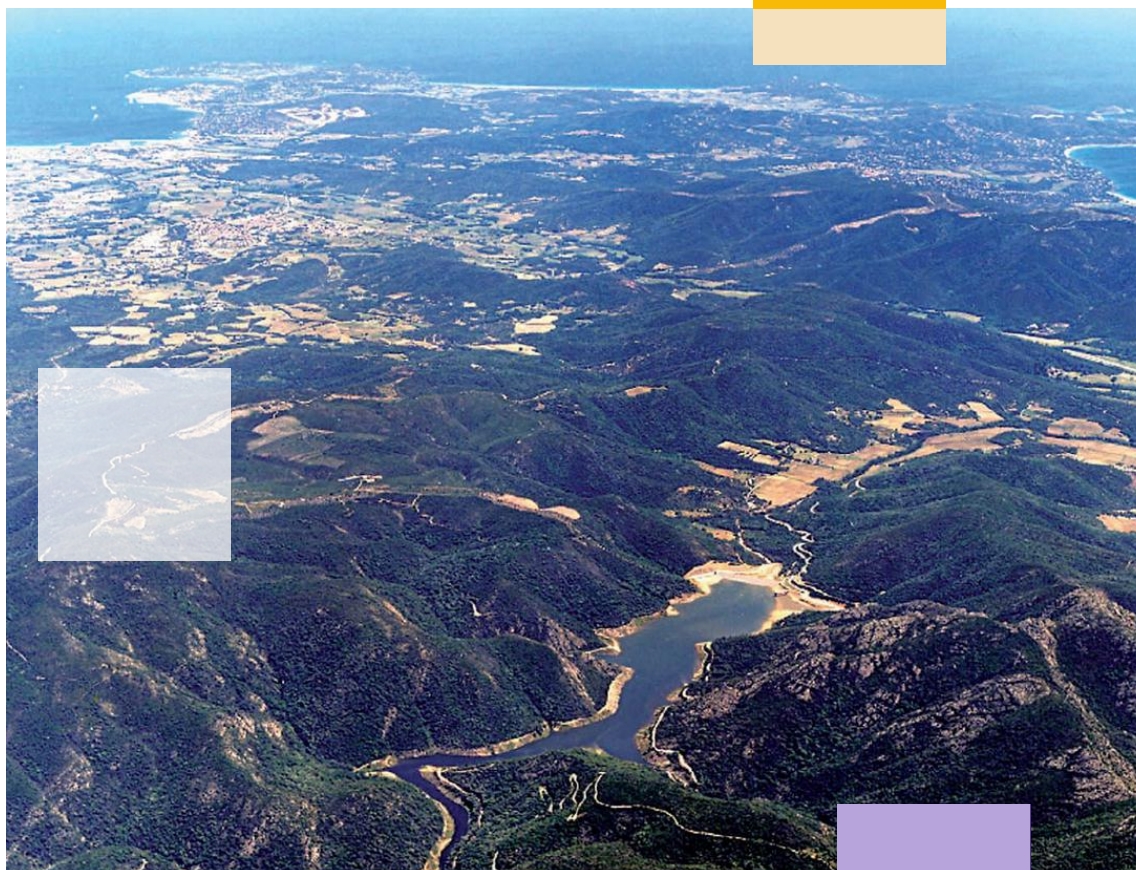


# ÉTUDES D'ESTIMATION DES VOLUMES PRÉLEVABLES GLOBAUX



2010 - 2015

SDAGE  
Rhône-Méditerranée



## Nappes alluviales Giscle et Môle

Rapport de phase 3 : Impacts des prélèvements et  
quantification de la ressource • novembre 2013



## SOMMAIRE

<b>1. INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
<b>2. MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE</b>	<b>1</b>
2.1. MODELE CONCEPTUEL	1
2.2. CONSTRUCTION DU MODELE	4
2.2.1. Logiciel utilisé	4
2.2.2. Extension et maillage	5
2.2.2.1. EXTENSION SPATIALE DU MODELE	5
2.2.2.2. EXTENSION VERTICALE	6
2.2.2.3. DISCRETISATION SPATIALE	6
2.2.2.4. DISCRETISATION TEMPORELLE	7
2.2.3. Conditions aux limites	8
2.2.3.1. LIMITE COTIERE	8
2.2.3.2. RECHARGE METEORIQUE	8
2.2.3.3. APPORTS LATERAUX	11
2.2.3.4. PRELEVEMENTS	12
2.2.3.5. RESTITUTIONS	16
2.2.3.6. COURS D'EAU	18
2.3. CALAGE ET VALIDATION DU MODELE	21
2.3.1. Calage en régime permanent	22
2.3.1.1. PIEZOMETRIE	22
2.3.1.2. PARAMETRE DE CALAGE : PERMEABILITES	23
2.3.1.3. BILAN HYDRAULIQUE	25
2.3.2. Calage en régime transitoire	26
2.3.2.1. REPRODUCTION DES PIEZOMETRIES DE REFERENCE	26
2.3.2.2. RECONSTITUTION DES CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES	28
2.3.2.3. COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT	35
2.3.2.4. RESTITUTION DES DEBITS DES RIVIERES	35
2.3.3. Bilan hydrologique	40
<b>3. RECONSTITUTION DE LA PIEZOMETRIE SANS POMPAGE</b>	<b>44</b>
3.1. PRINCIPE	44
3.2. RESULTATS DU SCENARIO - ABSENCE DE POMPAGE EN NAPPE	44
3.2.1. Chroniques piézométriques	44
3.2.2. Débits des rivières	47
3.2.2.1. DEBITS AUX STATIONS HYDROMETRIQUES	47
3.2.2.2. CARTE DES DEBITS SIMULES	48
<b>4. ETUDE DU BISEAU SALE</b>	<b>50</b>
4.1. DONNEES DISPONIBLES	50
4.2. MODELISATION DE LA SALINITE	54
4.2.1. Algorithme utilisé	54
4.2.2. Extension et maillage	54
4.2.3. Stabilité de la poche saumâtre	55
4.2.3.1. : CONDITIONS AUX LIMITES	55
4.2.3.2. RESULTATS DE LA MODELISATION SEAWAT	56
4.2.4. Mise en place de l'entrant salé	57
4.2.4.1. CONDITIONS AUX LIMITES	57
4.2.4.2. RESULTAT DE LA MODELISATION	58
<b>Annexe A. Cartes piézométriques modélisées</b>	<b>60</b>
<b>Annexe B. Chroniques piézométriques modélisées en régime transitoire</b>	<b>64</b>

## **Annexe C. Chroniques piézométriques modélisées sans prélèvements**

**69**

### **TABLEAUX**

Tableau 1 - Prélèvements souterrains à usage agricole et industriel en $m^3/an$ .....	14
Tableau 2 - Bilan hydraulique établi à partir du calage en régime permanent – Sept. 1998 .....	26
Tableau 3 : écarts en mètres entre les niveaux piézométriques simulés et observés. Niveau d'eau dans le piézomètre MR50. ....	34

### **FIGURES**

Figure 1 - Extension de la zone modélisée .....	2
Figure 2 - Profil hydrogéologique le long de la Môle puis de la Giscle jusqu'à Port Grimaud.....	3
Figure 3 - Modèle conceptuel de la nappe alluviale Môle-Giscle.....	4
Figure 4 - Extension spatiale du modèle sous le logiciel MODFLOW .....	5
Figure 5 - Coupes longitudinales du modèle bicouche repérées sur la Figure 6.....	6
Figure 6 - Maillage du modèle hydrogéologique de la nappe de Môle-Giscle.....	7
Figure 7 - Pluviométrie mensuelle à la station pluviométrique de Cogolin et évapotranspiration sur le secteur. ....	8
Figure 8 - Identification des 2 zones pour la recharge pluviométrique, des 11 zones d'apports latéraux et positionnement de la station pluviométrique de Cogolin. ....	9
Figure 9 – Infiltrations en nappe appliquées à l'aval : en bleu foncé la pluie infiltrée et en bleu clair la pluie brute observée à la station pluviométrique de Cogolin.....	10
Figure 10 - Infiltrations en nappe appliquées à la zone amont : en vert foncé la pluie infiltrée et en vert clair la moyenne des pluies brutes observées à la station pluviométrique Cogolin. ....	10
Figure 11 - Emprise des bassins versants latéraux (numéros) et amont (noms).....	11
Figure 12 – Recharge latérale : ruissèlement provenant des bassins versants latéraux et s'infiltrant dans la nappe en $m^3/mois$ . ....	12
Figure 13 - Localisation des prélèvements AEP et industriels, débits annuels moyennés sur toute la période de calage. ....	13
Figure 14 - Evolution des prélèvements annuels par champ captant en $m^3/an$ .....	15
Figure 15 - Evolution des prélèvements souterrains mensuels entre 1998 et 2012 ( $m^3/mois$ ).....	16
Figure 16 - Localisation des points de rejets en rivières des eaux issues de STEP et lavage des usines AEP.....	17
Figure 17 - Evolution des volumes rejetés en rivière par les usines de traitement des eaux AEP et les STEP en $m^3/mois$ . ....	18
Figure 18 - Cours d'eau et points de restitution intégrés avec les modules Stream et River .....	19
Figure 19 - Volumes mensuels intégrés au départ des segments Stream des rivières Môle, Verne et Carian en $m^3/mois$ .....	20
Figure 20 - Volumes mensuels intégrés au départ des segments Stream des rivières Grenouille et Giscle en $m^3/mois$ ....	21
Figure 21 – Comparaison entre les piézométries observée et simulée à l'issue du calage en régime permanent (septembre 1998).....	23
Figure 22 - Répartition des perméabilités pour la couche supérieure obtenues à l'issue du calage.....	24
Figure 23 - Répartition des perméabilités pour la couche inférieure obtenue à l'issue du calage.....	25
Figure 24 - Calage transitoire août 2003 - en rouge pointillé les isopièzes calculées pour le régime transitoire et en bleu les isopièzes reconstituées à partir des mesurées du 21 août 2003 – Période sèche avec étiage sévère. ....	27
Figure 25 - Calage transitoire septembre 2012: en rouge pointillé les isopièzes simulées pour le régime transitoire et en bleu les isopièzes mesurées du 20 septembre 2012.....	28
Figure 26 - Localisation des piézomètres de référence (en rouge les ouvrages correspondant aux chroniques présentées ci-dessous, en vert à celle présentées en annexe). Le point MR46 fait partie du réseau de surveillance RCO. ....	29
Figure 27 - Chroniques piézométriques observée et simulée du piézomètre MR50 (en mNGF) .....	30

# Etude des alluvions de la Gisle et de la Môle – Détermination des volumes maximums prélevables – Préservation de la ressource stratégique

Rapport de phase 3 – Impact des prélèvements et quantification de la ressource

Figure 28 - Chroniques piézométriques observée et simulée du piézomètre MR46 au sein du champ captant du Rayol (en mNGF).....	30
Figure 29 - Chroniques piézométriques observée et simulée du piézomètre MR26 (en mNGF) .....	31
Figure 30 - Chroniques piézométriques observée et simulée du piézomètre MGR10 (en mNGF).....	31
Figure 31 - Chroniques piézométriques observée et simulée du piézomètre MGR17B (en mNGF).....	32
Figure 32 - Chroniques piézométriques observée et simulée du piézomètre MGR03 (en mNGF).....	32
Figure 33 - Chroniques piézométriques observée et simulée du piézomètre GR18 au sein du champ captant de Gisle Grenouille (en mNGF) .....	33
Figure 34 - Evolution des débits observés et simulés de la Gisle à la station de Cogolin en l/s.....	36
Figure 35 - Evolution des débits observés et simulés de la Gisle à la station des Ajusts .....	37
Figure 36 - Carte des débits simulés pour le mois d'août 2003.....	38
Figure 37 - Carte des débits simulés pour le mois de septembre 2012 .....	38
Figure 38 – Résultats du module stream sur les débits d'amont en aval le long la Môle de juin à octobre 2003 .....	39
Figure 39 - Résultats du module stream sur les débits d'amont en aval le long la Gisle de juin à octobre 2003.....	40
Figure 40 - Bilan mensuel stockage-déstockage de la nappe des alluvions de Môle-Gisle. ....	41
Figure 41 - Evolution annuelle des termes du bilan hydraulique souterrain en m <sup>3</sup> /mois .....	42
Figure 42 – Bilan des entrées moins les sorties cumulées du modèle et pompages cumulés sur la période modélisée en m <sup>3</sup> .....	43
Figure 43 - Chroniques piézométriques simulées avec et sans prélèvement pour le piézomètre MR53 situé entre les champs captant du Val d'Astier et du Rayol (voir Figure 26 pour la localisation). ....	45
Figure 44 - Chroniques piézométriques simulées avec et sans prélèvements pour le piézomètre MR26 situé sur l'ancien champ captant des Pasquiers. ....	45
Figure 45 - Chroniques piézométriques simulées avec et sans prélèvement pour le piézomètre MGR10 situé dans la partie distale du champ d'influence des captages de la Môle. ....	46
Figure 46 - Chroniques piézométriques simulées avec et sans prélèvement pour le piézomètre MGR03 situé dans la zone d'influence du champ captant de la Gisle Grenouille. ....	46
Figure 47 - Débits mensuels simulés de la Gisle avec et sans prélèvements souterrains à la station de Cogolin. ....	47
Figure 48 - Débits mensuels simulés de la Gisle avec et sans prélèvements souterrains à la station des Ajusts. ....	48
Figure 49 - Carte des débits simulés sans pompages souterrains pour le mois d'août 2003.....	49
Figure 50 - Carte des débits simulés sans pompages pour le mois de septembre 2012 .....	49
Figure 51 - Localisation des piézomètres suivis en chlorinité et nom des piézomètres dont les chroniques sont présentées ci-après .....	50
Figure 52 - Chroniques de chlorinité dans les piézomètres amont du modèle en mg/l .....	51
Figure 53 - Chroniques de chlorinité dans les piézomètres sur l'ancien champ captant des Pasquiers en mg/l.....	51
Figure 54 - Chroniques de chlorinité dans les piézomètres sur la zone du champ captant Gisle – Grenouille en mg/l... ..	52
Figure 55 - Chroniques de chlorinité dans les piézomètres sur la poche saumâtre en mg/l .....	52
Figure 56 - Chroniques de chlorinité dans les piézomètres sur la zone littorale en mg/l.....	53
Figure 57 - Extension du modèle et trait de coupe de la Figure 58 .....	54
Figure 58 - Coupe longitudinale du modèle à 4 couches repéré Figure 57 .....	55
Figure 59 - Carte de salinité en entrée du modèle à partir des mesures du 25 septembre 1998.....	56
Figure 60 - Carte de salinité à l'issue de la modélisation en régime transitoire de septembre 1998 à septembre 2012 (A.N. : les codes couleurs sont différents en entrées et sortie du modèle). ....	57
Figure 61 – Carte des champs captant en fonctionnement en 1980 et section de la Gisle le contenant de l'eau saumâtre avant la mise en place du barrage anti-sel.....	58
Figure 62 - Carte de salinité en mg/l à l'issue de la modélisation en régime transitoire pour les conditions de prélèvement en nappe de 1980 .....	59

## **1. INTRODUCTION**

Pour mener à bien les études de phase 3 – Impact des prélèvements et quantification de la ressource, il a été prévu la construction d'un modèle hydrogéologique de nappe qui pourrait, par la suite, évoluer en outil d'aide à la décision pour tout projet impactant la nappe alluviale.

Le logiciel de modélisation hydrogéologique utilisé pour cette étude est le logiciel Visual Modflow qui est un standard mondialement reconnu pour ce type de problématique. Grâce à l'intégration des codes de calculs MODFLOW et SEAWAT, Visual MODFLOW offre la possibilité de simuler le comportement hydrodynamique de la nappe mais également l'évolution de la salinité au sein de l'aquifère.

Les résultats du calage du modèle hydrogéologique seront présentés sous forme de cartes et de graphiques :

- Cartes piézométriques état observé et état calculé par le modèle
- Chroniques piézométriques observées et simulées par le modèle
- Cartes de la position du biseau salé et des ilots de salinité
- Chroniques de l'évolution de la salinité dans la nappe
- Scénario Etat de nappe sans pompage

## **2. MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE**

Un modèle numérique permet de résoudre les équations régissant les écoulements souterrains au sein d'un milieu poreux. A partir de la connaissance d'un certain nombre de paramètres liés aux propriétés de l'aquifère et aux flux d'entrée et de sortie, il est possible de déterminer les flux d'eau souterraine et le niveau de la nappe pour chaque maille du modèle.

Le modèle numérique est directement déduit du modèle conceptuel décrit ci-après. Le logiciel de modélisation utilisé est présenté ensuite. Enfin, les modalités de transformation du modèle conceptuel en modèle numérique sont explicitées.

### **2.1. MODELE CONCEPTUEL**

Sur la base des données acquises lors des phases 1 & 2, un modèle conceptuel de l'écoulement des eaux souterraines au sein de la formation quaternaire des bassins versants des rivières Môle et Giscle peut être proposé.

Ainsi, l'emprise spatiale du modèle a été délimitée (Figure 1) :

- à partir de la limite d'extension des alluvions quaternaires,
- à l'aval par la mer Méditerranée qui représente un exutoire de l'aquifère,
- au nord et au sud de Port Grimaud, la limite du modèle a été fixée arbitrairement perpendiculairement aux isopièzes avec les deux aquifères adjacents.

## Etude des alluvions de la Giscle et de la Môle – Détermination des volumes maximums prélevables – Préservation de la ressource stratégique

Rapport de phase 3 – Impact des prélèvements et quantification de la ressource

Afin de représenter correctement le fonctionnement de cet aquifère, il a été convenu de représenter 2 couches géologiques qui permettent ainsi d'intégrer dans le fonctionnement de l'aquifère la présence d'une couche argilo-sableuse de nature fluvio-marine recouvrant des alluvions fluviales constituées majoritairement de graviers et sables.

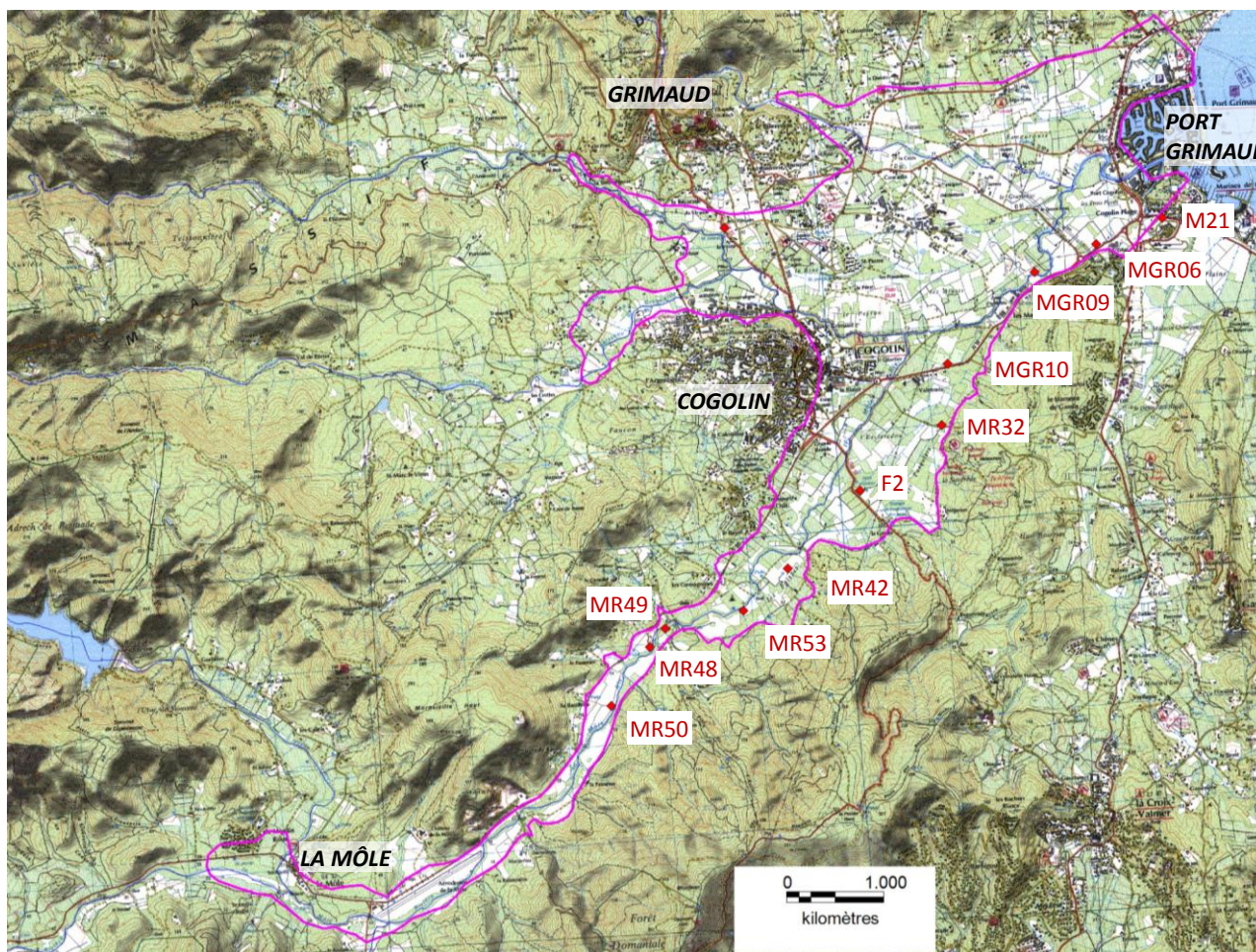


Figure 1 - Extension de la zone modélisée

L'analyse des données a permis de définir les entrées au sein de l'aquifère :

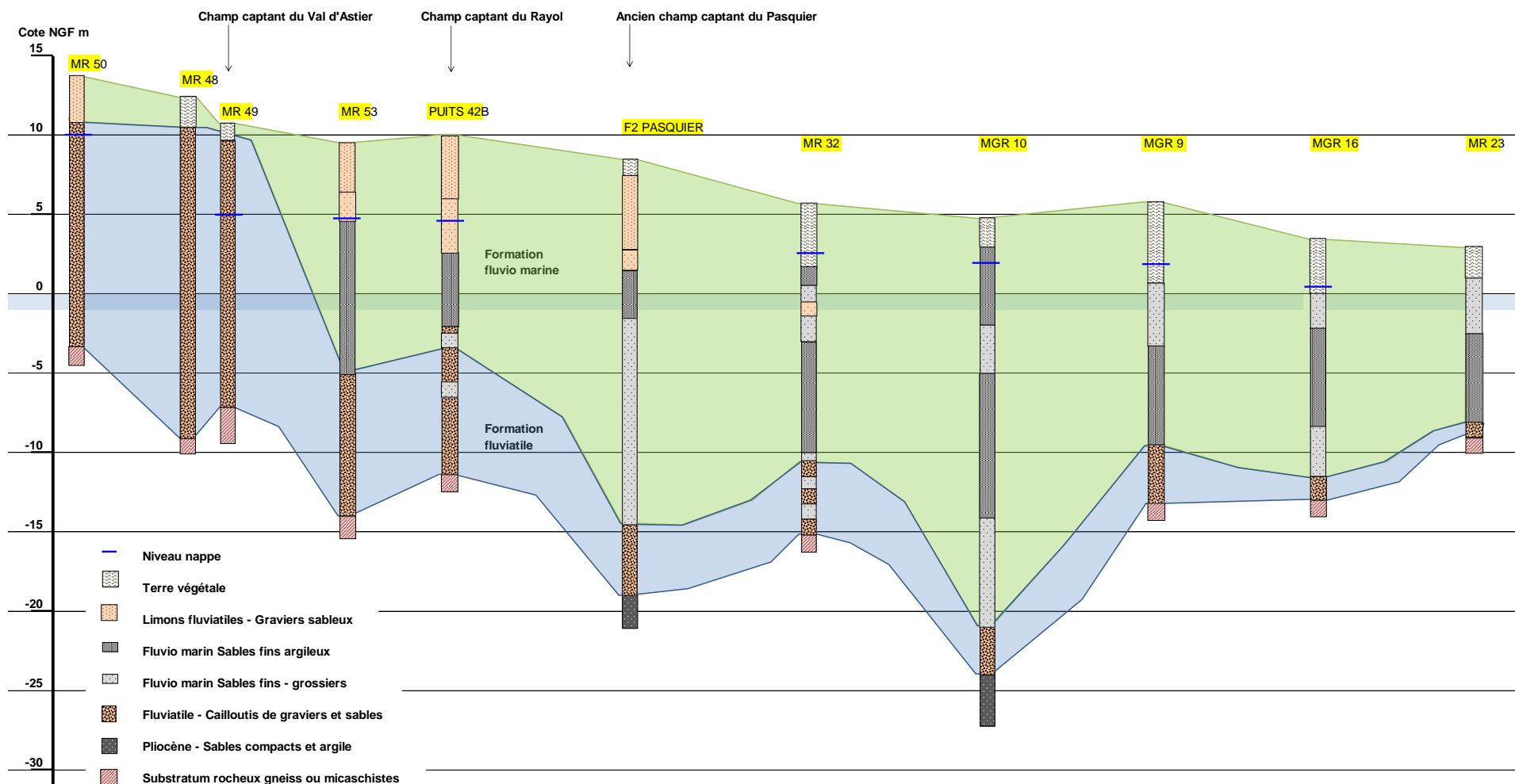
- la recharge directe de la pluviométrie
- l'infiltration en bordure du bassin du ruissellement depuis les bassins versants latéraux
- l'infiltration des rivières
- les eaux des STEP et du traitement AEP restituées à l'aquifère via les cours d'eau

Tandis que les sorties au sein de l'aquifère sont attribuées :

- aux prélèvements AEP, agricoles et industriels
- au drainage par les rivières
- au drainage vers la mer.

## Etude des alluvions de la Giscle et de la Môle – Détermination des volumes maximums prélevables – Préservation de la ressource stratégique

Rapport de phase 3 – Impact des prélèvements et quantification de la ressource



**Figure 2 - Profil hydrogéologique le long de la Môle puis de la Giscle jusqu'à Port Grimaud**

# Etude des alluvions de la Giscle et de la Môle – Détermination des volumes maximums prélevables – Préservation de la ressource stratégique

Rapport de phase 3 – Impact des prélèvements et quantification de la ressource

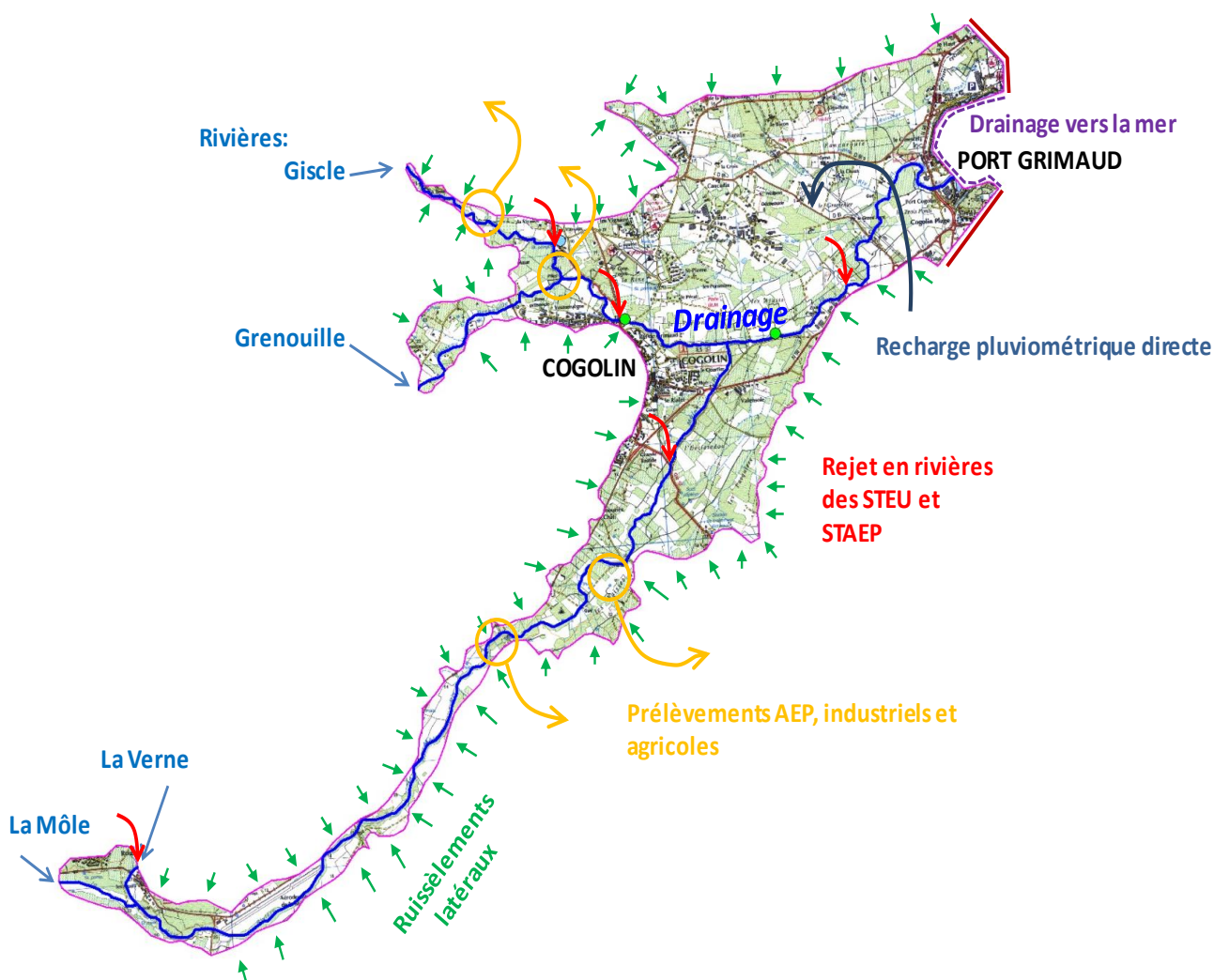


Figure 3 - Modèle conceptuel de la nappe alluviale Môle-Giscle

## 2.2. CONSTRUCTION DU MODELE

### 2.2.1. Logiciel utilisé

Le logiciel Visual MODFLOW est un logiciel de modélisation hydrogéologique mondialement reconnu. Il permet de modéliser les écoulements souterrains en trois dimensions, en régime permanent ou transitoire. Pour cela, il intègre par différences finies les équations d'hydraulique souterraine grâce aux algorithmes MODFLOW de l'United States Geological Survey (USGS). Ces algorithmes sont reconnus comme étant stables et robustes.

Visual MODFLOW permet de représenter des systèmes hydrogéologiques complexes à partir d'une interface graphique qui facilite l'intégration des données, avec notamment la possibilité d'importer des fonds de carte en plusieurs formats, d'interpoler les données par méthodes géostatistiques, etc. Pour l'exportation des résultats, Visual MODFLOW édite des cartes isopièzes



de chaque aquifère modélisé, des bilans détaillés des flux à l'échelle du système hydrogéologique ou locale.

## 2.2.2. Extension et maillage

### 2.2.2.1. EXTENSION SPATIALE DU MODELE

Comme défini dans le modèle conceptuel, l'extension spatiale du modèle correspond à la limite d'affleurement des alluvions quaternaires.

Ainsi, la zone modélisée se caractérise par une plaine d'environ 2.5 x 4 km, celle de Cogolin-Grimaud prolongée par les étroites vallées amont de la Giscle, la Grenouille et la Môle. Cette dernière s'allonge sur 9km et fait parfois moins de 200m de large.

La figure ci-dessous présente les limites spatiales du modèle sous Visual Modflow.



Figure 4 - Extension spatiale du modèle sous le logiciel MODFLOW

#### 2.2.2.2. EXTENSION VERTICALE

Le système aquifère ici modélisé est constitué des sédiments alluviaux et fluvio-marins. Le substratum du système aquifère est formé :

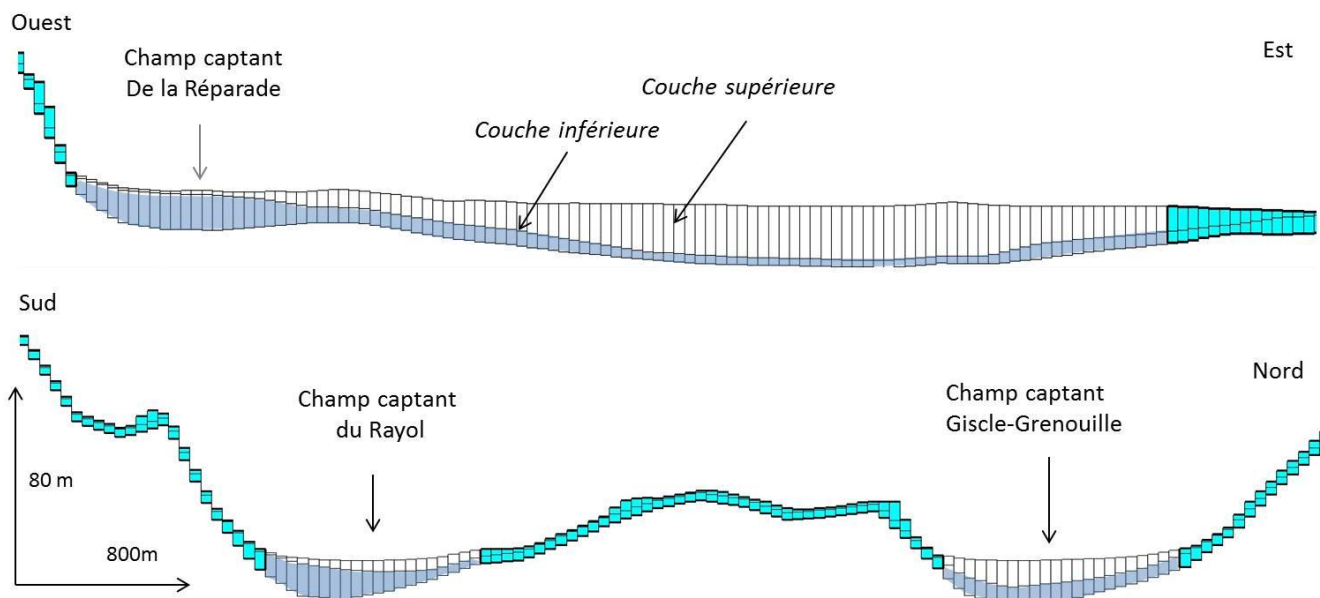
- soit par le substratum métamorphique du massif des Maures,
- soit par les dépôts alluviaux vaseux les plus profonds.

Ces deux substrats peuvent être considérés comme quasiment imperméables, les échanges avec la nappe et l'eau circulant dans ces formations peuvent donc être considérés comme négligeables.

En raison de l'hétérogénéité du remplissage alluvial et fluvio-marin, un système bicouche a été considéré. La couche inférieure renferme principalement les dépôts les plus grossiers (alluvions fluviales) et la couche supérieure des limons et sables fins (dépôts fluvio-marins). La couche supérieure, de faible épaisseur en amont du modèle où prédominent les dépôts fluviaux grossiers, s'épaissit vers l'aval où les dépôts deviennent principalement marins avec une épaisseur pouvant être de plusieurs dizaines de mètres (voir Figure 5). Cette couche joue un rôle important sur le fonctionnement de l'aquifère, notamment en mettant sous pression l'aquifère quaternaire inférieur et en limitant les conditions de recharge.

La géométrie des deux couches modélisées est obtenue à partir des coupes géologiques disponibles et complétées par les informations de sondages archivées sur le site de la BSS.

L'altitude du sol a été interpolée à partir des courbes de niveau des cartes IGN au 1/25 000<sup>ème</sup>.

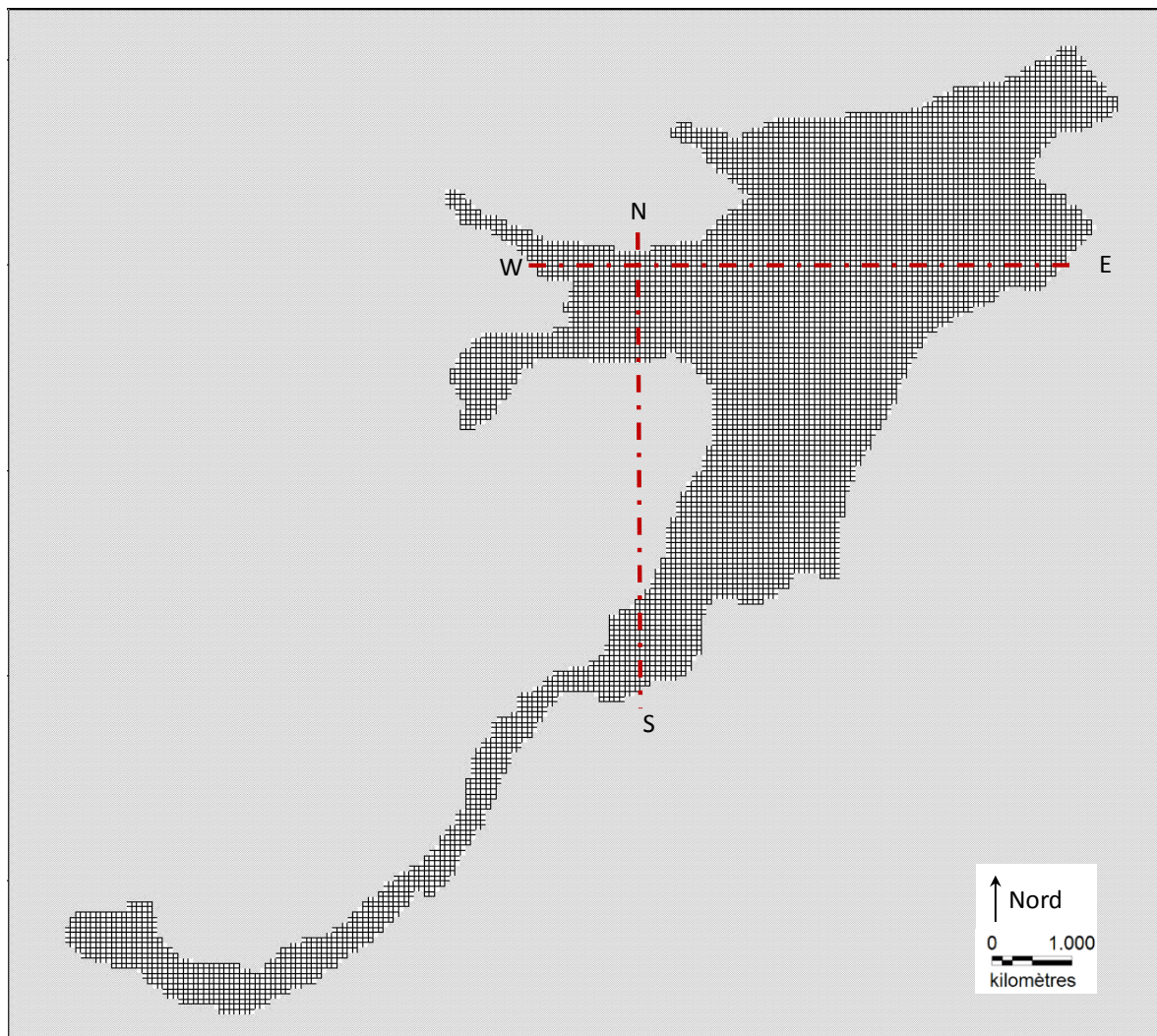


**Figure 5 - Coupes longitudinales du modèle bicouche repérées sur la Figure 6**

#### 2.2.2.3. DISCRETISATION SPATIALE

La méthode de résolution numérique des équations d'hydraulique souterraine par différences finies impose de discrétiser la zone d'étude par le biais d'un maillage. Cette discrétisation de l'espace définit la maille élémentaire où tous les paramètres hydrauliques sont homogènes.

Le modèle a été discrétisé de façon homogène en mailles carrées de 50m par 50m (Figure 6). Ce maillage a été choisi compte tenu de l'extension de la zone modélisée, de l'exiguïté des vallées, de la précision recherchée et des données disponibles.



**Figure 6 - Maillage du modèle hydrogéologique de la nappe de Môle-Giscle**

#### 2.2.2.4. DISCRETISATION TEMPORELLE

Les données disponibles permettent d'étendre la période de calage de septembre 1998 à septembre 2012. La discrétisation temporelle a été choisie au pas de temps mensuel en adéquation avec la majorité des données disponibles, notamment celle des chroniques piézométriques et des prélèvements AEP.

Cette période de calage couvre des périodes de basses hauts sèches et humides permettant ainsi de caler les réactions de l'aquifère sous différentes conditions de hydroclimatiques.

### 2.2.3. Conditions aux limites

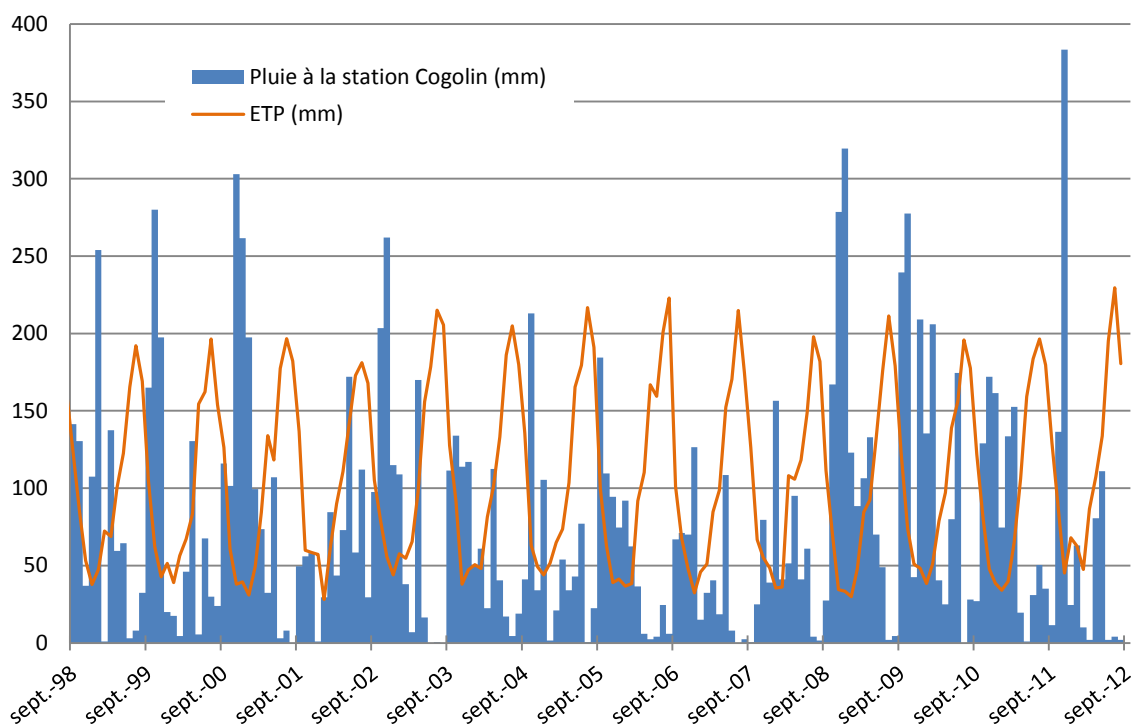
#### 2.2.3.1. LIMITE COTIERE

La mer Méditerranée représente un exutoire naturel à l'écoulement souterrain. Elle sera représentée dans le modèle par une condition de potentiel imposé constant dans le temps et fixé à 0 m NGF.

#### 2.2.3.2. RECHARGE METEORIQUE

La station pluviométrique de Cogolin a été choisie comme référence sur le bassin versant de la Môle-Giscle. Nous disposons pour cette station des hauteurs de pluies sur la période modélisée à l'échelle mensuelle (Météo France).

Les données d'évapotranspiration potentielle (ETP) ont aussi été récupérées sur la zone modélisée auprès de Météo France sur la période de calage (Figure 7).

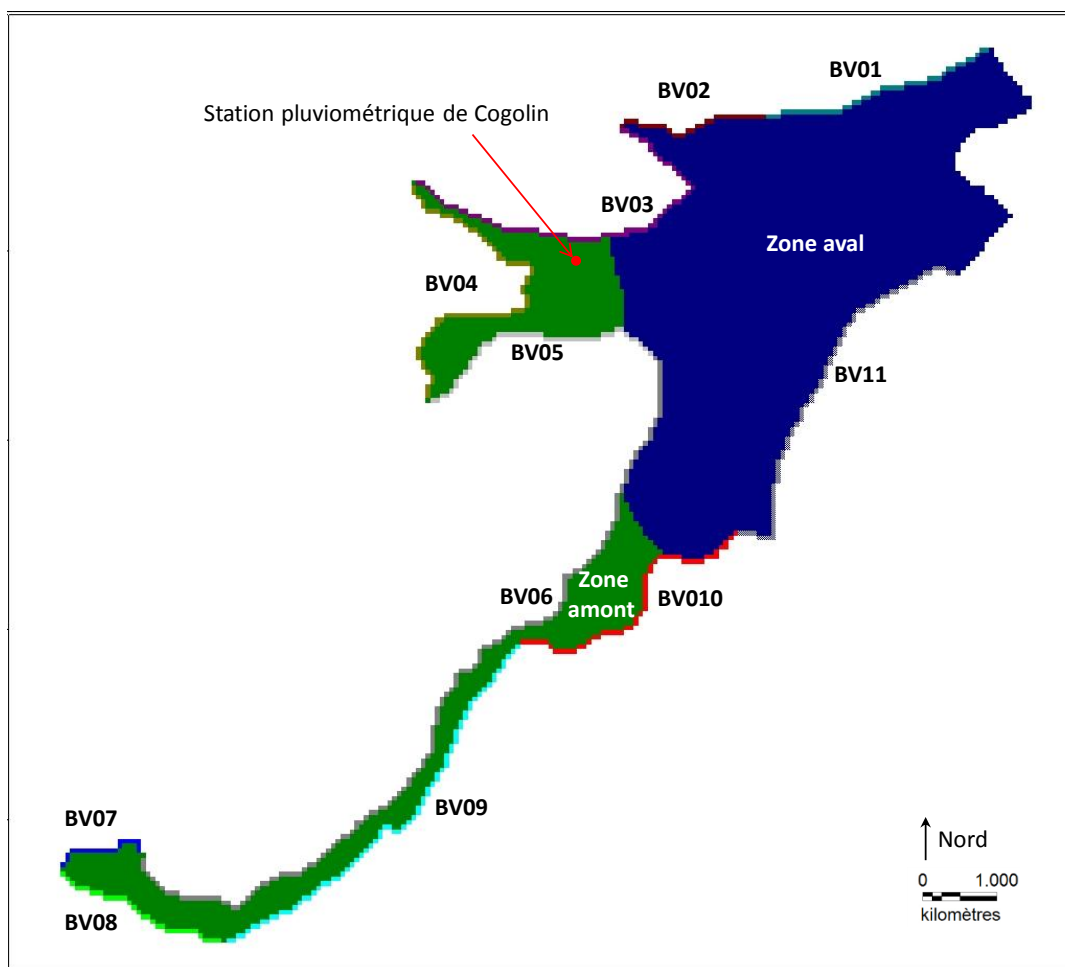


**Figure 7 - Pluviométrie mensuelle à la station pluviométrique de Cogolin et évapotranspiration sur le secteur.**

Dans l'ensemble, la pluviométrie est particulièrement faible en été et les précipitations les plus fortes sont enregistrées en automne et en hiver. Sur la période de calage, les conditions climatiques ne sont pas homogènes. Les étés 2003 à 2008 ont été particulièrement secs, tandis que, depuis l'automne 2008, les précipitations ont été plus abondantes.

La modélisation introduit 2 zones de recharges différentes, la zone amont et la zone aval (Figure 8). La distinction des zones de recharge s'est faite :

- En fonction de l'épaisseur de la couche supérieure, beaucoup moins perméable, qui limite l'infiltration et facilite le ruissellement
- En fonction de l'analyse des réactions piézométriques.



**Figure 8 - Identification des 2 zones pour la recharge pluviométrique, des 11 zones d'apports latéraux et positionnement de la station pluviométrique de Cogolin.**

A partir de ces données, il a été possible de calculer un bilan hydrique (selon Thornthwaite) au pas de temps mensuel (intégrant la pluie brute, l'ETP, le ruissellement et la RFU). A partir des informations bibliographiques et au cours du processus de calage, la réserve facilement utilisable (RFU) a été fixée à 50 mm (d'après la base de données Géographique des Sols de France de Inra.). Pour établir ce bilan, un paramètre de ruissellement a aussi été intégré en fonction de l'intensité des pluviométries mensuelles. A partir de ce calcul, la nappe est rechargée par les pluies efficaces uniquement pendant l'hiver (Figure 9 et Figure 10). Elle ne reçoit aucun apport météorique d'avril à octobre.

L'ensemble de ces paramètres seront validés par la bonne corrélation entre les niveaux piézométriques observés et simulés pour des épisodes de précipitations d'intensité variable.

Sur toute la période modélisée, l'infiltration en nappe correspond en moyenne à 11.2% de la pluie brute.

De 2001 à 2008, la recharge météorique de la nappe est en moyenne de 63 mm/an en aval et 77 mm/an en amont. De 2008 à 2011, elle reçoit en moyenne 183 mm/an en aval et 256 mm/an en amont.

## Etude des alluvions de la Giscle et de la Môle – Détermination des volumes maximums prélevables – Préservation de la ressource stratégique

Rapport de phase 3 – Impact des prélèvements et quantification de la ressource

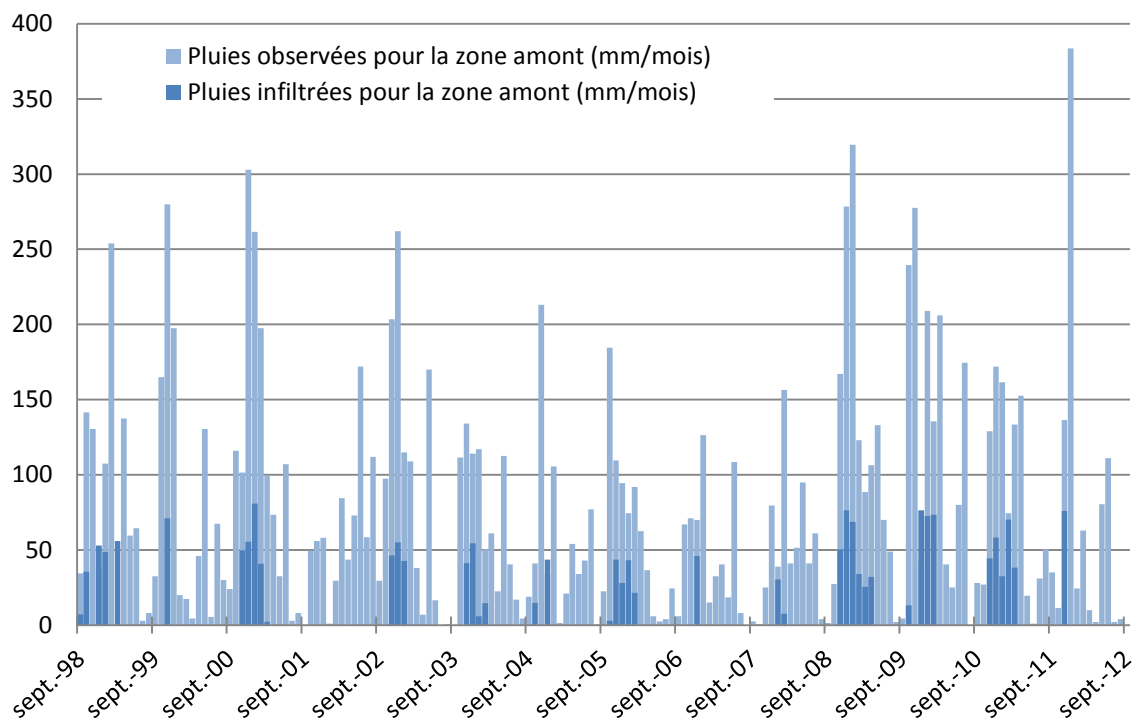


Figure 9 – Infiltrations en nappe appliquées à l'aval : en bleu foncé la pluie infiltrée et en bleu clair la pluie brute observée à la station pluviométrique de Cogolin.

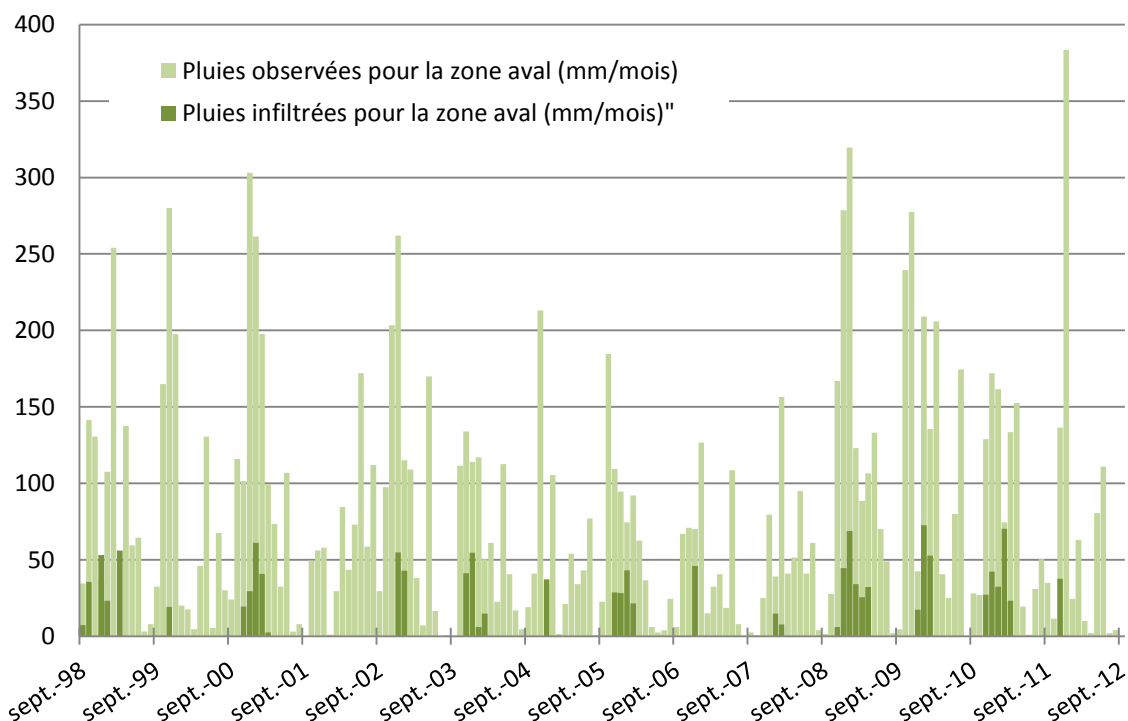


Figure 10 - Infiltrations en nappe appliquées à la zone amont : en vert foncé la pluie infiltrée et en vert clair la moyenne des pluies brutes observées à la station pluviométrique Cogolin.

Pendant les années particulièrement sèches, la recharge de la nappe est faible voire nulle. Au cours de ces périodes, l'eau qui ne ruisselle pas est mobilisée par la végétation alors qu'elle

s'infiltrer dans les couches supérieures du sol et n'atteint pas la nappe. Par contre, l'eau qui ruisselle rejoint les cours d'eau, elle est alors susceptible de recharger la nappe.

### 2.2.3.3. APPORTS LATÉRAUX

Sur l'ensemble du pourtour du modèle, une recharge latérale a été définie. Les flux latéraux correspondent à l'infiltration dans la plaine des eaux ruisselées sur les versants. Cette recharge n'est pas précisément connue et sera affinée au cours du calage.

A partir de l'analyse cartographique, 11 zones regroupant les petits bassins latéraux ont été identifiées sur le pourtour du modèle (bassins 1 à 11 de la Figure 11).

En première approche, une estimation des apports latéraux a été définie à partir de la pluviométrie et de la surface des bassins versants limitrophes (Figure 11). En effet, il a été considéré que seule une fraction du ruissellement sur les bassins versants latéraux s'infiltrait dans la nappe ; le reste étant canalisé le long des nombreux ruisseaux temporaires vers les cours d'eau de la plaine. Cette fraction n'étant pas connue, un pourcentage de 30% a été fixé en début du calage. En cours du calage, ce pourcentage s'est avéré trop important et a été revu à la baisse (7%). Les volumes mensuels apportés à la nappe par les bassins versants latéraux sont reportés Figure 12.

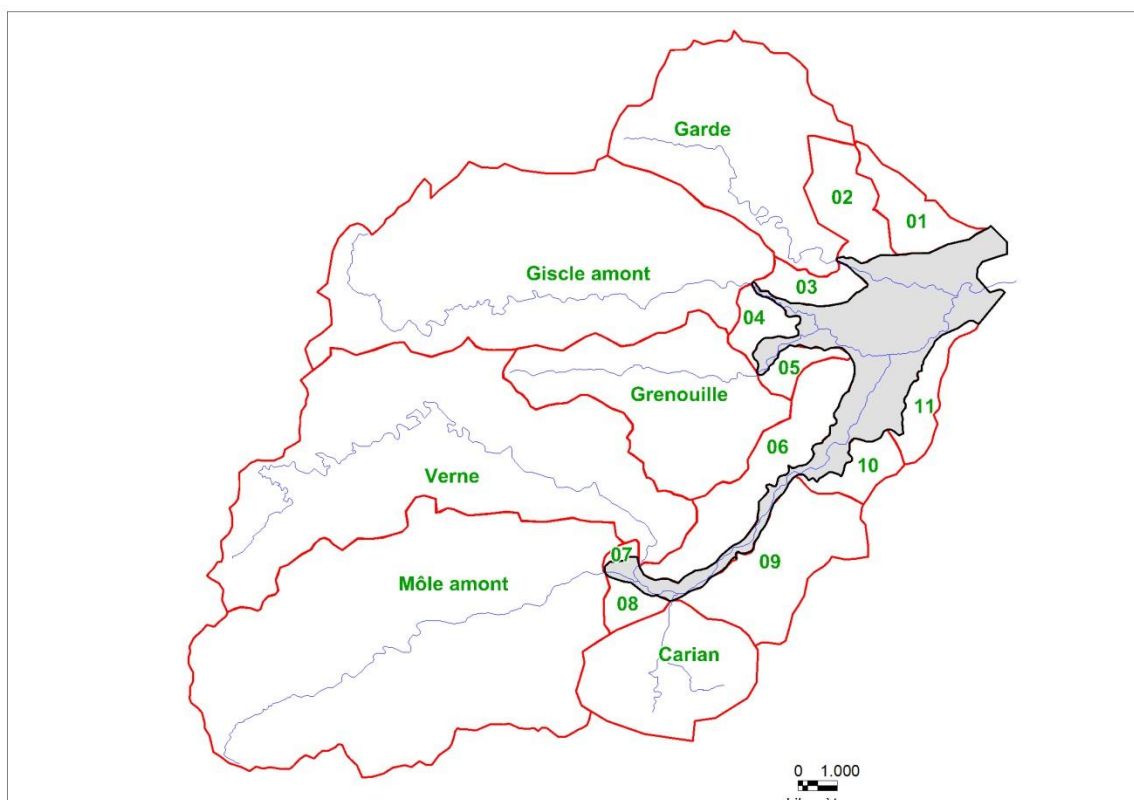
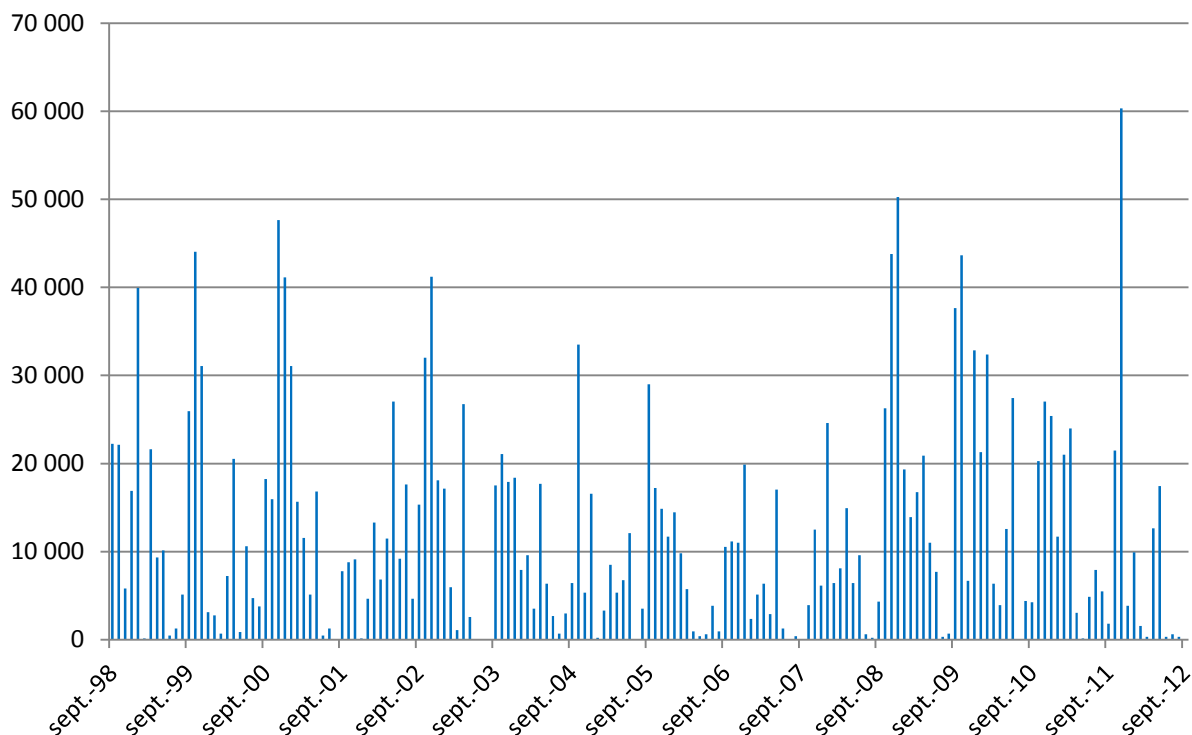


Figure 11 - Emprise des bassins versants latéraux (numéros) et amont (noms).



**Figure 12 – Recharge latérale : ruissèlement provenant des bassins versants latéraux et s’infiltrant dans la nappe en m<sup>3</sup>/mois.**

#### 2.2.3.4. PRELEVEMENTS

Les prélèvements sont introduits sous Visual Modflow avec les coordonnées exactes de chaque ouvrage. Les prélèvements sont alors affectés au centre de la maille dans laquelle ils se trouvent.

Il a été distingué plusieurs types de prélèvements, dont les variations intra-annuelles et interannuelles sont différentes :

- Les prélèvements AEP (exclusivement des forages du SIDECEM),
- Les prélèvements agricoles,
- Les prélèvements industriels,
- Les prélèvements domestiques.

En raison du faible volume prélevé en nappe par les usages domestiques (estimés à 1.6% des prélèvements totaux) et des informations très sommaires disponibles sur ce type de prélèvements, il a été convenu que ces prélèvements ne seront pas pris en compte lors de la modélisation.

Sur la période de calage, le débit moyen annuel prélevé dans la nappe est de 2.3 Mm<sup>3</sup>/an.

La Figure 13 ci-dessous localise l'ensemble des prélèvements pris en compte lors de la modélisation.



# Etude des alluvions de la Giscle et de la Môle – Détermination des volumes maximums prélevables – Préservation de la ressource stratégique

Rapport de phase 3 – Impact des prélèvements et quantification de la ressource

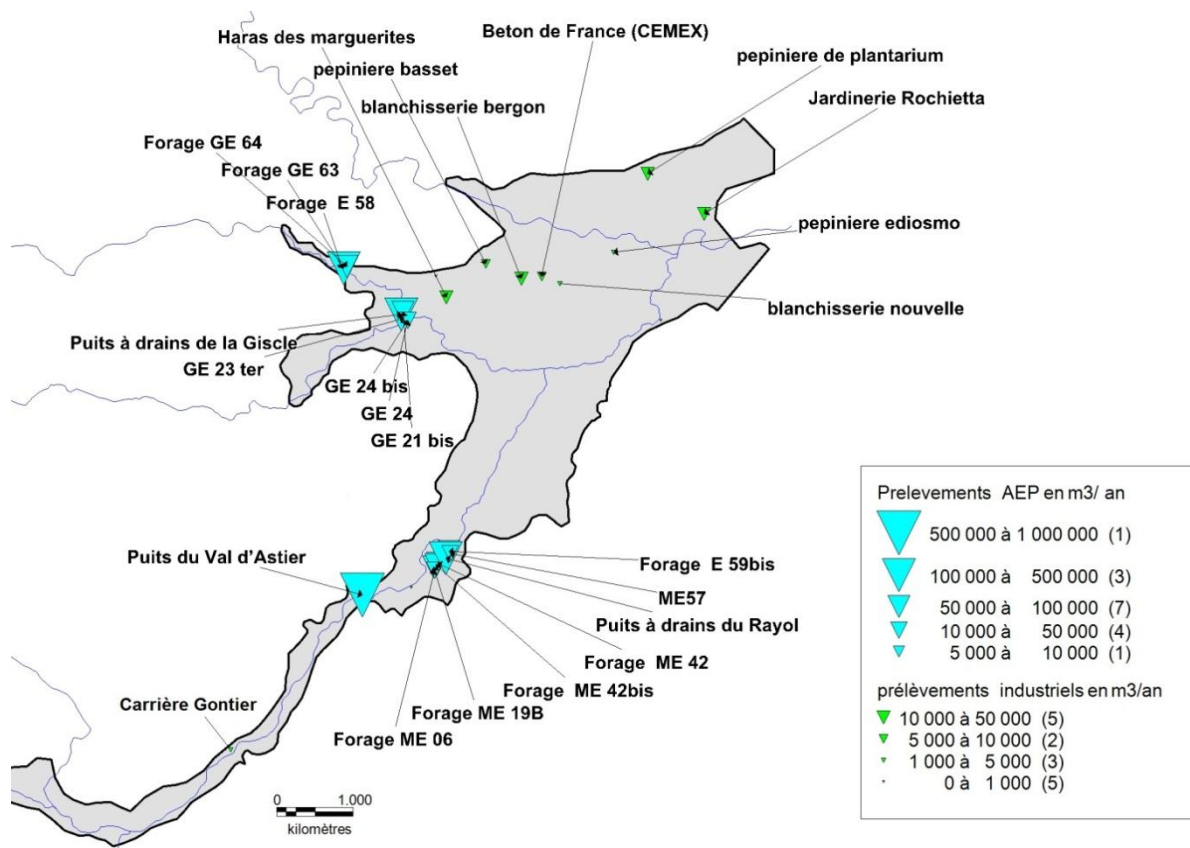


Figure 13 - Localisation des prélèvements AEP et industriels, débits annuels moyennés sur toute la période de calage.

## 2.2.3.4.1. Prélèvements agricoles et industriels

### a) Répartition spatiale

Les prélèvements agricoles et industriels entrés dans le modèle sont basés sur les données des fichiers des redevances de l'Agence de l'Eau de 1998 à 2011 et l'étude de besoins en eau d'irrigation et industrielle réalisée en 1999 par HGM pour le SIDECM (Etude des besoins en eau d'irrigation et industrielle, HGM, 1999).

Ont été intégrés au modèle les ouvrages déclarant prélever plus de 1000 m<sup>3</sup>/an auprès de l'Agence de l'Eau depuis 1999. Il s'agit de 5 ouvrages à usage agricole et 4 à usage industriel positionnés d'après l'étude de 1999 (Figure 13).

Les ouvrages sont essentiellement répartis sur le nord-est du modèle, Seule la carrière Gontier se situe sur la partie amont du modèle.

## Etude des alluvions de la Giscle et de la Môle – Détermination des volumes maximums prélevables – Préservation de la ressource stratégique

Rapport de phase 3 – Impact des prélèvements et quantification de la ressource

	1998	1999	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	Moyenne
Blanchisserie Bergon	24 000	30 650	9 000	9 900	10 900	11 900	11 900	11 900	11 900	11 900	14 395
Blanchisserie Nouvelle		2 160									2 160
Béton de France (CEMEX)		6 000		12 500	10 200	10 700	3 200	3 200	6 100		7 414
Pépinière de Plantarium		28 800									28 800
Pépinière Ediosmo		3 930									3 930
Pépinière Basset		5 500									5 500
Jardinerie Rochietta		24 300									24 300
Haras des Marguerites		26 100									26 100
Garcinieres		1 100									1 100
Carrière CEMEX Gontier						5 000	2 700	2 600			3 433
											<b>TOTAL 117 133</b>

**Tableau 1 - Prélèvements souterrains à usage agricole et industriel en m<sup>3</sup>/an**

### b) Evolution temporelle

Les valeurs mensuelles de prélèvement par ouvrage ne sont disponibles que pour l'année 1999. Nous avons utilisé ces valeurs pour toute la période de calage en y ajoutant la carrière Gontier. Cette approche n'aura que peu d'incidence sur le calage du modèle car ces prélèvements privés ne représentent qu'une faible part du volume prélevé dans la nappe (0.1 contre 2.26 Mm<sup>3</sup> pour l'AEP), et qu'ils sont situés dans une zone pour laquelle nous avons peu de données lithologiques et piézométriques.

#### 2.2.3.4.2. Prélèvements AEP

##### a) Répartition spatiale

4 champs captant peuvent être distingués au sein des alluvions quaternaires :

- sur le bassin versant de la Môle, le champ captant du Val d'Astier (1 puits à drains) et le champ captant du Rayol (6 forages et un puits à drains rayonnants)
- sur le bassin versant de la Giscle, le champ captant de la Réparade (3 forages) et le champ captant de la Grenouille (4 forages et un puits à drains rayonnants)

Notons que l'ancien champ captant Pasquier (ou Môle Aval) a été mis hors service en 1986. Il ne sera pas pris en compte pour le calage du modèle (1998-2012) mais utilisé pour comprendre la mise en place du biseau salé au cours des années 70-80.

##### b) Evolution temporelle

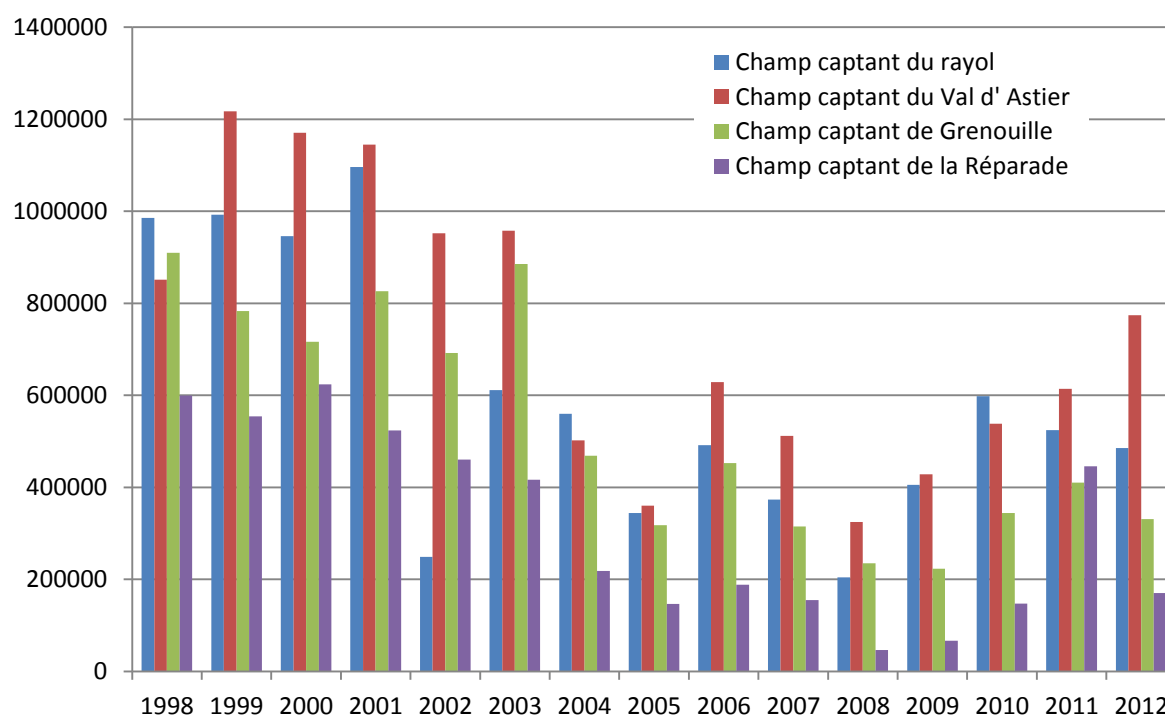
Sur la période de calage, les volumes annuels prélevés pour l'AEP au sein de l'aquifère par le SIDECEM sont en moyenne de 2,26 Mm<sup>3</sup> par an, et représentent 94 % des prélèvements totaux (comprenant les prélèvements agricoles et industriels).

Il n'existe pas actuellement de comptage permettant de connaître précisément les volumes pompés sur chaque forage AEP. C'est pourquoi, le volume pompé a été calculé en se basant uniquement sur les heures de fonctionnement des pompes et leurs puissances dans chaque puits. Les résultats ont été validés par comparaison avec les données d'exhaures aux usines de traitement de la Giscle (champs captant de la Réparade et de la Grenouille) et de la Môle (champs captant du Rayol et du Val d'Astier). L'incertitude est en moyenne de 15%.

Sachant que certains mois, le temps de fonctionnement des pompes n'est pas disponible sur certains forages, le volume pompé a été apprécié en se basant sur le volume enregistré aux usines de traitement et réparti de façon cohérente sur chaque forage. L'incertitude pour ces périodes est alors plus importante.

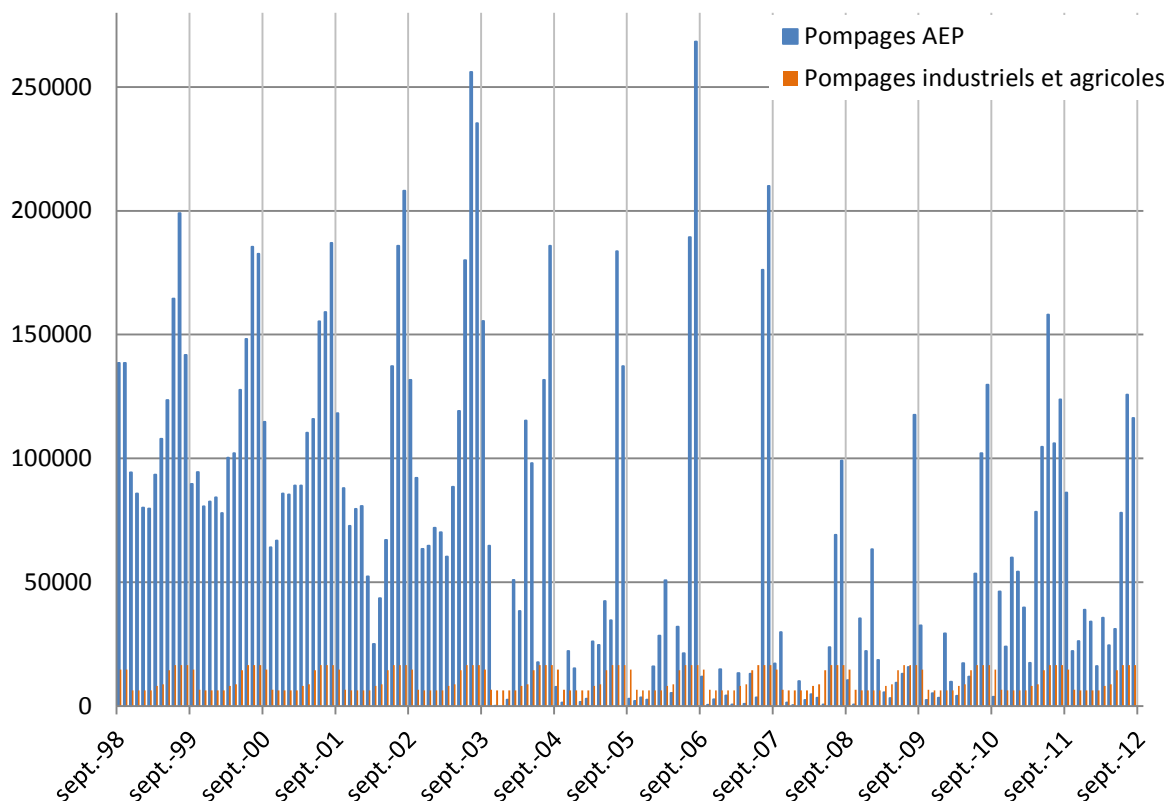
Les données de fonctionnement des pompes et de volumes d'exhaure sont disponibles à l'échelle mensuelle. Pour le régime transitoire, les prélèvements ont donc été calculés à un pas de temps mensuel.

L'évolution des prélèvements annuels pour l'AEP entre 1998 et 2012 est représentée sur la Figure 14. De 2001 à 2008, les volumes prélevés dans la nappe ont notablement baissé en réponse aux épisodes de sécheresse. Ils étaient de 3.5 Mm<sup>3</sup>/an en moyenne de 1998 à 2001 et sont passés à 0.94 Mm<sup>3</sup> en 2008.



**Figure 14 - Evolution des prélèvements annuels par champ captant en m<sup>3</sup>/an**

A l'échelle saisonnière (Figure 15), les prélèvements sont les plus élevés en période estivale en raison des conditions météorologiques et des besoins liés à la saison touristique. Si les prélèvements ont notablement baissé de 2001 à 2008, les prélèvements estivaux sont restés importants. Par contre, après 2007, on observe une baisse des prélèvements estivaux et une hausse sur le reste de l'année à partir de 2010. La diminution progressive des prélèvements est liée à la mise en œuvre du protocole de gestion entre le SIDECM et la Société du Canal de Provence (SCP). Ce protocole s'appuie notamment sur une grille tarifaire permettant au SIDECM de remplir le barrage de la Verne en hiver à un tarif préférentiel.



**Figure 15 - Evolution des prélèvements souterrains mensuels entre 1998 et 2012 (m<sup>3</sup>/mois)**

#### 2.2.3.5. RESTITUTIONS

Le lavage des filtres pour le traitement AEP et les STEP rejettent 2.6 Mm<sup>3</sup>/an en rivière (Figure 16 et Figure 17).

**Les données de restitution des stations de traitement AEP** sont disponibles et intégrées au pas mensuel de 1999 à 2012 (527000 m<sup>3</sup>/an). Pour les mois de septembre à décembre 1998, les données ont été reprises de 1999 pour les mois correspondants. Les eaux de lavage de la station de la Verne sont intégrées au débit de la Verne en entrée du modèle.

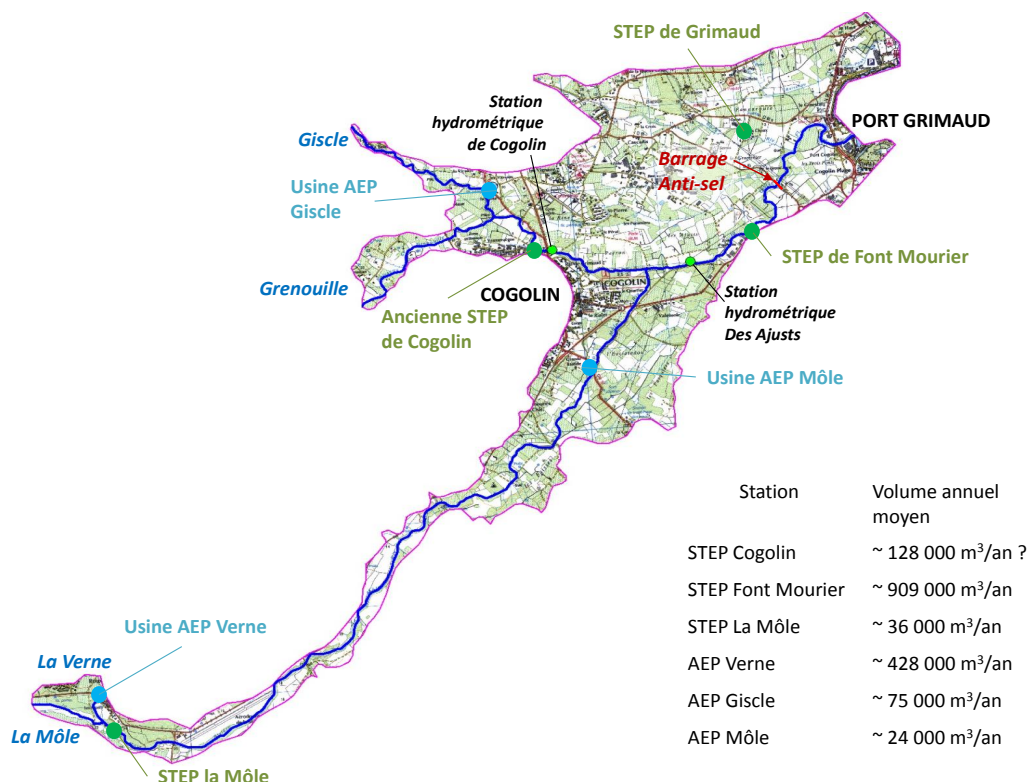
**Les données de restitutions des STEP** ont été fournies par l'Agence de l'Eau pour les STEP de Font Mourier et Cogolin.

Pour la STEP de Cogolin, les rejets mensuels sont disponibles de janvier à août 2009 et de janvier 2010 à juin 2011, date de son arrêt. Pour la STEP de Font Mourier, les rejets mensuels sont disponibles de janvier à août 2009 et de janvier 2010 à décembre 2012. Entre août 1998 et décembre 2008, nous avons considéré les moyennes mensuelles calculées sur les données disponibles.

Pour la STEP de la Môle village, elles sont extraites du portail de l'assainissement communal. Les débits moyens annuels entrants sont disponibles de 2008 à 2012. Le rejet de la STEP de la Môle village est situé sur un tronçon de rivière qui ne subit pas d'assecs. Les débits sont considérés comme négligeables en regard des apports de la Môle, ils n'ont donc pas été intégrés au modèle (0.04 contre 11.4Mm<sup>3</sup>/an).

## Etude des alluvions de la Giscle et de la Môle – Détermination des volumes maximums prélevables – Préservation de la ressource stratégique

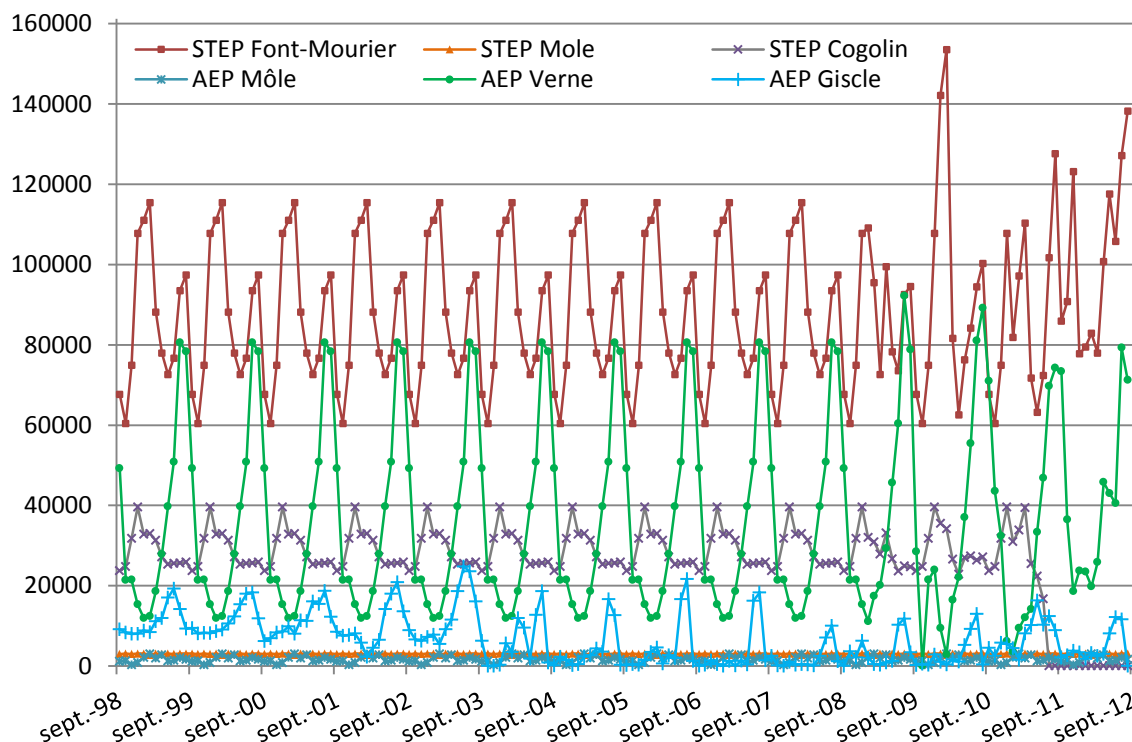
Rapport de phase 3 – Impact des prélèvements et quantification de la ressource



**Figure 16 - Localisation des points de rejets en rivières des eaux issues de STEP et lavage des usines AEP**

Le rejet de la STEP de Grimaud n'est pas intégré au modèle car le ruisseau St Pierre dans lequel se fait la restitution rejoint la Giscle en aval du barrage anti-sel. La modélisation du cours d'eau ne s'y fait plus en fixant des débits d'entrée mais des niveaux d'eau (voir chapitre 1.2.3.6).

L'incertitude sur les restitutions de la STEP de Cogolin avant 2009 aura certainement une incidence directe sur les résultats des débits modélisés de la rivière Giscle car son rejet en rivière se situe à une centaine de mètres en amont de la station hydrométrique de Cogolin.



**Figure 17 - Evolution des volumes rejetés en rivière par les usines de traitement des eaux AEP et les STEP en m<sup>3</sup>/mois.**

#### 2.2.3.6. COURS D'EAU

En raison des objectifs de cette étude de volumes prélevables, une attention particulière a été apportée à la modélisation des échanges nappe-rivières.

##### 2.2.3.6.1. Rivières représentées avec le module « Stream »

Pour représenter les variations de débits dans la rivière liées à la recharge et au drainage de la nappe, il a été choisi d'utiliser le module « *Stream* » (STR) dans le code de calcul MODFLOW.

L'intérêt majeur de ce type de condition limite est de pouvoir simuler les assecs temporaires des rivières.

Ce module utilise la relation de Manning-Strickler afin d'obtenir une relation entre le débit et la hauteur d'eau dans la rivière :

$$Q = \frac{1}{n} \cdot S \cdot R_H^{2/3} \cdot i^{1/2}$$

Où :

- Q est le débit au point de calcul, en m<sup>3</sup>/s ;
- n est le coefficient de rugosité de Manning ;
- S est la surface de la section mouillée en m<sup>2</sup> ;
- R<sub>h</sub> est le rayon hydraulique (i.e. rapport entre la surface et le périmètre de la section mouillée) en m ;
- i est la pente du cours d'eau.

## Etude des alluvions de la Giscle et de la Môle – Détermination des volumes maximums prélevables – Préservation de la ressource stratégique

Rapport de phase 3 – Impact des prélèvements et quantification de la ressource

Le fonctionnement de ce module consiste, pour toutes les cellules concernées et pour chaque pas de temps, à résoudre de manière itérative (d'amont en aval), le débit du cours d'eau en fonction des échanges nappe / rivières.



Figure 18 - Cours d'eau et points de restitution intégrés avec les modules Stream et River

Les informations nécessaires pour intégrer ce type de conditions limites sont :

- le profil en long du lit des rivières. Le levé du fil d'eau de la Môle a été spécialement réalisé pour cette étude. Les profils en long de la Grenouille et la Giscle étaient disponibles (campagnes de 1996, 2002 et 2011).
- le débit des rivières à l'amont du modèle hydrogéologique.
- Dans notre cas, les débits des cours d'eau intégrés en tête de bassin sont les suivants (Figure 18):
  - La Verne : débits mensuels à la station en sortie de barrage. Ces débits présentaient de nombreuses données aberrantes. Ils ont été corrigés en prenant pour base les

## Etude des alluvions de la Giscle et de la Môle – Détermination des volumes maximums prélevables – Préservation de la ressource stratégique

Rapport de phase 3 – Impact des prélèvements et quantification de la ressource

débits de surverse du barrage estimés par rapport aux niveaux d'eau du barrage. Lorsque le niveau d'eau du barrage est inférieur au niveau de surverse, le débit est supposé comme égal au débit de réserve (60l/s).

- La Môle : débits mesurés journaliers à la station Banque Hydro du Destel dite également du Lavandou (Y5435010).
- Le Carian : débit issu d'un calcul hydrologique en fonction de la pluviométrie et de la superficie du bassin versant (Figure 11).
- La Giscle : débit issu d'un calcul hydrologique en fonction de la pluviométrie et de la superficie du bassin versant (Figure 11).
- La Grenouille : débit issu d'un calcul hydrologique en fonction de la pluviométrie et de la superficie du bassin versant (Figure 11).

L'évolution des volumes d'entrée fixés à l'amont des principales rivières du modèle reflète les variations de la pluviométrie sur la période modélisée avec une période relativement sèche de 2001 à 2008 suivie par une période humide (Figure 19).

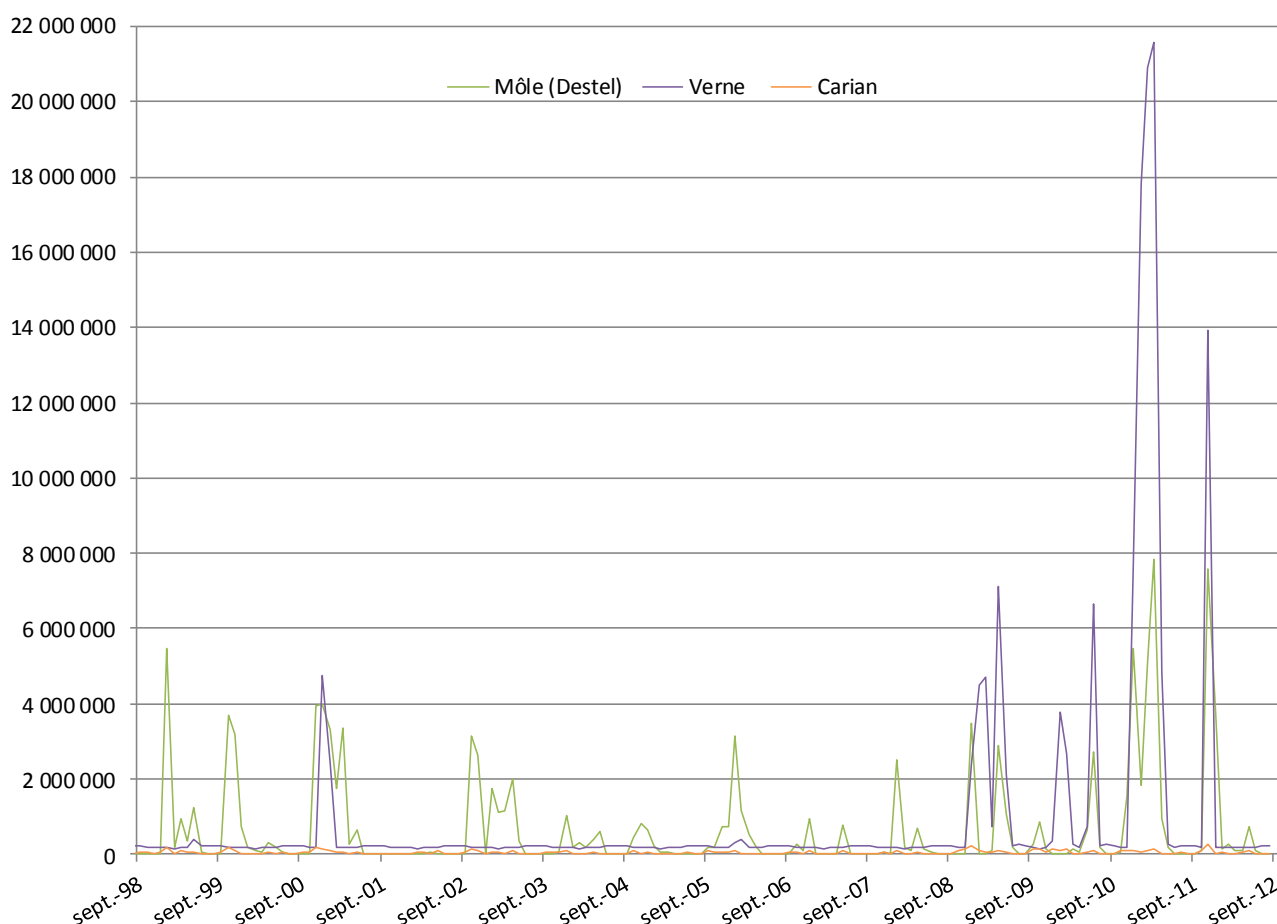
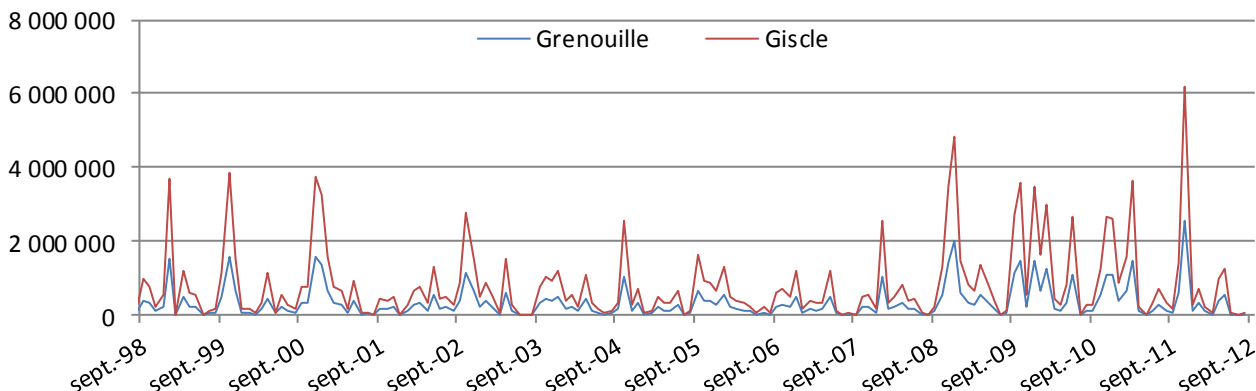


Figure 19 - Volumes mensuels intégrés au départ des segments Stream des rivières Môle, Verne et Carian en m<sup>3</sup>/mois





**Figure 20 - Volumes mensuels intégrés au départ des segments Stream des rivières Grenouille et Giscle en m<sup>3</sup>/mois**

#### 2.2.3.6.2. Rivières représentées avec le module « River »

Sous Visual Modflow, le module Stream calcule la cote de l'eau dans chaque maille de la rivière en fonction uniquement des échanges avec les eaux souterraines.

A l'aval du barrage anti-sel, la cote de l'eau de la rivière est fortement influencée par le niveau de la mer. L'utilisation du module Stream n'est donc pas adaptée. Pour ce type de conditions limites, il est donc préférable de représenter la rivière Môle avec le module River.

Le module « River » (RIV) du code de calcul MODFLOW nécessite de fournir pour chaque rivière une cote de fond, un coefficient d'échange (transmissivité verticale qui traduit l'état de colmatage du fond de la rivière) et une cote de l'eau en m NGF. Le modèle calcule par la suite, les flux d'échange (alimentation ou drainage) entre la nappe et la rivière pour maintenir cette ligne d'eau.

### 2.3. CALAGE ET VALIDATION DU MODELE

La démarche suivie pour le calage du modèle correspond ici à la démarche classique qui consiste à :

- dans un premier temps, effectuer un calage en régime permanent
- dans un second temps, introduire dans le modèle les conditions hydrauliques transitoires (recharge, prélèvements,...) de façon à simuler l'impact de la variation de ces conditions sur l'évolution de la piézométrie.

La comparaison entre l'évolution de la piézométrie simulée par le modèle et celle réellement observée renseigne sur la qualité du modèle (I.E. sa capacité à reproduire la dynamique des écoulements souterrains et donc sa capacité à simuler ultérieurement des scénarios).

Une des difficultés de cette approche réside dans le fait que l'on considère un régime permanent à une date donnée, c'est-à-dire une période où les entrées d'eau dans le système sont égales aux sorties. La nappe est donc supposée rester stable.

Dans la réalité, il est difficile d'observer un état permanent mais il permet de faire une première approximation des paramètres du modèle qui seront ensuite affinés avec le calage en transitoire. Il fournit également une piézométrie de départ pour la simulation en régime transitoire. Cette

piézométrie peut être plus ou moins erronée mais, si la période transitoire est suffisamment longue, l'impact de l'approximation faite initialement à l'état permanent s'estompe lorsqu'on avance dans le temps.

Le régime transitoire prend en compte les variations temporelles de la nappe, et donc les phénomènes de stockage/déstockage du réservoir aquifère.

L'approche suivante a donc été adoptée :

- simulation d'un régime permanent pour le mois de septembre 1998
- simulation du régime transitoire de septembre 1998 à septembre 2012

### **2.3.1. Calage en régime permanent**

La situation de référence choisie pour le calage en régime permanent est la piézométrie observée lors de la campagne piézométrique basses eaux du 25 septembre 1998.

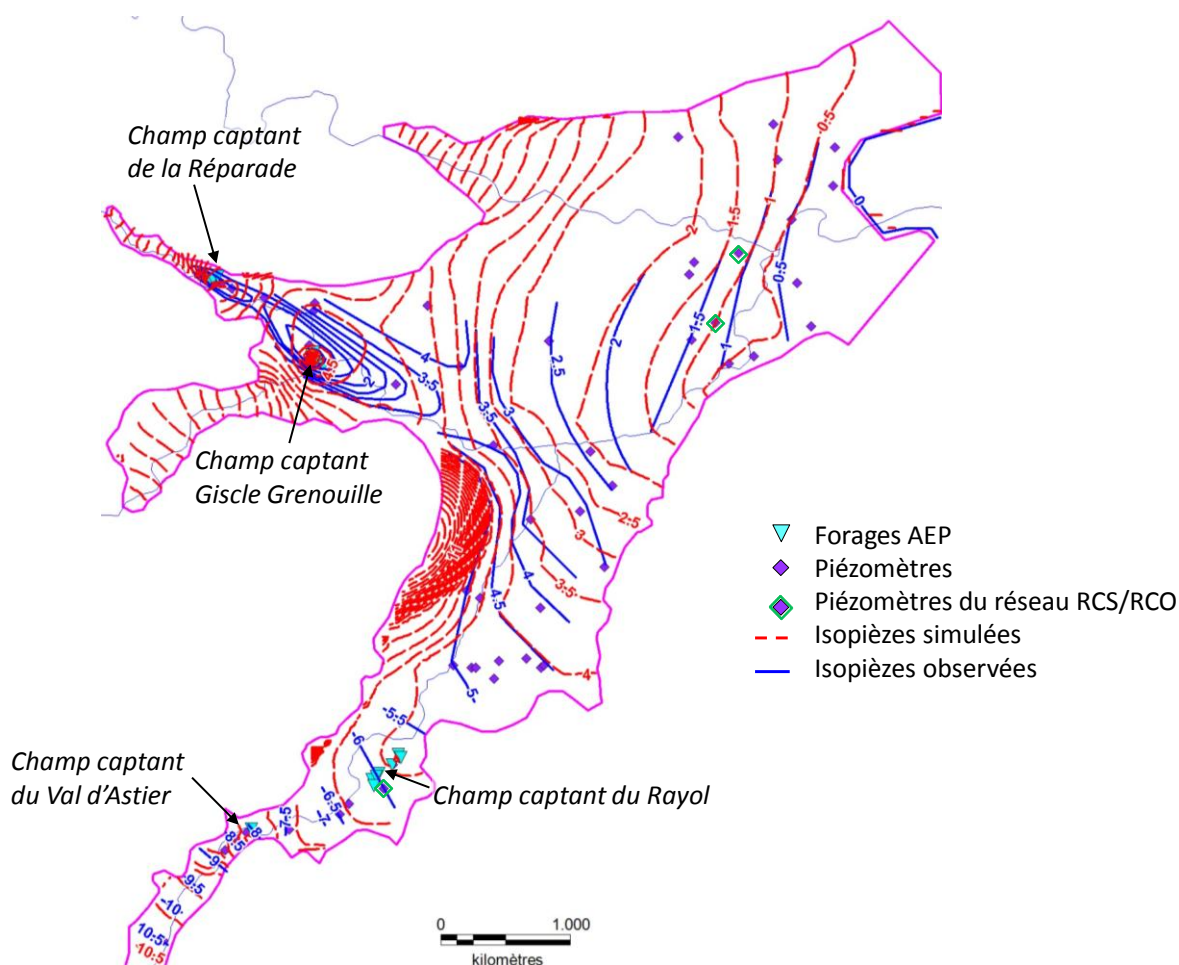
#### 2.3.1.1. PIEZOMETRIE

La carte Figure 21, montre les isopièzes calculées par le modèle et observées pour septembre 1998. Notons que, par confort de lecture, cette carte et les suivantes (Figure 24 et Figure 25) ne montrent pas la partie amont de la vallée de la Môle. Il n'y a aucun piézomètre suivi dans cette zone. Toutefois, la piézométrie simulée est à 20mNGF à la confluence Môle-Verne, c'est-à-dire 3m sous le niveau du sol, ce qui est tout à fait réaliste. La carte entière est reproduite en annexe.

Dans la partie aval, le modèle reproduit bien les gradients de nappe, la forme des isopièzes et les directions d'écoulements sont bien restitués.

A l'amont, on observe des différences notables autour des champs captant de Réparade et de Giscle Grenouille. Dans le modèle, les volumes prélevés sont moyennés à l'échelle mensuelle. D'après la carte des isopièzes observées, on peut supposer que le jour de la campagne piézométrique les prélèvements étaient plus importants que ceux pris en compte dans le modèle dans le secteur de la Giscle et nuls dans celui de la Môle. Le calage en transitoire validera cette hypothèse.

La piézométrie observée n'est pas représentée au nord-est de la nappe et dans la vallée de la Grenouille. Les données piézométriques et géologiques y sont très peu nombreuses. L'allure des isopièzes modélisées dans ce secteur est réaliste.

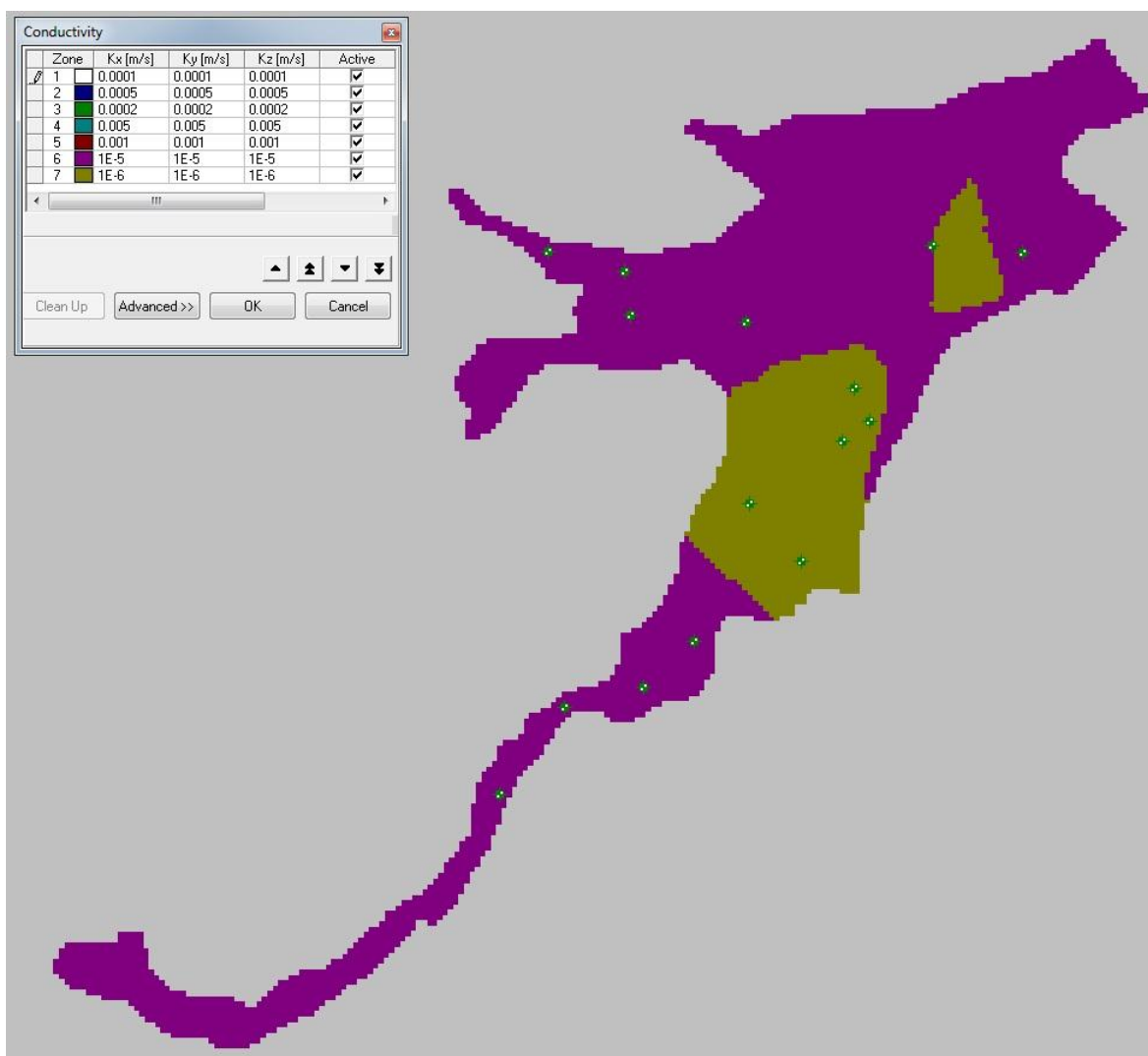


**Figure 21 – Comparaison entre les piézométries observée et simulée à l'issu du calage en régime permanent (septembre 1998)**

### 2.3.1.2. PARAMETRE DE CALAGE : PERMEABILITES

Les perméabilités introduites initialement dans le modèle sont fondées sur les valeurs déduites des essais de pompage (voir rapport de phase 1&2). Les valeurs ont ensuite été ajustées au cours de la phase de calage.

Les cartes de répartition des perméabilités pour les couches supérieure et inférieure obtenues à l'issue de la phase de calage sont présentées Figure 22 et Figure 23.

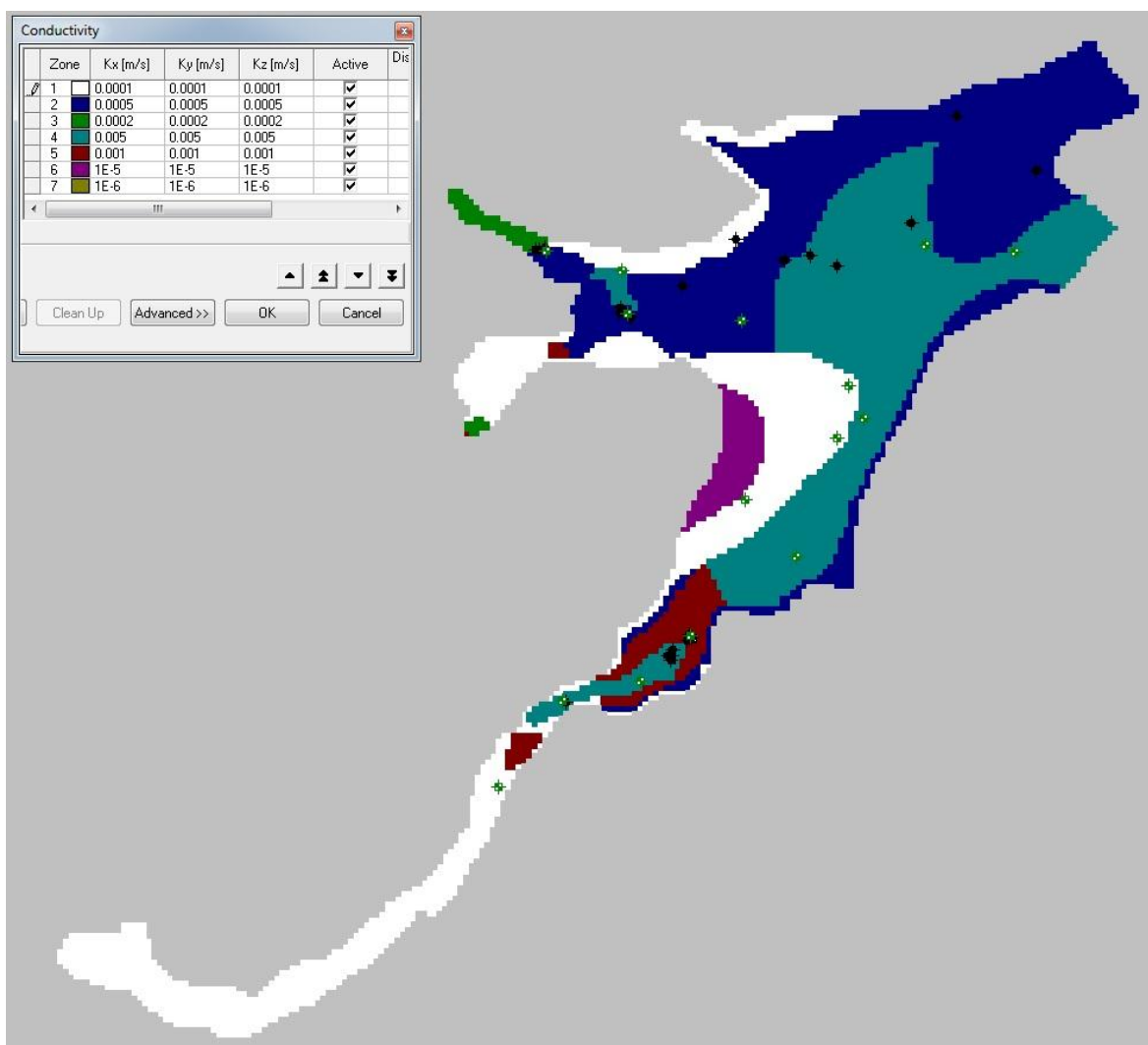


**Figure 22 - Répartition des perméabilités pour la couche supérieure obtenues à l'issue du calage.**

La couche supérieure, formée de limons et de sédiments fluviomarins fins à dominante sableuse, présente des perméabilités de  $10^{-6}$  à  $10^{-5}$  m/s.

La couche inférieure, composée de sédiments fluviaux grossiers en amont plus ou moins grossiers à l'aval, présente des variations de perméabilités comprises entre  $10^{-5}$  à  $5 \cdot 10^{-3}$  m/s.

Le calage a été ici réalisé sur la base d'un raisonnement en flux global, en adéquation avec l'objectif du modèle. Il en résulte donc une répartition présentant des zones de perméabilité homogènes relativement étendues pour des formations fluviomarines.



**Figure 23 - Répartition des perméabilités pour la couche inférieure obtenue à l'issue du calage.**

### 2.3.1.3. BILAN HYDRAULIQUE

Le tableau suivant (*Tableau 2*) synthétise les termes du bilan hydraulique de la nappe en régime permanent. Le régime permanent est une situation fictive pour laquelle les apports sont égaux aux sorties. Cette simulation permet de définir un état de base avant de mettre en place le régime transitoire. Le bilan hydraulique, en tant qu'outil de construction du modèle, permet de valider le calage en régime permanent. Il donne les premiers ordres de grandeur des échanges au sein du modèle.

En période de basses eau, les prélèvements souterrains (88 l/s) ont une importance majeure dans le bilan avec plus de 40% des sorties de l'aquifère. Il est à noter que le drainage côtier produit un flux moyen d'environ 11 l/s s'écoulant en mer.

Les échanges nappe/rivières sont élevés. De manière générale, les cours d'eau alimentent la nappe en amont et la drainent à l'aval. Le débit moyen échangé est de 100 l/s.

La recharge par les pluies au droit de la plaine alluviale constitue la moitié des entrées dans la nappe. La recharge provenant des versants y contribue pour l'autre moitié. Ce mois de septembre 1998 est relativement humide par rapport aux étés 2003 à 2008. Pour ces derniers, la recharge météorologique proviendra uniquement du ruissèlement des versants (voir Figure 9, 10 et 12).

	Entrées (m <sup>3</sup> /jour)	Sorties (m <sup>3</sup> /jour)
<b>Stockage</b>	0	0
<b>Prélèvements souterrains</b>	0	7 631
<b>Drainage côtier</b>	0	1 139
<b>Recharge issue des pluies</b>	8 769	0
<i>dont recharge des versants</i>	<i>5 003</i>	<i>0</i>
<b>Réseau hydrographique</b>	8 646	8 612
<b>TOTAL</b>	17 415	17 382

**Tableau 2 - Bilan hydraulique établi à partir du calage en régime permanent – Sept. 1998**

Ce bilan est cohérent avec les données d'échanges nappe-rivières observés par jaugeage sur le site (rapport de phases 1&2) et apparaît satisfaisant pour démarrer la phase de calage en régime transitoire.

### **2.3.2. Calage en régime transitoire**

La période de calage en régime transitoire s'étend de septembre 1998 à août 2012.

Le modèle se doit de reproduire le plus fidèlement possible l'évolution de la piézométrie sur divers piézomètres répartis sur différents secteurs de la nappe, et ce pour la période 1998 – 2012.

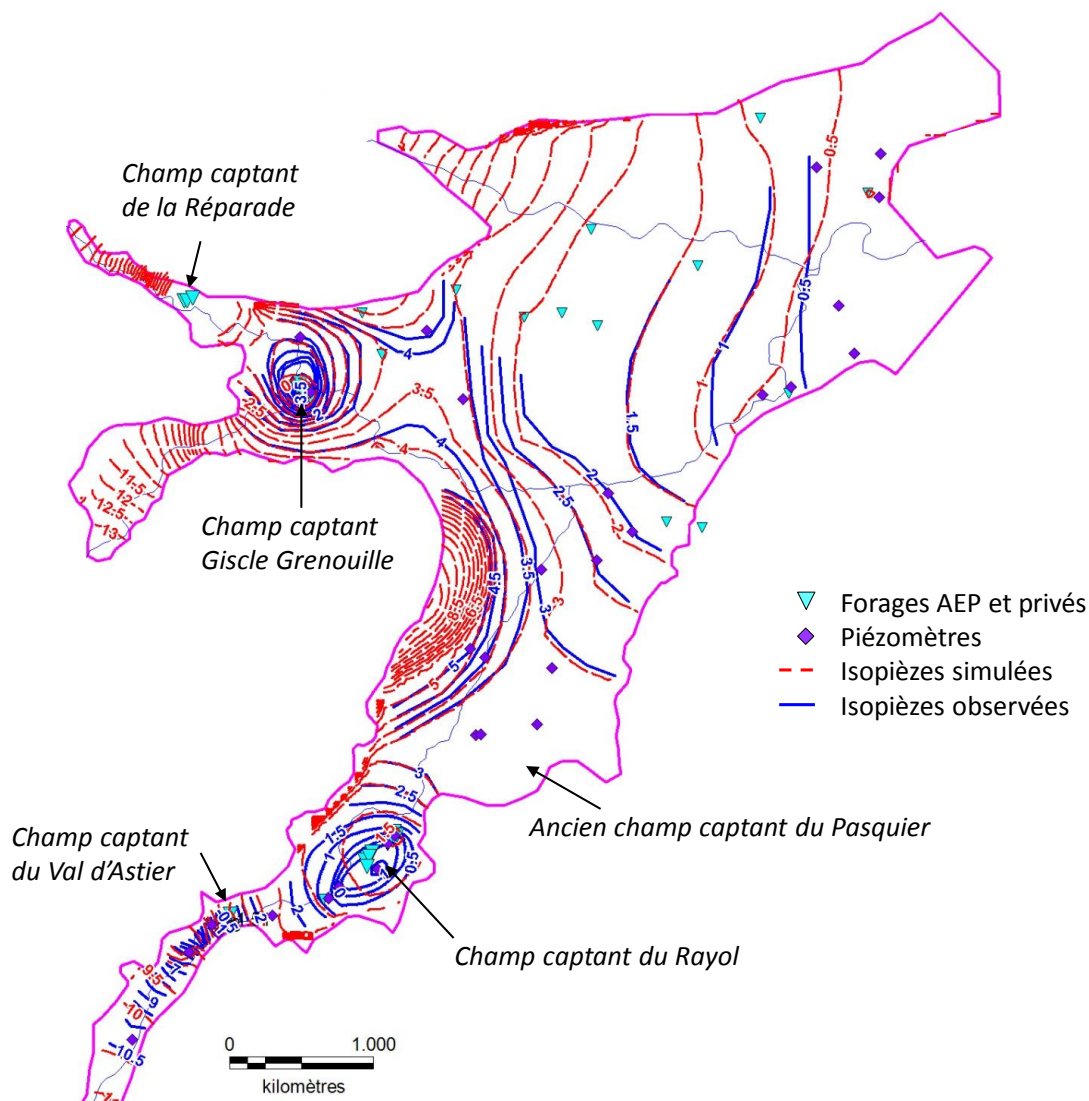
#### **2.3.2.1. REPRODUCTION DES PIEZOMETRIES DE REFERENCE**

Les cartes suivantes (Figure 24 et Figure 25) présentent les piézométries obtenues pour les situations d'août 2003 et de septembre 2012.

Les zones d'influences simulées des captages sont cohérentes avec les observations (voir rapport de phases 1&2). La zone d'influence des captages de la Môle s'étend en aval jusqu'à la RN98 (seuil des Garcinières) et celle des champs captant de la Giscle jusqu'à la RD558 (seuil de la Giscle).

La simulation de la piézométrie sur ces zones d'influence est directement dépendante des volumes pompés sur les captages AEP. Ces volumes étant différents entre le mois simulé et le jour de la campagne piézométrique, la piézométrie calculée par le modèle au niveau des champs captant, est légèrement différente de celle correspondante à l'état observé. Toutefois, la répartition spatiale et temporelle des gradients d'écoulement en fonction des volumes pompés est en accord avec les observations de terrain.

- **Août 2003** a été choisi pour ses niveaux piézométriques bas au regard de la période simulée. Figure 24, en aval des zones d'influence des captages, la forme générale des isopièzes est bien représentée.

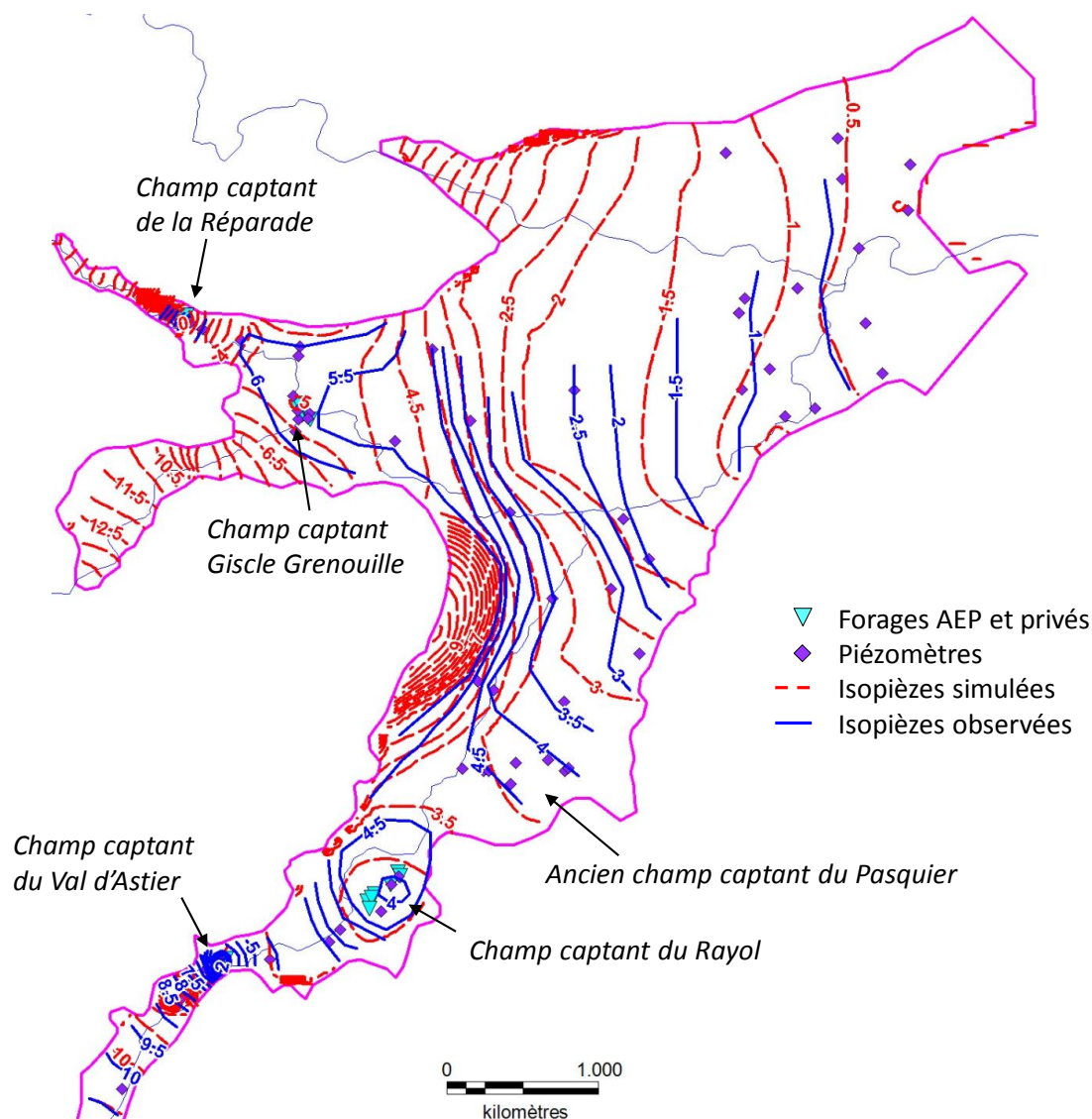


**Figure 24 - Calage transitoire août 2003 - en rouge pointillé les isopièzes calculées pour le régime transitoire et en bleu les isopièzes reconstituées à partir des mesurées du 21 août 2003 – Période sèche avec étiage sévère.**

- **Septembre 2012** a été choisi car cette période de basses eaux correspond à une situation plutôt humide et clos la période simulée.

Sur la carte piézométrique (Figure 25), on observe que les gradients de nappe et les directions d'écoulements sont assez bien représentés.

Notons que les volumes pompés sur les champs captant étaient probablement moins importants le jour de la campagne piézométrique que la moyenne sur le mois de septembre prise en compte dans la modélisation. La piézométrie simulée sur les zones d'influence est donc plus basse.



**Figure 25 - Calage transitoire septembre 2012: en rouge pointillé les isopièzes simulées pour le régime transitoire et en bleu les isopièzes mesurées du 20 septembre 2012.**

### 2.3.2.2. RECONSTITUTION DES CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES

Sept chroniques réparties de façon homogène sur la nappe sont ici présentées (Figure 27 à 19) parmi les 14 piézomètres de références choisis en fonction de leur localisation et de la longueur des chroniques (localisés sur la Figure 26). Les 7 autres sont présentés en annexes.



## Etude des alluvions de la Giscle et de la Môle – Détermination des volumes maximums prélevables – Préservation de la ressource stratégique

Rapport de phase 3 – Impact des prélèvements et quantification de la ressource

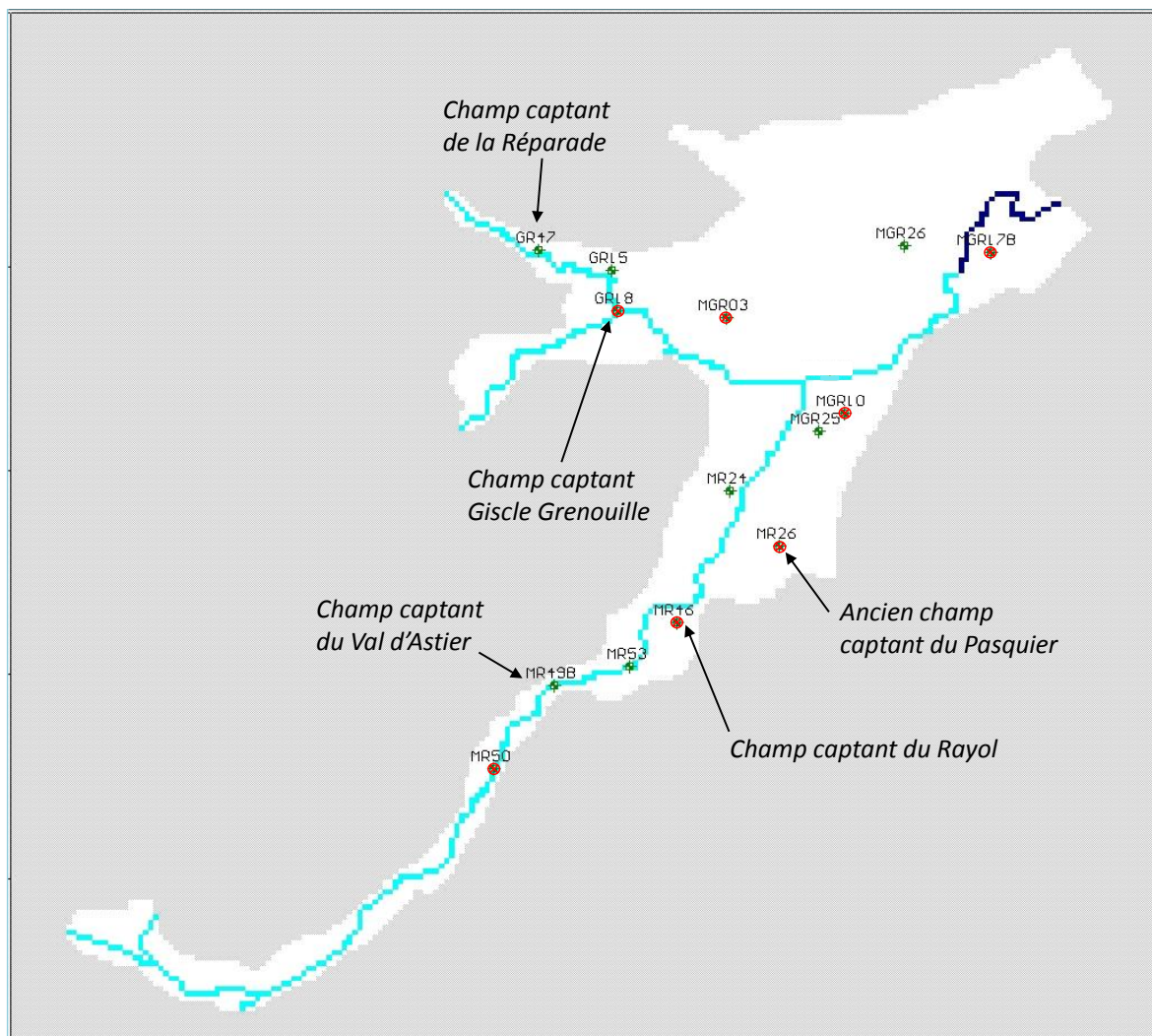


Figure 26 - Localisation des piézomètres de référence (en rouge les ouvrages correspondant aux chroniques présentées ci-dessous, en vert à celle présentées en annexe). Le point MR46 fait partie du réseau de surveillance RCO.

# Etude des alluvions de la Giscle et de la Môle – Détermination des volumes maximums prélevables – Préservation de la ressource stratégique

Rapport de phase 3 – Impact des prélèvements et quantification de la ressource

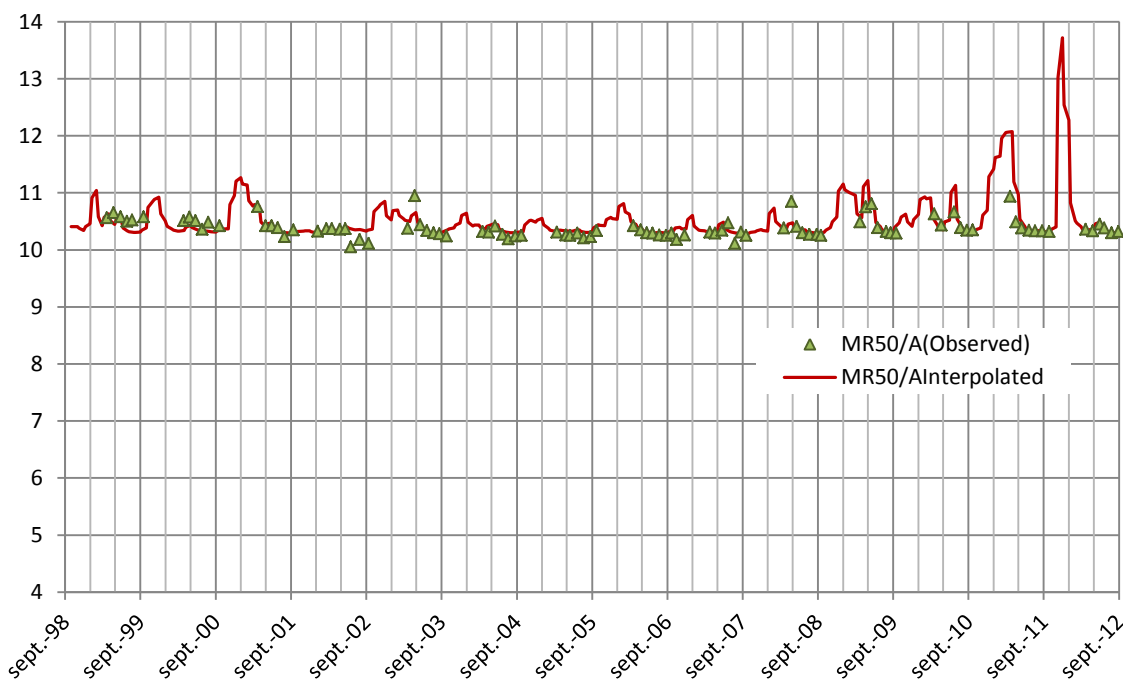


Figure 27 - Chroniques piézométriques observée et simulée du piézomètre MR50 (en mNGF)

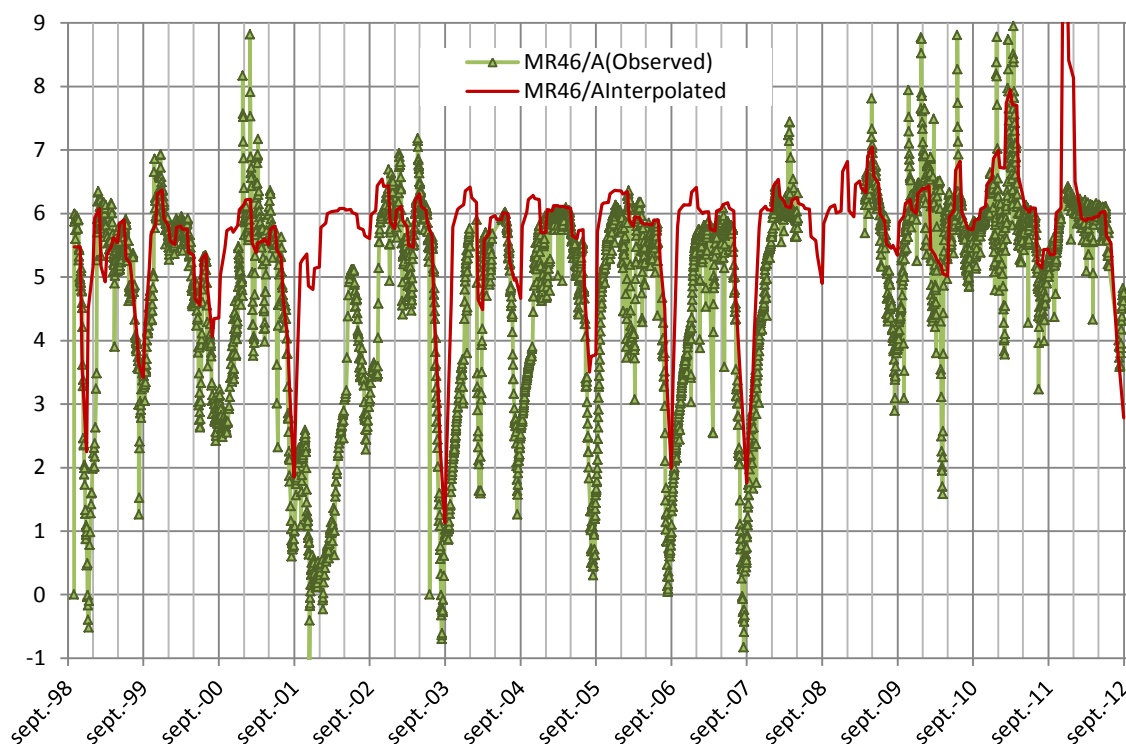


Figure 28 - Chroniques piézométriques observée et simulée du piézomètre MR46 au sein du champ captant du Rayol (en mNGF)

# Etude des alluvions de la Giscle et de la Môle – Détermination des volumes maximums prélevables – Préservation de la ressource stratégique

Rapport de phase 3 – Impact des prélèvements et quantification de la ressource

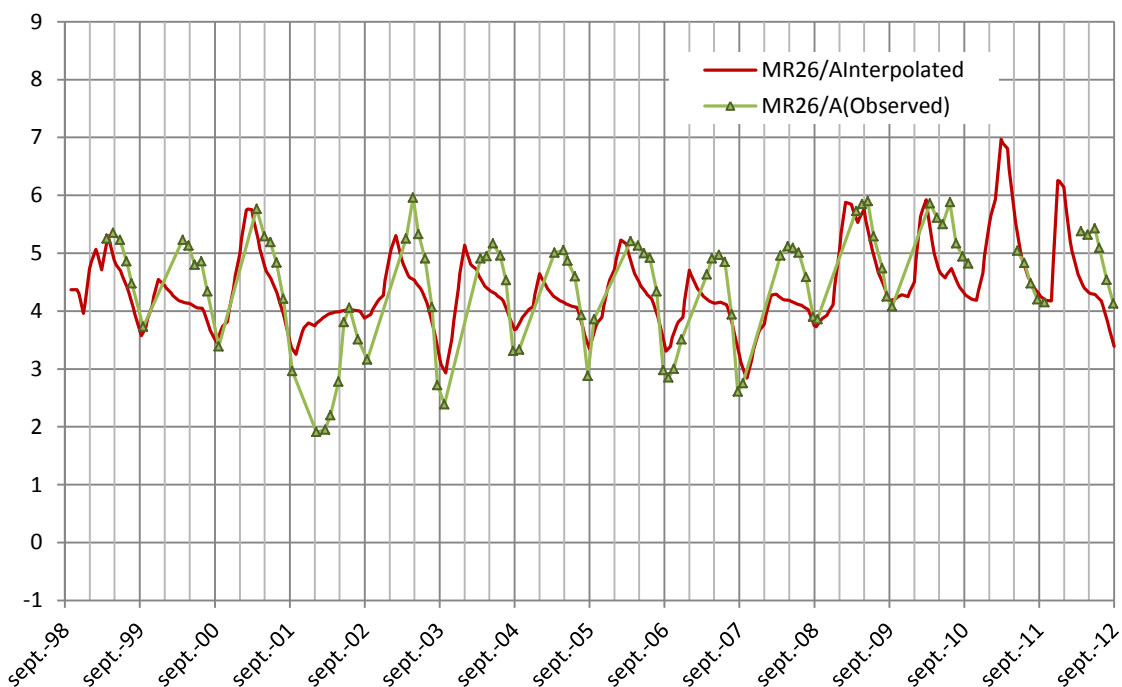


Figure 29 - Chroniques piézométriques observée et simulée du piézomètre MR26 (en mNGF)

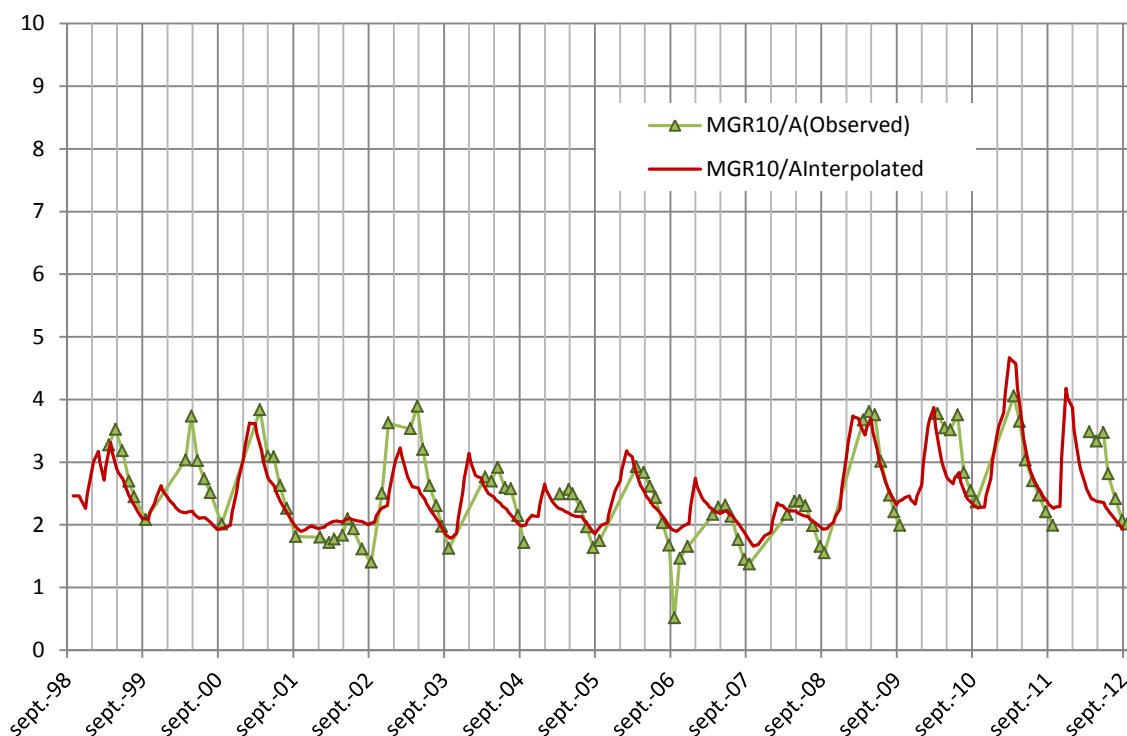


Figure 30 - Chroniques piézométriques observée et simulée du piézomètre MGR10 (en mNGF)

# Etude des alluvions de la Giscle et de la Môle – Détermination des volumes maximums prélevables – Préservation de la ressource stratégique

Rapport de phase 3 – Impact des prélèvements et quantification de la ressource

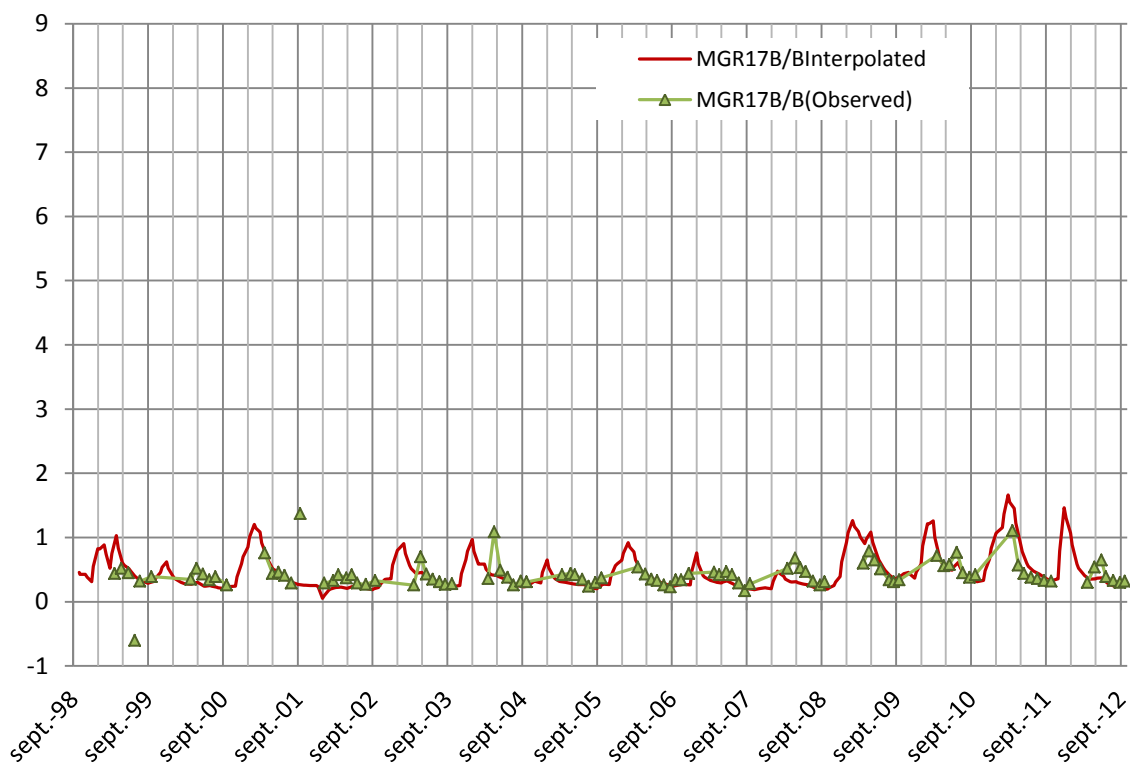


Figure 31 - Chroniques piézométriques observée et simulée du piézomètre MGR17B (en mNGF)

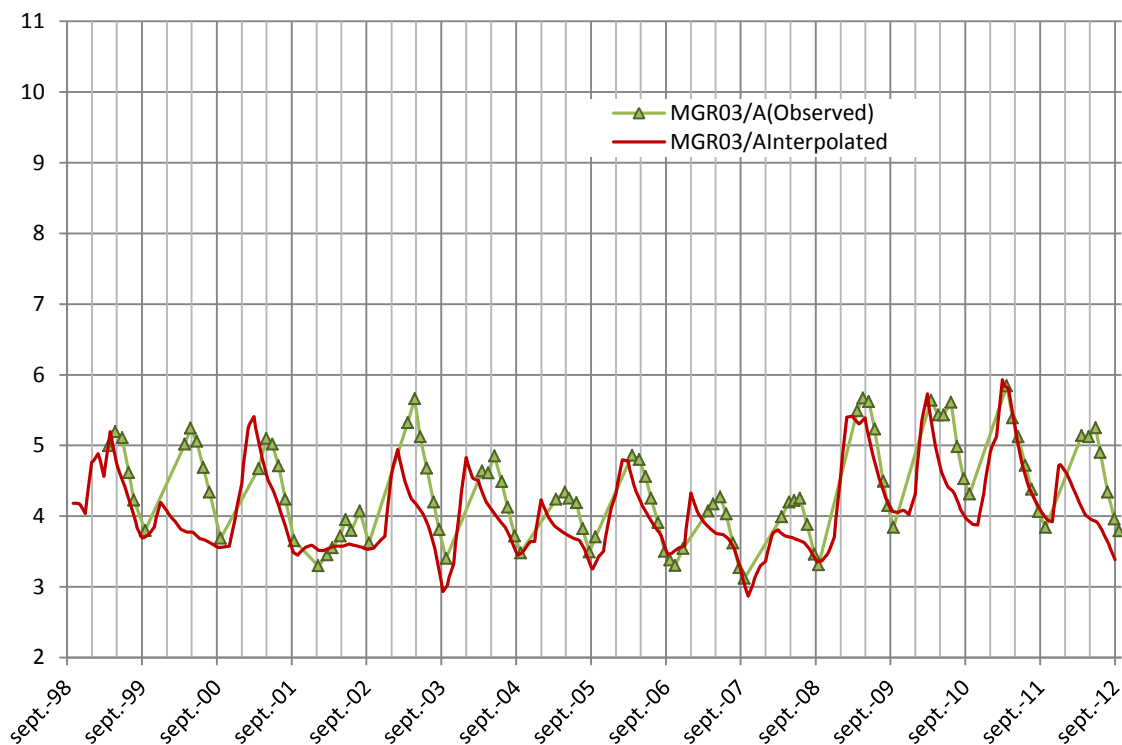
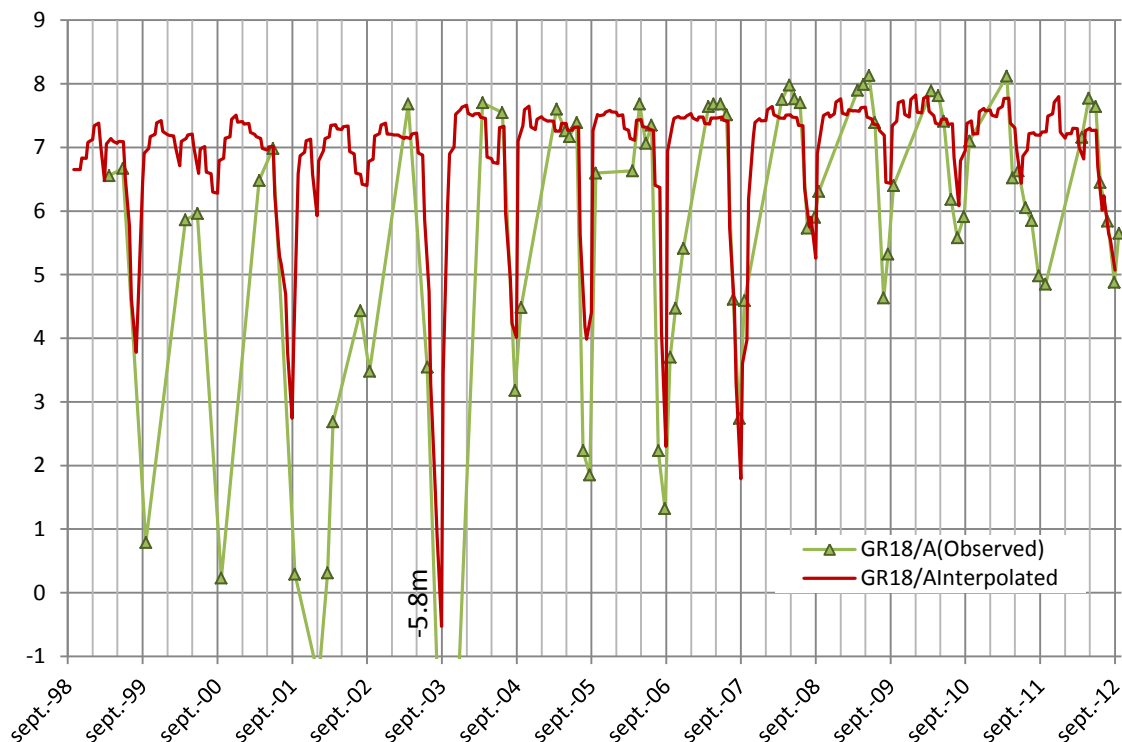


Figure 32 - Chroniques piézométriques observée et simulée du piézomètre MGR03 (en mNGF)



**Figure 33 - Chroniques piézométriques observée et simulée du piézomètre GR18 au sein du champ captant de Gisle Grenouille (en mNGF)**

De façon générale, les chroniques simulées reproduisent bien la dynamique de la nappe au cours du temps.

- La chronique du MR50 (Figure 27) reproduit très bien la dynamique de l'aquifère à l'amont des champs captant. On peut y constater que le niveau piézométrique y est très stable.
- Le piézomètre MR46 (Figure 28) est suivi par la DREAL et fournit des données journalières. Il se situe au droit du champ captant du Rayol, le modèle réagit correctement aux pompages.

Toutefois, en période estivale, le rabattement simulé est moins important que le mesuré. Plusieurs facteurs sont mis en cause:

- le débit prélevé est moyenné dans le modèle et ne correspond pas à la valeur exacte de pompage lors de la prise de mesure sur le piézomètre ;
- la maille de 50m du modèle éloigne artificiellement le piézomètre des puits ce qui produit un décalage significatif pour les rabattements les plus importants ;
- en 2001-2002, les prélèvements AEP ont probablement été bien supérieurs aux données fournies.

Ces décalages, localisés au niveau du champ captant, n'ont pas d'influence sur la modélisation des niveaux de la nappe à l'échelle de l'aquifère dont les tendances sont bien reproduites.

- Le piézomètre MR26 se situe au niveau de l'ancien champ captant du Pasquier, dans la zone d'influence du champ captant du Rayol. Le décalage de 2001-2002 observé sur le piézomètre MR46 se retrouve sur cette chronique. La dynamique de la nappe est bien restituée au niveau de ce piézomètre.

## Etude des alluvions de la Giscle et de la Môle – Détermination des volumes maximums prélevables – Préservation de la ressource stratégique

Rapport de phase 3 – Impact des prélèvements et quantification de la ressource

- Dans la partie aval du modèle, les chroniques des piézomètres MGR10, MRG17B et MGR03 reproduisent bien la dynamique de la nappe (Figure 30, Figure 31 et Figure 32). Pour MGR10, la valeur observée en septembre 2006 est aberrante, il s'agit probablement d'une erreur de mesure.
- Le piézomètre GR18 (Figure 33) se situe au droit du champ captant Giscle Grenouille, le modèle réagit correctement aux pompages. Comme pour le piézomètre MR46, la situation de ce piézomètre au droit du champ captant implique un décalage lors des rabattements les plus forts.

De plus, de 1999 à 2002 et en 2009, les données relatives aux débits pompés sont lacunaires. Cela se traduit par une réaction sous-évaluée de la piézométrie calculée par le modèle.

Enfin, le fait que la valeur du pompage soit moyennée dans le modèle et ne corresponde pas à la valeur exacte des pompages lors de la prise de mesure induit des décalages supplémentaires.

Pour un piézomètre situé au droit d'un champ captant, les niveaux modélisés pour GR18 réagissent bien aux pompages.

**L'observation des chroniques piézométrique montre que l'inertie de la nappe est très faible et que le modèle reproduit bien son comportement.**

	MR50 Simulé- observé	MR26 Simulé- observé	MGR10 Simulé- observé	MGR17B Simulé- observé	MGR03 Simulé- observé	MR24 Simulé- observé	MGR26 Simulé- observé	Moyenne des valeurs absolues des écarts
sept.-99	-0.19	-0.01	0.00	-0.04	-0.07	-0.19	-0.01	<b>0.07</b>
sept.-00	-0.06	0.28	-0.07	0.01	-0.13	-0.18	-0.35	<b>0.16</b>
sept.-01	-0.03	0.27	0.09	-1.07	-0.21	0.08	-0.04	<b>0.26</b>
sept.-03	0.11	0.53	0.16	-0.01	-0.39	-0.35	-0.08	<b>0.23</b>
sept.-04	0.07	0.51	0.29	-0.04	0.01	-0.26	-0.13	<b>0.19</b>
sept.-05	0.10	-0.13	0.25	-0.07	-0.32	-0.88	-0.31	<b>0.29</b>
sept.-06	0.04	0.56		-0.06	0.10	-0.24	0.14	<b>0.16</b>
sept.-07	0.04	0.16	0.33	-0.07	-0.14	-0.54	0.40	<b>0.24</b>
sept.-08	0.06	-0.02	0.39	-0.08	0.06	-0.39	0.15	<b>0.17</b>
sept.-09	0.18	0.13	0.41	0.12	0.21	0.22	0.89	<b>0.31</b>
sept.-10	-0.03	-0.62	-0.11	-0.07	-0.42	0.09	0.26	<b>0.23</b>
sept.-11	-0.01	0.01	0.24	0.03	0.11		0.71	<b>0.16</b>
août-12	0.00		-0.08	0.02	-0.34	-0.19	0.22	<b>0.12</b>
Moyenne des valeurs absolues des écarts	<b>0.07</b>	<b>0.25</b>	<b>0.19</b>	<b>0.13</b>	<b>0.19</b>	<b>0.28</b>	<b>0.28</b>	<b>0.20</b>

**Tableau 3 : écarts en mètres entre les niveaux piézométriques simulés et observés. Niveau d'eau dans le piézomètre MR50.**

Afin d'appréhender de façon quantitative la validité du modèle, le tableau 3 synthétise les écarts entre piézométrie observée et simulée pour les mois de septembre. En effet, la préservation de la ressource aquifère est en jeu en période de basses eaux. Le modèle doit se doit donc de reproduire correctement les niveaux piézométriques pour ces périodes.

Le Tableau 3 ne prend pas en compte les piézomètres se trouvant dans l'influence directe des champs captant (du fait des effets de maillage et de fortes variations journalières de pompage ne pouvant être modélisée au pas de temps mensuel).

En moyenne, les écarts absolus entre valeurs mesurées et simulée sont de 20cm. En comparaison, la nappe a un dénivelé de 10.33m entre MR50 et la mer. Dans le pire des cas, en septembre 2009, l'erreur sur le gradient de la nappe est de 3%. Ces écarts sont faibles et valident le calage du modèle.

Le modèle représente correctement le fonctionnement hydrodynamique de la nappe. Il pourra donc être utilisé comme outil de simulation pour les différents scénarios envisagés.

#### 2.3.2.3. COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT

Le modèle prend en compte des valeurs d'emménagement différentes suivant que l'aquifère est confiné ou pas. A l'aval des champs captant de Grenouille et Val d'Astier, la nappe est captive et l'emménagement spécifique est de l'ordre  $5.10^{-4}$  et  $5.10^{-3}/m$ . En amont, l'aquifère est libre et les porosités efficaces sont de l'ordre de 8 %.

Ces valeurs sont cohérentes avec la nature des formations lithologiques rencontrées et avec les résultats des essais de pompage. Elles permettent de reproduire les variations piézométriques de la nappe.

#### 2.3.2.4. RESTITUTION DES DEBITS DES RIVIERES

Par l'intermédiaire du module « Stream » décrit dans le paragraphe 1.2.3.6.1, il est possible d'obtenir le débit du cours d'eau sur chaque maille du modèle contenant une rivière et pour chaque pas de temps.

##### 2.3.2.4.1. Restitution des chroniques de débits des rivières

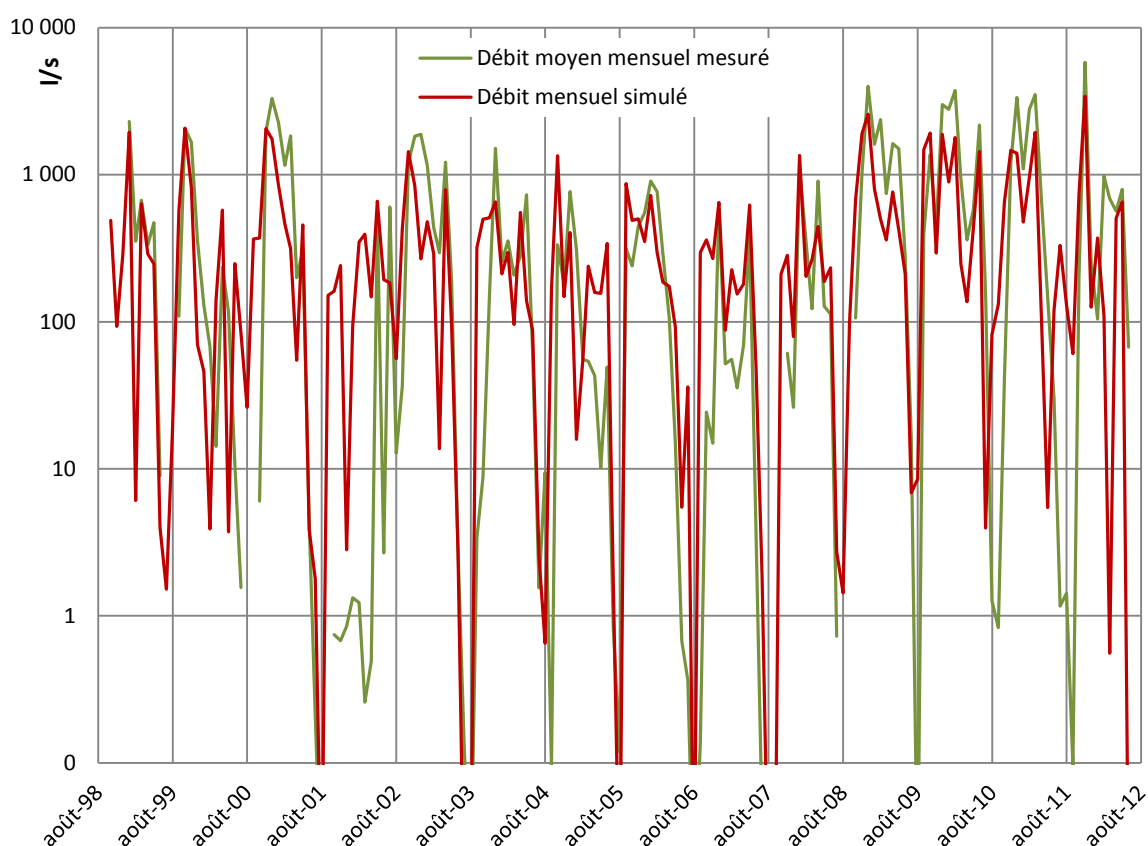
Deux stations hydrométriques sont présentes sur la zone (données Banque Hydro):

- celle de Cogolin (Y542010), située sur la Giscle au niveau du pont de la D558, caractérise le régime du bassin versant amont Giscle/Grenouille.
- celle des Ajusts (Y544010), située sur la Giscle après sa confluence avec la Môle, caractérise le régime de l'ensemble du bassin versant de la Môle et du bassin versant amont Giscle/Grenouille.

Les variations de débits aux stations hydrométriques sont généralement bien représentées. Toutefois, l'observation des mesures journalières montrent que les cours d'eau sont très réactifs vis-à-vis des événements pluvieux : le débit peut passer de 0 à 10l/s du jour au lendemain et redescendre à 0 le surlendemain. Le pas de temps mensuel du modèle ne peut ni reproduire ces variations journalières ni leur moyenne. En effet, une pluviométrie moyenne entrée dans le module Stream, n'aura pas le même comportement qu'une forte pluie ponctuelle précédée d'une période sèche. C'est donc la tendance, plutôt que la valeur absolue de la modélisation, qui doit être considérée.

A la station de Cogolin, les débits et la dynamique du cours d'eau sont correctement simulés. Seuls les asssecs de 2002 et 2009 à 2011 ne sont pas suffisamment représentés. Les prélèvements aux champs captant de la Giscle ayant un impact majeur sur la nappe et ses relations avec la rivière, les incertitudes sur les volumes prélevés peuvent expliquer ce décalage.

Pour les périodes de hautes eaux, il faut également rappeler que le module *Stream* est un module utilisé dans un modèle hydrogéologique, il ne calcule donc que les débits des cours d'eau en fonction des interactions nappe/rievière et des débits d'entrées. D'autres composantes hydrologiques (tels que le ruissellement par exemple) jouant un rôle dans le débit d'une rivière (notamment en période de Hautes Eaux) ne sont pas prises en compte dans un modèle hydrogéologique. Ce phénomène pourrait expliquer les différences entre débits observés et simulés pour les périodes de hautes eaux.

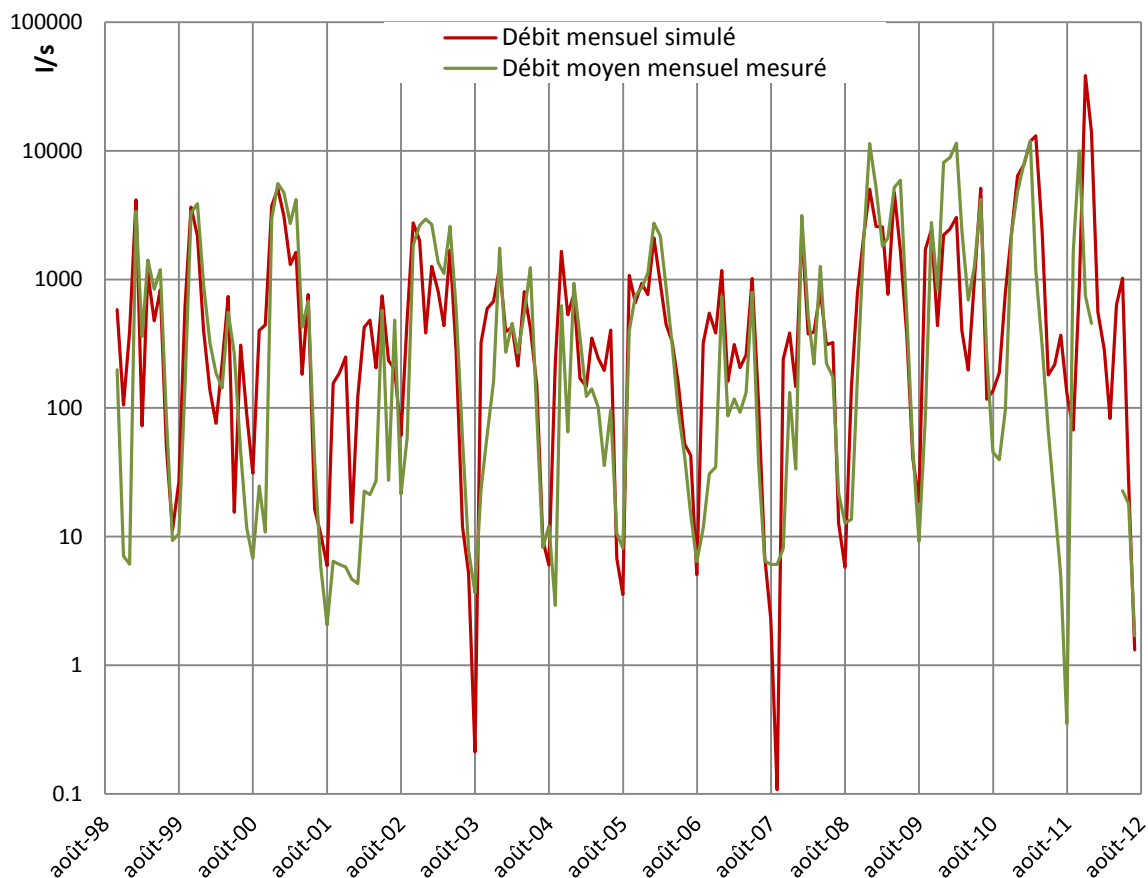


**Figure 34 - Evolution des débits observés et simulés de la Giscle à la station de Cogolin en l/s.**

A la station des Ajusts (Figure 35), les variations de débit sont généralement bien représentées, avec les mêmes limites de calcul que pour la station de Cogolin.

Les débits en basses eaux modélisés en 2003 et 2007 sont trop hauts. Les débits rejetés depuis la STEP de Cogolin pourraient être surestimés et annuler la baisse estivale des débits. Par contre en été 2011,





**Figure 35 - Evolution des débits observés et simulés de la Giscle à la station des Ajusts**

#### 2.3.2.4.2. Restitution des cartes de débits des rivières

Pour les deux situations de référence, août 2003 et septembre 2012, les cartes de débits simulés montrent les zones en assec estival (*Figure 36* et *Figure 37*). Ces zones sont en adéquation avec les observations de terrain sur les tronçons de rivière en assec.

Les tronçons en assec sont plus étendus en 2003, période plus sèche, qu'en 2012, période beaucoup plus humide.

La Môle est en assec avant la confluence avec la Verne qui apporte un débit de réserve de 60l/s maintenant la rivière en eau jusqu'au champ captant du Val d'Astier.

Ensuite, l'influence des pompages est prépondérante et provoque probablement l'assec de la rivière. En effet, les pompages abaissent localement le niveau de la nappe en dessous du lit de la rivière provoquant l'assèchement du cours d'eau (cette proposition sera confirmée par la modélisation à l'état dit « sans pompages » au chapitre 3). A partir du rejet de l'usine de traitement AEP de la Môle, la rivière est maintenue en eau.

# Etude des alluvions de la Giscle et de la Môle – Détermination des volumes maximums prélevables – Préservation de la ressource stratégique

Rapport de phase 3 – Impact des prélèvements et quantification de la ressource

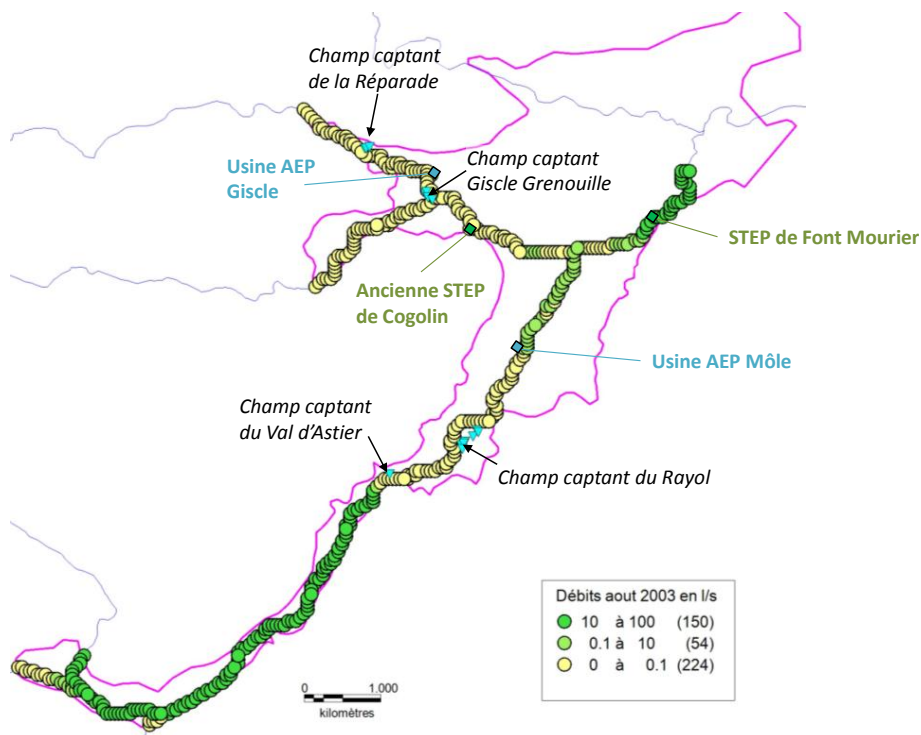


Figure 36 - Carte des débits simulés pour le mois d'août 2003

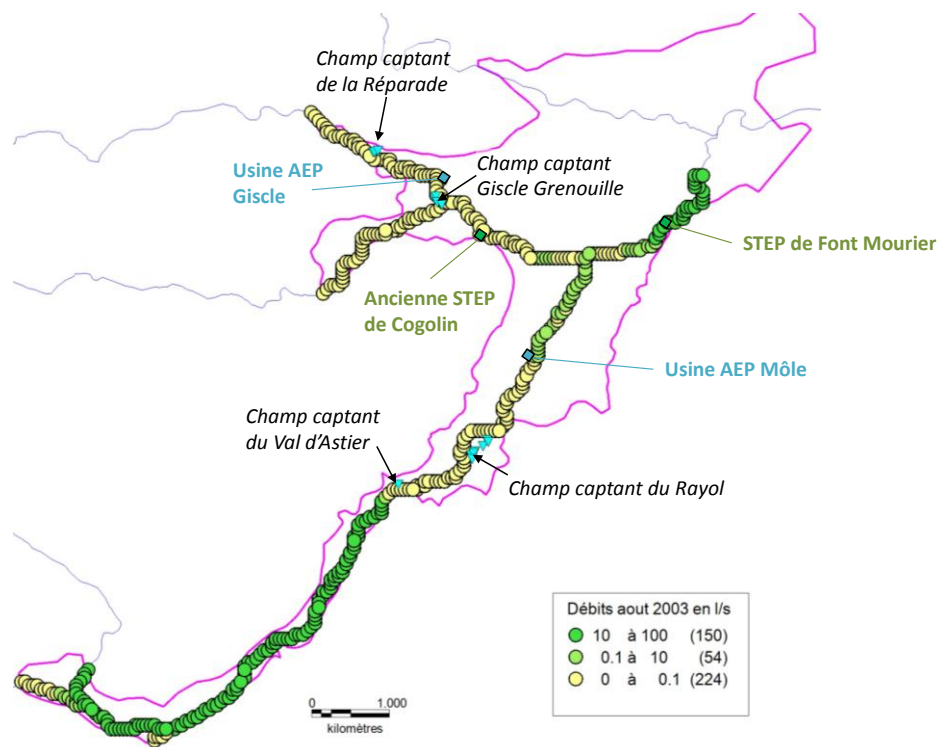


Figure 37 - Carte des débits simulés pour le mois de septembre 2012

## Etude des alluvions de la Giscle et de la Môle – Détermination des volumes maximums prélevables – Préservation de la ressource stratégique

Rapport de phase 3 – Impact des prélèvements et quantification de la ressource

L'utilisation du module *stream* permet de connaître le débit transitant dans chaque maille du cours d'eau.

Les Figure 38 et Figure 39 permettent de visualiser l'évolution du débit des rivières lors de leur traversée de la plaine alluviale. La distance linéaire d'amont en aval est matérialisée en abscisse. En ordonnée est indiqué le débit du cours d'eau. Lorsque le débit est égal à 0 l/s, le tronçon correspondant est en assec. Chaque courbe correspond à un mois entre juin et octobre 2013.

Pour la Môle et la Giscle, des tronçons sont en assecs de juillet à septembre 2003. L'étendue de ces assecs dépend de la confluence avec les autres cours d'eau, les rejets en rivière et les champs captant.

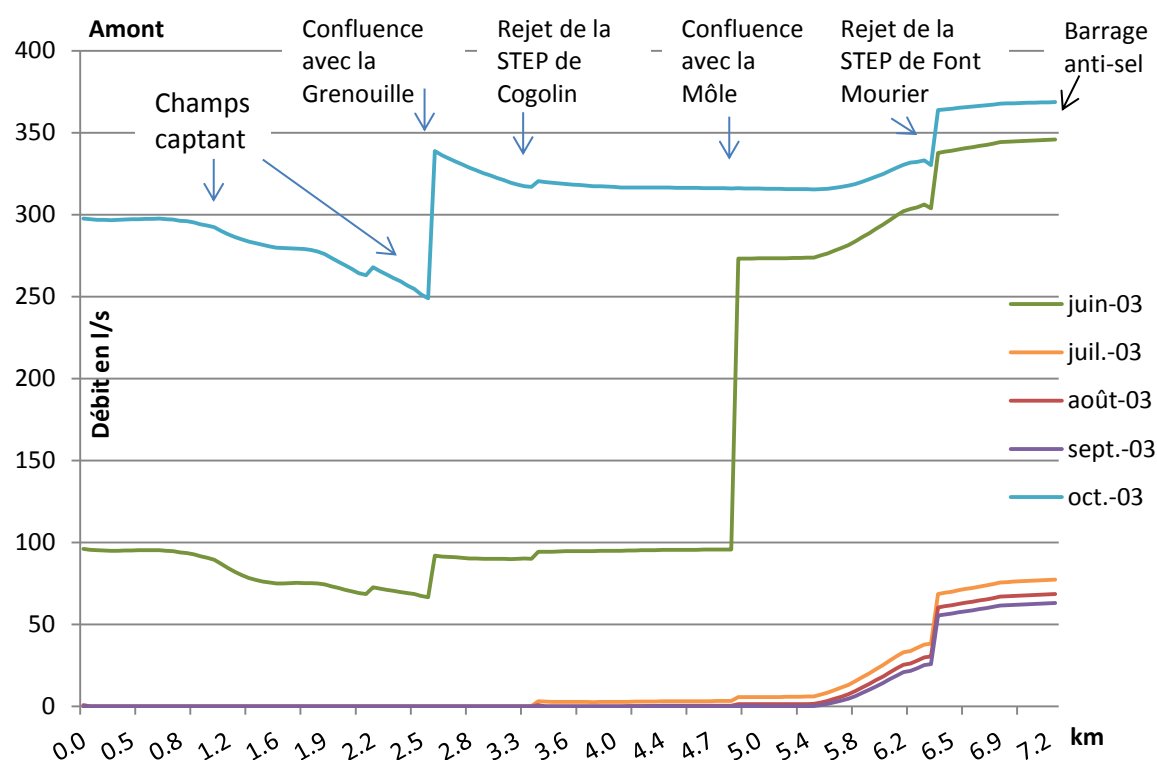
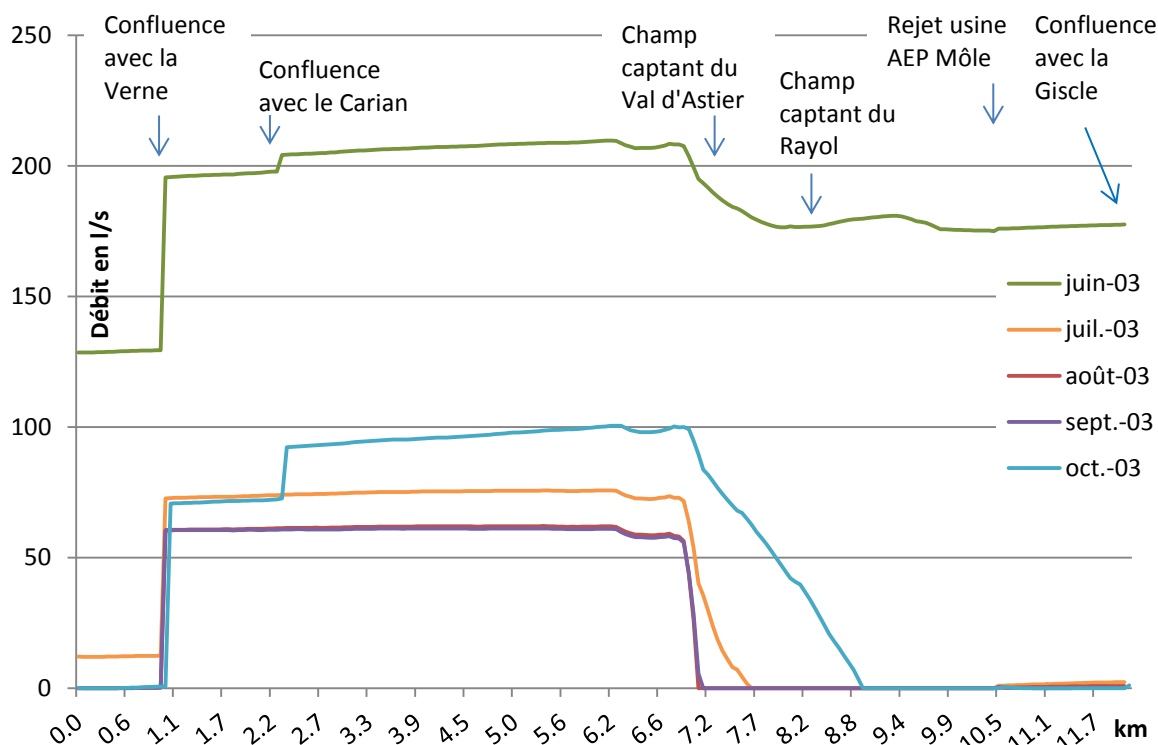


Figure 38 – Résultats du module stream sur les débits d'amont en aval le long la Môle de juin à octobre 2003

Le long de la Giscle (Figure 38), en juin et octobre 2003, le débit diminue au niveau des champs captant. Il augmente à nouveau à partir de la confluence avec la Grenouille.

Le rejet de la STEP de Cogolin permet la remise en eau de la Giscle au mois de juillet 2003. Une augmentation significative du débit est provoquée par le rejet de la STEP de Font Mourier.



**Figure 39 - Résultats du module stream sur les débits d'amont en aval le long la Giscle de juin à octobre 2003**

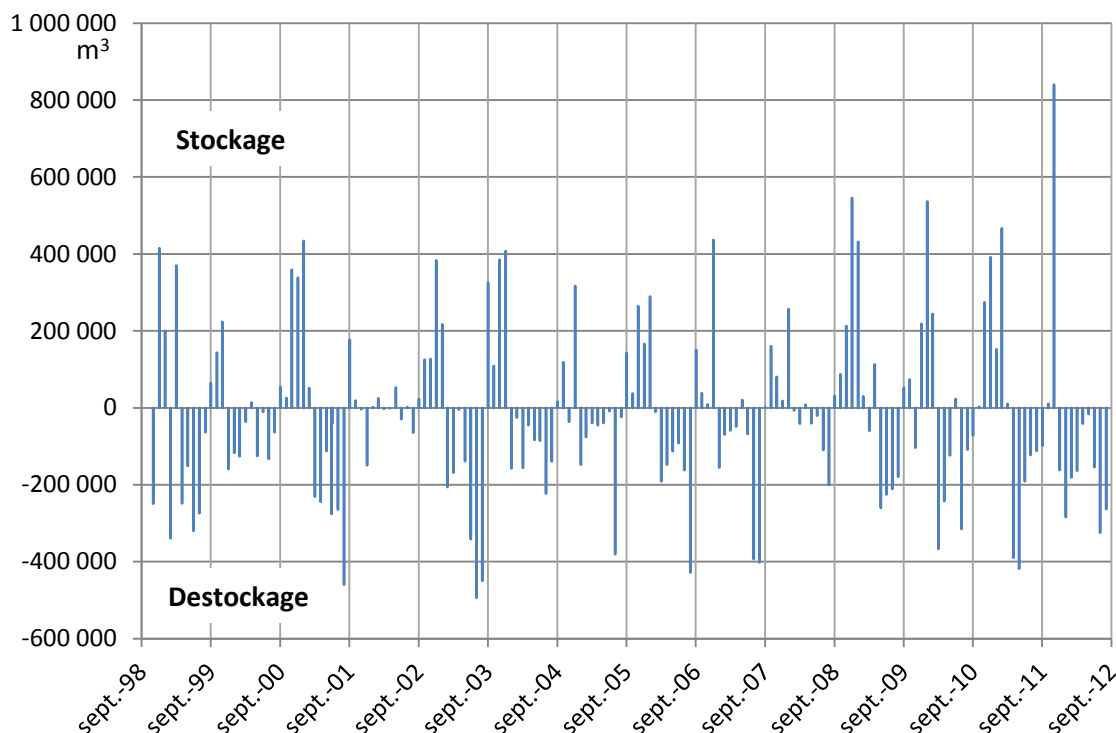
Le long de la Môle (Figure 39), la confluence avec le Verne apporte un débit important alors que le cours d'eau est en assec en août septembre et octobre 2003.

Les champs captant du Val d'Astier et du Rayol diminuent fortement le débit jusqu'à provoquer des assecs.

### 2.3.3. Bilan hydrologique

L'analyse du bilan stockage/déstockage de la nappe et des flux calculés par le modèle est un autre moyen de contrôler la validité et la cohérence des résultats obtenus.

Pour chaque mois, il a été dressé un bilan hydraulique des entrées et des sorties globales de l'aquifère modélisé. La figure suivante montre l'évolution des volumes stockés et déstockés par mois (Figure 40).



**Figure 40 - Bilan mensuel stockage-déstockage de la nappe des alluvions de Môle-Giscle.**

L'évolution des volumes stockés et déstockés montre que la nappe se décharge pendant la première moitié de l'année (de janvier à août) et se recharge essentiellement en automne (de novembre à février).

Les flux entrants correspondent :

- à l'alimentation par les rivières,
- aux recharges pluviométriques directes au droit de la plaine alluviale,
- aux recharges pluviométriques latérales à partir des flux ruisselés sur les versants.

Les flux sortants correspondent :

- aux prélèvements en nappe,
- aux flux évacués en mer,
- au drainage de la nappe par les rivières.

L'importance relative de ces différents termes du bilan hydraulique est figurée sur le graphe suivant (Figure 41).

Le stockage en nappe au cours de l'automne et de l'hiver correspond aux périodes de fortes précipitations (novembre à mars). Globalement, la recharge météorologique est la principale contributrice. La nappe est en général saturée et ses eaux sont alors drainées par les rivières et la mer dans la partie aval. Les pompages ne sollicitent pas les réserves de la nappe.

Au printemps et en été (mai à septembre), les apports à la nappe sont limités et les flux extraits par pompage ne sont pas équilibrés par la pluviométrie et l'apport des cours d'eau. Les réserves

## Etude des alluvions de la Giscle et de la Môle – Détermination des volumes maximums prélevables – Préservation de la ressource stratégique

Rapport de phase 3 – Impact des prélèvements et quantification de la ressource

accumulées en hiver sont alors mobilisées. La baisse des niveaux piézométriques accentue l'alimentation de la nappe par les cours d'eau jusqu'à la formation d'assecs.



Figure 41 - Evolution annuelle des termes du bilan hydraulique souterrain en m<sup>3</sup>/mois

La Figure 42, présente le bilan de la nappe et les pompages cumulés sur les 14 années de l'étude. A l'échelle de la période modélisée, le bilan de nappe est très faiblement négatif avec 2 Mm<sup>3</sup> de déficit (pour 31 Mm<sup>3</sup> pompés en nappe et 69 Mm<sup>3</sup> de recharge).

De façon générale, d'août 1998 à août 2008, le bilan est légèrement négatif, il se stabilise ensuite. L'impact des facteurs climatiques et des prélèvements sur le bilan hydrique de la nappe est appréciable si l'on s'en réfère à la Figure 41 :

- Les importants pompages réalisés de 1998 à fin 2003 n'ont été que partiellement compensés par le climat relativement humide de l'hiver 2002-2001.
- Les importants pompages de l'été 2003 ont eu un impact notable.
- Les conséquences d'un climat sec de 2004 à 2008 ont été amoindries par la diminution des pompages.
- Depuis 2008, les pompages raisonnés accompagnés d'un climat plus humide se traduisent par une stabilisation du bilan hydrique de la nappe.

# Etude des alluvions de la Giscle et de la Môle – Détermination des volumes maximums prélevables – Préservation de la ressource stratégique

Rapport de phase 3 – Impact des prélèvements et quantification de la ressource

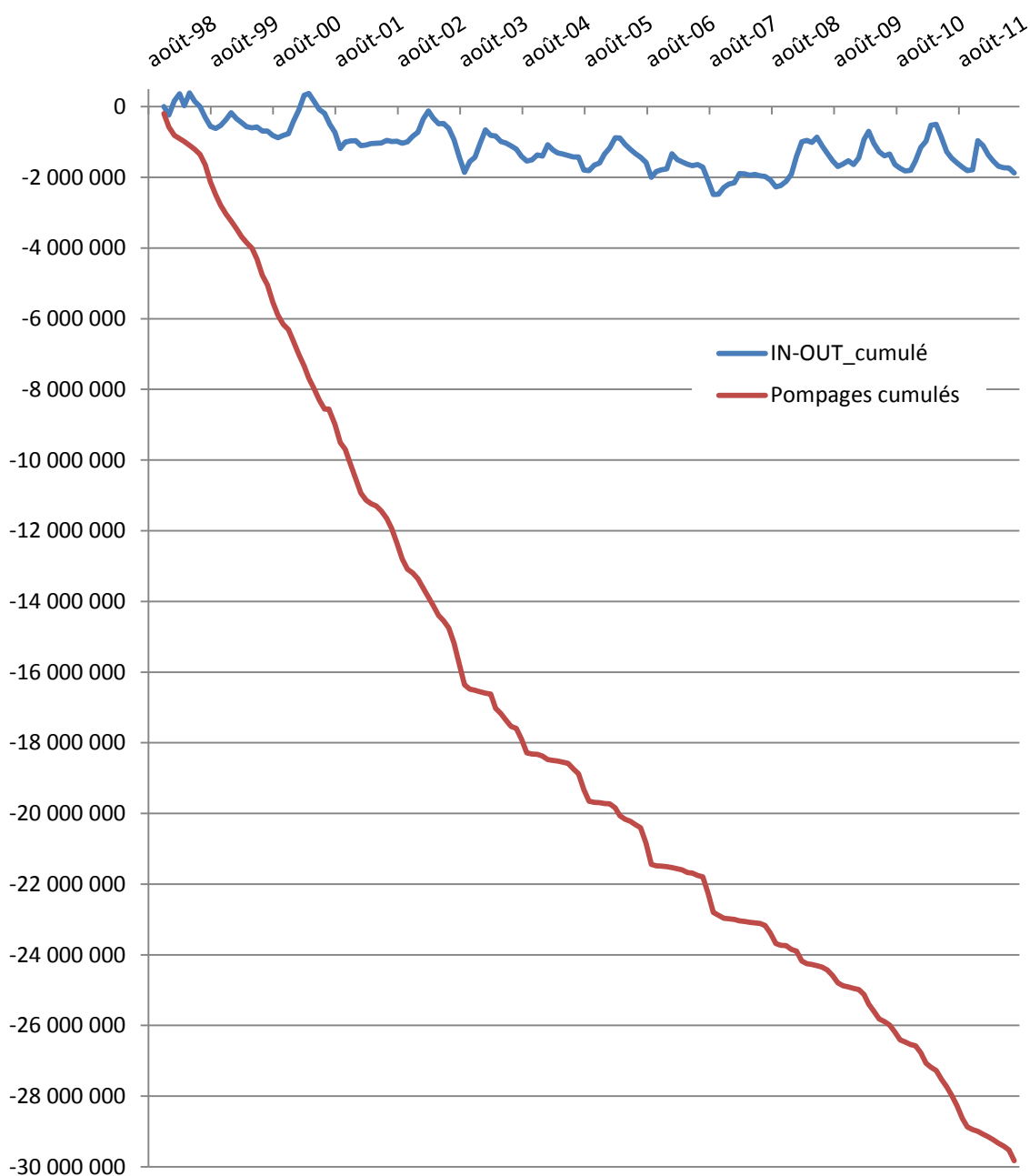


Figure 42 – Bilan des entrées moins les sorties cumulées du modèle et pompages cumulés sur la période modélisée en m<sup>3</sup>

## **3. RECONSTITUTION DE LA PIEZOMETRIE SANS POMPAGE**

### **3.1. PRINCIPE**

Une fois le modèle hydrogéologique correctement calé, il devient un outil permettant de tester l'influence sur la nappe et sur les rivières de différents scénarios de pompage exercés sur la nappe. L'objectif de notre premier scénario est de reproduire l'état de la nappe sans l'influence des pompages AEP liés aux prélèvements du SIDECM (arrêt de l'ensemble des pompages).

Nous avons donc effectué une simulation en régime transitoire, en conservant les paramètres issus du calage entre septembre 1998 et septembre 2012 (pluviométrie, paramètres hydrodynamiques, etc.).

Tous les pompages ont été supprimés afin de simuler une situation non influencée par les pompages AEP et privés. Les autres conditions limites sont identiques à celles du calage en régime transitoire. Ces résultats ont été comparés à la situation réelle, avec pompages.

### **3.2. RESULTATS DU SCENARIO - ABSENCE DE POMPAGE EN NAPPE**

#### **3.2.1. Chroniques piézométriques**

L'ensemble des chroniques piézométriques sont disponibles en annexes.

Les niveaux piézométriques dans les ouvrages situés dans les zones d'influences des captages réagissent à l'absence de pompage (Figure 43 à Figure 46). On observe logiquement que l'impact des pompages diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne des champs captant (MR26 est plus influencé que MGR10). Les chroniques en aval ou en amont des zones d'influences sont inchangées par l'absence de pompage.

L'influence des pompages est majeure en période de basses eaux (juin à octobre) car :

- d'une part, c'est en été que les prélèvements souterrains sont les plus importants (principalement juillet et août),
- d'autre part, la nappe n'est alimentée ni par la pluviométrie, ni par les cours d'eau. Ces derniers s'assèchent en été au niveau des champs captant qui, à cause des pompages, s'assèchent en été et n'alimentent plus la nappe. En été, les pompages AEP mobilisent la nappe alluviale dont le volume d'eau est limité.

En période hivernale, l'alimentation de la nappe est suffisante et les pompages n'ont pas d'influence sur les niveaux piézométriques (*mis à part au droit des champs captant où la piézométrie non influencée peut être légèrement plus haute*).

L'impact des prélèvements souterrains sur la nappe est peu marqué au cours des années humides telles que 2009, 2010 et 2011.



## Etude des alluvions de la Giscle et de la Môle – Détermination des volumes maximums prélevables – Préservation de la ressource stratégique

Rapport de phase 3 – Impact des prélèvements et quantification de la ressource

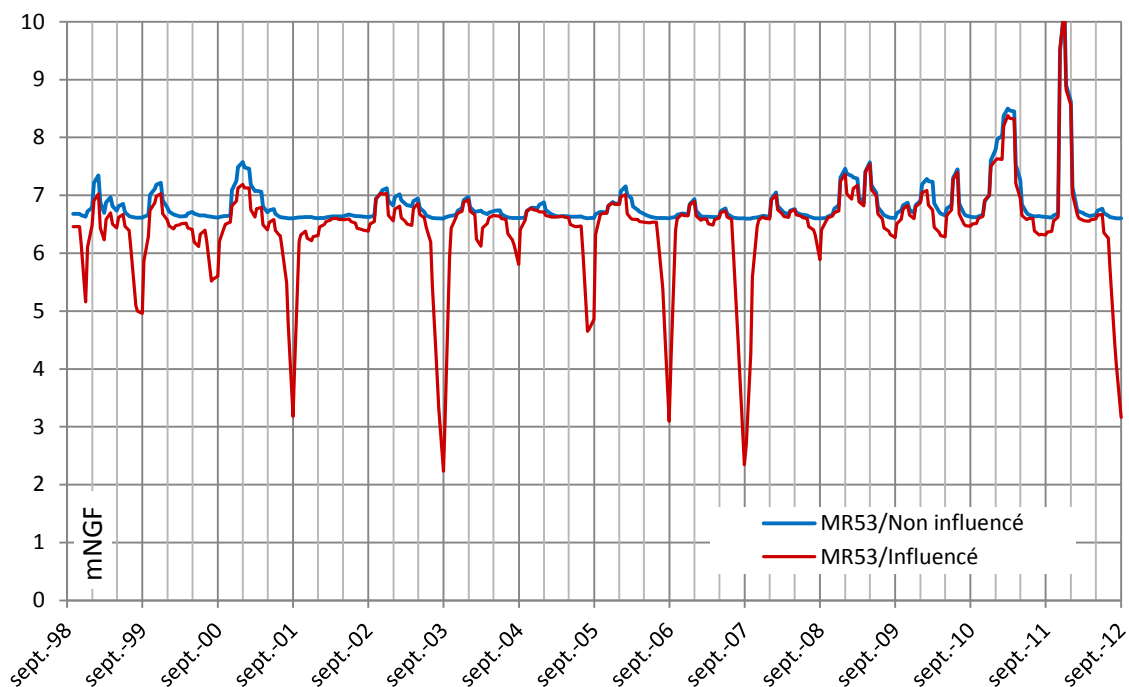


Figure 43 - Chroniques piézométriques simulées avec et sans prélèvement pour le piézomètre MR53 situé entre les champs captant du Val d'Astier et du Rayol (voir Figure 26 pour la localisation).

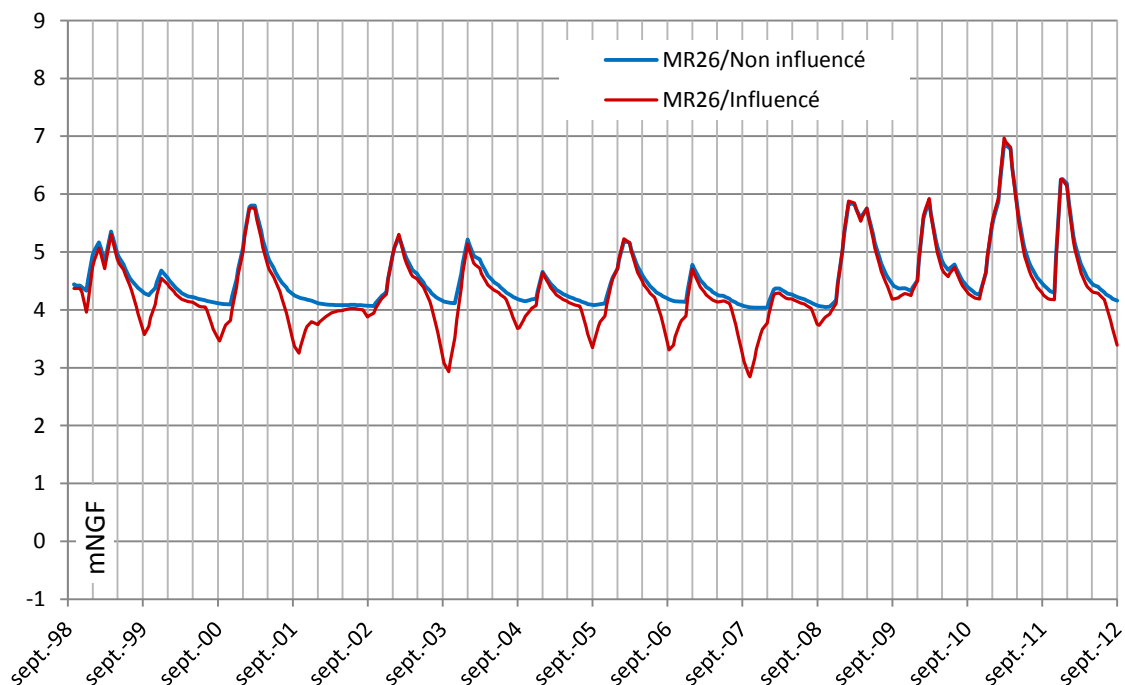


Figure 44 - Chroniques piézométriques simulées avec et sans prélèvements pour le piézomètre MR26 situé sur l'ancien champ captant des Pasquiers.

## Etude des alluvions de la Giscle et de la Môle – Détermination des volumes maximums prélevables – Préservation de la ressource stratégique

Rapport de phase 3 – Impact des prélèvements et quantification de la ressource

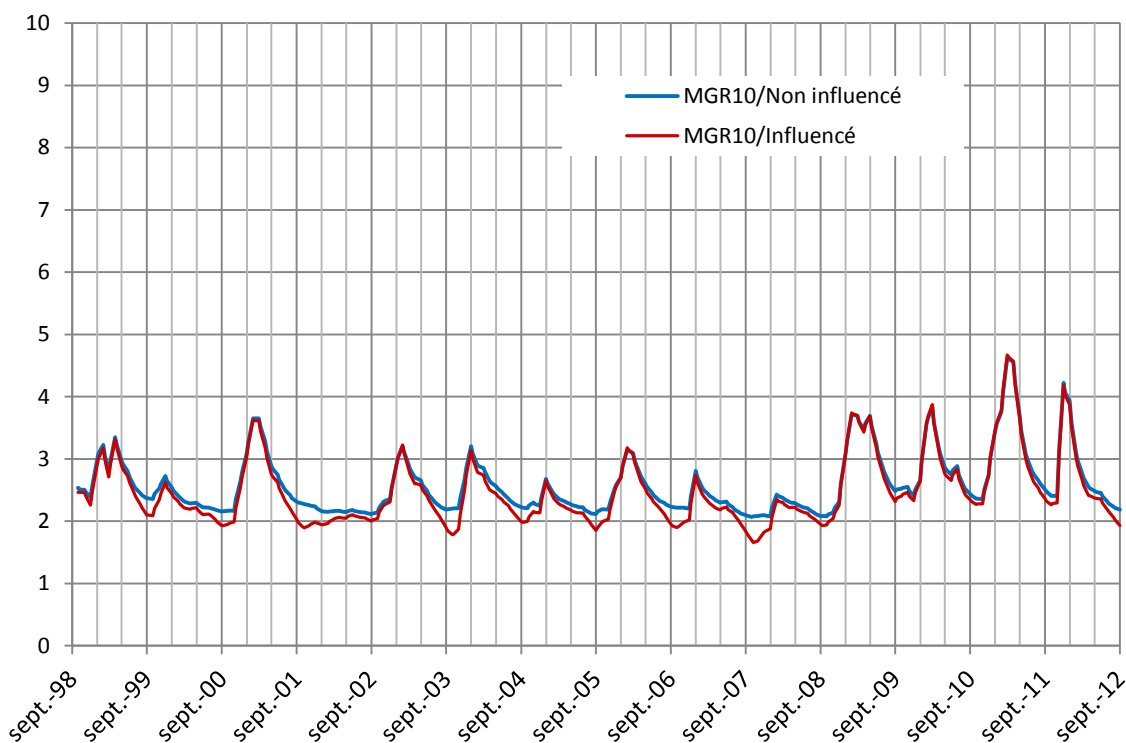


Figure 45 - Chroniques piézométriques simulées avec et sans prélèvement pour le piézomètre MGR10 situé dans la partie distale du champ d'influence des captages de la Môle.

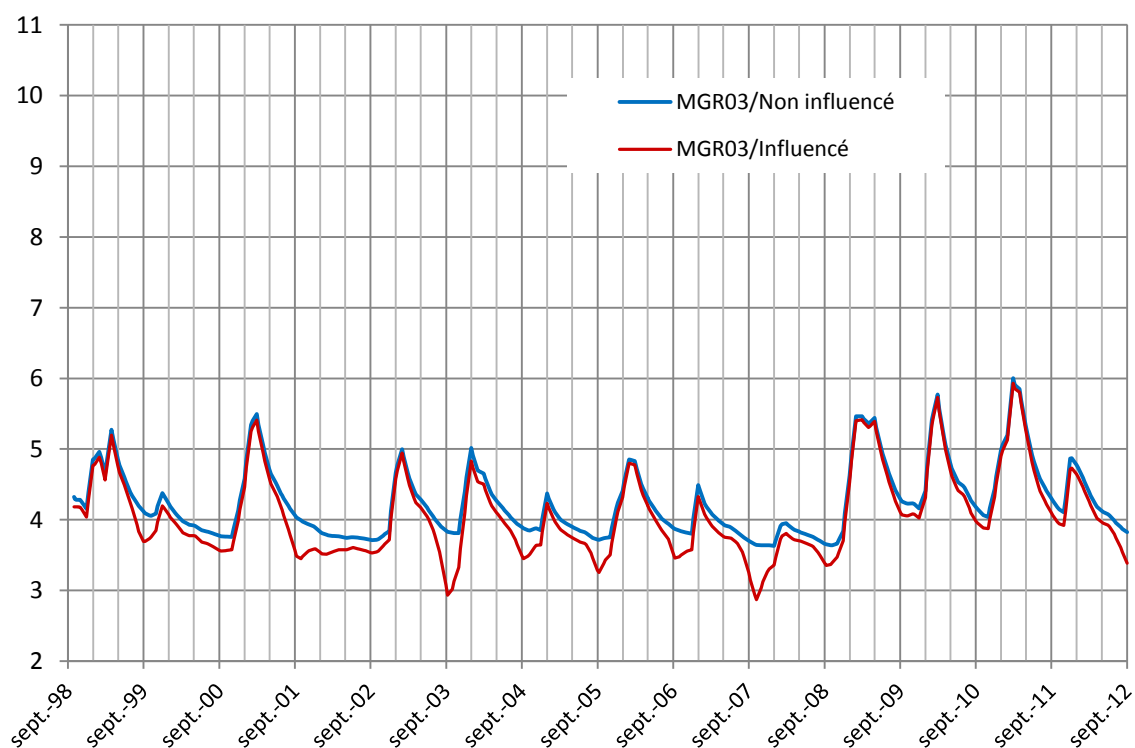


Figure 46 - Chroniques piézométriques simulées avec et sans prélèvement pour le piézomètre MGR03 situé dans la zone d'influence du champ captant de la Giscle Grenouille.

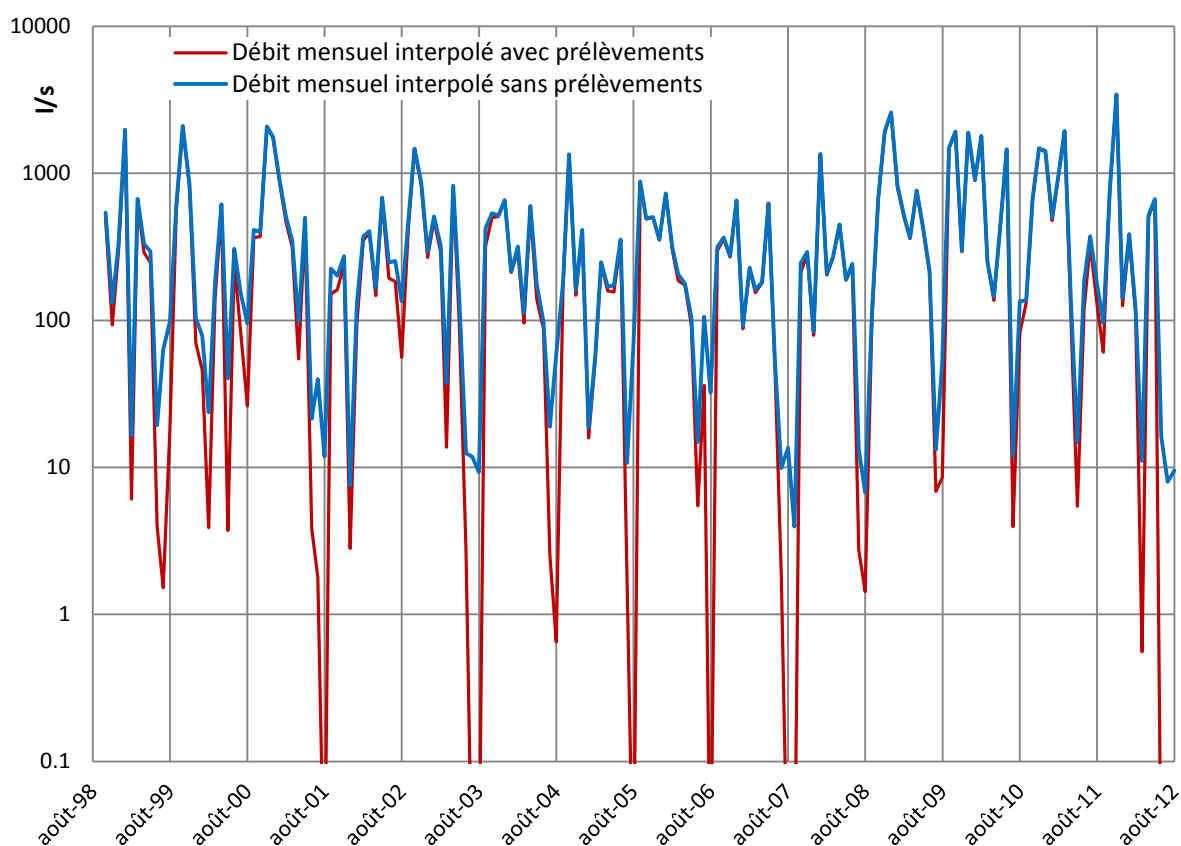
### 3.2.2. Débits des rivières

#### 3.2.2.1. DEBITS AUX STATIONS HYDROMETRIQUES

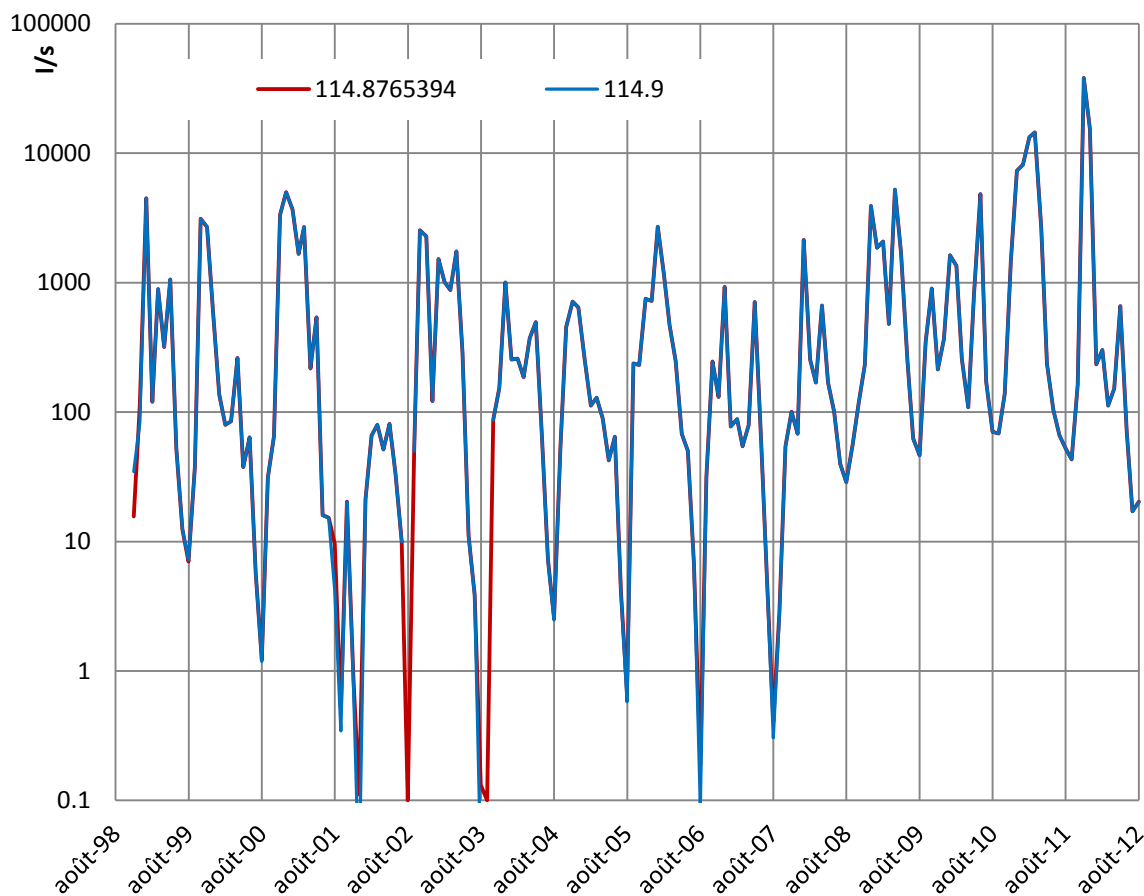
La simulation sans pompages permet aussi de qualifier l'impact des prélèvements souterrains sur le débit des rivières. L'influence est majeure en période de basses eaux, de juin à octobre (Figure 47 et Figure 48).

A l'échelle mensuelle, l'arrêt des prélèvements annule les assecs aux stations de la Cogolin et des Ajusts.

En périodes de hautes eaux, les débits sont inchangés. Les apports météoriques sont majeurs par rapport aux prélèvements.



**Figure 47 - Débits mensuels simulés de la Giscle avec et sans prélèvements souterrains à la station de Cogolin.**



**Figure 48 - Débits mensuels simulés de la Giscle avec et sans prélèvements souterrains à la station des Ajusts.**

### 3.2.2.2. CARTE DES DEBITS SIMULES

La Figure 49 montre la carte des débits des rivières simulés sans pompages pour le mois d'août 2003.

Des assecs persistent seulement sur les tronçons amont des rivières Giscle, Grenouille et Môle. La Giscle est en eau à partir du rejet de l'usine de traitement AEP.

Le débit réservé du barrage apporte un débit toute l'année à la Môle à partir de sa confluence avec la Verne.

La Figure 50 montre la carte des débits des rivières sans prélèvements souterrains pour le mois de septembre 2012. Cette période est plus humide que la précédente et seul un segment de la Grenouille est en assec.

Les assecs sont beaucoup moins étendus que sur les cartes des débits avec prélèvement (Figure 36 et Figure 37).

Les prélèvements souterrains amplifient les phénomènes d'assecs sur les 2 cours d'eau.

# Etude des alluvions de la Giscle et de la Môle – Détermination des volumes maximums prélevables – Préservation de la ressource stratégique

Rapport de phase 3 – Impact des prélèvements et quantification de la ressource

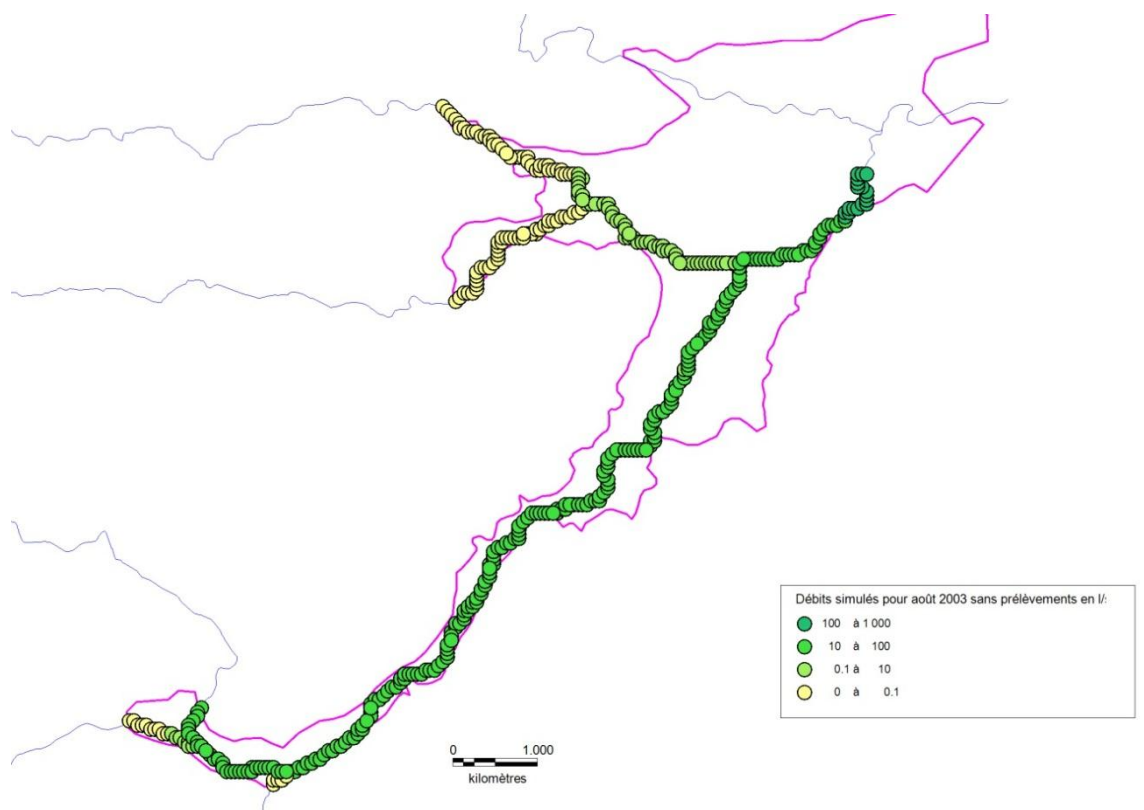


Figure 49 - Carte des débits simulés sans pompages souterrains pour le mois d'août 2003

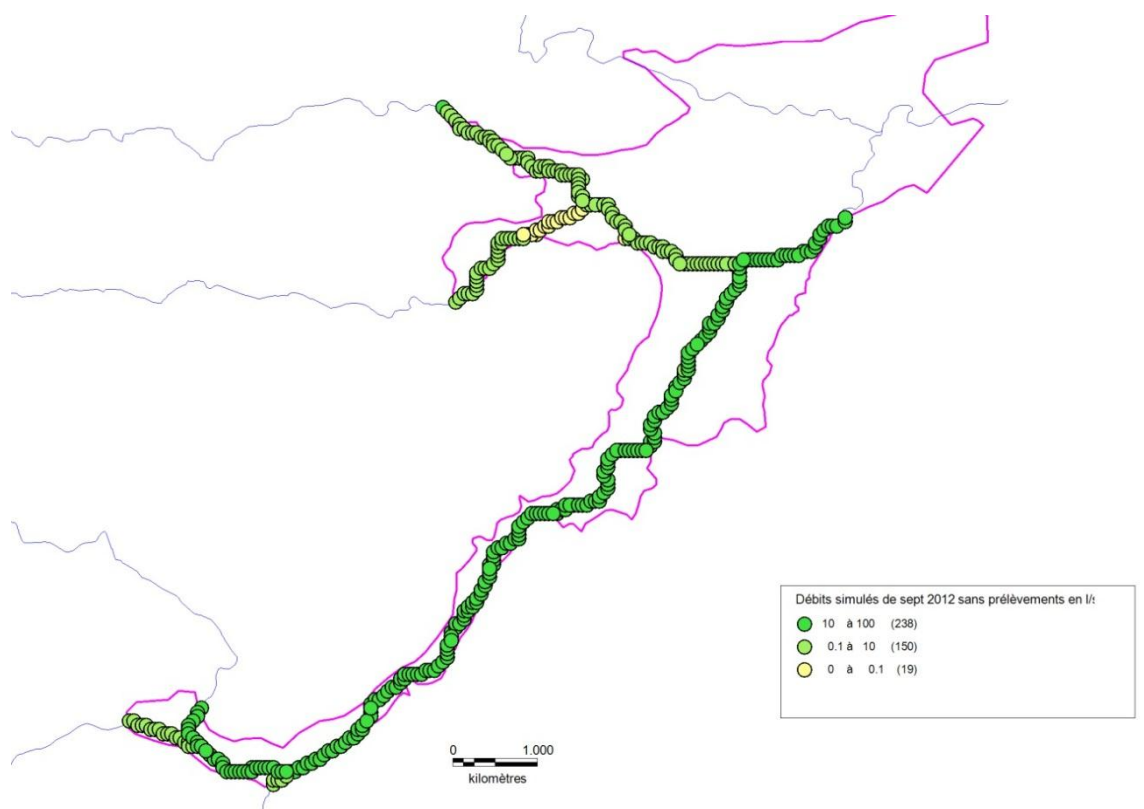


Figure 50 - Carte des débits simulés sans pompages pour le mois de septembre 2012

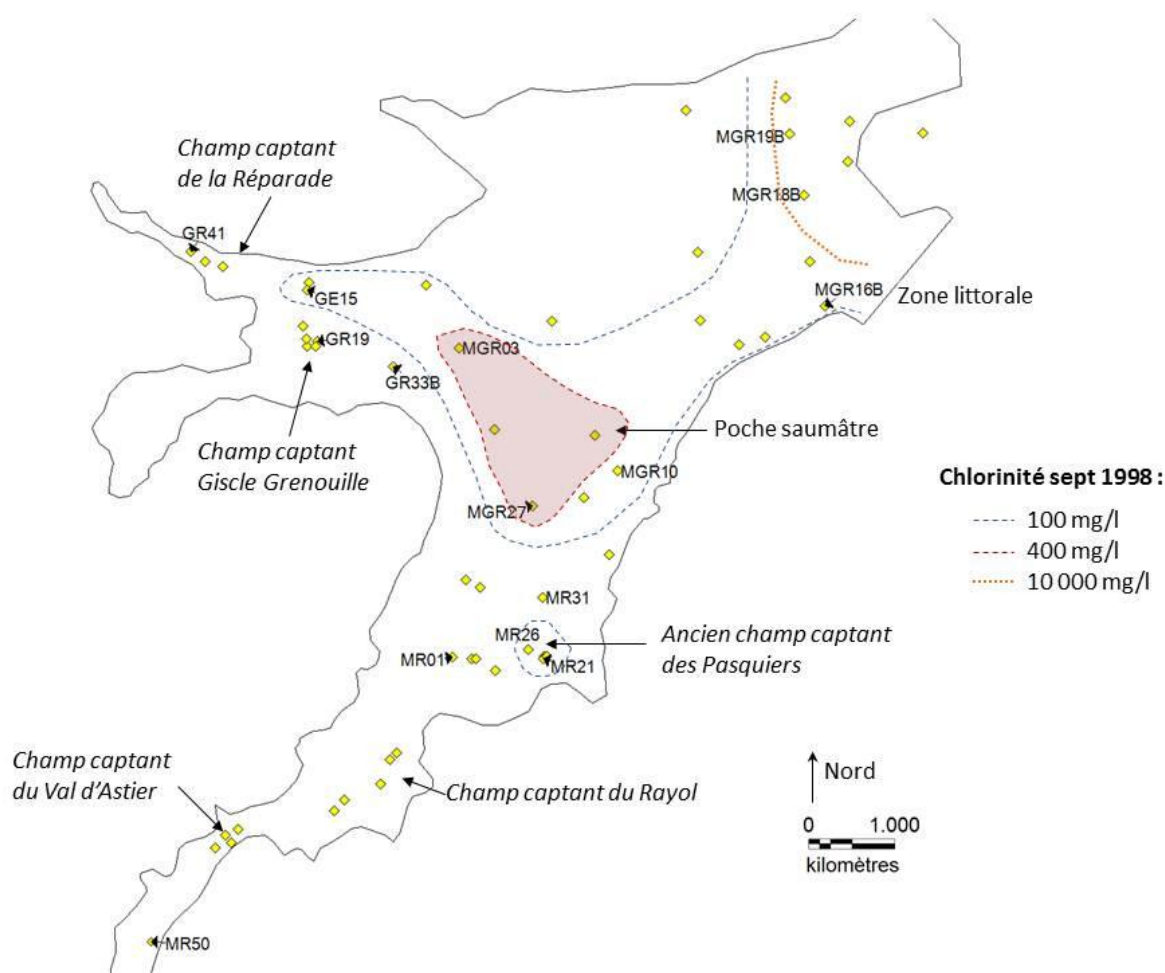
## 4. ETUDE DU BISEAU SALE

### 4.1. DONNEES DISPONIBLES

Le SIDECM réalise des mesures régulières de conductivité et de teneurs en chlorures sur son réseau de piézomètres (Figure 51).

L'exploitation de ces données est toutefois rendue difficile car les niveaux prélevés pour effectuer les mesures varient au cours des campagnes et l'équipement de la plupart des ouvrages suivis n'est pas connu (*notamment au niveau de la poche saumâtre où ne sont connus ni la lithologie ni l'équipement*). De plus, certains ouvrages se sont bouchés au cours du temps réduisant la profondeur d'origine des ouvrages (de 34 à 9 m par exemple pour le MGR18).

Nous avons donc utilisé au mieux les données disponibles pour étudier le phénomène de salinisation des eaux de la nappe par avancée du biseau salé.



**Figure 51 - Localisation des piézomètres suivis en chlorinité et nom des piézomètres dont les chroniques sont présentées ci-après**

Nous avons retenu les ouvrages qui présentent des mesures les plus complètes et situées sur les zones caractéristiques du problème de salinité :

## Etude des alluvions de la Gisle et de la Môle – Détermination des volumes maximums prélevables – Préservation de la ressource stratégique

Rapport de phase 3 – Impact des prélèvements et quantification de la ressource

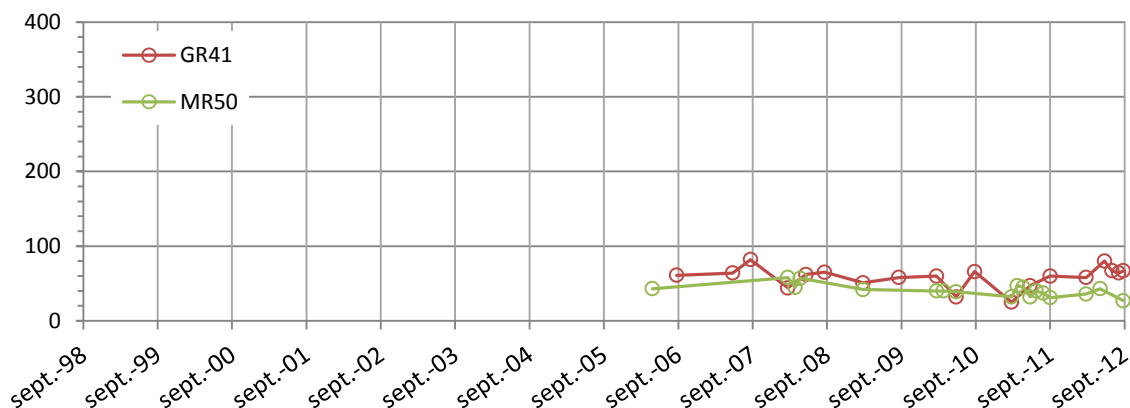


Figure 52 - Chroniques de chlorinité dans les piézomètres amont du modèle en mg/l

Les points les plus en amont du modèle (MR50 et GR41, Figure 52) montrent un « bruit de fond » de la nappe entre 30 et 60 mg/l de concentrations en chlorures. Ces concentrations n'évoluent pas au cours de la période étudiée.

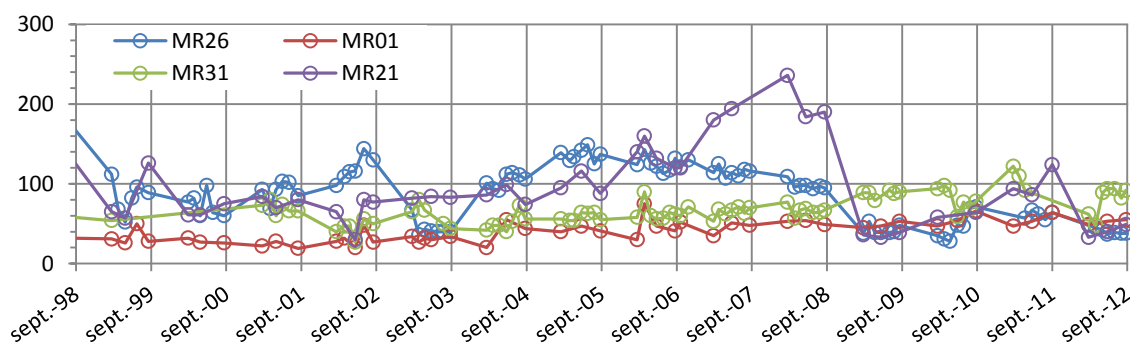


Figure 53 - Chroniques de chlorinité dans les piézomètres sur l'ancien champ captant des Pasquiers en mg/l

Sur l'ancien champ captant des Pasquiers (Figure 53), les ouvrages MR26 et MR21, à l'aplomb des anciens captages ont une chlorinité supérieure au bruit de fond de la nappe. Tous deux montrent une chute de chlorinité début 2009 qui se stabilise au niveau du « bruit de fond » de la nappe au cours des années 2010-2012.

Les ouvrages MR31 et MR01, plus distants de l'ancien captage, ont une salinité comparable à celle du « bruit de fond » de la nappe mais qui semble légèrement augmenter depuis 2006.

## Etude des alluvions de la Gisle et de la Môle – Détermination des volumes maximums prélevables – Préservation de la ressource stratégique

Rapport de phase 3 – Impact des prélèvements et quantification de la ressource

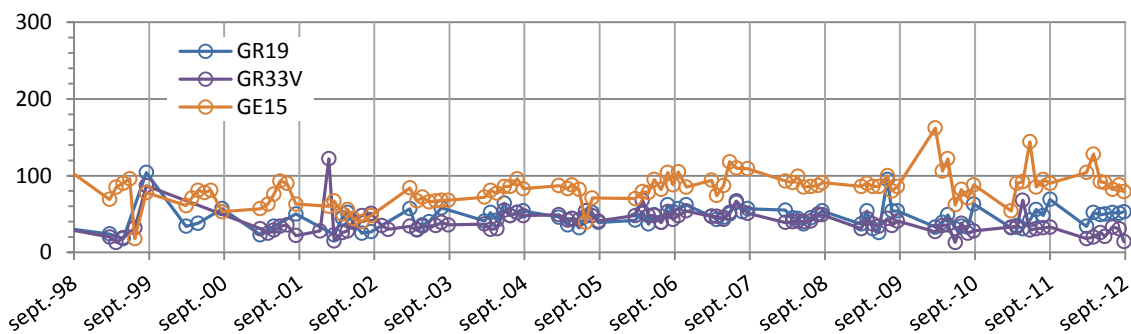


Figure 54 - Chroniques de chlorinité dans les piézomètres sur la zone du champ captant Gisle – Grenouille en mg/l

Dans la zone du champ captant Gisle Grenouille (Figure 54), la chlorinité est de l'ordre du « bruit de fond » de la nappe. Seul de GR15 est légèrement au-dessus et sa chlorinité augmente très légèrement au cours de la période étudiée.

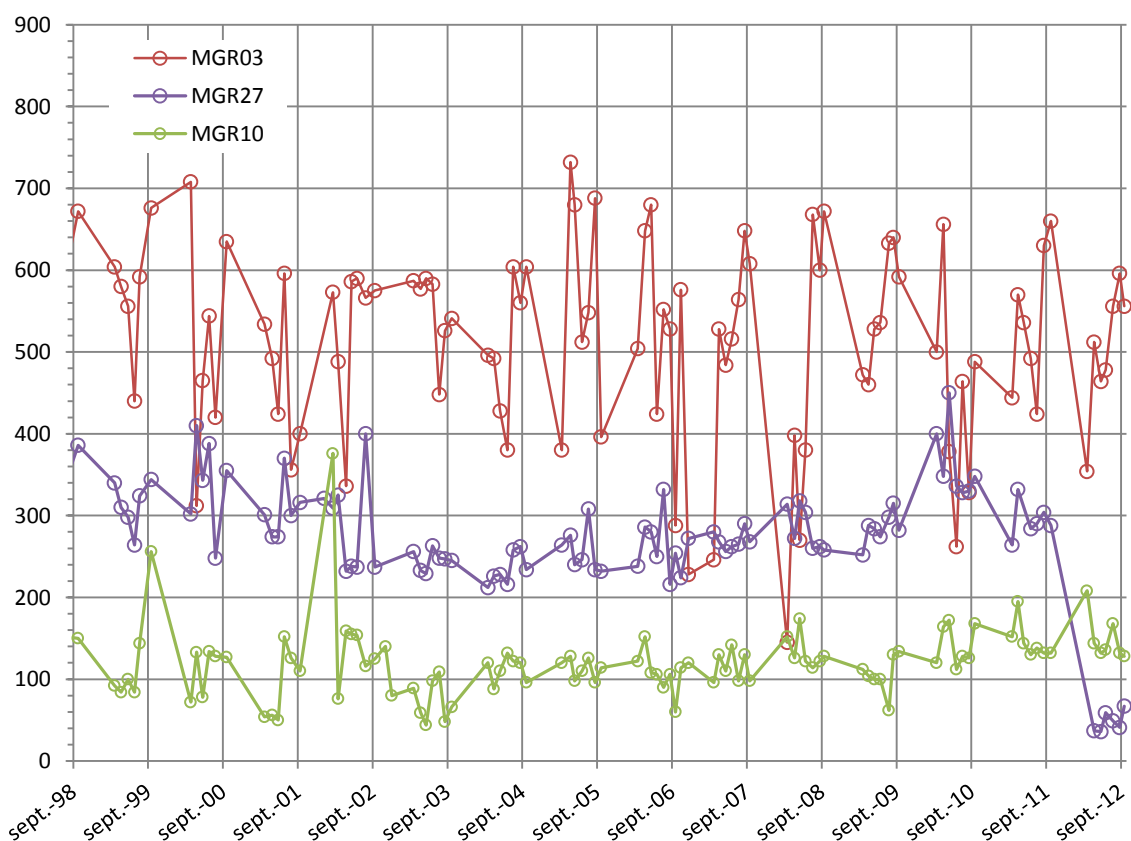


Figure 55 - Chroniques de chlorinité dans les piézomètres sur la poche saumâtre en mg/l

Les ouvrages MGR03, MGR27 et MGR10 (Figure 55), situés au niveau de la poche saumâtre, à la confluence des rivières Gisle et Môle ne présentent aucune évolution entre 1998 et 2012 (seul MGR27 subit une chute de chlorinité début 2012). MGR03 présente de fortes variations de chlorinité intra-annuelles. Parallèlement, son niveau piézométrique varie sur 2.5 m d'amplitude de façon saisonnière. Suivant la hauteur de la nappe et en fonction de la position



## Etude des alluvions de la Giscle et de la Môle – Détermination des volumes maximums prélevables – Préservation de la ressource stratégique

Rapport de phase 3 – Impact des prélèvements et quantification de la ressource

verticale de zones relativement salées, des fluctuations de chlorinité peuvent se produire au cours de l'année.

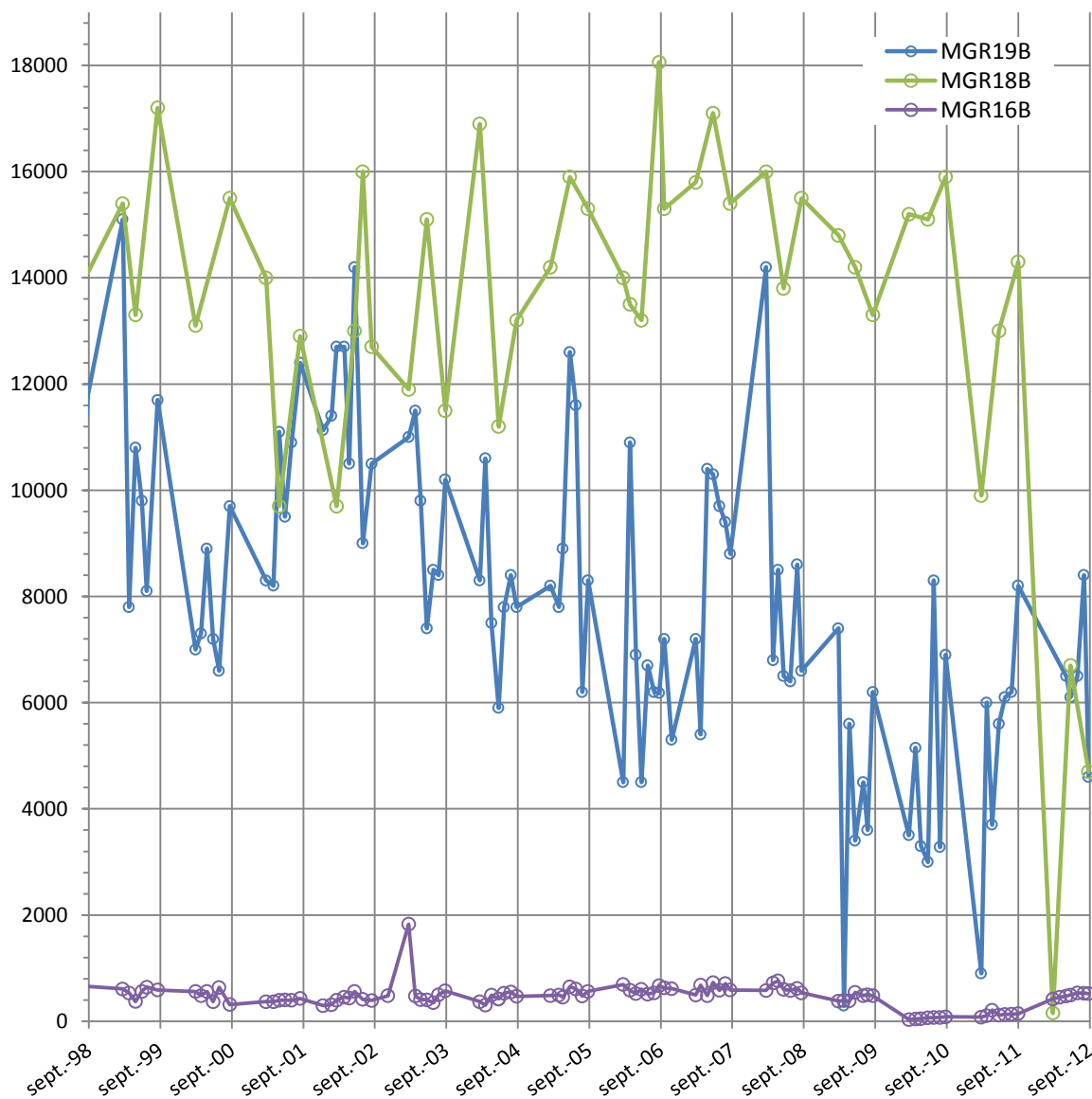


Figure 56 - Chroniques de chlorinité dans les piézomètres sur la zone littorale en mg/l

Au niveau de la zone littorale (Figure 56), la teneur en chlorures est beaucoup plus élevée (entre 4 et 14 g/l). Le MGR19B semble baisser en chlorinité sur l'ensemble de la période. Cette baisse pourrait être liée à un retrait progressif du biseau salé installé dans les années 1980. En effet, depuis cette période, la mise en place du barrage anti-sel ainsi que la réduction significative des pompages AEP ont permis de bloquer l'intrusion saline. L'importante inertie de retrait de biseau salé pourrait aboutir à la baisse contemporaine de la salinité au niveau de la frange côtière.

Le manque de coupes lithologiques, notamment au niveau de la zone saumâtre, et des informations lacunaires sur les piézomètres suivis, rendent le modèle complexe à caler.

Dans un premier temps, le modèle tentera donc de reproduire la stabilité des teneurs en chlorure observées au cours de la période 1998 à 2012.

Dans un second temps, le modèle permettra de définir les mécanismes de mise en place de la poche salée.

## **4.2. MODELISATION DE LA SALINITE**

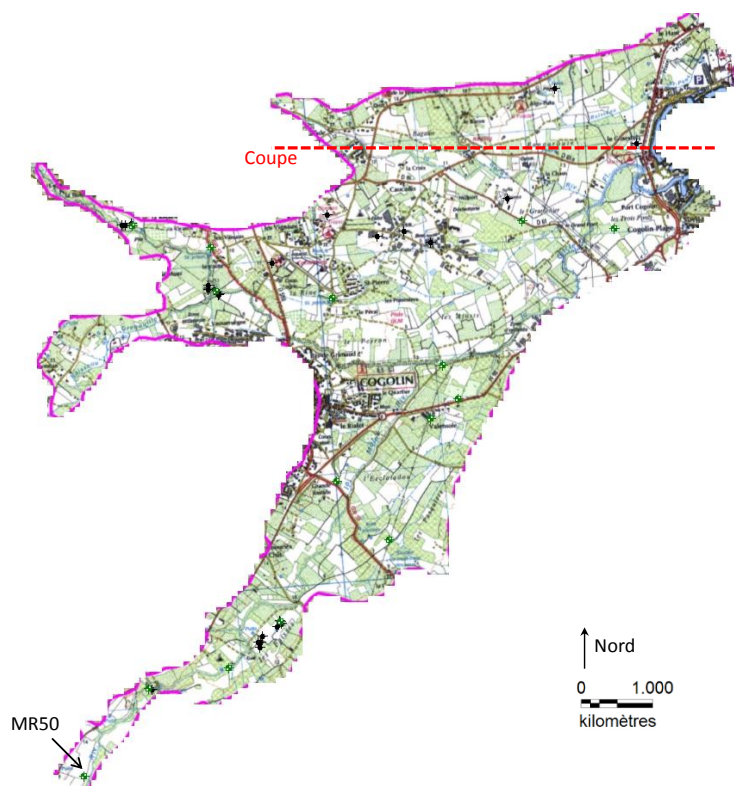
### **4.2.1. Algorithme utilisé**

Le programme SEAWAT a été développé pour simuler en trois dimensions l'écoulement des eaux souterraines à densité variable dans les milieux poreux. Il a été développé à partir du logiciel MODFLOW pour résoudre de façon couplée les équations de l'hydrodynamique et du transport de solutés.

Le maillage, les paramètres de calages et les conditions aux limites sont reprises du calage en régime transitoire de la modélisation hydrodynamique sous MODFLOW. Sont ajoutées les valeurs de salinité initiale dans l'aquifère, les concentrations dans les cours d'eau et au niveau de la mer.

### **4.2.2. Extension et maillage**

Nous avons repris la géométrie du modèle utilisée pour le calage en hydrodynamique. Mais le logiciel SEAWAT nécessitant des temps de calcul beaucoup plus longs, nous avons diminué l'emprise du modèle sur la vallée de la Môle. En effet, le piézomètre MR50 montre un niveau d'eau quasiment constant au cours de la période modélisée et nous n'avons pas de donnée en amont de ce point. Le modèle commence donc 100 m en amont du MR50.



**Figure 57 - Extension du modèle et trait de coupe de la Figure 58**

Les entrants salés se caractérisent classiquement par une variation verticale de salinité. Afin de bien la modéliser, nous avons subdivisé la couche supérieure du modèle en 3 couches (Figure 58).

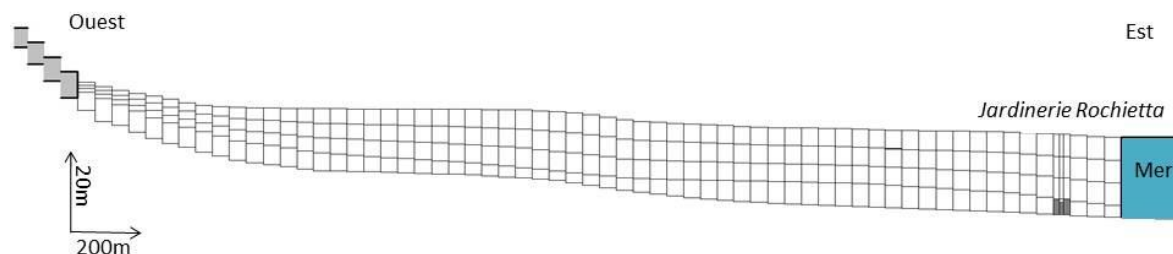


Figure 58 - Coupe longitudinale du modèle à 4 couches repéré Figure 57

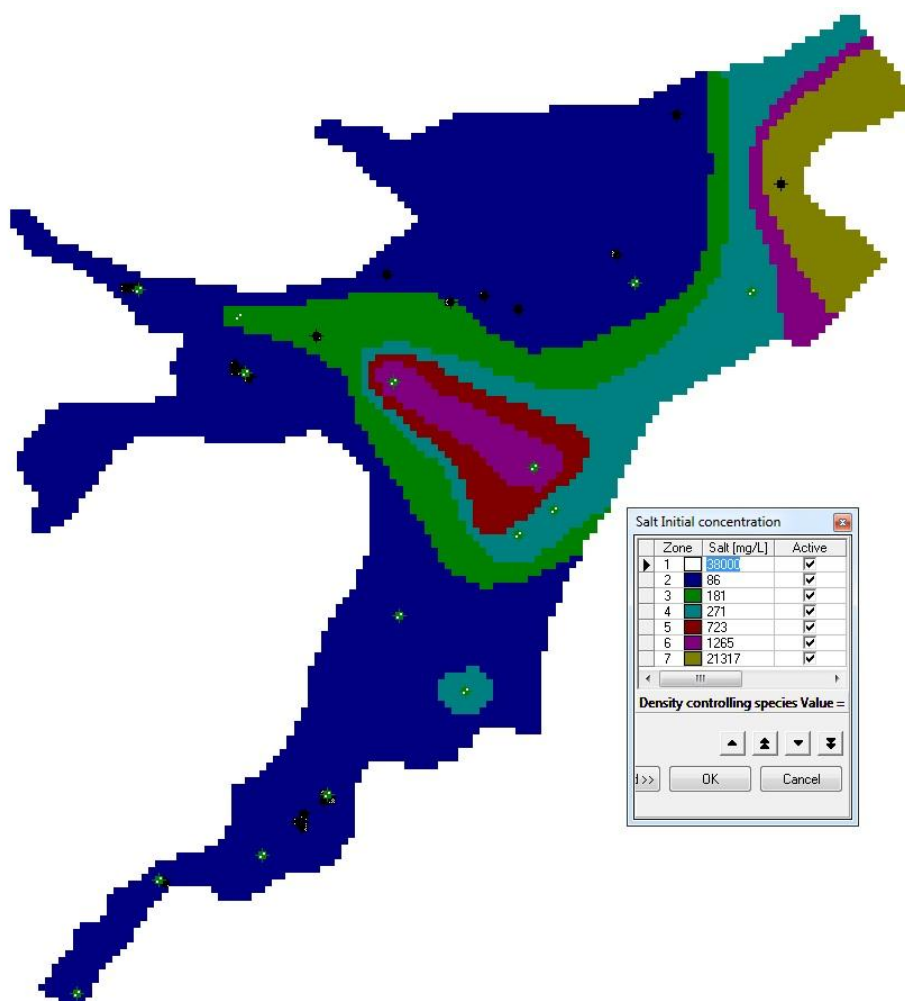
### 4.2.3. Stabilité de la poche saumâtre

#### 4.2.3.1. : CONDITIONS AUX LIMITES

En plus des conditions aux limites déterminées pour le calage en régime transitoire (cf. Chapitre 2.2.3), nous avons considéré dans le modèle une salinité initiale de la nappe sur la base des mesures effectuées en septembre 1998 (salinité = 1,080655 x chlorinité mesurée) (Figure 59).

Au niveau de la mer, la salinité est constante à 38g/l (donnée IFREMER).

*N.B. : SEAWAT ne fonctionne pas avec le module STREAM. Nous avons donc utilisé le module RIVER en imposant pour chaque pas de temps la ligne d'eau calculée lors du calage hydrodynamique en régime transitoire.*



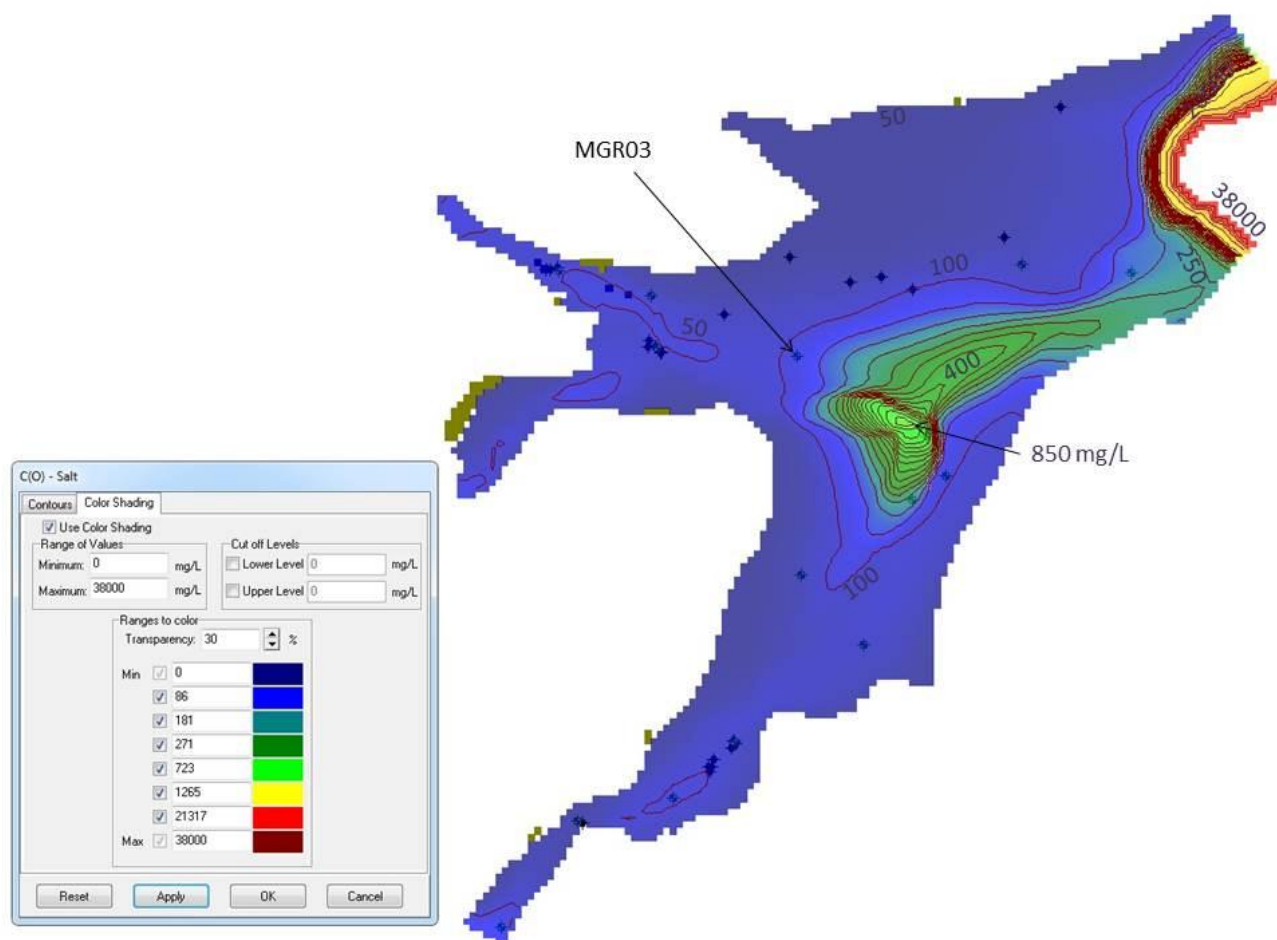
**Figure 59 - Carte de salinité en entrée du modèle à partir des mesures du 25 septembre 1998.**

#### 4.2.3.2. RESULTATS DE LA MODELISATION SEAWAT

La carte de salinité obtenue à l'issue de la modélisation en régime transitoire (de septembre 1998 à septembre 2012) montre une évolution des concentrations en accord avec certaines observations (Figure 60) :

- la poche saumâtre reste présente à la confluence de la Giscle et la Môle au cours de la période 1998-2012
- la salinité initialement élevée sur l'ancien champ captant des Pasquiers descend au niveau du bruit de fond de la nappe.

Par contre, l'extension nord-ouest de la poche saumâtre a régressé par rapport à l'extension que mise en évidence à partir des mesures disponibles.



**Figure 60 - Carte de salinité à l'issue de la modélisation en régime transitoire de septembre 1998 à septembre 2012 (A.N. : les codes couleurs sont différents en entrées et sortie du modèle).**

#### **4.2.4. Mise en place de l'entrant salé**

##### 4.2.4.1. CONDITIONS AUX LIMITES

Les entrants salés se sont mis en place dans la nappe alluviale Môle-Giscle autour de 1980. Afin de comprendre ce processus, les conditions aux limites de pompage et de salinité de cours d'eau de cette période ont été appliquées au modèle. Les conditions climatiques et hydrologiques ont été reprises du calage en régime transitoire.

Les données de pompages AEP sont issues des volumes mensuels traités aux usines de la Giscle et la Môle de 1979 à 1981 (5.1 Mm<sup>3</sup> en 1979, 5.5 Mm<sup>3</sup> en 1980 et 5.3 Mm<sup>3</sup> en 1981). Ils sont répartis sur les 5 champs captant en fonctionnement en 1980 : Réparade, Giscle-Grenouille, Val d'Astier, Rayol et Pasquier (Figure 61). Ces valeurs mensuelles sont reproduites sur les 14 années de modélisation.

La suppression du barrage anti-sel, construit en 1988, induit la remonté d'eaux saumâtres dans la Giscle. Une salinité moyenne de 20 g/l a été appliquée.

## Etude des alluvions de la Giscle et de la Môle – Détermination des volumes maximums prélevables – Préservation de la ressource stratégique

Rapport de phase 3 – Impact des prélèvements et quantification de la ressource

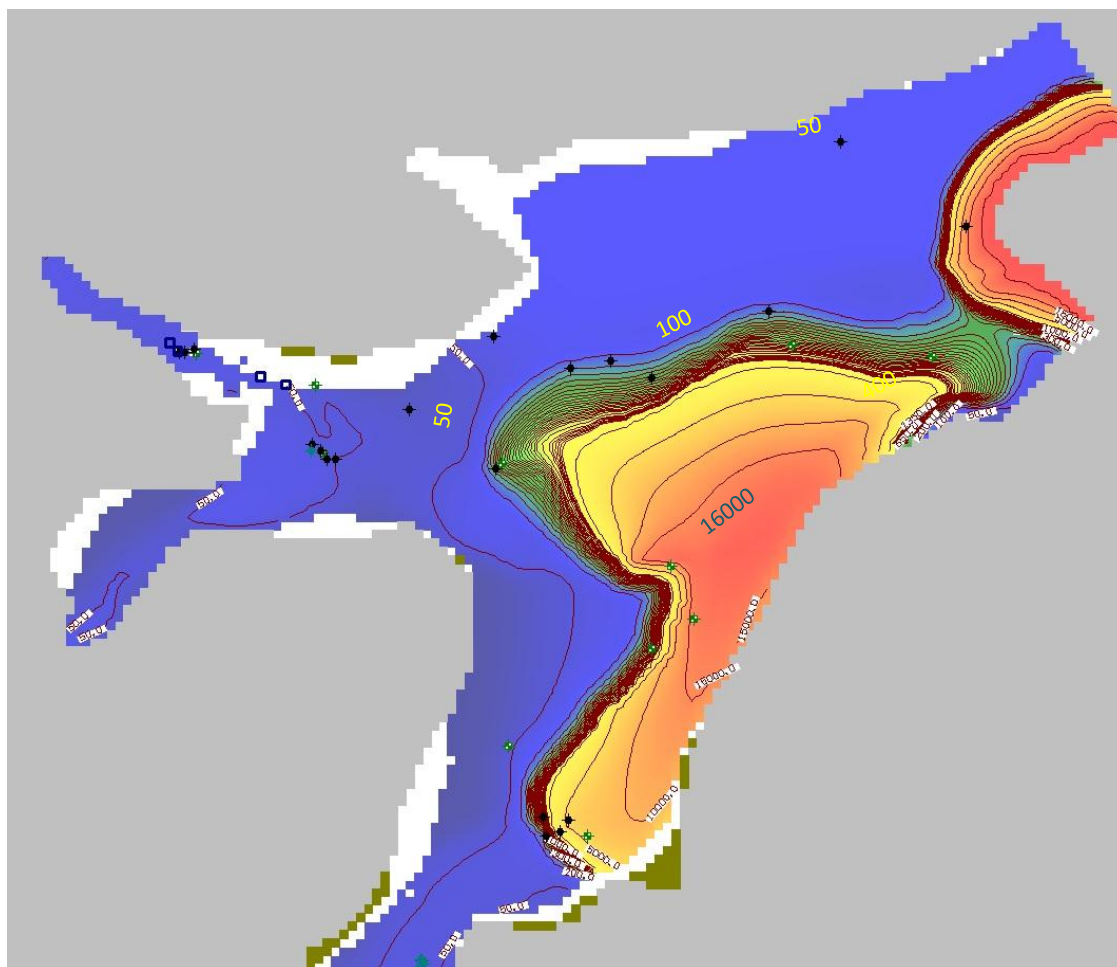


Figure 61 – Carte des champs captant en fonctionnement en 1980 et section de la Giscle le contenant de l'eau saumâtre avant la mise en place du barrage anti-sel

### 4.2.4.2. RESULTAT DE LA MODELISATION

A l'issue des 14 années modélisées, il apparaît que l'intrusion saline est le produit de l'infiltration des eaux salées de la Giscle (Figure 62). En effet, la poche saumâtre est déconnectée du biseau salé littoral.

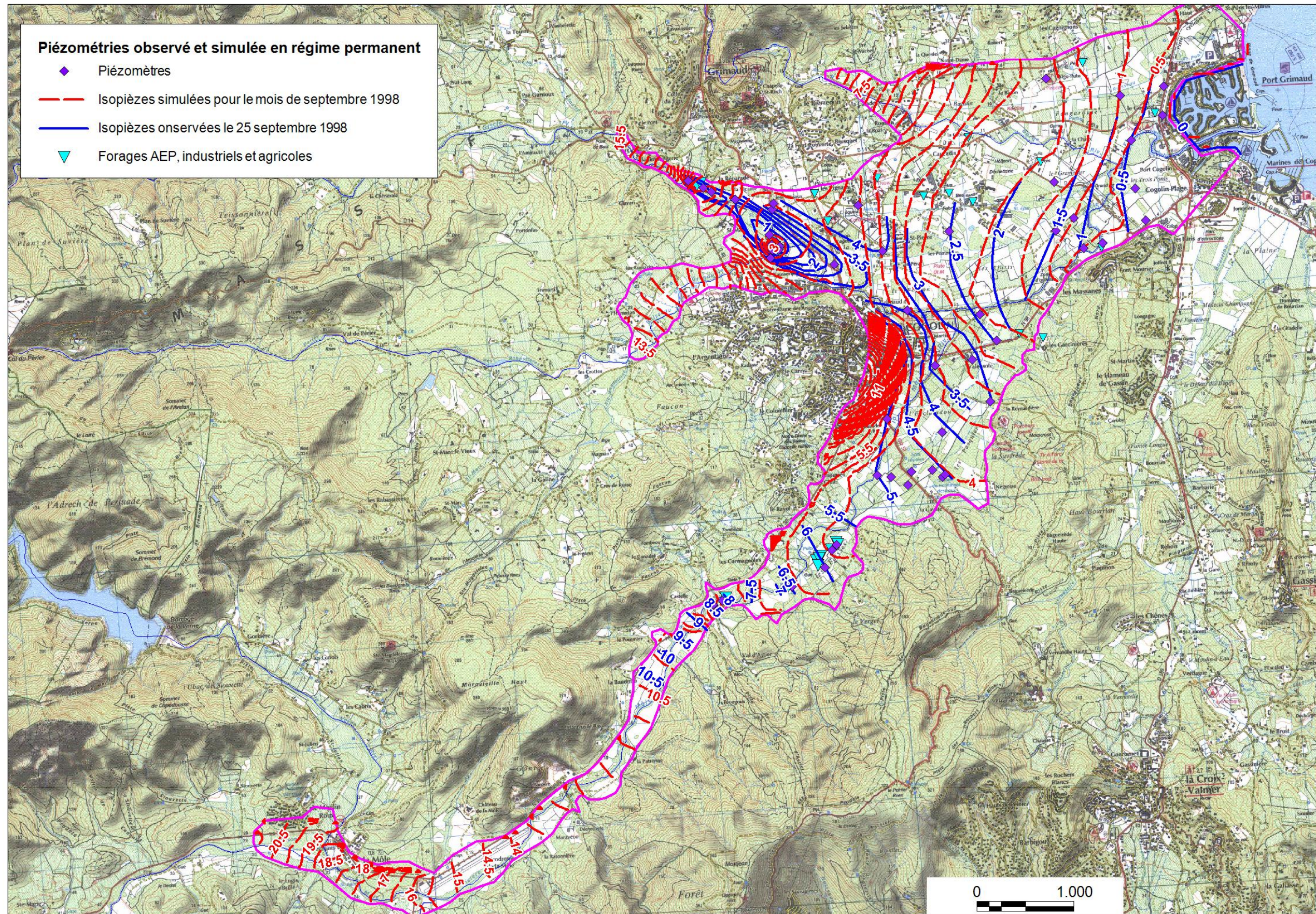
La mise en place du barrage anti-sel, l'arrêt du champ captant de Pasquier et la diminution des volumes prélevés en nappe sont autant de facteurs qui protègent la nappe de nouvelles intrusions d'eau saumâtre.

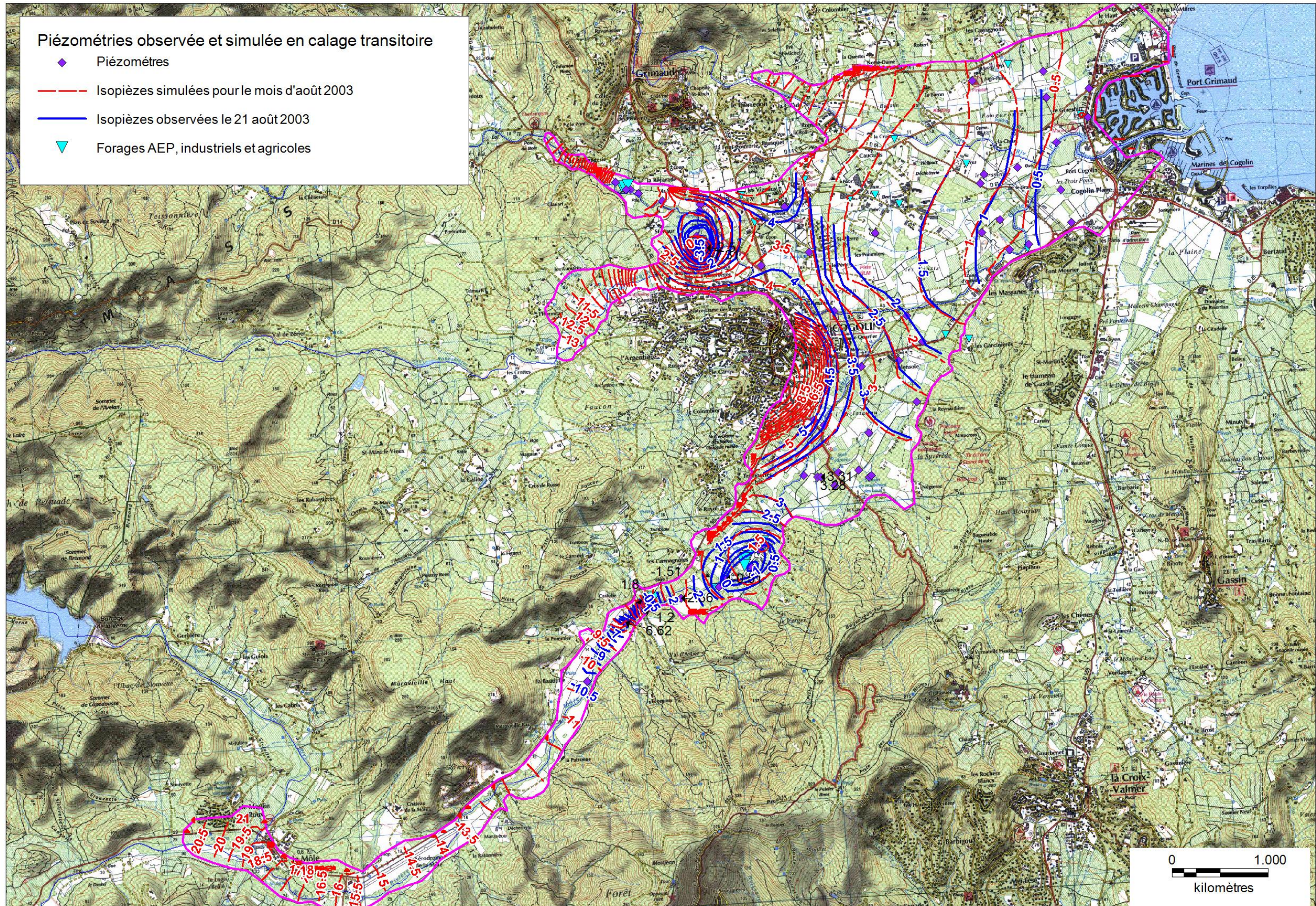


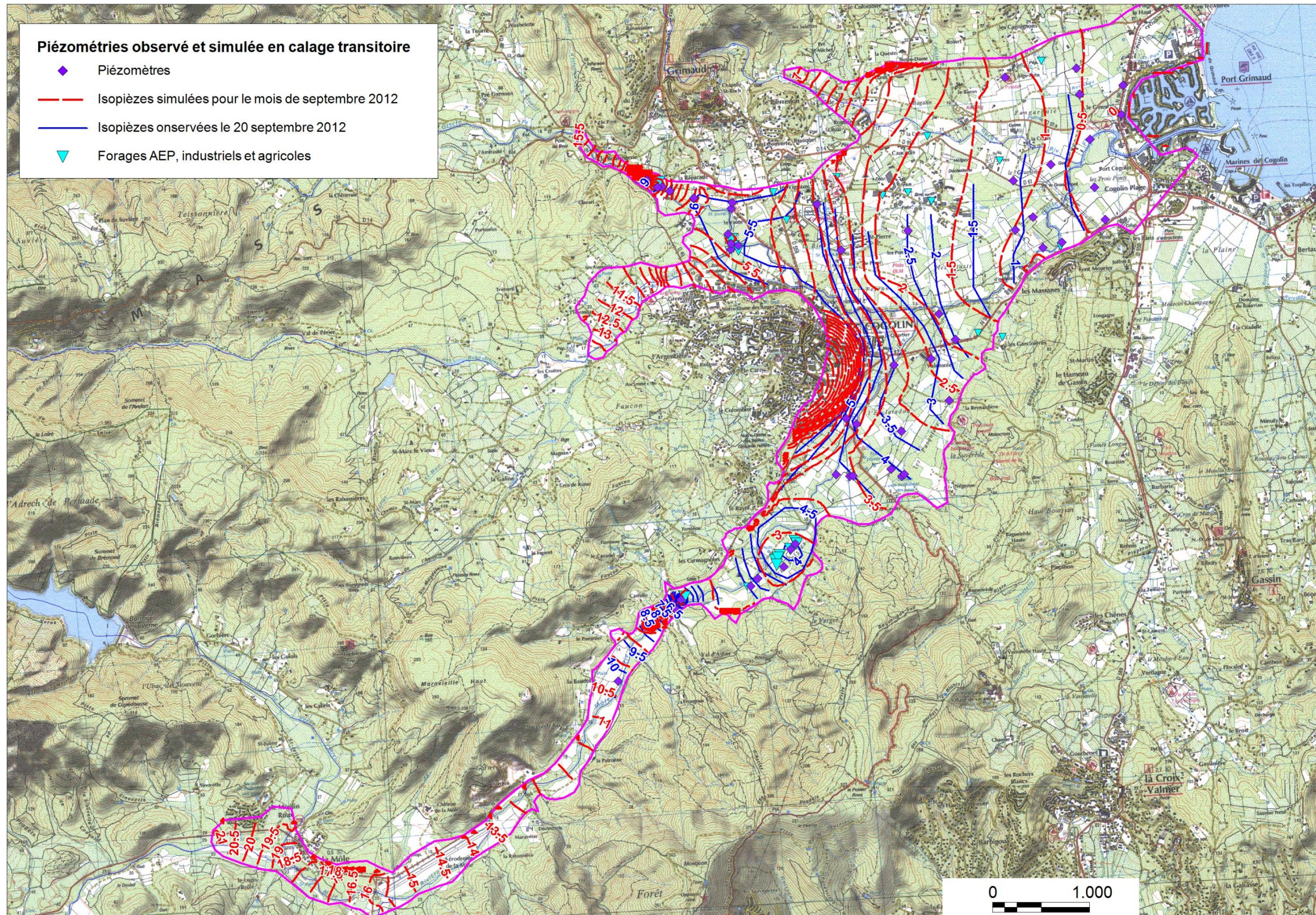
**Figure 62 - Carte de salinité en mg/l à l'issue de la modélisation en régime transitoire pour les conditions de prélèvement en nappe de 1980**

## **Annexe A. CARTES PIEZOMETRIQUES MODELISEES**







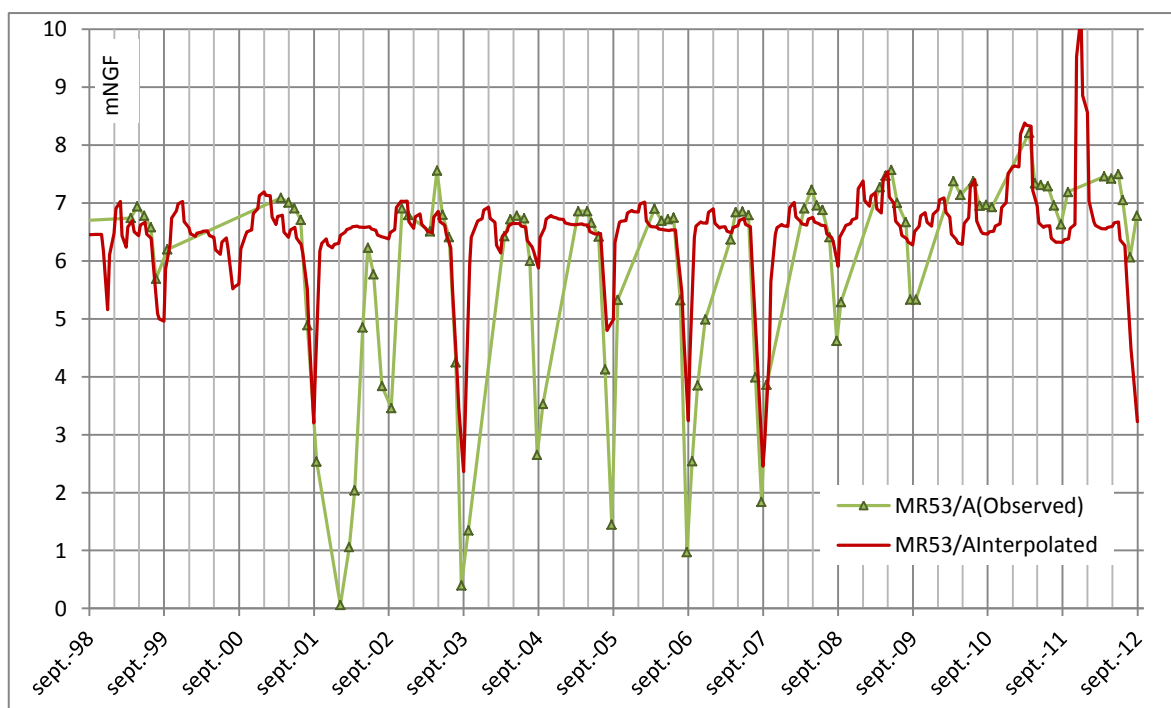
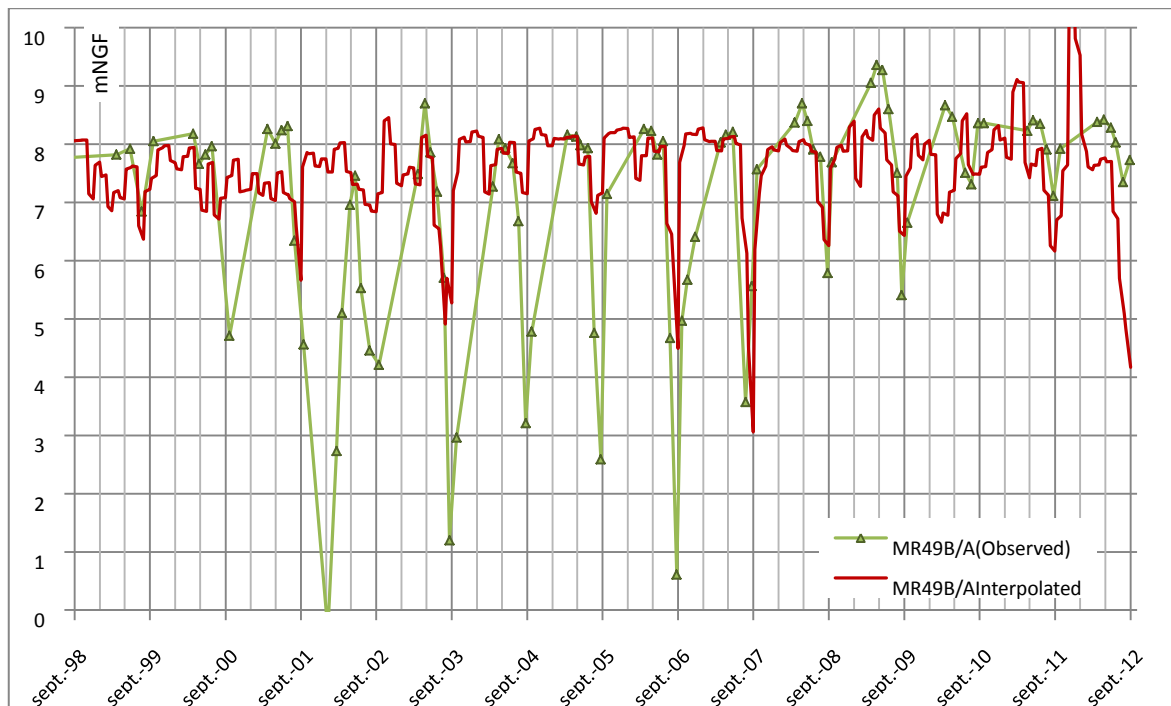


## **Annexe B. CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES MODELISEES EN REGIME TRANSITOIRE**

# Etude des alluvions de la Giscle et de la Môle – Détermination des volumes maximums prélevables – Préservation de la ressource stratégique

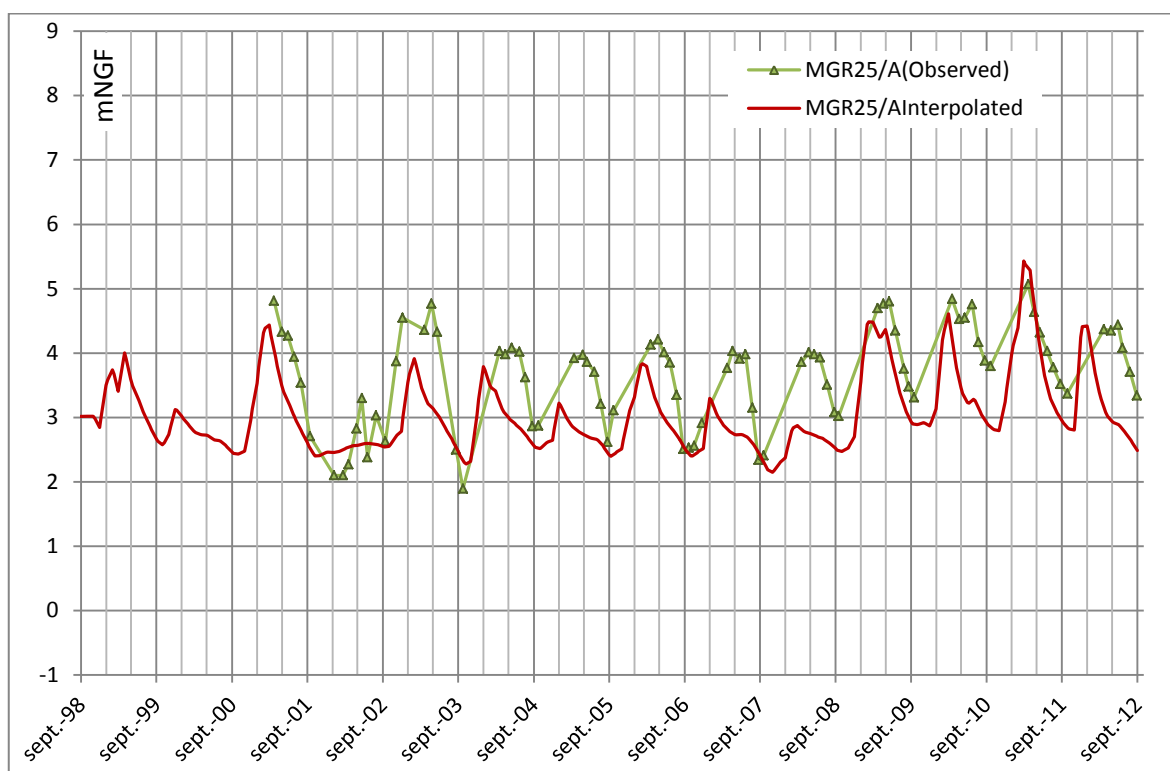
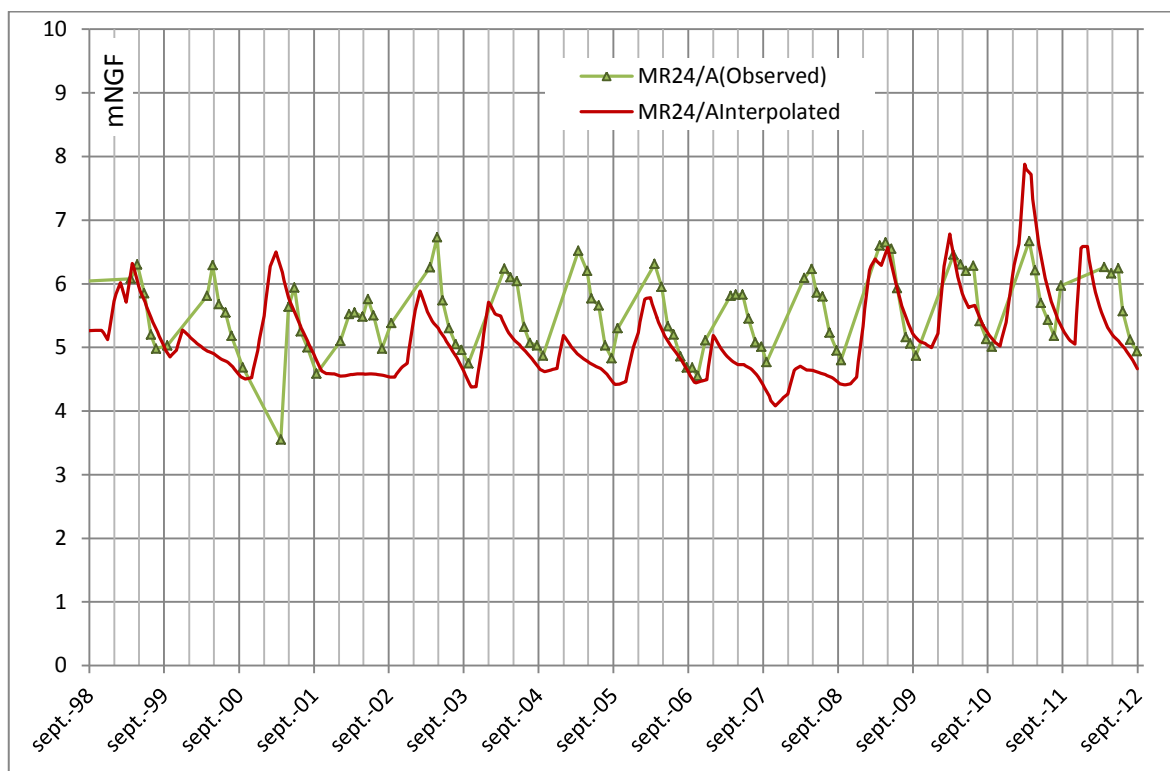
Rapport de phase 3 – Impact des prélèvements et quantification de la ressource

Voir Figure 26 - Localisation des piézomètres de référence (en rouge les ouvrage correspondant aux chroniques présentées ci-dessous, en vert à celle présentées en annexe)page 29 pour la localisation des ouvrages et les autres chroniques.



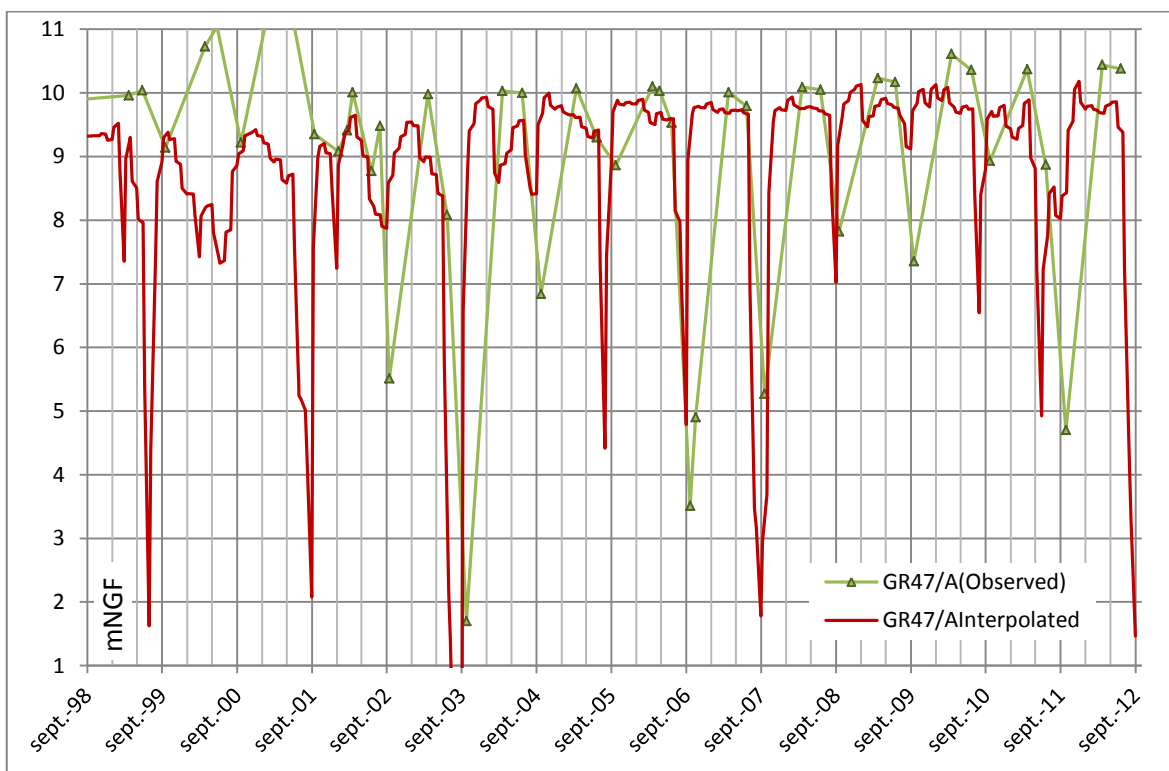
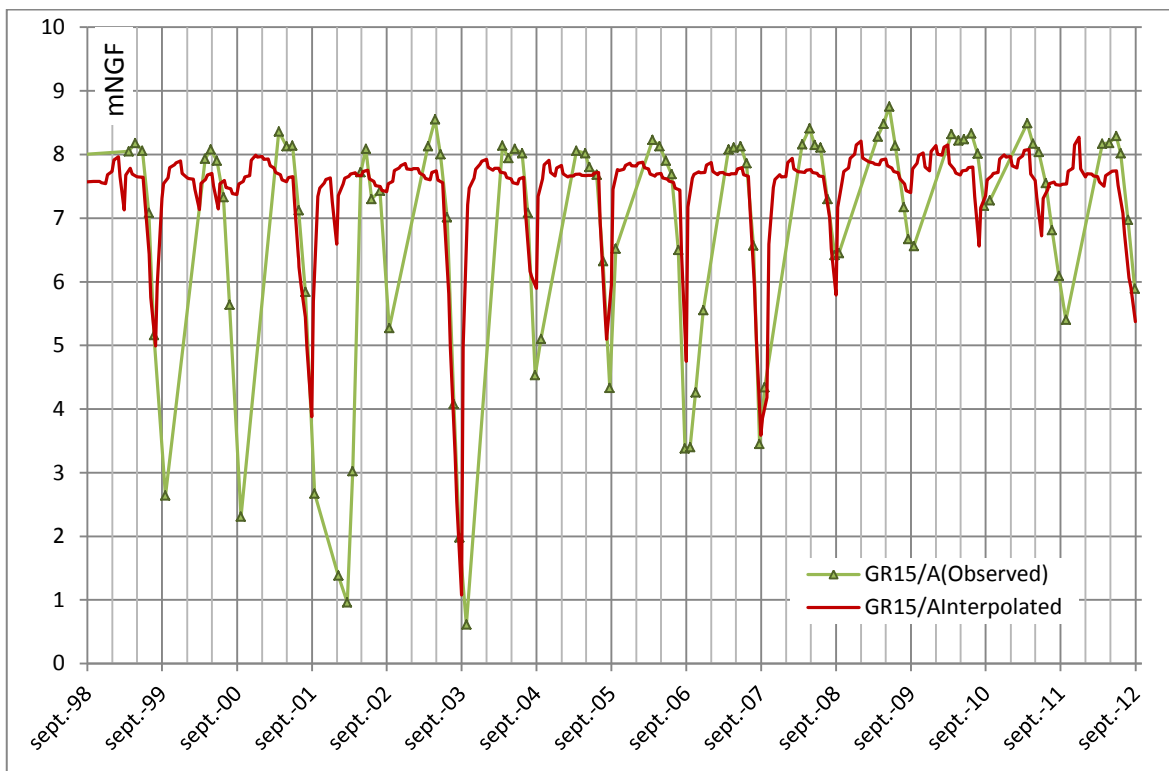
# Etude des alluvions de la Giscle et de la Môle – Détermination des volumes maximums prélevables – Préservation de la ressource stratégique

Rapport de phase 3 – Impact des prélèvements et quantification de la ressource



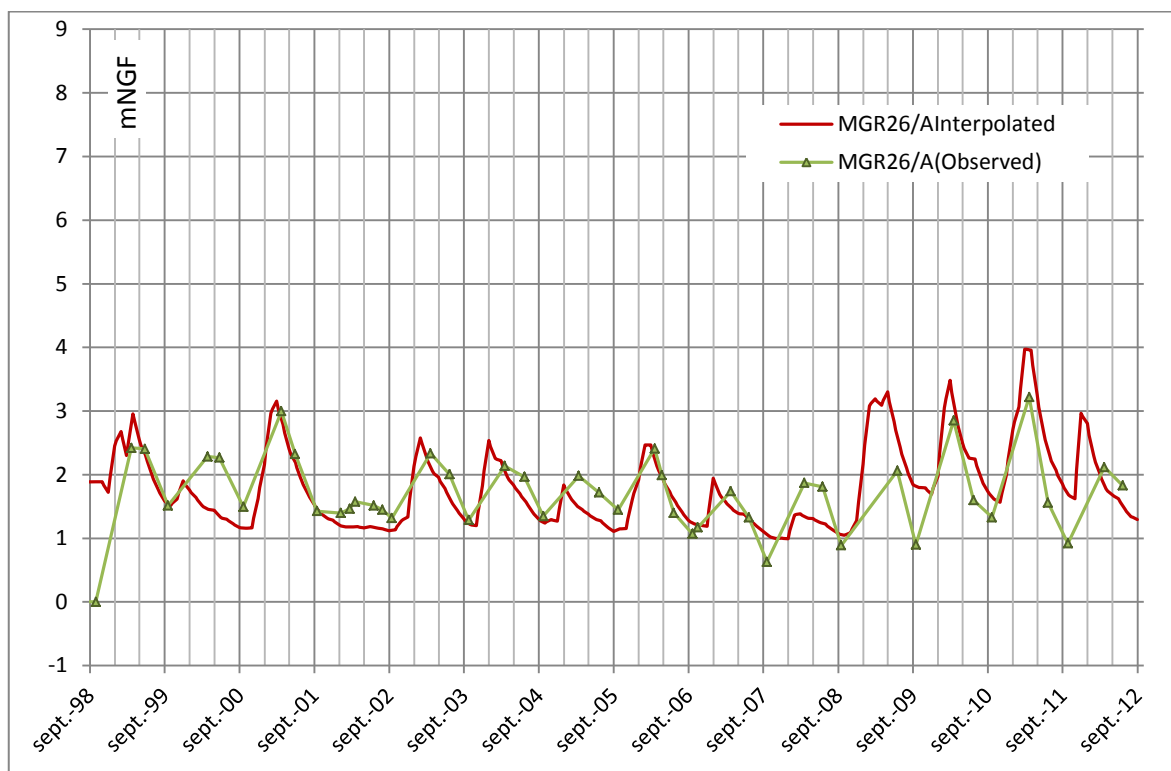
# Etude des alluvions de la Giscle et de la Môle – Détermination des volumes maximums prélevables – Préservation de la ressource stratégique

Rapport de phase 3 – Impact des prélèvements et quantification de la ressource



# Etude des alluvions de la Gisle et de la Môle – Détermination des volumes maximums prélevables – Préservation de la ressource stratégique

Rapport de phase 3 – Impact des prélèvements et quantification de la ressource



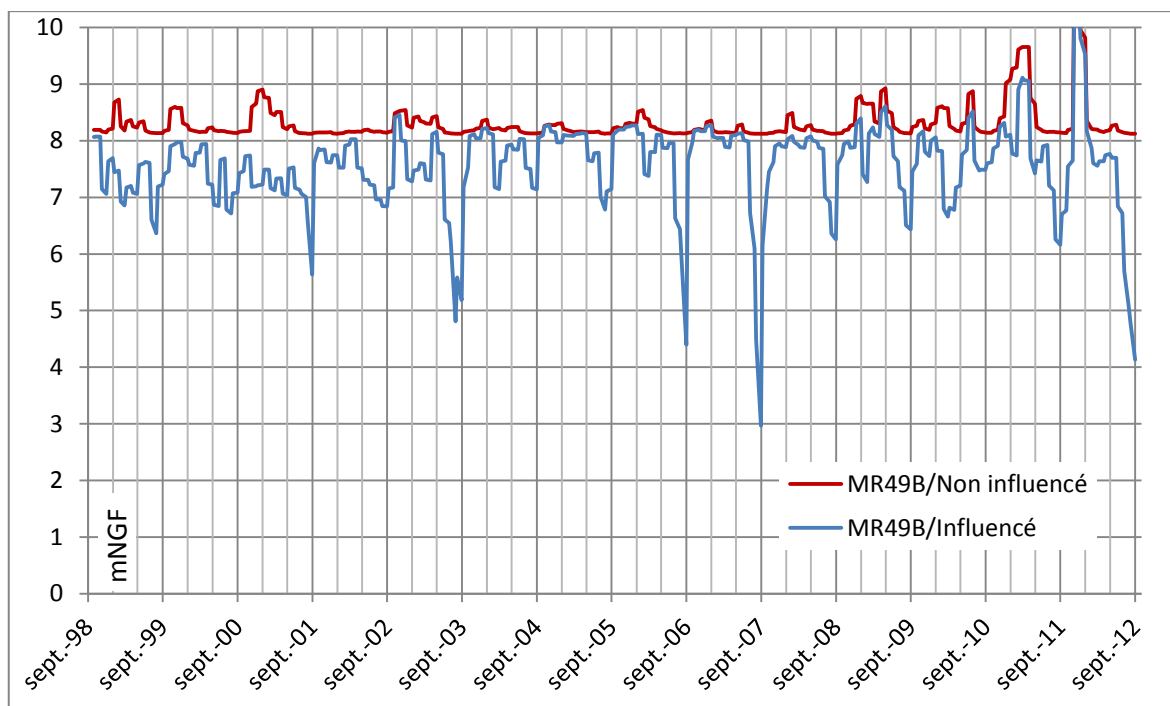
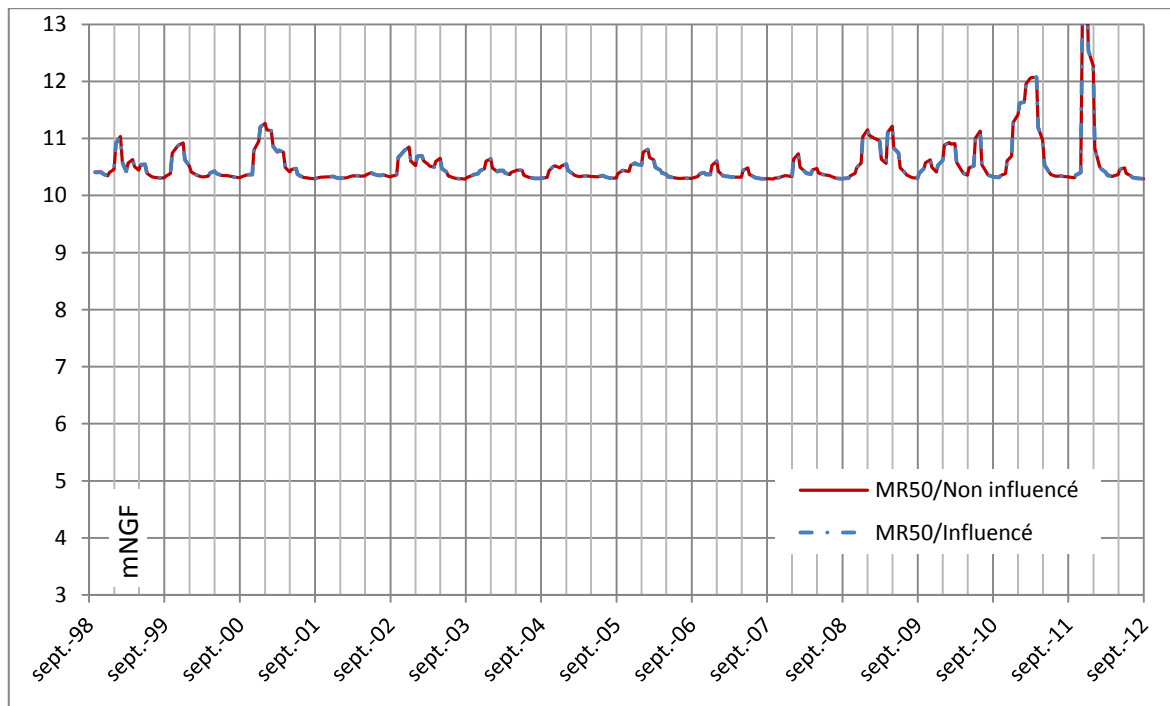


## **Annexe C. CHRONIQUES PIEZMETRIQUES MODELISIEES SANS PRELEVEMENTS**

## Etude des alluvions de la Gisle et de la Môle – Détermination des volumes maximums prélevables – Préservation de la ressource stratégique

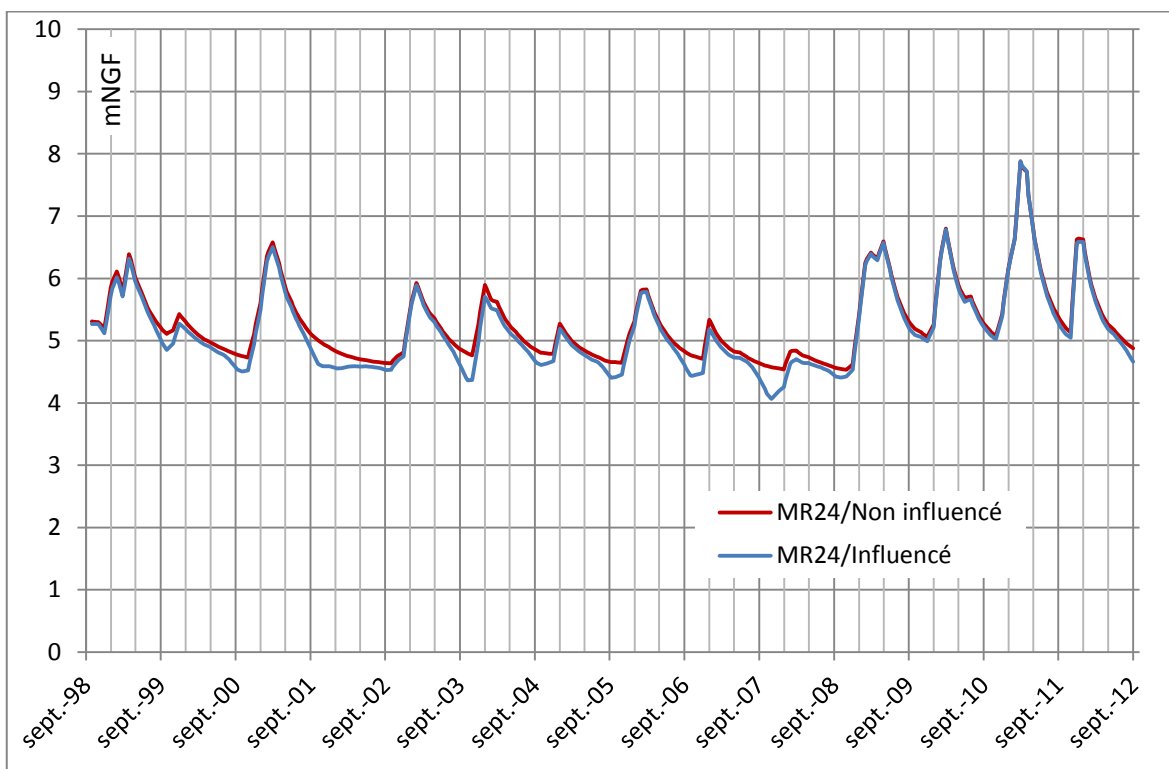
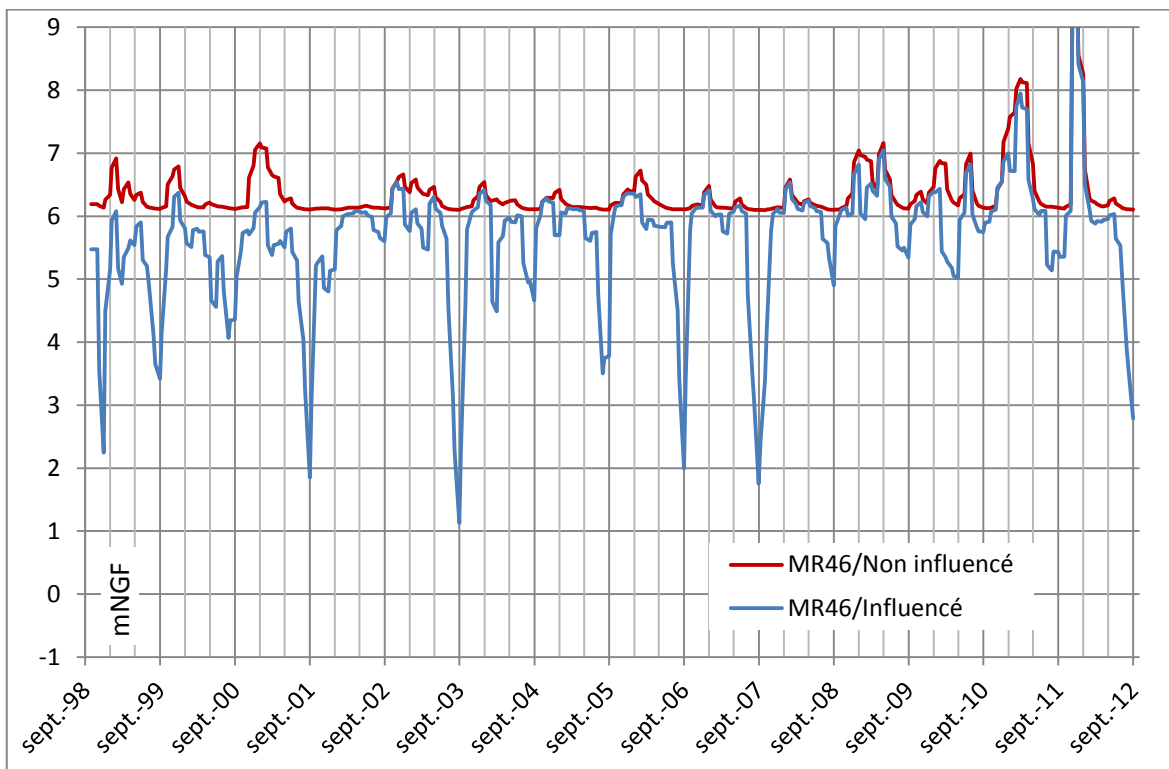
Rapport de phase 3 – Impact des prélèvements et quantification de la ressource

Voir Figure 26 - Localisation des piézomètres de référence (en rouge les ouvrages correspondant aux chroniques présentées ci-dessous, en vert à celle présentées en annexe)page 29 pour la localisation des ouvrages et les autres chroniques.



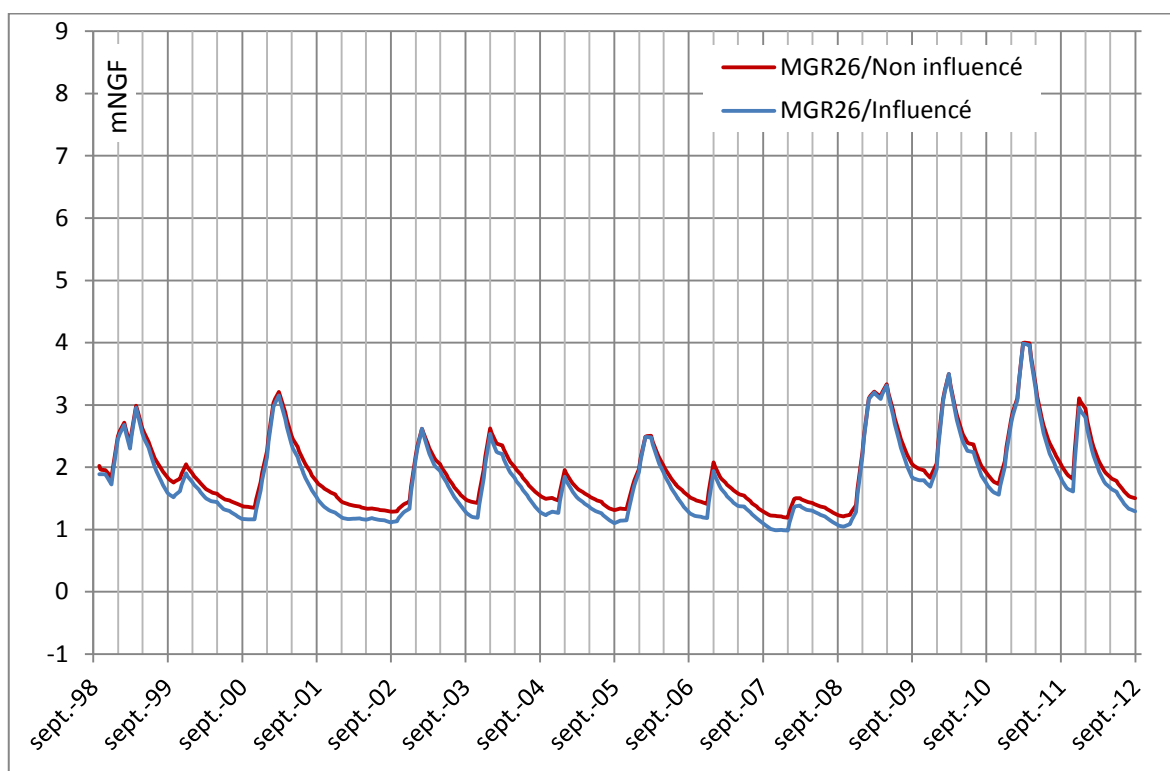
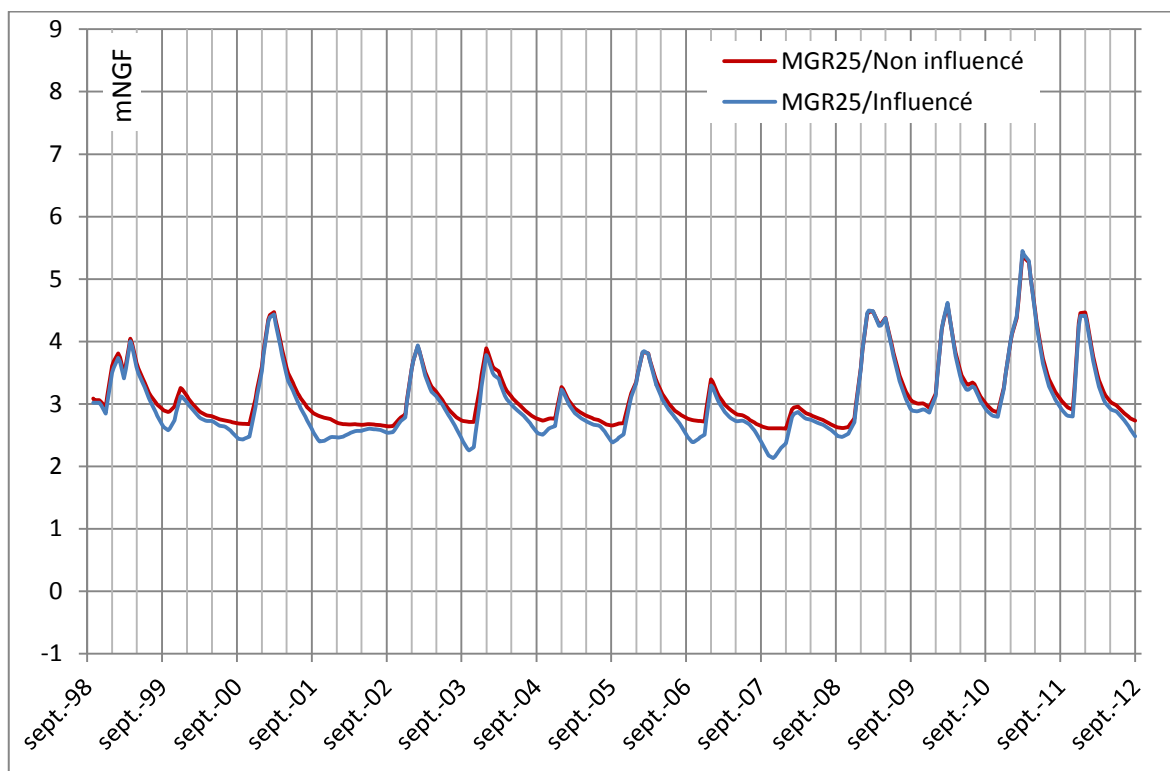
# Etude des alluvions de la Giscle et de la Môle – Détermination des volumes maximums prélevables – Préservation de la ressource stratégique

Rapport de phase 3 – Impact des prélèvements et quantification de la ressource



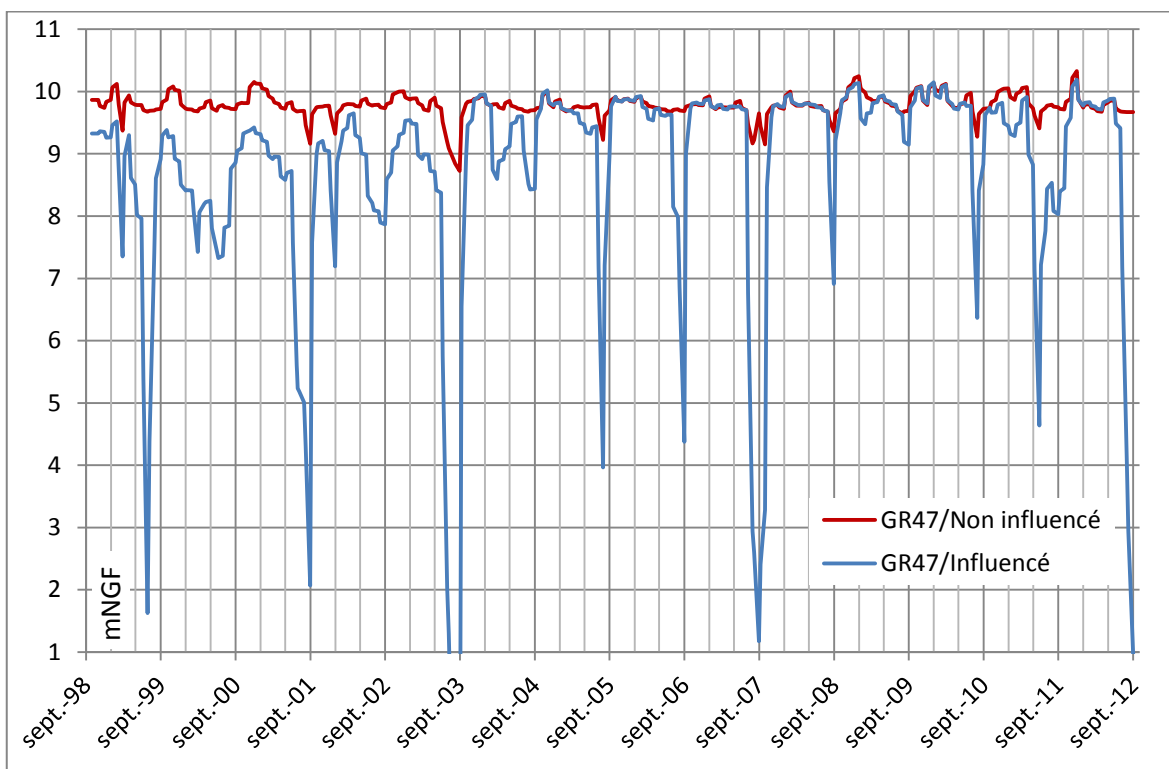
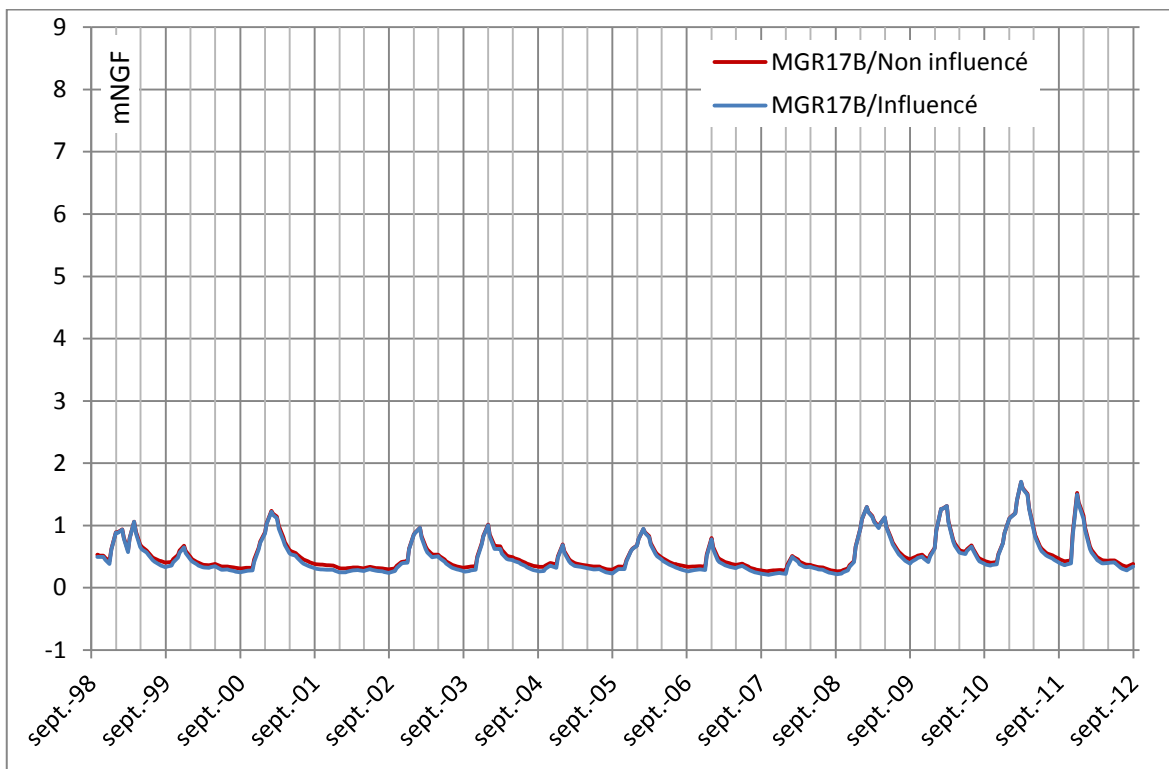
# Etude des alluvions de la Giscle et de la Môle – Détermination des volumes maximums prélevables – Préservation de la ressource stratégique

Rapport de phase 3 – Impact des prélèvements et quantification de la ressource



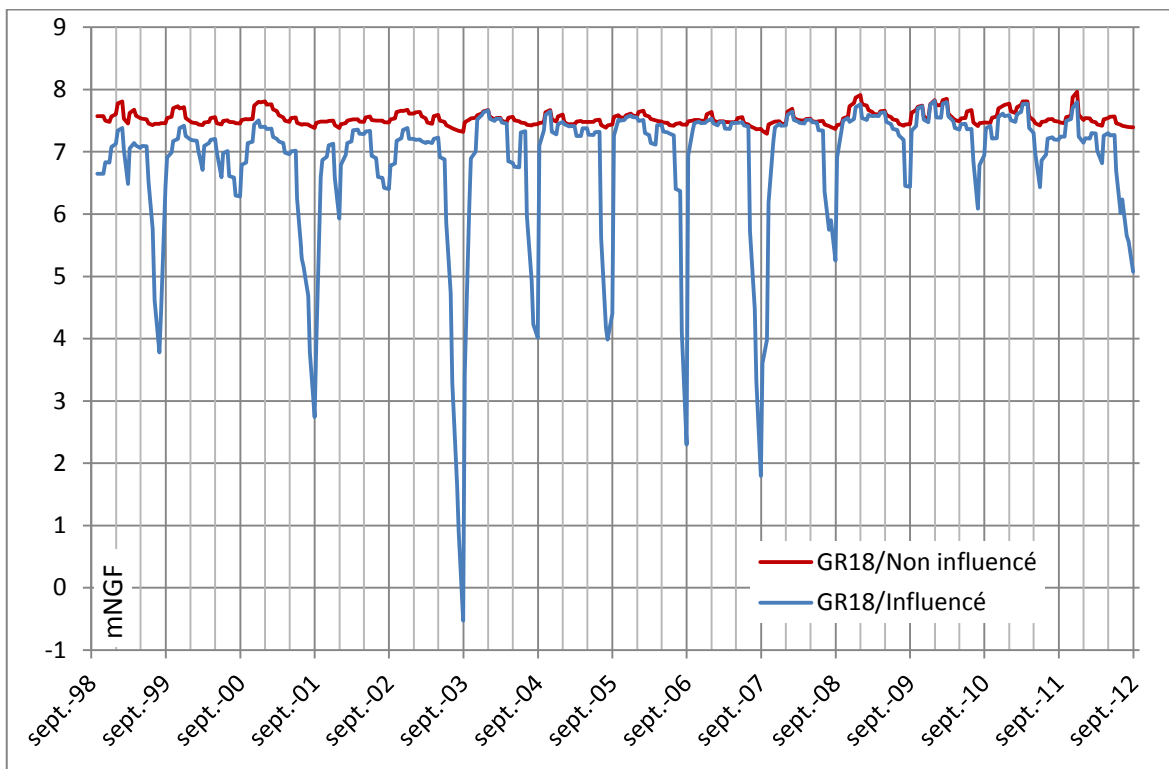
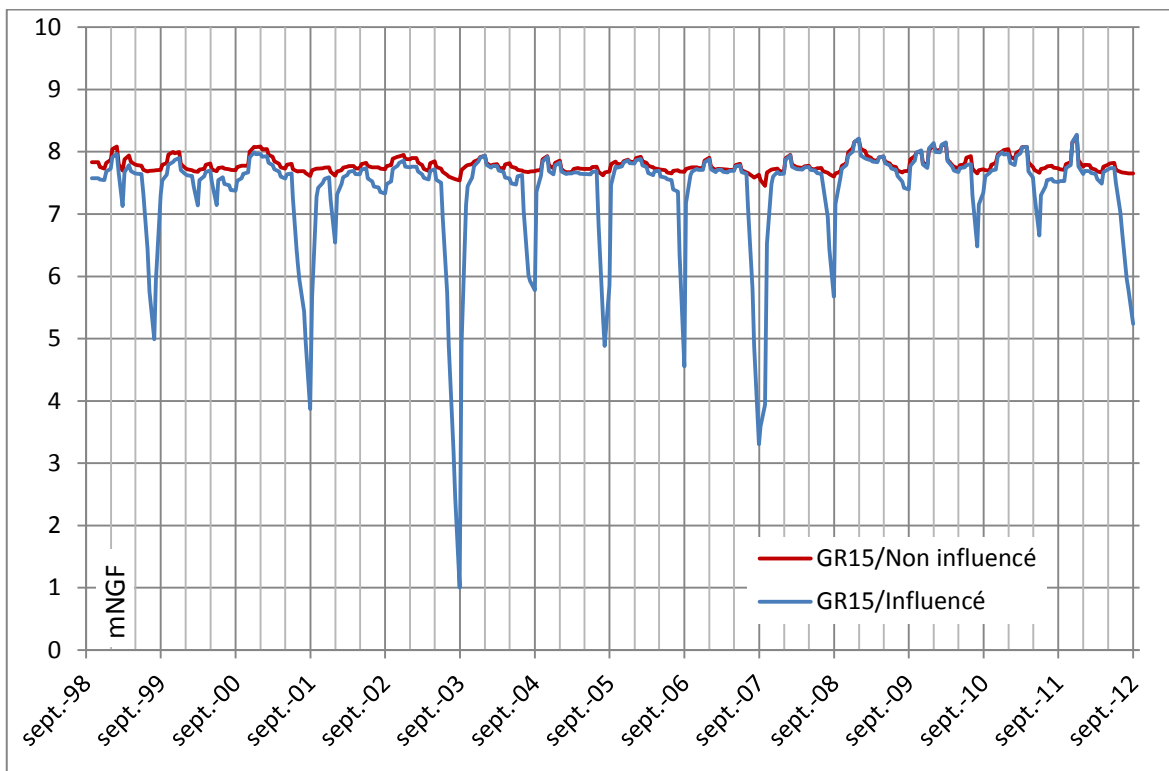
# Etude des alluvions de la Giscle et de la Môle – Détermination des volumes maximums prélevables – Préservation de la ressource stratégique

Rapport de phase 3 – Impact des prélèvements et quantification de la ressource



# Etude des alluvions de la Giscle et de la Môle – Détermination des volumes maximums prélevables – Préservation de la ressource stratégique

Rapport de phase 3 – Impact des prélèvements et quantification de la ressource







**ATTEINDRE  
L'ÉQUILIBRE QUANTITATIF  
EN AMÉLIORANT  
LE PARTAGE  
DE LA RESSOURCE EN EAU  
ET EN ANTICIPANT  
L'AVENIR**

## **ÉTUDES D'ESTIMATION DES VOLUMES PRÉLEVABLES GLOBAUX**

Les études volumes prélevables visent à améliorer la connaissance des ressources en eau locale dans les territoires en déficit de ressource.

Elles doivent aboutir à la détermination d'un volume prélevable global sur chaque territoire. Ce dernier servira par la suite à un ajustement des autorisations de prélèvement dans les rivières ou nappes concernées, en conformité avec les ressources disponibles et sans perturber le fonctionnement des milieux naturels.

Ces études sont également la première étape pour la définition de plans de gestion de la ressource et des étiages, intégrant des règles de partage de l'eau et des actions de réduction des prélèvements.

Les études volumes prélevables constituent une déclinaison opérationnelle du SDAGE et répondent aux objectifs de l'Orientation fondamentale 7 « Atteindre l'équilibre quantitatif en améliorant le partage de la ressource en eau et en anticipant l'avenir ».

Elles sont menées par des bureaux d'études sur 70 territoires en déficit du bassin Rhône-Méditerranée.

### **Maître d'ouvrage :**

Syndicat Intercommunal de Distribution d'Eau de la Corniche des Maures

### **Financeurs :**

Agence de l'eau Rhône-Méditerranée & Corse

### **Bureau d'études :**

ARTELIA