



**HAL**  
open science

**Modélisation hydrologique du bassin versant de la Cagne pour la confrontation des estimations DOE et différentes situations hydrologiques, selon des évolutions des prélèvements et selon des scénarios d'évolutions climatiques.**

N. Folton

► **To cite this version:**

N. Folton. Modélisation hydrologique du bassin versant de la Cagne pour la confrontation des estimations DOE et différentes situations hydrologiques, selon des évolutions des prélèvements et selon des scénarios d'évolutions climatiques.. irstea. 2014, pp.35. hal-02601232

**HAL Id: hal-02601232**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02601232v1>**

Submitted on 16 May 2020

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

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

# Modélisation hydrologique du bassin versant de la Cagne

pour la confrontation des estimations DOE et  
différentes situations hydrologiques, selon des  
évolutions des prélèvements et selon des  
scénarios d'évolutions climatiques.

**FOLTON Nathalie**

Relecture: Patrick ARNAUD

IRSTEA  
GROUPEMENT D'AIX-EN- PROVENCE  
3275, route Cézanne - CS 40061  
13182 Aix En Provence

Juin 2014 - Correctif Aout 2014

Pour mieux affirmer

ses missions,

le Cemagref devient Irstea



## SOMMAIRE

---

Tables des illustrations .....	3
INTRODUCTION.....	5
1. LES DONNEES .....	6
1.1. Le bassin versant de la cagne .....	6
1.2. les données safran .....	7
1.3. les données hydrologiques observés disponibles .....	7
1.4. Influences anthropiques.....	9
2. LE MODELE MENSUEL UTILISE (GR <sub>LOIEAU-PIXEL</sub> ) intégrant les données ISSUES DU SYSTEME SAFRAN .....	12
2.1. Le modèle.....	12
2.2. Procédure de calage- contrôle du modèle.....	13
3. LES RESULTATS .....	15
3.1. résultats de la simulation sur les stations présentant des données sur de longues chroniques .....	15
3.2. discussion autour de la valeur des paramètres .....	16
3.3. proposition d'une méthodologie pour prendre en compte les effets anthropiques lies au prélèvements.....	17
4. REGIONALISATION .....	19
4.1. Méthodologie .....	19
4.2. Résultats.....	20
5. ESTIMATION DE STATISTIQUES D'ETIAGE JOURNALIERES.....	23
6. IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DU BASSIN DU LOUP .....	25
6.1. scénarios climatiques futurs.....	25
6.2. Impact des scénarios climatiques sur les débits simulés sur les bassins de la cagne .....	28
7. IMPACT DE SCENARIOS DE MODIFICATIONS DES PRESSIONS ANTHROPIQUES LIEES A L'AEP .....	30
8. CONCLUSION.....	32
9. BIBLIOGRAPHIE .....	33
10. ANNEXE .....	34

## TABLES DES ILLUSTRATIONS

---

### TABLE DES FIGURES

figure 1 : Localisation du bassin versant de la Cagne (Source: Carte du bassin versant de la Cagne - Etude d'Egis Eau - SIEVI, décembre 2007).....	6
figure 2 : Carte géologique du bassin versant de la Cagne (CG06, 2012) .....	6
figure 3 : Répartition mensuelle des lames et pluies moyennes .....	8
figure 4 : Variabilité des précipitations moyennes mensuelles sur chaque période observée .....	8
figure 5 : Variabilité des lames moyennes mensuelles sur chaque période observée.....	9
figure 6 : Prélèvements moyens annuels sur la Cagne sur la période 2000 à 2012.....	10
figure 7 : Répartition mensuelle des prélèvements moyens annuels sur le bassin versant de la Cagne calculée sur la période 2005 à 2012.....	11
figure 8 : Schéma du modèle hydrologique .....	12
figure 9 : Distribution des paramètres du modèle (débit mesuré influencé) en fonction de la surface des bassins.....	16
figure 10 : Distribution des coefficients d'écoulement en fonction de la surface des bassins. ....	17
figure 11 : restitution des débits moyens mensuels en calage (débits mesurés aux stations) .....	18
figure 12 : Localisation des simulations en différents points le long du réseau hydrographique de la Cagne .....	20
figure 13 : Restitution du débit interannuel et du QMNA5 selon les différentes régionalisation des paramètres du modèle pour les 10 bassins simulés sur la Cagne .....	22
figure 14 : Liaison entre les variables statistiques d'étiages journalières et la variable statistique mensuelle sur les bassins du LOUP et de la CAGNE.....	23
figure 15 : désagrégation des données climatiques.....	26
figure 16 : Synoptique de travail des données climatiques jusqu'aux données Safran.....	27
figure 17 : Restitution du débit interannuel (QA) et du QMNA5 selon les deux scénarios de modification des pressions anthropiques pour les 10 bassins simulés sur la Cagne .....	31

### LISTE DES TABLEAUX

tableau 1 : Données disponibles auprès de la banque HYDRO.....	7
tableau 2 : Bilan 2005 -2012 des prélèvements AEP par captage réalisés sur le bassin de la Cagne ..	10
tableau 3 : Rejets moyens annuels sur la Cagne sur la période 2007 à 2012.....	11
tableau 4 : Résultats du calage du modèle sur les stations présentant de longues chroniques observées. ....	15
tableau 5 : Résultats du calage et de la validation sur les débits mesurés influencés des bassins de la Cagne .....	18
tableau 6 : Paramètres régionaux des différents points simulés sur le bassin versant de la Cagne.....	20
tableau 7 : Résultats des simulations en différents points du bassin de la Cagne, débits mesurés influencés.....	21
tableau 8 : Comparaison des données simulées et observées aux 2 points de contrôle de la Cagne..	21
tableau 9 : Résultats des simulations en différents points du bassin de la Cagne, débits naturalisés. ...	21
tableau 10 : Résultats des simulations en différents points du bassin de la Cagne, débits naturalisés déduits de la chroniques des débits influencés (tableau 7) auxquels on ajoute les prélèvements moyens mensuels .....	22
tableau 11 : Valeurs des statistiques d'étiage journalières simulées et observées .....	24
tableau 12 : Valeurs des statistiques d'étiage journalières mesurées .....	24
tableau 13 : Evolution des principales variables climatiques pour différentes périodes, sur les bassins versants de la Cagne .....	28
tableau 14 : Résultats des simulations en différents points du bassin de la Cagne, débits influencés sur la période P1.....	29
tableau 15 : Résultats des simulations en différents points du bassin de la Cagne, débits influencés sur la période P2.....	29

tableau 16 : Résultats des simulations en différents points du bassin de la Cagne, débits influencés avec hausse des prélèvements moyens de 10%.....	30
tableau 17 : Résultats des simulations en différents points du bassin de la Cagne, débits influencés avec baisse des prélèvements moyens de 10%.....	30

## INTRODUCTION

---

L'objectif de cette étude est de définir en divers points du bassin versant de la Cagne les principaux quantiles caractéristiques d'étiage: QMNA, QMNA2, QMNA5, 1/10 module, 1/20 module, VCN10, en fonction de différentes situations hydrologiques, de l'évolution des prélèvements et de scénarios d'évolutions climatiques.

Les réseaux de mesures hydrologiques et météorologiques disponibles sur ces bassins ne permettent pas de s'appuyer sur des observations pour étudier les phénomènes en tout point. Le développement de la modélisation des écoulements à partir de la pluie peut apporter une réponse à cette question clé en hydrologie. Cette approche présente l'avantage d'être globale et non limitée à une variable hydrologique. On modélise les processus hydrologiques pour générer des scénarios de débits d'où sont tirées des grandeurs statistiques. La régionalisation est alors reportée sur les paramètres du modèle pluie-débit.

Dans la modélisation hydrologique que nous développons (modèle GR<sub>LOIEAU</sub>) [1], les données utilisées sont issues d'une référence climatique spatialisée: la ré-analyse SAFRAN (Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige) mise à disposition par Météo-France. Ce système fournit des précipitations liquides, solides et des températures au pas de temps journalier sur la période 1970 - 2012. Nous avons travaillé à partir des débits observés (débits influencés, soumis à des influences anthropiques), mais nous nous sommes aussi intéressés à la naturalisation des débits. Les performances du modèle en calage sur ces débits sont très correctes, une régionalisation des paramètres a pu être proposée. Les paramètres régionaux permettent de simuler en divers points du bassin versant, des chroniques datées de débits mensuels, à partir desquelles peuvent être extraites les valeurs caractéristiques d'étiage.

# 1. LES DONNEES

## 1.1. LE BASSIN VERSANT DE LA CAGNE

Le bassin versant de la Cagne draine une surface totale de 95 km<sup>2</sup>. Depuis sa source à Coursegoules à une altitude de 1350 m, la Cagne s'écoule sur 25 km, après avoir reçu les eaux de son plus important affluent le Malvan. Celui-ci draine un bassin versant de l'ordre de 26 km<sup>2</sup>. Le régime hydrologique de la Cagne est de type pluvial méditerranéen, fortement influencé par les précipitations d'automne qui se traduisent par une augmentation du débit d'octobre à janvier. Le débit d'étiage estival est très bas. La partie amont du bassin comprend une zone karstique.

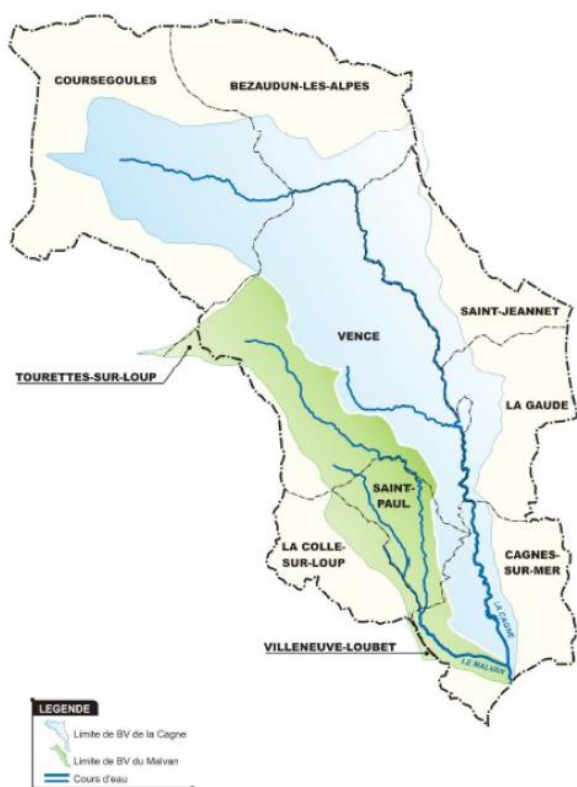


figure 1 : Localisation du bassin versant de la Cagne  
(Source: Carte du bassin versant de la Cagne - Etude d'Egis Eau - SIEVI, décembre 2007)

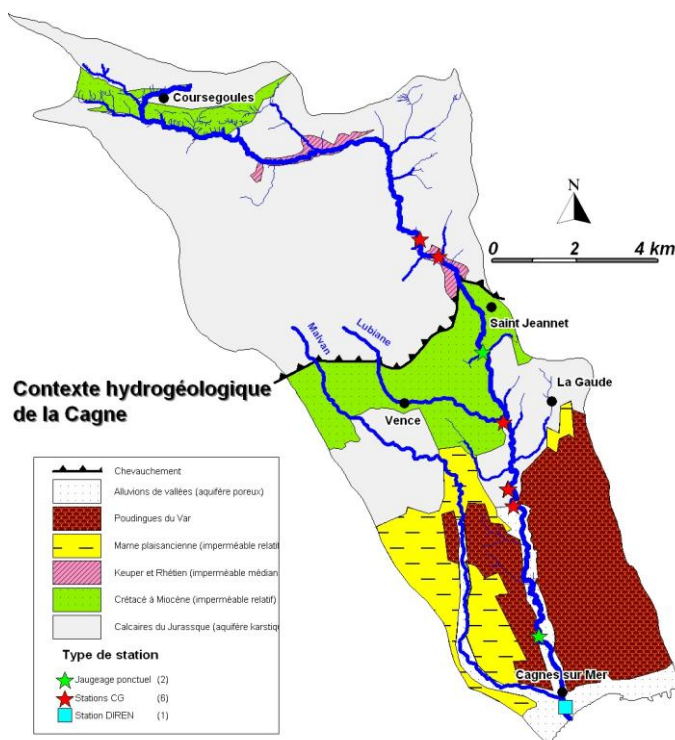


figure 2 : Carte géologique du bassin versant de la Cagne  
(CG06, 2012)

## 1.2. LES DONNEES SAFRAN

Les précipitations, températures et hauteurs de neige sont issues du système SAFRAN (Durand et al 1993, Etchevers 2000, Le Moigne, 2002 [2,3,4]) mis à disposition par Météo-France. SAFRAN (Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige) est un système d'analyse de l'atmosphère à moyenne échelle développé par météo-France, et qui a pour objectif de produire des valeurs en surface de diverses variables climatiques et hydrométéorologiques. Il fournit à l'échelle de la France entière des données de variables climatiques (rayonnement, vent, température, humidité, précipitation, neige) sur 8700 mailles de 8 km de côté. Les données SAFRAN utilisent toutes les données disponibles, c'est à dire les sorties des modèles utilisés pour les prévisions météorologiques et sont complétées par les observations en altitude et au sol (stations météorologiques et climatologiques, par exemple). Le tout est compilé et interpolé pour produire une première sortie sur 612 zones décrites comme climatologiquement homogènes en France. Ensuite toutes ces variables sont interpolées à partir des gradients topographiques sur une maille régulière de 8 par 8 km au pas de temps horaire. L'analyse des paramètres météorologiques effectuée par SAFRAN sur la France ainsi que sa validation ont été décrites en détail dans Quniana Ségui et al (2008). Le système Safran a fait l'objet de validations successives approfondies [5, 6]. L'ETP moyenne utilisée est calculée à partir de la formule établie par Oudin [7], qui a mis au point une formule d'ETP adaptée à la modélisation pluie-débit. Cette ETP dépend uniquement de la température de l'air et du rayonnement extraterrestre. L'ensemble de ces informations est disponible sur le territoire national, à la maille de 8 par 8 km sur la période 1961-2012.

## 1.3. LES DONNEES HYDROLOGIQUES OBSERVEES DISPONIBLES

Les débits sont extraits de la banque de données nationale sur l'eau (HYDRO) pour les stations disposant d'une chronique continue de données. Le tableau 1 récapitule les périodes disponibles.

Code hydro	NOM station	Surface (km <sup>2</sup> )	Données disponibles
Y5625010	LA CAGNES [ST JEANNET]*	38.7	QJ 1981 -1988
Y5625020	LA CAGNES [CAGNES/MER]*	95	QJ 1988 -2008

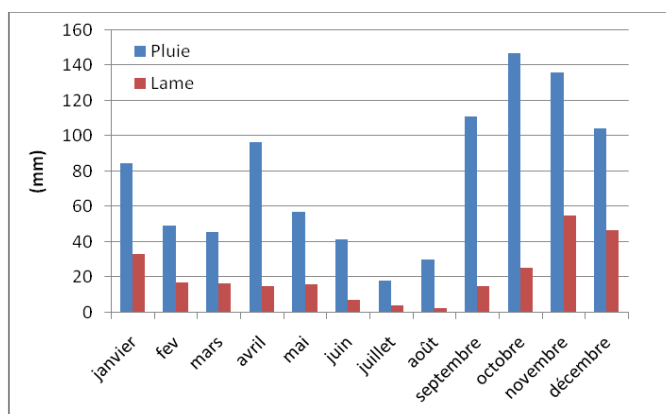
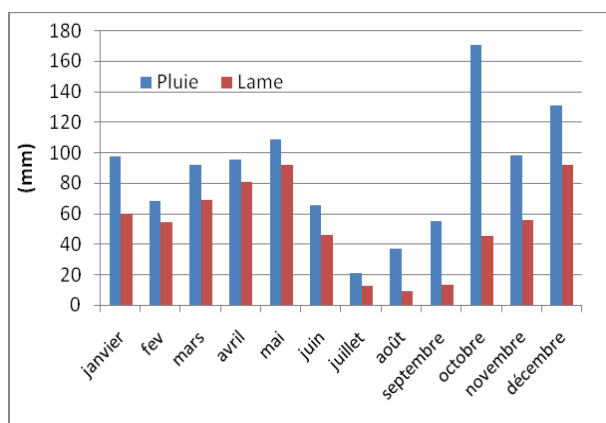
\* Gestionnaire: DREAL PACA

tableau 1 : Données disponibles auprès de la banque HYDRO



Des chroniques de débits et des données climatologiques ont été extraites les données mensuelles moyennes. La lame annuelle du cours d'eau à Cagnes-sur-Mer est estimée à 270 mm sur sa période observée (1981 à 1988). Elle est inférieure de plus de la moitié à celle observée à Saint Jeannet: 560 mm, sur la période 1988 à 2008. La figure 2 représente les pluies et lames mensuelle moyennes. Ainsi on observe:

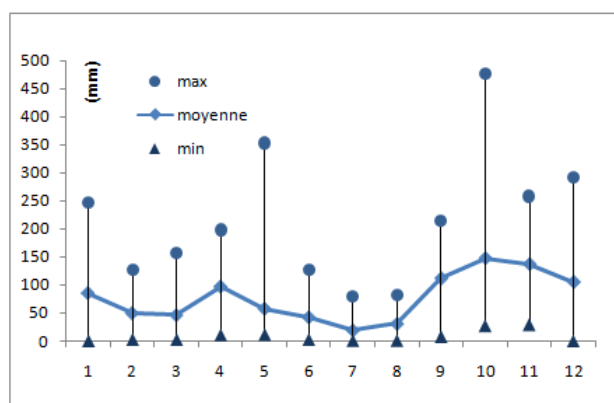
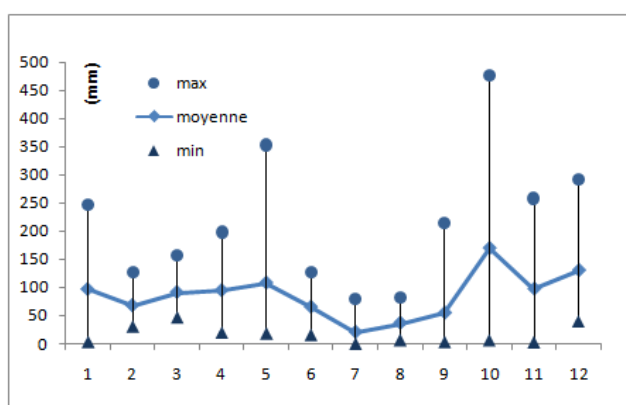
- deux périodes arrosées par les précipitations, l'automne et le printemps,
- une période sèche estivale avec une variabilité très faible pour les mois de juillet et août, ils sont toujours très sec,
- Une variabilité importante pour les précipitations pour le mois d'octobre (figure 4), ainsi que pour les écoulements mesurés à Cagnes sur Mer pour les mois d'octobre à décembre (figure 5).



La Cagne à Saint Jeannet

La Cagne à Cagnes sur Mer

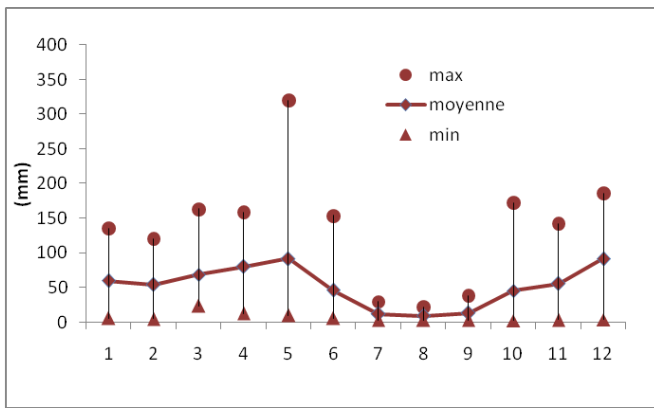
figure 3 : Répartition mensuelle des lames et pluies moyennes



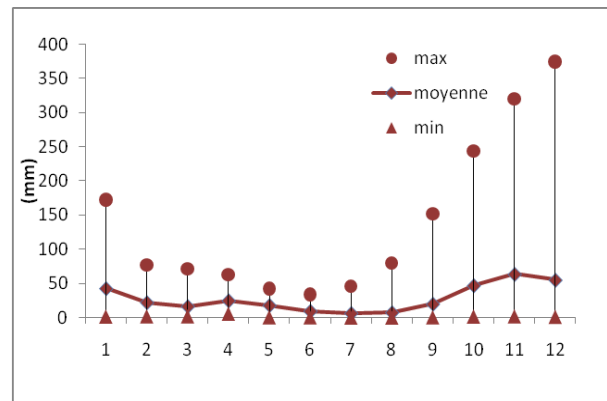
La Cagne à Saint Jeannet

La Cagne à Cagnes sur Mer

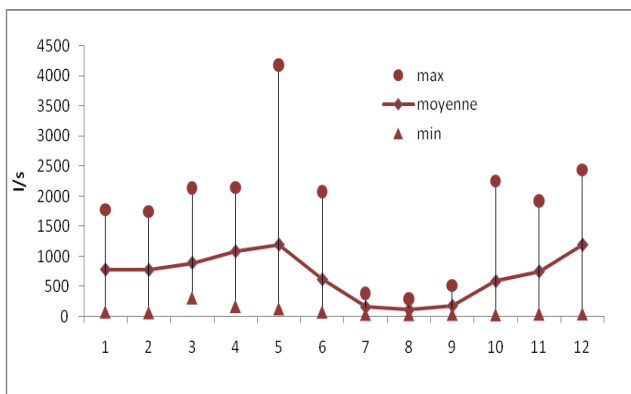
figure 4 : Variabilité des précipitations moyennes mensuelles sur chaque période observée



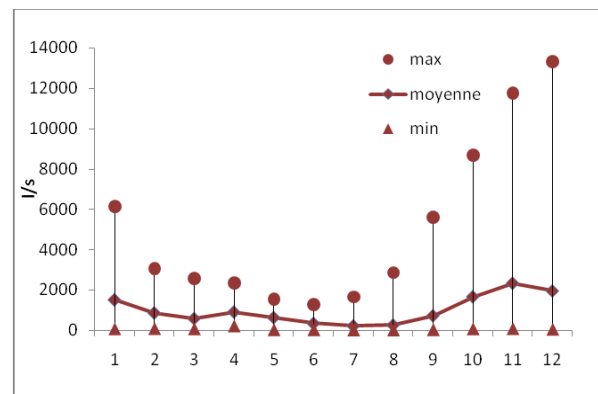
Écoulement exprimé en mm



Écoulement exprimé en mm



Écoulement exprimé en l/s  
La Cagne à Saint Jeannet



Écoulement exprimé en l/s  
La Cagne à Cagnes sur Mer

figure 5 : Variabilité des lames moyennes mensuelles sur chaque période observée

Une station de mesure des débits a été installée entre 2008 et 2011 au niveau du Pont des Salles. Elle ne dispose que de 13 données mensuelles réparties sur 4 années (3 valeurs de débits mensuels pour l'année 2008, 1 pour 2009, 4 pour 2010 et 5 pour 2011). Ces débits ne sont disponibles qu'entre mai et septembre. Le calage du modèle sur cette chronique trop incomplète risque de biaiser fortement ses résultats. En effet, ne disposant d'aucune référence en hautes eaux, le modèle ne peut initialiser correctement les deux réservoirs, les débits simulés sont entachés d'une grande incertitude et ne peuvent pas être présentés dans l'étude.

#### 1.4. INFLUENCES ANTHROPIQUES

Les prélèvements associés à l'usage de l'eau potable et les rejets connus dans le milieu naturel nous ont été communiqués par les services techniques du Conseil Général des Alpes Maritimes. Le tableau 2 présente le bilan des prélèvements connus sur la période 2005 à 2012, selon les différents captages.

Ces influences peuvent être prises en compte dans les simulations hydrologiques des deux bassins versants. Les captages Riou, Feraud et Meynier sont intégrés dans la simulation des écoulements de

la station de Saint-Jeannet. La simulation de la station située à Cagnes sur Mer, reprend l'ensemble des captages indiqués dans le tableau 2.

D'un point de vue quantitatif, les prélèvements annuels pour l'AEP entre 2005 et 2012 s'élèvent à un peu plus de 4 millions de m<sup>3</sup> dont près de 22 % en période estivale (juillet et août). Les captages de Féraud et de Meynier sont plus fortement sollicités en période d'étiage, comme l'indique le tableau 2.

Captage	Total estival (juillet -août) m <sup>3</sup>	Total annuel m <sup>3</sup>	% Volume prélevé à l'étiage / Volume total annuel
RIOU	418 236	2 612 389	16
FERAUD	113 768	472 012	24
MEYNIER	90 528	391 913	23
3 FONTS	72 506	418 384	17
LA FOUX	59 032	357 396	17
<b>Total des prélèvements</b>	<b>754 071</b>	<b>4 252 094</b>	<b>22</b>

tableau 2 : Bilan 2005 -2012 des prélèvements AEP par captage réalisés sur le bassin de la Cagne

La figure 6 présente l'évolution des prélèvements de 2000 à 2012, cependant sur la période 2000 à 2004, seul le volume annuel est renseigné, la répartition mensuelle est inconnue.

On note que les prélèvements évoluent peu, et ils semblent plutôt stables ces dernières années.

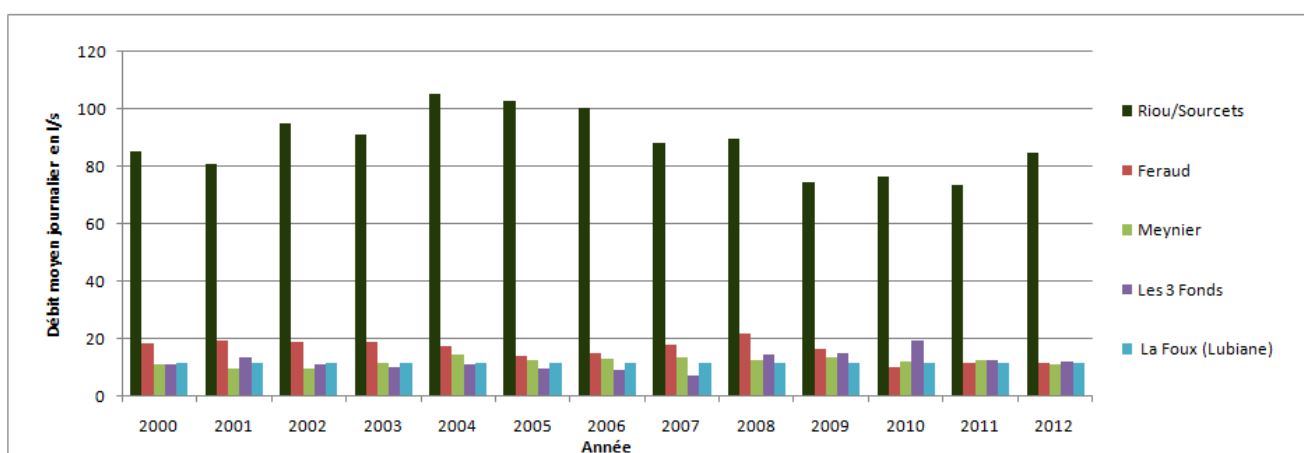


figure 6 : Prélèvements moyens annuels sur la Cagne sur la période 2000 à 2012

En considérant une répartition uniforme des prélèvements sur le mois et sur la journée, la figure 7 présente la répartition de la ressource moyenne prélevée au cours de l'année, pour la période connue de 2005 à 2012.

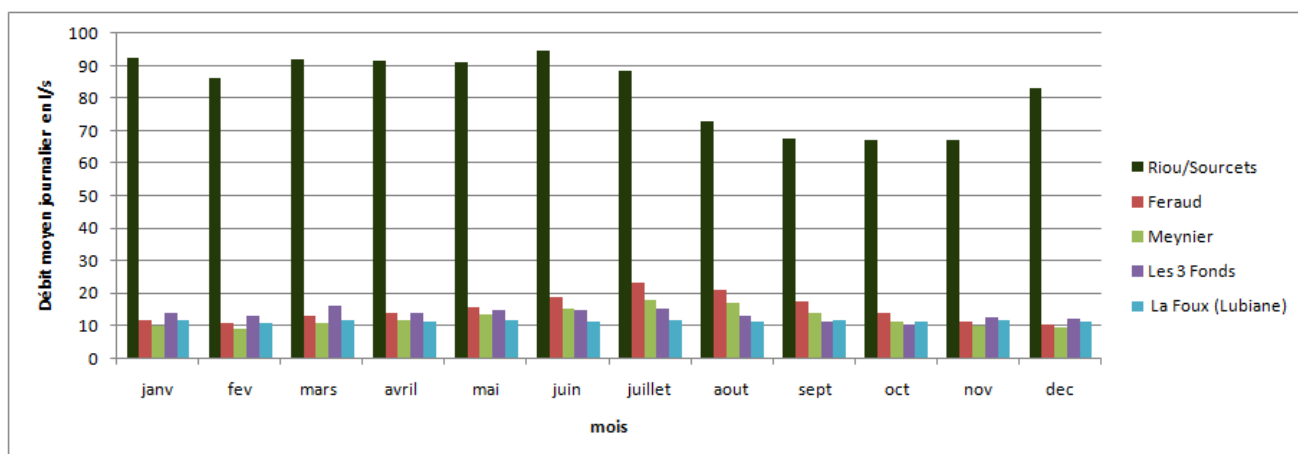


figure 7 : Répartition mensuelle des prélèvements moyens annuels sur le bassin versant de la Cagne calculée sur la période 2005 à 2012

Deux rejets (tableau 3) de stations d'épuration impactent directement les écoulements, ils sont situés sur la commune de Vence. D'un point de vue quantitatif, l'impact du rejet au regard de la ressource disponible n'est pas négligeable.

En effet le QMNA5<sup>(1)</sup> à la station DREAL de Cagnes sur Mer est de 32 l/s, et le débit moyen des rejets des stations d'épuration est de l'ordre de 13.5 l/s, soit près de 40% du QMNA5.

Rejets	Volume annuel moyen rejeté	
	l/s	Milliers m3
Vence Malvan	14.9	471
Vence Vosgelade	11.9	450

tableau 3 : Rejets moyens annuels sur la Cagne sur la période 2007 à 2012

<sup>(1)</sup> QMNA5: débit moyen mensuel sec de récurrence 5 ans. Le QMNA5 a une valeur réglementaire : c'est le débit de référence (défini au titre 2 de la nomenclature figurant dans les décrets n°93-742 et 93-743 du 29 mars 1993 pris en application de la loi sur l'eau du 3 janvier 1992).

## 2. LE MODELE MENSUEL UTILISE (GR<sub>LOIEAU-PIXEL</sub>) INTEGRANT LES DONNEES ISSUES DU SYSTEME SAFRAN

### 2.1. LE MODELE

Safran permet de disposer d'une information spatiale et temporelle par maille régulière. Afin de valoriser ces données spatialisées, on procède à une modélisation de la fonction de production par pixel, définie selon le maillage du système Safran. Sur chaque pixel les données d'entrée journalières (précipitation, ETP, température, neige) alimentent la fonction de production (figure 8). Cette fonction est donc considérée séparément par pixel. Le niveau (A) du réservoir S a été identifié par pixel, au niveau du territoire national [8].

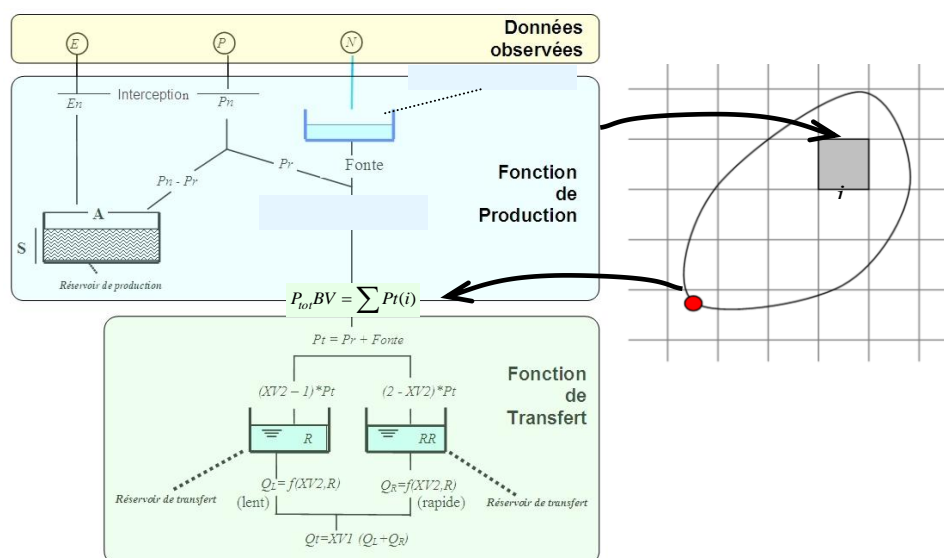


figure 8 : Schéma du modèle hydrologique

En chaque pixel et au pas de temps journalier sont estimés :

- ✓ la quantité de pluie ruisselée ( $Pr$ ),
- ✓ la fluctuation du réservoir S.
- ✓ le stockage et la fonte de la neige.

La précipitation solide ( $N$ ) est dirigée vers un réservoir qui représente le stock de neige propre à chaque pixel. Ce réservoir est initialisé à 0 mm lors du lancement de la modélisation et alimenté uniquement par la donnée précipitation solide de Safran. On s'inspire pour la gestion du stock de neige de la méthode degré-jour, la plus répandue dans la littérature (Valéry, 2010) [9], le coefficient de fonte ayant été préalablement calé.

Les lames de fonte et les pluies ruisselées sont ensuite agrégées pour former une unique lame d'eau écoulee à l'échelle du bassin ( $P_{tot}BV$ ). Pour effectuer la moyenne sur le bassin, seuls les pixels dont le

centre de la maille est contenu dans le contour du bassin sont utilisés. Ce calcul sert à connaître la valeur moyenne de la pluie ruisselée sur le bassin. Le cumul mensuel des lames alimentent la fonction de production qui reste mensuelle.

**XV1** est le paramètre de réglage de la fonction de production. Il gère le bilan du bassin versant par un facteur multiplicatif des débits de chaque mois. Le paramètre est strictement le même pour tous les mois de toutes les années. Selon la structure imposée par le modèle, ce paramètre ne corrige en fait que le débit total sortant. XV1 est positif et non borné. Des valeurs proches de 0 indiquent une tendance à de faibles écoulements du bassin, alors que des valeurs supérieures à 2 sont généralement le fait de bassins versants pour lesquels les entrées météoriques, pluie et neige, sont sous-estimées.

**XV2** est le paramètre de réglage de la fonction de transfert du modèle. Il règle la partie de l'écoulement qui se répartit entre deux réservoirs de transfert, notés (R) et (RR). Le réservoir (R) est muni d'une vidange lente, à l'opposé du réservoir (RR), qui comporte une vidange rapide. XV2 est compris entre 1 et 2. Le bassin réagit d'autant plus rapidement que XV2 est proche de 1. Si XV2 est égal à 1, toute la pluie nette est directement transférée à la rivière pendant le mois durant lequel elle est observée. Dans ce cas, il n'y a aucun stockage dans le réservoir de transfert rapide. De telles valeurs caractérisent les bassins versants très réactifs, souvent associés à des terrains à fort coefficient de drainage. Si XV2 est proche de 2, toute la pluie nette du mois pénètre dans le réservoir de transfert lent. Ce cas concerne des bassins versants qui possèdent une grande inertie, souvent associés à des cours d'eau à fortes contributions souterraines.

## 2.2. PROCEDURE DE CALAGE- CONTROLE DU MODELE

La fonction critère retenue pour le calage des deux paramètres du modèle est le coefficient proposé par Nash et Sutcliffe (1970) [10] calculé sur les racines carrées des débits. Il s'écrit :

$$Nash_{\sqrt{Q_m}} = \left( 1 - \frac{\sum(\sqrt{Q_{obs}} - \sqrt{Q_{cal}})^2}{\sum(\sqrt{Q_{obs}} - \sqrt{Q_{obs}})^2} \right)$$

Il minimise l'écart quadratique entre les valeurs des débits observés et calculés, il est appliqué ici sur la racine carrée des débits mensuels datés. Ce critère calculé sur les valeurs racines des débits permet d'accorder une importance moindre aux fortes valeurs de débits.  $Nash = 1$  correspond à une prédiction parfaite,  $Nash < 0$  témoigne de performances moins efficaces qu'une simple moyenne des valeurs observées. Elle est dénommée **Fonction critère 1**.

Nous avons adopté une démarche multicritères pour aborder le calage des paramètres et obtenir ainsi un modèle robuste pour plusieurs objectifs complémentaires : une bonne restitution des étiages en plus des débits mensuels. En effet comme l'objectif de l'étude est de connaître les évolutions du système en période d'étiage, il est important que le modèle représente bien les faibles débits. La **Fonction critère 2** retenue est composée de plusieurs critères statistiques d'évaluation de la qualité du modèle avec ajout de pondérations. Elle s'écrit :

$$\text{Fonction critère 2} = 0.5 (1 - Nash_{\sqrt{Q_m}}) + 0.3 \varepsilon_{QA \text{ relative}} + 0.2 \varepsilon_{QMNA5 \text{ relative}}$$

avec :  $Nash_{\sqrt{Q_m}}$  le critère précédent

L'écart relatif sur la valeur absolue des moyennes annuelles (QA) est donné par :

$$\varepsilon_{QA \text{ relative}} = \left( \frac{|QA_{cal} - QA_{obs}|}{QA_{obs}} \right)$$

L'écart relatif sur la valeur absolue de la variable d'étiage de référence QMNA5 est donné par :

$$\varepsilon_{QMNA5 \text{ relative}} = \left( \frac{|QMNA5_{cal} - QMNA5_{obs}|}{QMNA5_{obs}} \right)$$

La **Fonction critère 2** présente un compromis pertinent entre les différents aspects de restitution des débits.

### 3. LES RESULTATS

#### 3.1. RESULTATS DE LA SIMULATION SUR LES STATIONS

Le tableau 4a permet d'apprécier les performances des jeux de paramètres sur la restitution des chroniques de débits mensuels mesurés aux deux stations hydrométriques pour les deux critères d'optimisation. Le tableau 4b présente les valeurs de références observées et simulées. Dans la suite de l'étude, le débit moyen interannuel est dénommé QAO, lorsqu'il est calculé sur les débits observés, et QAC, lorsqu'il est calculé sur les débits simulés par le modèle. Le débit de référence d'étiage (QMNA5) est appelé Q5O lorsqu'il est calculé sur les débits observés et Q5C, lorsqu'il est calculé sur les débits simulés par le modèle.

bassin versant	surf (km <sup>2</sup> )	Fonction Critère 1 Nash QM	Fonction Critère 2 Nash QM
La CAGNE à SAINT JEUNET (1981 - 1988)	38.7	81.8	82.9
La CAGNE à CAGNES SUR MER (1988 - 2008)	95	83.70	83.90

(a) Distribution du critère de Nash des débits mensuels selon les deux fonctions critères

	valeurs en l/s			valeurs en l/s		
	QAO	QAC FC1	QAC FC2	Q5O	Q5C FC1	Q5C FC2
La CAGNE à SAINT JEUNET (1981 - 1988)	682	649	684	32	33	29
La CAGNE à CAGNES SUR MER (1988 - 2008)	815	751	809	31	27	32

(b) Débits de références (Module et QMNA5) selon les deux critères d'optimisation. Valeurs en l/s

tableau 4 : Résultats du calage du modèle sur les stations présentant de longues chroniques observées.

Les débits des deux stations de la Cagne sont correctement reproduits avec des critères de Nash supérieurs à 80%. L'analyse de la performance du modèle sur la restitution des débits de référence (QA et QMNA5) est synthétisée sur le tableau 4b. Le QMNA5 estimé à l'aval du bassin est du même ordre de grandeur que celui estimé à la station amont de Saint Jeannet.

Les résultats de modélisation pour les deux stations sont présentés dans l'annexe 1.



### 3.2. DISCUSSION AUTOUR DE LA VALEUR DES PARAMETRES

Sur la figure est reportée la distribution des deux paramètres en fonction de la surface des bassins versants et selon les deux options de calage. Les valeurs obtenues lors de l'étude de la modélisation hydrologique du bassin versant du Loup sont aussi reportées, car ce bassin présente un contexte climatologique et hydrogéologique similaire. Il dispose en outre de 4 stations hydrométriques qui permettent de caler le modèle et d'enrichir la réflexion sur les valeurs des paramètres.

On constate que le choix de la fonction critère pour caler le modèle n'a que peu d'impact sur les valeurs des paramètres.

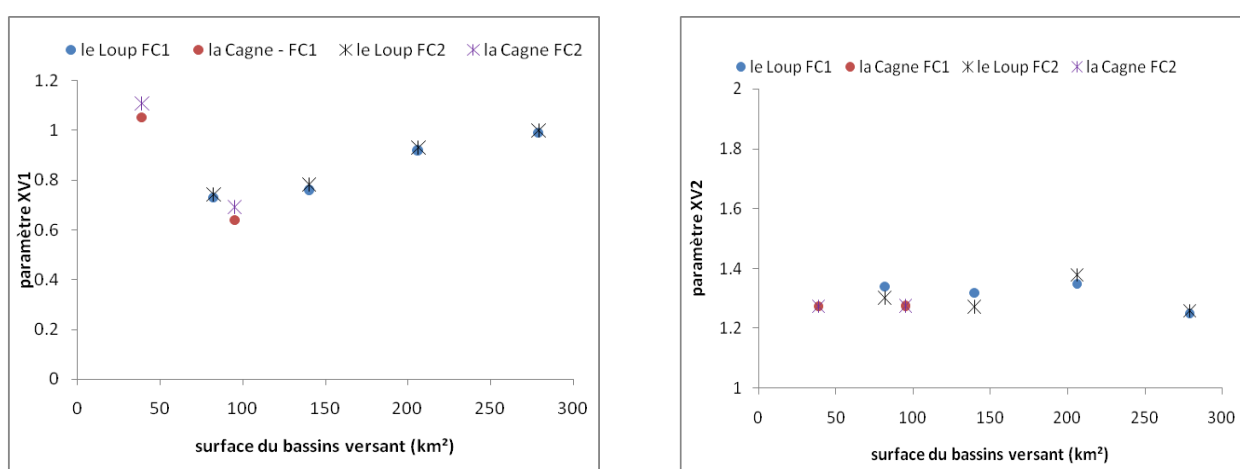


figure 9 : Distribution des paramètres du modèle (débit mesuré influencé) en fonction de la surface des bassins.

Par construction XV1 assure le bilan en eau du bassin versant. Au niveau du réservoir A, on ne tient pas compte des infiltrations, ou d'échanges souterrains potentiels, ni de l'évapotranspiration réelle du bassin. XV1 rend compte de ces échanges par un apport ( $XV1 > 1$ ) ou une perte ( $XV < 1$ ) autre que la pluie ou l'évapotranspiration. XV1 nous renseigne donc sur la productivité du bassin et il est assez lié au coefficient d'écoulement des bassins ( $C_e = \text{rapport écoulement annuel sur pluie annuelle}$ ). Généralement, les bassins supérieurs, au relief plus prononcé et présentant des sources, confirment des productivités plus importantes que les bassins inférieurs. Les coefficients d'écoulement de la Cagne décroissent avec la surface du bassin, comme l'illustre la figure 10, mais le constat est différent sur le Loup. On peut penser ici que la modélisation fait ressortir des spécificités locales (comportement karstique du bassin et/ou logiques d'aménagement différents entre l'amont et l'aval, transfert de surface ou souterrain). Pour le bassin du Loup, c'est lié aux prélèvements pour l'AEP plus important à l'amont. Au niveau de la régionalisation des deux paramètres, on peut alors soit intégrer ces contrastes, soit les exclure, soit calculer leur influence.

Le paramètre XV2 est homogène sur tous les bassins du Loup et de la Cagne, de l'ordre de 1,3.

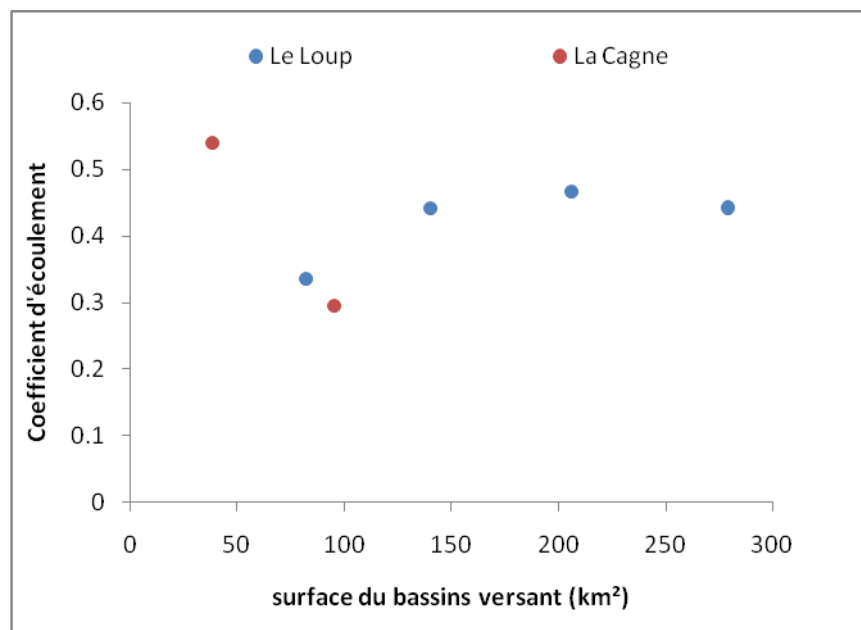


figure 10 : Distribution des coefficients d'écoulement en fonction de la surface des bassins.

### 3.3. PROPOSITION D'UNE METHODOLOGIE POUR PRENDRE EN COMPTE LES EFFETS ANTHROPIQUES LIES AU PRELEVEMENTS

La détermination des prélèvements et des restitutions sur les années 2000 à 2008, permet de calculer à partir des débits mesurés influencés, des débits dits "naturalisés". Ces débits correspondent aux valeurs de débits que l'on aurait dans le cours d'eau en l'absence d'effets anthropiques. La méthode algébrique est la suivante:

$$Q \text{ naturalisé} = Q \text{ mesuré influencé} + Q \text{ prélevé} - Q \text{ rejet}$$

les débits étant exprimés en l/s

Les débits correspondants aux prélèvements mensuels sont moyennés sur la période 2005 à 2012 (figure 6), et les débits correspondant aux rejets sont estimés à partir de la valeur moyenne, seule connue (tableau 3).

Le calage du modèle est réalisé sur la période d'observation des débits c'est à dire de 1980 à 1988 pour la station amont et de 1988 à 2008 pour la station aval, avec les débits influencés et avec les débits naturalisés. Les débits naturalisés ne représentent pas une reconstitution exacte, car les prélèvements sont inconnus sur la période d'observation des débits, mais ils permettent de préciser avec cohérence un ordre de grandeur de ces valeurs.

Les résultats, sont consignés dans le tableau suivant (tableau 5). Il permet de comparer les débits moyens interannuels (QA), le QMNA5, et la restitution des débits mensuels (critère de Nash calculé sur les débits mensuels). La comparaison des débits moyens mensuels simulés et observés est représentée sur la figure 11.

Y5625020 La cagne à Saint Jeannet - Calage sur 1980 - 1988 (FCT1)											
débits	XV1	XV2	Nash (%)	QAO (mm)	QAC (mm)	Q5O (mm)	Q5C (mm)	QAO (l/s)	QAC (l/s)	Q5O (l/s)	Q5C (l/s)
débits mesurés influencés	1.05	1.3	81.8	556.0	529.0	2.2	2.2	682	649	33	33
débits naturalisés	1.23	1.42	82.2	645.0	621.0	8.2	4.8	792	762	122	72

Y5625020 La cagne à Saint Jeannet - Calage sur 1980 - 1988 (FCT2)											
débits	XV1	XV2	Nash (%)	QAO (mm)	QAC (mm)	Q5O (mm)	Q5C (mm)	QAO (l/s)	QAC (l/s)	Q5O (l/s)	Q5C (l/s)
débits mesurés influencés	1.11	1.28	82.9	556.0	557.8	2.2	2.0	682	684	33	30
débits naturalisés	1.29	1.52	78.9	645.0	653.0	8.2	8.3	792	801	122	124

Y5625020 La cagne à Cagne sur Mer - Calage sur 1988 - 2008 (FCT1)											
débits	XV1	XV2	Nash (%)	QAO (mm)	QAC (mm)	Q5O (mm)	Q5C (mm)	QAO (l/s)	QAC (l/s)	Q5O (l/s)	Q5C (l/s)
débits mesurés influencés	0.64	1.26	83.7	270.6	249.3	0.9	0.8	815	751	32	28
débits naturalisés	0.73	1.37	82.2	303.5	202.8	4.0	1.6	914	611	147	59

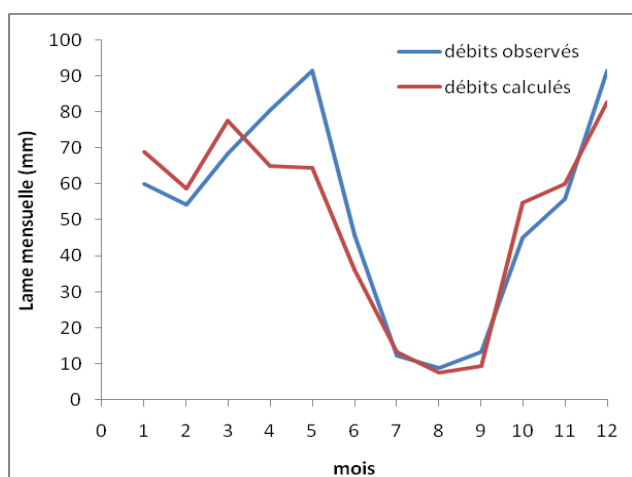
  

Y5625020 La cagne à Cagne sur Mer - Calage sur 1988 - 2008 (FCT2)											
débits	XV1	XV2	Nash (%)	QAO (mm)	QAC (mm)	Q5O (mm)	Q5C (mm)	QAO (l/s)	QAC (l/s)	Q5O (l/s)	Q5C (l/s)
débits mesurés influencés	0.69	1.27	83.8	270.6	268.6	0.9	0.9	815	809	32	33
débits naturalisés	0.79	1.53	74.2	303.5	303.3	4.0	4.0	914	914	147	147

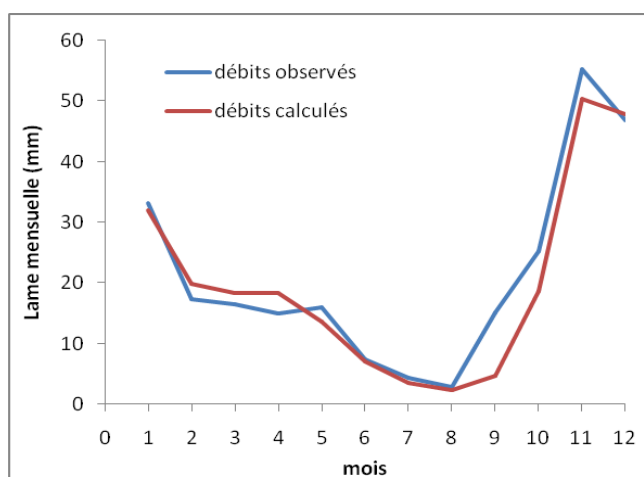
**tableau 5 : Résultats du calage et de la validation sur les débits mesurés influencés des bassins de la Cagne**

L'étude sur le Loup avait permis de mettre en évidence la même augmentation des paramètres entre les deux calages réalisés sur les débits mesurés influencés naturalisés, et ce quelque soit la fonction critère.

La fonction critère 2 est retenue car elle permet une restitution plus satisfaisante des débits d'étiage, sans dégrader la restitution du bilan. Le calage sur les débits naturalisés des deux bassins versants de la Cagne permet d'obtenir un paramètre XV2 de 1.5, du même ordre de grandeur que ceux obtenus sur les bassins modélisés du Loup.



**La Cagnes à Saint Jeannet (1980 à 1988)**



**La Cagnes à Cagnes sur mer (1988 à 2008)**

**figure 11 : restitution des débits moyens mensuels en calage (débits mesurés aux stations)**

## 4. REGIONALISATION

---

### 4.1. METHODOLOGIE

La régionalisation du modèle à partir des débits mesurés influencés consiste à obtenir une cartographie des deux paramètres du modèle en tout point de la zone d'étude, afin de pouvoir l'activer sur l'ensemble des cours d'eau de la zone. Les paramètres calés sur deux bassins ne nous permettant pas de rechercher des liens avec des caractéristiques physiques ou descriptifs des bassins versants. On peut juste retenir que l'amont du bassin de la Cagne, présente un paramètre de production (XV1) un peu plus fort que l'aval.

D'un point de vue hydrogéologique, le bassin situé à l'amont de la station "Saint Jeannet" apparaît homogène, il est composé pour l'essentiel de calcaire du Jurassique. On propose donc de fixer sur l'ensemble de cette zone amont, le paramètre XV1 à 1.1 pour le modèle débit mesuré influencé, et XV1 à 1.3 pour le modèle débit naturalisé. Ensuite on propose de faire décroître le paramètre XV1 avec la surface du bassin versant, pour obtenir à l'aval du bassin un paramètre de l'ordre de 0.7 pour le modèle débit mesuré influencé, et de l'ordre de 0.8 pour le modèle débit naturalisé.

Pour le paramètre XV2, on privilégie une valeur régionale, fixée à 1.3 pour l'application du modèle en débit mesuré influencé et à 1.5 pour l'application du modèle en débit naturalisé. Ces valeurs sont en adéquation avec celles obtenues sur le bassin du Loup.

Ces valeurs étant déterminées, on procède à une simulation des débits influencés et des débits naturalisés pour différents points exutoires de la Cagne sur la période 1970 à 2011. Les exutoires sont localisés sur la figure 12 et les paramètres régionaux correspondants sont indiqués dans le tableau 6.

Les prélèvements du tableau 2 sont pris en compte dans la modélisation, à avoir:

- BV1 intègre les prélèvements de Riou
- BV2 intègre les prélèvements de Riou , Féraud et Meynier
- BV3, BV4 et BV5 intègrent les prélèvements de Riou , Féraud, Meynier et les 3 Fonts.
- BV6 à BV 10 intègrent les prélèvements de Riou , Féraud, Meynier, les 3 Fonts et Lubiane

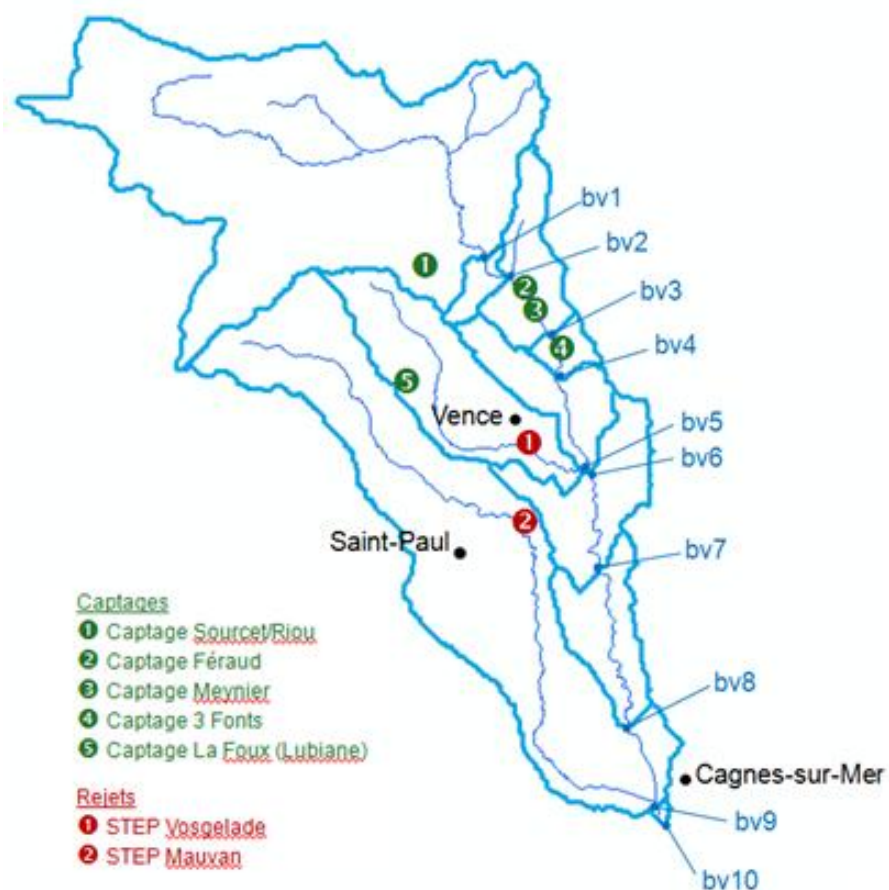


figure 12 : Localisation des simulations en différents points le long du réseau hydrographique de la Cagne

bassins simulés	numero bassin	Surface (km <sup>2</sup> )	xv1 "débit observé"	xv2 "débit observé"	xv1 "débit naturalisé"	xv2 "débit naturalisé"
Amont Captage Sourcet	BV 1	38.68	1.10	1.30	1.30	1.50
Réservoir	BV 2	39.66	1.09	1.30	1.29	1.50
Pont des moulins	BV 3	43.71	1.06	1.30	1.26	1.50
Les Fonts	BV 4	44.75	1.06	1.30	1.25	1.50
Amont Lubiane	BV 5	48.61	1.03	1.30	1.21	1.50
Aval Lubiane	BV 6	57.73	0.97	1.30	1.13	1.50
Pont des salles	BV 7	63.08	0.93	1.30	1.08	1.50
Passerelle du Breccq	BV 8	67.27	0.90	1.30	1.04	1.50
Station DREAL	BV 9	95.68	0.70	1.30	0.79	1.50
Exutoire en mer	BV 10	95.80	0.70	1.30	0.79	1.50

tableau 6 : Paramètres régionaux des différents points simulés sur le bassin versant de la Cagne.

## 4.2. RESULTATS

Des chroniques mensuelles simulées sont extraits les débits de références: module (QA) et Qmna5 influencés et naturalisés pour les exutoires demandés. Les débits moyens mensuels sont aussi

calculés. Les résultats concernant la simulation des débits mesurés influencés issus du modèle régional <sup>débit influencé</sup> sont présentés dans le tableau 7. Le tableau 9 présente les débits simulés naturalisés par le modèle régional <sup>débit naturalisé</sup>.

DEBITS INFLUENCES				Débits moyens mensuels en l/s												
		surf (km²)	Qa l/s	Q5 l/s	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BV1	Amont Captage Sourcet	38.68	780	46	1302	1164	1020	934	722	409	181	130	250	886	1162	1231
BV2	Réservoir	39.66	785	46	1312	1173	1027	938	725	410	182	130	251	891	1168	1239
BV3	Pont des moulins	43.71	811	47	1364	1219	1066	967	744	419	186	132	256	918	1204	1283
BV4	Les Fonts	44.75	823	48	1387	1239	1084	981	754	425	188	134	259	932	1221	1303
BV5	Amont Lubiane	48.61	843	48	1428	1275	1114	1002	767	431	191	135	262	952	1248	1336
BV6	Aval Lubiane	57.73	935	53	1590	1418	1240	1111	846	475	210	148	290	1059	1385	1486
BV7	Pont des salles	63.08	942	53	1611	1436	1254	1116	847	474	209	147	288	1064	1393	1500
BV8	Passerelle du Breçq	67.27	937	52	1610	1436	1252	1107	837	468	206	144	284	1055	1383	1493
BV9	Station DREAL	95.0	980	52	1701	1516	1317	1154	863	481	212	147	291	1101	1445	1570
BV10	Exutoire en mer	95.8	989	53	1716	1529	1328	1163	870	485	214	148	293	1110	1457	1583

tableau 7 : Résultats des simulations en différents points du bassin de la Cagne, débits mesurés influencés.

Les bassins 1 et 9 correspondent aux bassins présentant des observations influencées, les débits simulés sont légèrement supérieurs aux observés compte tenu que la période simulée (1970-2011) est plus pluvieuse, comme l'indique le tableau 8.

Y5625020 La cagne à Saint Jeannet				
periode	Pa (mm)	Qa (mm)	Qa l/s	Q5 l/s
obs: 1980 -1988	1037	615	754	36
sim:1970 - 2011	1116	636	780	46
Y5625020 La cagne à Cagne sur Mer				
periode	Pa (mm)	Qa (mm)	Qa l/s	Q5 l/s
obs:1988 - 2008	910	271	815	32
sim:1970 - 2011	987	325	980	52

tableau 8 : Comparaison des données simulées et observées aux 2 points de contrôle de la Cagne

DEBITS NATURALISES				Débits moyens mensuels en l/s												
		surf (km²)	Qa l/s	Q5 l/s	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BV1	Amont Captage Sourcet	38.68	923	132	1408	1365	1197	1134	931	648	391	292	361	882	1192	1303
BV2	Réservoir	39.66	929	133	1421	1376	1208	1142	937	652	394	294	362	888	1199	1312
BV3	Pont des moulins	43.71	964	137	1482	1435	1259	1184	968	673	406	303	373	919	1241	1363
BV4	Les Fonts	44.75	971	137	1494	1448	1269	1192	974	677	409	304	375	925	1250	1373
BV5	Amont Lubiane	48.61	991	139	1531	1483	1299	1215	990	687	415	308	379	941	1272	1402
BV6	Aval Lubiane	57.73	1090	152	1689	1635	1433	1337	1085	752	454	337	416	1037	1400	1546
BV7	Pont des salles	63.08	1095	151	1704	1650	1445	1342	1086	752	454	337	414	1039	1403	1553
BV8	Passerelle du Breçq	67.27	1084	148	1693	1640	1435	1327	1071	741	448	332	407	1025	1386	1538
BV9	Station DREAL	95.0	1107	148	1744	1689	1475	1355	1085	749	453	334	410	1043	1413	1577
BV10	Exutoire en mer	95.8	1117	149	1759	1703	1488	1366	1094	755	456	337	413	1052	1425	1590

tableau 9 : Résultats des simulations en différents points du bassin de la Cagne, débits naturalisés.

On assure une comparaison avec les simulations du modèle régional <sup>débit influencé</sup> (tableau 7) auxquelles on ajoute les prélèvements moyens mensuels. Le tableau 10 présente les résultats des simulations obtenues, qui sont dénommées "débits naturalisés bis".

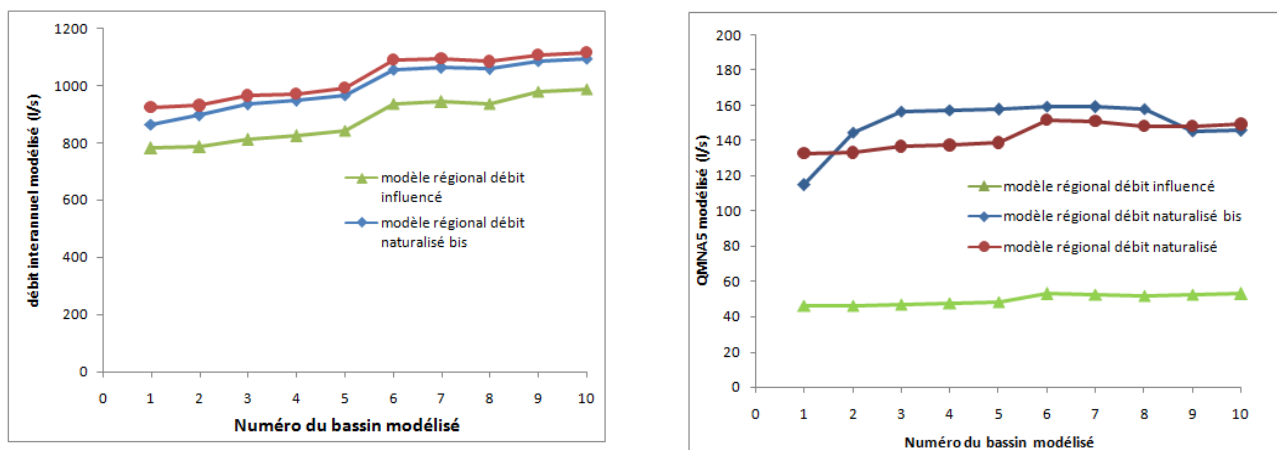


DEBITS NATURALISES				Débits moyens mensuels en l/s												
		surf (km <sup>2</sup> )	Qa l/s	Q5 l/s	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BV1	Amont Captage Sourcet	38.68	863	115	1394	1251	1112	1025	813	503	269	203	318	953	1229	1315
BV2	Réservoir	39.66	895	145	1426	1280	1143	1055	845	538	311	241	349	983	1257	1342
BV3	Pont des moulins	43.71	935	157	1492	1338	1198	1098	878	562	330	256	365	1021	1305	1398
BV4	Les Fonts	44.75	947	157	1515	1359	1215	1112	889	568	332	257	369	1034	1322	1418
BV5	Amont Lubiane	48.61	966	158	1556	1394	1246	1133	902	574	335	259	372	1055	1349	1451
BV6	Aval Lubiane	57.73	1056	159	1714	1533	1368	1238	977	614	350	268	396	1158	1483	1598
BV7	Pont des salles	63.08	1062	159	1735	1551	1382	1243	978	614	350	267	395	1163	1490	1611
BV8	Passerelle du Brecq	67.27	1057	158	1734	1551	1380	1234	968	607	347	265	390	1154	1480	1605
BV9	Station DREAL	95.0	1086	145	1811	1616	1432	1267	980	606	338	253	383	1185	1528	1667
BV10	Exutoire en mer	95.8	1094	146	1826	1629	1443	1276	987	610	340	254	385	1194	1540	1680

**tableau 10 : Résultats des simulations en différents points du bassin de la Cagne, débits naturalisés déduits de la chroniques des débits influencés (tableau 7) auxquels on ajoute les prélèvements moyens mensuels dits "débits naturalisés bis".**

Ces deux estimations peuvent donner un intervalle de confiance de la valeurs estimée.

Les restitutions du débit interannuel et du QMNA5 simulés pour les 10 sous bassins de la Cagne sont tracés sur la figure 13. Le QMNA5 "débit naturalisé bis" est impacté plus directement par les prélèvements et les rejets.



**figure 13 : Restitution du débit interannuel et du QMNA5 selon les différentes régionalisation des paramètres du modèle pour les 10 bassins simulés sur la Cagne**

Il faut noter que le modèle régional ne permet pas de restituer des valeurs aussi précises que le modèle en mode calage. Les paramètres régionaux sont issus d'une synthèse régionale. Certaines particularités hydrologiques ne peuvent donc être restituées correctement.

Notre méthode est une méthode régionale d'estimation de l'aléa hydrologique basée sur la régionalisation de paramètres d'un modèle. Elle propose une estimation homogène et cohérente (issue d'une seule régionalisation) de l'ensemble des caractéristiques statistiques de l'aléa (module, Qmna5...). La méthode en mode local est capable de se caler avec peu de paramètre et produire des résultats justes. La régionalisation est ici assez simple, elle s'appuie sur l'information qui se veut la plus homogène et la plus exhaustive possible. Et comme toute méthode régionale, les estimations fournies peuvent être entachées d'incertitudes. Cette incertitude est d'autant plus grande que l'on s'intéresse aux débits extrêmes. Ces quantiles restent donc une estimation régionale.

## 5. ESTIMATION DE STATISTIQUES D'ETIAGE JOURNALIERES

Le modèle hydrologique ne peut pas restituer des chroniques journalières. L'idée est donc de déduire les variables statistiques d'étiage journalières de la variable statistique mensuelles (QMNA/5). La figure 11 représente pour les quatre bassins du Loup et les deux bassins de la Cagne, la liaison entre les variables statistiques d'étiage journalières et mensuelles calculées sur les observations exprimées en l/s. La liaison de ces variables est fortement marquée pour ces 6 bassins, à l'exception du bassin versant de la Cagne aval légèrement décalé du nuage de points surtout pour la période de retour 5 ans. On obtient, cependant un coefficient de détermination de 0.99. On vérifie toutefois que la liaison est marquée aussi pour les variables exprimées en mm, et que la surface n'intègre pas toute la variabilité de la liaison (le  $r^2$  est de 0.95). On en déduit donc les quantiles du VCN10jour selon ces deux formulations:

$$\text{VCN10jour } T_{2\text{ans}} \text{ (l/s)} = 1.255 * \text{QMNA5 (l/s)} \text{ avec } r^2=0.991$$

$$\text{VCN10jour } T_{5\text{ans}} \text{ (l/s)} = 0.816 * \text{QMNA5 (l/s)} \text{ avec } r^2=0.990$$

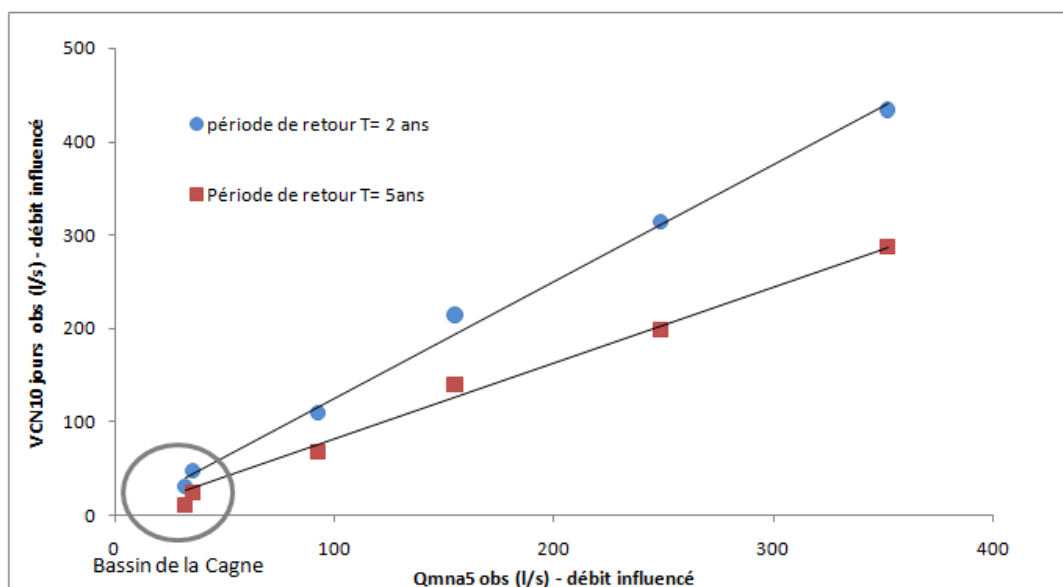


figure 14 : Liaison entre les variables statistiques d'étiages journalières et la variable statistique mensuelle sur les bassins du LOUP et de la CAGNE

Le tableau 11 récapitule les deux valeurs journalières de statistiques d'étiage calculées à partir des liaisons établies ci-dessus et des valeurs du QMNA5 simulés (débits influencés).



DEBITS INFLUENCES simulés (Modèle régional)			VCN10j T= 2 ans	VCN10j T= 5 ans
		surf (km <sup>2</sup> )	Q5 l/s	l/s
BV1	Amont Captage Sourcet	38.68	46	58
BV2	Réservoir	39.66	46	58
BV3	Pont des moulins	43.71	47	59
BV4	Les Fonts	44.75	48	60
BV5	Amont Lubiane	48.61	48	61
BV6	Aval Lubiane	57.73	53	67
BV7	Pont des salles	63.08	53	66
BV8	Passerelle du Brecq	67.27	52	65
BV9	Station DREAL	95	52	66
BV10	Exutoire en mer	95.8	53	66

tableau 11 : Valeurs des statistiques d'étiage journalières simulées et observées

Les valeurs de VCN10 obtenus sur les débits mesurés influencés (tableau 12) indiquent que les valeurs (en l/s) de l'aval sont inférieures à celles de l'amont, ce que ne peut reproduire notre formule.

	VCN10j T= 2 ans l/s	VCN10j T= 5 ans l/s
La CAGNE à SAINT JEUNET (1981 - 1988)	47	24
La CAGNE à CAGNES SUR MER (1988 - 2008)	31	10

tableau 12 : Valeurs des statistiques d'étiage journalières mesurées

Ces estimations restent des valeurs régionales. Elles ne peuvent respecter des spécificités hydrologiques locales et elles présentent de fortes incertitudes.

## 6. IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DU BASSIN DU LOUP

---

L'étude de l'impact du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique des bassins versants de la Cagne se base sur les données météorologiques élaborées et mises à disposition par le CERFACS.

### 6.1. SCENARIOS CLIMATIQUES FUTURS

Les conclusions du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) dans son rapport AR4 [12] (4<sup>ème</sup> Assessment Report) anticipe un réchauffement maximal sur les terres émergées et dans la plupart des régions des hautes latitudes de l'hémisphère Nord et un réchauffement minimal au-dessus de l'océan Austral et d'une partie de l'Atlantique Nord. D'importantes incertitudes existent sur les changements du cycle hydrologique dans le climat futur, même dans les scénarios les plus récents. Ces incertitudes sont néanmoins très variables selon les zones géographiques. L'Europe est une zone où les modèles s'accordent relativement bien, avec une augmentation des précipitations au nord et une diminution au sud du continent. Cependant, la limite est variable selon les saisons (plus au nord en été et plus au sud en hiver). La France se situant dans la zone de changement de signe, les incertitudes y sont fortes. Les impacts les plus importants risquent d'avoir lieu en Eté avec une importante diminution des précipitations sur le Sud de l'Europe, France incluse, une forte diminution du ruissellement ainsi qu'un assèchement des sols. Ceci n'exclut pas une augmentation d'intensité des évènements extrêmes, en Hiver notamment. [13]

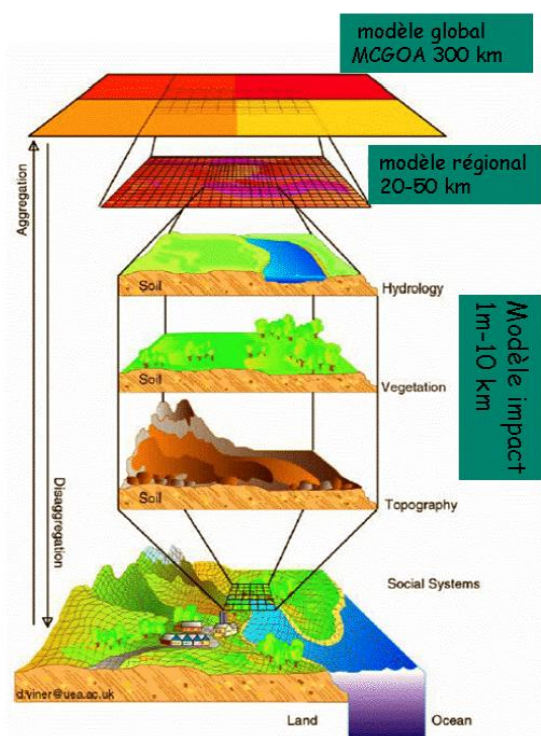
#### 6.1.1. Méthode d'obtention des scénarios climatiques futurs

Un scénario climatique futur est la combinaison d'un scénario d'émission de gaz à effet de serre (GES), d'un modèle climatique et d'une méthode de descente d'échelle.

Le GIEC a simulé plusieurs scénarios d'émission de gaz à effet de serre (GES), liés à différentes hypothèses sur les évolutions socio-économiques, démographiques et agricoles possibles au cours du 21<sup>ème</sup> siècle. Ces émissions ont été converties en concentrations et ont servi de données d'entrée aux modèles climatiques. Le scénario A1B a été choisi de part sa position médiane dans la palette des scénarios possibles.

Deux modèles climatiques simulant le climat sur la région considérée sont disponibles: il s'agit du modèle CNRM-CM3 et du modèle ARPEGE V4. Ces deux modèles ont été réalisés par le Centre National de Recherches Météorologiques de Météo France.

Les données climatiques produites par les modèles climatiques ne sont pas suffisantes pour conduire une étude d'impact à échelle fine sur un territoire étudié, une étape supplémentaire est nécessaire. Elle met en oeuvre des techniques dites de " régionalisation" des données climatiques. La méthode de descente d'échelle ou de désagrégation utilisée ici est la méthode des types de temps ou régimes de temps (figure 15). Elle permet d'affiner spatialement les données climatiques en essayant de prendre en compte des hétérogénéités spatiales non ou mal résolues. Elle est, selon Julien BOE, bien adaptée à l'étude des impacts hydrologiques. Ces modèles permettent de produire des chroniques perturbées pour le futur à l'échelle des mailles SAFRAN. Elles constituent les données d'entrées du modèle hydrologique. La figure 16 présente un récapitulatif de l'obtention des données climatiques futures.



**figure 15 : désagrégation des données climatiques**  
 (BOE Julien. "Changement global et cycle hydrologique")

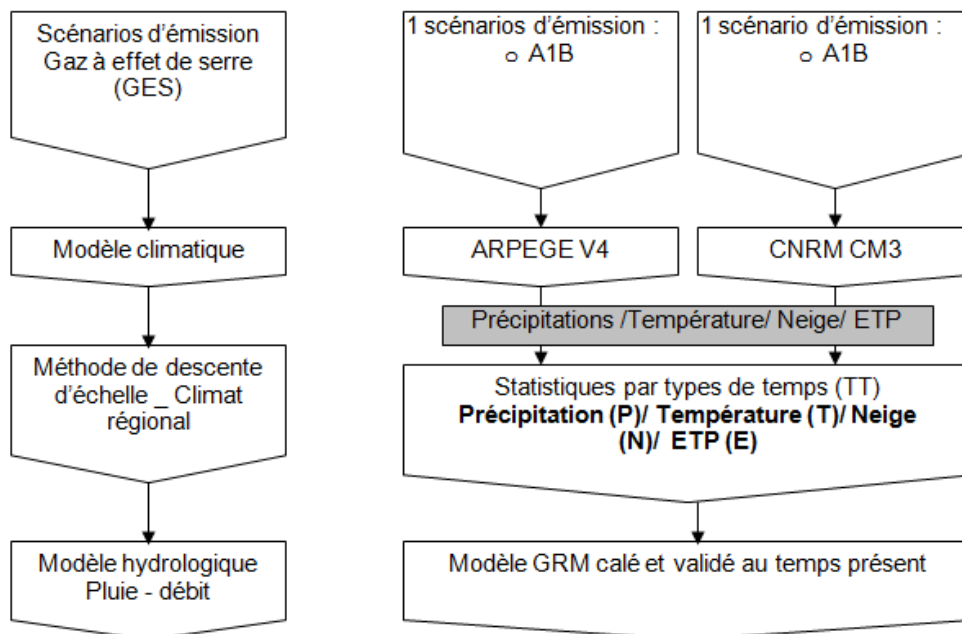


figure 16 : Synoptique de travail des données climatiques jusqu'aux données Safran

### 6.1.2. Résultats des scénarios climatiques

Les résultats des scénarios climatiques sont présentés dans le tableau 13. Les bilans annuels sont calculés pour deux périodes futures et la période 1981 à 2000 pour les données issues de l'observation (SAFRAN). Afin de ne garder que le signal climatique moyen et de pouvoir comparer les différentes périodes entre elles, nous avons considéré la moyenne multi-modèle pour les périodes futures.

Le tableau montre que la température augmenterait en moyenne de 2°C entre les périodes 1980-2000 et 2046-2068 et d'à peine 1°C entre les périodes 2046-2068 et 2081-2100. A l'horizon 2046-2065, les précipitations moyennes annuelles diminueraient d'environ 20 % à 25 % par rapport à la période 1981-2000. Quant aux précipitations neigeuses, les modèles prévoient une décroissance plus marquée de l'ordre de 12 à 13% par décennie. Les modèles prévoient également une augmentation de l'ETP à court et moyen terme, de l'ordre de 3% à 2% par décennie.

		SAFRAN 1970 - 2011	Moyenne multimodèle 2046/2065 2081-2100	
Pluie (mm/an)	BV1	1116.2	786.0	715.9
	BV2	1109.6	781.1	711.2
	BV3	1086.2	763.8	694.8
	BV4	1081.0	759.9	691.1
	BV5	1062.3	746.1	678.0
	BV6	1056.4	740.3	672.3
	BV7	1033.9	724.0	657.0
	BV8	1013.4	709.2	643.2
	BV9	987.2	688.5	624.0
	BV10	987.2	688.5	624.0
ETP (mm/an)	BV1	738.2	909.9	924.0
	BV2	740.6	910.2	924.4
	BV3	749.0	911.1	925.8
	BV4	750.9	911.3	926.1
	BV5	757.6	912.1	927.2
	BV6	760.9	914.1	929.5
	BV7	770.3	920.4	936.3
	BV8	779.1	927.1	943.4
	BV9	794.0	938.1	955.2
	BV10	794.0	938.1	955.2
Température (°C/an)	BV1	14.0	13.3	14.0
	BV2	14.0	13.3	14.0
	BV3	14.2	13.5	14.2
	BV4	14.3	13.6	14.3
	BV5	14.4	13.8	14.4
	BV6	14.5	13.8	14.5
	BV7	14.8	14.1	14.8
	BV8	15.0	14.3	15.0
	BV9	15.3	14.7	15.3
	BV10	15.3	14.7	15.3

tableau 13 : Evolution des principales variables climatiques pour différentes périodes, sur les bassins versants de la Cagne

## 6.2. IMPACT DES SCENARIOS CLIMATIQUES SUR LES DEBITS SIMULES SUR LES BASSINS DE LA CAGNE

Dans le cadre de simulations pour le temps futur, les données d'entrée sont celles obtenues par les modèles climatiques générées à partir de différents scénarios. La régionalisation du modèle est celle obtenue sur les débits mesurés influencés qui représentent les débits observés sur le temps actuel. Les simulations obtenues sous ces scénarios de changement climatique en différents exutoires du bassin de la Cagne permettent d'en déduire les débits de référence d'étiage et les débits moyens mensuels présentés dans les tableaux 14 et 15.

DEBITS INFLUENCES sur période 2046/2065				Débits moyens mensuels en l/s												
		surf (km <sup>2</sup> )	Qa l/s	Q5 l/s	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BV1	Amont Captage Sourcet	38.68	289	16	545	435	360	393	293	136	65	46	39	224	375	558
BV2	Réservoir	39.66	290	16	548	437	362	394	293	137	65	46	39	225	377	560
BV3	Pont des moulins	43.71	297	16	562	448	370	403	300	140	67	47	40	231	388	576
BV4	Les Fonts	44.75	301	16	570	454	375	408	303	142	67	47	40	234	394	584
BV5	Amont Lubiane	48.61	306	17	580	462	381	414	307	144	68	48	41	238	402	596
BV6	Aval Lubiane	57.73	338	18	643	509	420	457	339	159	75	53	45	264	445	659
BV7	Pont des salles	63.08	338	18	644	510	419	455	337	158	75	52	44	264	446	660
BV8	Passerelle du Breccq	67.27	333	18	637	504	413	446	331	155	73	51	43	260	441	653
BV9	Station DREAL	95.0	345	18	665	520	425	460	340	158	75	52	44	270	456	677
BV10	Exutoire en mer	95.8	347	18	671	524	429	464	343	160	75	53	44	272	460	683

**tableau 14 : Résultats des simulations en différents points du bassin de la Cagne, débits influencés sur la période P1**

DEBITS INFLUENCES sur période 2081/2100				Débits moyens mensuels en l/s												
		surf (km <sup>2</sup> )	Qa l/s	Q5 l/s	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BV1	Amont Captage Sourcet	38.68	360	23	597	567	358	448	325	162	73	55	49	275	668	759
BV2	Réservoir	39.66	362	23	600	570	360	450	326	163	73	55	49	276	671	764
BV3	Pont des moulins	43.71	372	24	617	588	370	462	333	166	75	56	50	285	690	791
BV4	Les Fonts	44.75	378	24	626	597	375	469	337	168	76	57	50	290	700	804
BV5	Amont Lubiane	48.61	385	24	638	611	383	477	342	170	77	57	51	296	715	824
BV6	Aval Lubiane	57.73	427	26	708	674	423	528	376	187	85	63	56	329	794	916
BV7	Pont des salles	63.08	428	26	710	678	424	527	374	186	84	63	56	330	796	922
BV8	Passerelle du Breccq	67.27	423	25	703	672	419	520	368	183	83	62	55	327	787	917
BV9	Station DREAL	95.0	439	26	734	696	433	537	376	186	85	63	56	339	820	959
BV10	Exutoire en mer	95.8	442	26	740	702	437	541	379	188	85	63	56	342	827	967

**tableau 15 : Résultats des simulations en différents points du bassin de la Cagne, débits influencés sur la période P2**

La modélisation climatique des variables, comme nous avons pu le constater, est complexe et incertaine. L'incertitude sur les variables climatiques obtenues est donc importante. Les estimations de débits influencés à partir de ces scénarios constituent donc un ordre de grandeur.

## 7. IMPACT DE SCENARIOS DE MODIFICATIONS DES PRESSIONS ANTHROPIQUES LIEES A L'AEP

Une modification des usages peut être envisagée dans ce type de modélisation. Les deux scénarios retenus, sont une baisse de 10% des prélèvements moyens mensuels, et une augmentation de 10%, les rejets sont conservés à l'identique.

La méthode est la suivante:

A partir de la chronique simulée des débits influencés sur la période actuelle (paragraphe 3, tableau 7) on impacte une hausse des prélèvements moyens mensuels de 10%. Les prélèvements moyens mensuels référents sont ceux mis à notre disposition sur la période 2005 - 2012, que l'on répercute sur toute la chronique. La baisse des prélèvements sera calculée à l'identique. De ces chroniques impactées seront déduits le Qmna5 et le module pour les deux scénarios envisagés.

Les résultats sont présentés dans les tableaux 16 et 17.

DEBITS INFLUENCES avec hausse des prélèvements de 10%				Débits moyens mensuels en l/s												
		surf (km <sup>2</sup> )	Qa l/s	Q5 l/s	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BV1	Amont Captage Sourcet	38.68	772	39	1293	1156	1011	924	713	399	172	122	243	879	1155	1223
BV2	Réservoir	39.66	774	35	1300	1162	1016	926	713	397	169	119	241	881	1159	1229
BV3	Pont des moulins	43.71	799	34	1351	1207	1053	954	730	405	171	120	245	908	1194	1271
BV4	Les Fonts	44.75	811	35	1374	1227	1071	968	740	410	173	121	248	922	1211	1292
BV5	Amont Lubiane	48.61	830	35	1415	1263	1101	989	753	417	176	122	251	942	1238	1325
BV6	Aval Lubiane	57.73	922	38	1576	1405	1225	1096	831	459	194	134	278	1048	1374	1474
BV7	Pont des salles	63.08	929	38	1597	1423	1240	1102	832	459	194	134	276	1053	1382	1487
BV8	Passerelle du Breçq	67.27	924	37	1596	1423	1238	1093	822	453	191	131	271	1044	1372	1481
BV9	Station DREAL	95.0	967	37	1688	1503	1303	1139	848	465	196	134	279	1090	1434	1557
BV10	Exutoire en mer	95.8	975	38	1702	1515	1314	1149	856	469	198	135	281	1099	1446	1571

**tableau 16 : Résultats des simulations en différents points du bassin de la Cagne, débits influencés avec hausse des prélèvements moyens de 10%**

DEBITS INFLUENCES avec baisse des prélèvements de 10%				Débits moyens mensuels en l/s												
		surf (km <sup>2</sup> )	Qa l/s	Q5 l/s	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BV1	Amont Captage Sourcet	38.68	789	54	1311	1173	1029	943	731	418	190	137	257	893	1169	1240
BV2	Réservoir	39.66	796	57	1323	1184	1039	950	737	423	194	141	261	900	1177	1249
BV3	Pont des moulins	43.71	823	59	1377	1231	1080	980	757	434	200	144	267	929	1214	1294
BV4	Les Fonts	44.75	836	59	1400	1251	1097	994	767	439	202	146	270	942	1232	1314
BV5	Amont Lubiane	48.61	855	60	1441	1287	1127	1015	780	445	205	147	273	963	1258	1348
BV6	Aval Lubiane	57.73	949	66	1604	1431	1254	1125	860	490	225	161	302	1071	1396	1499
BV7	Pont des salles	63.08	956	66	1625	1449	1268	1130	861	490	225	161	301	1076	1404	1512
BV8	Passerelle du Breçq	67.27	951	65	1624	1449	1266	1121	852	484	222	158	296	1067	1394	1506
BV9	Station DREAL	95.0	994	66	1715	1529	1332	1168	878	496	227	161	303	1112	1456	1583
BV10	Exutoire en mer	95.8	1002	66	1730	1542	1343	1178	885	500	229	162	305	1121	1468	1596

**tableau 17 : Résultats des simulations en différents points du bassin de la Cagne, débits influencés avec baisse des prélèvements moyens de 10%**

La figure 17 restitue le tracé des débits interannuels (QA) et du QMNA5 pour chaque bassin simulé de la Cagne, avec modification des pressions anthropiques.



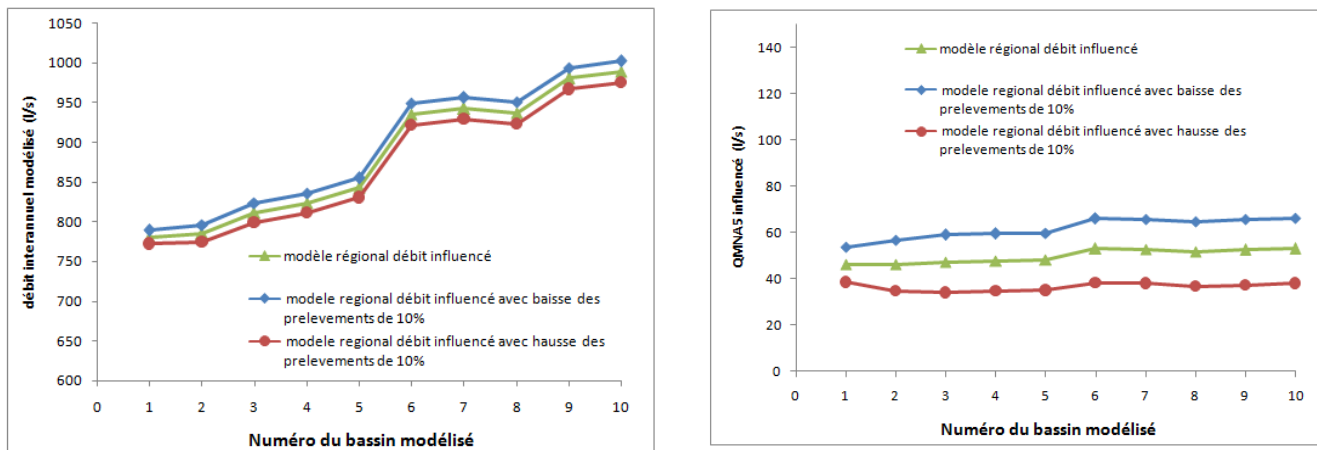


figure 17 : Restitution du débit interannuel (QA) et du QMNA5 selon les deux scénarios de modification des pressions anthropiques pour les 10 bassins simulés sur la Cagne

Il ne faut pas oublier que ces résultats restent des estimations. En effet la démarche régionale de notre méthode contient des incertitudes qui se cumulent avec l'hypothèse forte de la stabilité des prélèvements sur toute la longueur de la chronique.



## 8. CONCLUSION

---

Plutôt que de réaliser des ajustements statistiques sur les observations pour la détermination d'une variable hydrologique, cette méthode s'attache à modéliser les processus hydrologiques pour générer des scénarios de pluie et de débit d'où sont tirées des grandeurs statistiques. Ces approches par simulation permettent la prise en compte, dans les processus hydrologiques, d'hypothèses de changements climatiques, d'occupation du sol ou de modifications de pressions anthropiques. Cette approche présente l'avantage d'être globale et non limitée à une variable hydrologique. La régionalisation est alors essentiellement reportée sur les paramètres du modèle pluie-débit. Le modèle utilisé est très faiblement paramétré. Sa régionalisation permet sa mise en œuvre en tout point du réseau hydrographique pour fournir des chroniques de débits mensuels simulées. Ces chroniques sont ensuite utilisées pour en extraire toutes sortes de variables caractéristiques des écoulements mensuels, nécessaires par exemple pour la gestion de la ressource en eau. C'est pourquoi on s'intéresse à la capacité du modèle à retrouver ces caractéristiques, telles que les lames annuelles et mensuelles moyennes.

Il est important de noter que, comme toute méthode, les estimations fournies sont entachées d'incertitudes. Ces résultats sont fournis par une méthode régionale prenant en compte au mieux les informations pluviométriques et débitométriques disponibles, ainsi que les spécificités des bassins versants jaugés. L'approche est régionale avec ses avantages et ses inconvénients, et dans certains cas des spécificités très localisées, mais non observées peuvent rendre ces résultats inappropriés.

## 9. BIBLIOGRAPHIE

---

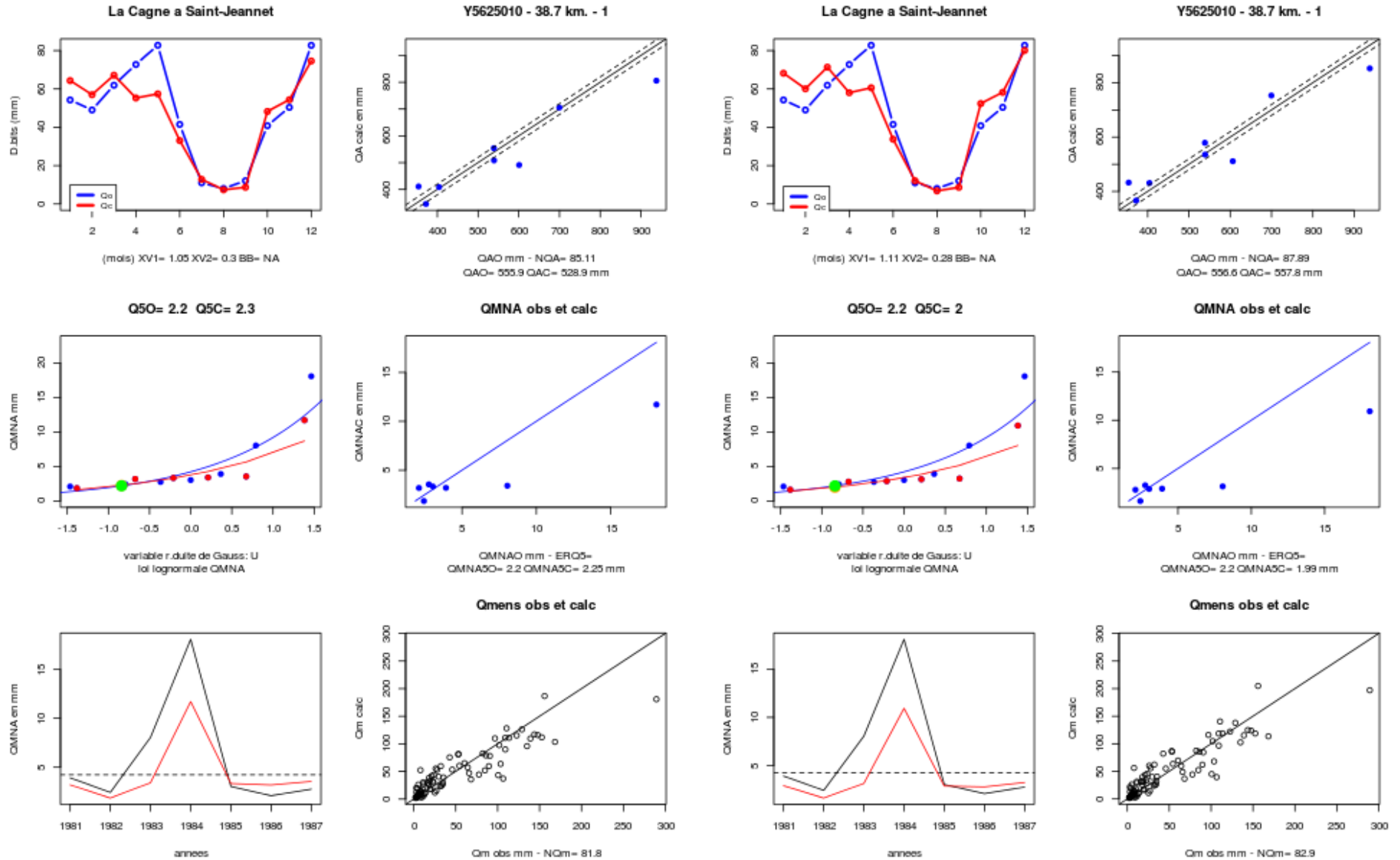
- [1] FOLTON, N. ET J. LAVABRE (2007) Approche par modélisation PLUIE-DEBIT pour la connaissance régionale de la ressource en eau : application à la moitié du territoire français. *La houille blanche* vol. 3: 64-70.
- [2] DURAND, Y., GIRAUD G., ET AL. (2009) Reanalysis of 47 years of Climate in the French Alps (1958-2005) : Climatology and trends for snow cover." *Journal of applied meteorology and climatology* vol:48: 2487-2511
- [3] 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. Météorologie et Hydrologie. Toulouse, Université PAUL SABATIER (TOULOUSE III). **thèse de Doctorat**: 350 p.
- [4] LE MOIGNE, P. (2002) Description de l'analyse des champs de surface sur la France par le système SAFRAN. Technical report, Centre national de recherches météorologiques, Météo-France,.
- [5] QUINTANA-SEGUÍ, P., P. LE MOIGNE, ET AL. (2008). "Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables : Validation of the SAFRAN Analysis over France." *journal of Applied Meteorology and Climatology* 47(1): 92-107.
- [6] VIDAL, J.-P., E. MARTIN, ET AL. (2010) 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. International. *Journal of Climatology*,(vol: 30): 1627 – 1644
- [7] OUDIN, L., (2004) Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global. Thèse de doctorat de l'Engref.
- [8] FOLTON N. (2009) Analyse de la sensibilité du modèle GR<sub>LOIEAU</sub> aux données SAFRAN – Rapport méthodologique ONEMA.17 pages.
- [9] VALERY, A.,(2010) Modélisation précipitations-débit sous influence nivale. Elaboration d'un module neige et évaluation sur 380 bassins versants. Thèse de doctorat d'AgroParisTech, p. 303 pages.
- [10] NASH, J. E. et J. V. SUTCLIFFE (1970) River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 27(3): 282-290.
- [11] FOLTON, N. ET J. LAVABRE (2006) Regionalization of a monthly rainfall–runoff model for the southern half of France based on a sample of 880 gauged catchments. *IAHS Publication - Large Sample Basin Experiments for Hydrological Model Parameterization: Results of the Model Parameter Experiment – MOPEX* vol. 4: 264-277.
- [12] GIEC, (2007) Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. ] GIEC, Genève, Suisse, 103 pages.
- [13] BOE Julien. (2007) Changement global et cycle hydrologique : Une étude de régionalisation sur la France. Thèse de doctorat, Physique du climat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, 244 p

# 10. ANNEXE

## Résultats du calage sur les bassins de la CAGNE à Saint-Jeannet - Y5625010

Fonction critère 1

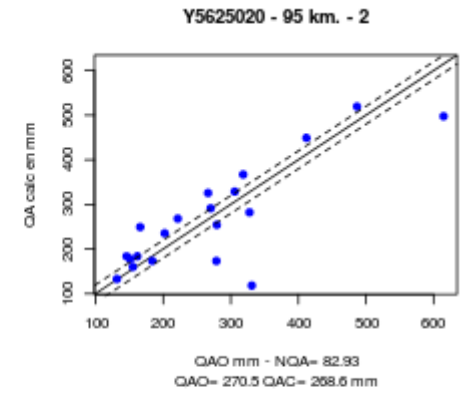
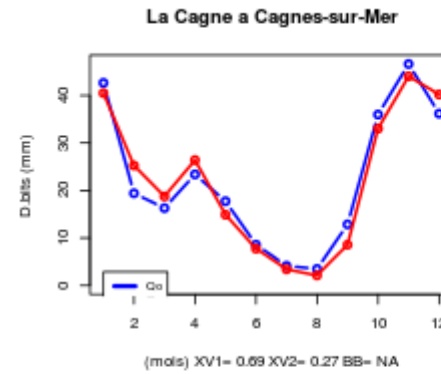
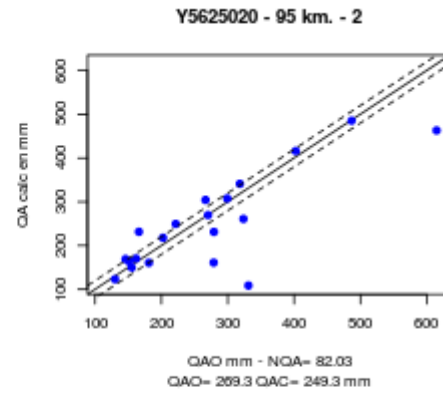
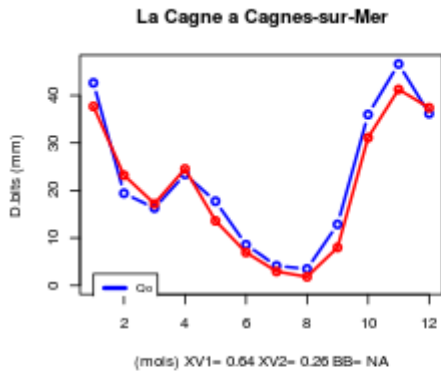
Fonction critère 2



# Résultats du calage sur le bassins la CAGNE à Cagnes sur Mer - Y5625020

Fonction critère 1

Fonction critère 2

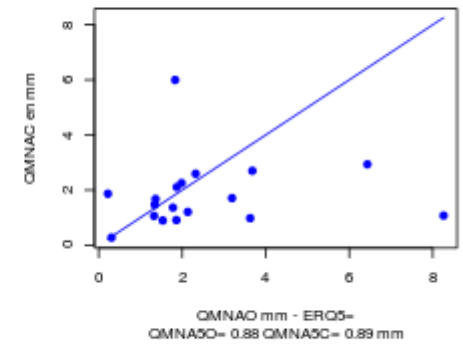
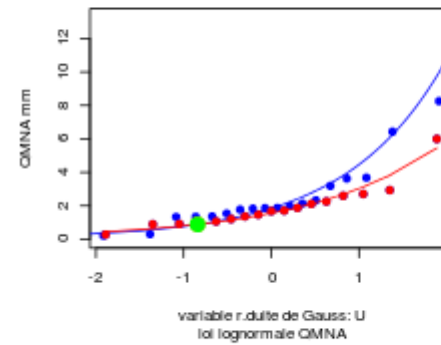
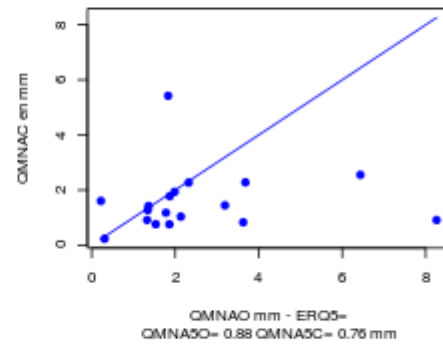
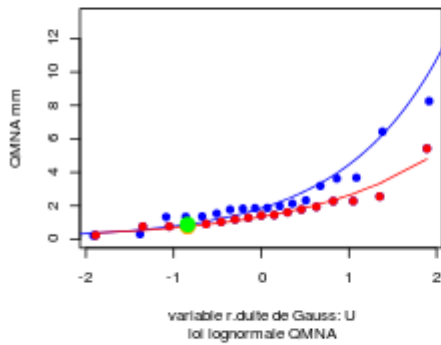


Q50= 0.9 Q5C= 0.8

QMNA obs et calc

Q50= 0.9 Q5C= 0.9

QMNA obs et calc



Qmens obs et calc

Qmens obs et calc

