



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

Contexte général	3
Objectifs généraux du projet.....	3
Résultats obtenus	3
Partenariats mis en place	4
Pour en savoir plus (quelques références).....	4
Liste des opérations de valorisation issues du contrat (articles de valorisation, participations à des colloques, enseignement et formation, communication, expertises...)	5
 Synthèse	 6
Le fonctionnement actuel du bassin	7
Climat et hydrologie du bassin en 2030	8
Impact combiné du changement climatique et des actions humaines	12
Évolution de l'hydroélectricité.....	12
Évolution de l'irrigation.....	14
Conclusion	15
References	15
 Résumés	 17
En français	17
Résumé	17
Mots clés.....	17
Abstract	17

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).

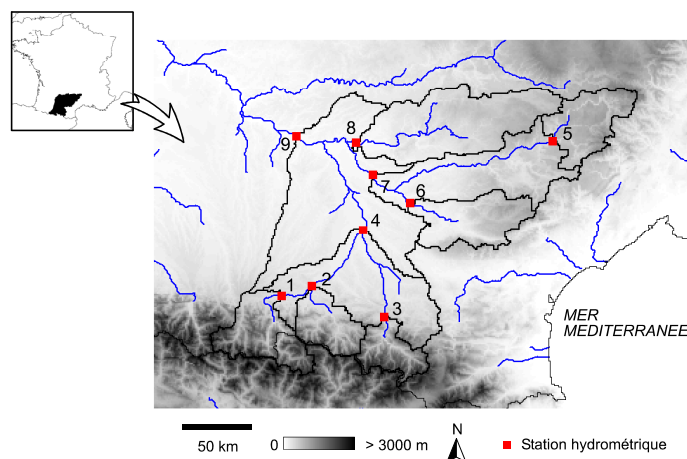


Figure 1 : Le bassin de la Garonne à Lamagistère et les huit sous-bassins étudiés (1 : la Garonne à Valentine (2230 km²) ; 2 : le Salat à Roquefort-sur-Garonne (1570 km²) ; 3 : l'Ariège à Foix (1340 km²) ; 4 : la Garonne à Portet-sur-Garonne (9980 km²) ; 5 : le Tarn à Millau (2170 km²) ; 6 : l'Agout 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.

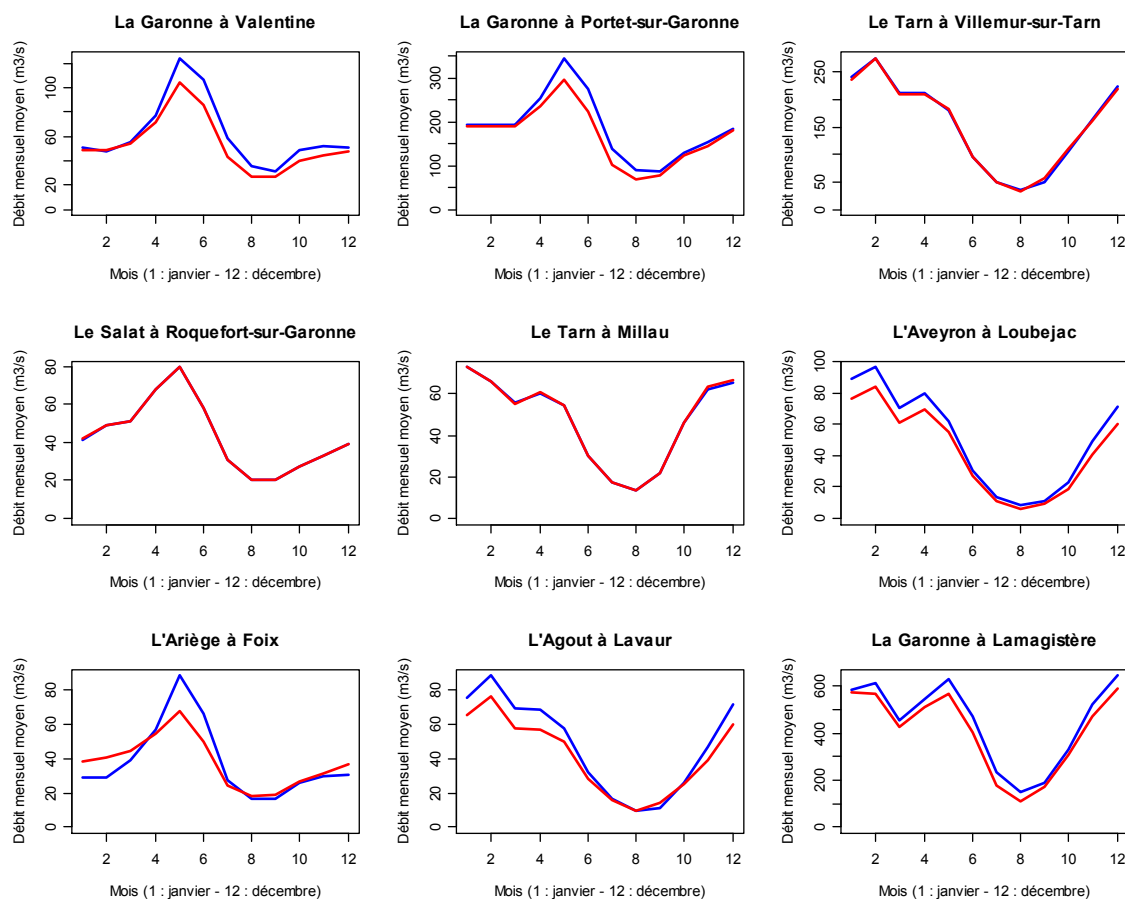


Figure 2 : Débits mensuels moyens observés et naturels reconstitués sur la période 1970-2005 (en bleu : régime naturel ; en rouge : débits observés aux stations)

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 « écluse ». 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.

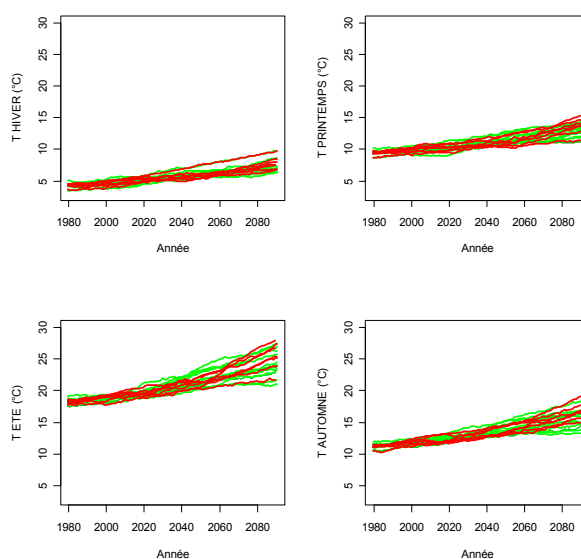


Figure 3 : Températures moyennes par saison (°C) pour la Garonne à Lamagistère (en rouge A2, en vert A1B)

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.

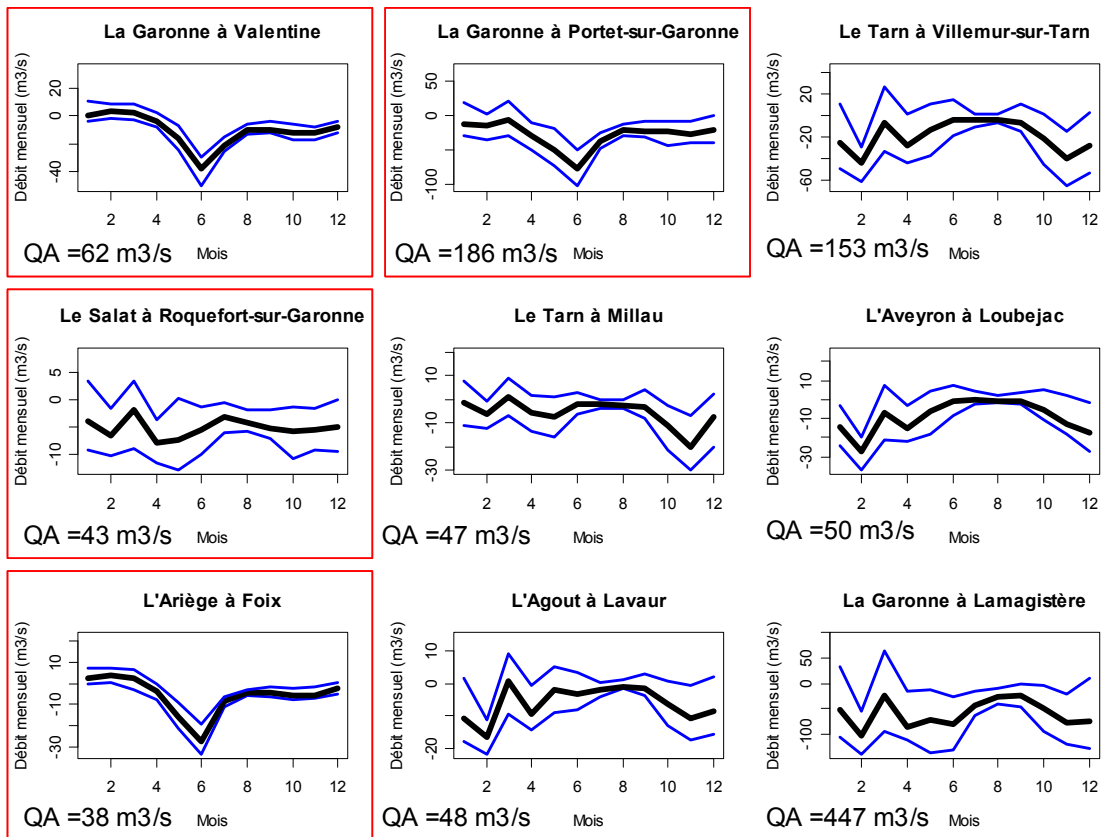


Figure 3 : Anomalie de débits mensuels à l'horizon 2030 - modèle CEQUEAU

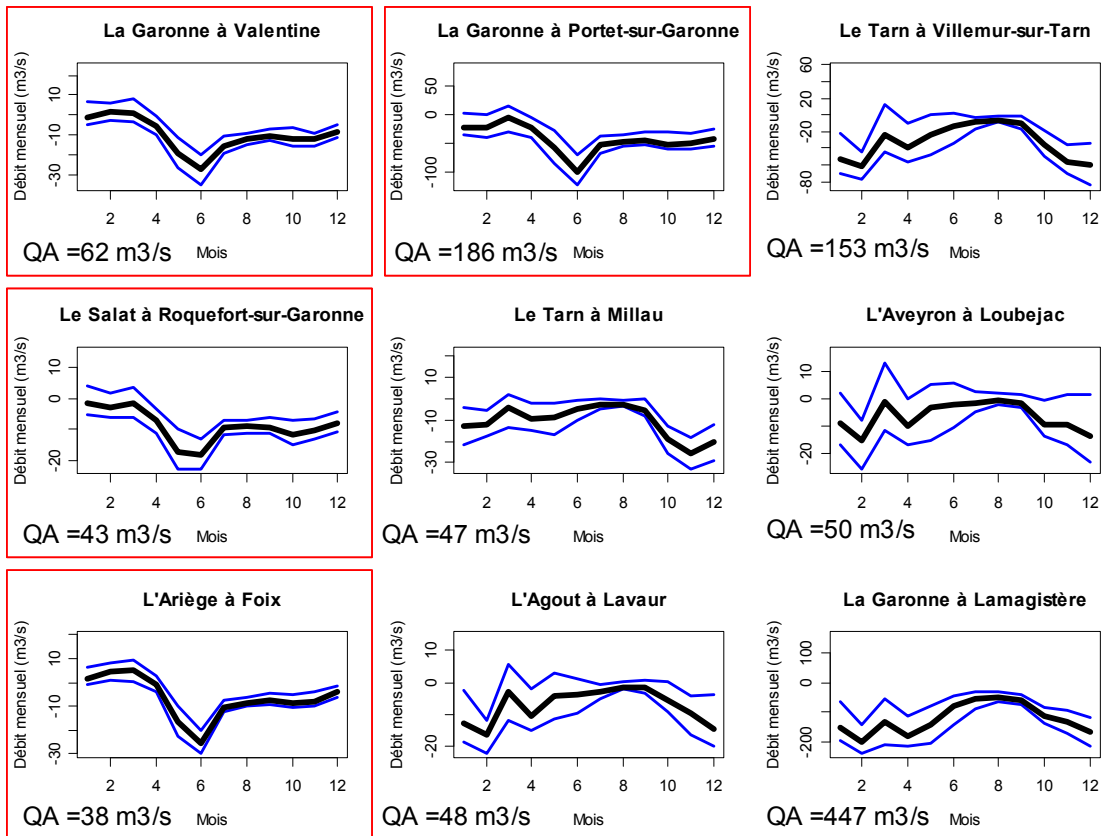


Figure 4 : Comme pour la Figure3, mais avec le modèle hydrologique GR4

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 (pilotees 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).

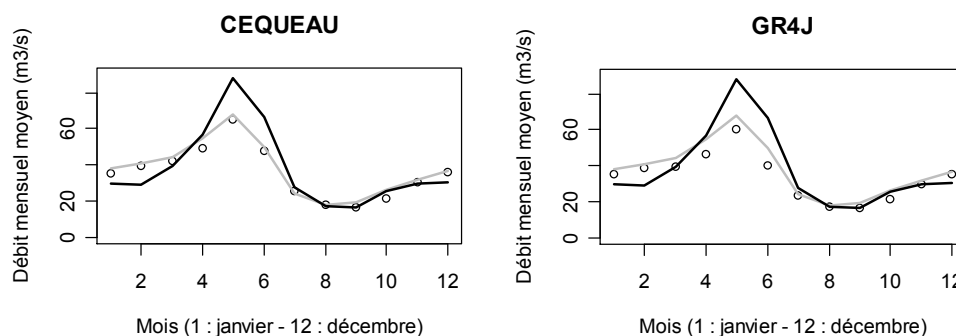


Figure 5 : Débits observés influencés sur la période 1990-2004 (—), débits naturels reconstitués (—) et débits obtenus avec le module de pression (O) couplé avec les modèles hydrologiques sous forçages représentatifs du temps présent

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.

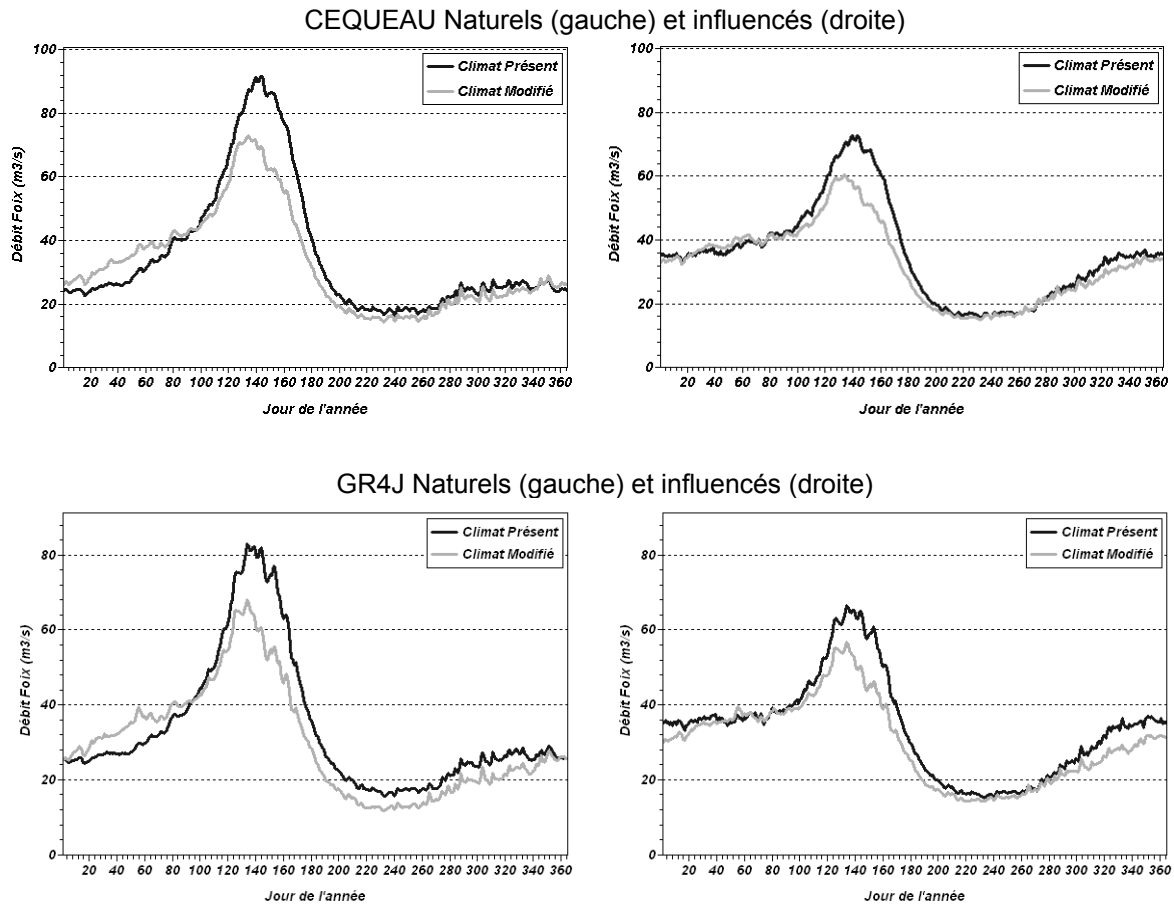


Figure 6 : Régimes hydrologiques naturels reconstitués et influencés de l'Ariège à Foix (moyenne sur la période 2021-2040, tous scénarios confondus)

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.

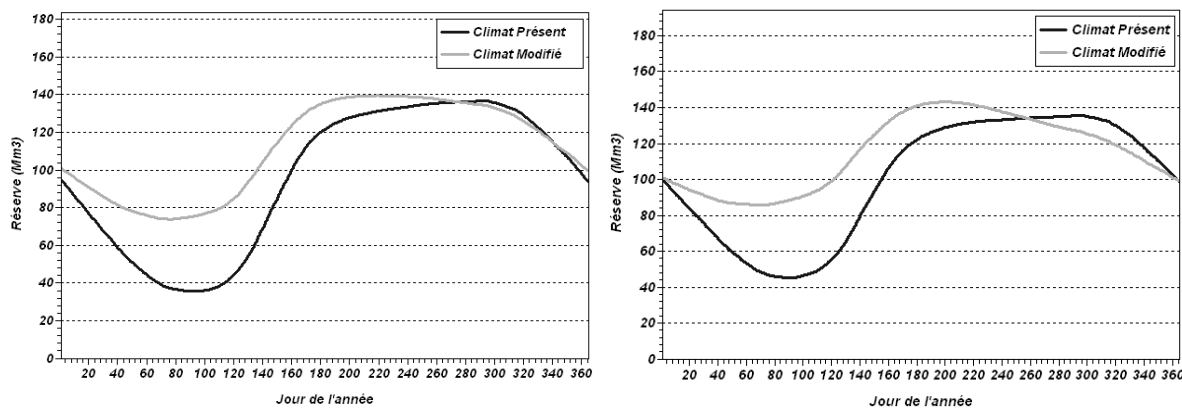


Figure 7 : Trajectoires de la macro réserve en amont de Foix sur la période 2021-2040 et sous climat présent

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.

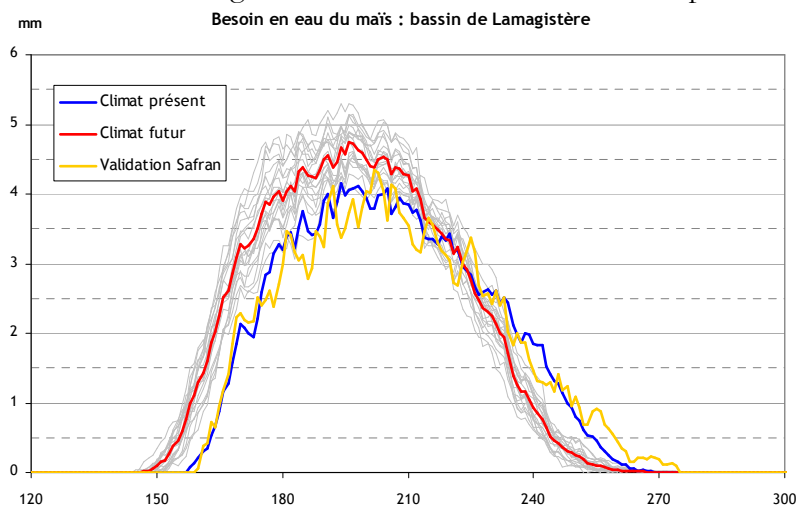


Figure 8 : Besoin en eau du maïs sur le bassin de Lamagistère (moyenne 2015-2045) en fonction du jour de l'année

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] 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.

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