

Document public



# Gestion des Eaux Souterraines en région Aquitaine

## Impact du changement climatique sur les eaux souterraines

### Évolution et perspectives d'adaptation en Aquitaine

- Module 7 - Année 4 -  
Convention 2008-2013

Rapport final

BRGM/RP-63354-FR  
Mai 2014



Préfecture de la région Aquitaine  
Secrétariat général pour les affaires régionales



Direction régionale  
de l'Environnement,  
de l'Aménagement  
et du Logement  
AQUITAINE



AGENCE DE L'EAU  
ADOUR-GARONNE  
ÉTABLISSEMENT PUBLIC DU MINISTÈRE  
DU DÉVELOPPEMENT DURABLE





Document public



# Gestion des Eaux Souterraines en région Aquitaine

## Impact du changement climatique sur les eaux souterraines

### Évolution et perspectives d'adaptation en Aquitaine

- Module 7 - Année 4 -  
Convention 2008-2013

Rapport final

**BRGM/RP-63354-FR**  
Mai 2014

Étude réalisée dans le cadre des opérations  
de Service public du BRGM PSP12AQI28

**M. Saltel et O. Cabaret**



Préfecture de la région Aquitaine  
Secrétariat général pour les affaires régionales



Liberté • Égalité • Fraternité  
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE



Direction régionale  
de l'Environnement,  
de l'Aménagement  
et du Logement

AQUITAINE

#### Vérificateur :

Nom : G. LE COZANNET

Date : 12/06/2014

#### Approbateur :

Nom : N. PEDRON

Fonction : Directeur BRGM Aquitaine  
par intérim

Date : 29/07/2014

Le système de management de la qualité et de l'environnement  
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.



AGENCE DE L'EAU  
ADOUR-GARONNE  
ETABLISSEMENT PUBLIC DU MINISTRE  
DU DEVELOPPEMENT DURABLE



RÉGION  
AQUITAINE



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Mots-clés** : changement climatique, démographie, eau souterraine, habitude de consommation, intrusion saline, relation nappe-rivière, réseau de suivi.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

**Saltel M. et Cabaret O.** (2014) - Gestion des Eaux Souterraines en Aquitaine - Impact du changement climatique sur les eaux souterraines - Évolution et perspectives d'adaptation en Aquitaine - Module 7 - Année 4. Rapport final. BRGM/RP-63354-FR, 72 p., 40 fig., 1 ann.

## Synthèse

Cette étude est réalisée dans le cadre de l'année 4 de la convention « Gestion des eaux souterraines en région Aquitaine » signée entre l'État, la région Aquitaine et le BRGM pour la période 2008-2013 avec le concours financier de l'Agence de l'Eau Adour Garonne.

Elle s'inscrit dans la continuité du rapport « Prévoir pour Agir », coordonnée par le climatologue Hervé Le Treut, à la demande d'Alain Rousset, président de la Région Aquitaine, qui visait à étudier les conséquences du changement climatique à l'échelle régionale.

Le rapport présenté ici a pour objectif de développer la thématique eau souterraine et faire part des dernières études traitant de l'impact du changement climatique sur les nappes libres et captives de France et plus particulièrement sur les réservoirs aquitains (Garonne 2050, Explore 2070,...). A l'issue de ce bilan des recommandations ont été émises pour orienter les travaux futurs concernant l'adaptation au changement climatique.

Les derniers travaux sur l'évolution du climat en France (Terray et al., 2013) ont mis en évidence une augmentation des températures moyennes annuelles pour la France de 4.5 °C à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle avec une hausse plus marquée en période estivale qu'en période hivernale. La tendance pour les précipitations serait à la diminution en été et à une probable augmentation en hiver. Il faudrait donc s'attendre à une évapotranspiration potentielle plus importante en été par rapport aux conditions actuelles. La diminution des précipitations estivales et l'augmentation des températures aboutiraient à des sécheresses plus fréquentes et plus intenses en été. Il est donc attendu des étages plus sévères et plus fréquents en été.

Les travaux réalisés sur les eaux souterraines en France indiquent une tendance à la diminution de la recharge [ (Ducharne et al., 2009), (Amraoui et al., 2012), (Douez, 2012), (Saltel et al., 2012)] qui engendre une baisse de la piézométrie affectant principalement les zones d'affleurements et les zones de drainage entre aquifères. L'apport des nappes aux cours d'eau s'en trouve également diminué, ce qui contribue à faire diminuer les débits en période d'étiage. Il faut également s'attendre à une diminution du débit des sources.

Il faut cependant garder à l'esprit que des incertitudes importantes demeurent à différents niveaux dans les simulations prospectives réalisées pour évaluer l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines. En effet, même si l'augmentation des températures à l'échelle globale fait consensus, des incertitudes demeurent à l'échelle locale sur leur évolution dans le temps. À noter que les incertitudes sont encore plus grandes pour les précipitations. Or, c'est ce paramètre qui conditionne la recharge des hydrosystèmes. 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 des modèles hydrodynamiques. Les lois de recharge utilisées actuellement pourraient alors s'avérer inadaptées dans les conditions climatiques les plus 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. Il ne faut donc pas considérer ces simulations prospectives comme des prévisions fines. Il convient en fait d'observer la tendance générale des différents résultats et de dégager les points de convergence et de désaccord des différents modèles pour évaluer les risques encourus, comparer ces derniers aux enjeux qui en découlent, et évaluer les incertitudes associées.

Les décideurs publics sont amenés à prendre en compte les effets du changement climatique dans des domaines et activités qui sont nombreux et variés (agriculture, pêche, tourisme,...). Il

devient donc impératif d'évaluer la pertinence de mesures d'adaptation qui engagent le territoire pour des durées de temps assez longues (quelques décennies à quelques siècles). Dans le cas de l'adaptation au changement climatique, il est nécessaire de disposer d'une approche qui permette la prise de décision dans un contexte de fortes incertitudes et d'examiner leurs effets sur des échelles de temps relativement longues.

En fonction des enjeux définis comme prioritaires par les décideurs, il faut trouver les moyens adéquats pour s'adapter aux changements à venir. Cela passe par de l'expérimentation sur des sites pilotes et des équipes de travail pluridisciplinaires (climatologues, hydrologues, hydrogéologues, agronomes, économistes, sociologues....).

Les eaux souterraines sont aux interfaces entre différents systèmes susceptibles d'être fortement impactés par les changements climatiques : la biosphère, l'hydrosphère (cours d'eau, lac, océan...). Selon les cas, il apparaît intéressant d'utiliser les nappes en tant qu'outils pour répondre à des problématiques locales. On pourrait, dans le cas de la nappe du Plio-Quaternaire, envisager de limiter le drainage pour maximiser le stockage en nappe pendant la période de recharge afin de favoriser un soutien maximum des eaux souterraines au débit des cours d'eau en période estivale. La piste de la recharge artificielle des nappes peut également être envisagée dans le cas des nappes alluviales.

Le volet amélioration des connaissances et des processus ne doit pas non plus être négligé. En effet, il apparaît important de disposer d'un observatoire de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau tel qu'il a été initié dans le cadre du rapport « Prévoir pour Agir ». Il serait possible de développer un tel réseau en associant aux partenaires académiques des acteurs locaux de la ressource en eau et plus largement des thématiques variées impactées par le changement climatique. Le but étant de créer un espace d'échange dans différents domaines qui pourraient communiquer sur cette thématique complexe et qui assureraient une veille scientifique sur ce sujet. Il semble également indispensable de mettre en place un réseau de surveillance des ressources en eaux superficielles (nappes libres, cours d'eau) dans les secteurs les moins influencés par les activités humaines pour évaluer sur le long terme l'impact du changement climatique (cf. chapitre 5). Par ailleurs une meilleure compréhension des processus de recharge des aquifères apparaît fondamentale de manière à optimiser la prise en compte de ce paramètre fondamental dans les modèles hydrodynamiques.

# Sommaire

<b>1. Introduction .....</b>	<b>9</b>
<b>2. Bilan sur l'évolution du climat à l'échelle européenne .....</b>	<b>11</b>
2.1. ÉVOLUTION DES CONDITIONS CLIMATIQUES .....	11
2.2. IMPACTS LIES AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES .....	14
2.3. EN RESUME .....	16
<b>3. Bilan des travaux méthodologiques d'intérêts sur les eaux souterraines .....</b>	<b>17</b>
3.1. IMPACT SUR LA RECHARGE ET LE NIVEAU DES NAPPES .....	17
3.2. INTERACTIONS NAPPES / RIVIERES .....	23
3.3. VULNERABILITE DES AQUIFERES COTIERS A L'INTRUSION SALINE .....	25
3.4. IMPACTS INDIRECTS SUR LES EAUX SOUTERRAINES .....	29
3.5. EN RESUME .....	30
<b>4. Prévision démographique et évolution des consommations .....</b>	<b>31</b>
4.1. ÉVOLUTION DEMOGRAPHIQUE ET EVOLUTION DES HABITUDES DE CONSOMMATION .....	31
4.1.1. Démographie .....	31
4.1.2. Habitudes de consommation .....	33
4.2. IMPACT SUR LES PRELEVEMENTS D'EAU .....	35
4.2.1. Evolution des prélèvements pour l'Alimentation en Eau Potable .....	36
4.2.2. Evolution des prélèvements pour l'agriculture .....	42
4.2.3. Evolution des prélèvements pour l'industrie .....	43
4.3. IMPACT LIE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE .....	45
4.4. EN RESUME .....	47
<b>5. Sélection de piézomètres pouvant définir un réseau d'observation .....</b>	<b>49</b>
5.1. ANALYSE DE L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE NIVEAU PIEZOMETRIQUE .....	49
5.2. ZONES DE SUIVI DU CHANGEMENT CLIMATIQUE .....	53
5.3. SELECTION D'OUVRAGES .....	54
5.4. EN RESUME .....	59
<b>6. Conclusions et perspectives .....</b>	<b>61</b>
<b>7. Bibliographie .....</b>	<b>65</b>
<b>8. Glossaire .....</b>	<b>71</b>

## Liste des illustrations

Figure 1 : Anomalies des températures moyennes quotidiennes (en moyenne annuelle) simulées par le modèle ARPEGE pour les scénarios B2 et A2 (Peings et al., 2011) .....	11
Figure 2 : Évolution des températures de l'air en surface dans un futur proche (de 2020 à 2049) et à la fin du 21ème siècle par rapport à la période 1900-1929 (Terray et al., 2013) a : Hiver - Futur proche (2020 à 2049) - b : Été - Futur proche (2020 à 2049) c : Hiver - Fin 21ème siècle (2070 à 2099) - d : Été - Fin 21ème siècle (2070 à 2099) .....	12
Figure 3 : Évolution des précipitations (mm/j) dans un futur proche et à la fin du 21ème siècle par rapport à la période 1900-1929 (Terray et al., 2013) a : Hiver - Futur proche (2020 à 2049) - b : Été - Futur proche (2020 à 2049) c : Hiver - Fin 21ème siècle (2070 à 2099) - d : Été - Fin 21ème siècle (2070 à 2099) .....	13
Figure 4 : Impacts du changement climatique dans les principales régions d'Europe (EEA, 2012).....	14
Figure 5 : Changement relatif dans le débit d'étiage des rivières avec une période de retour de 20 ans en comparaison à la période de référence 1961-1990.....	15
Figure 6 : Changement relatif des inondations dans les rivières avec une période de retour de 100 ans en comparaison à la période de référence 1961-1990.....	16
Figure 7 : Géométrie du Modèle Nord-Aquitain.....	19
Figure 8 : Exemple de restitution des résultats de simulation - Impact climatique sur la piézométrie .....	20
Figure 9 : 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-Quaternaire .....	22
Figure 10 : Echanges nappe-rivière - A - la nappe alimente la rivière B - la rivière alimente la nappe (Winter et al., 1998) .....	23
Figure 11 : Coupe schématique perpendiculaire au littoral selon Ghyben-Hezberg (Frissant et al., 2005).....	26
Figure 12 : Carte de sensibilité des aquifères côtiers vis-à-vis de l'intrusion saline dans la région de la Côte Aquitaine (Dörfliger et al., 2011) .....	27
Figure 13 : Carte du risque de salinisation dans les nappes de l'Eocène moyen (Corbier et al., 2005) ...	28
Figure 14 : La population mondiale 1950-2100 d'après différentes projections (Department et al., 2013).....	31
Figure 15 : Evolution de la population en France (1946-2007) et projections à l'horizon 2070 (BIPE, 2012).....	32
Figure 16 : Accroissement de la population régionale (BIPE, 2012).....	33
Figure 17 : Facteurs explicatifs de la consommation d'eau des ménages (Montginoul, 2013) .....	34
Figure 18 : Structure du modèle de pression sur l'AEP d'Explore 2070 (BIPE 2011 d'après étude AESN 2005).....	36
Figure 19 : Corrélations entre les 6 facteurs-clés de modélisation et les niveaux de prélèvements AEP (BIPE, 2011) .....	37
Figure 20 : Part du territoire occupée respectivement par l'habitat/autres surfaces construites .....	37
Figure 21 : Part de la région dans la surface artificialisée nationale (scénario étalement - calculs BIPE) .....	38
Figure 22 : Part de la région dans la surface artificialisée nationale (scénario concentration - calculs BIPE).....	38
Figure 23 : Évolution à long terme des volumes d'eau prélevés pour l'eau potable à l'échelle nationale en millions de m <sup>3</sup> (Agences de l'Eau - SOeS et projections BIPE 2011) .....	39

Figure 24 : Variation des volumes d'eau prélevés pour l'eau potable par bassin versant entre 2006 et 2070 - à gauche, le scénario « concentration » ; à droite, le scénario « étalement » (BIPE, 2012).....	39
Figure 25 : Historique et prospective de la population de la CUB selon le scénario INSEE et « CUB-millionnaire » (SMEGREG, 2010).....	40
Figure 26 : Hypothèse de prélèvements unitaires dans les nappes profondes de Gironde pour l'usage eau potable (m <sup>3</sup> /an/habitant) (SMEGREG, 2010) .....	41
Figure 27 : Hypothèses de prélèvement pour l'AEP (SMEGREG, 2010) .....	41
Figure 28 : Prélèvements d'eau en millions de m <sup>3</sup> pour l'irrigation à l'horizon 2070 selon le type de variante du scénario tendanciel (Agences de l'Eau - SOeS et projections Energies Demain). 42	
Figure 29 : Volumes prélevés pour l'irrigation selon l'origine de l'eau (Agreste Agriculture, 2013 repris des données Agence de l'eau Adour-Garonne 2010).....	43
Figure 30 : Evolution des prélèvements d'eau pour l'industrie (BIPE, 2012).....	44
Figure 31 : Evolution des prélèvements en eau en millions de m <sup>3</sup> par an pour l'usage industriel en Aquitaine (source BRGM).....	45
Figure 32 : Volume prélevé pour la CUB et température maximale journalière durant l'été 2006 (SMEGREG, 2009) .....	46
Figure 33 : Chronique piézométrique de l'ouvrage 08511X0036/F1 .....	51
Figure 34 : Localisation des piézomètres à tendances significatives (baisse et hausse des niveaux), aux risques 1% et 5% (Vernoux & Seguin, Établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines - année 2. Rapport final - BRGM/RP-61020-FR, 93 p., 40 ill., 3 tab., 3 ann, 2012) .....	51
Figure 35 : Localisation des piézomètres à tendances significatives à la baisse (à gauche) et à la hausse (à droite) influencés par des prélèvements (Vernoux & Seguin, Établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines - année 2. Rapport final - BRGM/RP-61020-FR, 93 p., 40 ill., 3 tab., 3 ann, 2012)52	
Figure 36 : Ecart entre la pluie efficace (P - ETR) temps futur et temps présent par masse d'eau souterraine (Vernoux & Seguin, Établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines - (année 3) et essai de détermination d'un index piézométrique standardisé. Rapport BRGM/RP-61807-FR, 110 p., 66 ill., 4 ann, 2013) .....	54
Figure 37 : Distribution des stations de mesures recensées sur le bassin Adour-Garonne toutes masses d'eau souterraine confondues (Lucas, 2011) .....	55
Figure 38 : Présentation de l'ensemble des points recensés dans les masses d'eau souterraine libres du bassin en fonction de la durée des chroniques (Lucas, 2011) .....	56
Figure 39 : Présélection de points susceptibles de faire partie du réseau de suivi du changement climatique (Vernoux & Seguin, Établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines - (année 3) et essai de détermination d'un index piézométrique standardisé. Rapport BRGM/RP-61807-FR, 110 p., 66 ill., 4 ann, 2013) .....	57
Figure 40 : Masses d'eau souterraines sensibles au changement climatique sans piézomètre présélectionné (Vernoux & Seguin, Établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines - (année 3) et essai de détermination d'un index piézométrique standardisé. Rapport BRGM/RP-61807-FR, 110 p., 66 ill., 4 ann, 2013) .....	58

## Liste des annexes

Annexe 1 Explore 2070- Bassin aquitain - 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 .....	73
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

# 1. Introduction

Dans le cadre de la convention régionale « Gestion des Eaux souterraines en région Aquitaine » signée entre le BRGM, la Région Aquitaine et l'Etat pour la période 2008-2013 avec le soutien financier de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne, le BRGM a entrepris des actions de recherche et de mise en valeur des ressources en eaux souterraines. Au cours de l'année 4 de la convention, le module 7 a été dédié à l'étude de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines.

Il intervient en complément du lancement en octobre 2011 par Alain Rousset, président de la région Aquitaine, et du climatologue Hervé Le Treut, des prémices d'un GIEC à l'échelle de la région qui rassemble plusieurs chercheurs aquitains. Ces derniers ont eu pour objectif de déterminer l'impact du changement climatique et l'adaptation du milieu et des hommes à l'horizon 2030-2050 en Aquitaine. Cette initiative a abouti à la rédaction d'un rapport scientifique intitulé « Prévoir pour Agir, la Région Aquitaine anticipe le changement climatique » qui fait un bilan des connaissances scientifiques sur cette thématique.

Les travaux menés dans le cadre du module 7 de la convention régionale permettent d'approfondir la réflexion de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines. En effet, depuis la parution du livre « Prévoir pour agir », de nouveaux travaux ont été publiés, basés notamment sur les dernières simulations dans le cadre de l'exercice du récent CMIP5<sup>1</sup> (Taylor et al., 2012).

Après avoir introduit la problématique du changement climatique, nous ferons un bilan des derniers travaux sur l'évolution du climat pour l'Europe et la France. Dans un second temps, nous traiterons des impacts de ces changements sur les eaux souterraines en procédant notamment à une revue des derniers travaux réalisés sur le sujet (Explore 2070, Garonne 2050,...). L'impact de l'évolution démographique et les évolutions des habitudes de consommation sur les eaux souterraines seront également abordés. Certains de ces facteurs montreront des liens très étroits avec le changement climatique. Enfin, la mise en place d'un réseau de suivi des phénomènes de déséquilibre structurel, de rareté de la ressource et de sécheresse dans un contexte de changement climatique apparaît indispensable. La réalisation d'un tel réseau, dont l'objectif serait de mettre en évidence les impacts du changement climatique à l'échelle de l'Aquitaine, sera examinée en dernière partie.

Dans les conclusions, nous évoquerons les perspectives pour les futures actions de recherche et de connaissances à mettre en œuvre sur le territoire régional.

---

<sup>1</sup> CMIP5 : fifth phase of the Climate Model Intercomparison Project



## 2. Bilan sur l'évolution du climat à l'échelle européenne

### 2.1. ÉVOLUTION DES CONDITIONS CLIMATIQUES

Plusieurs travaux ont été réalisés à l'échelle de la France pour déterminer les tendances probables de l'évolution du climat.

Les travaux coordonnés par Jean Jouzel en 2011 (Peings et al., 2011), basés sur les résultats des modèles régionaux français du CNRM<sup>2</sup> (ARPEGE-Climat) et de l'IPSL<sup>3</sup> (LMDz), indiquent que la température moyenne en France augmenterait d'environ 2°C à 2,5°C entre la fin du 20<sup>ème</sup> siècle et la fin du 21<sup>ème</sup> siècle (Figure 1), selon le scénario B2 (plutôt optimiste), et d'environ 2,5°C à 3,5°C pour le scénario A2 (plutôt pessimiste, mais correspondant aux trajectoires d'émissions actuelles). Une tendance à la diminution des précipitations est indiquée par les deux scénarios au printemps et en été, mais les signes des changements sont plus incertains pour l'hiver et l'automne. Le contenu minimum en eau du sol diminue progressivement dans le modèle du CNRM suggérant une tendance à l'assèchement des sols au cours du siècle sur une grande partie de la France, hormis durant la saison hivernale.

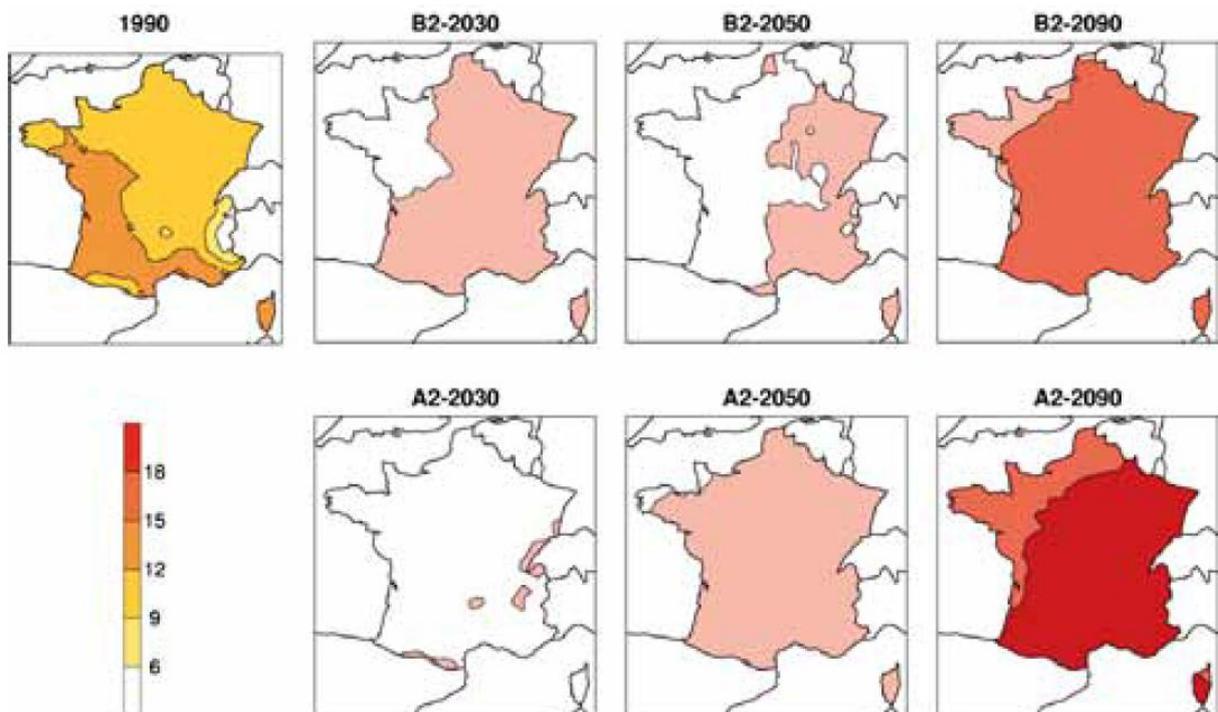


Figure 1 : Anomalies des températures moyennes quotidiennes (en moyenne annuelle) simulées par le modèle ARPEGE pour les scénarios B2 et A2 (Peings et al., 2011)

<sup>2</sup> Centre National de Recherches Météorologiques

<sup>3</sup> Institut Pierre Simon Laplace

Plus récemment, les projections provenant des modèles globaux exécutés dans le cadre de l'exercice du récent CMIP5<sup>4</sup> (Taylor et al., 2012) ont été analysées en se focalisant sur deux périodes : le futur proche (de 2020 à 2049) et la fin du 21<sup>ème</sup> siècle (de 2070 à 2099). Les changements observés sur les températures et les précipitations sur ces périodes de 30 ans ont été comparés à la période de référence de 1900-1929 (Terry et al., 2013).

L'analyse des projections climatiques du scénario RCP8.5<sup>5</sup> indique une augmentation des températures moyennes annuelles pour la France de 4,5°C (pour une gamme d'augmentation de + 2,7 à + 6,1°C) à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, les températures augmentant de 6°C en été contre 3,7°C en hiver (Figure 2).

Les précipitations estivales diminueraient de 0,6 mm/jour (18 mm/mois) tandis qu'en hiver, les précipitations augmenteraient de 0,3 mm/jour (environ 9 mm/mois). On peut donc s'attendre à une évapotranspiration potentielle plus importante en été par rapport aux conditions actuelles (Figure 3).

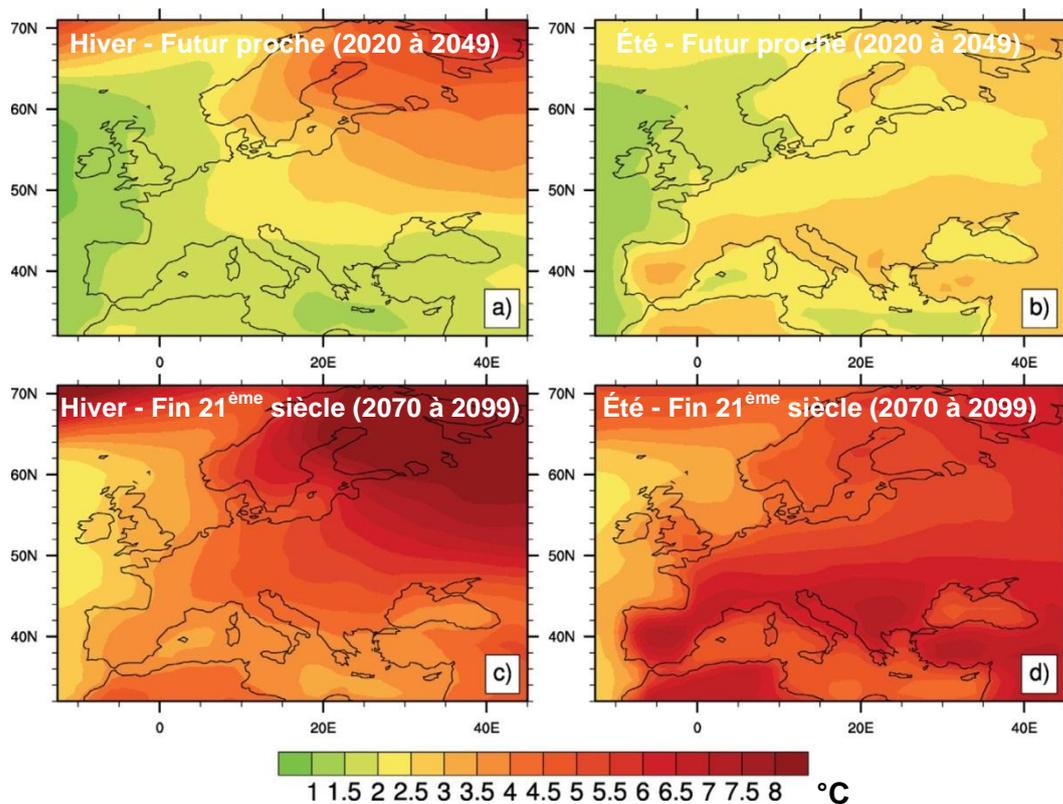


Figure 2 : Évolution des températures de l'air en surface dans un futur proche (de 2020 à 2049) et à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle par rapport à la période 1900-1929 (Terry et al., 2013)  
a : Hiver - Futur proche (2020 à 2049) - b : Été - Futur proche (2020 à 2049)  
c : Hiver - Fin 21<sup>ème</sup> siècle (2070 à 2099) - d : Été - Fin 21<sup>ème</sup> siècle (2070 à 2099)

<sup>4</sup> CMIP5 : fifth phase of the Climate Model Intercomparison Project

<sup>5</sup> Le scénario RCP8.5 est le scénario le plus pessimiste puisqu'il aboutit à une concentration en CO<sub>2</sub> de 936 ppm à l'horizon 2100 contre 538 ppm pour le RCP4.5 et 421 pour le RCP2.6

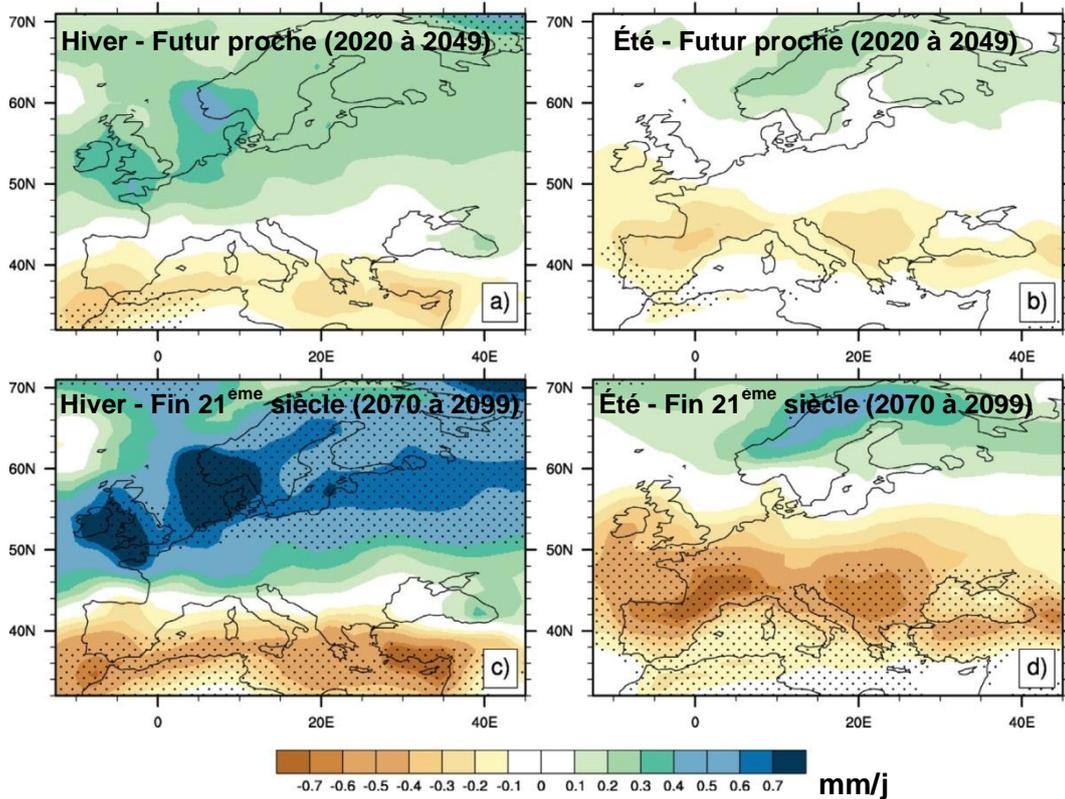


Figure 3 : Évolution des précipitations (mm/j) dans un futur proche et à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle par rapport à la période 1900-1929 (Terray et al., 2013)  
a : Hiver - Futur proche (2020 à 2049) - b : Été - Futur proche (2020 à 2049)  
c : Hiver - Fin 21<sup>ème</sup> siècle (2070 à 2099) - d : Été - Fin 21<sup>ème</sup> siècle (2070 à 2099)

Il faut garder à l'esprit que si les projections des modèles climatiques indiquent que les températures moyennes vont augmenter au cours des prochaines décennies, des difficultés persistent pour reproduire, via les simulations, les changements de températures observées à l'échelle d'un pays ou d'une région. A cette échelle, la variabilité climatique naturelle est très importante, il est donc difficile de distinguer l'importance des facteurs anthropiques par rapport aux causes naturelles dans les changements observés. Il est en effet très difficile d'attribuer les variations locales de température à des facteurs précis. Des incertitudes demeurent donc à l'échelle locale sur la compréhension des températures et leur évolution dans le temps. Les incertitudes sont encore plus grandes pour les précipitations.

Néanmoins, bien qu'imparfaits, les modèles climatiques représentent la meilleure approximation du système climatique réel. Les modèles climatiques régionaux (RCM pour Régional Climate Model) semblent être des outils plus appropriés à plus petite échelle.

## 2.2. IMPACTS LIES AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Les impacts du changement climatique dans les principales régions d'Europe sont synthétisés dans la Figure 4.

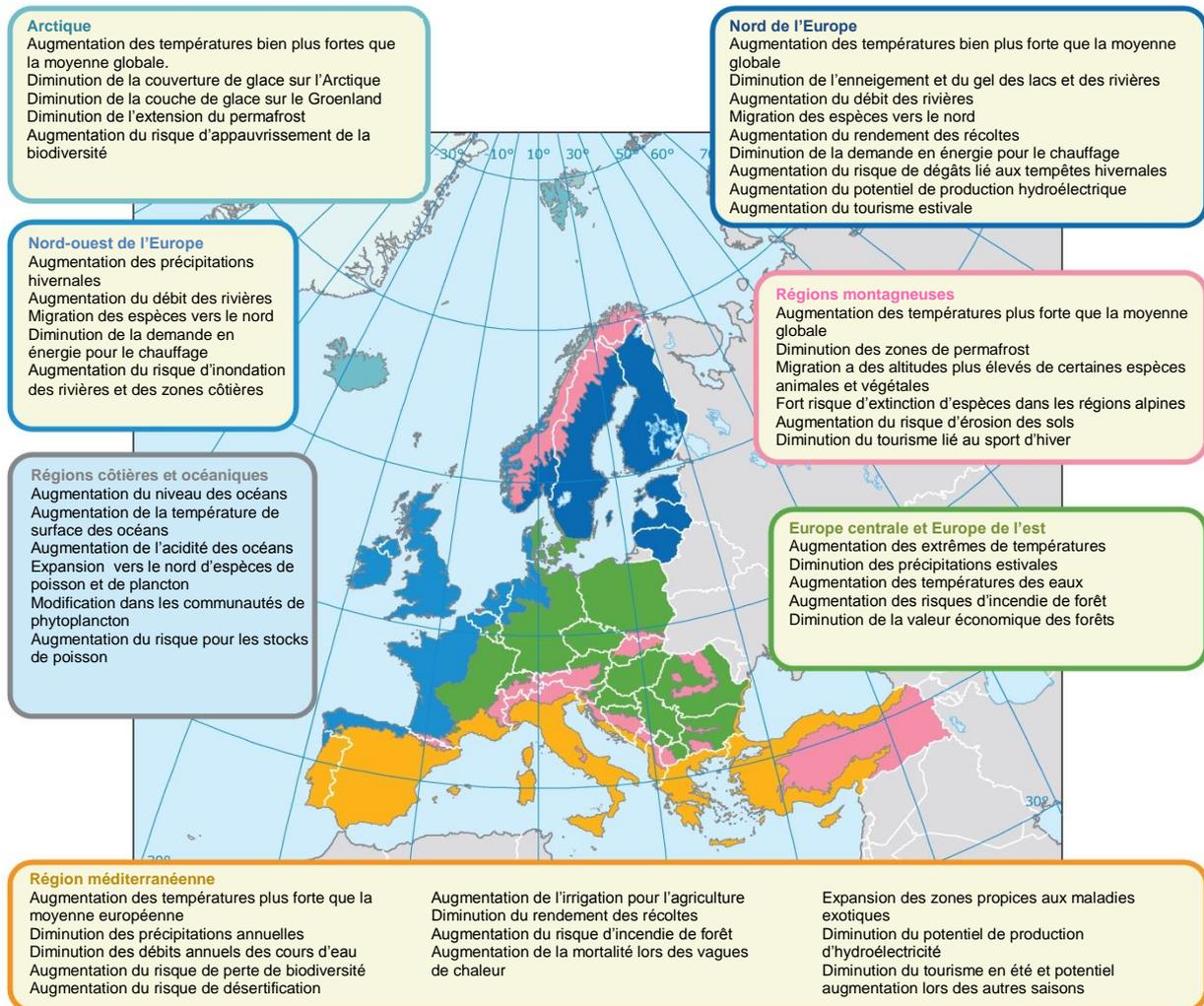


Figure 4 : Impacts du changement climatique dans les principales régions d'Europe (EEA, 2012)

Vis-à-vis des eaux souterraines, il ressort que l'intrusion d'eau saline dans les réservoirs d'eau douce constitue un risque important affectant les régions côtières à basse altitude. Ce phénomène est lié à l'augmentation du niveau marin et peut être aggravé par la surexploitation de la ressource en eau souterraine. Il peut impacter négativement l'alimentation en eau potable et l'irrigation. Cependant, il faut garder à l'esprit que ce risque est fortement lié au contexte local ; à l'échelle européenne, les données actuelles ne permettent pas de développer un indicateur sur ce risque.

Les cours d'eau en relation avec les nappes alluviales et les nappes phréatiques risquent aussi d'être fortement affectés par le changement climatique. L'assèchement des rivières en été va tendre à augmenter au cours des prochaines décennies (Figure 5) notamment dans le sud et le sud-est de l'Europe, le Benelux, la France, les parties occidentales de l'Allemagne et au Royaume-Uni (Rojas et al., 2012).

A l'horizon 2020, les différences par rapport à la période de référence (1961-1990) sont limitées bien qu'une tendance se dessine montrant l'augmentation des débits d'étiage en Scandinavie et une diminution des débits dans le sud de l'Europe.

Dans une grande partie de l'Europe, les diminutions de précipitations estivales déduites des simulations s'accompagnent d'une augmentation des températures, qui aboutit à des sécheresses plus fréquentes et plus intenses en été [ (Douville et al., 2002) ; (Lehner et al., 2006) ; (Feyen et al., 2009)]. Les conditions n'induiraient pas seulement une diminution du débit d'étiage dans les rivières mais aussi des baisses des niveaux des lacs et des nappes phréatiques ainsi qu'un assèchement des zones humides. Le changement climatique affectera non seulement les ressources en eau, mais aussi la demande d'eau. Les projections indiquent que les besoins en eau pour l'irrigation vont augmenter dans de nombreuses régions d'Europe, ce qui peut induire une diminution supplémentaire du débit des cours d'eau ; certains travaux suggèrent également que le changement climatique aura un impact sur la consommation en eau des ménages (Keirle et al., 2007).

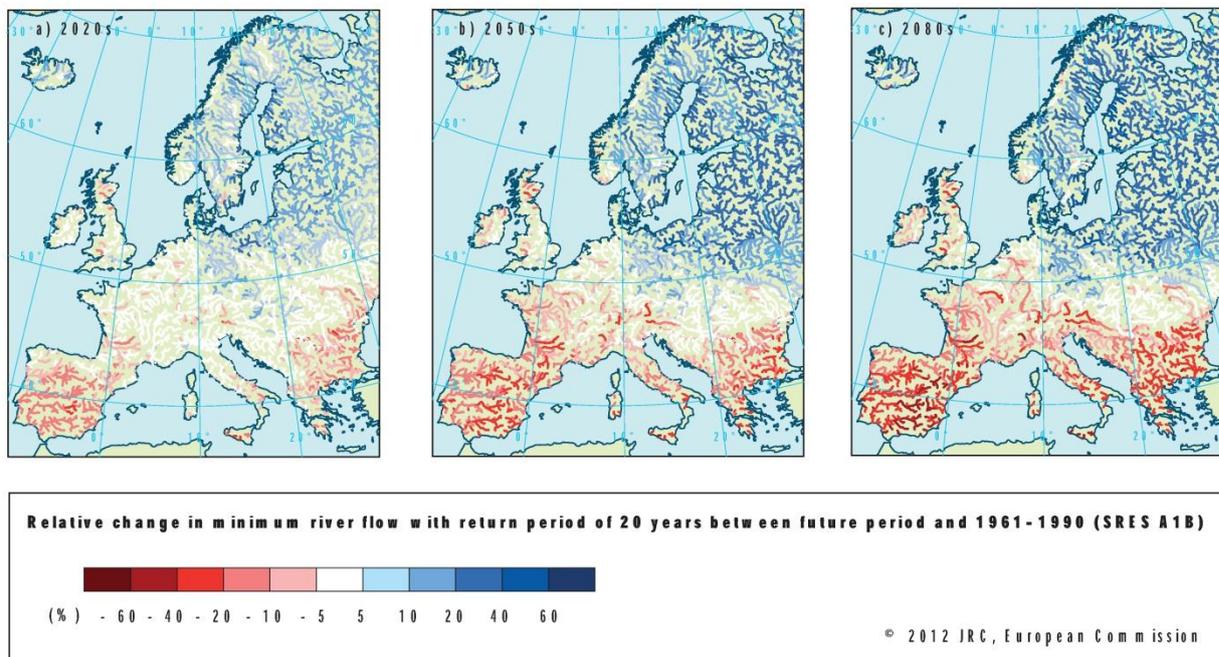


Figure 5 : Changement relatif dans le débit d'étiage des rivières avec une période de retour de 20 ans en comparaison à la période de référence 1961-1990

Pour la période hivernale, les tendances d'évolutions futures des risques d'inondations ont été simulées dans le modèle hydrologique LIFSLOOD et un ensemble de 12 modèles climatiques (Dankers and Feyen, 2009). La carte présentée en Figure 6 représente la moyenne issue de l'ensemble des simulations, les rivières bleues indiquent une augmentation de la fréquence des inondations avec une période de retour de 100 ans tandis que les rivières rouges traduisent une diminution de la fréquence de ces inondations. Il ressort que le risque d'inondation augmente pour plusieurs rivières européennes majeures (Feyen et al., 2012).

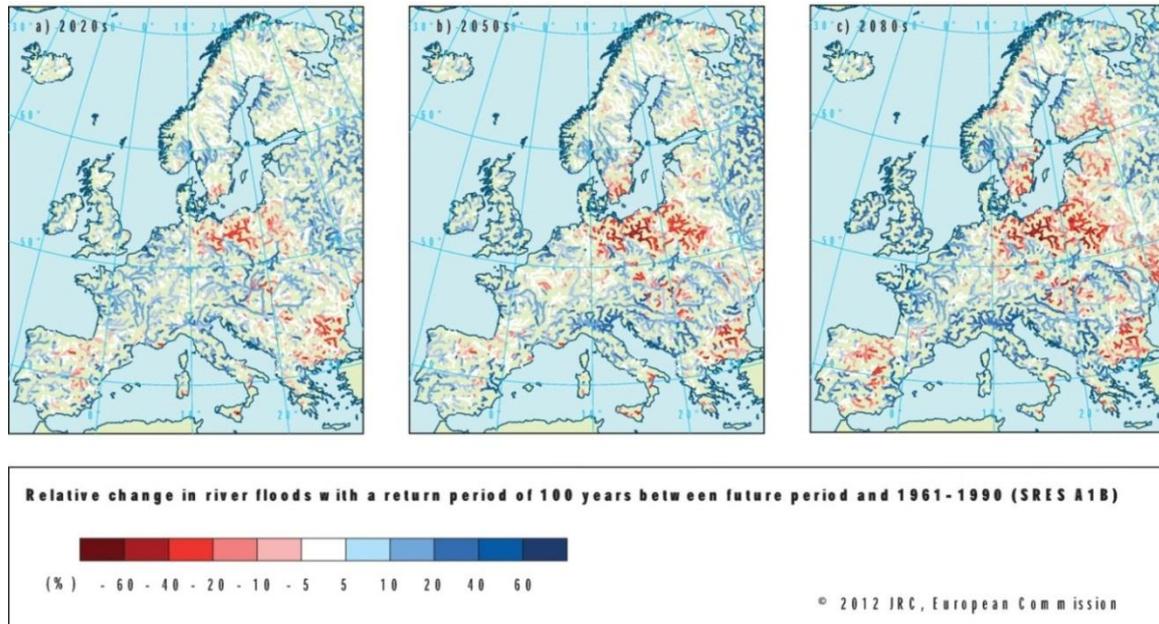


Figure 6 : Changement relatif des inondations dans les rivières avec une période de retour de 100 ans en comparaison à la période de référence 1961-1990

La variabilité de la recharge des aquifères liée au changement climatique reste difficile à évaluer. De nombreux facteurs affecteront la recharge des aquifères : l'évolution des précipitations et des températures, l'urbanisation et l'imperméabilisation des surfaces, la création ou la disparition de surfaces boisées, la rotation des cultures, etc. D'importantes sources d'incertitudes et de défauts dans l'estimation de la recharge existent (Holman, 2006). Par ailleurs, les changements de propriétés des sols sur le long terme peuvent modifier les propriétés d'infiltration et donc la recharge. En effet, la quantité d'eau que peut contenir un sol est en grande partie liée à sa texture, sa structure et la quantité de matière organique qu'il contient. La modification d'une de ces variables affectera les propriétés de rétention d'eau du sol et en fin de compte l'infiltration de l'eau pour la recharge des nappes.

### 2.3 EN RESUME

En l'état actuel des connaissances, les impacts attendus du changement climatique sur les eaux souterraines concernent :

- une diminution de la recharge des nappes, à pondérer des incertitudes sur l'évolution des précipitations notamment en période hivernale,
- la diminution des débits d'étiage des cours d'eau, liée à une baisse des apports en eau souterraine,
- la diminution des débits des sources,
- l'assèchement des zones humides en connexion avec les eaux souterraines,
- l'augmentation du risque d'intrusion d'eau saline, liée à l'augmentation du niveau marin.

## 3. Bilan des travaux méthodologiques d'intérêts sur les eaux souterraines

Comprendre les effets potentiels du changement climatique s'avère plus complexe dans le cas des eaux souterraines que dans celui des eaux de surfaces (Holman, 2006). En effet, les temps de résidence s'échelonnent de quelques jours à plusieurs dizaines de milliers d'années pour les eaux souterraines, ce qui retarde la réponse des systèmes aquifères aux changements climatiques (Chen et al., 2004). De plus, l'exploitation des eaux souterraines (alimentation en eau potable, irrigation, industrie,...) entraînent une diminution des réserves ainsi qu'une baisse des débits aux exutoires (sources) dont la périodicité est identique à celles des variations climatiques, ce qui rend difficile la distinction entre les impacts anthropiques et les impacts climatiques sur les eaux souterraines (Hanson et al., 2004).

Plusieurs études ont déjà fait la synthèse des travaux méthodologiques liés au changement climatique en Aquitaine et plus largement dans le Sud-Ouest [ (Lucas, 2011) ; (Dupuy et al., 2013)]. Cependant, il paraît important de faire ici un bilan de l'état des connaissances d'autant que plusieurs études récentes sont parues depuis.

### 3.1. IMPACT SUR LA RECHARGE ET LE NIVEAU DES NAPPES

L'alimentation<sup>6</sup> des systèmes aquifères peut s'effectuer soit directement par l'infiltration de l'eau de pluie au droit des zones d'affleurement, soit indirectement par drainance<sup>7</sup>. Localement, les échanges avec le réseau hydrographique, les zones humides, les lacs peuvent participer à la réalimentation des systèmes aquifères. Dans une zone géographique donnée, le climat d'une part, la nature du sol et sa couverture végétale d'autre part, vont conditionner les précipitations et l'évapotranspiration.

Les dernières projections (Terray et al., 2013) sur les températures indiquent une augmentation des températures moyennes annuelles pour la France de 4,5°C à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, avec des augmentations plus marquées en été qu'en hiver (6°C en été contre 3,7°C en hiver). Les projections issues des derniers modèles montrent une tendance à l'augmentation des précipitations en hiver et une diminution en été. On peut donc s'attendre à une évapotranspiration potentielle plus importante en été par rapport aux conditions actuelles (Terray et al., 2013) et une recharge plus importante en hiver.

En France, une étude intitulée REXHyss (Ducharne et al., 2009) menée dans le cadre du programme GICC (Gestion et Impacts du Changement Climatique) a permis, à l'aide de différentes projections climatiques régionalisées et de différents types de modèles couplés, d'estimer à 30% la diminution de la recharge moyenne annuelle des systèmes hydrogéologiques des bassins de la Seine et de la Somme pour une diminution moyenne des précipitations hivernales estimée à 12% pour la fin du 21<sup>ème</sup> siècle.

Par ailleurs, le projet Explore 2070, qui s'est déroulé de juin 2010 à octobre 2012, a eu pour objectif de connaître les impacts du changement climatique sur les milieux aquatiques et la ressource en eau à échéance 2070, pour anticiper les principaux défis à relever et hiérarchiser

---

<sup>6</sup> Apports d'eau externe de toutes origines, à un aquifère

<sup>7</sup> Flux d'eau, à composante essentiellement verticale, passant d'un aquifère à un autre à travers une couche semi-perméable

les risques encourus. Il a également servi à élaborer et à évaluer des stratégies d'adaptation dans le domaine de l'eau en déterminant les mesures d'adaptation les plus appropriées pour répondre aux défis identifiés tout en minimisant les risques encourus. Le projet a été porté par la Direction de l'Eau et de la Biodiversité du MEDDE (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie) Il a rassemblé une centaine d'experts venant d'établissements de recherche et de bureaux d'études spécialisés.

L'un des objectifs de l'étude était de réaliser une évaluation de l'impact possible sur les eaux souterraines, principalement en termes de piézométrie et de recharge à partir du scénario d'évolution climatique A1B du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) et des scénarios de demande en eau souterraine du BIPE (bureau d'étude responsable du volet « prospective » du projet), à l'horizon 2050-2070, en France métropolitaine et sur les départements d'Outre-mer.

Dans ce cadre, le groupement BRGM/ARMINES a utilisé les modèles hydrodynamiques maillés déjà construits et calés sur la période actuelle. Ainsi, les impacts du changement climatique sur les eaux souterraines ont été évalués dans six contextes hydrogéologiques majeurs différents : l'aquifère alluvial du Rhin, le bassin de la Seine, l'aquifère crayeux de la Somme, les aquifères calcaires de Poitou-Charentes, les nappes captives du Bassin Nord-Aquitain et l'aquifère karstique du Lez.

Les données issues de différents modèles climatiques provenant de Météo France ont été utilisées pour calculer la recharge de ces modèles hydrodynamiques afin de réaliser une série de simulations prospectives. L'objectif commun étant de comparer, dans différentes régions de France, la réponse des nappes à des conditions climatiques variables. Pour ce faire, deux périodes ont été considérées : une période de référence de 1958 à 2008, considérée comme la période de référence, et une période prospective de 2046 à 2065. Chacun des modèles hydrodynamiques utilisés dans le cadre de ce projet possède ses propres spécificités (pas de temps, intégration du réseau hydrographique, ...). Les résultats des simulations, selon les modèles utilisés, peuvent exploiter des paramètres différents (piézométrie et/ou débits des rivières) à des échelles de temps variables (annuelles, mensuelles,...). Ici seront détaillés les résultats effectués sur le modèle MONA (MOdèle Nord-Aquitain) qui a permis d'évaluer l'impact du changement climatique sur les nappes captives (Saltel et al., 2012).

La construction du MONA, a été initiée 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 désormais de simuler les écoulements au sein de 15 réservoirs aquifères (Figure 7). Cet outil de gestion et d'aide à la décision s'intéresse principalement aux nappes captives. Le modèle fonctionne actuellement au pas de temps annuel.

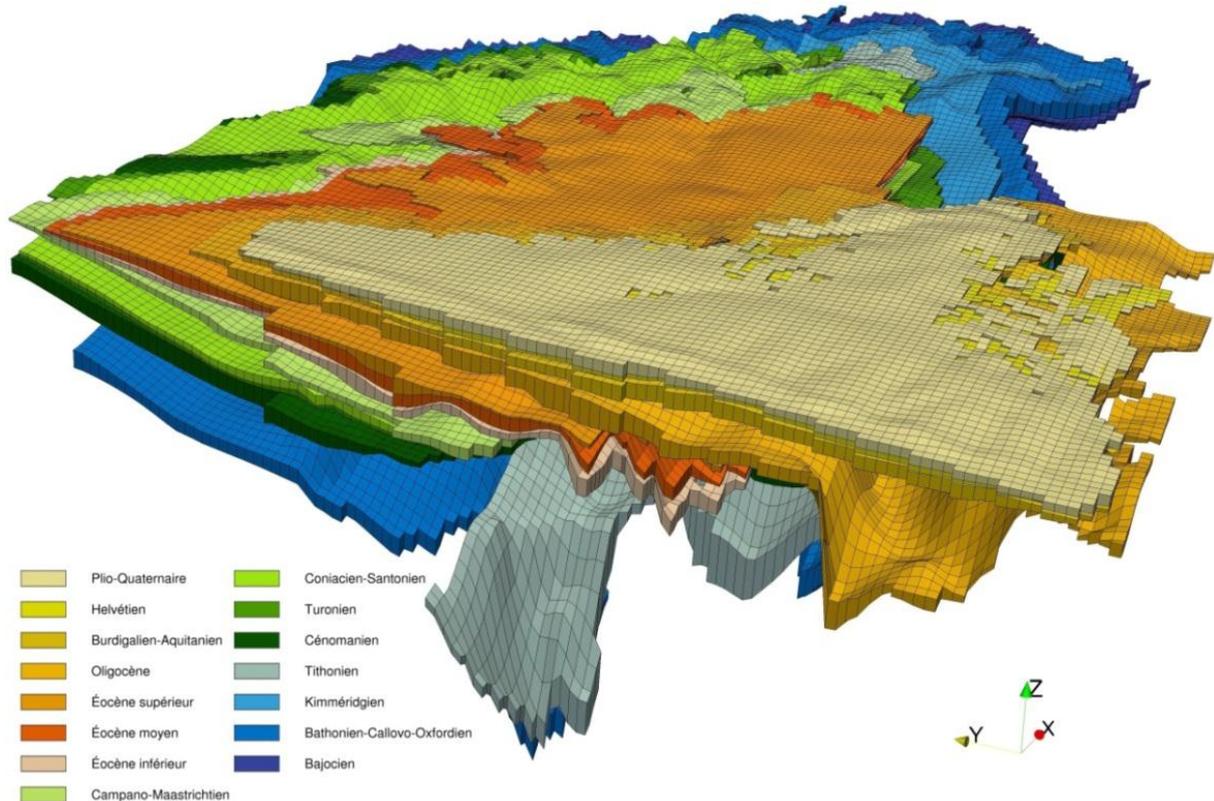


Figure 7 : Géométrie du Modèle Nord-Aquitain

Les simulations « temps passé » couvrent la période (en années hydrologiques<sup>8</sup>) : 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 (LeMoigne, 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+, GFDL-CM2.0, GFDL-CM2.1, ECHAM5/MPI, MRI-CGCM2.3.2, CCMA\_CGCM3, GISS\_MODEL\_ER) 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 (Pagé et al., 2010). La méthode a été mise au point pour les précipitations pour des applications hydrologiques. Elle utilise des prédicteurs<sup>9</sup> de grande échelle : la pression de surface et la température moyenne à 2 m. Les prédicteurs<sup>10</sup>

<sup>8</sup> Période de 12 mois qui débute après le mois habituel des plus basses eaux.

<sup>9</sup> Variables de grande échelle représentant correctement la Circulation de Grande Échelle

<sup>10</sup> Longue séries temporelles d'observations de variables climatiques d'intérêt à l'échelle locale

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 « prospectives » 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.

Pour l'ensemble des simulations réalisées dans le cadre de ce projet, les prélèvements ont été considérés comme constants, en prenant comme référence les valeurs de l'année 2006, issues de la base de prélèvement MONA. Chaque simulation a commencé par un état initial identique correspondant aux données climatiques de 1972 (année ayant servi au calage du modèle en régime permanent). Les autres pas de temps ont été intégrés à la suite (1962-1990 et 2047-2064). Les années 1961, 1991, 2046 et 2065 ont été éliminées car elles n'étaient pas complètes (MONA fonctionnant en année civile et non sur un cycle hydrologique). Les résultats des simulations prospectives (Figure 8) sont ensuite confrontés les uns aux autres, au droit des différents points d'observation du modèle (piézomètres de calage).

Pour mesurer l'impact des différents scénarios climatiques pris en compte sur les grandes nappes profondes du nord du Bassin aquitain, plusieurs approches ont été choisies :

- l'analyse des chroniques piézométriques qui nous permet d'observer en des points stratégiques l'impact des conditions climatiques sur l'évolution de la piézométrie,
- l'étude des cartes de différences piézométriques calculées entre 2064 et 2047 (H2064-H2047) qui nous permet d'avoir une vue générale de l'état des nappes et de localiser les secteurs les plus sensibles aux variations climatiques (Annexe 1).

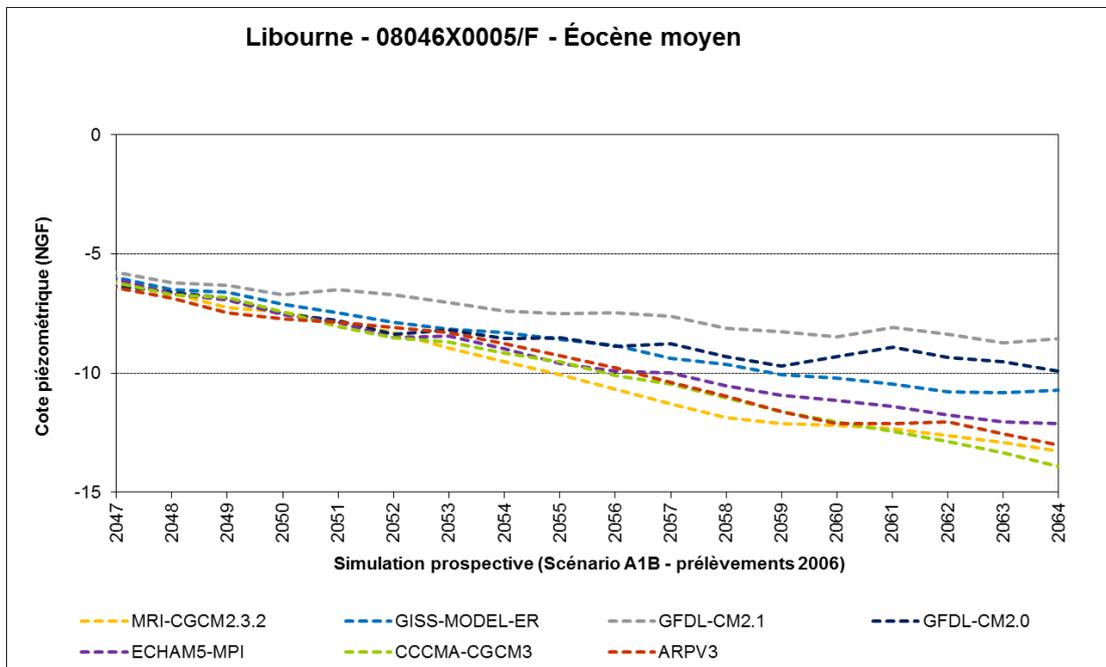


Figure 8 : Exemple de restitution des résultats de simulation - Impact climatique sur la piézométrie

Les impacts sont variables selon les nappes et les modèles considérés (Figure 9). Les diminutions de piézométries simulées basées sur les recharges calculées à partir des résultats des différents modèles climatiques (scénario : A1B), peuvent aller de 1 m à plusieurs dizaines de mètres (15 à 20 m pour les cas les plus extrêmes). Les modèles climatiques qui induisent les

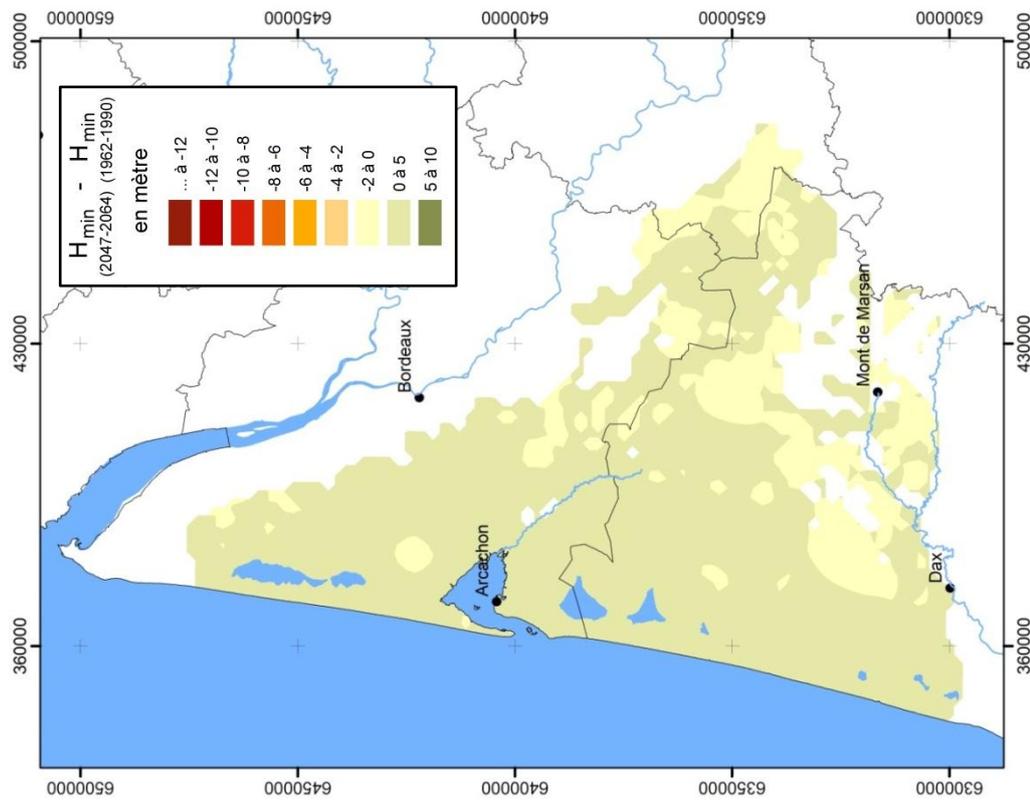
baisses les plus marquées de la piézométrie sont ARPEGE V3, CCMA-CGM3 et MRI-CGCM2.3.2. Le modèle GFDL-CM2.1 est celui dont les conditions climatiques s'éloignent le moins des données SAFRAN sur la période de référence. C'est donc tout naturellement le modèle qui a le moins d'impact sur la piézométrie des nappes. L'analyse des cartes de différences piézométriques calculées entre 2064 et 2047 (H2064-H2047) apporte des informations complémentaires et permet de localiser les secteurs où les baisses sont les plus sévères (Annexe 1). Ainsi, il apparaît de manière tout à fait logique que ce sont les zones d'alimentation qui sont les plus affectées.

Il s'agit dans certains cas des zones d'affleurements (cas de l'Éocène moyen) ou encore des zones de drainage entre aquifères (cas du Miocène et de l'Oligocène). Il y a donc une diminution directe ou indirecte de l'alimentation des nappes lorsque les scénarios climatiques induisent une diminution importante de la recharge.

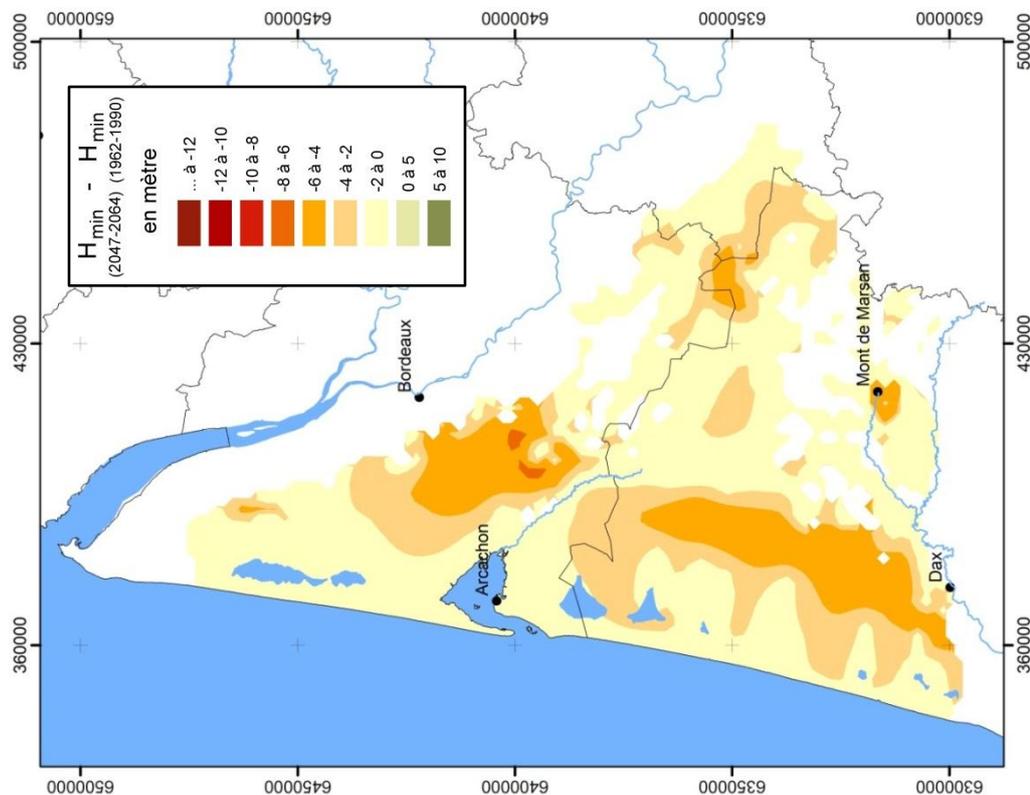
A proximité de l'océan, les baisses sont plus modérées en raison des potentiels imposés qui traduisent le niveau moyen de l'océan ou de l'estuaire de la Gironde dans le modèle. Dans le cadre des travaux réalisés ici, les impacts de l'élévation du niveau marin sur le niveau piézométrique ainsi que les 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 (Planton et al., 2012) et projets passés ou en cours : ANR-MISEEVA (Marine Inundation hazard exposure modelling and Social, Economic and Environmental Vulnerability Assessment in regard to global changes), Aquimetro (Aquifères côtiers Metro ONEMA 2010).

Par ailleurs, l'impact des prélèvements n'a pas été abordé dans ce document. Toutefois il apparaît important de souligner l'importance de ce paramètre sur la piézométrie des nappes captives du nord du Bassin aquitain. Les études réalisées précédemment en Aquitaine [ (Pédron et al., 2010) ; (Thiéry et al., 2011) ; (Saltel et al., 2012) ; (Cabaret et al., 2012)] 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 impactés correspondent dans ce cas aux grandes zones urbanisées où se concentrent la majorité des forages d'alimentation en eau potable.

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.



Nappe libre du Plio-Quaternaire GFDL-CM2.1 A1B



Nappe libre du Plio-Quaternaire MRI-CGCM2.3.2 A1B

Figure 9 : 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-Quaternaire

### 3.2. INTERACTIONS NAPPES / RIVIERES

La relation nappe-rivière se définit comme un échange d'eau dans un sens ou dans un autre entre une nappe d'eau souterraine et un cours d'eau (Vernoux et al., 2010). La nature des échanges entre les deux réservoirs va dépendre du contexte géologique et de la nature des formations sur lesquelles s'écoulent les cours d'eau. En fonction des saisons et du niveau relatif de la nappe par rapport à la rivière, on peut soit avoir une alimentation de la rivière par la nappe, soit une perte de la rivière (diminution du débit du cours d'eau) qui participe localement à recharger l'aquifère (Figure 10).

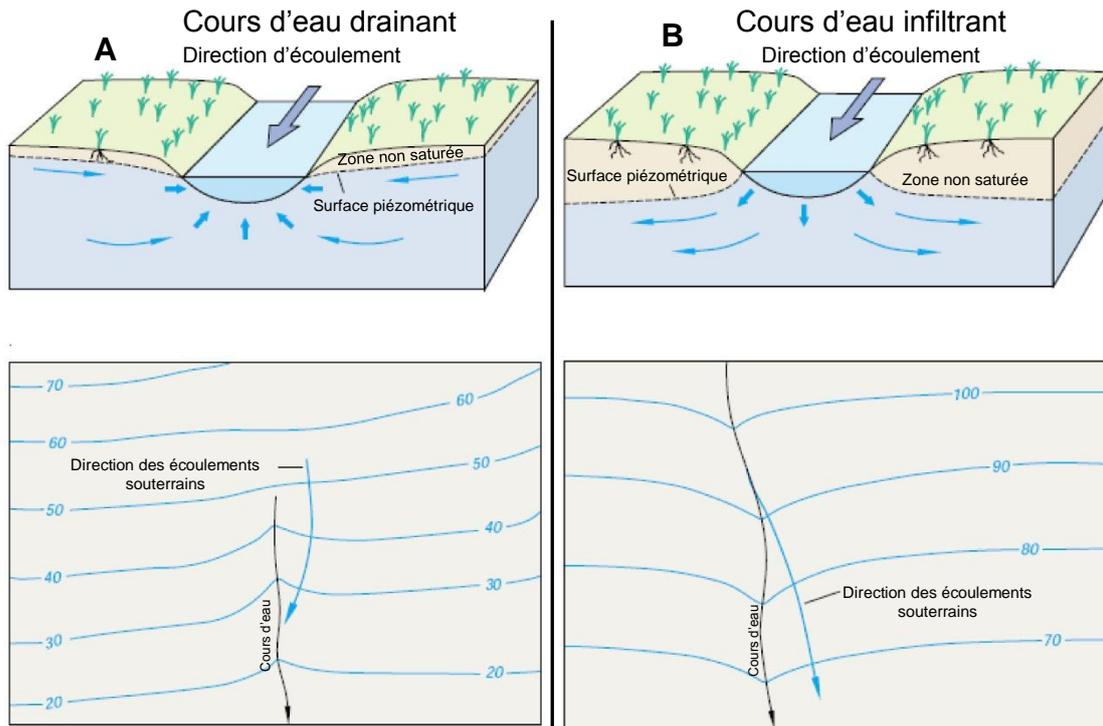


Figure 10 : Echanges nappe-rivière - A - la nappe alimente la rivière  
B - la rivière alimente la nappe (Winter et al., 1998)

Les eaux de surface transportent et déposent des sédiments appelés alluvions qui présentent souvent de bonnes caractéristiques hydrodynamiques (perméabilité et porosité) et permettent donc l'existence d'une nappe dite « alluviale ». Ces nappes jouent un rôle majeur dans le soutien des débits d'étiage car elles fournissent le débit de base du cours d'eau en période sèche. Dans certains contextes où les alluvions sont plus développées, les échanges avec les autres réservoirs souterrains sont plus directs. Par ailleurs, les émergences de nappes (sources) et les petits cours d'eau sont le principal moteur du fonctionnement des zones humides (marais littoraux, lagunes, cours d'eau). Toute modification du régime a des conséquences induites fortes (EAUCEA, 2008).

#### Cours d'eau

Plusieurs travaux ont été réalisés pour étudier l'impact du changement climatique sur les cours d'eau du Bassin Adour-Garonne [ (Caballero et al., 2003) ; (Caballero et al., 2007)] en utilisant le système de modélisation hydrométéorologique **SIM (SAFRAN-ISBA-MODCOU)**. Il ressort de cette étude que sur l'ensemble des scénarios, des impacts relativement homogènes aboutissent à une diminution moyenne de 11% des débits d'étiages à l'horizon 2050. Certains cours d'eau pourraient passer d'un régime d'écoulement nival à un régime pluvial, ce qui se

traduirait par une augmentation des débits en période hivernale. L'augmentation potentielle de la pluviométrie en hiver pourrait permettre une recharge hivernale plus favorable des réservoirs souterrains que sous le climat actuel. Cette situation favoriserait le soutien des nappes alluviales au débit de base des cours d'eau. Cependant ce soutien ne serait pas systématique et ne s'exercerait pas jusqu'à la fin de l'étiage.

Plus récemment, une étude centrée sur le bassin de la Garonne a été réalisée. **Garonne 2050** est une étude prospective sur les besoins et les ressources en eau à la base d'une stratégie d'adaptation au changement climatique (Garonne2050., 2013). Les travaux liés à l'évolution du climat à l'horizon 2050 montrent pour le sud-ouest de la France une tendance forte à l'augmentation de l'évapotranspiration annuelle qui aboutit mécaniquement à une diminution de la pluie efficace, du ruissellement et de l'infiltration. Il faut néanmoins garder à l'esprit que de nombreuses incertitudes demeurent concernant le régime des précipitations. Cependant, du fait de ces évolutions climatiques, de fortes modifications sur l'hydrologie sont à prévoir. On s'attend ainsi à des baisses annuelles de débits de toutes les grandes rivières du sud-ouest, comprises entre 20 et 40%. La dynamique des écoulements sera également fortement modifiée notamment en période de basses eaux avec des étiages plus précoces, plus sévères et plus longs (sans modifications des usages). Par ailleurs, l'augmentation de la température de l'air et la baisse des débits induiront en toute logique une augmentation de la température de l'eau qui, elle aussi, aura des conséquences non négligeables sur les usages et les milieux. Au-delà des impacts du changement climatique, l'étude intègre les évolutions possibles de la démographie, de l'énergie et de l'agriculture, et leur impact sur la ressource en eau, principalement du point de vue quantitatif. 5 scénarios ont été élaborés pour explorer le champ des possibles (Tendanciel, Stockage, Sobriété, Local, Libéral).

D'un point de vue plus national, dans le cadre du projet **Explore 2070**, le modèle Jurassique de Poitou-Charentes a été utilisé pour simuler l'impact du changement climatique sur la période 2046 à 2065 à partir des résultats de 7 modèles climatiques différents - scénario A1B du GIEC (Douez, 2012). Les résultats de ces 7 simulations du modèle hydrodynamique sont comparés à une simulation supplémentaire réalisée sur la période de référence (1961-1990). Ce modèle, contrairement au MONA, est parfaitement adapté pour prendre en compte les échanges nappes/rivières. Pour les nappes, les baisses seraient relativement plus importantes sur les plateaux (entre 2 à 7 mètres selon les simulations) et plus faibles dans les vallées (entre 0 et 1 mètre). En ce qui concerne les cours d'eau, les différentes simulations montrent une baisse générale des débits moyens qui pourrait être de l'ordre de 10 à 40% selon les cours d'eau et les simulations. Les étiages devraient être beaucoup plus sévères. Pour les périodes de crues, le pas de temps utilisé ne permet pas de reproduire correctement ces phénomènes. Néanmoins, pour certains cours d'eau, des débits aussi importants que ceux observés en période d'inondation ont été simulés. Au final, les simulations montrent toutes une diminution des niveaux piézométriques et des débits des cours d'eau, mais les résultats sont très variables selon les modèles climatiques. Cette grande variabilité est liée en particulier aux différences de précipitations et d'ETP<sup>11</sup> calculées par les modèles climatiques. Ainsi, les pluies efficaces obtenues pour un même secteur peuvent varier de -10% à -40% par rapport à la période de référence. Enfin, il est à noter que pour le calcul de la recharge, aucune évolution n'est considérée concernant l'IDPR<sup>12</sup> et les paramètres du sol.

Des résultats similaires ont été obtenus dans d'autres bassins comme le montre les travaux effectués sur le modèle de la Somme (Amraoui et al., 2012) qui montre une diminution du débit moyen de la Somme et de ses principaux affluents. La baisse est plus marquée dans l'Avre

---

<sup>11</sup> Evapotranspiration potentielle

<sup>12</sup> Indice de développement et de persistance des réseaux

pour lequel la moyenne du débit dans le temps futur serait de l'ordre de la moyenne du débit minimal de la période actuelle.

## Sources

Les sources constituent un cas particulier des échanges nappes/rivières puisqu'elles correspondent au lieu d'apparition de l'écoulement d'eau souterraine à la surface du sol. L'Aquitaine compte un nombre important de sources dont les débits sont variables en fonction des aquifères considérés. Certaines sources sont pérennes et présentent des débits plus ou moins constants tout au long du cycle hydrologique, alors que d'autres sont transitoires et ne fonctionnent qu'en période de hautes eaux. Dans certains contextes, elles constituent un apport important pour l'alimentation en eau potable. Pour mémoire, nous citerons ici les sources de Budos en Gironde et du Toulon en Dordogne, qui participent respectivement à l'approvisionnement en eau des villes de Bordeaux et de Périgueux.

Les sources les plus vulnérables vis-à-vis du changement climatique sont celles qui présentent dans le climat actuel un fonctionnement saisonnier avec de faibles débits en période de basses eaux. Des observations effectuées sur certaines sources des chaînons béarnais (Pyrénées-Atlantiques) montrent que ces dernières peuvent présenter des épisodes de tarissement au cours de certaines années sèches. A noter que dans ce secteur, une tendance à la hausse des températures moyennes annuelles est clairement établie et que la tendance s'accélère depuis 1975 (Rey, 2007). Même si les précipitations semblent stables, l'augmentation de l'évapotranspiration observée pourrait aboutir à des périodes de tarissements plus longues dans le temps.

D'autres travaux réalisés sur le massif de l'Ursuya (Pyrénées-Atlantiques) ont permis d'évaluer les impacts du changement climatique sur l'évolution des sources (Jaunat, 2012). Il ressort de ces travaux que, malgré des évolutions climatiques indéniables, la modification du régime de précipitation estimée pour la première moitié du 21<sup>ème</sup> siècle est faible sur le Pays Basque français. D'autre part, l'évapotranspiration est assez stable. Ceci est vrai pour les deux scénarios envisagés<sup>13</sup>, le scénario A2 étant le plus pessimiste vis-à-vis du réchauffement et des perturbations climatiques parmi ceux proposés par le GIEC (mais correspondant aux niveaux d'émissions de gaz à effet de serre sur la période récente). Ainsi, sur une période de 50 ans, ces évolutions climatiques n'entraînent pas de modification notable des niveaux piézométriques au sein de l'aquifère de l'Ursuya. En revanche, les flux sortants du système montrent une tendance à la diminution, dans l'hypothèse de modifications climatiques pessimistes. Cette diminution reste cependant faible au regard des volumes exploités sur le système aquifère de l'Ursuya.

### 3.3. VULNERABILITE DES AQUIFERES COTIERS A L'INTRUSION SALINE

Dans les zones littorales, les aquifères sont en contact avec l'eau salée d'origine marine, qui envahit plus ou moins les formations géologiques côtières. L'eau douce, d'une densité moindre que celle de l'eau salée « flotte » au-dessus de l'eau marine souterraine (Figure 11). L'eau salée d'une densité moyenne de 1,025kg/l a ainsi tendance à pénétrer vers les terres sous l'action du gradient de densité.

Le Bassin aquitain est largement ouvert sur l'Océan Atlantique. A l'intérieur de ce domaine, les formations plus ou moins perméables du Mésozoïque et du Cénozoïque ont constitué au cours

---

<sup>13</sup> Scénario A2 et B1 issues des modèles SCRATCH2010 (Pagé et al., 2010)

des temps géologiques un vaste système aquifère multicouche. La nappe du Plio-Quaternaire vient surplomber l'ensemble de ce système.

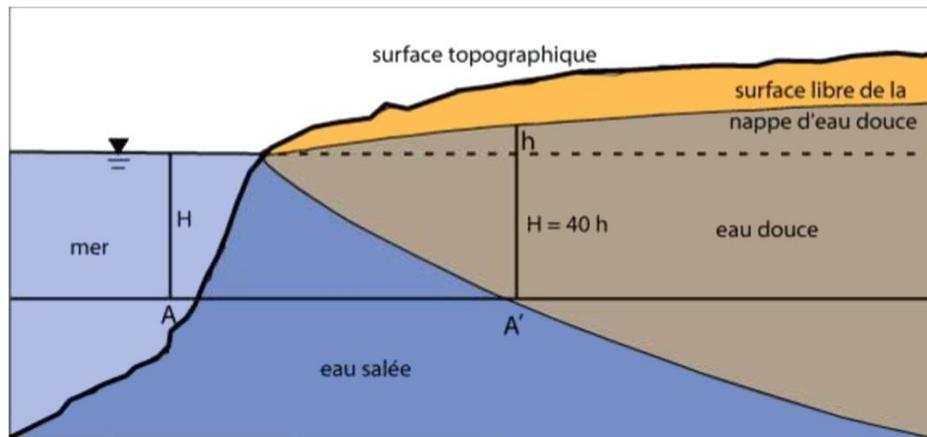


Figure 11 : Coupe schématique perpendiculaire au littoral selon Ghyben-Hezberg (Frissant et al., 2005)

Ainsi, en Aquitaine, des teneurs en chlorures ou des conductivités élevées sont constatées (Figure 12) :

- dans le secteur de Soulac, sur la pointe de Grave, la sensibilité à l'intrusion saline est connue. En effet, quatre points de mesures indiquent des concentrations en chlorures comprises entre 160 et 300 mg/l.
- dans l'estuaire de la Gironde, une dizaine de points de mesure de la nappe des calcaires de l'Éocène est caractérisée par des concentrations en chlorures de 100 à 3 000 mg/l. Cependant, l'origine des minéralisations mesurées en certains points captant la nappe de l'Éocène le long de l'estuaire est vraisemblablement le résultat d'un lent processus de salinisation induit par la présence des nappes salées fossiles du sous-Flandrien. Le processus pouvant être localement renforcé par de l'eau saumâtre infiltrée depuis l'estuaire.
- au nord de Biarritz, dans les sables plio-quaternaires et les sables et graviers du Pliocène captif, quatre points indiquent des concentrations moyennes en chlorures de 100 à 500 mg/l et des conductivités électriques élevées (700 à 2 300  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

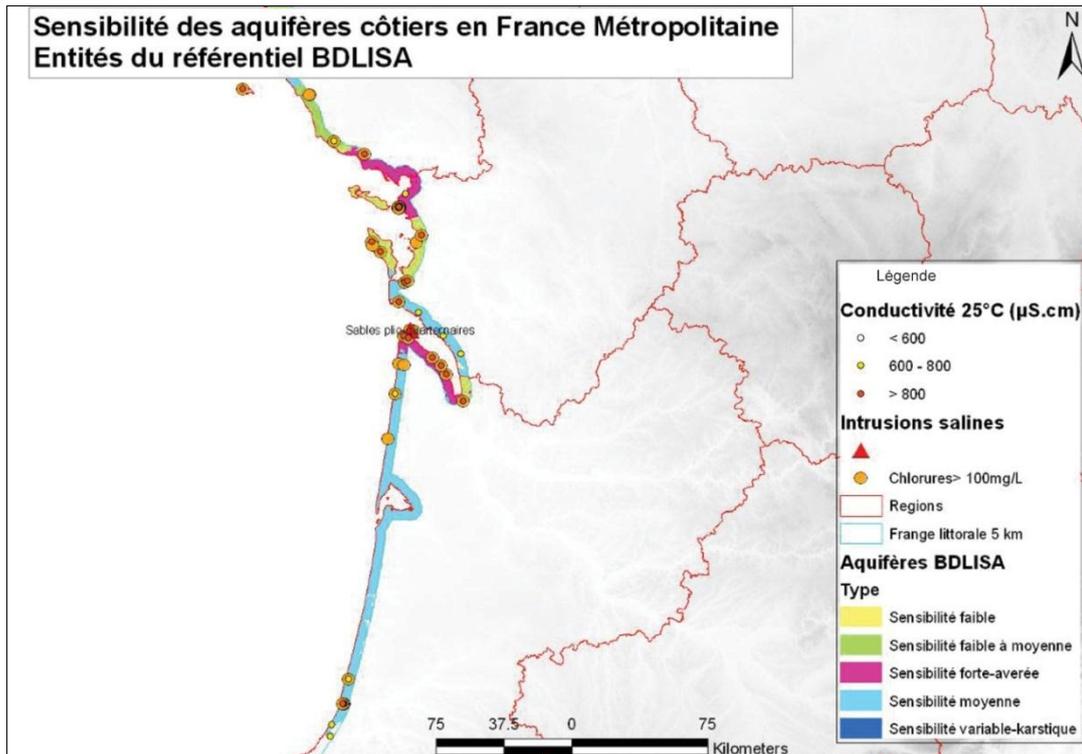


Figure 12 : Carte de sensibilité des aquifères côtiers vis-à-vis de l'intrusion saline dans la région de la Côte Aquitaine (Dörfliger et al., 2011)

Au sein de l'estuaire de la Gironde, dans la partie nord (entre phare Richard et Saint-Yzans-de-Médoc), les eaux reflètent un mélange entre les eaux de l'aquifère de l'Éocène, une eau issue de l'estuaire et une contribution d'une eau de type marine probablement ancienne (Schnebelen et al., 2002). Dans ce secteur, la source la plus probable de contamination est représentée par les eaux contenues dans les terrasses sous-flandriennes (Corbier et al., 2005). Dans le cas présent, quelle que soit l'évolution liée au changement climatique, la salinité restera la même car elle est liée à la présence d'eau fossile fortement minéralisée. La pointe de Grave révèle bien un problème de salinisation direct. La carte (Figure 13) met en évidence 3 zones de risque de salinisation de l'aquifère de l'Éocène moyen :

- une zone de risque fort, constituée de 2 parties disjointes, où les teneurs en chlorures peuvent être supérieures à 10 g/l (au Verdon-sur-Mer et au sud de Saint-Yzans par exemple),
- une zone de risque moyen qui s'étend au-delà de l'isopièze + 2,5 NGF, où les teneurs en chlorures ne dépassent pas 500 mg/l,
- une zone de risque faible, constituée de 2 parties disjointes, où les teneurs en chlorures sont systématiquement inférieures à 200 mg/l.

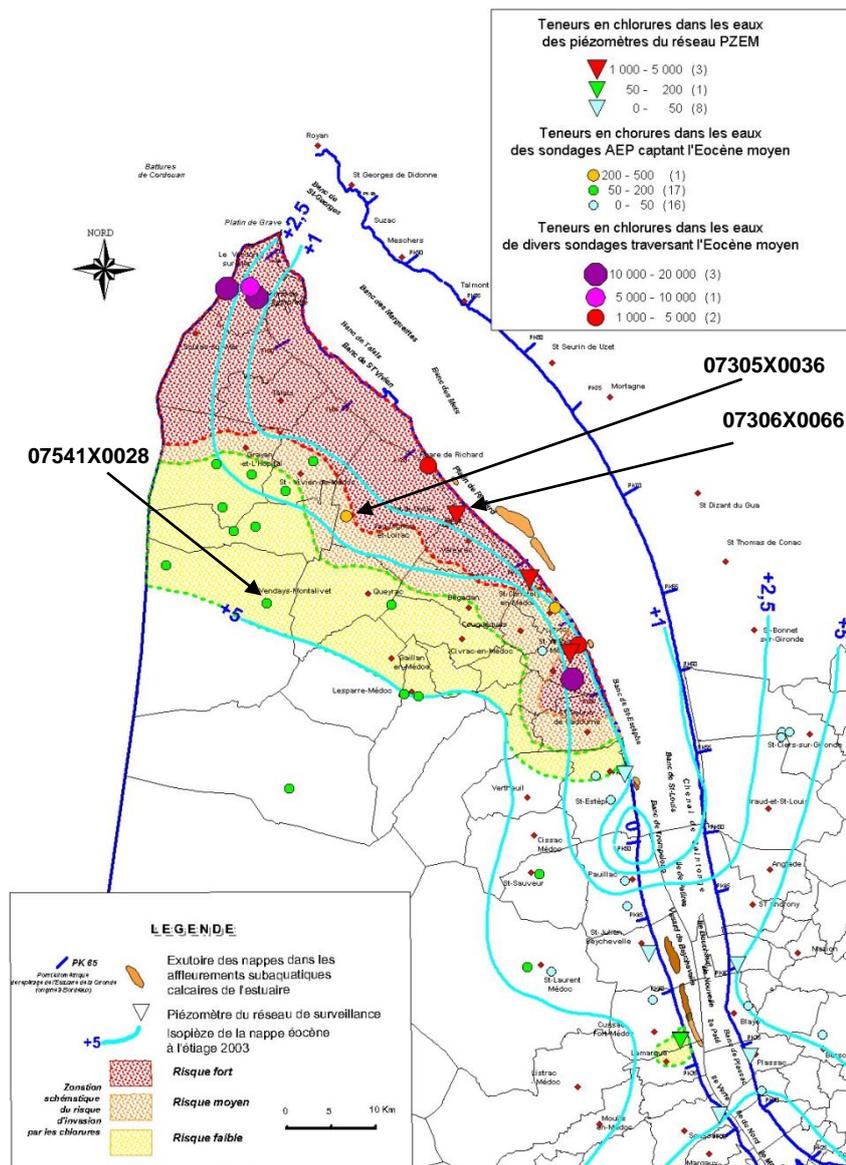


Figure 13 : Carte du risque de salinisation dans les nappes de l'Eocène moyen (Corbier et al., 2005)

L'aquifère des sables du Plio-Quaternaire pourrait être plus sensible au phénomène d'intrusion saline puisqu'il est en contact avec l'océan. La sensibilité est forte sur la pointe de Grave, au nord du Médoc, puisque l'on se situe entre l'estuaire de la Gironde et l'océan. Cependant les prélèvements captant cette nappe sont relativement faibles dans ce secteur.

Sur la façade atlantique, le cordon dunaire engendre une légère crête piézométrique tout le long de la côte aquitaine à l'exception du bassin d'Arcachon et limite ainsi les risques d'intrusions d'eau saline.

Au droit du bassin d'Arcachon, les études réalisées ont montré le caractère très aléatoire de la position du biseau salé dans la nappe phréatique (Corbier et al., 2007). Bien que la densité de puits et de dosages soit importante dans cette zone, il s'agit dans la très grande majorité des

cas, de prélèvements de particuliers servant à l'arrosage des jardins, ce qui engendre un impact relativement faible sur l'avancée du biseau salé.

Dans le contexte du changement climatique, les différentes études tendent à montrer que nous sommes actuellement entrés dans une dynamique de remontée du niveau marin. Les gammes de variation de l'élévation du niveau marin diffèrent selon les méthodes d'estimation mais la synthèse des différentes études tend à montrer qu'une augmentation de 60 cm à 1 m est probable pour la façade atlantique (Dörfliger et al., 2011). Il faut garder à l'esprit que la surcote<sup>14</sup> représente pour les systèmes aquifères côtiers un facteur d'évolution du biseau salé mais c'est principalement la modification du trait de côte qui constitue un risque.

### 3.4. IMPACTS INDIRECTS SUR LES EAUX SOUTERRAINES

En complément des **impacts directs** du changement climatique sur les eaux souterraines que représentent les modifications des modalités d'alimentation, des interactions nappes/rivières et l'augmentation des risques d'intrusion d'eau saline, il faut également prendre en considération les **impacts indirects** induits par l'évolution du climat. Les modifications des consommations d'eau qui vont découler des changements évoqués précédemment peuvent impacter de manière significative les eaux souterraines.

En effet, il a été mis en évidence que la production d'eau potable réagit immédiatement aux variations de température maximale notamment lors des périodes sans précipitations. Sur la Communauté Urbaine de Bordeaux, une relation linéaire a pu être mise en évidence entre l'augmentation de température maximale et l'augmentation du volume d'eau potable produit qui se traduit par une augmentation de 1,6% de la consommation par degré d'augmentation de température. Sur cette base, les projections faites à l'horizon 2050 indiquent une augmentation moyenne de consommation de 4 à 8 % sur la période estivale (Herbet et al., 2009).

Par ailleurs, l'irrigation constitue l'une des premières sources de consommation d'eau, même dans nos climats tempérés. Dans un contexte de rareté accrue, les conflits s'exacerbent entre les usages agricoles de l'eau et les autres usages notamment dans le cadre des débits d'objectif d'étiage.

Ainsi, de 2003 à 2006, les besoins en eau d'irrigation des cultures de maïs ont été, en France, de 30% supérieurs à la moyenne de la décennie précédente (calcul qui tient compte des précipitations et de la réserve en eau des sols), même si la responsabilité du changement climatique sur cette augmentation n'a pas été démontrée. La surface de maïs irrigué a été réduite de 10% en Aquitaine (pour une moyenne nationale de 13%). Dans le même temps, les volumes d'eau par hectare ont progressé pour compenser les déficits de précipitations. La sécheresse a surtout été plus marquée en 2005 dans notre région (Brisson et al., 2013). Cette année avait en effet été caractérisée par un déficit de pluviométrie estivale, précédée d'un hiver également sec. Ces sécheresses ont eu un impact négatif sur le rendement des céréales, mais positif sur la qualité des vins produits dans la région. Concernant le maïs irrigué, l'augmentation du déficit hydrique climatique pourrait se traduire par la nécessité d'un supplément d'irrigation de l'ordre de 40 mm/an en moyenne dans le futur proche (2020-2050).

Cependant, il ressort de travaux récents (Brisson et al., 2012) que dans le cas du maïs irrigué à 80%, le rendement pourrait diminuer malgré l'irrigation car l'avancement des stades

---

<sup>14</sup> Le phénomène de surcote est une élévation temporaire et locale du niveau de la mer au niveau des côtes littorales. Ce phénomène est provoqué la plupart du temps par les conditions météorologiques (dépression atmosphérique, vent, tempête, etc.) et parfois sismiques (tsunami).

phénologiques (floraison, récolte) est susceptible de générer une diminution du nombre de jours de remplissage des grains et donc une diminution du rendement.

Par ailleurs, la gestion de l'occupation du sol et en particulier les pratiques agro forestières comme le drainage généralisé jouent un rôle déterminant sur le régime des eaux de la nappe phréatique comme la nappe du Plio-Quaternaire (EAUCÉA, 2008).

Les baisses des débits des cours d'eau avec des risques d'étiages plus précoces, plus sévères et plus longs vont potentiellement générer un report des prélèvements vers les nappes captives, moins sujettes aux aléas climatiques. On peut donc s'attendre à ce que les nappes captives qui, de par leur inertie, sont moins sujettes au changement climatique à court terme soient impactées indirectement par les stratégies qui seront mises en place pour répondre aux besoins en eau pour l'irrigation ou l'alimentation en eau potable.

### 3.5 EN RESUME

La tendance générale qui ressort des différents travaux menés sur l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines indique une diminution de la recharge qui se traduit par une baisse des niveaux piézométriques affectant principalement les zones d'alimentation (zones d'affleurements ou de zones de drainance entre aquifères).

Le soutien d'étiage provenant des nappes souterraines sera diminué entraînant une baisse supplémentaire des débits des cours d'eau en période estivale. Le débit des sources aura également tendance à diminuer en relation avec la baisse de la recharge attendu en période hivernale. A noter que le contexte local est prépondérant et que les impacts seront très variables en fonction de la nature des réservoirs et des conditions climatiques locales.

Vis-à-vis du risque d'intrusion saline, la surcote représente pour les systèmes aquifères côtiers un facteur d'évolution du biseau salé, mais c'est principalement la modification du trait de côte qui constitue le risque prépondérant lié au changement climatique.

## 4. Prévision démographique et évolution des consommations

D'ores et déjà, les eaux souterraines sont impactées par l'évolution de la démographie, qui influe sur la demande en eau, et par les modifications des habitudes de consommation. Ces facteurs viennent se surimposer aux impacts du changement climatique, ce qui rend parfois difficile l'identification de l'importance relative de ces différents paramètres. Ce chapitre propose d'une part, de présenter les projections démographiques et les modifications de consommations envisagées et d'autre part, d'évaluer leurs impacts sur les prélèvements d'eaux pour différents usages. Cette évaluation, réalisée indépendamment de la problématique du changement climatique, permet de comprendre quels sont les facteurs clés affectant les prélèvements d'eau. Certains de ces facteurs montreront alors des liens très étroits avec le changement climatique.

### 4.1. ÉVOLUTION DEMOGRAPHIQUE ET EVOLUTION DES HABITUDES DE CONSOMMATION

#### 4.1.1. Démographie

D'après les chiffres de l'Organisation des Nations Unies (Department et al., 2013), la population mondiale est actuellement évaluée à 7,2 milliards d'individus. Elle devrait atteindre 9,6 milliards en 2050 et 10,9 milliards à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle (Figure 14). Dans le même temps, la France passerait de 64,3 millions d'habitants à 73 millions en 2050, puis 79 millions en 2100. Le premier chiffre est à pondérer, car les estimations de l'INSEE au 1<sup>er</sup> janvier 2013 (Bellamy et al., 2013) font état d'une population de 65,8 millions d'habitants (la différence avec les chiffres de l'ONU peuvent s'expliquer par la notion même de France Métropolitaine).

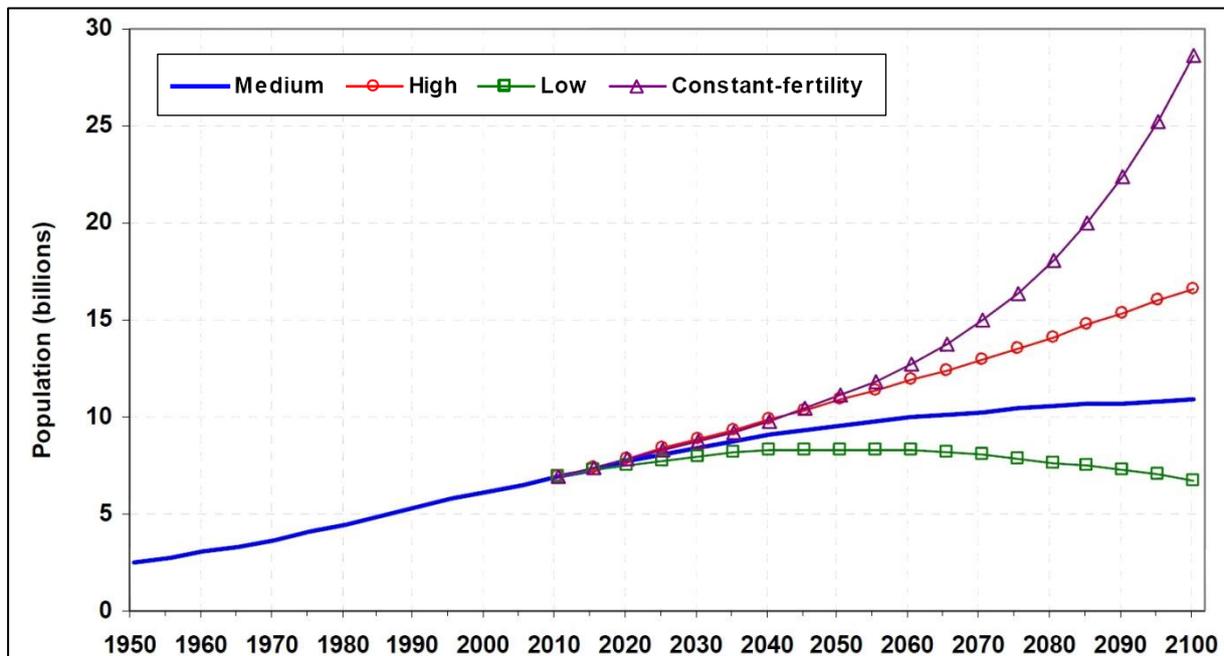


Figure 14 : La population mondiale 1950-2100 d'après différentes projections (Department et al., 2013)

En France, les perspectives d'évolution démographique ont été évaluées lors du projet Explore 2070, dont l'une des thématiques concernait la quantification des pressions anthropiques et des besoins en eau en fonction des évolutions démographiques et socio-économiques. Cette étude réalisée par le Bureau d'Informations et de Prévisions Économiques (BIPE, 2013) s'appuie sur la réalisation d'un scénario tendanciel à stabilité climatique, destiné à évaluer l'impact sur les prélèvements d'eau et pour lequel des projections démographiques sont réalisées.

En amont de cet exercice, il est rappelé qu'« à l'horizon de 20 à 30 ans, les projections démographiques sont généralement considérées comme étant assez robustes, ou "relativement" peu incertaines. Cette robustesse tient au fait que la majorité des générations projetées est déjà née au moment où la prévision est réalisée et que l'on connaît les principales caractéristiques des personnes qui composent ces générations. Il en est autrement à l'horizon 2070 car un peu moins du tiers de la population résidant en France actuellement sera encore présente à cet horizon » (BIPE, 2012). Toutefois, les prévisions démographiques établies correspondent à une vision consensuelle des tendances futures et s'appuient sur les travaux de l'INSEE à horizon 2060 (Blanpain et al., 2010) en prolongeant les tendances à horizon 2070.

Les projections obtenues envisagent qu'au 1<sup>er</sup> janvier 2070, la France métropolitaine devrait compter 75 millions d'habitants, contre 62 millions au 1<sup>er</sup> janvier 2007, soit une **hausse de 13 millions d'habitants** (Figure 15). Cette évolution démographique correspond néanmoins à un ralentissement du rythme de croissance de la population entre 2007 et 2070, sous l'effet du vieillissement de la population et de l'augmentation du nombre de décès qui l'accompagne.

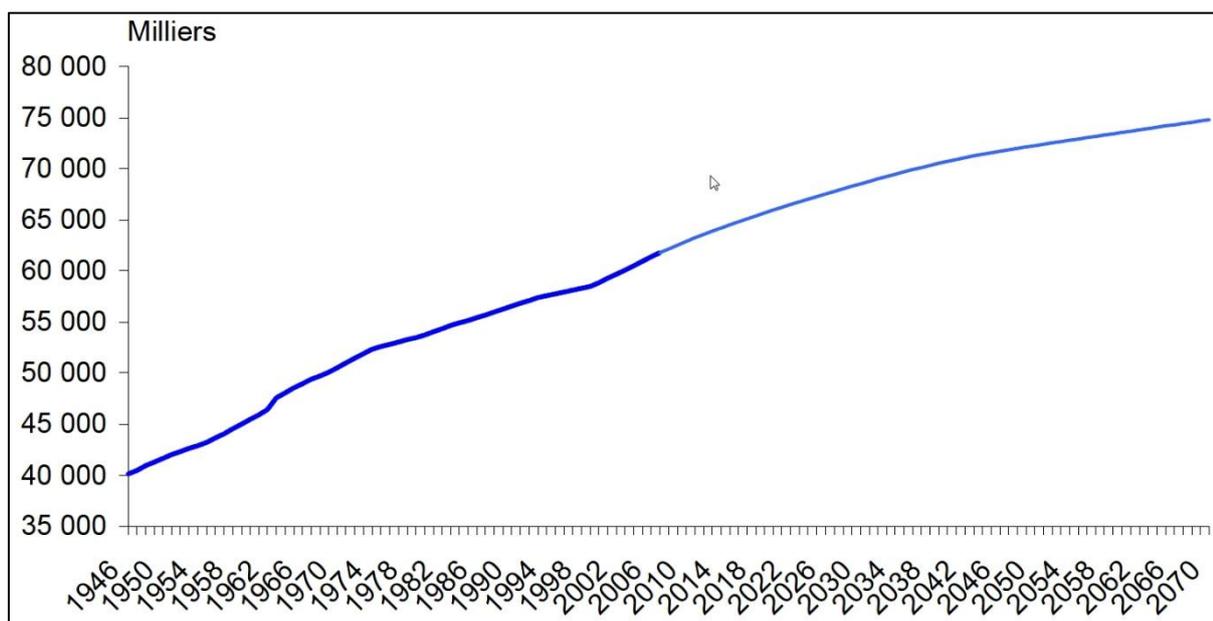


Figure 15 : Evolution de la population en France (1946-2007) et projections à l'horizon 2070 (BIPE, 2012)

Les estimations régionales reposent sur l'utilisation des paramètres de fécondité et de mortalité (solde naturel) dans chaque région ainsi que des quotients migratoires entre les régions métropolitaines. Les hypothèses de projection retenues par l'INSEE à l'horizon 2040 et utilisées par le BIPE à l'horizon 2070 (Figure 16) prévoient un déplacement progressif de la population vers la façade atlantique et vers le sud. Dans le scénario retenu, la région Aquitaine passe d'une population de 2,55 millions d'habitants à 3,15 millions de 1975 à 2008 (+ 23%) et atteindrait 4,2 millions en 2070 (soit une croissance de +33%). Dans le même temps, la région Midi-Pyrénées devrait atteindre 3,95 millions d'habitants en 2070 (+ 41% par rapport à 2008).

Ces chiffres s'expliquent principalement par les migrations entre régions qui jouent un rôle prépondérant dans la démographie régionale et justifient l'essentiel de la croissance démographique observée dans le sud-ouest. En revanche, le solde naturel aura un impact limité sur la croissance démographique des régions. Ainsi, 11 régions dont celles du sud-ouest auront un nombre de décès supérieurs au nombre de naissances.

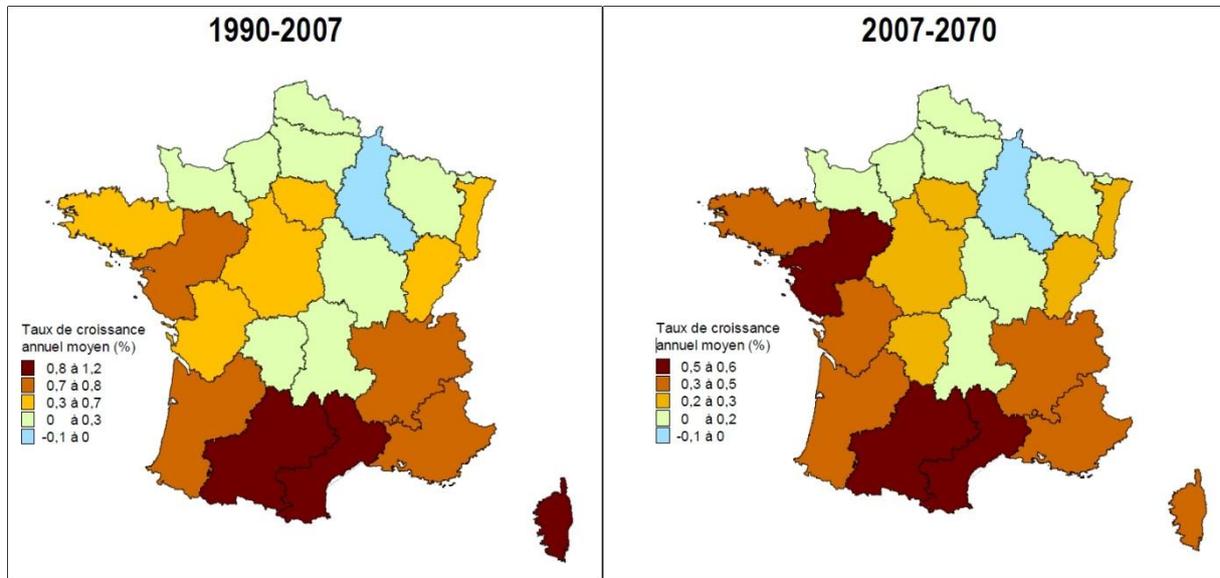


Figure 16 : Accroissement de la population régionale (BIPE, 2012)

#### 4.1.2. Habitudes de consommation

L'estimation de l'évolution des habitudes de consommation s'appuie généralement sur l'analyse des tendances observées depuis plusieurs années. Cette approche montre cependant quelques limites. En effet, à partir des années 1990, une baisse de la demande en eau est constatée (Montginoul, 2013). Celle-ci semble coïncider avec la hausse du prix de l'eau observée, la facture d'eau ayant augmenté d'environ 50% en valeur constante entre 1991 et 2000. Toutefois, **les données disponibles pour caractériser les tendances manquent cruellement**, celles-ci ne pouvant être illustrées qu'au travers d'exemples ponctuels pris en France (Montginoul, 2013). Les conclusions qui en ressortent ne sont alors valables que pour les cas considérés, le caractère représentatif des données récupérées n'étant pas fondé.

L'eau distribuée par les réseaux d'eau trouve différents utilisateurs, depuis le particulier jusqu'à l'entreprise, lesquels disposent de cette eau pour des usages domestiques (boisson, cuisine, douche, ...) mais aussi récréatifs (piscine, arrosage, ...). Ainsi, les facteurs explicatifs du niveau de consommation d'eau et des tendances observées sont multiples (Barraqué et al., 2011). En suivant les travaux précurseurs de Cambon-Grau et Maugendre (1996), Montginoul les répartit en quatre catégories possibles (Figure 17) : **les caractéristiques de l'habitat, celles du ménage, le prix de l'eau et les éventuelles actions de sensibilisation** (Montginoul, 2002).

		<b>Facteurs</b>	<b>Sens</b>	
Caractéristiques de l'habitat	Géographie locale	<b>Température</b> <b>Pluviométrie</b> Taille de la commune	+ - +	
	Nature de l'habitat	Type de logement Localisation du logement Statut du logement  <b>Taille du logement</b>	Immeubles (-) / maisons (+) Campagne (-) / ville (+) Propriétaire (+) / locataire (-) Saisonnier (-) / permanent (+) <b>Logement ancien (+) / récent (-)</b>	
	Équipement du logement	Existence d'un compteur divisionnaire		-
		Accès à la ressource		Unique (+) / diversifié (-)
		<b>Taux d'équipement</b>		+
		Équipements ménagers moins consommateurs d'eau		-
		Contrat d'entretien de la robinetterie		-
		Fuites		+
		Présence d'un jardin		+
		Type d'arrosage		Asperseur (+) / goutte à goutte (-) / arrosage automatisé (-)
Présence d'une piscine		+		
Caractéristiques du ménage		<b>Taille du ménage</b>	+	
		<b>Age moyen du ménage</b>	-	
		<b>Revenu du ménage</b>	+	
		Taux d'activité du ménage	Chômage (-)	
		Catégorie socioprofessionnelle	+/-	
		Comportements socio-culturels vis-à-vis de l'eau	+/-	
Prix de l'eau	<b>Niveau</b>	<b>Tarif élevé</b>	-	
	<b>Évolution du prix</b>	Forte hausse	-	
	<b>Évolution de la facture</b>	(= mix entre l'évolution du prix et de la consommation)	-	
	Structure tarifaire		Monôme (-), binôme (-), forfait (+)	
Actions de sensibilisation			-	

NB : sont indiqués en gras les facteurs produisant des effets statistiquement significatifs ; les + et - indiquent dans quel sens jouent les facteurs (augmentation ou réduction de la consommation d'eau).

Figure 17 : Facteurs explicatifs de la consommation d'eau des ménages (Montginoul, 2013)

Certains de ces facteurs montrent des liens très étroits avec les perspectives de changement climatique. Ainsi, la localisation géographique du logement par exemple joue un rôle majeur dans la consommation. En effet, au-delà d'un certain seuil de température (aux environs de 25 C en moyenne journalière), la consommation augmente significativement ; de même, il est remarqué que plus il pleut, moins les utilisateurs consomment (Montginoul, 2013). On pondérera cependant le propos par le fait que la reconnaissance de ces facteurs explicatifs de la consommation d'eau s'appuie sur des tests statistiques qui peuvent parfois demeurer non significatifs selon les contextes. Ainsi, le climat est un facteur explicatif en Gironde mais pas en Moselle (Montginoul, 2013).

Au final, la question se pose de savoir si la tendance à la baisse, observée en France, de la consommation en eau va se prolonger dans les années qui suivent ou si, au contraire, elle va s'inverser notamment du fait des effets du changement climatique. La réponse à ces questions passe en premier lieu par une meilleure connaissance de la consommation d'eau et du poids des différents facteurs explicatifs. Ceci démontre l'intérêt qu'auraient des études complémentaires, réalisées à des échelles plus fines que le niveau communal. Cela milite aussi pour la mise en place d'observatoires (Montginoul, 2013).

L'enjeu des services d'eau est donc pour l'avenir de résoudre ces deux points (Montginoul, 2013) :

- se doter des moyens et de l'organisation nécessaire à la collecte de l'information afin de mieux caractériser et, de façon pérenne, la typologie de l'habitat, de ses occupants et leur usage de l'eau,
- renforcer le partage de données de référence, et adopter des approches pluridisciplinaires, notamment dans les domaines socioculturels et géographiques.

C'est à ce prix qu'il sera alors sérieusement possible d'envisager de passer de l'observation à une démarche de prospective (Montginoul, 2013).

## **4.2. IMPACT SUR LES PRELEVEMENTS D'EAU**

La démarche adoptée dans le cadre d'Explore 2070 par le BIPE (BIPE, 2012) illustre l'importance de la recherche des facteurs explicatifs de la consommation en eau, tels que décrits par Montginoul (2013), et notamment la caractérisation de la typologie de l'habitat, la taille du ménage ; ces informations, entre autres, servant de base à l'évaluation future des prélèvements en eau.

En effet, la quantification des prélèvements en eau estimée dans le cadre d'un scénario tendanciel à stabilité climatique pour le projet Explore 2070 repose sur un système de modélisation où plusieurs paramètres interagissent.

En préambule, le BIPE rappelle que « *compte tenu de l'horizon de l'étude et des incertitudes majeures qui pèsent sur les évolutions géopolitiques, démographiques, économiques et sociétales à cet horizon, les scénarios tendanciels n'ont pas la prétention de constituer une « prévision » des évolutions futures. Leur objectif est de décrire ce que seraient les pressions sur les ressources - et en particulier sur les ressources énergétiques et les ressources en eau - dans l'hypothèse où la croissance de l'économie française se poursuivait sans heurts majeurs et sur une trajectoire proche du potentiel de croissance à long terme (...). D'autre part, dans l'étude, les scénarios sont choisis de manière à définir une fourchette d'incertitude relative aux résultats attendus, qui sont les besoins en eau et les pressions anthropiques à horizon 2070. Par conséquent, les variables sur lesquelles on fera des hypothèses différentes entre les deux scénarios tendanciels hors changement climatique sont celles qui sont les principales déterminantes - directes ou indirectes - des besoins en eau, ou qui ont une incidence directe sur les pressions anthropiques. En effet, même en admettant le degré d'incertitude élevé qui caractérise les projections faites sur un horizon temporel de 60 ans, l'erreur de prévision ne porte à conséquence dans cette étude que si elle porte sur des variables impactant les besoins en eau. Ainsi, à titre d'exemple, les évolutions attendues en termes de disparités de revenus sont certainement importantes en termes social et sociétal, mais sont moins discriminantes en termes de besoins en eau et d'usages de l'eau que les évolutions dans le domaine de l'habitat et de l'utilisation des sols » (BIPE, 2012).*

#### 4.2.1. Evolution des prélèvements pour l'Alimentation en Eau Potable

Le travail de synthèse réalisée par Rinaudo (2013), concernant les méthodes utilisées en France pour la prévision de la demande en eau potable, avait révélé la relative simplicité des approches retenues. Ce constat peut s'expliquer premièrement par la simplicité des cahiers des charges réalisés par le gestionnaire des services d'eau potable, révélateur de leur manque d'expertise, et les faibles moyens financiers. Une seconde explication vient du fait que le coût de l'erreur de prévision n'est pas dissuasif pour les maîtres d'ouvrage. Un dernier point de vue serait que la relative stabilité des ratios de consommations par habitant rend inutile l'utilisation de méthodes plus sophistiquées.

Concernant les pressions sur l'AEP, différents facteurs jouent sur les prélèvements et la consommation d'eau avec des relations plus ou moins étroites (Figure 18). Les 6 facteurs-clés retenus pour la modélisation (entourés sur le graphique) 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.

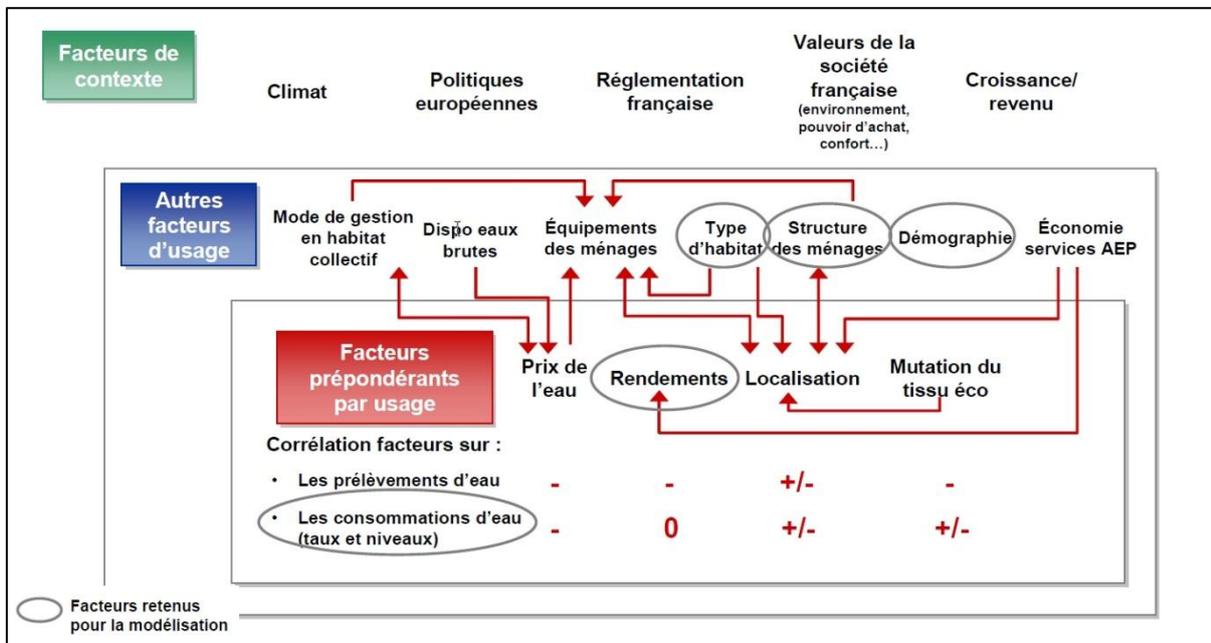


Figure 18 : Structure du modèle de pression sur l'AEP d'Explore 2070 (BIPE 2011 d'après étude AESN 2005)

Chacun de ces facteurs clés montre des degrés de relation différents avec les niveaux de prélèvements (Figure 19).

	Facteurs	Corrélation facteur /prélèvement	Commentaires	Évolution 2010-2070
Consommation d'eau	Démographie	++++	L'alimentation en eau potable est destinée à 80-85 % aux besoins de la population	Croissance démographique soutenue, (façade atlantique, méditerranée)
	Structure des ménages	+++	Non proportionnalité entre consommation et taille des ménages (facteur compris entre 1 et 2,8)	Augmentation du nombre de ménages « solos » et « couples sans enfants »
	Type d'habitat	++	Plus de consommations d'eau en habitat individuel (facteur compris entre 1 et 1,5)	Voir scénario « étalement » et scénario « concentration »
	Consommation par habitant	+++	En diminution graduelle (asymptote à partir de 2040)	Habitat collectif -0,3%/an Habitat individuel - 0,6 %/an
Prélèvements	Consommation / prélèvement	+++	Stable à long terme (ratio à chercher)	0% / an
	Taux de rendement primaire des réseaux	+++	Le taux de rendement primaire va conditionner les niveaux de prélèvement	+ 0.1%/an à + 0,3%/an

Figure 19 : Corrélations entre les 6 facteurs-clés de modélisation et les niveaux de prélèvements AEP (BIPE, 2011)

Les valeurs des évolutions 2010-2070 proviennent des résultats de l'analyse rétrospective, de la bibliographie et des entretiens auprès des experts rencontrés dans le cadre du projet Explore 2070.

On précisera simplement que les projections de consommation et de prélèvement s'évaluent selon deux scénarios établis pour le type d'habitat :

- le scénario **étalement urbain** part du constat suivant : le territoire se péri-urbanise dans une dynamique de dispersion de la population. Les espaces urbains se dilatent progressivement pour se développer en périphérie des villes. Le coût de plus en plus élevé des logements urbains est une des raisons pouvant justifier ce phénomène. Ce scénario retient l'hypothèse que 30% des nouveaux ménages choisissent de vivre en appartement et 70% privilégient des maisons individuelles.
- le scénario **concentration urbaine** s'inscrit dans une logique de développement durable et est censé répondre au problème de manque d'espace. Cette nouvelle dynamique territoriale, qui touche surtout le Japon et les Etats-Unis, commence à apparaître en Europe. Les villes se verticalisent, les immeubles deviennent de plus en plus hauts, et la densité de population croît fortement dans les pôles urbains. Ce scénario se fonde sur l'hypothèse que 70% des nouveaux ménages choisissent de vivre en appartement.

A partir de ces deux scénarios, les conséquences en termes d'occupation du sol, au niveau national, indiquent que la part occupée par l'habitat sur le territoire français augmente (Figure 20).

	2010	2070	
		concentration	étalement
Habitat	2,1%	2,5%	4,2%
Autres	7,3%	7,5%	15,9%
Total	9,4%	10,0%	20,1%

Figure 20 : Part du territoire occupée respectivement par l'habitat/autres surfaces construites

Quel que soit le scénario envisagé (étalement ou concentration), la répartition de la surface artificialisée sur le territoire varie selon les régions (Figure 21 et Figure 22) : les Pays-de-la-Loire, l'Aquitaine, Midi-Pyrénées ou encore le Rhône ont les surfaces artificialisées les plus importantes, du fait principalement de leur superficie, qui les classe parmi les plus grandes régions de France. A l'inverse, l'Alsace, la Haute-Normandie, la Franche-Comté, le Limousin et la Corse sont les régions qui disposent le moins de surfaces artificialisées.

A l'horizon 2070, les régions dont la surface artificialisée est la plus grande, telle que l'Aquitaine, voient leur part augmenter, tandis que celles dont la surface artificialisée est la plus faible voient leur part se réduire.

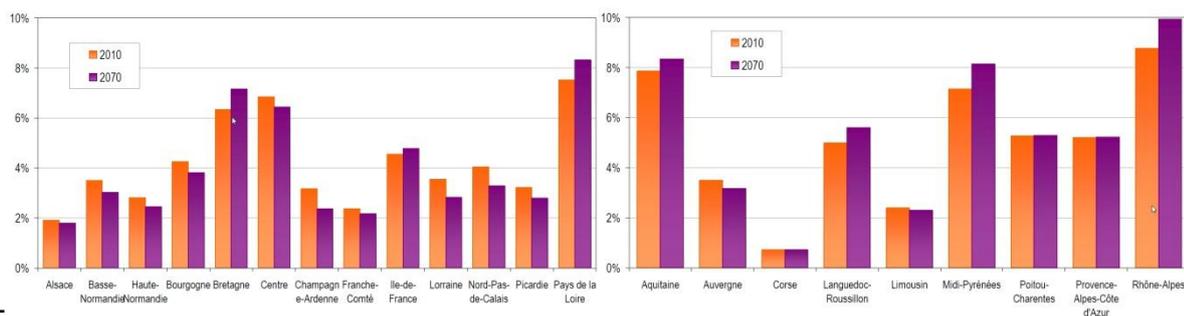


Figure 21 : Part de la région dans la surface artificialisée nationale (scénario étalement - calculs BIPE)

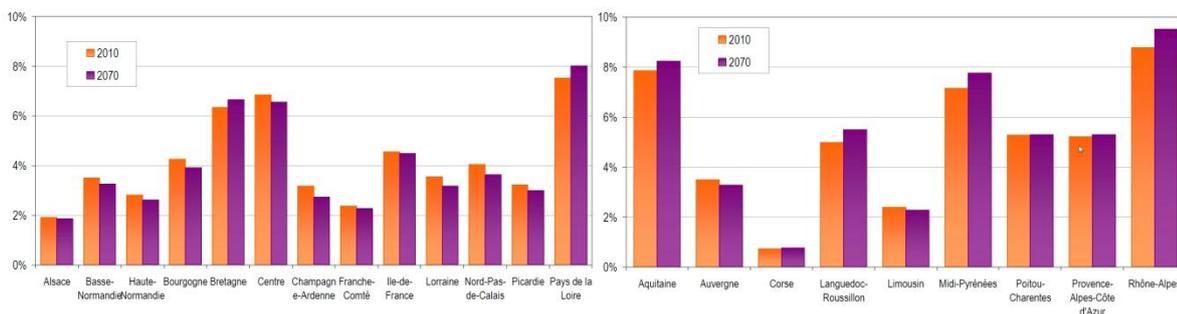


Figure 22 : Part de la région dans la surface artificialisée nationale (scénario concentration - calculs BIPE)

Les projections de prélèvements et de consommation pour l'AEP sont effectuées par bassin versant, les hypothèses d'évolution des facteurs-clés étant homogènes à l'échelle du bassin. De plus, les mêmes variations des prélèvements et consommations s'appliqueront à long terme pour les prélèvements en eaux superficielles et en eaux souterraines d'un même bassin. Par contre, les transferts d'eau depuis leur point de prélèvement dans un bassin pour une distribution dans un autre bassin versant ne sont pas pris en compte, sauf dans le cas de Paris.

La méthode a consisté à faire varier, sur la période 2006-2070, les 6 facteurs-clés pour aboutir *in fine* à une projection chiffrée des prélèvements en eau sur chacun des bassins versants. Parmi les variations appliquées à ces facteurs-clés, certaines sont communes quel que soit le bassin versant car ce sont des facteurs pas ou peu influencés par les spécificités locales (il s'agit des 3 facteurs correspondant à l'évolution de la quantité d'eau consommée par personne et par ménage, à l'évolution des quantités d'eau consommées selon le type d'habitat et au taux de consommation d'eau par rapport aux prélèvements.). Les 3 autres facteurs-clés sont spécifiques au bassin versant et les variations sont donc appliquées à l'échelle du bassin versant.

A l'échelle nationale, la combinaison des différentes hypothèses, selon les deux variantes d'implantation de l'habitat, aboutit à un niveau de prélèvement d'eau potable de 5 171 millions de m<sup>3</sup> pour le scénario « concentration » et de 5 476 millions de m<sup>3</sup> pour le scénario « étalement » (Figure 23). Ainsi au cours de la période 2006-2070, les prélèvements d'eau potable diminuent de 12% dans le scénario « concentration » et de 7% dans le scénario « étalement ».

En effet, malgré une progression de 40% des prélèvements due à la croissance du nombre de ménages, celle-ci est contrebalancée, entre autres, par les économies d'eau réalisées par chaque ménage (effets technologique et comportemental) qui sont de -29% dans le scénario « concentration » et -25% dans le scénario « étalement », mais aussi par l'amélioration du rendement des réseaux (besoin économique et réglementaire depuis l'article 161 de la loi de Grenelle II de juillet 2010) qui s'accompagne d'une baisse de 11% des prélèvements.

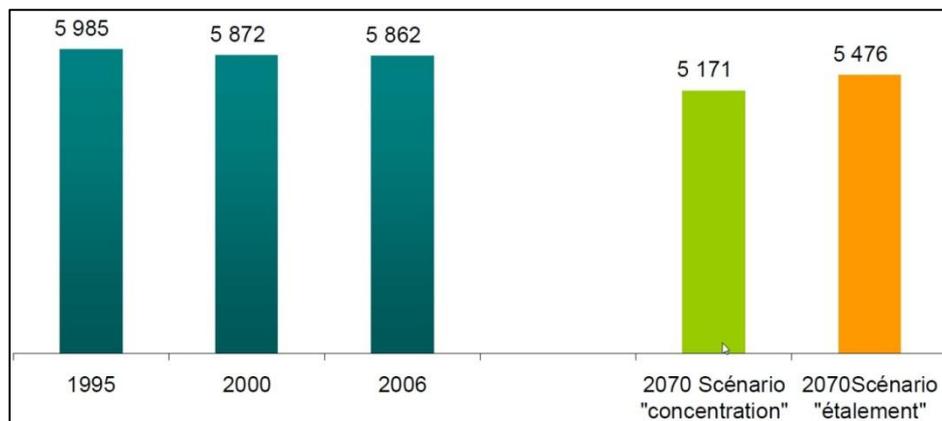


Figure 23 : Évolution à long terme des volumes d'eau prélevés pour l'eau potable à l'échelle nationale en millions de m<sup>3</sup> (Agences de l'Eau - SOeS et projections BIPE 2011)

Cette progression des prélèvements d'eau potable concerne essentiellement les bassins versants situés sur la façade atlantique et la Méditerranée, en conformité avec les projections démographiques (Figure 24). Ainsi, dans le bassin Adour-Garonne, les évolutions prévues indiquent que les prélèvements seraient supérieurs à l'actuel, le long du littoral aquitain ainsi qu'au sud d'une ligne allant d'Agen jusqu'à la Méditerranée.

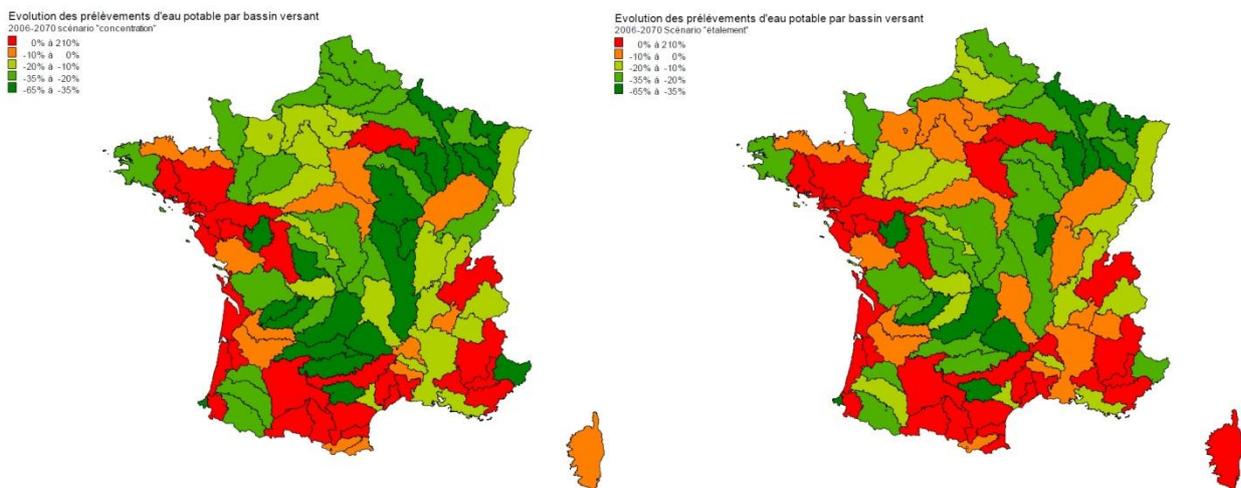


Figure 24 : Variation des volumes d'eau prélevés pour l'eau potable par bassin versant entre 2006 et 2070 - à gauche, le scénario « concentration » ; à droite, le scénario « étalement » (BIPE, 2012)

En Aquitaine, un exercice d'évaluation des besoins futurs pour l'AEP a été réalisé par le SMEGREG (Syndicat Mixte d'Etudes pour la Gestion de la Ressource en Eau du département de la Gironde). Cet exercice qui s'inscrit dans le cadre de la révision du SAGE Nappes profondes de Gironde (SMEGREG, 2010) doit permettre également de répondre au besoin d'adaptation à l'évolution de la demande en eau, engendrée par la croissance démographique que connaît la Gironde. En effet, le dynamisme et l'attractivité de la métropole bordelaise a conduit ces dernières années à une forte augmentation de la population (INSEE, 2013) et une augmentation de près de 12% est attendue entre 2006 et 2030 (SMEGREG, 2010). De plus, le projet métropolitain de la CUB (Communauté Urbaine de Bordeaux) appelle une croissance renforcée et orientée de la population sur la principale agglomération. Ce projet de « CUB Millionnaire » représenterait plus de 200 000 habitants supplémentaires affichant alors un taux d'accroissement de plus de 40% (Figure 25).

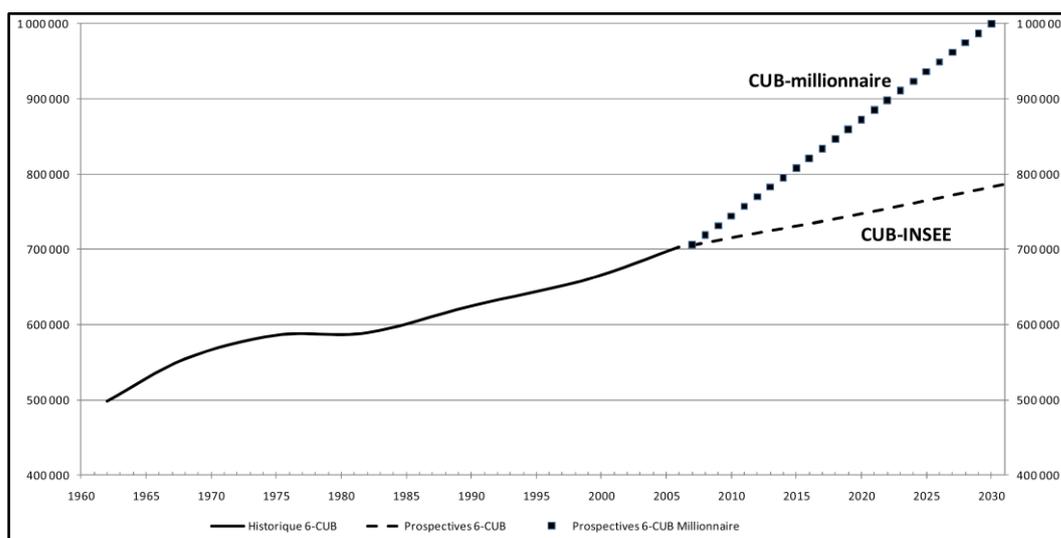


Figure 25 : Historique et prospective de la population de la CUB selon le scénario INSEE et « CUB-millionnaire » (SMEGREG, 2010)

L'évaluation des besoins futurs repose également sur des scénarios prospectifs combinant les besoins unitaires des habitants (Figure 26) et le rendement des réseaux. Dans le premier cas, compte tenu des tendances observées, le SMEGREG propose de retenir une économie de 6,7% de la consommation, par rapport aux prélèvements de 2005. Ces économies d'eau seraient réalisées d'ici 2021. Au-delà, la consommation d'eau par habitant se stabiliserait. Dans le second cas, les estimations de l'amélioration du rendement des réseaux d'eau potable sont basées sur les données fournies par le Conseil Général de la Gironde, issue de l'étude de réactualisation du schéma directeur de 2005. Le scénario pris en compte considère une atteinte progressive à l'horizon 2021 des performances des réseaux de la moyenne départementale de 2005 (Indice de pertes par abonnés de 0,11 m<sup>3</sup>/j/abonné), pour tous les services dont les performances étaient inférieures à cette moyenne en 2005. Au-delà de 2021, le rendement des réseaux est considéré comme stable. Les collectivités en niveau de perte inférieur à la moyenne pondérée restent à leur niveau de performance 2005.

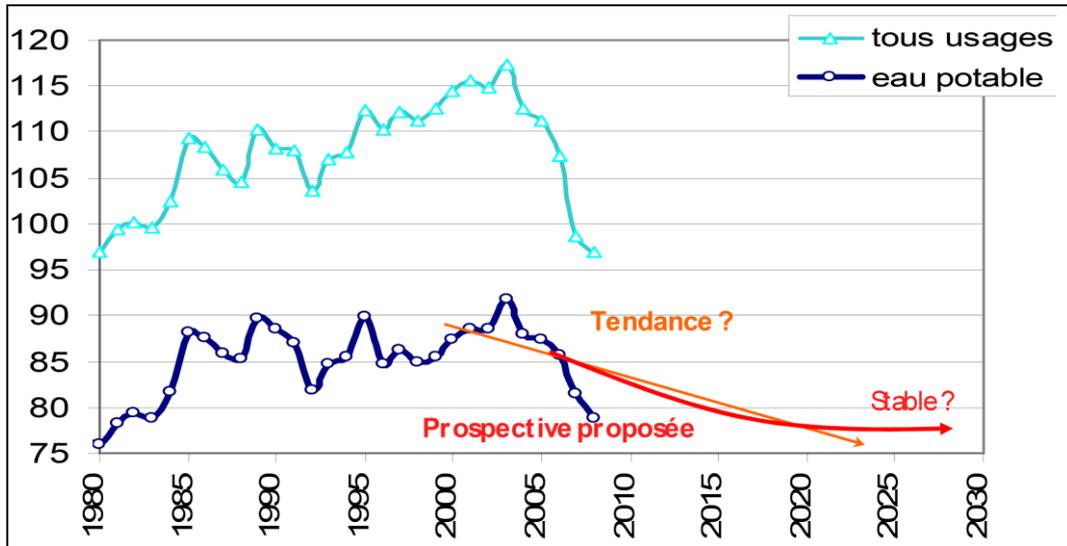


Figure 26 : Hypothèse de prélèvements unitaires dans les nappes profondes de Gironde pour l'usage eau potable (m³/an/habitant) (SMEGREG, 2010)

Les différentes hypothèses retenues conduisent toutes à une augmentation des prélèvements pour l'AEP d'ici 2030 (Figure 27). Aucune ne tient compte du scénario « CUB Millionnaire » qui, s'il se traduit par un gain net d'habitants sur le département (+ 217 000 à 2030), représentera alors un besoin nouveau de 16,9 millions de m³/an, en supposant une économie d'eau sur les usages, et 18,9 millions de m³/an sinon.

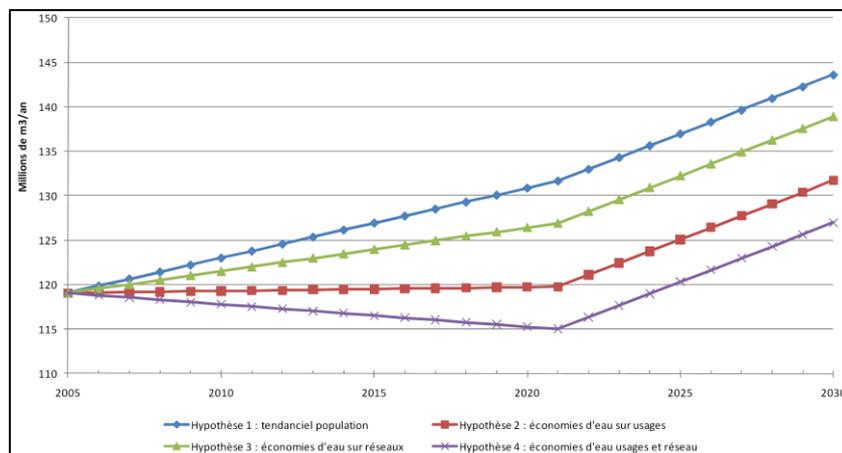


Figure 27 : Hypothèses de prélèvement pour l'AEP (SMEGREG, 2010)

Dans le cadre de l'hypothèse 4 (Figure 27) considérant des économies d'eau sur les usages et sur le réseau, il apparaît que « la croissance démographique rapide de la métropole aboutit au renversement de la tendance à la baisse induite par l'évolution des habitudes de consommation. Jusqu'alors, l'augmentation du nombre de consommateurs était compensée par la baisse de leur consommation unitaire. Or, à partir de 2021, les consommations unitaires stagnent (« effet plancher » car tous les gisements éventuels d'économie d'eau ont été mobilisés), tandis que les soldes naturel et migratoire restent positifs sur son territoire. La consommation globale de la métropole connaît alors un renversement de sa tendance pour croître de manière régulière. La métropole se trouve alors dans une situation paradoxale où la cité, bien qu'entièrement équipée de matériels hydro-économiques, voit son empreinte sur la ressource croître annuellement » (Isnard, 2013).

#### 4.2.2. Evolution des prélèvements pour l'agriculture

Les prévisions pour les prélèvements en eau sont d'autant plus difficiles dans les régions où les prélèvements en eau se font à destination de l'agriculture en raison des fortes incertitudes liées à la demande future et aux développements technologiques.

Des projections de surfaces cultivées par type de culture et par région à l'horizon 2070 ont été proposées dans le scénario tendanciel selon les deux variantes élaborées par le BIPE. Pour obtenir la demande en eau des cultures, le modèle, mis au point par Energies Demain et relaté dans le rapport du BIPE (BIPE, 2012), commence par calculer le besoin en eau mensuel de chacune des cultures. Ce besoin en eau des cultures est ensuite comparé aux précipitations sur les surfaces cultivées. Les besoins en eau sont reconstitués à la fois pour les cultures irriguées et les cultures qui ne le sont pas. Si ces précipitations ne sont pas suffisantes pour satisfaire l'ensemble des besoins en eau des cultures et que la surface est irriguée, alors un apport supplémentaire par irrigation est nécessaire. Le volume d'eau qui est effectivement apporté pour l'irrigation dépendra ensuite de l'efficacité du système d'irrigation. Pour un système d'irrigation très efficace (goutte à goutte), le volume apporté sera proche de la différence entre les besoins en eau des cultures et les précipitations mais pour certains systèmes beaucoup moins efficaces (irrigation gravitaire), le volume apporté peut être jusqu'à deux fois supérieurs à celui effectivement nécessaire pour compléter les besoins en eau des cultures.

A l'échelle nationale, sur la base de ces hypothèses, les prélèvements d'eau à destination de l'agriculture devraient augmenter de 66% dans la variante « concentration » et de 43% dans la variante « étalement » (Figure 28). L'agriculture devrait ainsi prélever 5,4 à 6,3 milliards de m<sup>3</sup> d'eau en 2070 selon la variante de type d'habitat retenue.

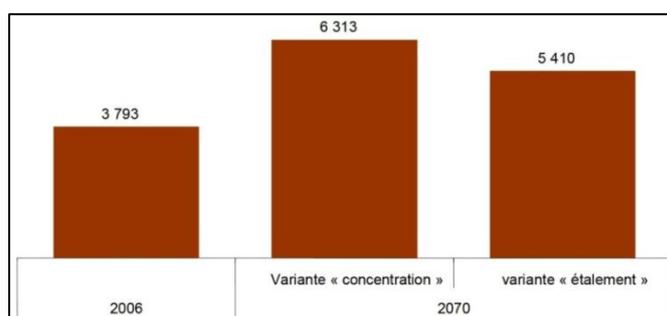


Figure 28 : Prélèvements d'eau en millions de m<sup>3</sup> pour l'irrigation à l'horizon 2070 selon le type de variante du scénario tendanciel (Agences de l'Eau - SOeS et projections Energies Demain)

Par ailleurs, l'étude de BRL Ingénierie (Chazot et al., 2012) sur les ressources et besoins en eau en France à l'horizon 2030 rapporte que de nombreux travaux prospectifs à l'échelle nationale élaborent des scénarios concernant les futurs possibles de l'agriculture en France aux horizons 2020-2030. L'étude rappelle que certains de ces travaux adoptent une approche dans laquelle l'agriculture constitue l'élément central de la réflexion. D'autres étudient l'agriculture au sein d'un système intégré et influencé par d'autres facteurs (prix de l'énergie, organisation de l'espace rural, réforme de la PAC etc.). Certains exercices comprennent une estimation des futures surfaces agricoles irriguées selon chacun des scénarios qu'ils proposent. Au final, la diversité des scénarios possibles montre qu'au-delà des scénarios tendanciels étudiés par le BIPE, d'autres scénarios sont vraisemblables, rendant délicat le chiffrage des surfaces irriguées et des prélèvements en eau agricole. **L'agriculture française à l'horizon 2030 dépendra de différents facteurs avec en particulier la politique agricole (PAC) et la politique environnementale, notamment concernant les ressources en eau.**

Ces décisions peuvent être mises en relief par l'exemple de l'Aquitaine. Avec 303 000 ha de surface irrigable, elle est la première région pour la part de la surface agricole utilisée (Aquitaine, 2013). La moitié des pompages est effectuée dans la nappe des Sables des Landes (Figure 29).

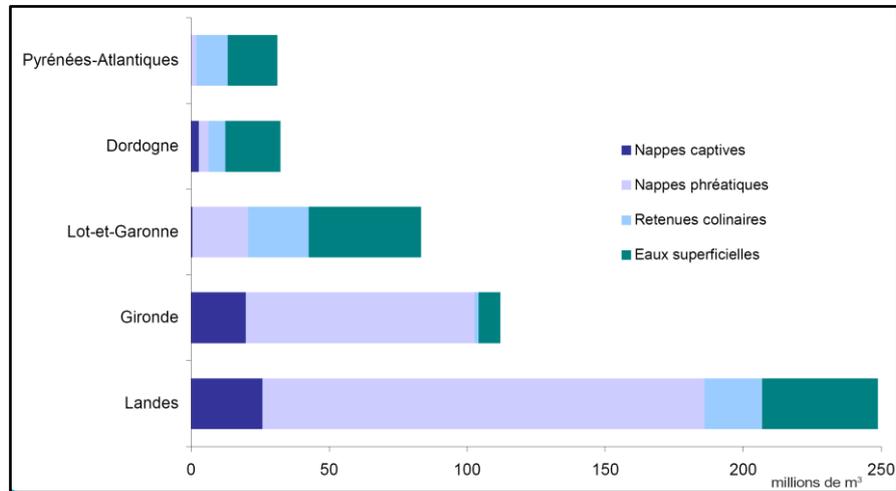


Figure 29 : Volumes prélevés pour l'irrigation selon l'origine de l'eau (Agreste Agriculture, 2013 repris des données Agence de l'eau Adour-Garonne 2010)

Le développement de l'irrigation a été fortement lié à celui du maïs qui totalise, en 2010, trois quarts des surfaces irriguées d'Aquitaine. La région a vu ses surfaces irrigables croître de façon constante jusque dans les années 2000 (Aquitaine, 2013). Ainsi, entre 1979 et 2000, les surfaces équipées pour l'irrigation sont passées de 178 000 ha à plus de 350 000 ha. Les années 2000 marquent un tournant avec la diminution des surfaces en maïs (amorcée à partir des années 1990), l'évolution de la PAC et du contexte réglementaire relatif aux usages de l'eau ainsi que les changements en matière de rotations culturales. Sur la décennie qui a suivie (2000-2010), la superficie irrigable régionale a perdu un ha sur sept, soit près de 50 000 ha au total. En Aquitaine, la perte des terres irrigables est supérieure à celle observée au niveau national (-14% contre -12%). Cet exemple montre que dans une région où la contrainte environnementale sur les ressources en eau est forte, la demande en eau pour l'agriculture constitue une incertitude importante. Dans cette région, l'avenir de l'irrigation se décidera en fonction des autres contraintes et des décisions d'investissements (barrages, transferts...). Ces décisions dépendront de facteurs réglementaires d'une part, et politiques d'autre part, qui s'exprimeront par le biais des politiques régionales d'investissement (Chazot et al., 2012).

#### 4.2.3. Evolution des prélèvements pour l'industrie

La dénomination d'industrie recouvre tout un panel dont les principaux prélèvements en eau sont à destination des secteurs de la chimie, de la papeterie, de l'agro-alimentaire ou encore des usines d'incinération des ordures ménagères pour les plus importants (BIPE, 2012). Les volumes de 2006 en France proviennent à 56% des eaux de surface et à 44% des eaux souterraines, pour un total de 3,28 millions de m<sup>3</sup>.

La modélisation des pressions industrielles sur l'eau, autrement dit la projection des prélèvements industriels à long terme, a été réalisée sur la base de l'évolution de plusieurs variables-clés qui dimensionnent les volumes d'eau nécessaires au fonctionnement des usines.

Ces variables-clés sont :

- l'activité économique et les perspectives à l'horizon 2070 de la production en volume,
- la capacité à améliorer les procédés pour diminuer les prélèvements d'eau,
- la nature des circuits de refroidissement (circuits fermés, ouverts ou mixtes) : les prélèvements les plus importants en eau sont destinés au refroidissement qui sont effectués principalement en rivière pour être rejetés sur place.

La projection réalisée s'appuie sur des hypothèses fortes compte-tenu des réalités du secteur industriel :

- Il est considéré que les sites en activité en 2006 le seront encore en 2070. Il n'est pas possible de pointer les sites qui risquent de disparaître, ceux qui vont se maintenir, se développer ou bénéficier de la fusion concentration avec l'activité d'autres sites.
- Il est considéré que les économies d'eau sont réalisées au même rythme quel que soit le secteur (baisse asymptotique). Dans la réalité, certains secteurs ont encore de nombreux progrès à faire dans le domaine des économies d'eau tandis que d'autres sont arrivés à une certaine limite basse en matière de prélèvement et de consommation d'eau.

Dans la continuité des observations faites depuis 1970 (baisse constatée des prélèvements de plus de 30% entre 1970 et 2005), les prélèvements d'eau par l'industrie en France devraient baisser de 56% entre 2006 et 2070 (Figure 30). Le cheminement de baisse des prélèvements d'eau dans l'industrie suit l'évolution de l'investissement des entreprises. Les prélèvements d'eau dans l'industrie devraient connaître une accélération de leur rythme de décroissance entre 2020 et 2040, période où les investissements des entreprises seront soutenus.

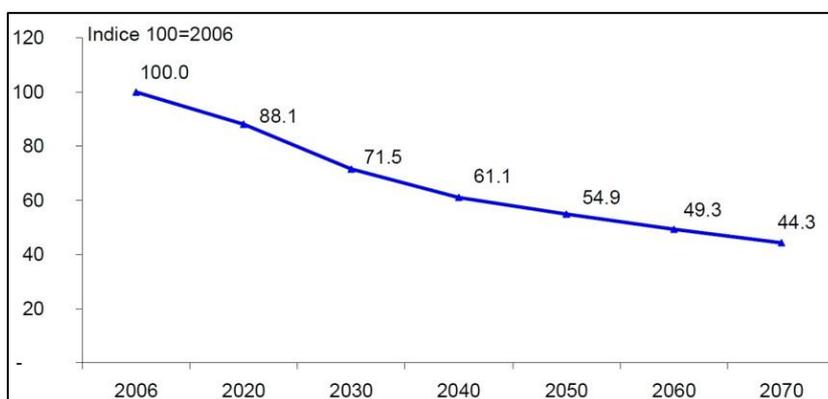


Figure 30 : Evolution des prélèvements d'eau pour l'industrie (BIPE, 2012)

En Aquitaine, une baisse pourrait également être envisagée, dans la continuité de la tendance observable depuis 1971 sur la chronique des prélèvements industriels en Aquitaine (Figure 31). Au regard de l'ensemble des volumes prélevés dans les eaux souterraines, les volumes industriels ne représentent qu'un faible pourcentage des prélèvements.

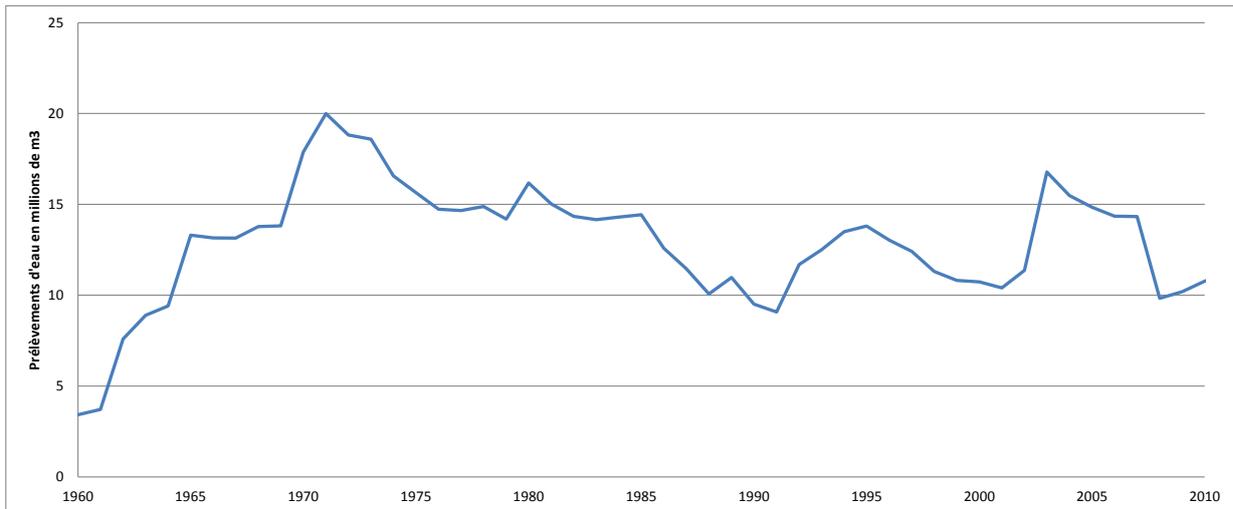


Figure 31 : Evolution des prélèvements en eau en millions de m<sup>3</sup> par an pour l'usage industriel en Aquitaine (source BRGM)

#### 4.3. IMPACT LIE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

**Les impacts de divers usages (AEP, agriculture, énergie et industrie) sur les prélèvements d'eau ont été fixés indépendamment de l'effet du changement climatique.** On identifie cependant très bien les facteurs pris en compte dans l'établissement des scénarios qui sont directement ou indirectement impactés par le changement climatique :

- **Les migrations démographiques** peuvent être modifiées du fait du changement climatique. En effet, actuellement, le sud de la France est globalement plus attractif que le nord, et on observe une lente migration de la population du nord du pays vers le sud du pays : cette tendance peut être modifiée, notamment en ce qui concerne les personnes âgées, du fait de l'inconfort thermique des fortes chaleurs du sud que le changement climatique est susceptible d'amplifier. L'attractivité d'une destination touristique est également le résultat de nombreux facteurs, et nombre d'entre eux sont liés au climat. La modification des migrations due au changement climatique (temporaires pour les touristes, permanentes pour les habitants) a des implications sur les besoins d'investissement dans les infrastructures et le bâtiment (ONERC, 2010).

- **La consommation en eau potable** est à la baisse depuis quelques années. Ces variations sont très dépendantes par exemple de l'évolution des formes d'urbanisme (Desprats et al., 2013) ou encore de l'évolution de la tarification de l'eau (Rinaudo et al., 2012) et de nombreuses études doivent encore être menées pour modéliser ces impacts. Cependant, ces variations de consommation sont également très dépendantes du climat. Dans le cadre d'une étude de l'impact du changement climatique sur l'AEP (SMEGREG, 2009), le SMEGREG met en évidence le parallélisme entre la demande en eau et la température maximale journalière en été (Figure 32). Ainsi, la consommation en eau augmente en corrélation avec celle de la température sans effet retard (aucune perdurance du phénomène n'est observée). L'étude met en avant une meilleure corrélation en croisant la consommation avec la température maximale au pas de temps journalier. Ceci a des impacts, in fine, non seulement sur la production AEP mais aussi sur le dimensionnement des infrastructures d'AEP, notamment en période de pointe.

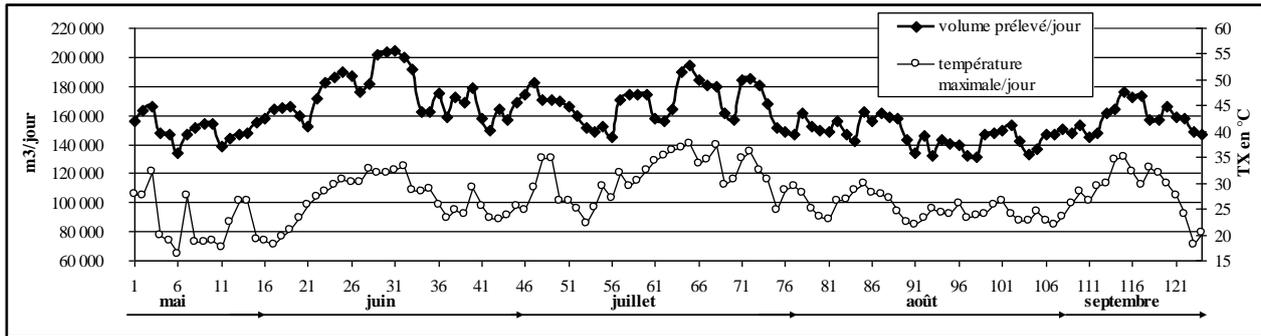


Figure 32 : Volume prélevé pour la CUB et température maximale journalière durant l'été 2006 (SMEGREG, 2009)

- **Les rendements des réseaux** : les variations climatiques et notamment les périodes de sécheresses font prendre conscience de la rareté de l'eau et pourront inciter les collectivités locales à améliorer les rendements de leurs réseaux de distribution (BIPE, 2012).

- **Les besoins pour l'agriculture** sont nettement impactés par le changement climatique. D'une part, il pourrait jouer indirectement sur les besoins agricoles car des changements d'assolement pourraient être envisagés afin d'adapter les cultures aux conditions climatiques. D'autre part directement, au travers de la modification des précipitations et des températures futures qui aura un rôle prépondérant sur les besoins en eau des cultures. On rappelle ici que la température est le moteur du développement des plantes, dans une gamme qui varie selon l'espèce considérée et que l'eau représente généralement le premier facteur limitant la croissance d'une plante et le rendement des cultures (Brisson et al., 2013). Quelques études mettent par ailleurs en évidence un allongement des cycles végétatifs du sud vers le nord de la France qui à terme pourrait poser problème si cela devait entraîner un nouveau développement des irrigations dans des régions plus septentrionales (ONERC, 2007). Au contraire, dans des régions jusque-là peu soumises aux restrictions d'eau, la situation future nécessitera l'instauration d'une gestion de l'eau, en particulier celle destinée à l'irrigation. Certaines études montrent que des réflexions sont en cours quant à la mise en place d'outils de gestion des prélèvements dans ce contexte (Montginoul et al., 2011). Au final, le maintien d'une activité agricole de qualité et économiquement rentable dans un contexte de changement climatique impose la mise en œuvre de modifications dans les systèmes de culture qui constitueront un défi d'innovation et d'adaptation pour les agriculteurs (Brisson et al., 2013).

- **Les secteurs industriels** sont souvent considérés comme étant moins vulnérables aux incidences du changement climatique que des secteurs tels celui de l'agriculture (GIEC, 2008). Parmi les principales exceptions, on trouve les installations industrielles situées dans des régions sensibles au climat (telles que des plaines inondables) et celles dépendant de produits de base sensibles au climat, telles que les installations de transformation des aliments. L'ONERC (2012) rappelle cependant que le secteur industriel est un secteur très important de l'économie nationale et de la balance commerciale, mais à ce jour on dispose de peu d'éléments sur sa sensibilité à l'évolution future du climat.

#### 4.4 EN RESUME

Les prévisions démographiques et d'évolution des consommations ont fait l'objet de plusieurs modélisations prospectives dont celle, d'envergure nationale, menée par le BIPE pour le projet Explore 2070 (BIPE, 2012). Cette étude met en lumière la complexité de l'évaluation de la demande en eau future du fait de la multitude de paramètres à intégrer.

Il en ressort une quasi-stagnation des prélèvements à l'horizon 2070 mais avec des cheminements différents. La baisse des prélèvements est beaucoup plus marquée dans l'industrie (-56%) alors que dans l'AEP, elle varie entre 12% (variante « concentration ») et 7% (variante « étalement »). On notera qu'en Aquitaine, une augmentation, envisagée conséquente de la population devrait conduire à une forte hausse de la demande en eau potable que ne sauraient enrayer la diminution de consommation d'eau par habitant et l'augmentation du rendement des réseaux (SMEGREG, 2010). Les prévisions pour l'agriculture se heurtent à de nombreuses incertitudes. Dans le cadre du projet Explore 2070, le BIPE avait estimé une hausse des prélèvements pour l'irrigation de l'ordre de 66% dans la variante « concentration » et de 43% dans la variante « étalement ». Les prélèvements d'eau pour l'énergie nucléaire, compte tenu d'un parc identique à celui de 2006, sont identiques à ceux de 2006. Cet aspect n'a pas été traité ici car l'ensemble des prélèvements s'effectue sur les eaux de surface (cours d'eau de la Garonne). Par ailleurs, une progression de 16 à 25% de la consommation totale d'eau est observée. Cette progression est essentiellement liée à la consommation d'eau pour l'irrigation.

Les impacts de divers usages (AEP, agriculture, énergie et industrie) sur les prélèvements d'eau ont été fixés indépendamment de l'effet du changement climatique. On identifie cependant très bien les facteurs pris en compte dans l'établissement des scénarios qui sont directement ou indirectement impactés par le changement climatique.



## 5. Sélection de piézomètres pouvant définir un réseau d'observation

« *Se doter d'outils efficaces de suivi des phénomènes de déséquilibre structurel, de rareté de la ressource et de sécheresse dans un contexte de changement climatique* » est une action majeure proposée par l'Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique (ONERC, L'adaptation de la France au changement climatique. Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique, 80 p., 2012) . Il paraît en effet nécessaire d'augmenter notre capacité de suivi de la ressource en eau à moyen et long termes.

C'est notamment dans ce contexte qu'une recherche d'ouvrages doit être réalisée afin de définir un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines. Cette recherche a déjà fait l'objet d'une étude confiée par l'ONEMA au BRGM en 2010 et pour laquelle 3 rapports existent :

- RP-59286-FR (Vernoux & Seguin, Établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines - année 1. Rapport final - BRGM/RP-59286-FR, 129 p., 69 ill., 27 tab., 4 ann, 2011),
- RP-61020-FR (Vernoux & Seguin, Établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines - année 2. Rapport final - BRGM/RP-61020-FR, 93 p., 40 ill., 3 tab., 3 ann, 2012),
- RP-61807-FR (Vernoux & Seguin, Établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines - (année 3) et essai de détermination d'un index piézométrique standardisé. Rapport BRGM/RP-61807-FR, 110 p., 66 ill., 4 ann, 2013).

Les différents éléments de ces rapports sont repris par la suite.

La mise en place d'un réseau d'observation piézométrique doit permettre d'évaluer et de suivre l'impact d'un changement climatique sur le niveau des nappes d'eau souterraines indépendamment de toute influence anthropique. La création de ce réseau nécessite tout d'abord l'analyse des séries piézométriques existantes afin d'identifier les piézomètres qui ne subissent pas d'autres effets que le changement climatique. Cette étape est importante pour déterminer les méthodes d'analyse de chroniques et les critères de sélection d'ouvrages pertinents pour la mise en évidence de l'impact du changement climatique sur les niveaux piézométriques. Dans un second temps, un découpage du territoire en zones de tailles raisonnables doit être réalisé afin de sélectionner ou créer un piézomètre qui sera dédié au suivi du changement climatique.

### 5.1. ANALYSE DE L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE NIVEAU PIEZOMETRIQUE

Mis à part le phénomène de drainance, l'infiltration des eaux de pluie au niveau des zones d'affleurement est prépondérante dans le processus de recharge des aquifères. Les volumes d'eaux météoriques qui s'infiltrent se répercutent donc sur les niveaux piézométriques. La quantité de recharge sera directement impactée par le changement climatique mais sera difficile à évaluer dans la mesure où différents paramètres interviennent (quantité et intensité des précipitations, variations de température, modification de la couverture végétale, du type de sol ou encore de la concentration en dioxyde de carbone). Il est donc évident que l'observation des

niveaux piézométriques et l'interprétation qui peut en être faite peuvent permettre d'évaluer l'impact du changement climatique. Il est cependant fondamental de connaître la part des prélèvements en eau souterraine dans l'évolution des niveaux des nappes associées. En effet, dans de nombreux aquifères, on constate une tendance à la baisse des niveaux due à des pompages dépassant la recharge sans pour autant qu'il y ait une modification des variables climatiques. Afin de détecter d'éventuelles tendances liées au changement climatique sur les niveaux d'eau souterraine en France, une analyse statistique des données de suivi piézométrique a été réalisée sur un nombre important d'ouvrages issus de la banque ADES. Elle vise à détecter, dans un premier temps, une non-stationnarité dans les chroniques piézométriques dont les causes seront recherchées dans un second temps.

Les ouvrages utilisés pour l'analyse statistique étaient sélectionnés selon les critères suivants :

- durée de la chronique supérieure à 25 ans : la durée retenue initialement était de 30 ans (Vernoux et Seguin, 2011) afin de disposer d'un nombre de chroniques suffisant et bien réparti mais aussi pour une bonne significativité des tests statistiques, En 2<sup>ème</sup> année d'étude, ce critère a été abaissé à 25 ans (Vernoux & Seguin, Établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines - année 2. Rapport final - BRGM/RP-61020-FR, 93 p., 40 ill., 3 tab., 3 ann, 2012),
- piézomètre en nappe libre : les nappes captives se rechargent peu (affleurements très réduits) ou pas du tout par infiltration directe des eaux météoriques, elles sont donc peu sensibles au changement climatique. Par contre, du fait de leur forte diffusivité, elles sont sensibles aux prélèvements,
- piézomètre non influencé : absence d'influence anthropique par prélèvements et piézomètres non influencés par l'aménagement des cours d'eau (piézomètres situés en particulier dans la nappe alluviale).

Au total, à l'échelle de la France, 377 piézomètres ont été retenus. L'Aquitaine présente seulement 2 piézomètres répondant aux critères de sélection. Une forte inégalité dans la répartition des piézomètres sur le territoire s'observe (Figure 34) avec une forte majorité de points se situant sur les bassins Seine-Normandie, Artois-Picardie et en Alsace. Cette hétérogénéité s'explique par l'histoire de la mise en place des réseaux de mesures et par des priorités de suivi (Blum et al., 2009). Ainsi, en Aquitaine, des réseaux importants existent depuis longtemps mais la plupart des points suivent des nappes captives, en baisse depuis plusieurs décennies pour certaines.

La non-stationnarité des séries chronologiques a été étudiée afin de détecter les changements et surtout leur significativité (au sens statistique) au moyen de nombreuses méthodes. Pour ce calcul, ont été exclus des piézomètres présentant trop de lacunes dans la série et les piézomètres captant les nappes à cycle pluriannuels, à forte inertie, pour lesquelles il y a une forte autocorrélation. Au final, un seul ouvrage, celui de la « Jalousie » à Saucats (08511X0036/F1), a été retenu en Aquitaine. Celui-ci montre une baisse significative (Figure 33). Ailleurs en France (Figure 34), 43 piézomètres présentent une baisse significative et 35 montrent une hausse significative. Deux piézomètres ont une tendance mixte (à la hausse ou à la baisse selon la variable utilisée).

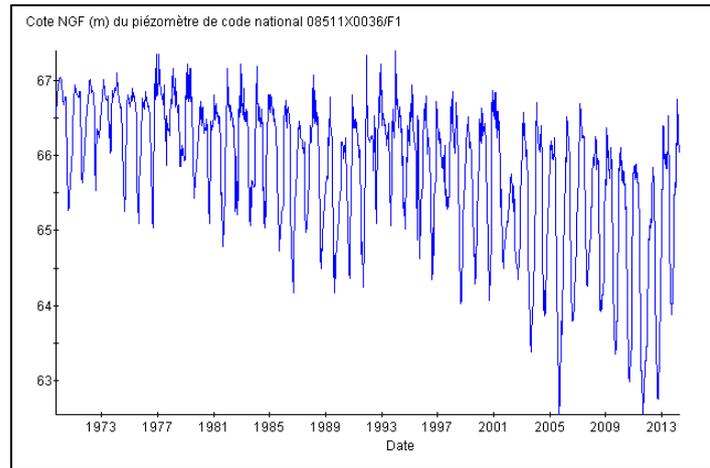


Figure 33 : Chronique piézométrique de l'ouvrage 08511X0036/F1

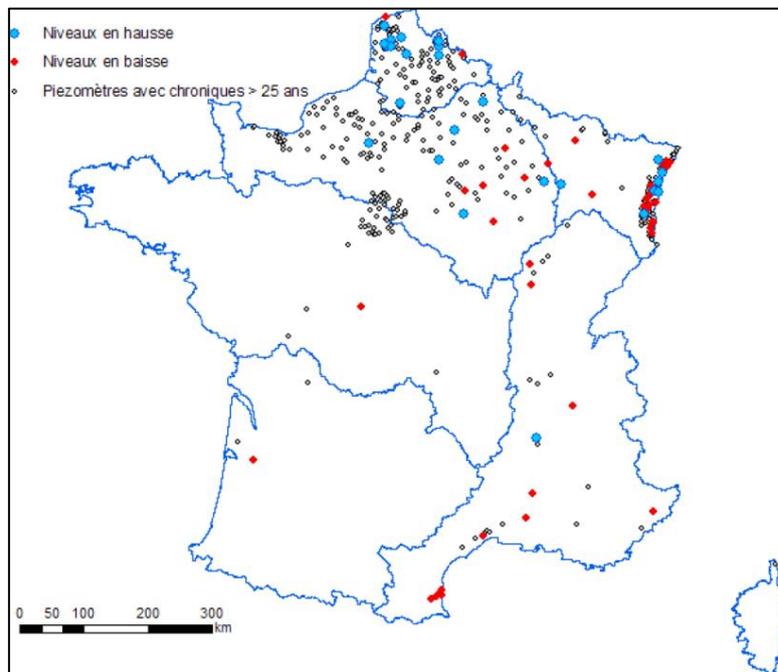


Figure 34 : Localisation des piézomètres à tendances significatives (baisse et hausse des niveaux), aux risques 1% et 5% (Vernoux & Seguin, Établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines - année 2. Rapport final - BRGM/RP-61020-FR, 93 p., 40 ill., 3 tab., 3 ann, 2012)

L'origine de la non-stationnarité observée, que la tendance soit à la hausse ou à la baisse, a été recherchée et plus précisément celle liée à un effet anthropique, principalement celui de l'influence des prélèvements. Ainsi, l'application de la loi de Theis (Vernoux et al., 2012) a permis de préciser si le piézomètre, qui montre une tendance, est influencé de manière significative ou non. Sur les 70 piézomètres montrant une tendance (Figure 35), 44 sont très peu influencés par les prélèvements (rabattement inférieur à 10 cm) dont le piézomètre aquitain, 10 sont moyennement influencés (rabattement compris entre 10 et 50 cm) et 16 le sont fortement. Cette approche met en garde sur le fait que, pour les piézomètres influencés, cette influence ne signifie pas nécessairement que la tendance à la baisse est due aux

prélèvements. En effet, on peut très bien avoir des prélèvements importants mais constants durant toute la période de suivi des niveaux piézométriques ; dans ce cas, le niveau mesuré est certes influencé par les prélèvements mais la tendance à la baisse est liée à une diminution de la recharge.

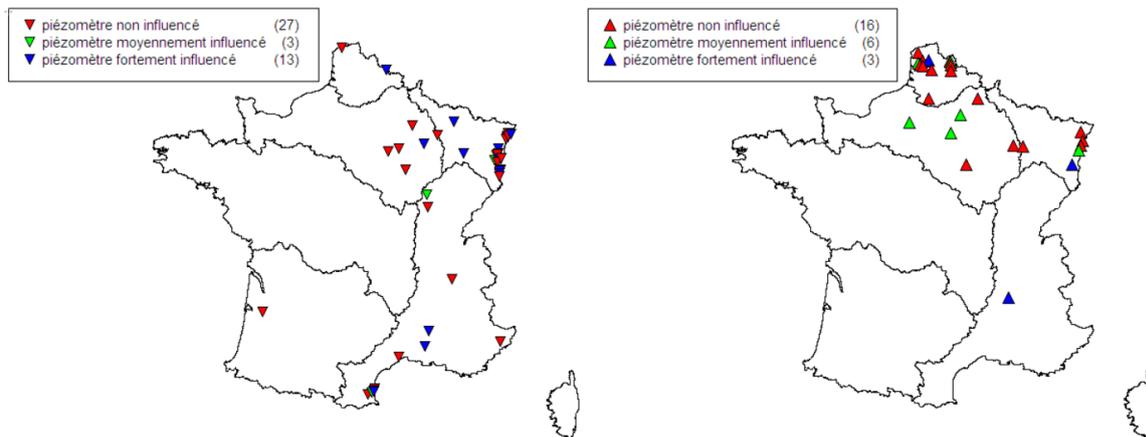


Figure 35 : Localisation des piézomètres à tendances significatives à la baisse (à gauche) et à la hausse (à droite) influencés par des prélèvements (Vernoux & Seguin, Établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines - année 2. Rapport final - BRGM/RP-61020-FR, 93 p., 40 ill., 3 tab., 3 ann, 2012)

Les tendances des niveaux piézométriques ont ensuite été comparées aux tendances observées sur les précipitations et sur les températures. On notera simplement qu'en Aquitaine, la baisse significative observée sur le point 08511X0036/F1 est corrélée à une tendance significative à la baisse de la pluie. L'absence d'autres points ne permet pas de généraliser ces observations. Ailleurs en France, il est difficile de dégager d'autres tendances communes pluies-niveaux car, dans un même secteur, ces tendances s'opposent parfois ou vont dans le même sens. Dans le cas des températures, les chroniques montrent systématiquement une tendance à l'augmentation, ne permettant donc pas d'en tirer des conclusions.

Les tendances ont par la suite été comparées aux projections d'évolution futures de la recharge obtenues dans le cadre du projet Explore 2070 (période 2046-2065). L'examen des évolutions futures de la recharge indique, pour la valeur moyenne, une baisse quasi-générale de la recharge comprise entre 10 et 25% avec globalement deux zones plus sévèrement touchées : le bassin de la Loire avec une baisse, sur la moitié de la superficie de son bassin versant, comprise entre 25 et 30% et surtout, le sud-ouest avec des baisses comprises entre 30 et 50%. Les zones de tendances à la hausse observées actuellement ne se retrouvent pas dans les scénarios testés.

**Il ressort de ce premier travail que le manque de points d'observations notamment ne permet pas actuellement de mettre en évidence un impact d'une tendance climatique significative sur le niveau des nappes.** De plus, la constitution d'un réseau d'observation du niveau piézométrique en lien avec le changement climatique ne doit pas se limiter aux piézomètres montrant seulement une tendance à la baisse car des tendances actuellement à la hausse pourraient s'inverser dans les années à venir.

## 5.2. ZONES DE SUIVI DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

La définition d'un réseau piézométrique dédié au changement climatique est également basée sur un découpage du territoire en zones de taille raisonnable, à l'intérieur desquelles sera sélectionné ou créé un piézomètre, dédié au suivi du changement climatique.

Différents zonages pertinents pour cet objectif existent à l'échelle du territoire et s'appuient sur différentes considérations :

- Zones climatiques : carte « Aurore » de Météo-France qui identifie 198 zones aux caractéristiques pluviométriques proches et climatiquement homogènes en regard des précipitations,
- Hydro-écorégions de niveau 1 (HER) : zonation utilisée par Irstea pour la surveillance des étiages,
- Masses d'eau souterraines : 534 masses d'eau souterraines (MESO) dont 498 de niveau 1 (niveau le plus superficiel),
- Le référentiel hydrogéologique français (RHF) : découpage en entités hydrogéologiques (formations géologiques aquifères ou non) de façon plus détaillée que le référentiel des masses d'eau souterraines,
- Bassins versants de surface : référentiel BD Carthage,
- Zones vulnérables vis-à-vis du changement climatique : zones obtenues dans le cadre d'Explore 2070 qui montrent une évolution de la recharge sous l'influence du changement climatique.

Ces différentes possibilités de zonations qui recouvrent des critères géologiques et/ou climatiques ont été étudiées. Il en est ressorti que l'addition de critères tels que le zonage Aurore, la sectorisation hydro Carthage, les hydro-écorégions, complexifient le zonage sans apporter de réelle plus-value. Ainsi, il a été décidé que **la sectorisation serait basée sur le croisement de deux critères, un critère purement hydrogéologique et un critère de sensibilité au changement climatique.**

Le critère hydrogéologique retenu est celui du découpage des masses d'eau souterraines de niveau 1 car il est apparu techniquement approprié pour un traitement à l'échelle nationale. Après suppression de certaines MESO qui ne sont a priori pas ou peu impactées par les effets du changement climatique, 474 MESO ont été présélectionnées.

Le critère de sensibilité au changement climatique retenu est celui de l'écart de pluie efficace entre « temps futur » (2046-2065) et « temps présent » (1961-1991) pour lequel une grille a été générée.

Ces deux critères ont ensuite été combinés afin de calculer un écart moyen, par masse d'eau souterraine, de la pluie efficace entre le temps futur et le temps présent (Figure 36) ; ceci, dans le but de prioriser les masses d'eau souterraines, par la mise en place du réseau piézométrique dédié au suivi du changement climatique. Ont été considérées comme prioritaires les masses d'eau qui présentent un écart inférieur à -5%, soit 237 masses d'eau souterraines (sur les 474 MESO présélectionnées). En Aquitaine, 53 MESO sont recensées, dont 45 considérées comme prioritaires.

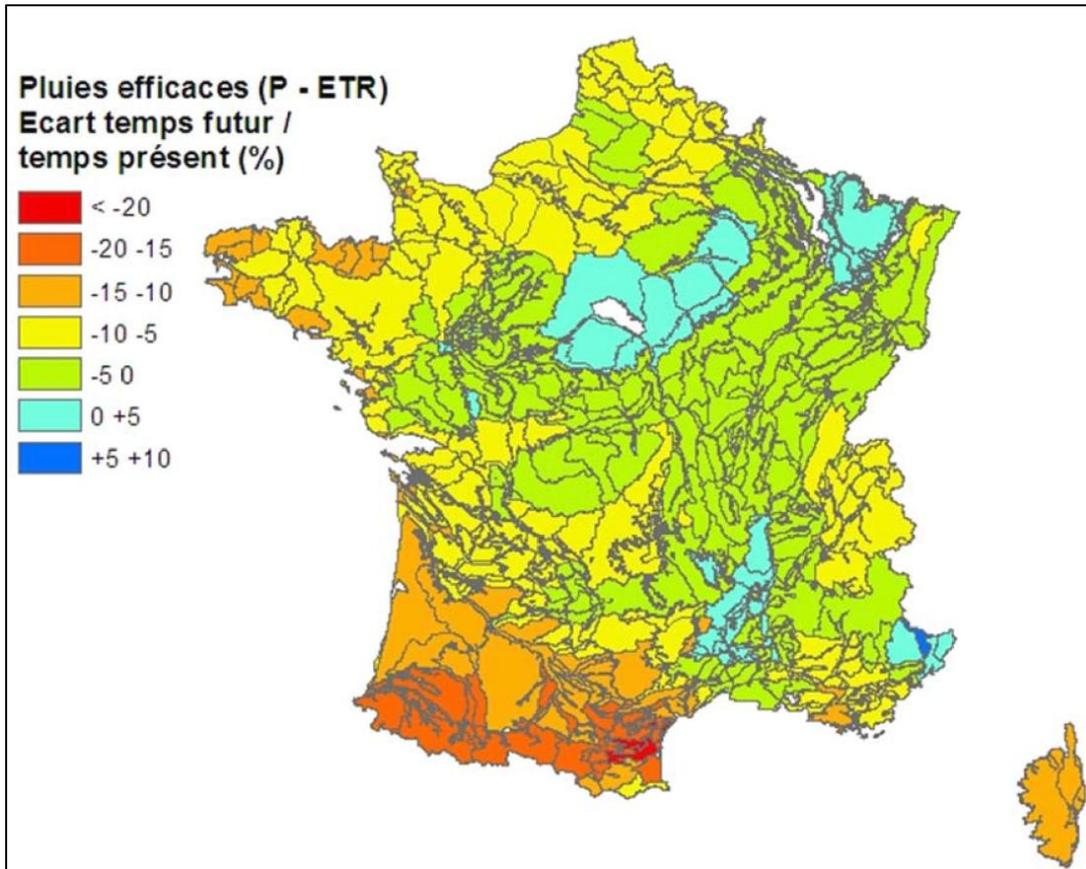


Figure 36 : Ecart entre la pluie efficace ( $P - ETR$ ) temps futur et temps présent par masse d'eau souterraine (Vernoux & Seguin, Établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines - (année 3) et essai de détermination d'un index piézométrique standardisé. Rapport BRGM/RP-61807-FR, 110 p., 66 ill., 4 ann, 2013)

### 5.3. SELECTION D'OUVRAGES

La poursuite de la mise en place d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines consiste à sélectionner au sein de chacune des 236 entités identifiées précédemment un piézomètre susceptible de faire partie du réseau.

Différentes banques de données existent pour permettre l'accès aux piézomètres et à leurs chroniques piézométriques. La plus importante est la banque ADES (Accès aux Données sur les Eaux Souterraines). Dans le cadre d'un inventaire des stations de mesures présentes sur le bassin Adour-Garonne (Lucas, 2011), d'autres sources d'informations ont été utilisées : la banque Hydro, les Conseils Généraux. La distribution des points sur le bassin Adour-Garonne (Figure 37) met en évidence un bon échantillonnage des masses d'eau en Aquitaine, indépendamment de la qualité de la donnée, à l'exception des Pyrénées-Atlantiques en raison de la non prise en compte dans cette carte de points de suivi pourtant existants.

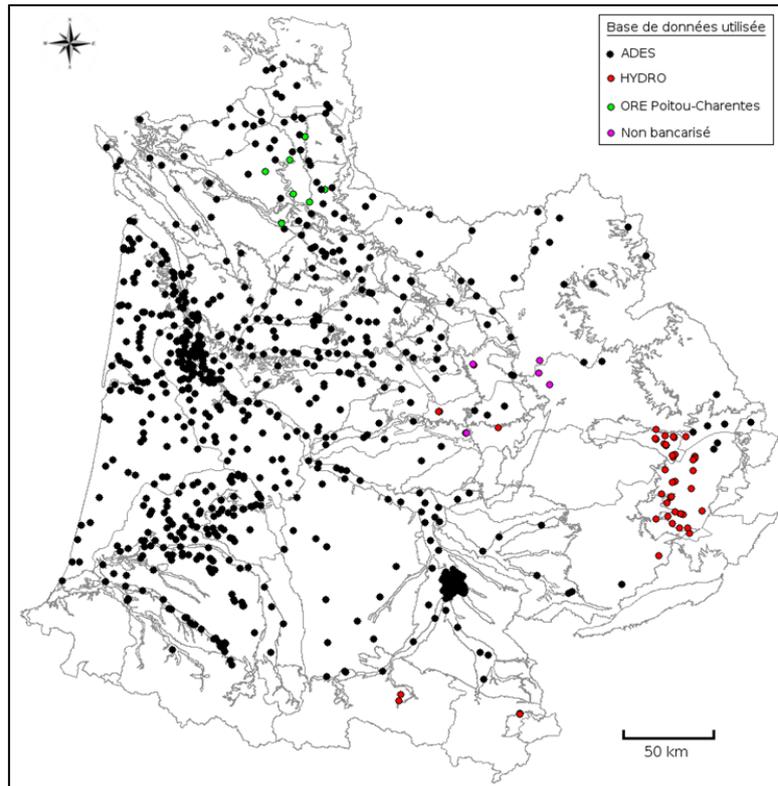


Figure 37 : Distribution des stations de mesures recensées sur le bassin Adour-Garonne toutes masses d'eau souterraine confondues (Lucas, 2011)

Sur la base de cet inventaire, une représentation de ces points de suivi par typologie de masses d'eau libres et par durée des chroniques piézométriques est proposée (Figure 38). Il ressort de son analyse que le réseau d'observation des masses d'eau souterraines libres du bassin Adour-Garonne est constitué de stations récentes mises en place il y a moins d'une dizaine d'années pour plus de la moitié d'entre elles. Cette répartition, biaisée par une importante concentration de points d'observations récents au droit de l'agglomération toulousaine, montre que les chroniques piézométriques les plus courtes correspondent à des points implantés dans les systèmes alluviaux (Garonne, Dordogne Adour et leurs affluents). Les chroniques les plus longues (> 20 ans) se situent pour la plupart au sein du triangle landais pour le suivi de la nappe des sables plio-quadernaires.

Les méthodes d'analyse de l'impact du changement climatique sur le niveau des nappes reposent sur des outils statistiques dont l'application nécessite des critères spécifiques quant à la sélection des ouvrages et de leur chronique piézométrique associée (chapitre 5.1). Il s'agit donc à la fois de faire une sélection d'ouvrages mais aussi une hiérarchisation car les critères initiaux sont très restrictifs entraînant la mise à l'écart de nombreuses masses d'eau qui se retrouveraient alors sans point de suivi. Ces critères de sélection sont :

- durée et qualité de la chronique piézométrique (absence de lacunes importante (?) de données),
- faible influence anthropique (absence d'effets de pompage, d'irrigation, de sources potentielles de recharge artificielle, ...),
- capter une seule nappe, un aquifère libre qui réponde aux fluctuations climatiques,
- disposer d'informations pertinentes sur l'ouvrage,
- avoir l'assurance de la pérennité du point d'eau,
- absence d'assec de l'ouvrage,

- cohérence avec le réseau de référence pour la surveillance des étiages de l'Irstea,
- cohérence avec le réseau des 257 piézomètres (appelés indicateurs ponctuels) du Bulletin national de Situation Hydrologique (BSH) des nappes.

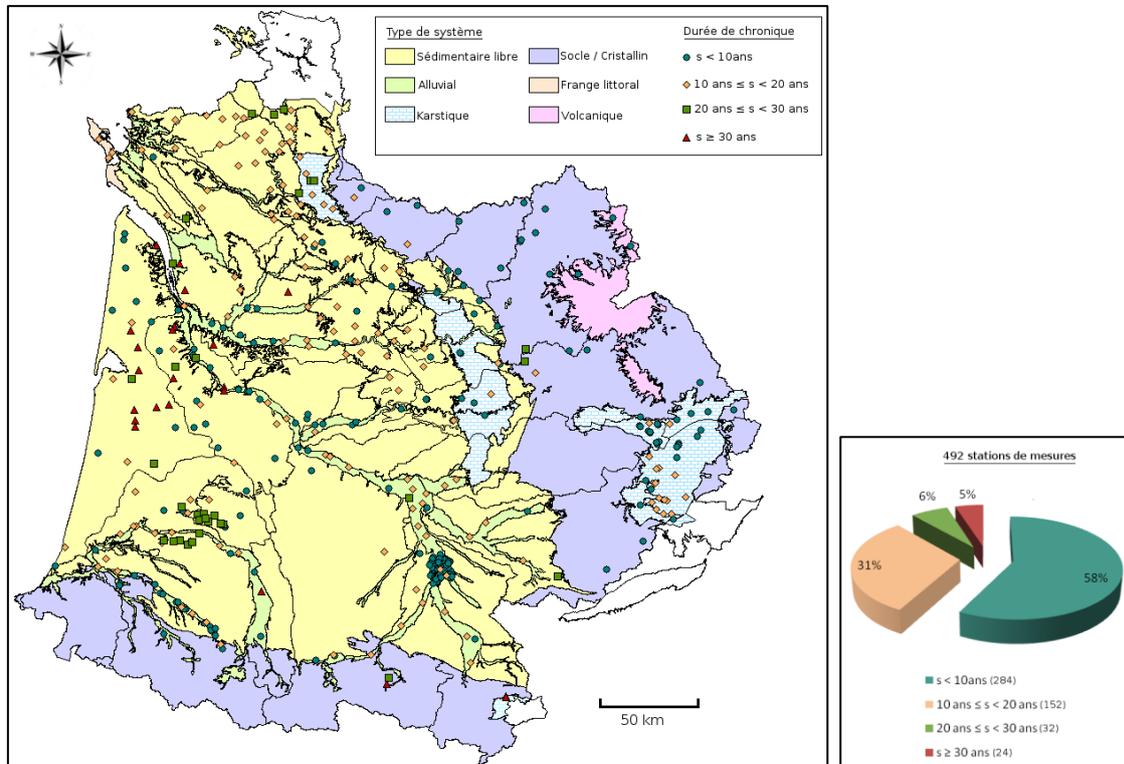


Figure 38 : Présentation de l'ensemble des points recensés dans les masses d'eau souterraine libres du bassin en fonction de la durée des chroniques (Lucas, 2011)

Les piézomètres ont été ensuite sélectionnés en considérant leur pérennité, s'ils étaient faiblement influencés et selon la durée des chroniques d'observation (si plusieurs ouvrages répondaient à ces critères pour une même masse d'eau, la priorité a été donnée à ceux montrant une tendance à la baisse et/ou ceux appartenant à un réseau de suivi de la sécheresse) :

- > 25 ans : priorité p1,
- entre 15 et 25 ans : priorité p2,
- entre 10 et 15 ans : priorité p3,
- moins de 10 ans : priorité p4.

Au total, 105 ouvrages ont été présélectionnés :

- 33 ouvrages en priorité 1,
- 29 ouvrages en priorité 2,
- 6 ouvrages en priorité 3,
- 37 ouvrages en priorité 4.

En Aquitaine, sur les 43 MESO à suivre, 13 disposent de points présélectionnés :

5005 : 07143X0017/P1 ; priorité 4,	5033 : 07844X0076/P1 ; priorité 4,
5011 : 07638X0017/MAIRIE ; priorité 4,	5043 : 09845C1426/F ; priorité 2,
5020 : 10097X0224/F ; priorité 2,	5045 : 08988X0014/D5 ; priorité 2,
5024 : 08101X0227/P1 ; priorité 4,	5046 : 09007X0047/PZ ; priorité 2,
5028 : 09793X001/F ; priorité 2,	5091 : 09768X0040/F2 ; priorité 3,
5030 : 10031X0017/F ; priorité 2,	5099 : 07822X0072/P1 ; priorité 4
5031 : 100350009/F2 ; priorité 3,	

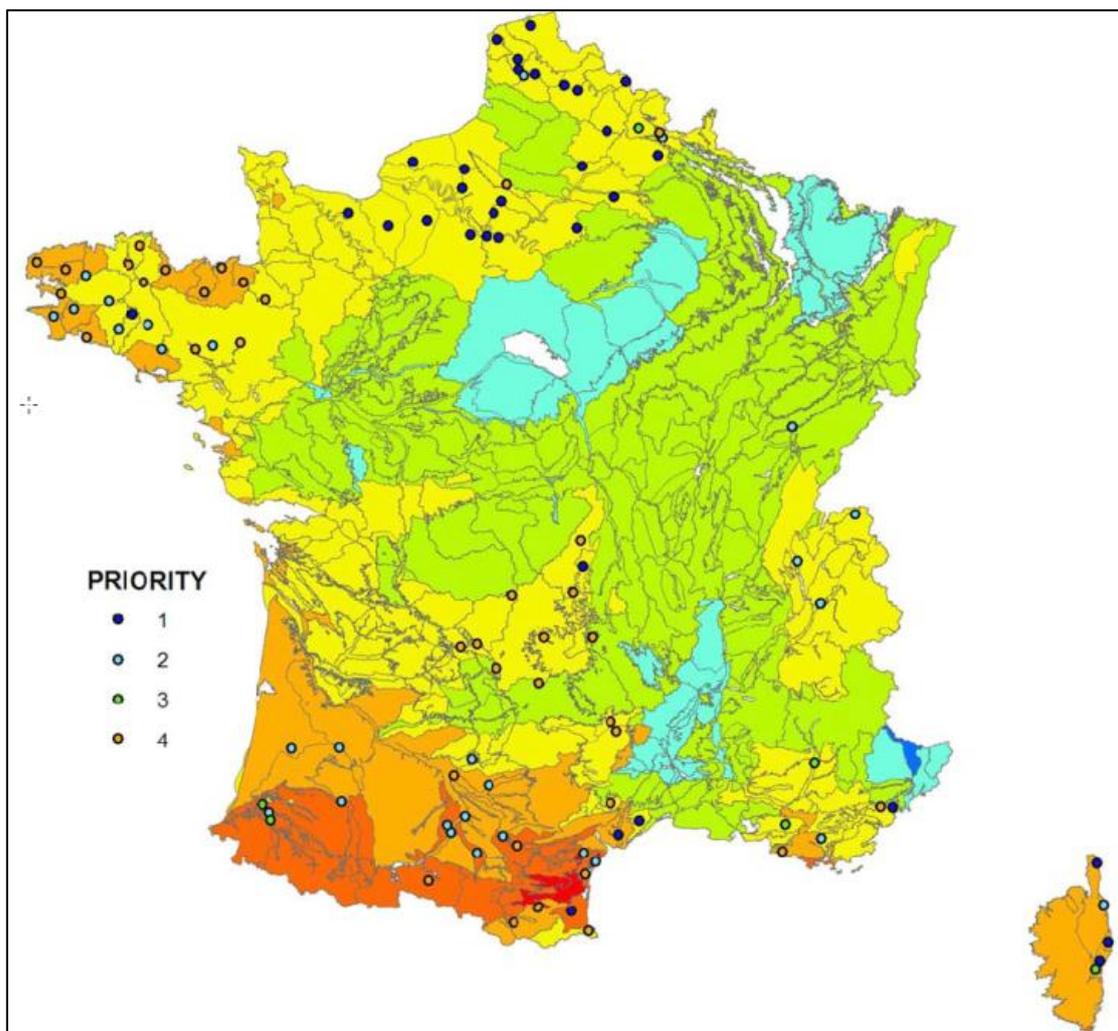


Figure 39 : Présélection de points susceptibles de faire partie du réseau de suivi du changement climatique (Vernoux & Seguin, Établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines - (année 3) et essai de détermination d'un index piézométrique standardisé. Rapport BRGM/RP-61807-FR, 110 p., 66 ill., 4 ann, 2013)

Au terme de cet exercice, 131 masses d'eau souterraine en France ne disposent pas de piézomètre présélectionné pour le suivi du changement climatique. La carte de leur répartition (Figure 40) fait ressortir que la région sud-ouest est le secteur le plus déficitaire en termes de suivi. En Aquitaine, 30 MESO sont concernées. La répartition est la suivante :

- 10 MESO sans aucun piézomètre (code X0),
- 19 MESO pour lesquelles il existe un ou plusieurs piézomètres mais sans information sur la pérennité et le degré d'influence (code X1),
- 1 MESO pour laquelle il existe un ou plusieurs piézomètres influencés (code X2),
- aucune MESO pour laquelle il existe un ou plusieurs piézomètres influencés et un ou plusieurs piézomètres sans information (X1+X2).

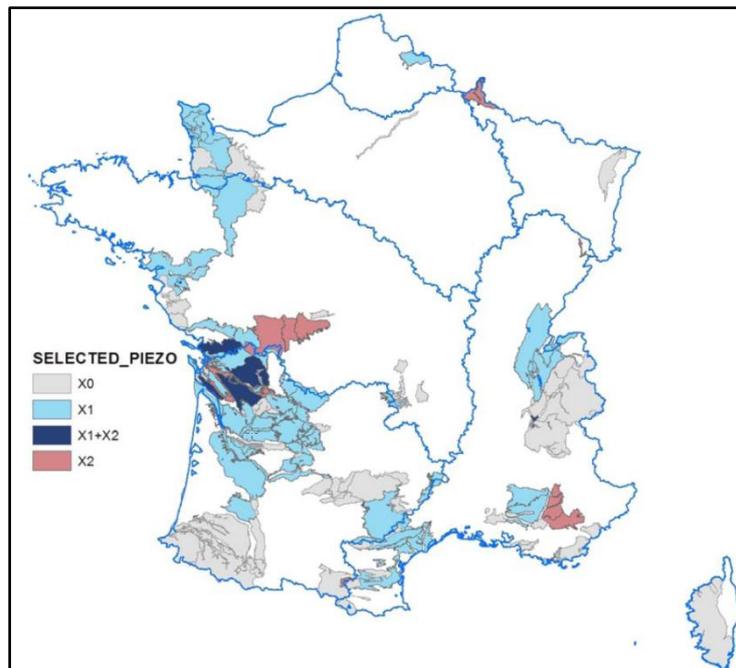


Figure 40 : Masses d'eau souterraines sensibles au changement climatique sans piézomètre présélectionné (Vernoux & Seguin, *Établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines - (année 3) et essai de détermination d'un index piézométrique standardisé. Rapport BRGM/RP-61807-FR, 110 p., 66 ill., 4 ann, 2013)*

Pour les masses d'eau sans piézomètre, on peut supposer qu'il s'agit de masses d'eau présentant peu d'intérêt en termes de ressources en eau et pour lesquelles il n'a pas été jugé utile de mettre en place un suivi quantitatif. Si cette règle ne s'applique pas au réseau de suivi du changement climatique, et donc si on considère que ce réseau doit être indépendant de la gestion actuelle de la ressource, il faudra impérativement créer de nouveaux points.

Pour les masses d'eau avec des piézomètres existants mais qui sont tous influencés, il faudra créer de nouveaux points dans les secteurs non influencés, si ces derniers existent.

Pour les masses d'eau avec un ou plusieurs piézomètres pour lesquels aucune information sur la pérennité ou sur le degré d'influence n'existe, il convient de rechercher ces informations auprès des gestionnaires d'ouvrages ou de faire des investigations complémentaires.

## 5.4 EN RESUME

Dans l'état actuel des connaissances de l'impact du changement climatique sur le niveau piézométrique des nappes d'eau souterraine, lié en particulier à l'incertitude des données, **il semble préférable de ne prendre en compte que des critères hydrogéologiques et de privilégier une couverture nationale avec au moins un point par masse d'eau**. L'approche menée ici doit cependant être approfondie et analysée afin de valider les paramètres de choix des aquifères à surveiller et des points de suivi nécessaires à l'évaluation de l'impact du changement climatique sur les niveaux piézométriques. L'utilisation de certains paramètres pour la définition de la sensibilité des masses d'eau vis-à-vis du changement climatique doit être notamment précisée.

Une réflexion importante devra également être menée sur le moyen de **caractériser de façon homogène sur le territoire envisagé l'état piézométrique des nappes libres**, de suivre l'évolution dans le temps de cet état et de quantifier l'intensité des impacts climatiques subis par ces nappes. Les travaux de Vernoux et Seguin (2013) ont initié ce travail en évaluant les possibilités de définition d'un index piézométrique standardisé (SPLI, Standardized Piezometric Level Index). Toutefois, au stade actuel de la recherche, de nombreux points restent à discuter concernant notamment la pertinence de l'index, l'échelle d'agrégation, le mode de représentation ou encore l'exploitation en association avec d'autres indicateurs.



## 6. Conclusions et perspectives

Les derniers travaux sur l'évolution du climat montrent que la seule prise en compte des forçages naturels ne permet pas de reproduire les réchauffements observés à partir des années 1980. L'intégration des forçages anthropiques (émissions de gaz à effet de serre) s'avère indispensable pour reproduire les évolutions des températures observées à partir de la fin du 20<sup>ème</sup> siècle. Les émissions de gaz à effet de serre sont donc bien le responsable principal du réchauffement climatique observé. L'analyse des projections climatiques indique une augmentation des températures moyennes annuelles pour la France de 4,5°C à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, les températures augmentant de 6°C en été contre 3,7°C en hiver. La tendance pour les précipitations serait à la diminution lors des périodes estivales et à l'augmentation en hiver. Il faut donc s'attendre à une évapotranspiration plus importante en été par rapport aux conditions actuelles. La tendance générale qui ressort des différentes simulations montre que la diminution des précipitations estivales et l'augmentation des températures aboutit à des sécheresses plus fréquentes et plus intenses en été. Il est donc attendu des étiages plus sévères et plus fréquents en été.

Les travaux qui ont été menés sur les eaux souterraines en France indiquent une tendance à la diminution de la recharge [ (Ducharne et al., 2009), (Amraoui et al., 2012), (Domez, 2012), (Saltel et al., 2012)] dus principalement aux précipitations plus faibles issues des projections climatiques des différents modèles

En Aquitaine, les diminutions de piézométries simulées basées sur les recharges calculées à partir des résultats des différents modèles climatiques (scénario : A1B), peuvent aller de 1 m à plusieurs dizaines de mètres (15 à 20 m pour les cas les plus extrêmes). Il apparaît de manière tout à fait logique que ce sont les zones d'alimentation qui sont les plus affectées. Il s'agit dans certains cas des zones d'affleurements ou de zones de drainance entre aquifères. Il y a donc, selon les cas, une diminution directe et indirecte de l'alimentation des nappes lorsque les scénarios climatiques induisent une diminution importante de la recharge.

L'apport des nappes aux cours d'eau s'en trouve également diminué participant ainsi à la baisse des débits en période d'étiage. Il faut également s'attendre à une diminution du débit des sources. A noter que le contexte local est prépondérant et que les impacts seront très variables en fonction de la nature des réservoirs et des conditions climatiques locales.

Vis-à-vis de la vulnérabilité des aquifères côtiers à l'intrusion saline, les différents travaux montrent que nous sommes actuellement entrés dans une dynamique de remontée du niveau marin. Il faut garder à l'esprit que la surcote représente pour les systèmes aquifères côtiers un facteur d'évolution du biseau salé en déplaçant vers l'intérieur des terres l'interface eau salée / eau douce. Plusieurs zones vulnérables ont été mises en évidence. Cependant, c'est principalement la modification du trait de côte en réponse ou non à l'élévation du niveau de la mer qui constitue un risque pour ces secteurs.

Évaluer les effets potentiels du changement climatique s'avère plus complexe pour les eaux souterraines que pour les eaux de surface (Holman, 2006). En effet, les temps de résidence s'échelonnent de quelques jours à plusieurs dizaines de milliers d'années pour les eaux souterraines, ce qui retarde la réponse des systèmes aquifères aux changements climatiques (Chen et al., 2004). De plus, l'exploitation des eaux souterraines (Alimentation en eau potable, irrigation, industrie,...) entraîne une diminution des réserves ainsi qu'une baisse des débits aux exutoires (sources) qui vient s'ajouter à celles des variations climatiques, ce qui rend difficile la distinction entre les impacts anthropiques et les impacts climatiques sur les eaux souterraines

(Hanson et al., 2004). Par ailleurs, selon la nature des réservoirs (sableux, karstiques,...), l'inertie de la réponse des aquifères libres sera différente.

Il faut garder à l'esprit que des incertitudes demeurent à différents niveaux dans les simulations prospectives réalisées pour évaluer l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines. En effet, même si l'augmentation des températures à l'échelle globale fait consensus, des incertitudes demeurent à l'échelle locale sur leurs évolutions dans le temps. À noter que les incertitudes sont encore plus grandes pour les précipitations. Or c'est ce paramètre qui conditionne la recharge des hydrosystèmes. 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 des modèles hydrodynamiques. Les lois 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. Par ailleurs, l'impact des prélèvements est prépondérant dans le cas des nappes captives, or l'évaluation de la demande future, à destination de l'eau potable, de l'agriculture ou encore de l'industrie, est très complexe. En effet, en plus des facteurs climatiques, de nombreux paramètres socio-économiques vont influencer la demande en eau : évolution de la population (fécondité, mortalité, quotients migratoires), évolution des habitudes de consommation (caractéristiques de l'habitat, des ménages, du tarif de l'eau), évolution des pratiques agricoles, etc. Si ces paramètres évoluent essentiellement en fonction des politiques sociétales et environnementales, qu'elles soient nationales ou locales, beaucoup de facteurs montrent des liens étroits avec le changement climatique. Ainsi, les scénarios prédictifs sur lesquels se basent les décisions doivent être globaux, intégrant les aspects socio-économiques en plus des perspectives de changement climatique seul.

Il ne faut donc pas considérer ces simulations prospectives comme des prévisions fines mais plutôt observer la tendance générale des différents résultats et dégager les points de convergence des différents modèles pour évaluer les risques encourus et comparer ces derniers aux enjeux qui en découlent.

Les décideurs publics vont être amenés à prendre en compte les effets du changement climatique dans des domaines et activités nombreux et variés (agriculture, pêche, tourisme,...). Dans ce cadre, il devient impératif d'évaluer la pertinence de mesures d'adaptation qui engagent le territoire pour des durées de temps assez longues (quelques décennies à quelques siècles). Une difficulté provient du fait que de nombreuses approches (coût /bénéfices ou coût/avantages) sont souvent plus pertinentes pour des échelles de temps relativement courtes avec des incertitudes contenues. Dans le cas de l'adaptation au changement climatique, il est nécessaire de disposer d'une approche qui permette la prise de décision dans un contexte de fortes incertitudes et d'examiner leurs effets sur des échelles de temps relativement longues.

En fonction des enjeux qui ont été définis comme prioritaires par les décideurs, il faut trouver les moyens adéquats pour s'adapter aux changements à venir. Cela passe par de l'expérimentation sur des sites pilotes et des équipes de travail pluridisciplinaires (climatologues, hydrologues, hydrogéologues, agronomes, économistes, sociologues....).

Les eaux souterraines sont aux interfaces entre différents systèmes susceptibles d'être fortement impactés par les changements climatiques : la biosphère (agriculture, foresterie,...), l'hydrosphère (cours d'eau, lac, océan...). Selon les cas, il apparaît intéressant d'utiliser les nappes en tant qu'outils pour répondre à des problématiques locales. On pourrait, dans le cas de la nappe du Plio-Quaternaire, envisager de limiter le drainage pour maximiser le stockage en nappe pendant la période de recharge afin de favoriser un soutien maximum des eaux

souterraines au débit des cours d'eau en période estivale. La piste de la recharge artificielle des nappes peut également être envisagée dans le cas des nappes alluviales.

Le volet amélioration des connaissances et des processus ne doit pas non plus être négligé. En effet, il apparaît important de disposer d'un observatoire de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau tel qu'il a été initié dans le cadre du rapport « Prévoir pour Agir ». Il serait possible de développer un tel réseau en associant aux partenaires académiques des acteurs locaux de la ressource en eau et plus largement des thématiques variées impactées par le changement climatique. Le but étant de créer un espace d'échange regroupant différents domaines (climatologie, hydrogéologie, hydrologie, agriculture,...) qui pourraient communiquer sur cette thématique complexe que représente le changement climatique tout en assurant une veille scientifique sur ce sujet. Il semble également indispensable de mettre en place un réseau de surveillance des ressources en eaux superficielles (nappes libres, cours d'eau) dans les secteurs les moins influencés par les activités humaines pour évaluer sur le long terme l'impact du changement climatique (cf. chapitre 5). Par ailleurs une meilleure compréhension des processus de recharge des aquifères apparaît fondamentale de manière à optimiser la prise en compte de ce paramètre dans les modèles hydrodynamiques.



## 7. Bibliographie

**Amraoui N., Thiery D.** (2012) - Explore 2070 - Hydrologie souterraine - Bassin de la Somme - Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie - Armines - BRGM.

**Agreste Aquitaine** (2013) - L'irrigation en Aquitaine : un facteur de production essentiel. Agreste Aquitaine - Analyses et résultats n°70, 6 p.

**Barraqué B., Isnard L., Montginoul M., D. Rinaudo J., Souriau J.** (2011) - Baisse des consommations d'eau potable et développement durable. Responsabilité et Environnement, Vol. 63, pp. 102-108.

**Bellamy V., Beaumel C.** (2013) - Bilan démographique 2012 - La population croît, mais plus modérément. Rapport Insee n°1429, 4 p.

**BIPE** (2013) - Bilan du projet Explore 2070 - Résultats et premiers anciennements : Les prélèvements en eau à l'horizon 2070 - Scénario tendanciel - Prospective socio-économique, Présentation 28 slides.

**BIPE** (2012) - Prospective socio-économique et démographique : Pressions anthropiques. Rapport final, 199 p.

**BIPE** (2011) - Rapport d'étape n°2 - Prospective socio-économique et démographique, 172 p.

**Blanpain N., Chardon O.** (2010) - Projections de population 2007-2060 pour la France métropolitaine : méthode et principaux résultats. 71 p.

**Brisson N., Levraut F.** (2012) - Livre vert du projet Climator - Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces.

**Brisson N., Denoyes B., rcia de I., Goutouly J-P., Kleinhentz M., Launay M., Michalet R., Ollat N., Pieri P., Van Leeuwen C.** (2013) - Prévoir pour agir - La région Aquitaine anticipe le changement climatique. *Région Aquitaine*, 108-125

**Caballero Y., Noilhan J.** (2003) - Étude de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau du bassin Adour Garonne.

**Caballero Yvan, Voirin-Morel Sophie, Habets Florence, Noilhan Joël, LeMoigne Patrick, Lehenaff Alain, Boone Aaron** (2007) - Hydrological sensitivity of the Adour-Garonne river basin to climate change. *Water Resources Research*, Vol. 43, n/a--n/a.

**Cabaret O., Saltel M.** (2012) - Contribution à la révision du SAGE Nappes Profondes de Gironde : Utilisation du Modèle Nord-Aquitain - phase « Tendances et Scénarios » - Simulations complémentaires - Rapport final, BRGM/RP-61479-FR, 46 p., 21 fig., 4 ann.

**Chazot S., Terrasson I., Drocourt A.** (2012) - Ressources et besoins en eau en France à l'horizon 2030. Etude réalisée par BRL Ingénierie pour le Centre d'Analyse Stratégique. Rapport final, 176 p.

**Chen Zhuoheng, E. Grasby Stephen, G. Osadetz Kirk** (2004) - Relation between climate variability and groundwater levels in the upper carbonate aquifer, southern Manitoba, Canada. *Journal of Hydrology*, Vol. 290, 43-62.

**Corbier P., Abou Akar A., Karnay G., Léger A.** (2007) - Caractérisation des biseaux d'eau salée exploités sur le pourtour du Bassin d'Arcachon et expérimentation sur 3 sites tests. Rapport final. BRGM/RP-54844-FR. 119 p., 83 ill., 4 ann..

**Corbier P., Capdeville J.P., Pédron N., Platel J.P., Winckel A.** (2005) - SAGE Nappes profondes de Gironde - Atlas des zones à risques - BRGM/RP-53756-FR, 180 p., 82 ill, 4 ann.

**Nations Department United, Affairs Population Social** (2013) - World Population Prospects: The 2012 Revision, Highlights and Advance Tables. Working Paper No. ESA/P/WP.228. 118 p.

**F. Desprats J., Montginoul M., D. Rinaudo J.** (2013) - Low density urbanisation and water consumption: evidences from two French metropolitan areas. 3rd International Conference on Water Economics, Statistics and Finance, International Water Association, Marbella - Spain, 24-26 April 2013, 7 p.

**Dörfliger N., Schombrugk S., Bouzit M., Petit V., Caballero Y., Durst P., Douez O., Croiset N., Surdyk N.** (2011) - Montée du niveau marin induite par le changement climatique : Conséquences sur l'intrusion saline dans les aquifères côtiers en Métropole. Rapport final, BRGM/RP-60829-FR, 302 p., 122 ill., 4 ann..

**Douez O.** (2012) - Explore 2070 - Hydrologie souterraine - Poitou - Ministère de l'écologie, du developpement durable et de l'énergie - Armines - BRGM.

**Douville H., Chauvin F., Planton S., Royer J.-F., Salas-Mélia D., Tyteca S.** (2002) - Sensitivity of the hydrological cycle to increasing amounts of greenhouse gases and aerosols. , Vol. 20, 45-68--.

**Ducharne A., Habets F., Déqué M., Evaux L., Hachour A., Lepaillier A., Lepelletier T., Martin E., Oudin L., Pagé C., Ribstein P., Sauquet E., Thiéry D., Terray L., Viennot P., Boé J., Bourqui M., Crespi O., Gascoïn S., Rieu J.** (2009) - Projet RExHySS - Impact du changement climatique sur les Ressources en eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme - Programme GICC -Rapport de fin de contrat.

**Dupuy A., de Grissac B., Huneau F., Lucas C., Marchet P.** (2013) - Prévoir pour agir - La région Aquitaine anticipe le changement climatique - Chapitre 8.4 Disponibilité des eaux souterraines. *Région Aquitaine*, 275-285

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

**EAUCÉA** (2008) - Évaluation des impacts du changement climatique sur l'estuaire de la Gironde et prospective à moyen terme -Phase 2: Prospective, priorités et indicateurs.

**EEA** (2012) - Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012 - An indicator-based report EEA - N° 12 /2012.

**Etcheverry D.** (2001) - Une approche déterministe des distributions des temps de transit de l'eau souterraine par la théorie des réservoirs. *Thèse de doctorat : Université de Neuchâtel*,

**Feyen Luc, Dankers Rutger, Bodis Katalin, Salamon Peter, Barredo José.** (2012) - Fluvial flood risk in Europe in present and future climates. *Climatic Change*, Vol. 112, 47-62.

**Feyen Luc, Dankers Rutger** (2009) - Impact of global warming on streamflow drought in Europe. *J. Geophys. Res.*, Vol. 114, D17116--.

**Frissant N., René-Corail C., Bonnier J., De La Y.** (2005) - Le phénomène d'intrusion saline à La Réunion : état des connaissances et synthèse des données disponibles. *Rapport BRGM/RP-54330-FR*, 64 p., 27 ill., 4 tabl.

**Garonne2050.** (2013) - Synthèse de l'étude sur les besoins et les ressources en eau à l'échelle du bassin Garonne.

**GIEC** (2008) - Le changement climatique et l'eau, document technique publié par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Secrétariat du GIEC, Genève, 236 p.

**Hanson R.T., Newhouse M.W., Dettinger M.D.** (2004) - A methodology to assess relations between climatic variability and variations in hydrologic time series in the southwestern United States. *Journal of Hydrology*, Vol. 287, 252-269.

**Herbet C., Pichon A., de Grissac B., Vaucelle S., Paredes E.** (2009) - Enseignements de la canicule 2003 et des années 2007 et 2008 pour la prise en compte des changements climatiques dans l'estimation des besoins futurs en eau potable. Colloque 193 SHF : «Etiages, Sécheresses, Canicules rares et leurs impacts sur les usages de l'eau», Lyon, 7-8 octobre 2009.

**Holman I.P.** (2006) - Climate change impacts on groundwater recharge- uncertainty, shortcomings, and the way forward?. *Hydrogeology Journal*, Vol. 14, 637-647.

**INSEE** (2013) - Métropole bordelaise : enjeux et perspectives d'un recentrage de la croissance démographique girondine. *Le Quatre Pages - INSEE Aquitaine*, Vol. 209, 6 p..

**Isnard Laure** (2013) - Scénarios de prospective : Vers une gestion durable des services d'eau. *PROJET EAU & 3E – ANR Villes Durables 2008*, 60 p.

**Jaunat J.** (2012) - Caractérisation des écoulements souterrains en milieu fissuré par approche couplée hydrologie-géochimie-hydrodynamisme. Application au massif de l'Ursuya (Pays Basque, France). *Thèse de doctorat : Université de Bordeaux 3*, 344

**Keirle Robert, Hayes Colin** (2007) - A review of catchment management in the new context of drinking water safety plans. *Water and Environment Journal*, Vol. 21, 208-216.

**Lehner Bernhard, Döll Petra, Alcamo Joseph, Henrichs Thomas, Kaspar Frank** (2006) - Estimating the Impact of Global Change on Flood and Drought Risks in Europe: A Continental, Integrated Analysis. *Climatic Change*, Vol. 75, 273-299.

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

**Lucas C.** (2011) - Changements climatiques et Eaux souterraines. Etat des connaissances sur le bassin Adour-Garonne - Institut EGID Université Bordeaux 3.

**Montginoul M.** (2002) - La consommation d'eau des ménages en France : état des lieux, UMR Cemagref-ENGEES en Gestion des Services Publics, Strasbourg, 41 p.

**Montginoul M.** (2013) - La consommation d'eau en France : historique, tendances contemporaines, déterminants. Sciences Eaux & Territoires, Vol. 10, pp. 68-72.

**Montginoul M., D. Rinaudo J.** (2011) - Quels outils de gestion des prélèvements en eau agricole pour faire face à la réduction annoncée des disponibilités en eau ? Eléments de réflexion à partir de scénarios de prospective discutés avec des agriculteurs et des institutionnels. 6èmes journées de recherches en sciences sociales, INRA, SFER, CIRAD, 18 p..

**ONERC** (2012) - L'adaptation de la France au changement climatique. Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique, 80 p.

**ONERC** (2010) - Villes et adaptation au changement climatique. Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique, 158 p.

**ONERC 2007** (2007) - Stratégie nationale d'adaptation au changement climatique. Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique, la Documentation française, Paris, 158 p.

**Pagé C., Terray L.** (2010) - Nouvelles projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21ème siècle : les scénarii SCRATCH2010.

**Pédron N., Gomez E.** (2010) - Utilisation du MOdèle hydrodynamique Nord Aquitain (MONA) pour appuyer à la définition des volumes prélevables dans les aquifères profonds du nord du Bassin aquitain. Dix-septièmes journées techniques du Comité Français d'Hydrogéologie de l'Association Internationale des Hydrogéologues. « La DCE 10 ans après : une dynamique pour la connaissance et la gestion des eaux souterraines. Avancées techniques et scientifiques ».

**Peings Y., Jamous M., Planton S., Le Treut H.** (2011) - Le climat de la France au XXIème siècle Volume 1 - Scénarios régionalisés - Scénarios climatiques : indices sur la France métropolitaine pour les modèles français ARPEGE-Climat et LMDz et quelques projections pour les DOM-COM, Mission confiée à Jean Jouzel.

**Planton S., Cazenave A., Delecluse P., Dörfliger N., Gaufres P., Idier D., Jamous M., Le Cozannet G., Le Treut H., Peings Y.** (2012) - Le climat de la France au XXIe siècle - Evolution du niveau de la mer.

**Rey F.** (2007) - Ressources en eau souterraine dans les chaînons béarnais (Pyrénées-Atlantiques, France). Géométrie et fonctionnement hydrogéologique de quatre aquifères carbonatés. *Thèse de doctorat : Université Sciences et Technologies - Bordeaux I,*

**Rinaudo J.D.** (2013) - Prévoir la demande en eau potable : une comparaison des méthodes utilisées en France et en Californie. Sciences Eaux & Territoires, Vol. 10, pp. 78-85.

**Rinaudo Jean-Daniel, Neverre Noémie, Montginoul Marielle** (2012) - Simulating the Impact of Pricing Policies on Residential Water Demand: A Southern France Case Study. *Water Resources Management*, Vol. 26 (7), 2057-2068.

**Rojas R., Feyen L., Bianchi A., Dosio A.** (2012) - Assessment of future flood hazard in Europe using a large ensemble of bias-corrected regional climate simulations. *J. Geophys. Res.*, Vol. 117, D17109--.

**Saltel M., Pédron N.** (2012) - Contribution à la révision du SAGE Nappes Profondes de Gironde : Utilisation du Modèle Nord-Aquitain dans le cadre du module « Tendances et Scénarios » -Rapport final, BRGM/RP-60416-FR 56 p., 24 fig., 5 ann.

**Saltel M., Cabaret O.** (2012) - Explore 2070 - Hydrologie souterraine - Bassin Aquitain - Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie - Armines - BRGM.

**Schnebelen N., Platel J.P., Petelet-Giraud E., Dubreuilh J., Benhammouda S., Dufour P.** (2002) - Gestion des eaux souterraines en Aquitaine. Année 5. Opération sectorielle. Relations entre l'estuaire de la Gironde et la nappe de l'Éocène. Réalisation d'un piézomètre complémentaire. Suivi du réseau d'alerte et synthèse des résultats. Protocoles d'action - BRGM/RP-51177-FR, 113 p.;, 37 fig., 3 ann.

**SMEGREG** (2009) - Présentation de l'étude de l'incidence des changements climatiques sur les consommations d'eau potable. COMMISSION LOCALE DE L'EAU - réunion du 26 octobre 2009.

**SMEGREG** (2010) - SAGE Nappes profondes de Gironde - Tendances et scénarios.

**Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A.** (2012) - An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, Vol. 93, 485–498.

**Terray L., Boé J.** (2013) - Quantifying 21st-century France climate change and related uncertainties. *Comptes Rendus Geoscience*, Vol. 345, 136-149.

**Thiéry D., Amraoui N., Gomez, E.and N., Seguin J.J.** (2011) - Regional model of groundwater management in North Aquitania aquifer system: Water resources optimization and implementation of prospective scenarios taking into account climate change.. *Water Security in the Mediterranean Region*, NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. pp. 275-290. eds. A. Scozzari \& B. El Mansouri. DOI 10.1007/798-94-007-1623-0., Vol. Series C: Environmental Security, 275-290.

**Vernoux J.F., Lions J., Petelet-Giraud E., Seguin J.J., Stollsteiner P., Lalot E.** (2010) - Contribution à la caractérisation des relations entre eau souterraine, eau de surface et écosystèmes terrestres associés en lien avec la DCE. Rapport BRGM/RP-57044-FR, 207 pages, 91 illustrations, 1 annexe.

**Vernoux J.F., Seguin J.J.** (2013) - Établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines - (année 3) et essai de détermination d'un index piézométrique standardisé. Rapport BRGM/RP-61807-FR, 110 p., 66 ill., 4 ann.

**Vernoux J.F., Seguin J.J.** (2011) - Établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines - année 1. Rapport final - BRGM/RP-59286-FR, 129 p., 69 ill., 27 tab., 4 ann.

**Vernoux J.F., Seguin J.J.** (2012) - Établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines - année 2. Rapport final - BRGM/RP-61020-FR, 93 p., 40 ill., 3 tab., 3 ann.

**Winter T.C., Harvey J., L. Franke O., M Alley W** (1998) - Ground Water and Surface Water a single resource.

## 8. Glossaire

**AR4** : 4th Assessment Report (2007)

**AR5** : 5th Assessment Report (2013-2014)

**CCNUCC** : Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques

**CETMEF** : Centre D'Etudes Techniques Maritimes Et Fluviales

**CGDD** : Commissariat Général au Développement Durable

**CMIP5** : fifth phase of the Climate Model Intercomparison Project

**DGEC** : Direction Générale de l'Energie et du Climat

**DGPR** : Direction Générale de la Prévention des Risques

**DREAL** : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

**EEA** : European Environment Agency

**FAR** : First Assessment Report (1990) 1er rapport d'évaluation

**Forçage radiatif** : Le forçage radiatif est le changement de l'exposition énergétique verticale nette (exprimée en  $Wm^{-2}$ ) à la tropopause dû à un changement interne ou à un changement du forçage externe du système climatique (changement de la concentration de dioxyde de carbone ou du rayonnement solaire, par exemple). En général, le forçage radiatif est calculé en tenant compte du réajustement des températures stratosphériques à l'équilibre radiatif, mais avec toutes les propriétés troposphériques maintenues à leurs valeurs non modifiées.

**GCM** : Global Climate Model

**GES** : Gaz à effet de serre

**GHG** : Green House Gaz

**GIEC** : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat IPCC en anglais

**IPCC** : Intergovernmental Panel on Climate Change

**MEDDE** : Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie

**MME** : Multi-Model Ensemble

**Modèle climatique** : Simulation informatique des évolutions possibles du climat terrestre, fondée sur les composants du système climatique et leurs interactions ainsi que sur différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre.

**OMM** : Organisation Météorologique Mondiale

**ONEMA** : Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques

**ONERC** : Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique en France métropolitaine et dans les départements et territoires d'outre-mer

**PNUE** : Programme des Nations Unies pour l'Environnement

**RCM** : Regional Climate Models

**RCP** : Radiative concentration Pathway

**SAR** : Second Assessment Report (1995) 2ème rapport d'évaluation

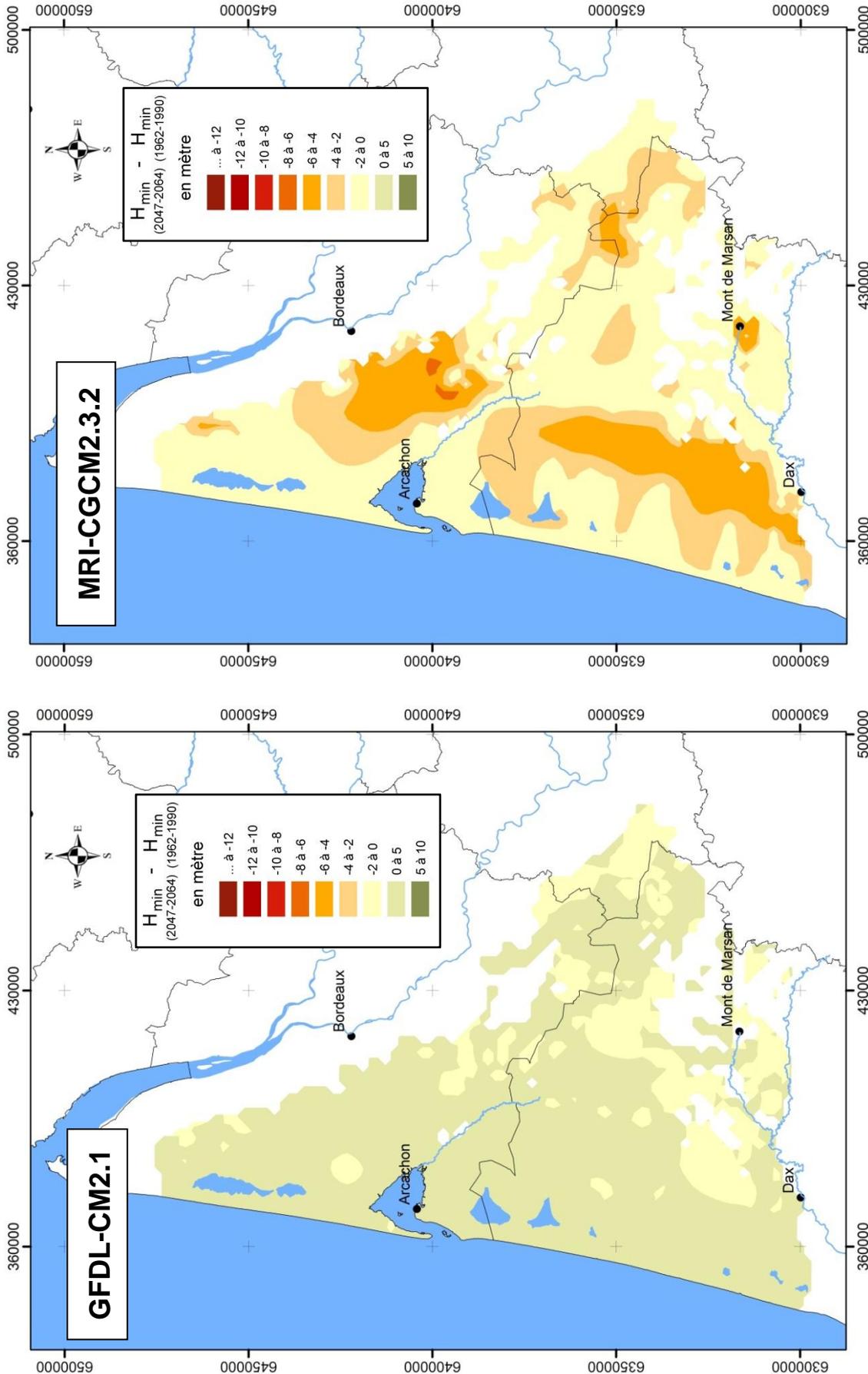
**Système climatique** : Système extrêmement complexe formé de cinq composants principaux : l'atmosphère, l'hydrosphère, la cryosphère, la surface terrestre et la biosphère, et les interactions entre eux. Le système climatique évolue dans le temps sous l'effet de ses propres éléments dynamiques internes et en raison de forçages externes tels que les éruptions volcaniques, variations solaires, et de forçages anthropiques tels que la modification de la composition de l'atmosphère et les changements d'affectation des terres.

**TAR** : Third Assessment Report (2001)

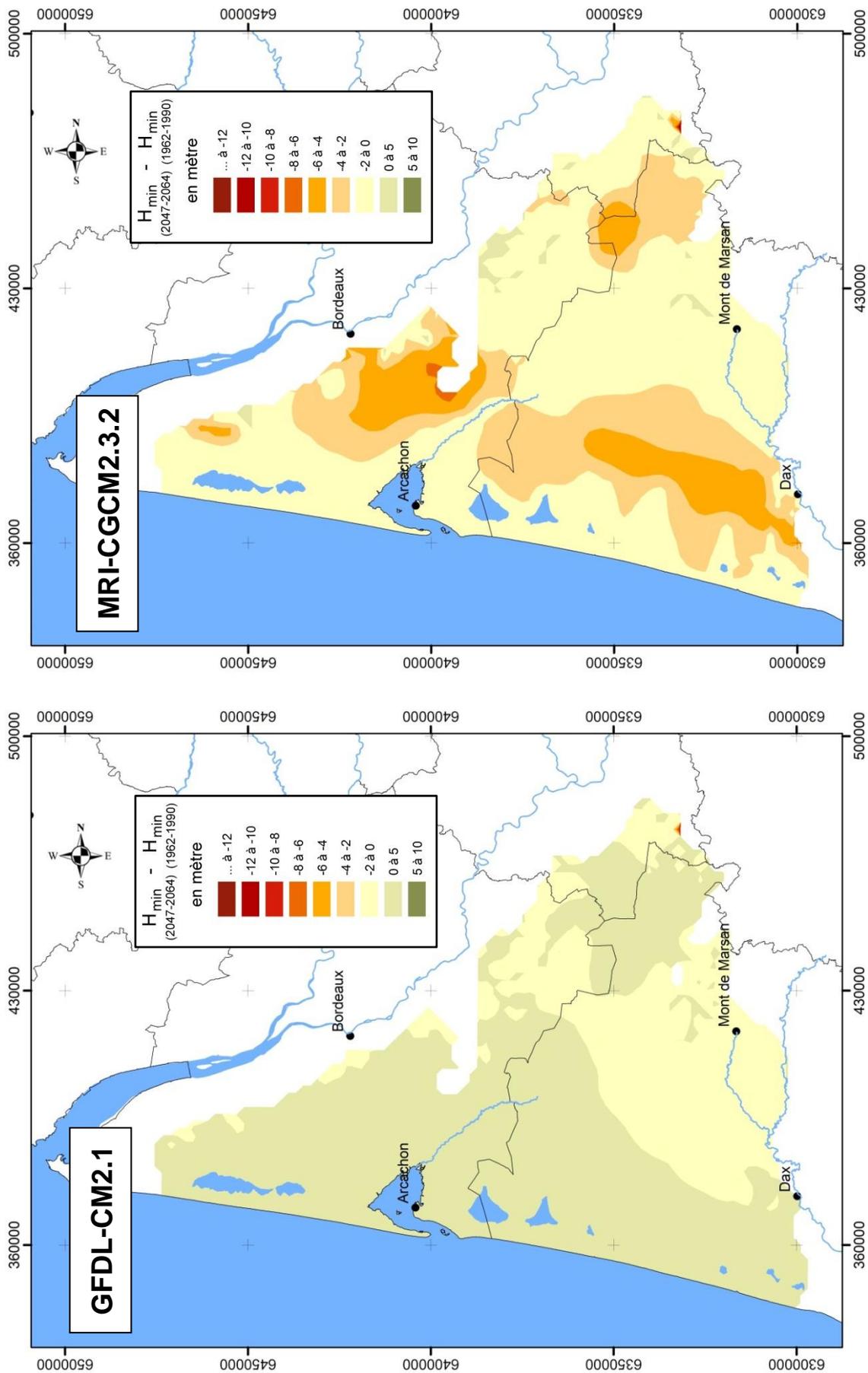
## **Annexe 1**

### **Explore 2070- Bassin aquitain - 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**

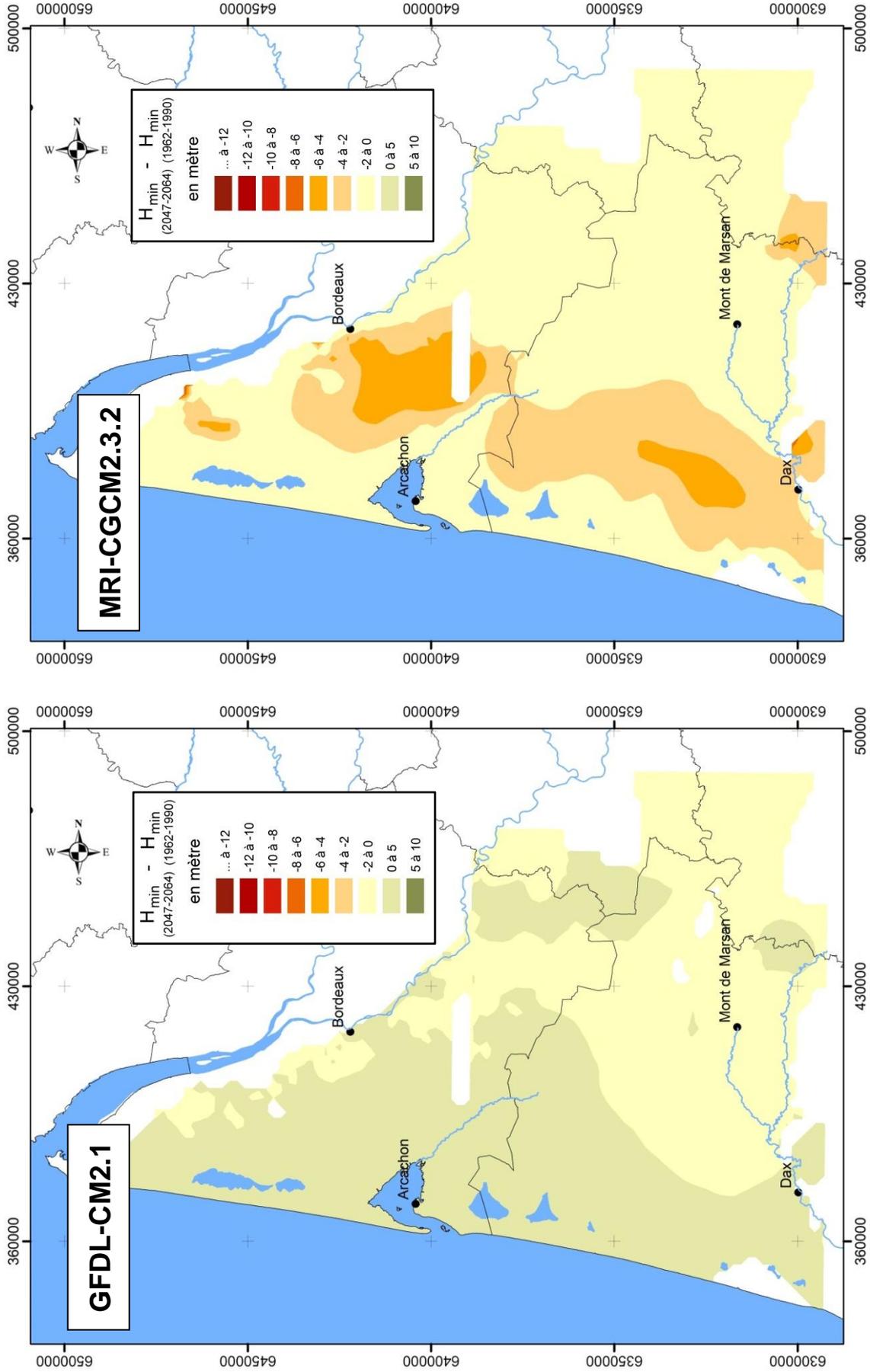




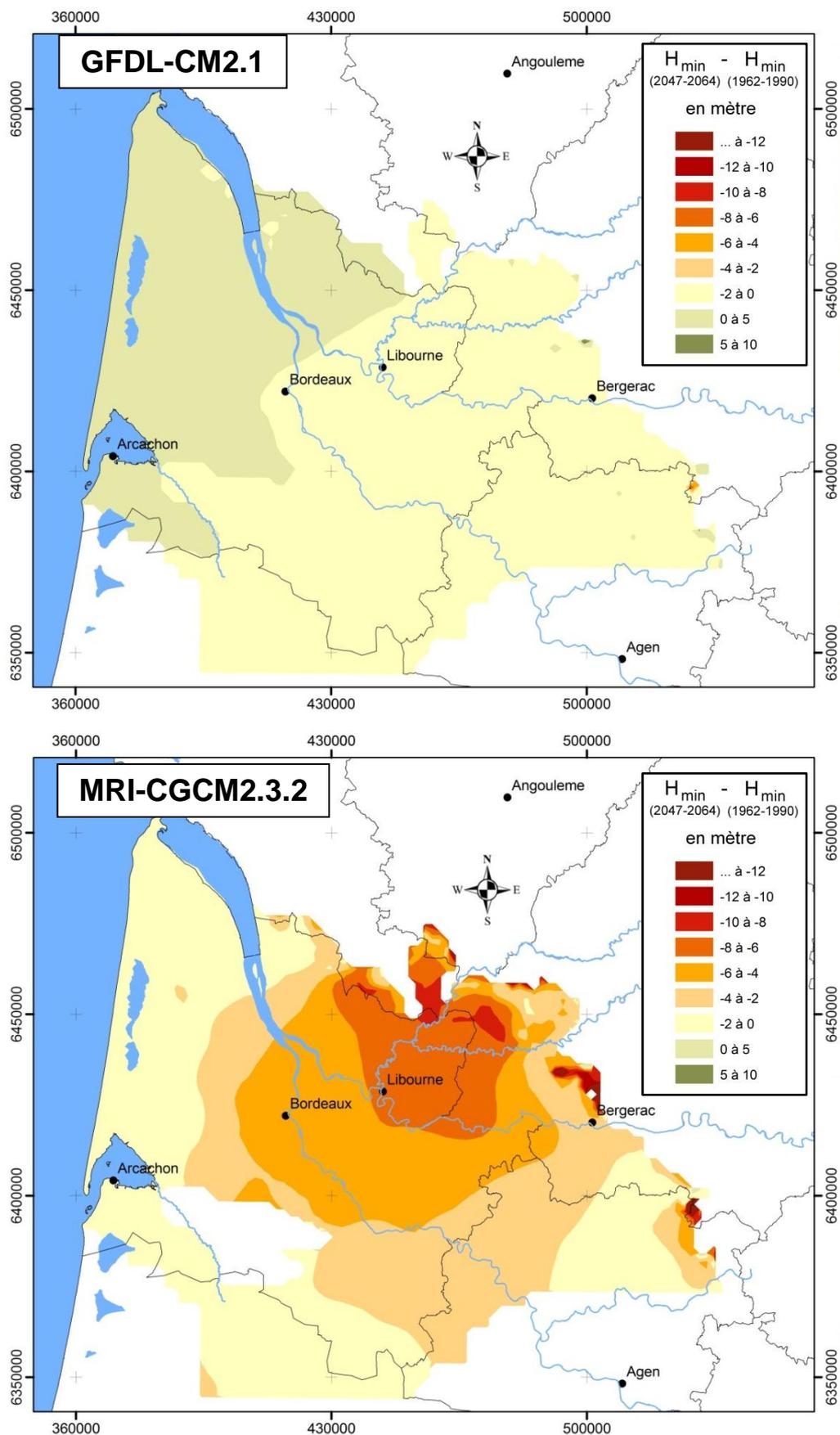
Cartes des écarts de la piézométrie minimale calculée entre la période 2047-2064 et la période de référence 1962-1990 pour les modèles GFDL-CM2.1 et MRI-CGCM2.3.2 : **Nappe du Plio-quaternaire**



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**



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**



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**



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Centre scientifique et technique**

3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34 - [www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)

**Direction régionale Aquitaine**

Parc Technologique Europarc  
24, avenue Léonard de Vinci

33 600 – Pessac - France

Tél. : 05 57 26 52 71