



MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE  
ET DE L'ÉNERGIE



**Hydrologie souterraine**  
**Bassin Aquitain**

**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 **MO**dèle **Nord-Aquitain (MONA)**.

Il comprend une présentation :

- du modèle et des différentes données climatiques utilisés,
- de la méthodologie employée,
- des principaux résultats en termes d'impact du changement climatique avec et sans évolution des prélèvements.

L'analyse des cartes de différences piézométriques appuyée par celle des chroniques, révèle une grande disparité des résultats en fonction des modèles climatiques :

- dans le cas des modèles climatiques les plus optimistes (cas du modèle GFDL-CM2.1), une légère augmentation des niveaux piézométriques, pouvant atteindre 4 m, s'opère pour chaque nappe sur une large bande à proximité de la façade atlantique. Sur le reste du bassin, une baisse très modérée (inférieure à 2 m) de l'ensemble des nappes est observée,
- avec le modèle MRI-CGCM2.3.2, étant celui qui prévoit les plus fortes baisses de la recharge sur les zones d'affleurement des aquifères étudiés, on constate une baisse de plus de 10 m pour la nappe de l'Eocène moyen sur les bordures septentrionales et orientales du bassin et les zones de drainage entre aquifères et presque 10 m sur le plio-quatenaire. A proximité de l'océan, les baisses sont plus modérées en raison des potentiels imposés qui traduisent le niveau moyen de l'océan ou de l'estuaire de la Gironde dans le modèle.

Par ailleurs, il faut observer que certaines projections climatiques aboutissent à des réductions drastiques de la recharge sur de longues périodes ; événements non observés sur la période de calage du Modèle Nord-Aquitain. Les lois de recharges utilisées actuellement pourraient s'avérer inadaptées dans les conditions climatiques fortement défavorables prises en compte sur la période prospective.

Dans le cas des nappes plio-quatenaire et miocène, le scénario d'exploitation des aquifères à l'horizon 2070 entraîne, par rapport au scénario de prélèvement actuel, une diminution de l'ordre de 2 m de la piézométrie le long de la façade atlantique. Cette diminution s'amplifie dans les aquifères sous-jacents de l'Oligocène d'abord et de l'Eocène moyen ensuite, engendrant une baisse jusqu'à 12 m autour du bassin d'Arcachon.

Dans le reste du domaine modélisé, la piézométrie des aquifères plio-quadernaires à oligocène accuse une augmentation globale de la piézométrie relativement modeste. Elle est de l'ordre de 2 m maximum et peut atteindre, très localement, 4 m. Concernant la nappe de l'Eocène moyen, la piézométrie subit une augmentation encore plus importante avec des écarts entre les deux scénarios pouvant atteindre 14 m.

Au final, le schéma des tendances démographiques du BIPE traduit ainsi pour l'ensemble des nappes un scénario de prélèvements estimé à l'horizon 2070 défavorable sur le littoral atlantique, et notamment le bassin d'Arcachon, mais favorable aux nappes sur le reste du domaine modélisé.

## SOMMAIRE

<b>1.</b>	<b>INTRODUCTION</b>	<b>6</b>
<b>2.</b>	<b>MODELE NORD-AQUITAIN (MONA)</b>	<b>8</b>
<b>2.1.</b>	<b>PRESENTATION</b>	<b>8</b>
<b>2.2.</b>	<b>METHODOLOGIE</b>	<b>11</b>
<b>3.</b>	<b>DESCRIPTION DES DONNEES D'ENTREE UTILISEES</b>	<b>14</b>
<b>3.1.</b>	<b>DONNEES CLIMATIQUES</b>	<b>14</b>
<b>3.1.</b>	<b>DONNEES DE PRELEVEMENT</b>	<b>18</b>
3.1.1.	DONNEES FOURNIES	18
3.1.2.	DONNEES UTILISEES	18
<b>4.</b>	<b>RESULTATS DES SIMULATIONS</b>	<b>22</b>
<b>4.1.</b>	<b>APPROCHE METHODOLOGIQUE</b>	<b>22</b>
<b>4.2.</b>	<b>IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA PIEZOMETRIE</b>	<b>23</b>
<b>4.3.</b>	<b>IMPACT DE L'EVOLUTION DES PRELEVEMENTS SUR LA PIEZOMETRIE</b>	<b>31</b>
<b>5.</b>	<b>CONCLUSION</b>	<b>38</b>

### Liste des annexes

<i>Annexe 1 Répartition spatiale des diminutions de recharge (pourcentage de baisse entre les valeurs moyennes de la période de référence et les valeurs moyennes de chaque modèle)</i>	43
<i>Annexe 2 Comparaison de l'impact des scénarios climatiques à partir de chroniques piézométriques</i>	51
<i>Annexe 3 Comparaison de l'impact des prélèvements à partir de chroniques piézométrique</i>	61

## Table des illustrations

<i>Illustration 1 : Discrétisation des couches d'un modèle aux différences finies.....</i>	9
<i>Illustration 2 : Situation géographique et géologie à l'affleurement – Extension de la zone modélisée .....</i>	10
<i>Illustration 3 : Géométrie du Modèle Nord-Aquitain .....</i>	10
<i>Illustration 4 : Localisation des zones d'affleurement du modèle pour chaque nappe et source des données de pluies efficaces utilisées pour le calcul de la recharge</i> <b>Erreur ! Signet non défini.</b>	
<i>illustration 5 : Bilan des pluies efficaces calculées pour les différents modèles .....</i>	15
<i>Illustration 6 : Variation moyenne de la recharge des modèles climatiques par rapport aux données SAFRAN sur la période de référence (1962-1990) pour chaque station météorologique.....</i>	16
<i>Illustration 7 : Variation de la recharge calculée à la station de Mérignac (RU100) entre les 8 jeux de données climatiques .....</i>	16
<i>Illustration 8 : Carte des volumes prélevés par bassin versant et par usage</i> <b>Erreur ! Signet non défini.</b>	
<i>Illustration 9 : Variations de prélèvements pour l'AEP entre 2006 et 2070 correspondant au scénario 2 du BIPE.....</i>	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<i>Illustration 10 : Localisation des points d'observation sélectionnés et aquifères captés associés.....</i>	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<i>Illustration 11 : Cartes des écarts de la piézométrie minimale calculée entre la période 2047-2064 et la période de référence 1962-1990 pour les modèles GFDL-CM2.1 et MRI-CGCM2.3.2 : <b>Nappe du Plio-quaternaire</b>.....</i>	25
<i>Illustration 12 : Cartes des écarts de la piézométrie minimale calculée entre la période 2047-2064 et la période de référence 1962-1990 pour les modèles GFDL-CM2.1 et MRI-CGCM2.3.2 : <b>Nappe de l'Aquitainien</b>.....</i>	27
<i>Illustration 13 : Cartes des écarts de la piézométrie minimale calculée entre la période 2047-2064 et la période de référence 1962-1990 pour les modèles GFDL-CM2.1 et MRI-CGCM2.3.2 : <b>Nappe de l'Oligocène</b>.....</i>	29
<i>Illustration 14 : Cartes des écarts de la piézométrie minimale calculée entre la période 2047-2064 et la période de référence 1962-1990 pour les modèles GFDL-CM2.1 et MRI-CGCM2.3.2 : <b>Nappe de l'Eocène moyen</b>.....</i>	30
<i>Illustration 15 : Cartes des écarts de la piézométrie minimale sur la période 2047-2064 entre l'estimation des prélèvements à l'horizon 2070 et ceux de 2006 pour les modèles GFDL-CM2.1 et MRI-CGCM2.3.2 : <b>Nappe du Plio-quaternaire</b>.....</i>	32
<i>Illustration 16 : Cartes des écarts de la piézométrie minimale sur la période 2047-2064 entre l'estimation des prélèvements à l'horizon 2070 et ceux de 2006 pour les modèles GFDL-CM2.1 et MRI-CGCM2.3.2 : <b>Nappe de l'Aquitainien</b>.....</i>	34
<i>Illustration 17 : Cartes des écarts de la piézométrie minimale sur la période 2047-2064 entre l'estimation des prélèvements à l'horizon 2070 et ceux de 2006 pour les modèles GFDL-CM2.1 et MRI-CGCM2.3.2 : <b>Nappe de l'Oligocène</b>.....</i>	36
<i>Illustration 18 : Cartes des écarts de la piézométrie minimale sur la période 2047-2064 entre l'estimation des prélèvements à l'horizon 2070 et ceux de 2006 pour les modèles GFDL-CM2.1 et MRI-CGCM2.3.2 : <b>Nappe de l'Eocène moyen</b>.....</i>	37

## **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, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer (MEEDDM) 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 **MO**dèle Nord-Aquitain (**MONA**) : 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. MODELE NORD-AQUITAIN (MONA)**

### **2.1. PRESENTATION**

Le **MO**dèle Nord-Aquitain (**MONA**), a été initié au début des années 1990 pour apporter des réponses à la problématique de la baisse continue des niveaux de la nappe de l'Eocène en Gironde. Il a connu depuis lors de nombreux développements et permet maintenant de simuler les écoulements au sein de 15 réservoirs aquifères. Cet outil de gestion et d'aide à la décision s'intéresse principalement aux nappes captives.

En effet si les zones de recharge sont représentées, il n'y a pas d'intégration fine du réseau hydrographique. Seule l'Estuaire de la Gironde est pris en compte dans le modèle sous la forme d'un plan d'eau.

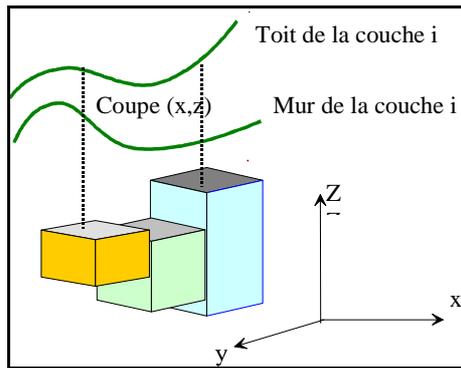
Les contextes géologiques et hydrogéologiques ([Pédron et al., 2006] ; [Pédron et al., 2008b]) ont été décrits en détail dans le cadre des conventions « Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine » signées entre l'État, la Région Aquitaine et le BRGM avec le concours financier de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne et de l'Europe (fonds FEDER) et ne seront pas repris ici. Le lecteur pourra se référer à ces rapports pour plus de précision ainsi qu'à l'Atlas hydrogéologique de l'Aquitaine [Bichot et al., 2001].

La géométrie du modèle est décrite en détail dans le rapport BRGM-56614-FR [Pédron et al., 2008b]. Les principales caractéristiques sont néanmoins rappelées ci-dessous.

Le domaine modélisé (Illustration 2) couvre la partie nord du Bassin aquitain : la totalité du département de la Gironde, une grande partie de celui des Landes (pour les 4 premières couches principalement), l'essentiel (hormis le nord-est) de celui de la Dordogne, le Lot-et-Garonne, le nord- du Gers et du Tarn et Garonne, l'ouest du Lot et le sud de la Charente et de la Charente maritime.

La zone modélisée occupe ainsi une superficie de 46 032 km<sup>2</sup> limitée par les affleurements du Crétacé et du Jurassique à l'est et au nord, le littoral et l'estuaire de la Gironde à l'ouest et une limite sud correspondant à la séparation entre les grands bassins hydrogéologiques nord et sud aquitains.

Le modèle construit utilise le code de calcul **MARTHE** (**MO**délisation d'**A**quifères par maillage **R**ectangulaire en régime **T**ransitoire pour le calcul **H**ydrodynamique des **E**coulements) développé par le BRGM (actuellement version 4.3 a) via l'interface **WinMarthe** version 7.1 [(Thiéry, 1990), (Thiéry, 2006), (Thiéry, 2010)]. Le schéma de résolution utilise les différences finies. Les couches du modèle sont discrétisées en mailles parallélépipédiques dont les faces supérieures et inférieures correspondent respectivement au toit et au mur de la formation considérée (Illustration 1).



*Illustration 1 : Discrétisation des couches d'un modèle aux différences finies*

Le maillage du MONA (Modèle Nord-Aquitain) est régulier (mailles carrées de 2 km de côté). Le modèle comprend au total 148 colonnes, 128 lignes et 15 couches soit un total de 284 160 mailles dont 66 973 servent au calcul des écoulements.

MONA est un modèle « pseudo 3D », c'est-à-dire que les épontes ne figurent pas explicitement en tant que couches de calcul. Les charges hydrauliques n'y sont donc pas calculées. Toutefois, bien que les termes stockages-déstockages ne soient pas pris en compte dans les épontes, les échanges verticaux entre couches aquifères sont restitués.

Dans sa version actuelle (**MONA V3.3b-2007**) le modèle simule les écoulements au sein de 15 aquifères (Illustration 3) : le Plio-Quaternaire, l'Helvétien, l'Aquitainien-Burdigalien, l'Oligocène, l'Eocène supérieur, l'Eocène moyen, l'Eocène inférieur, le Campano-Maastrichtien, le Coniacien-Santonien, le Turonien, le Cénomaniens, le Tithonien, le Kimméridgien, le Bathonien-Callovo-Oxfordien, le Bajocien.

Le modèle MONA intègre le fonctionnement des différents ouvrages de prélèvements en eau souterraine soit 3 759 ouvrages sollicitant les 14 nappes (hors Plio-quaternaire) répartis comme suit : 3 en Tarn-et-Garonne (82), 85 en Lot-et-Garonne(47), 0 dans le Lot (46), 536 dans les Landes (40), 1412 en Gironde (33), 404 en Dordogne (24), 1179 en Charente-Maritime (17) et 150 en Charente (16).

Le modèle fonctionne actuellement au pas de temps annuel, en année civile et non sur un cycle hydrologique, de 1972 à 2007.

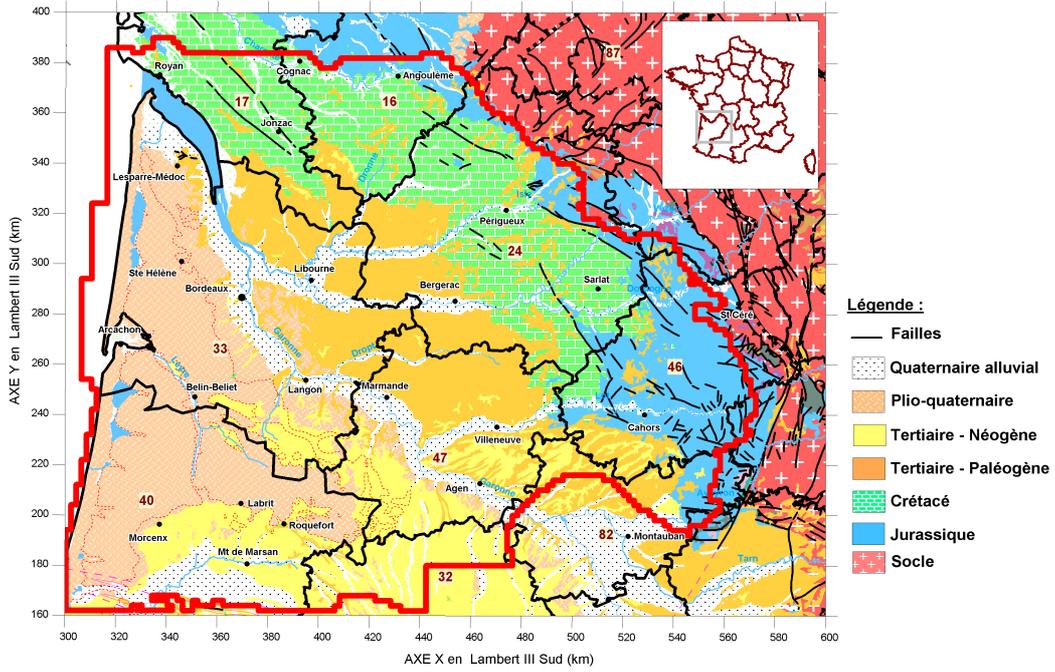


Illustration 2 : Situation géographique et géologie à l'affleurement – Extension de la zone modélisée

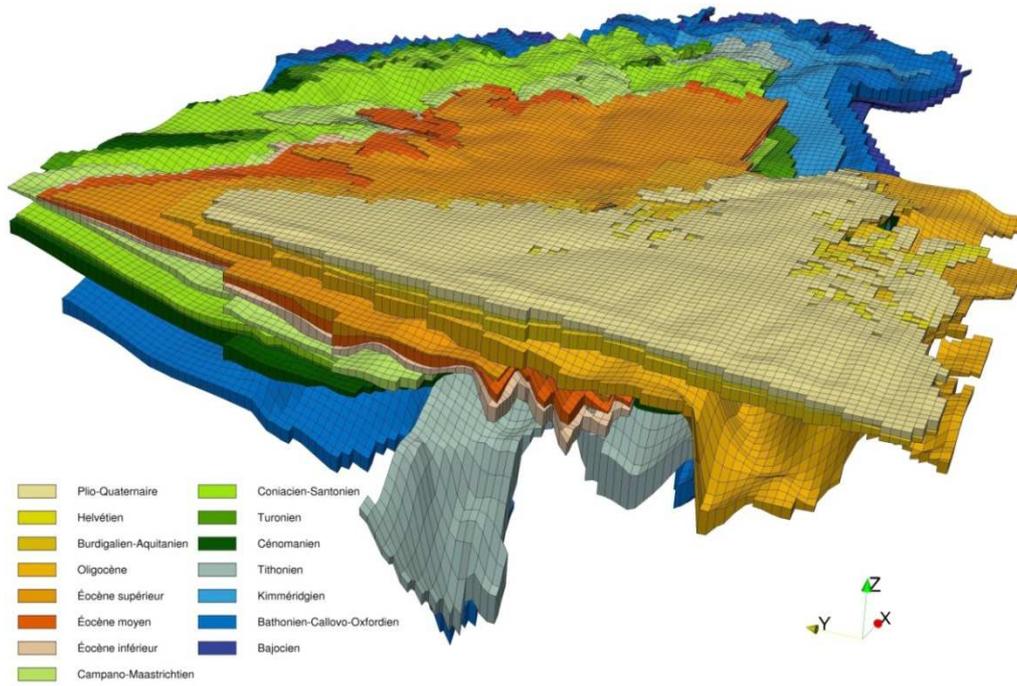


Illustration 3 : Géométrie du Modèle Nord-Aquitain

## 2.2. METHODOLOGIE

Le mode de calcul de la recharge utilisé ici est le même que celui utilisé lors des phases de calage des différentes versions du modèle qui se sont succédées depuis 1998. Le calcul est détaillé dans le rapport BRGM/RP-53 659-FR (Pédron, et al., 2005). La recharge année par année a été évaluée suivant les secteurs en prenant comme référence la pluie efficace moyenne de la station météo considérée, calculée sur la période 1972-2000 avec une Réserve Utile (RU) maximale de 150 mm.

À partir des valeurs de recharge du régime permanent, les valeurs année par année pour chaque zone d'infiltration définie lors de la phase de calage sont obtenues par :

$$R_{z,k} = \frac{P_{eff}(k)}{\overline{P_{eff}}} \overline{R_z}$$

- $\frac{R_{z,k}}{\overline{R_z}}$  est la valeur de recharge de l'année k affectée à la zone z
- $\overline{R_z}$  est la valeur de recharge du régime permanent pour la zone z
- $\frac{P_{eff}(k)}{\overline{P_{eff}}}$  est la pluie efficace de l'année k
- $\overline{P_{eff}}$  est la pluie efficace moyenne calculée sur la période 1971-2000

La localisation des zones de recharge de chaque couche du modèle ainsi que les stations météorologiques qui s'y rattachent sont présentées en **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

Les données de pluies efficaces de la station de Méridnac, pour une RU de 150 mm, sont utilisées pour l'Eocène (supérieur, moyen et inférieur), le Campano-Maastrichtien et le Turonien-Coniacien-Santonien.

Les données de la station de Méridnac, pour une RU de 100 mm sont utilisées pour le calcul de la recharge des nappes plio-quadernaire, miocènes (Aquitain-Burdigalien et Helvétien) et oligocène. Les données des stations de Cognac et de Gourdon, pour une RU de 150 mm, sont utilisées pour le Turonien-Coniacien-Santonien et le Campano-Maastrichtien.

Les données de Bergerac, pour une RU de 150 mm, sont utilisées pour les nappes de l'Eocène inférieur et de l'Eocène moyen.

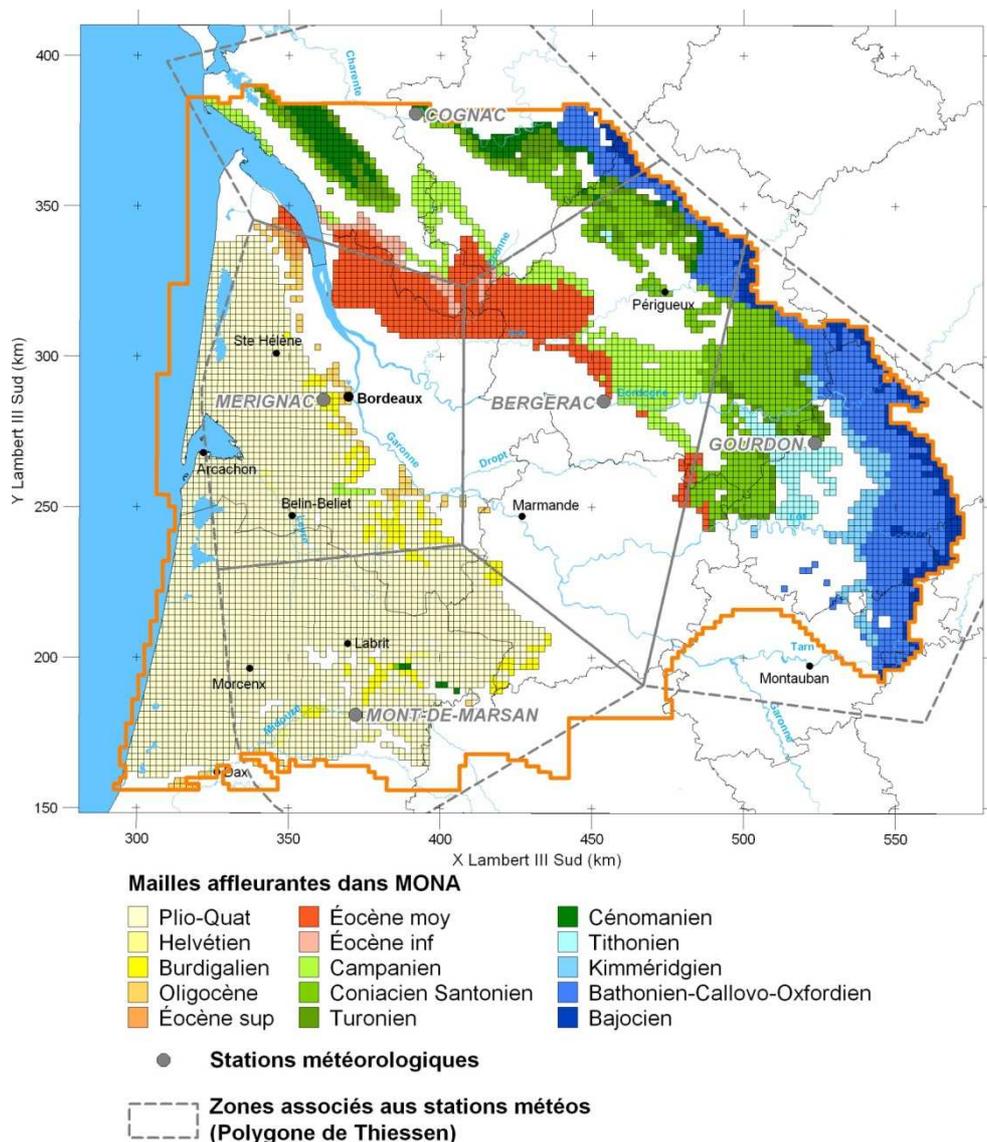
Les données de Mont-de-Marsan, pour une RU de 100 mm sont utilisées pour le Plio-Quadernaire. Les pluies efficaces trimestrielles supérieures ou égales à 250 mm sont réduites de 30 %. Cet écrêtage simule la diminution de l'infiltration (augmentation de la part du ruissellement) dans les écoulements durant les périodes fortement pluvieuses.

Le Plio-Quadernaire constitue l'aquifère superficiel du modèle Nord-Aquitain et affleure sur toute la partie ouest de la zone d'étude. L'attribution des flux d'infiltration s'y fait donc par grandes plages (Pédron *et al.*, 2001). Par contre, les zones d'affleurement des aquifères plus profonds sont en comparaison peu nombreuses et d'extension plus réduite. Du fait de la taille des mailles du modèle (2 x 2 km), il peut y avoir des écarts importants entre la superficie réelle des affleurements et la superficie des mailles correspondantes, ce qui impose de

distribuer le flux d'infiltration dans les mailles en fonction de la superficie réelle des affleurements.

Les superficies des affleurements dans les mailles de la grille du modèle sont calculées et regroupées en classes (0 à 10%, 10 à 20%...) (Pédron et al., 2003) pour les couches 2 à 15 (hors Plio-Quaternaire). Chaque maille de recharge directe est rattachée selon sa localisation géographique à une station météorologique (en utilisant les polygones de Thiessen) de manière à moduler la recharge calculée en fonction de la variabilité spatiale des pluies efficaces. 5 stations météorologiques (Mérignac, Bergerac, Gourdon, Cognac et Mont de Marsan) sont utilisées pour le calcul de la recharge dans les mailles d'affleurement. Celles-ci ont été choisies car elles sont jugées représentatives, équi-réparties sur le territoire modélisé et surtout elles présentent des chroniques de pluies et d'ETP sur plus de 35 ans. Elles permettent donc de calculer la recharge du modèle pour chaque pas de temps depuis l'état initial (1972).

Chaque maille d'affleurement du modèle est affectée d'un numéro de zone de recharge (ou météorologique [ZMTO] dans le logiciel MARTHE) qui dépend de la couche considérée (Illustration 4), de la station météorologique à laquelle elle est rattachée et de la classe correspondant au rapport de la superficie réelle de l'affleurement sur la superficie totale de la maille (4 km<sup>2</sup>).



*Illustration 4 : Localisation des zones d'affleurement du modèle pour chaque nappe et source des données de pluies efficaces utilisées pour le calcul de la recharge*

La nomenclature de codification des mailles est décrite ci-dessous :

**14 3 9**      **14** : numéro de la couche du modèle, en l'occurrence le Bathonien-Callovo-Oxfordien  
**3** : numéro de la station météorologique (Bergerac dans cet exemple)  
**9** : superficie réelle de l'affleurement dans la maille comprise entre 90 et 100% (Classe 9)

Cette numérotation permet d'ajouter des couches ou de prendre en compte des stations météorologiques supplémentaires sans modifier l'existant.

### **3. DESCRIPTION DES DONNEES D'ENTREE UTILISEES**

#### **3.1. DONNEES CLIMATIQUES**

Le MONA, dans sa version actuelle, a été conçue pour répondre aux problématiques des nappes captives profondes. Son maillage (2 km x 2 km), n'est pas optimal pour intégrer finement le réseau hydrographique. La recharge devient ainsi la seule donnée climatique d'entrée du modèle.

Les simulations « temps présent » couvrent la période (en années hydrologiques) **1961-62/1990-91** (climat « relativement » stable). Elles proviennent de l'analyse SAFRAN de Météo-France. SAFRAN/France est un système d'analyse à méso-échelle de variables atmosphériques près de la surface. Il utilise des observations de surface, combinées à des données d'analyse de modèles météorologiques pour produire les paramètres horaires suivants : température, humidité, vent, précipitations solides et liquides, rayonnement solaire et infrarouge incident. Ces paramètres sont analysés par pas de 300 m d'altitude. Ils sont ensuite interpolés sur une grille de calcul régulière (8 x 8 km). Le système d'analyse Safran a été développé à l'origine par le Centre d'études de la neige (Durand, et al., 1993) pour la prévision des risques d'avalanches. L'acronyme Safran signifiant Système d'Analyse Fournissant des Renseignements A la Neige. Il a été étendu à l'ensemble du bassin du Rhône (Etcheverry, 2001), puis à la France entière (Le Moigne, 2002).

Les simulations « prospectives » couvrent la période **2046-47/2064-65**. Elles sont issues des différentes projections climatiques des modèles de l'AR4 du GIEC (ARPEGE V3+, GISS-MODEL-ER, CCMA\_CGCM3, ECHAM5/MPI, MRI-CGCM2.3.2, GFDL-CM2.0, GFDL-CM2.1) désagrégées par méthode CERFACS dsclim pour lesquelles on dispose du forçage désagrégé sur la grille SAFRAN (maille 8 km) par une méthode de régionalisation statistique basée sur des types de temps et la recherche d'analogues. La méthode a été mise au point pour les précipitations pour des applications hydrologiques. Elle utilise des prédicteurs de grande échelle : la pression de surface et la température moyenne à 2 m. Les prédictants proviennent de l'analyse SAFRAN de Météo-France. La période d'apprentissage utilisée est actuellement 1981-2005. La méthodologie est basée sur les types de temps et le ré-échantillonnage des jours de la période d'apprentissage. Les simulations réalisées par les différents modèles sont toutes basées sur le scénario A1B du GIEC. La recharge intégrée au MONA pour la période de référence et les simulations prospectives a été calculée en utilisant les données des mailles SAFRAN correspondant aux stations météorologiques utilisées habituellement. De plus, pour chacun des modèles du GIEC, nous disposons de données climatiques sur la période de référence.

Le tableau présenté en Illustration 5 permet de comparer les pluies efficaces introduites dans le MONA calculées à partir des différentes projections climatiques des modèles de l'AR4 du GIEC. Il ressort qu'en moyenne les pluies efficaces calculées sur la période « prospective » 2047-2064 sont inférieures à celles calculées sur la période de référence (1962-1990). Les cartes illustrant la répartition spatiale des variations moyennes de recharge entre les deux périodes sont présentées en Annexe 1.

Modèles climatiques (GIEC)	Stations météorologiques	Mt de Marsan RU 100			Mérignac RU 150			Mérignac RU 100			Gourdon RU 150			Cognac RU 150			Bergerac RU 150		
		Moy annuelle 1962-1990 (mm)	Moy annuelle 2047-2064 (mm)	Taux de variation	Moy annuelle 1962-1990 (mm)	Moy annuelle 2047-2064 (mm)	Taux de variation	Moy annuelle 1962-1990 (mm)	Moy annuelle 2047-2064 (mm)	Taux de variation	Moy annuelle 1962-1990 (mm)	Moy annuelle 2047-2064 (mm)	Taux de variation	Moy annuelle 1962-1990 (mm)	Moy annuelle 2047-2064 (mm)	Taux de variation	Moy annuelle 1962-1990 (mm)	Moy annuelle 2047-2064 (mm)	Taux de variation
ARPV3		336.2	184.9	-45%	222.3	125.9	-43%	269.5	166.6	-38%	196.3	108.8	-45%	154.0	94.0	-39%	133.4	74.0	-45%
CCMA-CGMC3		362.6	204.4	-44%	241.1	117.7	-51%	291.3	169.2	-42%	218.4	88.27	-60%	152.5	89.0	-42%	147.2	46.9	-68%
ECHAM5-MPI		377.7	274.6	-27%	267.5	161.9	-39%	317.7	215.0	-32%	218.9	138.6	-37%	172.0	112.8	-34%	156.7	77.9	-50%
GFDL-CM2.0		354.2	262.6	-26%	256.9	207.2	-19%	305.1	262.1	-14%	221.4	169.6	-23%	164.5	142.3	-13%	166.0	115.0	-31%
GFDL-CM2.1		407.1	323.3	-21%	255.4	231.0	-10%	307.1	277.8	-10%	229.1	207.3	-10%	148.1	162.3	10%	162.8	148.6	-9%
GISS-MODEL-ER		346.6	296.4	-14%	238.6	191.4	-20%	288.6	241.4	-16%	196.2	145.8	-26%	146.5	114.2	-22%	146.3	110.1	-25%
MRI-CGCM2.3.2		375.9	195.7	-48%	270.8	129.9	-52%	316.9	172.9	-45%	239.7	116.9	-51%	199.1	89.5	-55%	183.3	71.1	-61%

Illustration 5 : Bilan des pluies efficaces calculées pour les différents modèles

Les baisses sont plus ou moins sévères selon les modèles climatiques considérés. Ainsi, les modèles qui aboutissent à une diminution forte de la pluie efficace sont ARPEGE V3, CCMA-CGM3 et MRI-CGCM2.3.2. Le modèle GFDL-CM2.1 est celui dont les conditions climatiques évaluées sur la période 2047-2064 s'éloignent le moins des données actuelles. Il prévoit une relative stabilisation de la recharge sur l'ensemble du bassin nord-aquitain voire une légère augmentation dans la partie septentrionale.

Pour la période de référence « temps présent » (1962-1990), le calcul de la recharge a été réalisé à partir des données climatiques de SAFRAN et des 7 modèles du GIEC. Une analyse des résultats (Illustration 6) montre que les valeurs de recharge issues du GIEC sont dans l'ensemble inférieures à celles de SAFRAN, avec des disparités importantes entre les stations. On observe par ailleurs qu'à l'échelle d'une station (Illustration 7), les valeurs annuelles de recharge présentent des variations très importantes entre les modèles climatiques et qu'au final aucun ne correspond vraiment aux données SAFRAN. Aussi, afin de respecter l'évolution du climat définie pour chaque scénario du GIEC, les simulations prospectives et les simulations "temps présent" seront comparées entre elles pour un même modèle.

		Stations météorologiques					
		Mt de Marsan RU 100	Mérignac RU 150	Mérignac RU 100	Gourdon RU 150	Cognac RU 150	Bergerac RU 150
Modèles climatiques (GIEC)	ARPEGE V3	-15.8%	-18.6%	-16.1%	-29.2%	-36.6%	-16.0%
	CCMA-CGM3	-9.2%	-11.7%	-9.3%	-21.2%	-37.2%	-7.3%
	ECHAM5-MPI	-5.5%	-2.0%	-1.1%	-21.0%	-29.2%	-1.3%
	GFDL-CM2.0	-11.3%	-5.9%	-5.0%	-20.1%	-32.3%	4.6%
	GFDL-CM2.1	1.9%	-6.4%	-4.3%	-17.3%	-39.0%	2.5%
	GISS-MODEL-ER	-13.2%	-12.6%	-10.1%	-29.2%	-39.6%	-7.9%
	MRI-CGCM2.3.2	-5.9%	-0.8%	-1.3%	-13.5%	-18.0%	15.4%

Illustration 6 : Variation moyenne de la recharge des modèles climatiques par rapport aux données SAFRAN sur la période de référence (1962-1990) pour chaque station météorologique

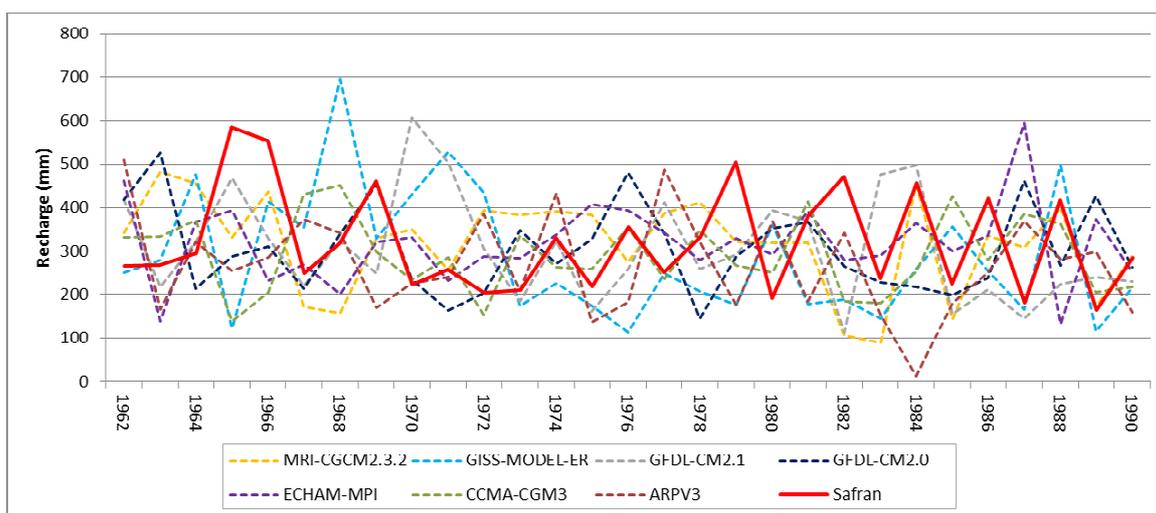


Illustration 7 : Variation de la recharge calculée à la station de Mérignac (RU100) entre les 8 jeux de données climatiques

Afin d'évaluer l'impact du changement climatique d'après les scénarios du GIEC, la méthodologie retenue a été de considérer les prélèvements comme constants à la fois sur la période de référence et sur celle prospective. Ces prélèvements correspondent à ceux de

l'année 2006, issus de la base de prélèvements du MONA. Chaque simulation commence par un état initial identique conforme aux données climatiques de 1972 (année ayant servi au calage du modèle en régime permanent). Par la suite, sont intégrés les données climatiques de la période de référence (1962-1990) ou de la période prospective (2047-2064). Le modèle MONA fonctionne en année civile et non sur un cycle hydrologique, ainsi les années 1961, 1991, 2046 et 2065 ont été écartées car incomplètes. Au final, 14 simulations ont été réalisées correspondant aux périodes de référence et de prospection de chacun des 7 modèles du GIEC avec des volumes de prélèvement identiques.

### **3.1. DONNEES DE PRELEVEMENT**

#### **3.1.1. DONNEES FOURNIES**

Les projections de prélèvements à l'horizon 2070 ont été évaluées par le Bureau d'Information et de Prévisions Économiques (BIPE). Elles s'appuient sur deux scénarios tendanciels construits à partir de l'estimation du nombre de ménages, par type de ménage. Ainsi, le scénario 1 considère une concentration plus forte de l'habitat dans les zones déjà occupées par des activités économiques et des logements. Le scénario 2 suppose quant à lui une accélération du phénomène d'étalement de l'habitat dans la continuité de ce qui est observé ces dernières années. Chacun de ces scénarios repose sur des prévisions démographiques et de migrations internes, issues des projections INSEE et prolongées à l'horizon 2070. Ils s'appuient également sur l'évolution de l'activité agricole et de l'aménagement du territoire, sur les besoins en énergie, en eau et enfin sur le développement d'autres secteurs économiques tels que l'industrie, les services marchands ou encore la construction. De l'évolution ordonnée et équilibrée de ces secteurs, sont déduites les pressions anthropiques sur la ressource en eau pour chaque scénario.

Par la suite, les conséquences de ces scénarios sur les besoins en eau sont évaluées. Elles s'appuient sur 6 facteurs-clés que sont : les niveaux de consommation par habitant, la démographie, la structure des ménages, le type d'habitat, les taux de consommation d'eau et le rendement des réseaux. Les projections sont alors réalisées sur la base des évolutions de chacun de ces facteurs dans les deux scénarios tendanciels à stabilité climatique retenus précédemment. Pour ce faire, l'ensemble des points de prélèvements de 2006 en France a été récupéré par le BIPE sur la base de données du Service de l'Observation et des Statistiques (SOeS) du Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement (MEDDTL). Ces prélèvements sont ensuite dissociés en trois usages (Alimentation en Eau potable, Agriculture et Industrie) puis regroupés en bassins versants à l'échelle desquels les évolutions sur les prélèvements sont considérées homogènes.

Au final, les évolutions des prélèvements en eau sont définies à l'horizon 2070 par bassin versant et par usage pour chacun des deux scénarios.

#### **3.1.2. DONNEES UTILISEES**

La comparaison des données fournies avec celles intégrées dans le MONA montre des différences significatives entre les deux sources.

Globalement, les volumes du BIPE surestiment les prélèvements quel que soit l'usage destiné. Des différences importantes apparaissent notamment pour l'usage agricole où elles peuvent atteindre plus de 60 millions de m<sup>3</sup>/an. Celles-ci s'expliquent par le fait que les volumes fournis par le BIPE sont déclaratifs, ils correspondent donc aux volumes autorisés et non à ceux réellement prélevés. Les volumes AEP sont quant à eux estimés à partir des déclarations des usagers auprès des agences de l'Eau.

Les données de prélèvements MONA ont fait l'objet d'un important travail de réactualisation au cours de ces dernières années (Gomez et al ; 2010), lequel faisait intervenir différents organismes responsables de la gestion des ressources en eaux souterraines en Aquitaine (Agence de l'Eau Adour-Garonne, Conseils généraux, SMEGREG, exploitants, ...). La base de prélèvements MONA a ensuite été mise en cohérence puis validée.

Aussi a-t-il été retenu, comme conditions initiale de prélèvements, les données de la base MONA puis d'affecter à chaque point de pompage du MONA l'évolution des prélèvements estimée par le BIPE. Ainsi, les points de prélèvement du MONA ont d'abord été regroupés par bassin versant, sur la base des regroupements effectués par le BIPE (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

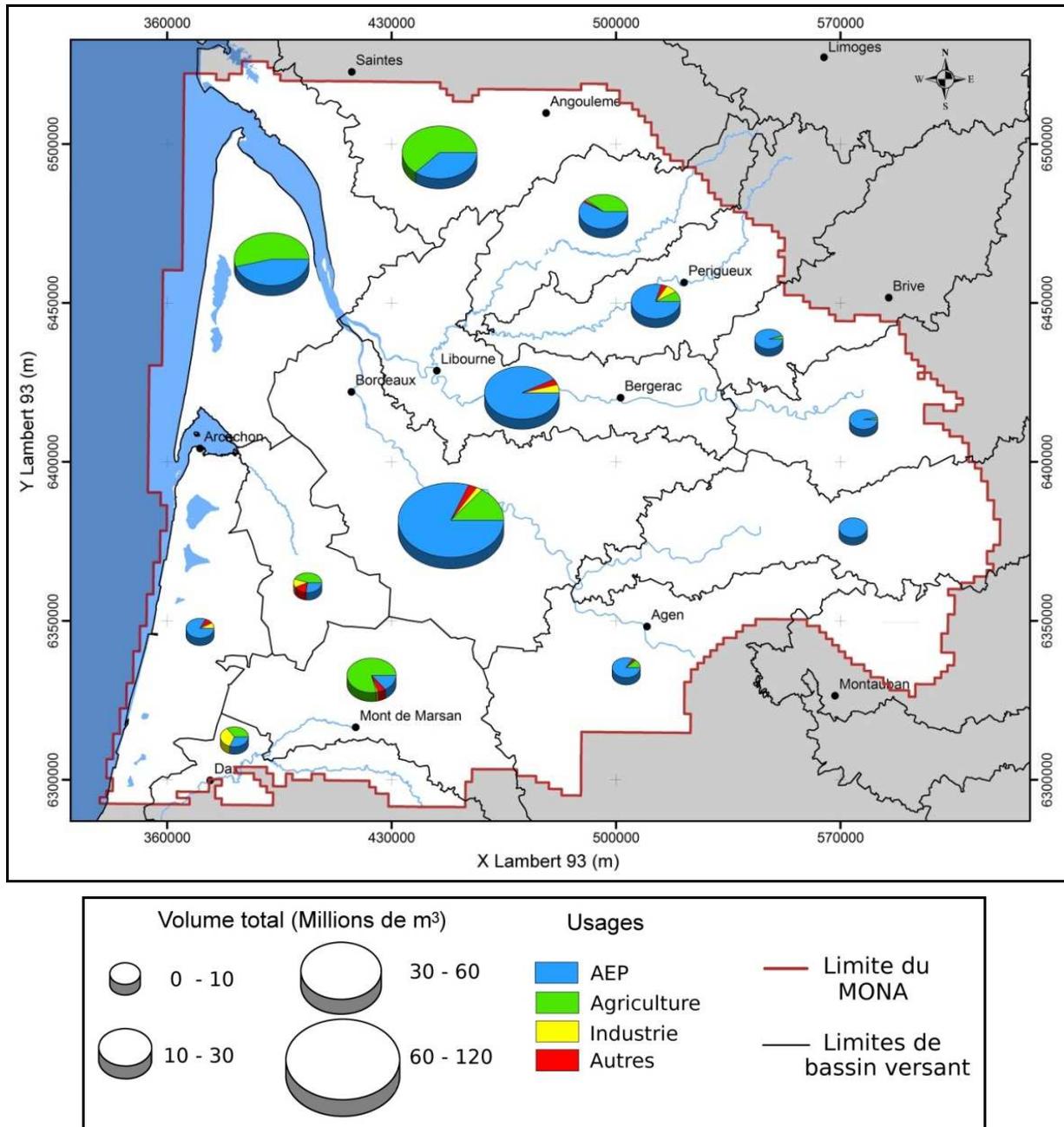


Illustration 8 : Carte des volumes prélevés par bassin versant et par usage

Sur le domaine modélisé, 62% des prélèvements sont destinés à l'Alimentation en Eau Potable, les volumes prélevés les plus importants étant naturellement concentrés au niveau de la Communauté Urbaine de Bordeaux. 32% des prélèvements sont utilisés pour l'agriculture, dont les forages sont principalement situés au nord de l'estuaire de la Gironde ainsi que dans la région de Mont-de-Marsan. Enfin, les eaux à destination de l'industrie et autres usages représentent moins de 6% des volumes. Elles sont prélevées dans les moitiés nord et ouest du domaine d'étude.

L'impact de l'évolution des prélèvements estimée par le BIPE a été évalué en réalisant, pour chacun des 7 modèles prédictifs établis par le GIEC, deux simulations sur la période 2047-2064. Ces deux simulations ne diffèrent que par les volumes de prélèvements.

Dans la première, les prélèvements de 2006 sont reportés sur la période prospective, afin d'évaluer l'impact du changement climatique. La seconde simulation intègre l'évolution des prélèvements telle que définie par le scénario 2 du BIPE c'est-à-dire celui planifiant un étalement de l'habitat. Ces projections ont été préalablement définies par le BIPE pour les trois principaux usages que sont l'AEP (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), l'agriculture et l'industrie.

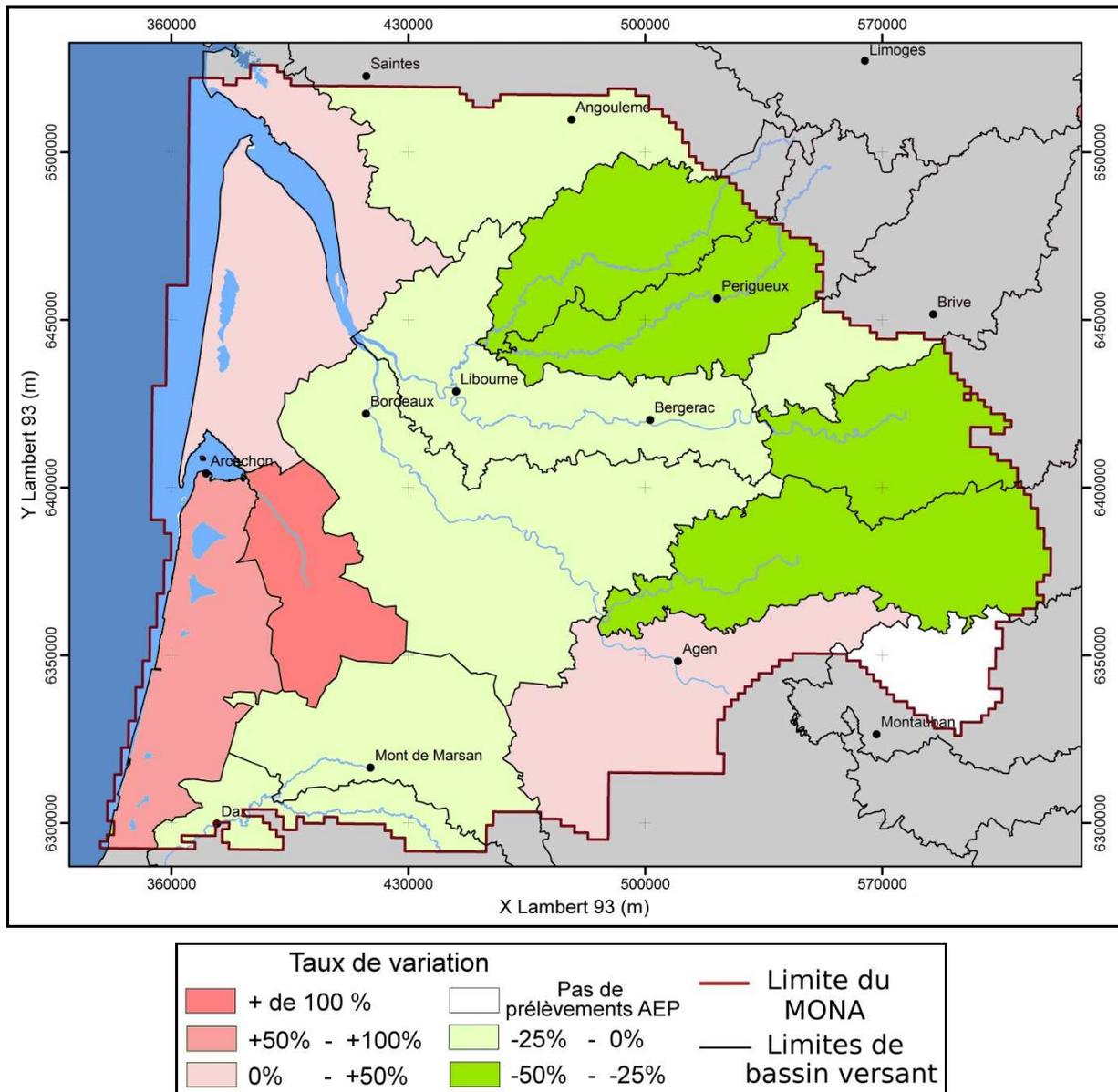


Illustration 9 : Variations de prélèvements pour l'AEP entre 2006 et 2070 correspondant au scénario 2 du BIPE

Concernant l'AEP, seuls le littoral atlantique et le bassin versant d'Agen sont sujets à une augmentation des prélèvements. En termes de volume global, la situation restera relativement stable d'ici 2070 puisqu'on observe une augmentation générale d'à peine 2% des prélèvements pour l'AEP sur l'ensemble du domaine modélisé.

Pour l'agriculture, une diminution de 5 à 10% a été estimée sur l'ensemble des bassins versants. Cette diminution est plus importante pour l'industrie avec des volumes prélevés inférieurs de 38 à 65% à ce qu'ils sont actuellement. Au final, pour l'ensemble des usages, on notera une diminution globale de l'ordre de 3% des volumes d'eau prélevés sur le domaine d'étude

La base de prélèvements du MONA référence cependant d'autres usages à destination de l'eau collective, de l'eau individuelle, du thermalisme ou encore de l'embouteillage pour lesquels aucun scénario d'évolution n'est identifié. Les volumes de prélèvement correspondant à ces usages intéressent généralement moins de 5% des volumes totaux d'un bassin versant (sauf pour deux bassins où les volumes considérés impliquent 9% et 16% des prélèvements). Au regard de cette analyse, on peut considérer qu'une tendance, qu'elle soit optimiste ou pessimiste, définie pour ces usages n'entraînera qu'un très faible biais dans les résultats. Aussi, il a été décidé de les garder fixes pour les simulations prospectives.

L'impact de l'évolution des prélèvements estimée par le BIPE a été évalué en réalisant, pour chacun des 7 modèles prédictifs établis par le GIEC, deux simulations sur la période 2047-2064. Ces deux simulations ne diffèrent que par les volumes de prélèvements. Dans la première, les prélèvements de 2006 sont reportés sur la période prospective. La seconde simulation intègre l'évolution des prélèvements telle que définie par le scénario 2 du BIPE c'est-à-dire celui planifiant un étalement de l'habitat.

## **4. RESULTATS DES SIMULATIONS**

### **4.1. APPROCHE METHODOLOGIQUE**

Pour évaluer l'impact des différents scénarios sur les grandes nappes profondes du nord du Bassin aquitain, deux approches ont été choisies :

- **L'étude des cartes de différences piézométriques calculées entre les différentes simulations. Afin de localiser les secteurs les plus sensibles aux variables considérées, l'état des nappes représentatif de la période simulée correspond à un état critique c'est-à-dire à la piézométrie minimale calculée en chaque maille. Pour l'impact du changement climatique il s'agit, pour un même modèle du GIEC, de comparer les valeurs minimums calculées sur la période prospective (2047-2064) à celles de la période de référence (1962-1990). Les deux simulations présentent le même scénario de prélèvements (celui de l'année 2006) et ne divergent que par les valeurs de recharge qui y sont intégrées. Pour l'impact de l'évolution des prélèvements, sont comparées, pour un même modèle du GIEC, deux simulations réalisées sur la période prospective qui se différencient par le scénario d'exploitation des nappes.**
- L'analyse des chroniques piézométriques permet d'observer en des points stratégiques l'impact des variables étudiées sur l'évolution de la piézométrie. La localisation des 12 chroniques piézométriques, considérées comme représentatives de l'état des 4 nappes sélectionnées pour illustrer les résultats, est présentée en **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

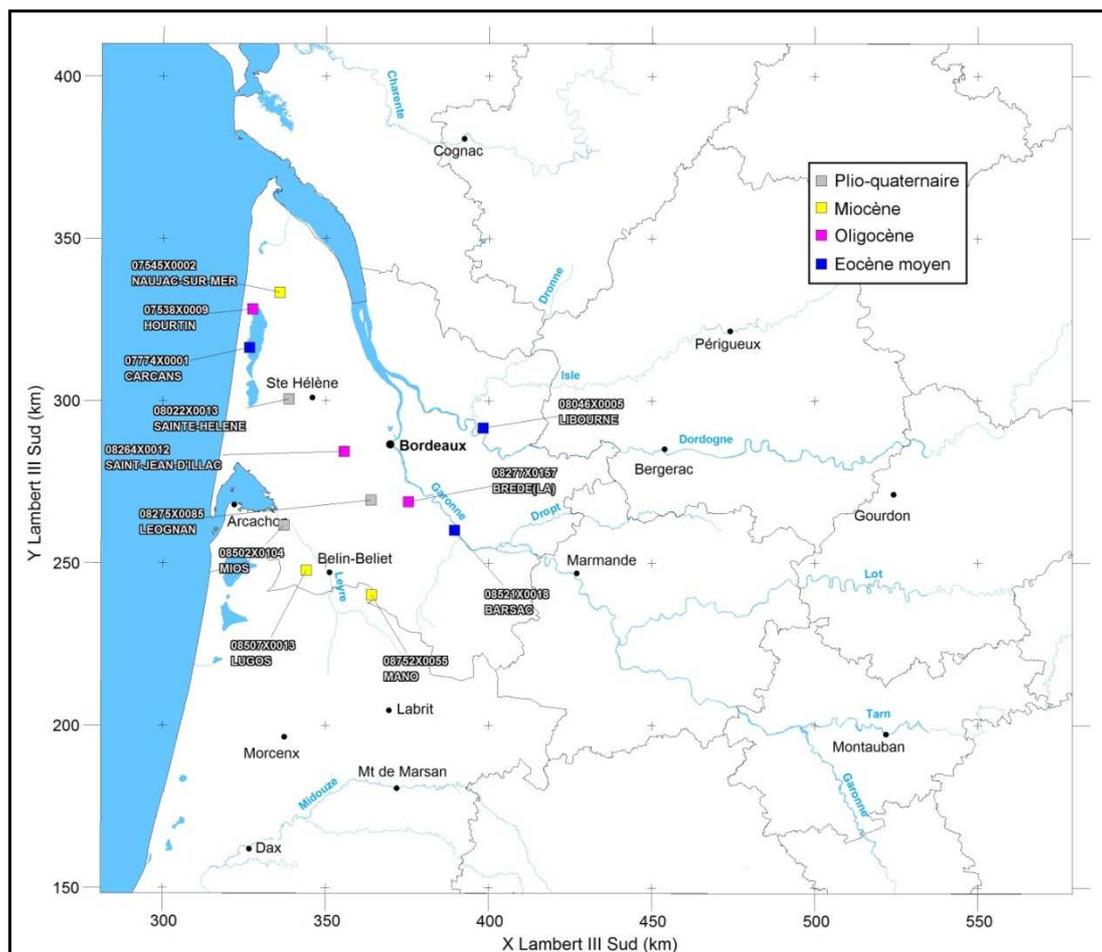


Illustration 10 : Localisation des points d'observation sélectionnés et aquifères captés associés

Nota bene : Le modèle MONA ne s'intéressant principalement qu'aux aquifères captifs, il ne permet pas de quantifier les impacts du changement climatique ou des prélèvements sur le débit des cours d'eau.

## 4.2. IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA PIEZOMETRIE

L'impact du changement climatique sur la piézométrie des aquifères aquitains varie selon les nappes et les secteurs considérés. En adéquation avec les valeurs de recharge intégrées pour chaque modèle climatique, il ressort que les baisses de piézométrie les plus marquées sont induites par les modèles ARPEGE V3, CCMA-CGM3 et MRI-CGCM2.3.2 lesquels considèrent les recharges les plus faibles sur la période prospective. Au contraire, le modèle GFDL-CM2.1 est celui pour lequel les niveaux piézométriques sont les plus stables par rapport à l'état actuel.

L'analyse des cartes de différences piézométriques (Illustration 11 à Illustration 14), appuyée par celle des chroniques (Annexe 2), révèle que dans le cas des modèles climatiques plus optimistes (cas du modèle GFDL-CM2.1), une légère augmentation des niveaux piézométriques, pouvant atteindre 4 m, s'opère pour chaque nappe sur une large bande à proximité de la façade atlantique. Sur le reste du bassin, une baisse très modérée (inférieure à 2 m) de l'ensemble des nappes est observée.

Par ailleurs, il apparaît de manière tout à fait logique que sur les modèles prévoyant une diminution significative de la recharge à l'horizon 2064 (exemple du modèle MRI-CGCM2.3.2), ce sont les zones d'alimentation qui sont les plus affectées par une baisse piézométrique. Ces zones concernent à la fois les affleurements, à l'origine des baisses piézométriques de plus de 10 m de la nappe de l'Eocène moyen sur les bordures septentrionales et orientales du bassin, et les zones de drainance entre aquifères, notamment entre le Miocène et l'Oligocène au centre et au sud-ouest du domaine modélisé. Au final, les modèles climatiques les plus défavorables aboutissent à une diminution directe ou indirecte de l'alimentation des nappes. A proximité de l'océan, les baisses sont plus modérées en raison des potentiels imposés qui traduisent le niveau moyen de l'océan ou de l'estuaire de la Gironde dans le modèle. Dans le cadre des travaux réalisés ici, les impacts des variations du niveau marin sur le niveau piézométrique ainsi que les effets des modifications de la géomorphologie côtière n'ont pas été prises en compte. Pour mémoire, ces aspects ont été abordés de manière exploratoire dans différentes études (Lenotre, et al., 2010) et projets en cours : MISEEVA (Marine Inundation hazard exposure modelling and Social, Economic and Environmental Vulnerability Assessment in regard to global changes), Aquimetro (Aquifères côtier Metro ONEMA 2010).

Il faut noter pour conclure qu'il existe des variabilités importantes entre les résultats des différents modèles climatiques pour un même scénario (A1B). Les recharges introduites en données d'entrée dans le modèle ont donc des impacts plus ou moins forts sur la piézométrie. Par ailleurs, il faut observer que certaines projections climatiques aboutissent à des réductions drastiques de la recharge sur de longues périodes ; événements non observés sur la période de calage du Modèle Nord-Aquitain. Les lois de recharges utilisées actuellement pourraient s'avérer inadaptées dans les conditions climatiques fortement défavorables prises en compte sur la période prospective. Il faut donc considérer les résultats obtenus avec toute la mesure qui s'impose en gardant à l'esprit les limites de l'exercice.

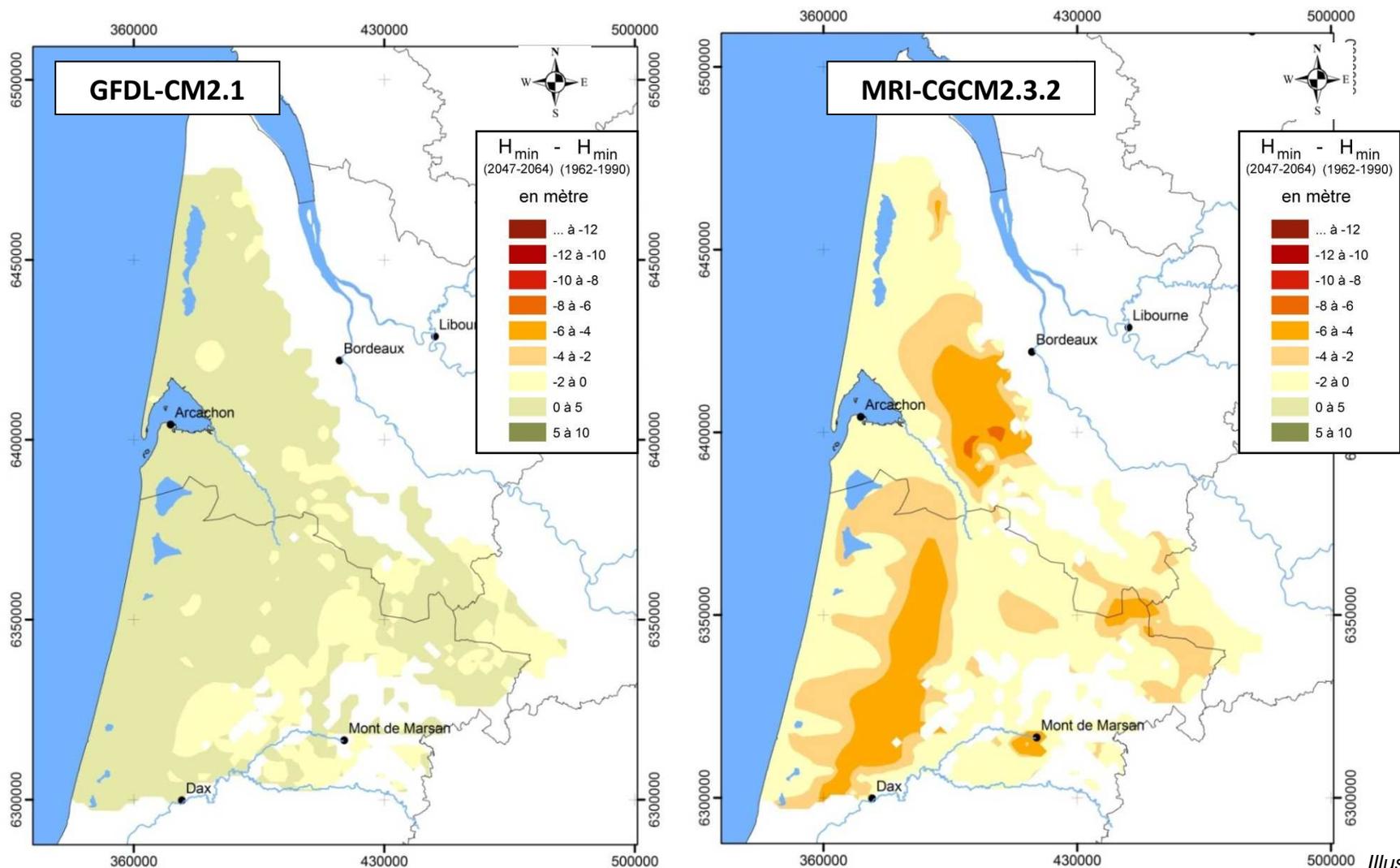
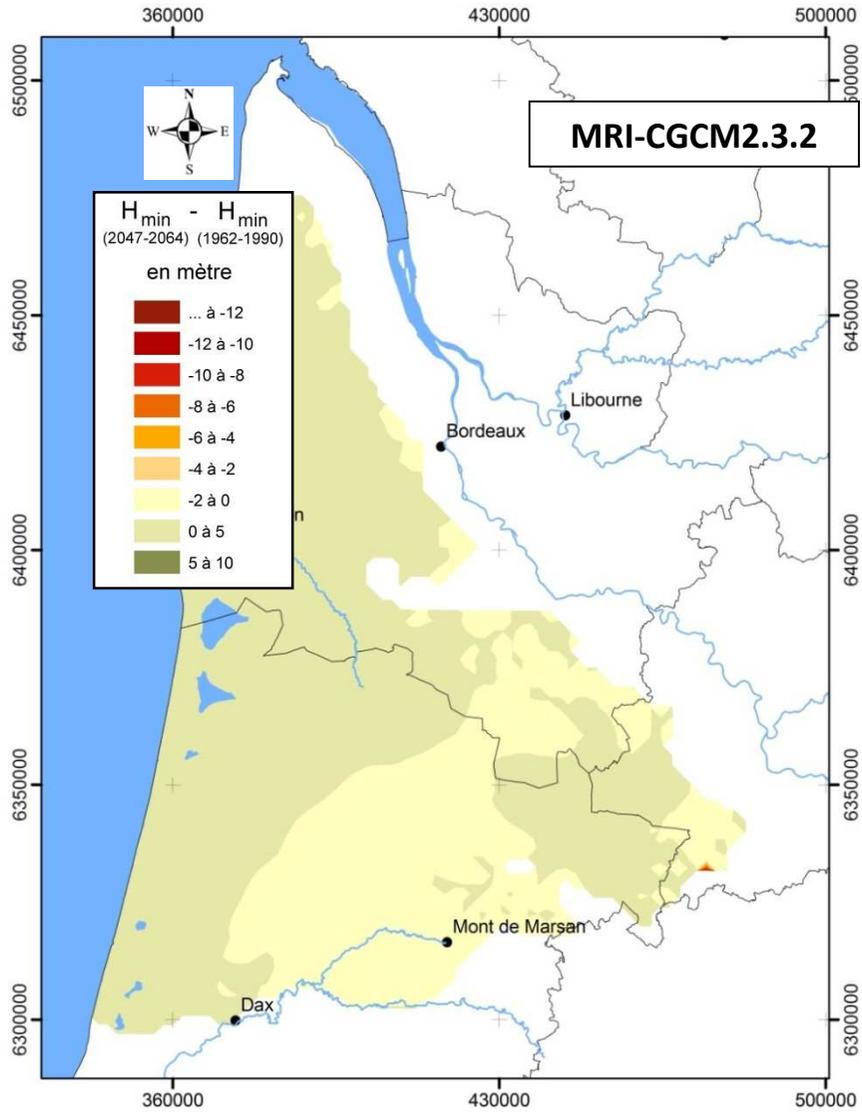
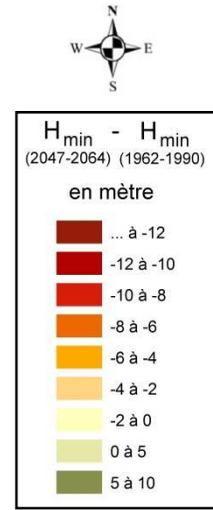


Illustration 11 :  
 Cartes des écarts de la piézométrie minimale calculée entre la période 2047-2064 et la période de référence 1962-1990 pour les modèles GFDL-CM2.1 et MRI-CGCM2.3.2 : **Nappe du Plio-quatenaire**

**GFDL-CM2.1**



**MRI-CGCM2.3.2**



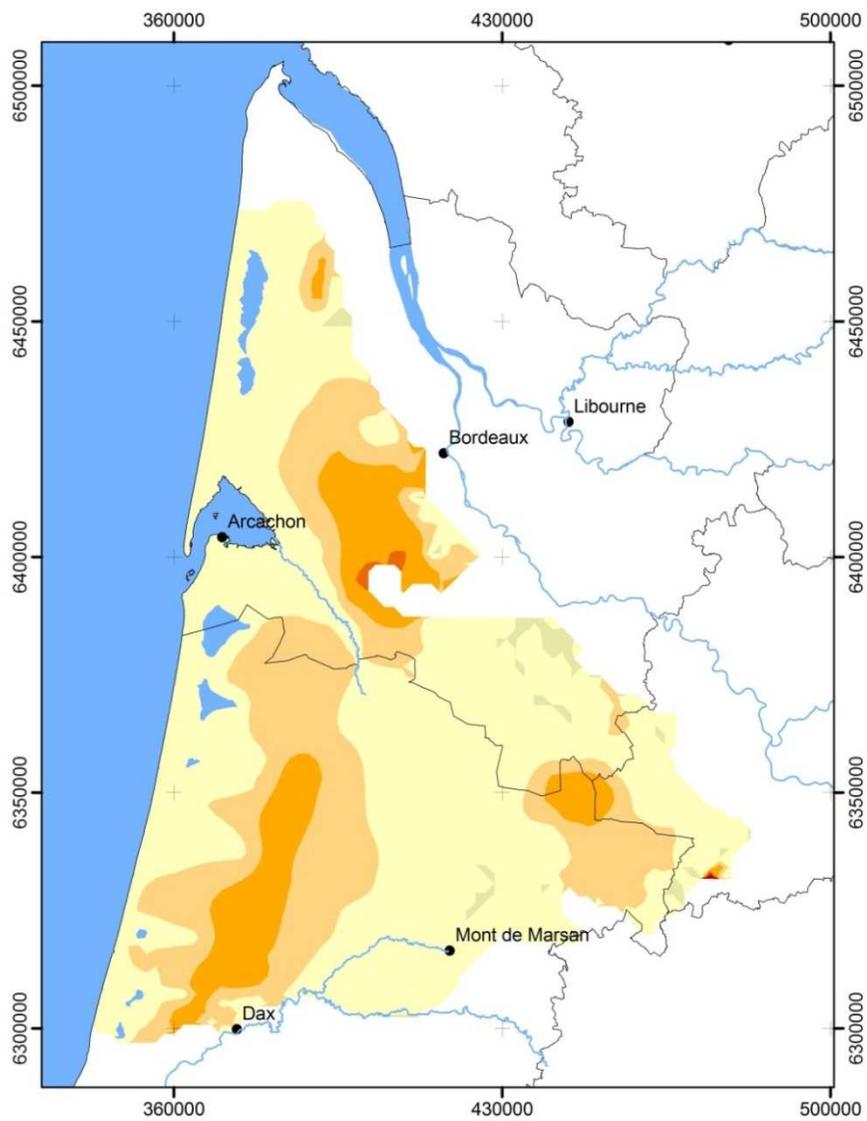
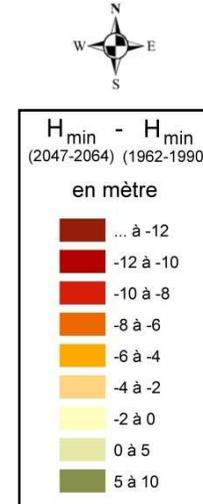
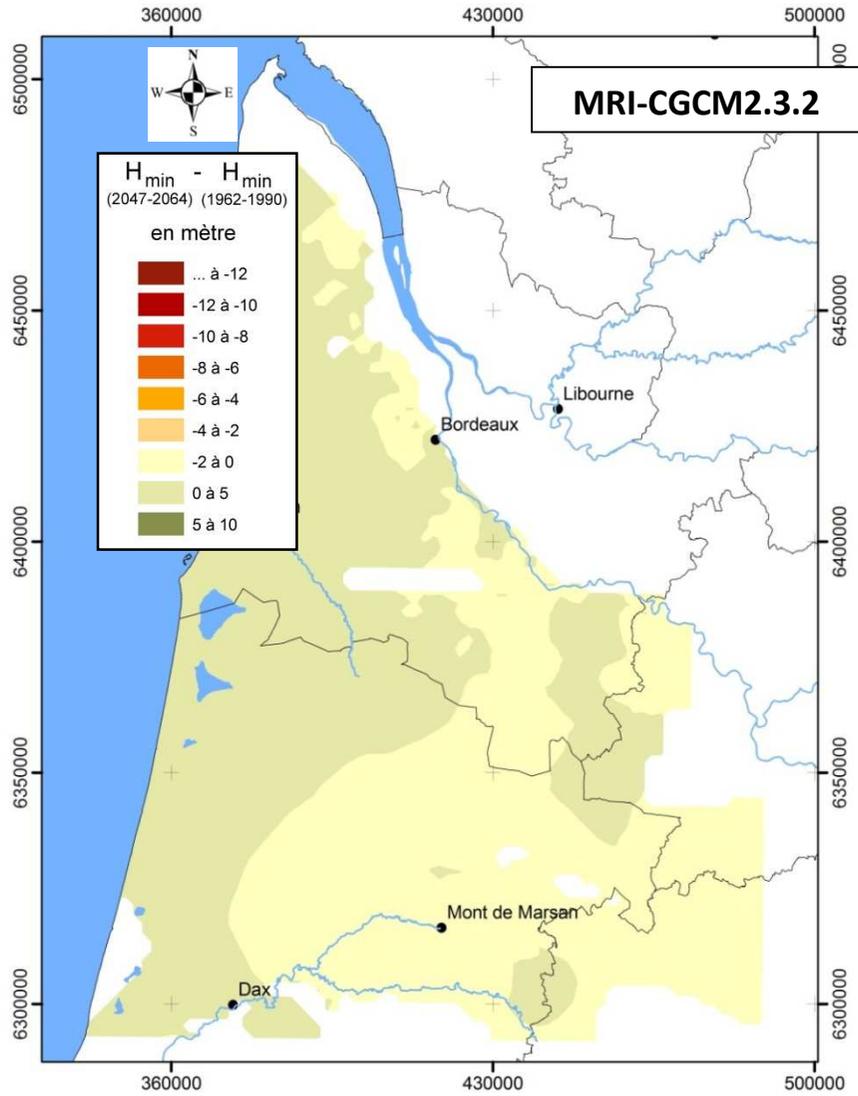


Illustration 12 : Cartes des écarts de la piézométrie minimale calculée entre la période 2047-2064 et la période de référence 1962-1990 pour les modèles GFDL-CM2.1 et MRI-CGCM2.3.2 : **Nappe de l'Aquitainien**

GFDL-CM2.1



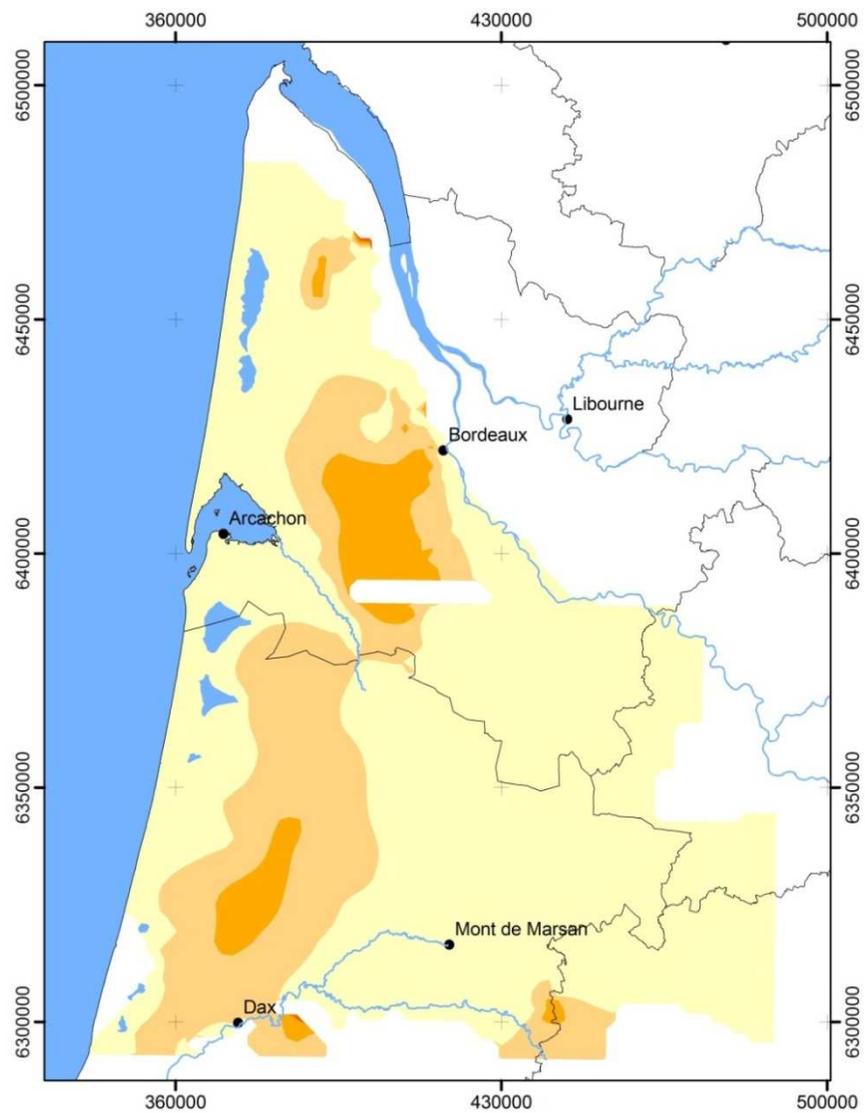


Illustration 13 : Cartes des écarts de la piézométrie minimale calculée entre la période 2047-2064 et la période de référence 1962-1990 pour les modèles GFDL-CM2.1 et MRI-CGCM2.3.2 : **Nappe de l'Oligocène**

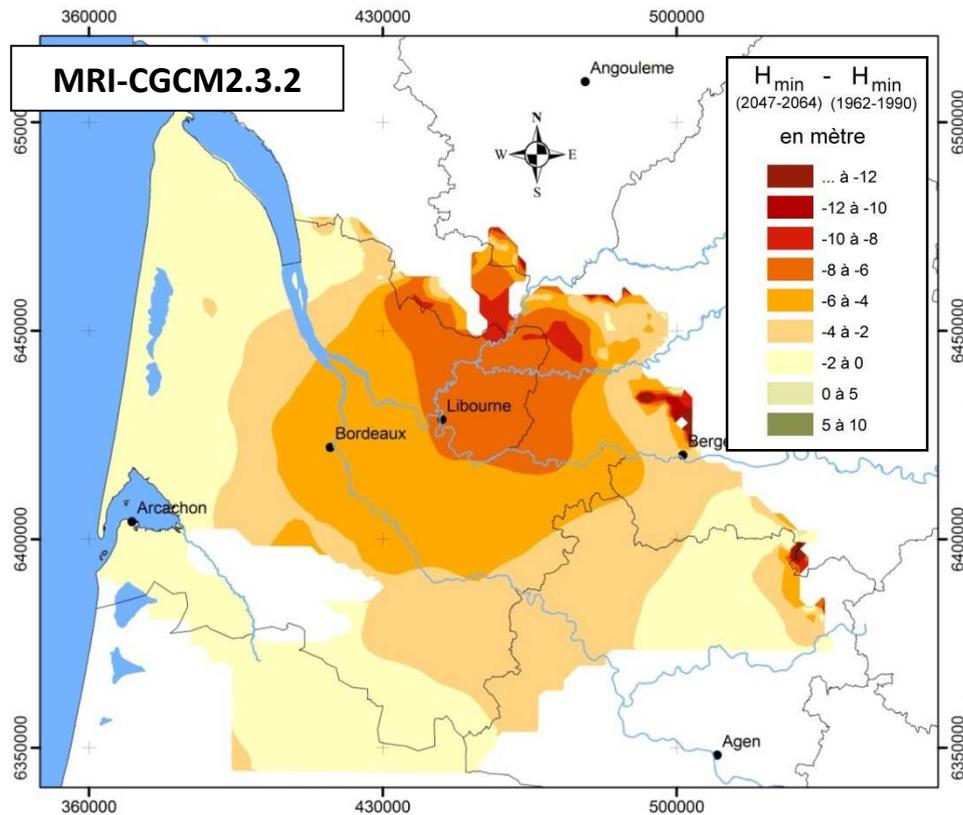
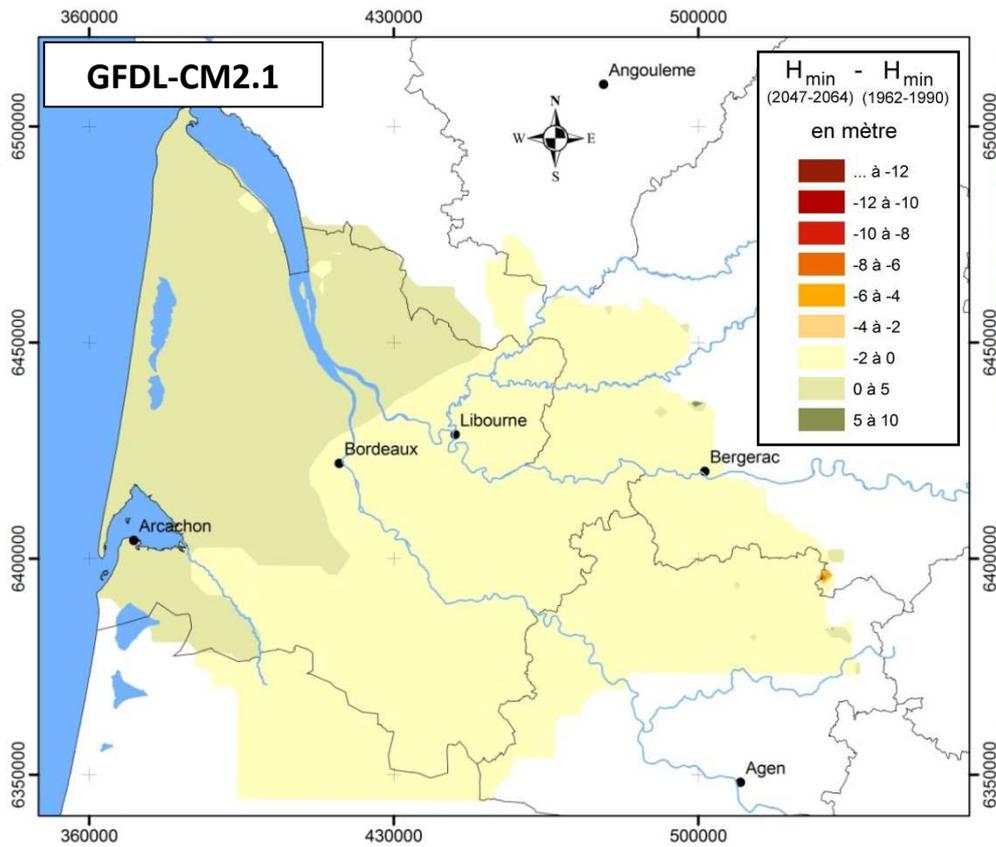


Illustration 14 : Cartes des écarts de la piézométrie minimale calculée entre la période 2047-2064 et la période de référence 1962-1990 pour les modèles GFDL-CM2.1 et MRI-CGCM2.3.2 : **Nappe de l'Eocène moyen**

### **4.3. IMPACT DE L'EVOLUTION DES PRELEVEMENTS SUR LA PIEZOMETRIE**

Afin d'évaluer l'impact de l'évolution des prélèvements telle qu'estimée par le BIPE, les données climatiques des 7 modèles du GIEC ont été utilisés en faisant varier les valeurs des débits pompés. Deux séries de simulations ont donc été réalisées sur la même période prospective (2047-2064), l'une intégrant les données de prélèvements de 2006 (notée Q2006) et l'autre les prélèvements à l'horizon 2070 (notés Q2070). À l'instar de l'approche précédente, les résultats sont évalués à la fois au travers des cartes de différences piézométriques calculées entre les deux simulations (

Illustration 15 à Illustration 18), en considérant toujours l'état critique, et en analysant les chroniques piézométrique des 12 points d'observation (Annexe 3).

Il ressort en premier lieu que quel que soit le modèle climatique considéré, les tendances globales, d'augmentation ou de diminution des niveaux piézométriques, sont sensiblement identiques.

Dans le cas des nappes plio-quadernaire et miocène, le scénario d'exploitation des aquifères à l'horizon 2070 entraîne, par rapport au scénario de prélèvement actuel, une diminution de l'ordre de 2 m de la piézométrie le long de la façade atlantique. Cette diminution s'amplifie dans les aquifères sous-jacents de l'Oligocène d'abord et de l'Eocène moyen ensuite, engendrant une baisse jusqu'à 12 m autour du bassin d'Arcachon. Dans le reste du domaine modélisé, la piézométrie des aquifères plio-quadernaires à oligocène accuse une augmentation globale de la piézométrie relativement modeste. Elle est de l'ordre de 2 m maximum et peut atteindre, très localement, 4 m. Concernant la nappe de l'Eocène moyen, la piézométrie subit une augmentation encore plus importante avec des écarts entre les deux scénarios pouvant atteindre 14 m.

Ces observations sont en accord avec la modification du schéma d'exploitation des nappes tel que décrit par le BIPE (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Ainsi, le long du littoral, une augmentation des volumes de prélèvements pour l'ensemble des usages, conduit à une diminution plus importante de la piézométrie dans ce secteur. Autour du Bassin d'Arcachon, ce phénomène s'amplifie. Cette zone voit en effet s'accroître les prélèvements pour l'AEP du fait d'une croissance démographique importante. Dans ce secteur, comme ailleurs en Gironde, ce sont les nappes de l'Eocène moyen et de l'Oligocène qui sont les plus sollicitées pour cet usage. Ailleurs, les prévisions 2070 considèrent une réduction générale plus ou moins importante des quantités d'eau prélevées. Ceci se traduit alors par une hausse de la piézométrie, qui peut être significative pour la nappe de l'Eocène moyen. L'absence de baisse piézométrique dans le sud-est, comme attendue dans le bassin Garonne Moyenne (secteur d'Agen), s'explique par le fait que ces nappes n'y sont pas captées pour l'AEP, les volumes d'eaux étant prélevés dans les aquifères sous-jacents.

Au final, ce schéma des tendances traduit ainsi pour l'ensemble des nappes un scénario de prélèvements estimé à l'horizon 2070 défavorable sur le littoral atlantique, et notamment le bassin d'Arcachon, mais favorable aux nappes sur le reste du domaine modélisé.

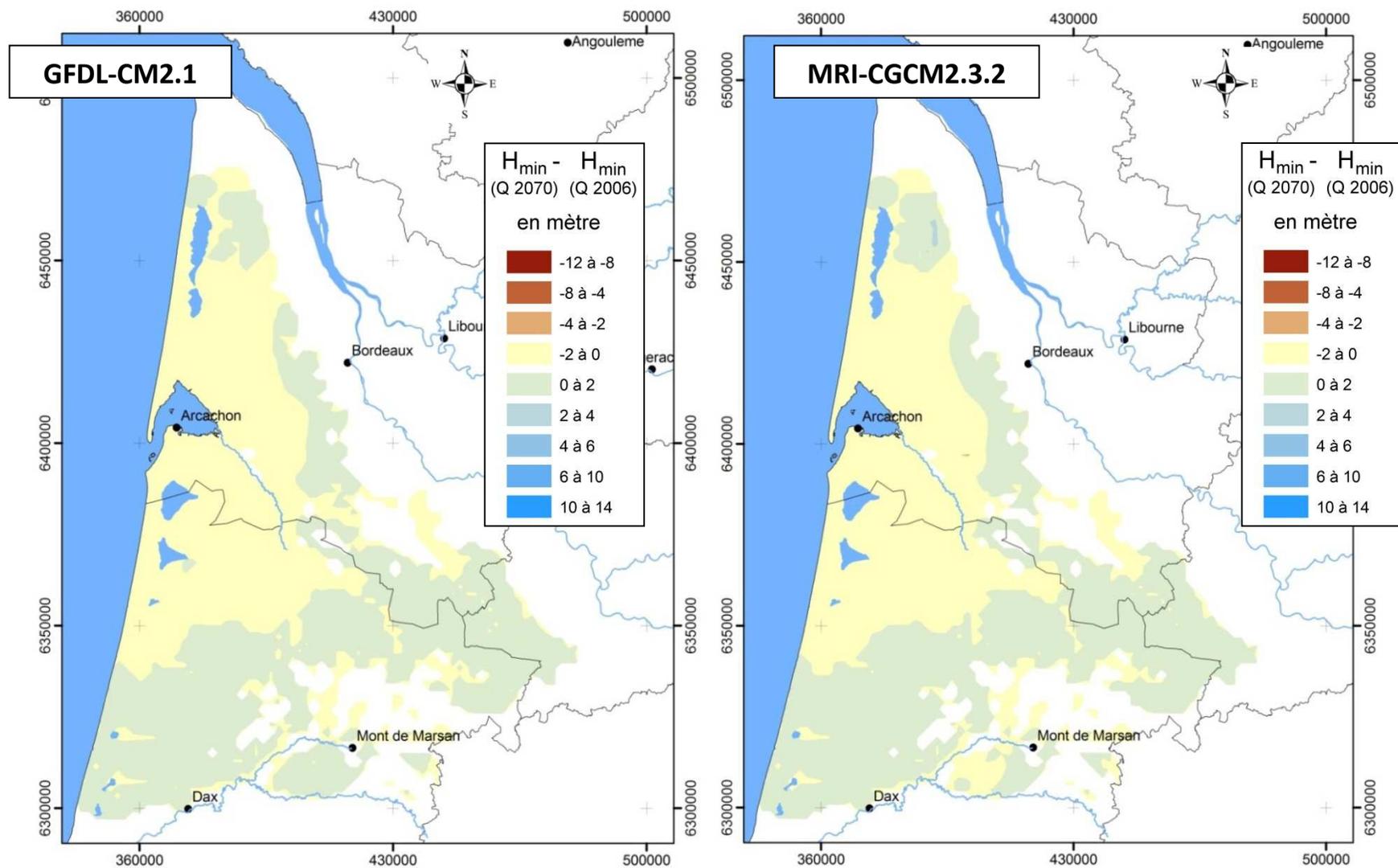
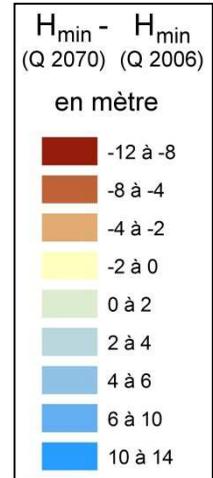
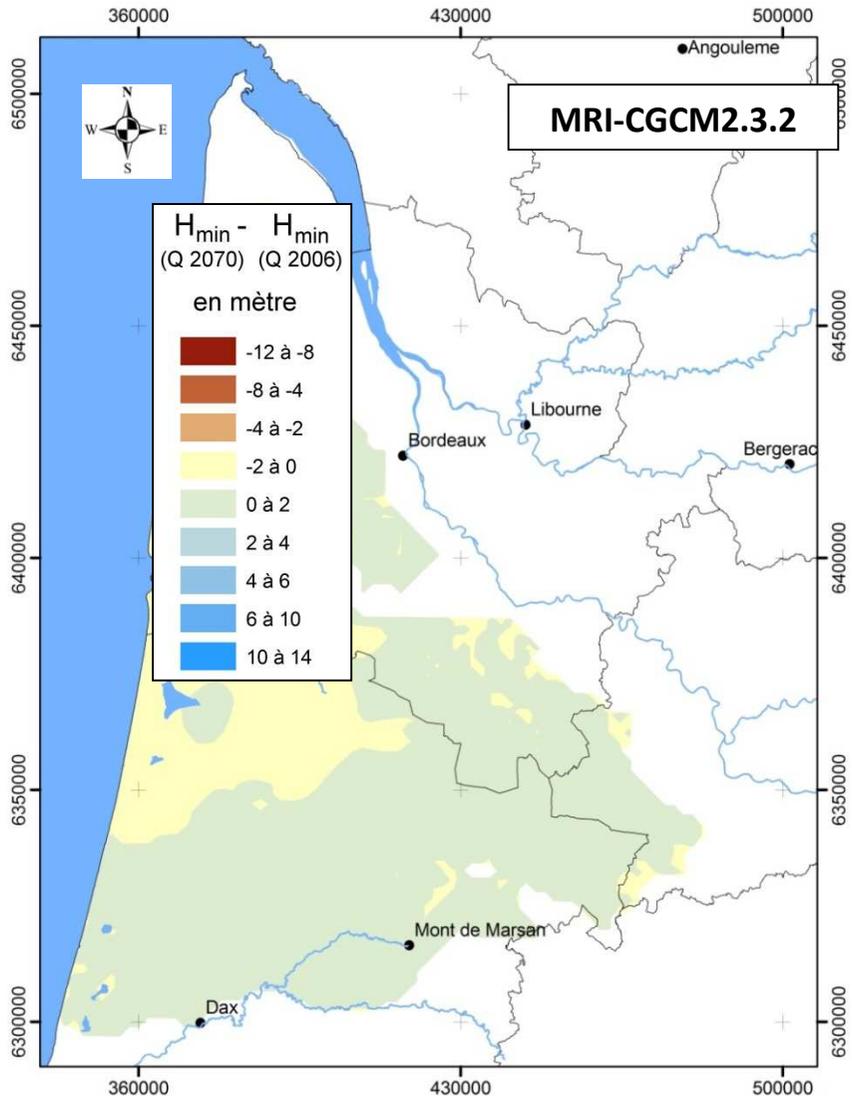


Illustration 15 : Cartes des écarts de la piézométrie minimale sur la période 2047-2064 entre l'estimation des prélèvements à l'horizon 2070 et ceux de 2006 pour les modèles GFDL-CM2.1 et MRI-CGCM2.3.2 : **Nappe du Plio-quaternaire**

**GFDL-CM2.1**



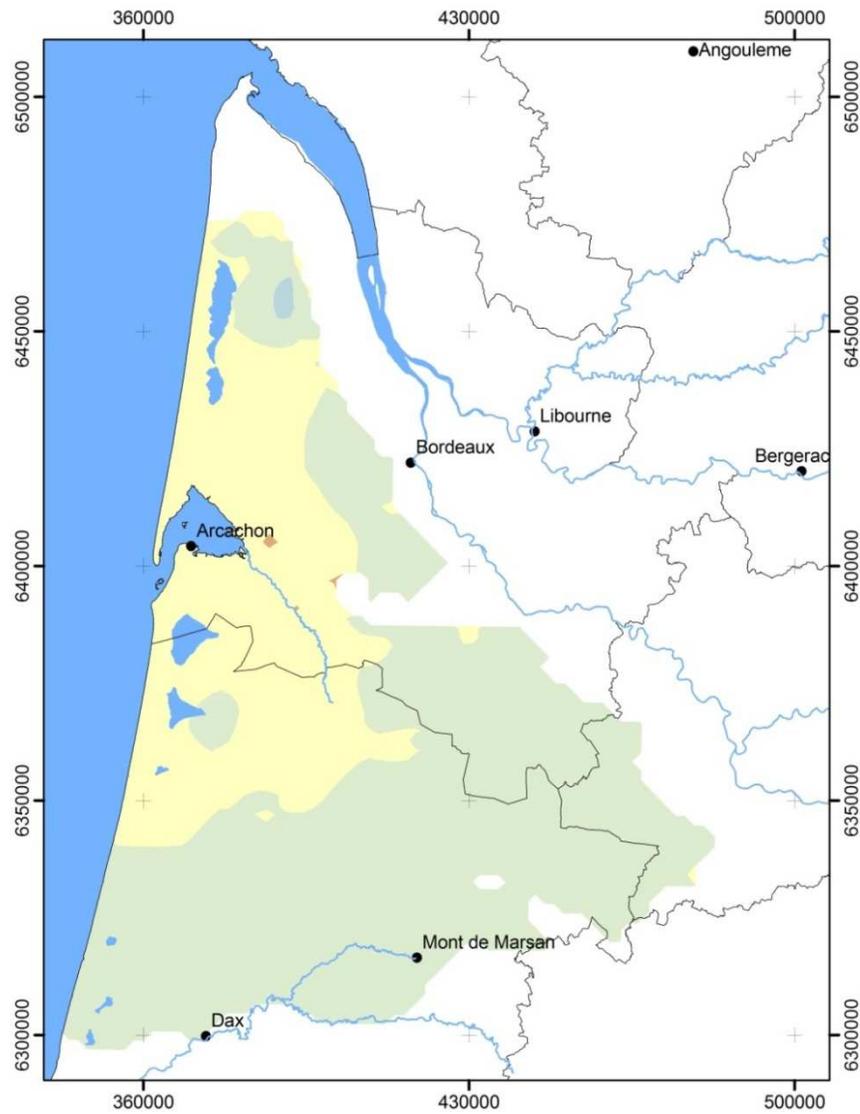
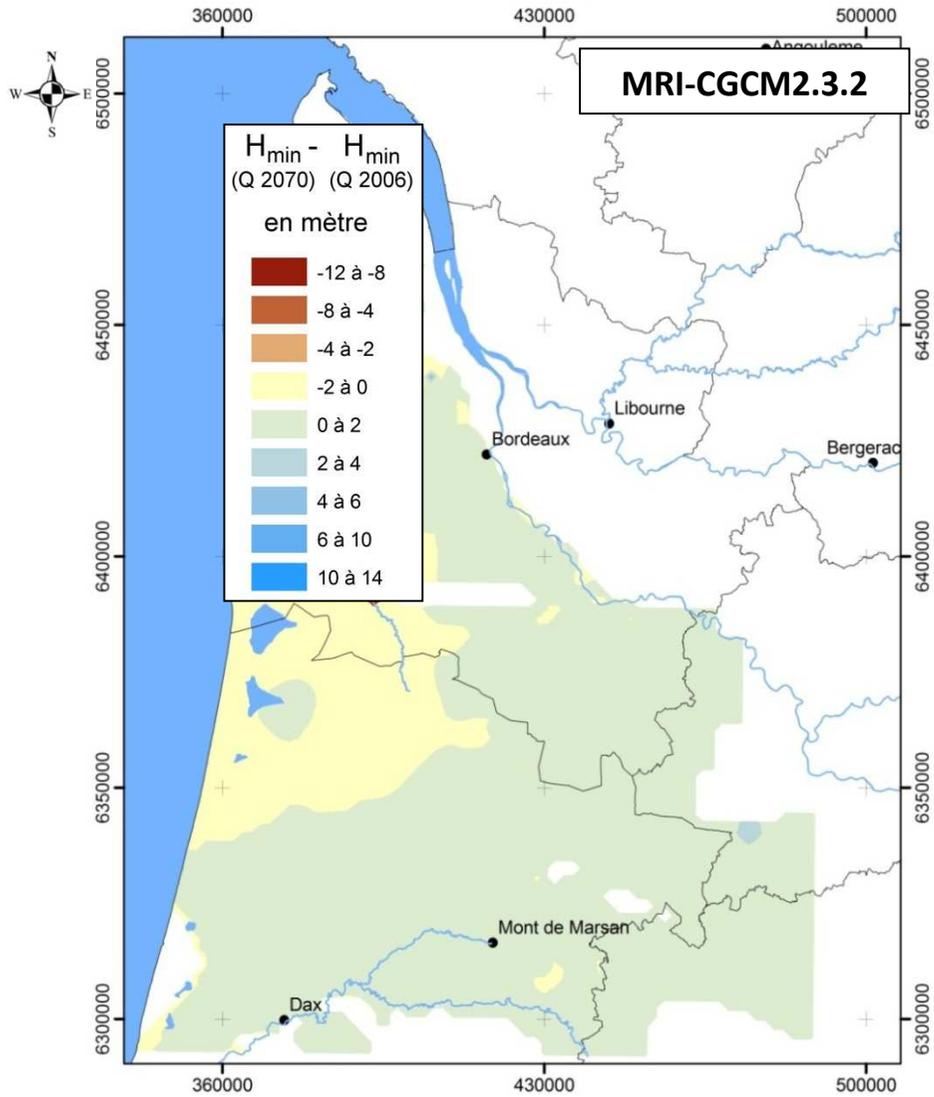
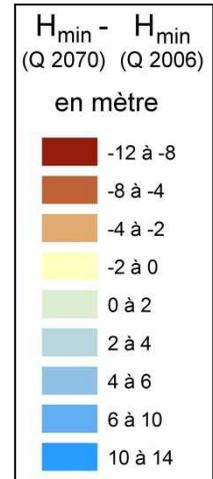


Illustration 16 : Cartes des écarts de la piézométrie minimale sur la période 2047-2064 entre l'estimation des prélèvements à l'horizon 2070 et ceux de 2006 pour les modèles GFDL-CM2.1 et MRI-CGCM2.3.2 : **Nappe de l'Aquitainien**

**GFDL-CM2.1**



**MRI-CGCM2.3.2**



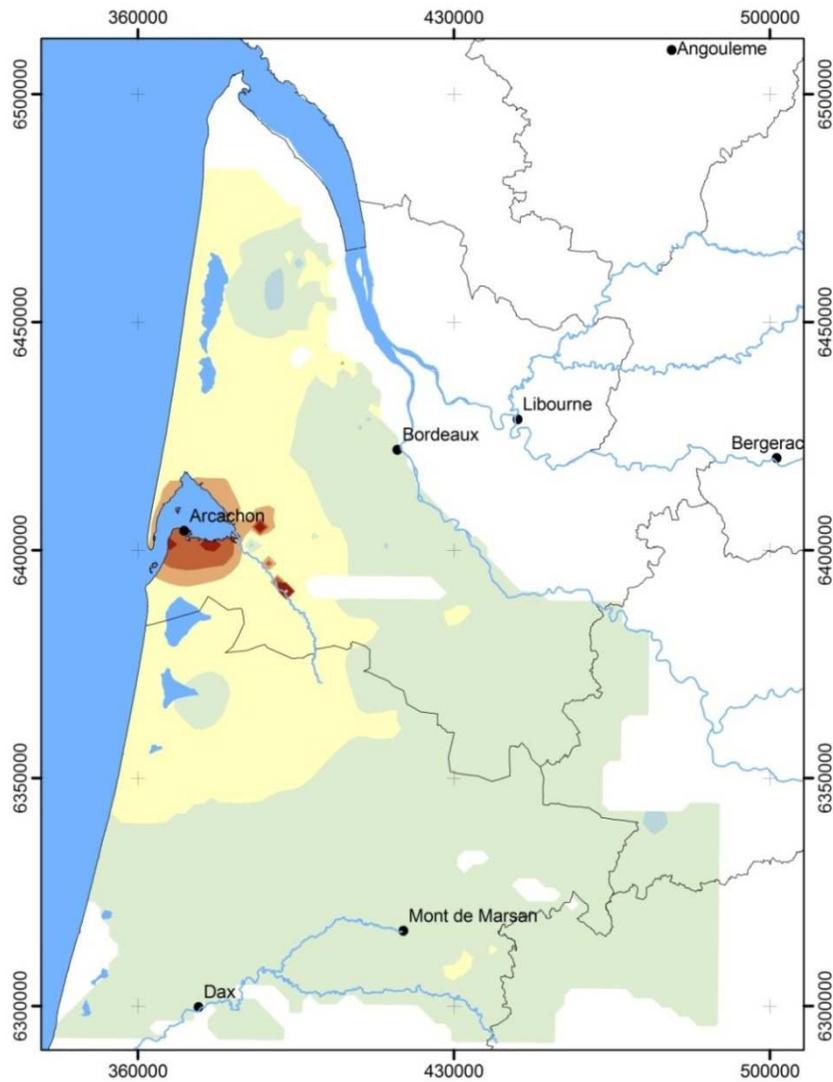


Illustration 17 : Cartes des écarts de la piézométrie minimale sur la période 2047-2064 entre l'estimation des prélèvements à l'horizon 2070 et ceux de 2006 pour les modèles GFDL-CM2.1 et MRI-CGCM2.3.2 : **Nappe de l'Oligocène**

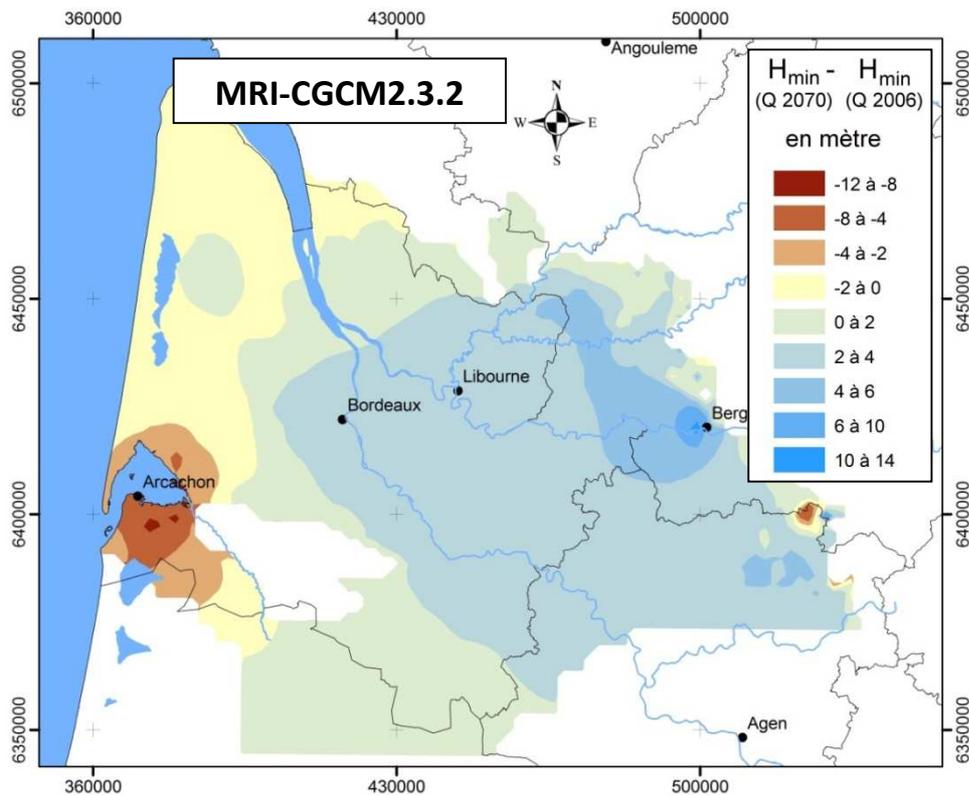
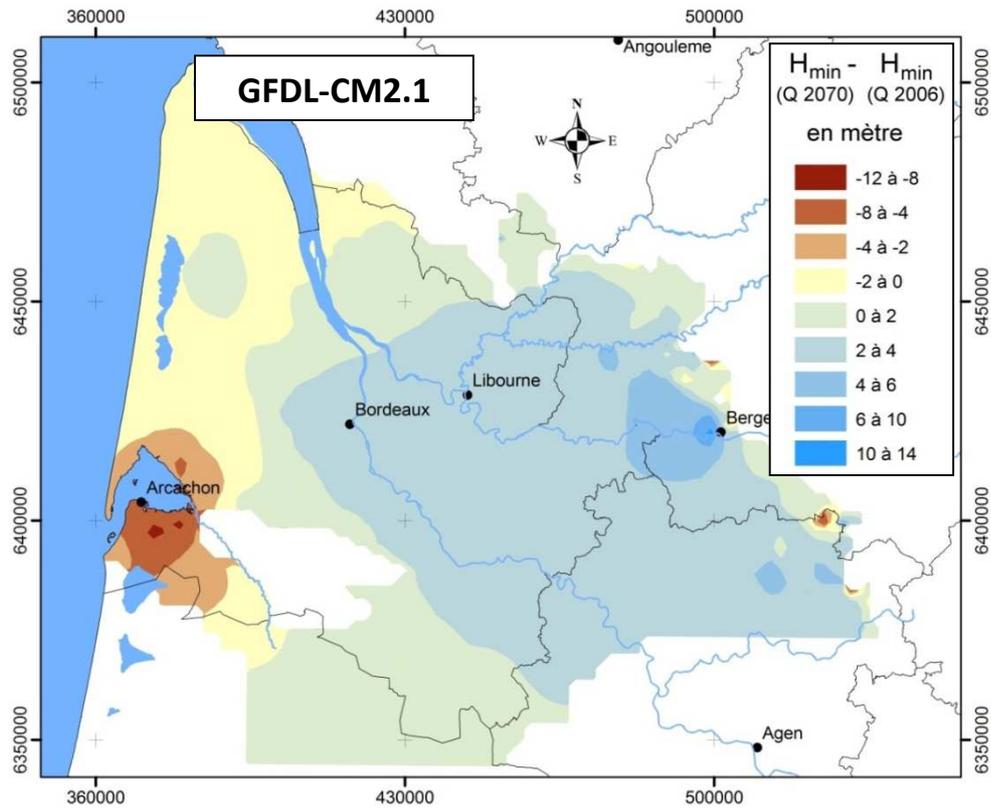


Illustration 18 : Cartes des écarts de la piézométrie minimale sur la période 2047-2064 entre l'estimation des prélèvements à l'horizon 2070 et ceux de 2006 pour les modèles GFDL-CM2.1 et MRI-CGCM2.3.2 : **Nappe de l'Eocène moyen**

## 5. CONCLUSION

Dans un premier temps, le Modèle Nord-Aquitain a été utilisé afin de simuler l'impact du changement climatique sur les niveaux aquifères du Bassin Nord-Aquitain. Les simulations ont été réalisées sur la base des résultats de 7 modèles climatiques différents (Scénario A1B du GIEC). A chaque modèle climatique correspondent deux simulations, l'une réalisée sur la période de référence de 1962-1990 considérée comme non influencée par le changement climatique, l'autre sur la période prospective (2047-2064). De manière à évaluer l'impact du changement climatique, une comparaison de ces deux simulations pour chaque modèle a été effectuée sous la forme de cartes de différences piézométriques et de graphiques des chroniques de points d'observation.

Une variation importante de l'état des nappes a pu être observée selon les modèles considérés. Ainsi, pour les modèles dits "optimistes", les nappes subissent une augmentation modérée de leurs niveaux piézométriques sur la façade atlantique. Ailleurs, ces nappes sont soumises à une baisse de charge qui reste également modeste. Pour les modèles considérant des recharges beaucoup plus faibles qu'actuellement, l'ensemble des nappes subit une baisse piézométrique qui se concentre au niveau des zones d'affleurement, notamment pour l'Eocène moyen, et au niveau des zones de drainance entre aquifères (cas du Miocène et de l'Oligocène).

Dans un second temps, le Modèle Nord-Aquitain a permis d'évaluer l'impact de l'évolution de l'exploitation des eaux souterraines à l'horizon 2070. Les perspectives d'évolution des prélèvements ont été réalisées par le BIPE. Elles admettent globalement une augmentation des prélèvements sur l'ensemble de la façade atlantique alors que dans le reste du bassin, les nappes sont moins sollicitées. L'évaluation de l'impact de ce scénario a été entreprise en réalisant sur la période prospective (2047-2064) deux simulations par modèle climatique. La première intègre les données de prélèvements de l'année 2006, issues de la base de prélèvement du MONA, alors que la seconde prend en compte une perspective d'évolution de ces prélèvements à l'horizon 2070 sur les recommandations du BIPE. Une différence entre les deux simulations permet d'évaluer l'impact de l'évolution des prélèvements par rapport à l'actuel.

Pour les nappes captives, la variation de leur régime d'exploitation impacte nettement l'évolution des charges hydrauliques. Ainsi, le long du littoral, une augmentation présumée des volumes de prélèvements (Eau potable principalement) conduit, pour l'ensemble des nappes, à une baisse piézométrique qui se concentre notamment sur le Bassin d'Arcachon. Dans le reste du domaine, une réduction globale des prélèvements d'ici 2070 entraîne une hausse de la piézométrie, apparaissant comme significative pour la nappe de l'Eocène moyen.

Au final, cette étude a montré que des variabilités importantes dans la piézométrie sont observables entre les résultats des différents modèles climatiques pour un même scénario (A1B). Les recharges introduites dans les modèles ont donc un rôle majeur dans l'état des nappes. Ainsi, les projections climatiques aboutissent dans de nombreux cas à des réductions sévères de la recharge sur de longues périodes ; événements non observés sur la période de calage du Modèle Nord-Aquitain. Les modalités de recharge utilisées actuellement pourraient s'avérer inadaptées dans les conditions climatiques fortement défavorables prises en compte sur la période prospective. Il faut donc considérer les résultats obtenus avec toute la mesure qui s'impose en gardant à l'esprit les limites de l'exercice.

Toutefois, les résultats de ces simulations montrent que l'impact du changement climatique ne peut être négligé dans la gestion de la ressource en eau. En effet, les modèles climatiques les

plus défavorables se traduisent par des baisses de la piézométrie pouvant aller jusqu'à plus de 10 m. La gestion de la ressource constitue donc un enjeu fondamental sur l'ensemble du Bassin Nord-Aquitain. En Aquitaine, les baisses de piézométries induites par la diminution de la recharge peuvent également entraîner une réduction des débits des sources dont certaines participent de manière importante à l'alimentation en eau potable des populations de la région. Cet aspect doit être pris en compte dans les stratégies de gestion des eaux souterraines par la rationalisation des prélèvements sur les zones à forts enjeux. A noter que l'étude des politiques de gestion les plus adaptées est d'ores et déjà en cours à l'échelle départementale par l'intermédiaire du SAGE Nappes profondes de Gironde. Les solutions proposées préconisent l'établissement d'une politique d'économie d'eau (sur les usages et le rendement des réseaux) et une meilleure répartition spatiale des prélèvements rendue possible par la mise en œuvre de nouveaux champs captants.

Les simulations portant sur l'évolution des prélèvements ont traduit l'importance de ce paramètre sur la piézométrie des nappes captives du nord du Bassin aquitain. Les variations observées s'échelonnent de -12 à +14 m selon les secteurs considérés. Ces résultats viennent appuyer les études réalisées récemment en Aquitaine (Pédron et *al.*, 2010) ou celles actuellement en cours (révision du SAGE nappes profondes de Gironde) qui montrent qu'à conditions climatiques constantes, les diminutions de la piézométrie à l'horizon 2030 peuvent aller jusqu'à 20 m selon les scénarios de prélèvements considérés. Les secteurs les plus influencés correspondent, comme dans les simulations réalisées ici, aux grandes zones urbanisées où se concentrent la majorité des forages d'alimentation en eau potable.

Il s'avère donc indispensable de prendre en considération l'impact du changement climatique pour la gestion des nappes captives. En effet, la tendance semble plutôt s'orienter vers une baisse de la recharge, même si les projections aboutissent à des gammes variables selon les différents modèles climatiques.



# Bibliographie

**Amraoui, N., F. Bichot, J.J. Seguin, J.P. Platel, et B. Sourisseau.** «Restructuration du modèle nord aquitain de gestion des nappes. Réalisation de 6 simulations pour le Schéma de Gestion des Eaux du département de la Gironde. BRGM/RR-40224-FR.» BRGM, 1999, .

**Amraoui, N., F. Bichot, J.P. Platel, et J.J. Seguin.** «Gestion des eaux souterraines en Aquitaine. Année 2 - Evaluation des ressources. Ajout des couches du Santonien-Turonien, du Cénomanien et du Jurassique moyen et supérieur au modèle nord aquitain. BRGM/RR-40110-FR.» BRGM, 1998, 59.

**Braneyre, M.** «Modèle conceptuel sommaire. Multicouche aquitain, BRGM/RR-37322-F.» BRGM, 1993.

**Braneyre, M., et al.** «Modélisation mathématique multicouche des trois aquifères exploités du bassin sédimentaire nord-aquitain (Oligocène - Éocène - Crétacé) - BRGM/RR-37361-FR.» BRGM, 1993.

**Braneyre, M., M. Lambert, et B. Sourisseau.** «Rapport de synthèse du modèle régional multicouche du Bassin Nord-aquitain. Calage en régime transitoire et simulations - BRGM/RR-38006-FR.» BRGM, 1994.

**Durand, Y., E. Brun, L. Mérindol, G. Guyomarc'h, B. Lesaffre, et E. Martin.** «A meteorological estimation of relevant parameters for snow models.» *Annals of Glaciology*, , vol.18 (1993): pp.65-71.

**Etcheverry, D.** «Une approche déterministe des distributions des temps de transit de l'eau souterraine par la théorie des réservoirs.» Université de Neuchâtel, 2001.

**Gomez, E. Pédron, N. et Buscarlet, E..** «Utilisation du Modèle Nord-Aquitain (MONA) pour appuyer la définition des volumes prélevables dans les aquifères profonds du Nord du Bassin aquitain - BRGM/RP-57878-FR» BRGM, 2010.

**Le Moigne, P.** «Description de l'analyse des champs de surface sur la France par le système Safran. Note de centre GMME.» Météo-France, 2002.

**Lenotre, N., G. Le.Cozannet, et N. Dorfliger.** «Contribution du BRGM au dictionnaire des phénomènes liés au changement climatique et de leurs impacts sur le littoral. Rapport final - BRGM/RP-58289-FR.» BRGM, 2010.

**Pédron, N., et B. Lopez.** «Actualisation du modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes. Période 2001 - 2003. Rapport final - BRGM/RP-54220-FR.» BRGM, 2006.

**Pédron, N., J.J. Seguin, et F. Bichot.** «Gestion des eaux souterraines en Aquitaine. Année 5. Évaluation des ressources. Modélisation des aquifères du Miocène. Calage et simulations. BRGM/RP-51176-FR.» BRGM, 2001.

**Pédron, N., J.J. Seguin, et J.P. Capdeville.** «Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine - Développements et maintenance du Modèle Nord Aquitain de gestion des nappes - Module 4 - Année 1. BRGM/RP-52602-FR.» BRGM, 2003, 56.

**Pédron, N., J.P. Platel, B. Bourguine, et J.B. Loiseau.** «Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine - Année 4 - Module 4 - Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes - RP-56614-FR.» BRGM, 2008.

**Pédron, N., J.P. Platel, et B. Bourgine.** «Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine - Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes – Module 4 – Année 3 – BRGM/RP-55242-FR.» BRGM, 2006.

**Pédron, N., J.P. Platel, et B. Lopez.** «Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine - Développements et maintenance du Modèle Nord Aquitain de gestion des nappes - Modules 4 - Année 2 - Rapport final - BRGM/RP-53659-FR.» BRGM, 2005, 95.

**Seguin, J.J.** «Contrôle qualité et gestion des nappes d'eaux souterraines en Gironde. Actualisation du modèle nord-aquitain de gestion des nappes. Période 1997-1998. BRGM/RR-40760-FR.» BRGM, 1999.

**Seguin, J.J.** «Gestion des eaux souterraines en Aquitaine. Actualisation du modèle nord-aquitain. Période 1999-2000. BRGM/RP-51758-FR.» BRGM, 2002.

**Seguin, J.J.** «Restructuration du modèle nord-aquitain de gestion des nappes. Correction du biais de calage du modèle. R40711.» BRGM, 1999.

**Thiéry, D.** «Didacticiel du code de calcul Marthe v7.0 - Votre premier modèle - BRGM/RP-58632-FR.» BRGM, 2010.

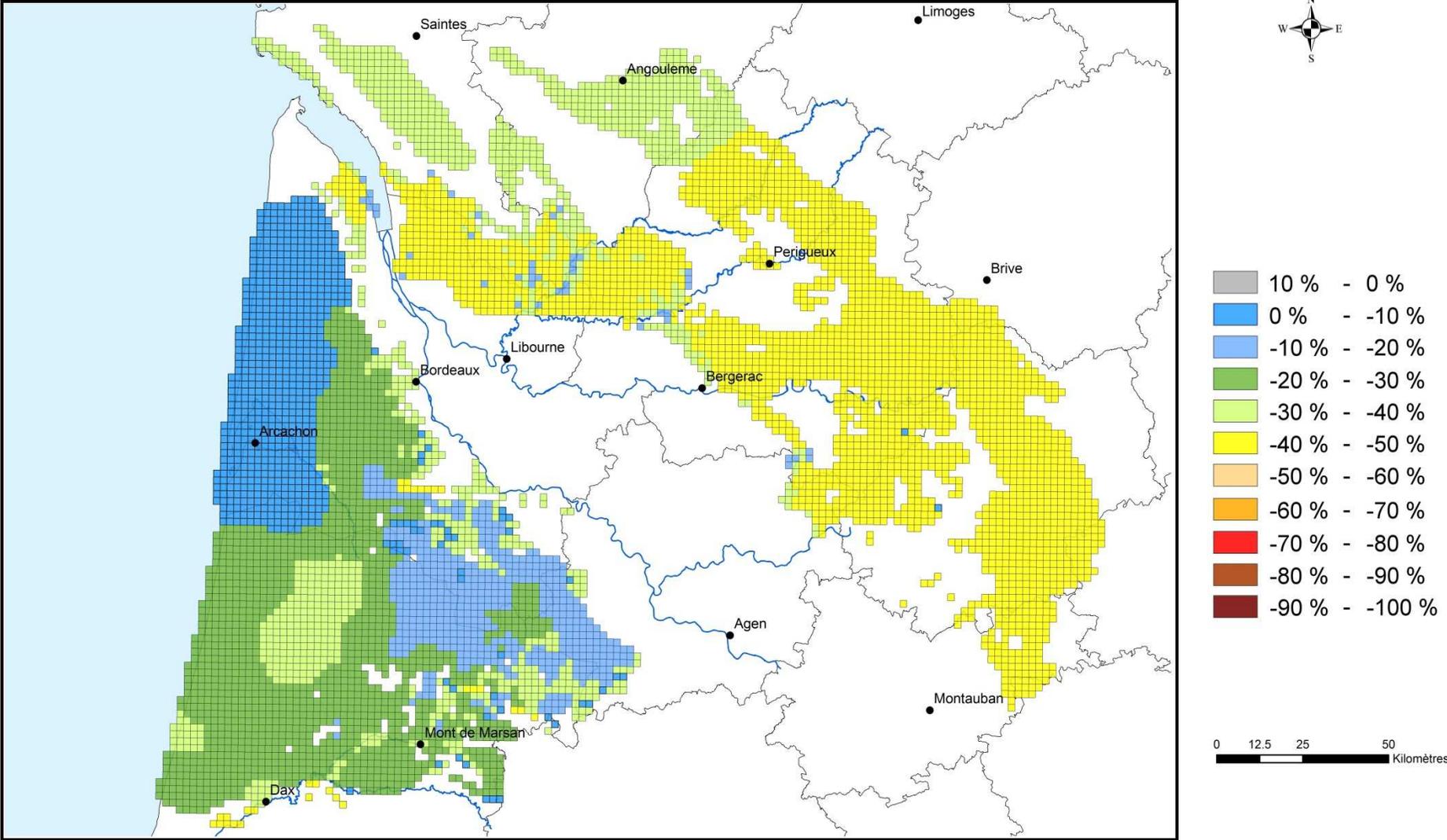
**Thiéry, D.** «Didacticiel du pré-processeur WinMarthe v4.0 - Rapport final - BRGM/RP - 54652-FR.» BRGM, 2006.

**Thiéry, D.** «Logiciel MARTHE Modélisation d'Aquifère par maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Écoulements - R-32210.» BRGM, 1990.

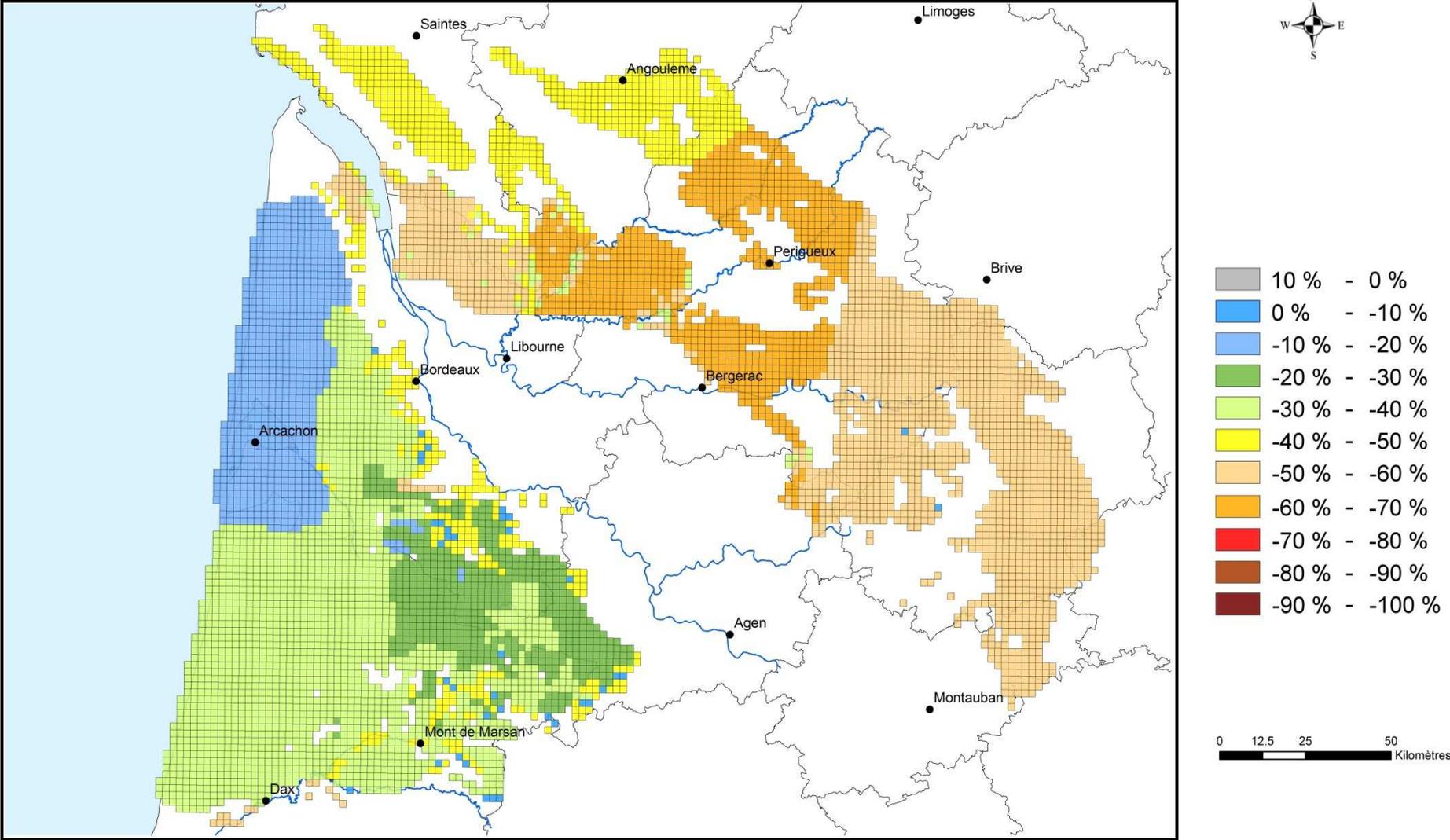
## **Annexe 1**

**Répartition spatiale des diminutions de recharge  
(pourcentage de baisse entre les valeurs moyennes  
de la période de référence et les valeurs moyennes  
de chaque modèle)**

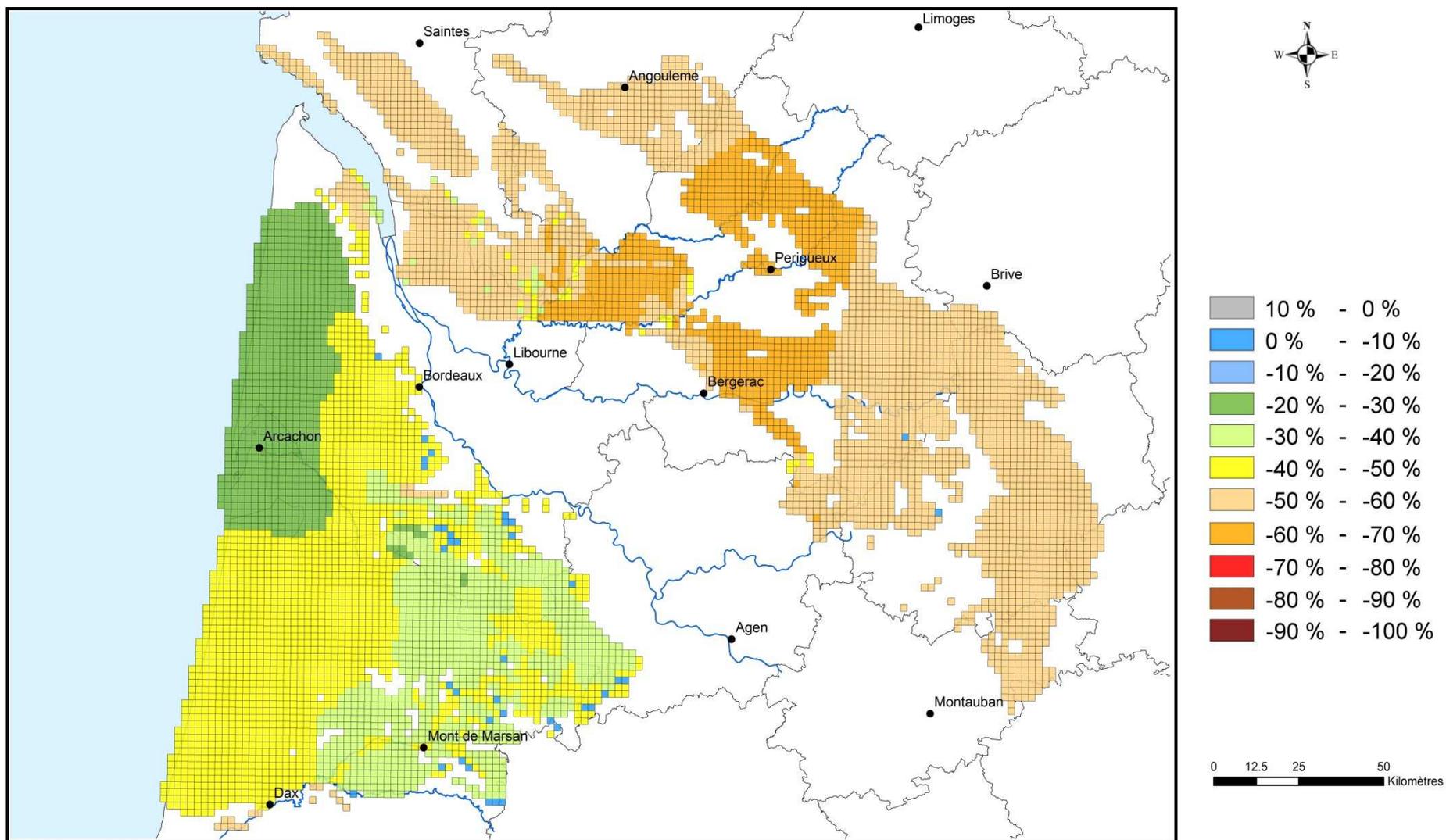
Variation de recharge entre la période prospective (2047-2064) et la période de référence (1962-1990) : modèle ARPV3



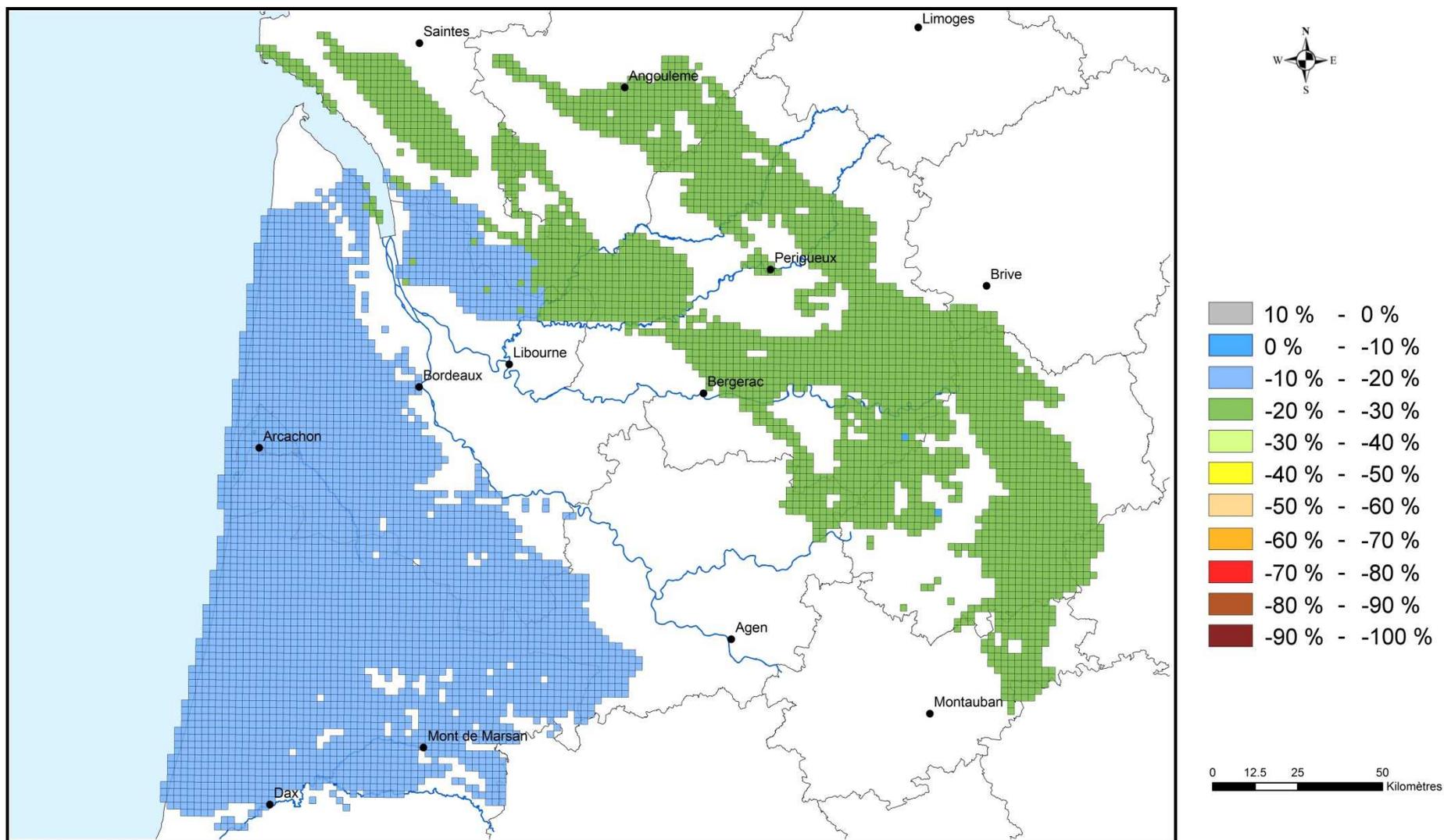
Variation de recharge entre la période prospective (2047-2064) et la période de référence (1962-1990) : modèle CCCMA-CGCM3



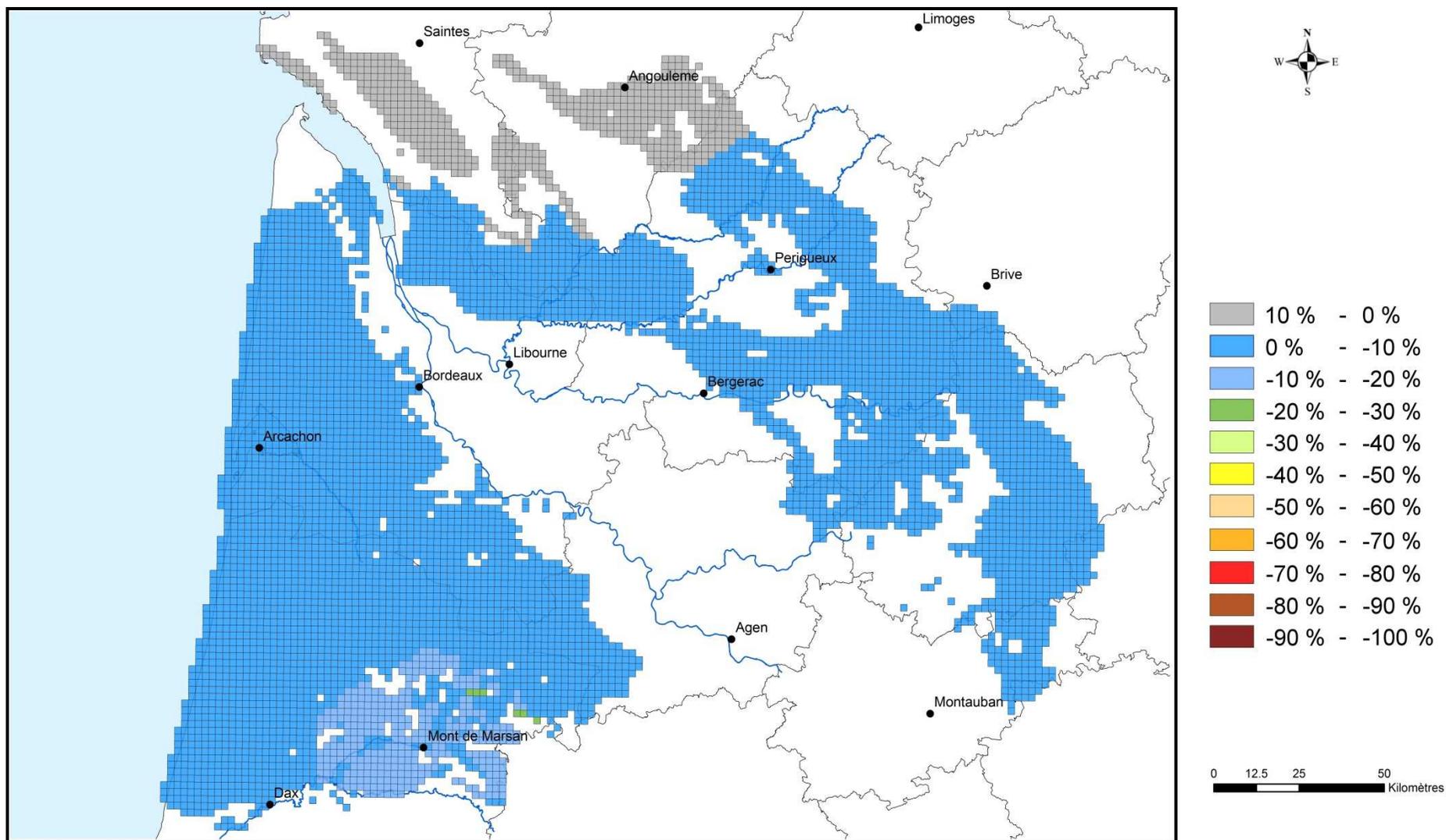
Variation de recharge entre la période prospective (2047-2064) et la période de référence (1962-1990) : modèle MRI-CGCM2.3.2



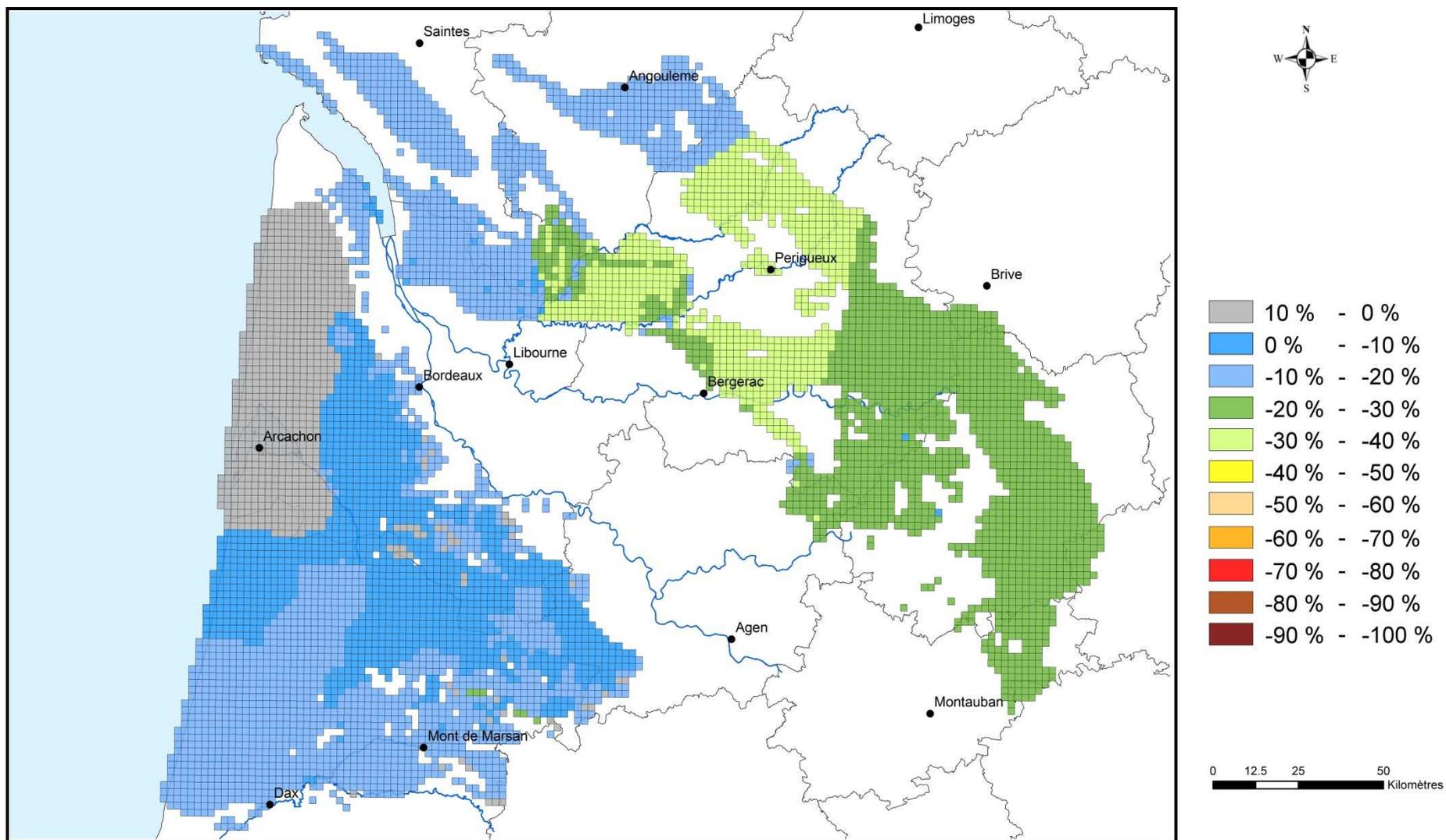
Variation de recharge entre la période prospective (2047-2064) et la période de référence (1962-1990) : **modèle GISS-MODEL-ER**



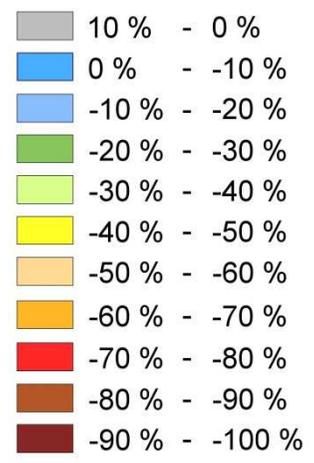
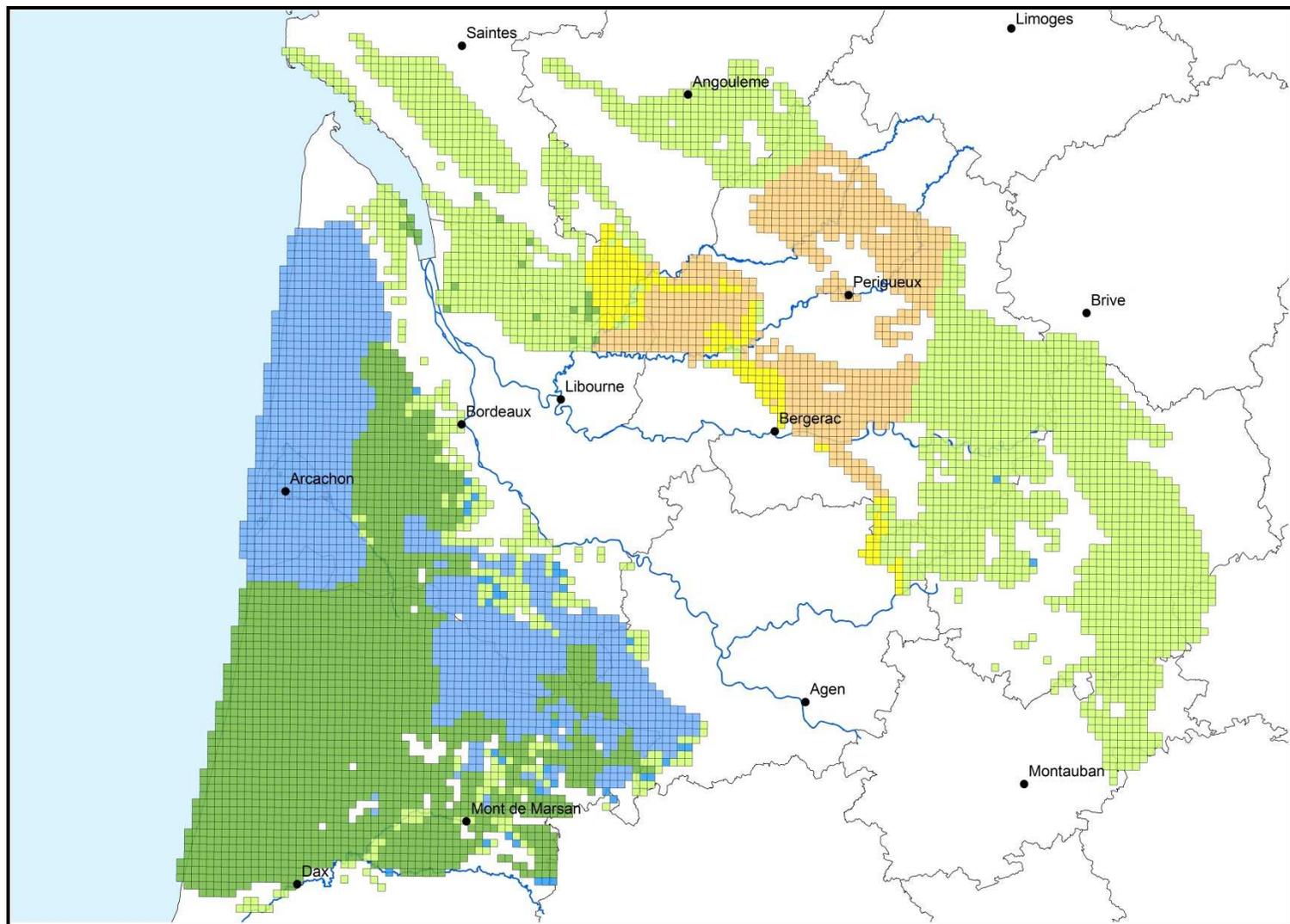
Variation de recharge entre la période prospective (2047-2064) et la période de référence (1962-1990) : **modèle GFDL-CM2.1**



Variation de recharge entre la période prospective (2047-2064) et la période de référence (1962-1990) : **modèle GFDL-CM2.0**



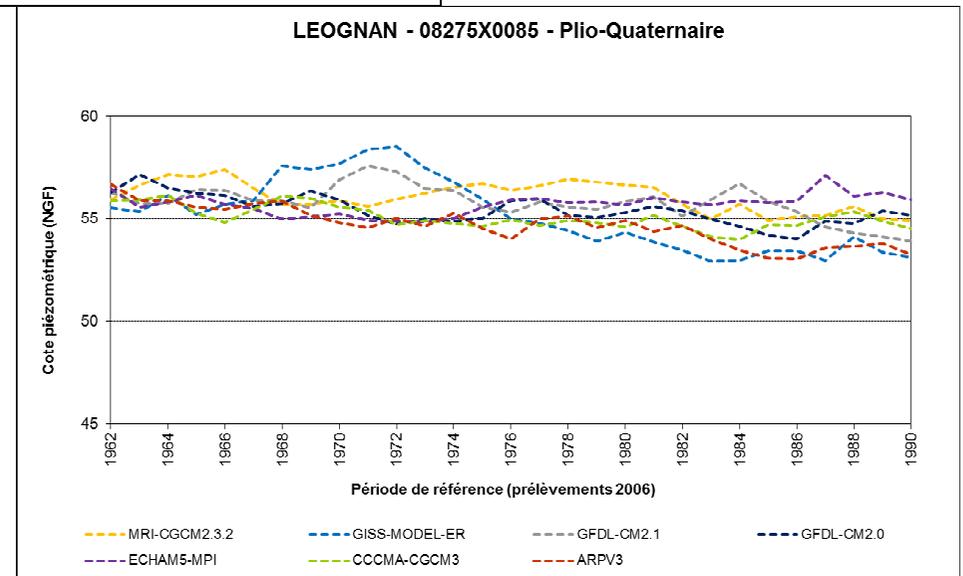
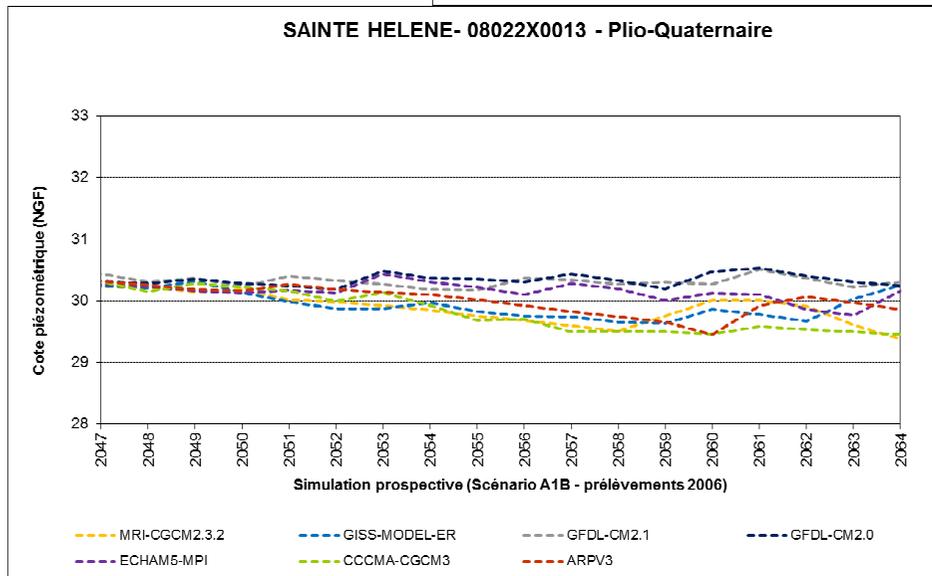
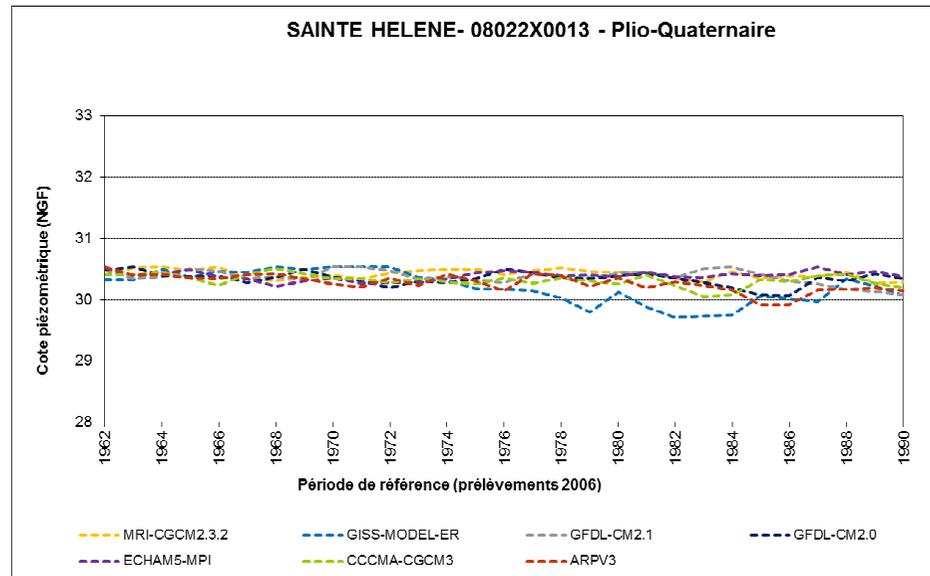
Variation de recharge entre la période prospective (2047-2064) et la période de référence (1962-1990) : **modèle ECHAM5-MPI**

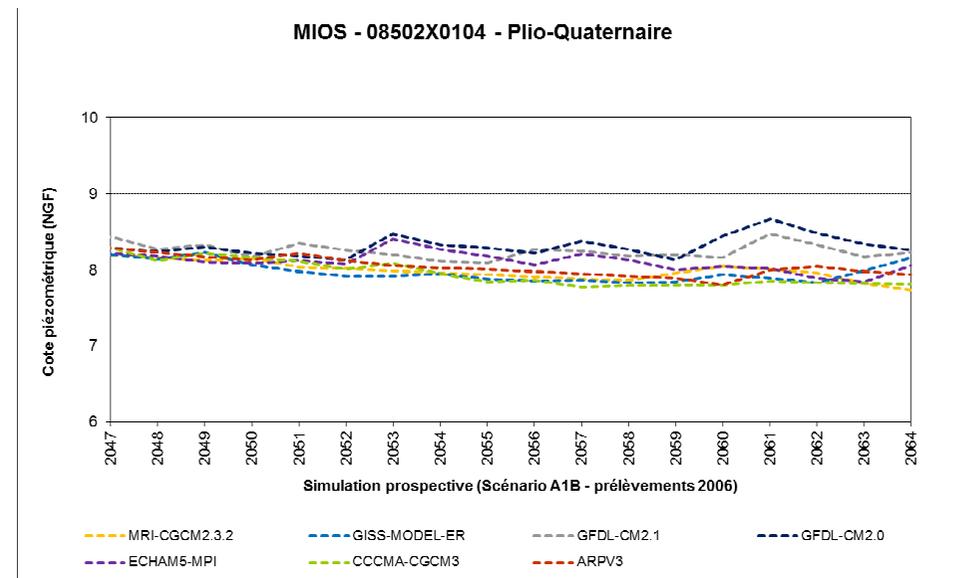
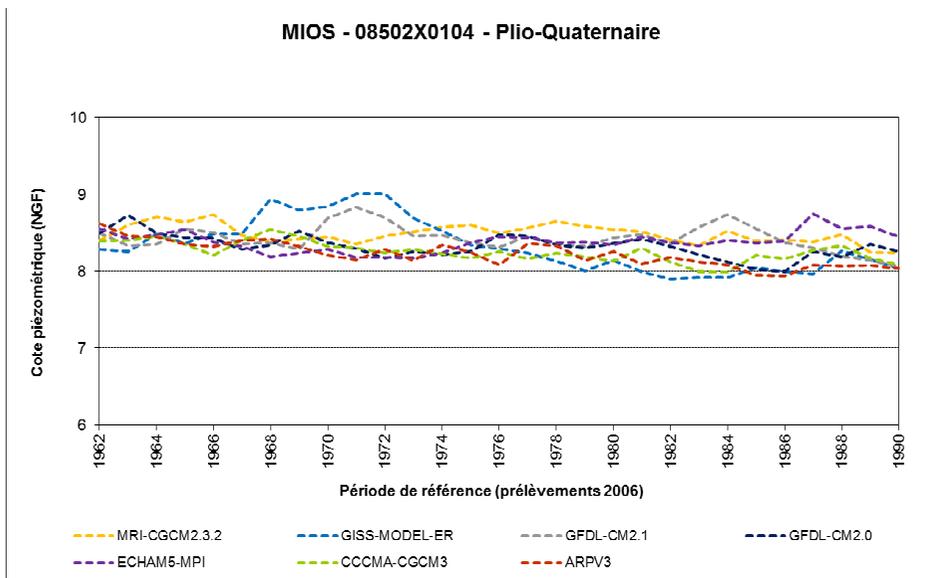
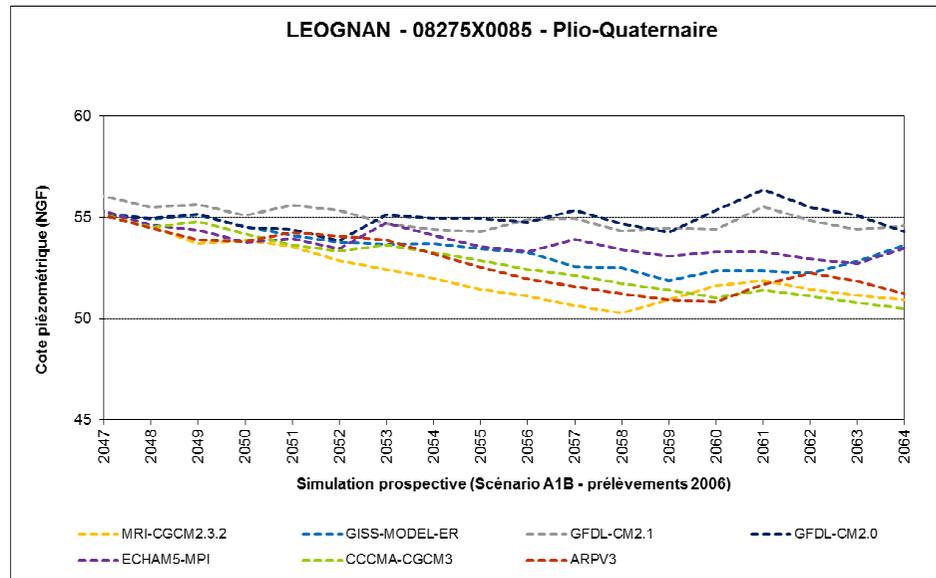


## **Annexe 2**

### **Comparaison de l'impact des scénarios climatiques à partir de chroniques piézométriques**

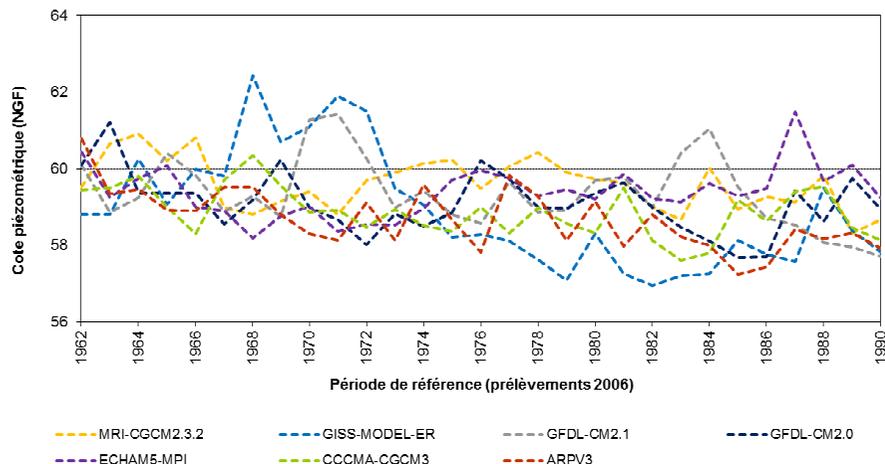
## Nappe du Plio-Quaternaire



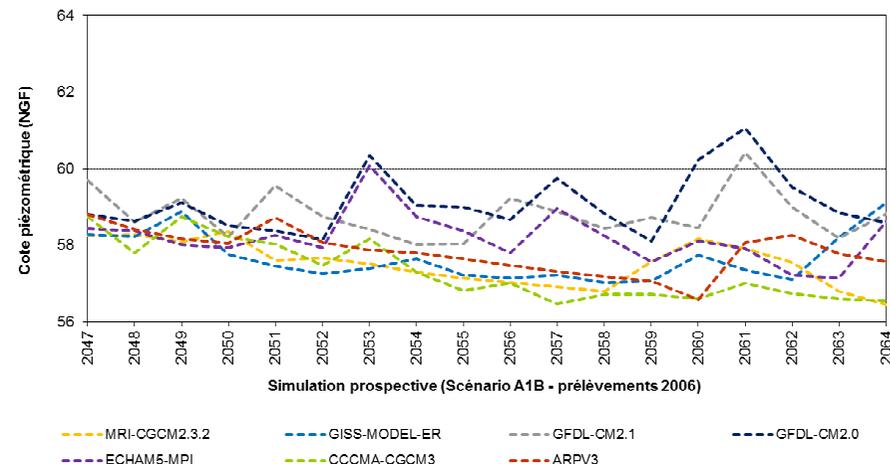


## Nappes du Miocène

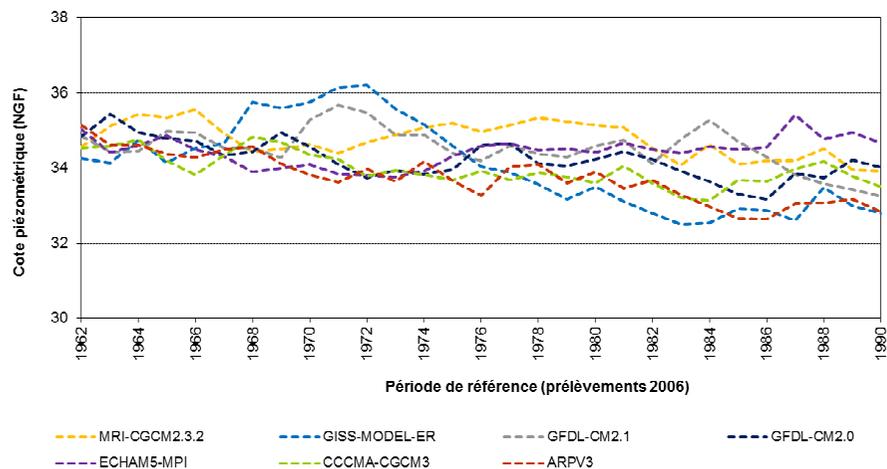
Mano- 08752X0055/F - Langhien-Serravalien



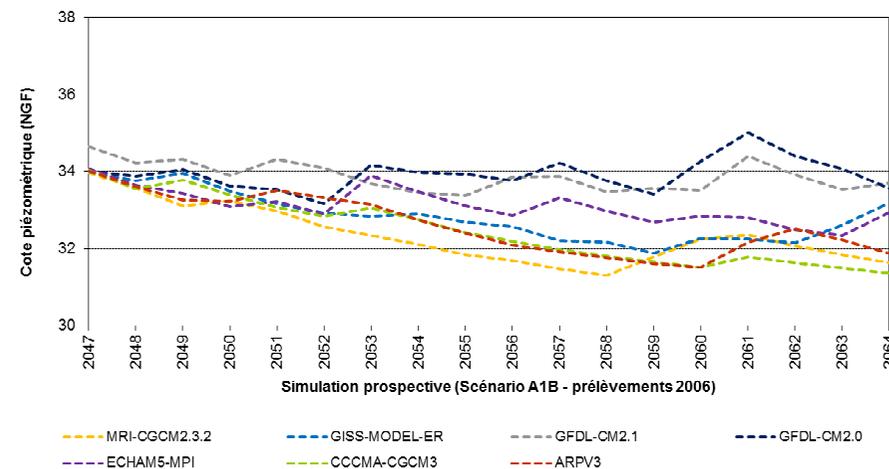
Mano- 08752X0055/F - Langhien-Serravalien



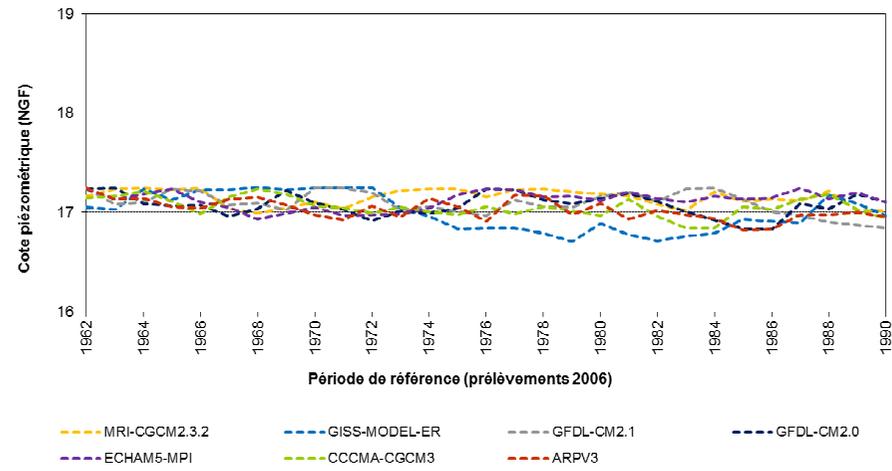
Lugos - 08507X0013/F - Aquitanien



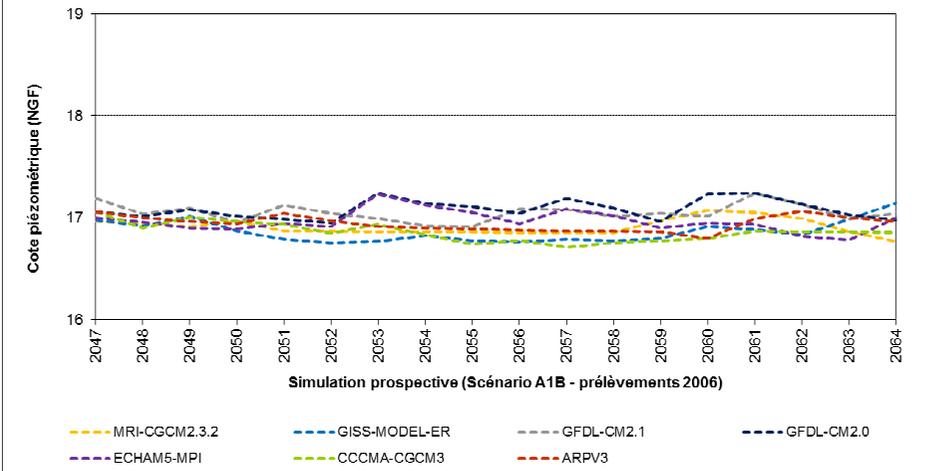
Lugos - 08507X0013/F - Aquitanien



Naujac-sur-Mer - 07545X0002/F1 - Aquitainien

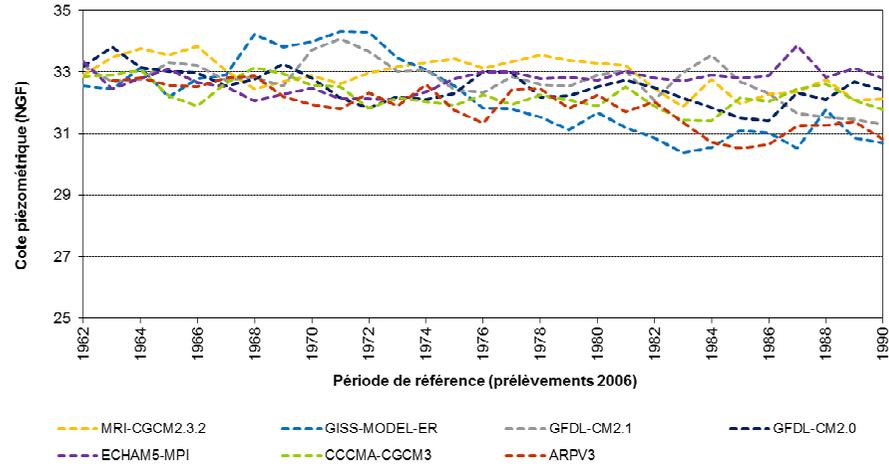


Naujac-sur-Mer - 07545X0002/F1 - Aquitainien

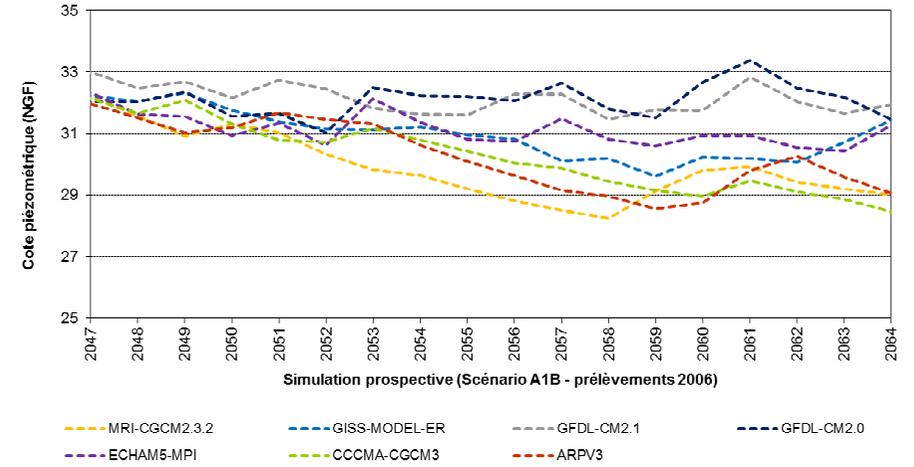


# Nappe de l'Oligocène

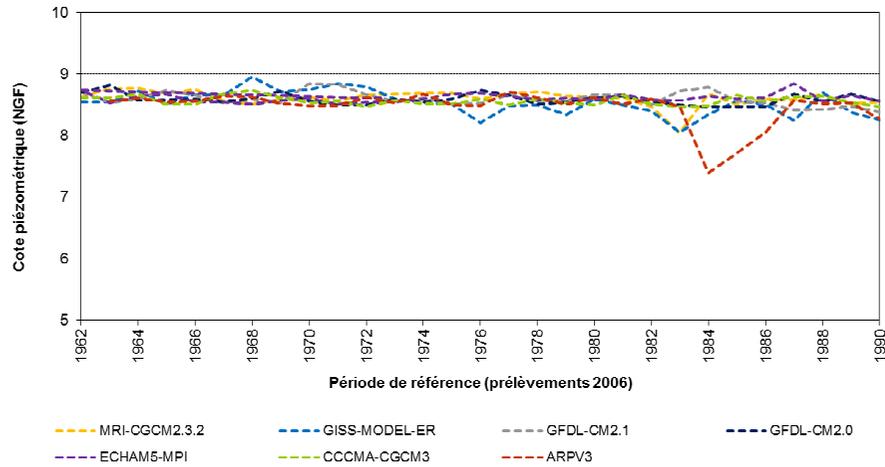
St-Jean-d'Illac - 08264X0012/F2 - Oligocène



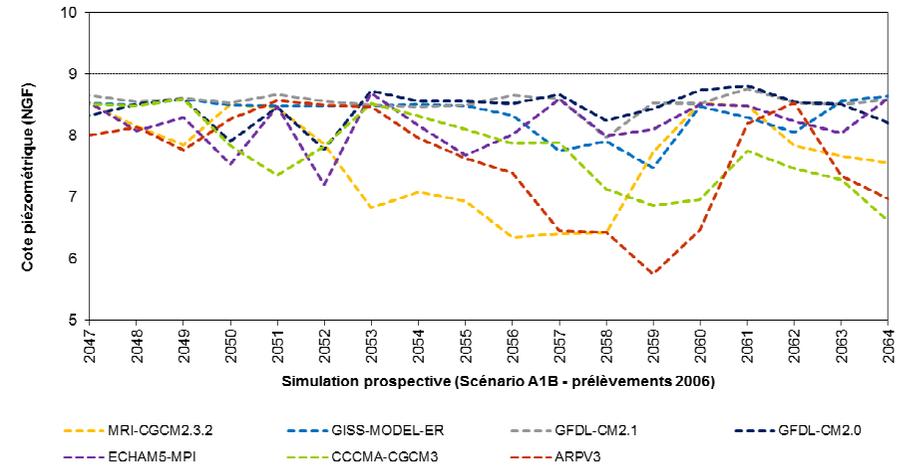
St-Jean-d'Illac - 08264X0012/F2 - Oligocène



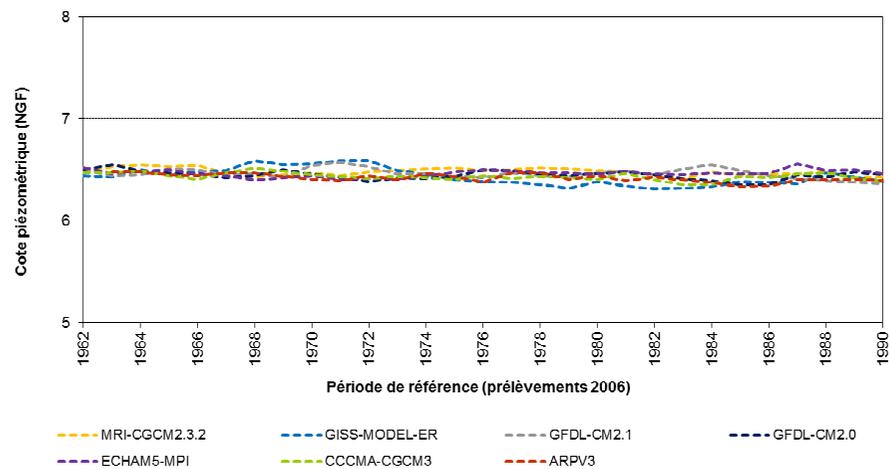
La Brède - 08277X0157/F2 - Oligocène



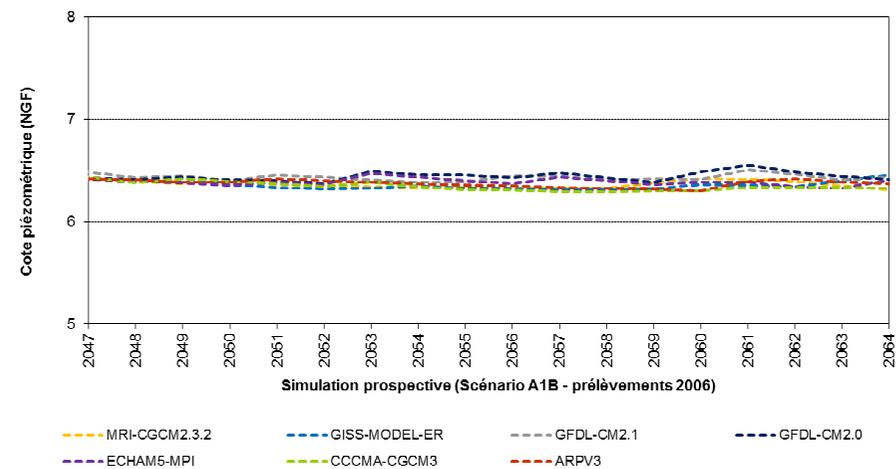
La Brède - 08277X0157/F2 - Oligocène



Hourtin - 07538X0009/F2 - Oligocène

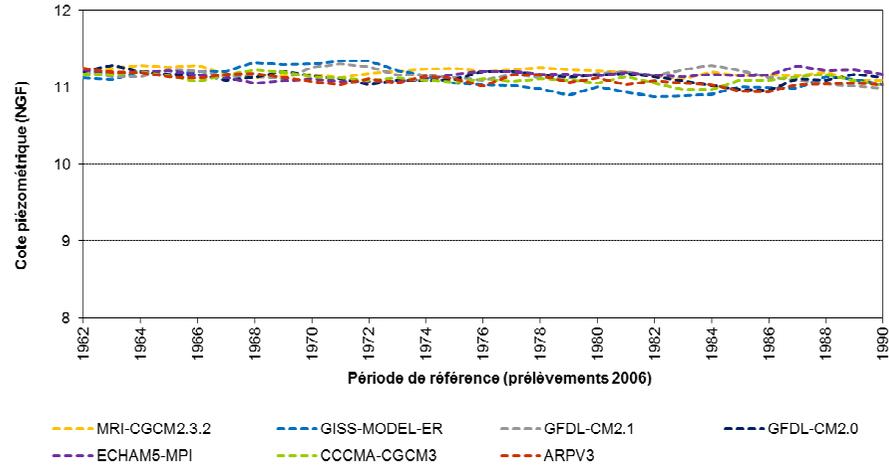


Hourtin - 07538X0009/F2 - Oligocène

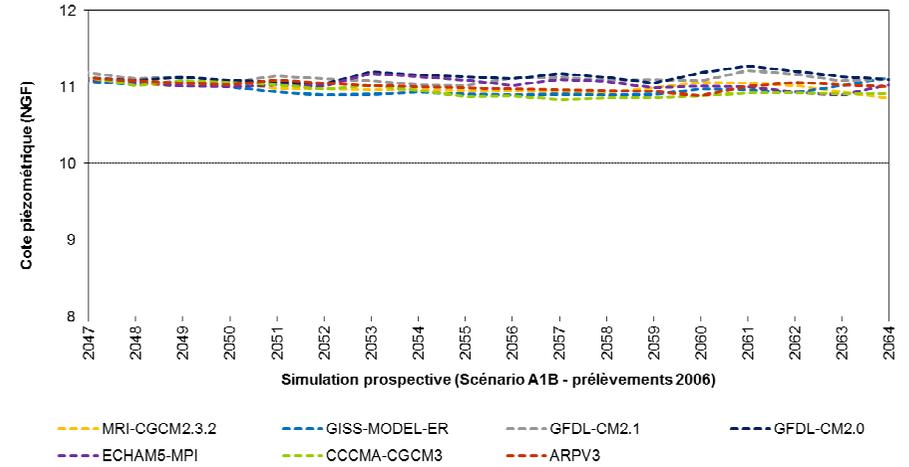


## Nappe de l'Eocène moyen

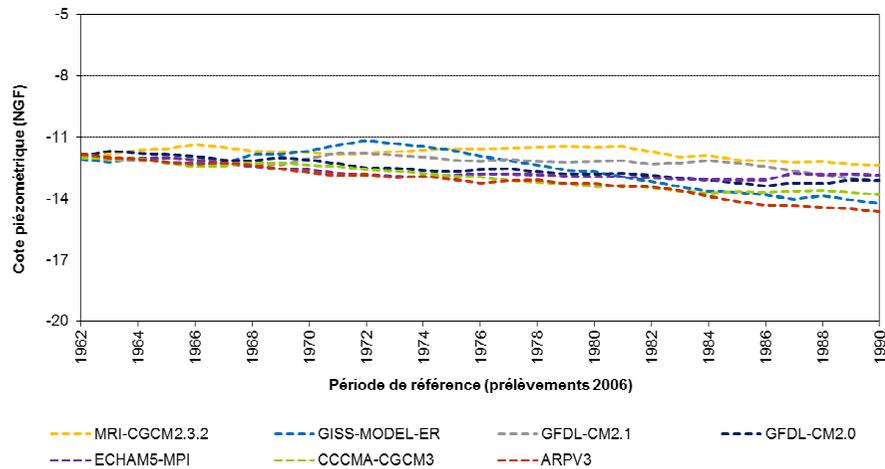
Carcans- 07774X0001/F - Éocène moyen



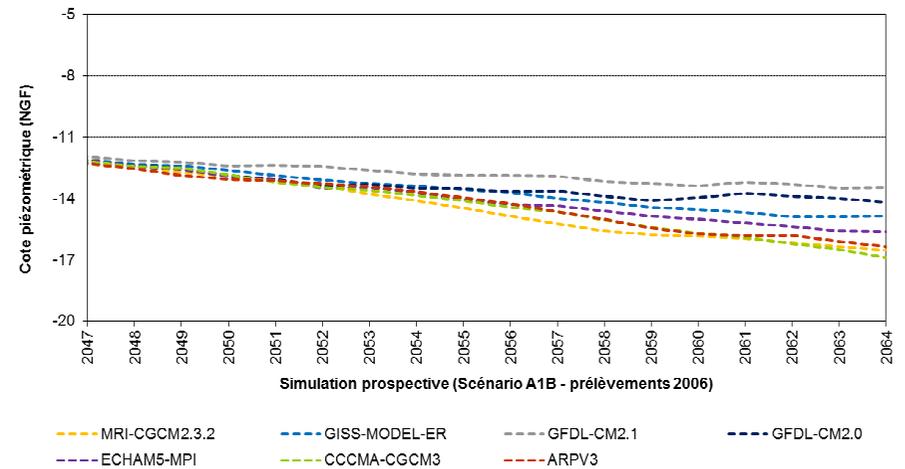
Carcans- 07774X0001/F - Éocène moyen



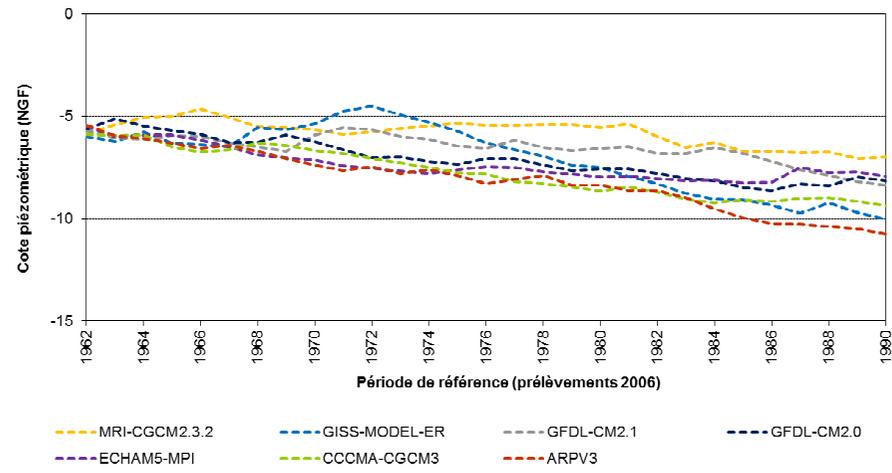
Barsac - 08521X0018/F - Éocène moyen



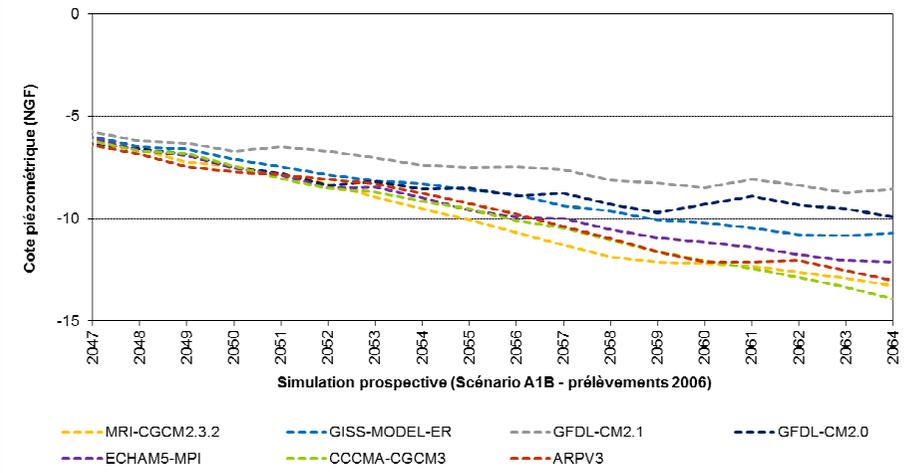
Barsac - 08521X0018/F - Éocène moyen



Libourne - 08046X0005/F - Éocène moyen



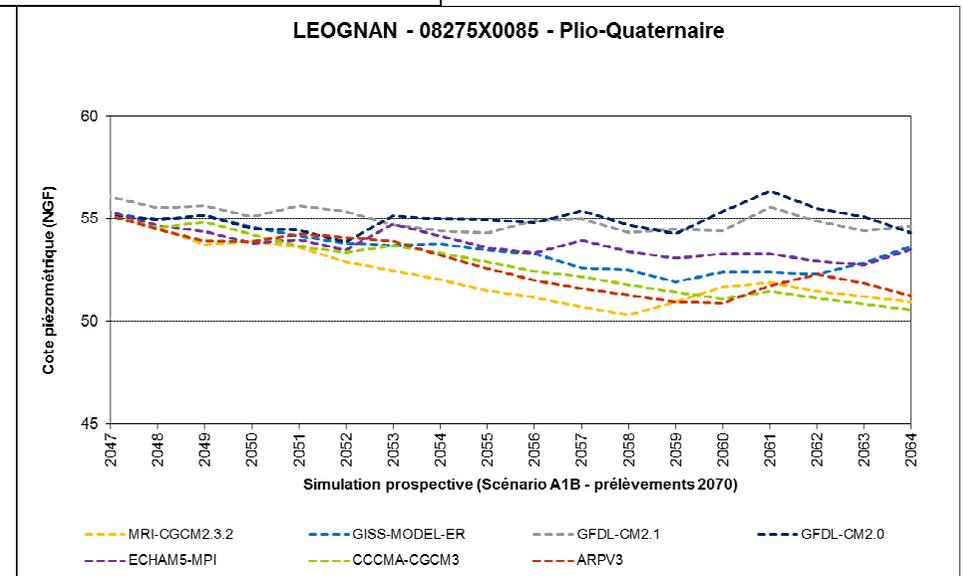
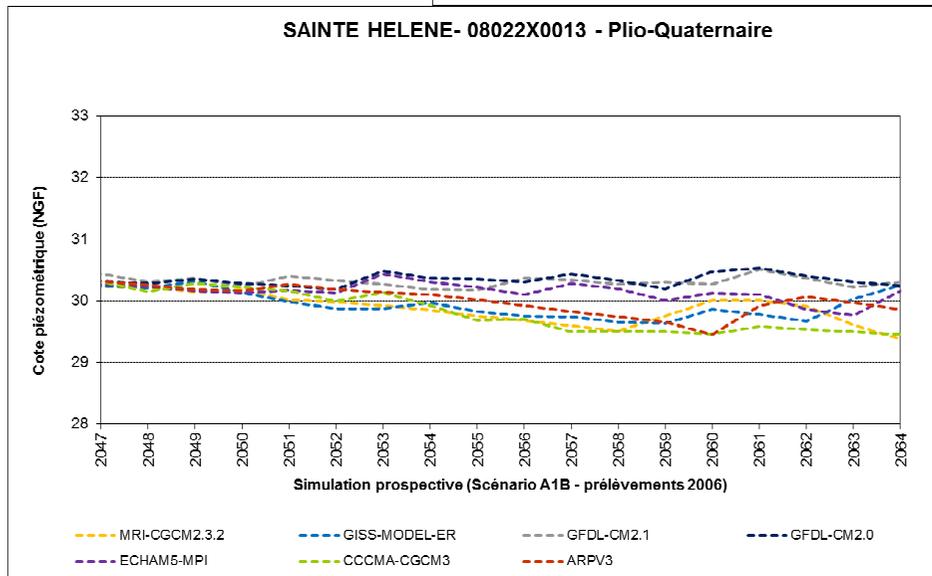
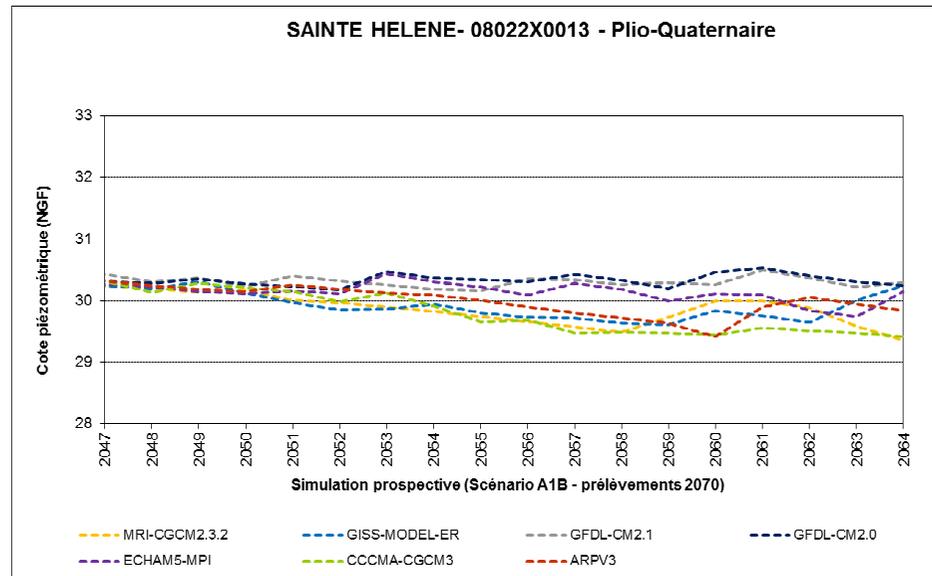
Libourne - 08046X0005/F - Éocène moyen

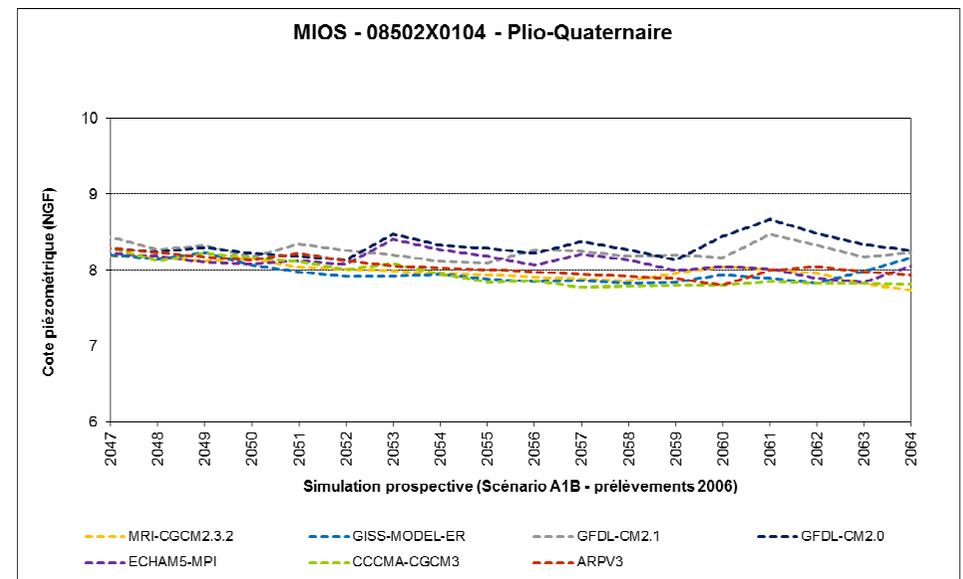
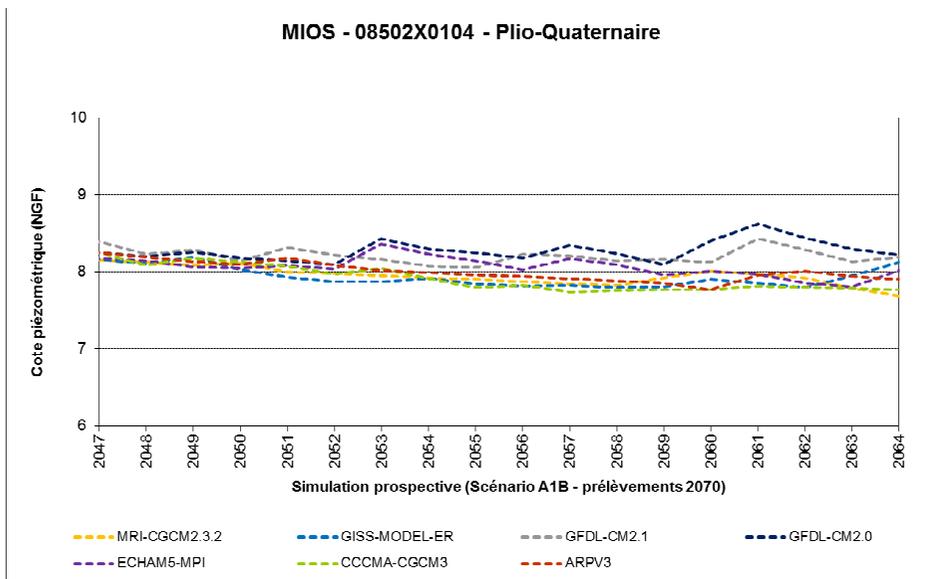
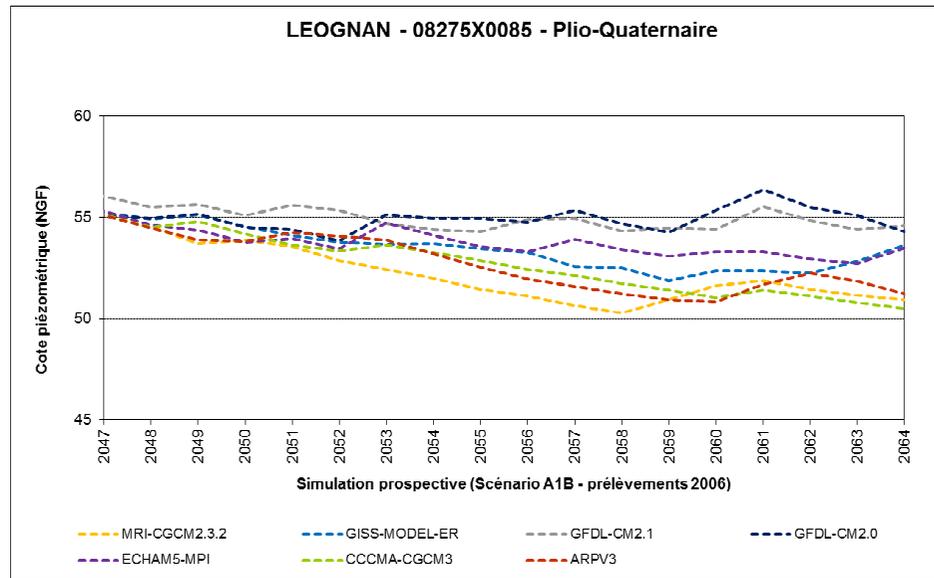


## **Annexe 3**

### **Comparaison de l'impact des prélèvements à partir de chroniques piézométrique**

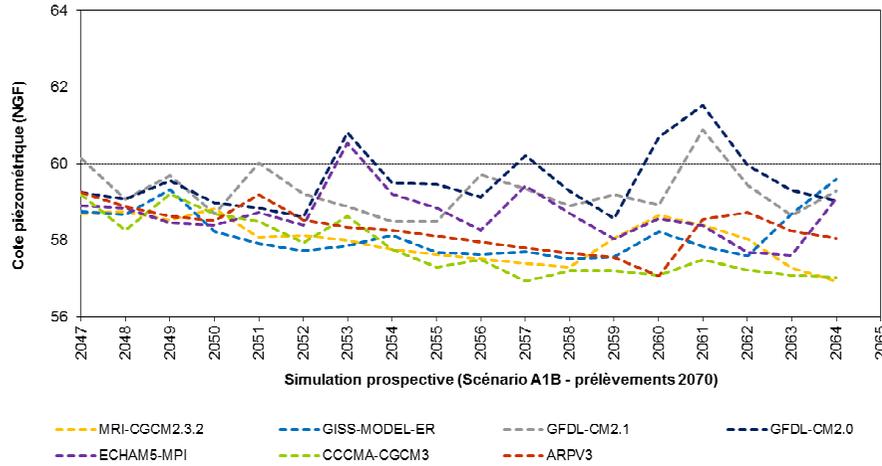
## Nappe du Plio-Quaternaire



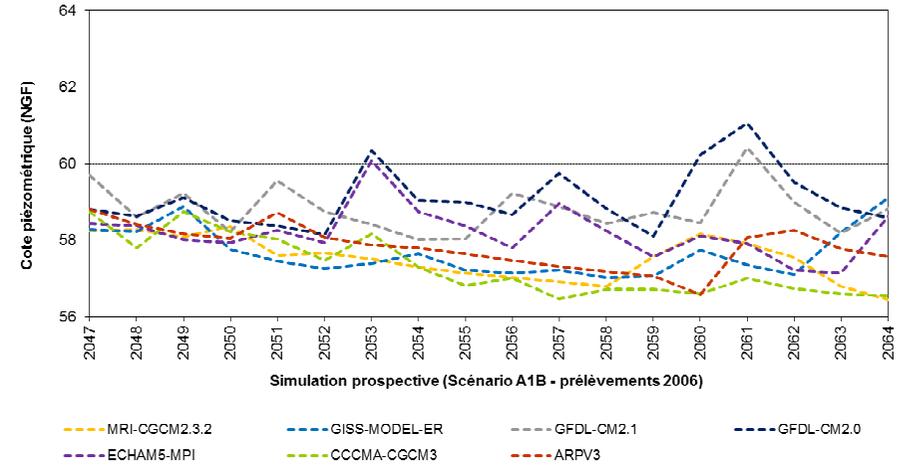


## Nappes du Miocène

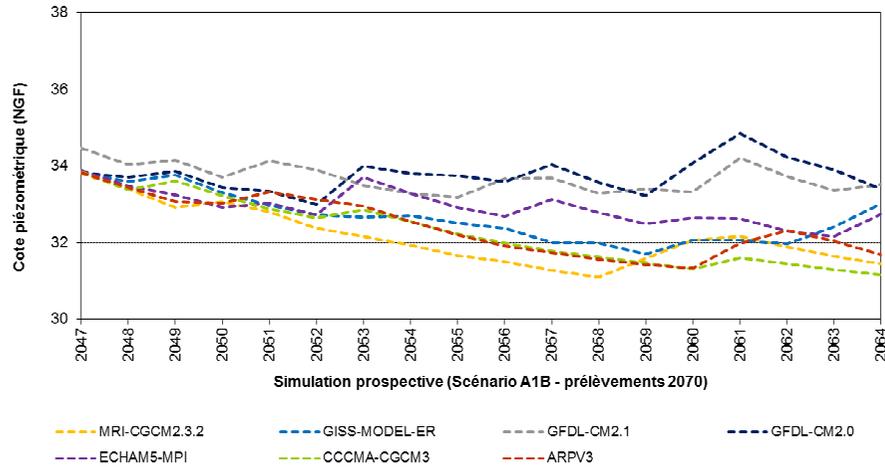
Mano- 08752X0055/F - Langhien-Serravalien



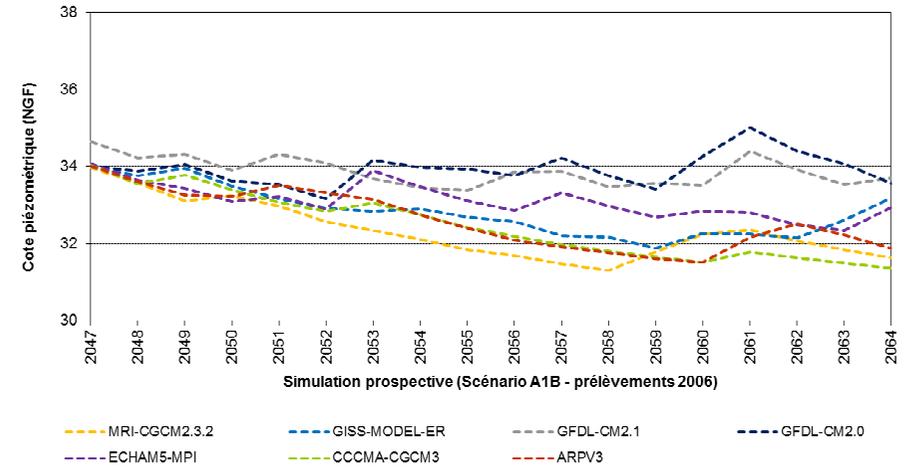
Mano- 08752X0055/F - Langhien-Serravalien



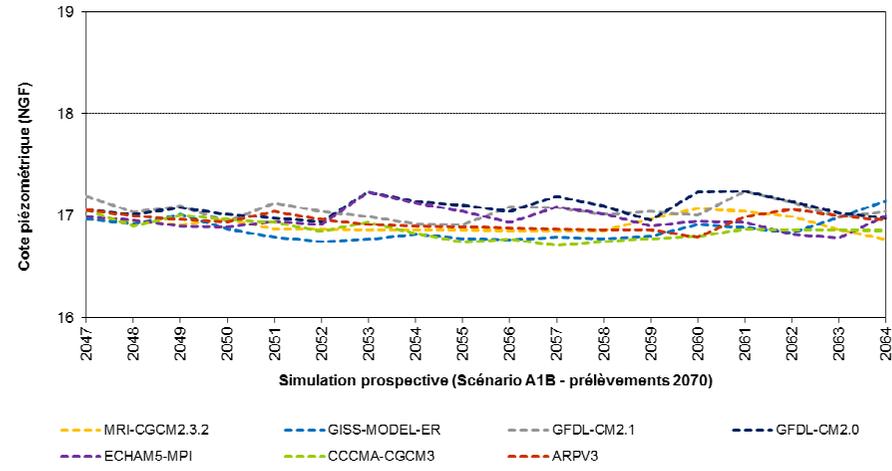
Lugos - 08507X0013/F - Aquitanien



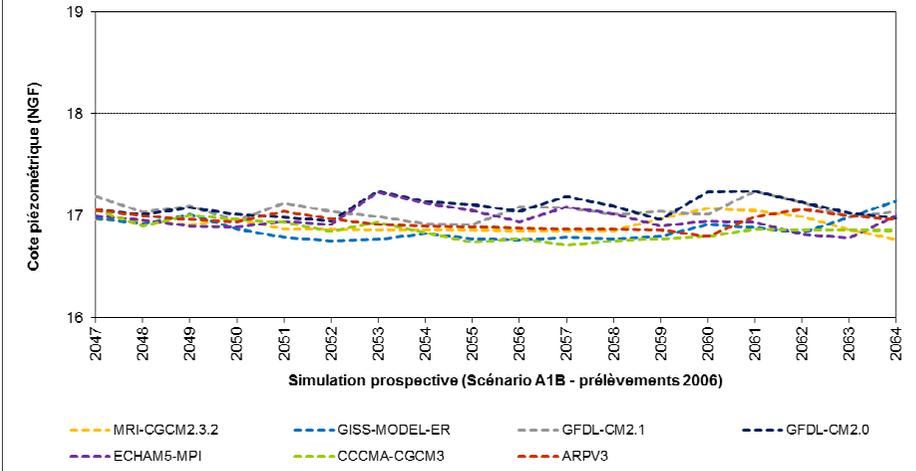
Lugos - 08507X0013/F - Aquitanien



Naujac-sur-Mer - 07545X0002/F1 - Aquitainien

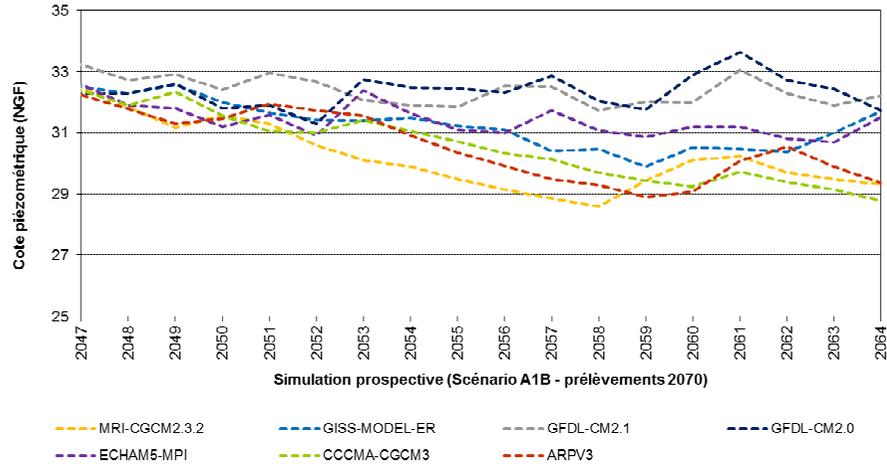


Naujac-sur-Mer - 07545X0002/F1 - Aquitainien

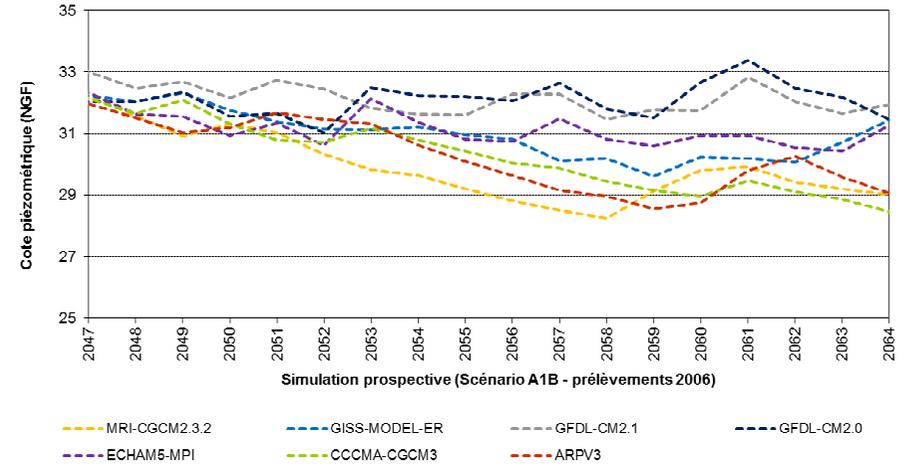


# Nappe de l'Oligocène

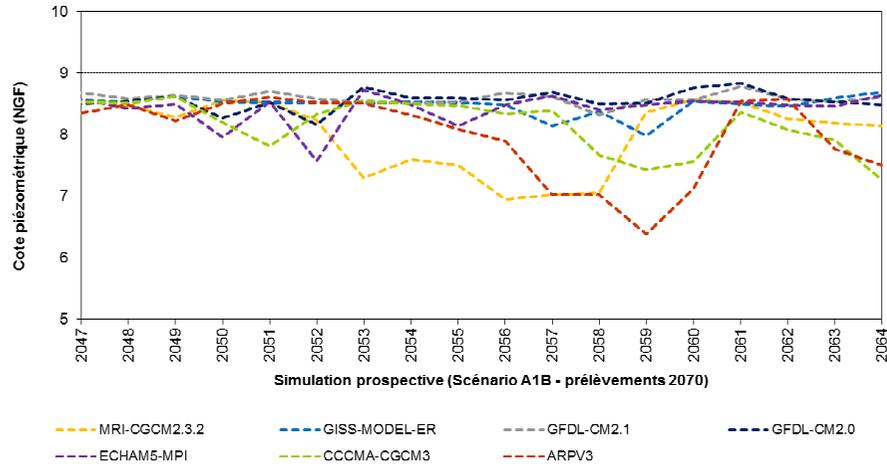
St-Jean-d'Illac - 08264X0012/F2 - Oligocène



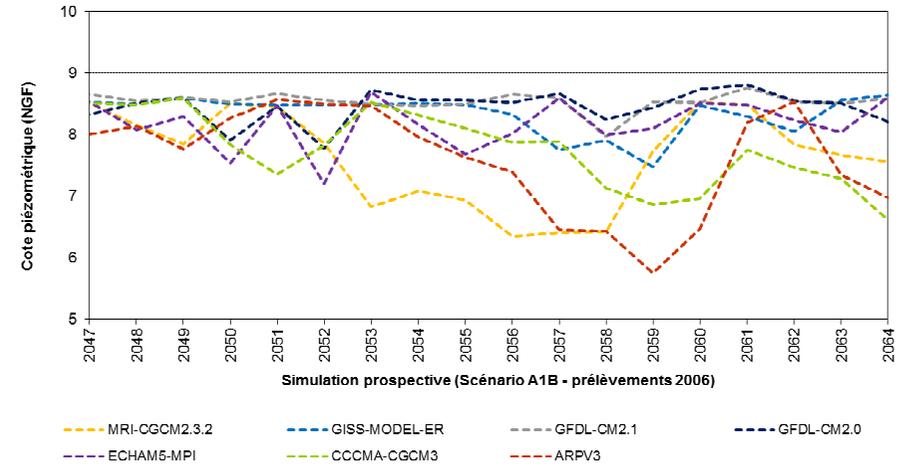
St-Jean-d'Illac - 08264X0012/F2 - Oligocène



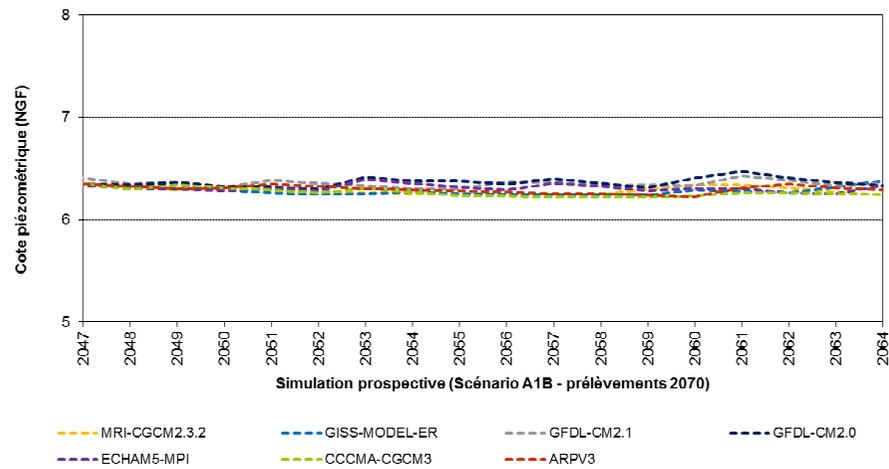
La Brède - 08277X0157/F2 - Oligocène



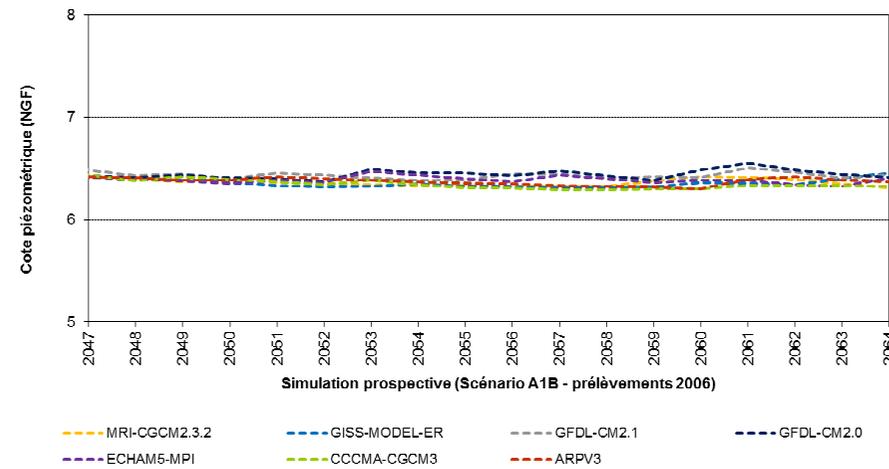
La Brède - 08277X0157/F2 - Oligocène



Hourtin - 07538X0009/F2 - Oligocène

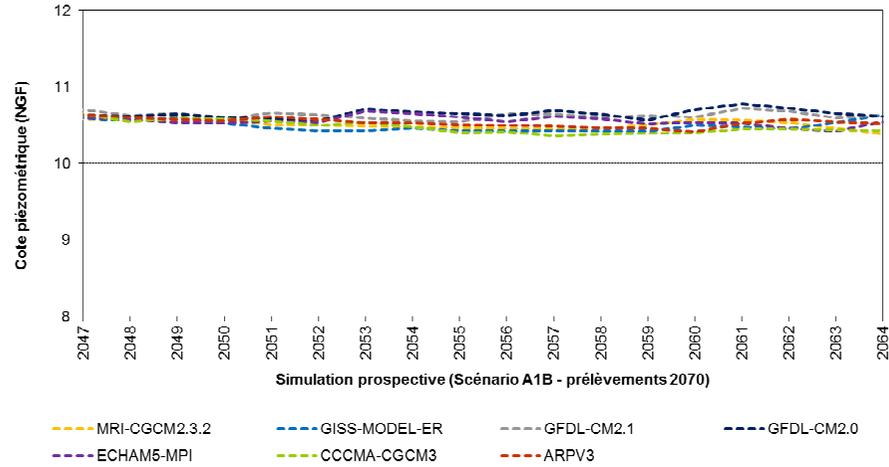


Hourtin - 07538X0009/F2 - Oligocène

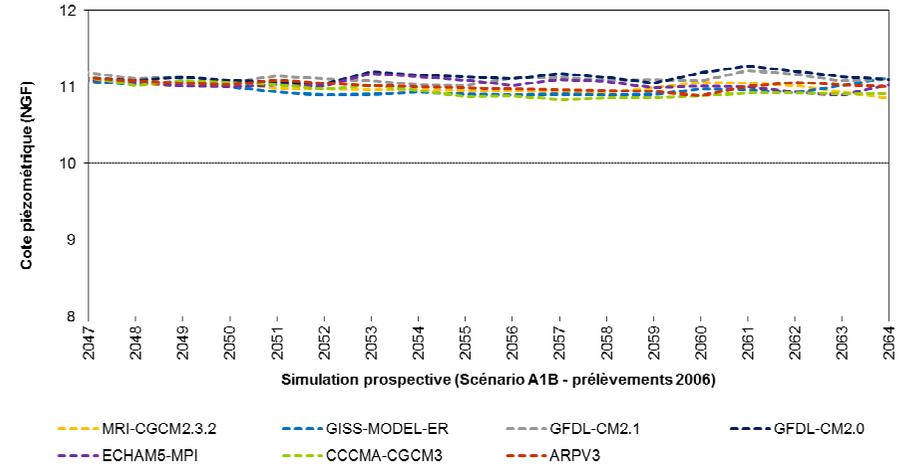


# Nappe de l'Eocène moyen

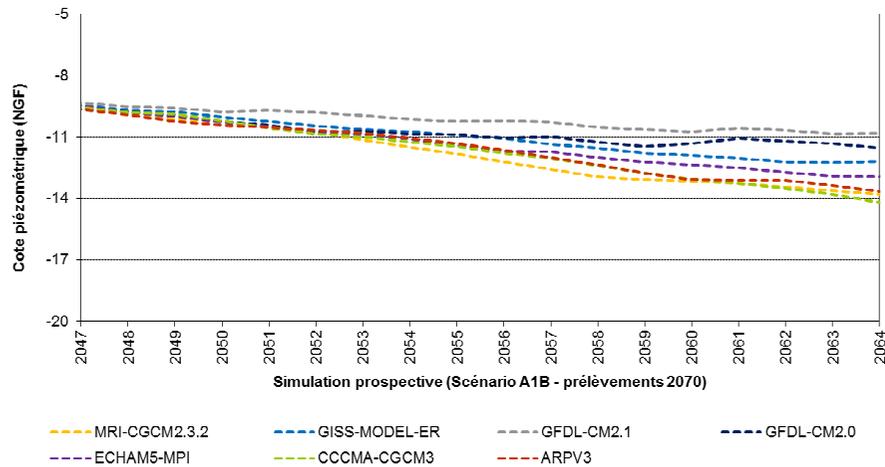
Carcans- 07774X0001/F - Éocène moyen



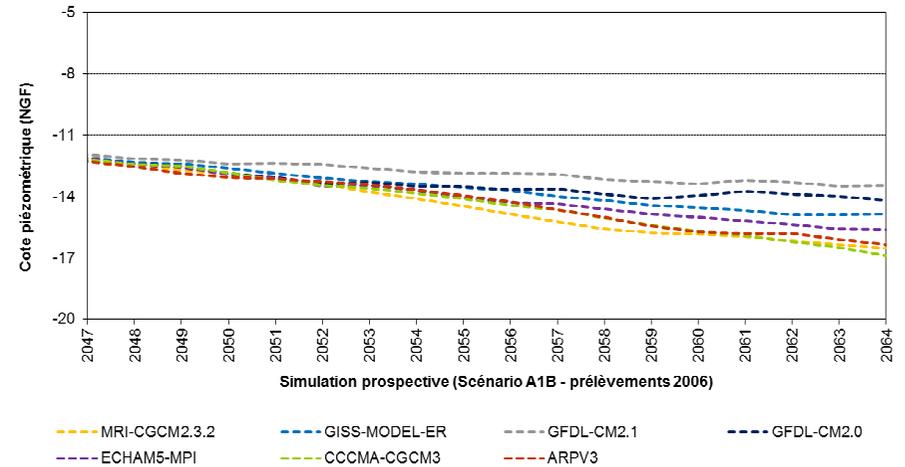
Carcans- 07774X0001/F - Éocène moyen



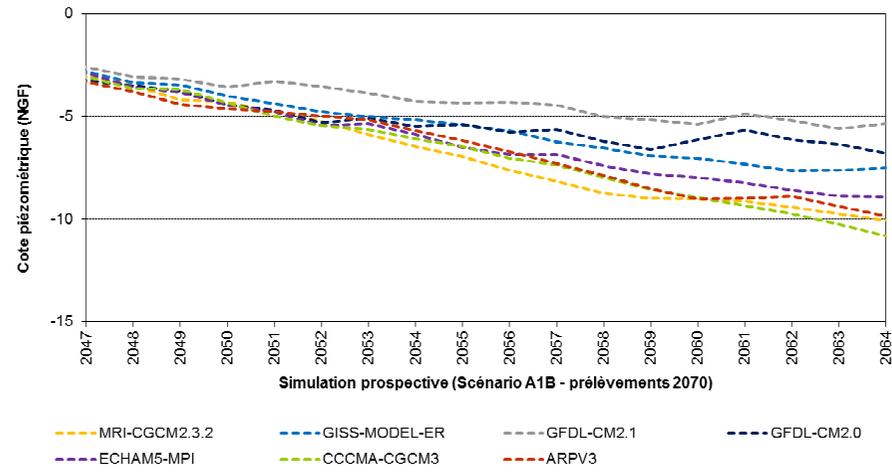
Barsac - 08521X0018/F - Éocène moyen



Barsac - 08521X0018/F - Éocène moyen



Libourne - 08046X0005/F - Éocène moyen



Libourne - 08046X0005/F - Éocène moyen

