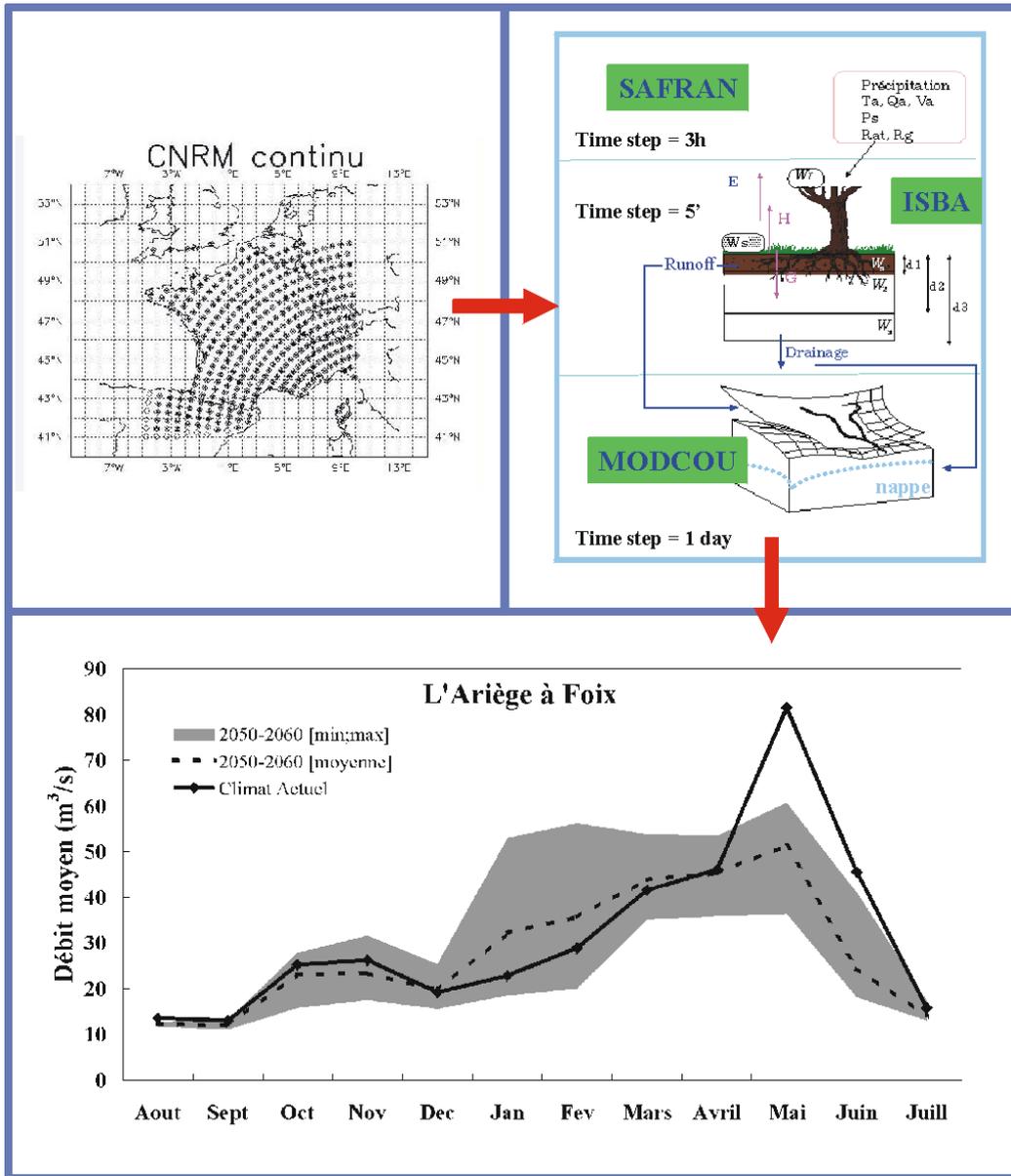


Etude de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau du bassin Adour Garonne



Y. Caballero et J. Noilhan

Toulouse - Avril 2003

Table des matières

Table des matières	3
Introduction	5
I. L'étude des changements climatiques.....	7
I.1 Les gaz à « effet de serre »	8
I.2 Les observations	9
I.2.1 Les températures.....	9
I.2.2 Les précipitations.....	10
I.2.3 Neige et glace	10
I.2.4 Les océans	10
I.3 La modélisation	11
I.3.1 Méthodes	11
I.3.2 Prévisions et impacts	13
I.4 Les outils du CNRM : le système SIM.....	17
I.4.1 SAFRAN	17
I.4.2 ISBA	17
I.4.3 MODCOU	24
I.4.4 Applications récentes.....	25
II. Application de SAFRAN-ISBA-MODCOU au bassin Adour-Garonne.....	27
II.1 Présentation de la méthode.....	27
II.2 Stations de référence et naturalisation des débits	30
II.3 Le calage sur les périodes d'étéage.....	32
III. Calcul des anomalies climatiques.....	45
III.1 Méthode d'interpolation spatiale et calcul des anomalies.....	45
III.2 Validation des simulations des MCG pour le climat actuel	48
III.3 Anomalies obtenues	49
IV. Résultat des simulations pour la période 2050-2060.....	52
IV.1.1 Le bassin amont de la Garonne	55
IV.1.2 Le bassin aval de la Garonne.....	63
IV.1.3 Les bassins du Tarn, de l'Aveyron et de la Dordogne.....	66
IV.1.4 Le bassin de l'Adour	69
IV.1.5 Les bassins des Gaves	73
IV.2 Résultats pour les années extrêmes	75
IV.3 Résultats pour la période 2025-2035 et le scénario continu.....	77
IV.4 Etude de sensibilité au climat des bassins de l'Ariège à Foix et de l'Adour à Aire.	82
V. Conclusion.....	86
Références bibliographiques	89
ANNEXE A.....	93
ANNEXE B.....	147
ANNEXE C.....	156
ANNEXE D.....	165
ANNEXE D.....	171

Introduction

L'importance de l'eau pour la vie sur Terre et pour les activités de l'homme en général fait que scientifiques et gestionnaires s'inquiètent désormais des conséquences des changements du climat sur le cycle hydrologique, la disponibilité et la qualité de la ressource en eau.

Des instances internationales ont ainsi appelé à une prise de conscience et à la mise en place de politiques de « gestion durable », pour protéger la qualité et la quantité de nos ressources en eau (conférence de Dublin 1992, sommet de la Terre de Rio 1992, protocole de Kyoto 1997). Les organisations internationales proches de la problématique de l'eau, comme les Nations Unies ou le World Water Council travaillent sur des méthodes d'exploitation raisonnée et publient régulièrement des rapports sur l'état des ressources en eau dans le monde (Cosgrove et Rijbersman, 2000).

L'Agence de l'Eau Adour-Garonne (AEAG) en collaboration avec le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) ont entrepris de réaliser une étude de l'impact des changements climatiques sur les régimes hydrologiques du bassin Adour-Garonne, qui subit déjà des étiages sévères. Cette étude s'intéresse aux périodes 2025 et 2050 de manière à ce que les résultats soient utiles aux gestionnaires à moyen et à long terme. Elle s'attache à quantifier les impacts avec un degré de précision qui est fonction des incertitudes sur l'évolution du climat et sur le modèle hydrométéorologique utilisé.

La première partie de ce rapport contient une synthèse bibliographique des résultats des recherches entreprises à ce jour dans le domaine. Après une brève introduction sur les observations et les méthodes utilisées dans le domaine de l'étude des changements climatiques, les principaux impacts prévus sur les différentes composantes du cycle de l'eau à l'échelle européenne et planétaire sont présentés.

Dans la seconde partie du rapport, les méthodes utilisées par le CNRM pour l'étude de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau du bassin Adour-Garonne sont présentés et les principaux résultats commentés et synthétisés. Cette étude a ainsi principalement consisté à appliquer le modèle ISBA-MODCOU sur le bassin pour simuler les débits au niveau de 16 stations de référence choisies par l'AEAG. Les périodes d'étiage intéressant plus particulièrement l'AEAG, il a été procédé au calage du modèle sur les mois de juillet à octobre.

La méthode de calage ainsi que la comparaison des résultats aux observations au niveau des stations est présentée dans un premier temps. Ensuite, la méthode de calcul des anomalies climatiques issues des scénarios disponibles ainsi que la méthode d'interpolation spatiale utilisée pour déterminer ces anomalies à l'échelle du bassin Adour-Garonne sont détaillées. Enfin, les débits moyens mensuels sur la période 2050-2060 sont comparés à ceux de la période 1985-1995 considérée comme la référence actuelle. Une analyse des tendances observées pour la période plus récente de 2025-2035, ainsi que quelques études de sensibilité sur des bassins de l'Ariège et de l'Adour permettent de compléter l'analyse sur les impacts sur les autres composantes du bilan hydrique. Une synthèse générale résumant les principaux résultats obtenus clôture finalement cette étude.

I. L'étude des changements climatiques

Depuis quelques années, les résultats de nombreuses études sur la dynamique du climat ont présenté un grand nombre d'indices indiquant un changement climatique à l'échelle mondiale. Les questions soulevées par ces résultats ont amené le **Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE)** et l'**Organisation Météorologique Mondiale (OMM)** à mettre en place le **Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution de Climat (GIEC – IPCC en anglais)**.

Cette entité est chargée de réaliser des travaux de synthèse bibliographique scientifique et technique. Elle propose ainsi des directives de travail pour mieux appréhender la variabilité climatique naturelle et les relations directes et indirectes entre les activités de l'homme et le climat.

Depuis 1990, le GIEC publie périodiquement des rapports de synthèse (IPCC, 2001a et 2001b) qui présentent l'état d'avancement des connaissances et qui servent de support de discussion dans les négociations intergouvernementales (<http://www.ipcc.ch>).

Par ailleurs, le GIEC se charge aussi de réaliser des études technico-économiques qui aboutissent à une prévision (appelée « scénario »), sur les émissions des gaz à effet de serre, jusqu'en 2100. Ces prévisions se font en fonction des évolutions possibles en termes de démographie, de développement économique et social, d'avancées technologiques, de gestion des ressources et de pollution à l'échelle planétaire.

Plusieurs scénarii d'évolution économique et sociale de la planète sont ainsi envisagés. Leurs principales caractéristiques sont les suivantes:

- Ils ne prennent pas en compte d'éventuelles initiatives dont le but serait de lutter directement contre les changements climatiques, de manière à voir ce qui se passerait si aucune mesure n'était décidée en ce sens à l'échelle planétaire.
- Ils se basent sur différentes hypothèses d'évolution de nos sociétés (accroissement/diminution de la population mondiale, apports des nouvelles technologies,...).
- Ils analysent les conséquences indirectes des politiques économiques et sociales résultantes de ces évolutions (libéralisation/protectionnisme, harmonisation/divergence des politiques régionales de développement), sur les émissions de gaz à effet de serre à l'échelle de la planète.

Ces scénarii, sur lesquels s'appuient les modèles du climat pour faire leurs prévisions, sont présentés dans un rapport spécial du GIEC (IPCC, 2000). Ils sont suffisamment nombreux et hétérogènes pour explorer au mieux les possibilités d'évolution de l'activité de l'homme sur la planète.

I.1 Les gaz à « effet de serre »

La surface de la Terre absorbe le rayonnement solaire. L'apport d'énergie résultant est redistribué par les circulations atmosphériques et océaniques, puis renvoyé vers l'espace avec un rayonnement qui se situe dans les longueurs d'ondes infra-rouges. Une partie de ce rayonnement est capté par les gaz naturellement présents dans l'atmosphère, ce qui a pour effet de réchauffer ses couches basses (troposphère), ainsi que la surface de la Terre. Ce phénomène est appelé « effet de serre ». Sans l'influence de ces gaz, la température à la surface de la Terre serait inférieure à ce qu'elle est d'une trentaine de degrés (IPCC, 2001c).

Le climat de la Terre possède une variabilité naturelle qui est due aux interactions de divers facteurs comme l'effet de réflexion du rayonnement solaire, de certaines particules et des constituants présents dans la troposphère, les émissions d'aérosols d'origine volcanique, la variabilité naturelle de l'activité du Soleil et les relations entre l'océan et l'atmosphère qui provoquent des événements comme El Niño. Cependant, depuis les débuts de l'ère industrielle, les émissions de gaz carbonique (CO_2) et d'autres produits comme le méthane, l'oxyde nitreux (N_2O) et les chloro-fluoro-carbones (CFC), que nous appellerons pour simplifier « gaz à effet de serre », n'ont cessé de croître (Figure 1). Cette augmentation provoque des déséquilibres climatiques qui ont pour conséquence de renforcer l'effet de serre, ce qui se traduit par un réchauffement global de la surface de la Terre et de la basse troposphère.

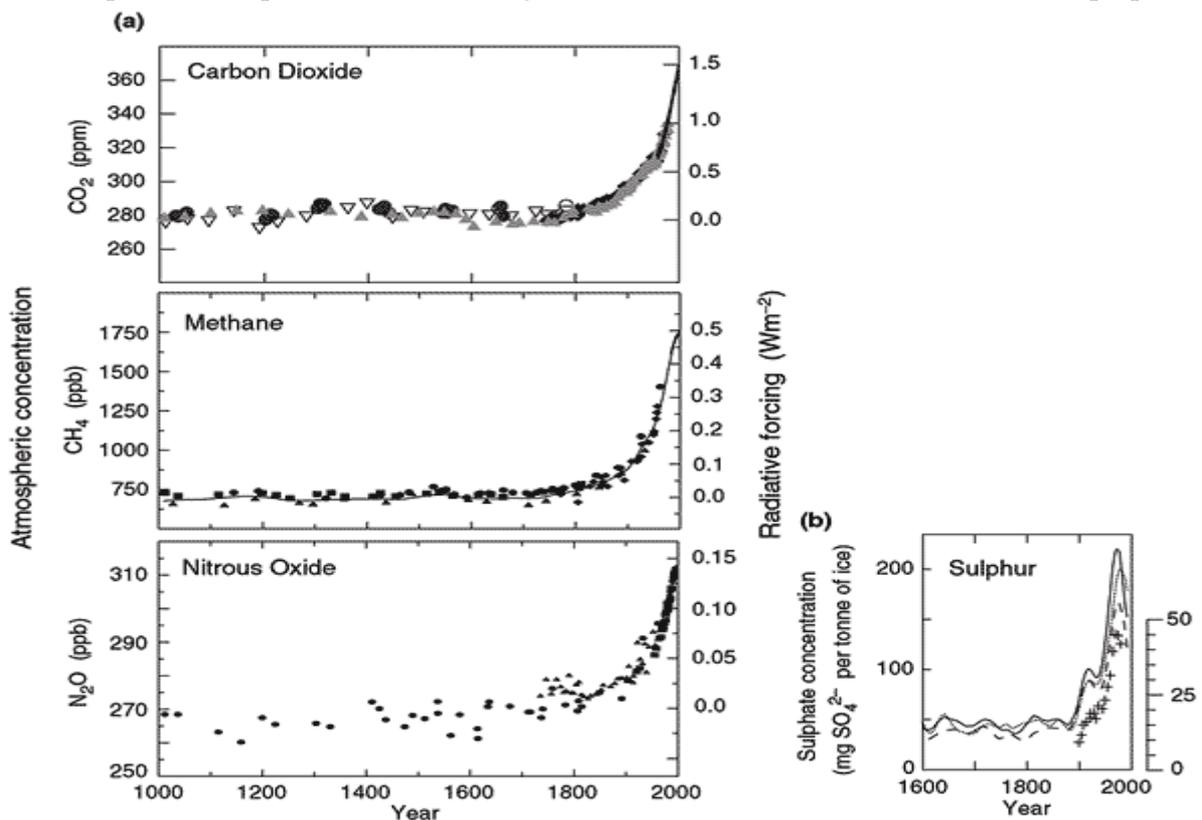


Figure 1 : Observations faites à partir d'échantillonnages dans l'air, mais aussi de carottages de glace (a) des concentrations de CO_2 , méthane et oxyde nitreux dans l'atmosphère; (b) de SO_2 produit des éruptions volcaniques et des activités industrielles, pour les derniers 1000 ans (IPCC, 2001c).

I.2 Les observations

L'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère a des conséquences sur le climat et le milieu naturel actuel. Voyons quels sont les principaux effets observés :

I.2.1 Les températures

Si au début des années 90, (date de mise en place du GIEC), il n'était pas possible de dire si ce que l'on observait était lié à un changement climatique ou à une variabilité interannuelle, le doute n'est aujourd'hui plus permis.

La température globale de la planète a augmenté de $0,6 \pm 0,2^\circ\text{C}$ depuis la fin du 19^{ème} siècle (Figure 2). Ce réchauffement est deux fois plus important sur les continents que sur les océans et il a aussi été observé dans la troposphère mais avec une plus faible intensité.

D'autres méthodes de mesure indirecte comme la dendrochronologie (datation des écorces d'arbres), les carottages dans les banquises, l'analyse des coraux, mais aussi l'évident retrait des glaciers tropicaux, la réduction de la couverture neigeuse, la décroissance de l'étendue de la banquise arctique ou l'augmentation du niveau moyen des océans confirment indirectement ce réchauffement.

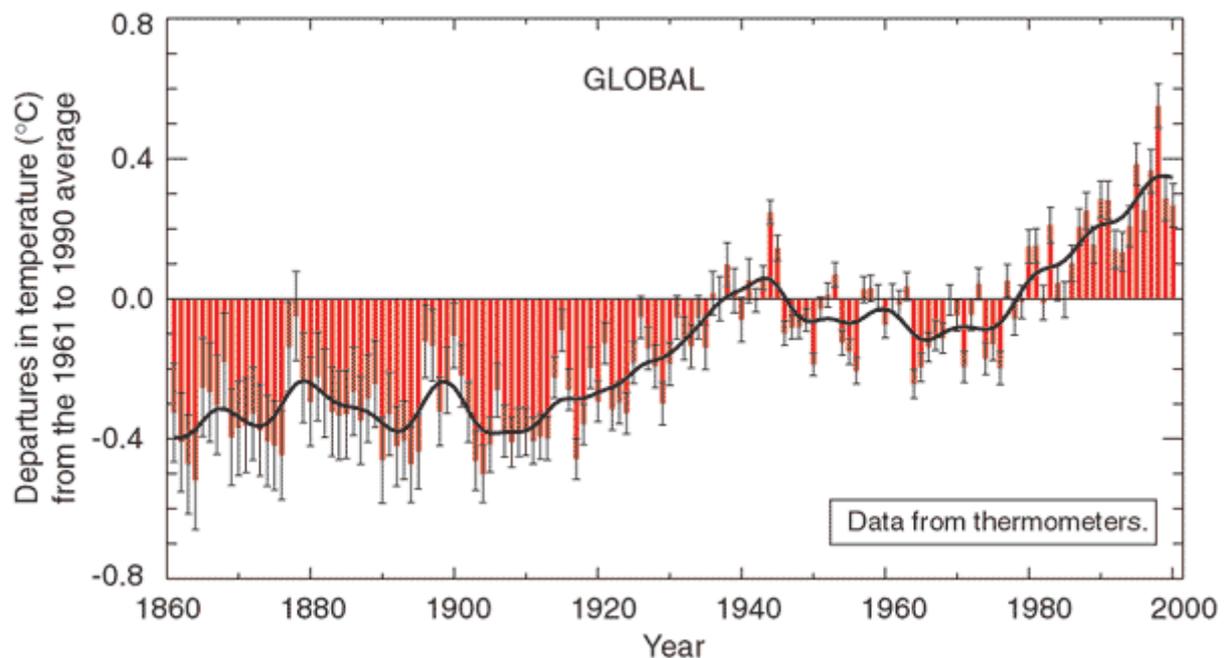


Figure 2 : Anomalies de la température de la surface de la Terre combinée à celle des océans, calculées entre 1860 et 2000 par différence avec les températures de la période 1961-1990 (IPCC, 2001c).

En Europe, ce réchauffement semble être plus important en hiver qu'en été et plus intense durant la nuit que durant la journée, suivant les régions. En France, les mesures de température de Météo France montrent que le réchauffement sur le dernier siècle est plus marqué sur le sud (parfois supérieur à 1°C) que sur le nord (de l'ordre de $0,6$ à $0,7^\circ\text{C}$) (Mestre, 2000; [http:// www.meteo.fr/meteonet/actu/archives/dossiers/sieclecho/dos.htm](http://www.meteo.fr/meteonet/actu/archives/dossiers/sieclecho/dos.htm))

I.2.2 Les précipitations

Les observations ont mis en évidence une augmentation générale des précipitations aux moyennes et hautes latitudes de l'hémisphère Nord et une diminution dans la zone tropicale et sub-tropicale des deux hémisphères.

Par ailleurs une augmentation du taux de vapeur d'eau dans la basse troposphère a été observée de façon globale autour de la planète.

En Europe du Sud, on peut observer une tendance à la diminution des précipitations estimée à 20% au cours du 20^{ème} siècle. Une étude menée sur les Pyrénées espagnoles annonce une diminution de 30% des nombre de jours de précipitations pour la période 1964 – 1993 (Romero et al., 1999).

On note également une modification de la pluviométrie en France avec une augmentation des précipitations en hiver et une diminution en été, sans cependant que l'on note de tendance nette sur le bilan annuel (Moisselin, 2002; http://www.cnrs.fr/dossiers/dosclim/biblio/pigb13/06_precipitations.htm).

Les fréquences d'événements extrêmes semblent suivre les tendances de croissance ou décroissance de la précipitation aux moyennes et hautes latitudes de l'hémisphère Nord. Cependant, cet effet peut être localement perturbé.

Ainsi, la fréquence des évènements extrêmes observée aux Etats-Unis et en Angleterre semble avoir augmenté en hiver et de plus grandes quantités d'eau sont observés au cours des événements pluvieux que durant les décades précédentes (Osborn et al., 1999 ; IPCC, 2001c ; Palmer et Räisänen, 2002).

I.2.3 Neige et glace

Les observations par satellite indiquent une diminution de l'ordre de 10 % de la couverture neigeuse mondiale depuis 1960, sauf dans certaines régions côtières où les précipitations ont localement augmenté. Une diminution de l'ordre de 2 semaines de la durée d'englacement des rivières et des lacs aux moyennes et hautes latitudes de l'hémisphère Nord, a été observée sur le terrain. Par contre, on n'observe pas de tendance annuelle claire en ce qui concerne la banquise en Antarctique, bien que sa superficie décroisse en été et que son épaisseur moyenne semble diminuer (IPCC, 2001c).

I.2.4 Les océans

Il est difficile de mettre en évidence des tendances à grande échelle en termes de variation du niveau moyen des océans. Les marégraphes du monde entier montrent cependant une augmentation de l'ordre de 1 à 2 mm/an au cours du 20^{ème} siècle, que l'on peut corrélérer aux pertes de masse des surfaces glaciaires et aux phénomènes de dilatation thermique de l'eau. L'analyse des circulations océaniques indique par ailleurs une augmentation des fréquences d'occurrence et des intensités des phénomènes oscillatoires comme El Niño ou l'Oscillation de l'Atlantique Nord (IPCC, 2001c).

L'ensemble de ces observations montre clairement que nous nous trouvons face à un changement climatique majeur. La question qui se pose alors est de savoir comment la climat va évoluer dans le futur et quel sera son impact sur notre environnement et notamment sur la ressource en eau.

I.3 La modélisation

Pour étudier l'impact du changement climatique sur les processus hydrologiques futurs dans une région donnée, il est nécessaire de savoir quel sera son contexte climatique futur.

La seule façon de répondre à cette question passe par l'utilisation de modèles climatiques qui s'appuient sur une description correcte des mécanismes gouvernant le climat actuel pour faire des prévisions dans le futur.

Nous conseillons, à ce stade, la lecture d'un court texte de Michel Déqué de Météo France, disponible sur le site Internet de la Mission Interministérielle sur l'Effet de Serre (<http://www.effet-de-serre.gouv.fr>), qui présente un très intéressant historique du chemin parcouru dans ce domaine par Météo France.

I.3.1 Méthodes

Les capacités de vitesse de calcul des ordinateurs actuels ne permettent pas encore de faire fonctionner des modèles contenant l'ensemble des connaissances dont on dispose à ce jour sur le climat. De plus, les phénomènes que l'on cherche à simuler peuvent concerner des échelles spatiales et temporelles très différentes. Certains peuvent être très locaux et courts comme les orages convectifs et d'autres d'échelle planétaire et saisonniers comme les courants océaniques.

Face à ce problème, les modélisateurs sont obligés de simplifier leur description des processus et de réduire les exigences de leurs modèles en termes de capacité de calcul. Comme il est possible de simplifier les descriptions de manière plus ou moins importante, on peut distinguer trois types de modèles climatiques par ordre de complexité décroissante : les modèles « couplés » océan-atmosphère à trois dimensions, les modèles à complexité intermédiaire et les modèles climatiques simples.

Les modèles couplés (désignés par l'abréviation **MCGAO** pour **Modèles de Circulation Générale Atmosphère-Océan** (AOGCM's en anglais)) résultent du couplage de modèles de circulation générale de l'atmosphère (MCGA) avec des modèles de circulation générale des océans (MCGO) et de modèles de comportement de la banquise, des surfaces continentales et de la biosphère (Figure 3). Ce sont les mieux adaptés à l'étude des changements climatiques dans la mesure où ils permettent de prendre en compte le fait que l'océan est un important régulateur du climat, en raison de sa grande capacité calorifique (Déqué, 2000).

Les chercheurs du CNRM ont couplé un modèle de circulation atmosphérique qui interagit avec la surface du sol (modèle ARPEGE-Climat), à un modèle de circulation générale de l'océan réalisé par le Laboratoire d'Océanographie Dynamique et de Climatologie de l'Université de Paris VI (modèle OPA) et à un modèle d'évolution de la banquise (modèle GELATO). Seuls les modèles couplés comme celui-ci permettent de simuler de manière réaliste le climat à l'échelle régionale ou planétaire. En effet, ils sont basés sur des lois physiques qui décrivent, à l'aide d'équations mathématiques à trois dimensions, les échanges de chaleur, d'humidité et de quantité de mouvement entre les différents milieux. Ils sont par conséquent mieux à même de prendre en compte les différences de résolution spatiale et temporelle des processus spécifiques à chaque milieu. Une liste exhaustive des différents modèles couplés existants est fournie dans les rapports du GIEC (IPCC, 2001c).

Partie intégrante des modèles couplés, les « schémas de surface », sont utilisés pour simuler les échanges de chaleur et d'humidité à l'interface entre le sol et l'atmosphère. Ils sont alimentés par les modèles de circulation atmosphérique, qui reçoivent en retour les flux de chaleur que les schémas de surface simulent. Le calcul de ces flux passe par la simulation de l'évolution du contenu en eau du sol, variable directement reliée à la ressource en eau.

Il existe une grande quantité de schémas de surface, qui font l'objet de programmes d'intercomparaison (Henderson-Sellers et al., 1993). Plus ou moins détaillés suivant les modèles atmosphériques auxquels ils sont couplés, ils permettent de prendre en compte l'influence du manteau neigeux et du gel, ainsi que du type de sol et de végétation sur le bilan hydrique du sol. Actuellement, les travaux se concentrent sur la prise en compte de la physiologie des plantes qui permettra de simuler les flux de CO₂ intervenant dans le cycle terrestre du carbone.

Parallèlement à la prise en compte de la végétation dans les schémas de surface, des sous-modèles des cycles terrestres et océaniques du carbone et du soufre ont été rajoutés aux modèles couplés, de manière à pouvoir simuler l'impact des émissions de gaz à effet de serre sur le climat (Figure 3).

The Development of Climate models, Past, Present and Future

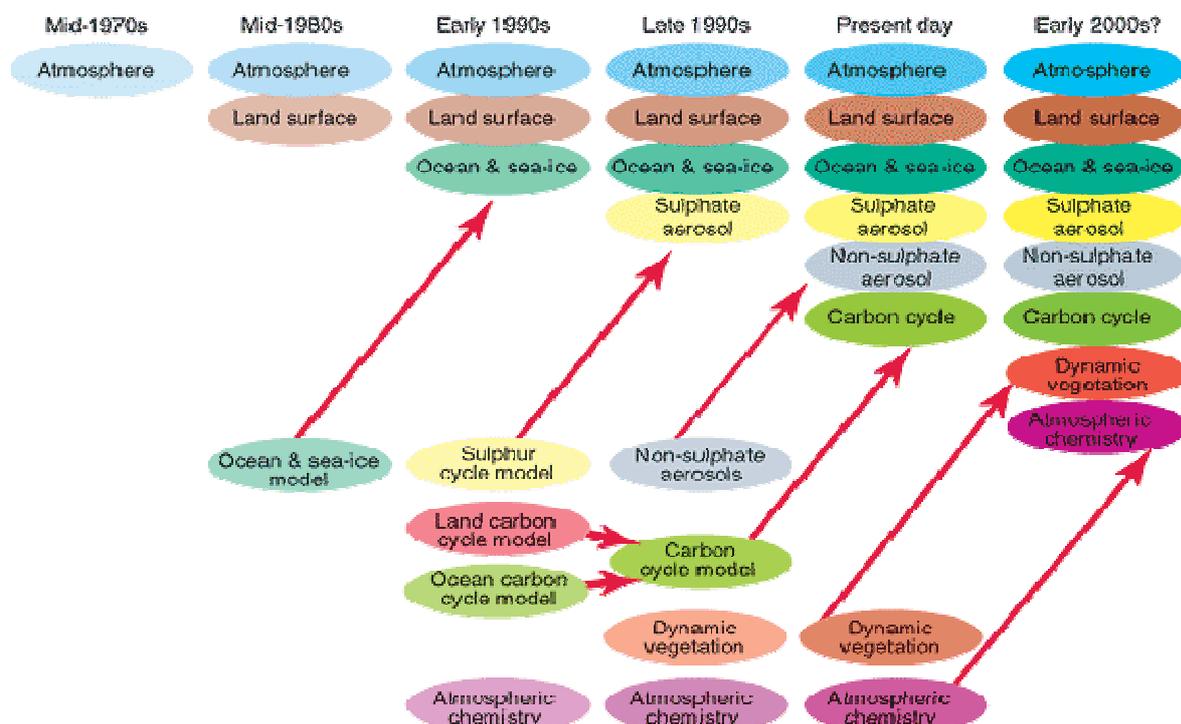


Figure 3 : Développement des modèles de climat durant les 25 dernières années montrant comment les différents sous-modèles sont d'abord développés chacun de leur côté puis ensuite couplés au modèle général (IPCC, 2001c).

Pour vérifier la validité des modèles climatiques couplés il faut bien évidemment comparer le résultat de leurs simulations aux observations actuelles. Cette étape s'appelle la validation du modèle et elle est conduite lors de chacune de ces applications. On peut aussi confronter les simulations à de longues séries d'observations climatiques du passé. Il existe par exemple des programmes de comparaison de divers modèles aux données disponibles sur une période de 20 000 ans (PMIP (Paleoclimate Modelling Intercomparison Project - <http://www-lsce-cea.fr/pmip/home.html>)). Ces études ont permis de confirmer que seuls des modèles qui couplent l'atmosphère, les océans et les surfaces continentales sont capables de donner des résultats de bonne qualité.

Si les simulations reproduisent les observations de manière correcte, on considère que le modèle est validé. Il peut alors être utilisé pour simuler le climat du futur à partir d'un ou plusieurs scénarii d'évolution du taux de CO₂ atmosphérique établis par le GIEC. Cependant, comme il n'y a pas, par définition, de valeurs auxquelles on puisse comparer les résultats du modèle, une stratégie d'analyse des prévisions a été mise au point pour éliminer ses sources d'erreur propres.

Cette stratégie consiste à réaliser une première simulation que l'on appelle « simulation de contrôle », réalisée avec la valeur de CO₂ atmosphérique constante sur la période de simulation. Ensuite, on effectue une simulation en augmentant le taux de CO₂ conformément au scénario choisi, puis on calcule la différence entre le résultat obtenu et le résultat de la simulation de contrôle pour les variables climatiques qui nous intéressent. Ce calcul permet d'obtenir ce que l'on appelle les anomalies climatiques occasionnées par l'augmentation du CO₂. Dans la littérature, on présente généralement les anomalies sur les températures et sur les précipitations.

De grands programmes internationaux (Global Energy and Water Cycle Experiment – GEWEX, International Geosphere Biosphere Program - IGBP) ont donné lieu à des intercomparaisons de modèles climatiques pour essayer de déterminer les meilleurs choix de modélisation face à la grande hétérogénéité des anomalies résultantes de ces modèles (Meehl et al., 2000). Il a été ainsi montré que si les modèles couplés de climat sont relativement insensibles aux processus d'interaction avec la surface à grande échelle, ils le sont beaucoup plus à l'échelle régionale. De ce fait, les résultats des simulations varient suivant l'échelle spatiale considérée et l'on peut se retrouver avec un résultat régional opposé à la tendance globale. Les changements de type d'occupation des sols qui modifient les flux de chaleur et d'eau entre le sol et l'atmosphère peuvent par exemple avoir un impact important. Les schémas de surface peuvent introduire d'importantes incertitudes lors du calcul de l'évaporation pour les moyennes et hautes latitudes (Crossley et al., 2000).

Par ailleurs, de longues séries de données hydrologiques ont été reconstituées et ont permis de mettre en évidence les fluctuations saisonnières à pluriannuelles des processus hydrologiques à grande échelle. Il est en effet important de ne pas confondre changement climatique et variabilité naturelle du climat. L'étude de quelques grands phénomènes climatiques comme El Niño ou l'Oscillation de l'Atlantique Nord, montrent qu'il existe une variabilité hydrologique importante qui n'est pas forcément liée à un changement climatique.

Il est donc important d'associer un calcul d'incertitude à toute étude d'impact du changement climatique sur les ressources en eau. Celui-ci passe par l'utilisation de plusieurs modèles climatiques, de manière à intégrer la dispersion de leurs résultats dans l'analyse des impacts.

I.3.2 Prévisions et impacts

Parmi les scénarios proposés par le GIEC, deux d'entre eux sont largement utilisés à l'heure actuelle dans les travaux de modélisation réalisés avec les modèles couplés les plus complets. Il s'agit des scénarios appelés **A2** et **B2** (IPCC, 2000).

A2 considère une très rapide croissance démographique au cours de laquelle la population mondiale atteindrait un maximum en milieu de siècle pour diminuer ensuite. Ce scénario prévoit des convergences dans les politiques régionales et un renforcement des interactions culturelles et sociales. Il estime qu'en conséquence, le taux de CO₂ dans l'atmosphère doublerait d'ici la fin du siècle.

B2, scénario plus modéré, met l'accent sur des solutions locales allant dans le sens de la viabilité économique, sociale et environnementale, avec un accroissement de la population beaucoup plus lent que dans le scénario A2. L'augmentation des émissions résultante de ce scénario serait bien sûr beaucoup moins importante.

Nous allons à présent résumer les prévisions qui sont faites par les MCGAO lorsqu'ils considèrent ces scénarios et présenter les impacts prévus sur les ressources en eau.

I.3.2.1 Les températures

L'ensemble des travaux de modélisation prévoient que la température globale va continuer à augmenter jusqu'à atteindre en 2100 des valeurs situées entre 1,5 et 4,3°C pour le scénario A2 et entre

0,9 et 3,4°C pour le scénario B2. Ils prévoient aussi une diminution de l'amplitude thermique journalière, due à une remontée des températures minimales nocturnes et une augmentation plus importante des températures moyennes en été qu'en hiver, en raison de l'assèchement des surfaces. Les modèles simulent aussi un réchauffement plus rapide pour les surfaces continentales que pour les surfaces océaniques et plus intense pour les hautes latitudes en hiver. Cette augmentation généralisée des températures provoquerait bien évidemment un recul important des manteaux neigeux et glaciaires du monde entier.

Le scénario (B2) a été testé avec le modèle couplé du CNRM. Les résultats de la simulation à l'échelle mondiale montrent une augmentation de la température, variable selon le lieu et la saison, qui atteint 3°C en moyenne globale en 2100. Ce réchauffement est plus important dans l'hémisphère nord que dans l'hémisphère sud et provoque un net recul de la banquise des pôles. Il est à noter qu'une simulation réalisée avec la concentration de gaz à effet de serre actuelle, maintenue constante dans le futur, présente aussi un réchauffement de l'ordre de 1°C en 150 ans.

L'effet du chlore contenu dans les CFC sur l'ozone de la haute atmosphère a aussi été pris en compte. L'apparition du trou dans la couche d'ozone au dessus de l'Antarctique a pu être reproduite. Les résultats montrent que celui-ci pourrait être résorbé en 50 ans si l'on respectait l'accord de Montréal sur la diminution des CFC (Royer et al., 2002).

I.3.2.2 Les précipitations

A l'échelle de la planète, les modèles prévoient une augmentation des précipitations toute l'année pour les hautes latitudes. Cette augmentation est aussi prévue pour les latitudes moyennes de l'hémisphère nord et en Afrique tropicale durant l'hiver et en Antarctique, Asie du Sud et de l'Est durant l'été. Par contre des diminutions sont prévues en Australie, en Amérique centrale et en Afrique du Sud en hiver et en Europe en été. Ainsi une étude réalisée sur l'Europe du Sud avec un scénario de doublement du taux de CO₂ dans l'atmosphère, prévoit une précipitation constante en hiver et une diminution de l'ordre de 20% en été. (Gregory et al., 1997). Les Alpes subiraient par contre des hivers plus pluvieux mais plus doux, ce qui provoquerait une diminution de 30 à 50 % de la taille des glaciers (IPCC, 2001a).

Ces augmentations/diminutions des précipitations sont corrélées avec la variabilité de leur intensité (plus il pleut, plus l'intensité des événements varie). Les changements de fréquence des événements extrêmes (orages, ouragans) sont difficiles à simuler du fait des échelles de temps et d'espace grossiers utilisés par ces modèles par rapport à la taille de ces phénomènes. Cependant, une étude récente indique que l'Europe du Nord et l'Asie Centrale risquent de subir une importante augmentation de la fréquence des précipitations extrêmes (Palmer et Räisänen, 2002). Par contre, Gregory et al. (1997) et Wetherald et Manabe (1999), prévoient une intensification des sécheresses en Europe du Sud. Ils notent aussi que l'impact sur le contenu en eau du sol devrait intervenir moins rapidement que pour la température de l'air. Mitchell et Johns (1997) obtiennent de leur côté une augmentation des précipitations et de l'humidité du sol en été, à cause des sulfates qui contrecarrent l'effet du CO₂, ce qui montre la complexité des mécanismes en jeu.

I.3.2.3 Le contenu en eau du sol

Des simulations sur l'hémisphère Nord montrent qu'une augmentation des gaz à effet de serre provoquerait une diminution du contenu en eau du sol.

Ce phénomène s'explique principalement par une élévation de la température, qui augmenterait l'évaporation en hiver et au printemps et par une diminution des précipitations en été.

Gregory et al. (1997) observent dans leur étude régionale sur l'Europe du Sud, une diminution du contenu en eau du sol en été de l'ordre de 25%. Ce phénomène de sécheresse (également prévu par d'autres études régionales), est la conséquence de la diminution de la précipitation et de

l'augmentation de l'évaporation. Cette étude conclut aussi à un changement dans le régime d'alimentation en eau du sol, qui recevrait plus d'eau au cours de l'hiver et moins au printemps. Ceci est dû à la modification de la phase des précipitations, qui voient les chutes de neige diminuer et fondre plus rapidement, réduisant de façon importante l'alimentation en eau des sols au printemps.

Ces sécheresses peuvent avoir des impacts secondaires comme la salinisation des sols qui, dans les zones côtières, risque d'être accentuée par la remontée du niveau de la mer. Par contre, les sols seraient moins soumis aux processus d'érosion de la pluie et du gel, ce qui modifierait aussi les processus d'infiltration et de ruissellement

I.3.2.4 Ressources en eau souterraines

L'évolution des nappes souterraines est difficile à estimer car l'augmentation des précipitations favorise la recharge en hiver, alors que l'augmentation de l'évaporation favorise les pertes. La variation de la longueur des périodes de sécheresse et de précipitation influe également. Peu d'études ont analysé ces problèmes qui sont différents si les nappes sont libres ou captives (peu sensibles) et suivant le type d'aquifère. Dans le cas des nappes libres (alluviales, d'accompagnement,...), une recharge hivernale plus favorable peut limiter en partie les étiages liés à l'accroissement de l'ETP et à la réduction des précipitations en été. La réponse des nappes captives est plus compliquée car leur réaction à une perturbation atmosphérique peut s'étaler sur plusieurs années.

I.3.2.5 Ressources en eau de surface

Les débits observés sur les rivières sont fortement liés aux précipitations et ont donc augmenté avec elles dans l'hémisphère Nord. Aux Etats-Unis les observations indiquent une augmentation du nombre de crues supérieures à la crue centennale au cours des 30 dernières années. Ce phénomène serait accentué pour les 100 années à venir dans le cas du scénario de doublement du CO₂ (Milly et al., 2002). Les risques hydrologiques liés aux crues pourraient donc être plus importants que par le passé et plus clairement centrés sur l'hiver.

L'augmentation de la température modifierait aussi le régime des écoulements dans la mesure où elle impliquerait moins de chutes de neige et donc moins de retard aux écoulements. Martin (2000) indique par exemple que, pour une hypothèse de réchauffement de 1,8°C, la durée d'enneigement des montagnes françaises à l'altitude de 1500 m risque de subir une réduction allant de 30 à 50 jours, à cause d'un début d'enneigement retardé et d'une fonte de la neige avancée.

La multitude de facteurs qui influencent les débits, l'effet anthropique qui modifie l'occupation des sols et la variabilité climatique naturelle rend difficile la détection d'un signal propre aux effets des changements climatiques. Cependant, il semble bien que l'effet le plus important dans les régions de montagne et aux latitudes moyennes soit une augmentation des débits et des intensités des crues en hiver et une diminution au printemps, dues aux fontes nivales précoces. De plus, la réduction des précipitations en été impliquerait des débits d'étiage plus faibles (sauf pour les bassins alimentés par des nappes importantes qui profitent de l'augmentation des précipitations en hiver (Arnell et Reynard, 1996 ; Arnell, 1999) et des périodes d'étiages qui se décalent vers le printemps (par manque des écoulements de fonte des neiges) (Mandelkern et al., 1998).

Ces facteurs peuvent bien évidemment avoir un impact sur la gestion des retenues pour l'irrigation ou la production d'électricité. Leurs capacités devront peut-être être augmentées pour stocker plus d'eau sur un temps plus court. De plus, la gestion de ces ouvrages devra tenir compte de l'augmentation prévisible de la demande.

Peu d'études existent sur l'effet de l'augmentation de la température sur la qualité des eaux, particulièrement sur le taux d'oxygène dissous en période de basses eaux. Par ailleurs, l'augmentation

de la température peut provoquer de rapides proliférations d'algues bleues ou vertes, à cause des phosphates et nitrates présents dans les eaux des lacs et étangs.

Face à l'ensemble de ces impacts, les gestionnaires peuvent, soit augmenter les capacités de stockage ou de résistance des ouvrages existants tout en modifiant leurs stratégies d'utilisation des aménagements, soit réguler la demande en eau en changeant les pratiques institutionnelles. Cette dernière méthode est celle qui soulève le plus d'intérêt ces dernières années, étant même encouragée par des agences internationales comme la Banque Mondiale du fait de sa plus grande efficacité et de son plus faible coût.

Les études actuelles, si elles se sont penchées sur les multiples effets que peut avoir un réchauffement de la planète sur les ressources en eau (processus hydrologiques, alimentation en eau potable, gestion de l'eau, pollution,... etc.), sont limitées dans leurs conclusions par la diversité des milieux et des contextes socio-économiques étudiés. Rares sont les études qui permettent de s'affranchir totalement des effets des changements d'occupation des sols, des techniques agricoles, des activités anthropiques ou simplement de la variabilité climatique naturelle pour analyser uniquement l'impact d'un changement du climat et en tirer des conclusions d'ordre général. Ceci est d'autant plus vrai que, quand il s'agit des usages de l'eau, les gestionnaires tendent par définition à adapter leurs stratégies aux changements, dans le système qu'ils gèrent.

Nous allons maintenant présenter les outils et les méthodes de travail adoptées pour étudier l'impact du changement climatique sur la ressource en eau du bassin Adour Garonne.

I.4 Les outils du CNRM : le système SIM

Le système « SAFRAN-ISBA-MODCOU (SIM) » (Habets et al., 1999a), mis tout d'abord en place sur le bassin de l'Adour (Habets et al., 1999b), puis sur le bassin du Rhône (Habets et al., 1999c), a été développé par les chercheurs du CNRM pour modéliser simultanément les bilans de surface et les débits des grands bassins, en relation avec les champs météorologiques observés sur de longues périodes de temps. SIM couple un module d'analyse des variables climatiques (SAFRAN (Durand et al., 1993)), un schéma de surface qui décrit les interactions entre le sol, la biosphère et l'atmosphère (ISBA (Noilhan et Planton, 1989, Noilhan et Mahfouf, 1996)) et un modèle hydrologique distribué des écoulements superficiels et souterrains (MODCOU (Ledoux, 1980)).

I.4.1 SAFRAN

SAFRAN (Durand et al., 1993) permet de reconstituer sur une grille régulière de 8 km de côté, les huit variables météorologiques qui définissent le forçage atmosphérique d'ISBA.

Cette reconstitution se fait à partir d'observations, d'analyses issues de modèles et de données climatologiques. Le forçage atmosphérique est donc l'ensemble des variables suivantes calculées à un pas de temps tri-horaire :

- Température à 2 m du sol,
- Humidité à 2 m du sol,
- Vitesse du vent à 10 m du sol,
- Pression atmosphérique à 2 m,
- Rayonnement global (visible),
- Rayonnement atmosphérique (infra-rouge),
- Précipitation liquide,
- Précipitation solide.

I.4.2 ISBA

Le schéma ISBA simule les échanges d'eau et d'énergie entre le sol et l'atmosphère et les flux d'eau (ruissellement et drainage) vers le système hydrologique. Il peut être couplé avec l'ensemble des modules météorologiques de Météo France et est, en particulier, utilisé pour la prévision météorologique opérationnelle depuis 1998 (Morel, 2002). Il travaille sur des mailles de la même taille que celles de SAFRAN (8 km) à partir du forçage atmosphérique fourni par ce dernier.

ISBA a été validé à plusieurs reprises dans des contextes climatiques très différents et fait l'objet de travaux d'amélioration permanents grâce à sa participation à de grandes campagnes internationales de comparaison entre les différents schémas de surface (par exemple le Programme PILPS (Henderson-Sellers et al., 1993), qui a permis de tester des schémas de surface dans différents contextes (Wood et al., 1998 ; Schlosser et al., 2000 ; Slater et al., 2001). Plusieurs descriptions détaillées de ce schéma sont consultables dans les thèses de Habets (1998), Boone (2000), Etchevers (2000) et Morel (2002). Nous présentons ici les grandes lignes de sa construction en insistant plus particulièrement sur la partie qui concerne la simulation du drainage et du ruissellement.

I.4.2.1 Description schématique

ISBA présente différentes versions en fonction du type d'étude à réaliser. La plus simple se base sur l'approche « Force-Restore » développée par Deardorff (1977) et Deardorff (1978), à partir des travaux de Bhumralkar (1975) et Blackadar (1976), sur la simulation des variations de la température et de l'humidité du sol.

Bhumralkar et Blackadar décrivent le sol comme la superposition d'une fine couche de surface d'épaisseur 1 cm, évoluant rapidement en fonction du cycle diurne de la température de l'air et d'une couche profonde plus épaisse, au temps de réponse plus long. La température de cette fine couche de surface subit des variations rapides dues à l'effet des différents flux d'énergie et de chaleur (concept de forçage « force ») et est ramenée à l'équilibre par l'effet régulateur de la couche de sol profond (concept de remise à l'équilibre thermique: « restore »), lorsque l'effet des forçages atmosphériques s'estompe.

Deardorff a élargi cette méthode au calcul de l'évolution du contenu en eau du sol, en considérant que les forçages sont imposés par les flux « hydrologiques » (précipitation et évaporation) et que le retour à l'équilibre, lorsque l'évaporation ou la précipitation diminuent, se fait par diffusion verticale de l'eau entre la couche de surface et les compartiments profonds.

Cette approche fut donc utilisée dans un premier temps pour construire la version ISBA – FR (pour **Force Restore**) qui considère un sol à deux couches, dont les propriétés thermiques et hydriques sont reliées à la texture et qui comporte en surface un réservoir d'eau pour la végétation (Noilhan et Planton, 1989 ; Noilhan et Mahfouf, 1996). La résolution du bilan d'énergie sur le complexe sol – végétation permet de calculer les variations de température du sol superficiel et profond. L'évaporation totale (transpiration végétale, évaporation de l'eau interceptée par la végétation et évaporation de l'eau du sol) est simulée à partir des lois aérodynamiques de la couche limite de surface.

Une version qui considère un sol à trois couches, appelée ISBA – 3L (pour **3 Layers**) (Boone et al., 1999), a permis de pallier à certaines limitations de ISBA-FR. Elle différencie une couche racinaire d'une couche profonde et simule mieux les termes d'évapotranspiration et de ruissellement. Une description schématique de cette version est présentée sur la Figure 4.

Dans cette version, ISBA calcule au pas de temps de 5 minutes, l'évolution de 11 variables dites « pronostiques » (au sens où on se propose de « pronostiquer » leur évolution au cours du temps), que l'on peut séparer en 6 variables qui concernent le sol et la végétation (T_s température de la fine couche de surface; T_2 température de la couche de sol profond ; W_r le contenu en eau du réservoir végétal d'interception ; w_s le contenu en eau de la fine couche de surface ; w_2 le contenu en eau de la zone racinaire, w_3 le contenu en eau de la couche profonde inaccessible aux racines), de 3 variables qui concernent la neige (W_n équivalent en eau de la neige ; ρ_n la densité de la neige ; α_n l'albédo de la neige) et de 2 variables qui concernent la glace (w_{ice1} et w_{ice2} contenu en eau des réservoirs de glace des couches de surface et profonde).

Les paramètres d'ISBA sont classés en deux catégories :

- Les paramètres primaires, qui sont 1) le type de sol (fonction de sa composition en pourcentage de sable et d'argile) et 2) le type de végétation (prairies, cultures d'hiver ou d'été, forêts,...).
- Les paramètres secondaires,
 - 1) qui dépendent des paramètres primaires et sont calculés à l'aide de relations continues (contenu en eau du sol à la saturation, à la capacité au champ et au point de flétrissement, fraction de végétation présente sur la maille, indice foliaire (LAI), résistance stomatique minimum de la végétation, longueurs de rugosité dynamique et thermique),
 - 2) dont la valeur est directement reliée au type de sol et de végétation (profondeur du sol et de la zone racinaire, albédo et émissivité).

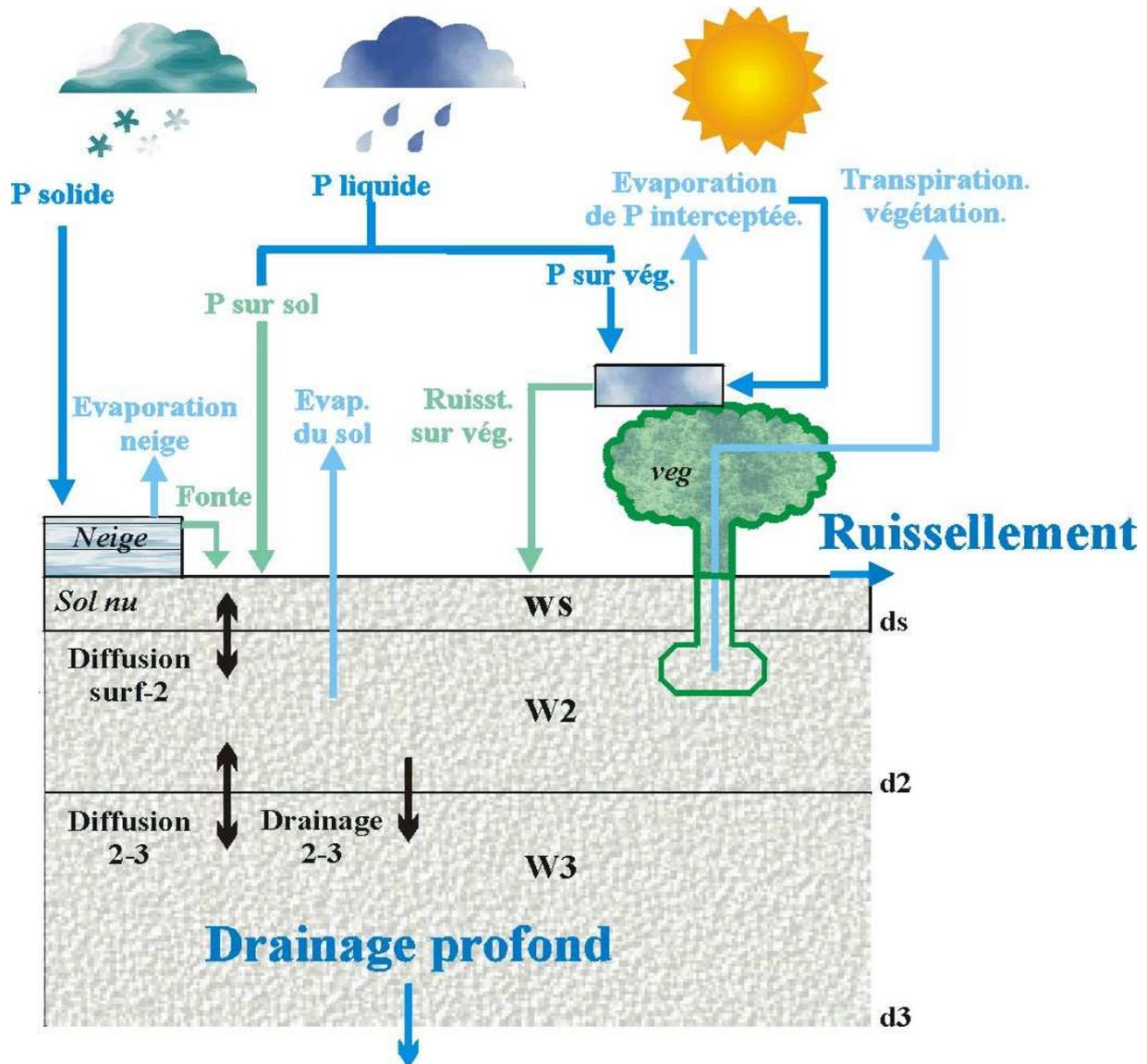


Figure 4 : Description schématique du fonctionnement hydrologique d'ISBA (d'après Boone, 2000). W_s , W_2 et W_3 sont les contenus en eau du sol de chaque couche d'épaisseur d_s , d_2 et d_3 .

I.4.2.2 Contenu en eau du sol

Les contenus en eau de chaque couche du sol sont calculés (équations (1) à (7)), en considérant, d'une part, les apports totaux au sol (P_s dans les équations) qui représentent la somme de l'eau de pluie, l'eau qui ruisselle sur les plantes et l'eau de fonte du manteau neigeux et, d'autre part, les pertes par évaporation et transpiration :

- Variation du contenu en eau des 3 couches (surface (w_s), zone racinaire (w_2), zone profonde (w_3)) qui décrivent le sol dans ISBA:

$$(1) \quad \frac{\partial w_s}{\partial t} = \frac{C_1}{d_s \rho_w} (P_s - E_s) - Diff_{surface-2}$$

$$(2) \quad \frac{\partial w_2}{\partial t} = \frac{1}{d_2 \rho_w} (P_s - E_s - E_{tr}) - Drain_{2-3} - Diff_{2-3}$$

$$(3) \quad \frac{\partial w_3}{\partial t} = \frac{d_2}{d_3 - d_2} (\text{Drain}_{2-3} + \text{Diff}_{2-3}) - \text{Drainage profond}$$

Avec C_1 le premier de quatre « coefficients force-restore » qui dépendent de la texture du sol et qui règlent l'intensité des flux, d_s , d_2 et d_3 les épaisseurs des trois couches de sol, ρ_w la densité de l'eau, P_s et E_s la précipitation nette et l'évaporation sur la première couche du sol et E_{tr} l'évapotranspiration consécutive de la succion de l'eau du sol par les plantes à travers leurs racines.

Les termes *Diff* et *Drain* qui concernent respectivement la diffusion et le drainage gravitaire (Mahfouf et Noilhan, 1996) de l'eau dans le sol se calculent de la manière suivante:

- Drainage gravitaire dans la zone racinaire (Dr_2) et dans la zone profonde (Dr_3)

$$(4) \quad \text{Drain}_{2-3} = \frac{C_3 d_3}{d_2 \tau} \max(w_{\text{drain}}, w_2 - w_{fc})$$

$$(5) \quad \text{Drainage profond} = \frac{C_3}{\tau} \frac{d_3}{d_3 - d_2} \max(w_{\text{drain}}, w_3 - w_{fc})$$

Avec C_3 le coefficient force-restore de drainage, w_{drain} le coefficient de drainage sous-maille (voir paragraphe I.4.2.5), τ une constante de temps égale à 1 jour et w_{fc} la capacité au champ du sol.

Lorsque l'humidité des sols (w_i) est supérieure à la capacité au champ (w_{fc}), l'excès est rapidement éliminé par drainage gravitaire avec une vitesse dépendante des propriétés hydrauliques du sol (l'intensité du drainage est contrôlée par le coefficient C_3 qui est fonction de la texture du sol). Dans le cas d'un sol sec ($w < w_{fc}$), la paramétrisation permet de maintenir un flux de base caractérisant la présence d'aquifères non résolue dans le modèle. Le coefficient w_{drain} doit donc être étalonné (cf. I.4.2.5).

- Diffusion entre la surface et la zone racinaire ($\text{Diff}_{\text{surface-2}}$) et entre cette dernière et la zone profonde (Diff_{2-3}):

$$(6) \quad \text{Diff}_{\text{surface-2}} = \frac{C_2}{\tau} (w_s - w_{\text{seq}})$$

$$(7) \quad \text{Diff}_{2-3} = \frac{C_4}{\tau} (w_2 - w_3)$$

Avec C_2 et C_4 les deux derniers coefficients force-restore et w_{seq} le contenu en eau de la couche de surface pour lequel les forces gravitaires et les forces capillaires s'équilibrent.

Les coefficients $C_{1,2,3,4}$ ont été étalonnés à l'aide d'un modèle de référence détaillé simulant les équations de diffusion de la chaleur et de la masse sur un grand nombre de niveaux.

I.4.2.3 Ruissellement

Classiquement, le ruissellement sur une maille donnée peut être obtenu par saturation de sa capacité de stockage ou lorsque l'intensité de la précipitation qu'elle subit est supérieure à sa capacité d'infiltration (mécanisme de ruissellement Hortonien). Cependant, plus on travaille à grande échelle, plus on introduit d'hétérogénéités dans la topographie, les états de surface ou dans la répartition spatiale des pluies. Le ruissellement se produit alors sur une fraction de la maille avant que la totalité de la surface concernée par la maille ne se trouve dans les conditions énoncées ci-dessus. Pour cette raison, une méthode de production de ruissellement, appelée « ruissellement sous-maille » (Wood et al., 1992), a été développée dans ISBA pour tenir compte de l'hétérogénéité de la maille vis-à-vis de ce phénomène.

Cette méthode utilise une distribution statistique pour décrire la variabilité spatiale de la capacité d'infiltration du sol à l'intérieur de la maille. La maille est ainsi subdivisée en un nombre infini de réservoirs élémentaires, dont la capacité d'infiltration i varie continûment entre 0 et une valeur maximale i_{max} .

La Figure 5a présente schématiquement un exemple de distribution des capacités d'infiltrations pour un nombre limité de réservoirs élémentaires.

Le contenu en eau w_2 de la maille est assimilé à la somme des contenus en eau de chaque réservoir élémentaire. Il représente les contenus en eau des réservoirs non saturés et des réservoirs saturés qui recouvrent la fraction de la maille dS/S .

Ainsi, on considère que la somme des apports au sol P_S , se répartit de façon homogène sur la maille, remplit les réservoirs qui ne sont pas saturés et ruisselle sur ceux qu'il remplit à saturation et ceux qui étaient saturés au pas de temps précédent (zone hachurée dans la Figure 5a).

La valeur du ruissellement calculé dépend donc à la fois de la valeur de P_S , du contenu en eau du sol w_2 et du type de distribution des capacités d'infiltration sur la maille.

La distribution spatiale des capacités d'infiltration sur la maille est décrite à l'aide d'une loi de probabilité $f(i)$ pour la variable aléatoire i , dont la fonction de répartition détermine la fraction de la maille $A(i)$ (avec $0 \leq A(i) \leq 1$), pour laquelle les capacités d'infiltration des réservoirs élémentaires sont inférieures à i , telle que (Wood et al., 1992, Dümenil et Todini, 1992):

$$(8) \quad A(i) = 1 - \left(1 - \frac{i}{i_{max}}\right)^b$$

avec i_{max} , la capacité d'infiltration maximale de la maille et b le paramètre de courbure de la fonction.

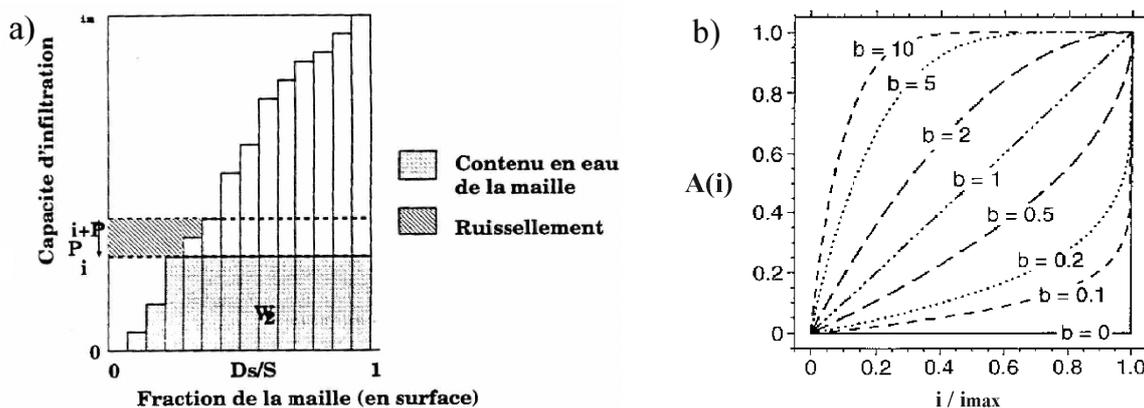


Figure 5: (a) principe de l'apparition de ruissellement pour une distribution donnée des capacités d'infiltration des réservoirs ; (b) formes des fonctions de répartition $A(i)$ pour différentes valeurs du paramètre de courbure b (extrait de Habets, 1998).

La Figure 5b montre que la variation de b entre 0 (ruissellement à saturation totale uniquement) et l'infini (saturation immédiate) permet à la fonction de répartition de balayer toutes les possibilités de distribution spatiale des capacités d'infiltration sur la maille. Le ruissellement est fort lorsque b est grand (forte proportion de réservoirs élémentaires à faible capacité d'infiltration) et faible lorsque b est petit (forte proportion de réservoirs à forte capacité).

Récemment, Habets et Saulnier ont développé une méthode pour estimer la distribution spatiale des capacités d'infiltration en fonction de la distribution de l'orographie sous-maille (méthode basée sur les indices topographiques de TOP MODEL) (Habets et Saulnier, 2001).

I.4.2.4 Flux d'eau dans le sol

Une fois que le ruissellement a été calculé, la quantité d'eau restante s'infiltré dans les différentes couches du sol à l'aide des équations (1) à (7).

La méthode force-restore se retrouve dans le mode de calcul de l'évolution des contenus en eau de chaque couche. Ainsi, les premiers termes des membres de droite des équations (1) et (2), représentent le forçage et les suivants le rappel à la capacité au champ pour le drainage gravitaire (équations (4) et (5)) ou à l'équilibre pour la diffusion dans le sol (équations (6) et (7)).

Le drainage gravitaire toujours orienté de haut en bas se déclenche dès que le contenu en eau du sol dépasse la capacité au champ (w_{fc}). Son intensité sera fonction de l'écart de son contenu en eau à cette dernière et de la valeur du coefficient force restore C_3 (Mahfouf et Noilhan, 1996). Ce drainage gravitaire est formulé de façon identique à la base de la couche racinaire et de la couche profonde.

Le drainage par diffusion est réglé par la valeur des coefficients force-restore C_2 et C_4 et du gradient de contenu en eau entre les couches (équations (4) à (7)) et peut fonctionner de haut en bas et de bas en haut.

I.4.2.5 Drainage sous-maille

Lorsque le contenu en eau de la couche racinaire ou profonde passe en dessous de la valeur de la capacité au champ, un mécanisme de production d'écoulement, appelé «drainage sous-maille», se met en place (Habets et al., 1999a ; Etchevers, 2000). Ce mécanisme a été introduit dans ISBA pour simuler les écoulements produits au cours des périodes sèches par les réservoirs temporaires, les nappes perchées et/ou les nappes d'accompagnement, non pris en compte en raison de leur petite taille.

Le paramètre w_{drain} a donc été introduit dans les équations (4) et (5) d'évolution du contenu en eau des couches racinaire et profonde, pour produire un écoulement minimal linéaire tant que le contenu en eau de la couche se trouve sous la valeur de la capacité au champ. Ce drainage sous-maille doit être étalonné pour chaque bassin et sa valeur est de l'ordre de quelques mm/jour. Son intensité dépend de la conductivité hydraulique du sol, reliée à sa texture au travers du coefficient C_3 .

Dans le cadre de la présente étude et conformément au souhait de l'Agence de l'Eau, ce paramètre a fait l'objet d'une procédure de calage pour simuler au mieux les débits en période d'étiage. En effet, il contrôle le drainage du sol quand celui-ci ne peut plus être drainé par gravité. Un calage par bassin de la valeur de ce paramètre a donc été réalisé en se basant sur le débit moyen observé entre les mois de juillet à octobre (voir paragraphe II.3).

I.4.2.6 La neige

Deux paramétrisations de complexité croissante peuvent être utilisées pour décrire le comportement du manteau neigeux.

La première est une version à une couche (ISBA-FR), basée sur l'approche Force-Restore, dont la température est commune à celle du sol et de la végétation. L'évolution des variables pronostiques équivalent en eau, albédo et contenu en eau du manteau neigeux est calculée (Douville et al., 1995).

La seconde, plus récente (ISBA –ES (pour Explicit Snow)), calcule un bilan d'énergie spécifique pour le manteau neigeux discrétisé en trois couches d'épaisseur variable, au sein desquelles est simulée

l'évolution des variables pronostiques équivalent en eau, densité et chaleur stockée. De cette manière, un grand nombre de processus internes au manteau neigeux peuvent être simulés, comme la rétention d'eau liquide et les mécanismes de fonte et regel, importants en altitude (Boone, 2000).

L'influence du gel sur l'évolution du contenu en eau et de la température de la couche de surface est aussi pris en compte. Un module à deux couches mis au point par Boone et al. (2000) en s'inspirant du travail de Giard et Bazile (2000), a ainsi été couplé à ISBA et permet de mieux simuler les épisodes prolongés de fort refroidissement.

I.4.2.7 Autres versions d'ISBA

D'autres versions d'ISBA sont disponibles en fonction du contexte étudié. Elles peuvent se présenter sous la forme de simples modifications d'une partie du schéma ou bien comme modules utilisables de manière optionnelle. Elles peuvent être utilisés pour prendre en compte des contextes particuliers ou bien pour faire des études de sensibilité du modèle.

La version ISBA-DF (pour explicit vertical **Di**ffusion model) modélise les mécanismes de diffusion et de transferts d'eau et de chaleur dans un sol à plusieurs couches. De cette manière, l'évolution des variables pronostiques, ainsi que les changements de phase en fonction de la profondeur dans le sol, sont mieux pris en compte (Boone, 2000).

Le schéma de ville TEB (pour **T**own **E**nergy **B**udget) simule les échanges radiatifs entre la surface et l'atmosphère au dessus des villes (Masson, 2000).

Un schéma de végétation interactive ISBA-A-gs (Calvet et al., 1998) permet de représenter de manière plus réaliste l'impact du stress hydrique et de la concentration du CO₂ dans l'air sur le comportement de la végétation, en estimant de manière plus détaillée la conductance stomatique. Ce schéma permet aussi de simuler l'évolution de l'indice foliaire LAI en fonction du climat. Une étude de la sensibilité de la modélisation hydrologique à cette paramétrisation est actuellement en cours (Morel, 2002).

Enfin, une nouvelle manière de prendre en compte la variabilité des états de la surface à l'intérieur des mailles de 8 km² sur lesquelles ISBA est appliqué, a été récemment mise en place. Dans la version actuelle d'ISBA, les flux sont calculés de manière différente en fonction du type d'occupation du sol. Le schéma TEB calcule les flux au dessus de la fraction « ville » de la maille, ISBA le fait au dessus de la fraction végétation et une paramétrisation spécifique le fait au dessus des fractions « eau libre », telles que les lacs et les océans. Les fractions de chaque type de surface sont utilisés pour estimer les flux moyens sur la maille concernée. Le fait de ne pas pouvoir différencier les types de culture sur une même maille étant une limite de cette méthode, une approche « mosaïque » a été développée. Dans cette approche, chaque maille est composée de « tiles » ou « patches », qui correspondent à différents types de végétation ou à différents états d'un même type de végétation (végétation haute, basse).

De cette manière, on n'applique plus ISBA de manière commune à l'ensemble de la végétation de la maille, mais spécifiquement en fonction du type/état de la végétation. Ainsi, il n'est plus nécessaire d'agréger des paramètres de végétation qui peuvent être très différents. Cette nouvelle méthode est surtout plus adaptée lorsqu'on travaille avec le schéma ISBA-A-gs, qui utilise des paramètres pour lesquels il n'existe pas de règles d'agrégation simples.

Cette nouvelle approche a permis la prise en compte des surfaces irriguées sur le bassin de l'Adour, pour lesquelles un bilan hydrique est calculé. Cette étude ainsi que des détails sur cette nouvelle approche sont décrites dans la thèse de Morel, 2002 à paraître.

I.4.3 MODCOU

MODCOU est le modèle hydrologique développé par l'école des Mines de Paris (Ledoux, 1980). C'est un modèle distribué travaillant sur des mailles carrées de tailles variables, ce qui permet une forte résolution sur les zones sensibles (rivières, limites de bassin,...) et une résolution plus faible sur les zones plus homogènes (plaines, plateaux, ...). Une description détaillée du fonctionnement du modèle peut être consultée dans Ledoux (1980) ; Habets (1998) et Morel (2002).

En tant que modèle hydrologique, MODCOU possède sa propre fonction de production d'écoulement, qui est du type « réservoirs emboîtés ». Le niveau d'eau de chaque réservoir varie en fonction de l'apport des pluies et des pertes par évaporation et une valeur seuil sépare la quantité d'eau qui va ruisseler de celle qui va s'infiltrer. L'utilisation de réservoirs emboîtés introduit des fonctions de retard pour le ruissellement et l'infiltration qui permettent d'étaler sur plusieurs jours l'impact des précipitations.

Dans SIM, cette fonction de production a été remplacée par ISBA (Habets, 1998) qui a l'avantage de proposer une approche plus physique des phénomènes et d'améliorer la simulation de l'évaporation (Habets et al., 1999b). ISBA calcule donc les flux d'eau qui s'infiltreront et ruisselleront et le résultat est affecté à chaque maille de MODCOU pour que celui-ci les transfère à l'exutoire. MODCOU effectuant ces calculs au pas de temps journalier, les quantités de ruissellement et de drainage simulées par ISBA sont cumulées sur la journée. L'eau d'infiltration ira directement à la nappe en cas de présence de celle-ci au niveau de la maille ou sera cumulée à l'eau de ruissellement pour alimenter le réseau hydrographique.

I.4.3.1 Le transfert de l'eau vers l'exutoire

Une fois que l'eau d'infiltration et de ruissellement ont été calculées pour chaque maille du bassin, elles sont transférées jusqu'à l'exutoire, en passant par les mailles « rivière » pour les écoulements superficiels et par les mailles « nappe » pour les écoulements souterrains. Les échanges nappe-rivière sont aussi calculés lorsque leurs mailles respectives coïncident. Ils sont fonction d'un coefficient assimilable à une transmissivité verticale et de la différence de cote entre le niveau de la nappe et celui de la rivière.

□ Transfert superficiel

Le transfert superficiel se fait en deux étapes :

1. à l'intérieur des sous-bassins versants (transfert jusqu'aux mailles rivières)
2. d'un sous-bassin à l'autre (à travers les mailles rivière).

Préalablement à ces deux étapes, on calcule le réseau hydrographique à partir d'un modèle numérique de terrain du bassin, qui fournit le sens d'écoulement de chaque maille. Puis on utilise ce réseau pour définir les mailles du bassin qui vont alimenter chacune des mailles rivières. Ensuite on calcule les temps de transfert de l'eau entre les mailles en fonction de leur distance, de leur pente et d'un coefficient fonction du temps de transfert maximal sur le bassin (temps de concentration). Enfin, on définit des zones d'égal temps de transfert à l'exutoire que l'on appelle « zones isochrones ».

On peut ainsi effectuer la première étape du transfert, c'est à dire le calcul des apports des sous-bassins aux mailles rivières au cours du pas de temps. Il se fait en additionnant : les apports de la zone isochrone dont le temps de transfert à la maille rivière est égal au pas de temps, les apports dont le temps de transfert est de deux fois le pas de temps et qui ont été générés au pas de temps précédent et

ainsi de suite jusqu'à ce que les apports de toutes les mailles du sous-bassin qui alimentent la maille rivière aient été pris en compte.

Le calcul du volume d'eau (QR) dans les mailles rivières (i) pour chaque pas de temps (t) est donc égal à

$$(9) \quad QR_i^t = \sum_{k=1,n} QR_k^{t-k+1}$$

avec (QR) le volume d'eau simulé sur chaque maille (k) du sous-bassin qui alimente la maille rivière considérée et dont le nombre total est (n).

La deuxième étape du transfert superficiel consiste ensuite à transférer l'eau de bief en bief (ensemble de mailles rivière appartenant à la même zone isochrone), jusqu'à l'exutoire. Chaque bief est doté d'un coefficient de vidange (valeur minimale des coefficients de vidange des mailles rivière qui constituent le bief, eux mêmes fonction de la surface du bassin qu'elles drainent et de la superficie d'eau libre qu'elles contiennent), pour qu'il ne transmette qu'une partie de son volume d'eau de manière à simuler la propagation du flux sur l'ensemble de la rivière.

□ Transfert souterrain

Le transfert souterrain dans les nappes est dominé par la composante horizontale et il est simulé à l'aide d'une équation de diffusion. Le niveau piézométrique est calculé en fonction de la transmissivité et du coefficient d'emmagasinement de l'aquifère par unité de surface. Ainsi, on simule l'évolution du niveau de la nappe principalement en fonction des quantités d'eau drainée (ou pompée le cas échéant). Le calcul des relations nappe-rivière se fait entre les deux étapes du transfert superficiel détaillé plus haut.

I.4.4 Applications récentes

I.4.4.1 Modélisation hydrologique actuelle

Le système SIM tel qu'il vient d'être décrit a été utilisé pour modéliser les écoulements sur les bassins de l'Adour, de la Garonne, du Rhône et de la Seine (Habets, 1998 et Morel, 2002), dans les conditions météorologiques actuelles. Le forçage atmosphérique est calculé sur chaque maille du bassin à l'aide du système SAFRAN. Ensuite, ISBA calcule, au pas de temps de 5 minutes l'ensemble des termes du bilan hydrique. Enfin, les flux d'eau de ruissellement et d'infiltration simulées par ISBA sont cumulées sur la journée et intégrés dans MODCOU, qui calcule les transferts dans les rivières et dans la nappe jusqu'à l'exutoire du bassin.

Dans le cas de l'Adour, les débits simulés pour la période 1986-87 en quatre points du bassin (Salles sur la Leyre, Pandelon sur la Luy de France, Mouchan sur l'Osse et Saint Vincent sur l'Adour), ont reproduit les débits observés journaliers et mensuels de manière satisfaisante. Les écarts mensuels à la moyenne annuelle du contenu en eau du sol, simulés sur six sites différents, ont aussi montré une bonne correspondance avec les observations (Habets et al., 1999b). La qualité des résultats au regard de l'important contraste climatique entre la période de calibration et celle de validation et de l'hétérogénéité des sous-bassins étudiés a permis de s'assurer de la robustesse du modèle. Celle-ci fut d'ailleurs confirmée par une nouvelle étude sur la période 1988-1995 (Voinin et al., 1998) et par l'application du système au bassin du Rhône pendant la période 1987-88 à l'échelle journalière (Habets et al., 1999c) et 1981-1995 à l'échelle mensuelle (Noilhan et al., 2001).

Pour finir, l'expérience réalisée sur le bassin de l'Adour a récemment été étendue au bassin de la Garonne, avec l'introduction du schéma ISBA-A-gs, qui permet de calculer l'évapotranspiration en prenant en compte l'assimilation nette de CO₂ de la plante ainsi que le stress hydrique (Morel, 2002).

Le fait qu'ISBA se base sur des lois physiques pour décrire les processus hydrologiques au niveau du sol justifie l'utilisation du système SIM pour réaliser des études d'impact des changements climatiques sur les ressources en eau. En effet, ISBA ne contient pas de paramètres dont la valeur et la signification peuvent être altérées en cas de modification du climat. Ce modèle a donc été adopté pour réaliser l'étude d'impact des changements climatiques sur le bassin Adour Garonne, que nous allons à présent détailler.

II. Application de SAFRAN-ISBA-MODCOU au bassin Adour-Garonne

II.1 Présentation de la méthode

Le bassin Adour Garonne contient les bassins l'Adour, de la Garonne, du Tarn, du Lot, de la Dordogne, de la Charente et des petits fleuves côtiers du littoral aquitain. Il couvre une superficie d'approximativement 105 000 km². Le bassin de la Charente ne sera pas pris en compte dans le cadre de cette étude (Figure 6).

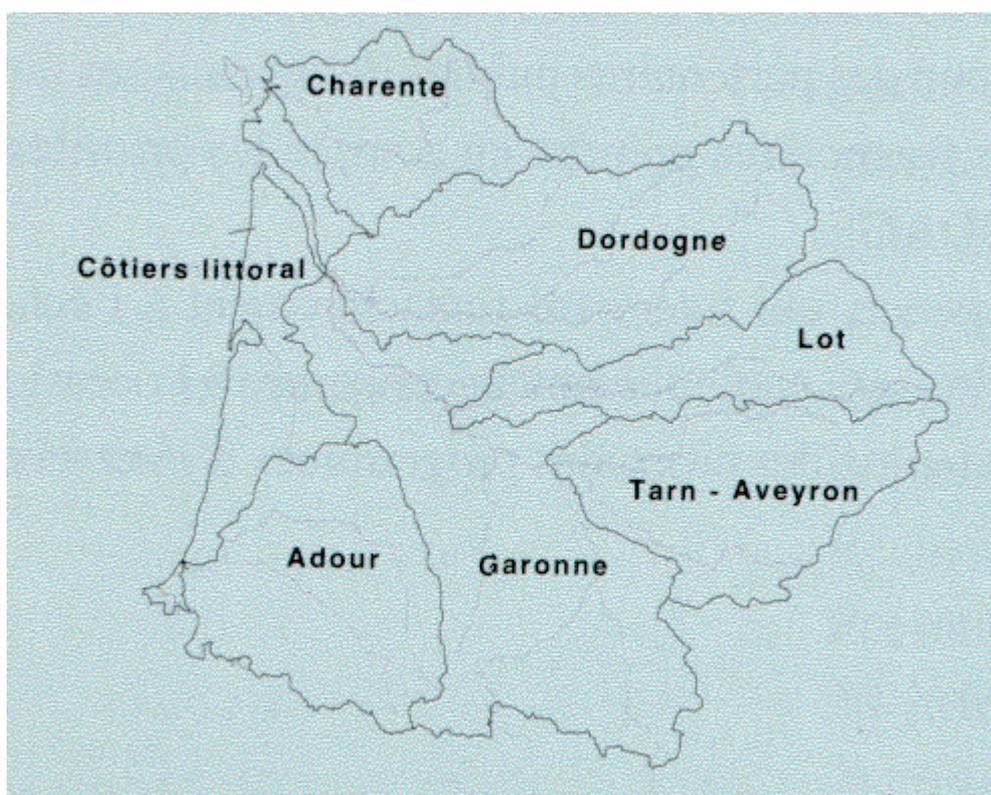


Figure 6 : Carte des sous-bassins contenus dans le bassin Adour Garonne. Extrait du SDAGE (Agence de l'eau Adour Garonne - DIREN Midi-Pyrénées, 1996).

Pour l'application de SAFRAN-ISBA-MODCOU, le bassin a été discrétisé sur une grille de 1758 mailles de 8 km de côté (Figure 7). Sur chacune de ces mailles, un forçage atmosphérique a été calculé au pas de temps tri-horaire pour la période 1985-1995, à partir du réseau d'observation de Météo-France et de l'outil d'interpolation et d'analyse météorologique SAFRAN (Morel, 2002). Ce forçage comprend les précipitations liquides et solides, la température, le rayonnement solaire et atmosphérique, l'humidité spécifique, la pression atmosphérique et le vent. Il a donc pu être appliqué à ISBA, pour que ce dernier simule les différents flux de chaleur et d'eau sur les 1758 mailles.

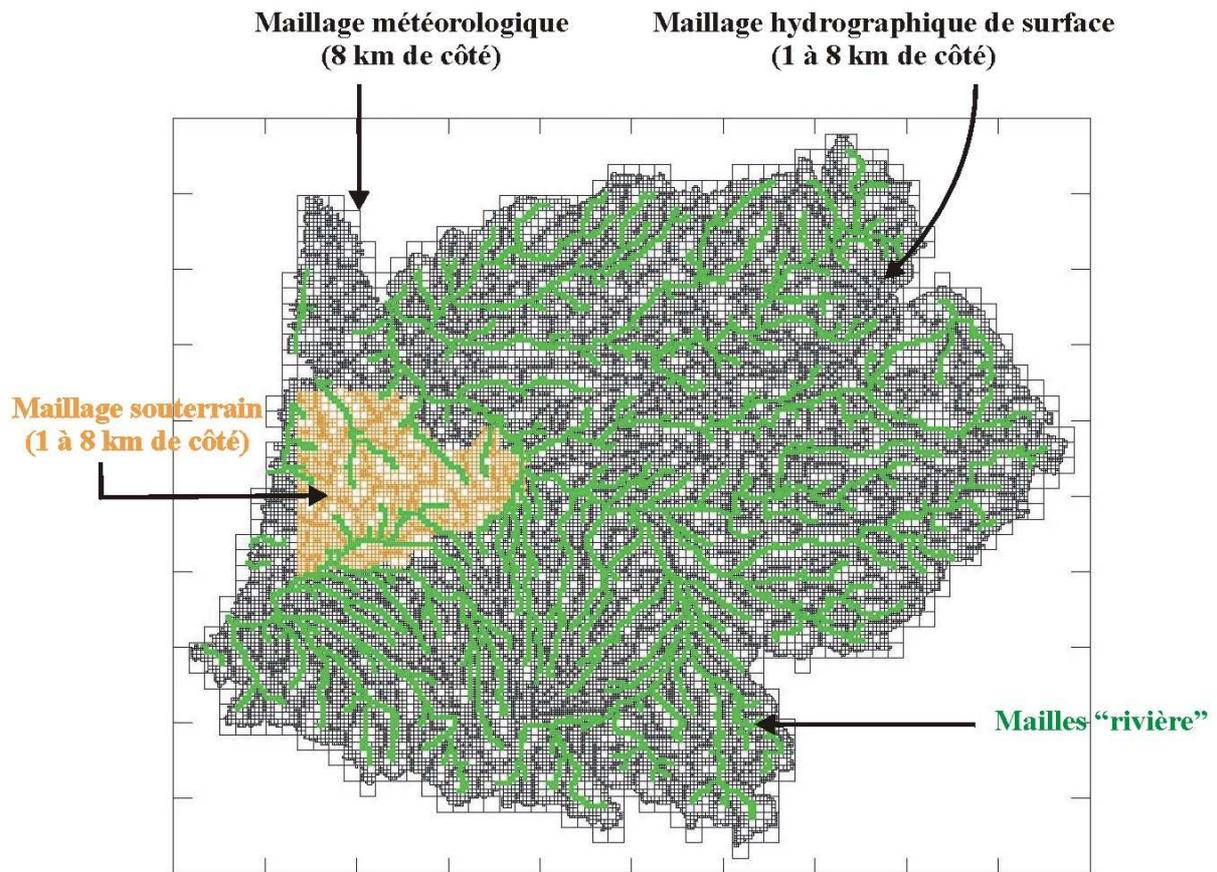


Figure 7: Maillages utilisés pour décrire le bassin Adour Garonne, son réseau hydrographique et souterrain (nappe d'Aquitaine) (extrait de Morel, 2002).

Les données physiographiques utilisées par ISBA pour la simulation sont d'une part, la texture du sol (pourcentage de sable et d'argile, issus de la base de données de l'INRA à 1 km de résolution spatiale - Figure 8) et d'autre part, le type de végétation, l'indice foliaire, la fraction de végétation, l'albédo et la rugosité la surface (Figure 9). Ces informations ont été extraites de la base de données ECOCLIMAP (Masson et al., 2001) et des données du capteur satellitaire VEGETATION, qui permettent de connaître leur évolution au pas de temps de 10 jours et à des résolutions spatiales fines (< 1 km).

Après calcul des différents termes du bilan hydrique (évapotranspiration, ruissellement et infiltration) par le schéma de surface ISBA, les flux superficiels et souterrains sont transférés vers les rivières par MODCOU pour être acheminés vers les exutoires. Les transferts sont réalisés à l'aide d'une description très fine de la surface (40248 mailles hydrographiques) et la prise en compte d'une partie des lacs et des aquifères (2861 mailles souterraines) (Figure 7).

L'ensemble de ce travail a fait l'objet d'une thèse de doctorat (Morel, 2002), dont les principaux résultats ayant trait à la modélisation hydrologique, sont consignés en ANNEXE A.

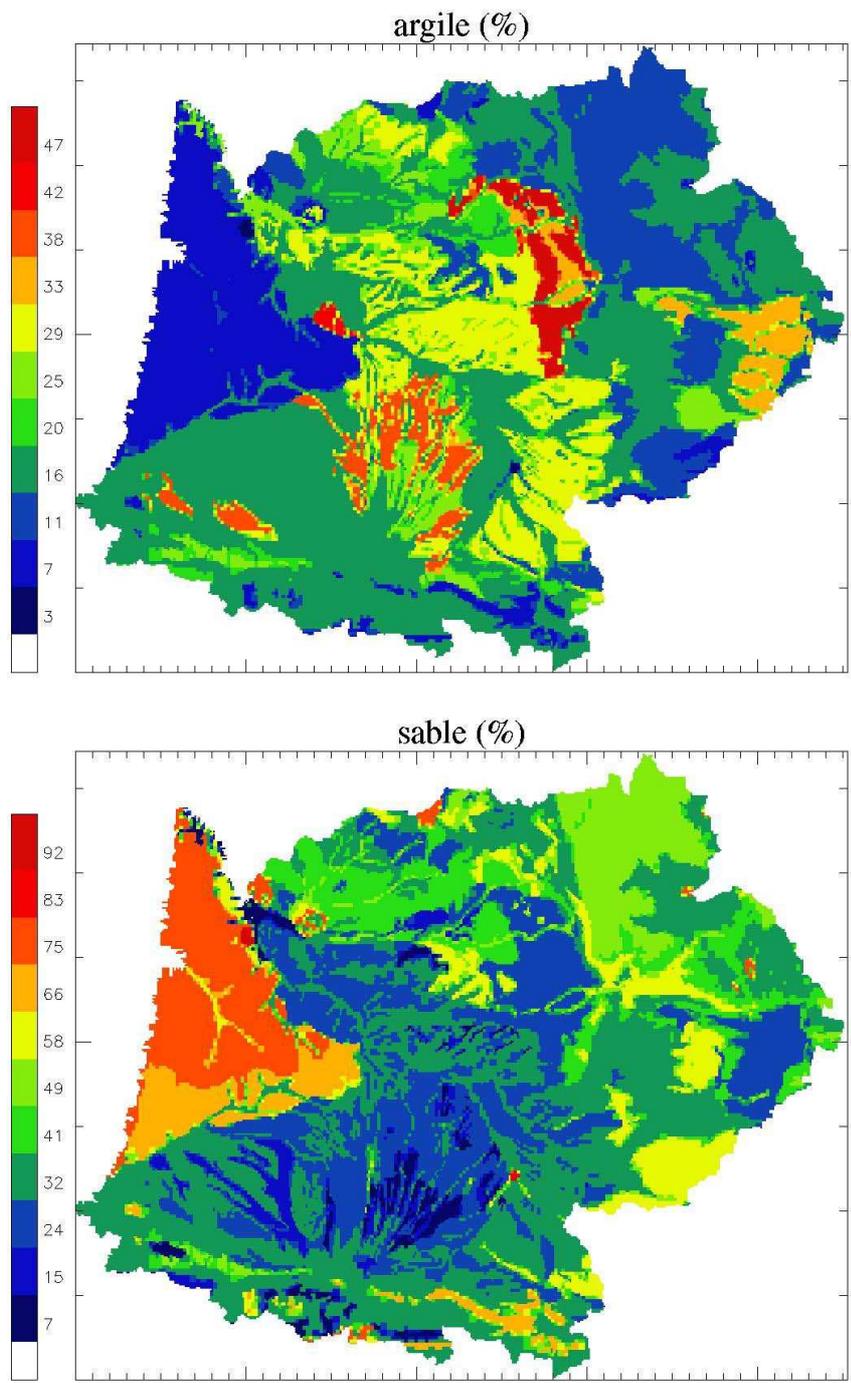


Figure 8: Textures du sol sur le bassin Adour Garonne à 1 km de résolution spatiale.

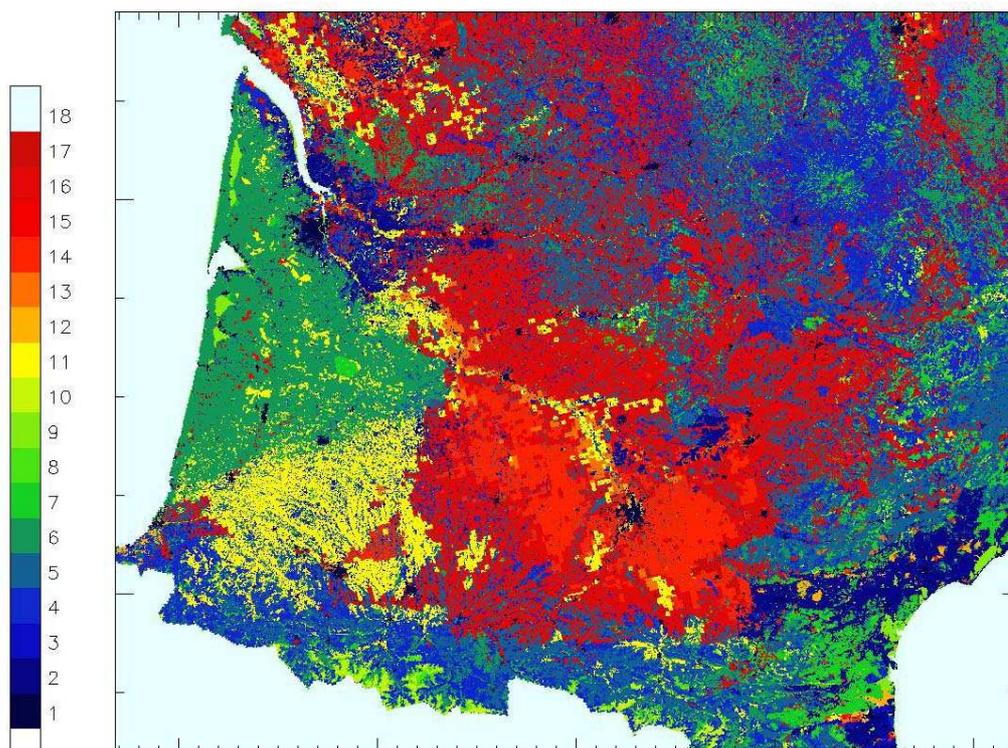


Figure 9: Couvert végétal dominant à 250 m de résolution spatiale. (1: ville, 2: vigne, 3: verger, 4: prairie, 5: feuillus, 6: conifères, 7: garrigue, 8: sol nu, 9: eau-lac, 10: rocher-glacier, 11: culture d'été, 12: culture méditerranéenne, 13: céréales 1, 14: culture d'hiver 1, 15: céréales 2, 16: cultures et prairie, 17: culture d'hiver 2, 18: culture d'hiver 3).

II.2 Stations de référence et naturalisation des débits

Au démarrage de cette étude nous disposons des chroniques de débits observés au cours de la période 1985-1995 fournies par la Banque Nationale des Données pour l'Hydrologie et l'Hydrométrie, au niveau de 81 stations hydrométriques sur le bassin (Morel, 2002). 16 stations, dites de «référence» (Figure 10), ont été choisies parmi ces 81 stations et les 51 points nodaux définis dans le SDAGE (Agence de l'eau Adour Garonne - DIREN Midi-Pyrénées, 1996).

Ces débits ne sont pas toujours indépendants des effets de l'anthropisation (retenues, irrigation, etc.). En effet, les stockages/vidanges des réservoirs utilisés pour la production d'hydroélectricité ainsi que les prélèvements/apports dus à l'irrigation peuvent fortement perturber la dynamique naturelle des écoulements, notamment en période de basses eaux. Par conséquent, un travail de correction des effets anthropiques sur les débits - «*naturalisation des débits*» a été réalisé au niveau de ces 16 stations à partir des estimations fournies par l'AEAG, ainsi que les sources de données suivantes :

- débits naturalisés obtenus dans le cadre du Plan de Gestion des Etiages de l'Adour et de la Garonne;
- prélèvements pour l'irrigation sur l'Aveyron et la Midouze et influences des aménagements EDF/SHEM sur l'ensemble du bassin (St Géraud, Estaens, Fabrège, Bioux, Artouste, Gloriette, Ossoue, Escoubous, Migouelou, Le Tech, Campana, Gréziolles, Laquets, Arraing, Fourcat, Gnioure, Izourt, Soulcem, Majou, Riète, Naguilhes, Laparan, Sisca, Baldarquès, Bésines, Portillon, Lac Glacé, Lac d'Oo, Caillaous, Pouchergues, Oredon, Oule, Cap de Long, Aubert, Aumar, Saints Peyres, Pinet, Villefranche, Raviège, Record, Laouzas, Pareloup, Pont de Salars, Bage, Castelnau, Golinac, Grandval, Lanau, Sarrans, La Barthe, Montezic, Couesque, Maury, Brugale, Basteyroux, Montignac et Chastang).

Des chroniques de 10 ans de débits naturalisés ont ainsi été construites au pas de temps journalier. Il faut cependant noter que, bien que les perturbations anthropiques soient les plus fortes pendant les périodes d'étiage, elles ne modifient pas les débits observés de manière importante (cf. comparaison des chroniques journalières des débits bruts et naturalisés en ANNEXE B).

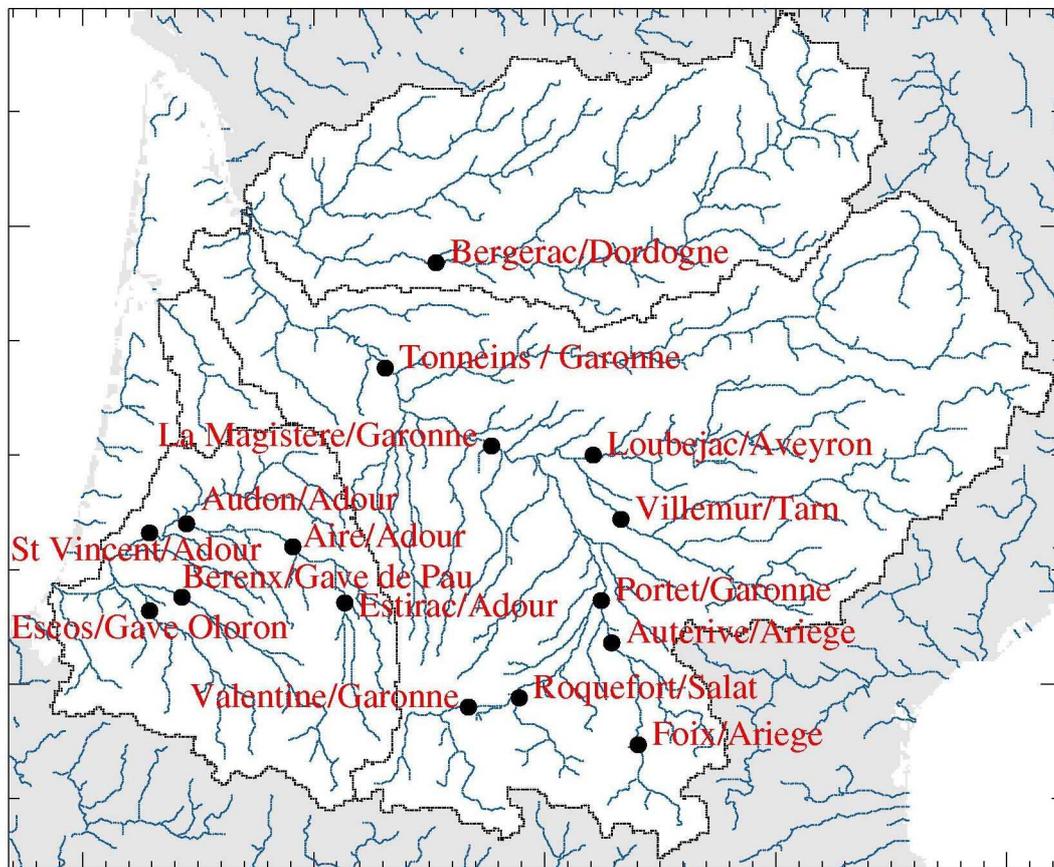


Figure 10: Réseau hydrographique et stations de référence choisies par l'AEAG sur le bassin.

Certaines stations de référence (Audon et Saint Vincent sur l'Adour) sont influencées par la nappe d'Aquitaine (Figure 11). Cette nappe étant la plus importante du bassin, son influence sur les débits est simulée par MODCOU à l'aide du maillage cité plus haut. Les autres nappes du bassin ne sont actuellement pas prises en compte dans MODCOU.

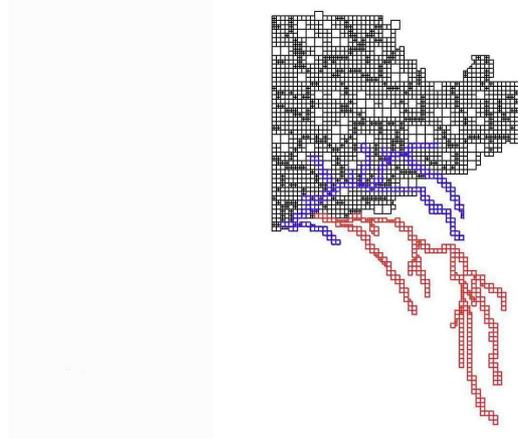


Figure 11: Réseaux hydrographiques des stations Audon (rouge) et Saint Vincent (rouge + bleu) et contact avec le maillage souterrain décrivant la nappe d'Aquitaine (extrait de Morel, 2002).

II.3 Le calage sur les périodes d'été.

Une fois cette base de données de débits naturels mise en place, un travail de calage du modèle ISBA-MODCOU sur les débits en période d'été (mois de juillet à octobre) a été réalisé.

Les écoulements en période d'été sont principalement produits par drainage des eaux d'infiltration et par vidange des aquifères, nappes perchées et/ou des nappes d'accompagnement des rivières, qui constituent des réservoirs de stockage temporaire. Dans le modèle ISBA-MODCOU, le flux de drainage est généré par le schéma de surface ISBA. Il représente le flux d'eau drainé par la force gravitaire à la base du sol, qui ne peut être retenu par la force de rétention capillaire. L'équilibre entre ces deux forces définit le contenu en eau à la capacité au champ dans ISBA.

Au cours de la période d'été, le sol s'assèche rapidement pour passer sous la capacité au champ, bloquant ainsi le drainage gravitaire. Un mécanisme de production d'écoulement, appelé «drainage sous-maille», se met alors en place dans ISBA (cf. paragraphe I.4.2.5). Ce mécanisme dépendant de la texture du sol, a été introduit dans le modèle pour simuler le déstockage des réservoirs temporaires non pris en compte explicitement dans le modèle MODCOU en raison de leur petite taille.

Il est contrôlé par le coefficient de drainage sous-maille (w_{drain}), dont nous avons déterminé la valeur sur l'ensemble des mailles du bassin par étalonnage. Pour ce faire, un débit considéré comme caractéristique de l'écoulement en période d'été a été calculé pour chacune des stations de référence. Le calcul de ce débit de référence a été réalisé en classant les débits par ordre croissant et en prenant la valeur moyenne des 1200 débits les plus faibles ($4 * 30 \text{ jours} * 10 \text{ ans} = 1200$), valeur considérée comme représentative des 4 mois d'été.

Des débits de référence ont ainsi été calculés pour chaque station et reportés sous les graphes de chaque station présentés en ANNEXE B. Ils sont logiquement proches des débits moyens mensuels minimaux (QMNA) calculés par la Banque Nationale des Données pour l'Hydrologie et l'Hydrométrie pour chaque station, sur des périodes allant de 30 à 100 ans.

A partir de ces débits de référence, les valeurs du coefficient de drainage sous-maille ont pu être déterminées sur les mailles du bassin contenant des aquifères. Pour déterminer ces mailles, un zonage préalable des aquifères sur le bassin a été réalisé à partir de l'information fournie par la base de données du Réseau Hydrogéologique Français (BD-RHF - Marchet, 2002) du BRGM. Cette base de données, accessible gratuitement via internet (<http://www.rnde.tm.fr>), permet de télécharger une carte des aquifères français dans un format exploitable à partir de logiciels comme MapInfo ou Arcview. Un maillage régulier des zones aquifères sur le bassin a ainsi pu être construit par croisement de cette carte et du maillage ISBA sur le bassin Adour-Garonne (Figure 12).

Les valeurs du coefficient w_{drain} ont donc été calibrées sur ce zonage. Nous les avons reportées sur une carte présentée en Figure 13. On remarque, d'une part, que ce coefficient est nul sur les zones influencées par la nappe Aquitaine où les écoulements d'été sont simulés par le modèle MODCOU et, d'autre part, qu'il peut être ponctuellement nul sur certaines zones aquifères. Ce dernier point s'explique par le fait que le calage du coefficient w_{drain} se fait d'amont en aval. Les débits produits dans les parties amont des bassins peuvent alors avoir un impact tel sur les débits dans les parties aval, que cela rend parfois inutile le travail de calage de w_{drain} , qui conserve alors une valeur nulle.

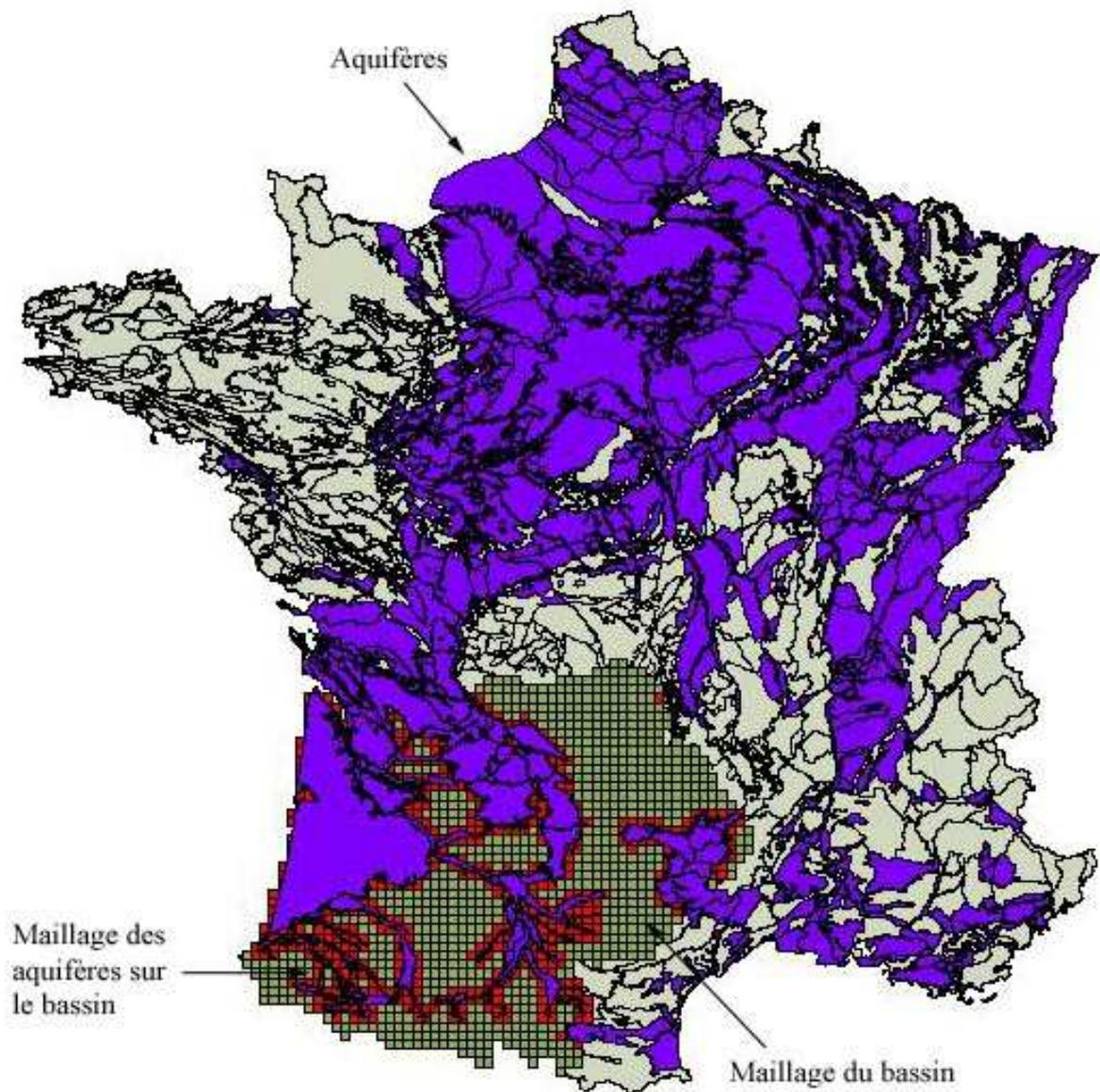


Figure 12 : Maillage régulier des aquifères sur le bassin Adour Garonne (rouge) construit par intersection du zonage des aquifères sur la France (violet - extrait de la base BD-RHF du BRGM) et du maillage ISBA sur le bassin.

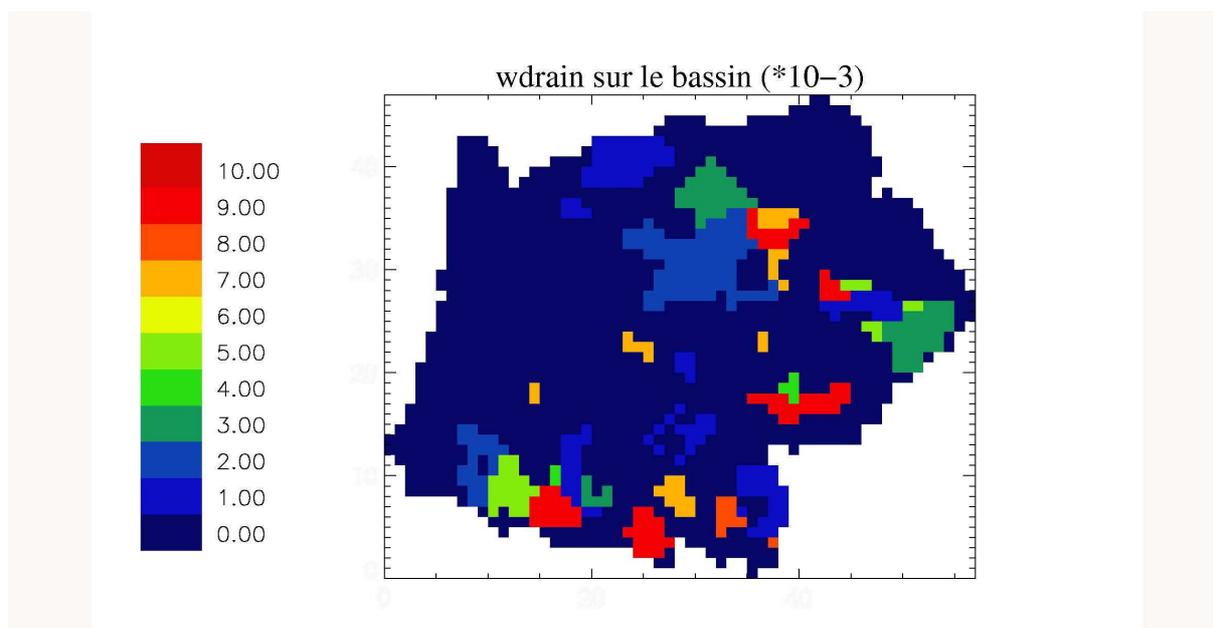


Figure 13: Carte des valeurs du coefficient de drainage sous-maille (wdrain) sur le bassin Adour Garonne.

Une fois le coefficient de drainage sous-maille calé, le résultat des simulations a été comparé aux simulations sans calage et l'on a noté une amélioration substantielle des résultats en période d'étiage, par rapport à la simulation sans calage. Les Figure 14 à Figure 21 présentent le résultat de ces simulations au pas de temps mensuel sans calage (simulation de référence pour laquelle le coefficient de drainage sous-maille a la même valeur sur tout le domaine), puis avec calage (valeur du coefficient calculée pour chaque bassin) et permettent de les confronter aux observations. Sur ces figures, l'échelle des débits a été tronquée de manière à mieux montrer l'impact du calage sur les débits de la période d'étiage. Les mêmes figures, à l'échelle normale ont été ajoutées en ANNEXE C.

Deux critères statistiques ont été calculés pour juger de la qualité des résultats: le rapport des débits simulés aux débits observés (valeur optimale : 1) et le critère de Nash ou Efficience (témoin de la capacité de la simulation à reproduire les variations observées, valeur optimale: 1). Ces critères ont été calculés pour les deux simulations et reportés sous les graphes correspondants à chacune des stations dans les Figure 14 à Figure 21. L'analyse visuelle et la comparaison des critères statistiques calculés montre une relativement bonne adéquation entre les simulations et les observations dans la plupart des cas. La dynamique des écoulements est généralement bien reproduite et les débits d'étiage moyens correctement approchés, même si le modèle simule parfois des récessions trop rapides en comparaison des observations. Les résultats de la simulation en période d'étiage à la station de St Vincent présentent néanmoins une forte surestimation par rapport aux observations. Ceci est relié à la méthode de calage de la valeur du coefficient de drainage sous-maille, qui pour cette station, utilise un débit de référence intégrant les apports souterrains de la nappe. Cela a pour conséquence une surestimation de la valeur de ce coefficient sur les mailles du bassin ne contenant pas de nappe, qui mène logiquement à une surestimation des débits provenant de la nappe. Ce problème est en passe d'être réglé en corrigeant les débits observés de l'influence de la nappe simulée par le modèle.

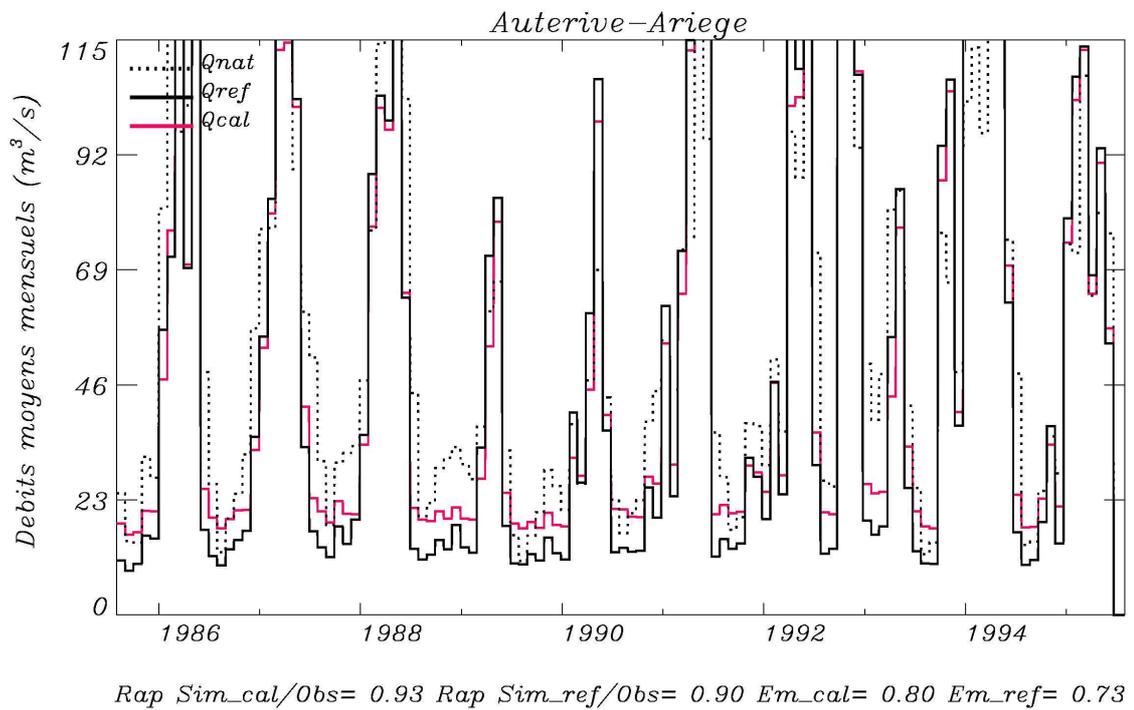
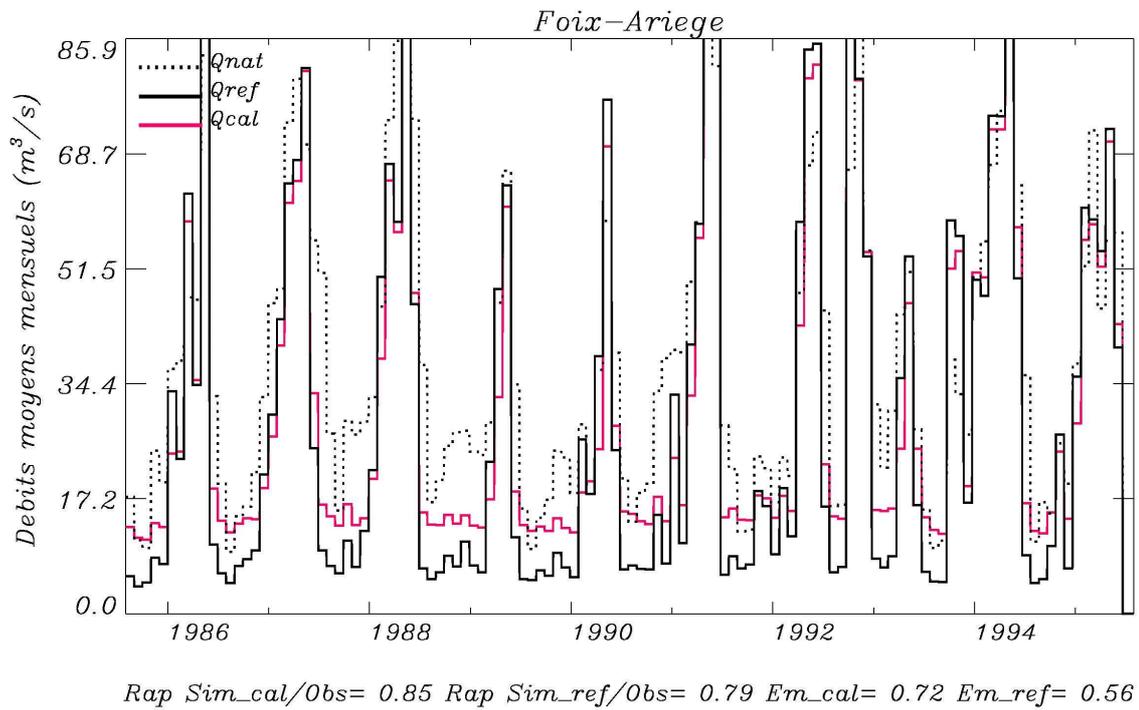


Figure 14: Comparaison des débits simulés par ISBA-MODCOU avant calage (ref – trait continu noir), après calage (cal – trait continu rouge) et des débits naturalisés (nat - trait pointillé noir), aux stations de Foix et Auterive sur l'Ariège (zoom sur les débits d'étiage). Deux critères statistiques ont été calculés : le rapport des débits simulés sur observés (Rap) et le critère de Nash ou Efficience (Em).

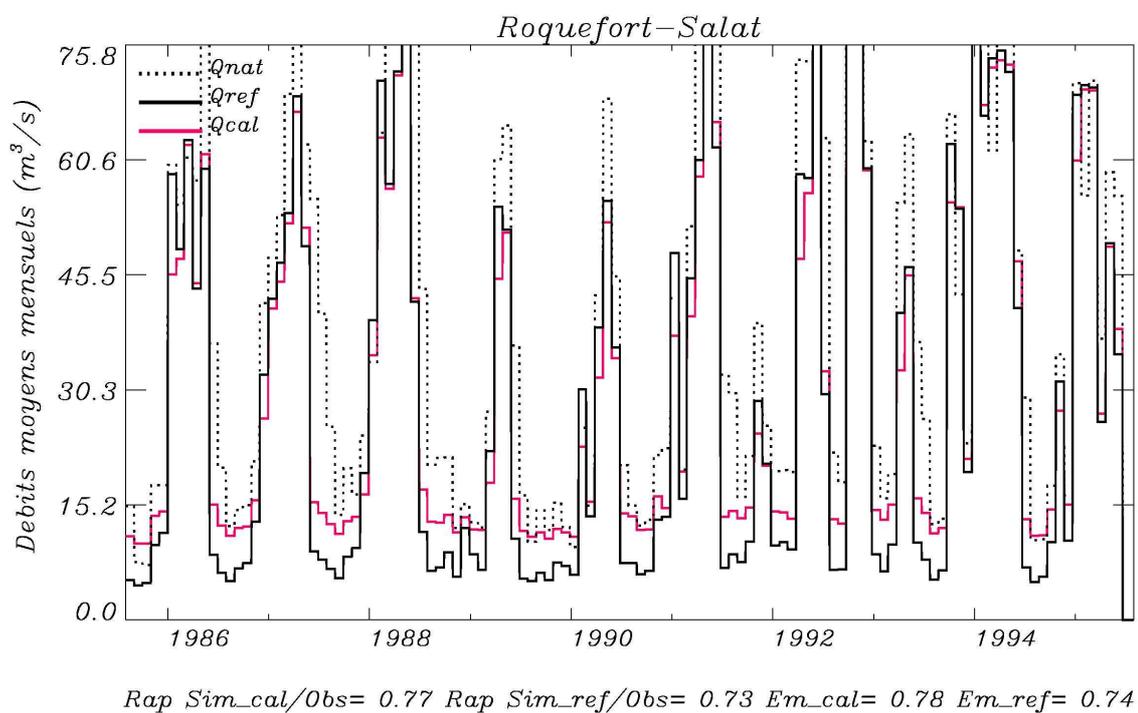
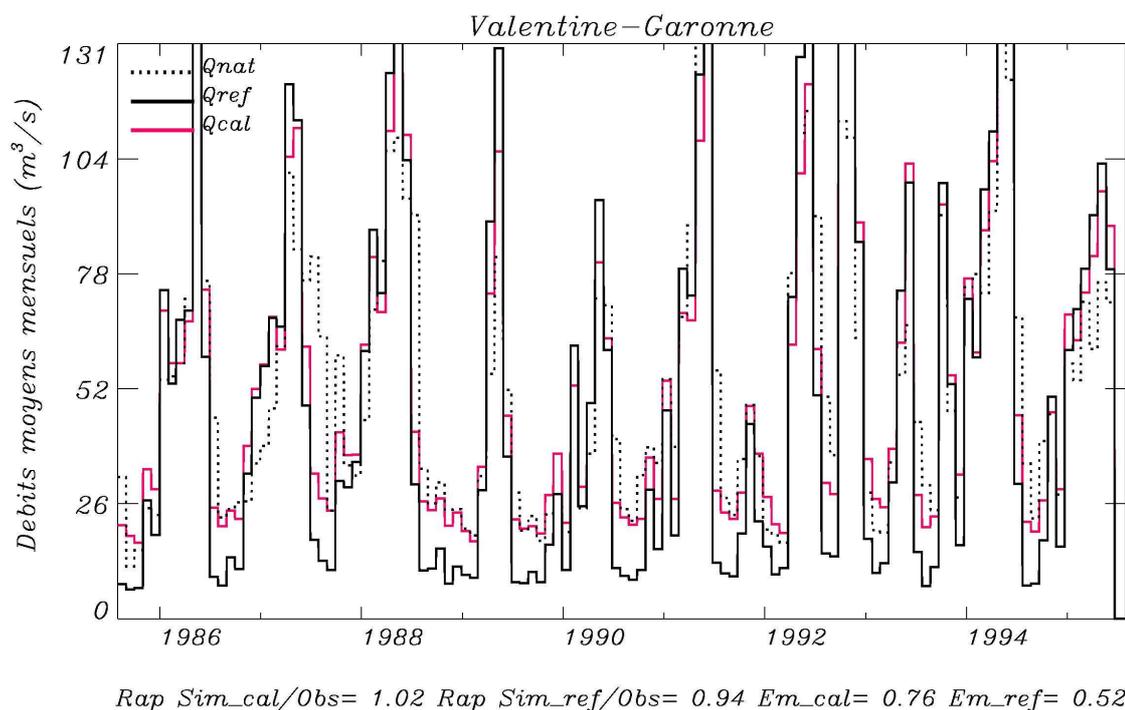


Figure 15: Comparaison des débits simulés par ISBA-MODCOU avant calage (ref – trait continu noir), après calage (cal – trait continu rouge) et des débits naturalisés (nat - trait pointillé noir), aux stations de St Gaudens et Roquefort sur la Garonne (zoom sur les débits d'été). Deux critères statistiques ont été calculés : le rapport des débits simulés sur observés (Rap) et le critère de Nash ou Efficience (Em).

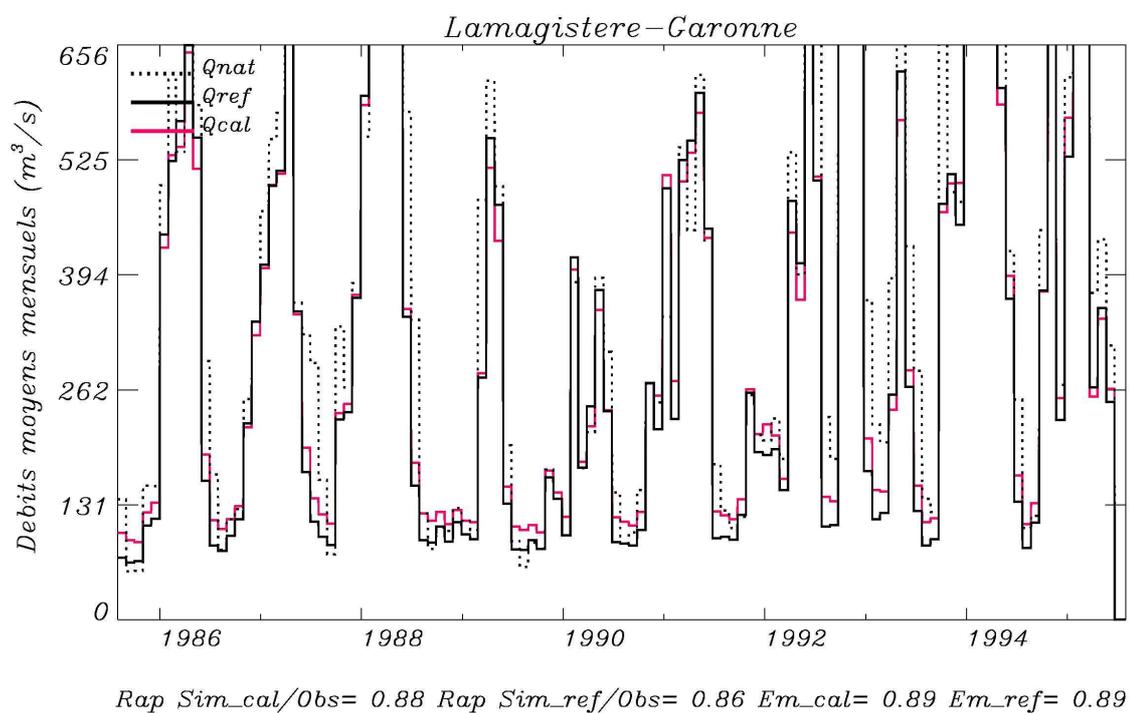
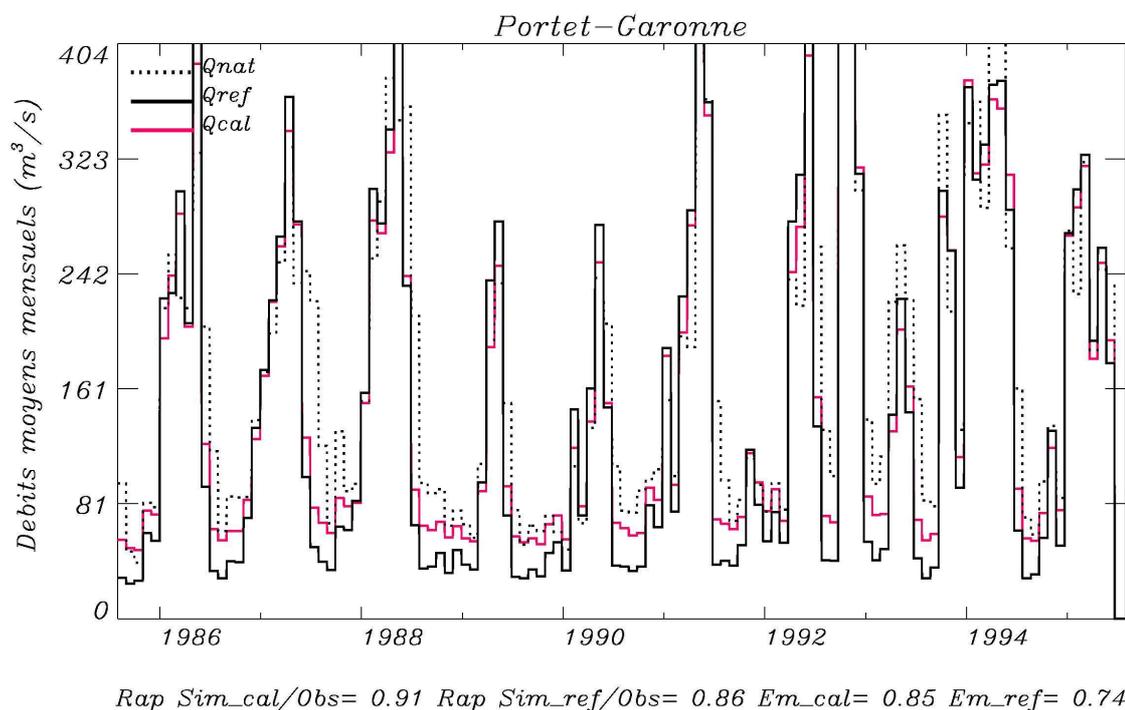


Figure 16: Comparaison des débits simulés par ISBA-MODCOU avant calage (ref – trait continu noir), après calage (cal – trait continu rouge) et des débits naturalisés (nat - trait pointillé noir), aux stations de Portet et Lamagistère sur la Garonne (zoom sur les débits d'étiage). Deux critères statistiques ont été calculés : le rapport des débits simulés sur observés (Rap) et le critère de Nash ou Efficience (Em).

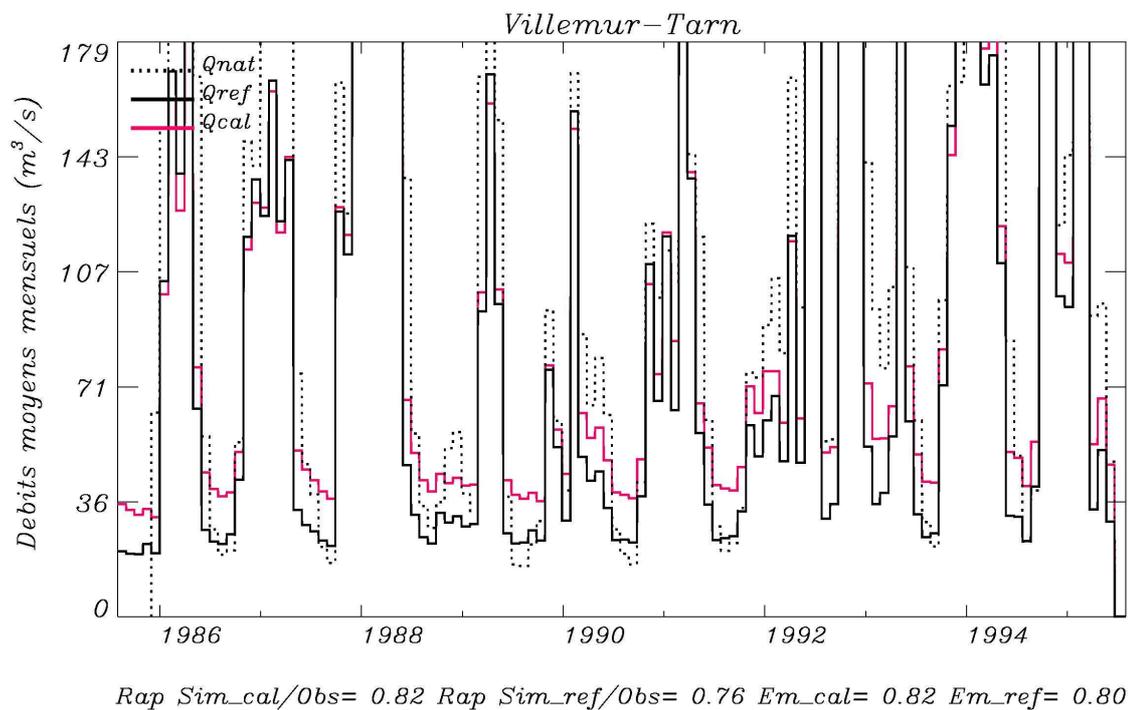
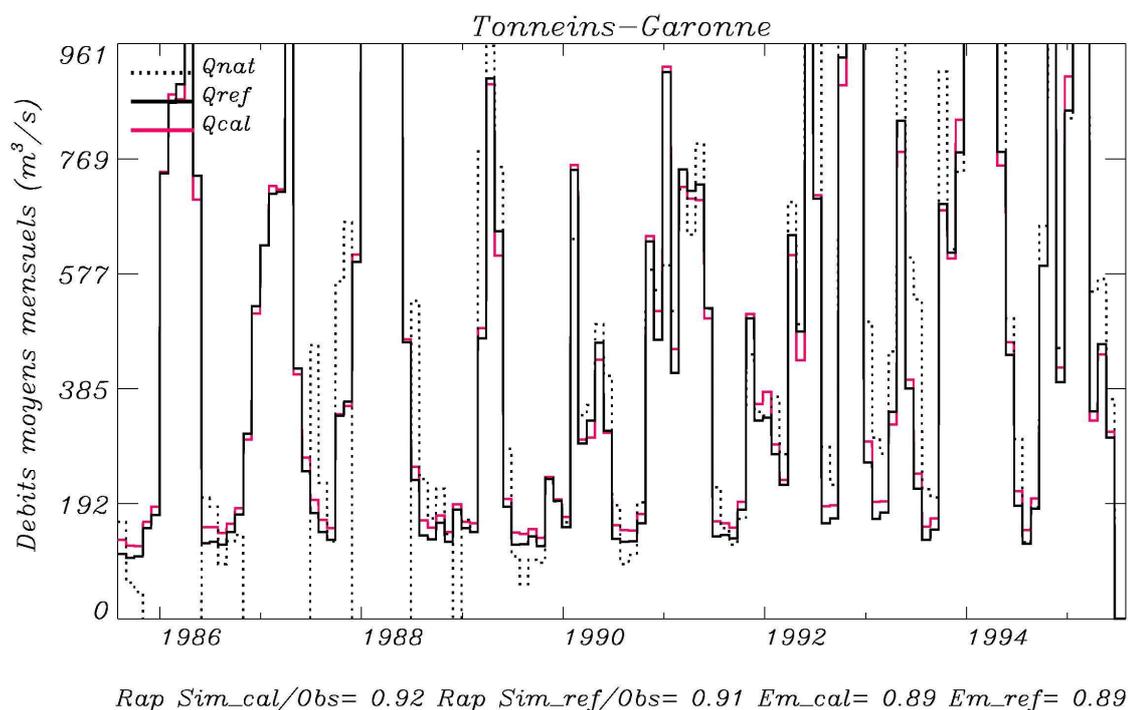


Figure 17: Comparaison des débits simulés par ISBA-MODCOU avant calage (ref – trait continu noir), après calage (cal – trait continu rouge) et des débits naturalisés (nat - trait pointillé noir), aux stations de Tonneins sur la Garonne et Villemur sur le Tarn (zoom sur les débits d'été). Deux critères statistiques ont été calculés : le rapport des débits simulés sur observés (Rap) et le critère de Nash ou Efficience (Em).

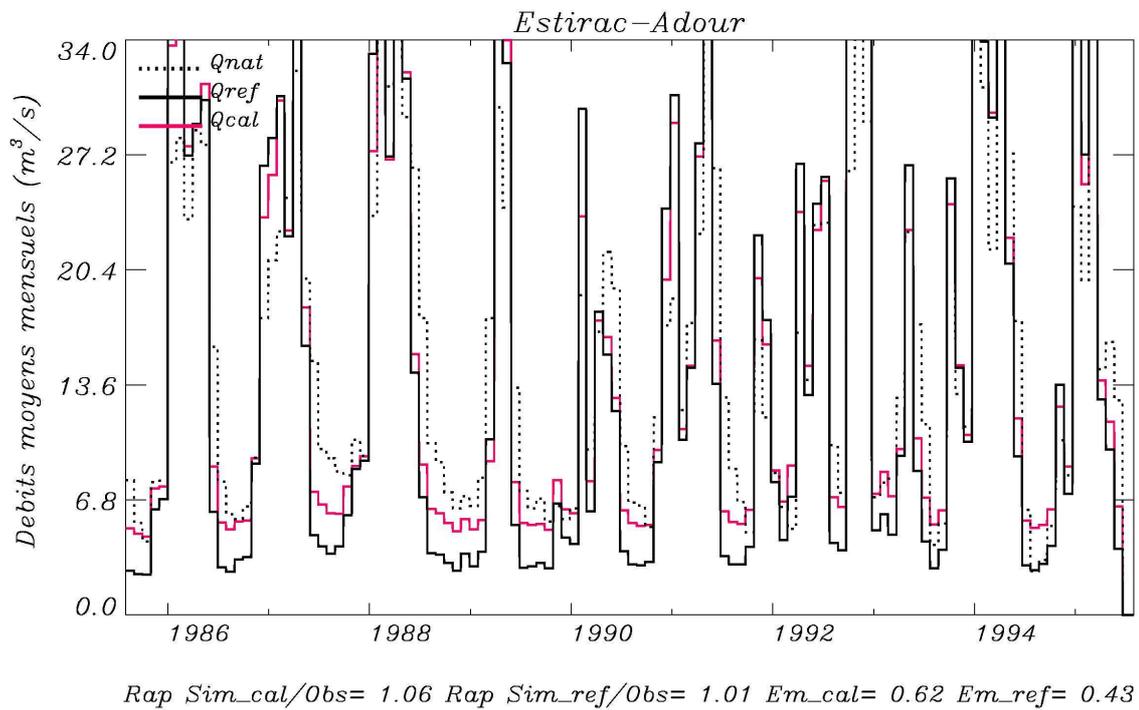
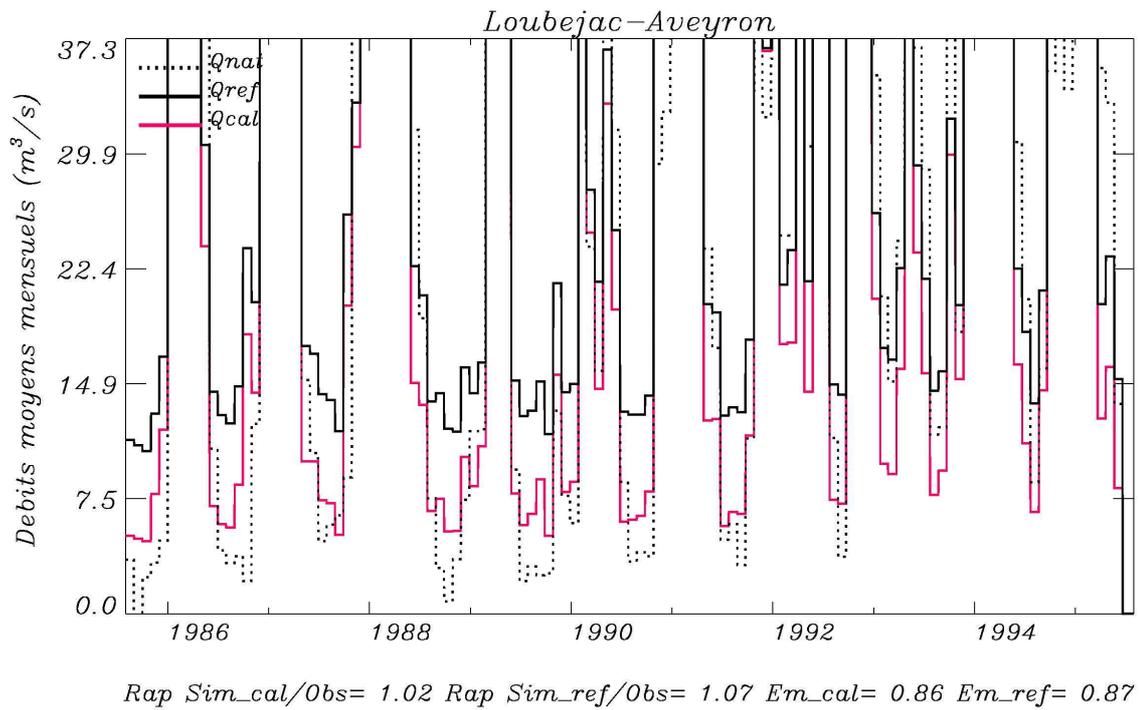


Figure 18: Comparaison des débits simulés par ISBA-MODCOU avant calage (ref – trait continu noir), après calage (cal – trait continu rouge) et des débits naturalisés (nat - trait pointillé noir), aux stations de Piquecos sur l'Aveyron et Estirac sur l'Adour (zoom sur les débits d'étiage). Deux critères statistiques ont été calculés : le rapport des débits simulés sur observés (Rap) et le critère de Nash ou Efficience (Em).

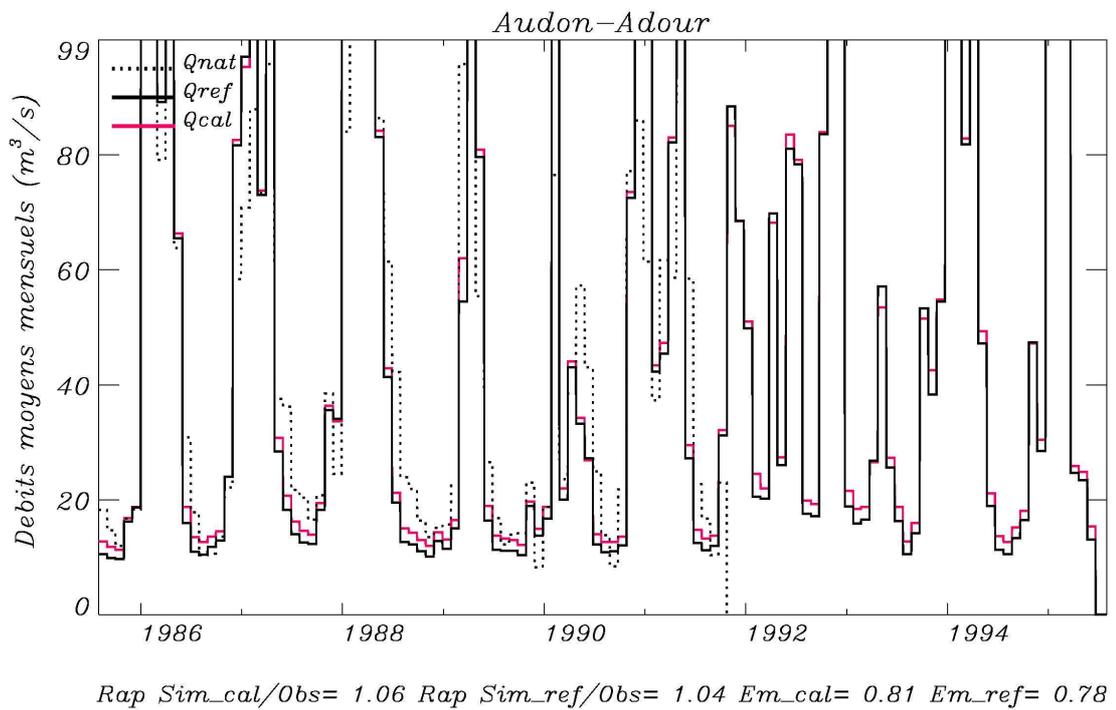
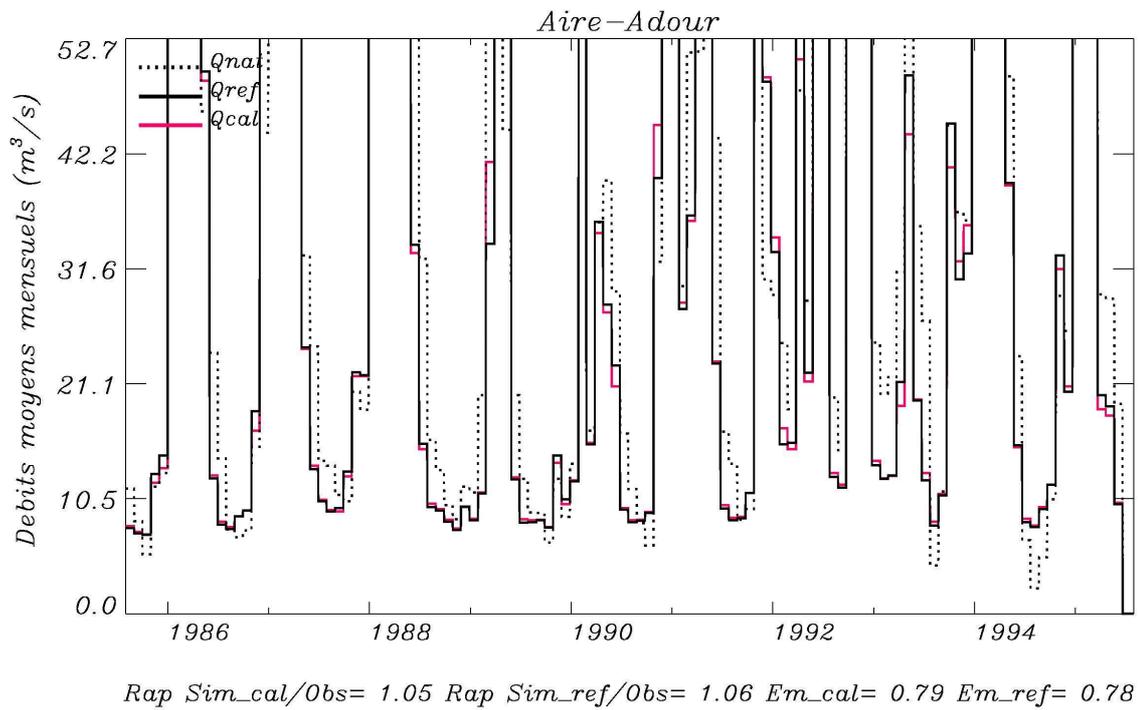
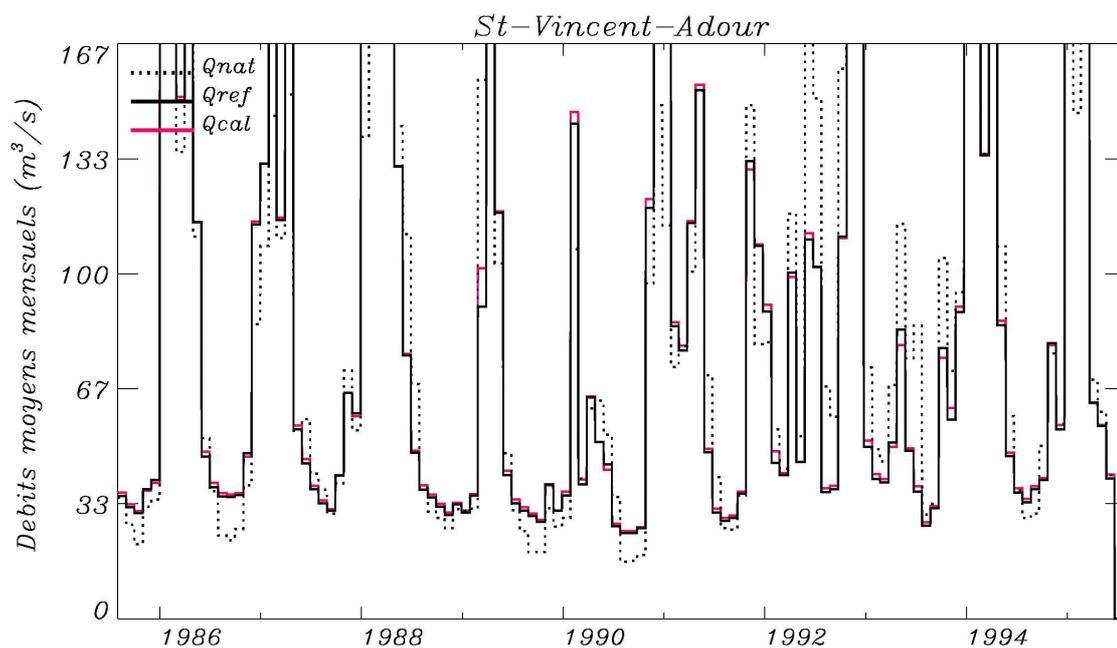
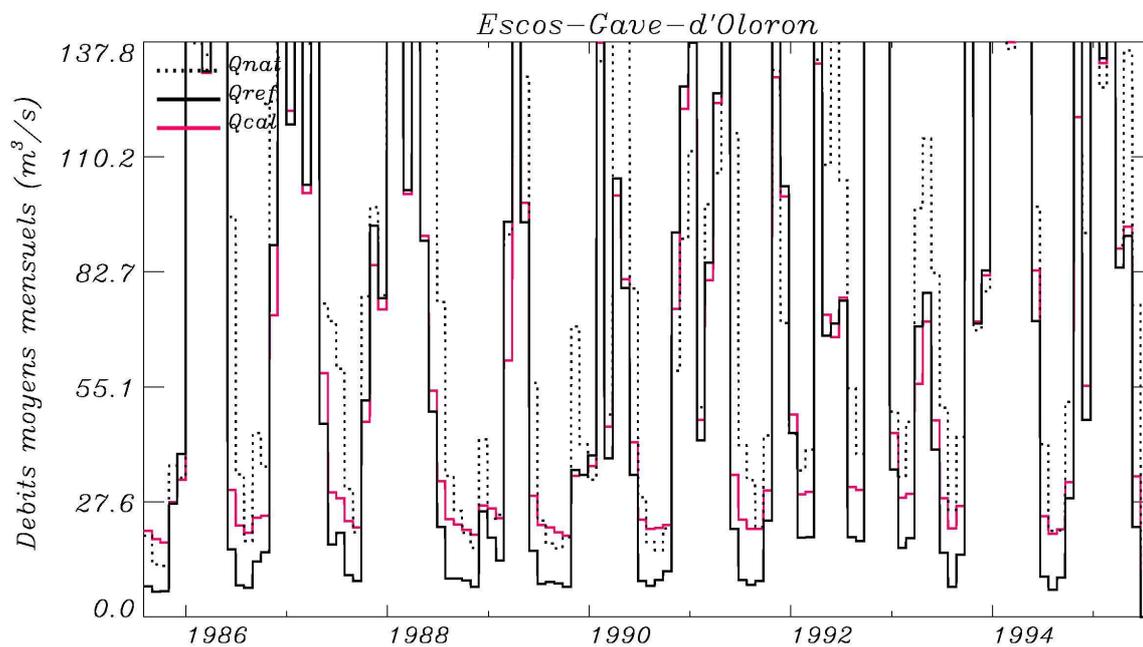


Figure 19: Comparaison des débits simulés par ISBA-MODCOU avant calage (ref – trait continu noir), après calage (cal – trait continu rouge) et des débits naturalisés (nat - trait pointillé noir), aux stations d'Aire et d'Audon sur l'Adour (zoom sur les débits d'étiage). Deux critères statistiques ont été calculés : le rapport des débits simulés sur observés (Rap) et le critère de Nash ou Efficience (Em).

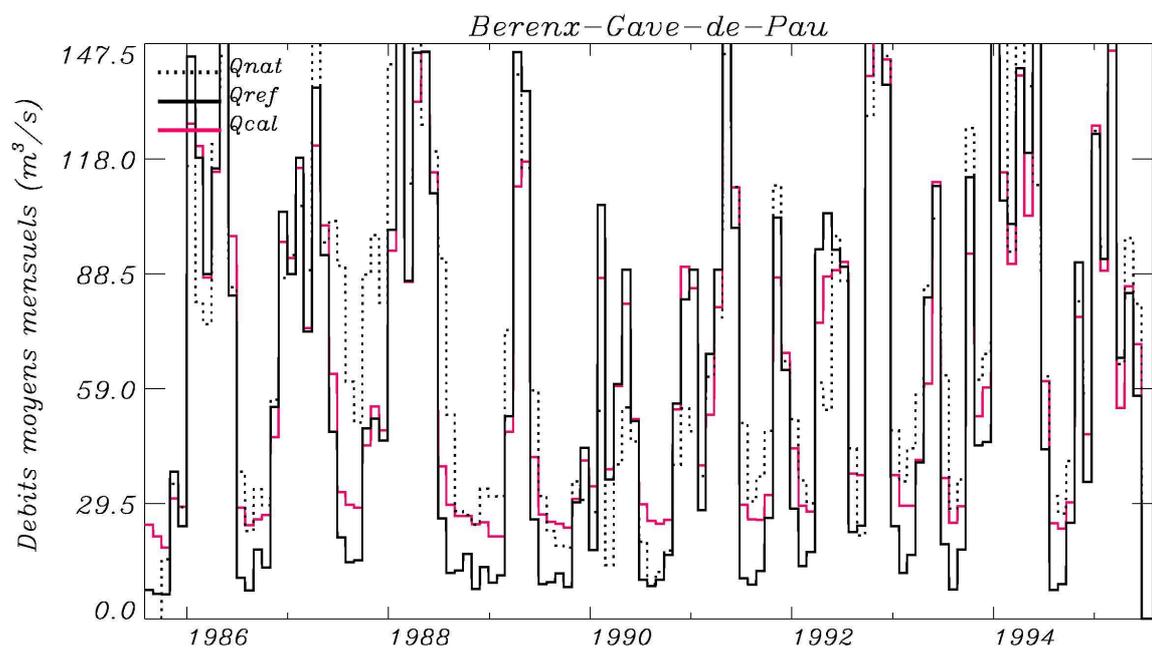


$Rap\ Sim_cal/Obs= 1.00$ $Rap\ Sim_ref/Obs= 1.00$ $Em_cal= 0.91$ $Em_ref= 0.91$

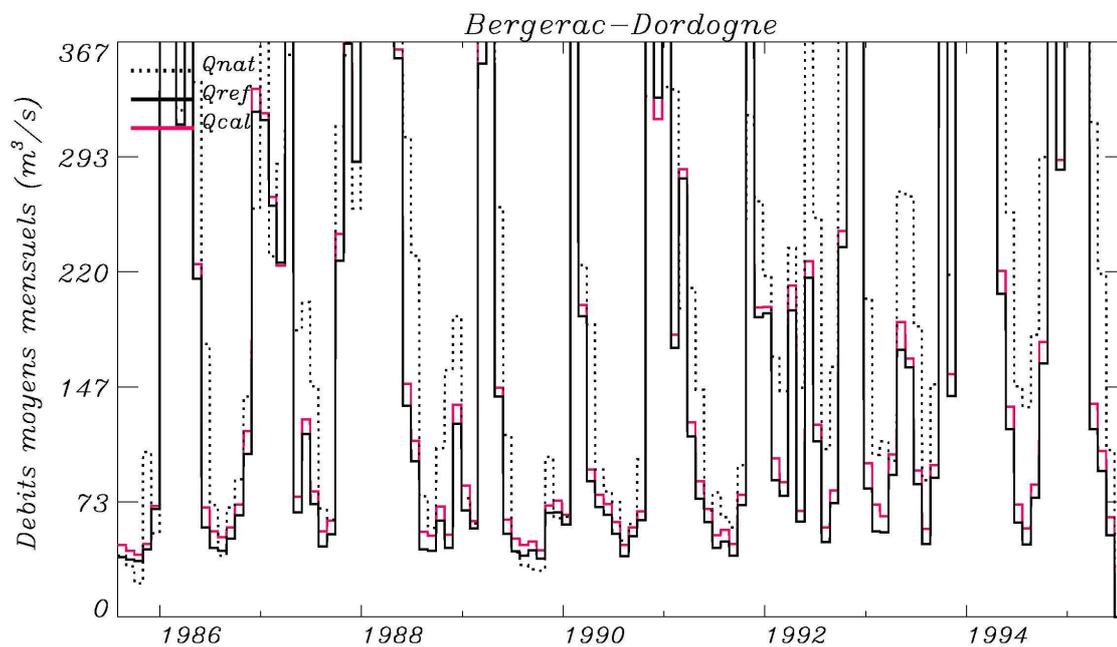


$Rap\ Sim_cal/Obs= 0.81$ $Rap\ Sim_ref/Obs= 0.78$ $Em_cal= 0.81$ $Em_ref= 0.78$

Figure 20: Comparaison des débits simulés par ISBA-MODCOU avant calage (ref – trait continu noir), après calage (cal – trait continu rouge) et des débits naturalisés (nat - trait pointillé noir), aux stations St. Vincent sur l'Adour et Escos sur le Gave d'Oloron (zoom sur les débits d'été). Deux critères statistiques ont été calculés : le rapport des débits simulés sur observés (Rap) et le critère de Nash ou Efficience (Em).



Rap Sim_cal/Obs= 0.94 Rap Sim_ref/Obs= 0.88 Em_cal= 0.79 Em_ref= 0.69



Rap Sim_cal/Obs= 0.88 Rap Sim_ref/Obs= 0.85 Em_cal= 0.87 Em_ref= 0.85

Figure 21: Comparaison des débits simulés par ISBA-MODCOU avant calage (ref – trait continu noir), après calage (cal – trait continu rouge) et des débits naturalisés (nat - trait pointillé noir), aux stations Berenx sur le Gave de Pau et Bergerac sur la Dordogne (zoom sur les débits d'étiage). Deux critères statistiques ont été calculés : le rapport des débits simulés sur observés (Rap) et le critère de Nash (Em).

Une analyse plus spécifiquement axée sur la période d'étiage a permis de détailler la comparaison pour les mois de juillet à octobre. Le Tableau 1 présente les valeurs moyennes sur la période 1985-1995 des rapports des débits simulés sur observés pour chaque mois, pour l'ensemble de la période d'étiage et pour les débits moyens mensuels minimum.

Stations-Rivières	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Etiage (Juillet-Octobre)	Q mens. min.
Foix-Ariège	0,6	1,0	0,9	0,9	0,8	1,1
Auterive-Ariège	0,7	1,1	1,0	1,0	0,9	1,2
Valentine-Garonne	0,6	0,8	1,0	0,9	0,8	1,0
Roquefort-Salat	0,5	0,8	0,9	0,9	0,7	0,9
Portet-Garonne	0,5	0,7	0,8	0,8	0,7	0,9
Lamagistere-Garonne	0,7	1,0	1,2	1,0	0,9	1,2
Tonneins-Garonne	0,7	1,2	1,2	1,1	1,0	1,8
Villemur-Tarn	1,3	1,7	1,7	1,0	1,3	1,8
Loubejac-Aveyron	1,1	1,2	1,8	2,8	1,5	2,0
Estirac-Adour	0,7	0,9	0,9	1,1	0,9	1,1
Aire-Adour	0,7	1,1	1,0	1,1	0,9	1,4
Audon-Adour	0,7	0,8	1,1	1,1	0,9	1,1
St-Vincent-Adour	0,8	1,1	1,2	1,1	1,0	1,2
Escos-Gave-d'Oloron	0,6	0,9	1,0	0,9	0,8	1,1
Berenx-Gave-de-Pau	0,8	1,0	1,1	1,0	0,9	1,1
Bergerac-Dordogne	0,7	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0
Rap < 0,8 (%)	75	6	0	0	13	0
Rap > 1,2 (%)	13	13	25	6	13	38
0,8 ≤ Rap ≤ 1,2 (%)	13	81	75	94	75	62

Tableau 1: Rapports moyens simulation/observation pour la période 1985-1995 des débits moyens mensuels pour chaque mois et pour la totalité de l'étiage (juillet-octobre), et des débits moyens mensuels minimum pour les 16 stations de référence.

On observe tout d'abord que le mois de juillet est celui pour lequel le modèle reproduit le moins bien les observations. Seulement 13% des stations présentent des écarts entre débits simulés et observés inférieurs à 20% et pour la plus grande partie d'entre elles (75%), les débits ont été sous-estimés. Cette sous-estimation est liée au fait que le modèle simule des fins de crues (récession) trop rapides, comme il peut-être observé sur les figures précédentes. En revanche, le modèle donne des résultats beaucoup plus satisfaisants pour les 3 mois restants, avec plus de 75% des stations sous la barre des 20% d'erreur. Ceci induit logiquement des résultats similaires sur l'ensemble de la période d'étiage. L'analyse des rapports de débits mensuels minimum montre cependant une tendance à la surestimation (38% des stations ont un rapport > 1,2) qui est fortement reliée à la méthode de calage utilisée. En effet, le débit de référence adopté pour l'étiage est un débit moyen sur la période, ce qui implique que les faibles débits soient moins influents dans le calage du coefficient de drainage sous-maille. Par conséquent, les débits moyens d'étiage seront forcément mieux simulés que les débits extrêmes. Les stations de Villemur et de Loubejac présentent une surestimation que nous n'avons pu expliquer. Bien que n'ayant a priori pas de relation logique avec la surestimation observée, il faut noter que ces stations contiennent une forte proportion de zones karstiques que l'on ne peut pas explicitement prendre en compte dans le modèle.

III. Calcul des anomalies climatiques

Si l'on considère comme acceptables les résultats de calage présentés plus haut, (même si des études sont en cours pour tenter de les améliorer), nous pouvons d'ores et déjà utiliser le modèle calé pour tester l'impact de certains des scénarios climatiques disponibles sur la ressource en eau du bassin.

Dans cette partie, nous commencerons par résumer les méthodes d'interpolation spatiale des sorties des modèles de circulation générale (MCG) et de calcul des anomalies de précipitation et de température. Nous présenterons ensuite quelques résultats obtenus lors des premières simulations en conditions de climat modifié à l'horizon 2050.

III.1 Méthode d'interpolation spatiale et calcul des anomalies

La méthode d'interpolation spatiale appliquée au bassin Adour Garonne par Lehenaff, 2002, s'inspire du travail réalisé sur le bassin versant du Rhône par Etchevers, 2000 et Noilhan et al., 2001.

La Figure 22 présente les maillages sur lesquels sont disponibles les sorties des différents MCG sur la France, dont les principales caractéristiques et résolutions sont détaillées dans le Tableau 2. Pour chaque modèle, les variables météorologiques simulées sont disponibles en chacun des points de leur grille. Seul le modèle CNRM_continu fournit des données pour toute la période comprise entre 1960 à 2199. Les 6 autres ne fournissent de données que pour le climat présent (période 1985-1995) et le climat sous hypothèse de doublement de CO₂ (période 2050-2060) (Caballero et Noilhan, 2002b).

Modèles à faible résolution		
Modèles de Circulation Générale (MCG)		Résolutions spatiales
HC	(Hadley Centre – UK)	2,5° x 3,5°
LMD_LR	(Lab. de Météorologie Dynamique – FR)	1,6° x 3,75°
UR	(University of Reading – UK)	2,8° x 2,8°
CNRM_LR	(Centre Nat. de Recherche en Météo. – FR)	3,8° x 3,7°
Modèles à forte résolution		
Modèles de Circulation Générale (MCG)		Résolutions spatiales
LMD_HR	(Laboratoire de Météorologie Dynamique – FR)	100 km
CNRM_HR	(Centre National de Recherche Météorologiques – FR)	50 km
CNRM_continu	(Centre National de Recherche Météorologiques – FR)	~ 50 km

Tableau 2: Les différents modèles de circulation générale utilisés et leur résolutions spatiales.

Comme nous l'avons vu au début de ce rapport, l'utilisation du modèle ISBA-MODCOU nécessite de connaître l'intensité du forçage atmosphérique sur le maillage de résolution spatiale 8 km x 8 km qui décrit le bassin Adour Garonne. Il a donc été nécessaire d'interpoler en chacun des points de cette grille, les valeurs de précipitation et de température simulées par chaque modèle propre. Cette interpolation a été réalisée suivant la méthode itérative de Cressmann. Cette méthode, relativement complexe, consiste à calculer la valeur d'une variable en un point A du maillage 8x8, à partir des valeurs de cette même variable au niveau des trois points B, C et D du maillage du MCG considéré, se trouvant le plus près du point A. Les valeurs des variables au niveau des points B, C et D sont ensuite pondérées en fonction de leur distance au point A. Finalement, la valeur interpolée de la variable au point A est calculée par itérations successives, en veillant à ce qu'elle reste entre les limites minimale et maximale de la variable sur le maillage du MCG.

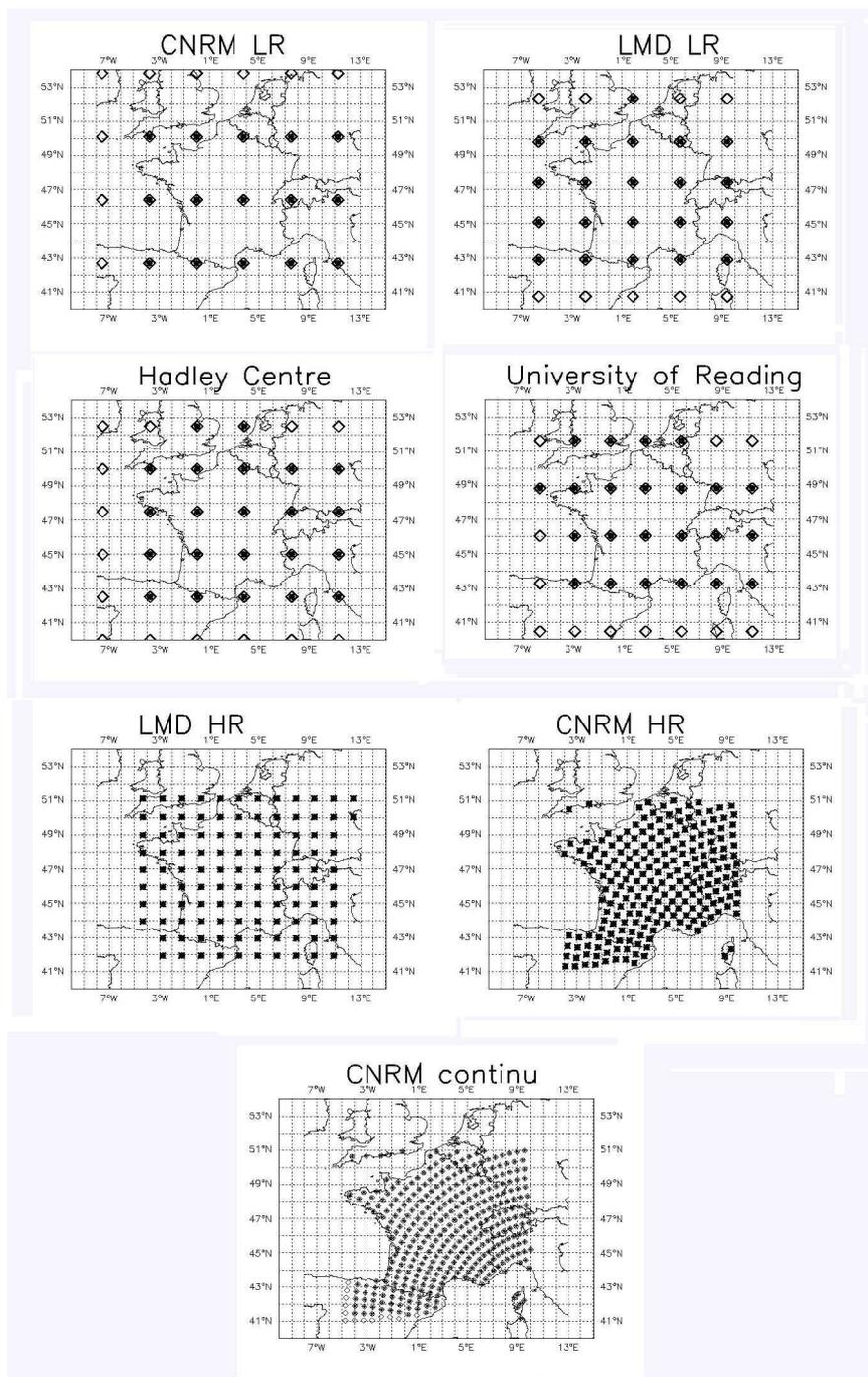


Figure 22: Maillages des différents MCG disponibles, à partir desquels les valeurs de la précipitation et de la température ont été interpolées à la résolution d'ISBA (8 km x 8 km) sur le bassin Adour Garonne. Les 4 premiers en partant du haut sont les MCG à résolution grossière, les trois derniers ont une résolution spatiale plus élevée (voir Tableau 2). Les points blancs n'ont pas été utilisés dans l'interpolation (extrait de Lehenaff, 2002).

Les champs de précipitations et de température simulées pour le climat présent (période 1985 – 1995) et pour le climat futur (période 2050 – 2060) ont ainsi pu être calculés pour le bassin Adour Garonne à la résolution spatiale 8 km x 8 km d'ISBA.

Ces données ont ensuite été utilisées pour calculer les anomalies de température et de précipitation entre le climat présent (le taux actuel de CO₂ dans l'atmosphère étant pris comme référence: 1xCO₂) et futur (scénario de multiplication par deux de ce taux : 2x CO₂), à l'aide des équations ((1) et (2):

$$(1) \quad \delta Ta = Ta_{2 \times CO_2} - Ta_{1 \times CO_2}$$

$$(2) \quad \delta P = (P_{2 \times CO_2} - P_{1 \times CO_2}) / P_{1 \times CO_2}$$

Ces anomalies peuvent ainsi être utilisées pour modifier, comme le montrent les équations (3) et (4), les valeurs de température et de précipitation observées au cours de la période 1985–1995 de manière à construire un forçage atmosphérique pour le climat futur.

$$(3) \quad T_{cm} = T_{ca} + \delta Ta$$

$$(4) \quad P_{cm} = P_{ca} \times (1 + \delta P)$$

avec T_{cm} et T_{ca} les températures en climat modifié et actuel, P_{cm} et P_{ca}, les précipitations en climat modifié et actuel.

III.2 Validation des simulations des MCG pour le climat actuel

La Figure 23 permet de comparer les valeurs moyennes mensuelles des températures et des précipitations simulées par les différents MCG aux observations sur le bassin. On observe un bon accord général, bien que certains modèles comme le LMD et le CNRM aient tendance à surestimer les températures, respectivement en été et toute l'année. Les précipitations sont dans l'ensemble mieux représentées l'hiver que l'été, où elles sont généralement sous-estimées. En ce qui concerne le scénario continu, on observe qu'il présente des résultats tout à fait satisfaisants à la fois sur les températures et sur les précipitations. Il apparaît que les modèles à haute résolution fournissent une représentation généralement meilleure du climat actuellement observé que ceux à basse résolution (à l'exclusion toutefois du modèle LMD-HR).

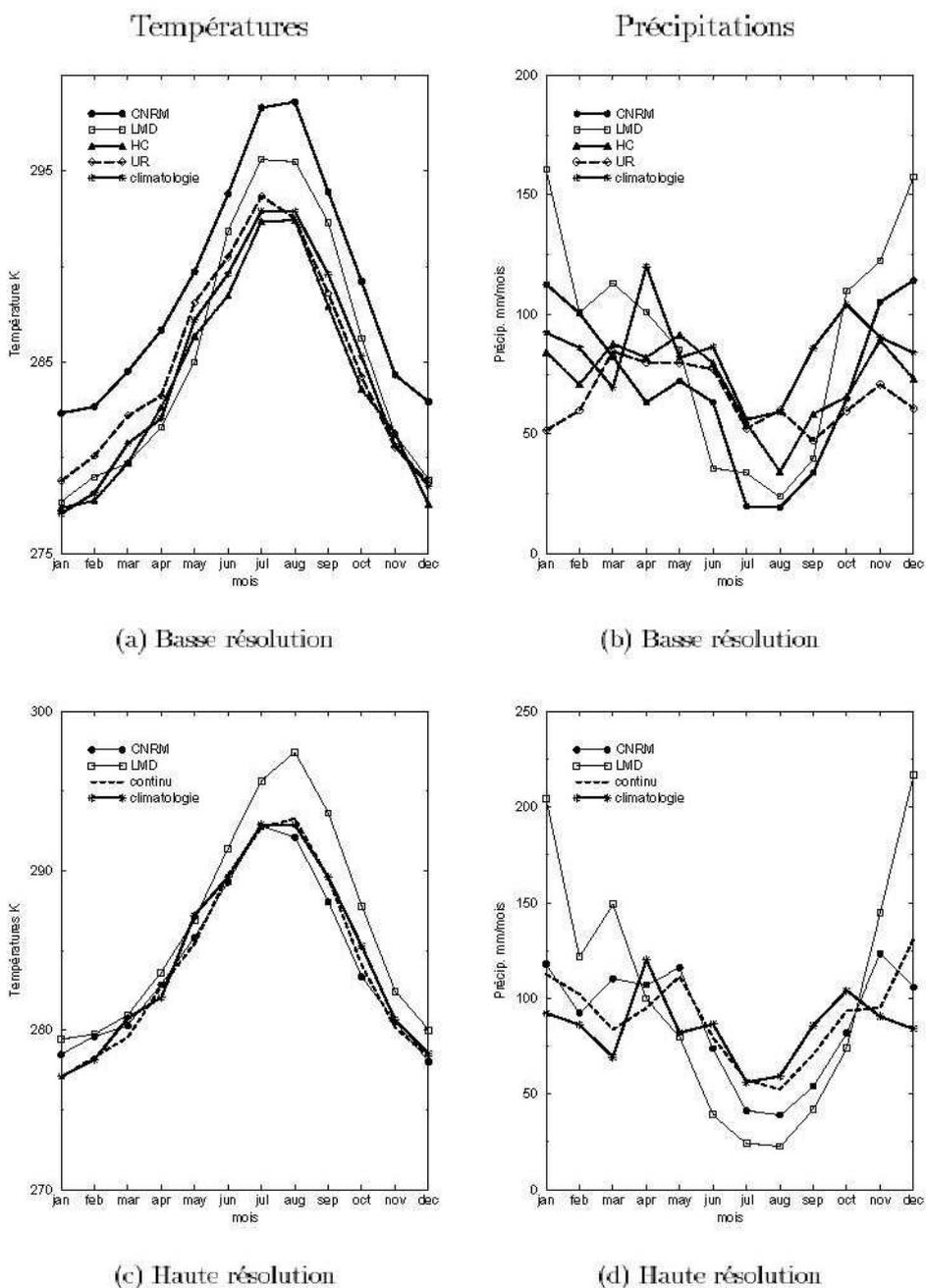
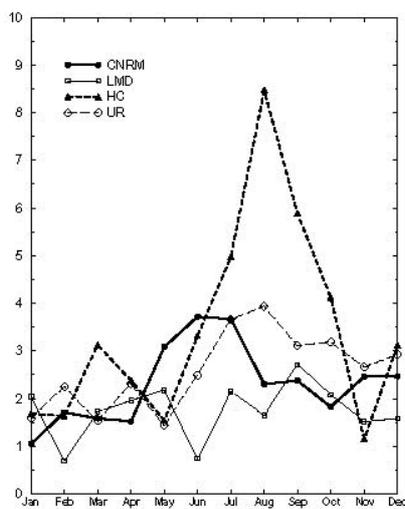


Figure 23 : Comparaison des températures et précipitations moyennes mensuelles observées (climatologie) et simulées par les divers MCG, pour le climat actuel sur le bassin (extrait de Lehenaff, 2002).

III.3 Anomalies obtenues

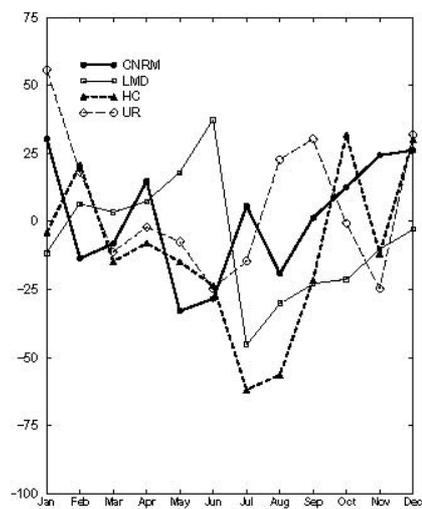
La Figure 24 permet de visualiser les anomalies de température et de précipitation moyennes sur le bassin, obtenues pour les six modèles haute et basse résolution et pour le scénario continu sur les périodes 2055-65 et 2065-75. On observe qu'elles sont du même ordre de grandeur que celles obtenues dans le cadre de l'étude réalisée sur le Rhône (Noilhan et al., 2001 et Caballero et Noilhan, 2002b). Les anomalies de température sont généralement plus importantes en été (3 à 4 degrés) que l'hiver (1 à 2 degrés). Le modèle de HC se distingue par une anomalie de l'ordre de 9 degrés au mois d'août. Les anomalies de précipitation sont généralement positives en hiver (augmentation des précipitations) et négatives (diminution) en été.

Anomalies de température °C

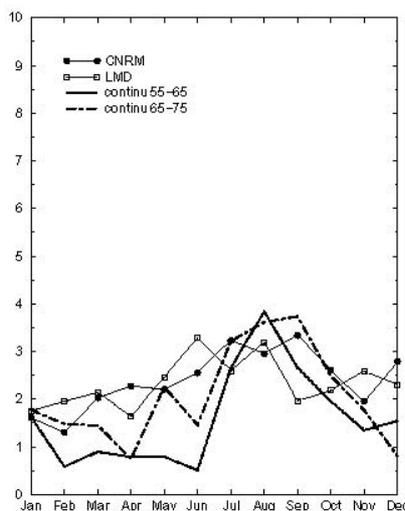


(a) Basse résolution

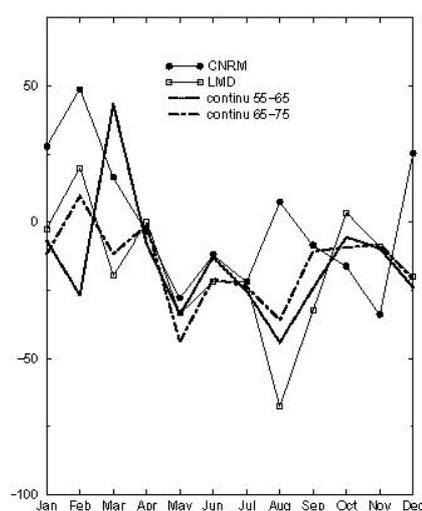
Anomalies de précipitation %



(b) Basse résolution



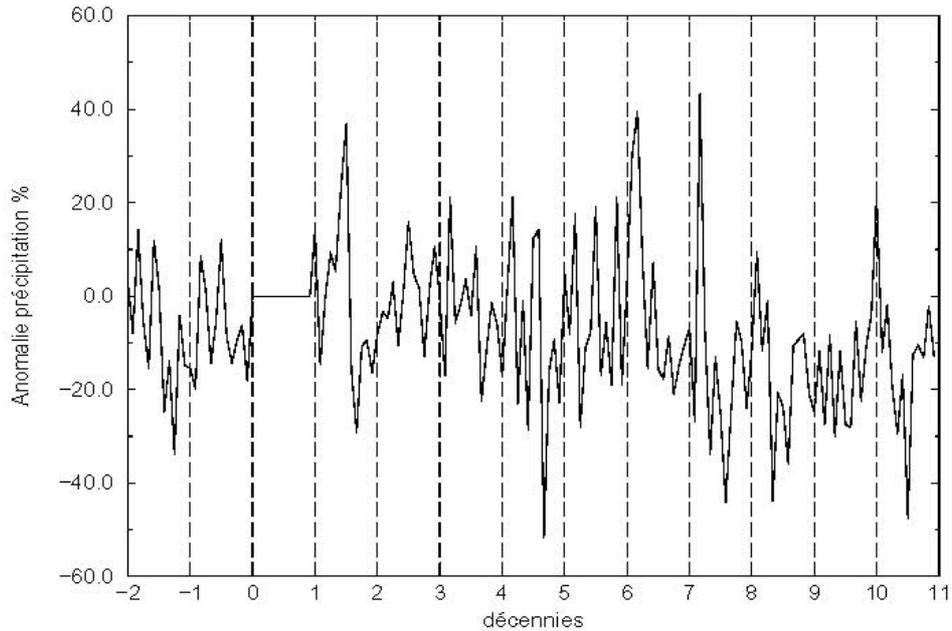
(c) Haute résolution



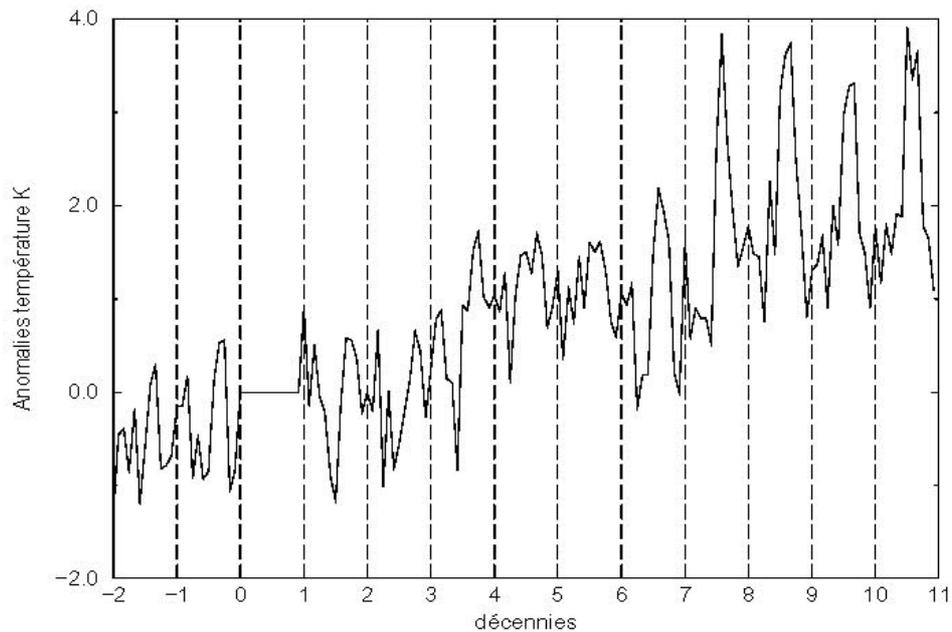
(d) Haute résolution

Figure 24: Anomalies mensuelles de précipitation et de température calculées à partir des sorties des différents MCG (extrait de Lehenaff, 2002).

La Figure 25 présente les anomalies calculées pour chaque décennie à partir des données fournies par le modèle CNRM_continu. On peut nettement observer l'augmentation continue des anomalies de température, avec des valeurs particulièrement marquées en été pour les dernières décennies. Il est par contre moins évident de discerner une tendance claire en ce qui concerne les précipitations, bien que les dernières décennies présentent des anomalies négatives pouvant atteindre -20% et une diminution de l'amplitude de fluctuation interannuelle.



(a) Précipitation



(b) Température

Figure 25: Anomalies de température et de précipitation par décennie, moyennées sur le bassin, la décennie "0" couvrant la période 1985-1995 (extrait de Lehenaff, 2002).

La Figure 26 présente une spatialisation sur le bassin Adour Garonne, des anomalies calculées à partir des données du CNRM_HR pour la période 2050-60. Cette représentation permet de visualiser les différences régionales qu'un scénario à haute résolution peut impliquer. On observe par exemple que ce modèle prévoit des gradients de température pouvant atteindre 1,5°C en été du nord au sud. Il en est de même pour les précipitations avec un gradient très fort entre le sud du domaine (Pyrénées) et le bassin de la Garonne. Cependant la comparaison des anomalies de précipitation prévues par le modèle CNRM_HR pour la période d'hiver (généralement positives) à celles prévues par le scénario continu sur la figure précédente (généralement négatives pour la période 2055-65 (entre repères 7 et 8)), montre qu'il peut y avoir beaucoup de différences d'un modèle à l'autre. Cette constatation renforce l'intérêt d'utiliser plusieurs scénarii pour notre étude d'impact.

De la même manière la Figure 26 présente les valeurs des anomalies de température et de précipitation obtenues pour la période 1985 – 1995, avec le scénario du CNRM_HR spatialisées sur le bassin.

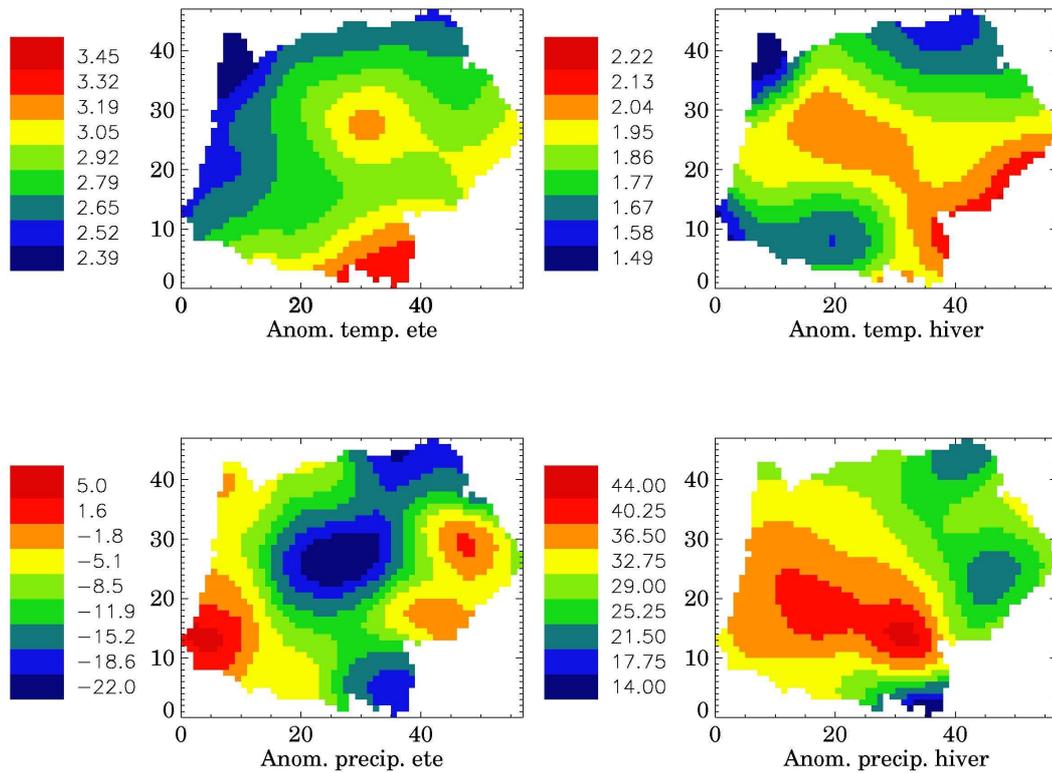


Figure 26: Anomalies de température et de précipitation obtenues à partir des données du scénario CNRM – HR pour la décennie 2050-60, en été et en hiver, sur le bassin Adour Garonne.

Nous disposons donc à présent des anomalies mensuelles de précipitation et de température sur la période 2050-2060 pour chacun des sept scénarii et sur la période 2025-2035 pour le scénario continu uniquement. Nous allons maintenant détailler les résultats du modèle calé lorsqu'il est soumis aux forçages modifiés avec les anomalies obtenues pour chaque scénario.

IV. Résultat des simulations pour la période 2050-2060

Après avoir détaillé les méthodes d'interpolation et de calcul des anomalies sur le bassin Adour Garonne, voyons maintenant les résultats fournis par les simulations d'ISBA-MODCOU en contexte de forçage climatique futur.

Le Tableau 3, Tableau 4 et Tableau 5 présentent, au niveau de chaque station de référence et pour les 4 mois d'étiage (de Juillet à Octobre), les rapports moyens pour les 7 scénarii, des débits moyens mensuels simulés sous climat modifié (période 2050-2060) sur les débits moyens mensuels simulés sous climat actuel (période 1985-1995), ainsi que les valeurs extrêmes. Nous avons aussi reporté ces valeurs moyennées sur l'ensemble de la période d'étiage ainsi que sur les débits moyens mensuels minimaux. Les valeurs des rapports par scénario et pour le restant des mois de l'année ont aussi été calculés et peuvent être consultés en annexe C.

Station	Scénario	Juillet	Aôut	Septembre	Octobre	Etiage (juillet-octobre)	Débit min.
Foix	UR	0,85	0,93	1,01	1,06	0,99	0,96
	HC	0,86	0,88	0,87	0,94	0,90	0,89
	CNRM HR	0,83	0,91	0,95	1,03	0,95	0,94
	CNRM LR	0,89	0,92	0,93	1,01	0,95	0,94
	LMD HR	0,83	0,86	0,85	0,80	0,82	0,86
	LMD LR	1,08	0,94	0,91	0,76	0,88	0,91
	SC CONT 2055	0,91	0,92	0,92	0,83	0,87	0,92
Auterive	UR	0,85	0,94	1,02	1,07	0,99	0,95
	HC	0,85	0,88	0,87	0,96	0,91	0,89
	CNRM HR	0,83	0,91	0,95	1,00	0,94	0,93
	CNRM LR	0,88	0,92	0,94	1,02	0,96	0,93
	LMD HR	0,82	0,86	0,85	0,80	0,82	0,86
	LMD LR	1,09	0,93	0,91	0,75	0,87	0,91
	SC CONT 2055	0,90	0,92	0,92	0,82	0,87	0,92
Valentine	UR	0,74	0,91	1,04	1,12	0,97	0,96
	HC	0,74	0,83	0,80	0,91	0,84	0,82
	CNRM HR	0,78	0,90	0,91	0,91	0,88	0,91
	CNRM LR	0,75	0,88	0,88	0,99	0,89	0,89
	LMD HR	0,69	0,79	0,75	0,71	0,73	0,76
	LMD LR	0,99	0,92	0,86	0,72	0,85	0,87
	SC CONT 2055	0,79	0,87	0,83	0,77	0,81	0,85
Roquefort	UR	0,81	0,93	1,01	1,09	0,99	0,96
	HC	0,81	0,88	0,87	0,93	0,89	0,89
	CNRM HR	0,82	0,92	0,93	0,91	0,90	0,93
	CNRM LR	0,85	0,92	0,93	0,99	0,94	0,93
	LMD HR	0,79	0,85	0,84	0,80	0,81	0,86
	LMD LR	1,11	0,93	0,90	0,76	0,89	0,91
	SC CONT 2055	0,89	0,91	0,90	0,82	0,86	0,91
Portet	UR	0,78	0,92	1,03	1,10	0,99	0,96
	HC	0,78	0,86	0,84	0,93	0,87	0,86
	CNRM HR	0,80	0,91	0,93	0,93	0,90	0,93
	CNRM LR	0,81	0,90	0,91	1,00	0,93	0,92
	LMD HR	0,75	0,83	0,80	0,76	0,78	0,82
	LMD LR	1,04	0,92	0,88	0,73	0,86	0,89
	SC CONT 2055	0,84	0,89	0,87	0,79	0,83	0,89
Lamagistère	UR	0,79	0,94	1,02	1,07	0,98	0,97
	HC	0,77	0,87	0,83	0,98	0,87	0,87
	CNRM HR	0,81	0,93	0,93	0,84	0,86	0,93
	CNRM LR	0,82	0,92	0,93	1,04	0,95	0,93
	LMD HR	0,75	0,85	0,80	0,73	0,76	0,83
	LMD LR	1,02	0,92	0,88	0,69	0,84	0,90
	SC CONT 2055	0,82	0,90	0,89	0,81	0,84	0,90
Tonneins	UR	0,80	0,96	1,04	1,08	0,99	0,98
	HC	0,75	0,87	0,82	1,00	0,87	0,87
	CNRM HR	0,81	0,93	0,93	0,82	0,85	0,94
	CNRM LR	0,82	0,92	0,94	1,05	0,95	0,94
	LMD HR	0,75	0,85	0,80	0,74	0,76	0,84
	LMD LR	1,00	0,92	0,87	0,69	0,83	0,91
	SC CONT 2055	0,82	0,90	0,88	0,80	0,83	0,90
Villemur	UR	0,88	0,96	0,98	0,97	0,94	0,97
	HC	0,84	0,92	0,86	1,04	0,92	0,90
	CNRM HR	0,88	0,96	0,94	0,78	0,86	0,96
	CNRM LR	0,90	0,95	0,96	1,07	0,99	0,96
	LMD HR	0,82	0,90	0,85	0,74	0,79	0,88
	LMD LR	0,97	0,95	0,90	0,70	0,83	0,93
	SC CONT 2055	0,87	0,94	0,94	0,87	0,89	0,94

Tableau 3 : Rapports moyens pour les 4 mois d'étiage sur la période 2050-2060, des débits simulés sous climat futur aux débits simulés sous climat actuel au niveau des 8 premières stations de référence.

Station	Scénario	Juillet	Aôut	Septembre	Octobre	Étiage (juillet-octobre)	Débit min.
Loubejac	UR	0,77	0,99	1,08	1,08	0,99	0,97
	HC	0,70	0,82	0,75	1,07	0,86	0,89
	CNRM HR	0,78	0,95	0,90	0,73	0,78	0,95
	CNRM LR	0,80	0,90	0,95	1,08	0,96	0,94
	LMD HR	0,69	0,81	0,73	0,74	0,71	0,88
	LMD LR	0,98	0,87	0,80	0,66	0,76	0,92
	SC CONT 2055	0,77	0,85	0,84	0,77	0,78	0,91
Estirac	UR	0,82	0,96	1,06	1,10	1,00	0,98
	HC	0,80	0,90	0,89	0,96	0,89	0,92
	CNRM HR	0,90	0,95	0,94	0,91	0,92	0,96
	CNRM LR	0,82	0,92	0,92	0,97	0,91	0,94
	LMD HR	0,80	0,89	0,87	0,81	0,82	0,90
	LMD LR	1,14	0,96	0,92	0,79	0,92	0,94
	SC CONT 2055	0,86	0,91	0,87	0,78	0,83	0,91
Aire	UR	0,80	0,97	1,12	1,17	1,03	0,98
	HC	0,77	0,88	0,87	0,96	0,88	0,91
	CNRM HR	0,89	0,95	0,94	0,92	0,91	0,95
	CNRM LR	0,80	0,91	0,92	0,98	0,90	0,93
	LMD HR	0,78	0,87	0,84	0,80	0,80	0,89
	LMD LR	1,15	0,94	0,89	0,77	0,92	0,94
	SC CONT 2055	0,84	0,89	0,83	0,76	0,81	0,89
Audon	UR	0,82	0,97	1,11	1,24	1,07	0,99
	HC	0,79	0,89	0,87	0,93	0,87	0,90
	CNRM HR	0,90	0,96	0,96	0,92	0,93	0,97
	CNRM LR	0,82	0,92	0,92	0,97	0,91	0,93
	LMD HR	0,80	0,88	0,84	0,77	0,80	0,89
	LMD LR	1,12	0,95	0,90	0,76	0,91	0,94
	SC CONT 2055	0,84	0,89	0,84	0,74	0,80	0,89
St Vincent	UR	0,91	1,02	1,11	1,19	1,07	1,03
	HC	0,80	0,89	0,88	0,93	0,88	0,90
	CNRM HR	1,02	1,06	1,05	1,01	1,03	1,05
	CNRM LR	0,90	0,97	0,97	1,00	0,96	0,98
	LMD HR	0,80	0,86	0,84	0,81	0,82	0,86
	LMD LR	1,03	0,93	0,91	0,81	0,91	0,92
	SC CONT 2055	0,80	0,85	0,82	0,78	0,81	0,85
Escos	UR	0,85	0,97	1,09	1,14	1,04	0,99
	HC	0,80	0,89	0,87	0,95	0,90	0,90
	CNRM HR	0,91	0,96	0,95	0,87	0,91	0,96
	CNRM LR	0,83	0,91	0,90	0,95	0,91	0,92
	LMD HR	0,81	0,89	0,84	0,78	0,81	0,88
	LMD LR	1,08	0,96	0,91	0,76	0,88	0,94
	SC CONT 2055	0,84	0,91	0,85	0,77	0,82	0,89
Berenx	UR	0,77	0,94	1,10	1,19	1,02	0,97
	HC	0,74	0,85	0,81	0,94	0,85	0,83
	CNRM HR	0,84	0,93	0,92	0,91	0,89	0,93
	CNRM LR	0,76	0,89	0,88	0,98	0,88	0,89
	LMD HR	0,72	0,84	0,77	0,73	0,76	0,79
	LMD LR	0,99	0,94	0,88	0,76	0,87	0,89
	SC CONT 2055	0,78	0,89	0,83	0,77	0,80	0,85
Bergerac	UR	0,88	1,02	1,13	1,19	1,10	1,01
	HC	0,74	0,87	0,76	1,02	0,88	0,87
	CNRM HR	0,80	0,94	0,94	0,72	0,81	0,95
	CNRM LR	0,84	0,94	0,95	1,05	0,97	0,95
	LMD HR	0,78	0,88	0,79	0,71	0,76	0,89
	LMD LR	0,96	0,94	0,85	0,68	0,80	0,95
	SC CONT 2055	0,84	0,91	0,82	0,72	0,79	0,91

Tableau 4: Rapports moyens pour les 4 mois d'étiage sur la période 2050-2060, des débits simulés sous climat futur aux débits simulés sous climat actuel au niveau des 8 dernières stations de référence.

Station	Qfutur/Qactuel moyen sur l'étiage (juillet - octobre)	Ecart-type	Qmin futur/Qmin actuel moyen	Ecart-type
Foix	0,91	0,06	0,92	0,03
Auterive	0,91	0,06	0,91	0,03
Valentine	0,85	0,07	0,87	0,06
Roquefort	0,90	0,06	0,91	0,03
Portet	0,88	0,07	0,90	0,05
Lamagistère	0,87	0,07	0,90	0,05
Tonneins	0,87	0,08	0,91	0,05
Villemur	0,89	0,07	0,93	0,03
Loubejac	0,84	0,11	0,93	0,04
Estirac	0,89	0,07	0,94	0,03
Aire	0,90	0,07	0,93	0,03
Audon	0,90	0,09	0,93	0,04
St Vincent	0,92	0,10	0,95	0,07
Escos	0,89	0,08	0,92	0,05
Berenx	0,87	0,08	0,88	0,06
Bergerac	0,87	0,12	0,92	0,06

Tableau 5: Moyennes et écart-types des rapports de débits moyens sur l'étiage et de débits minimaux.

De façon générale, l'application des 7 scénarii se traduit par une diminution de 11% en moyenne des débits d'été sur l'ensemble des stations (l'utilisation conjuguée de scénarii de résolutions différentes ne semble pas avoir d'influence particulière sur les résultats pour cette période). Il y a cependant une assez large variabilité entre les scénarii puisqu'on obtient un écart-type moyen de 0,08. Les impacts les plus forts s'observent au mois de juillet où les débits diminuent en moyenne de 15%. L'impact sur débits mensuels minimaux calculés sur la période de simulation (équivalents aux QMNA) est plus faible que celui sur les débits moyens puisque la diminution observée est en moyenne de 8%. Ces deux dernières observations s'expliquent par le fait que les changements climatiques ont un impact différent suivant s'ils s'appliquent sur des écoulements de type rapide ou des écoulements de type lent. Les débits du mois de juillet correspondent aux derniers écoulements provoqués par les précipitations et la fonte des neiges, conjugués au débit de base. La quantité d'eau disponible à ce moment là est donc plus importante que lors du mois où l'on enregistre les débits les plus faibles, qui eux correspondent à des écoulements maintenus grâce au déstockage des réservoirs temporaires naturels (nappes perchées, nappes alluviales, etc..). Les écoulements de type rapide sont plus sensibles à une modification du régime des précipitations et des températures que les écoulement du régime de base. Il est donc normal, dans le cadre du modèle actuel, que les impacts soient plus forts au mois de juillet et, comme nous allons le voir dans ce qui suit, le reste de l'année, qu'au cœur de l'été où l'on observe les plus faibles débits.

Les impacts varient fortement en fonction des scénarii et de la position géographique des stations. Pour faciliter la visualisation des résultats et de leur dispersion, les débits moyens mensuels simulés pour les 7 scénarii (2050-2060) ont été comparés aux débits simulés pour le climat actuel (1985-1995) et les évolutions annuelles des rapports obtenus ont été tracés. Nous allons à présent commenter les résultats obtenus bassin par bassin, de manière à mettre en avant les impacts liés à leur situation géographique sur l'ensemble de l'année. La position géographique et hydrographique des stations discutées peut être consultée sur la Figure 10 pour une meilleure compréhension.

IV.1.1 Le bassin amont de la Garonne

Les bassins amont de la Garonne contiennent une forte proportion de zones de montagne. La neige qui s'y accumule en hiver et fond au printemps a une influence sur la dynamique des écoulements. Le réchauffement de l'atmosphère et la modification du régime des pluies liés à l'application des scénarii a un impact sur la neige. Il se traduit par une diminution des précipitations neigeuses au profit des précipitations liquides en hiver et une réduction de la durée de l'enneigement au printemps. Sur les Figure 27 et Figure 28, on observe par exemple une diminution du nombre de jours d'enneigement et de la hauteur moyenne de la neige au niveau de 6 stations de montagne entre 1990 et 2090, simulée pour le scénario continu du CNRM. La Figure 29 montre que cette diminution s'accroît avec l'altitude puisqu'on observe que la différence de hauteur de neige entre 1990 et 2090 augmente avec l'altitude. Cette diminution n'est cependant pas linéaire dans le temps puisque les décades 2005-2015 et 2045-2055 ne suivent pas l'évolution générale (conséquence des anomalies positives de précipitation du scénario continu pour cette période – voir paragraphe IV.3).

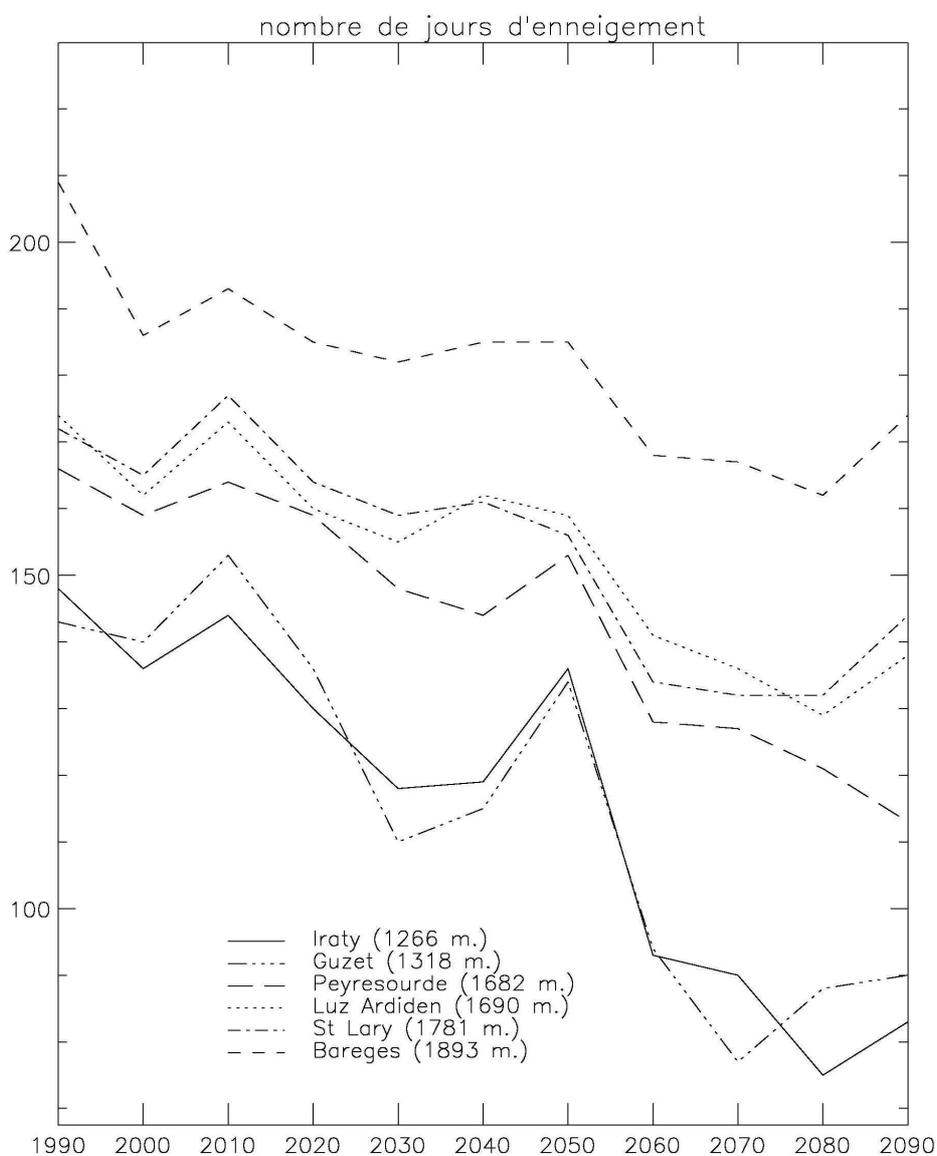


Figure 27: Evolution de la durée d'enneigement simulée.

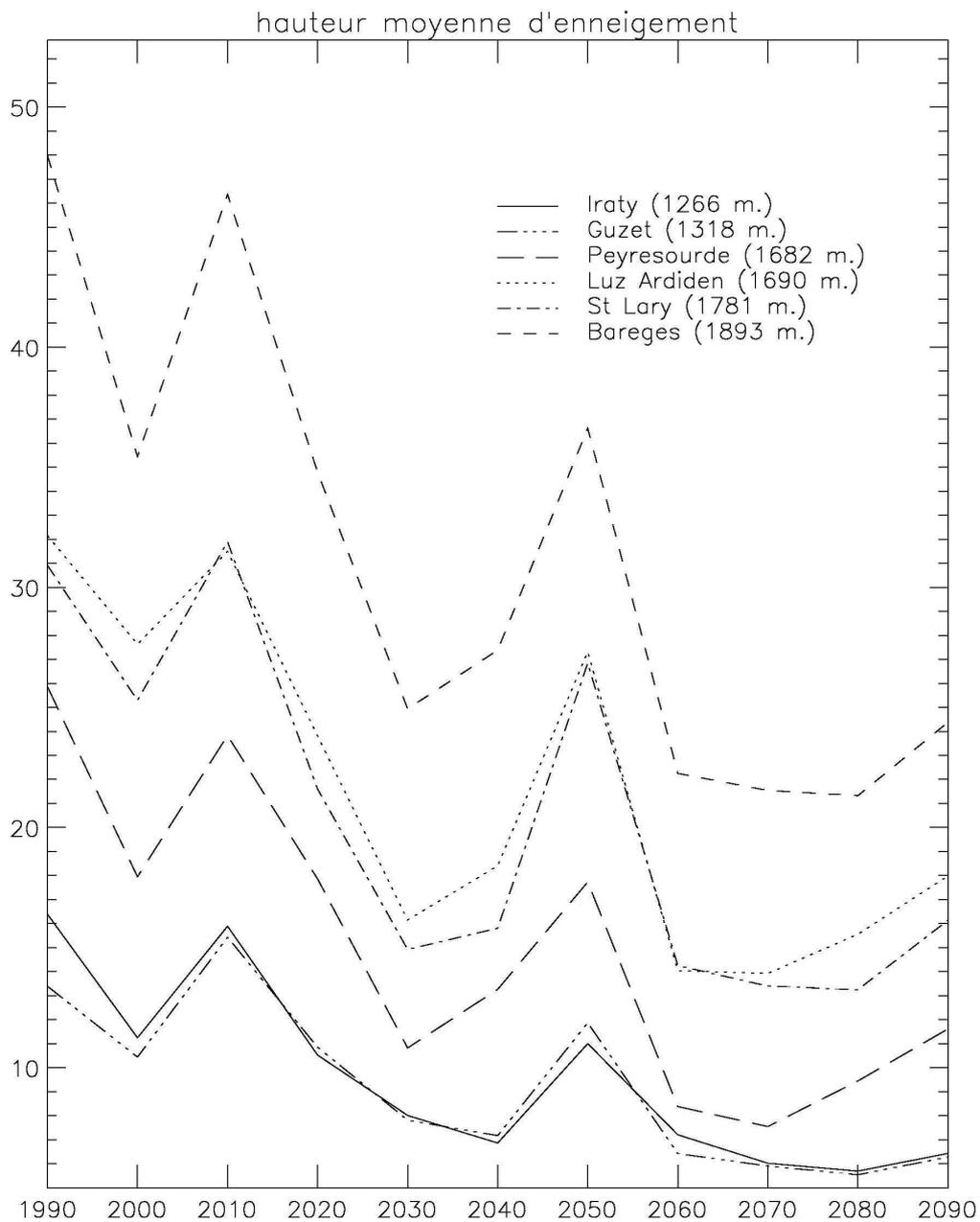


Figure 28: Evolution de la hauteur de neige simulée (en centimètres), moyennée sur la durée d'enneigement.

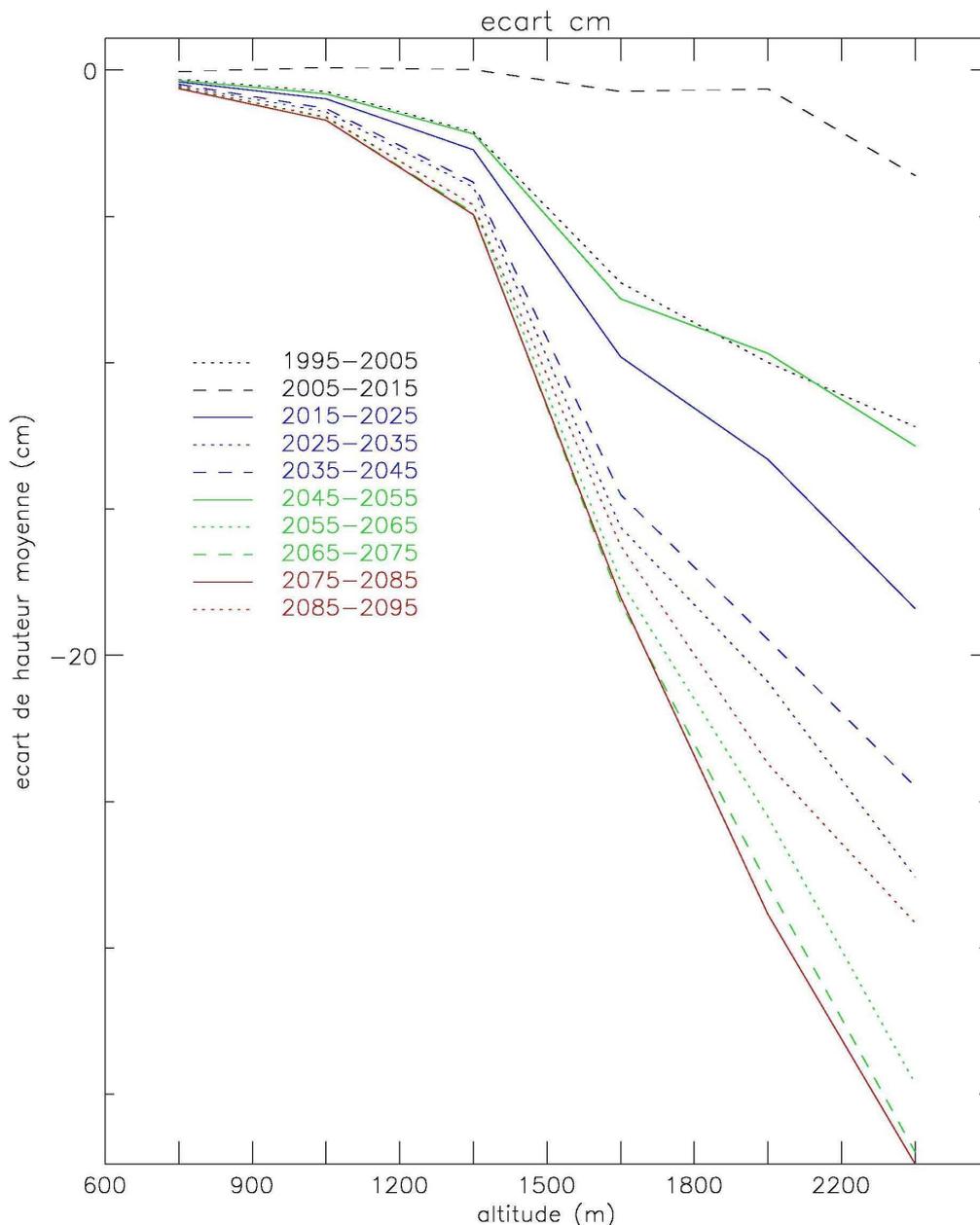


Figure 29: Evolution des écarts par rapports à l'actuel des hauteurs de neige par tranche d'altitude sur l'ensemble du bassin Adour-Garonne en centimètres.

Les modifications subies par le manteau neigeux vont donc avoir un impact important sur la dynamique des écoulements pour les sous-bassins de zone montagneuse.

La Figure 30 présente les débits moyens mensuels simulés pour les 7 scénarii à la station de Foix. Ce type de graphe a été construit pour l'ensemble des stations et est consultable en annexe D. Cette figure permet de voir la forte variabilité des tendances simulées pour les différents scénarii. On y observe une dispersion des débits résultants relativement faible pour tous les scénarii en étiage, liée aux faibles quantités d'eau disponibles à cette période. Pendant le reste de l'année, cette dispersion est beaucoup plus grande avec un maximum au cours de l'hiver. De plus, les impacts observés peuvent aussi bien être négatifs que positifs par rapport aux débits actuels.

L'analyse de cette figure, ainsi que de l'ensemble des figures disponibles en annexe C, fait ressortir le caractère relativement homogène des réponses du modèle ISBA-MODCOU aux différents scénarii durant le printemps et l'étiage, par rapport aux débits simulés sous climat présent.

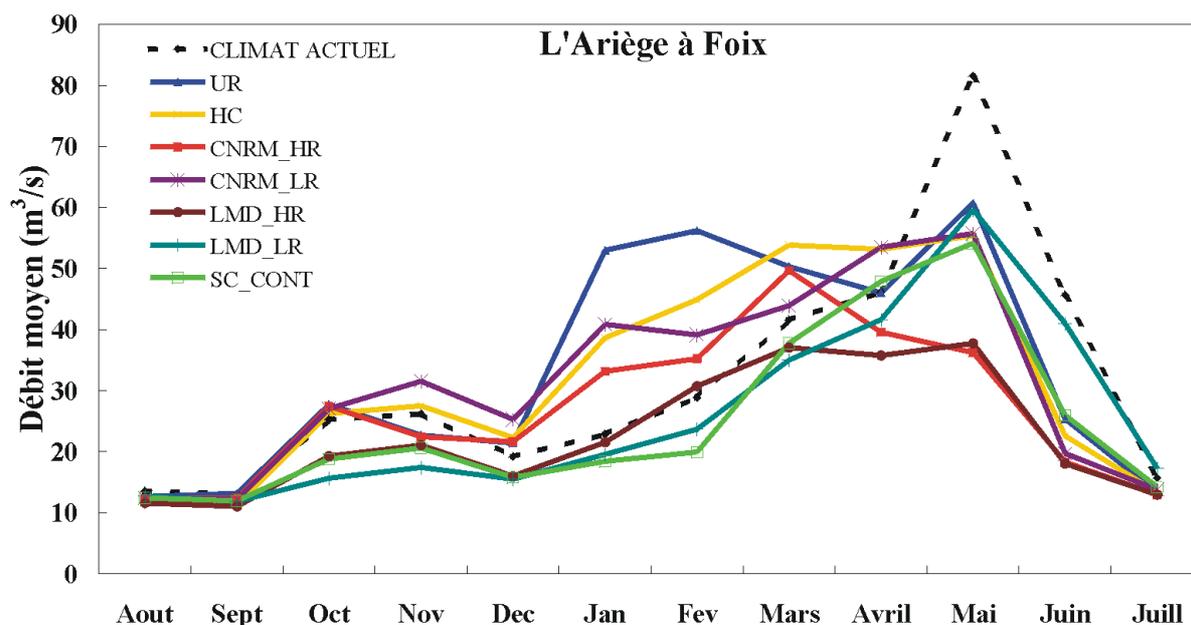


Figure 30: Débits moyens mensuels à Foix simulés sous climat actuel (1985-1995) comparés aux débits moyens mensuels simulés sous climat futur pour chacun des 7 scénarii.

Les débits simulés en climat modifié sont généralement inférieurs aux débits simulés en climat présent pendant ces deux périodes. Pour l'automne et l'hiver par contre, le modèle simule généralement des débits supérieurs à ceux du climat présent pour les scénarii UR, HC, CNRM_HR et LR et inférieurs pour les scénarii LMD_HR, LR et le scénario continu.

Les Figure 31, Figure 32, Figure 33 et Figure 34 présentent pour les stations de Foix et Auterive sur l'Ariège, de Valentine sur la Garonne et de Roquefort sur le Salat, d'une part, l'ensemble des débits futurs simulés sous la forme d'une courbe enveloppe limitée par leurs valeurs extrêmes et d'une courbe des valeurs moyennes et, d'autre part, les valeurs moyennes des rapports futur/actuel de ces débits avec leur intervalle de variation (écart-types et valeurs min-max).

Ces figures confirment que les impacts simulés sur la période d'étiage sont à la fois plus faibles et moins aléatoires que pour le reste de l'année. L'écart croissant entre les valeurs extrêmes indique toutefois que si tous les scénarii prédisent une diminution moyenne de l'ordre de 10% des débits de juillet à octobre, l'impact est plus aléatoire en fin d'étiage.

En hiver et au printemps les impacts sont les plus forts en valeur relative, ce qui est en partie dû aux modifications subies par le régime de précipitation et de fonte nivales. Ces modifications se traduisent de manière générale pour les 4 stations par une forte réduction des débits au printemps, couplée à une augmentation des débits d'hiver. Les crues de printemps actuellement provoquées par la fonte des neiges voient leur amplitude diminuer de jusqu'à 50 % pour tous les scénarii, principalement en raison de la réduction de l'épaisseur et de la durée de maintien du manteau neigeux. Ceci a pour conséquence principale de décaler le début du régime d'étiage observée actuellement au mois de juillet vers le mois de juin. Ainsi, l'impact sur les étiages ne se traduit pas seulement par une diminution des débits mais aussi par une modification de la durée de l'étiage liée à la fonte plus précoce de la neige.

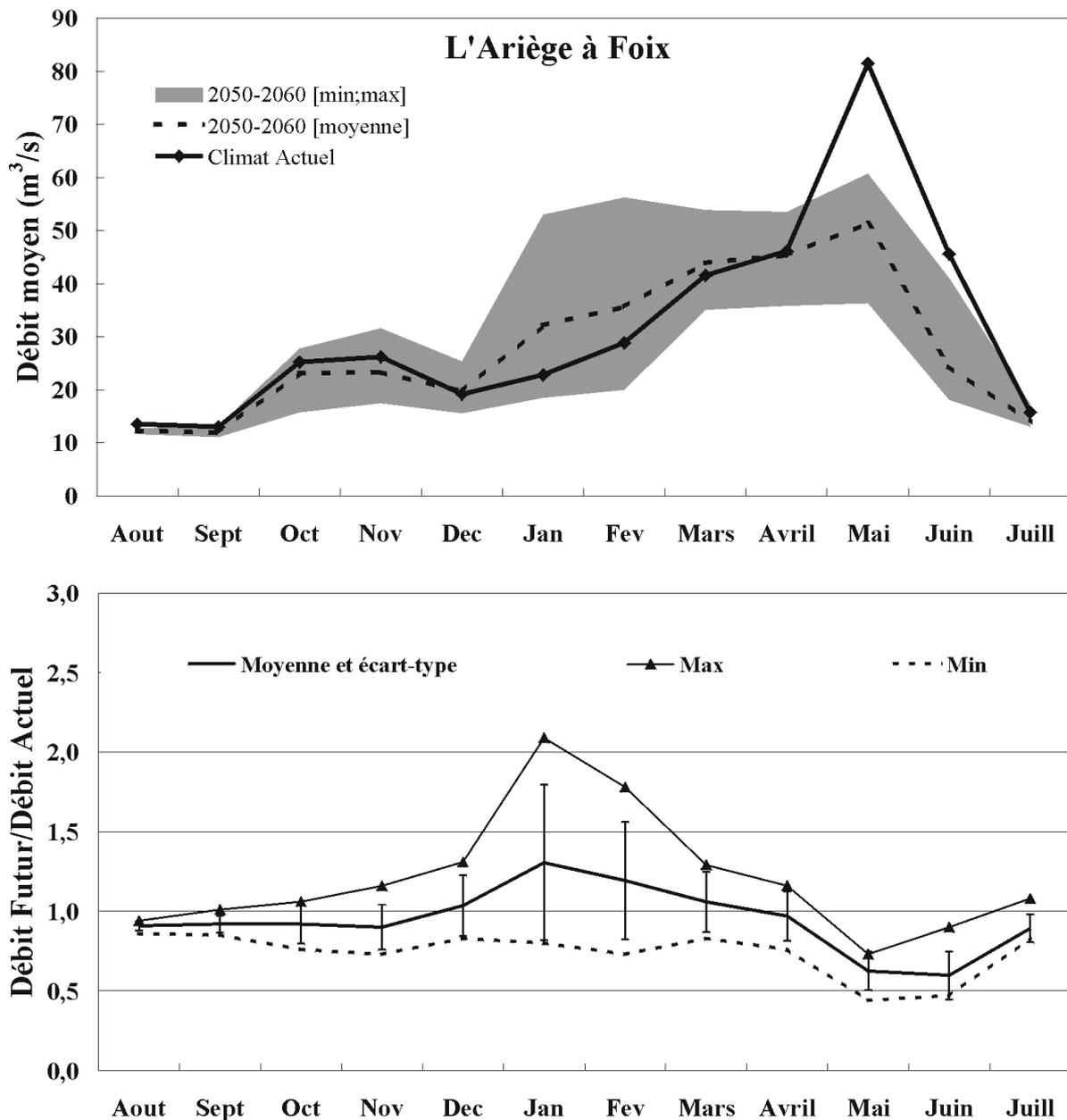


Figure 31: Haut - Débits moyens mensuels à Foix simulés sous climat actuel (1985-1995) comparés aux débits moyens mensuels simulés sous climat futur (valeur moyenne et courbe enveloppe des débits des 7 scénarii bornée par les valeurs extrêmes pour chaque mois). Bas - Rapports des débits moyens mensuels simulés sous climat futur sur les débits moyens mensuels simulés sous climat actuel (valeur moyenne des débits des 7 scénarii avec écart-type et valeurs extrêmes pour chaque mois).

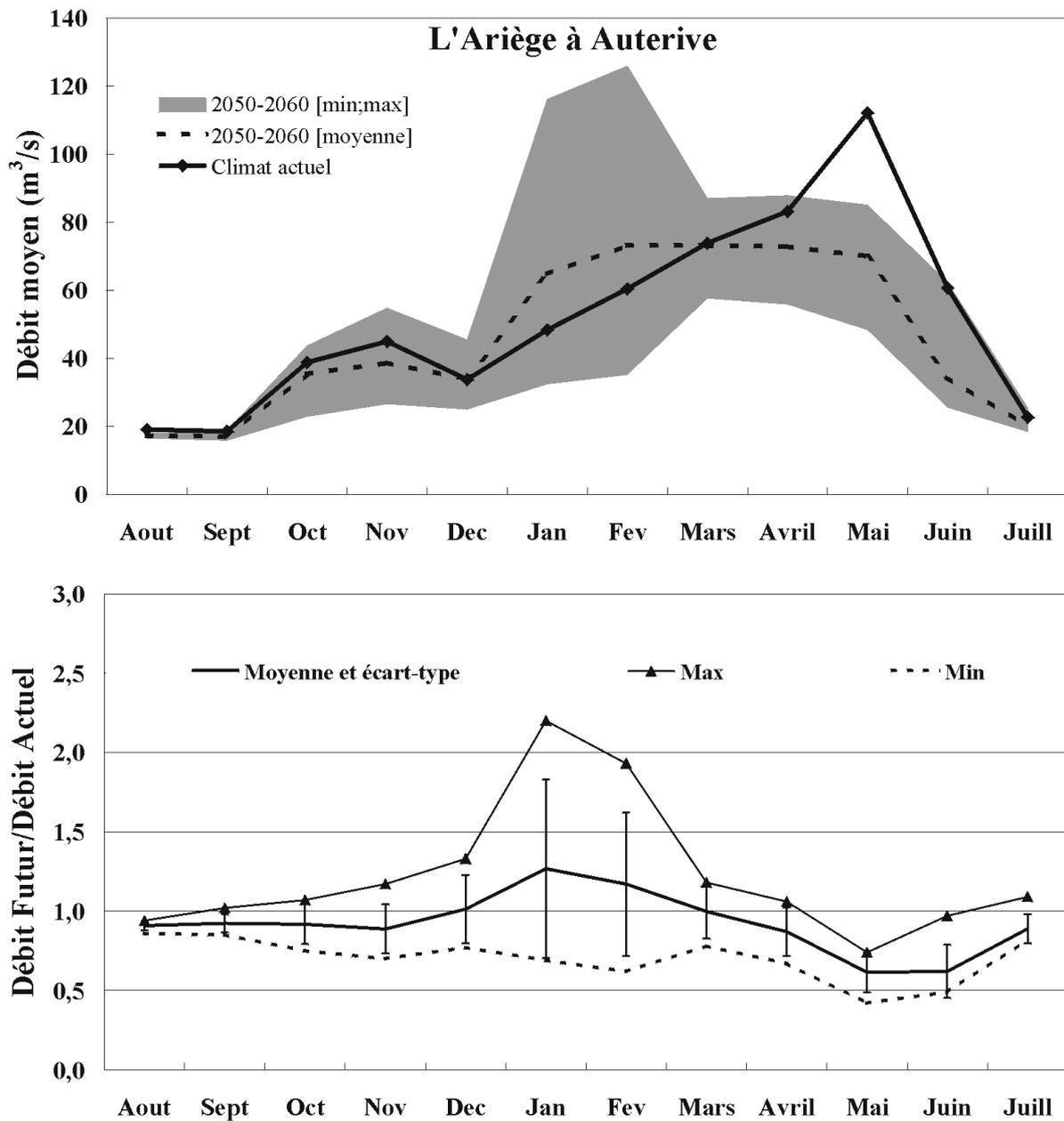


Figure 32: Haut - Débits moyens mensuels à Auterive simulés sous climat actuel (1985-1995) comparés aux débits moyens mensuels simulés sous climat futur (valeur moyenne et courbe enveloppe des débits des 7 scénarii bornée par les valeurs extrêmes pour chaque mois). Bas - Rapports des débits moyens mensuels simulés sous climat futur sur les débits moyens mensuels simulés sous climat actuel (valeur moyenne des débits des 7 scénarii avec écart-type et valeurs extrêmes pour chaque mois).

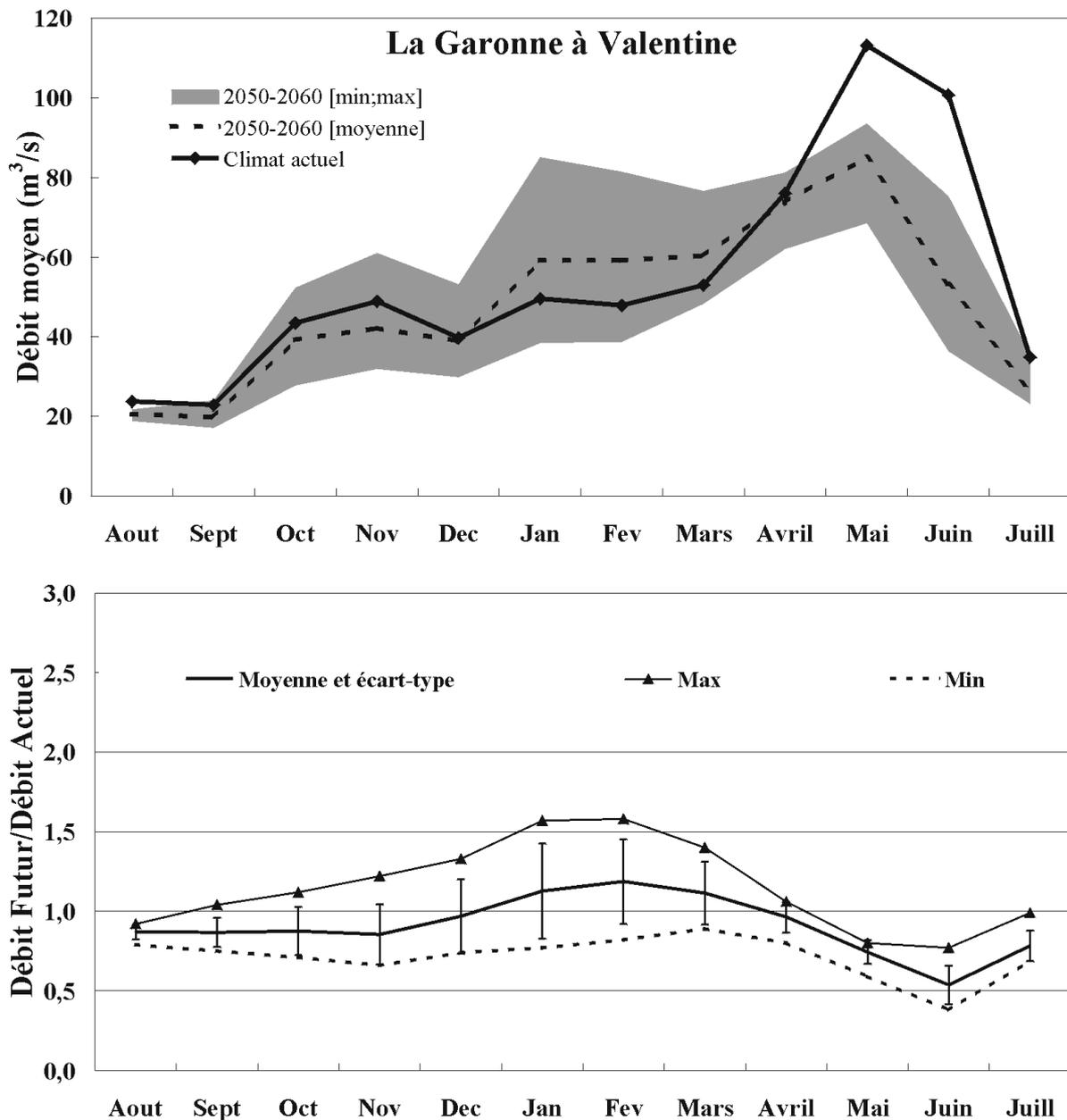


Figure 33: Haut - Débits moyens mensuels à Valentine simulés sous climat actuel (1985-1995) comparés aux débits moyens mensuels simulés sous climat futur (valeur moyenne et courbe enveloppe des débits des 7 scénarii bornée par les valeurs extrêmes pour chaque mois). Bas - Rapports des débits moyens mensuels simulés sous climat futur sur les débits moyens mensuels simulés sous climat actuel (valeur moyenne des débits des 7 scénarii avec écart-type et valeurs extrêmes pour chaque mois).

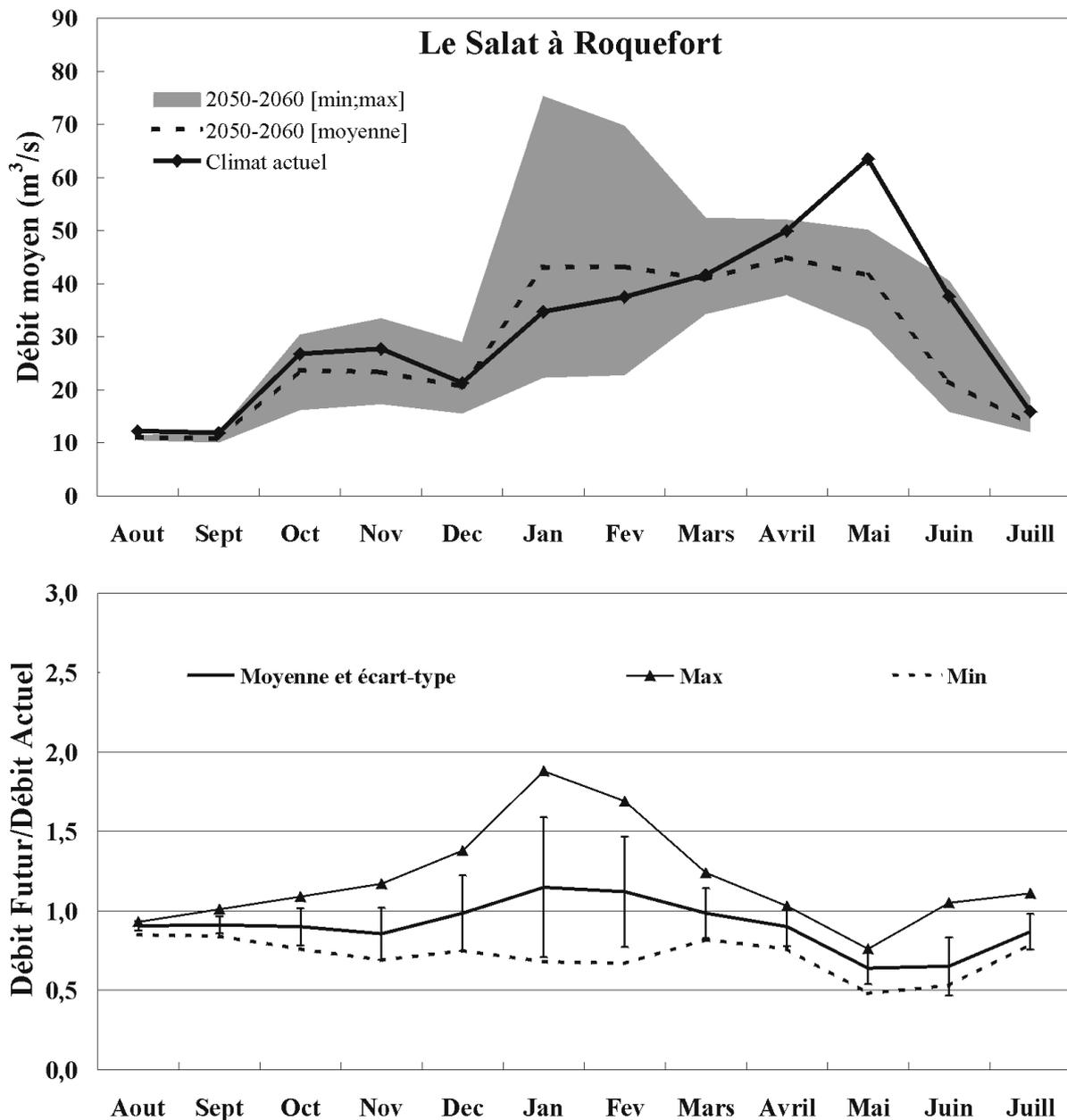


Figure 34: Haut - Débits moyens mensuels à Roquefort simulés sous climat actuel (1985-1995) comparés aux débits moyens mensuels simulés sous climat futur (valeur moyenne et courbe enveloppe des débits des 7 scénarii bornée par les valeurs extrêmes pour chaque mois). Bas - Rapports des débits moyens mensuels simulés sous climat futur sur les débits moyens mensuels simulés sous climat actuel (valeur moyenne des débits des 7 scénarii avec écart-type et valeurs extrêmes pour chaque mois).

IV.1.2 Le bassin aval de la Garonne

Les Figure 35, Figure 36 et Figure 37 présentent les impacts simulés en termes de débits et de rapports futur/actuel aux stations de Portet, Lamagistère et Tonneins, situées dans la partie aval du bassin de la Garonne. On observe que les impacts en étiage sont du même ordre de grandeur que pour les stations amont et que leur variabilité est aussi plus grande vers la fin de l'étiage. Par contre, le déficit de débits au printemps encore bien visible à Portet, s'estompe pour les deux autres stations (le rapport des débits moyen passe de valeurs proches de 0,5 à Portet, à des valeurs proches de 1 à Tonneins entre Avril et Juin et les maximums dépassent ce seuil à Tonneins). Ceci est dû à la diminution de la part de surface enneigée par rapport à la surface des zone d'alimentation des stations, lorsque l'on va vers l'aval.

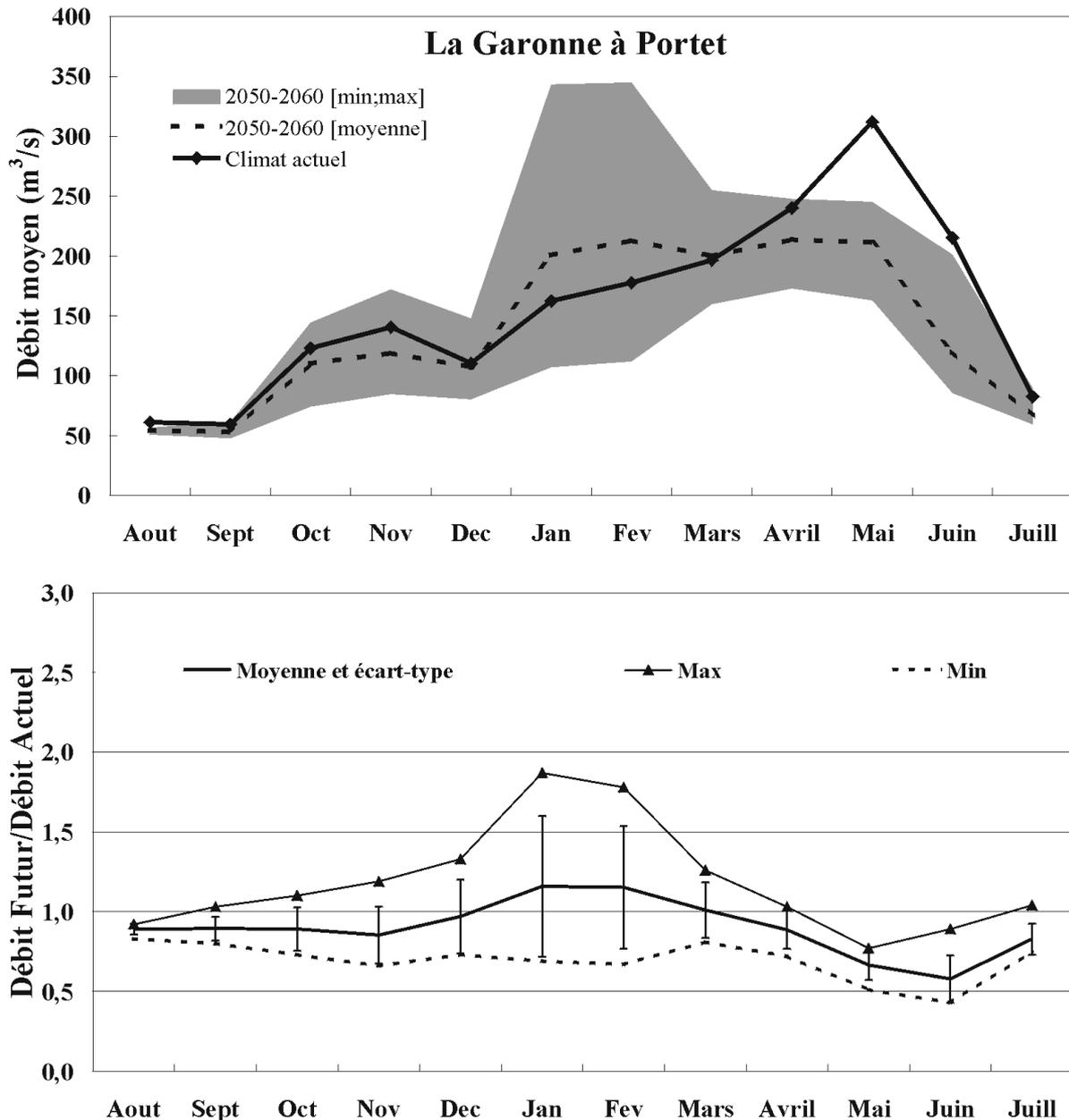


Figure 35: Haut - Débits moyens mensuels à Portet simulés sous climat actuel (1985-1995) comparés aux débits moyens mensuels simulés sous climat futur (valeur moyenne et courbe enveloppe des débits des 7 scénarii bornée par les valeurs extrêmes pour chaque mois). Bas - Rapports des débits moyens mensuels simulés sous climat futur sur les débits moyens mensuels simulés sous climat actuel (valeur moyenne des débits des 7 scénarii avec écart-type et valeurs extrêmes pour chaque mois).

De la même façon, l'impact sur les débits d'hiver est moins important en valeur relative que pour les stations amont et diminue en allant vers l'aval (le rapport des débits maximum passe de valeurs proches de 2 à Portet, à des valeurs proches de 1,5 à Tonneins entre Janvier et Février).

Ceci s'explique par le fait que l'apport de précipitations actuellement neigeuses qui tomberaient sous forme liquide à cause du réchauffement de l'atmosphère, diminue en allant vers l'aval au regard des précipitations sur l'ensemble de la surface qui alimente ces stations.

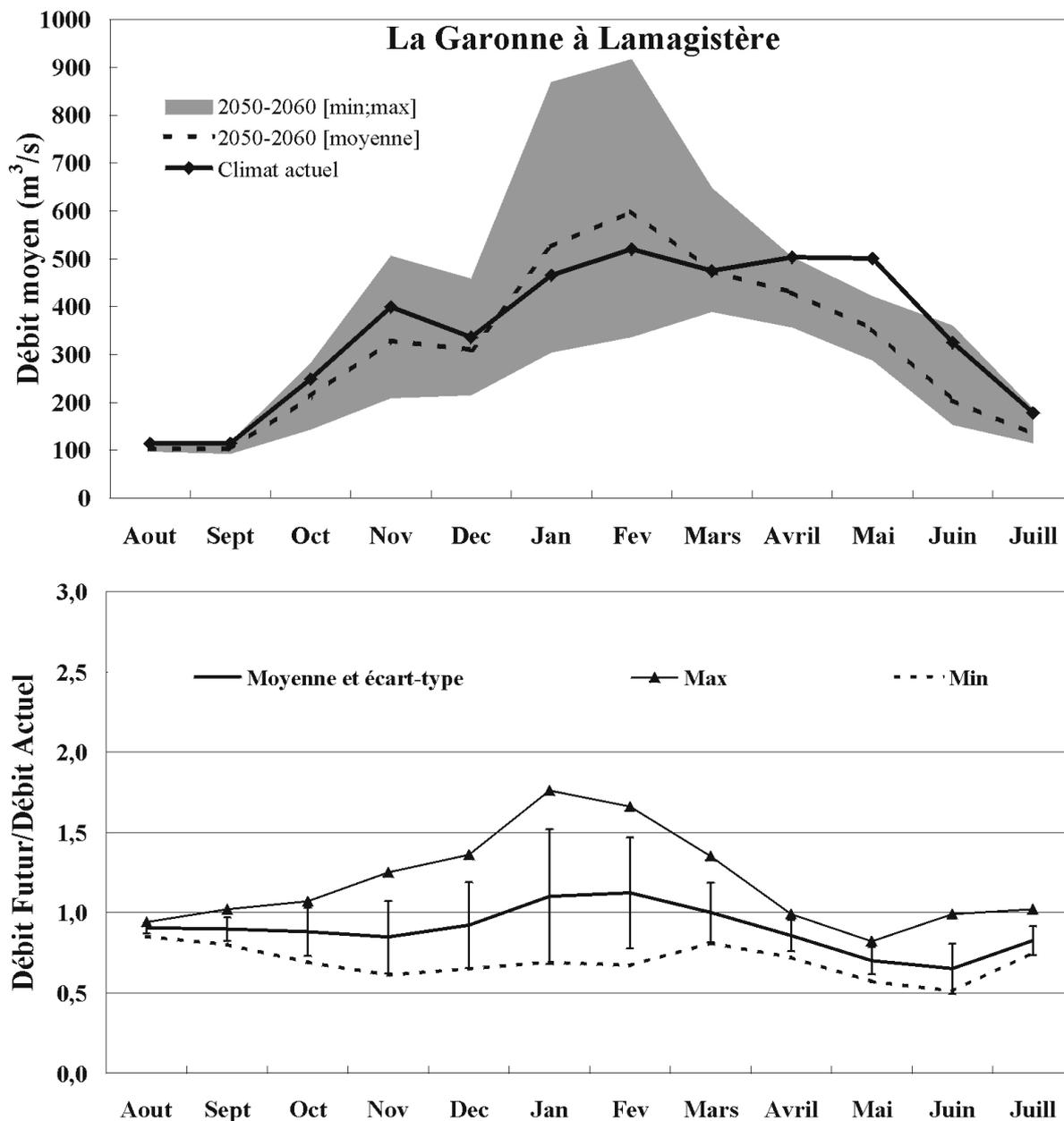


Figure 36: Haut - Débits moyens mensuels à Lamagistère simulés sous climat actuel (1985-1995) comparés aux débits moyens mensuels simulés sous climat futur (valeur moyenne et courbe enveloppe des débits des 7 scénarii bornée par les valeurs extrêmes pour chaque mois). Bas - Rapports des débits moyens mensuels simulés sous climat futur sur les débits moyens mensuels simulés sous climat actuel (valeur moyenne des débits des 7 scénarii avec écart-type et valeurs extrêmes pour chaque mois).

Enfin, les impacts positifs observés en hiver sont en valeur moyenne similaires pour les mois de Janvier et Février, ce qui n'est pas le cas pour les stations amont où l'un des deux mois subit des impacts plus importants que l'autre (en général le mois de Janvier).

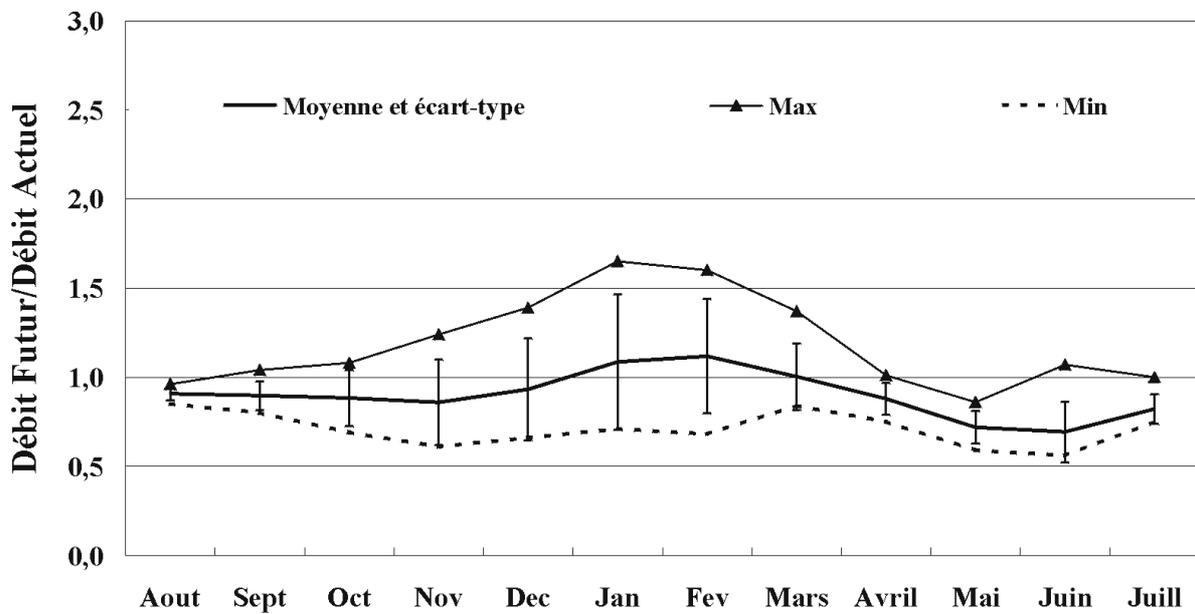
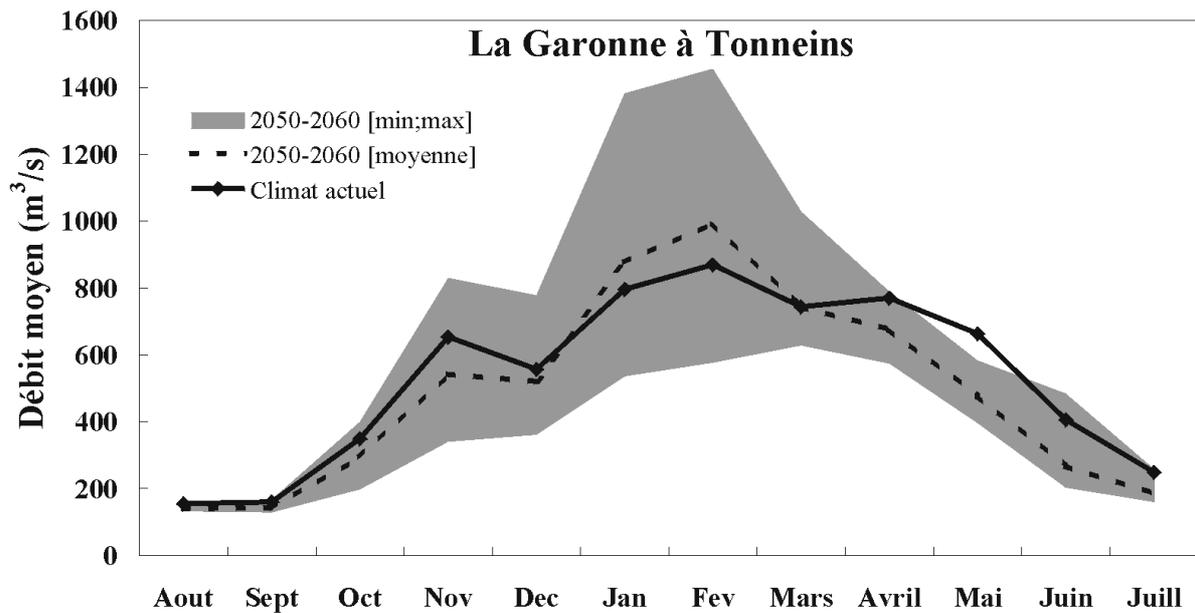


Figure 37: Haut - Débits moyens mensuels à Tonneins simulés sous climat actuel (1985-1995) comparés aux débits moyens mensuels simulés sous climat futur (valeur moyenne et courbe enveloppe des débits des 7 scénarii bornée par les valeurs extrêmes pour chaque mois). Bas - Rapports des débits moyens mensuels simulés sous climat futur sur les débits moyens mensuels simulés sous climat actuel (valeur moyenne des débits des 7 scénarii avec écart-type et valeurs extrêmes pour chaque mois).

IV.1.3 Les bassins du Tarn, de l'Aveyron et de la Dordogne

Bien que concernant des bassins très différents, nous avons regroupé les stations de Villemur sur le Tarn, Loubejac sur l'Aveyron et Bergerac sur la Dordogne car elles contrôlent les écoulements de la partie est du bassin (Figure 10). Les Figure 38, Figure 39 et Figure 40 présentent les impacts simulés en terme de débits et de rapports futur/actuel pour ces trois stations, dont la position géographique s'échelonne du Sud vers le Nord.

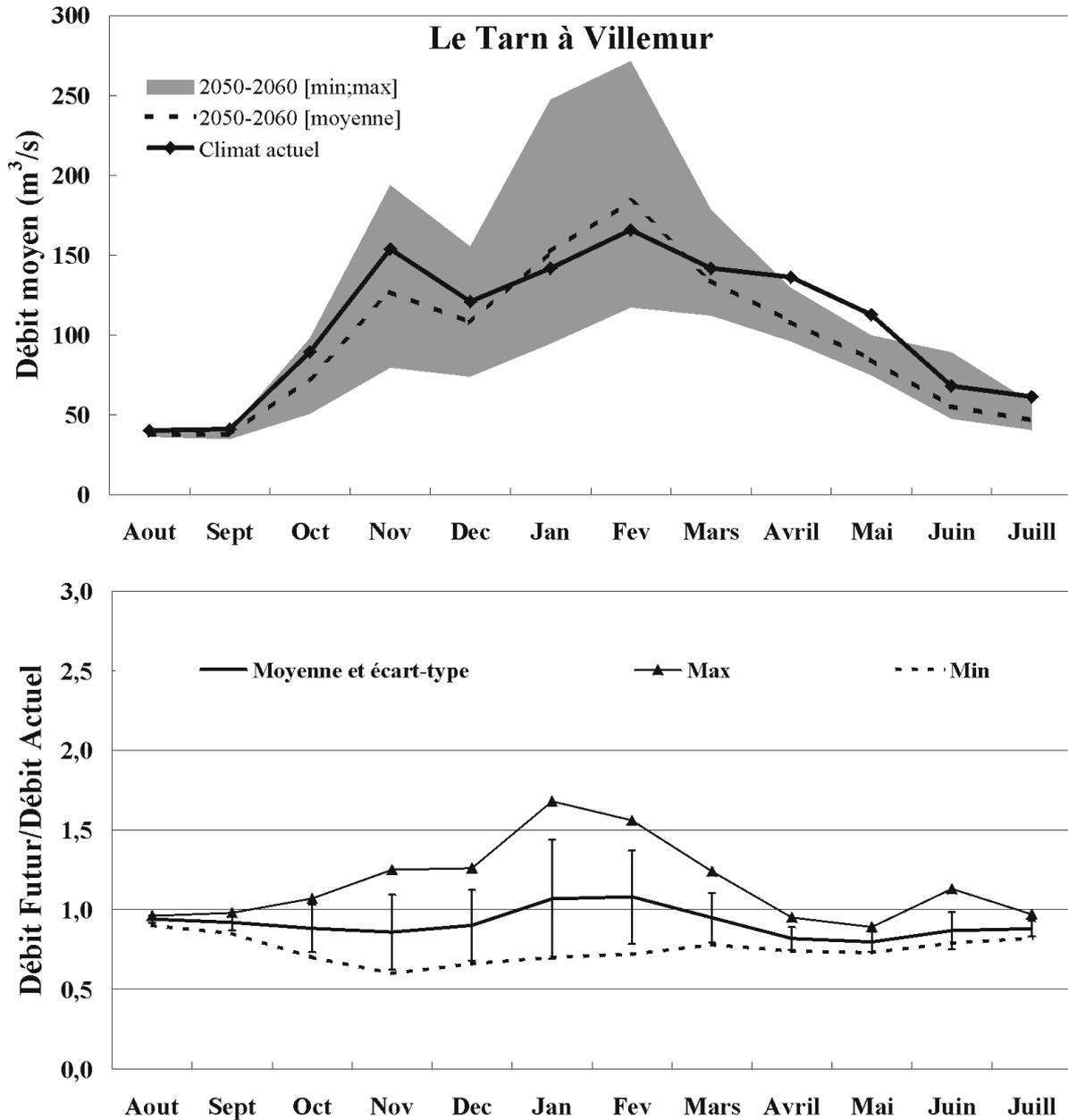


Figure 38: Haut - Débits moyens mensuels à Villemur simulés sous climat actuel (1985-1995) comparés aux débits moyens mensuels simulés sous climat futur (valeur moyenne et courbe enveloppe des débits des 7 scénarii bornée par les valeurs extrêmes pour chaque mois). Bas - Rapports des débits moyens mensuels simulés sous climat futur sur les débits moyens mensuels simulés sous climat actuel (valeur moyenne des débits des 7 scénarii avec écart-type et valeurs extrêmes pour chaque mois).

Les impacts en période d'étiage sont nettement moins forts pour le bassin du Tarn que pour les bassins précédents, celui de l'Aveyron et celui de la Dordogne. L'évolution des rapports au cours de l'été présentant aussi une dispersion plus faible, la variabilité spatiale des anomalies de précipitation et de

température des scénarii à haute résolution ne doit pas en être la cause. Il est par contre possible que ces faibles impacts soient reliés à la présence étendue de zones karstiques sur le bassin, contenant des réservoirs d'eau souterraine susceptibles d'être remplis pendant l'hiver grâce aux apports de précipitation excédentaires et qui soutiendraient les étiages malgré la modification climatique.

Par ailleurs, on observe sur ce bassin un pic de débits au mois de novembre, certainement causé par des précipitations plus intenses qu'ailleurs à cette période, que l'on n'observe pas sur les bassins pyrénéens bien qu'on le retrouve sur les stations de la Garonne situées en aval de Villemur (Lamagistère et Tonneins). Les impacts sur cette période sont négatifs et opposés aux impacts hivernaux, ainsi que pour toutes les autres stations.

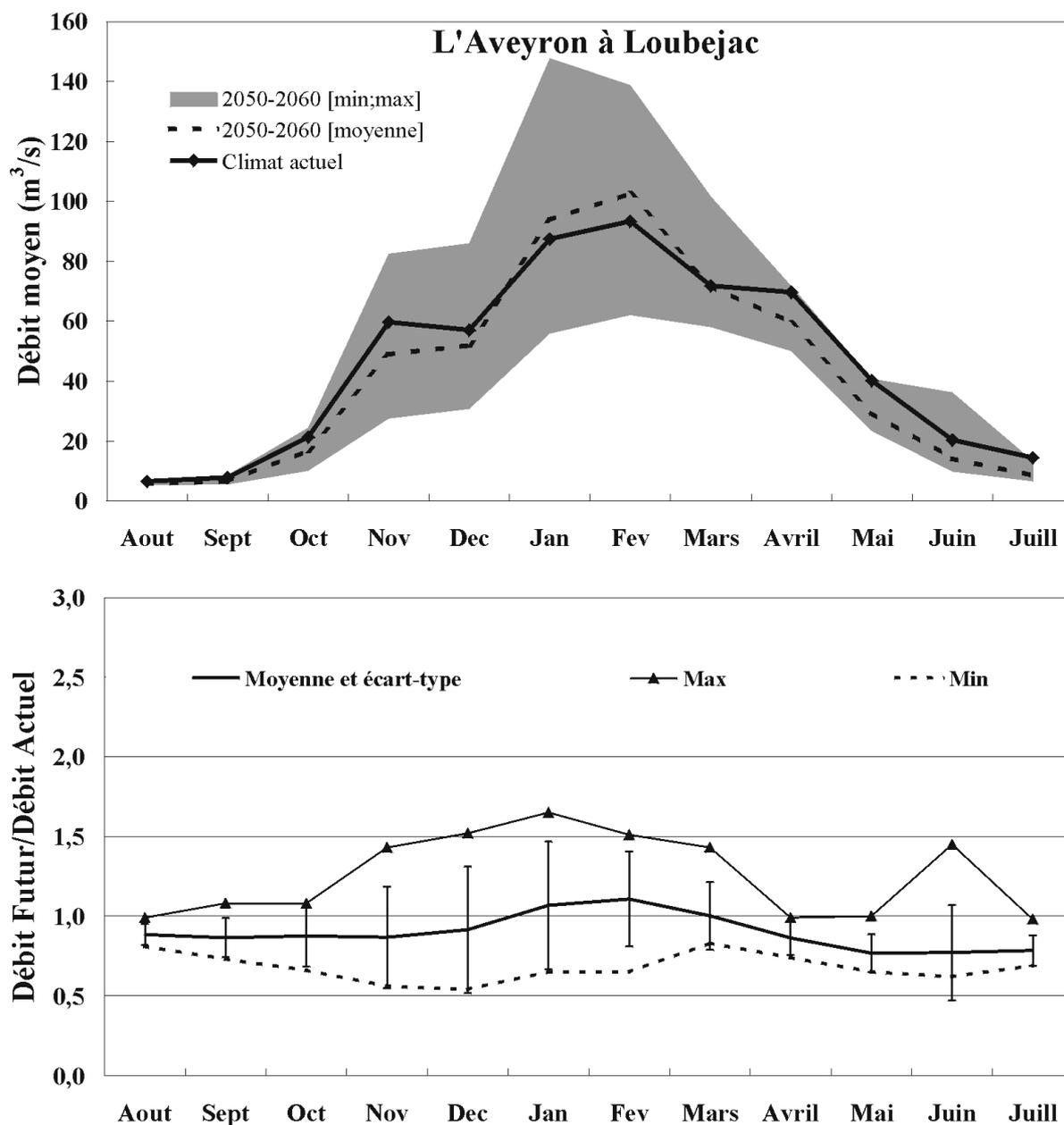


Figure 39: Haut - Débits moyens mensuels à Loubejac simulés sous climat actuel (1985-1995) comparés aux débits moyens mensuels simulés sous climat futur (valeur moyenne et courbe enveloppe des débits des 7 scénarii bornée par les valeurs extrêmes pour chaque mois). Bas - Rapports des débits moyens mensuels simulés sous climat futur sur les débits moyens mensuels simulés sous climat actuel (valeur moyenne des débits des 7 scénarii avec écart-type et valeurs extrêmes pour chaque mois).

L'impact de la fonte des neiges est faible sur ces stations et bien qu'étant encore visible à Villemur, il s'estompe en allant vers le Nord pour finalement disparaître à Bergerac.

Pour la station de Loubejac, mais plus encore pour celle de Bergerac, on observe des impacts plus faibles en valeur relative au cours des mois d'hiver que pour les autres stations. Moins concentrés sur cette période, ils présentent des amplitudes de variation relativement constantes tout au long des mois d'automne, hiver et printemps. Leur valeur moyenne pendant cette période suit cependant la même tendance que partout ailleurs sur le bassin : inférieure à 1 en automne et au printemps (débits futurs inférieurs aux débits actuels) et supérieure à 1 en hiver (débits futurs supérieurs aux débits actuels).

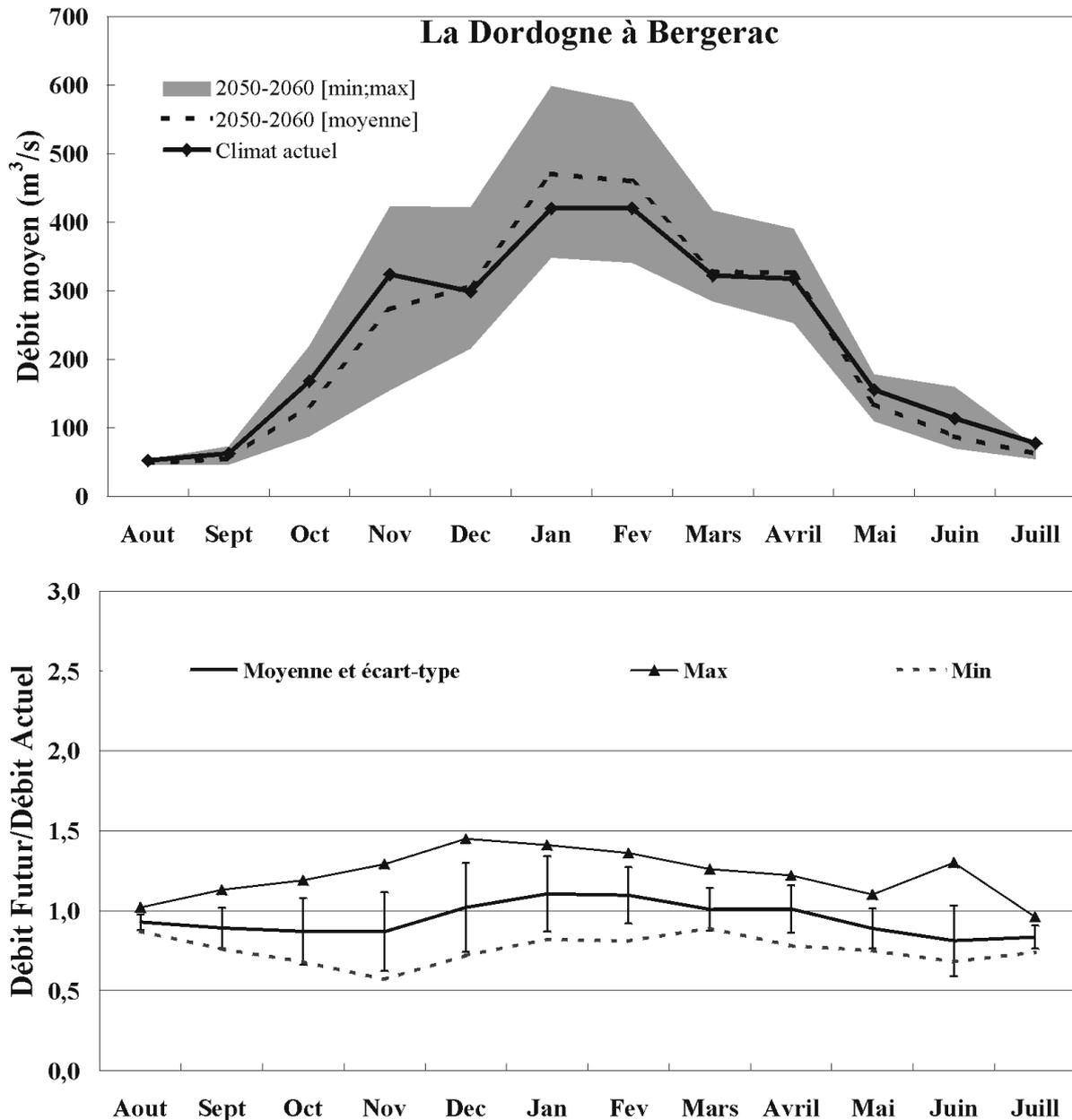


Figure 40: Haut - Débits moyens mensuels à Bergerac simulés sous climat actuel (1985-1995) comparés aux débits moyens mensuels simulés sous climat futur (valeur moyenne et courbe enveloppe des débits des 7 scénarii bornée par les valeurs extrêmes pour chaque mois). Bas - Rapports des débits moyens mensuels simulés sous climat futur sur les débits moyens mensuels simulés sous climat actuel (valeur moyenne des débits des 7 scénarii avec écart-type et valeurs extrêmes pour chaque mois).

IV.1.4 Le bassin de l'Adour

Les Figure 41, Figure 42, Figure 43 et Figure 44 présentent les impacts simulés en terme de débits et de rapports futur/actuel aux stations d'Estirac, Aire, Audon et St Vincent sur l'Adour. Les impacts sur les débits d'étiage sont en valeur moyenne du même ordre de grandeur que pour les autres bassins bien que leur dispersion semble moins forte. Les impacts au mois de Juillet sont, ainsi qu'il a été observé sur le tableau 3 pour tous les bassins, légèrement plus forts que pour les autres mois de l'étiage et leur dispersion est aussi plus grande, ce qui se retrouve partout sur le bassin sauf pour St Vincent. Pour cette station la nappe des Landes semble jouer un rôle régulateur qui provoque une relative homogénéité de la valeur moyenne et de l'amplitude de dispersion tout au long de l'étiage.

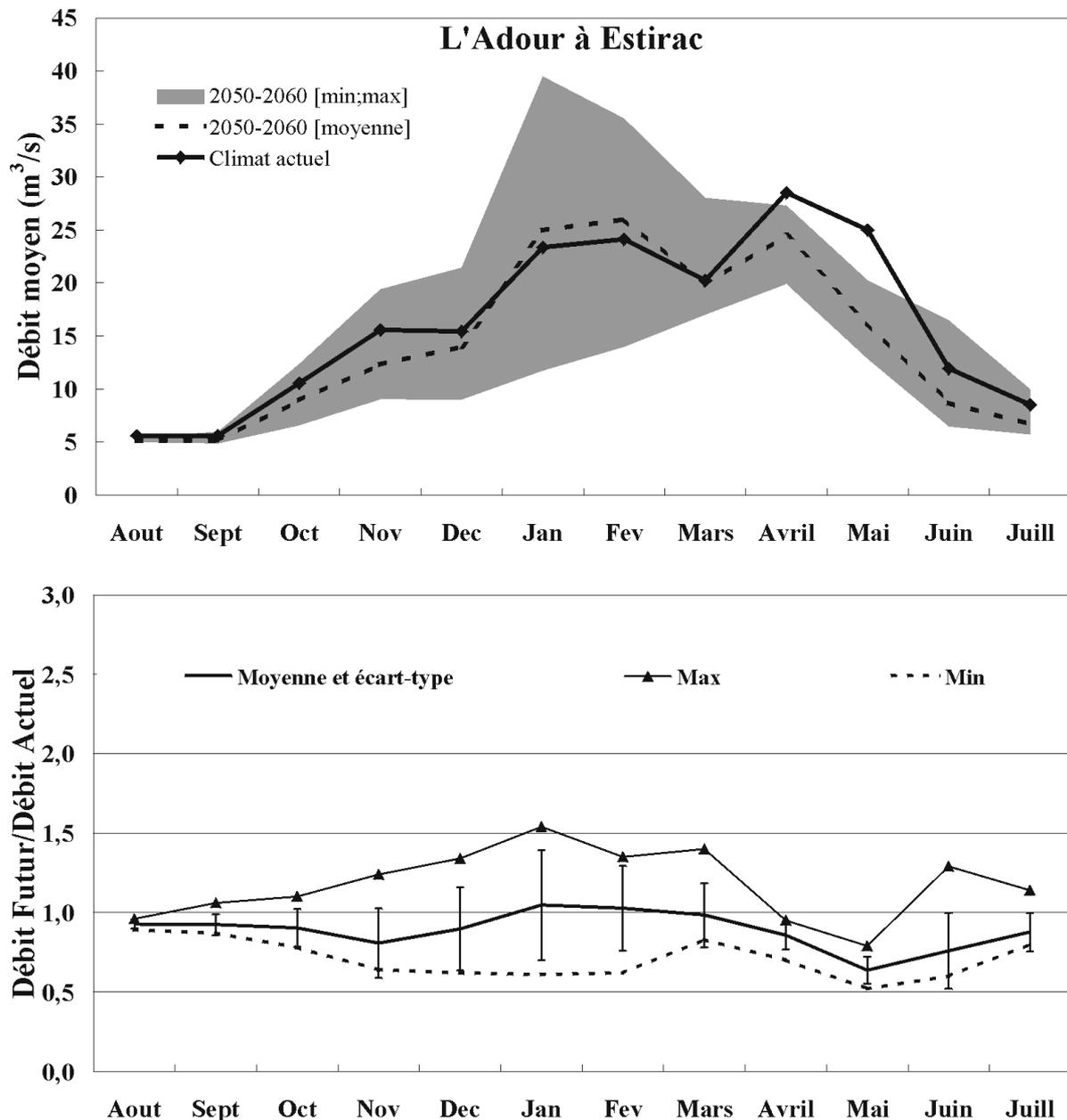


Figure 41: Haut - Débits moyens mensuels à Estirac simulés sous climat actuel (1985-1995) comparés aux débits moyens mensuels simulés sous climat futur (valeur moyenne et courbe enveloppe des débits des 7 scénarii bornée par les valeurs extrêmes pour chaque mois). Bas - Rapports des débits moyens mensuels simulés sous climat futur sur les débits moyens mensuels simulés sous climat actuel (valeur moyenne des débits des 7 scénarii avec écart-type et valeurs extrêmes pour chaque mois).

L'impact de la fonte des neiges est bien visible pour la station Estirac, qui est la plus haute du bassin. Il est logiquement moins fort que pour les stations amont de la Garonne qui drainent une surface plus petite et où la part de zone de montagne est plus grande. On observe cependant que contrairement à ces dernières, l'impact est nettement plus fort pour le mois de mai que pour le mois de juin. Ceci est certainement dû à la variabilité spatiale des scénarii à haute résolution étant donné que, pour le mois de juin, on observe une plus grande dispersion des impacts sur ce bassin que pour les bassins amont de la Garonne. Cette variabilité peut aussi être la cause du fort impact négatif observé sur ce bassin en novembre, que l'on ne retrouve pas aussi clairement sur les autres stations, ainsi que les faibles impacts observés au cours des mois d'hiver.

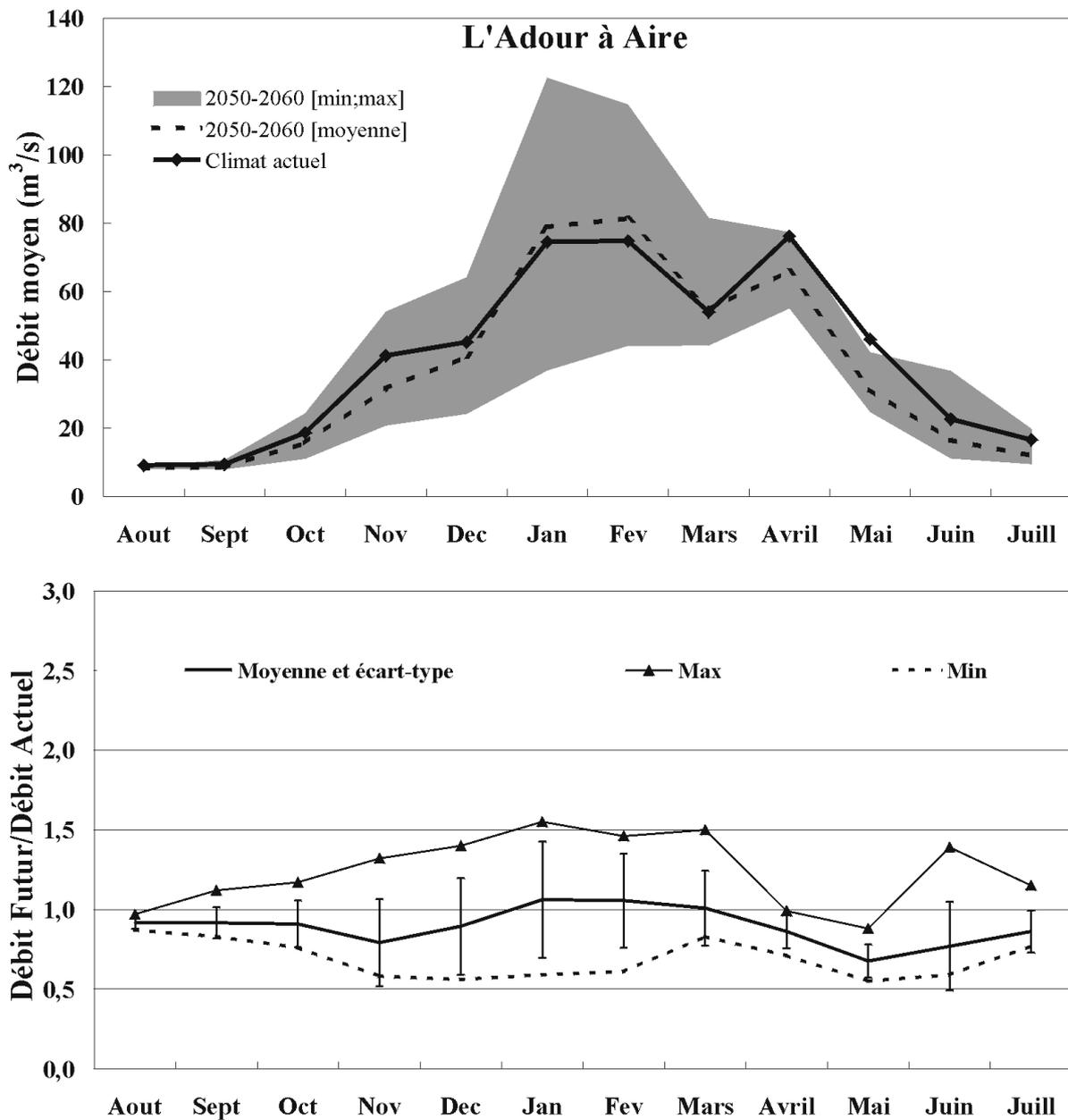


Figure 42: Haut - Débits moyens mensuels à Aire simulés sous climat actuel (1985-1995) comparés aux débits moyens mensuels simulés sous climat futur (valeur moyenne et courbe enveloppe des débits des 7 scénarii bornée par les valeurs extrêmes pour chaque mois). Bas - Rapports des débits moyens mensuels simulés sous climat futur sur les débits moyens mensuels simulés sous climat actuel (valeur moyenne des débits des 7 scénarii avec écart-type et valeurs extrêmes pour chaque mois).

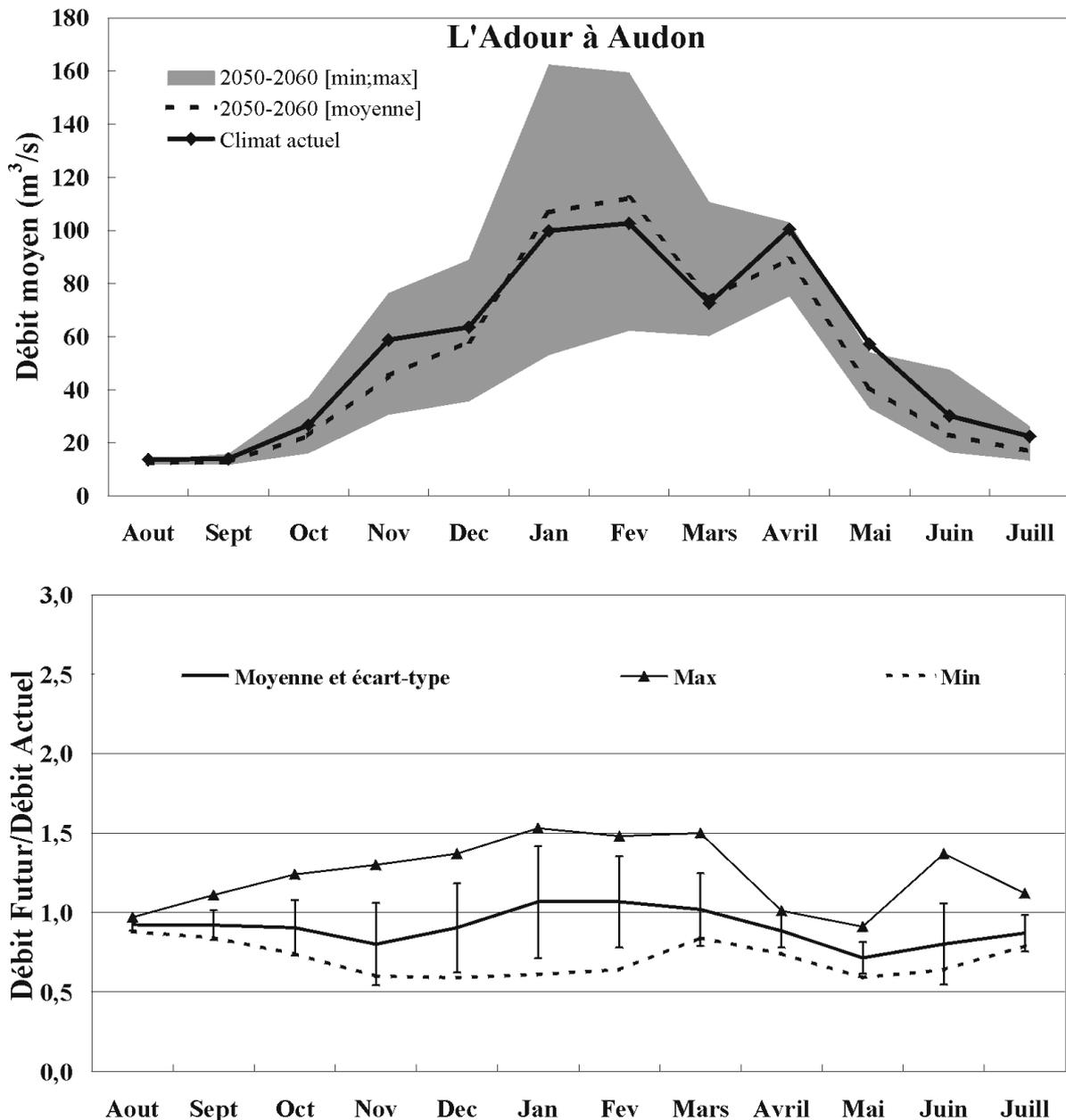


Figure 43: Haut - Débits moyens mensuels à Audon simulés sous climat actuel (1985-1995) comparés aux débits moyens mensuels simulés sous climat futur (valeur moyenne et courbe enveloppe des débits des 7 scénarii bornée par les valeurs extrêmes pour chaque mois). Bas - Rapports des débits moyens mensuels simulés sous climat futur sur les débits moyens mensuels simulés sous climat actuel (valeur moyenne des débits des 7 scénarii avec écart-type et valeurs extrêmes pour chaque mois).

En ce qui concerne la station de St Vincent, fortement influencée par la présence de la nappe des Landes, on peut observer que les impacts sont parmi les plus faibles observés en valeur moyenne tout au long de l'année. Ils sont aussi homogènes puisque leur dispersion est relativement constante. Ceci est certainement relié au rôle régulateur de la nappe qui est rechargée par les précipitations d'hiver et qui maintient les étiages en été. On observe d'ailleurs dans le Tableau 3 que cette station enregistre les rapports les plus proches de 1 des quatre stations situées sur l'Adour pendant l'étiage.

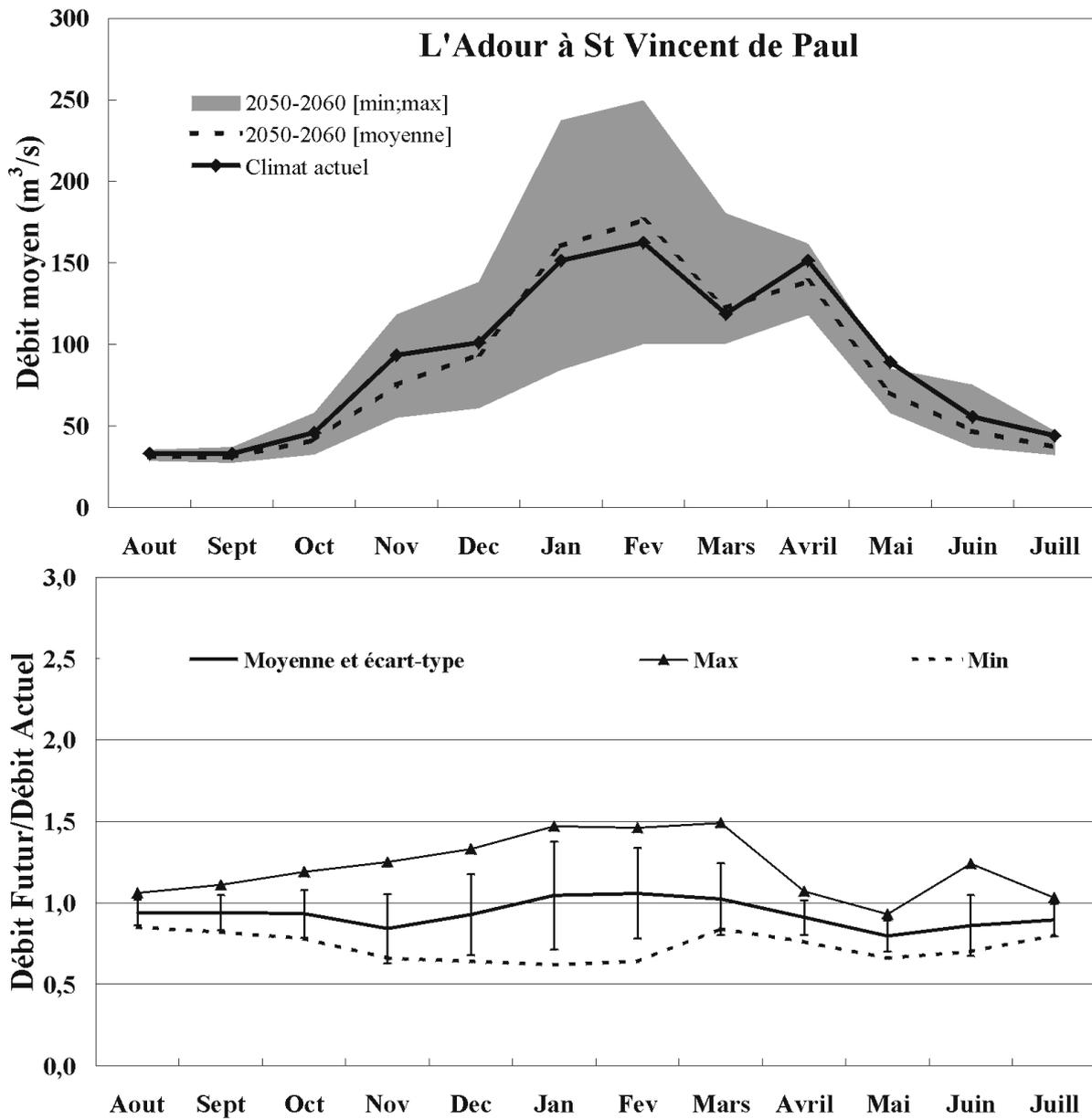


Figure 44: Haut - Débits moyens mensuels à St Vincent de Paul simulés sous climat actuel (1985-1995) comparés aux débits moyens mensuels simulés sous climat futur (valeur moyenne et courbe enveloppe des débits des 7 scénarii bornée par les valeurs extrêmes pour chaque mois). Bas - Rapports des débits moyens mensuels simulés sous climat futur sur les débits moyens mensuels simulés sous climat actuel (valeur moyenne des débits des 7 scénarii avec écart-type et valeurs extrêmes pour chaque mois).

IV.1.5 Les bassins des Gaves

Les Figure 45 et Figure 46 présentent les impacts simulés en termes de débits et de rapports futur/actuel aux stations d'Escos sur le Gave d'Oloron et de Berenx sur le Gave de Pau. Les impacts en étiage sont du même type que pour les autres bassins. Les bassins drainés sont de relativement petite taille et contiennent aussi des zones de montagne. Les impacts de la fonte de neige au printemps observées à Berenx sont similaires à celles observées sur l'Adour, avec un impact maximum pour le mois de juin. A Escos, bassin plus éloigné de celui de l'Adour, ce maximum se situe au mois de mai. Bien que de manière générale les impacts soient plus forts qu'à Saint Vincent sur l'ensemble de l'année, on observe qu'à ces deux stations ils présentent les plus faibles dispersions du bassin, signe d'homogénéité des scénarii sur cette région.

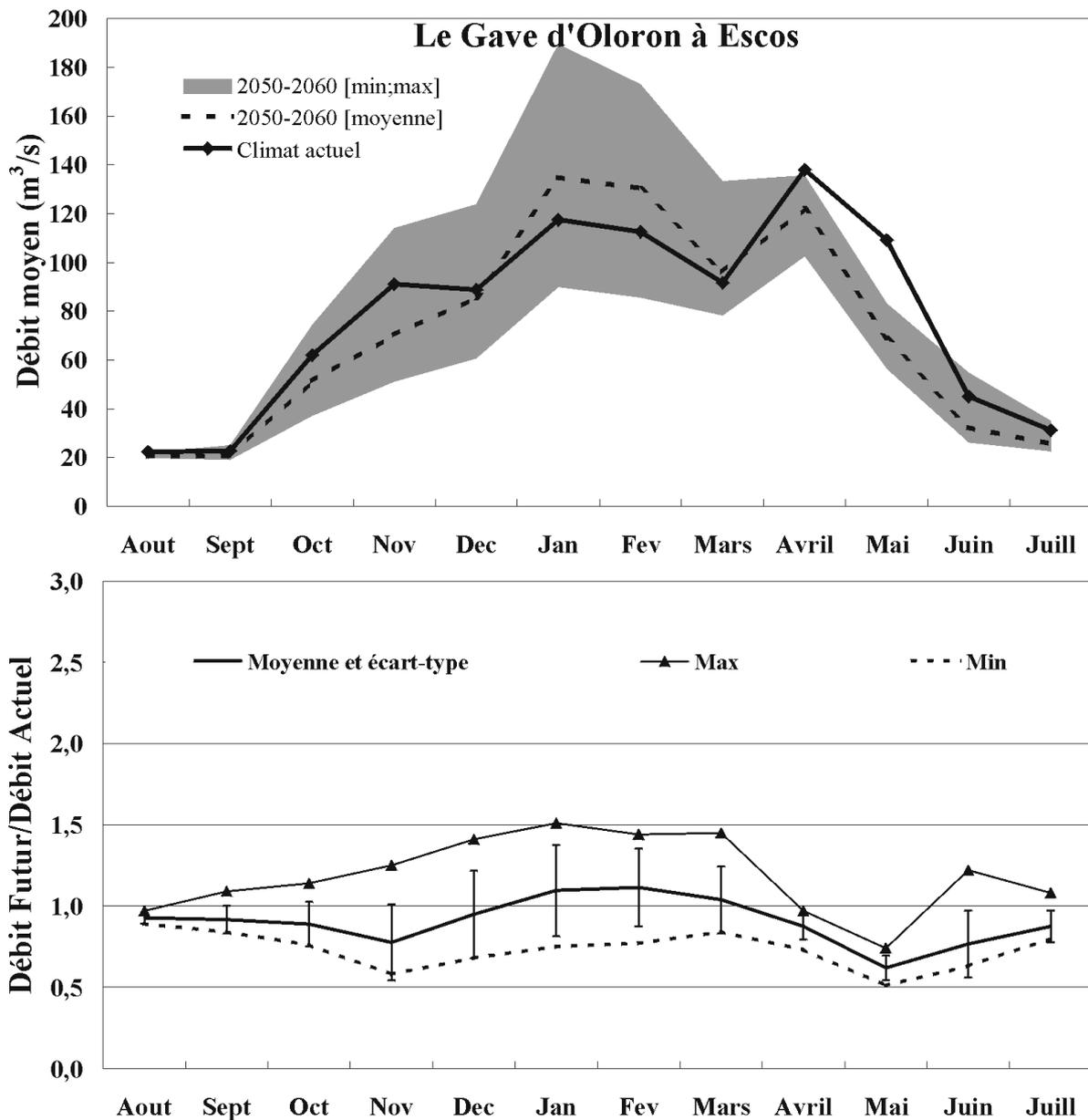


Figure 45: Haut - Débits moyens mensuels à Escos simulés sous climat actuel (1985-1995) comparés aux débits moyens mensuels simulés sous climat futur (valeur moyenne et courbe enveloppe des débits des 7 scénarii bornée par les valeurs extrêmes pour chaque mois). Bas - Rapports des débits moyens mensuels simulés sous climat futur sur les débits moyens mensuels simulés sous climat actuel (valeur moyenne des débits des 7 scénarii avec écart-type et valeurs extrêmes pour chaque mois).

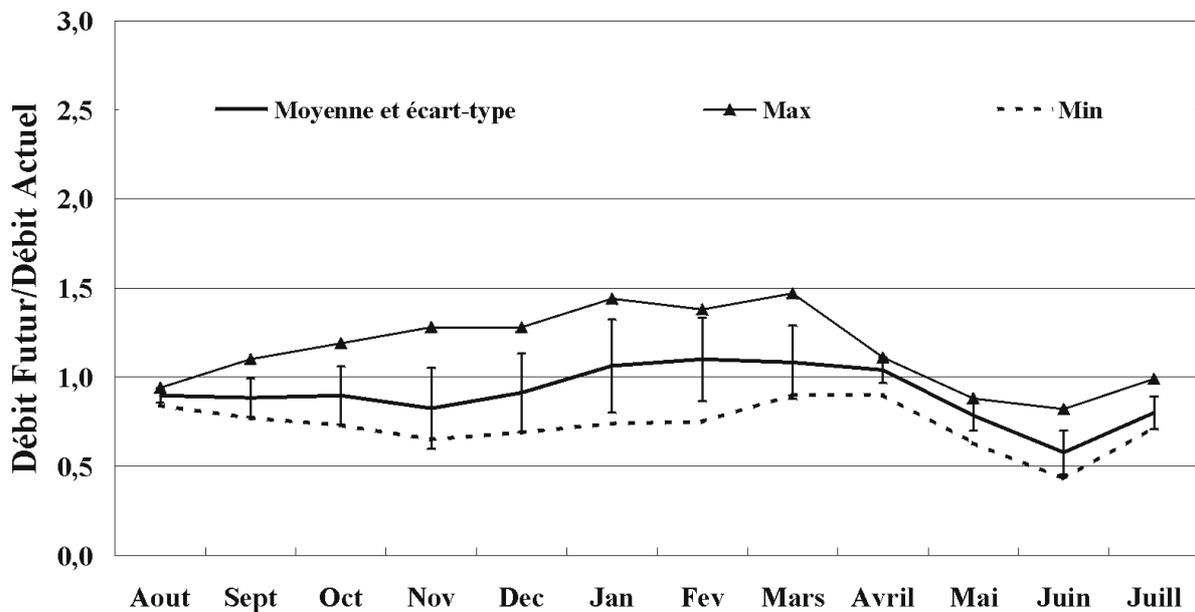
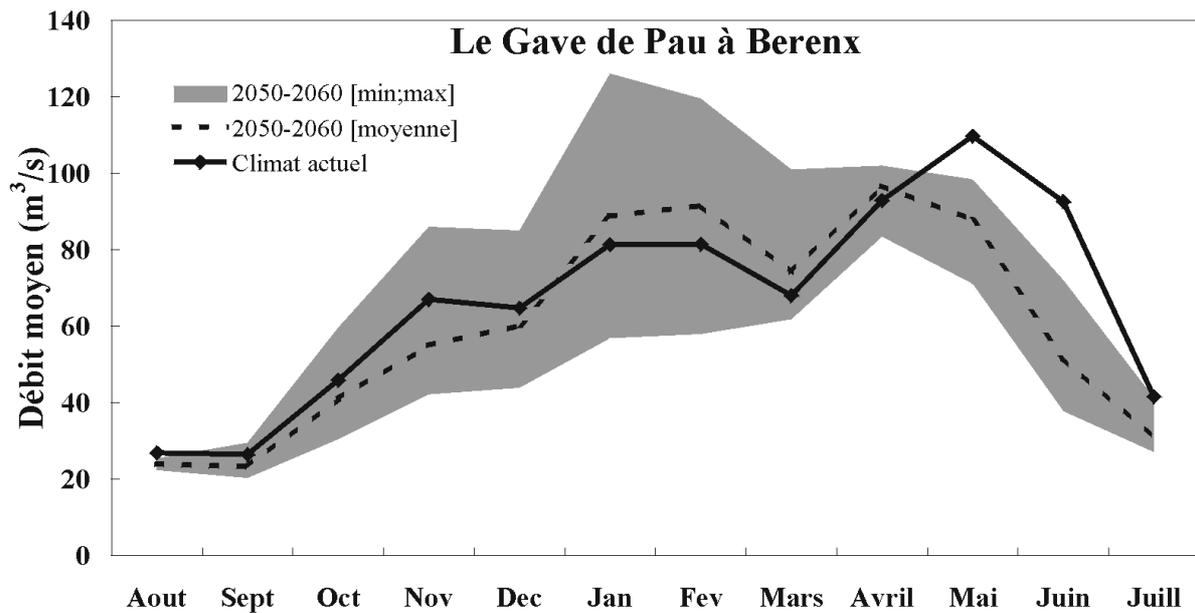


Figure 46: Haut - Débits moyens mensuels à Berenx simulés sous climat actuel (1985-1995) comparés aux débits moyens mensuels simulés sous climat futur (valeur moyenne et courbe enveloppe des débits des 7 scénarii bornée par les valeurs extrêmes pour chaque mois). Bas - Rapports des débits moyens mensuels simulés sous climat futur sur les débits moyens mensuels simulés sous climat actuel (valeur moyenne des débits des 7 scénarii avec écart-type et valeurs extrêmes pour chaque mois).

IV.2 Résultats pour les années extrêmes

Après avoir détaillé les résultats sur l'ensemble de la période, voyons à présent l'impact des scénarii sur deux années extrêmes du point de vue climatique de la décade 1985-1995.

Comme on peut le voir sur le Tableau 6, l'année la plus sèche et la plus humide (en considérant les cumuls de précipitation de août à juillet) sont respectivement l'année 1989-90 et l'année 1993-1994.

Années	Precip. Moy.
1985-1986	869
1986-1987	946
1987-1988	1253
1988-1989	740
1989-1990	804
1990-1991	930
1991-1992	1018
1992-1993	1173
1993-1994	1310
1994-1995	1119

Tableau 6: Cumuls de précipitations moyens sur le bassin Adour Garonne.

Les Tableau 7 et Tableau 8 présentent les résultats de l'application des scénarii en termes de rapports pour les mois d'été de ces deux années extrêmes. Les rapports moyens sur la période d'été obtenus pour l'année sèche sont en général supérieurs à ceux obtenus pour l'année humide.

L'année humide (Tableau 7) subit donc un fort impact, qui est relié à la sensibilité des écoulements de type rapide (provoqués par les précipitations ou la fonte des neiges) aux anomalies climatiques. Ainsi, de même que nous avons observé des impacts en moyenne plus importants au mois de juillet qu'au mois d'août, les impacts relatifs sur les années humides sont beaucoup plus forts que sur les années sèches. Ces impacts sont néanmoins très variables en fonction du scénarii comme en témoignent la valeur moyenne des écarts-types de 0,23 (sauf pour Villemur probablement à cause des réservoirs karstiques).

Station	Qfutur/Qactuel moyen sur l'été (juillet - octobre)	Ecart-type	Qmin futur/Qmin actuel moyen	Ecart-type
Foix	0,88	0,21	0,93	0,03
Auterive	0,87	0,25	0,93	0,03
Valentine	0,89	0,21	0,89	0,05
Roquefort	0,82	0,23	0,91	0,04
Portet	0,85	0,25	0,91	0,04
Lamagistère	0,84	0,23	0,89	0,04
Tonneins	0,81	0,22	0,89	0,04
Villemur	0,87	0,08	0,92	0,03
Loubejac	0,70	0,20	0,77	0,08
Estirac	0,85	0,24	0,94	0,03
Aire	0,86	0,28	0,94	0,03
Audon	0,88	0,27	0,94	0,03
St Vincent	0,87	0,21	0,91	0,06
Escos	0,84	0,26	0,94	0,03
Berenx	0,92	0,25	0,90	0,06
Bergerac	0,76	0,28	0,90	0,06

Tableau 7: Moyennes, écart-types, minimums et maximums des rapports de débits moyens mensuels simulés sous climat futur (2050-2060) aux débits moyens mensuels simulés sous climat actuel (1985-1995), pour les 16 stations, les 7 scénarii et pour une année humide.

En ce qui concerne l'année sèche (Tableau 8), il apparaît que les anomalies climatiques ont un impact très limité sur les étiages en valeur relative, et la variabilité entre les scénarii est faible (valeur moyenne des écarts-types de 0,08). Ceci s'explique par le fait que lorsqu'on se trouve en année sèche, les volumes d'eau mobilisés pendant l'étiage correspondent aux régimes de déstockage des réservoirs naturels temporaires. Comme la plupart des scénarii prévoient des anomalies de précipitation positives en hiver, ces réservoirs se remplissent pendant cette période et se trouvent alors dans une situation favorable en été quelque soit le cumul pluviométrique annuel. Seul les scénarii qui prévoient des sécheresses en hiver (anomalies de précipitation négatives associées à des anomalies de température positives), comme par exemple le LMD_LR, peuvent fortement perturber les débits en fin d'étiage (cf. Tableau 3 et Tableau 4).

Station	Qfutur/Qactuel moyen sur l'été (juillet - octobre)	Ecart-type	Qmin futur/Qmin actuel moyen	Ecart-type
Foix	0,93	0,04	0,91	0,03
Auterive	0,93	0,05	0,92	0,03
Valentine	0,85	0,11	0,86	0,07
Roquefort	0,89	0,08	0,89	0,03
Portet	0,88	0,08	0,89	0,05
Lamagistère	0,89	0,07	0,92	0,05
Tonneins	0,88	0,06	0,93	0,04
Villemur	0,94	0,03	0,96	0,02
Loubejac	0,81	0,07	0,97	0,02
Estirac	0,89	0,11	0,94	0,04
Aire	0,88	0,12	0,94	0,03
Audon	0,89	0,09	0,95	0,03
St Vincent	0,94	0,09	0,97	0,08
Escos	0,90	0,07	0,94	0,03
Berenx	0,89	0,08	0,88	0,07
Bergerac	0,86	0,05	0,94	0,04

Tableau 8: Moyennes, écart-types, minimums et maximums des rapports de débits moyens mensuels simulés sous climat futur (2050-2060) aux débits moyens mensuels simulés sous climat actuel (1985-1995), pour les 16 stations, les 7 scénarii et pour une année sèche.

IV.3 Résultats pour la période 2025-2035 et le scénario continu

Nous avons détaillé l'estimation des impacts moyens pour la période 2050-2060. Les anomalies fournies par le scénario continu du CNRM nous ont aussi permis d'estimer les impacts pour la période comprise entre 1995 et 3005. L'analyse de l'évolution de ces derniers peut nous renseigner sur les tendances associées à ces impacts sur l'ensemble de la période 1985 – 3005 et, notamment, sur les impacts pour la période 2025-2035 dans le cadre de ce scénario. Le scénario continu du CNRM étant parmi ceux qui prédisent les plus fortes diminutions des débits sur l'ensemble de l'année (Figure 30), il fournit ce que l'on peut considérer comme une estimation parmi les plus pessimistes des impacts que subirait le bassin.

Les Figure 47, Figure 48, Figure 49 et Figure 50 présentent, pour 4 stations considérées comme représentatives des différentes situations géographiques rencontrées, l'évolution des valeurs saisonnières moyennées par décades des précipitations totales et nivales, de l'évaporation et des débits simulés à partir du forçage estimé par le scénario continu pour la période comprise entre 1995 et 3005.

Les courbes des débits moyens saisonniers montrent des variations au cours du temps différentes en fonction de la saison considérée, bien que la tendance générale soit à la décroissance. Il est cependant remarquable de voir que les rapports des débits simulés en 2025-2035 sont très proches de ceux simulés en 2055-2065 sur l'ensemble des stations du bassin. Ainsi, d'après ce scénario, des impacts similaires à ceux que nous avons estimé pour 2050 pourraient déjà être ressentis en 2030.

La courbe d'été des débits, correspondant à la période d'étiage, présente pour les quatre stations une décroissance relativement linéaire au cours du temps, traduisant une diminution des débits d'étiage à partir de la décade 2015-2025. Le modèle simule cependant une augmentation importante des débits d'étiage pour la période précédente, en particulier pour la décade 1995-2005, qui est liée aux précipitations excédentaires que l'on observe au printemps. Ces précipitations rechargent les réservoirs naturels profonds qui se vidangent en été, donnant lieu à un écoulement de base plus important.

Les autres courbes saisonnières de débits ont un comportement beaucoup plus variable dans le temps, mais aussi dans l'espace puisque, par exemple, l'allure des courbes du bassin de Bergerac est très différente de celle des autres bassins. Cette variabilité s'explique en général par la variabilité saisonnière des précipitations liquides et neigeuses et de la température simulées par ce scénario de haute résolution.

Malgré la tendance générale qui apparaît sur ces figures, ce scénario peut présenter des impacts très différents de ceux de 2025-35 et 2055-65. On observe par exemple des décades où le modèle simule une augmentation des débits où tout au moins un ralentissement de la décroissance. Nous avons vu dans ce qui précède, le cas des décades précédant celle de 2025 (1995-2005 et 2005-2015). De la même manière, les décades comprises entre 2025 et 2055 (2035-45 et 2045-55) présentent des rapports très supérieurs à ceux que l'on observe sur les décades précédentes et suivantes, à toutes les saisons y compris pendant l'étiage. Pour la décade 2035-2045, cela s'explique par une remontée de la quantité de précipitations sur l'ensemble de l'année, sauf en hiver. L'évaporation supérieure à celle de la décade précédente couplée à la fonte rapide de la neige, provoque des débits plutôt faibles au printemps et en été par rapport aux débits d'automne et d'hiver. La décade suivante présente au contraire une nette augmentation de la quantité de précipitations et surtout de neige. La couverture neigeuse qui ne fond qu'au printemps fait alors remonter les débits de cette saison et favorise aussi la remontée des débits d'étiage de la même manière que pour les décades précédant 2025.

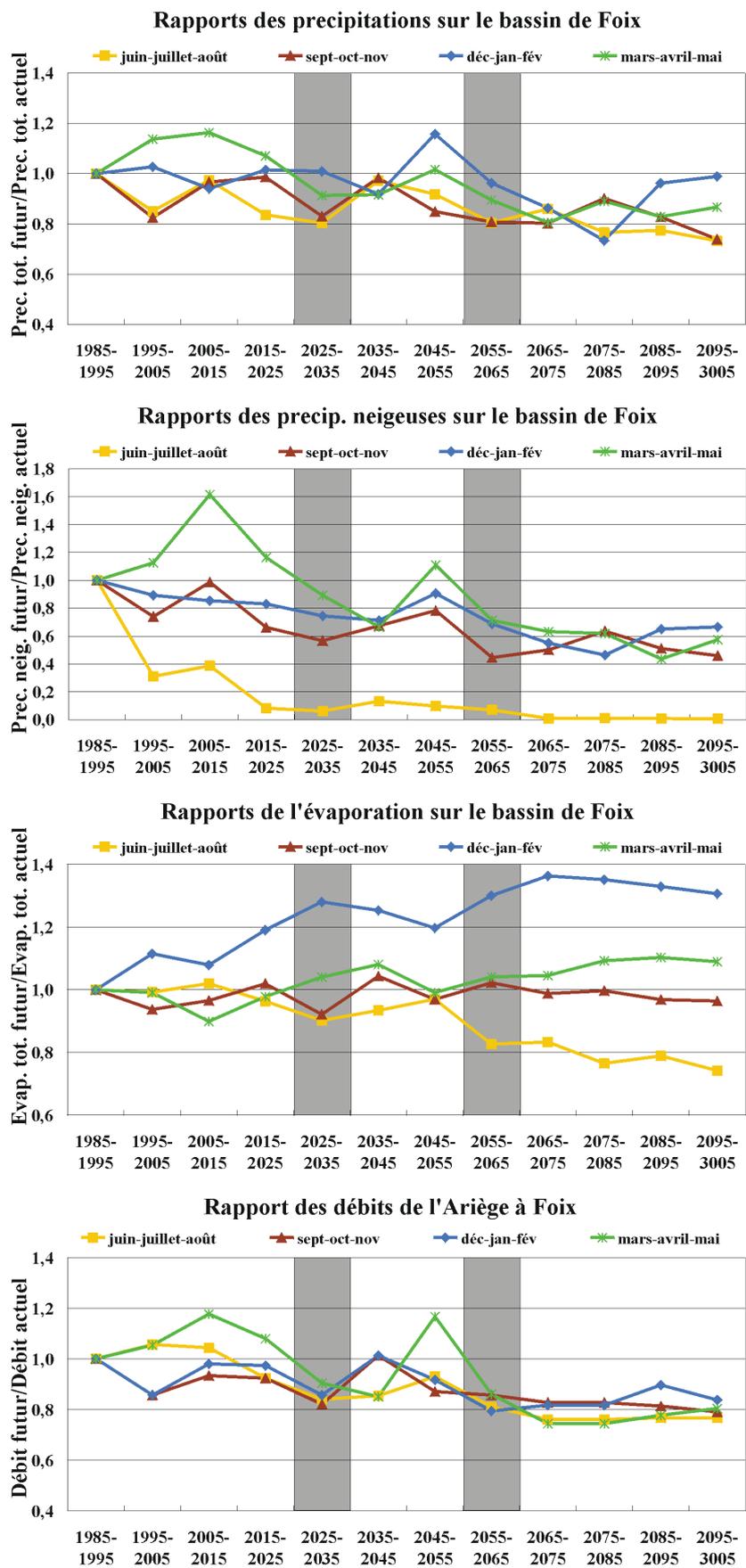


Figure 47: Evolution des rapports futur/actuel des valeurs moyennes saisonnières simulées pour le scénario continu, des précipitations totales, neigeuses, de l'évaporation et des débits à Foix.

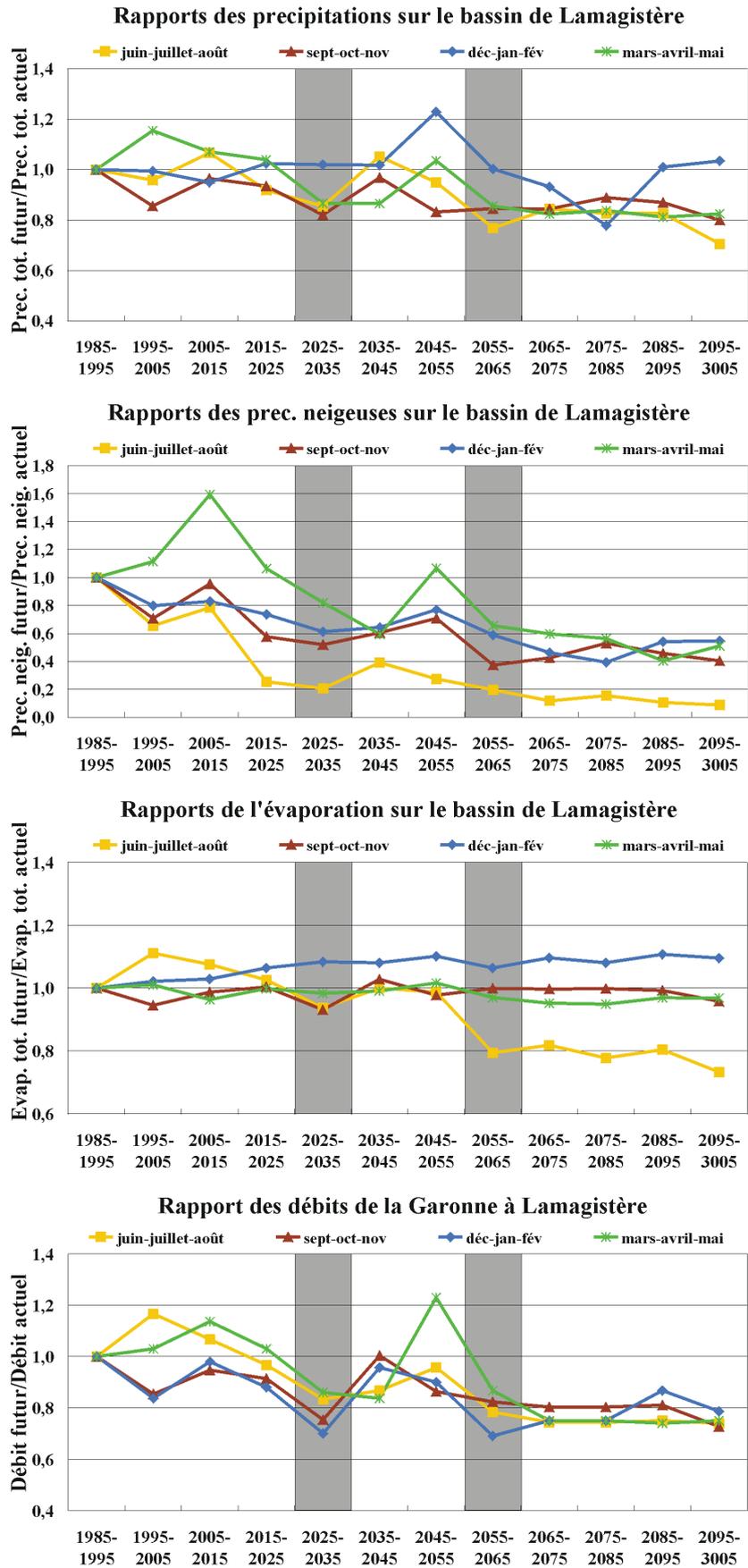


Figure 48: Evolution des rapports futur/actuel des valeurs moyennes saisonnières simulées pour le scénario continu, des précipitations totales, neigeuses, de l'évaporation et des débits à Lamagistère.

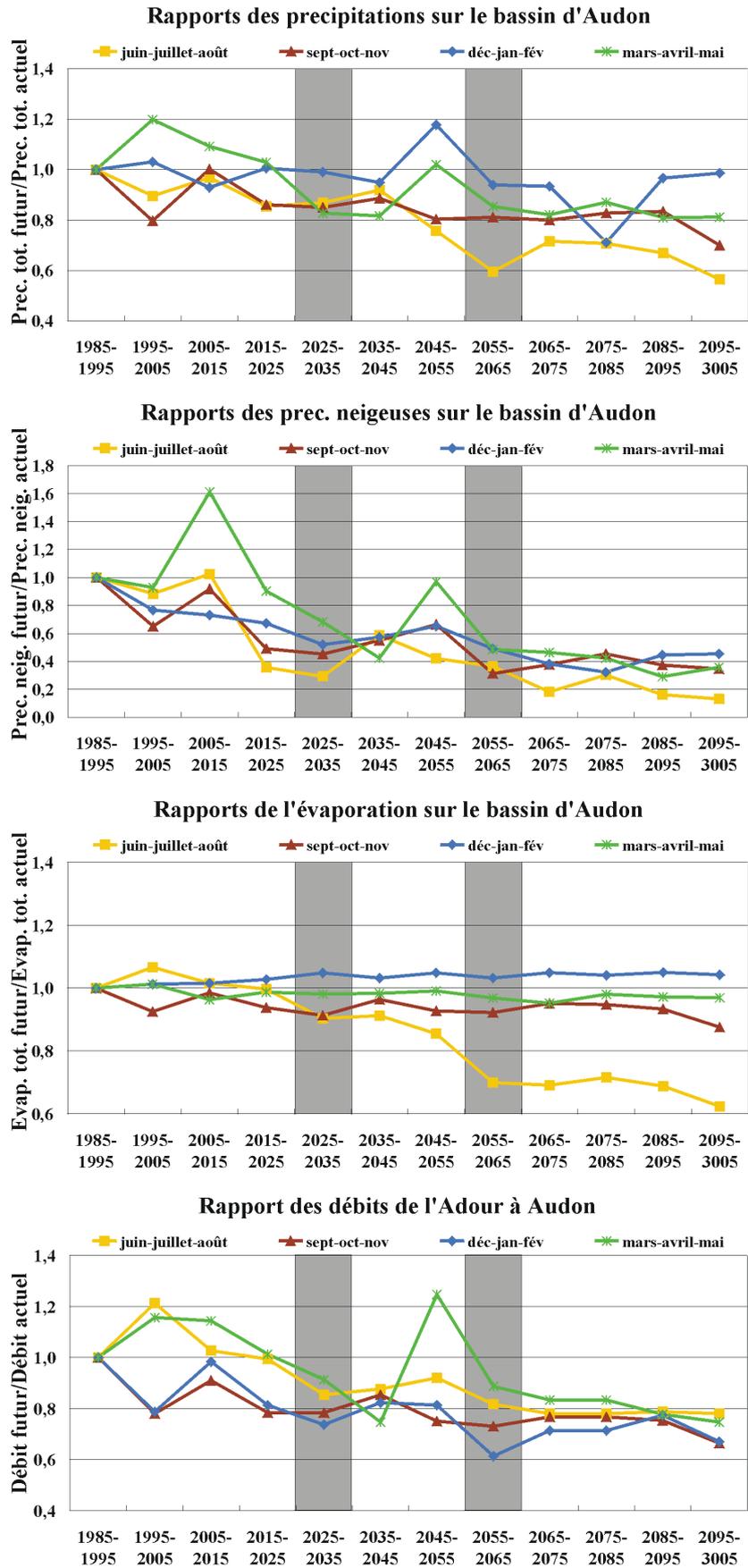


Figure 49: Evolution des rapports futur/actuel des valeurs moyennes saisonnières simulées pour le scénario continu, des précipitations totales, neigeuses, de l'évaporation et des débits à Audon.

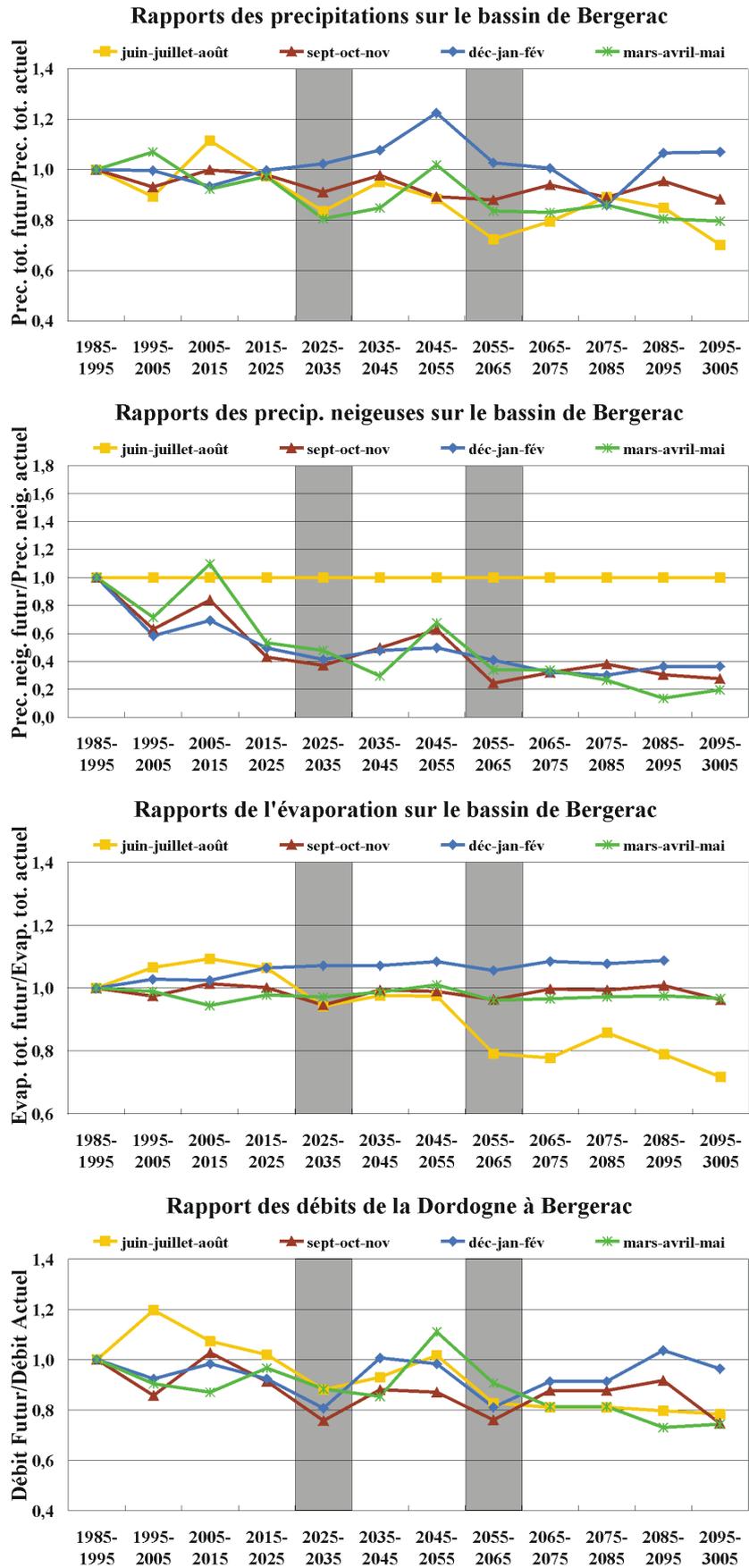


Figure 50: Evolution des rapports futur/actuel des valeurs moyennes saisonnières simulées pour le scénario continu, des précipitations totales, neigeuses, de l'évaporation et des débits à Bergerac.

IV.4 Etude de sensibilité au climat des bassins de l'Ariège à Foix et de l'Adour à Aire.

Une étude de sensibilité du modèle à des variations de la température et de la précipitation entre deux valeurs extrêmes a été conduite sur les bassins de l'Ariège à Foix et de l'Adour à Aire, de manière à analyser la représentativité des impacts des 7 scénarii.

Pour pouvoir réaliser un grand nombre de simulations, il était nécessaire que leur temps de calcul soit suffisamment court, sous peine de ne pas pouvoir explorer un intervalle de variation des températures et des précipitations suffisamment grand pour englober les valeurs des anomalies obtenues avec les différents scénarii. C'est pourquoi une version simplifiée du modèle SIM a été développée sur ces deux bassins.

La taille de ces deux bassins, qui couvrent plusieurs mailles de la grille décrivant le bassin Adour Garonne, a été ramenée à une seule maille équivalente pour chacun d'entre eux. Le forçage atmosphérique connu au pas de temps tri-horaire sur 10 ans et sur chacune des mailles des bassins a ensuite été moyenné pour obtenir un forçage tri-horaire sur 1 an sur la maille équivalente à chaque bassin. De même, les valeurs des différents paramètres du sol et de la végétation sur la maille équivalente ont été agrégées suivant les règles décrites dans Noilhan et Lacarrère (1995).

Pour chaque maille équivalente, 81 simulations ont ainsi été effectuées sur une année, en appliquant au forçage moyen sur la maille, des anomalies variant entre -2°C et $+6^{\circ}\text{C}$ par intervalles de 1°C pour la température et entre -80% et $+80\%$ par intervalles de 10% pour la précipitation. Chacune de ces simulations a été précédée d'une phase de mise à l'équilibre du modèle sur un an, pour que les résultats ne soient pas influencés par l'état initial du sol et de la végétation.

Pour chaque simulation, la somme du drainage et du ruissellement, de l'équivalent en eau de la neige et de l'humidité du sol simulés par ISBA sur la maille ont été extraites, pour pouvoir ensuite analyser leur évolution en fonction des valeurs des anomalies appliquées. Il est à noter que l'on ne simule ici aucun transfert avec MODCOU puisque la simulation s'effectue sur une seule maille.

Les Figure 51 et Figure 52 présentent les résultats de cette étude de sensibilité pour chacun des deux bassins et pour les saisons d'hiver et d'été. Les variables simulées sont: *l'écoulement* (défini ici comme la somme du ruissellement et drainage produits sur la maille par ISBA); l'équivalent en eau de la neige (w_s) et l'indice d'humidité du sol (*SWI*). Les résultats sont présentés sous la forme de rapports entre la valeur de la variable simulée sous perturbation des anomalies et celle de la variable simulée sans perturbation. Sur les figures, les valeurs de ce rapport varient entre 0 et 4 pour des commodités de représentation, les valeurs supérieures à 4 apparaissant en blanc. Les anomalies de température et de précipitation de chaque scénario moyennées pour chaque bassin, ont été représentées pour chaque saison. De cette manière nous pouvons les situer par rapport à la réponse des bassins aux variations de température de précipitation.

Pour le bassin de l'Ariège à Foix, la Figure 51 montre que l'écoulement produit par ce bassin est très sensible aux variations de température et de précipitation. En été, il augmente avec la précipitation tout en restant relativement constant avec la température. En hiver, la présence de neige modifie fortement sa réponse puisque pour les très faibles températures, le stockage d'eau sous forme de neige limite la production d'écoulement. La quantité de neige simulée est logiquement fortement liée à la température et dans une moindre mesure à la précipitation. Elle atteint des valeurs maximales pour des précipitations importantes dans les atmosphères les plus froides. Il est à noter que le manteau neigeux simulé sur le bassin disparaît pour des températures supérieures à 2°C , température au niveau de laquelle se situent la majorité des scénarii.

En ce qui concerne l'humidité des sols, caractérisées par l'indice de caractérisation (*SWI*) qui se calcule de la manière suivante (eq. 10):

$$(10) \quad SWI = \frac{(w - w_{wilt})}{(w_{fc} - w_{wilt})}$$

avec w le contenu en eau du sol, w_{wilt} le contenu en eau du sol lorsque l'on se trouve au point de flétrissement et w_{fc} le contenu en eau du sol lorsque l'on se trouve à la capacité au champ.

La Figure 51 montre que le *SWI* est logiquement beaucoup plus sensible à la variation de la quantité de précipitation qu'à celle de la température sauf lorsque le sol contient suffisamment d'eau pour que les processus d'évaporation prennent de l'importance.

La position des anomalies des différents scénarii indique qu'en termes de neige, tous les scénarii ont un impact similaire qui se traduit par une quasi-disparition du manteau neigeux. Ceci renforce la probabilité d'assister à une forte modification du régime d'écoulement des bassins de montagne quelque soit le scénario climatique.

En termes d'humidité des sols, nous voyons qu'en hiver les scénarii se situent dans une gamme de sensibilité n'excluant pas la possibilité d'une réduction de l'eau du sol. En été par contre tous les scénarios présentent des impacts clairement négatifs, qui peuvent se traduire par des diminutions importantes de l'humidité du sol, notamment dans le cas du Scénario Continu (SC) et du scénario Lmd_HR (LH).

En ce qui concerne les écoulements produits sur le bassin en hiver, même si la majorité des scénarii sont dans la gamme de sensibilité du modèle qui prévoient une augmentation de l'écoulement, on ne peut pas exclure une possibilité d'avoir une diminution en particulier dans le cas du Scénario Continu (SC). Les fortes variations de production d'écoulement que l'on peut observer entre les deux scénarii les plus extrêmes (Cnrm_HR (CH) et Scénario Continu (SC)), indiquent cependant qu'il y existe une forte incertitude autour de la prévision des impacts en fonction du scénario choisi. En été, cette incertitude est beaucoup moins grande puisque l'ensemble des scénarii provoquent une diminution plus ou moins forte de l'écoulement.

Pour le bassin de l'Adour à Aire (Figure 52), la faible proportion de surfaces susceptibles d'avoir un manteau neigeux semble limiter l'impact de la température sur les écoulements produits en hiver. En effet, même si un manteau neigeux peut rapidement apparaître pour des températures inférieures à 1°C, la faible surface qu'il peut recouvrir ne perturbera pas les écoulements sur le bassin. Les impacts liés à des perturbations de la température et de la précipitation sont cependant plus importants en hiver qu'en été. Ces observations sont aussi applicables à l'analyse des impacts sur l'humidité des sols.

En ce qui concerne les impacts des scénarii on observe, comme pour le bassin de Foix, que tous les scénarii ont un impact similaire sur le manteau neigeux, qui se traduit par sa quasi-disparition. L'impact sur l'humidité des sols est par contre très modéré puisque l'ensemble des scénarii provoquent de légères augmentations de l'humidité par rapport au climat présent.

L'intensité de l'impact des différents scénarii sur les écoulements produits est moindre que dans le cas de Foix du fait de la faible importance de la composante nivale. Il faut cependant noter d'une part, que le Scénario Continu (SC) provoque une diminution des écoulements plus forte qu'à Foix et que d'autre part, ce scénario n'est plus le seul à provoquer une diminution puisque ceux du Lmd HR (LH) et LR (LL) le provoquent eux aussi. En été par contre les impacts observés pour les différents scénarii sont de la même intensité que pour le bassin de Foix et traduisent aussi une diminution des écoulements.

Foix-Ariège

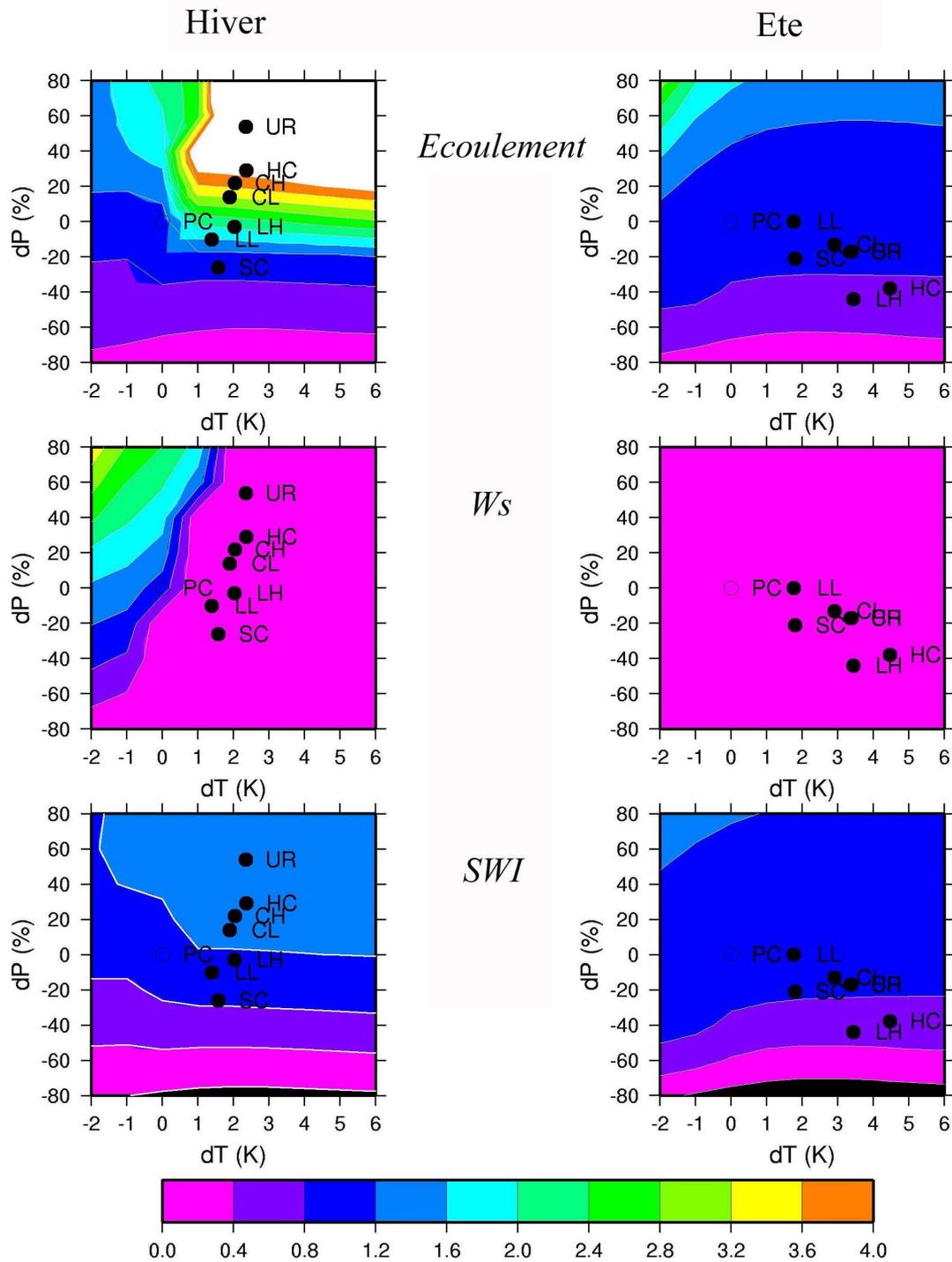


Figure 51: Impacts sur les *écoulements* (somme du ruissellement et du drainage produits par ISBA), le manteau neigeux (w_s : équivalent en eau de la neige) et l'humidité du sol (SWI : indice détaillé dans l'équation 10), des anomalies de température et de précipitation variant respectivement entre $[-2^{\circ}\text{C}; +6^{\circ}\text{C}]$ et entre $[-80\%; +80\%]$ sur une maille équivalente au bassin de l'Ariège à Foix. Les points correspondants aux anomalies des 7 scénarii climatiques utilisés ont été reportés (UR : U. reading ; HC : Hadley Center ; CL : CNRM_LR ; CH : CNRM_HR ; LL : LMD_LR ; LH : LMD_HR ; SC : Scénario Continu), ainsi que celui correspondant au climat présent (PC).

Aire-Adour

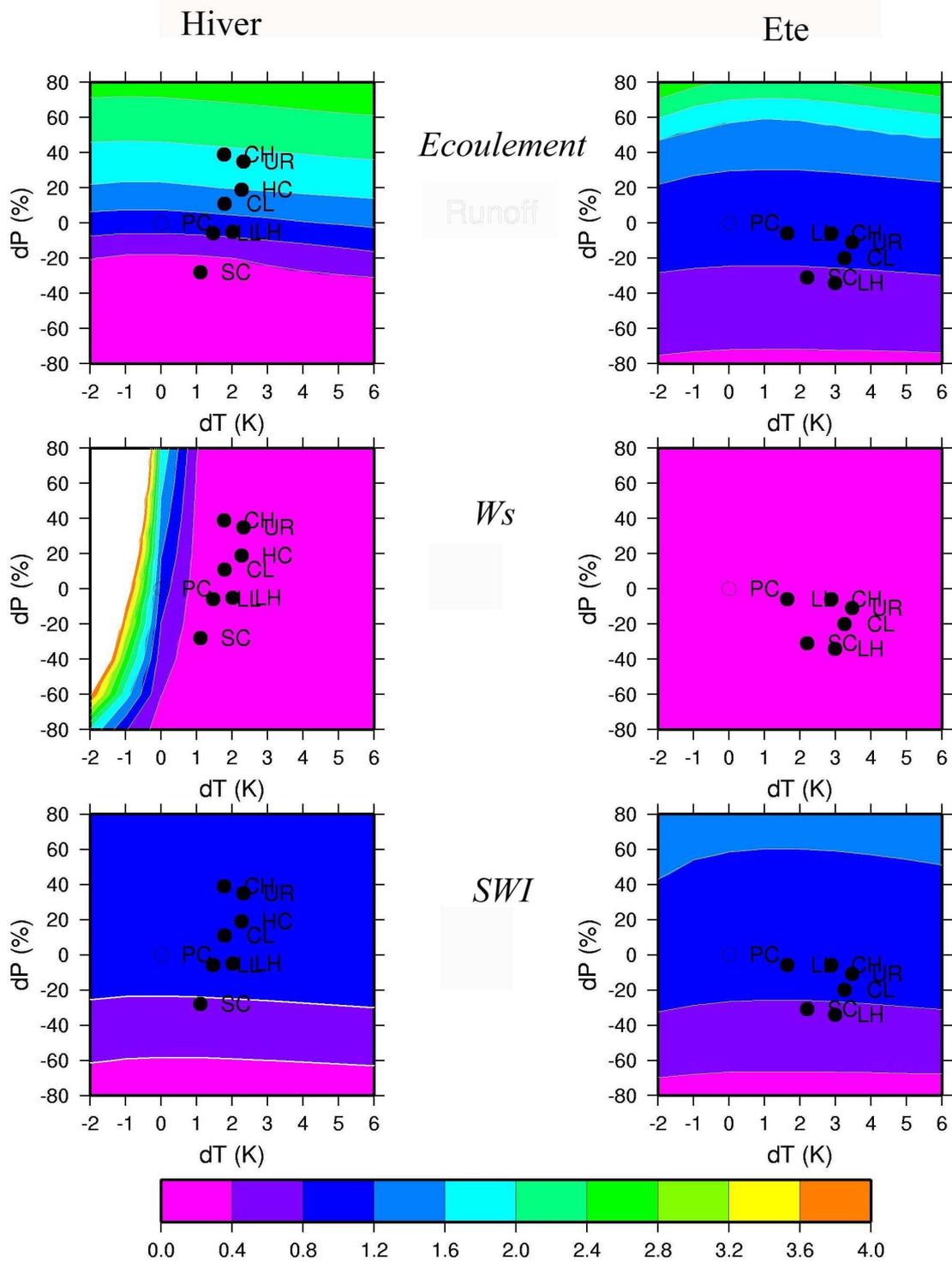


Figure 52: Impacts sur les *écoulements* (somme du ruissellement et du drainage produits par ISBA), le manteau neigeux (w_s : équivalent en eau de la neige) et l'humidité du sol (*SWI* : indice détaillé dans l'équation 10), des anomalies de température et de précipitation variant respectivement entre $[-2^{\circ}\text{C} ; +6^{\circ}\text{C}]$ et entre $[-80\% ; +80\%]$ sur une maille équivalente au bassin de l'Adour à Aire. Les points correspondants aux anomalies des 7 scénarii climatiques utilisés ont été reportés (UR : U. reading ; HC : Hadley Center ; CL : CNRM_LR ; CH : CNRM_HR ; LL : LMD_LR ; LH : LMD_HR ; SC : Scénario Continu), ainsi que celui correspondant au climat présent (PC).

V. Conclusion

Cette étude a été menée par le CNRM à la demande de l'Agence de l'eau Adour Garonne. Elle s'attache à déterminer les effets du changement climatique sur les ressources en eau du bassin, et plus spécifiquement des débits naturels d'étiage, à l'horizon 2025 et 2050.

Une synthèse bibliographique des principaux travaux effectués dans le monde sur cette question est tout d'abord proposée. Elle permet de présenter les hypothèses de changement climatique actuellement retenues par la communauté scientifique internationale.

Le système de modélisation hydrométéorologique **SIM** (SAFRAN-ISBA-MODCOU) choisi pour simuler le calcul des bilans énergétiques et hydrologiques sur le bassin Adour Garonne est ensuite présenté. Ce système se compose de trois modèles couplés: **SAFRAN**, un interpolateur d'observations qui permet de constituer le forçage atmosphérique (précipitations, température, humidité spécifique, pression atmosphérique, rayonnement, solaire et atmosphérique et vent) qui s'exerce sur le bassin sur une grille régulière est sur de longues périodes de temps; **ISBA** (Intéraction Sol-Biosphère-Atmosphère), le schéma de surface de Météo-France qui permet de simuler l'évolution du contenu en eau du sol et les principaux flux hydrologiques (évapotranspiration, drainage et ruissellement); **MODCOU**, un modèle hydrologique distribué qui permet de transférer les flux de drainage et de ruissellement fournis par ISBA, à travers les réseaux d'écoulement superficiels et souterrains. Ces modèles, qui s'appuient dans la mesure du possible sur des descriptions physiques des phénomènes hydrologiques, sont adaptés à cette étude dans la mesure où leurs paramétrisations sont relativement indépendantes des conditions climatiques.

Le modèle SIM a été appliqué avec succès au bassin Adour Garonne dans le cadre des travaux de doctorat de Sophie Morel au CNRM. Il a cependant fait l'objet d'une phase de calage particulière dans le cadre de la présente étude, pour simuler au mieux les écoulements pendant la période d'étiage sur la période actuelle. Ce calage a consisté à étalonner un coefficient contrôlant la production du flux de base du modèle sur les zones du bassin contenant des aquifères, car ceux-ci sont les principales sources d'alimentation des écoulements en période d'étiage. Pour ce faire, il a été procédé à un travail de naturalisation des débits, pour s'affranchir des influences des aménagements hydro-électriques et des prélèvements pour l'irrigation, susceptibles d'affecter les débits observés au niveau des 16 stations de référence choisies pour cette étude. Le calage du modèle a ensuite été fait sur la base des débits moyens d'étiage observés au niveau des 16 stations de référence. La comparaison des débits simulés après calage aux observations, a mis en évidence une amélioration significative des performances du modèle sur la période d'étiage.

Une fois le calage terminé, des anomalies climatiques de température et de précipitation ont été calculées au pas de temps mensuel, à partir des données fournies par 7 scénarii climatiques de différents modèles de circulation générale (MCGs) avec différentes résolutions spatiales, pour la période 2050-2060. Calculées par différence entre les valeurs fournies par les scénarii pour la période 2050-2060 et celles fournies par ces mêmes scénarii pour la période 1985-1995, elles ont été ensuite appliquées au forçage atmosphérique appliqué au bassin de manière à simuler les débits correspondants au climat modifié au niveau des stations de référence. La comparaison des débits résultants avec les débits simulés pour la période actuelle, a finalement permis de caractériser la nature des impacts sur les débits de la modification du climat induite par chaque scénario. De plus, un scénario décrivant l'évolution climatique continuellement de nos jours à 2100 a été considéré pour examiner les impacts hydrologiques possibles des 2025.

Nous pouvons dégager de l'analyse des résultats obtenus, les conclusions suivantes:

- L'ensemble des scénarii présentent, à l'horizon 2050, des impacts relativement homogènes en été se traduisant par une diminution moyenne de 11% des débits d'été, avec un écart-type de 8%. Le reste de l'année, la variabilité des impacts liée à celle des anomalies climatiques des MCGs est plus importante, en particulier durant l'hiver. On observe ainsi des impacts en moyenne négatifs sur les débits d'automne et de printemps et positifs sur les débits d'hiver (liés à la modification du régime des précipitations et de fonte des neiges).
- Les précipitations et la couverture neigeuse subissent un impact important (diminution de presque 50% des hauteurs de neige et de la durée totale d'enneigement simulée par le scénario continu à la fin du siècle). Ceci a pour conséquence directe la réduction marquée des crues hivernales qui ne sont plus limitées par le stockage des précipitations dans le manteau neigeux. Par ailleurs, la diminution des débits de printemps provoque un avancement de l'ordre d'un mois du passage en régime d'été. Ceci implique un impact plus important sur les débits du mois de juillet que sur ceux des mois suivants qui sont soutenus par le flux de base provenant de la vidange des réservoirs naturels profonds (aquifères, nappes perchées ou alluviales).
- L'augmentation de la pluviométrie en hiver place les réservoirs naturels profonds dans une situation de recharge hivernale plus favorable que sous le climat actuel. Cette recharge plus importante permet un soutien estival du débit de base, qui limite l'impact du réchauffement et de la diminution des précipitations estivales. Ce soutien ne s'exerce cependant pas jusqu'à la fin de l'été, ce qui induit des impacts plus importants en fin de période (mois d'octobre) et maximaux au mois de novembre.
- L'analyse des impacts du scénario continu (considéré comme un scénario pessimiste parmi les 7 scénarii disponibles, puisqu'il donne lieu à des anomalies pour lesquelles le modèle simule une diminution des débits hivernaux) fait apparaître une tendance à la diminution générale des débits en toutes saisons, principalement liée à la réduction de la pluviométrie annuelle que le scénario prévoit. Bien que pour ce scénario le modèle présente plus de variabilité en ce qui concerne l'évolution des débits du reste de l'année, il simule dès 2025 une réduction des débits d'été similaire à celle de 2050.
- Une étude de sensibilité au climat des bassins de l'Ariège à Foix et de l'Adour à Aire, respectivement représentatifs des bassins de montagne et de plaine, a permis de préciser les incertitudes autour des principaux impacts des 7 scénarii climatiques. La très forte probabilité de passage d'un régime d'écoulement nival à un régime d'écoulement pluvial pendant les périodes hivernales est montrée. Bien que ceci se traduise principalement par une augmentation des écoulements et de l'humidité des sols, une réduction de ceux-ci ne peut être totalement exclue. Cette incertitude est par contre beaucoup plus faible en été, puisque l'ensemble des scénarii climatiques donnent lieu à des réductions significatives des débits et de l'humidité des sols. Cependant, l'humidité des sols apparaît être nettement moins sensible aux impacts du changement climatique que les écoulements produits sur les bassins.

Des travaux complémentaires sur l'influence que peut avoir sur ces résultats, une adaptation de la végétation au changement climatique, ont pour finir été entrepris. Les premiers résultats obtenus indiquent qu'une telle prise en compte pourrait compléter de manière efficace les conclusions de ce travail. Il serait donc souhaitable de mener à bien des études supplémentaires dans ce domaine.

Références bibliographiques

- Agence de l'eau Adour Garonne - DIREN Midi-Pyrénées**, 1996. "Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) du bassin Adour Garonne", 112 pp. Agence de l'eau Adour Garonne - DIREN Midi-Pyrénées, Toulouse.
- Arnell N. W.**, 1999. "The effects of climate change on hydrological regimes in Europe: a continental perspective", *Global Environmental Change*. 9, pp. 5-23.
- Arnell N. W. and Reynard N. S.**, 1996. "The effects of climate change due to global warming on river flows in Great Britain", *Journal of Hydrology*. 183, (397), pp. 424
- Bhumralkar C. M.**, 1975. "Numerical experiments on the computation of ground surface temperature in an atmospheric general circulation model", *Journal of Applied Meteorology*. 14, pp. 1246-1258.
- Blackadar, A. K.**, 1976. "Modelling the nocturnal boundary layer", Proceedings of the third symposium on atmospheric turbulence, diffusion and air quality, pp. 46-49. American Meteorological Society, Boston.
- Boone, A.**, 2000. "Modélisation des processus hydrologiques dans le schéma de surface ISBA: Inclusion d'un réservoir hydrologique, du gel et modélisation de la neige", *Thèse de Doctorat*, Université Paul Sabatier (Toulouse III), 252 p.
- Boone A., Calvet J. C., and Noilhan J.**, 1999. "Inclusion of a third soil layer in a land surface scheme using the force-restore method", *Journal of Applied Meteorology*. 38, pp. 1611-1630.
- Boone A., Masson V., Meyers T., and Noilhan J.**, 2000. "The influence of the inclusion of soil freezing on simulations by a Soil-Vegetation-Atmosphere transfer scheme", *Journal of Applied Meteorology*. 39, pp. 1544-1569.
- Calvet J. C., Noilhan J., Bessemoulin P., Cabelguenne M., Oliosio A., and Wigneron J. P.**, 1998. "An interactive vegetation SVAT model tested against data from six contrasting sites", *Agricultural and Forest Meteorology*. 92, pp. 73-95.
- Cosgrove W J and Rijbersman F R**, 2000. *World Water Vision: making water everybody's business*. World water council, Earthscan Publications Ltd. 108 pp. London, (UK).
- Crossley J. F., Polcher J., Cox P. M., Gedney N., and Planton S.**, 2000. "Uncertainties linked to land-surface processes in climate change simulations", *Climate dynamics*. 16, pp. 949-961.
- Deardorff J. W.**, 1977. "A parameterization of ground-surface moisture content for use in atmospheric prediction models", *Journal of Applied Meteorology*. 16, pp. 1182-1185.
- Deardorff J. W.**, 1978. "Efficient prediction of the ground surface temperature and moisture with inclusion of a layer of vegetation", *Journal of Geophysical Research*. 83, (C4), pp. 1889-1903.
- Déqué, M.**, 2000. "Modélisation numérique des impacts climatiques", Impacts potentiels du changement climatique en France au XXIème siècle., 45 pp. Mission interministérielle sur l'effet de serre, Paris,
- Douville H., Royer J. F., and Mahfouf J.-F.**, 1995. "A new snow parameterization for the Meteo-France climate model. Part I: Validation in stand-alone experiments", *Climate dynamics*. 12, pp. 21-35.
- Durand Y., Brun E., Merindol L., Guyomarc'h G., Lesaffre B., and Martin E.**, 1993. "A meteorological estimation of relevant parameters for snow models", *Annals of Glaciology*. 18, pp. 65-71.

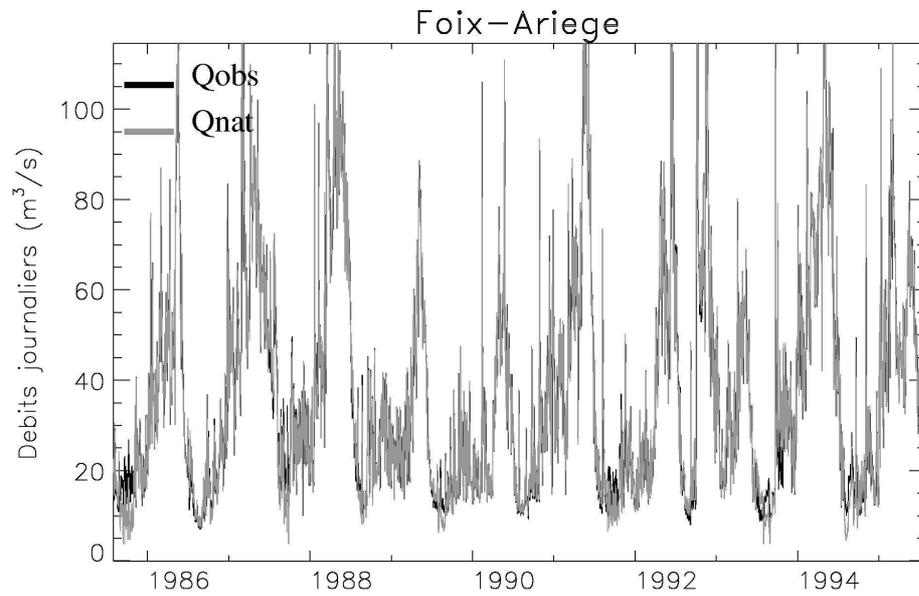
- Dümenil L and Todini E**, 1992. "A rainfall-runoff scheme for use in the Hamburg climate model" (Chap. 9). In: *Advances in Theoretical Hydrology, a tribute to James Dooge*. [McGraw-Hill (eds.)] pp. 129-157.
- Etchevers, P.**, 2000. "Modélisation du cycle continental de l'eau à l'échelle régionale. Impact de la modélisation de la neige sur l'hydrologie du Rhône", *Thèse de Doctorat*, Université de Toulouse III, 361 p.
- Giard D. and Bazile E.**, 2000. "Implementation of a new assimilation scheme for soil and surface variables in a global NWP model", *Monthly Weather Review*. 128, pp. 997-1015.
- Gregory J. M., Mitchell J. F. B., and Brady A. J.**, 1997. "Summer drought in northern midlatitudes in a time-dependent CO₂ climate experiment", *Journal of Climate*. 10, (4), pp. 662-686.
- Habets, F.**, 1998. "Modélisation du cycle continental de l'eau à l'échelle régionale. Application aux bassins versants de l'Adour et du Rhône.", *Thèse de Doctorat*, Université Paul Sabatier (Toulouse III), 224 p.
- Habets F., Etchevers P., Golaz C., Leblois E., Ledoux E., Martin E., Noilhan J., and Otle C.**, 1999c. "Simulation of the water budget and the river flows of the Rhone basin", *Journal of Geophysical Research*. 104, pp. 31145-31172.
- Habets F., Noilhan J., Golaz C., Goutorbe J. P., Lacarrere P., Leblois E., Ledoux E., Martin E., Otle C., and Vidal-Madjar D.**, 1999a. "The Isba surface scheme in a macroscale hydrological model applied to the Hapex-Mobilhy area. Part I: Model and database", *Journal of Hydrology*. 217, pp. 75-96.
- Habets F., Noilhan J., Golaz C., Goutorbe J. P., Lacarrere P., Leblois E., Ledoux E., Martin E., Otle C., and Vidal-Madjar D.**, 1999b. "The Isba surface scheme in a macroscale hydrological model applied to the Hapex-Mobilhy area. Part II: Simulation of streamflows and annual water budget", *Journal of Hydrology*. 217, pp. 97-118.
- Habets F. and Saulnier G. M.**, 2001. "Subgrid runoff parameterization", *Phys. Chem. Earth*. 26, (5-6), pp. 455-459.
- Henderson-Sellers A., Yang Z. L., and Dickinson R. E.**, 1993. "The Project for Intercomparison of Land-Surface Parameterization Schemes PILPS", *Bulletin of American Meteorological Society*. 74, pp. 1335-1349.
- IPCC**, 2000. "Special report on emissions scenarios", Special report of the intergovernmental panel on climate, 570 pp. Cambridge University Press. Cambridge (UK). <http://www.grida.no/climate/ipcc/emission/index.htm>.
- IPCC**, 2001a. "Europe" (Chap. 13). In: *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of the working group II to the Third Assessment Report or the Intergovernmental Panel on the Climate Change*. [McCarthy, J. J., Canziani, O. F., Leary, N. A., Dokken, D. J., and White, K. S. (eds.)] pp. 645-692. <http://www.ipcc.ch/pub/tar/wg2/index.htm>. ISBN: 0-521-01500-6
- IPCC**, 2001b. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of the working group II to the Third Assessment Report or the Intergovernmental Panel on the Climate Change. Cambridge University Press. 1000 pp. Cambridge (UK).
- IPCC**, 2001c. *Climate Change 2001: The scientific basis*. Contribution of the working group II to the Third Assessment Report or the Intergovernmental Panel on the Climate Change. Cambridge University Press. 944 pp. Cambridge (UK).
- Ledoux, E.**, 1980. "Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique", *Thèse de Doctorat*, Ec. Nat. Sup. des Mines de Paris, 200 p.

- Lehenaff, A.**, 2002. "Impact du changement climatique sur la ressource en eau du bassin Adour Garonne.", *Rapport de stage de fin d'études* .n° 818, ENM – CNRM.
- Mahfouf J.-F. and Noilhan J.**, 1996. "Inclusion of gravitational drainage in a land surface scheme based on the force-restore method", *Journal of Applied Meteorology*. 35, pp. 987-992.
- Mandelkern, S., Parey, S., and Tauveron, N.**, 1998. "Hydrological consequences of greenhouse effect a case study of the river Doubs", Proceedings of the second international conference on climate and water, Espoo, Finland. 17-20 August 1998, 3. pp. 1505-1514.
- Marchet, P.**, 2002. "Le référentiel hydrogéologique national", Spécial Eau Souterraine de la Revue de l'Agence de l'eau Adour Garonne., pp. 5-8,
- Martin, E.**, 2000. "Modification de la couverture neigeuse", Impacts potentiels du changement climatique en France au XXIème siècle., 57 pp. Mission interministérielle sur l'effet de serre, Paris,
- Masson V.**, 2000. "A physically-base scheme for the urban energy budget in atmospheric models", *Boundary Layer Meteorology*. 94, pp. 357-397.
- Masson V., Champeaux J.-L., and Chauvin F.**, 2001. "A global database of surface parameters at 1 km resolution in meteorological and climate models.", *Journal of Climate*. (soumis)
- Meehl G. A., Boer G. J., Covey C., Latif M., and Stoufer R. J.**, 2000. "The Coupled Model Intercomparison Project (CMIP)", *Bulletin of American Meteorological Society*. 81, pp. 313-318.
- Mestre, O.**, 2000. "Méthodes statistiques pour l'homogénéisation des longues séries climatiques", Université Paul Sabatier de Toulouse, 227 p.
- Milly P. C. D., Wetherald R. T., Dune K. A., and Delworth T. L.**, 2002. "Increasing of great floods in a changing climate", *Nature*. 415, pp. 514-517.
- Mitchell J. F. B. and Johns T. C.**, 1997. "On modification of global warming by sulfate aerosols", *Journal of Climate*. 10, pp. 245-267.
- Moisselin J.-M.**, 2002. "Les précipitations sur le 20ème siècle en France", *Lettre PIGB-PMRC-France*. (Février), pp. 57-62.
- Morel, S.**, 2002. "Modélisation distribuée du bilan hydrique à l'échelle régionale: application au bassin Adour Garonne", *Thèse de Doctorat (en cours)*, Université Paul Sabatier - Toulouse III.
- Noilhan, J., Boone, A., and Etchevers, P.**, 2001. "Application of climate change scenarios to the Rhone basin", Applying climate scenarios for regional studies: with particular reference to the Mediterranean. ECLAT-2 Toulouse Workshop Report N° 4, France, 25-27 October 2000, pp. 58-74. Climatic Research Unit UEA, Norwich (UK).
- Noilhan J. and Mahfouf J.-F.**, 1996. "The ISBA land surface parameterization scheme", *Global and Planetary Change*. 13, pp. 145-159.
- Noilhan J. and Lacarrère J.-F.**, 1995. "GCM gridscale evaporation from mesoscale modelling", *Journal of Climate*. 8 (2), pp. 206-223.
- Noilhan J. and Planton S.**, 1989. "A simple parameterization of Land Surface Processes for meteorological Models", *Monthly Weather Review*. 117, pp. 536-549.
- Osborn T. J., Hulme M., Jones P. D., and Basnett T.**, 1999. "Observed trends in the daily intensity of the United Kingdom precipitation", *International Journal of Climatology*. 20, pp. 347-364.

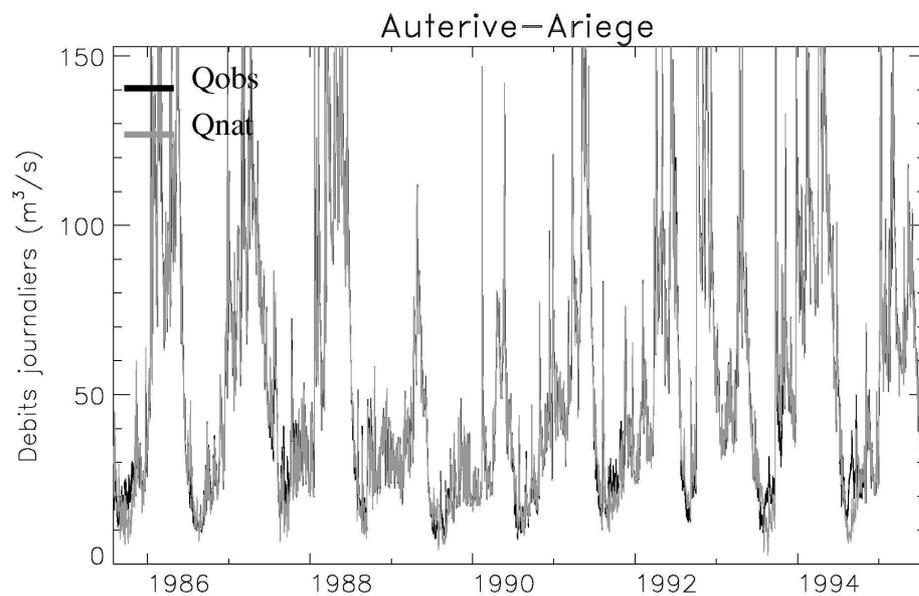
- Palmer T. N. and Räisänen J.**, 2002. "Quantifying the risk of extreme seasonal precipitation events in a changing climate", *Nature*. 415, pp. 512-514.
- Romero R., Ramis C., and Guijarro J. A.**, 1999. "Daily rainfall patterns in the Spanish Mediterranean area: an objective classification", *International Journal of Climatology*. 19, pp. 95-112.
- Royer J. F., Cariolle D., Chauvin F., Déqué M., Douville H., Planton S., Rascol A., Ricard J.-L., Salas y Melia D., Sevault F., Simon P., Somot S., Tyteca S., Terray L., and Valcke S.**, 2002. "Simulation des changements climatiques au cours du 21^{ème} siècle incluant l'ozone stratosphérique", *Compte Rendus de Géoscience*. 334, (3), pp. 147-154.
- Schlosser C. A., Slater A. G., Robock A., Pitman A. J., Vinnikov K. Y., Henderson-Sellers A., Speranskaya N. A., and Mitchel K.**, 2000. "Simulations of a boreal grassland hydrology at Valdai, Russia: PILPS Phase 2(d)", *Monthly Weather Review*. 128, pp. 301-321.
- Slater A. G., Schlosser C. A., Desborough C. E., Pitman A. J., Henderson-Sellers A., Robock A., Vinnikov K. Y., Mitchel K., Boone A., Braden H., Chen F., Cox P. M., De Rosnay P., Dickinson R. E., Dai Y.-J., Duan Q., Entin J., Etchevers P., Gedney N., Gusev Y. M., Habets F., Kim J., Koren V., Kowalczyk E. A., Nasonova O. N., Noilhan J., Schaake J., Shmakin A. B., Smirnova T. G., Verseghy D. L., Wetzel P., Xue Y., Yang Z.-L., and Zeng Q.**, 2001. "The representation of snow in land surface schemes: Results from PILPS 2(d)", *Journal of Hydrometeorology*. pp. 7-25.
- Voirin, S., Habets, F., and Noilhan, J.**, 1998. "Dix ans de simulation du bilan hydrique et des débits sur le bassin de l'Adour, à l'aide du modèle hydrologique distribué ISBA-MODCOU", Note de travail du Groupe de Météorologie à Moyenne Echelle, n° 55, 93 p. GMME – Toulouse.
- Wetherald R. T. and Manabe S.**, 1999. "Detectability of summer dryness caused by greenhouse gases", *Climatic Change*. 43, pp. 495-511.
- Wood E. F., Lettenmaier D. P., Liang X., Lohmann D., Boone A., Chang S., Chen F., Day Y., Desborough C. E., Duan Q., Ek M., Gusev Y. M., Habets F., Irannejad P., Koster R., Nasanova O. N., Noilhan J., Schaake J., Schlosser C. A., Shao Y., Shmakin A. B., Verseghy D. L., Wang J., Warrach K., Wetzel P., Xue Y., Yang Z.-L., and Zeng Q.**, 1998. "The project for intercomparison of land-surface parameterization scheme (PILPS) Phase 2(c) Red-Arkansas river experiment: I. Experiment description and Summary intercomparisons", *Global and Planetary Change*. 19, pp. 115-136.
- Wood E. F., Lettenmaier D. P., and Zartarian V.**, 1992. "A land-surface hydrology parameterization with sub-grid variability for general circulation models", *Journal of Geophysical Research*. 97, (D3), pp. 2717-2728.

ANNEXE A

ANNEXE B

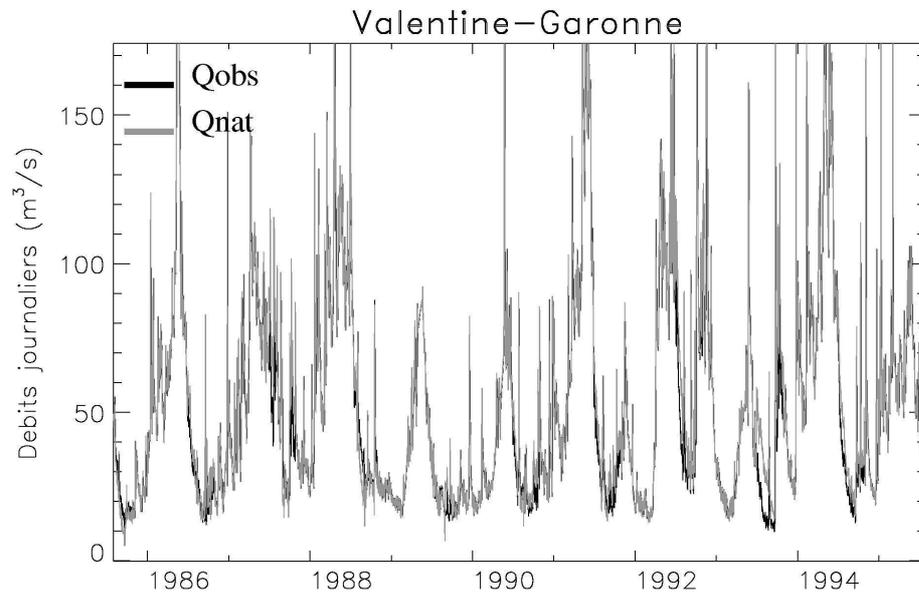


Qcalage: 14.3 m³/s

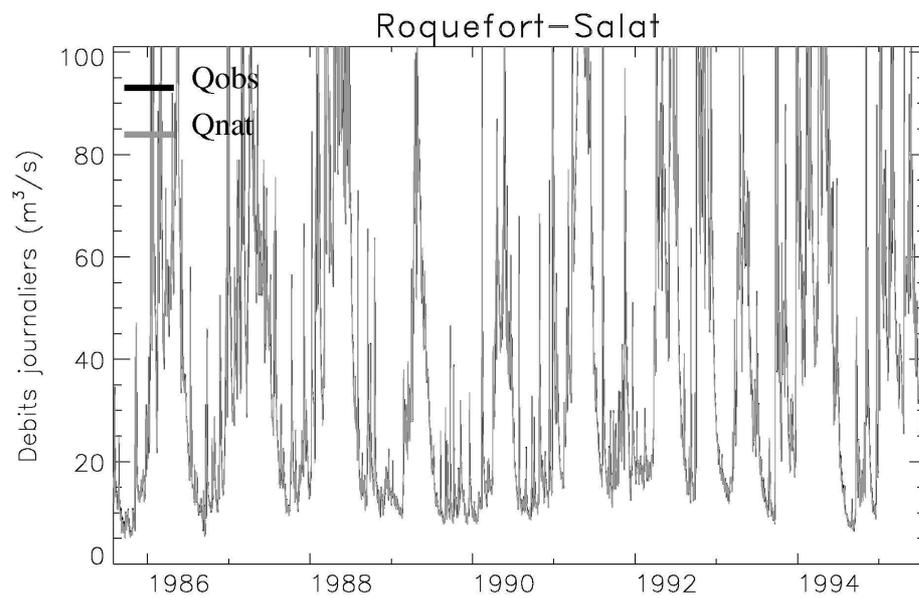


Qcalage: 19.1 m³/s

Débits journaliers observés (en gris), naturalisés (en noir) et débit de référence pour l'étiage (Qcalage) aux stations de Foix et d'Auterive sur l'Ariège pour la période 1985 - 1995. Les débits maximaux sont tronqués pour permettre une meilleure visualisation des débits d'étiage.

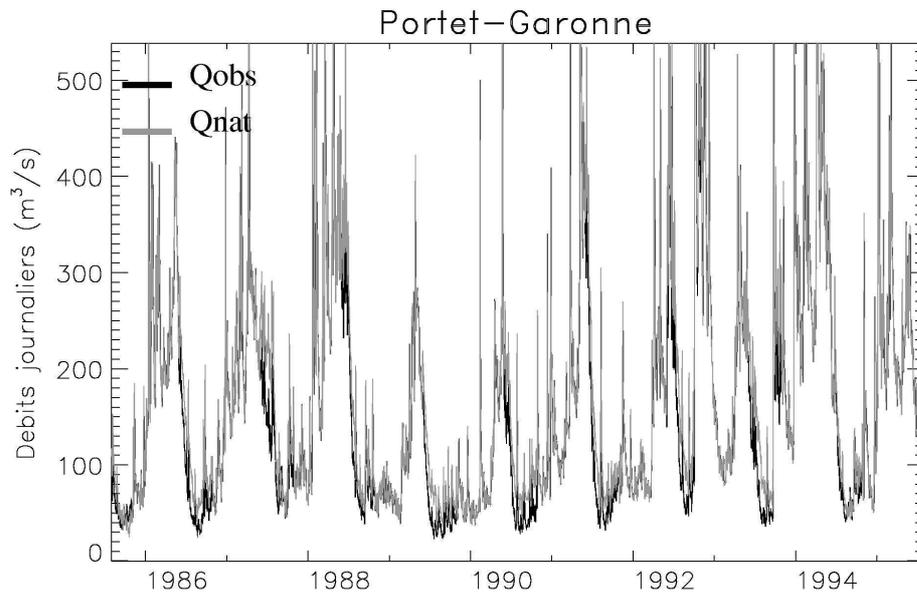


Qcalage: 21.8 m³/s

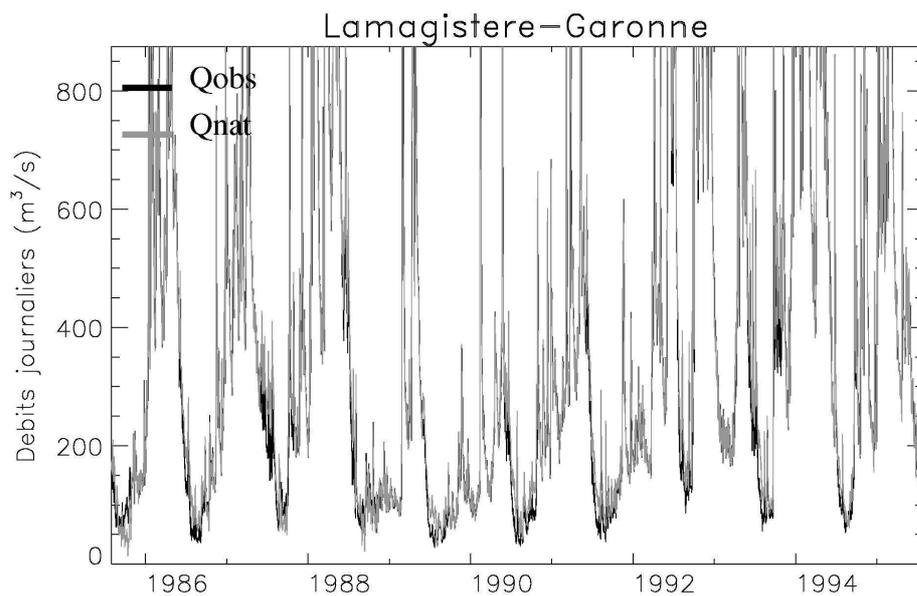


Qcalage: 12.6 m³/s

Débits journaliers observés (en gris), naturalisés (en noir) et débit de référence pour l'étiage (Qcalage) aux stations de Valentine (St Gaudens) sur la Garonne et de Roquefort sur le Salat pour la période 1985 - 1995. Les débits maximaux sont tronqués pour permettre une meilleure visualisation des débits d'étiage.

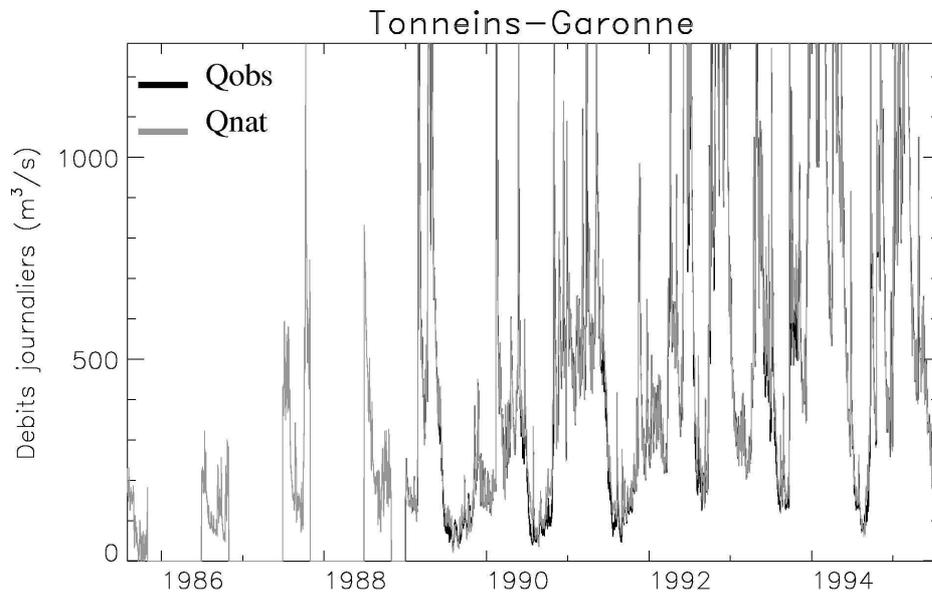


Qcalage: 67.3 m³/s

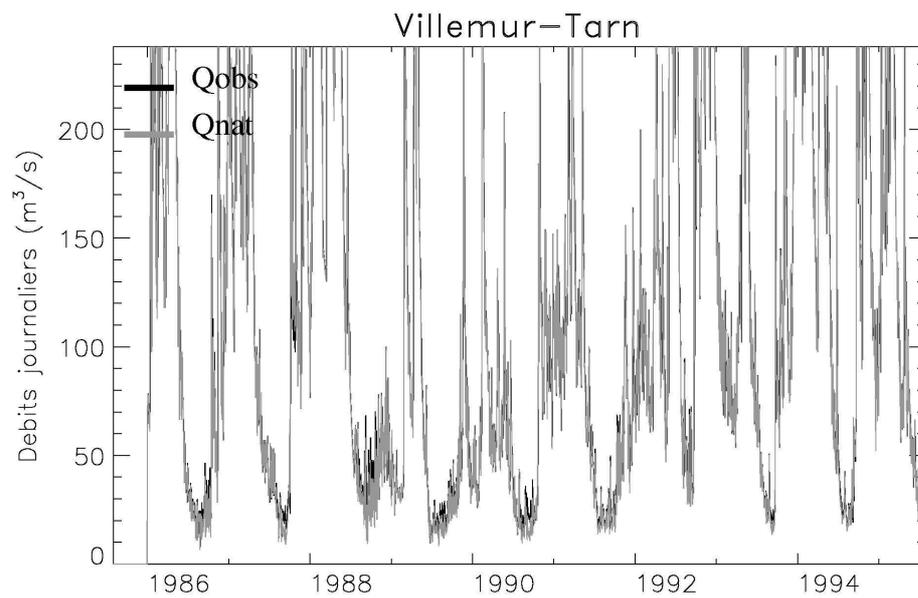


Qcalage: 109.3 m³/s

Débits journaliers observés (en gris), naturalisés (en noir) et débit de référence pour l'étiage (Qcalage) aux stations de Portet de Lamagistère sur la Garonne pour la période 1985 - 1995. Les débits maximaux sont tronqués pour permettre une meilleure visualisation des débits d'étiage.

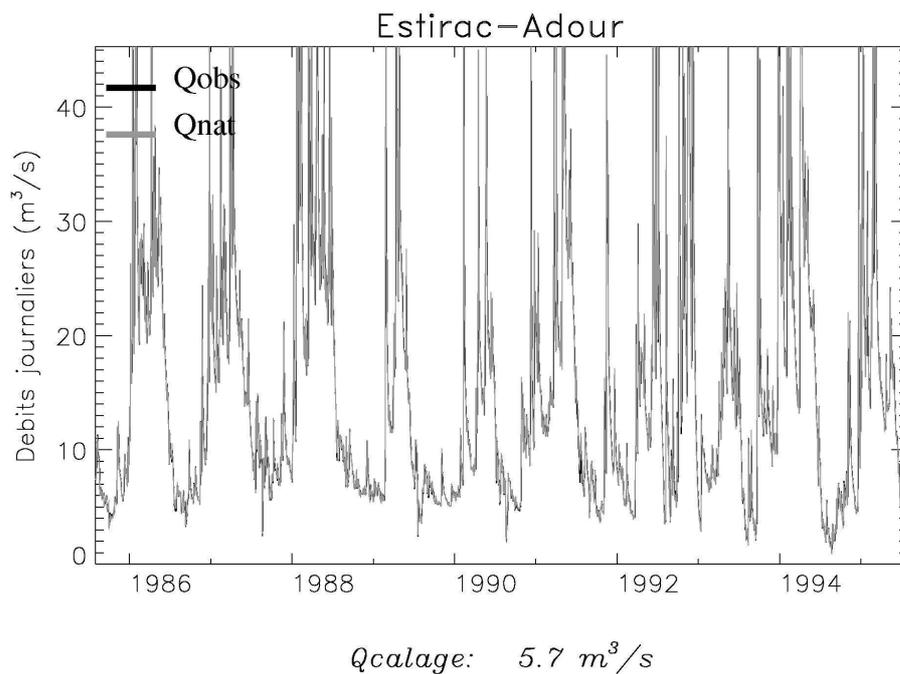
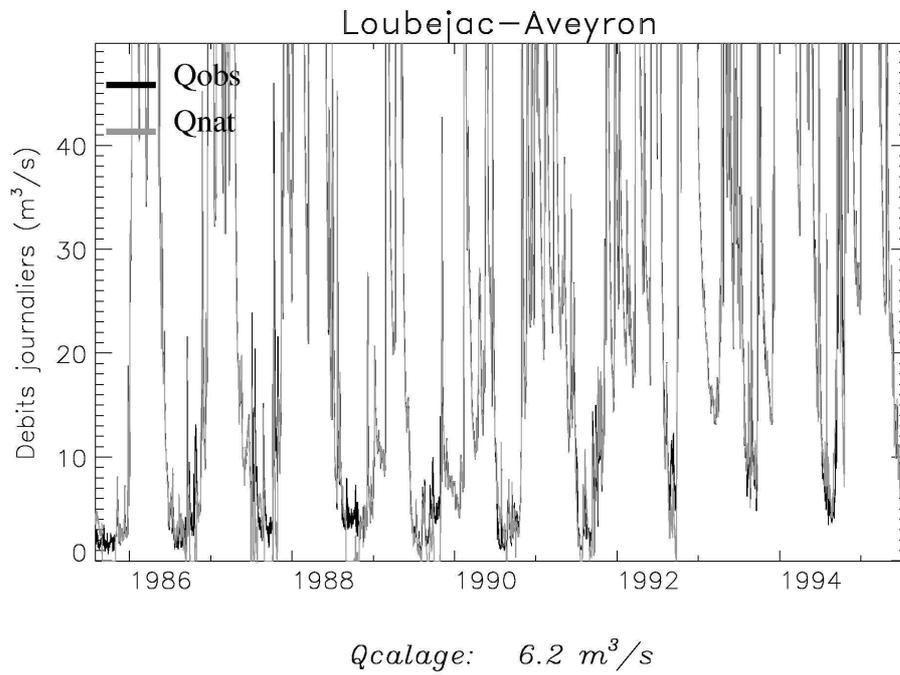


Qcalage: 160.2 m³/s

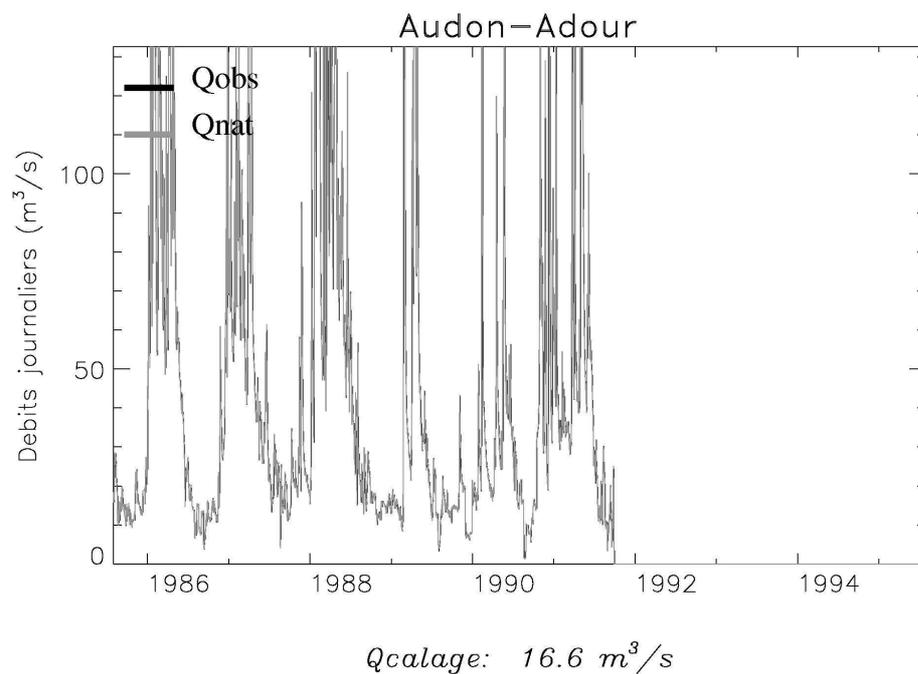
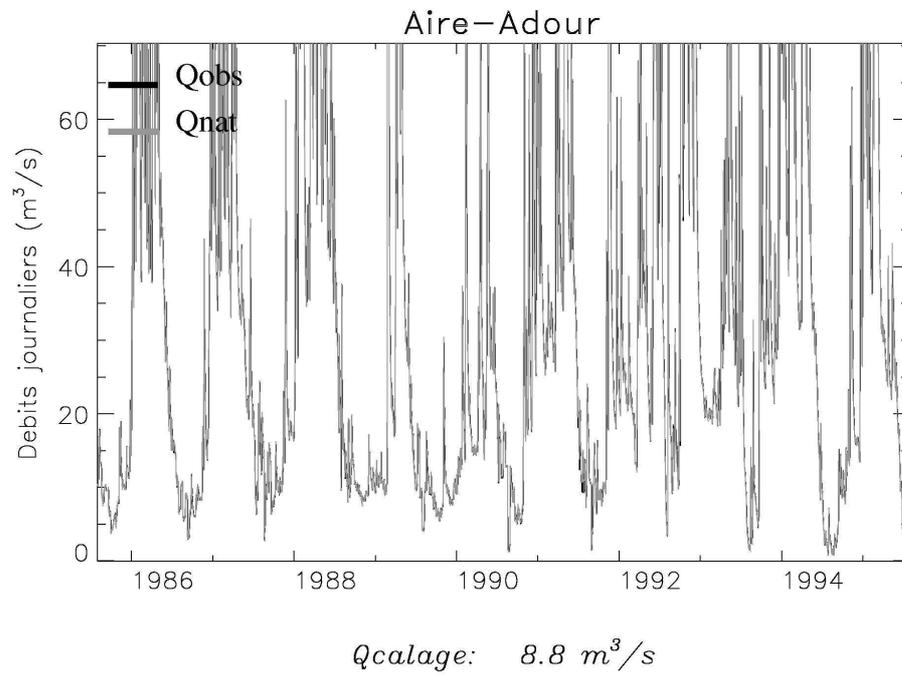


Qcalage: 29.8 m³/s

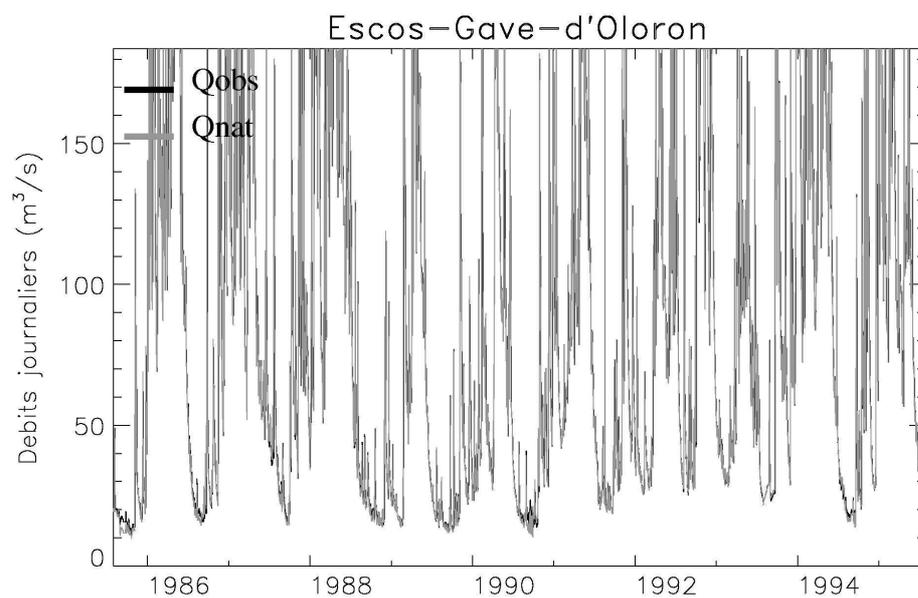
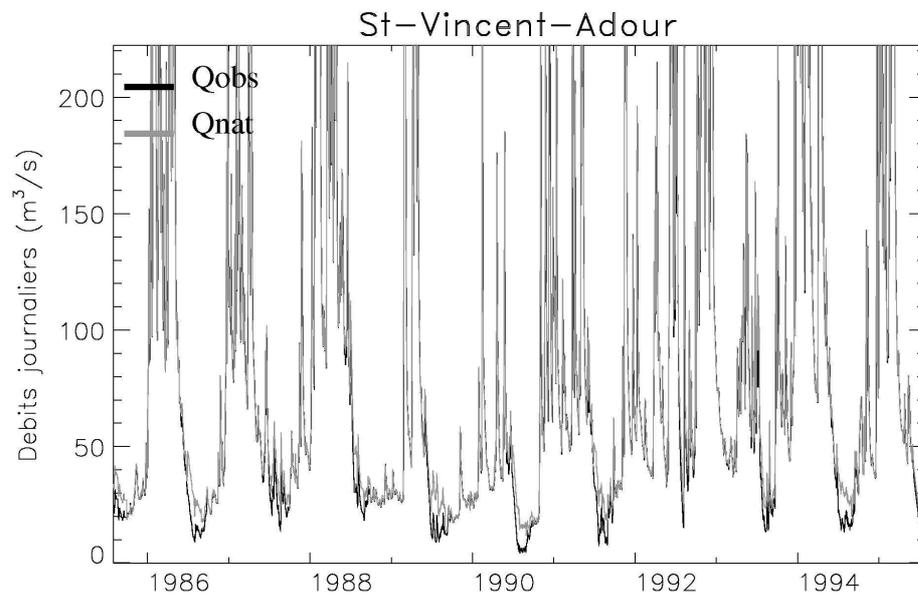
Débits journaliers observés (en gris), naturalisés (en noir) et débit de référence pour l'étiage (Qcalage) aux stations de Tonneins sur la Garonne et de Villemur sur le Tarn pour la période 1985 - 1995. Les débits maximaux sont tronqués pour permettre une meilleure visualisation des débits d'étiage.



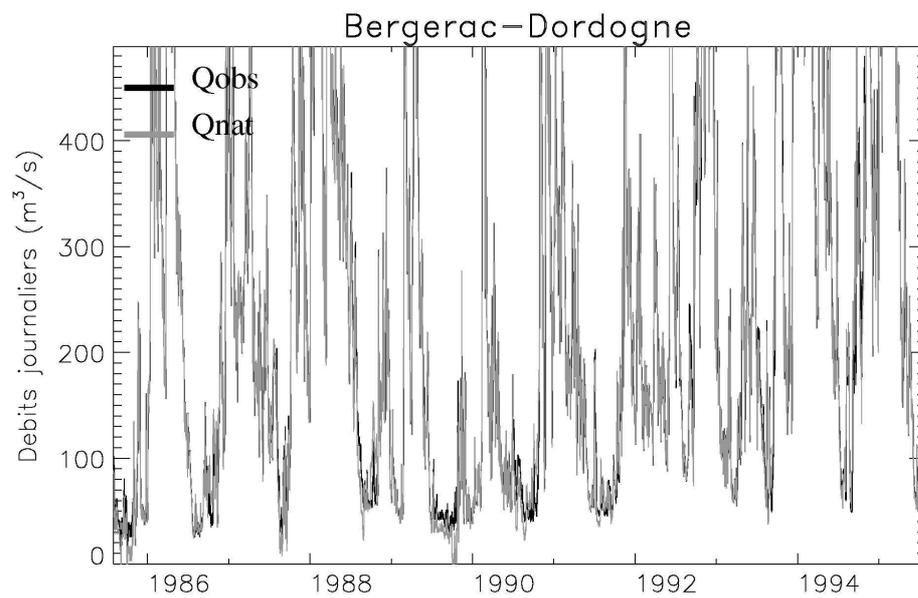
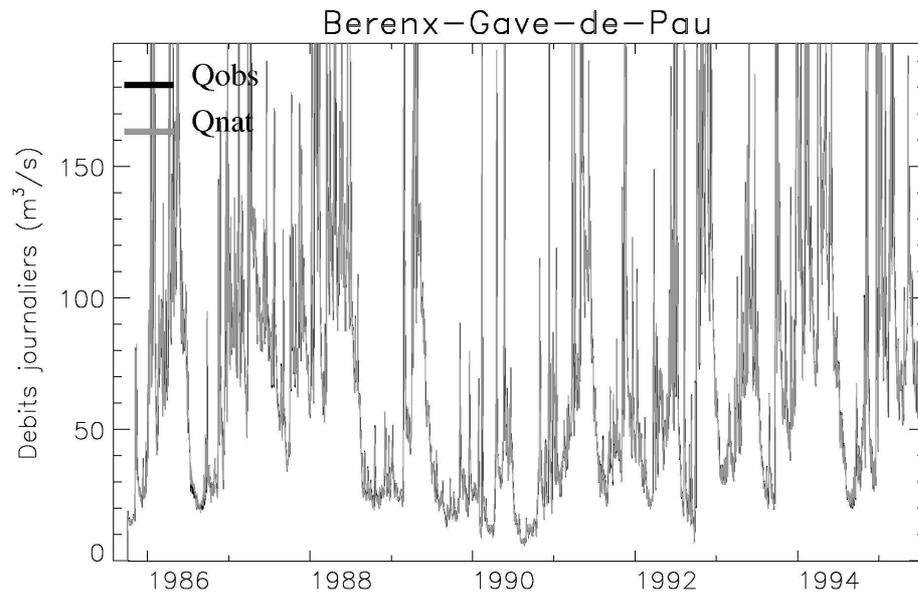
Débits journaliers observés (en gris), naturalisés (en noir) et débit de référence pour l'étiage (*Qcalage*) aux stations de Loubejac (Piquecos) sur l'Aveyron et d'Estirac sur l'Adour pour la période 1985 - 1995. Les débits maximaux sont tronqués pour permettre une meilleure visualisation des débits d'étiage.



Débits journaliers observés (en gris), naturalisés (en noir) et débit de référence pour l'étiage (Q_{calage}) aux stations d'Aire et d'Audon sur l'Adour pour la période 1985 – 1995 (sauf pour Audon car lacune après le 30/09/1991). Les débits maximaux sont tronqués pour permettre une meilleure visualisation des débits d'étiage.

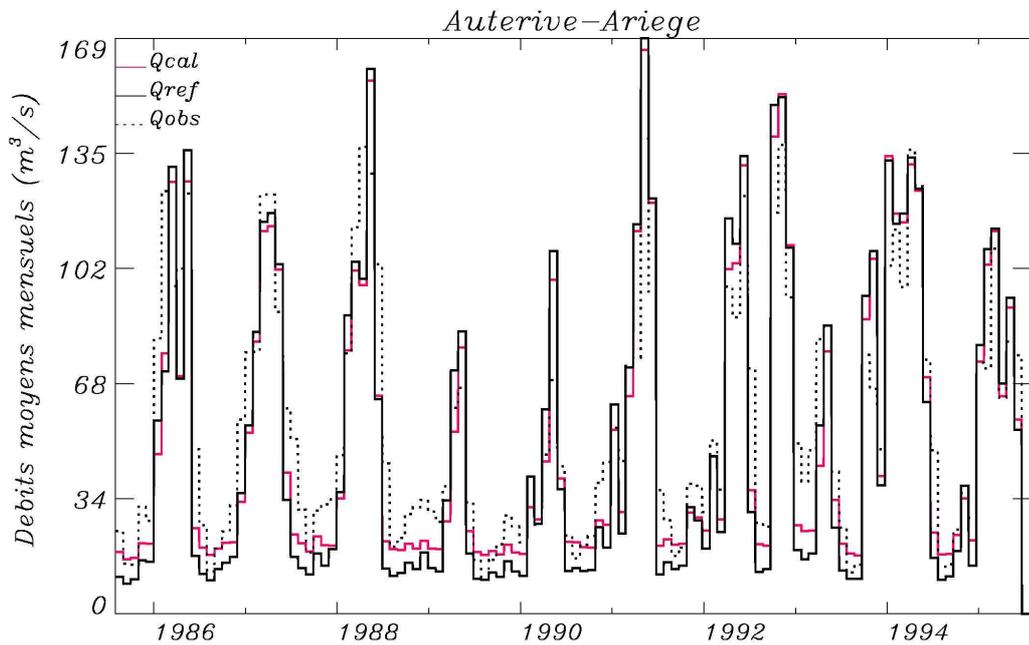
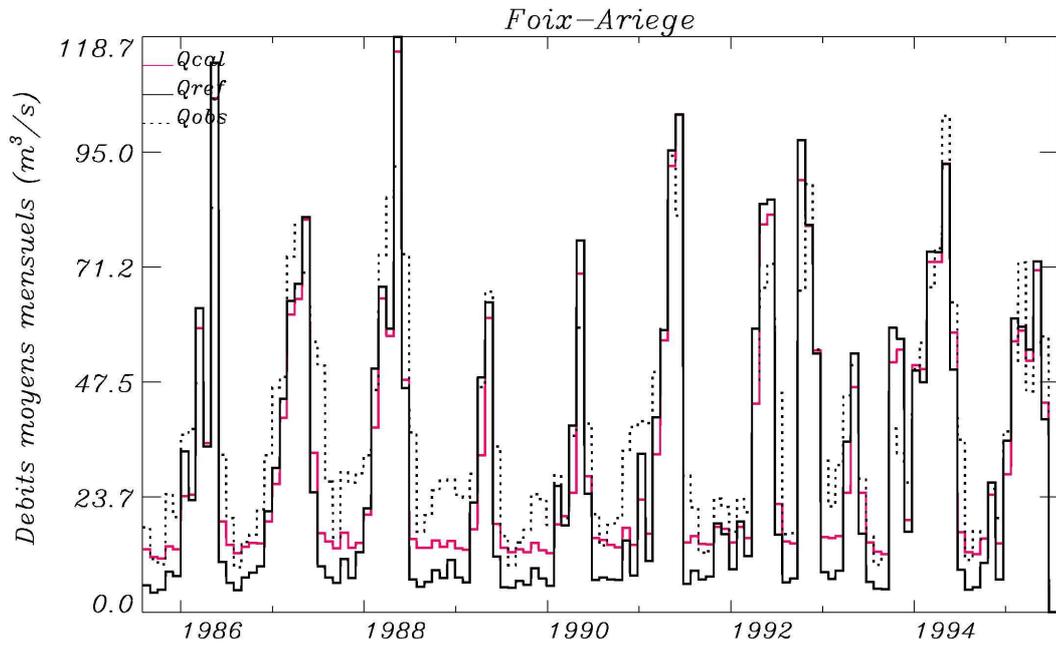


Débits journaliers observés (en gris), naturalisés (en noir) et débit de référence pour l'étiage (Qcalage) aux stations de St Vincent sur l'Adour et d'Escos sur le Gave d'Oloron pour la période 1985 - 1995. Les débits maximaux sont tronqués pour permettre une meilleure visualisation des débits d'étiage.

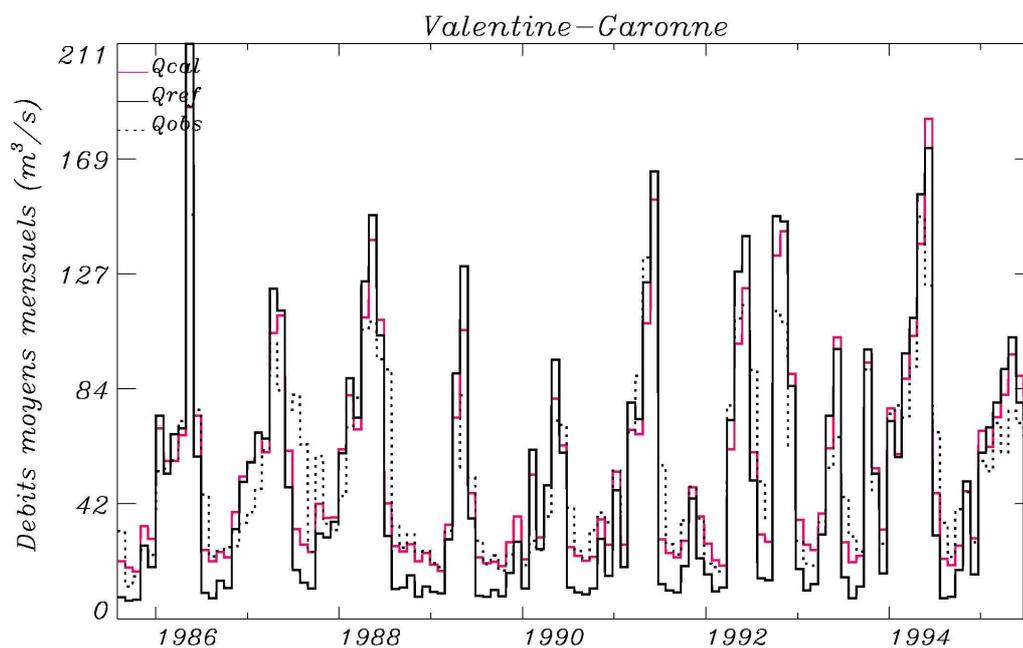


Débits journaliers observés (en gris), naturalisés (en noir) et débit de référence pour l'étiage (Qcalage) aux stations de Berenx sur le Gave de Pau et de Bergerac sur la Dordogne pour la période 1985 - 1995. Les débits maximaux sont tronqués pour permettre une meilleure visualisation des débits d'étiage.

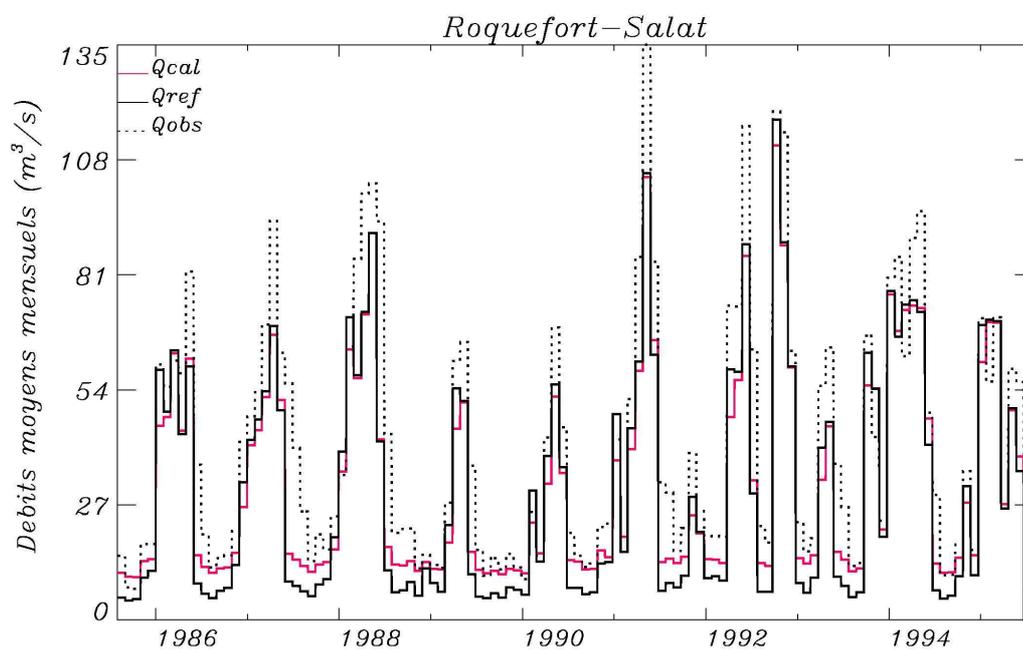
ANNEXE C



Comparaison des débits simulés par ISBA-MODCOU avant calage (ref – trait continu noir), après calage (cal – trait continu rouge) et des débits naturalisés (obs - trait pointillé noir), aux stations de Foix et Auterive sur l'Ariège. Deux critères statistiques ont été calculés : le rapport des débits simulés sur observés (Rap) et le critère de Nash ou Efficience (Em).

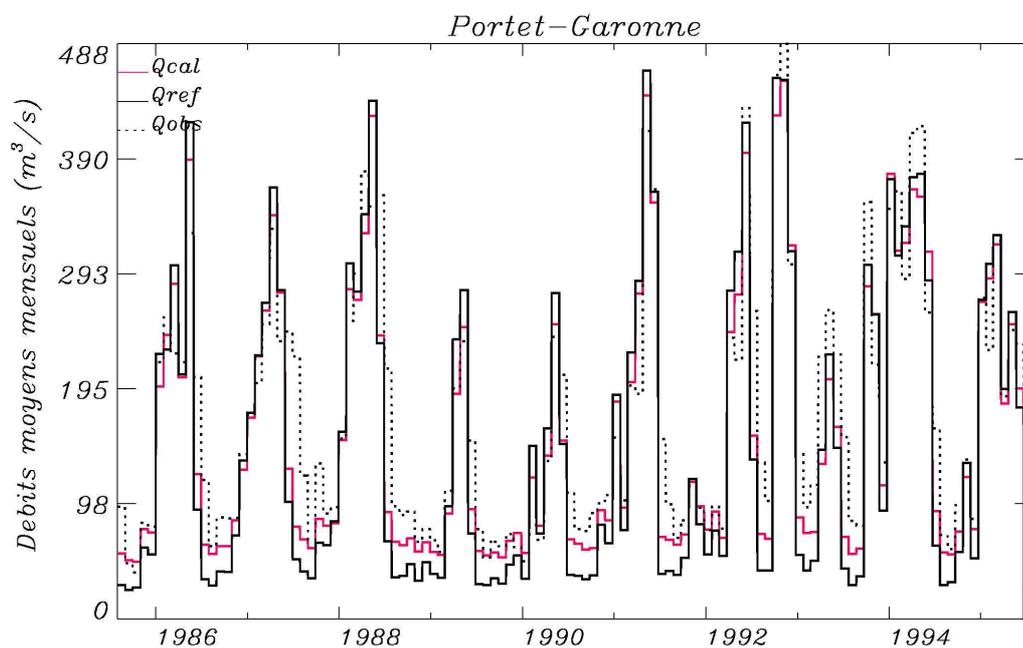


Rap Sim_cal/Obs= 1.02 Rap Sim_ref/Obs= 0.94 Em_cal= 0.76 Em_ref= 0.52

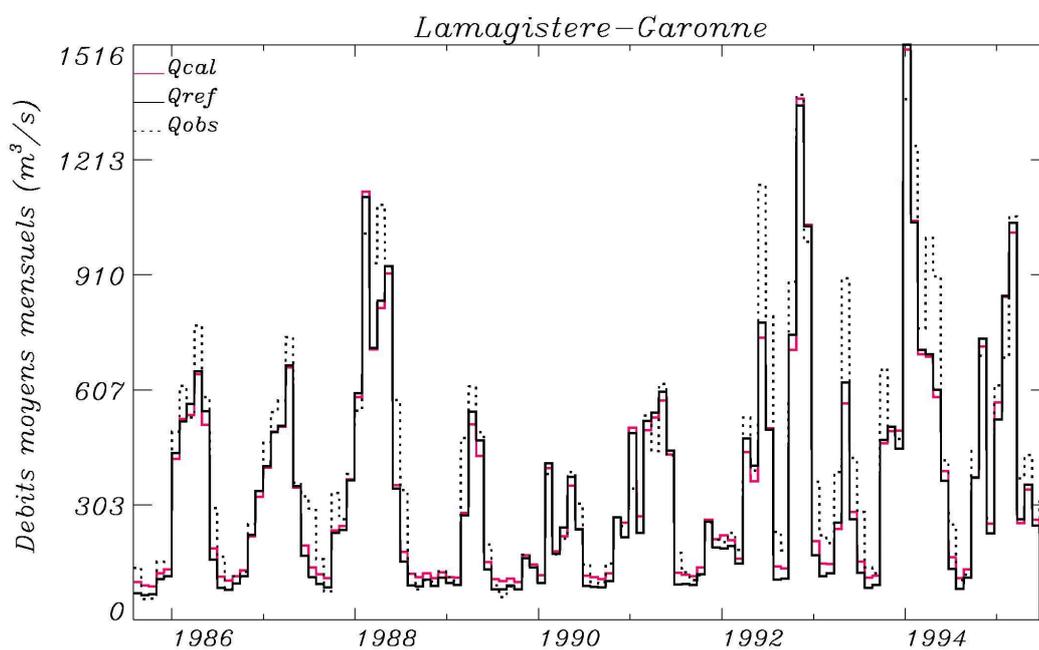


Rap Sim_cal/Obs= 0.77 Rap Sim_ref/Obs= 0.73 Em_cal= 0.78 Em_ref= 0.74

Comparaison des débits simulés par ISBA-MODCOU avant calage (ref – trait continu noir), après calage (cal – trait continu rouge) et des débits naturalisés (obs - trait pointillé noir), aux stations de St Gaudens et Roquefort sur la Garonne. Deux critères statistiques ont été calculés : le rapport des débits simulés sur observés (Rap) et le critère de Nash ou Efficience (Em).

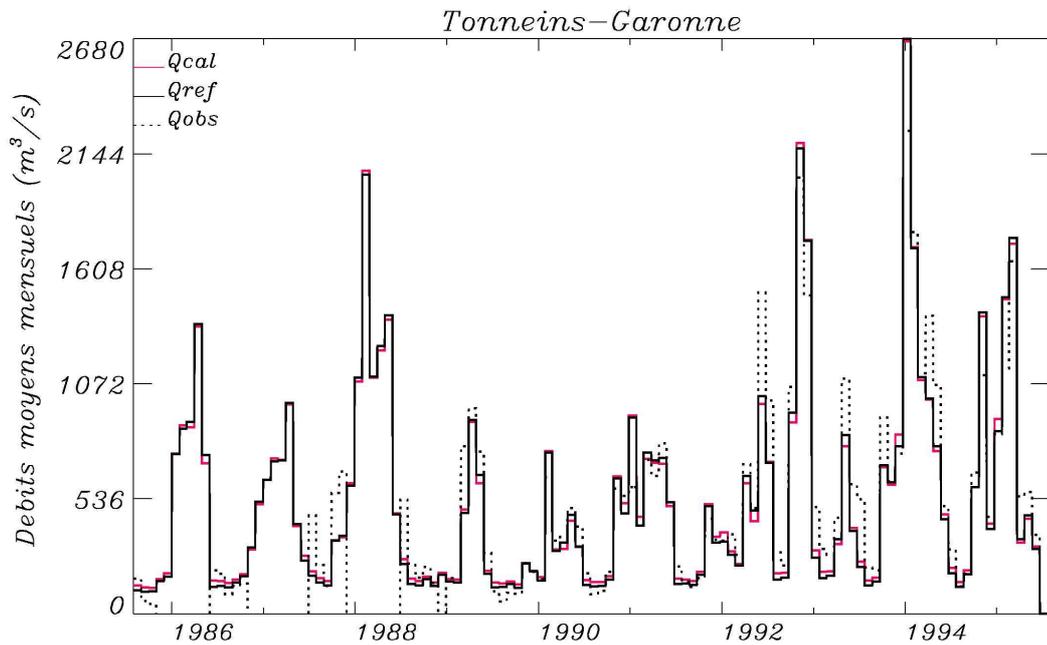


Rap Sim_cal/Obs= 0.91 Rap Sim_ref/Obs= 0.86 Em_cal= 0.85 Em_ref= 0.74

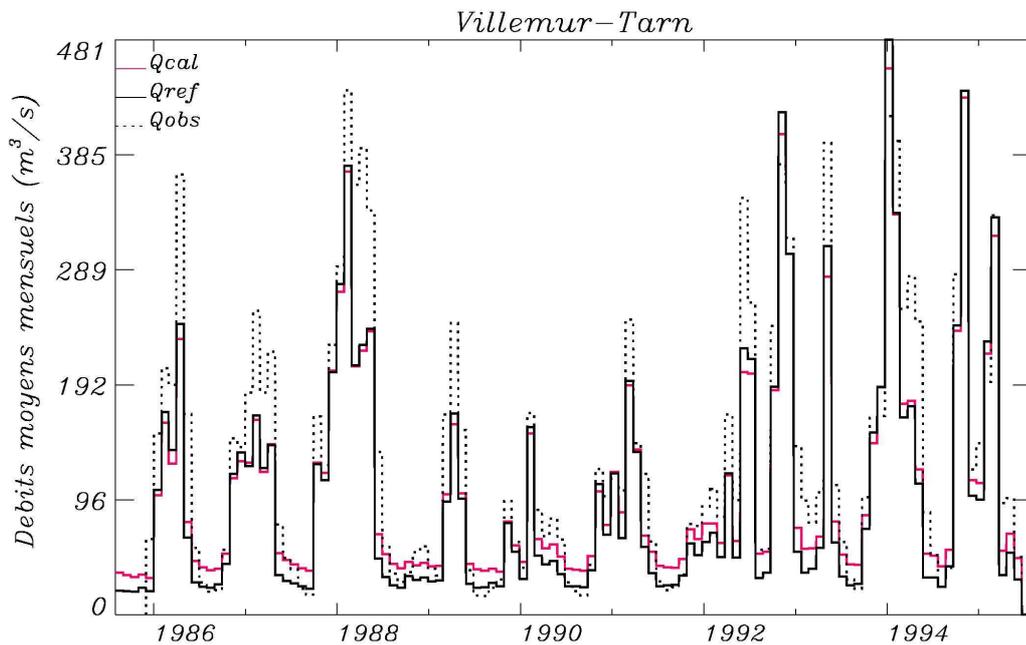


Rap Sim_cal/Obs= 0.88 Rap Sim_ref/Obs= 0.86 Em_cal= 0.89 Em_ref= 0.89

Comparaison des débits simulés par ISBA-MODCOU avant calage (ref – trait continu noir), après calage (cal – trait continu rouge) et des débits naturalisés (obs - trait pointillé noir), aux stations de Portet et Lamagistère sur la Garonne. Deux critères statistiques ont été calculés : le rapport des débits simulés sur observés (Rap) et le critère de Nash ou Efficience (Em).

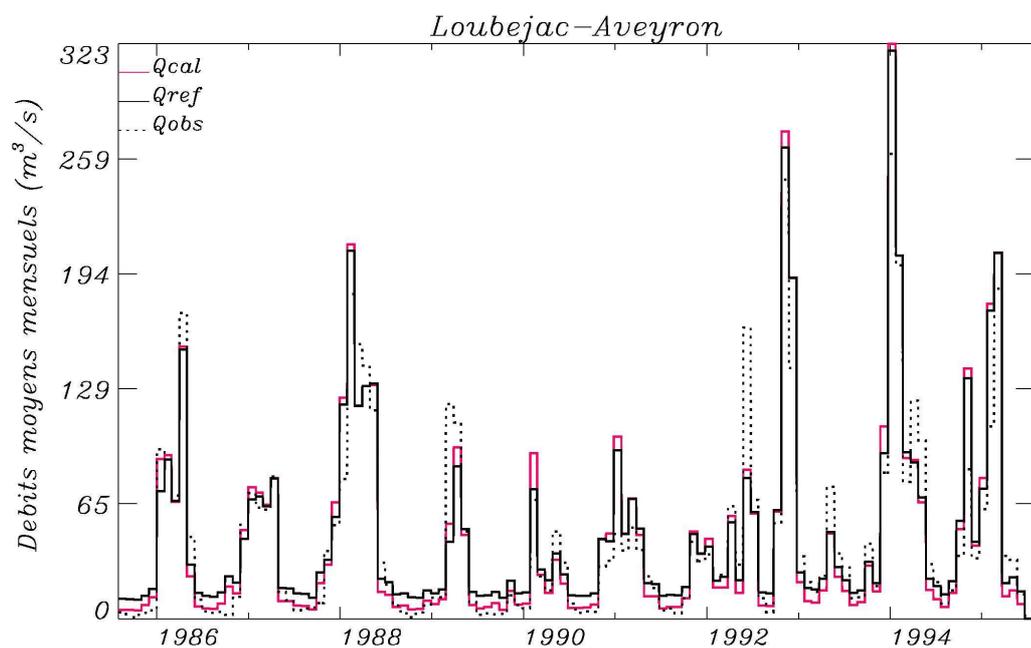


Rap Sim_cal/Obs= 0.92 Rap Sim_ref/Obs= 0.91 Em_cal= 0.89 Em_ref= 0.89

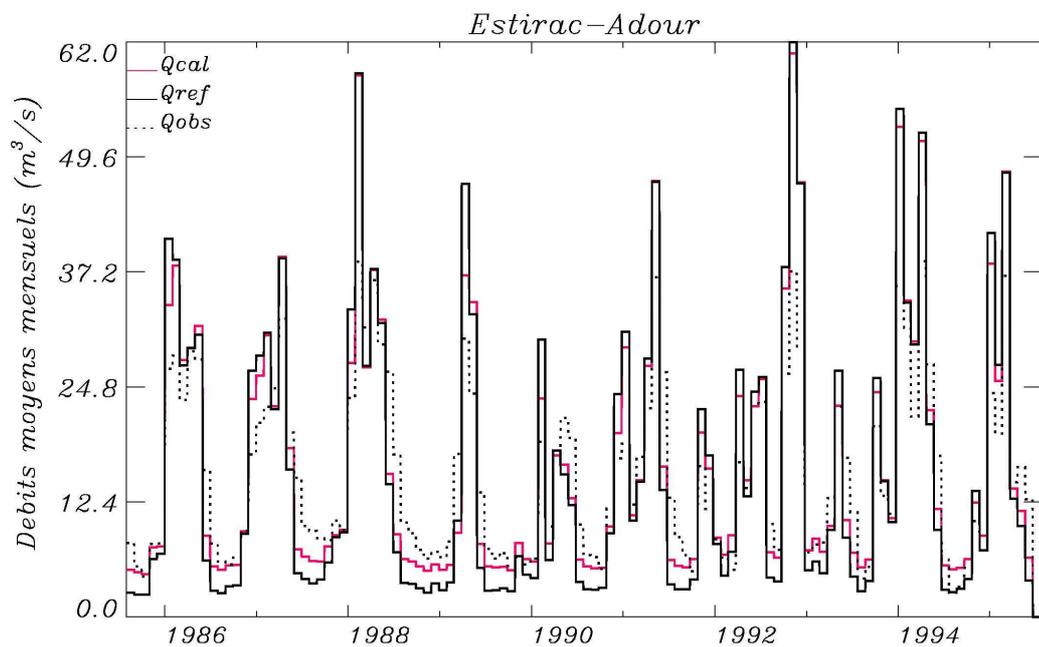


Rap Sim_cal/Obs= 0.82 Rap Sim_ref/Obs= 0.76 Em_cal= 0.82 Em_ref= 0.80

Comparaison des débits simulés par ISBA-MODCOU avant calage (ref – trait continu noir), après calage (cal – trait continu rouge) et des débits naturalisés (obs - trait pointillé noir), aux stations de Tonneins sur la Garonne et de Villemur sur le Tarn. Deux critères statistiques ont été calculés : le rapport des débits simulés sur observés (Rap) et le critère de Nash ou Efficience (Em).

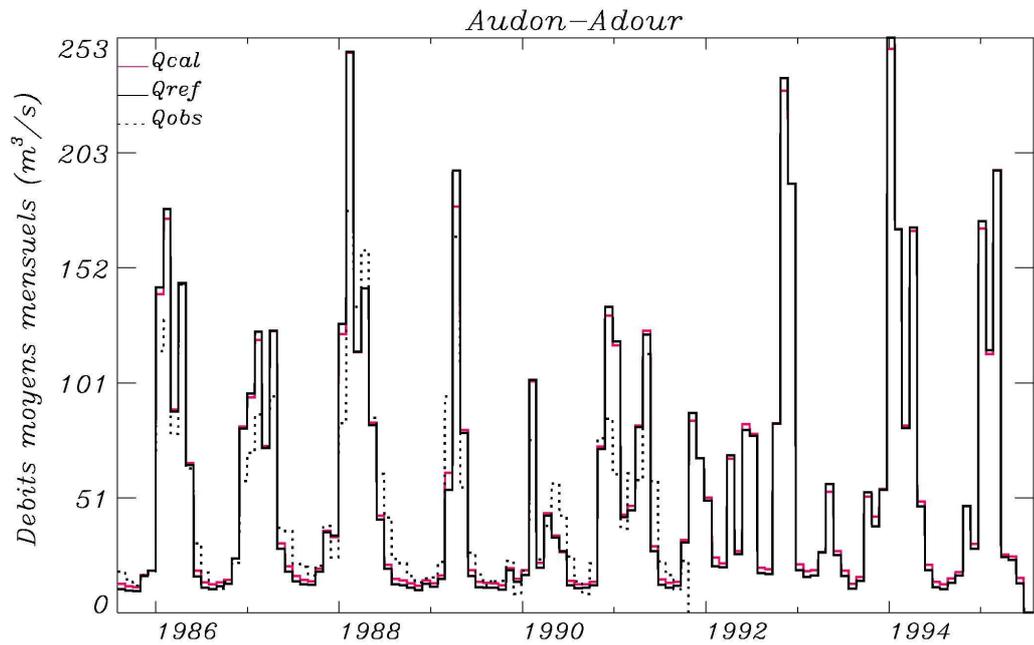
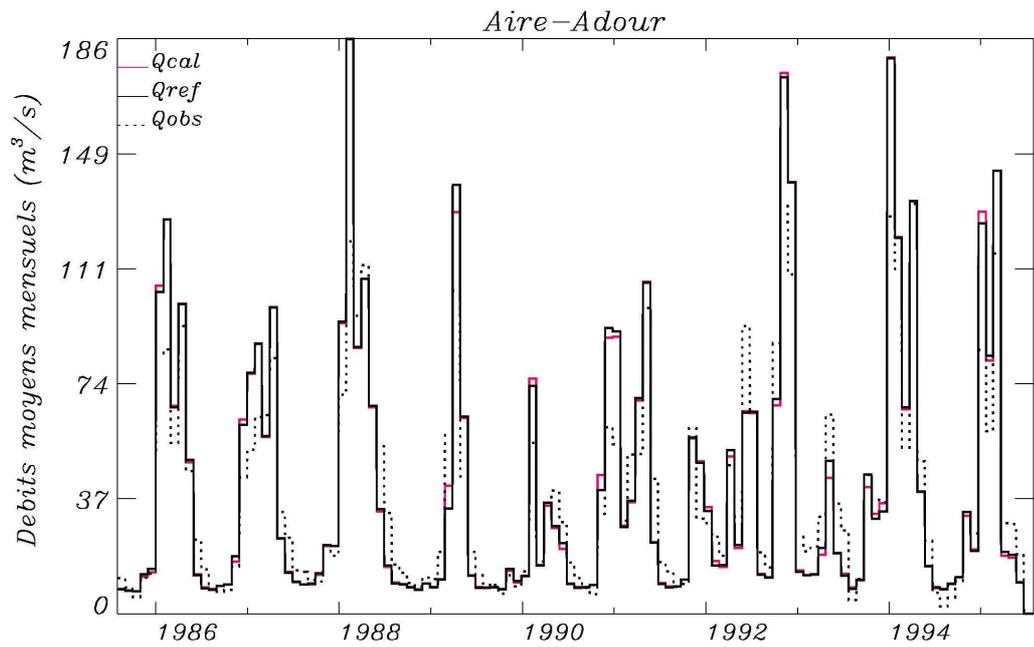


Rap Sim_cal/Obs= 1.02 Rap Sim_ref/Obs= 1.07 Em_cal= 0.86 Em_ref= 0.87

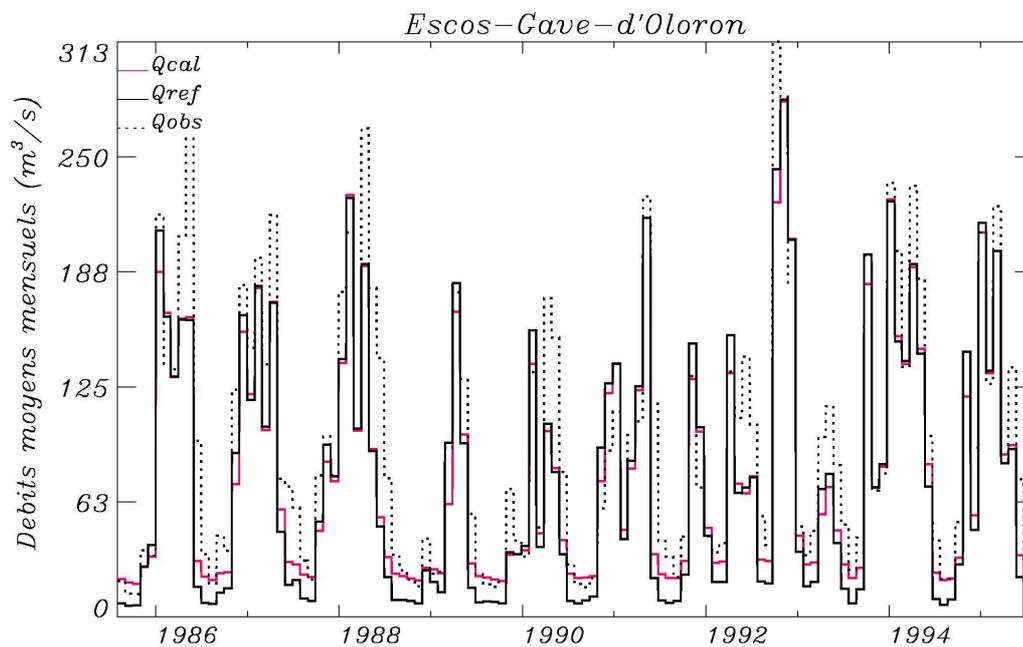
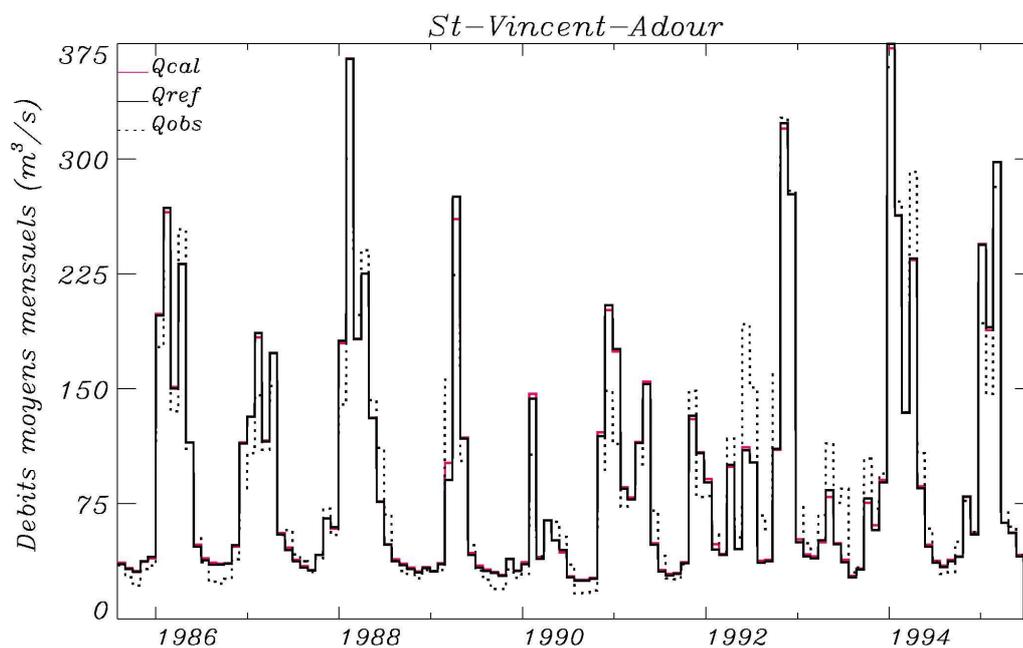


Rap Sim_cal/Obs= 1.06 Rap Sim_ref/Obs= 1.01 Em_cal= 0.62 Em_ref= 0.43

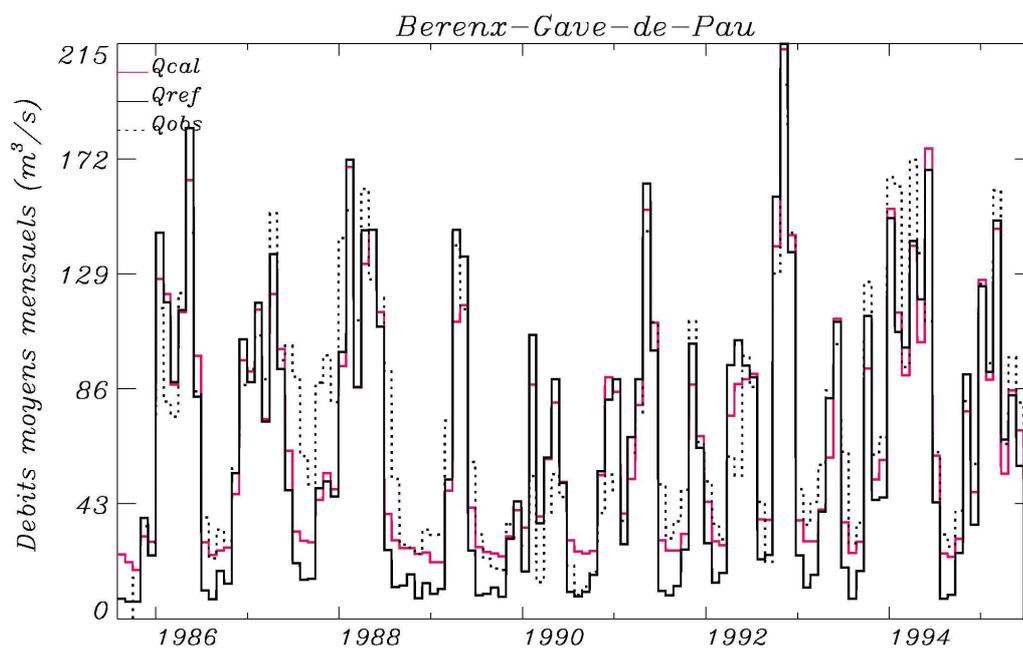
Comparaison des débits simulés par ISBA-MODCOU avant calage (ref – trait continu noir), après calage (cal – trait continu rouge) et des débits naturalisés (obs - trait pointillé noir), aux stations de Piquecos sur l'Aveyron et Estirac sur l'Adour. Deux critères statistiques ont été calculés : le rapport des débits simulés sur observés (Rap) et le critère de Nash ou Efficience (Em).



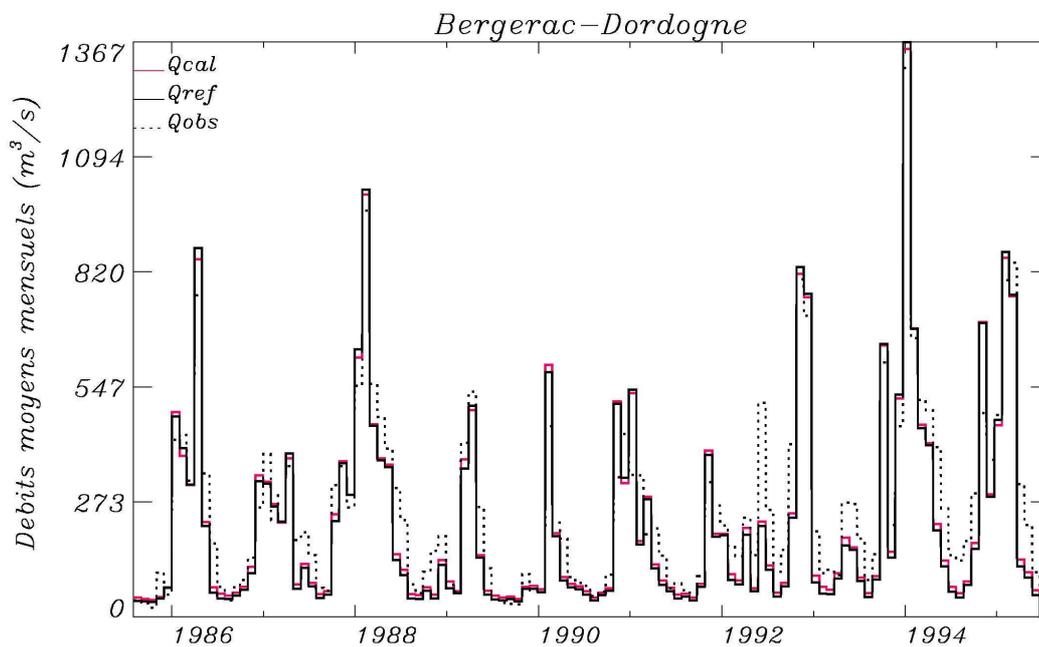
Comparaison des débits simulés par ISBA-MODCOU avant calage (ref – trait continu noir), après calage (cal – trait continu rouge) et des débits naturalisés (obs - trait pointillé noir), aux stations d'Aire et d'Audon sur l'Adour. Deux critères statistiques ont été calculés : le rapport des débits simulés sur observés (Rap) et le critère de Nash ou Efficience (Em).



Comparaison des débits simulés par ISBA-MODCOU avant calage (ref – trait continu noir), après calage (cal – trait continu rouge) et des débits naturalisés (obs - trait pointillé noir), aux stations de St Vincent de Paul sur l'Adour et d'Escos sur le Gave d'Oloron. Deux critères statistiques ont été calculés : le rapport des débits simulés sur observés (Rap) et le critère de Nash ou Efficience (Em).



Rap Sim_cal/Obs= 0.94 Rap Sim_ref/Obs= 0.88 Em_cal= 0.79 Em_ref= 0.69



Rap Sim_cal/Obs= 0.88 Rap Sim_ref/Obs= 0.85 Em_cal= 0.87 Em_ref= 0.85

Comparaison des débits simulés par ISBA-MODCOU avant calage (ref – trait continu noir), après calage (cal – trait continu rouge) et des débits naturalisés (obs - trait pointillé noir), aux stations de Berenx sur le Gave de Pau et de Bergerac sur la Dordogne. Deux critères statistiques ont été calculés : le rapport des débits simulés sur observés (Rap) et le critère de Nash ou Efficience (Em).

ANNEXE D

Station	Scénario	Juill	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Etiage (juillet-octobre)	Débit min.
Foix	UR	0,85	0,93	1,01	1,06	0,90	1,12	2,09	1,78	1,26	0,99	0,72	0,66	0,99	0,96
	HC	0,86	0,88	0,87	0,94	1,00	1,16	1,55	1,48	1,29	1,16	0,67	0,56	0,90	0,89
	CNRM HR	0,83	0,91	0,95	1,03	0,88	1,13	1,31	1,19	1,17	0,83	0,44	0,47	0,95	0,94
	CNRM LR	0,89	0,92	0,93	1,01	1,16	1,31	1,65	1,32	1,08	1,16	0,68	0,52	0,95	0,94
	LMD HR	0,83	0,86	0,85	0,80	0,81	0,85	0,90	1,02	0,88	0,76	0,46	0,47	0,82	0,86
	LMD LR	1,08	0,94	0,91	0,76	0,73	0,83	0,84	0,83	0,83	0,88	0,73	0,90	0,88	0,91
	SC_CONT_2055	0,91	0,92	0,92	0,83	0,82	0,85	0,80	0,73	0,90	1,01	0,67	0,60	0,87	0,92
Auterive	UR	0,85	0,94	1,02	1,07	0,89	1,11	2,20	1,93	1,16	0,83	0,69	0,66	0,99	0,95
	HC	0,85	0,88	0,87	0,96	1,00	1,16	1,47	1,42	1,18	1,02	0,67	0,58	0,91	0,89
	CNRM HR	0,83	0,91	0,95	1,00	0,84	1,10	1,25	1,26	1,16	0,73	0,42	0,49	0,94	0,93
	CNRM LR	0,88	0,92	0,94	1,02	1,17	1,33	1,70	1,31	0,98	1,06	0,66	0,53	0,96	0,93
	LMD HR	0,82	0,86	0,85	0,80	0,80	0,82	0,82	0,93	0,81	0,67	0,45	0,49	0,82	0,86
	LMD LR	1,09	0,93	0,91	0,75	0,70	0,77	0,74	0,72	0,78	0,79	0,74	0,97	0,87	0,91
	SC_CONT_2055	0,90	0,92	0,92	0,82	0,81	0,80	0,69	0,62	0,91	0,99	0,67	0,62	0,87	0,92
Valentine	UR	0,74	0,91	1,04	1,12	0,88	1,11	1,57	1,58	1,20	0,96	0,80	0,59	0,97	0,96
	HC	0,74	0,83	0,80	0,91	0,96	1,15	1,25	1,35	1,31	1,06	0,74	0,50	0,84	0,82
	CNRM HR	0,78	0,90	0,91	0,91	0,77	0,95	1,18	1,34	1,40	1,00	0,73	0,53	0,88	0,91
	CNRM LR	0,75	0,88	0,88	0,99	1,22	1,33	1,38	1,24	1,12	1,06	0,80	0,48	0,89	0,89
	LMD HR	0,69	0,79	0,75	0,71	0,74	0,76	0,89	1,05	0,92	0,80	0,59	0,38	0,73	0,76
	LMD LR	0,99	0,92	0,86	0,72	0,66	0,74	0,85	0,93	0,89	0,87	0,80	0,77	0,85	0,87
	SC_CONT_2055	0,79	0,87	0,83	0,77	0,75	0,74	0,77	0,82	0,96	1,00	0,74	0,51	0,81	0,85
Roquefort	UR	0,81	0,93	1,01	1,09	0,85	1,09	1,88	1,69	1,02	0,79	0,69	0,63	0,99	0,96
	HC	0,81	0,88	0,87	0,93	0,97	1,16	1,28	1,31	1,14	1,02	0,63	0,58	0,89	0,89
	CNRM HR	0,82	0,92	0,93	0,91	0,77	0,97	1,15	1,24	1,24	0,83	0,53	0,57	0,90	0,93
	CNRM LR	0,85	0,92	0,93	0,99	1,17	1,38	1,49	1,20	0,93	1,03	0,67	0,53	0,94	0,93
	LMD HR	0,79	0,85	0,84	0,80	0,77	0,79	0,82	0,95	0,82	0,76	0,48	0,53	0,81	0,86
	LMD LR	1,11	0,93	0,90	0,76	0,69	0,75	0,74	0,78	0,82	0,84	0,76	1,05	0,89	0,91
	SC_CONT_2055	0,89	0,91	0,90	0,82	0,77	0,76	0,68	0,67	0,93	1,03	0,71	0,67	0,86	0,91

Rapports moyens sur les 10 ans de la simulation, des débits simulés sous climat modifié (2050-2060) aux débits simulés sous climat actuel pour chaque mois, pour l'ensemble de la période d'étiage et pour les débits mensuels minimaux.

Station	Scénario	Juill	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Etiage (juillet-octobre)	Débit min.
Portet	UR	0,78	0,92	1,03	1,10	0,87	1,09	1,87	1,78	1,10	0,83	0,72	0,61	0,99	0,96
	HC	0,78	0,86	0,84	0,93	0,97	1,14	1,29	1,34	1,18	1,00	0,68	0,53	0,87	0,86
	CNRM HR	0,80	0,91	0,93	0,93	0,77	0,98	1,18	1,31	1,26	0,83	0,56	0,52	0,90	0,93
	CNRM LR	0,81	0,90	0,91	1,00	1,19	1,33	1,52	1,26	0,98	1,03	0,71	0,50	0,93	0,92
	LMD HR	0,75	0,83	0,80	0,76	0,75	0,77	0,81	0,94	0,83	0,72	0,51	0,43	0,78	0,82
	LMD LR	1,04	0,92	0,88	0,73	0,66	0,73	0,75	0,77	0,81	0,80	0,77	0,89	0,86	0,89
	SC_CONT_2055	0,84	0,89	0,87	0,79	0,76	0,75	0,69	0,67	0,91	0,99	0,71	0,57	0,83	0,89
Lamagistère	UR	0,79	0,94	1,02	1,07	0,84	1,05	1,76	1,66	1,09	0,79	0,74	0,66	0,98	0,97
	HC	0,77	0,87	0,83	0,98	1,05	1,15	1,18	1,19	1,06	0,89	0,71	0,60	0,87	0,87
	CNRM HR	0,81	0,93	0,93	0,84	0,67	0,82	1,07	1,38	1,35	0,87	0,61	0,59	0,86	0,93
	CNRM LR	0,82	0,92	0,93	1,04	1,25	1,36	1,53	1,22	0,91	0,99	0,75	0,57	0,95	0,93
	LMD HR	0,75	0,85	0,80	0,73	0,74	0,71	0,78	0,96	0,83	0,72	0,57	0,51	0,76	0,83
	LMD LR	1,02	0,92	0,88	0,69	0,61	0,65	0,69	0,78	0,81	0,78	0,82	0,99	0,84	0,90
	SC_CONT_2055	0,82	0,90	0,89	0,81	0,77	0,71	0,69	0,67	0,95	0,95	0,70	0,63	0,84	0,90
Tonneins	UR	0,80	0,96	1,04	1,08	0,87	1,09	1,65	1,60	1,09	0,83	0,76	0,69	0,99	0,98
	HC	0,75	0,87	0,82	1,00	1,13	1,17	1,15	1,15	1,03	0,86	0,71	0,63	0,87	0,87
	CNRM HR	0,81	0,93	0,93	0,82	0,66	0,82	1,10	1,39	1,37	0,92	0,63	0,64	0,85	0,94
	CNRM LR	0,82	0,92	0,94	1,05	1,24	1,39	1,50	1,21	0,90	1,01	0,78	0,60	0,95	0,94
	LMD HR	0,75	0,85	0,80	0,74	0,74	0,70	0,77	0,97	0,84	0,75	0,59	0,56	0,76	0,84
	LMD LR	1,00	0,92	0,87	0,69	0,61	0,66	0,72	0,82	0,84	0,82	0,86	1,07	0,83	0,91
	SC_CONT_2055	0,82	0,90	0,88	0,80	0,76	0,69	0,71	0,68	0,95	0,96	0,70	0,66	0,83	0,90
Villemur	UR	0,88	0,96	0,98	0,97	0,81	0,99	1,68	1,56	1,01	0,77	0,80	0,84	0,94	0,97
	HC	0,84	0,92	0,86	1,04	1,10	1,11	1,10	1,07	0,93	0,80	0,81	0,83	0,92	0,90
	CNRM HR	0,88	0,96	0,94	0,78	0,65	0,77	0,96	1,30	1,24	0,84	0,76	0,84	0,86	0,96
	CNRM LR	0,90	0,95	0,96	1,07	1,25	1,26	1,46	1,15	0,85	0,95	0,86	0,82	0,99	0,96
	LMD HR	0,82	0,90	0,85	0,74	0,77	0,74	0,83	0,99	0,82	0,74	0,73	0,79	0,79	0,88
	LMD LR	0,97	0,95	0,90	0,70	0,60	0,66	0,70	0,77	0,78	0,77	0,89	1,13	0,83	0,93
	SC_CONT_2055	0,87	0,94	0,94	0,87	0,83	0,78	0,74	0,72	1,01	0,86	0,73	0,83	0,89	0,94

Rapports moyens sur les 10 ans de la simulation, des débits simulés sous climat modifié (2050-2060) aux débits simulés sous climat actuel pour chaque mois, pour l'ensemble de la période d'été et pour les débits mensuels minimaux.

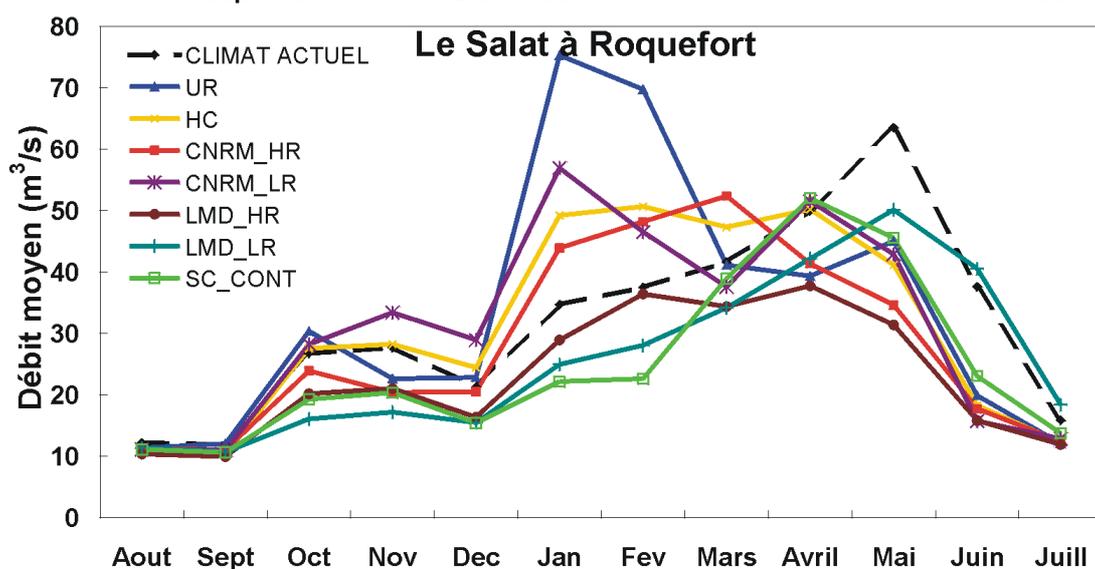
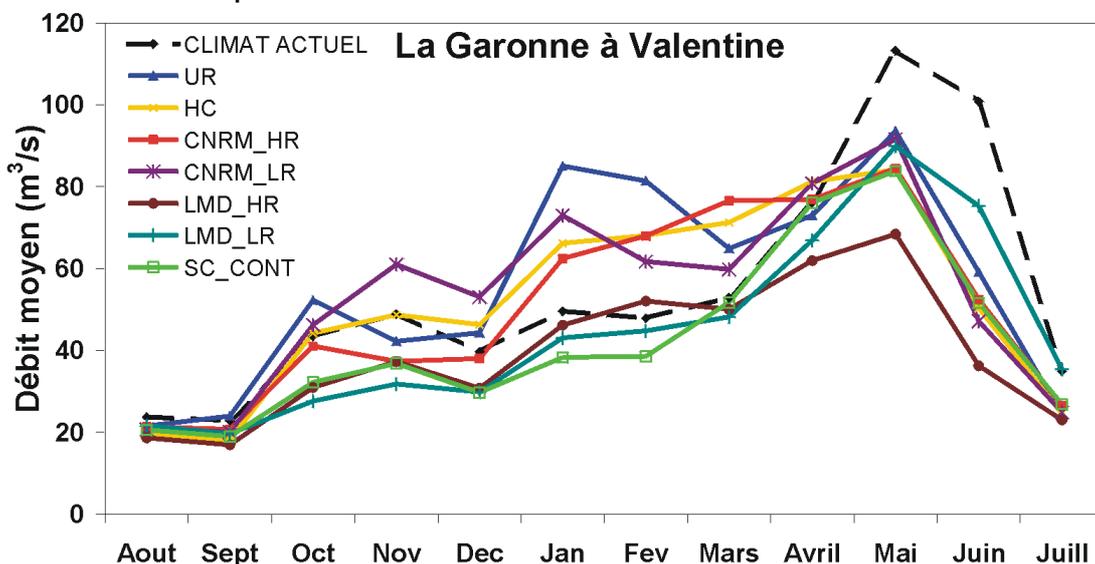
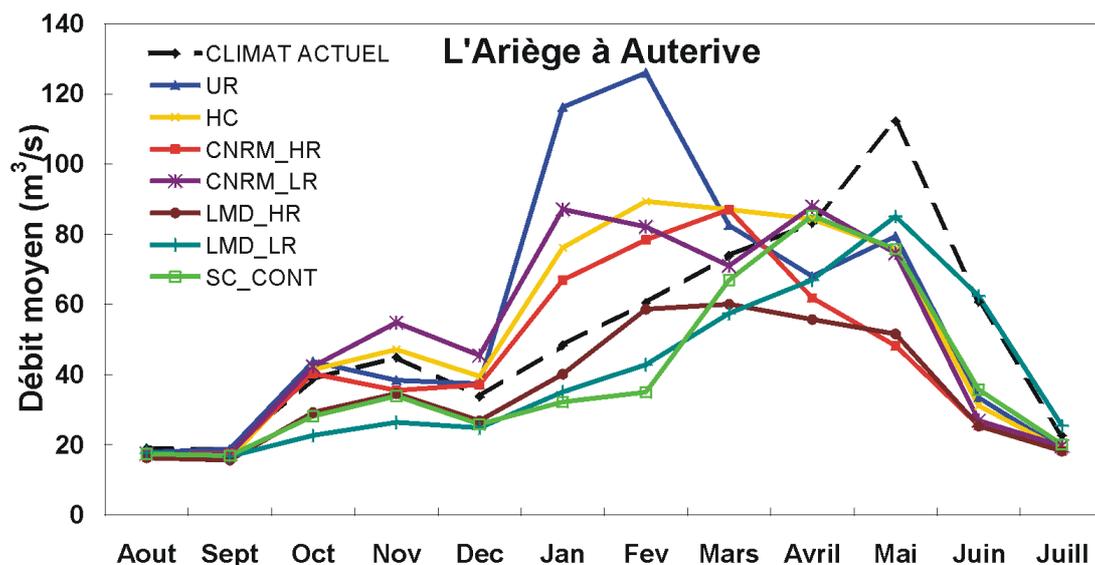
Station	Scénario	Juill	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Etiage (juillet-octobre)	Débit min.
Loubejac	UR	0,77	0,99	1,08	1,08	0,82	1,13	1,65	1,51	1,10	0,79	0,78	0,69	0,99	0,97
	HC	0,70	0,82	0,75	1,07	1,17	1,31	1,15	1,13	0,97	0,74	0,73	0,65	0,86	0,89
	CNRM HR	0,78	0,95	0,90	0,73	0,56	0,67	1,03	1,42	1,43	0,98	0,70	0,68	0,78	0,95
	CNRM LR	0,80	0,90	0,95	1,08	1,43	1,52	1,53	1,13	0,83	0,99	0,82	0,62	0,96	0,94
	LMD HR	0,69	0,81	0,73	0,74	0,74	0,63	0,76	1,05	0,84	0,77	0,69	0,62	0,71	0,88
	LMD LR	0,98	0,87	0,80	0,66	0,59	0,54	0,65	0,86	0,84	0,82	1,00	1,45	0,76	0,92
	SC_CONT_2055	0,77	0,85	0,84	0,77	0,76	0,60	0,70	0,65	1,00	0,95	0,65	0,69	0,78	0,91
Estirac	UR	0,82	0,96	1,06	1,10	0,84	1,04	1,54	1,32	0,93	0,80	0,69	0,69	1,00	0,98
	HC	0,80	0,90	0,89	0,96	0,92	1,07	1,10	1,16	1,09	0,88	0,62	0,68	0,89	0,92
	CNRM HR	0,90	0,95	0,94	0,91	0,67	0,82	1,14	1,35	1,40	0,93	0,59	0,74	0,92	0,96
	CNRM LR	0,82	0,92	0,92	0,97	1,24	1,34	1,40	1,01	0,86	0,95	0,62	0,60	0,91	0,94
	LMD HR	0,80	0,89	0,87	0,81	0,70	0,69	0,77	0,91	0,83	0,70	0,52	0,62	0,82	0,90
	LMD LR	1,14	0,96	0,92	0,79	0,64	0,70	0,77	0,82	0,88	0,83	0,79	1,29	0,92	0,94
	SC_CONT_2055	0,86	0,91	0,87	0,78	0,64	0,62	0,61	0,62	0,90	0,91	0,63	0,69	0,83	0,91
Aire	UR	0,80	0,97	1,12	1,17	0,86	1,06	1,55	1,35	0,95	0,76	0,72	0,68	1,03	0,98
	HC	0,77	0,88	0,87	0,96	0,94	1,10	1,09	1,18	1,10	0,82	0,65	0,68	0,88	0,91
	CNRM HR	0,89	0,95	0,94	0,92	0,60	0,81	1,20	1,46	1,50	0,95	0,62	0,74	0,91	0,95
	CNRM LR	0,80	0,91	0,92	0,98	1,32	1,40	1,45	1,00	0,83	0,94	0,65	0,59	0,90	0,93
	LMD HR	0,78	0,87	0,84	0,80	0,65	0,65	0,78	0,94	0,83	0,71	0,55	0,61	0,80	0,89
	LMD LR	1,15	0,94	0,89	0,77	0,58	0,68	0,77	0,85	0,90	0,86	0,88	1,39	0,92	0,94
	SC_CONT_2055	0,84	0,89	0,83	0,76	0,59	0,56	0,59	0,61	0,95	0,99	0,66	0,69	0,81	0,89
Audon	UR	0,82	0,97	1,11	1,24	0,88	1,07	1,53	1,34	0,97	0,79	0,76	0,72	1,07	0,99
	HC	0,79	0,89	0,87	0,93	0,93	1,09	1,08	1,18	1,09	0,82	0,69	0,72	0,87	0,90
	CNRM HR	0,90	0,96	0,96	0,92	0,62	0,83	1,22	1,48	1,50	0,99	0,67	0,79	0,93	0,97
	CNRM LR	0,82	0,92	0,92	0,97	1,30	1,37	1,45	1,01	0,84	0,95	0,69	0,64	0,91	0,93
	LMD HR	0,80	0,88	0,84	0,77	0,66	0,67	0,79	0,95	0,85	0,74	0,59	0,65	0,80	0,89
	LMD LR	1,12	0,95	0,90	0,76	0,60	0,71	0,79	0,87	0,92	0,89	0,91	1,37	0,91	0,94
	SC_CONT_2055	0,84	0,89	0,84	0,74	0,61	0,59	0,61	0,64	0,96	1,01	0,69	0,72	0,80	0,89

Rapports moyens sur les 10 ans de la simulation, des débits simulés sous climat modifié (2050-2060) aux débits simulés sous climat actuel pour chaque mois, pour l'ensemble de la période d'étiage et pour les débits mensuels minimaux.

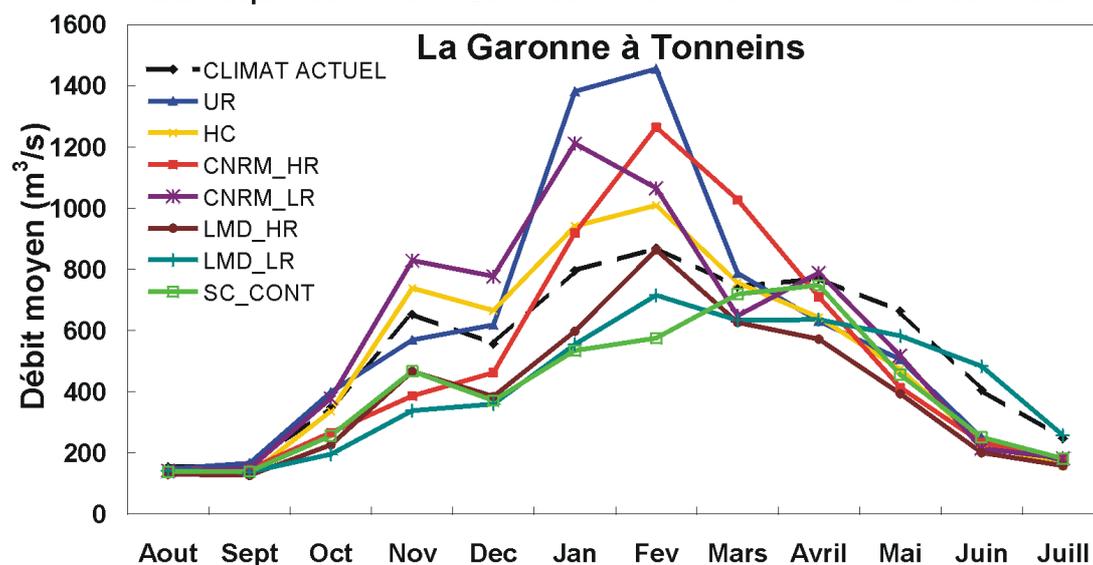
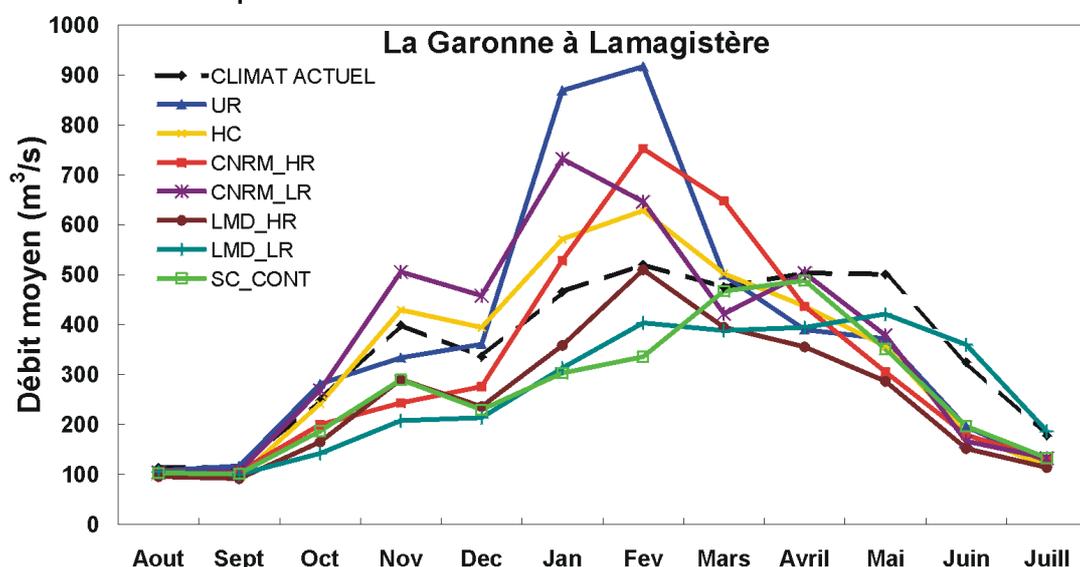
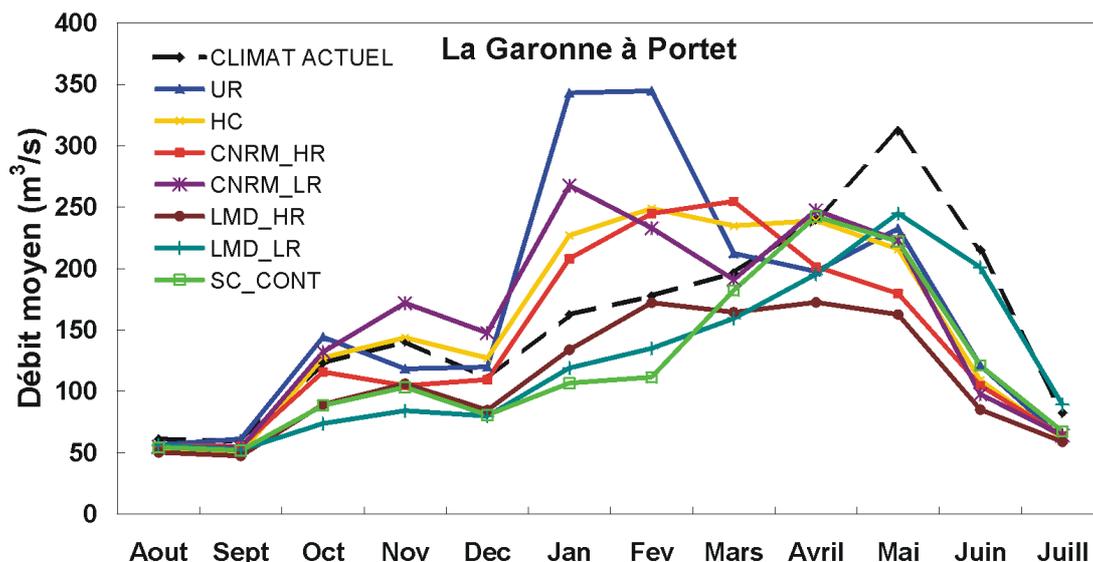
Station	Scénario	Juill	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Etiage (juillet-octobre)	Débit min.
St Vincent	UR	0,91	1,02	1,11	1,19	0,94	1,09	1,47	1,32	1,03	0,86	0,87	0,85	1,07	1,03
	HC	0,80	0,89	0,88	0,93	0,92	1,07	1,04	1,13	1,06	0,82	0,75	0,77	0,88	0,90
	CNRM HR	1,02	1,06	1,05	1,01	0,73	0,90	1,23	1,46	1,49	1,07	0,85	0,95	1,03	1,05
	CNRM LR	0,90	0,97	0,97	1,00	1,25	1,33	1,40	1,06	0,91	0,99	0,80	0,78	0,96	0,98
	LMD HR	0,80	0,86	0,84	0,81	0,71	0,70	0,77	0,93	0,84	0,76	0,66	0,70	0,82	0,86
	LMD LR	1,03	0,93	0,91	0,81	0,68	0,76	0,79	0,86	0,92	0,90	0,93	1,24	0,91	0,92
	SC_CONT_2055	0,80	0,85	0,82	0,78	0,66	0,64	0,62	0,64	0,91	0,97	0,71	0,73	0,81	0,85
Escos	UR	0,85	0,97	1,09	1,14	0,83	1,12	1,51	1,35	1,05	0,84	0,68	0,72	1,04	0,99
	HC	0,80	0,89	0,87	0,95	0,85	1,10	1,12	1,25	1,14	0,85	0,60	0,70	0,90	0,90
	CNRM HR	0,91	0,96	0,95	0,87	0,58	0,82	1,18	1,44	1,45	0,91	0,56	0,77	0,91	0,96
	CNRM LR	0,83	0,91	0,90	0,95	1,25	1,41	1,37	1,04	0,90	0,94	0,63	0,63	0,91	0,92
	LMD HR	0,81	0,89	0,84	0,78	0,65	0,72	0,85	1,01	0,84	0,73	0,51	0,64	0,81	0,88
	LMD LR	1,08	0,96	0,91	0,76	0,61	0,79	0,89	0,94	0,93	0,88	0,74	1,22	0,88	0,94
	SC_CONT_2055	0,84	0,91	0,85	0,77	0,66	0,68	0,75	0,77	0,96	0,97	0,61	0,68	0,82	0,89
Berenx	UR	0,77	0,94	1,10	1,19	0,88	1,05	1,44	1,36	1,13	1,00	0,85	0,61	1,02	0,97
	HC	0,74	0,85	0,81	0,94	0,91	1,06	1,10	1,23	1,22	1,09	0,77	0,52	0,85	0,83
	CNRM HR	0,84	0,93	0,92	0,91	0,67	0,82	1,14	1,38	1,47	1,11	0,78	0,61	0,89	0,93
	CNRM LR	0,76	0,89	0,88	0,98	1,28	1,28	1,32	1,07	0,98	1,09	0,83	0,53	0,88	0,89
	LMD HR	0,72	0,84	0,77	0,73	0,69	0,73	0,84	0,99	0,90	0,90	0,63	0,43	0,76	0,79
	LMD LR	0,99	0,94	0,88	0,76	0,65	0,76	0,86	0,92	0,94	1,02	0,88	0,82	0,87	0,89
	SC_CONT_2055	0,78	0,89	0,83	0,77	0,69	0,69	0,74	0,75	0,94	1,07	0,75	0,52	0,80	0,85
Bergerac	UR	0,88	1,02	1,13	1,19	0,94	1,20	1,41	1,36	1,11	1,04	0,95	0,83	1,10	1,01
	HC	0,74	0,87	0,76	1,02	1,07	1,24	1,12	1,05	0,93	0,78	0,78	0,71	0,88	0,87
	CNRM HR	0,80	0,94	0,94	0,72	0,57	0,94	1,17	1,25	1,26	1,22	0,89	0,73	0,81	0,95
	CNRM LR	0,84	0,94	0,95	1,05	1,29	1,45	1,39	1,13	0,89	1,09	0,96	0,70	0,97	0,95
	LMD HR	0,78	0,88	0,79	0,71	0,76	0,74	0,82	1,05	0,92	0,85	0,79	0,68	0,76	0,89
	LMD LR	0,96	0,94	0,85	0,68	0,71	0,85	0,92	1,02	1,02	1,05	1,10	1,30	0,80	0,95
	SC_CONT_2055	0,84	0,91	0,82	0,72	0,74	0,72	0,90	0,81	0,93	1,04	0,75	0,73	0,79	0,91

Rapports moyens sur les 10 ans de la simulation, des débits simulés sous climat modifié (2050-2060) aux débits simulés sous climat actuel pour chaque mois, pour l'ensemble de la période d'étiage et pour les débits mensuels minimaux.

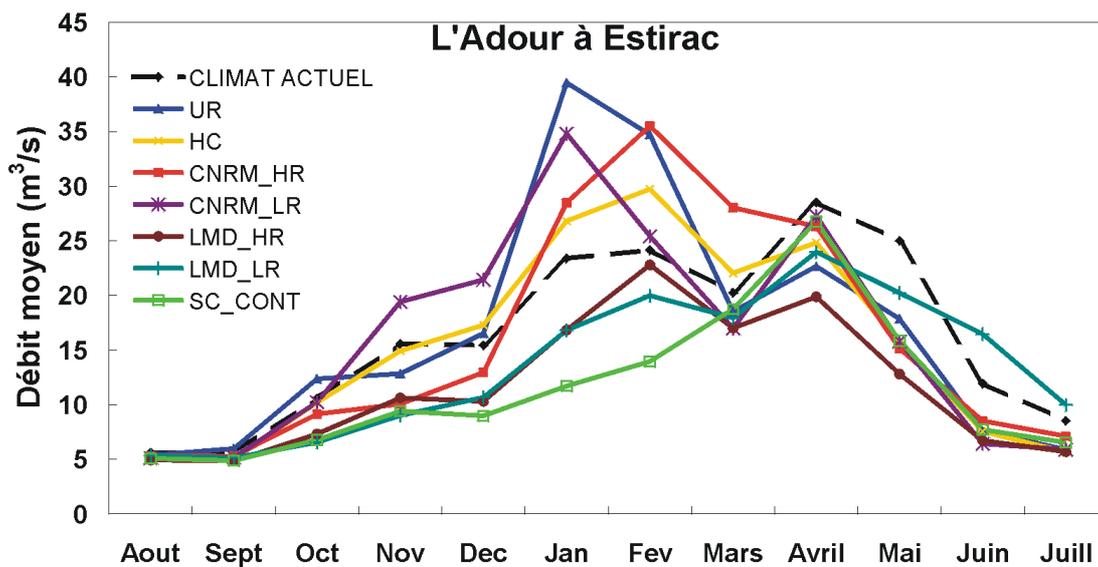
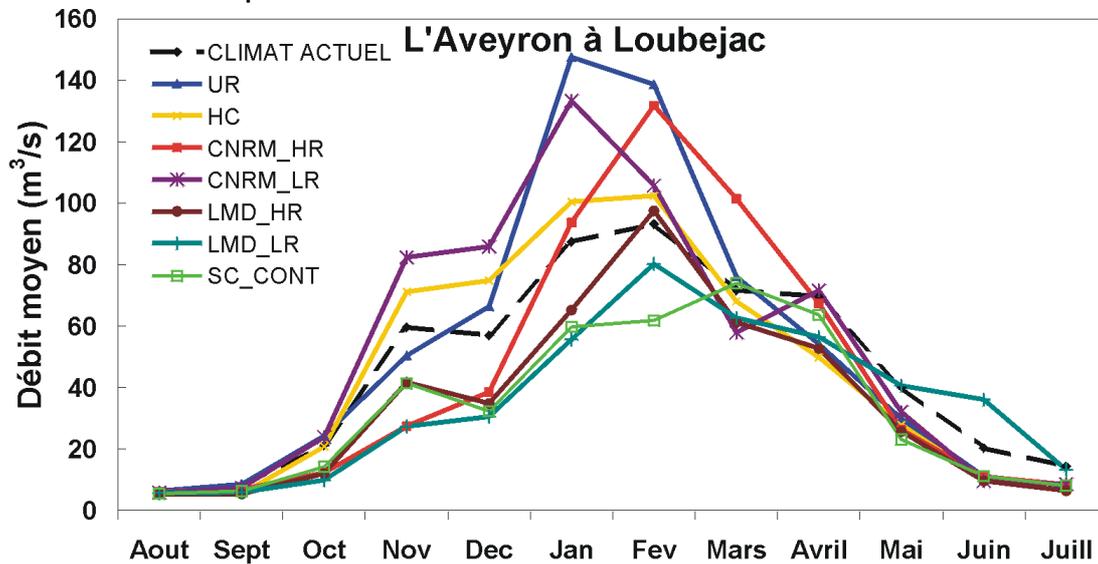
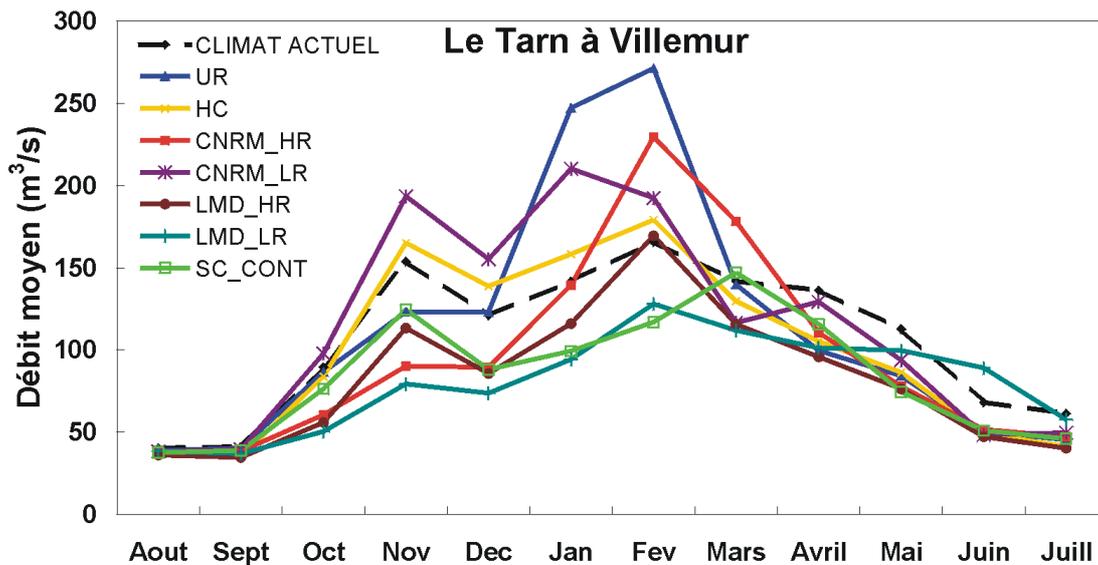
ANNEXE D



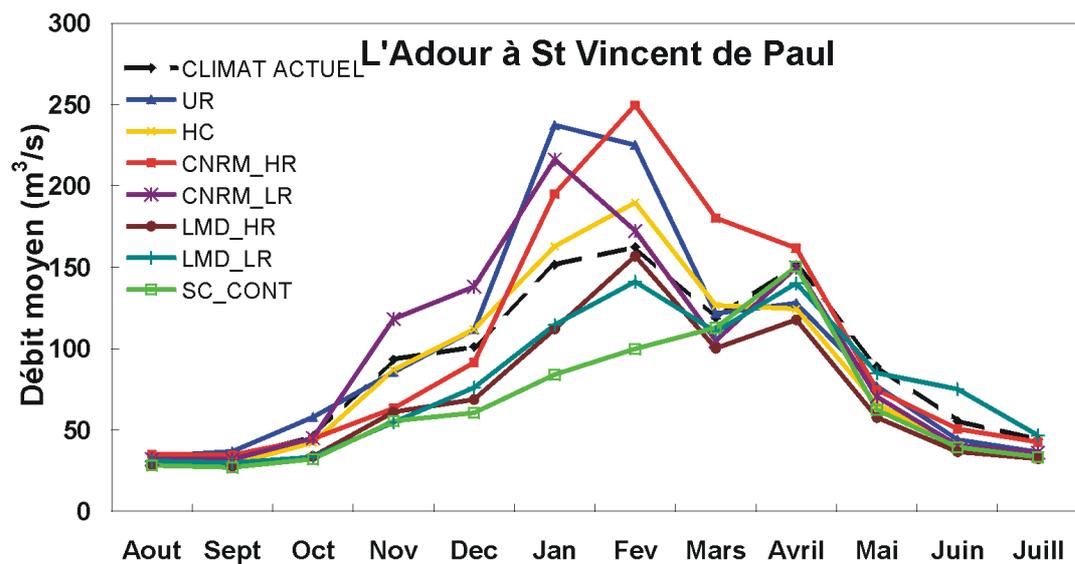
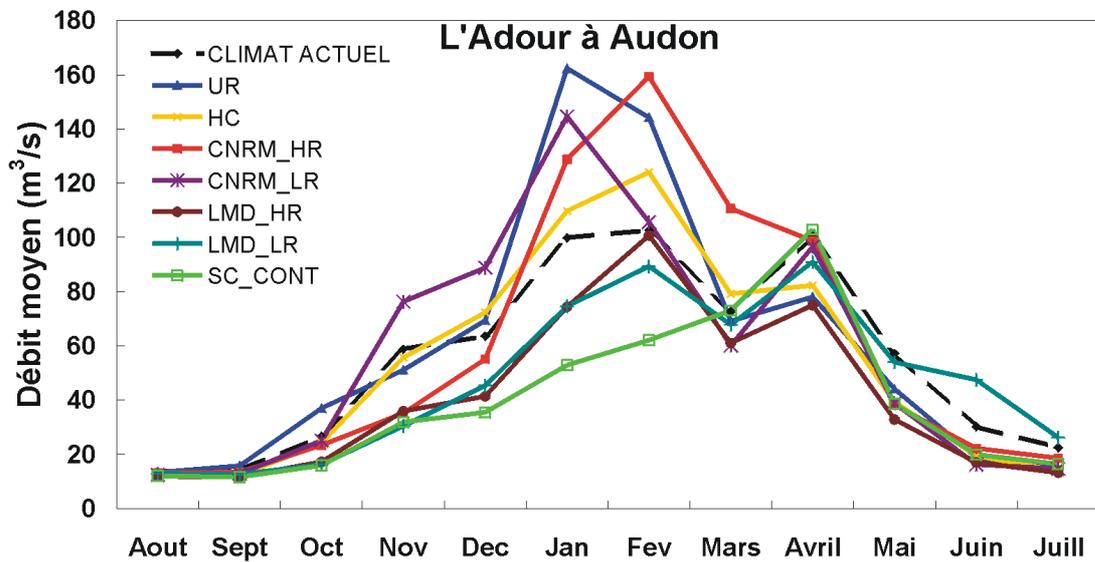
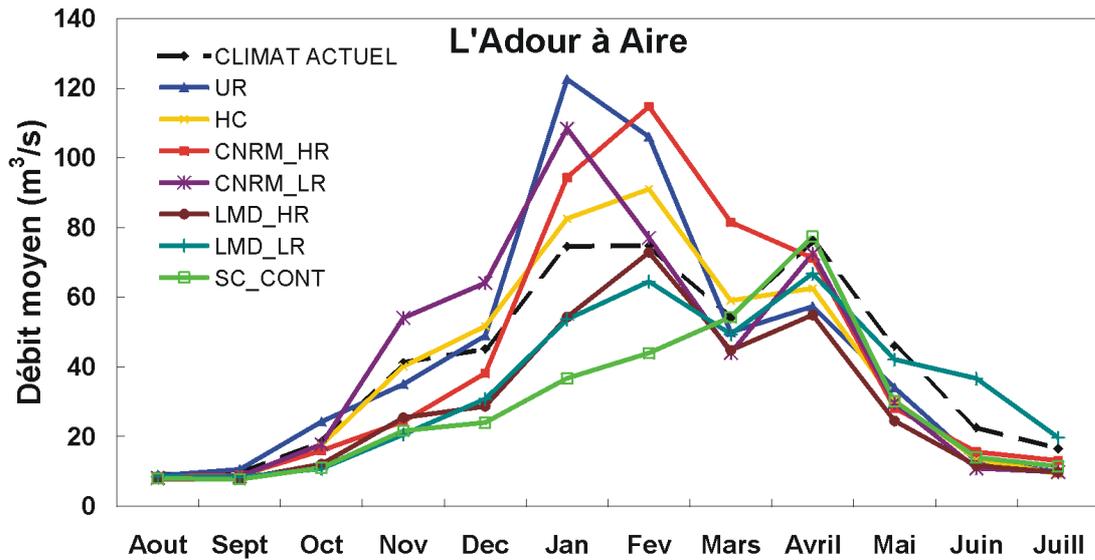
Débits moyens mensuels à Auterive, Valentine et Roquefort simulés sous climat actuel (1985-1995) comparés aux débits moyens mensuels simulés sous climat futur pour chacun des 7 scénarii.



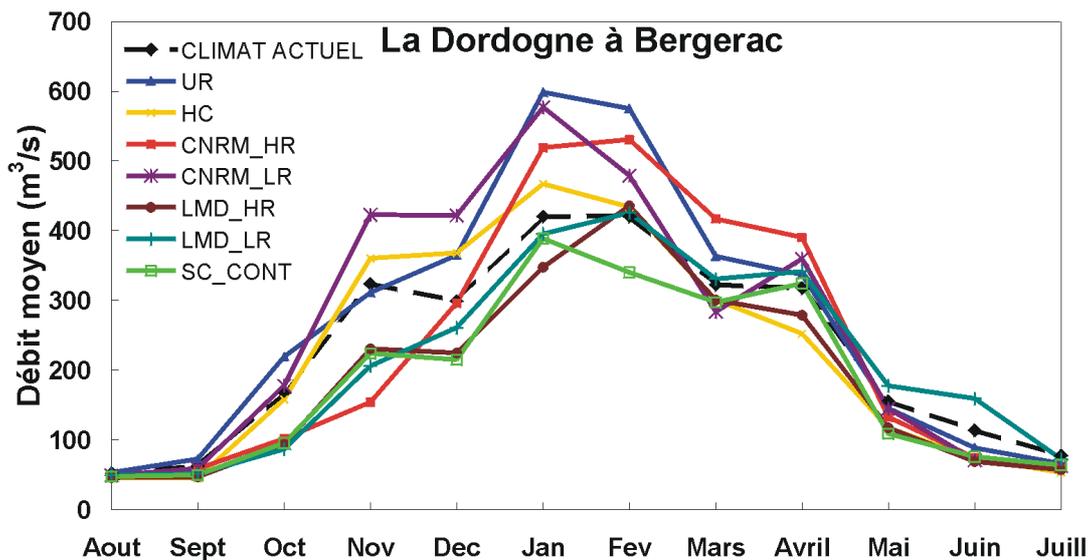
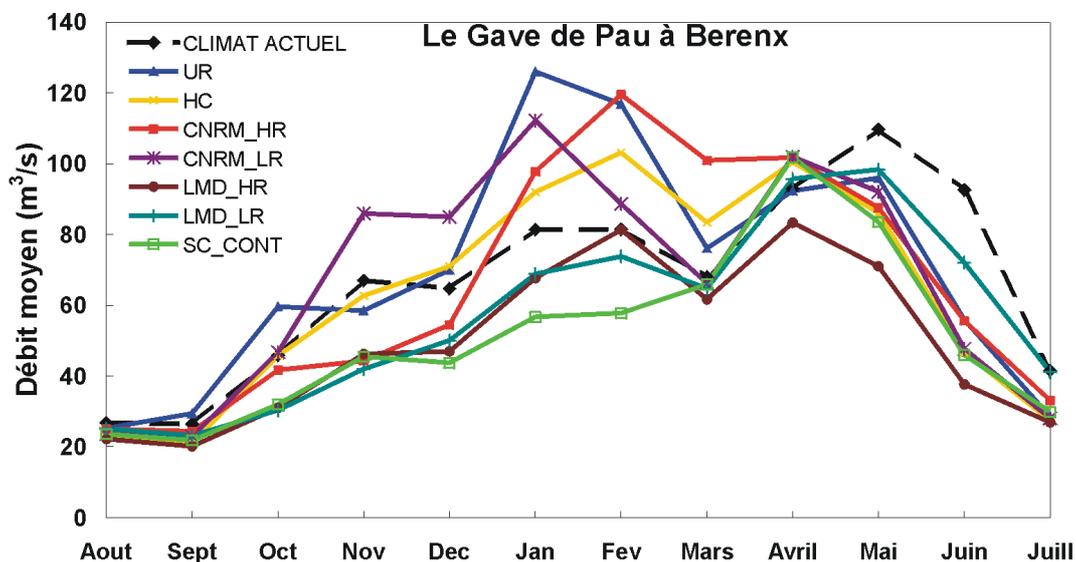
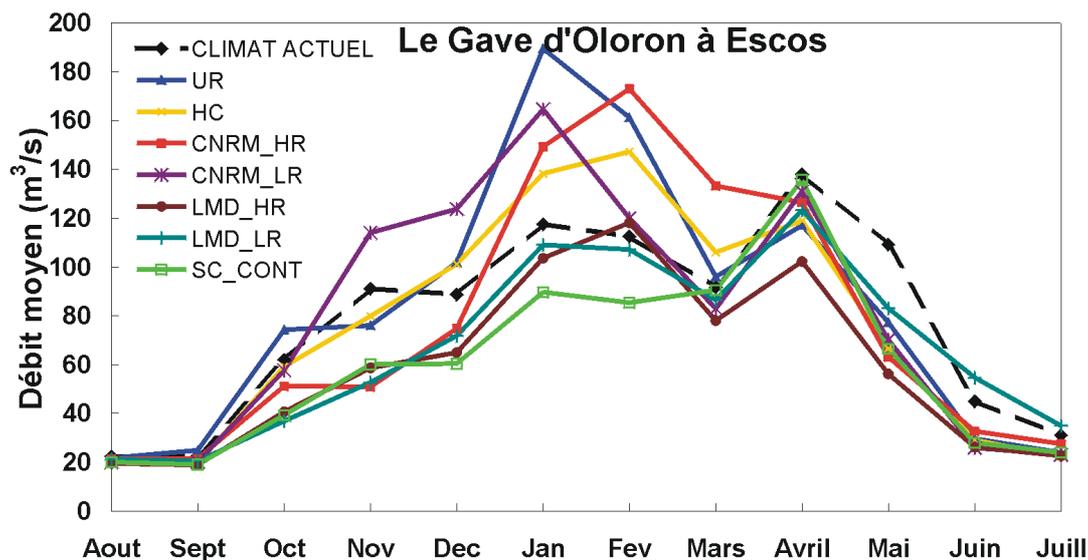
Débits moyens mensuels à Portet, Lamagistère et Tonneins simulés sous climat actuel (1985-1995) comparés aux débits moyens mensuels simulés sous climat futur pour chacun des 7 scénarii.



Débits moyens mensuels à Villemur, Loubejac et Estirac simulés sous climat actuel (1985-1995) comparés aux débits moyens mensuels simulés sous climat futur pour chacun des 7 scénarii.



Débits moyens mensuels à Aire, Audon et St Vincent simulés sous climat actuel (1985-1995) comparés aux débits moyens mensuels simulés sous climat futur pour chacun des 7 scénarii.



Débits moyens mensuels à Escos, Berenx et Bergerac simulés sous climat actuel (1985-1995) comparés aux débits moyens mensuels simulés sous climat futur pour chacun des 7 scénarii.