



## Hydrologie souterraine

### Aquifère du Lez

Octobre 2012

## SYNTHESE ET CONCLUSIONS

Dans le cadre du projet « Explore 2070 » et afin d'évaluer l'impact du changement climatique sur les niveaux de nappes et les débits des cours d'eau, le groupement BRGM/ ARMINES a proposé, vu le temps imparti, d'utiliser les modèles hydrodynamiques maillés, déjà construits et calés sur la période actuelle. Ces modèles, dont l'historique, la description et le calage ont été détaillés dans le rapport d'avancement précédent, font chacun l'objet d'un rapport séparé. Le présent rapport traite du modèle global de l'aquifère du Lez.

Après une présentation de l'aquifère karstique du Lez et des enjeux auxquels les exploitants de la ressource sont confrontés, la méthode de modélisation, la déclinaison locale des scénarios climatiques et d'évolution future des prélèvements, ainsi que la méthode adoptée pour en étudier les impacts futurs sont décrits. Enfin les principaux résultats en termes d'impact du changement global sont détaillés.

Les scénarios climatiques montrent une diminution de -10% à -20% des cumuls de précipitation futurs pour le printemps, l'été et l'automne, tandis que pour l'hiver on observe une augmentation de l'ordre de +10%, en moyenne sur tous les modèles considérés (multi-modèle). Les résultats pour l'ETP indiquent une augmentation en moyenne multi-modèle de l'ordre de +15% sur le cumul annuel, plus marquée sur l'automne. Le scénario d'évolution future des prélèvements (projections du cabinet BIPE dans le cadre du lot prospective d'Explore 2070) table sur une augmentation moyenne annuelle de l'ordre de 20% des prélèvements sur le secteur de l'aquifère du Lez.

La réponse du modèle à ces scénarios se traduit essentiellement par une baisse de la précipitation efficace. Cette baisse impacte le niveau piézométrique, qui subit une baisse de -2 m en moyenne annuelle, pouvant atteindre 6 m entre juillet et octobre. L'impact du scénario de prélèvement présente des ordres de grandeur similaires à ceux de l'impact du climat. L'effet combiné de l'évolution du climat et des prélèvements entraînerait ainsi une diminution des niveaux piézométriques pouvant aller jusqu'à 12m par rapport au niveau actuel simulé en période de sollicitation, avec une dispersion de 2 à de 5 m autour de la moyenne multi-modèle. La cote

piézométrique de 45 m NGF (en dessous de laquelle les exploitants de l'aquifère font aujourd'hui appel à une ressource complémentaire (eau du Rhône) pour alimenter la ville de Montpellier) serait plus souvent atteinte en contexte de climat futur et encore plus souvent (jusqu'à 15% du temps) en appliquant le scénario d'augmentation des prélèvements, sans pour autant que l'on dépasse la cote de 35 m NGF, seuil d'exploitation actuel de l'aquifère. Etant donné que l'effet des scénarios considérés provoque des baisses de niveau piézométrique, ils ne soumettent pas les populations et les activités à une augmentation des risques (en termes d'inondations ou autres).

Concernant les débits de débordement de la source, les scénarios climatiques considérés conduisent à une diminution comprise entre 150 l/s et 500 l/s (50% du débit présent) entre le printemps et l'automne et à une augmentation de l'ordre de 100 l/s en hiver (moins de 10% du débit présent). Une forte incertitude affecte là aussi ces résultats, notamment en hiver. L'impact du scénario de prélèvement se traduit aussi par une diminution uniforme des débits sur l'année de l'ordre de -150 l/s de novembre à mai. L'effet combiné de l'évolution du climat et des prélèvements entraînerait donc une diminution marquée par rapport au présent, même en hiver. La combinaison des scénarios climatiques et de prélèvement se traduit par une augmentation des fréquences d'occurrence du tarissement de la source du Lez de l'ordre de 2 mois environ. Par contre, aucune tendance n'apparaît pour les débits extrêmes.

Les limites et incertitudes de l'approche présentée sont les suivantes:

- Le modèle construit pour simuler la piézométrie est probablement perfectible, notamment dans la mesure où le modèle actuel simule le comportement dans le drain karstique mais pas la charge dans la matrice qui l'entoure. Il n'est de plus pas possible de juger de sa fiabilité pour des niveaux piézométriques plus profonds que 35 m NGF, pour lesquels le comportement de l'aquifère est inconnu.
- Les scénarios climatiques utilisés dans cette étude sont susceptibles d'être renforcés ou bien remis en cause dans le futur, au fur et à mesure des progrès dans la modélisation du climat, surtout au niveau des interfaces côtières. Ainsi l'analyse présentée devra probablement être mise à jour avec les scénarios futurs, produits par la communauté des climatologues.

## SOMMAIRE

<b>1.</b>	<b>INTRODUCTION</b>	<b>9</b>
<b>2.</b>	<b>L'AQUIFERE KARSTIQUE DU LEZ</b>	<b>13</b>
<b>2.1.</b>	<b>CARACTERISTIQUES PRINCIPALES</b>	<b>13</b>
<b>2.2.</b>	<b>CARACTERISTIQUES GEOLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES DE L'AQUIFERE KARSTIQUE</b>	<b>15</b>
<b>2.3.</b>	<b>FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE DE L'AQUIFERE KARSTIQUE</b>	<b>17</b>
<b>2.4.</b>	<b>MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE DE L'AQUIFERE DU LEZ</b>	<b>18</b>
<b>2.4.1.</b>	<b>SIMULATION DU DEBIT NATUREL DE LA SOURCE DU LEZ</b>	<b>18</b>
<b>2.4.2.</b>	<b>SIMULATION DU NIVEAU PIEZOMETRIQUE DE L'AQUIFERE KARSTIQUE DU LEZ</b>	<b>20</b>
<b>2.4.3.</b>	<b>RESULTATS DU CALAGE ET DE LA VALIDATION DU MODELE</b>	<b>22</b>
<b>3.</b>	<b>LES SCENARIOS CLIMATIQUES : DONNEES D'ENTREE</b>	<b>24</b>
<b>3.1.</b>	<b>DONNEES CLIMATIQUES</b>	<b>24</b>
<b>3.2.</b>	<b>DONNEES DE PRELEVEMENTS</b>	<b>28</b>
<b>4.</b>	<b>IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE</b>	<b>29</b>
<b>4.1.</b>	<b>IMPACTS SUR LA PLUIE EFFICACE</b>	<b>29</b>
<b>4.2.</b>	<b>IMPACT SUR LES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES</b>	<b>31</b>
<b>4.3.</b>	<b>IMPACT SUR LE DEBIT DE DEBORDEMENT A LA SOURCE DU LEZ</b>	<b>33</b>

<b>5.</b>	<b>IMPACTS DU SCENARIO DE PRELEVEMENT</b>	<b>35</b>
<b>5.1.</b>	<b>IMPACT SUR LES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES</b>	<b>36</b>
<b>5.2.</b>	<b>IMPACT SUR LE DEBIT DE DEBORDEMENT A LA SOURCE DU LEZ</b>	<b>39</b>
	<b>CONCLUSION</b>	<b>43</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>46</b>

## Table des illustrations

Illustration 1 : Localisation du bassin hydrogéologique de la source du Lez, de ces principales caractéristiques géologiques et des piézomètres du Suquet et Laudoux. ....	14
Illustration 2 : Réseau karstique de la source du Lez et dispositif de captage (Fleury et al. 2009). ....	15
Illustration 3 : Calage de la simulation du débit naturel estimé à la source du Lez. ....	19
Illustration 4 : Validation de la simulation du débit naturel estimé à la source du Lez. ....	20
Illustration 5 : Schéma récapitulatif du fonctionnement du modèle de l'aquifère karstique du Lez. ....	21
Illustration 6 : Niveaux piézométriques simulé et observé (calage). ....	23
Illustration 7 : Niveaux piézométriques simulé et observé (validation).....	23
Illustration 8 : Moyennes interannuelles de la pluie mensuelle calculées à partir des données SAFRAN en noir, multi-modèle présent en bleu (trait plein) et multi-modèle futur en rouge (trait en pointillés). Les enveloppes autour des moyennes multi-modèle représentent la dispersion des modèles climatiques (valeurs maximales et minimales parmi les 7 modèles climatiques pour chaque mois) .....	25
Illustration 9 : Anomalies mensuelles de précipitations calculées à partir des moyennes interannuelles de la pluie mensuelle présentes et futures. La zone grisée représente l'enveloppe de tous les modèles climatiques. ....	26
Illustration 10 : Moyennes interannuelles de l'ETP mensuelle calculées à partir des données SAFRAN en noir, multi-modèle présent en bleu (trait plein) et multi-modèle futur en rouge (trait en pointillés). Les enveloppes autour des moyennes multi-modèle représentent la dispersion des modèles climatiques (valeurs maximales et minimales parmi les 7 modèles climatiques pour chaque mois) .....	26
Illustration 11 : Anomalies mensuelles de l'ETP calculées à partir des moyennes interannuelles de l'ETP mensuelle présentes et futures. La zone grisée représente l'enveloppe de tous les modèles climatiques.....	27
Illustration 12 : Moyennes interannuelles de la pluie efficace mensuelle calculées à partir des données SAFRAN en noir, multi-modèle présent en bleu (trait plein) et multi-modèle futur en rouge (trait en pointillés). Les enveloppes autour des moyennes multi-modèle représentent la dispersion des modèles climatiques (valeurs maximales et minimales parmi les 7 modèles climatiques pour chaque mois).....	29
Illustration 13 : Anomalies mensuelles de la pluie efficace calculées à partir des moyennes interannuelles de la pluie efficace mensuelle présentes et futures. La zone grisée représente l'enveloppe de tous les modèles climatiques. ....	30
Illustration 14 : Moyennes interannuelles du niveau piézométrique mensuel calculées à partir des données SAFRAN en noir, multi-modèle présent en bleu (trait plein) et multi-modèle futur en rouge (trait en pointillés). Les enveloppes autour des moyennes multi-modèle représentent la dispersion des modèles climatiques (valeurs maximales et minimales parmi les 7 modèles climatiques pour chaque mois) .....	32
Illustration 15 : Anomalies mensuelles du niveau piézométrique calculées à partir des moyennes interannuelles du niveau piézométrique mensuel présentes et futures. La zone grisée représente l'enveloppe de tous les modèles climatiques. ....	33
Illustration 16 : Moyennes interannuelles du débit à la source (Qd) mensuel calculées à partir des données SAFRAN en noir, multi-modèle présent en bleu (trait plein) et multi-modèle futur en rouge (trait	

en pointillets). Les enveloppes autour des moyennes multi-modèle représentent la dispersion des modèles climatiques (valeurs maximales et minimales parmi les 7 modèles climatiques pour chaque mois). .....	34
Illustration 17 : Anomalies mensuelles du débit à la source (Qd) calculées à partir des moyennes interannuelles du débit de débordement mensuel présentes et futures. La zone grisée représente l'enveloppe de tous les modèles climatiques. ....	35
Illustration 18 : Moyennes interannuelles du niveau piézométrique mensuel calculées à partir des données SAFRAN en noir, multi-modèle futur + Qp en rouge (trait plein) et multi-modèle futur + Qp +20% en jaune (trait en pointillets). Les enveloppes autour des moyennes multi-modèle représentent la dispersion des modèles climatiques (valeurs maximales et minimales parmi les 7 modèles climatiques pour chaque mois) .....	36
Illustration 19 : (à gauche) Anomalies mensuelles du niveau piézométrique entre le climat futur (2046-2065) avec un débit de prélèvement présent et le climat futur avec débit de prélèvement futur (augmentation de 20% par rapport au présent). (à droite) Anomalies mensuelles du niveau piézométrique entre le climat présent avec un débit de prélèvement présent et le climat futur avec débit de prélèvement futur (augmentation de 20% par rapport au présent). Les zones grisées représentent l'enveloppe de tous les modèles climatiques. ....	37
Illustration 20 : Evolution de l'occurrence des niveaux piézométriques appartenant à la classe [45m,35m NGF] (à gauche) et inférieurs à 35mNGF (à droite) en fonction des scénarios (impact du débit de prélèvement seul, impact du climat seul et effet couplé prélèvement + climat). ....	38
Illustration 21 : Moyennes interannuelles du débit de débordement mensuel calculées à partir des données SAFRAN en noir, multi-modèle futur + Qp en rouge (trait plein) et multi-modèle futur + Qp +20% en jaune (trait en pointillets). Les enveloppes autour des moyennes multi-modèle représentent la dispersion des résultats (valeurs maximales et minimales parmi les 7 modèles climatiques pour chaque mois) .....	39
Illustration 22 : (à gauche) Anomalies mensuelles du débit de débordement entre le climat futur (2046-2065) avec un débit de prélèvement présent et le climat futur avec débit de prélèvement futur (augmentation de 20% par rapport au présent). (à droite) Anomalies mensuelles du débit de débordement entre le climat présent avec un débit de prélèvement présent et le climat futur avec débit de prélèvement futur (augmentation de 20% par rapport au présent). Les zones grisées représentent l'enveloppe de tous les modèles climatiques. ....	40
Illustration 23 : Evolution de l'occurrence des débits de débordement nuls (à gauche) et valeur du QJXA10 calculée à partir de la fonction de répartition empirique du débit de débordement max (à droite) en fonction des hypothèses de calcul (impact du débit de prélèvement seul, impact du climat seul et effet couplé débit de prélèvement + climat).....	41

## 1. Introduction

Le changement climatique, et ses conséquences sur le milieu naturel, est devenu une préoccupation majeure, aussi afin de mieux comprendre et d'appréhender cette problématique, le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE) a initié en 2010 le projet « Explore 2070 ».

L'objectif de ce projet (Elaboration et évaluation des stratégies d'adaptation au changement climatique en France face à l'évolution des hydrosystèmes et des milieux côtiers à l'horizon 2050-2070) est, à partir de différents scénarios climatiques, démographiques et socio-économiques, d'élaborer et d'évaluer des stratégies d'adaptation au changement climatique face à l'évolution des hydrosystèmes et des milieux côtiers à l'horizon 2050-2070, pour la métropole et les départements d'outre-mer. A l'aide d'une approche systémique, il s'agit de concevoir des stratégies d'adaptation permettant d'anticiper les effets du changement climatique et d'élaborer, pour chacune d'elles, une feuille de route visant à minimiser les risques et les coûts associés (financiers, humains, environnementaux).

Cette étude, qui a fait l'objet d'un appel d'offre, a été découpée en 8 lots et le 4ème lot « Expertise Hydrologie – Ressources souterraines et aquifères » a été confié au groupement BRGM/ ARMINES.

Afin d'évaluer l'impact du changement climatique sur les niveaux de nappes et les débits des cours d'eau, le groupement BRGM/ ARMINES a proposé, vu le temps imparti, d'utiliser les modèles hydrodynamiques maillés, déjà construits et calés sur la période actuelle.

La démarche de ce type d'étude consiste à estimer les émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols. Ces émissions sont alors utilisées par des modèles de climat pour en déduire l'évolution du climat dans le futur. Ces simulations sont ensuite désagrégées (ou régionalisées) pour obtenir une meilleure estimation de l'évolution du climat à une échelle plus fine. Ces informations régionales sont ensuite utilisées dans des modèles hydrologiques régionaux pour estimer l'impact du changement climatique sur les débits des rivières et le niveau des nappes phréatiques.

Sept modèles de climat et scénario d'émission de gaz à effet de serres (issus du 4ième exercice du GIEC) ont été traités dans le cadre du projet « Explore 2070 ». Six des sept modèles de climat utilisés (CCCMA\_GCGM3\_1, GFDL\_CM2\_0, GFDL\_CM2\_1, GISS\_MODEL\_E\_R,

MPI\_ECHAM5, MRI\_CGCM2\_3\_2A) couvrent uniquement la période 1961-1990 pour la simulation du climat actuel et la période 2046-2065 pour la période temps futur (ou milieu de siècle). Seul le modèle ARPEGE couvre de manière continue, la période 1950-2065.

Une première évaluation consiste à vérifier que ces simulations climatiques désagrégées sur le temps présent se comparent favorablement aux observations. (période 1961-1990).

L'impact du changement climatique sur les eaux souterraines se quantifie en comparant les résultats des modélisations hydrodynamiques obtenus avec les données fournies par chaque modèle climatique sur la période future (2046-2065) à ceux obtenus sur la période de référence (1961-1990) en considérant les prélèvements actuels comme constants, la variabilité des résultats obtenus pour l'ensemble des modèles climatiques permettant de cerner les incertitudes sur les projections climatiques.

Dans un second temps, un scénario considérant l'évolution des prélèvements dans le futur a été testé à partir de jeux de données fournis par le BIPE ; 7 simulations supplémentaires prospectives (une pour chaque modèle climatique) ont donc été réalisées.

Le groupement BRGM/ ARMINES a donc réalisé ces modélisations sur l'ensemble des modèles hydrodynamiques actuellement disponibles soit :

- o les deux grands bassins sédimentaires (bassin parisien et bassin aquitain),
- o les aquifères du Jurassique de la région Poitou Charente,
- o l'aquifère alluvial de la plaine d'Alsace,
- o l'aquifère crayeux de la Somme,
- o l'aquifère calcaire de Grande Terre en Guadeloupe,
- o et afin de compléter cette évaluation dans un milieu karstique, par utilisation d'un modèle global sur les sources du Lez.

L'exploitation de chacun de ces modèles, dont l'historique, la description et le calage ont été détaillés dans le rapport d'avancement précédent, fait l'objet d'un rapport spécifique séparé.

Le présent volume traite du modèle global sur les sources du Lez : il comprend :

- une présentation succincte du modèle utilisé et des différentes données climatiques utilisées ;
- la méthodologie employée ;
- enfin, les principaux résultats en termes d'impact du changement climatique avec et sans évolution des prélèvements.



## 2. L'aquifère karstique du Lez

### 2.1. CARACTERISTIQUES PRINCIPALES

Située dans le département de l'Hérault, la source du Lez est une source karstique de type Vaclusien (en référence à la fontaine du Vaucluse, exutoire type d'un système karstique dans lequel les écoulements sont drainés sous le niveau de l'exutoire – Dorfliger et al. (2004)). Elle donne naissance à un fleuve côtier éponyme, long de 25,8 km, qui traverse Montpellier et se jette plus au sud dans la Méditerranée au niveau de la ville de Palavas-les-Flots (*Illustration 1*). La source du Lez constitue l'exutoire principal des massifs calcaires du Jurassique et du Crétacé, qui affleurent dans la région des Garrigues Nord Montpelliéraines, situées au pied des Cévennes. Elle jaillit à la côte +65 m NGF, dans une vasque qui s'est développée au sein des calcaires du Berriasien, au niveau d'une faille normale (*Illustration 2*). Le secteur est constitué de collines et de plateaux, dont les points culminants sont le pic St Loup (658 m) et le Causse de l'Hortus (512 m) et qui sont limités à l'ouest par le fleuve Hérault et à l'est et au nord par le fleuve Vidourle.

La particularité de cet aquifère réside dans le fait qu'il est exploité selon le principe de « gestion active » (mise en place suite aux études réalisées par le Prof. Avias de l'Université de Montpellier, dans les années 1960-1970), qui consiste à prélever l'eau souterraine directement dans le drain karstique principal alimentant la source, à une cote inférieure à celle-ci (*Illustration 2*). Ce mode de gestion permet ainsi d'exploiter les eaux souterraines de l'aquifère par pompage en période de basses eaux, avec un débit supérieur au débit d'étiage de la source. On peut de cette manière solliciter les réserves de l'aquifère en période d'étiage, tout en assurant leur reconstitution lors des périodes automnale et hivernale.

La ressource en eau souterraine de cet aquifère est ainsi captée par Véolia Eau pour l'alimentation en eau potable de la ville de Montpellier, à plus de 400 m en amont de la source et à un débit moyen de 1.1 m<sup>3</sup>/s pour la période 1997-2005. Ce mode d'exploitation a bien sûr une influence sur les débits de la source du Lez, dont l'écoulement est susceptible de diminuer en période de pompage jusqu'au tarissement. Pour compenser l'impact du pompage sur le débit du fleuve alimenté par la source, une partie du flux pompé est restitué en aval de la vasque, à un débit de 160 l/s fixé par Déclaration d'Utilité Publique (05 juin 1981). A partir de la plus basse côte observée, la DUP fixe

par ailleurs, un niveau d'eau minimal à 40 m NGF, ce qui autorise donc un rabattement maximal de 25 m (Illustration 2).

La modélisation du débit et de la piézométrie de la source du Lez doit donc prendre en considération le pompage, ainsi que le fonctionnement de type karstique du système.

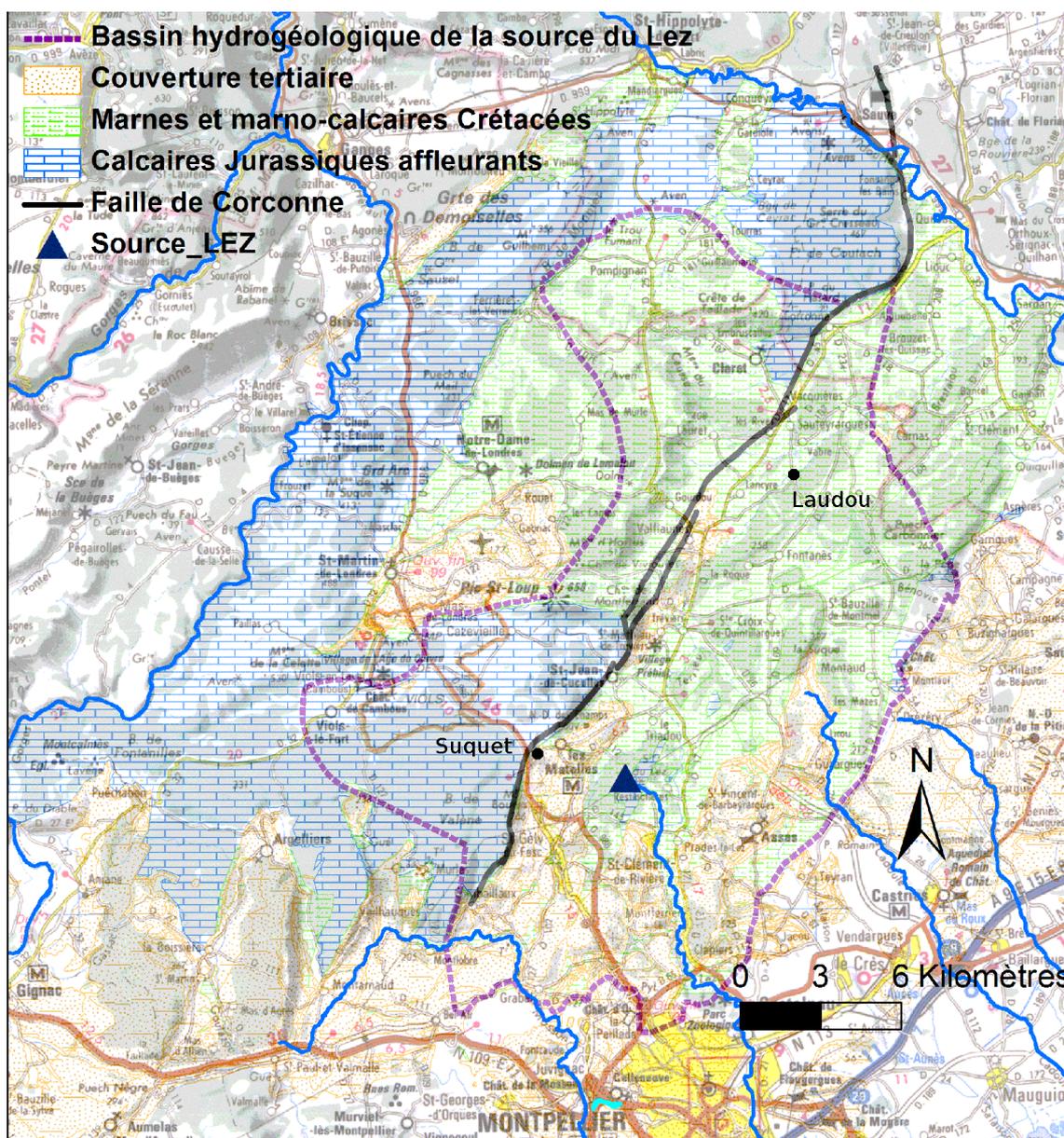


Illustration 1 : Localisation du bassin hydrogéologique de la source du Lez, de ces principales caractéristiques géologiques et des piézomètres du Suquet et Laudoux.

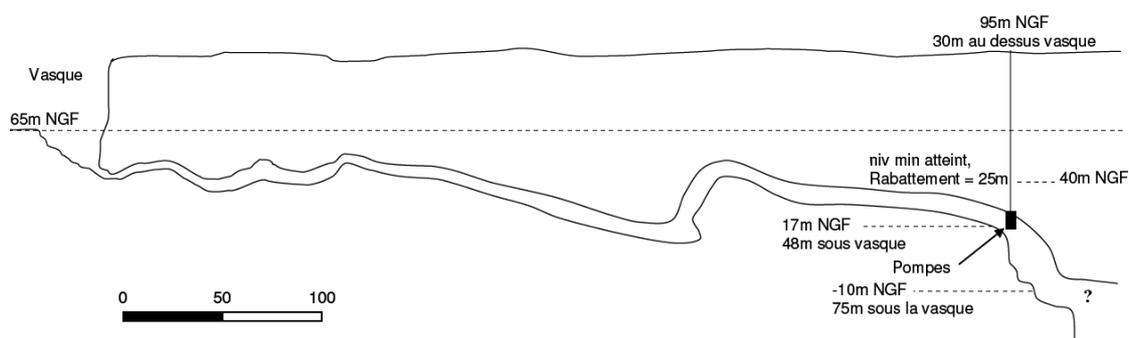


Illustration 2 : Réseau karstique de la source du Lez et dispositif de captage (Fleury et al. 2009).

## 2.2. CARACTERISTIQUES GEOLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES DE L'AQUIFERE KARSTIQUE

L'aquifère karstique du Lez présente une structuration orientée vers le sud, en relation avec l'épisode Messinien (assèchement de la Méditerranée), qui a provoqué le développement d'une karstification en profondeur et un drainage souterrain en direction de la Méditerranée. Néanmoins, la présence de grands accidents confère à ce système une typologie de « karst barré » permettant la mise en fonctionnement de sources de débordement. La géométrie des drains karstiques n'est pas connue avec précision. L'aquifère comporte très vraisemblablement deux axes de drainage principaux :

- l'un, relativement bien connu, orienté Nord-Est – Sud-Ouest, parallèle à la faille des Matelles-Corconne et d'une quinzaine de kilomètres d'extension au moins ;
- l'autre, de direction Nord-Ouest – Sud-Est, au droit duquel se trouvent la source du Lirou et la source du Lez.

Le bassin d'alimentation souterrain de la source du Lez a une superficie estimée de quelques 380 km<sup>2</sup> (Illustration 2). Ses limites ont été établies à partir des résultats d'essais de traçages, de l'identification des limites structurales imperméables ainsi que de l'analyse des niveaux d'eau dans les forages (Bérard, 1983).

D'un point de vue lithologique, ce système karstique est constitué par les calcaires massifs du Jurassique supérieur (Argovien à Kimméridgien) et de la base du Crétacé inférieur (Bérriasien). La base de l'aquifère est constituée des marnes et marno-calcaires du Jurassique moyen (Oxfordien)

alors que la limite supérieure de l'aquifère est marquée par la série marneuse et marno-calcaire du Crétacé inférieur (Albien).

Deux domaines différents peuvent être identifiés au sein de ce bassin versant, notamment en fonction de leur comportement vis-à-vis des processus d'alimentation de l'aquifère karstique :

- les secteurs où affleurent les calcaires jurassiques, qui représentent une superficie d'environ 100 km<sup>2</sup>, soit 26% de la superficie du bassin d'alimentation souterrain. Ces secteurs présentent en général un réseau hydrographique de surface peu développé, ce qui permet de considérer, en première approximation, que l'essentiel des pluies efficaces s'infiltrent directement via l'épikarst ;
- les secteurs où affleurent les formations correspondantes au toit de l'aquifère (marnes et marno-calcaires crétacés, formations éocènes, oligocènes et quaternaires principalement). Ces formations sont soit peu perméables, soit nettement moins karstifiées que les formations jurassiques. Elles présentent par conséquent un réseau hydrographique de surface mieux organisé, dont une partie est intégrée au bassin versant topographique du Lez à la Valette (120 km<sup>2</sup> environ) (figure).

Parmi ces roches, les formations calcaires (calcaires éocènes et parties les plus carbonatées des formations marno-calcaires secondaires) renferment des aquifères karstiques perchés, d'extensions variées (de quelques hectares à une à deux dizaines de kilomètres carrés), dont la plupart sont indépendants de l'aquifère karstique du Lez. Ils donnent lieu à des sources parfois pérennes (autour des calcaires éocènes et crétacés du causse de l'Horthus essentiellement), mais plus généralement temporaires (« boulidous ») ou au débit très modeste en basses eaux.

Les formations marneuses et marno-calcaires comportent localement, au droit du réseau hydrographique de surface qui les sillonne, des zones de pertes situées à proximité de la faille des Matelles ou de ses satellites et dont la grande majorité alimente l'aquifère karstique du Lez.

Le fonctionnement des secteurs crétacés peut donc être résumé comme suit :

- en période de basses et moyennes eaux, la quasi intégralité des écoulements de surface se perdent et alimentent l'aquifère du Lez ;

- en période de hautes eaux, les débits des cours d'eau présentent des valeurs plus élevées que la capacité d'absorption des pertes et, par conséquent, une partie des écoulements sont exportés vers d'autres bassins versants (Vidourle, Mosson, etc.).

### 2.3. FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE DE L'AQUIFERE KARSTIQUE

Un travail important de caractérisation du fonctionnement de l'aquifère a été réalisé notamment dans le cadre du projet LEZ LGMU 2007-2013 (Jourde et al., 2011). Sur la base de ce travail, il est possible de résumer le comportement de l'aquifère exploité de la manière suivante :

- en période de hautes eaux, lorsque le débit naturel de la source (c'est à dire le débit qu'aurait la source en l'absence de pompage) est supérieur au débit pompé dans le drain karstique, le niveau piézométrique se situe au-dessus de 65 m NGF, la source coule et alimente le Lez. On peut alors considérer que les réserves de la zone noyée ne sont pas sollicitées par le pompage ;
- en période de basses eaux, le débit de la source est inférieur au débit pompé, ce qui provoque une baisse du niveau piézométrique. Celui-ci passe alors sous les 65 m NGF, ce qui provoque un assèchement total de la vasque.

Ainsi, pour pouvoir reproduire correctement le comportement de l'aquifère, le concept de « sollicitation des réserves » (Ladouche et al, 2006) a été utilisé. En effet, on ne peut pas considérer que le pompage sollicite les réserves de l'aquifère à tout moment de l'année, puisqu'une partie du débit pompé peut provenir de la recharge, notamment en période de hautes eaux. Ce concept considère donc que la sollicitation de la réserve de l'aquifère intervient lorsque le débit total de pompage devient supérieur au débit naturel qu'aurait présenté la source en l'absence de pompage (Eq. 1).

$$(Eq. 1) \quad \text{Sollicitation} = Q_{\text{naturel}} - Q_{\text{pompage}}$$

On considère alors que la fonction de sollicitation est nulle lorsque qu'il se produit un débordement à la vasque. Ainsi, la prise en compte de la recharge et de cette fonction de sollicitation permet de simuler les forçages s'exerçant réellement sur le système aquifère.

## **2.4. MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE DE L'AQUIFERE DU LEZ**

La construction du modèle de simulation du comportement de l'aquifère karstique du Lez a été faite à l'aide de l'outil TEMPO. Cet outil de modélisation repose sur la notion de réponse impulsionnelle qui exprime la manière dont une variable de « sortie » d'un système (débit, niveau piézométrique, flux) réagit suite à une variation d'une des « entrées » de ce même système (pluie, évapotranspiration potentielle ETP, niveau d'une nappe, prélèvement, variation de concentration d'un traceur naturel ou d'origine anthropique, etc...). L'approche méthodologique dite de *modélisation inverse* permet la caractérisation du fonctionnement d'hydrosystèmes complexes tel les systèmes karstiques (Pinault et al 2001a, b, 2004, 2005), Pinault et Schomburgk (2006), Pinault et Allier (2007); Dörfliger et al, 2009). Ainsi, l'utilisation d'un modèle inverse à plusieurs variables d'entrée permet de séparer les influences ou contributions des différentes entrées du système au comportement de la variable de sortie.

Ce type d'approche est intéressante dans le cas de l'aquifère karstique du Lez, puisqu'elle permet de travailler sur les contributions respectives de la pluie efficace et du débit de pompage sur le niveau piézométrique au sein de l'aquifère et le débit de la source du Lez au niveau de la vasque. L'influence des variables d'entrée sur celles de sortie se traduit dans le modèle par l'utilisation de réponses impulsionnelles lentes et rapides, que l'on combine de manière à reproduire les dynamiques hautement non-linéaires caractéristiques du comportement d'un aquifère karstique (effets de chasse, mise en connexion d'une nappe temporaire dans l'épikarst avec la zone noyée au travers de fractures et/ou conduits subverticaux, effet retard lié aux circulations plus lentes dans la matrice (Pinault et al, 2001)).

### **2.4.1. Simulation du débit naturel de la source du Lez**

Le modèle construit sous Tempo pour simuler le comportement de l'aquifère karstique du Lez calcule dans un premier temps les débits naturels de la source du Lez (c'est-à-dire tels qu'ils seraient si l'aquifère n'était pas exploité). La pluie efficace est ainsi calculée à partir de la pluie et de l'ETP du pas de temps de calcul, en combinant un hydrogramme unitaire et un facteur de seuil pour la pluie efficace représentatif du déficit de la réserve utile des sols. Ce facteur de seuil permet de simuler le fait que seule une hauteur de pluie supérieure à ce seuil génère une pluie efficace. Il est calculé par inversion des signaux pluie et ETP des pas de temps de calcul précédents, en intégrant l'inertie de leur influence sur l'état hydrique du sol, à l'aide des réponses impulsionnelles.

Les résultats du calage de la modélisation du débit naturel de la source du Lez confrontés aux estimations de ce débit, faites sur la base des observations disponibles (Jourde et al., 2011) sont présentés sur l'illustration 3. Ces résultats sont considérés satisfaisants, car les pics de crues et le tarissement sont globalement bien reproduits, ce qui se confirme par les critères statistiques de qualification de l'ajustement obtenus. Le temps de transit moyen de la réponse impulsionnelle lente (42 jours), souligne la nature globalement peu inertielle de ce système karstique.

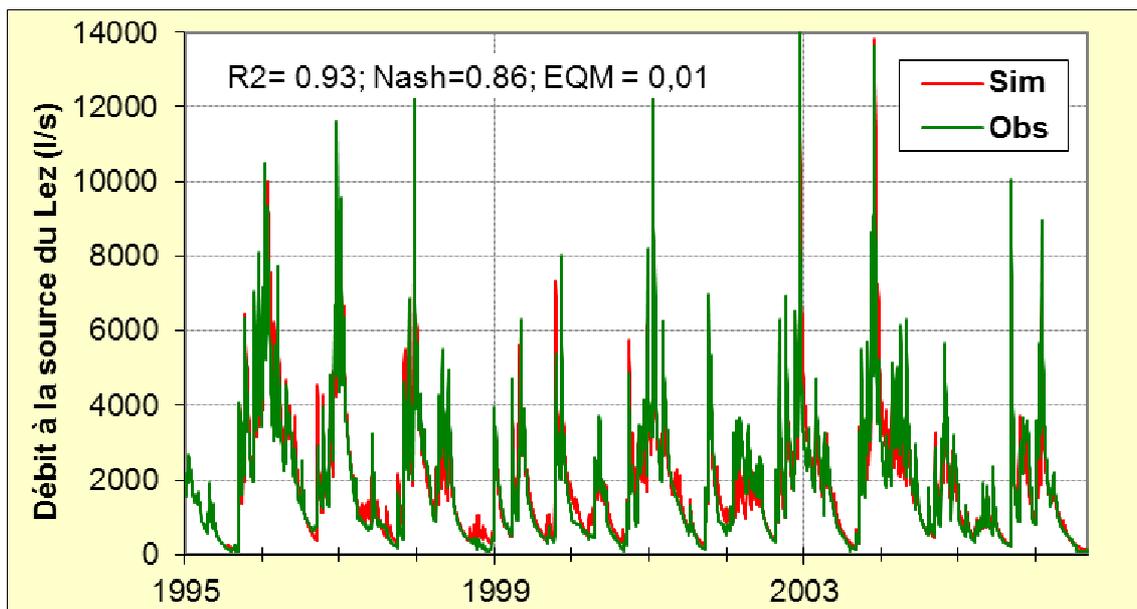


Illustration 3 : Calage de la simulation du débit naturel estimé à la source du Lez.

Une simulation réalisée sur la période 1977 – 2010 permet de proposer une validation du modèle construit (Illustration 4).

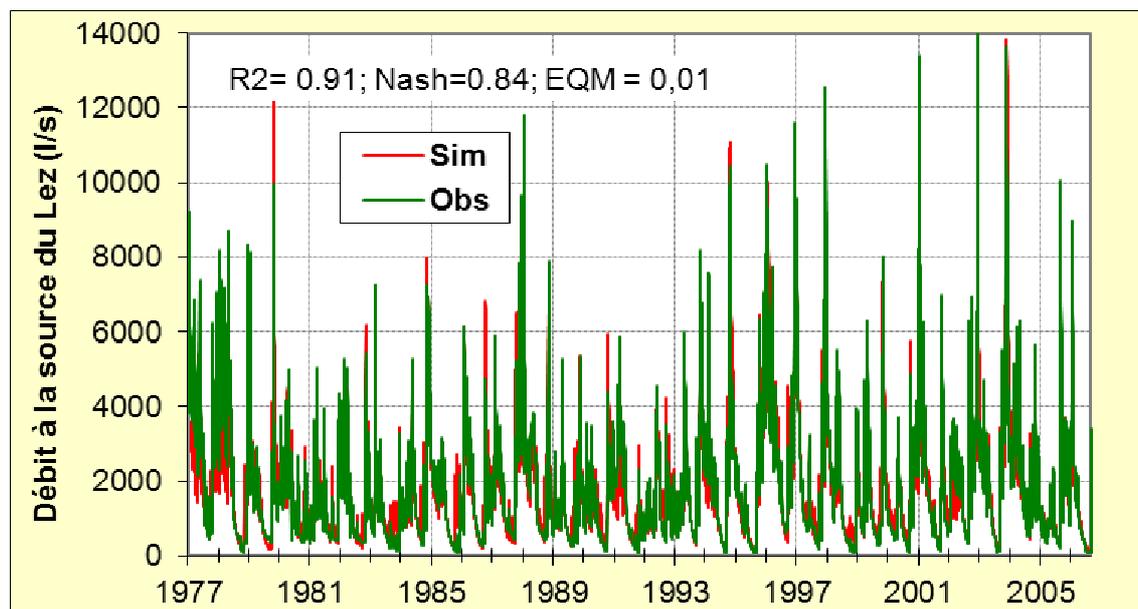


Illustration 4 : Validation de la simulation du débit naturel estimé à la source du Lez.

#### 2.4.2. Simulation du niveau piézométrique de l'aquifère karstique du Lez

Une fois le débit naturel simulé, les modèles de transfert pour simuler la piézométrie ont été construits. Le module principal, qui simule le niveau piézométrique au sein du drain principal (*Illustration 2*), intègre en entrée la pluie efficace, le débit naturel de la source du Lez (simulé par le premier modèle), la fonction de sollicitation (débit naturel de la source du Lez – débit de pompage) et deux sous-modules de simulation de la piézométrie au niveau de Suquet et de Laudou (*Illustration 5*).

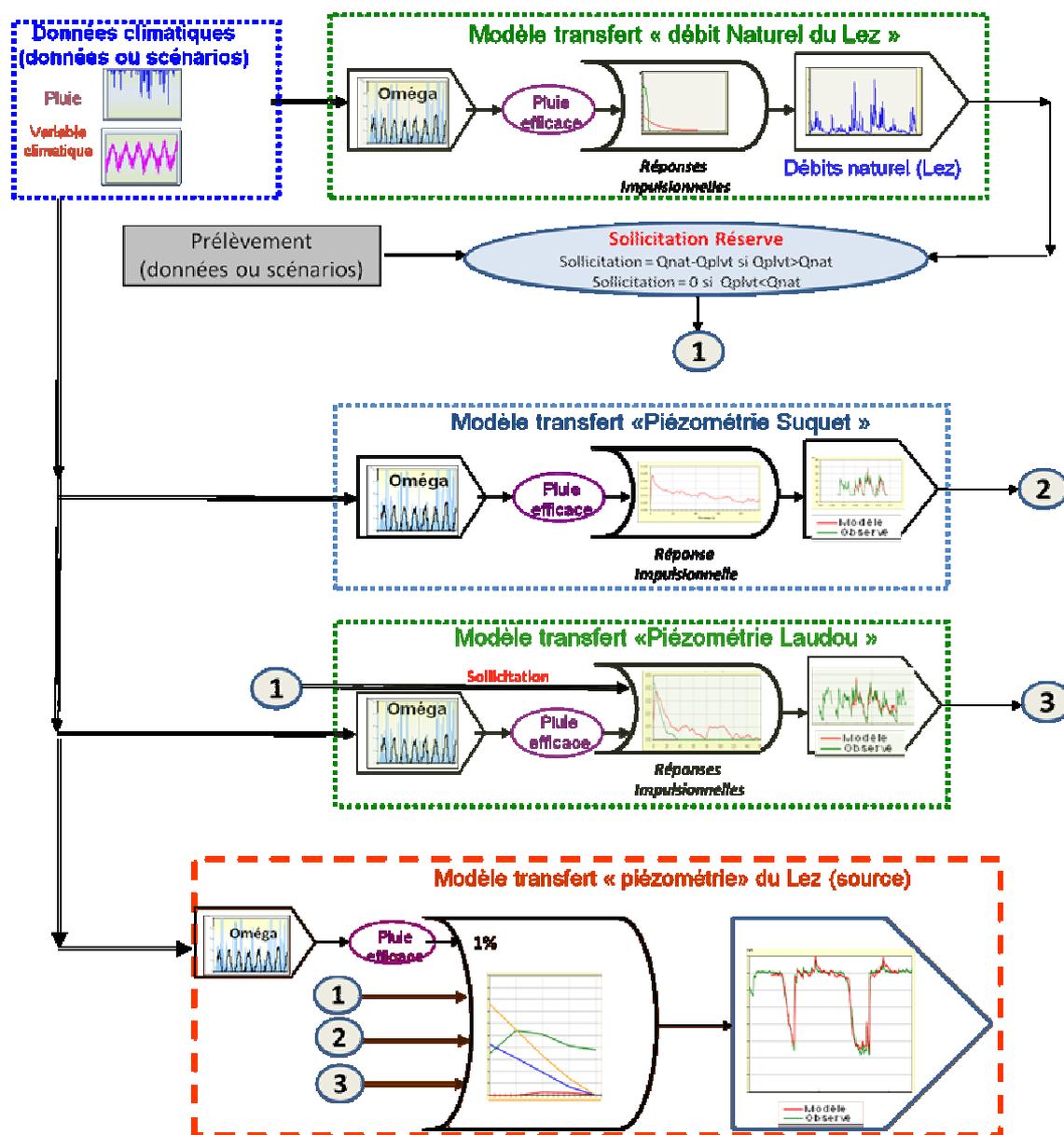


Illustration 5 : Schéma récapitulatif du fonctionnement du modèle de l'aquifère karstique du Lez.

Les deux sous-modules sont utilisés pour caractériser la contribution au comportement du niveau piézométrique dans le drain principal du compartiment Jurassique situé à l'ouest de la faille de Corconne (Suquet) d'une part, et du compartiment crétacé (Laudou), d'autre part.

En effet, une « déconnexion piézométrique » entre le compartiment Jurassique situé à l'ouest de la faille de Corconne (ou est implanté le piézomètre du Suquet – Illustration 1) et le drain principal situé

à l'est, a été mis en évidence en période de basses eaux (Jourde et al., 2011). Pendant cette période, la charge mesurée au piézomètre de Suquet n'apparaît plus être influencée par les rabattements observés dans le drain, en lien avec les pompages. Cette déconnexion se produit lorsque la charge piézométrique du drain principal est de 53,5 m NGF. Il convient cependant de noter que ce phénomène n'empêche pas qu'un flux d'eau en provenance du compartiment ouest ne continue d'alimenter le jurassique sous couverture en période d'étiage. En période de hautes eaux par contre, la réponse piézométrique est similaire pour les deux compartiments.

L'eau échantillonnée au niveau du piézomètre de Laudou, situé sur le compartiment Crétacé (*Illustration 1*), présente une signature isotopique très comparable à celle du drain principal. De plus, leurs comportements piézométriques sont comparables en toutes saisons. La caractérisation du transfert du signal entre l'ouvrage du Laudou et le drain principal permet donc de rendre compte de l'effet lié à la recharge en provenance du crétacé.

### **2.4.3. Résultats du calage et de la validation du modèle**

Le modèle construit permet donc de simuler au pas de temps journalier l'évolution du niveau piézométrique dans l'aquifère karstique du Lez et le débit de débordement au niveau de la vasque, lorsque le niveau piézométrique est supérieur à 65 m NGF.

Pour calculer la fonction de sollicitation, des données journalières de débit pompage sont disponibles pour la période 1975-2010 (les données pour la période 1990-1994 ont été interpolées à partir des valeurs hebdomadaires ou mensuelles disponibles). La sollicitation des réserves du karst est maximale en été, en moyenne de l'ordre de 466 l/s pour le mois d'août, par exemple. Pour les années déficitaires en recharge, les débits de sollicitation des réserves du karst sont de l'ordre de 800 l/s au mois d'août (Jourde et al., 2011).

Le modèle permet de reproduire de manière satisfaisante les évolutions de la piézométrie dans l'aquifère karstique en calage (*Illustration 6*) et validation (*Illustration 7*). Le comportement est cependant généralement mieux simulé pendant les périodes d'étiage que lors des crues dont le tarissement est mal reproduit.

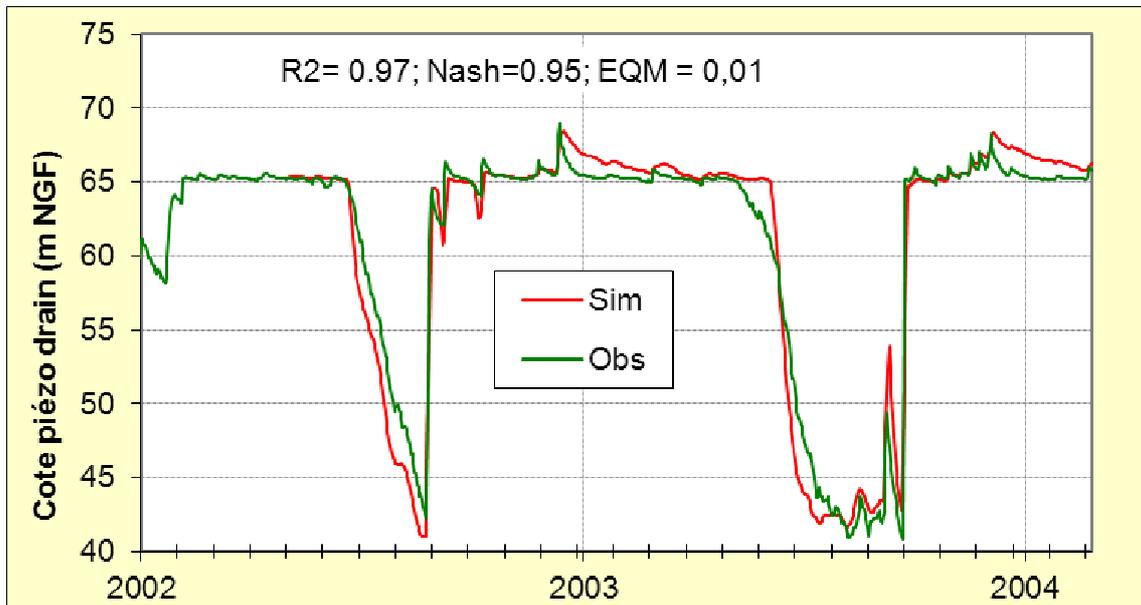


Illustration 6 : Niveaux piézométriques simulé et observé (calage).

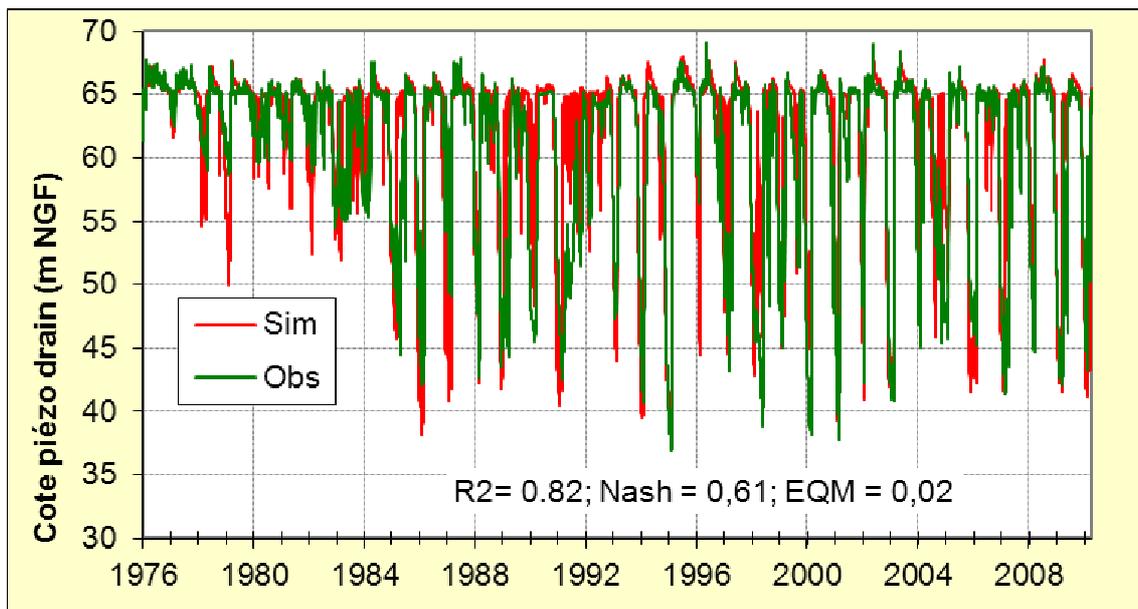


Illustration 7 : Niveaux piézométriques simulé et observé (validation)

### 3. Les scénarios climatiques : données d'entrée

#### 3.1. DONNEES CLIMATIQUES

Un certain nombre de scénarios climatiques ont été produits dans le cadre du projet Explore 2070 pour permettre la réalisation d'études d'impact du changement climatique sur l'ensemble du territoire. Les données de 7 modèles de climat ont ainsi été « désagrégées » (c'est-à-dire passer de la résolution spatiale des modèles de climat – centaine de kilomètres, à celle des modèles d'impact régionaux – quelques kilomètres) suivant une méthode statistique multivariée, qui repose sur l'utilisation du concept de type de temps (Boé et al. 2006 ; Boé 2007) et intégrée dans l'outil DsClim développé au CERFACS (<http://www.cerfacs.fr/~page/work/dsclim/>). Des chroniques de pluie et d'évapotranspiration (ETP) sont ainsi projetées sur la grille SAFRAN (Vidal et al. 2010) qui couvre l'ensemble du territoire national, avec une résolution spatiale de 8 km. Le détail de ces scénarios à l'échelle nationale est présenté dans le document « Rapport d'étape n°2, Hydrologie de surface, produit par le lot 3 de l'étude ».

Sur notre zone d'étude, ces scénarios se déclinent de la manière suivante.

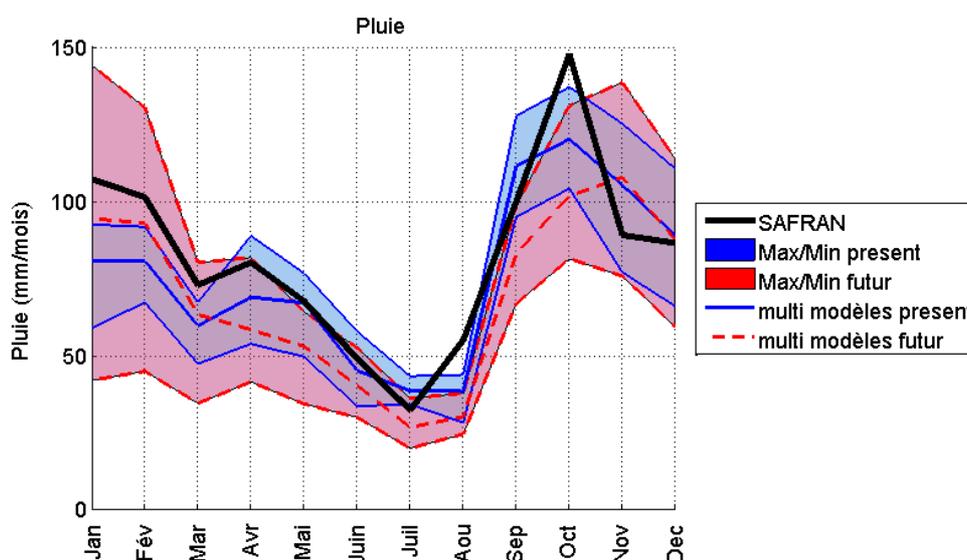
<b>MCGOA</b>	ARPEGE V3 / GFDL-CM2.0 / MRI-CGCM2.3.2 CCCMA-CGCM3 / GFDL-CM2.1 / MPI ECHAM5 / GISS-MODEL-ER
<b>Périodes</b>	01/08/1960 au 31/12/1991 01/08/2046 au 31/07/2065
<b>Scénario CO<sub>2</sub></b>	A1B
<b>Méthode de désagrégation</b>	Régime de temps

Les données de précipitations et d'ETP sont fournies au pas de temps journalier et couvrent la période du 01/08/1960 au 31/12/1991 et du 01/08/2046 au 31/07/2065.

L'ensemble du bassin d'alimentation de l'aquifère du Lez recouvre une quinzaine de mailles SAFRAN. Pour obtenir deux chroniques de pluie et d'ETP représentatives de la zone interceptée par le bassin d'alimentation, nous avons fait le choix de créer une fonction de pondération en fonction de la surface du bassin interceptée par les mailles, pour calculer les lames d'eau de pluie et d'ETP globales sur le bassin d'alimentation.

Les moyennes mensuelles interannuelles de pluie et d'ETP calculées à partir de SAFRAN d'une part, et de tous les modèles (multi-modèle) d'autre part, pour les périodes présentes et futures sont présentées sur les *Illustration 8* et *Illustration 10*.

Les différences moyennes mensuelles relatives entre les périodes future et présente par modèle et multi-modèle (anomalies) de pluie et d'ETP sont représentées sur les *Illustration 9* et *Illustration 11*.



*Illustration 8 : Moyennes interannuelles de la pluie mensuelle calculées à partir des données SAFRAN en noir, multi-modèle présent en bleu (trait plein) et multi-modèle futur en rouge (trait en pointillés). Les enveloppes autour des moyennes multi-modèle représentent la dispersion des modèles climatiques (valeurs maximales et minimales parmi les 7 modèles climatiques pour chaque mois)*

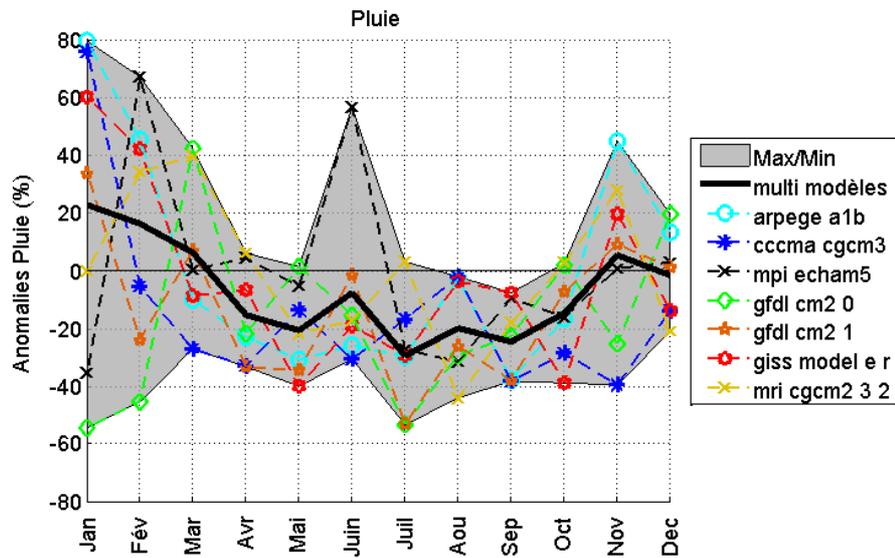


Illustration 9 : Anomalies mensuelles de précipitations calculées à partir des moyennes interannuelles de la pluie mensuelle présentes et futures. La zone grisée représente l'enveloppe de tous les modèles climatiques.

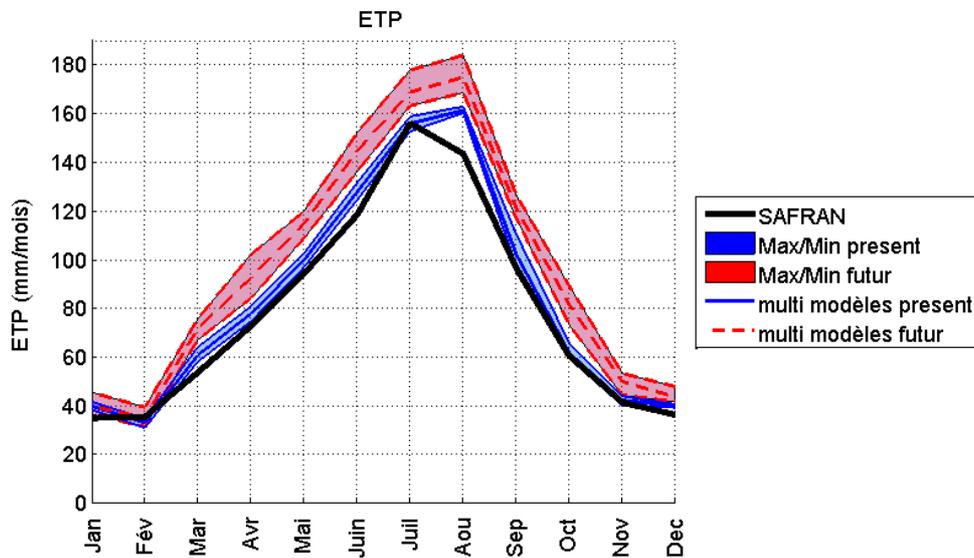


Illustration 10 : Moyennes interannuelles de l'ETP mensuelle calculées à partir des données SAFRAN en noir, multi-modèle présent en bleu (trait plein) et multi-modèle futur en rouge (trait en pointillets). Les enveloppes autour des moyennes multi-modèle représentent la dispersion des modèles climatiques (valeurs maximales et minimales parmi les 7 modèles climatiques pour chaque mois)

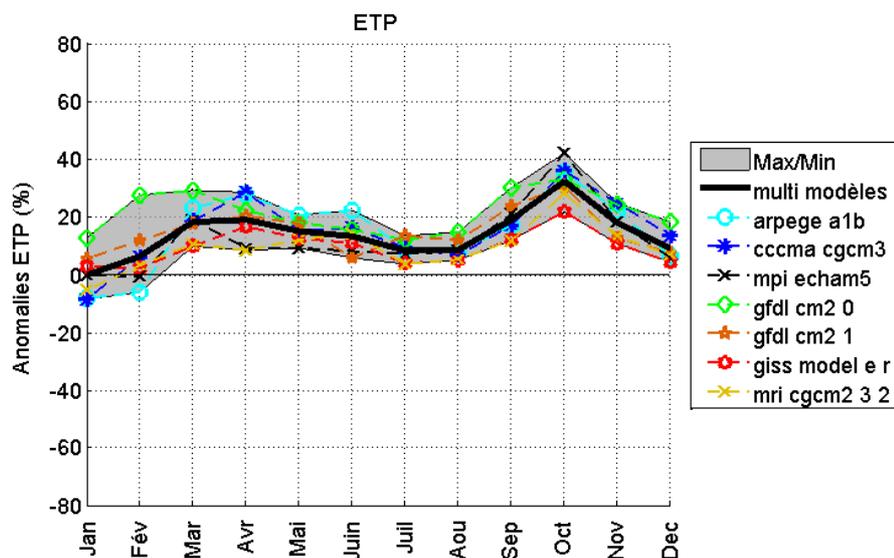


Illustration 11 : Anomalies mensuelles de l'ETP calculées à partir des moyennes interannuelles de l'ETP mensuelle présentes et futures. La zone grisée représente l'enveloppe de tous les modèles climatiques.

La comparaison de la moyenne multi-modèle de la pluie à la moyenne SAFRAN au temps présent montre que l'ensemble des modèles climatiques sous-estime les cumuls de précipitations de janvier à mars, ainsi qu'en août et en octobre. A l'inverse, les cumuls des mois de septembre et novembre sont surestimés. La dynamique générale est respectée, on observe les précipitations les plus élevées en automne (épisodes cévenols), alors qu'elles sont plus modérées au printemps et très faibles en été.

Pour les précipitations futures projetées par l'ensemble des modèles, on observe une augmentation de la pluie hivernale, de l'ordre de +20% en janvier-février et une diminution de l'ordre de -20% entre avril et octobre. Pour le mois de juin, le modèle *mpi echam5* simule une augmentation de +60% du cumul de précipitation, qui a pour effet de « remonter » la valeur de la moyenne multi modèle à -10%.

La dispersion des modèles (largeur de l'enveloppe des précipitations simulées), et donc l'incertitude affectant les résultats est plus grande au futur qu'au présent, en particulier sur la période allant de novembre à mars (l'illustration 9, exception faite du mois de juin, dont une part majeure de l'incertitude est associée au comportement de *mpi echam5*).

Pour l'ETP (*Illustration 10*), la comparaison de la moyenne multi-modèle à la moyenne SAFRAN au temps présent montre que les cumuls sont surestimés en aout (+20 mm) et dans une moindre mesure entre mars et juin. Pour le reste de l'année, les écarts entre ces deux moyennes sont très faibles. Les enveloppes de l'ensemble des modèles climatiques sont plus resserrées autour des moyennes multi-modèles que pour les précipitations.

Pour le futur, on observe une augmentation des cumuls d'ETP sur l'ensemble de l'année, comprise entre +10 et +20% en moyenne multi-modèle (*Illustration 11*). En janvier, il n'y pas d'évolution du cumul d'ETP tandis qu'en octobre on observe l'évolution relative la plus importante (+30%). La dispersion entre les modèles relativement constante sur l'année est plus élevée au futur qu'au présent, mais reste bien inférieure à celle des précipitations.

### **3.2. DONNEES DE PRELEVEMENTS**

Dans un premier temps, impact du changement climatique, le débit de prélèvement est le même pour la période présente et la période future. Il est construit à partir de la chronique journalière d'une année type représentative de la période actuelle répétée chaque année (30 ans au présent, 20 ans au futur). Le volume de prélèvement total annuel correspondant à ce scénario est égal au volume de prélèvement total annuel moyen pour la période 2006, estimé par le BIPE sur la source du Lez (29 Mm<sup>3</sup>/an).

Puis, pour déterminer l'impact des prélèvements, le BIPE ayant projeté une augmentation moyenne annuelle de l'ordre de 20% sur la zone d'étude du Lez, nous avons appliqué cette augmentation à notre chronique de débit de prélèvement ( $Q_{\text{ptot futur}} = 29\text{Mm}^3 + 20\% = 34,8\text{Mm}^3$ ), sans en modifier la dynamique saisonnière.

## 4. Impacts du changement climatique

### 4.1. IMPACTS SUR LA PLUIE EFFICACE

Les moyennes mensuelles interannuelles de la pluie efficace sont présentées sur l'illustration 12. Elles sont calculées pour chacune des deux périodes ainsi que pour la référence SAFRAN.

Les anomalies mensuelles de la pluie efficace calculées à partir de ces moyennes sont représentées sur l'illustration 13.

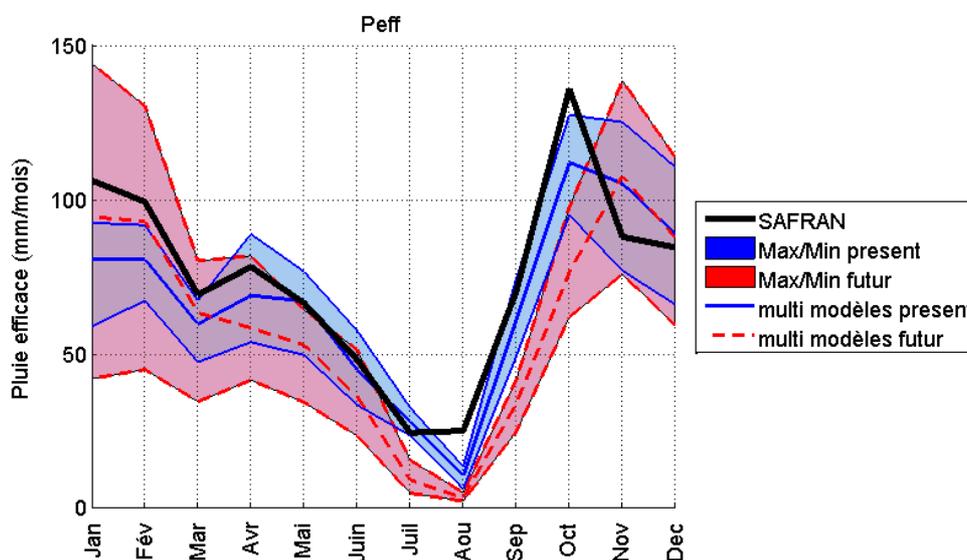


Illustration 12 : Moyennes interannuelles de la pluie efficace mensuelle calculées à partir des données SAFRAN en noir, multi-modèle présent en bleu (trait plein) et multi-modèle futur en rouge (trait en pointillés). Les enveloppes autour des moyennes multi-modèle représentent la dispersion des modèles climatiques (valeurs maximales et minimales parmi les 7 modèles climatiques pour chaque mois)

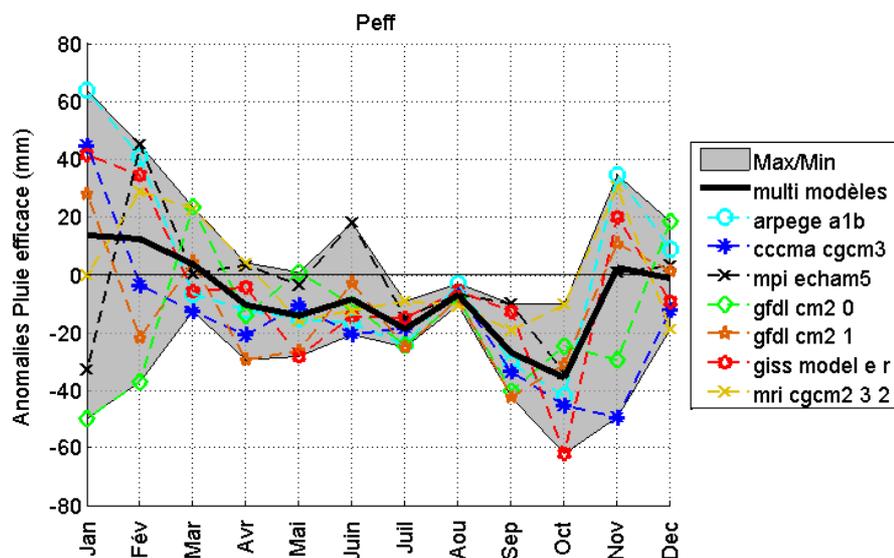


Illustration 13 : Anomalies mensuelles de la pluie efficace calculées à partir des moyennes interannuelles de la pluie efficace mensuelle présentes et futures. La zone grisée représente l'enveloppe de tous les modèles climatiques.

Les moyennes multi-modèle présentes et futures de la pluie efficace sont très proches des moyennes multi-modèle de la pluie en hiver, saison durant laquelle les cumuls d'ETP sont les plus faibles sur l'année. Pour les autres saisons, la pluie efficace est plus faible que la pluie à cause de l'ETP plus élevée. La comparaison de la moyenne multi-modèle présente à la moyenne SAFRAN montre que comme pour la pluie, les cumuls sont sous-estimés de janvier à mars. Ils le sont aussi pour les mois d'avril, septembre et octobre, cette fois-ci à cause de la surestimation de l'ETP par les modèles climatiques. La dynamique saisonnière est néanmoins respectée, excepté en aout, où la pluie efficace calculée par les modèles climatiques est très inférieure à la pluie efficace calculée à partir des données SAFRAN. Cette différence s'explique par l'allure de l'ETP qui est surestimé de +20mm en aout. Cet écart important ne devrait cependant pas impacter les évolutions du niveau piézométrique et du débit de débordement de manière importante car la contribution du mois d'aout à la recharge de l'aquifère est très faible.

Concernant l'évolution future de la pluie efficace, on observe que les cumuls de mois de mars à aout diminuent (de -10% à -20% en moyenne multi-modèle), avec une diminution plus importante en octobre (de l'ordre de -35%), mois pour lequel nous avons observé l'augmentation d'ETP la plus importante (+30%). Enfin, la pluie efficace augmente d'environ +15% en janvier et en février.

## 4.2. IMPACT SUR LES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES

Les moyennes mensuelles interannuelles du niveau piézométrique sont présentées sur l'*Illustration 14*. Elles sont calculées pour chacune des deux périodes ainsi que pour la référence SAFRAN. Les anomalies mensuelles du niveau piézométrique calculées à partir de ces moyennes sont représentées sur l'*Illustration 15*.

La comparaison de la moyenne multi-modèle présente à la moyenne SAFRAN montre que les niveaux piézométriques moyens simulés à partir des scénarios sont légèrement sous-estimés sur l'ensemble de l'année. Les écarts ne dépassent cependant pas 1m en moyenne, alors que la dispersion entre les résultats pour les scénarios temps présent est plus grande entre juin et septembre (période de sollicitation) que pour le reste de l'année.

En ce qui concerne l'évolution du niveau piézométrique au futur, on observe que les scénarios climatiques provoquent une diminution du niveau piézométrique entre les mois de mars et décembre. Peu marquée jusqu'au mois de juin, cette diminution s'observe principalement entre juillet et octobre, ou elle peut atteindre jusqu'à -6 m en moyenne multi-modèle au mois d'août et septembre. On constate que la légère augmentation de la pluie efficace observée au cours du mois de novembre ne suffit pas à empêcher une baisse de niveau en lien avec la réponse inertielle de l'aquifère au déficit de recharge printanier et estival. Enfin, l'augmentation de la recharge hivernale future liée à la pluie efficace plus importante, ne se traduit que par une légère augmentation du niveau piézométrique en février.

L'incertitude associée aux résultats des scénarios augmente au futur. La dispersion des modèles autour de la moyenne multi-modèle est deux fois plus grande en période estivale (4 m) qu'en période hivernale (2 m), conférant ainsi une plus grande incertitude aux résultats obtenus au cours de la période de sollicitation de l'aquifère par les pompages.

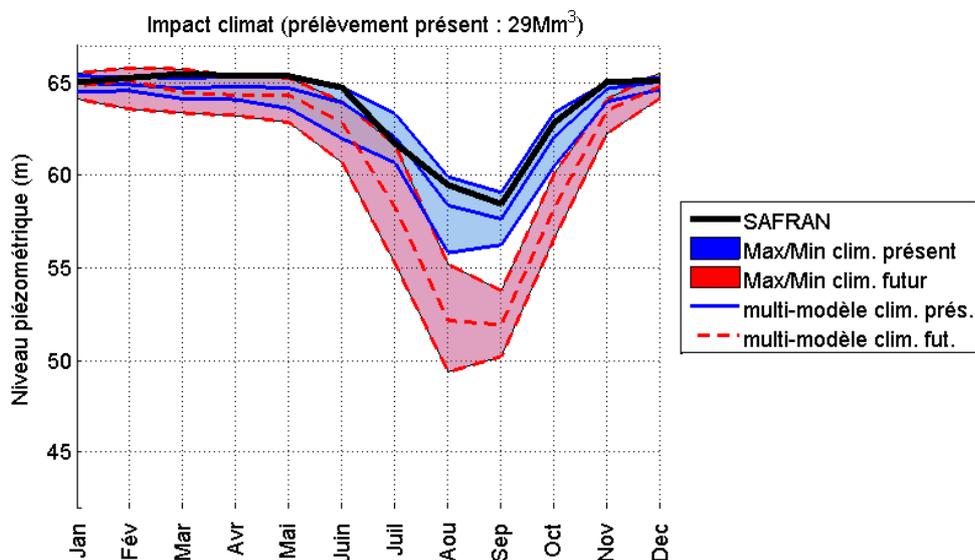


Illustration 14 : Moyennes interannuelles du niveau piézométrique mensuel calculées à partir des données SAFRAN en noir, multi-modèle présent en bleu (trait plein) et multi-modèle futur en rouge (trait en pointillés). Les enveloppes autour des moyennes multi-modèle représentent la dispersion des modèles climatiques (valeurs maximales et minimales parmi les 7 modèles climatiques pour chaque mois)

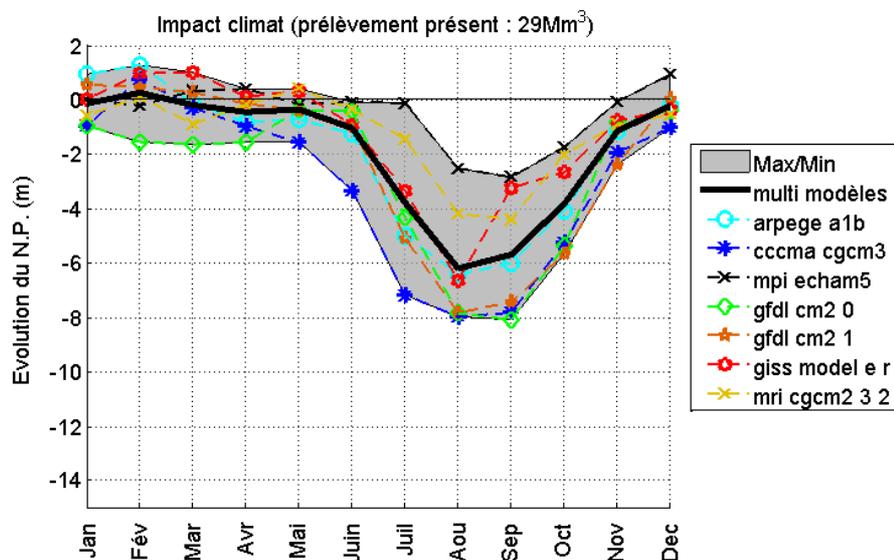


Illustration 15 : Anomalies mensuelles du niveau piézométrique calculées à partir des moyennes interannuelles du niveau piézométrique mensuel présentes et futures. La zone grisée représente l'enveloppe de tous les modèles climatiques.

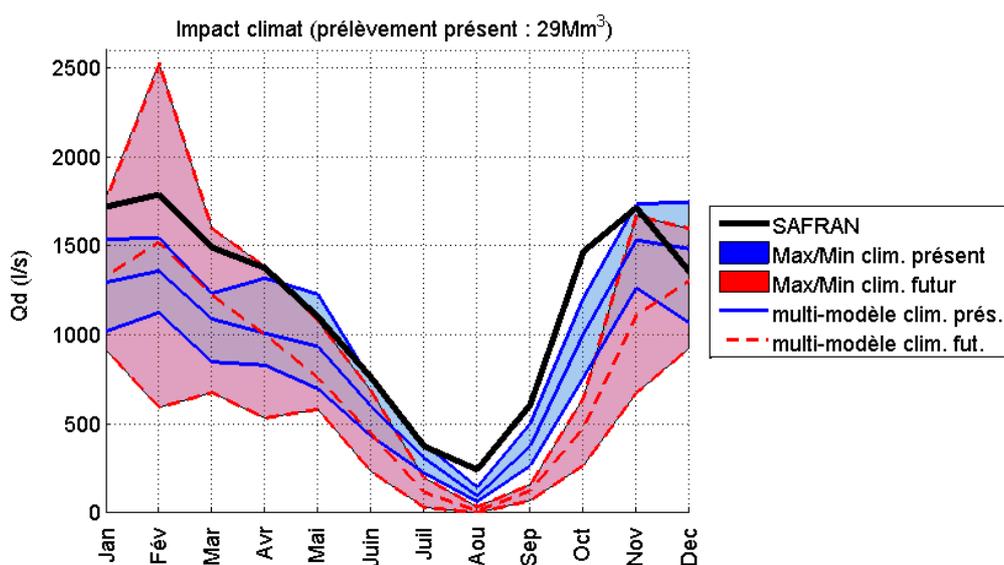
### 4.3. IMPACT SUR LE DEBIT DE DEBORDEMENT A LA SOURCE DU LEZ

Le débit de débordement à la source du Lez (Qd) représente le débit de débordement à la vasque et est donc le débit qui s'écoule véritablement dans le fleuve Lez. Il ne doit pas être confondu avec le débit naturel qui est le débit qui se serait écoulé à la source en l'absence de pompage.

Les moyennes mensuelles interannuelles du débit de débordement sont présentées sur l'illustration 16. Elles sont calculées pour chacune des deux périodes ainsi que pour la référence SAFRAN. Les anomalies mensuelles du débit de débordement calculées à partir de ces moyennes sont représentées sur l'illustration 17.

La comparaison de la moyenne multi-modèle présente à la moyenne SAFRAN montre que le débit à la source est sous-estimé une bonne partie de l'année et en particulier entre janvier et avril, où la moyenne multi-modèle se situe 500l/s sous la moyenne SAFRAN (Illustration 16). La période allant de novembre à avril est aussi la période sur laquelle on observe le plus de dispersion entre les modèles.

L'importante dispersion observée pendant la période hivernale au temps présent implique une évolution du débit futur très variable suivant les scénarios climatiques (*Illustration 17*). Si on constate en moyenne multi-modèle, une hausse du débit de l'ordre de 100 l/s entre janvier et avril, on observe notamment jusqu'à 2000 l/s d'écart entre les prévisions des modèles arpege a1b et gfdl cm2.0 au mois de février. Le débit moyen multi-modèle diminue ensuite sur le reste de l'année (autour de -150l/s de mai à septembre), avec une intensité plus marquée en automne (-500l/s en octobre-novembre).



*Illustration 16 : Moyennes interannuelles du débit à la source (Qd) mensuel calculées à partir des données SAFRAN en noir, multi-modèle présent en bleu (trait plein) et multi-modèle futur en rouge (trait en pointillés). Les enveloppes autour des moyennes multi-modèle représentent la dispersion des modèles climatiques (valeurs maximales et minimales parmi les 7 modèles climatiques pour chaque mois).*

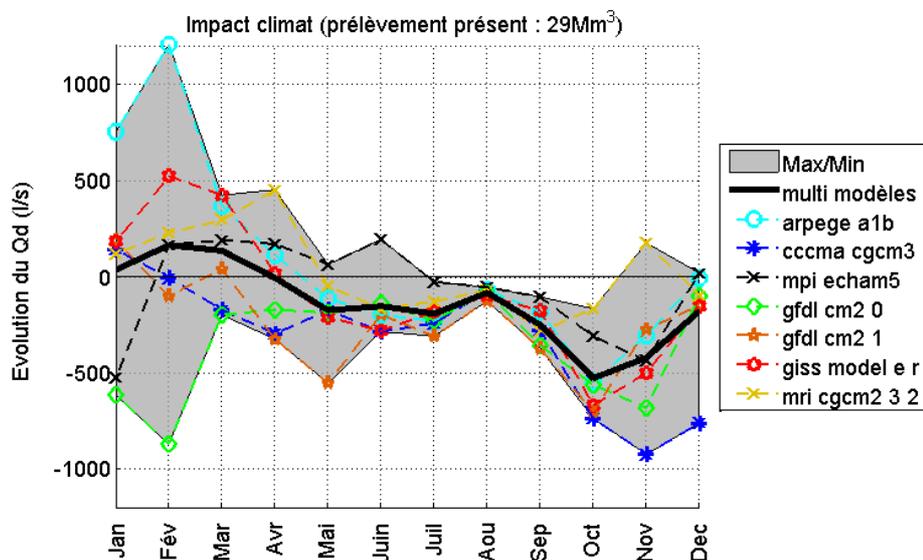


Illustration 17 : Anomalies mensuelles du débit à la source (Qd) calculées à partir des moyennes interannuelles du débit de débordement mensuel présentes et futures. La zone grisée représente l'enveloppe de tous les modèles climatiques.

## 5. Impacts du scénario de prélèvement

Dans cette section nous allons analyser l'impact d'une augmentation du débit de prélèvement (Qp) sur le niveau piézométrique et le débit de débordement en situation future et en lien avec les projections du BIPE faites dans le cadre du lot 7 d'EXPLORE 2070 sur les prélèvements futurs. Cette analyse permettra de comparer les impacts liés aux scénarios climatiques à ceux liés aux évolutions des prélèvements. Le BIPE ayant projeté une augmentation moyenne annuelle de l'ordre de 20% des prélèvements sur la zone d'étude du Lez, nous avons appliqué cette augmentation à notre chronique de débit de prélèvement ( $Q_{\text{ptot futur}} = 29\text{Mm}^3 + 20\% = 34,8\text{Mm}^3$ ), sans en modifier la dynamique saisonnière.

## 5.1. IMPACT SUR LES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES

Les moyennes mensuelles interannuelles du niveau piézométrique sont présentées sur l'illustration 18. Elles sont calculées pour chacun des deux débits de prélèvement ( $Q_p$  et  $Q_p+20\%$ ) ainsi que pour la référence SAFRAN.

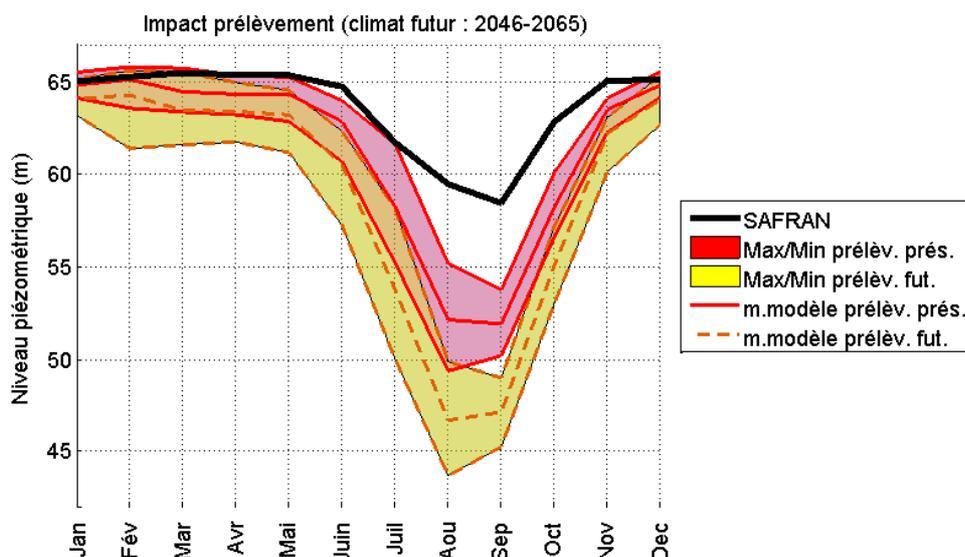
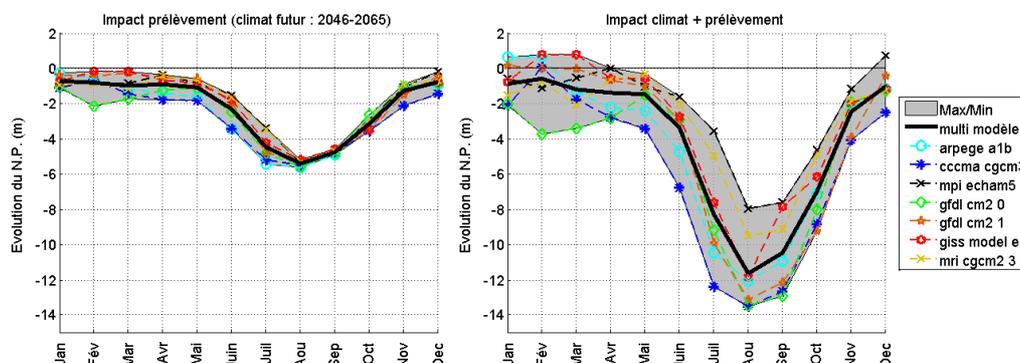


Illustration 18 : Moyennes interannuelles du niveau piézométrique mensuel calculées à partir des données SAFRAN en noir, multi-modèle futur +  $Q_p$  en rouge (trait plein) et multi-modèle futur +  $Q_p + 20\%$  en jaune (trait en pointillés). Les enveloppes autour des moyennes multi-modèle représentent la dispersion des modèles climatiques (valeurs maximales et minimales parmi les 7 modèles climatiques pour chaque mois)

Sous l'effet d'un pompage plus important, les niveaux moyens mensuels diminuent d'environ -1m en période de hautes eaux (novembre à mai) et jusqu'à -5m en période de sollicitation. Ceci indique donc qu'en moyenne multi-modèle, l'impact de l'augmentation des prélèvements projetée est du même ordre de grandeur que l'impact des scénarios climatiques. De plus, la dispersion des résultats entre les deux scénarios de pompage pour la période future est logiquement plus faible que celle qui était observée entre le climat présent et le climat futur (Illustration 19). Ainsi, l'effet couplé de l'évolution du climat et de l'augmentation du débit de prélèvement, entrainerait une diminution des

niveaux piézométriques pouvant aller jusqu'à -12m par rapport au niveau actuel simulé (climat 1961-1990, Qp présent) en période de sollicitation (*Illustration 19*).



*Illustration 19* : (à gauche) Anomalies mensuelles du niveau piézométrique entre le climat futur (2046-2065) avec un débit de prélèvement présent et le climat futur avec débit de prélèvement futur (augmentation de 20% par rapport au présent). (à droite) Anomalies mensuelles du niveau piézométrique entre le climat présent avec un débit de prélèvement présent et le climat futur avec débit de prélèvement futur (augmentation de 20% par rapport au présent). Les zones grisées représentent l'enveloppe de tous les modèles climatiques.

De manière à caractériser la sensibilité de l'exploitation de l'aquifère aux scénarios climatiques et de pompage considérés, nous avons représenté sur l'*Illustration 20* l'occurrence des niveaux appartenant à la classe [45m, 35m NGF] (en dessous de 45 m NGF, les exploitants de l'aquifère font appel à une ressource complémentaire (eau du Rhône)) et inférieurs à 35m NGF (seuil minimal actuel d'exploitation de l'aquifère) pour les données SAFRAN et pour chacune des scénarios suivants :

- Référence : climat 1961-1990, prélèvement 29 Mm<sup>3</sup>
- Prélèvement : climat 1961-2000, prélèvement 34,8 Mm<sup>3</sup>
- Climat : climat 2046-2065, prélèvement 29 Mm<sup>3</sup>
- Climat + prélèvement : climat 2046-2065, prélèvement 34,8 Mm<sup>3</sup>

Des « boîtes à moustache » sont calculées à partir des valeurs issues des 7 modèles climatiques (*Illustration 20*). La médiane (trait rouge) est calculée à partir de tous les modèles (multi-modèle) et l'écart entre les extrémités des boîtes (traits bleus) représente l'écart interquartile (3ème quartile

pour le trait du haut et 1er quartile pour celui du bas). Les extrêmes sont représentés par les moustaches (traits noirs courts situés au bout des pointillés) et les valeurs singulières (se situant au-delà de  $1.5 \times I$  l'écart interquartile) par des points rouges. Les résultats obtenus à partir des données SAFRAN avec le débit de prélèvement présent sont représentés par une étoile noire.

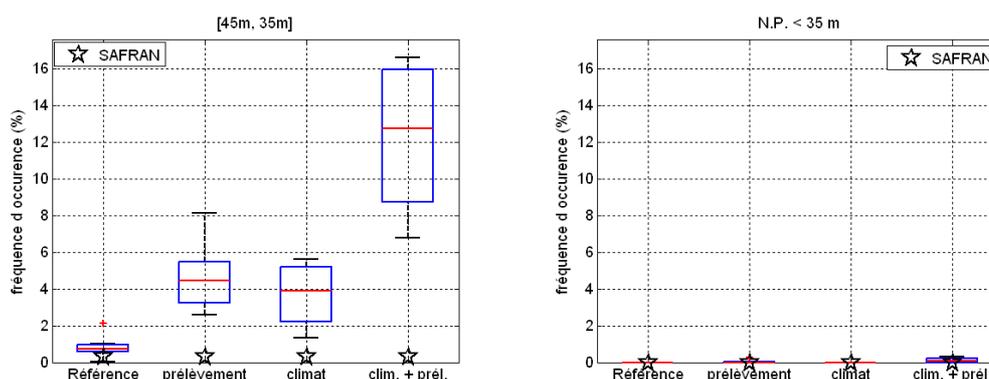


Illustration 20 : Evolution de l'occurrence des niveaux piézométriques appartenant à la classe [45m,35m NGF] (à gauche) et inférieurs à 35mNGF (à droite) en fonction des scénarios (impact du débit de prélèvement seul, impact du climat seul et effet couplé prélèvement + climat).

De manière cohérente avec les résultats présentés sur l'illustration 14, la fréquence d'occurrence de niveaux piézométriques compris dans la classe [45m, 35m NGF] est plus faible que pour les scénarios référence, puisque nous avons vu que les simulations avec ces scénarios sous-estimaient les niveaux par rapport à ceux simulés avec SAFRAN. Par contre, tant les niveaux simulés avec SAFRAN que ceux simulés avec les scénarios référence, sont toujours supérieurs à 35 m NGF.

Il n'y a pas de différence significative entre l'occurrence des niveaux appartenant à la classe [45m, 35m NGF] simulés pour les scénarios *prélèvement* et *climat* (environ 4% du temps). Ce résultat montre que l'impact de l'augmentation du prélèvement est du même ordre de grandeur que celui de l'évolution future du climat. L'effet couplé de l'augmentation des prélèvements et du changement climatique entraîne une augmentation non négligeable de cette fréquence d'occurrence, qui triple pour devenir de l'ordre de 12%. Par contre, quel que soit le scénario considéré, l'augmentation de la fréquence d'occurrence observée entre 35 et 45 m NGF, ne se reporte pas plus bas, puisque le seuil de 35m NGF n'est jamais franchi.

## 5.2. IMPACT SUR LE DEBIT DE DEBORDEMENT A LA SOURCE DU LEZ

Les moyennes mensuelles interannuelles du débit de débordement sont présentées sur l'illustration 21. Elles sont calculées pour chacun des deux débits de prélèvement ( $Q_p$  et  $Q_{p+20\%}$ ) ainsi que pour la référence SAFRAN.

L'augmentation du débit de prélèvement entraîne une diminution du débit de débordement uniforme de décembre à mai (de l'ordre de -150l/s). Entre juin et novembre, les diminutions sont plus faibles à nulles. Les incertitudes liées uniquement au scénario prélèvement futur sont très faibles devant les incertitudes associées aux scénarios climatiques (Illustration 22).

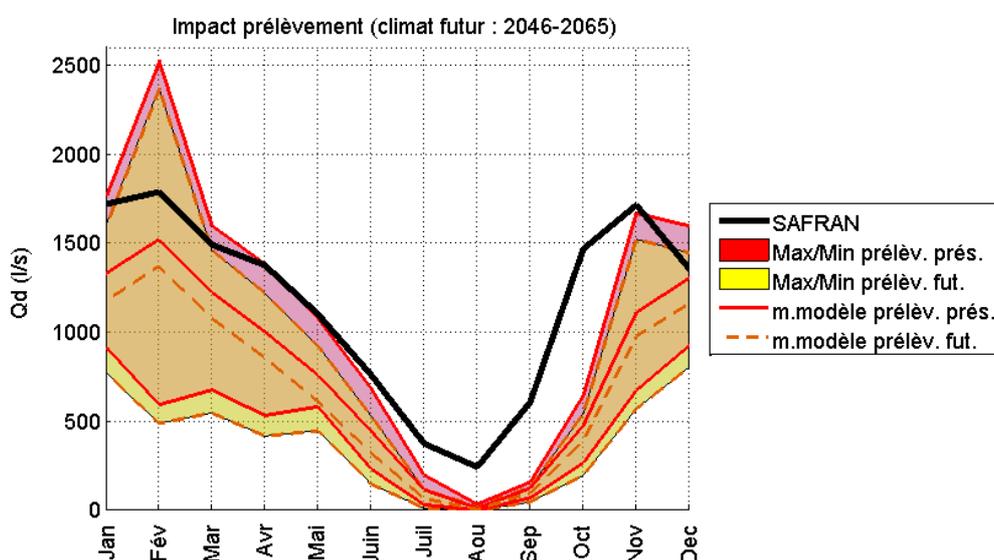


Illustration 21 : Moyennes interannuelles du débit de débordement mensuel calculées à partir des données SAFRAN en noir, multi-modèle futur +  $Q_p$  en rouge (trait plein) et multi-modèle futur +  $Q_p + 20\%$  en jaune (trait en pointillés). Les enveloppes autour des moyennes multi-modèle représentent la dispersion des résultats (valeurs maximales et minimales parmi les 7 modèles climatiques pour chaque mois)

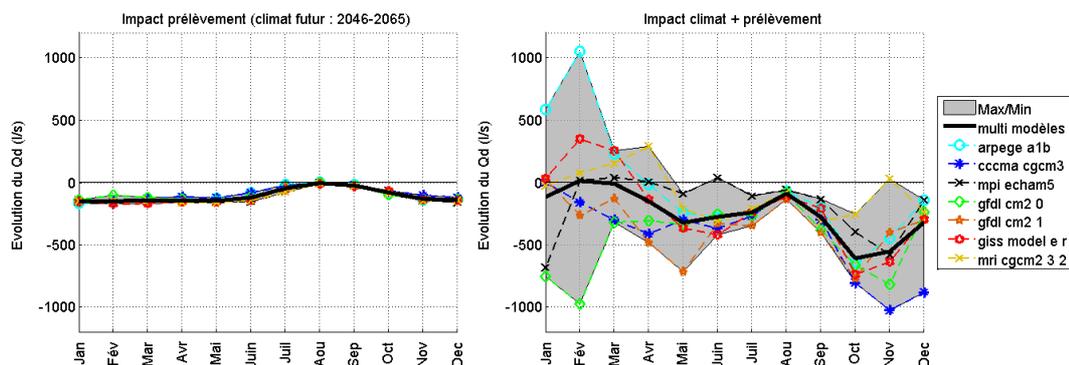


Illustration 22 : (à gauche) Anomalies mensuelles du débit de débordement entre le climat futur (2046-2065) avec un débit de prélèvement présent et le climat futur avec débit de prélèvement futur (augmentation de 20% par rapport au présent). (à droite) Anomalies mensuelles du débit de débordement entre le climat présent avec un débit de prélèvement présent et le climat futur avec débit de prélèvement futur (augmentation de 20% par rapport au présent). Les zones grisées représentent l'enveloppe de tous les modèles climatiques.

Les anomalies calculées pour les scénarios de prélèvement futur sous climat futur comparés à ceux avec prélèvement présent sous climat présent montrent qu'il n'y a plus d'augmentation des débits de débordement en février et mars sous l'effet couplé de l'augmentation des prélèvements et du changement climatique.

Cependant, la dispersion des résultats et donc l'incertitude qui leur est associée durant cette période hivernale reste très forte.

De manière à caractériser la sensibilité de la dynamique de débordement de l'aquifère aux scénarios climatiques et de pompage considérés, nous avons représenté sur l'illustration 23, l'évolution de l'occurrence des débits nuls en fonction des différents scénarios présentés précédemment (§5.1). On constate tout d'abord que les scénarios référence surestiment l'occurrence de débits de débordement nuls par rapport aux occurrences simulées avec SAFRAN, en cohérence avec la tendance à la sous-estimation des débits présentée sur l'illustration 16. Comme pour les niveaux piézométriques, on constate que l'impact du scénario de prélèvement futur est comparable à celui du scénario *climat* (de l'ordre de 35% du temps), une hausse médiane plus marquée s'affichant pour le scénario prélèvement que pour le scénario *climat*. L'effet couplé de l'augmentation des prélèvements et du changement climatique entraîne ici, comme pour les niveaux, une augmentation de la fréquence

d'occurrence de débits nuls (de l'ordre de 40%, valeur médiane), comparativement moindre que pour les niveaux piézométriques.

Enfin, pour caractériser les évolutions du risque de crue, nous avons représenté, sur le même modèle que pour les débits nuls, l'évolution des débits journaliers maximaux de période de retour 10 ans (QJXA10) calculés pour les scénarios considérés (Illustration 23). Le résultat montre qu'aucune tendance significative ne se dégage concernant l'évolution du QJXA10 pour les différents scénarios, puisque les évolutions médianes observées se trouvent systématiquement comprises dans les intervalles interquartiles du scénario *référence*. On peut tout de même observer qu'une fois de plus, les incertitudes sont plus élevées lorsque l'on considère les scénarios d'évolution du climat. La relative stabilité de cet indicateur quel que soit le scénario considéré est probablement liée à l'effet « tampon » associé à la capacité de stockage de l'aquifère.

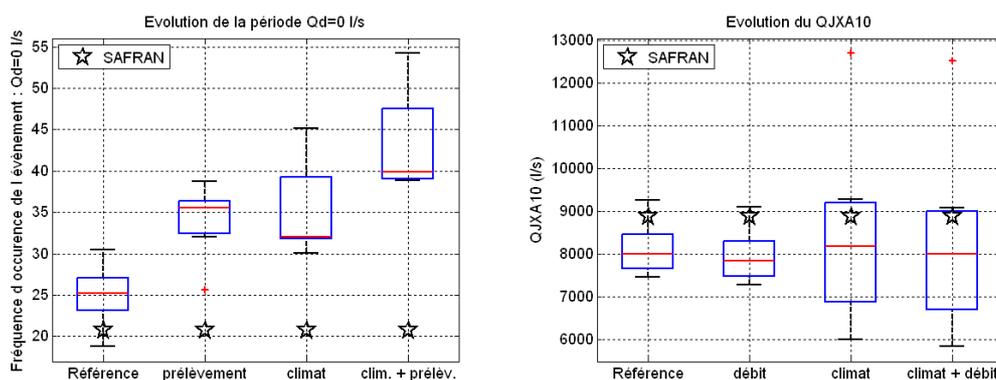


Illustration 23 : Evolution de l'occurrence des débits de débordement nuls (à gauche) et valeur du QJXA10 calculée à partir de la fonction de répartition empirique du débit de débordement max (à droite) en fonction des hypothèses de calcul (impact du débit de prélèvement seul, impact du climat seul et effet couplé débit de prélèvement + climat).



## Conclusion

L'objet du présent rapport est de présenter le résultat du travail réalisé dans le cadre du projet « Explore 2070 » d'étude de l'impact du changement climatique sur la ressource en eau de l'aquifère karstique du Lez (département de l'Hérault). Cet aquifère, outre son caractère représentatif des karsts que l'on rencontre sur le pourtour méditerranéen français, est intensément exploité pour l'alimentation en eau de la ville de Montpellier.

Les scénarios climatiques montrent une diminution de -10% à -20% des cumuls de précipitation saisonniers futurs pour le printemps, l'été et l'automne, tandis que pour l'hiver on observe une augmentation de l'ordre de +10%, en moyenne multi-modèle. Les résultats obtenus pour l'ETP indiquent une augmentation en moyenne multi-modèle de l'ordre de +15% sur le cumul annuel, plus marquée sur l'automne. Concernant l'évolution des prélèvements, les projections du cabinet BIPE faites dans le cadre du lot prospective d'Explore 2070 sur les prélèvements futurs tablent sur une augmentation moyenne annuelle de l'ordre de 20% des prélèvements sur la zone d'étude du Lez. Cette augmentation a été appliquée à la chronique de débit de prélèvement établie lors du calage du modèle, sans en modifier la dynamique saisonnière ( $Q_{\text{prel. total futur}} = 29\text{Mm}^3 + 20\% = 34,8\text{Mm}^3$ ).

La réponse du modèle aux scénarios climatiques se traduit par une baisse de la précipitation efficace (recharge) de l'ordre de -10% à l'échelle annuelle, plus marquée en été (-40%) et en automne (-20%), en moyenne multi-modèle.

Cette baisse impacte le niveau piézométrique, qui subit une baisse de -2 m en moyenne annuelle, pouvant atteindre -6 m entre juillet et octobre. L'impact du scénario de prélèvement présente des ordres de grandeur similaires à ceux de l'impact du climat, avec une baisse de -1 m en période de hautes eaux et de jusqu'à -5 m en période de sollicitation. L'effet combiné de l'évolution du climat et des prélèvements entrainerait ainsi une diminution des niveaux piézométriques pouvant aller jusqu'à -12 m par rapport au niveau moyen actuel simulé en période de sollicitation (à comparer aux 30 m de rabattement possible). Une forte incertitude affecte tout de même ces résultats, avec une dispersion des résultats autour de la moyenne multi-modèle de l'ordre de 5 m de février à septembre et de l'ordre de 2 m d'octobre à janvier.

La cote piézométrique de 45 m NGF (en dessous de laquelle les exploitants de l'aquifère font appel à une ressource complémentaire (eau du Rhône) pour alimenter la ville de Montpellier) serait plus souvent atteinte en contexte de climat futur (5% du temps par rapport à moins de 2% du temps au présent) et encore plus souvent (jusqu'à 15% du temps) en appliquant le scénario d'augmentation

des prélèvements. Cet accroissement de la sensibilité de l'exploitation de l'aquifère aurait lieu sans pour autant que l'on dépasse la cote de 35 m NGF, seuil d'exploitation actuel de l'aquifère, même sous l'influence combinée du climat et des prélèvements futurs.

Concernant les débits de débordement de la source, les scénarios climatiques considérés conduisent à leur diminution de l'ordre de 150 l/s de mai à septembre et de 500 l/s en automne (ce qui représente de l'ordre de 50% du débit simulé au présent) et à une augmentation de l'ordre de 100 l/s entre janvier et avril (ce qui représente moins de 10% du débit simulé au présent). Une forte incertitude affecte ces résultats, notamment en hiver. L'impact du scénario d'augmentation des prélèvements se traduit aussi par une diminution relativement uniforme des débits sur l'année, avec une intensité un peu moindre comparée à l'effet du climat (de l'ordre de -150 l/s de novembre à mai). L'effet combiné de l'évolution du climat et des prélèvements entraînerait donc une diminution plus marquée par rapport au présent en période estivale et automnale et une disparition de l'augmentation hivernale simulée sous climat futur uniquement.

Les scénarios climatiques et de prélèvement futurs se traduisent tous deux par une augmentation des fréquences d'occurrence du tarissement de la source du Lez de l'ordre de 1 mois environ (par rapport aux 3 mois (25% du temps) de tarissement simulés sous climat présent). L'effet combiné des deux scénarios provoque ainsi une augmentation de l'occurrence du tarissement de la source de 2 mois environ. Concernant les débits extrêmes futurs, aucune tendance d'évolution significative ne semble apparaître, même si une incertitude importante affecte toujours les résultats, notamment avec les scénarios de changement climatique.

Etant donné que l'effet des scénarios considérés provoque des baisses de niveau piézométrique, ils ne soumettent pas les populations et les activités à une augmentation des risques (en termes d'inondations ou autres). Par contre, les baisses de niveau projetées peuvent faire que l'on se situe plus fréquemment en dessous du seuil de 45 m NGF (de 2% du temps aujourd'hui à 15% du temps sous climat et prélèvements modifiés). A l'heure actuelle, lorsque le niveau passe sous cette valeur seuil, l'exploitant fait appel à la ressource en eau du Rhône pour compléter son alimentation. Si l'on maintient cette stratégie de gestion de l'aquifère, il sera plus souvent fait appel à la ressource en eau du Rhône dans le futur. Il n'est cependant pas impossible que cette stratégie puisse être modifiée, dans la mesure où ce seuil n'a pas de réelle signification physique et que le comportement de l'aquifère n'est pas foncièrement modifié lorsque son niveau piézométrique se situe en dessous.

Les limites et incertitudes de l'approche présentée se situent essentiellement à deux niveaux :

- Le modèle construit pour simuler la piézométrie est probablement perfectible, notamment dans la mesure où il simule le comportement dans le drain karstique mais pas la charge dans la matrice qui l'entoure. Pour ce faire, il serait nécessaire de mettre en œuvre des outils de modélisation hydrodynamique de type maillé (en 2D ou 3D). Cependant, la mise en œuvre de tels outils dans un aquifère karstique est pour l'instant rendue difficile par la méconnaissance de la structure de l'aquifère (forme et organisation du réseau des drains karstiques, profondeur du substratum et caractéristiques hydrodynamiques par secteurs).
- Le modèle construit peut être considéré comme robuste pour la gamme de niveaux piézométriques observés à l'heure actuelle. Cependant, il n'est pas possible de juger de sa fiabilité pour des niveaux piézométriques plus profonds que 35 m NGF, pour lesquels le comportement de l'aquifère est inconnu.
- Les scénarios climatiques utilisés dans cette étude sont susceptibles d'être renforcés ou bien remis en cause dans le futur, au fur et à mesure des progrès dans la modélisation du climat, surtout au niveau des interfaces côtières. Ainsi l'analyse présentée devra probablement être mise à jour avec les scénarios futurs, produits par la communauté des climatologues.

## Bibliographie

Berard, P., (1983), Alimentation en eau de la ville de Montpellier. Captage de la source du lez. Etudes des relations entre la source et son réservoir aquifère, Rapport n.2. Définition des unités hydrogéologiques. BRGM/83-SGN-325-LRO.

Boé J, Terray L, Habets F, Martin E. 2006. A simple statistical dynamical scheme based on weather types and conditional resampling. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 111, D23106, doi:10.1029/2005JD006889.

Boé, J., L. Terray, F. Habets, and E. Martin (2007), Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies, *Int. J. Clim.*, 27(12), 643– 1655, doi:10.1002/joc.1602.

Dörfliger.N., Pinault.J.L., Petit.V., Jauffret.D., Ladouche.B., Bakalowicz.M., De.La.Vaissere.R. (2004), Systèmes karstiques et crues du Doubs. Méthodologie de détermination de la contribution des systèmes karstiques aux écoulements de surface, hors crues et des étiages. BRGM/RP-53063-FR, 182 p, 68 illustrations, 11 annexes.

Dörfliger N., Fleury P., Ladouche B. (2009) Inverse Modeling Approach to Allogenic Karst System Characterization., *Groundwater*, Willey-Blackwell publishing, Inc, Vol. 47, Issue 3, 414-426.

Fleury, P., Ladouche, B., Conroux, Y., Jourde, H., Dörfliger, N. (2009), Modelling the hydrologic functions of a karst aquifer under active water management – The Lez spring. *Journal of Hydrology*, (365) 235–243.

Jourde H., N. Dörfliger, C. Batiot-Guilhe, C. Bouvier, JF. Desprats, B. Ladouche, V. Leonardi, PO. Malaterre, JC. Maréchal, V. Prié (2011). L'hydrosystème du Lez - Synthèse des connaissances récentes et passées. Rapport BRGM/RP-60041-FR.

Ladouche B., J.-Ch. Maréchal, N.Dörfliger, P. Lachassagne (2006) - Système karstique des Cent Fonts. Simulation de Scénarios d'exploitation et de gestion de la ressource, BRGM/RP-54865-FR, 275 p., 59 ill., 32 tab., 8 ann.

Pinault.J.L., Plagnes.V., Aquilina.L., Bakalowicz.M. (2001) Inverse modeling of the hydrological and the hydrochemical behavior of hydrosystems - Characterization of karst system functioning., *Water Resources Research*, Vol. 37, n° 8, p. 2191-2204.

Pinault.J.L., Pauwels.H., Cann.C. (2001) Inverse modeling of the hydrological and the hydrochemical behavior of hydrosystems - application to nitrate transport and denitrification., *Water Resources Research*, Vol. 37, n° 8, pp. 2179-2190.

Pinault.J.L., Dörfliger.N., Ladouche.B., Bakalowicz.M. (2004) Characterizing a coastal karst aquifer using an inverse modeling approach : The saline springs of Thau, southern France, *Water Resources Research*, 40 W08501.

Pinault, J.L., N. Amraoui, and C. Golaz (2005), Groundwater-induced flooding in macropore-dominated hydrological system in the context of climate changes, *Water Resource Res.*, 41, W05001, doi:10.1029/2004WR003169.

Pinault, J.-L., and S. Schomburgk (2006), Inverse modeling for characterizing surface water/groundwater exchanges, *Water Resour. Res.*, 42, W08414, doi:10.1029/2005WR004587.

Pinault, J.-L., and Allier D. (2007), regionalization of rainfall for broad-scale modelling: An Inverse approach, *Water Resour. Res.*, 43, W09422, doi:10.1029/2006WR005642.