



EPTB Charente

Institution interdépartementale pour l'aménagement  
du fleuve Charente et de ses affluents

## ASSISTANCE A LA GESTION DE L'ETIAGE

### COMPTE RENDU DE MISSIONS

**MISSION 02-1**

Bon de commande n° 09-53

### Modélisation moyen terme scénarii climatiques *Prospective hydrologique liée aux changements globaux*

**ANNEE 2009-2010**



67 allées Jean Jaurès  
31000 Toulouse  
Tél 05 61 62 50 68 -  
Fax 05 61 62 65 58  
E-mail [eaucea@eaucea.fr](mailto:eaucea@eaucea.fr)



AGENCE DE L'EAU  
**ADOUR-GARONNE**

ÉTABLISSEMENT PUBLIC DU MINISTÈRE  
DE L'ÉCOLOGIE ET DU DÉVELOPPEMENT DURABLE



avril 2010

1

<b>1 LES DONNEES DE SIMULATIONS REGIONALISEES CERFACS .....</b>	<b>3</b>
<i>Températures</i>	8
<i>Evapotranspiration</i>	10
<i>Précipitation</i>	14
<b>2 LE MODELE PLUIE-DEBIT : CYCLEAUPE .....</b>	<b>21</b>
<b>2.1 Structure générale du modèle .....</b>	<b>21</b>
<b>2.2 Principe de CycleauPE .....</b>	<b>23</b>
<b>2.3 Cas particulier de la Touvre.....</b>	<b>25</b>
<b>2.4 Adaptation de CycleauPE à des simulations longue période.....</b>	<b>29</b>
<b>3 RESULTATS .....</b>	<b>30</b>

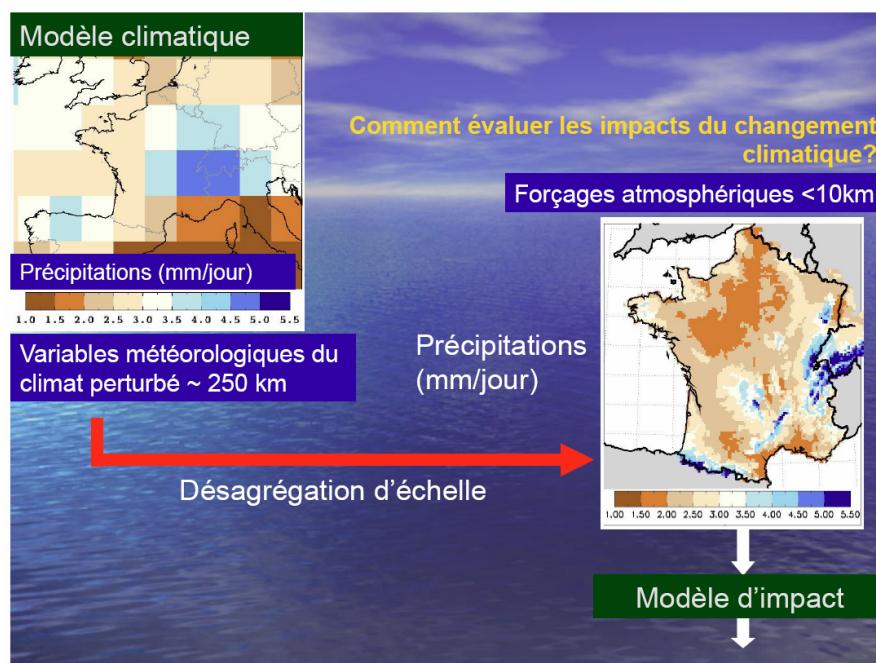
## 1 LES DONNEES DE SIMULATIONS REGIONALISEES CERFACS

L'objectif des méthodes de régionalisation est d'évaluer les changements climatiques avec une distribution géographique beaucoup plus fine (maillage Safran 8 km). Cette étape est d'un grand intérêt pour l'analyse détaillée du territoire. Les chroniques proposées sont elles aussi beaucoup mieux adaptées à notre préoccupation d'une gestion prospective du court et moyen terme puisque ce sont les seules disponibles à ce jour pour traiter du champ proche.

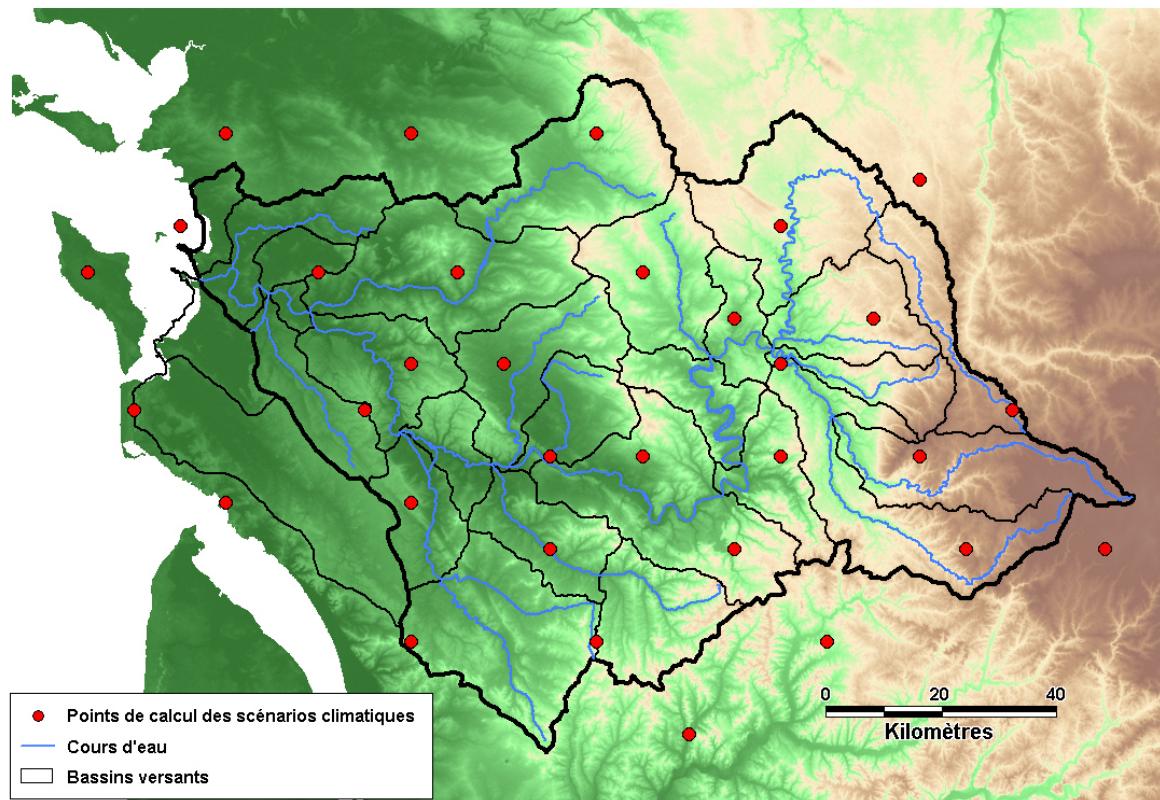
La valorisation des données de simulation peut être conduite avec deux optiques :

- Soit analyser et illustrer l'évolution des phénomènes climatiques (par exemple l'évolution des températures)
- Soit s'intégrer dans des modèles d'impacts (par exemple simulation de la température de l'estuaire).

*Illustration Cerfacs*



## Localisation des stations Cercfacs mobilisées



Notons que les modélisations transmises par le Cercfacs génèrent des séries de données historiques fictives et qui pour la période historique doivent par construction recouper les données issues du modèle Safran. Les données SAFRAN sont des sorties de modèles de prévision qui sont ré-analysées en tenant compte des observations, des champs analysés par le centre européen, ou qui sont issues du modèle ARPEGE V4.X, et qui subissent une interpolation optimale prenant en compte le relief. Toutes les variables météorologiques classiques (pluie, température, vent, rayonnement...) sont ainsi estimées toutes les 3h et affectées à une zone définie comme climatiquement homogène de 8x8 km.

## Description des scénarii climatiques SCRATCH08

Un ensemble de scénarii ou projections climatiques réalisés dans le cadre du 4<sup>ème</sup> rapport du GIEC a été désagrégé à une résolution de 8 km sur une région couvrant la France et une partie de la Suisse. La méthodologie de descente d'échelle utilisée est celle développée par Julien Boé au CERFACS (Boé et al. 2006 ; Boé 2007). Cette méthodologie est une désagrégation d'échelle statistique multivariée qui repose sur l'utilisation du concept de type de temps et qui est dérivée de la méthode classique des analogues. Les propriétés climatiques régionales sont utilisées afin d'établir des types de temps discriminants pour une variable locale donnée (les précipitations pour les scénarii SCRATCH08). L'hypothèse principale est que chaque régime de temps particulier (représenté par une variable de circulation atmosphérique de grande échelle ≡ le/les prédicteur(s)) est associé à une distribution spécifique des variables climatiques locales (par exemple la température et les précipitations à petite échelle ≡ le/les prédictant(s)). Cette association est représentée par une fonction de transfert qui est construite statistiquement à partir des observations et/ou réanalyses disponibles.

Les jeux de données utilisés pour construire la fonction de transfert sont d'une part l'analyse météorologique à méso-échelle SAFRAN développée à Météo-France (pour les prédictants) et d'autre part la réanalyse météorologique du National Center for Environmental Prediction – NCEP (pour les prédicteurs). L'analyse SAFRAN couvre la France sur une période allant de 1970 à 2005 à une résolution spatiale de 8 km (zones climatiques cohérentes) sur une grille régulière en projection Lambert-II étendue. Elle comporte 7 paramètres, soient : les précipitations solide et liquide, la température à 2 m, le module du vent à 10 m, la radiation infrarouge et visible incidente en surface, l'humidité spécifique à 2 m. Les scénarii climatiques désagrégés contiennent en plus de ces 7 variables l'évapotranspiration potentielle, l'humidité relative (moyenne, minimale et maximale), les températures minimale et maximale. Les variables sont fournies à l'échelle journalière.

Les scénarii climatiques qui ont été désagrégés proviennent de 15 modèles utilisés pour le 4<sup>ème</sup> rapport du GIEC (forcé par le même scénario d'évolution des gaz à effet de serre GES, le scénario médian A1B). Un jeu additionnel de 3 scénarii réalisés à Météo-France à l'aide du modèle ARPEGE (voir ci-dessous) avec différents scénarii d'évolution des GES a également été désagrégé. Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques des simulations désagrégées disponibles.

### SCRATCH08 : SCénarii Régionaux Adaptés à l'éTude des CHangements climatiques

Modèles du GIEC	Scénario GES	Période couverte	Centre climatique
CCCM3 CGCM3.1 T63			CCCM3 (Canada)
CNRM-CM3			Météo-France
CSIRO-MK3.0			CSIRO (Australie)
GFDL-CM2.0			GFDL (USA)
GFDL-CM2.1			GFDL (USA)
GISS-AOM			GISS (USA)
GISS-ER			GISS (USA)
IAP-FGOALS	GES Observé + A1B	01/01/1961-31/12/2000	FGOALS (Chine)
INGV ECHAM4		01/01/2046-31/12/2065	INGV (Italie)
IPSL CM4		01/01/2081-31/12/2100	IPSL (France)
MIROC3.2 MEDRES			MIROC (Japon)
MIUB ECHO-G			MIUB (Allemagne)
MPI-ECHAM5			MPI (Allemagne)
MRI CGCM 2.3.2a			MRI (Japon)
NCAR CCSM3			NCAR (USA)
Modèle ARPEGE			
ARPEGE version4	GES Observé	01/01/1950-31/12/2000	Météo-France
ARPEGE version4	B1	01/01/2001-31/12/2100	Météo-France
ARPEGE version4	A1B	01/01/2001-31/12/2100	Météo-France
ARPEGE version4	A2	01/01/2001-31/12/2100	Météo-France

### Références:

J. Boé, L. Terray, F. Habets, and E. Martin: A simple statistical-dynamical downscaling scheme based on weather types and conditional resampling. J. Geophys. Res., 111 :D21106, 2006.

J. Boé. Changement global et cycle hydrologique : Une étude de régionalisation sur la France. PhD thesis, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2007.

C. Pagé, J. Boé, L. Terray : Projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21<sup>ème</sup> siècle : les scénarii SCRATCH08. Technical Report TR/CMGC/08/64, CERFACS, Toulouse, France, 2008

Pour les simulations climatiques, 7 scénarios ont été fournis par le Cerfacs :

- ARPEGE V4 récent SRES A1B, A2 et B1: Sur la période 1960-1999 les données sont identiques entre ces 3 scénarios. Le scénario SRES-A2 pour lequel les émissions de CO<sub>2</sub> continuent de croître jusqu'en 2100 ; le scénario SRES-A1B pour lequel les émissions de CO<sub>2</sub> continuent de croître jusqu'en 2050 puis décroissent ; enfin le scénario SRES-B1 pour lequel les émissions de CO<sub>2</sub> sont presque stabilisées dès l'année 2000, puis décroissent à partir de 2050.
- ARPEGE V4 ensemble SRES A1B : 4 membres ayant des conditions initiales différentes au 1<sup>er</sup> janvier 1950. Donc les données 1960-1999 diffèrent entre ces 4 scénarios.

Il convient toutefois de préciser l'interprétation qu'il est possible de faire de ces deux jeux de scénarios. Les 3 scénarios A1B, A2 et B1, qui ont des données passées communes, permettent de quantifier l'incertitude liée aux scénarios d'émissions futures de gaz à effet de serre.

Les 4 simulations mobilisant le scénario A1B et utilisant des conditions initiales de modélisation différentes permettent de quantifier l'incertitude liée aux conditions de calage.

## **Quantification de l'incertitude des scénarii désagrégés (chapitre rédigé par Christian Pagé-Cerfacs)**

La question des incertitudes est devenue une des questions centrales autour de l'utilisation des scénarii ou projections climatiques pour les études d'impact. Les sources d'incertitude présentes dans tout exercice de projection climatique à échelle fine sur le 21ème siècle sont multiples et il est essentiel de toujours bien garder en mémoire les limitations inhérentes à l'exercice de projection climatique dans le futur.

L'identification et la quantification des sources d'incertitudes inhérentes aux projections climatiques reposent principalement à l'heure actuelle sur l'existence d'ensembles de scénarii plus que sur une démarche véritablement concertée. Les incertitudes peuvent se catégoriser comme suit:

- L'incertitude réflexive, qui est liée aux scénarii futurs d'émission des gaz à effet de serre;

- L'incertitude modèle, qui est liée à une connaissance imparfaite des phénomènes et à leur représentation approximative dans les modèles;
- L'incertitude stochastique, qui est liée à la variabilité climatique intrinsèque et chaotique et qui comprend également la problématique des conditions initiales du système climatique modélisé.

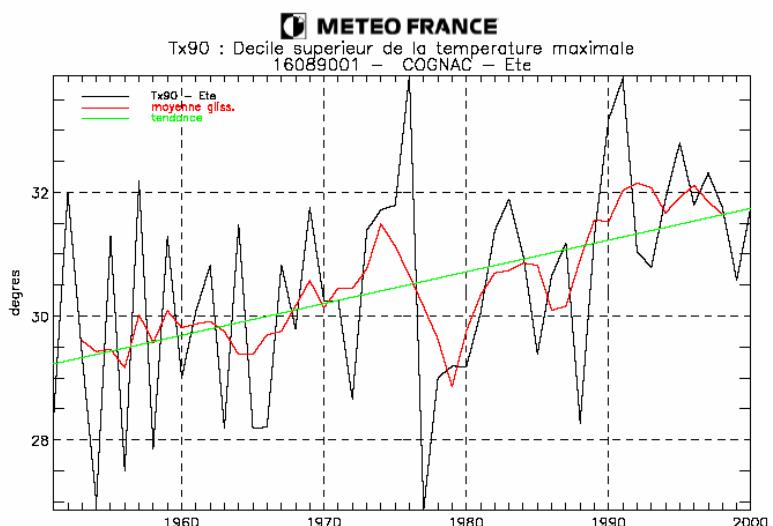
Les scénarii utilisés dans le présent projet exploitent une partie de la base de données CMIP3 ainsi que la réalisation de simulations régionales réalisées à Météo-France et au CERFACS avec le modèle ARPEGE en mode étiré sur l'Europe et la Méditerranée. Ils permettent ainsi de donner une première estimation de certaines des sources d'incertitude. La considération de la base CMIP3 donne la dispersion associée au multi-modèle du GIEC et fournit une estimation approximative de la combinaison des incertitudes modèle et stochastique. L'estimation de l'incertitude reliée directement aux concentrations de gaz à effet de serre provient de 3 scénarii ARPEGE Météo-France réalisés avec les 3 scénarii SRES A1B, A2 et B1 couvrant la période 2000-2100.

Par contre, il est difficile de quantifier ou même d'encadrer (borner) précisément les différentes sources d'incertitude. La seule alternative pratique actuellement est donc de travailler avec ces ensembles pour obtenir une première estimation des incertitudes. Enfin, il est à souligner que si les études de vulnérabilité n'exigent pas une approche ensembliste (on peut très bien faire une étude de vulnérabilité avec un seul scénario idéalisé), toute étude de risque presuppose l'utilisation des probabilités et la prise en compte des différentes sources d'incertitude.

## 1.1 Températures

### Les tendances historiques

Sur le plan des températures, et depuis 1950, les tendances des températures minimales moyennes annuelles sont de l'ordre de + 0,26 °C par décennie et pour les températures maximales moyennes annuelles de l'ordre de + 0,30 °C par décennie soit une moyenne de l'ordre de 2,8°C par siècle. L'augmentation s'observe en réalité depuis le début du XX<sup>ème</sup> siècle mais avec manifestement un accroissement pour les températures maximales après les années 1950 qui se traduit dans les deux sources d'informations disponibles par des tendances séculaires différentes selon la série analysée (+1,2°C « seulement » sur la série 1900/2000). Cette accélération est en soi un phénomène très marquant et qui recoupe assez bien les analyses climatiques plus globales. Au niveau mondial, le 4<sup>ème</sup> rapport du GIEC relève la même tendance mais avec une amplitude moitié moins grande « La vitesse moyenne du réchauffement au cours des cinquante dernières années (0,13 (0,10 à 0,16) °C par décennie) est environ le double de la pente moyenne pour les cent dernières années. L'augmentation totale de température de 1850-1899 à 2001-2005 est de 0,76 (+ ou -0,19)°C. ».



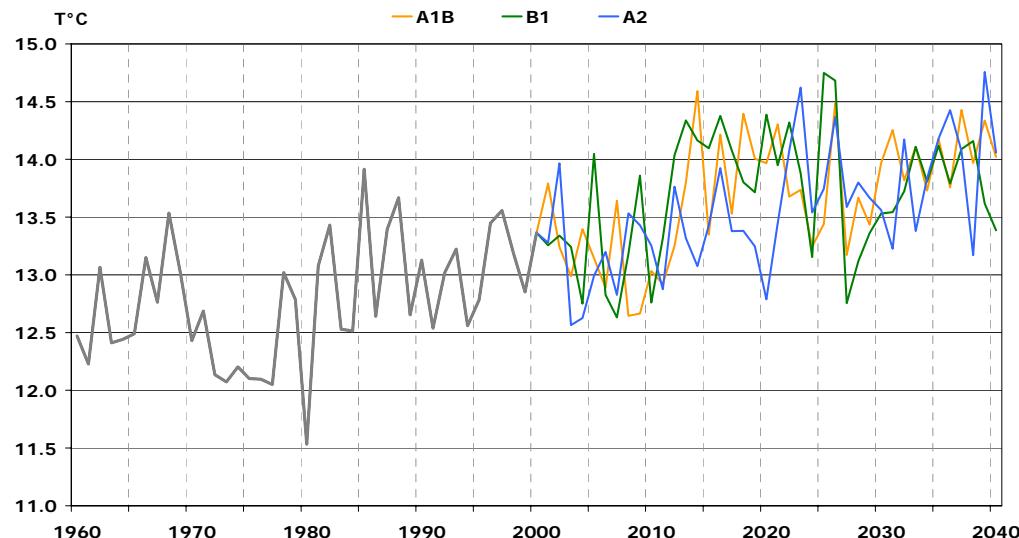
Ce distinguo pose cependant des questions lourdes de sens d'un point de vue écologique car la vitesse de variation est sans doute un facteur aussi important que la variation elle-même.

Par ailleurs, on note au niveau national et sur les 50 dernières années une augmentation systématique des températures estivales maximales. La canicule 2003, n'aura fait que confirmer cette tendance lourde.

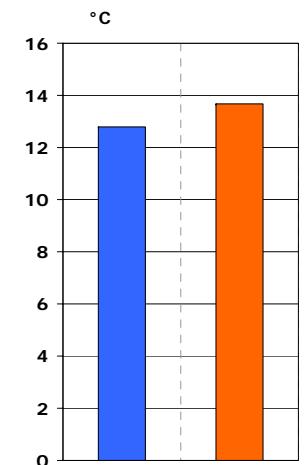
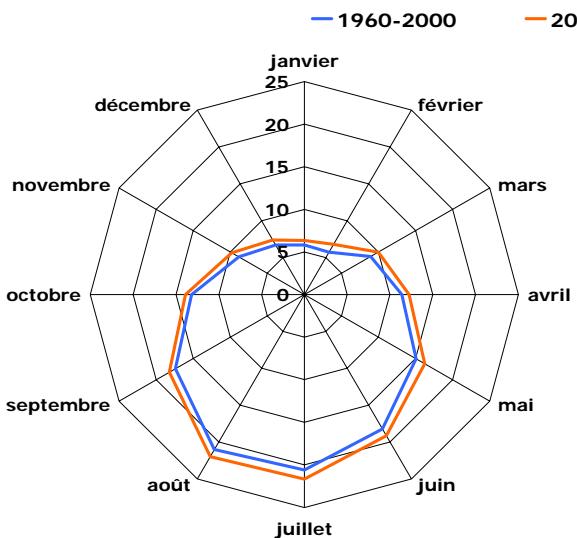
Les graphiques suivants présentent les évolutions attendues sur la température moyenne annuelle et mensuelle pour chaque scénario.

Sur le paramètre température, les résultats des simulations sont assez proches et laissent présager une augmentation de la température moyenne annuelle d'environ 1°C d'ici 2040.

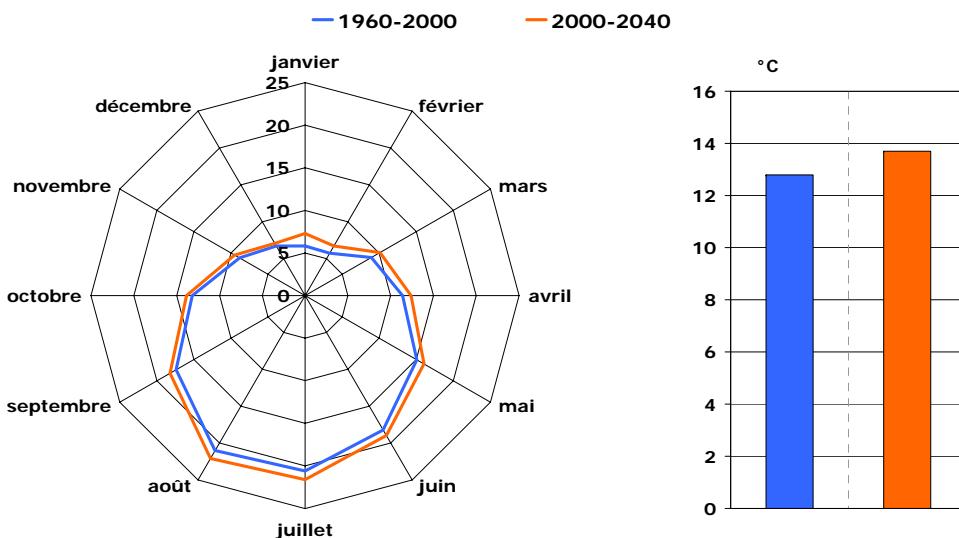
**Evolution de la température moyenne annuelle en fonction des scénarios climatiques**



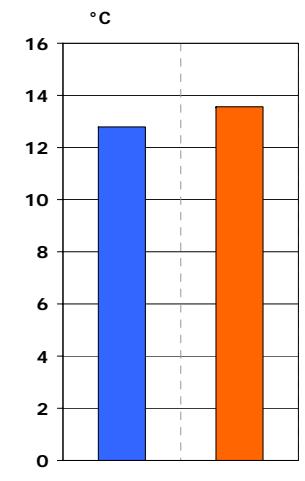
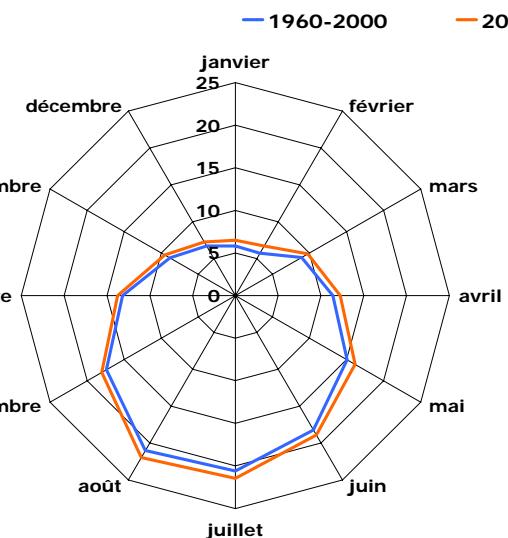
**Température moyenne pour le scénario a1b**



**Température moyenne pour le scénario b1**



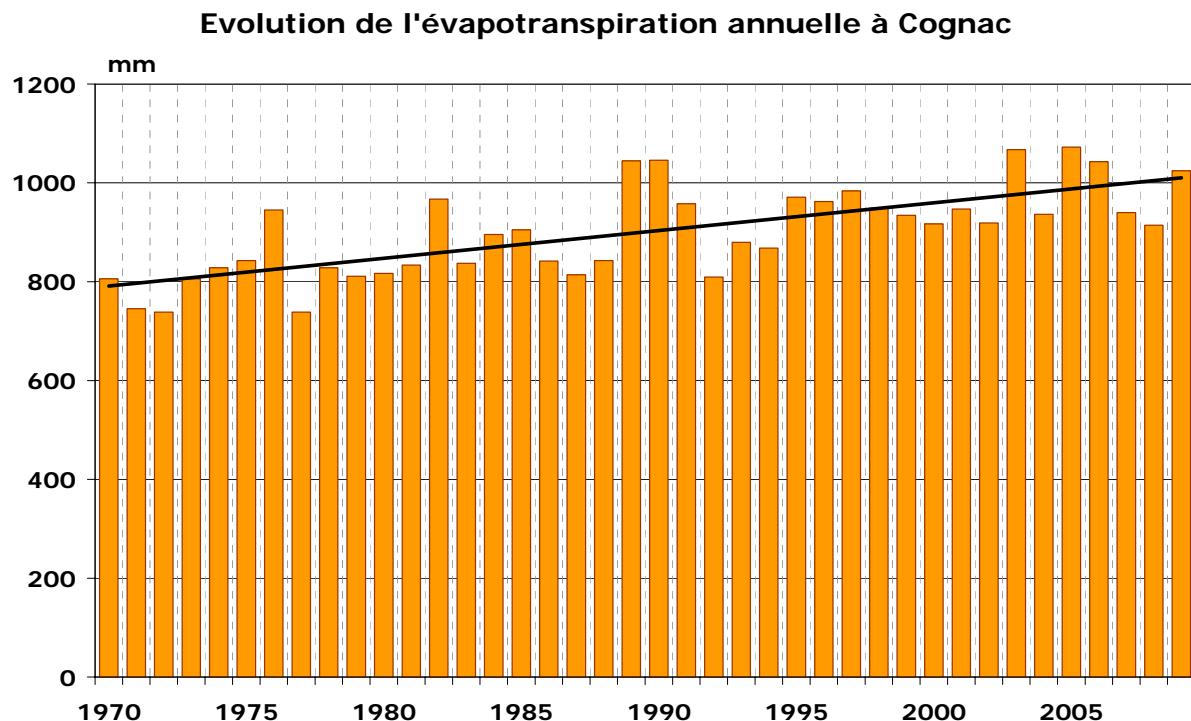
**Température moyenne pour le scénario a2**



## 1.2 Evapotranspiration

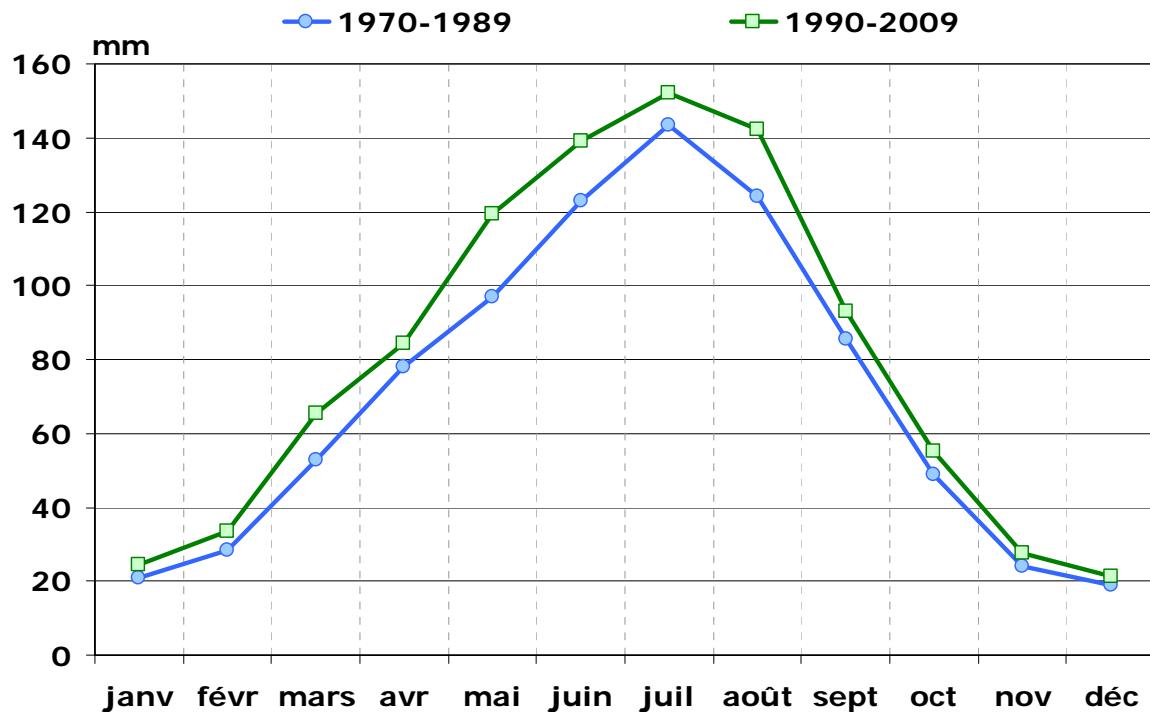
L'évapotranspiration est sur le plan des ressources en eau, l'un des plus importants facteurs puisqu'elle peut impacter lourdement la végétation, qu'elle régit les transferts vers les rivières et les nappes souterraines et enfin qu'elle peut induire un appel à l'irrigation des cultures plus important.

Les tendances historiques présentent une augmentation de la normale de cumul annuel d'évapotranspiration (ETP) de l'ordre de 100 mm.



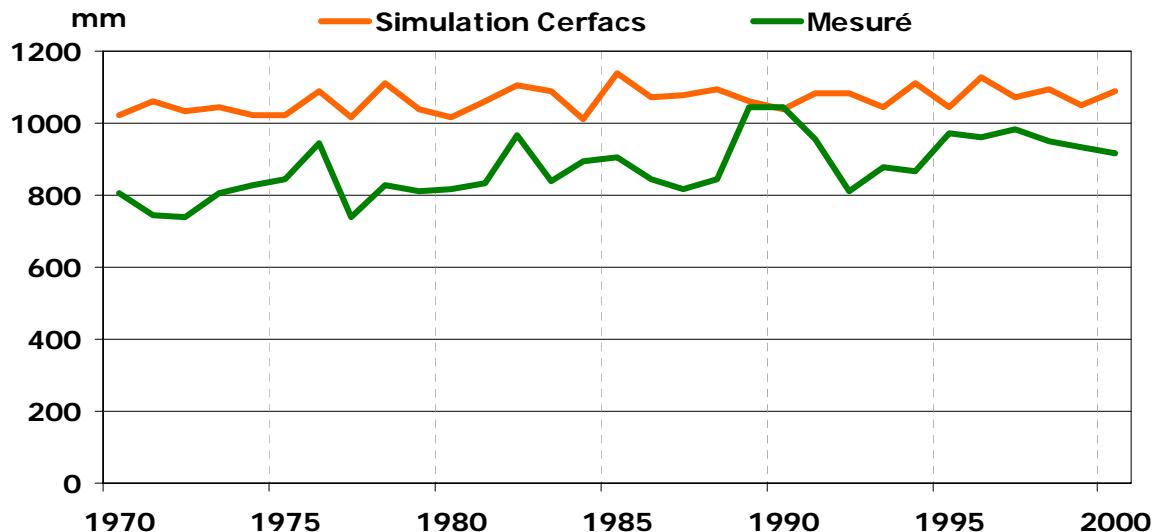
Même si cette augmentation se fait principalement ressentir du mois de mai au mois d'août, on constate que l'ensemble du cycle annuel est affecté par cette tendance. Au niveau annuel, cette tendance lourde pourrait avoir des répercussions sur le cycle de l'eau en milieu forestier notamment au printemps et en début d'été.

### Evolution de l'ETP moyenne mensuelle

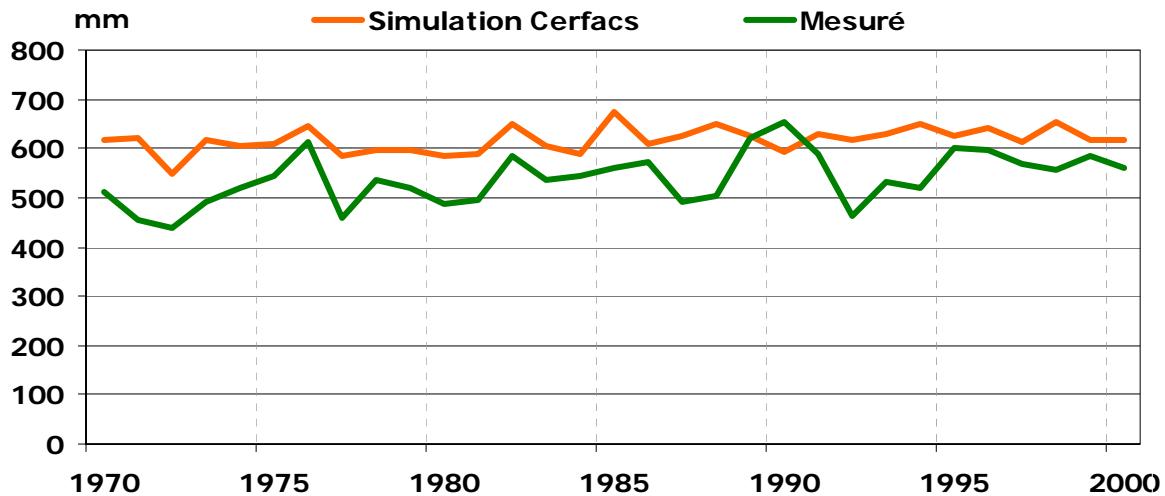


Il est remarquable que pour ce paramètre les valeurs observées dans le passé à Cognac sont significativement plus basses que les tendances simulées par le CERFACS.

### Comparaison des cumuls d'ETP annuelle mesurée et simulée à Cognac

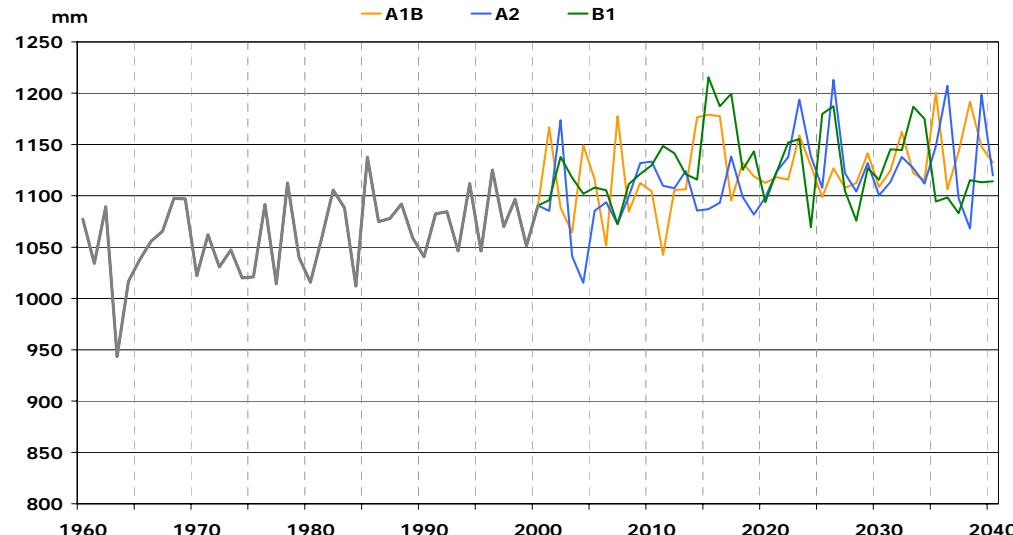


### Comparaison des cumuls d'ETP estivale mesurée et simulée à Cognac



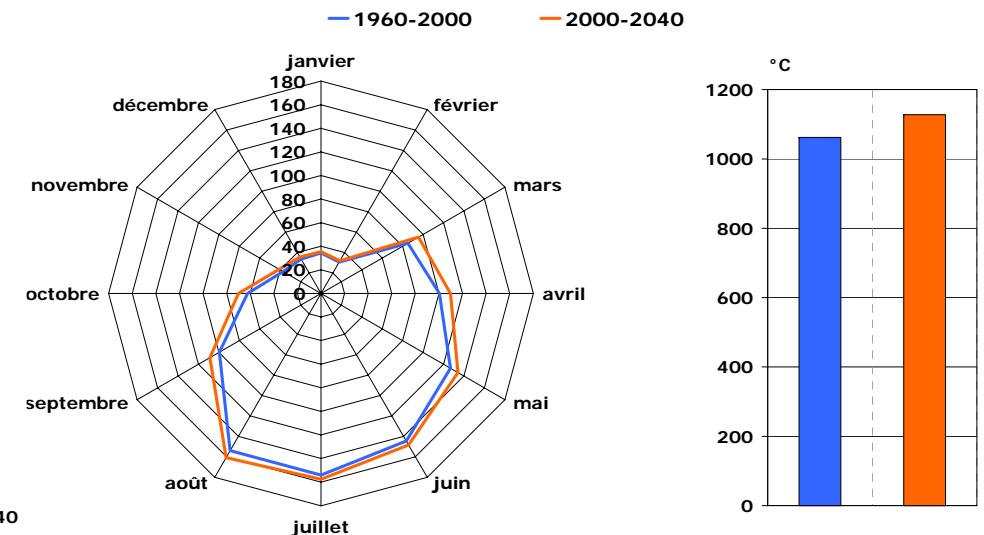
D'après les simulations climatiques les tendances observées par le passé vont perdurer à moyen terme. Pour la période 2000/2040 les 3 scénarios conduisent tous à une légère augmentation de l'évapotranspiration avec environ +60 mm par rapport à la période 1960/2000.

**Evolution du cumul annuel d'ETP  
en fonction des scénarios climatiques**

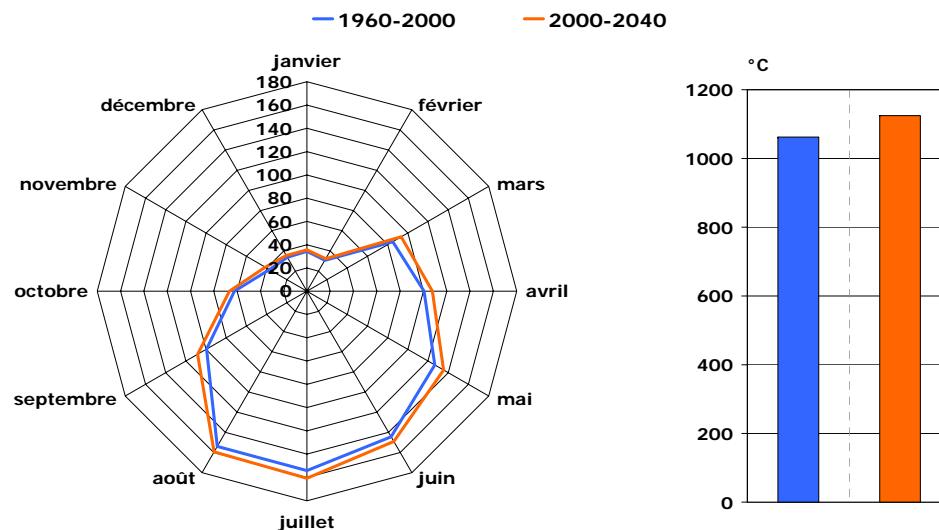


**Cumul moyen d'ETP pour le scénario a1b**

*Modélisation moyen terme scénario climatiques – mission 02-1*  
**Cumul moyen d'ETP pour le scénario b1**



**Cumul moyen d'ETP pour le scénario a2**



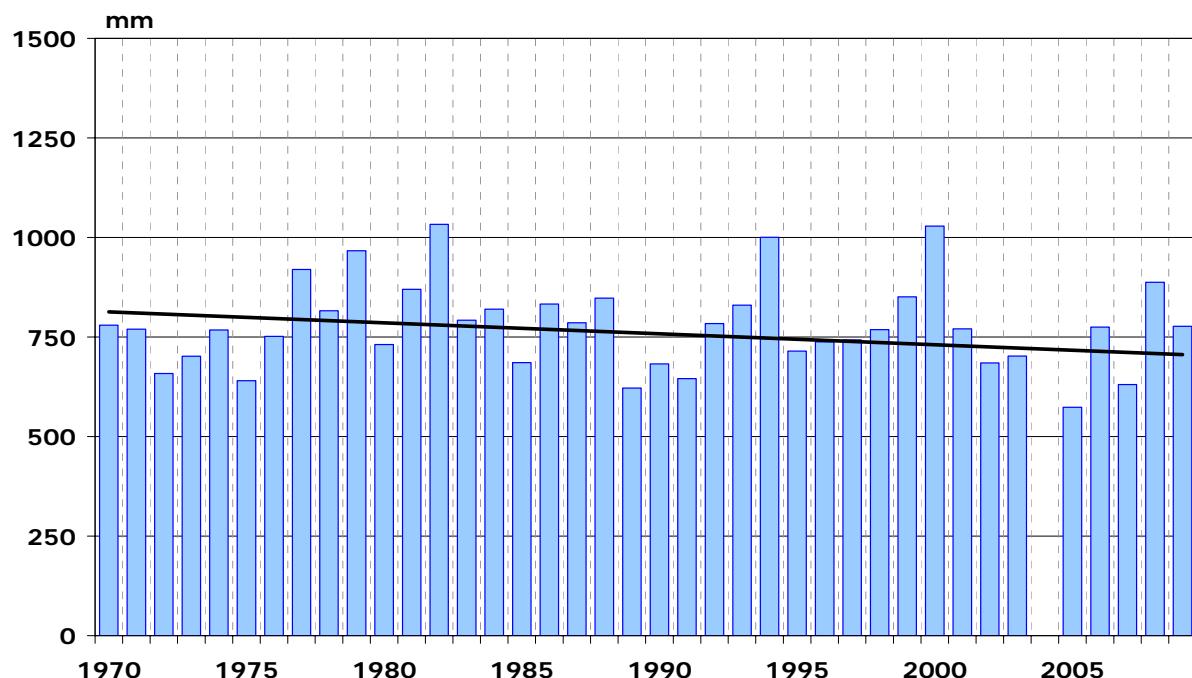
avril 2010

13

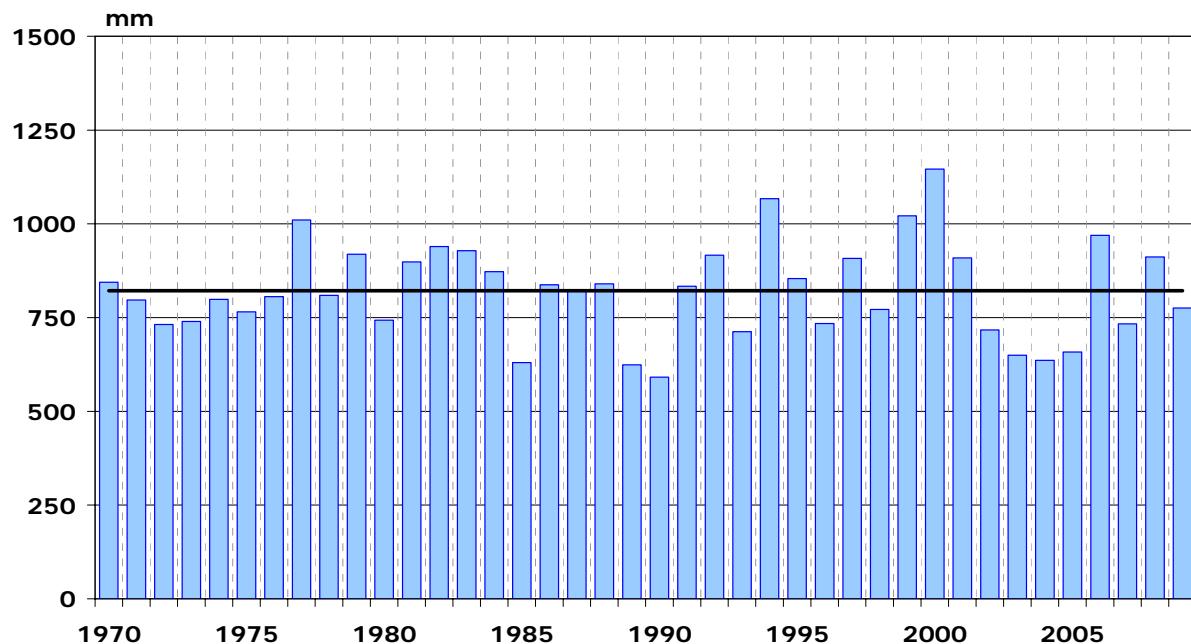
### 1.3 Précipitation

Les précipitations envoient un signal peu marqué et hétérogène sur le plan tendanciel. Ainsi à Cognac, la tendance serait à une légère diminution des précipitations sur les 40 dernières années. Cette tendance ne se retrouve pas partout sur le bassin versant, ainsi à Marthon les précipitations semblent évoluer à la hausse alors qu'à Nuaille-sur-Boutonne, aucune tendance ne se distingue.

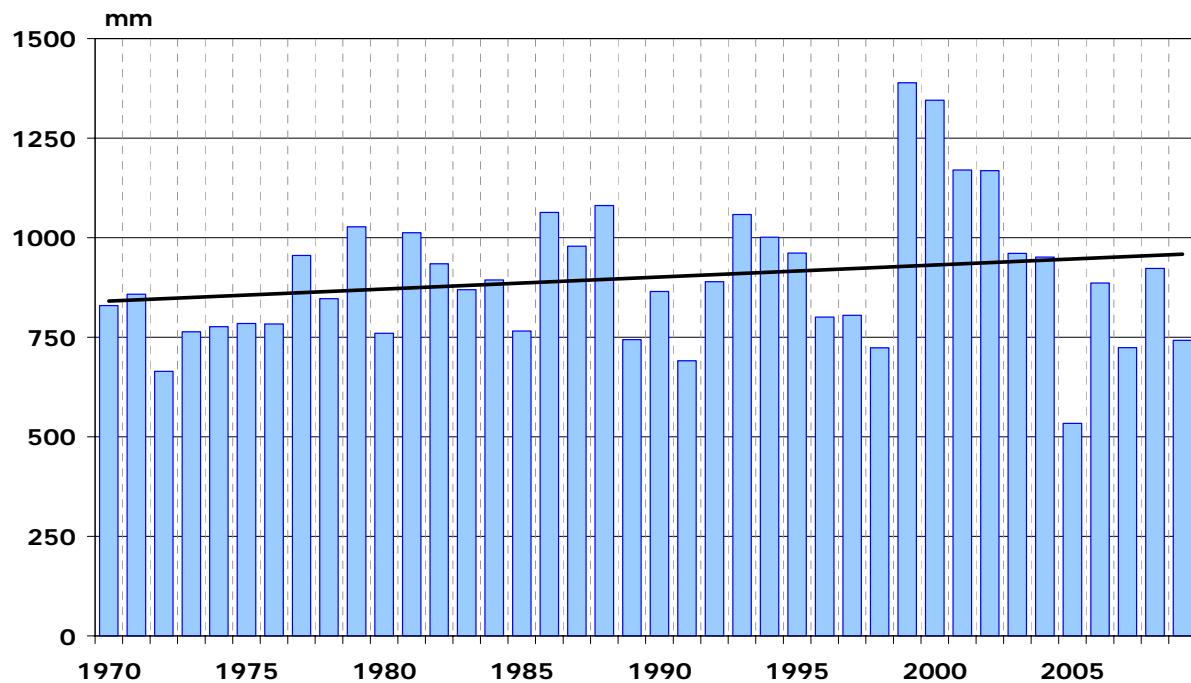
**Evolution du cumul annuel de précipitations à Cognac**



**Evolution du cumul annuel de précipitations à Nuaille sur Boutonne**

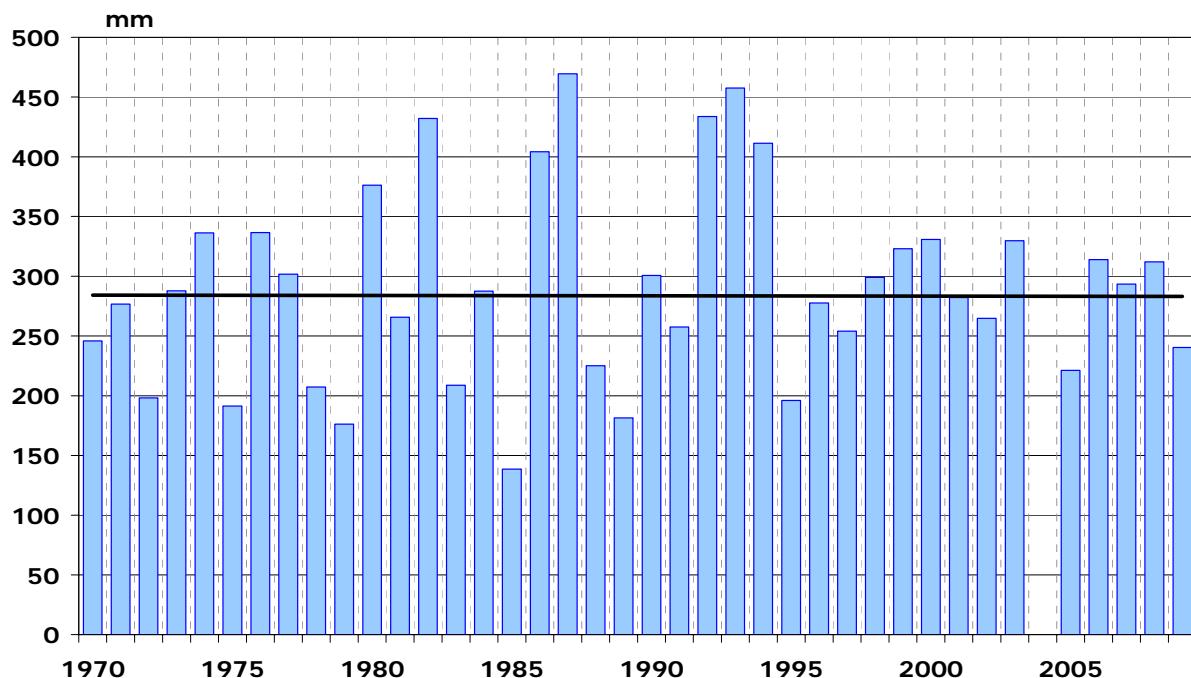


**Evolution du cumul annuel de précipitations à Marthon**

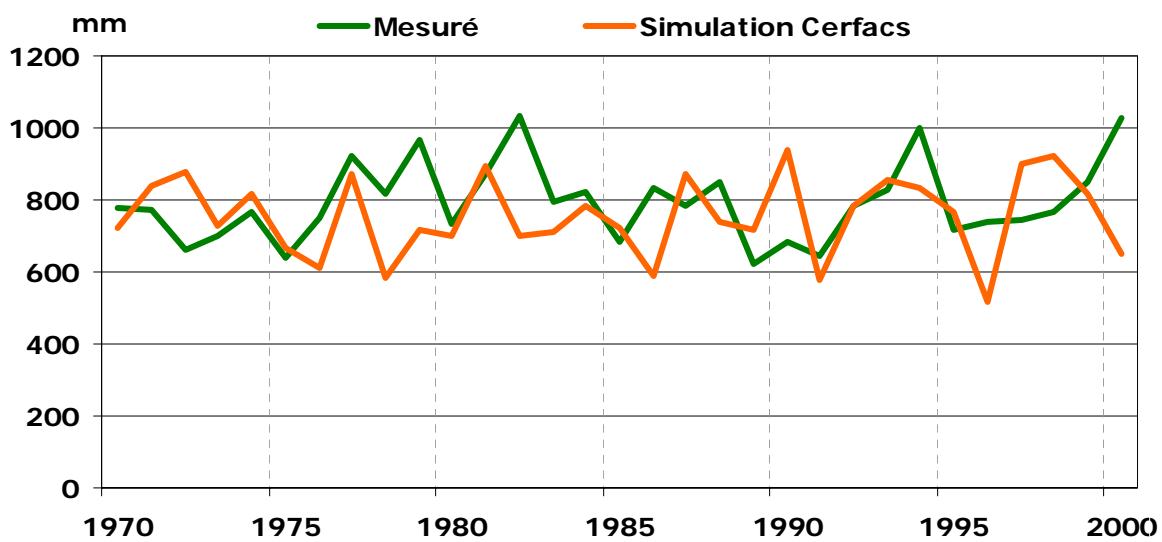


En été, aucune tendance claire ne se dégage et la situation apparaît stable.

#### Evolution du cumul estival de précipitation à Cognac

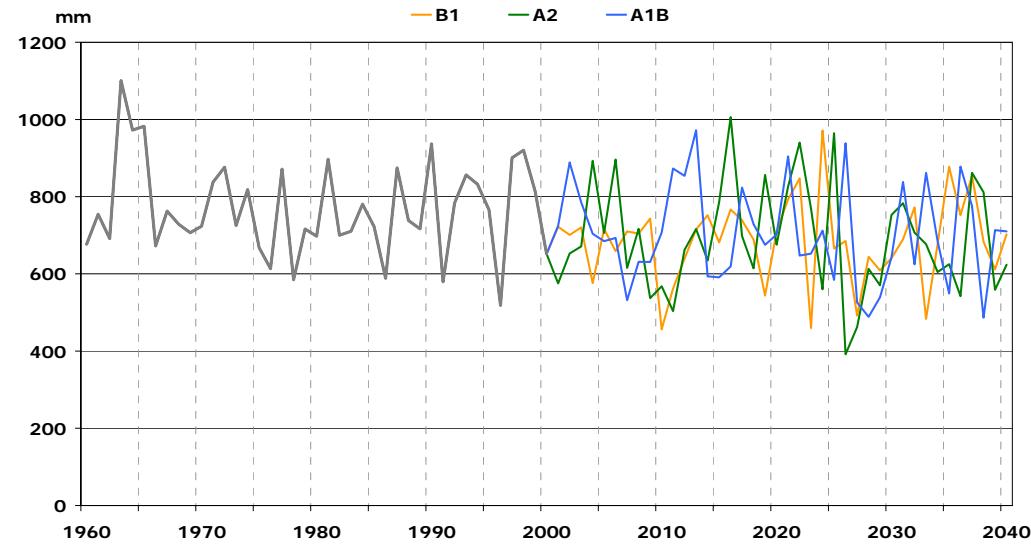


#### Comparaison des cumuls de précipitations annuelles mesurés et simulés à Cognac

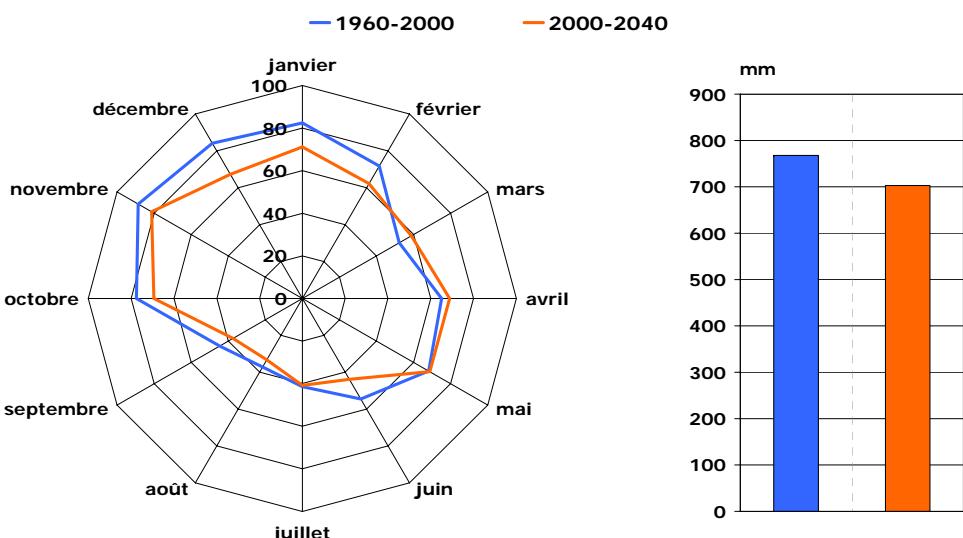


Si aucune tendance ne peut être généralisée au vu des observations du passé, les scénarios climatiques conduisent à une diminution des précipitations moyennes annuelles de l'ordre 60 à 80 mm par an.

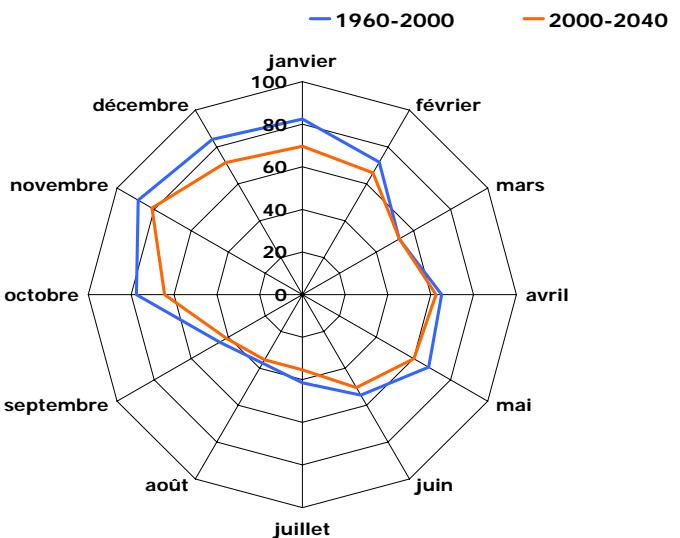
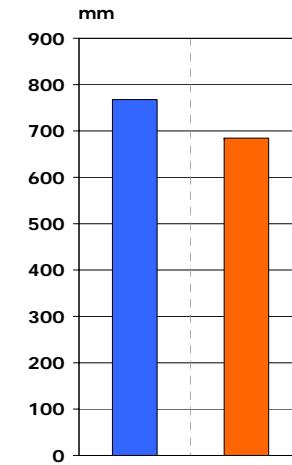
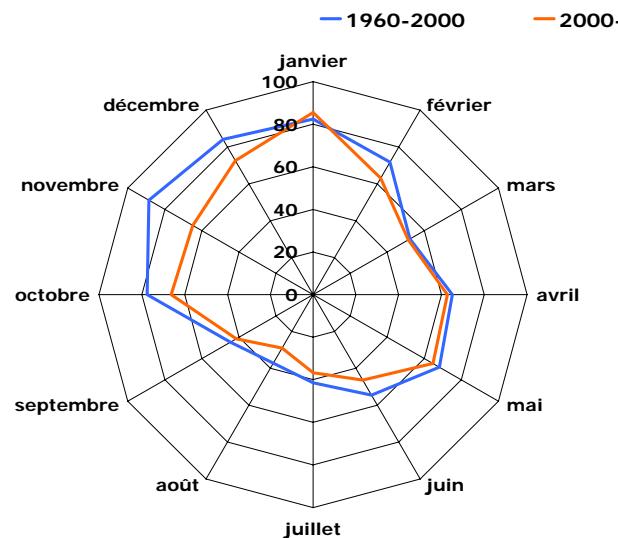
**Evolution Du cumul annuel de précipitations  
en fonction des scénarios climatiques**



*Modélisation moyen terme scénario climatiques – mission 02-1*  
**Cumul mensuel moyen de précipitation pour le scénario a1b**



**Cumul mensuel moyen de précipitation pour le scénario b1**



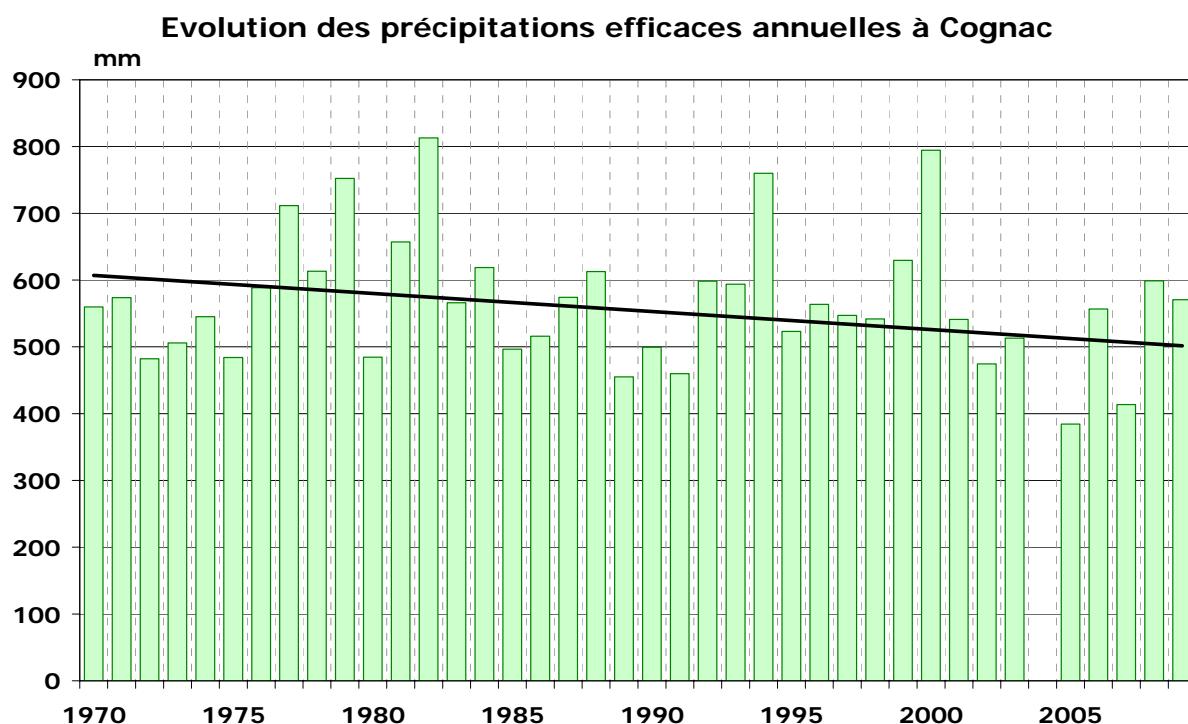
avril 2010

17

Si les cumuls annuels ne semblent pas devoir évoluer de manière extrêmement marquée, les simulations climatiques prévoient une modification du régime annuel de précipitations. Ainsi, pour les trois scénarios, ce sont principalement les mois d'hiver qui seraient impactés par cette diminution. Les tendances sur le printemps et l'été sont, selon le scénario, moins marquées même si, de manière générale, une diminution des précipitations est à anticiper.

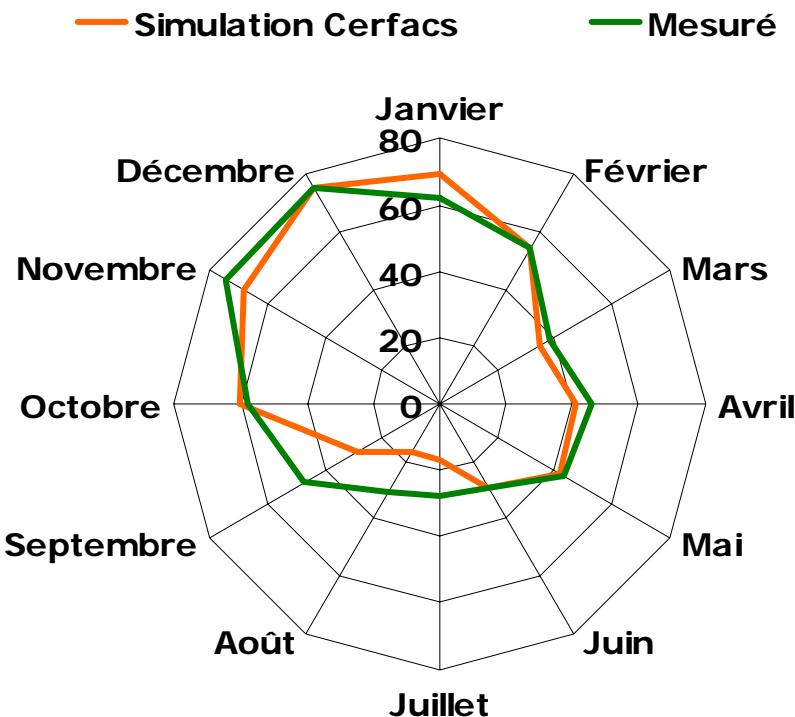
Au-delà de l'analyse du régime pluviométrique, une première expertise hydrologique peut être posée par l'analyse des précipitations efficaces. Cette valeur qui correspond au bilan Pluie efficace = Pluie – ETP permet d'évaluer la quantité d'eau qui reste potentiellement disponible à la surface du sol et qui peut alimenter les nappes et cours d'eau.

Historiquement, la tendance des cumuls de précipitations efficaces est à la baisse et est très marquée. La dernière décennie n'ayant fait que renforcer cette tendance.



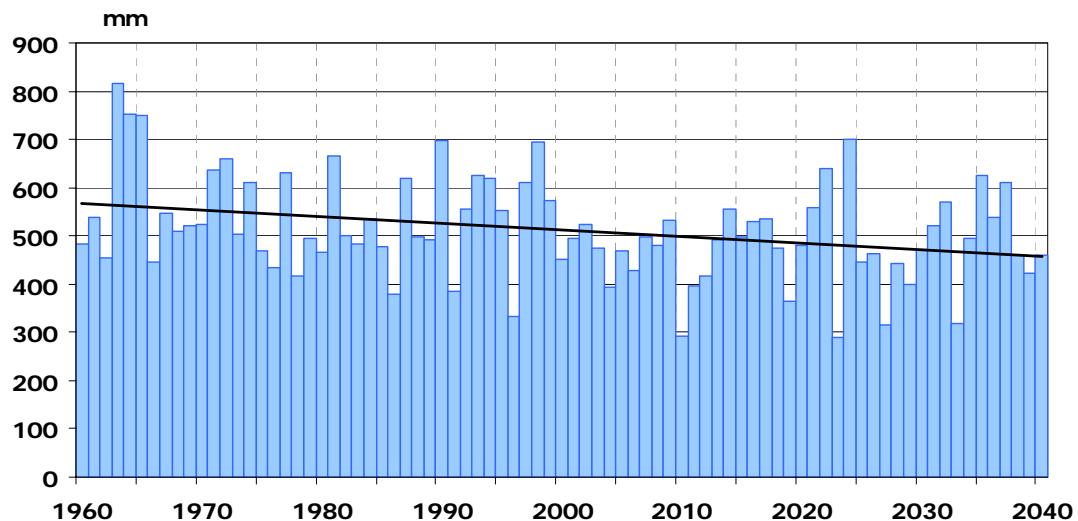
Les simulations climatiques retrouvent globalement bien le régime hivernal de précipitations efficaces. En revanche les mois d'été sont moins bien retracés. Cet écart pourra entraîner des biais dans les simulations hydrologiques et agro-climatiques. Cette période étant particulièrement sensible pour le cycle de la végétation et en particulier pour les cultures dites d'été (maïs par exemple) mais aussi pour la forêt.

## Régime moyen des précipitations efficaces

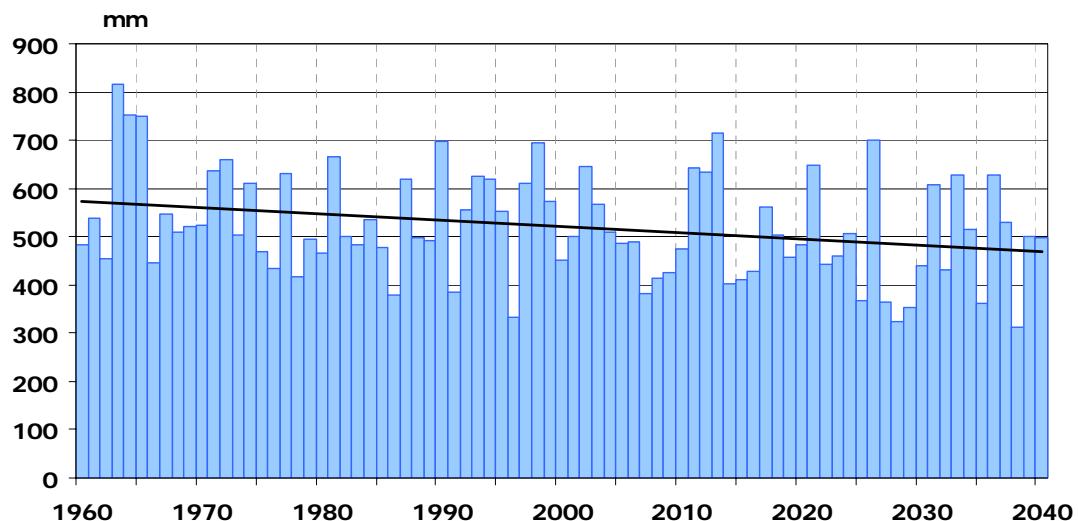


Les projections futures simulées à partir des scénarios climatiques montrent une prolongation des tendances historiques à moyen terme avec une diminution de l'ordre 50 à 70 mm de précipitations efficaces en moyenne d'ici 2040.

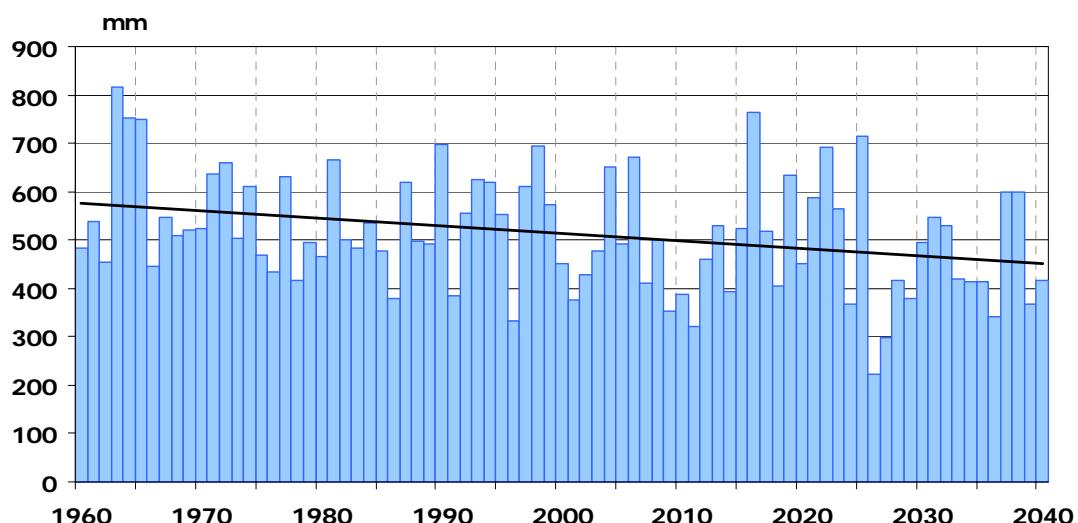
### Evolution du cumul de précipitations efficaces pour le scénario B1



### Evolution du cumul de précipitations efficaces pour le scénario A1B



### Evolution du cumul de précipitations efficaces pour le scénario A2



## 2 LE MODELE PLUIE-DEBIT : CYCLEAUPE

### 2.1 Structure générale du modèle

La modélisation hydrologique sur le bassin de la Charente grâce au modèle CycleauPE (Cycle de l'eau pour la Prévision des Etiages) a été développée initialement pour permettre la prévision des débits durant l'étiage aux points nodaux de Vindelle, comme appui à la gestion des lâchers de soutien d'étiage depuis les barrages de Lavaud et Mas Chaban, et de Foulpougue, pour préciser les débits disponibles pour la Charente aval.

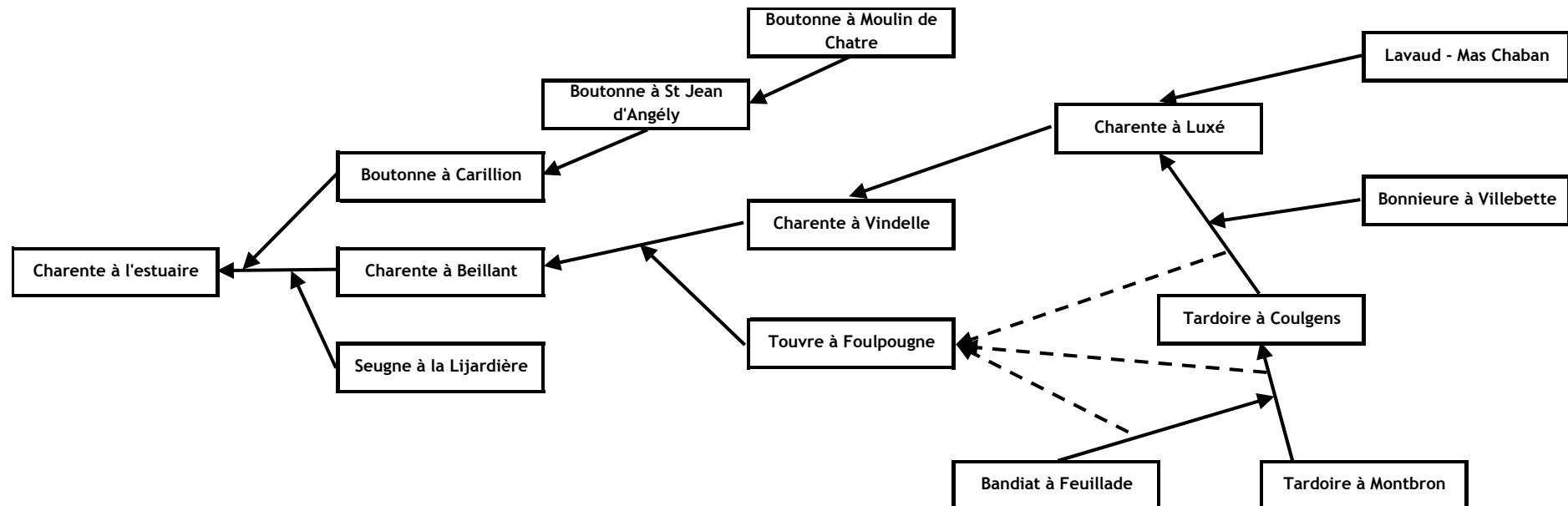
Les récents travaux ont permis de compléter l'approche prédictive de l'hydrologie en Charente aval avec l'incrémentation de nouveaux points de simulation sur les affluents ainsi que sur l'axe Charente jusqu'à l'estuaire.

#### Positionnement des points de simulation du modèle CycleauPE



Le modèle "CycleauPE Charente" se structure en 13 modules, décrivant 13 sous bassins versants hydrologiques ou hydrogéologiques. Ils s'articulent comme décrit sur le schéma ci-dessous.

CycleauPE est donc un modèle semi-distribué car la spatialisation des données d'entrée n'intervient que d'un module par rapport à l'autre et non à l'intérieur des modules ; en effet, les données météorologiques sont supposées uniformes à l'échelle d'un sous bassin versant.



## 2.2 Principe de CycleauPE

Chaque module de CycleauPE est un modèle pluie – débit à réservoirs, c'est-à-dire qu'il simule les débits en fonction des seules données météorologiques de pluie et d'évapotranspiration, en modélisant les différents compartiments du sol et du sous-sol par des réservoirs qui sont régis par des relations mathématiques (vidange, remplissage, transfert, influence, etc.).

Ces modèles pluie – débit peuvent être plus ou moins complexes mais un consensus se dégage pour considérer que les modèles type réservoirs sont les plus robustes et les moins gourmands en données d'entrée.

### **Pluie et ETP $\Rightarrow$ Débit naturel**

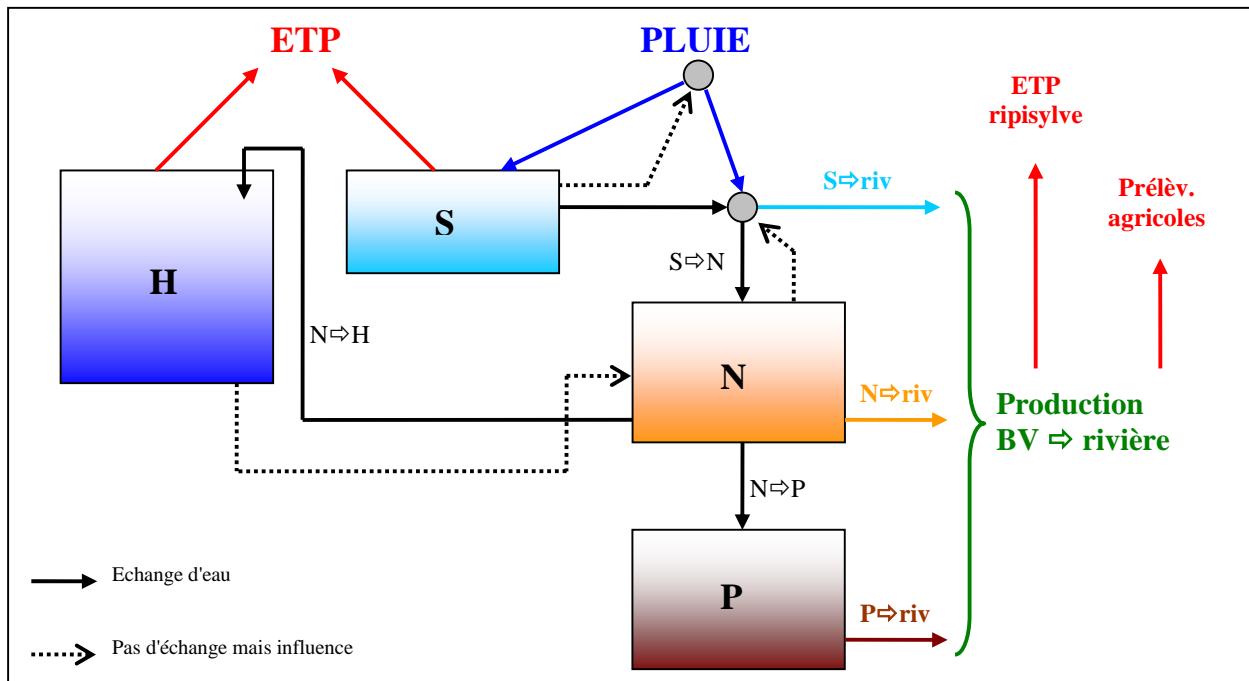
Le modèle hydrologique CycleauPE est une plateforme de simulation et de prévision des débits journaliers, exploitant plusieurs sous modèles, eux-mêmes en relation les uns avec les autres.

La particularité de CycleauPE par rapport à un modèle réservoir traditionnel est la très grande attention portée à l'étiage (période la plus complexe) et l'absence de relation "purement mathématique" sans lien avec un comportement physique identifiable. Cela en fait un puissant outil de communication auprès des usagers de la ressource (par exemple test de l'impact de restriction).

Le modèle comporte 4 réservoirs :

- Le réservoir superficiel (noté S), à capacité limitée ( $S_{max}$ )
- Le réservoir non saturé (noté N), à capacité limitée ( $N_{max}$ )
- Le réservoir "humidité" (noté H), à capacité limitée ( $H_{max}$ ). Il représente le potentiel matriciel du sol, caractéristique de la capacité au champ du sol.
- Le réservoir profond saturé (noté P), sans limite de capacité

Ces réservoirs et leurs fonctionnements sont représentés schématiquement sur la figure suivante :



La production du bassin versant vers la rivière dépend dans ce modèle des précipitations (PLUIE) et de l'évapotranspiration potentielle (ETP), qui font réagir les différents réservoirs, qui eux-mêmes se vidangent, chacun à leur rythme, dans la rivière.

1. Dans le modèle, la pluie alimente directement le sol, la zone non saturée et le ruissellement. Les proportions de ces échanges (compris entre 0 et 1 pour chaque compartiment) sont en interaction et dépendent de leur état respectif à J-1. Lorsque la pluie s'abat sur le bassin, le taux de remplissage du réservoir **S** (rapport  $S/S_{max}$ ) commande la part infiltrée dans **S** et la part qui passera directement dans **N**. Ainsi, un sol humide va favoriser l'alimentation de la zone non saturée. Si les apports pluviométriques sont supérieurs à la capacité  $S_{max}$ , il y a transfert. La part évaporée vient réduire le stock de **S** (La pluie précède l'évaporation dans le modèle).
2. En fonction du taux de remplissage de **N** ( $N/N_{max}$ ), les apports à **N** (pluie et transfert depuis **S**) vont soit ruisseler ( $S \rightarrow riv$ ), soit alimenter **N** ( $S \rightarrow N$ ). Ainsi, un fort remplissage de **N** favorisera le ruissellement direct.
3. Le réservoir **N** commande à la fois les écoulements retardés vers le cours d'eau (ressuyage, décrue, etc.) et les apports au réservoir profond **P** (recharge des nappes). Cette vidange de **N** vers **P** ou la rivière est régulée par la notion de capacité au champ (potentiel matriciel du sol = capacité du sol à retenir l'eau dans l'espace interstitiel grâce aux forces de capillarité). Ce potentiel va donc avoir tendance à soit retenir l'eau dans la

zone non saturée si l'humidité du sol est faible, soit la laisser s'écouler si l'humidité est élevée.

C'est à ce niveau qu'intervient le réservoir H, caractéristique de la capacité au champ du sol. H est alimenté par N et vidangée par la part de l'ETP non satisfaite par le stock du sol (lorsque S = 0).

Les échanges depuis N vers P et Riv (N-Riv et N-P) sont proportionnels à H/Hmax (plus l'humidité est forte, plus la vidange est importante). A l'inverse les échanges de N vers H (N-H) sont proportionnels à 1-H/Hmax (plus l'humidité est faible, plus le transfert vers H est important).

Par ailleurs, l'intensité des échanges est aussi proportionnelle au stock de N. Plus le remplissage de N est élevé, plus les transferts d'eau vers H, P ou Riv sont importants. Enfin, la part relative des sorties d'eau depuis N est paramétrée par KN-H, KN-P et KN-Riv.

4. La vidange du réservoir profond P assure le débit de base du cours d'eau, notamment à l'étiage. Cette vidange (P-Riv) est directement proportionnelle au remplissage de P et est paramétrée par un "coefficient de tarissement",  $K_P$  (éventuellement variable avec le remplissage).

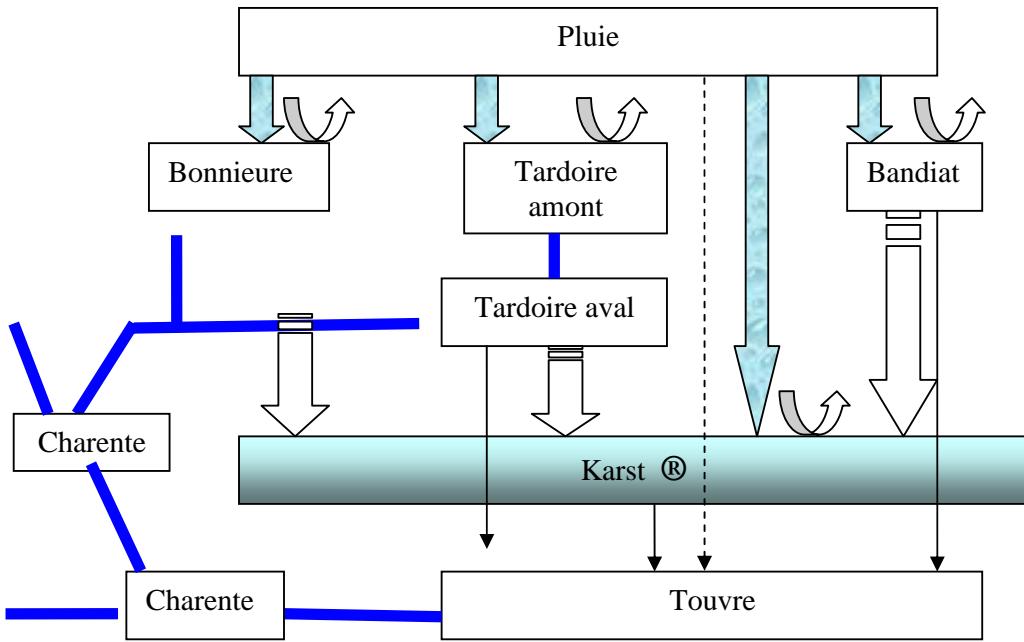
5. La production du bassin versant, apportée à la rivière, est donc l'addition des termes S-Riv, N-Riv et P-Riv.

## 2.3 Cas particulier de la Touvre

Les débits de la Touvre sont issus de la vidange du karst de La Rochefoucauld, via les sources de la Touvre (deuxième plus grosse résurgence de France). Leur modélisation revêt donc des particularités bien spécifiques qui la distingue des autres sous bassins, plus "classiques".

Le modèle de simulation de la Touvre est représenté dans le schéma ci-après.

## Principe général du modèle Bandiat/Tardoire/Touvre



Dans ce modèle général, les débits des rivières sont calculés à partir

d'un bilan pluie évaporation.

L'apport au karst intègre les pertes des rivières vers le stock qui sont elles-mêmes régulées par l'état du stock. **(R)**

Les impulsions directes ou assimilées sont les pertes des rivières qui se transmettent directement à la Touvre.

Une impulsion directement liée à la pluie devrait être envisagée dans les futurs développements du modèle.

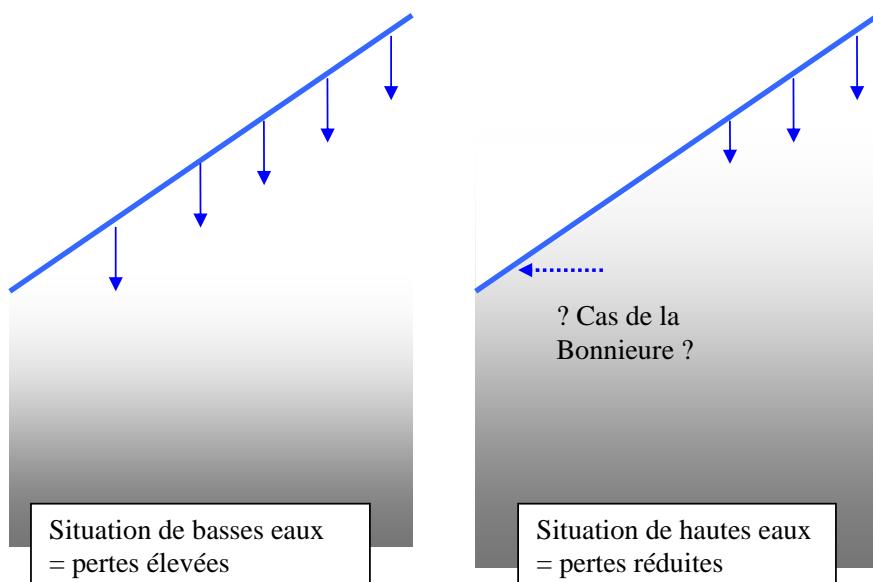
D'autres fonctions prises en compte ne sont pas représentées ici : consommation par l'irrigation, ripisylve, etc.

Les trois grandes entrées du modèle sont la pluie sur le territoire du karst, les débits du Bandiat et les débits de la Tardoire.

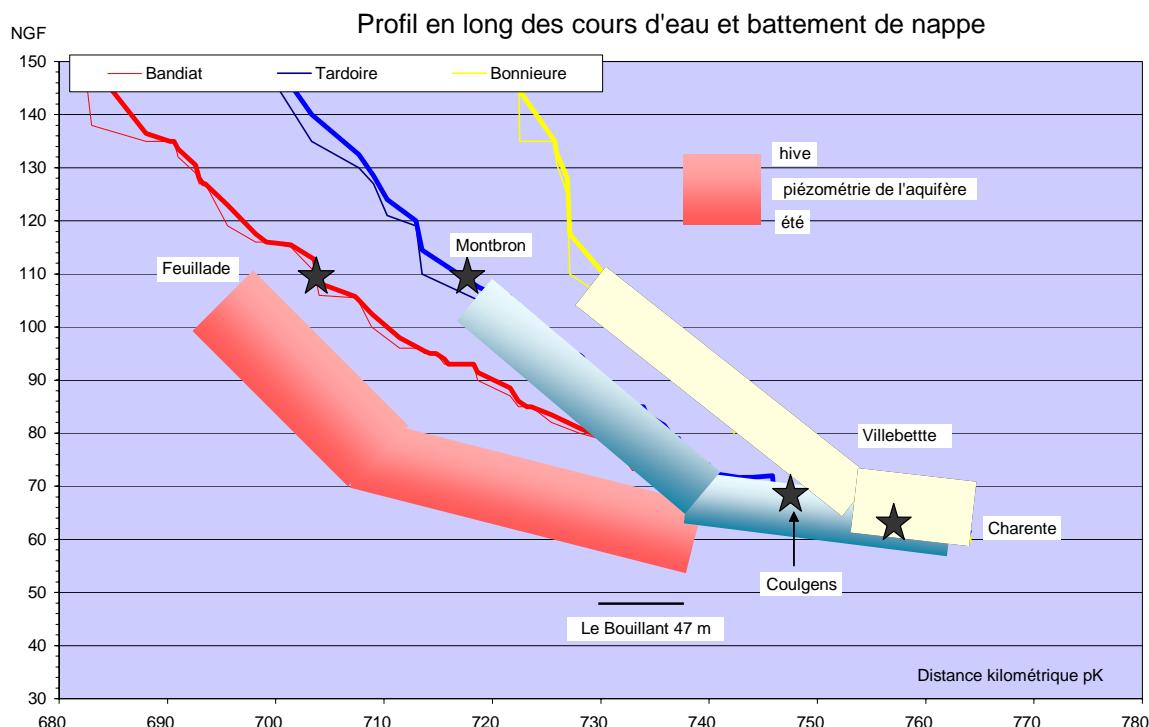
Les filtres apportés sont :

- pour les pluies : le passage par le sol sensible à l'évapotranspiration, puis une zone insaturée interprétée comme correspondant à l'épikarst et enfin le milieu poreux saturé. Dans la mesure où chaque compartiment est représenté par un seul « réservoir » ;

- pour les pertes des rivières une impulsion directe sur les débits de la Touvre pour 10 % environ du débit des pertes journalières Bandiat + Tardoire. Les mécanismes de cette impulsion ne sont pas détaillés mais pourraient correspondre à des transmissions de pression ou à des écoulements rapides préférentiels dans des drains ou fractures. Le reste des pertes est lui injecté comme une recharge de l'aquifère. Ce type de réaction sera à affecter à la fraction ruissellement issu des précipitations. Les premiers tests du modèle semblent montrer que, en hiver, la Touvre aurait une réaction directe à ce phénomène ;
- Les simulations continues pluie – débit des pertes/débit de la Touvre sont conduites au pas de temps journalier (contre un pas de temps hebdomadaire dans le modèle M. Larocque) ;
- L'évolution des mécanismes de vidange et de recharge construit un cycle annuel dans lequel la variation de volume du réservoir profond peut être interprétée comme un indicateur d'évolution de stock et donc indirectement peut être mis en relation avec les évolutions des « niveaux piézométriques » ;
- Ce cycle du stock peut être exploité en retour pour conditionner le niveau des pertes en rivière dont on sait qu'elles sont réduites en hautes eaux du moins pour la Tardoire, voire même inversées en très hautes eaux pour la Bonnieure. Le calage de ces pertes est donc ramené à une fonction constante proportionnelle au linéaire de cours d'eau concernée par l'insuffisance du niveau. (cf. schéma ci-dessous). Une réalimentation de la Bonnieure serait même envisageable en très hauts niveaux piézométriques. Nous ne l'avons pas intégrée dans le modèle, cette situation n'intervenant que rarement et pour une part négligeable des échanges hydrologiques globaux.



Le profil en long des cours d'eau, est instructif car dans la zone du karst, leur direction d'écoulement superficiel est parallèle aux lignes de niveau des écoulements souterrains avec un étagement Nord Sud des trois principaux axes. Le Bandiat qui est le bassin le plus bas en altitude est cependant celui qui est le plus perché par rapport au niveau piézométrique est donc le plus largement concerné par les pertes. La Tardoire s'inscrit dans le niveau du battement de nappe et peut donc bénéficier d'écoulement superficiel en hautes eaux. La Bonnieure est dans une situation comparable mais la position oscillante de la crête piézométrique rend plus complexe l'analyse du processus d'échange.



La station pluviométrique de référence pour le karst est un point important qui pourrait être précisé en fonction des disponibilités de Météofrance par rapport aux contraintes de délai de transmission ou de prévision. Idéalement une estimation de la lame d'eau moyenne sur le bassin serait suffisante pour alimenter le modèle.

## Le modèle agricole

La consommation pour irrigation est estimée au pas de temps journalier sur la base du modèle Eaucéa intégrant la contrainte agroclimatique et les restrictions d'usage réglementaires.

Les prélevements d'irrigation sur le karst sont affectés au réservoir profond, ce qui amortit considérablement l'impact journalier de ces prélevements.

Néanmoins, dans le cadre des simulations climatiques, c'est la description de la ressource naturelle et son éventuelle dérive qui sont recherchées ; le modèle agricole ne sera donc pas activé.

## 2.4 Adaptation de CycleauPE à des simulations longue période

Un important travail a dû être fourni dans le cadre de cette mission afin d'adapter la plateforme CycleauPE. L'outil de base servant à de la prévision en phase de gestion opérationnelle n'était pas du tout adapté à des simulations sur de longues périodes (1960-2040 soit 81 années) et pour des scénarios multiples.

Pour optimiser les calculs, le "moteur" CycleauPE (équations, relations entre modules et paramètres) a été conservé mais transformé afin de pouvoir intégrer des grandes quantités de données d'entrée et en ressortir des grandes quantités de données de résultats.

Pour mémoire, les hydrogrammes journaliers des 13 modules pour 81 années de simulations et 7 scénarios climatiques représentent environ 2,7 millions de valeurs de débits journaliers. A cela, on peut rajouter les 5,4 millions de données en entrée des modèles (pluie et ETP).



## 3 RESULTATS

Il ne s'agit pas ici de présenter des kyrielles d'hydrogrammes simulés, ce qui n'aurait pas beaucoup d'intérêt.

Les résultats synthétiques qui sont présentés dans ce chapitre concernent tout d'abord les indicateurs hydrologiques généraux : modules annuels et interannuels, régime hydrologique moyen et un indicateur d'étiage, le QMNA.

Il s'agit non seulement de constater des valeurs absolues de débit, mais également et surtout de mettre en évidence des dérives de ces indicateurs.

Dans un premier temps, c'est surtout la variabilité liée aux différents scénarios du GIEC (A2, A1B et B1) qui est étudiée, car ces scénarios ont un passé commun sur la période "passée" 1960-2000. On constate ensuite sur 2000-2040 les dérives liées aux variables de forçage différentes d'un scénario à l'autre.

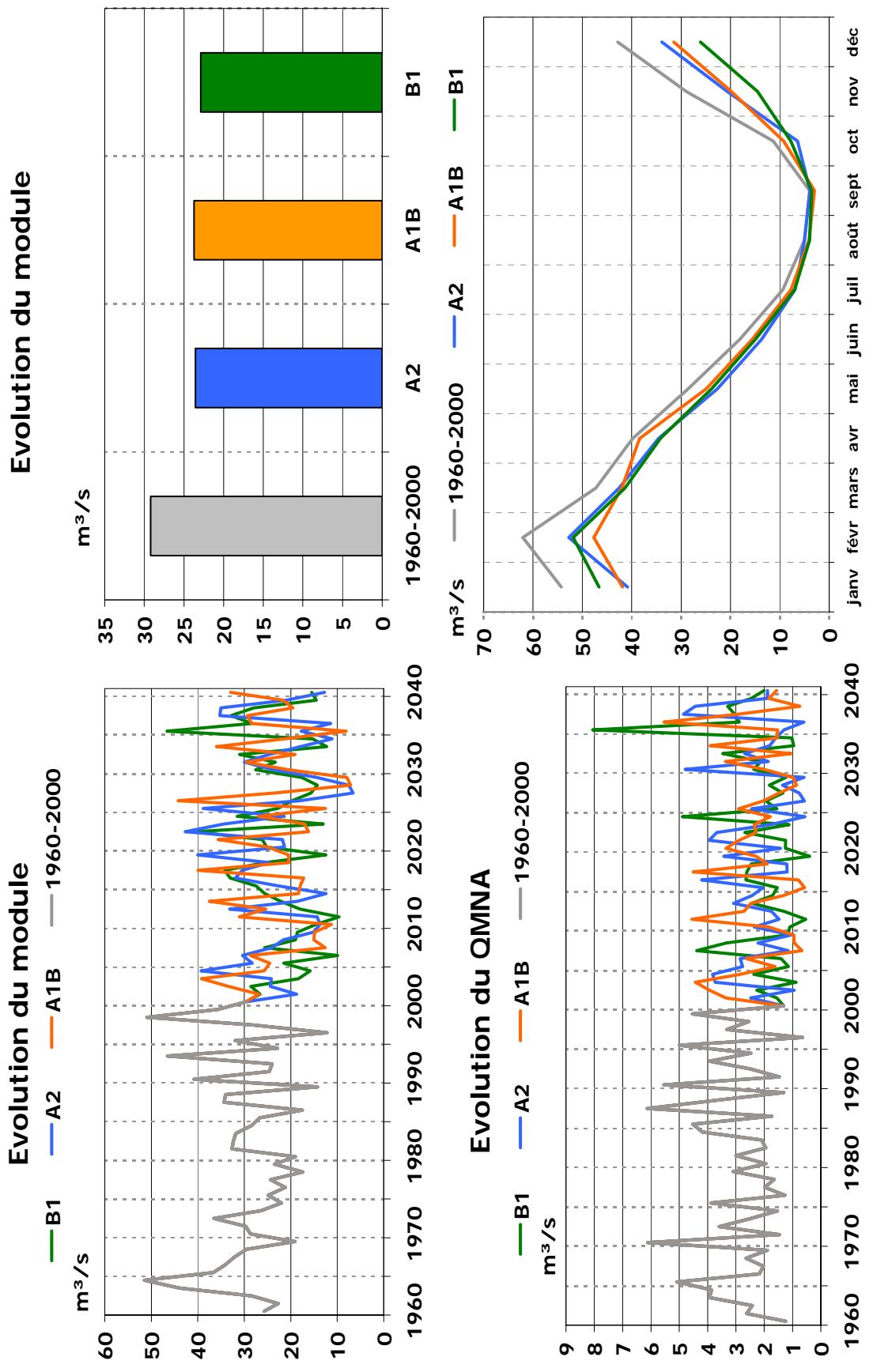
Les fiches de synthèse présentées ci-dessous permettent donc de visualiser rapidement l'évolution des modules annuels et des QMNA (débit moyen mensuel minimum de l'année considérée) de 1960 à 2040, ainsi que les différences de modules interannuels et de régimes entre la période "passée" et la période "future". Rappelons que le passé dont on parle est lui aussi simulé et ne correspond pas à ce qui a été observé au travers des mesures hydrométéorologiques.

Premier point nodal de la Charente, Vindelle est présenté sur la fiche ci-après.

Sans réelle surprise, les débits sont à la baisse, tant en hautes eaux qu'en basses eaux. Le module "passé" simulé est de 29,2 m<sup>3</sup>/s (30,3 m<sup>3</sup>/s en module mesuré réel). Suivant les 3 scénarios du GIEC, il subit une diminution de 19% à 22% entre les deux périodes successives de 40 années.

Sur le régime moyen, les baisses absolues s'observent en période de hautes eaux, de novembre à mars. Concernant les baisses relatives, on constate des diminutions pour tous les mois de l'année avec, pour Vindelle, une fourchette de baisses entre -10% et -35%. Les baisses relatives les plus fortes concernent les mois de fin d'année calendaire, signant donc que les étiages plus intenses dans le futur seront vraisemblablement plus longs également, la recharge hydrologique hivernale étant retardée d'autant.

La Charente à Vindelle



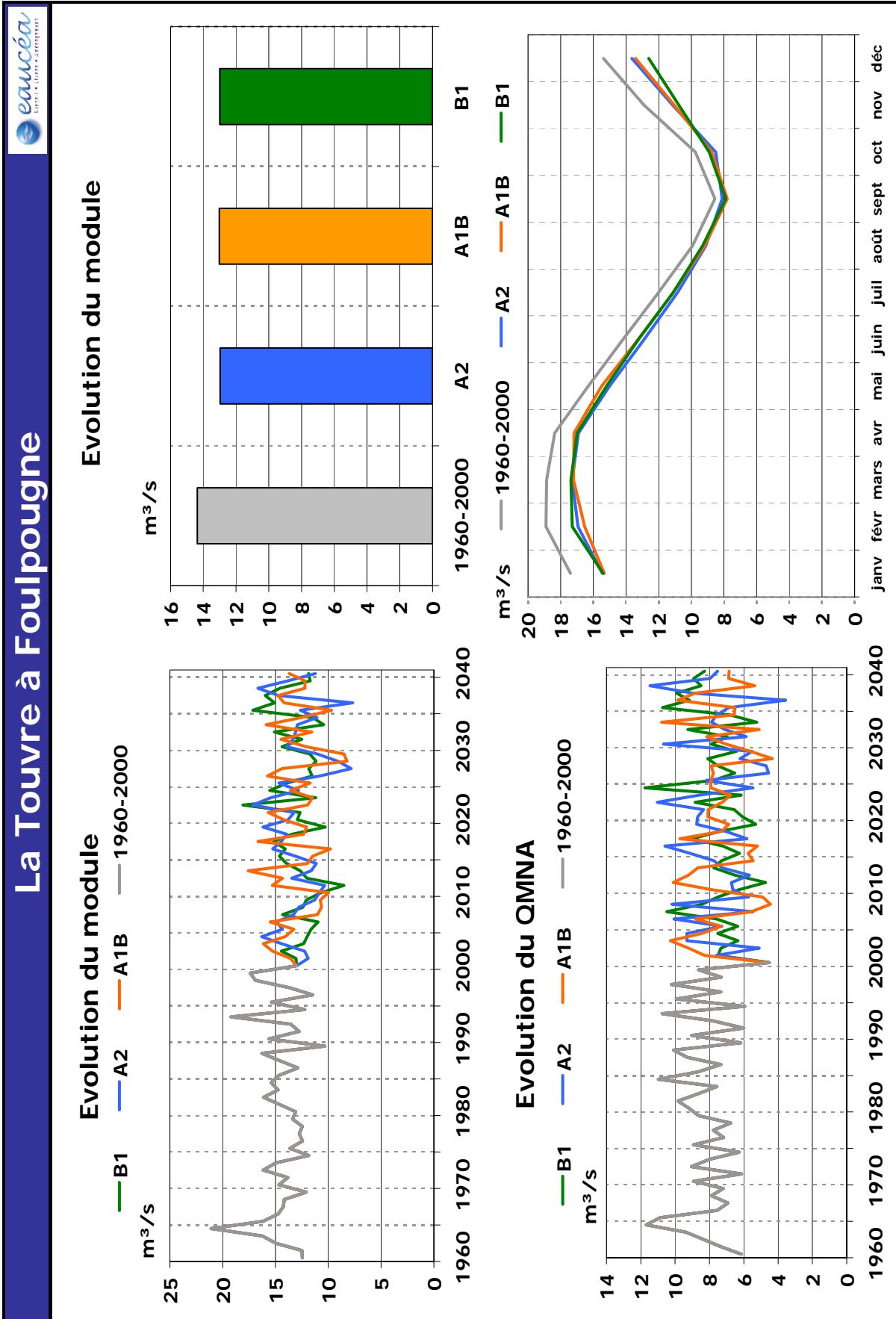
Concernant les autres points clés du territoire, les variations sont également toutes à la baisse, avec des particularités suivant les systèmes hydrologiques considérés.

Pour le karst de la Rochefoucauld et son exutoire la Touvre, les baisses relatives d'abondance hydrologique sont à la fois plus faibles et plus homogènes d'un mois à l'autre. Entre 1960-2000 et 2000-2040, la diminution du module interannuel est d'environ 10%, avec une diminution plus faible au printemps (-6%) et plus forte en fin d'automne (-14%).

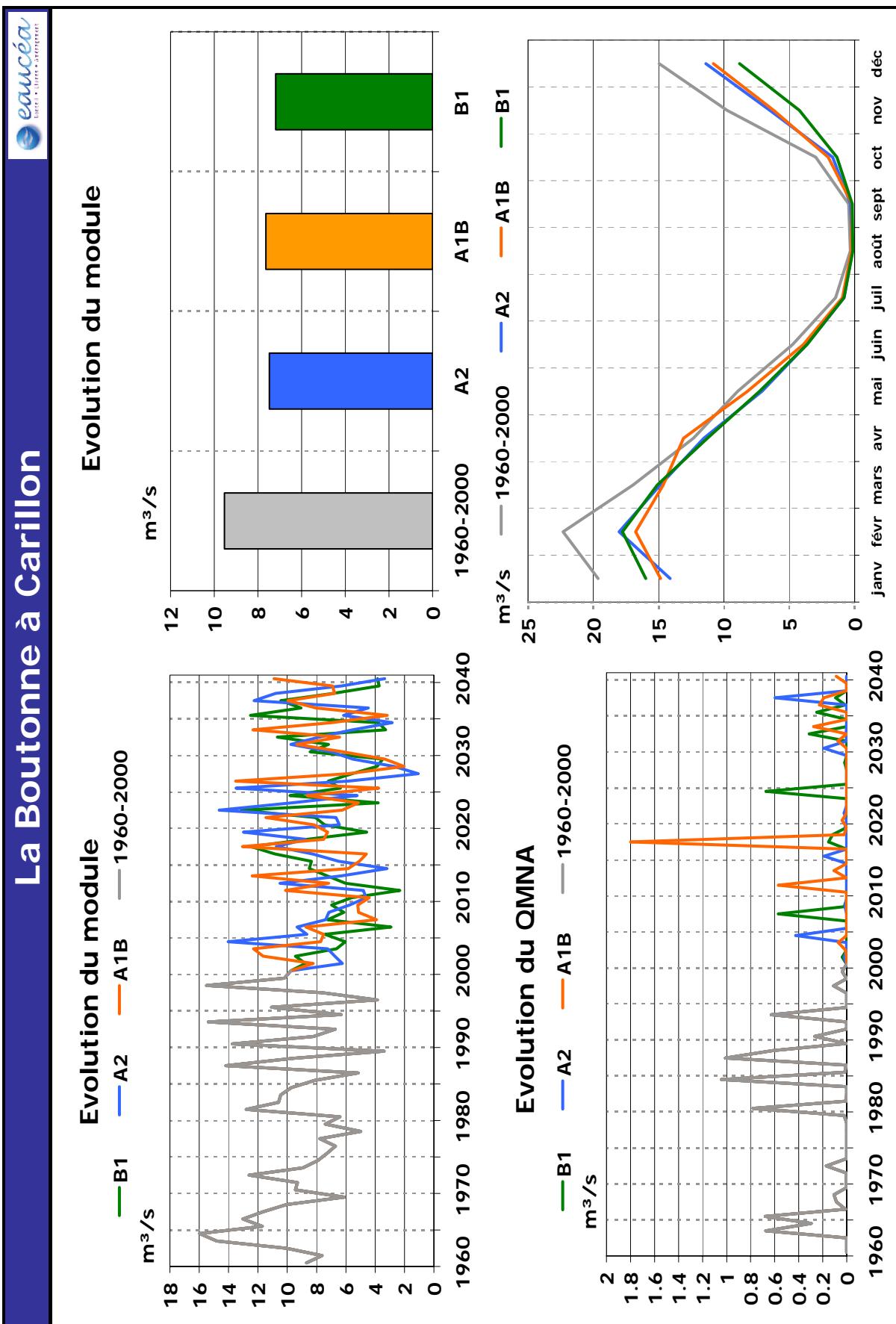
C'est le bassin de la Boutonne qui est le plus touché, accusant une baisse globale de son hydrologie de 22 à 25% suivant le scénario GIEC pris en compte. La baisse est flagrante (-40% à -50%) sur les 5 mois de juillet à novembre.

A l'échelle globale de tout le bassin, les apports d'eau douce à l'estuaire et au bassin de Marennes – Oléron pourraient diminuer globalement de 20% à moyen terme.

Cette baisse générale s'accompagnera donc d'épisodes de crise vraisemblablement plus intenses, notamment au cœur de l'étiage, lorsque l'ensemble des usages s'expriment.

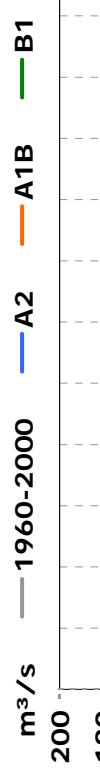
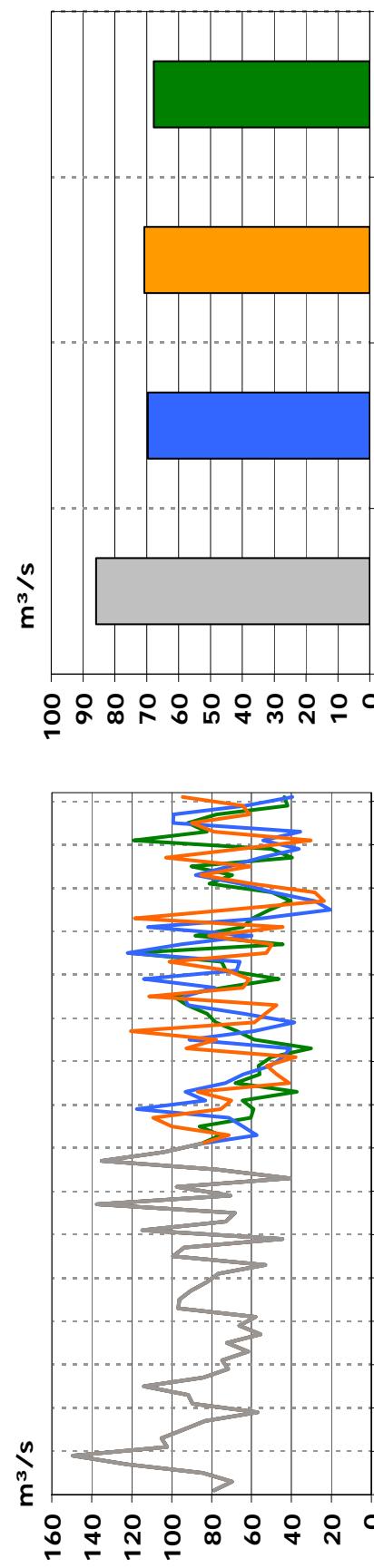


La Bottonne à Carillon



## La Charente à l'estuaire

### Evolution du module



### Evolution du QMNA

