54	-83	-69	-61
L'Ariège à Foix	-23	-15	-9	-41	-33	-19	-39	-33	-22	-56	-50	-44	-63	-59	-53	-96	-84	-74
La Garonne à Portet-sur-Garonne	-31	-22	-15	-39	-29	-20	-44	-37	-26	-62	-55	-50	-68	-63	-58	-104	-93	-79
Le Tarn à Millau	-32	-20	-12	-33	-20	-3	-48	-37	-25	-73	-66	-61	-60	-52	-42	-71	-48	-37
L'Agout à Lavaur	-21	-13	-6	-28	-11	2	-35	-23	-2	-36	-30	-22	-46	-42	-34	-57	-47	-36
Le Tarn à Villemur-sur-Tarn	-28	-19	-11	-33	-16	-2	-48	-37	-16	-72	-66	-61	-59	-52	-43	-67	-51	-40
L'Aveyron à Loubejac	-17	-10	2	-28	-5	14	-37	-21	1	-78	-74	-71	-55	-48	-40	-53	-40	-29
La Garonne à Lamagistère	-37	-28	-18	-39	-27	-16	-51	-42	-30	-75	-69	-65	-67	-63	-56	-96	-80	-67

Tableau 3 : Comme pour le Tableau 2, mais avec le modèle hydrologique GR4J

Les baisses sur le QJJA pour un bassin donné sont sensiblement équivalentes d'un modèle à l'autre. Nous retrouvons une réponse spatiale différenciée pour cette variable. Les diminutions les plus fortes sont observées sur les bassins de tête pyrénéens (en moyenne proche de 25%). Les bassins sous influence méditerranéenne semblent moins impactés. La réduction médiane sur QJJA est inférieure à 10% pour CEQUEAU et inférieure à 20% pour GR4J. GR4J suggère de manière générale des évolutions plus conséquentes : ainsi, Q90 et QMNA5 sont diminués respectivement de 55% et de 50% pour GR4J contre respectivement 30% et 40% pour CEQUEAU. Les écoulements moyens d'automne sont également diminués, du fait d'étiages prolongés (perceptible sur la fiabilité). Nous notons moins de différence entre les bassins que sur QJJA : GR4J propose une baisse plus importante que CEQUEAU (33% contre 16%). Sous climat présent, le QMNA5 est dépassé 95% du temps, soit en moyenne 18 jours. Les résultats des

modélisations montrent que la fiabilité (le nombre de jours avec le seuil défini par QMNA5 actuel) augmente significativement (en médiane entre 31 et 93 jours). En supposant le QMNA5 actuel valeur seuil déclencheur de restrictions à l'horizon 2030, le changement climatique induirait une fréquence accrue des épisodes critiques pour la gestion de la ressource et poserait de manière récurrente la question du partage de l'eau.

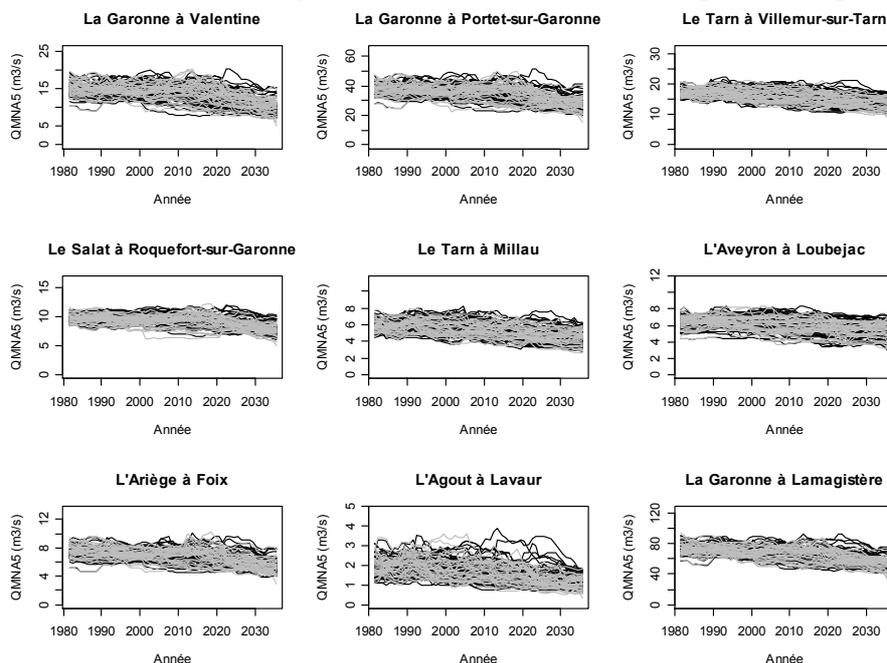


Figure 3 : Évolution du QMNA5 aux neuf stations dans une configuration naturelle – Moyenne mobile sur 20 ans, avec en noir pour A2 et en gris pour A1B, modèle hydrologique CEQUEAU

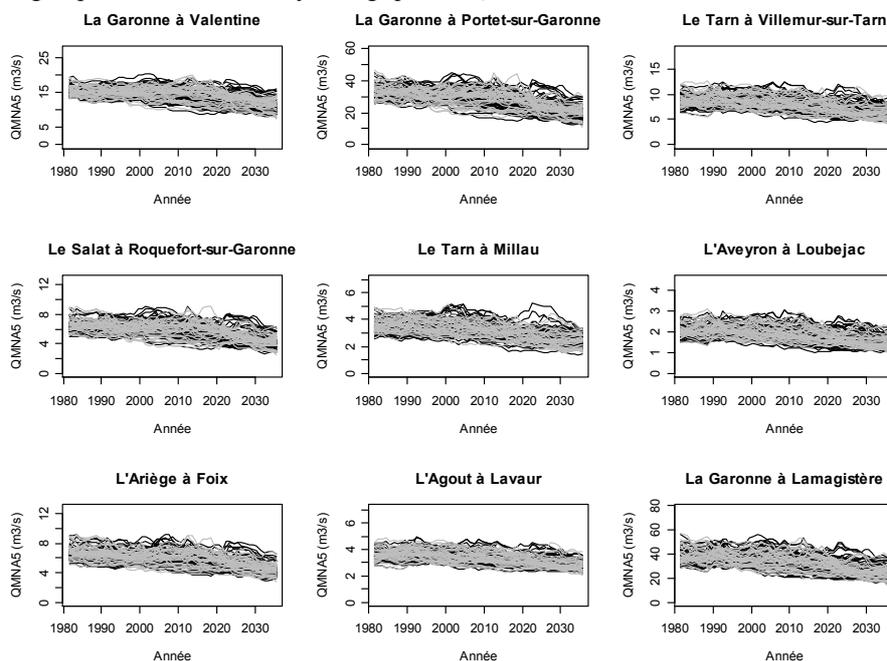


Figure 4 : Comme pour la Figure 3, mais avec le modèle hydrologique GR4J

IV IMPACT COMBINÉ DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET DES ACTIONS HUMAINES

Peu d'études ont été réalisées à ce jour sur le devenir des modes de gestion sous changement climatique à une échelle locale, du fait de la rareté de données relatives aux usages et d'une complexité, de fait, accrue de modélisation. Nous avons souhaité intégrer une représentation des deux usages dominants sur le bassin : l'hydroélectricité et l'irrigation. Nous avons choisi de considérer des modes de gestion futures identiques à celle du présent. En effet, cette représentation est – déjà – délicate à mettre en œuvre en temps présent. De plus, l'élaboration de scénarios quantitatifs d'évolution des pratiques n'est pas aisée à l'échelle des sous-

bassins étudiés, du fait de l'évolution probable des politiques publiques nationales ou européennes (pilotees par la Directive Cadre sur l'Eau, la Directive Energies Renouvelables, la Politique Agricole Commune, etc.).

IV.1 Évolution de l'hydroélectricité

Notre étude se concentre dans un premier temps sur un module de gestion simplifiée de l'hydroélectricité, développé spécifiquement pour modéliser l'influence des aménagements sur le régime naturel. Ce module s'appuie sur un processus dynamique basé sur des valeurs de Bellman [9]. Il s'agit ici de reproduire grossièrement la stratégie de l'hydroélectricien recherchant à valoriser au mieux sa réserve hydraulique vis à vis des besoins en électricité et de son espérance d'apport futur d'eau. Ce module s'appuie sur un vecteur « intérêt à turbiner » dépendant de la température moyenne de l'air en France qui vise à tenir compte de la sensibilité de la consommation électrique au chauffage (consommation d'autant plus grande que la température est sous les 15°C) et par conséquent de l'intérêt à placer dans ces moments de pointe, l'énergie hydraulique. Naturellement plus complexes et notamment complétés de dimensions économiques et financières liées au fonctionnement des marchés de l'énergie, les outils opérationnels utilisés dans la gestion de la production s'appuient sur des approches mathématiques similaires, ce qui rend le module utilisé assez réaliste pour l'exercice recherché. Plus de détails sur le module ont été publiés récemment dans [10].

L'application présentée concerne le bassin de l'Ariège à Foix. Nous avons de plus tenu compte d'une contrainte de respect d'un débit environnemental en aval. Le modèle de pression a tout d'abord été calé sur le passé afin de reconstruire le régime influencé sur les dernières années 1990-2004. Nous avons vérifié le réalisme des débits issus de l'assemblage (CEQUEAU ou GR4J et module de gestion) en alimentant cet ensemble avec des forçages météorologiques représentatif du climat présent sur la Garonne et la France, obtenus par rééchantillonnage KNN dans la réanalyse SAFRAN. La Figure 5 montre la bonne cohérence des résultats à l'échelle saisonnière (écarts acceptables entre simulations et observations).

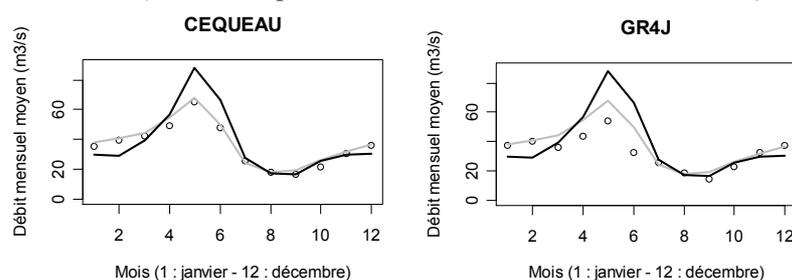


Figure 5 : Débits observés influencés sur la période 1990-2004 (—), débits naturels reconstitués (---) et débits obtenus avec le module de pression (○) couplé avec les modèles hydrologiques sous forçages représentatifs du temps présent

Nous avons ensuite exploité les scénarios climatiques futurs. CEQUEAU et GR4J fournissent les débits naturels sous changement climatique. Les débits influencés sont obtenus à partir du même modèle de gestion à partir d'une chronique de température journalière France entière simulée au même horizon et cohérente avec la situation météorologique du jour sur le bassin de la Garonne. La Figure 6 montre d'une part la diminution du pic de fonte en juin et un écart aux débits naturels moindre que dans la situation actuelle.

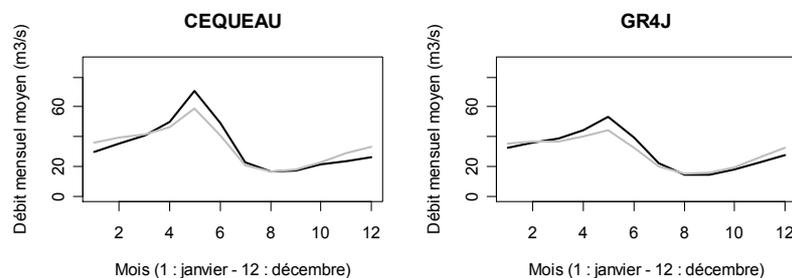


Figure 6 : Régimes hydrologiques naturels reconstitués (---) et influencés (—) de l'Ariège à Foix (moyenne sur la période 2021-2040, tout scénario confondu)

En complément nous avons tracé l'évolution du volume de remplissage de la réserve agrégée (Figure 7). Les trajectoires varient selon le scénario climatique envisagé. Les résultats suggèrent la nécessité d'un remplissage printanier plus précoce de la réserve pour assurer des débits estivaux suffisants tout en permettant de disposer d'un stock énergétique en entrée d'hiver. L'amplitude des variations en hiver plus faible à l'horizon 2030 qu'actuellement laisse entendre une moindre valorisation énergétique, double conséquence de la baisse du débit annuel et de sollicitations estivales accrues.

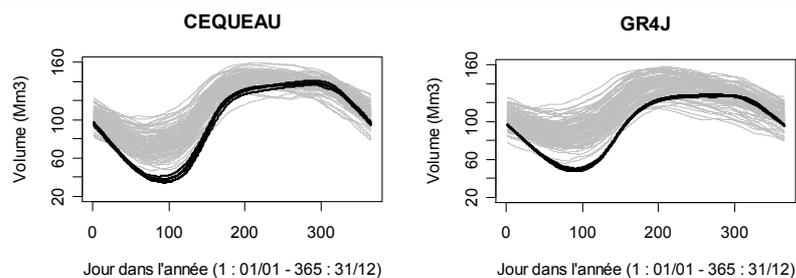


Figure 7 : Trajectoires de la macro réserve en amont de Foix sur la période 2021-2040 (—) et sous climat présent (—)

IV.2 Évolution de l'irrigation

Pour représenter l'usage agricole, un modèle classique de bilan hydrique à un horizon a été développé. Ce modèle permet d'estimer au pas de temps journalier le besoin théorique en eau d'irrigation, en sus de l'apport par les précipitations et de l'eau contenue dans le réservoir sol, nécessaire afin d'obtenir un développement optimal de la culture. Il s'appuie sur une équation du bilan hydrique à la parcelle. La comparaison des résultats sous climat présent montre une bonne cohérence avec les séries chronologiques établies sur le secteur [11] entre 1980 et 2005. Le sous-bassin de l'Aveyron a été privilégié dans cette application. Sans aller jusqu'à entreprendre une véritable démarche prospective impliquant l'ensemble des acteurs régionaux, l'étude a cherché à analyser l'incidence des scénarios de changement climatique (évolution des températures et des précipitations) sur le besoin en eau théorique des cultures. Nous présentons ici les évolutions des besoins des plantes (ici le maïs) au cours du XXI^e siècle par rapport à la situation de référence (sous climat actuel). La Figure 8 suggère une hausse de la demande sous scénario A1B (en moyenne +20% à l'horizon 2030 tous scénarios confondus). Une évolution similaire est identifiée sous scénario A2 jusqu'en 2045. Si ces besoins devaient être satisfaits par irrigation, les prélèvements devraient être augmentés d'autant. Nous accédons ici à un ordre de grandeur de la pression supplémentaire sur la ressource en période estivale. Les chiffres sont discutables, dans la mesure où d'autres facteurs comme l'évolution des surfaces irriguées ou la nature des cultures n'ont pas été intégrés.

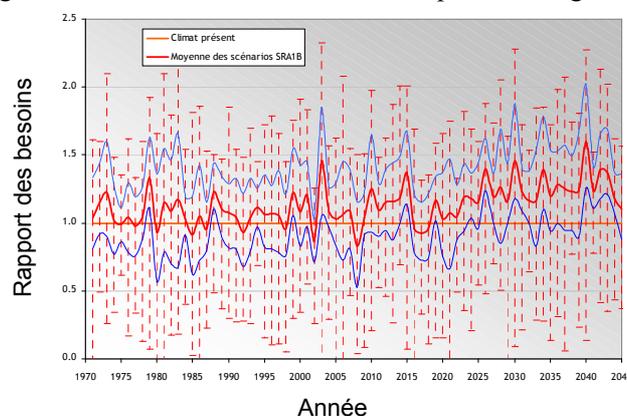


Figure 8 : Evolution des besoins en eau pour les scénarios SRA1B exprimé en ratio par rapport au temps présent (en trait épais, les autres courbes quantifient les amplitudes des variations dans l'année)

V CONCLUSION

Les travaux menés dans le cadre du projet IMAGINE2030 ont abouti à une représentation hydrologique cohérente du fonctionnement naturel de la Garonne sur la base de séries de débits désinfluencés des principales actions anthropiques et de modèles pluie-débit. Ceci nous a permis d'examiner l'évolution des étiages à l'horizon 2030. L'augmentation des températures en moyenne de +2°C en été induit une diminution marquée des débits estivaux (sur les moyennes saisonnières et sur les extrêmes) et un allongement des événements sous le seuil actuel de référence QMNA5. Ce résultat est cohérent avec ceux issus des études récentes (par exemple [12]) exploitant la même base de données de l'IPCC mais désagrégée de manière différente. Les bassins sous influence méditerranéenne ont une sensibilité distincte des bassins pyrénéens aux évolutions climatiques. Les modèles hydrologiques et le grand nombre de scénarios climatiques considérés permettent de quantifier en partie les incertitudes pesant sur le futur du bassin.

Reproduire parfaitement la gestion des eaux est un exercice hors de portée faute de données exhaustives sur l'ensemble du territoire. Nous avons donc choisi de comprendre la dynamique du système en place et les interactions entre usages et rivière, puis, sur cette base, d'engager des modélisations simplifiées de la gestion hydroélectrique et des pratiques agricoles. Le cas test décrit sur l'Ariège à Foix permet d'illustrer les effets des ouvrages hydroélectriques sur les débits en 2030, tenant compte de leur optimisation et du respect d'un débit environnemental. Cependant, il faut préciser que les débits influencés calculés sont le résultat d'une gestion optimale qui n'intègre pas de défaillance (par exemple : disponibilité de l'ensemble des ouvrages) et qui s'appuie sur une météorologie parfaitement connue. La demande en irrigation est quantifiée au travers d'un modèle exprimant les besoins en eau des plantes. Sans surprise, l'augmentation de la température entraîne une augmentation de la demande en eau du maïs notamment si les pratiques n'évoluent pas. La pression sera plus forte sur la ressource en eau qui vraisemblablement sera diminuée à l'horizon 2030. Les exercices réalisés dans le cadre d'IMAGINE2030 sont académiques. Les seuls déterminants régissant l'évolution des usages considérés sont d'origine physique. Ils sont insuffisants (il faut inclure à terme la dimension socio-économique) mais permettent de donner des premiers ordres de grandeur avec un mode de gestion non modifié. Les modèles et les données sont un premier pas vers la construction d'un outil d'aide à la décision pour les acteurs de l'eau pour anticiper des probables tensions sur la ressource.

VI REMERCIEMENTS

Le projet IMAGINE2030 a été soutenu financièrement par le MEEDDM dans le cadre de l'appel à proposition « Risque, Décision, Territoire » lancé en 2006. Merci à tous les acteurs locaux (SMEAG, VNF, ARPE, DIREN, CACG, EDF-DTG, Eaucéa) impliqués dans le « Comité de Pilotage » mis en place pour le suivi de ce projet. Ils ont permis de construire nos représentations en lien avec le terrain. Merci également à Météo-France et à la SHEMA pour la mise à disposition de données pour les besoins de recherche.

VII REFERENCES

- [1] Comité du Bassin Adour-Garonne (2004). — *Plan de Gestion des Etiages Garonne-Ariège*. 77 pages.
- [2] Meehl, G.A., Stocker, T.F., Collins, W.D., Friedlingstein, P., Gaye, A.T., Gregory, J.M., Kitoh, A., Knutti, R., Murphy, J. M., Noda, A., Raper, S.C.B., Watterson, I.G., Weaver, A.J., & Zhao Z.C. (2007). — Global Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M, Averyt, K.B., Tignor, M., & Miller H.L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [3] Vidal, J.P., & Wade, S.D. (2008). — A framework for developing high-resolution multi-model climate projections: 21st century scenarios for the UK. *International Journal of Climatology*, **28**(7) : 843-858.
- [4] Quintana-Seguí, P., Le Moigne, P., Durand, Y., Martin, E., Habets, F., Baillon, M., Canellas, C., Franchisteguy, L., & Morel, S. (2008). — Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables: Validation of the SAFRAN Analysis over France. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **47** : 92-107.
- [5] Lall, U., & Sharma, A. (1996). — A nearest neighbor bootstrap for resampling hydrologic time series. *Water Resources Research*, **32**(3): 679-693.
- [6] Charbonneau, R., Fortin, J.P., & Morin, G. (1977). — The CEQUEAU model: description and examples of its use in problems related to water resource management. *Hydrol. Sci. Bull.*, **22**(1) : 93-202.
- [7] Perrin, C. (2002). — Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. *La Houille Blanche*, **6/7** : 84-91.
- [8] Klemeš, V. (1986). — Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, **31**(1) : 13-24.
- [9] Bellman, R. (1957). — *Dynamic Programming*. Princeton University Press.
- [10] Dupeyrat, A., Agosta, C., Sauquet, E., Hendrickx, F. (2008). — Sensibilité aux variations climatiques d'un bassin à forts enjeux : le cas de la Garonne. *Actes du 13th IWRA World Water Congress 2008* (Montpellier, France, 1-4 septembre 2008), 15 pages.
- [11] Teyssier, F. (2006). — Les consommations d'eau pour irrigation en Midi-Pyrénées sur 2001-2005. DRAF Midi-Pyrénées, août 2006.
- [12] Boé, J. (2007). — Changement global et cycle hydrologique : une étude de régionalisation sur la France, Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III – Paul Sabatier, 256 pages + Annexes.