



*Liberté • Égalité • Fraternité*

**RÉPUBLIQUE FRANÇAISE**

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



## Hydrologie souterraine

Synthèse

Octobre 2012



## SYNTHESE ET CONCLUSIONS

Afin de quantifier l'impact du changement climatique sur les ressources « quantitatives » en eau souterraine, le groupement BRGM/ ARMINES a proposé, dans le cadre de sa contribution au projet Explore 2070 :

- d'utiliser les modèles hydrodynamiques maillés, déjà calés sur la période actuelle,
- de compléter ces évaluations par quelques modélisations globales pluie-débit-niveau piézométrique déjà réalisées avec des logiciels tels que GARDENIA ou TEMPO du BRGM
- d'étendre les résultats obtenus à l'aide de ces modèles à l'ensemble du territoire.

Les modèles hydrodynamiques proposés dans le cadre de cette étude couvrent une grande partie du territoire métropolitain et une partie de la Guadeloupe. Ils modélisent différents types d'aquifères dans des formations différentes et de caractéristiques différentes. La première partie de ce rapport dresse un inventaire des systèmes aquifères en France, présente les caractéristiques la localisation et l'étendue de ces différents types d'aquifères.

Les systèmes aquifères modélisés, les objectifs de modélisation et les logiciels utilisés étant différents, les modèles ont des données d'entrée, des pas de temps de modélisation, des maillages et mêmes des données et rendus de sortie très différents. La présentation et le calage de ces différents modèles ont fait l'objet d'un rapport intermédiaire. L'exploitation et la présentation des résultats de de ces modèles font l'objet de volumes séparés à raison d'un volume spécifique par modèle hydrodynamique.

La démarche a principalement consisté, après calage, à utiliser en données d'entrée des modèles :

- Les séries de pluie et ETP fournis par Météo France (Lot 3) représentative du temps actuel (période 1961-1990),
- Les séries de pluies et ETP issues de sept modèles climatiques différents sur la période 2045-2065,

Puis à comparer les variations relatives des différents termes du bilan temps présent/ temps futur et à évaluer les incertitudes issues des modèles climatiques. Ces modèles, qui prévoient une augmentation de température moyenne d'environ 3°C, fournissent des estimations pluviométriques et d'ETP conduisant à des résultats sensiblement différents. Aussi, les résultats présentés seront constitués de la moyenne et des valeurs enveloppes extrêmes obtenues avec les données de ces 7 modèles. Cette démarche n'a toutefois pas été possible pour les DOM car les prévisions climatiques y sont particulièrement délicates du fait de la très forte variabilité spatiale et du peu de points de

calcul des modèles climatiques au droit de ces zones.

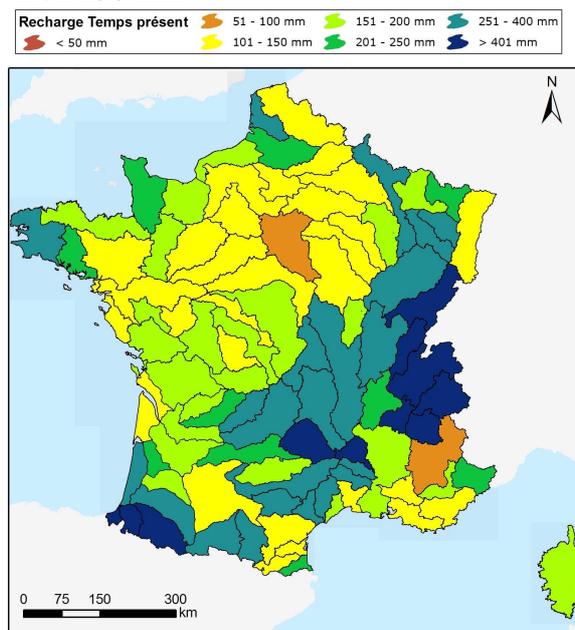
Les principaux résultats obtenus à partir de ces modèles ont ensuite été utilisés simultanément avec les résultats du lot 3 (hydrologie de surface) afin de préciser et/ou évaluer les impacts du changement climatique sur les ressources en eaux souterraines au droit des bassins versants « Explore » non modélisés. Cette extension repose principalement sur l'IDPR qui permet de fournir une estimation de la répartition ruissellement - percolation, permettant ainsi de définir, à partir de la pluie efficace, la recharge des aquifères.

La recharge des bassins versants « Explore » (illustration ci-après) est ainsi constituée des valeurs :

- Obtenues par modélisations hydrodynamiques complétées pour les bassins non modélisés par :
- La recharge obtenue à l'aide de la lame ruisselée au moyen des résultats GR4 (lot 3) et de l'IDPR,
- pour les points manquants ou douteux restants (Rhône moyen, Rhône aval, Loire moyenne, Garonne moyenne), par la recharge obtenue à l'aide de la pluie efficace Météo France (lot 3) et de l'IDPR.

Il est à noter que les résultats des bilans hydrologiques, temps présent comme temps futur, des lots 3 (hydrologie superficielle) et 4 (hydrologie souterraine) sont très voisins même s'il existe quelques différences dans les estimations du pourcentage de décomposition eau de surface/eau souterraine.

Hormis quelques bassins où les résultats fournissent une recharge proche voire supérieure à la pluie efficace et dont les valeurs peuvent être considérées comme légèrement surestimées, la recharge ainsi obtenue varie entre 20% et 90 % de la pluie efficace avec une valeur moyenne comprise entre 55 et 60%. En valeur absolue, elles varient de 88 mm ou 98 mm à 600 mm voire 724 mm autour d'une valeur moyenne d'environ 230 mm.



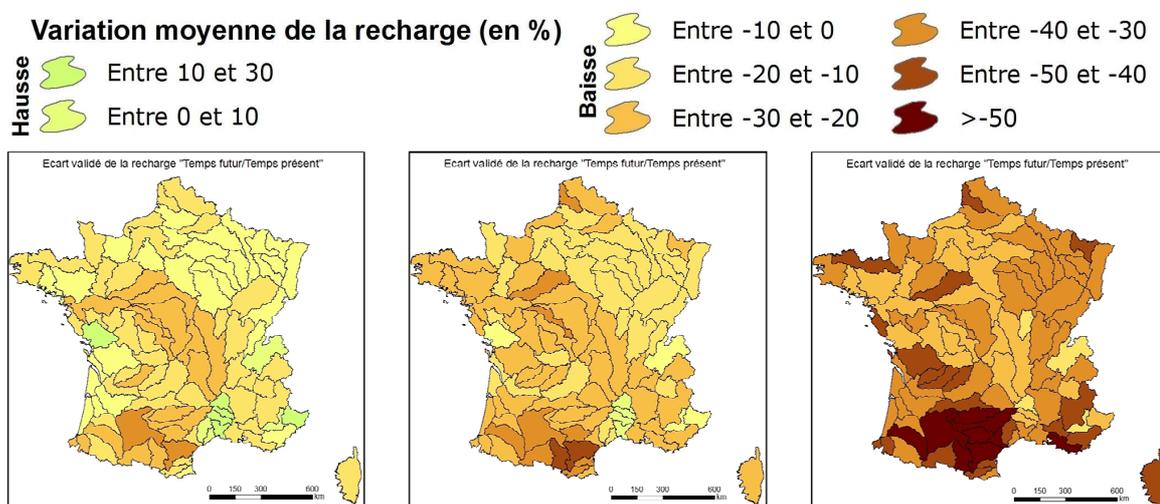
Carte de la recharge temps présent

La recharge temps futur est déterminée de façon similaire. Toutefois, afin de préciser les incertitudes dérivant des différents modèles climatiques utilisés dans le cadre de cette étude, il apparaît nécessaire de fournir non seulement la valeur moyenne obtenue par l'intermédiaires de ces sept modèles mais également les valeurs maximales et minimales des écarts évalués entre la recharge future et la recharge actuelle par chacun de ces modèles. Il y a donc trois cartes proposées permettant ainsi de fournir une évaluation moyenne et des évaluations minimales et maximales.

L'examen de ces cartes indique, pour la valeur moyenne (illustration ci-dessous), 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%.

Ces baisses significatives s'expliquent par une diminution de la pluviométrie, une hausse significative de l'EvapoTranspiration Potentielle (via notamment l'élévation de température) une stagnation (inhérente aux hypothèses d'utilisation des modèles) des coefficients culturaux (notamment vis-à-vis de la végétation non productive : irrigation) et des coefficients de ruissellement.



**Ecarts minimal, moyen et maximal de la recharge temps futur/ temps présent**

Par rapport au temps présent et pour tous les modèles climatiques étudiés, l'ensemble des piézomètres montrent une baisse du niveau moyen mensuel de la nappe liée à la baisse de la recharge. Les données issues des modèles ARPV3 et CFDL- CM2.0 sont celles qui fournissent les simulations les plus pessimistes alors que les données des modèles GISS et CFDL CM2.1 fournissent les plus optimistes, et ce avec une variabilité très importante.

Sur les plateaux, les niveaux de la nappe sont relativement plus hauts et réagissent plus à la variation de la recharge comparé aux piézomètres qui sont proches de la rivière pour lesquels le niveau de la nappe est très lié au niveau de la rivière et à la cote topographique.

D'après les différentes modélisations réalisées il ressort :

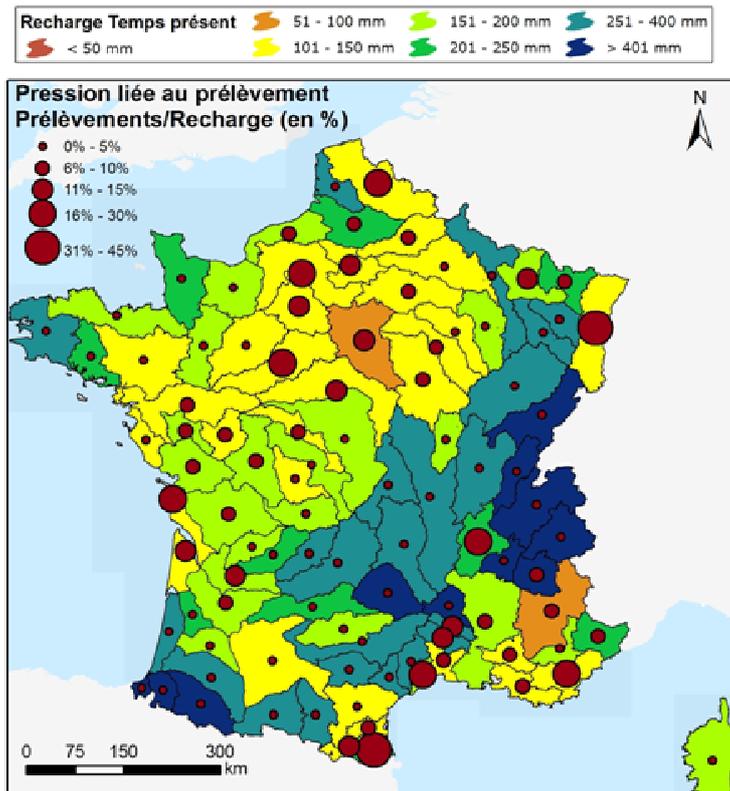
- Que les modèles optimistes indiquent une légère baisse des niveaux de l'ordre de 0.5 m à 1.5 m, voire pour certaines régions (Aquitaine, Poitou, ) une hausse locale possible.
- Que les modèles pessimistes indiquent une baisse très limitée de la piézométrie au droit des plaines alluviales mais de fortes baisses, pouvant atteindre 10 m, sur les plateaux et ou contreforts au droit des bassins sédimentaires, les baisses étant conséquentes mais plus limitées sur le socle (1 à 4 m).

De même que pour les niveaux piézométriques, les résultats sur les débits sont très contrastés entre les sept modèles climatiques. Néanmoins, pratiquement tous les modèles climatiques montrent une baisse du débit moyen mensuel des cours d'eau à l'horizon 2065, baisse qui paraît plus accentuée au sud qu'au nord mais qui varie également en fonction de conditions locales spécifiques (géologie, altitude, présence d'ouvrages ...). Cette baisse varie globalement entre 10 et 40 % dans la moitié nord et 30 à 50% dans la moitié sud avec quelques extrêmes obtenus, pour quelques modèles climatiques, pouvant atteindre, semble-t-il, 70%. La répartition annuelle des débits est également modifiée dans la mesure où on constate :

- une diminution des débits d'étiage (baisse variant généralement entre 30 et 70%),
- une stagnation voire une légère baisse des débits hivernaux.

Cette baisse relative des débits hivernaux n'empêche pas, toutefois, de constater, sur certains bassins versants et pour quelques modèles climatiques, la possible apparition de forts débits hivernaux (Somme, Rhin, ...) confirmant ainsi la possible apparition de crues longues. Pour les crues plus rapides, le pas de temps des modélisations ne permet pas de déterminer s'il peut y avoir un impact.

L'illustration ci-dessous fournit la pression actuelle, par bassin versant « Explore », liée aux prélèvements en eau souterraine de l'année 2006 fournis par le BIPE (lot 7) sur fond de la carte des recharges. On constate que la pression est maximale sur certains bassins du bassin Parisien (Loire Moyenne, Seine aval, ..) le Nord, la Plaine d'Alsace, la vallée du Rhône et le Tet. Toutefois ainsi que signalé précédemment, les recharges prises en compte n'incluent pas les échanges nappe rivière qui sont généralement importants au droit des grandes plaines alluviales telles que l'Alsace.



Pression liée aux prélèvements en eau souterraine par bassin versant « explore »  
(données BIPE, 2006)

Par suite de la variation des prélèvements en eau souterraine proposé par le BIPE entre 2006 et 2070 (Lot 7) qui se caractérise par:

- Une réduction très importante des prélèvements industriels,
- Une stagnation voire une baisse globalement très légère des prélèvements agricoles,
- Une augmentation de la demande AEP le long des côtes, notamment la côte atlantique, en Savoie et en Languedoc Roussillon,

L'impact de cette variation de la demande, qui s'ajoutera à celle de l'impact climatique, va généralement se limiter à :

- Une légère remontée des niveaux piézométriques par rapport aux niveaux piézométriques modélisés à la baisse à prélèvements constants, sauf au droit des ouvrages eux-mêmes où l'arrêt des pompages va entraîner une remontée ponctuelle importante,
- Une faible, voire insignifiante, augmentation des débits d'étiage,
- Une baisse au droit des zones où les prélèvements vont augmenter (cf. illustration 86), baisse dont l'amplitude dépendra notamment de l'augmentation de la demande mais également des caractéristiques de l'aquifère concerné. En aquitaine, par exemple, on notera notamment une baisse possible d'environ 2 m pour le plio-quadernaire le long de la côte, baisse pouvant atteindre 12 m pour l'Eocène.

Si l'on ne tient pas compte de la problématique qualité, les ressources en eau des DOM sont

importantes et ne sont que partiellement exploitées sur la partie eau souterraine. L'impact du changement climatique pourrait, d'après les estimations réalisées, induire une augmentation de température de l'ordre de 2°C ce qui aurait pour conséquence d'augmenter l'ETP de l'ordre de 10% (variable suivant l'altimétrie), et réduire ainsi d'autant les ressources mais elles resteraient globalement suffisantes pour la satisfaction des besoins. Il est toutefois probable que cet impact serait plus prononcé sur les côtes « sous le vent » et que dans ces zones cela pourrait poser problème, si l'on prend comme critère la DCE, vis-à-vis du bon état environnemental.

Hormis la Guyane qui ne devrait pas souffrir de cette diminution des ressources, l'impact de ce changement devrait aggraver la situation actuelle sur les autres DOM, situation qui a déjà mis en évidence :

- Une mauvaise répartition locale de la ressource, obligeant ainsi à envisager des transferts d'eau de l'est vers l'ouest,
- Une remontée du biseau salé (cf. paragraphe ci-dessous).

En effet, parallèlement à l'impact sur les eaux souterraines, l'influence de la remontée de niveau marin a été étudiée au moyen de deux approches différentes.

La première approche, reposant sur l'utilisation d'un modèle numérique de terrain (MNT) et sur la pression démographique propose une classification de la sensibilité actuelle des aquifères côtiers et fournit une carte de vulnérabilité pour différents scénarios de surélévation du niveau marin. Il en ressort que l'on recense de nombreux endroits à forte vulnérabilité notamment en méditerranée entre Marseille et l'Espagne. Dans ces zones à forte activité touristique, la surélévation du niveau marin associée à une forte demande estivale en eau risquent de générer une remontée du biseau salé qui mettrait en danger la qualité des aquifères côtiers. Il est ainsi fortement probable qu'il faille dès à présent envisager un déplacement, vers l'intérieur des terres, des ouvrages de prélèvements les plus exposés.

La deuxième approche repose sur deux modélisations hydrodynamiques qui permettent d'étudier la progression du biseau salé et l'équilibre hydrodynamique des nappes :

- une réalisée sur la presqu'île de Grande terre en Guadeloupe qui confirme la première approche et montre que dans certains cas l'élévation du niveau marin peut représenter une diminution significative de la surface émergée (plaine des Grappons),
- une réalisée sur le marais Poitevin qui indique, d'après les premiers tests, que l'effet d'une remontée de niveau marin et de salinité au niveau d'un estuaire peut ne pas avoir un impact très important sur le biseau salé; l'impact associé aux prélèvements peut être tout aussi significatif. Actuellement l'extension du front salé à l'intérieur des terres est de 200 mètres

aussi bien au repos qu'en période de prélèvement. D'ici 100 ans l'augmentation de la côte moyenne de l'estuaire de +0.6m et un doublement de la salinité de l'estuaire entraînerait une progression du front salé d'une distance inférieure à 100 mètres. Enfin, malgré le choix du secteur présentant le plus grand nombre de données, il a été difficile d'étudier précisément les intrusions d'eau en provenance de l'estuaire. Ceci permet, encore une fois, de souligner la nécessité d'acquérir des données en vue de la construction d'un modèle à plus grande échelle visant à étudier l'impact du changement climatique sur les aquifères côtiers.

- Par ailleurs, l'influence de la remontée du niveau marin peut se faire sentir sur l'équilibre hydrodynamique des nappes sur plusieurs kilomètres dans le cas de marais. Sur la base des premiers résultats de cette modélisation hydrodynamique du Marais poitevin, et ce sans prise en compte de la salinité, les simulations de son augmentation, en maintenant les volumes prélevés actuels, engendrent des secteurs déprimés d'étendue importante (charges généralement inférieures aux 0 NGF actuel) et indiquent que le niveau des nappes pourrait être inférieur ou au mieux égal au niveau de l'océan sur plus d'une dizaine de kilomètres à l'intérieur des terres. Ce qui entraînerait évidemment une forte progression du biseau salé.

En conclusion, malgré :

- les hypothèses simplificatrices :

- pas de modifications des paramètres de calage des modèles c'est-à-dire notamment pas de ruissellement supplémentaire pouvant être généré par assèchement des sols et/ou pas de diminution de l'évapotranspiration des parties naturelles de la végétation ;
- pas de reconstitution des débits naturels malgré les prélèvements et ouvrages actuels, qui pallient à une méconnaissance des réactions de la nature ;
- le manque de données fiables (montant et répartition des prélèvements) ;
- les adaptations potentielles rendues possibles par le futur.

Il est probable que les ressources en eaux souterraines vont diminuer de manière sensible à l'horizon 2070.

Les scénarii climatiques optimistes montrent ainsi une diminution de la ressource variable, suivant les bassins versants, entre +10 et -30% et les scénarii pessimistes entre -20 et -55% autour d'une valeur moyenne variant entre 0 et -50%. La baisse des débits d'étiage des cours d'eau va, quant à elle, être, au moins, aussi importante or la situation est déjà critique dans certains secteurs vis-à-vis des débits minimums biologiques. Il conviendra donc de réaliser des économies d'eau et d'envisager de mieux répartir les prélèvements dans l'espace et dans le temps. Cela passe par l'exploitation de nouvelles ressources et l'abandon de certaines, et, pour faire face à la remontée du

niveau marin et au développement urbain en bord de mer, source probable d'aggravation de remontée du biseau salé, par le déplacement d'ouvrages de prélèvement proches du milieu marin.

## SOMMAIRE

<b>1.</b>	<b>INTRODUCTION</b>	<b>19</b>
1.1.	PRESENTATION DU PROJET EXPLORE 2070	19
1.2.	RAPPEL DE LA METHODOLOGIE PROPOSEE	19
1.3.	CONTENU DU PRESENT RAPPORT	20
<b>2.</b>	<b>HYDROGEOLOGIE GENERALE</b>	<b>22</b>
2.1.	AQUIFERES ET EAUX SOUTERRAINES	22
2.1.1.	RÉSERVOIRS AQUIFÈRES	22
2.1.2.	ALIMENTATION ET ÉCOULEMENT NATUREL DES EAUX SOUTERRAINES	24
2.1.3.	CAPTAGE DES EAUX SOUTERRAINES	26
2.1.4.	PRINCIPAUX AQUIFÈRES FRANÇAIS	27
2.2.	BASSINS SEDIMENTAIRES	30
2.3.	AQUIFERES ALLUVIAUX	32
2.4.	MASSIFS ANCIENS : AQUIFERE DE SOCLE	35
2.5.	AQUIFÈRES VOLCANIQUES	39
2.6.	AQUIFÈRES KARSTIQUES	44
2.7.	AQUIFÈRES LITTORAUX	49
2.8.	SYSTÈMES AQUIFÈRES ET RÉFÉRENTIEL HYDROGÉOLOGIQUE	50
2.8.1.	SYSTEMES AQUIFERES	50
2.8.2.	REFERENTIEL HYDROGEOLOGIQUE DE LA FRANCE	53
2.8.2.1.	Version 1	53
2.8.2.2.	Version 2 ou BD LISA	54
2.8.3.	MASSES D'EAU SOUTERRAINE	56
2.9.	EXPLOITATION DES EAUX SOUTERRAINES	60
2.9.1.	EVALUATION DES PRELEVEMENTS ANTERIEURS A L'ETUDE	60
2.9.2.	EVALUATION DE LA PRESSION DES PRELEVEMENTS DANS LE CADRE DU PROJET EXPLORE 207065	
<b>3.</b>	<b>PREMIERES ANALYSES DE DIFFERENTS PARAMETRES ET INDICATEURS</b>	<b>66</b>
3.1.	PRÉCIPITATIONS TOTALES ET PRÉCIPITATIONS EFFICACES	66
3.1.1.	RÉPARTITION DES PRÉCIPITATIONS MOYENNES ANNUELLES	66

3.1.2.	ÉVALUATION DES PRÉCIPITATIONS EFFICACES MOYENNES ANNUELLES SUR LA PÉRIODE 1970-1999 .....	67
3.1.2.1.	<i>Evaluation antérieure à l'étude : période 1970-1999.....</i>	67
3.1.2.2.	<i>Evaluation dans le cadre du projet explore 2070 : période 1961-1990 .....</i>	68
<b>3.2.</b>	<b>ANALYSE DE DIFFERENTS INDICATEURS .....</b>	<b>68</b>
3.2.1.	INDICE DE DÉVELOPPEMENT ET DE PERSISTANCE DES RÉSEAUX (IDPR) .....	69
3.2.2.	COMPARAISON IDPR ET RESULTATS DRAIN/RUNC (METEO FRANCE).....	70
3.2.3.	EVALUATION DE LA RECHARGE DES AQUIFERES PAR L'IDPR.....	71
<b>3.3.</b>	<b>PREMIERES ANALYSES DES LONGUES SERIES PIEZOMETRIQUES.....</b>	<b>73</b>
3.3.1.	INTRODUCTION .....	73
3.3.2.	SERIES PIEZOMETRIQUES LONGUE DUREE .....	73
3.3.3.	ANALYSES STATISTIQUES SUR LES SERIES SELECTIONNEES .....	75
3.3.3.1.	<i>Analyse de tendance simple .....</i>	75
3.3.3.2.	<i>Analyse de tendance et de rupture .....</i>	75
3.3.3.3.	<i>Piézomètres influencés par les prélèvements.....</i>	79
3.3.3.4.	<i>RELATION ENTRE RUPTURES DÉTECTÉES DANS LES SÉRIES ET ÉPISODES CLIMATIQUES PARTICULIERS.....</i>	80
<b>3.4.</b>	<b>VULNERABILITE A LA SECHERESSE DES AQUIFERES A NAPPE LIBRE.....</b>	<b>81</b>
3.4.1.	DOMAINE ETUDIE ET METHODOLOGIE .....	81
3.4.1.1.	<i>Domaine étudié .....</i>	81
3.4.1.2.	<i>Méthodologie .....</i>	82
3.4.2.	EVALUATIONS DES CRITERES.....	83
3.4.3.	RESULTATS : IRIS : INDICATEUR DE RESISTANCE INTRINSEQUE A LA SECHERESSE .....	86
<b>4.</b>	<b>MODELISATIONS HYDRODYNAMIQUES DES AQUIFERES _____</b>	<b>89</b>
<b>4.1.</b>	<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>89</b>
<b>4.2.</b>	<b>PRINCIPES GENERAUX DE MODELISATION .....</b>	<b>89</b>
4.2.1.	RAPPELS SUR LES PRINCIPES ET ETAPES DE LA MODELISATION .....	89
4.2.1.1.	<i>Les principes .....</i>	89
4.2.1.2.	<i>Les étapes.....</i>	89
4.2.1.3.	<i>Le logiciel MARTHE utilisé pour la modélisation au brgm.....</i>	92
4.2.1.4.	<i>Principe du modele hydrogeologique MODCOU utilisé à ARMINES.....</i>	93
4.2.2.	ECHANGES ENTRE LE DOMAINE DE SURFACE ET LE DOMAINE SOUTERRAIN .....	95
<b>5.</b>	<b>MODELISATIONS GLOBALES _____</b>	<b>97</b>
<b>5.1.</b>	<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>97</b>
<b>5.2.</b>	<b>MODELISATIONS GARDENIA DE DIFFERENTS BASSINS VERSANTS.....</b>	<b>98</b>

<b>5.2.1. OBJECTIF</b> .....	98
<b>5.2.2. RESULTATS DES MODELISATIONS</b> .....	99
5.2.2.1. <i>BASSIN VERSANT DU SCORFF</i> .....	99
5.2.2.2. <i>Bassin versant de l'Avre</i> .....	99
5.2.2.3. <i>Bassin de la CONIE</i> .....	102
5.2.2.4. <i>autres modélisations</i> .....	107
<b>5.3. BASSIN VERSANT DE LA LOIRE</b> .....	<b>107</b>
5.3.1. INTRODUCTION .....	107
5.3.2. MODELISATIONS REALISEES .....	107
5.3.3. RESULTATS OBTENUS .....	108
5.3.3.1. <i>Niveaux piézométriques</i> .....	108
5.3.3.2. <i>Débits moyens annuels</i> .....	109
<b>6. RESULTATS DES MODELISATIONS HYDRODYNAMIQUES</b> _____	<b>111</b>
<b>6.1. INTRODUCTION</b> .....	<b>111</b>
<b>6.2. IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE</b> .....	<b>111</b>
6.2.1. INTRODUCTION .....	111
6.2.2. BAISSSE DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES .....	112
6.2.2.1. <i>Bassin Parisien</i> .....	112
6.2.2.2. <i>Plaine d'Alsace</i> .....	112
6.2.2.3. <i>Poitou Charente</i> .....	112
6.2.2.4. <i>Bassin Aquitain</i> .....	114
6.2.2.5. <i>Somme</i> .....	116
6.2.3. EVOLUTION DES DEBITS DES COURS D'EAU .....	118
6.2.3.1. <i>Bassin Parisien</i> .....	118
6.2.3.2. <i>Plaine d'Alsace</i> .....	118
6.2.3.3. <i>Bassin Aquitain</i> .....	120
6.2.3.4. <i>Poitou Charente</i> .....	120
6.2.3.5. <i>Bassin de la Somme</i> .....	121
<b>6.3. IMPACT DES PRELEVEMENTS</b> .....	<b>123</b>
6.3.1. INTRODUCTION .....	123
6.3.2. BASSIN DE LA SEINE .....	124
6.3.3. PLAINE D'ALSACE .....	124
6.3.4. BASSIN AQUITAIN .....	125
6.3.5. BASSIN DE LA SOMME.....	125
6.3.6. POITOU CHARENTE .....	125
<b>6.4. CONCLUSION</b> .....	<b>126</b>

6.4.1.	BASSIN PARISIEN .....	126
6.4.2.	BASSIN AQUITAIN .....	127
6.4.3.	PLAINE D'ALSACE .....	129
6.4.4.	POITOU CHARENTE .....	130
6.4.5.	LA SOMME .....	131
6.4.6.	GRANDE TERRE EN GUADELOUPE .....	132
6.4.7.	LE LEZ.....	133
<b>7.</b>	<b>EXTENSION DES RESULTATS DES MODELES HYDRODYNAMIQUES _</b>	<b>135</b>
<b>7.1.</b>	<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>135</b>
<b>7.2.</b>	<b>METHODOLOGIE.....</b>	<b>135</b>
<b>7.3.</b>	<b>DONNEES TEMPS FUTUR .....</b>	<b>136</b>
<b>7.4.</b>	<b>ANALYSE DES PLUIES EFFICACES : .....</b>	<b>137</b>
<b>7.5.</b>	<b>RECHARGE DES AQUIFERES .....</b>	<b>140</b>
7.5.1.	DECOMPOSITION DE LA PLUIE EFFICACE : IDPR .....	140
7.5.2.	RECHARGE TEMPS PRESENT .....	140
7.5.3.	RECHARGE TEMPS FUTUR.....	146
<b>7.6.</b>	<b>NIVEAUX PIEZOMETRIQUE .....</b>	<b>151</b>
7.6.1.	EVENEMENTS EXCEPTIONNELS : REMONTEE DE NAPPE .....	151
7.6.2.	NIVEAU PIEZOMETRIQUE HORS EVENEMENTS EXCEPTIONNELS .....	152
<b>7.7.</b>	<b>EVOLUTION DES DEBITS .....</b>	<b>153</b>
<b>7.8.</b>	<b>PRELEVEMENTS .....</b>	<b>154</b>
7.8.1.	PRELEVEMENTS 2006.....	154
7.8.2.	PRESSION SUR LA RESSOURCE .....	154
7.8.3.	INFLUENCE DES PRELEVEMENTS EN 2070 SUR LES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES .....	156
<b>8.</b>	<b>IMPACT SUR LES AQUIFERES COTIERS _____</b>	<b>157</b>
<b>8.1.</b>	<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>157</b>
<b>8.2.</b>	<b>METHODOLOGIES UTILISEES VIS-A-VIS DE LA VULNERABILITE DES AQUIFERES .....</b>	<b>158</b>
<b>8.3.</b>	<b>TEST DE CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE DES AQUIFERES COTIERS A DIFFERENTES ECHELLES : NATIONALE ET REGIONALE.....</b>	<b>160</b>
8.3.1.	DEMARCHE NATIONALE ?.....	160
8.3.2.	CARTE A .....	162
8.3.3.	CARTE B : MNT .....	163
8.3.4.	CARTE C .....	164

8.3.5.	CARTE DE VULNERABILITE .....	166
8.3.6.	CONCLUSION .....	169
<b>8.4.</b>	<b>PAR MODELISATION : MARAIS POITEVIN.....</b>	<b>169</b>
8.4.1.	CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE .....	169
8.4.2.	DESCRIPTION DU MODELE EXISTANT (CF. VOLUME) .....	170
8.4.2.1.	<i>Description des simulations</i> .....	172
8.4.2.2.	<i>Résultats des simulations</i> .....	173
8.4.2.3.	<i>Effets sur les Piézomètres</i> .....	173
8.4.2.4.	<i>Cartographie des résultats</i> .....	175
8.4.3.	CONCLUSION.....	179

## VOLUMES

Volume 1 : Rapport principal

Volume 2 : Modélisation hydrodynamique (MODCOU) de la Plaine d'Alsace

Volume 3 : Modélisation hydrodynamique (MARTHE) du Bassin Aquitain

Volume 4 : Modélisation globale (TEMPO) du Lez

Volume 5 : Modélisation hydrodynamique (MARTHE) du Poitou Charentes

Volume 6 : Modélisation hydrodynamique (MODCOU) du Bassin Parisien

Volume 7 : Modélisation hydrodynamique (MARTHE) du Bassin de la Somme

Volume 8 : Ressources en eau souterraine des DOM

Volume 9 : Résumé du lot 4 « Hydrologie- ressources en eau souterraine »

## Table des illustrations

<i>illustration 1 : Principaux terrains aquifères de France dans leur cadre géologique synthétique (avec indication des débits possibles dans les ouvrages de captage) .....</i>	<i>23</i>
<i>illustration 2 : Exemple de variabilité des temps d'écoulements des eaux souterraines selon les caractéristiques physiques de l'aquifère (gradient de 1%) (adapté selon C. Drogue, 1971).....</i>	<i>25</i>
<i>illustration 3 : Carte hydrogéologique structurale de la France (J. Margat, 1986) .....</i>	<i>27</i>
<i>illustration 4 : Principaux aquifères à nappe captive du territoire français (J. Margat, 1980et 2003).28</i>	
<i>illustration 5 : typologie des aquifères .....</i>	<i>29</i>
<i>illustration 6 : Caractéristiques des principales formations aquifères du territoire français (J. Margat, 1986).....</i>	<i>31</i>
<i>illustration 7 : Principales nappes alluviales de France.....</i>	<i>32</i>
<i>illustration 8 : Principaux types d'aquifères alluviaux .....</i>	<i>33</i>
<i>illustration 9 : Modèle conceptuel stratiforme de la structure et des propriétés hydrogéologiques des aquifères de socle (Wyns, 2002) .....</i>	<i>36</i>
<i>illustration 10 : Exemple de variabilité spatiale à l'échelle cartographique .....</i>	<i>41</i>
<i>illustration 11 : Coupe d'une coulée « aa » en mouvement .....</i>	<i>42</i>
<i>illustration 12 : Modèle conceptuel du système karstique (d'après A. Mangin, 1975) .....</i>	<i>45</i>
<i>illustration 13 : Carte hydrogéologique des formations carbonatées karstifiables (d'après B. Marsaud).....</i>	<i>48</i>
<i>illustration 14 : Typologie des biseaux salés (V. Petit, 1996).....</i>	<i>50</i>
<i>Illustration 15 : Exemples d'informations cartographiques obtenues à partir de BD LISA.....</i>	<i>55</i>
<i>Illustration 16 : Typologie des masses d'eau souterraine (M. Normand, D.Chadourne, 2003) ..</i>	<i>58</i>
<i>Illustration 17 : Carte des masses d'eau souterraine de niveau 1 de la France, Version 1.0.....</i>	<i>59</i>
<i>illustration 18 : Principaux prélèvements d'eau souterraine répartis par aquifère (estimation 1999).61</i>	
<i>illustration 19 : Répartition et nombre des captages AEP par bassin versant « Explore » .....</i>	<i>62</i>
<i>illustration 20 : Prélèvements comparés aux ressources par bassin (1999).....</i>	<i>63</i>
<i>illustration 21 : Flux naturels moyens et taux d'exploitations des principaux aquifères Français (1996).....</i>	<i>64</i>
<i>illustration 22 : Prélèvements actuels (2006) et projection des prélèvements en 2070 en eau souterraine en Mm<sup>3</sup> (Source BIPE) .....</i>	<i>65</i>
<i>Illustration 23 : Pluviométrie moyenne interannuelle et Pluie efficace moyenne interannuelle (Période 1970-1999) .....</i>	<i>68</i>
<i>illustration 24 : Pluviométrie moyenne interannuelle et Pluie efficace moyenne interannuelle (Période 1961-1990) .....</i>	<i>68</i>
<i>Illustration 25 : Report de l'IDPR pérenne (haut) et universel : pérenne et intermittent (bas) ....</i>	<i>70</i>
<i>illustration 26 : Comparaison de la répartition de la pluie efficace safran entre infiltration et ruissellement a) fournie par Météo France b) par l'IDPR.....</i>	<i>71</i>
<i>illustration 27 : Pourcentages retenus pour le calcul du ruissellement et de l'infiltration .....</i>	<i>72</i>
<i>Illustration 28 : Recharge moyenne interannuelle sur la période 1961-1990 calculée à partir de la pluie efficace Météo France.....</i>	<i>72</i>
<i>Illustration 29 : Exemples de chroniques de piézomètres à éliminer .....</i>	<i>74</i>
<i>Illustration 30 : Exemples de chroniques de piézomètres à conserver .....</i>	<i>75</i>

<i>Illustration 31 : Exemple d'analyse de tendance simple</i> .....	75
<i>Illustration 32 : Définition des tests réalisés</i> .....	76
<i>Illustration 33 : Tableau récapitulant les résultats des tests réalisés</i> .....	77
<i>Illustration 34 : Exemple de graphiques et de tableau de résultats réalisés lors de cette analyse</i> 77	
<i>illustration 35 : Localisation des piézomètres à tendances significatives (baisse et hausse des niveaux), aux risques 1% et 5 % (70 piézomètres)</i> .....	78
<i>illustration 36 : Masses d'eau captées par les piézomètres en baisse significative et en hausse significative</i> .....	79
<i>illustration 37 : Piézomètres à la baisse (rouge, à gauche) et à la hausse influencés par des prélèvements (bleue, à droite)</i> .....	80
<i>illustration 38 : Vulnérabilité à la sécheresse - Localisation et liste des aquifères traités</i> .....	82
<i>illustration 39 : Pondération et notation des critères de résistance retenus</i> .....	83
<i>illustration 40 : Temps de demi-décroissance des aquifères (en mois)</i> .....	84
<i>illustration 41 : Superficie des aquifères</i> .....	85
<i>illustration 42 : IDPR des systèmes aquifères</i> .....	86
<i>illustration 43 : Classement des aquifères en fonction de IRIS</i> .....	87
<i>illustration 44 : carte de résistance à la sécheresse de 80 systèmes aquifères libres et pression des prélèvements au droit de ces systèmes</i> .....	88
<i>Illustration 45 : Les étapes de la modélisation</i> .....	90
<i>illustration 46: Schéma de fonctionnement du modèle à réservoirs</i> .....	94
<i>illustration 47 : Différents cas d'échanges hydrauliques entre nappe et rivière.</i> .....	95
<i>illustration 48 : Principe du modèle en cascade de Nash</i> .....	96
<i>illustration 49 : Impact du changement climatique sur le piézomètre de Morvilliers</i> .....	97
<i>Illustration 50 : Localisation des modélisations globales les plus récentes réalisées par le groupement</i> .....	98
<i>illustration 51 : Variations des principaux termes du bilan du Scorff à Plouay</i> .....	99
<i>illustration 52: Modélisation globale du BV du Scorff : calage de la modélisation</i> .....	100
<i>illustration 53 : Modélisation globale du BV du Scorff : comparaison Etat Présent / Etat Futur</i> 101	
<i>illustration 54 : Variations des principaux termes du bilan de la Conie à Conie Molitard (pompages maintenus).</i> .....	102
<i>illustration 55 : Modélisation globale du BV de l'Avre : calage de la modélisation et évolution des niveaux piézométriques et des débits</i> .....	103
<i>illustration 56 : Modélisation globale du BV de l'Avre : comparaison Etat Présent / Etat Futur</i> 104	
<i>illustration 57 : Modélisation globale du BV de la Conie : calage de la modélisation et évolution des niveaux piézométriques</i> .....	105
<i>illustration 58 : Modélisation globale du BV de la Conie : comparaison Etat Présent / Etat Futur</i> 106	
<i>illustration 59 : Principaux résultats des modélisations de quatre séries piézométriques : écarts état présent/ état futur</i> .....	107
<i>illustration 60 : Exemples de variation de niveaux piézométriques des nappes libres à proximité de Tours</i> .....	109
<i>illustration 61 : Diminution maximale des débits aux droits des différents bassins versants « explore » de la Loire</i> .....	110
<i>illustration 62 : Bassin Parisien : Calcaire de Beauce (en haut) et Craie (en bas) - baisse du niveau moyen de la nappe sur la période 2046-2065 par rapport à la période de référence (1961-1990) pour quelle simulation ?</i> .....	113

<i>illustration 63 : Poitou Charente : Jurassique supérieur (en haut) et Dogger (en bas) - baisse du niveau moyen de la nappe sur la période 2046-2065 par rapport à la période de référence (1961-1990) pour la simulation la plus pessimiste MRI-CGCM 2.3.2.....</i>	<i>115</i>
<i>illustration 64 : Bassin Aquitain: Plio-quatenaire: baisse du niveau mini (CM2.1) et maxi (CGCM2.3.2) de la nappe sur la période 2046-2065 par rapport à la période de référence (61-90) .....</i>	<i>116</i>
<i>illustration 65 : Bassin de la Somme : baisse maximale du niveau moyen en mètres (ARPV3) de la nappe sur la période 2046-2065 par rapport à la période de référence (1961-1990).....</i>	<i>117</i>
<i>illustration 66: Evolution relative des débits moyens mensuels à l'horizon 2046-2065 (moyenne des 7 modèles de climat).....</i>	<i>118</i>
<i>illustration 67 : Evolution des débits minimaux mensuels de période de retour 5 ans simulés aux stations hydrométriques entre le temps présent et les périodes 2046-2065 avec les sept projections climatiques.....</i>	<i>119</i>
<i>illustration 68 :Evolution moyenne mensuelle du débit de l'Avre à la station de Moreuil (Bassin de l'Avre).....</i>	<i>122</i>
<i>illustration 69 : Evolution moyenne mensuelle du débit de la Somme à la station de Boismont.....</i>	<i>122</i>
<i>illustration 70 : Scénario 1 d'évolution des prélèvements : variation relative du débit moyen mensuel des grands cours d'eau du bassin de la Seine par rapport au débit moyen mensuel modélisé à l'horizon 2046-2065 sans évolution de prélèvements .....</i>	<i>124</i>
<i>illustration 71 : Ecart de moyenne annuelle de la température quotidienne Safran simulé pour la France métropolitaine entre simulations 2046-2065 et référence 1961-1990 : intervalle de confiance et valeurs extrêmes. Pour l'ensemble des 7 simulations-scénario A1B (en °C) (source Lot 3).....</i>	<i>137</i>
<i>illustration 72 : Rapports moyens du cumul annuel pluviométrique Safran simulé pour la France métropolitaine, pour la période de référence 1961-1990 et rapport entre simulations 2046-2065 et référence pour l'ensemble des 7 simulations-scénario A1B (en % / valeur de réf.) (source Lot 3).....</i>	<i>137</i>
<i>illustration 73 : Lame ruisselée moyenne interannuelle calculée à l'aide du modèle GR4 (Lot 3).....</i>	<i>139</i>
<i>illustration 74 : IDPR calculée au droit des bassins versants explore.....</i>	<i>140</i>
<i>illustration 75 : Comparaison des recharges temps présent obtenues par modélisation hydrodynamique maillée, modélisation hydrologique, par IDPR et pluie efficace Météo France et les valeurs de Drainage Météo France. ....</i>	<i>142</i>
<i>illustration 76 : Corrélation entre les recharges calculées et la pluie efficace Météo France ...</i>	<i>143</i>
<i>illustration 77 : Corrélation Pluie efficace Météo France- Recharge des bassins « Explore »..</i>	<i>144</i>
<i>illustration 78 : Carte de la recharge temps présent.....</i>	<i>145</i>
<i>illustration 79 : Comparaison des écarts temps présent/temps futur de la recharge calculée par les lots 3 et 4 .....</i>	<i>146</i>
<i>• illustration 80 : Enveloppe maximale de l'écart de la recharge temps futur/ temps présent obtenue par modélisation hydrodynamique maillée et modélisation hydrologique et écart maximal retenu. ....</i>	<i>148</i>
<i>illustration 81 : Enveloppe moyenne de l'écart de la recharge temps futur/ temps présent obtenue par modélisation hydrodynamique maillée et modélisation hydrologique et écart maximal retenu.....</i>	<i>149</i>
<i>illustration 82 : Enveloppe minimale de l'écart de la recharge temps futur/ temps présent obtenue par modélisation hydrodynamique maillée et modélisation hydrologique et écart maximal retenu.....</i>	<i>150</i>
<i>illustration 83 : Carte de sensibilité aux remontées de nappes.....</i>	<i>152</i>
<i>illustration 84 : Prélèvements en eau souterraine par bassin versant « explore » en 2006 (données BIPE).....</i>	<i>154</i>
<i>illustration 85 : Pression liée aux prélèvements en eau souterraine par bassin versant « explore » .....</i>	<i>155</i>
<i>illustration 86 : Evolution des prélèvements en eaux souterraines entre 2006 et 2070.....</i>	<i>156</i>

<i>Illustration 87 : Schéma de la démarche de cartographie nationale de la vulnérabilité des aquifères côtiers de la bande littorale vis-à-vis de l'intrusion marine dans un contexte de changement climatique et de remontée de niveau marin à l'échelle nationale.....</i>	<i>161</i>
<i>Illustration 88 : Illustration de la démarche de cartographie de la vulnérabilité des aquifères côtiers de la bande littorale vis-à-vis de l'intrusion marine dans un contexte de changement climatique et de remontée de niveau marin à l'échelle nationale .....</i>	<i>162</i>
<i>illustration 89 : Carte de sensibilité des aquifères côtiers vis-à-vis de l'intrusion marine pour la côte méditerranéenne.....</i>	<i>163</i>
<i>illustration 90 : Cartographie et tableau de la répartition des surfaces par altitude (0 à 1 m : risque de submersion permanente et temporaire (retour d'un événement tous les 20 ans) pour l'ensemble des côtes de Métropole .....</i>	<i>164</i>
<i>Illustration 91 : Calcul des surfaces submersibles permanentes ou temporaires bi-décennales</i>	<i>164</i>
<i>Illustration 92: Cartes des pressions anthropiques sur les aquifères côtiers de la France Métropolitaine .....</i>	<i>165</i>
<i>Illustration 93: Cartes des prélèvements des eaux souterraines (irrigation, AEP et industriel) sur la côte méditerranéenne et la côte atlantique .....</i>	<i>166</i>
<i>Illustration 94: Cartes des prélèvements des eaux souterraines pour les besoins en eau potable (AEP) sur la côte méditerranéenne .....</i>	<i>166</i>
<i>illustration 95: Cartes de la vulnérabilité des aquifères côtiers suivant la remontée du niveau marin .....</i>	<i>168</i>
<i>illustration 96: Contexte géologique de la zone d'étude du modèle hydrodynamique du Marais Poitevin .....</i>	<i>170</i>
<i>illustration 97: Extension du modèle hydrodynamique développé sous MARTHE et zone d'étude</i>	<i>171</i>
<i>illustration 98: Comparaison des chroniques observée/simulée – piézomètre de Longeville (Dogger) .....</i>	<i>172</i>
<i>illustration 99 : Comparaison des chroniques observée/simulée – piézomètre des Caillettes (Dogger) .....</i>	<i>172</i>
<i>illustration 100: Potentiels imposés au niveau de l'Océan .....</i>	<i>173</i>
<i>Illustration 101 : Effet de la remontée océanique sur le piézomètre de Longeville.....</i>	<i>174</i>
<i>Illustration 102 : localisation des piézomètres virtuels .....</i>	<i>174</i>
<i>Illustration 103 : Résultats des simulations de remontée océanique sur les 2 piézomètres virtuels .....</i>	<i>175</i>
<i>Illustration 104 : Comparaison pour les simulations pour les hautes et basses eaux 2001 (année humide).....</i>	<i>177</i>
<i>Illustration 105 : Comparaison pour les simulations pour les hautes et basses eaux 2005 (année sèche).....</i>	<i>178</i>

# **1. INTRODUCTION**

## **1.1. PRESENTATION DU PROJET EXPLORE 2070**

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

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

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

## **1.2. RAPPEL DE LA METHODOLOGIE PROPOSEE**

Le groupement BRGM/ ARMINES a proposé, dans le cadre de sa contribution au projet Explore 2070 :

- d'utiliser les modèles hydrodynamiques maillés, déjà calés sur la période actuelle :
  - o des deux grands bassins sédimentaires (bassin parisien et bassin aquitain),
  - o des aquifères du Jurassique de la région Poitou Charente,
  - o de l'aquifère alluvial de la plaine d'Alsace,
  - o de l'aquifère crayeux de la Somme,
  - o de l'aquifère calcaire de Grande Terre en Guadeloupe.
- de compléter ces évaluations dans le socle, le karst, les zones fortement plissées et/ ou les aquifères alluviaux d'extension limitée par quelques modélisations globales pluie-débit-niveau piézométrique déjà réalisées avec des logiciels tels que GARDENIA ou TEMPO du BRGM.
- de cerner l'impact du changement climatique sur quelques indicateurs piézométriques qui

servent actuellement aux DREAL pour ajuster les volumes pompés et permettre ainsi le respect des Débits d'Objectif d'Etiage (DOE), nous proposons donc de réaliser des modélisations globales sur quelques-uns de ces indicateurs (indicateur de Beauce, des Yvelines, .....).

Parallèlement, nous nous proposons:

- d'analyser les évolutions piézométriques de quelques chroniques les plus longues afin de mettre en évidence une éventuelle absence ou présence de tendance ;
- de quantifier la ressource renouvelable sur l'ensemble du territoire à partir notamment
  - des données de pluie efficace au pas de temps mensuel,
  - de l'IDPR (cf.3.2.1)

Ceci nous permettra de déterminer la recharge et donc la ressource renouvelable.

- de fournir une cartographie des principaux aquifères, BDRHF (Banque de Données du Référentiel Hydrogéologique) version 1 ou un exemple illustrant la version 2 si celle-ci, qui est en cours de finalisation par le BRGM, a été validée.
- d'expliquer, à l'aide d'exemples concrets, notamment au droit des zones modélisées, le fonctionnement des principaux systèmes aquifères.

L'ensemble des résultats des modélisations hydrodynamiques et globales, pour les nappes libres, sera ensuite comparé aux valeurs et aux variations de la recharge estimée au moyen de la pluie efficace et de l'IDPR. Cette validation permettra ainsi de fournir les valeurs présentes et évaluer les valeurs futures probables de la recharge sur l'ensemble du territoire pour chaque modèle climatique.

### **1.3. CONTENU DU PRESENT RAPPORT**

Le présent rapport comprend :

- une partie théorique générale sur l'hydrogéologie permettant de dresser un inventaire des différents types d'aquifères, de leurs principales caractéristiques et de leur localisation,
- la présentation des référentiels hydrogéologiques et des masses d'eau,
- des cartes nationales d'indices permettant d'envisager une relation, à partir de paramètres physiques, entre la géologie et la morphologie et les potentialités de recharge,
- une première analyse des séries piézométriques ayant une longue période d'observation,
- une carte de vulnérabilité à la sécheresse des aquifères à nappe libre,

- la description des logiciels utilisés pour réaliser les modèles hydrodynamiques,
- L'analyse et comparaison des résultats des modèles hydrodynamiques avec les résultats du lot 3,
- l'extension des résultats des zones modélisées à l'ensemble du territoire par le biais des résultats du lot 3 et de l'IDPR,
- la réalisation de cartes définissant la recharge par bassin versant explore en 2006 ainsi que les variations moyennes et extrêmes, fournies par les différents modèles climatiques utilisés, de cette recharge à l'horizon 2065.
- Enfin une partie complémentaire portant sur l'impact de la surélévation de niveau marin d'un mètre, du au changement climatique, sur les ressources en eau souterraine.

## **2. HYDROGEOLOGIE GENERALE**

Cette partie a pour objectif de montrer la diversité la localisation et les caractéristiques principales des formations aquifères en France. Pour cela, il est nécessaire de procéder à un rappel théorique sur les bases de l'hydrogéologie puis de développer les notions de référentiels et de masse d'eau introduites afin de gérer, protéger, contrôler et/ou vérifier la quantité et qualité de la ressource. Cette gestion de la ressource passe obligatoirement par son adéquation avec les besoins, d'où la nécessité de connaître les montants et leurs localisations des prélèvements actuels et des besoins futurs.

La rédaction de ce chapitre s'appuie et reprend des extraits de deux livres :

- Aquifères et eaux souterraines, éditions BRGM (mars 2006), ouvrage collectif principaux auteurs des articles : J.C. Roux, J. Margat, T. Pointet, P. Lachassagne, R. Wyns, B. Blavoux, M. Livet, M. Bakalowicz, J.J. Collin.
- Les eaux souterraines : éditions BRGM (2004) J.J. Collin.

### **2.1. AQUIFERES ET EAUX SOUTERRAINES**

#### **2.1.1. RÉSERVOIRS AQUIFÈRES**

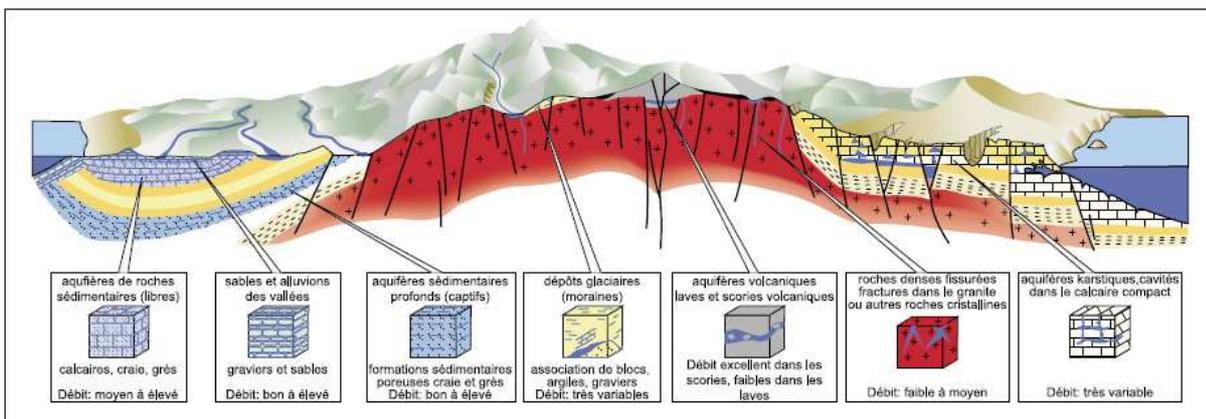
Les formations géologiques, sédimentaires pour l'essentiel, qui composent le sous-sol ont, lorsqu'elles sont assez perméables et poreuses, la capacité de permettre les écoulements verticaux et transversaux de l'eau et de l'emmagasiner. Elles constituent alors les aquifères dans lesquels le comportement des eaux souterraines est très variable selon les caractéristiques physiques et structurales des terrains. En effet, les aquifères se caractérisent principalement par leur lithologie, leur structure (épaisseur, morphologie des couches, plissements, fracturation ...), leur porosité efficace et leur perméabilité. À ce dernier paramètre, assez difficile à mesurer sur le terrain, se substitue souvent la notion de transmissivité (produit de la perméabilité par la hauteur d'aquifère sous le niveau de la nappe) plus facile à déterminer par pompage sur des puits ou forages. Un aquifère est à la fois un réservoir et un conducteur d'eau. La quantité d'eau qu'il emmagasine (réserve) et le débit qu'il écoule dépendent autant de ses dimensions (étendue, volume) que de la porosité et de la perméabilité des roches qui le constituent. Sa capacité de stockage dépend de son volume et de sa porosité efficace, tandis que son aptitude à transmettre un flux d'eau (ou transmissivité) dépend de son épaisseur et de sa perméabilité.

Deux principales catégories de réservoirs sont à distinguer (illustration 1) :

- les aquifères homogènes ou continus, à perméabilité d'interstices, constitués de sables, graviers, grès, etc.; c'est le cas des nappes alluviales qui occupent les fonds de vallée et d'une

partie des nappes des grands bassins sédimentaires. Les vitesses d'écoulement y sont généralement lentes et régulières ;

- les aquifères hétérogènes ou discontinus, à perméabilité de fissures, sont surtout constitués de calcaires mais également de roches volcaniques, granitiques ou gréseuses. Dans les massifs calcaires, les fissures sont souvent ouvertes (aquifères de type karstique), et constituent de véritables conduits souterrains dans lesquels la vitesse de circulation des eaux peut être très rapide et irrégulière.



**illustration 1 : Principaux terrains aquifères de France dans leur cadre géologique synthétique (avec indication des débits possibles dans les ouvrages de captage)**

Dans certaines roches (craie, grès), les deux types de perméabilité peuvent coexister avec généralement une prédominance de la perméabilité de fissures sous les vallons et les vallées.

Du point de vue de la dynamique des eaux souterraines, on distingue également deux types de nappes, les nappes libres généralement peu profondes (dites alors « phréatiques ») et les nappes captives, plus ou moins profondes, qui sont " piégées " sous des couches géologiques peu perméables. Sous certaines conditions ces nappes peuvent être artésiennes et jaillissantes au-dessus du sol.

Enfin, un aquifère sédimentaire peut être « monocouche », c'est-à-dire composé d'une seule formation géologique ou « multicouches », c'est-à-dire constitué par une superposition de plusieurs formations géologiques, de nature et perméabilité différentes, qui communiquent entre elles.

Les aquifères peuvent être totalement indépendants ou communiquer entre eux, latéralement ou par l'intermédiaire de failles ou encore verticalement par drainance ou artésianisme.

### **2.1.2. ALIMENTATION ET ÉCOULEMENT NATUREL DES EAUX SOUTERRAINES**

Les nappes libres sont principalement alimentées par l'infiltration d'une partie des eaux de pluies qui, compte tenu de l'évapotranspiration, sont surtout efficaces entre les mois d'octobre et d'avril où l'infiltration des eaux est facile. Ainsi, l'alimentation des eaux souterraines représente en France 20% à 23 % seulement des précipitations annuelles moyennes. Cependant, dans les aquifères très fissurés, les épisodes pluvieux des mois de printemps et d'été peuvent recharger momentanément les réservoirs aquifères. En effet, l'écoulement vertical de l'eau vers la nappe est fonction de la porosité et de la perméabilité du sol, et de la nature et l'épaisseur de la zone non saturée. La vitesse d'infiltration peut être de l'ordre du mètre par an (Craie du Cambésis, Craie de Champagne) d'un mètre par mois (Calcaires de Beauce), d'un mètre par jour (alluvions), et de plusieurs dizaines de mètres à l'heure dans les terrains très fissurés de type karstique (Causse, Jura, craie karstifiée du Bassin de Paris ...).

La capacité des sols à l'infiltration peut être cartographiée d'après l'étude de la densité des réseaux hydrographiques (cf. §3.2.1). Dans les aquifères à perméabilité d'interstices, la pluie s'infiltrant dans le sous-sol ne participe pas directement à la recharge de la nappe. C'est par transfert de pression que la lame d'eau infiltrée chasse à la base de la zone non saturée une lame d'eau égale vers la nappe. Aussi peut-il falloir plusieurs recharges successives, c'est-à-dire plusieurs années ou dizaines d'années, pour que les eaux infiltrées arrivent elles-mêmes à la nappe. Dans les aquifères fissurés, il se produit une infiltration à deux vitesses, la première, lente, à travers la masse poreuse, la seconde, plus rapide ou très rapide, par l'intermédiaire des fissures. Entre la zone d'infiltration et l'exutoire, l'eau souterraine se déplace dans l'aquifère par gravité des zones les plus hautes vers les points les plus bas. Le volume d'eau mouvante a une surface en pente. Cette surface piézométrique, véritable topographie de la nappe est révélée par le niveau des puits et des sources. Elle permet de déterminer les sens d'écoulement. Sa profondeur est très variable selon les conditions d'alimentation et de drainage. Dans les vallées alluviales, le niveau des nappes est à faible profondeur, généralement moins de 5 m. Il peut même affleurer créant des zones humides. Sous les plateaux, loin des vallées, cette profondeur peut atteindre plusieurs dizaines de mètres (50 à 100 m), jusqu'à 300 m sous les plateaux calcaires des Causse et encore davantage sous les calcaires urgoniens de Haute Provence.

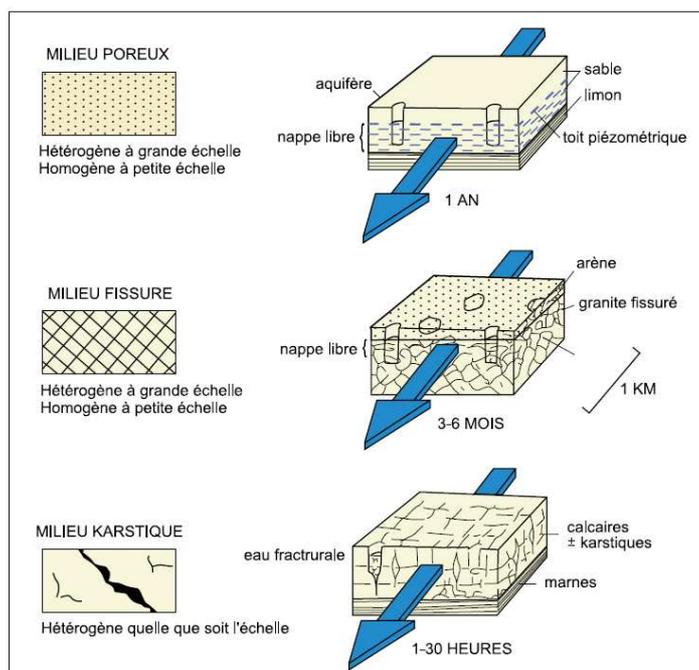
Les niveaux ne sont pas statiques mais mobiles, les fluctuations piézométriques saisonnières et annuelles étant fonction des différences entre le volume extrêmement variable, de l'alimentation par l'infiltration des pluies efficaces et le débit de sortie, beaucoup plus régulier, par les sources ou les prélèvements pas forages. Les variations piézométriques interannuelles peuvent varier de quelques mètres en nappe alluviale à plusieurs dizaines sous les plateaux. Par leur énorme capacité d'emménagement, les grands aquifères à nappe libre jouent le rôle d'immenses accumulateurs

d'eau qu'ils restituent progressivement au réseau superficiel, jouant ainsi un régulateur primordial sur les débits d'étiage des cours d'eau, rôle qui devient essentiel les années de grande sécheresse.

Les eaux souterraines sont réparties en de nombreux bassins hydrogéologiques souterrains dont la forme et les limites peuvent parfois être très différentes de celles des bassins hydrographiques de surface, ce qui peut induire des erreurs d'évaluation de la direction de l'écoulement souterrain et des superficies des bassin d'alimentation.

La vitesse d'écoulement est liée à la perméabilité de l'aquifère, elle-même fonction de la taille de l'interstice, de la fissure ou de la cavité, et au gradient. Ainsi le transfert d'un même volume d'eau sur une même distance peut nécessiter quelques années en alluvions et en milieu poreux, quelques mois en milieu fissuré et quelques jours, voire quelques heures, en milieu karstique (illustration 2).

Les nappes captives sont également alimentées par les eaux d'infiltration mais uniquement sur les zones d'affleurement à nappe libre de leur aquifère, mais elles peuvent l'être aussi par drainance des aquifères supérieurs. Les vitesses d'écoulement y sont de l'ordre de quelques mètres par an, ce qui peut représenter une durée de plusieurs millénaires entre la période d'alimentation de la nappe et celle de l'utilisation de l'eau prélevée à grande distance.



**illustration 2 : Exemple de variabilité des temps d'écoulements des eaux souterraines selon les caractéristiques physiques de l'aquifère (gradient de 1%) (adapté selon C. Drogué, 1971)**

En milieu homogène (aquifère continu), la vitesse d'écoulement varie peu selon les périodes annuelles ou interannuelles. Par contre, en milieu hétérogène (aquifère discontinu), de perméabilité

de fissures, et surtout dans les aquifères karstifiés, les vitesses d'écoulement entre hautes et basses eaux peuvent varier de 1 à 50, et les écoulements peuvent avoir un régime turbulent.

Les sources sont les exutoires naturels des aquifères. Les aquifères peuvent aussi être drainés par les cours d'eau, les eaux souterraines assurant alors la totalité du débit d'étiage. Inversement dans certaines conditions, les rivières peuvent alimenter les aquifères. Les nappes alluviales peuvent être rechargées lors des périodes de crue des cours d'eau et dans certains cas particuliers, calcaires fissurés, les cours d'eau peuvent s'infiltrer partiellement ou totalement, alimenter l'aquifère, puis après un parcours de plusieurs kilomètres, donner naissance à une résurgence.

### **2.1.3. CAPTAGE DES EAUX SOUTERRAINES**

Capter l'eau souterraine, c'est la détourner de son cours naturel. C'est le but des ouvrages tels que galeries, puits et forages, mais les sources captées sont le plus souvent aménagées par des chambres de captage ou complétées par des forages améliorant leur exploitation.

Le captage d'une source ne modifie pas les conditions d'écoulement dans l'aquifère, mais tarit ou diminue le débit du ruisseau auquel elle donne naissance. En revanche, le pompage dans un puits, un forage et a fortiori un groupe d'ouvrages (champ captant) modifie l'état d'équilibre, inverse en partie les directions d'écoulement, et provoque un cône de rabattement de la nappe en forme d'entonnoir dissymétrique.

Dans l'aquifère exploité, deux zones distinctes sont à considérer :

- la zone d'appel, dans laquelle l'ensemble des lignes de courant se dirigent vers l'ouvrage de pompage, donc où l'eau est captée. Elle est comprise dans l'aire d'alimentation du captage qui se prolonge en amont jusqu'à une limite du système (crête piézométrique ou cours d'eau) ;
- la zone d'influence dans laquelle les niveaux sont rabattus par le pompage. Elle s'étend à la fois dans la zone d'appel et hors de la zone d'appel.

Les dimensions du cône de rabattement, de la zone d'influence et de la zone d'appel, varient en fonction des paramètres hydrodynamiques, du débit et du temps de pompage. La zone d'appel a une importance considérable car les polluants qui s'y introduisent sont susceptibles d'être entraînés vers l'ouvrage de pompage.

Dans les nappes de vallées humides, les prélèvements induisent souvent une réalimentation par le cours d'eau, qui, dans certains champs captant, peut atteindre jusqu'à 90 % du débit pompé. Les pompages entraînent une modification de la qualité de la nappe et des prélèvements excessifs peuvent aller jusqu'à tarir des cours d'eau.

## 2.1.4. PRINCIPAUX AQUIFÈRES FRANÇAIS

En se basant à la fois sur des critères de structure, de type et de perméabilité, liés à la nature lithologique de la roche réservoir, ainsi que de relation avec les cours d'eau et eaux de surface, il est possible de définir une typologie des principaux aquifères (illustration 5).

Les deux tiers du territoire métropolitain sont pourvus de nappes ou de réseaux d'eau souterraine, libres ou captifs, contenus dans plusieurs centaines d'aquifères individualisés, qui peuvent être classés en aquifères libres ou captifs, aquifères alluviaux, karstiques et fissurés, multicouches, aquifères en zone de socle et en zone humide (illustration 3 et illustration 4).

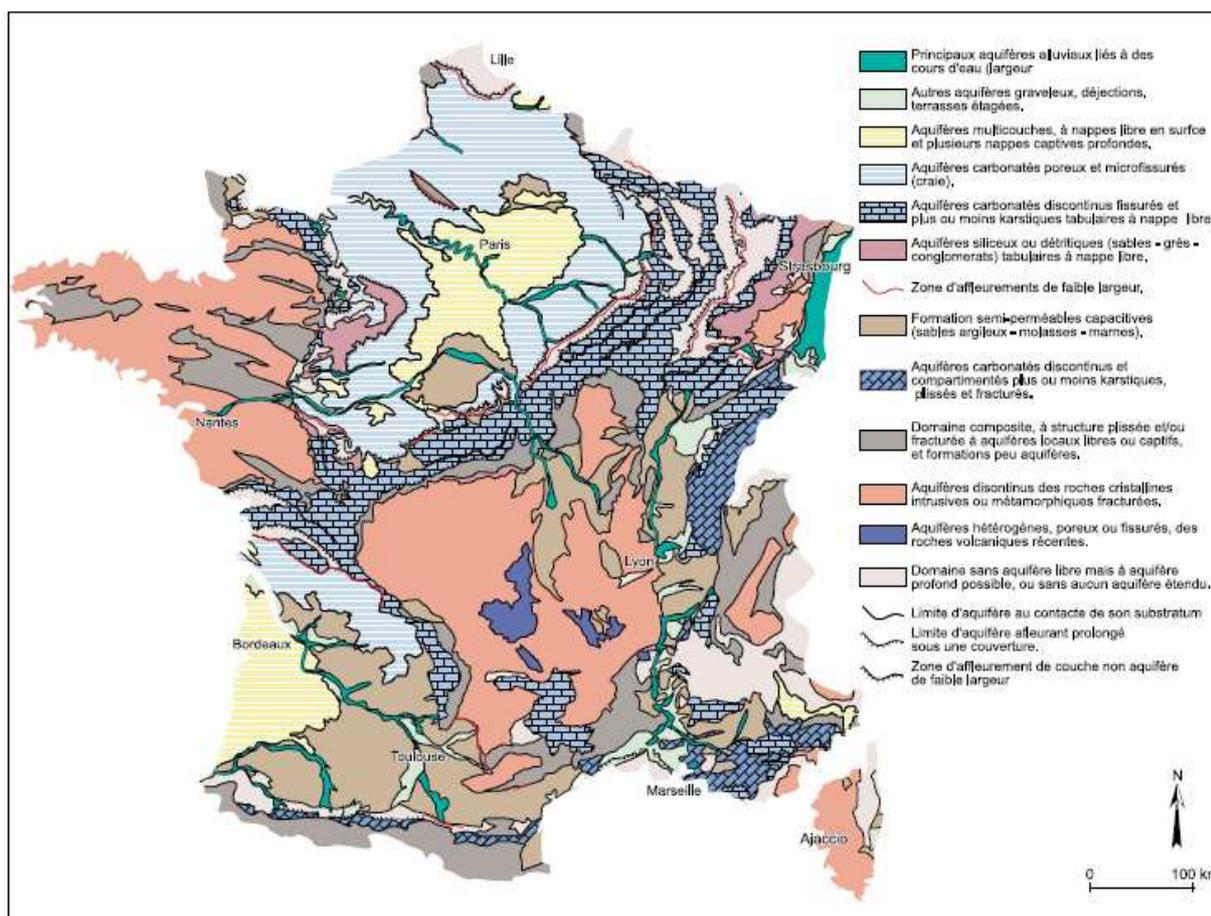


illustration 3 : Carte hydrogéologique structurale de la France (J. Margat, 1986)

Parmi eux, on distingue environ deux cents aquifères d'importance régionale, d'une superficie supérieure à 100 km<sup>2</sup> : 175 aquifères à nappe libre, monocouche ou multicouches, souvent limités par les cours d'eau majeurs qui les traversent, dont :

- 15 grands aquifères alluviaux,
- 40 aquifères karstiques,
- 20 aquifères multicouches (au moins en partie),
- 25 aquifères profonds, à nappe captive, reliés pour la plupart à l'un des précédents.

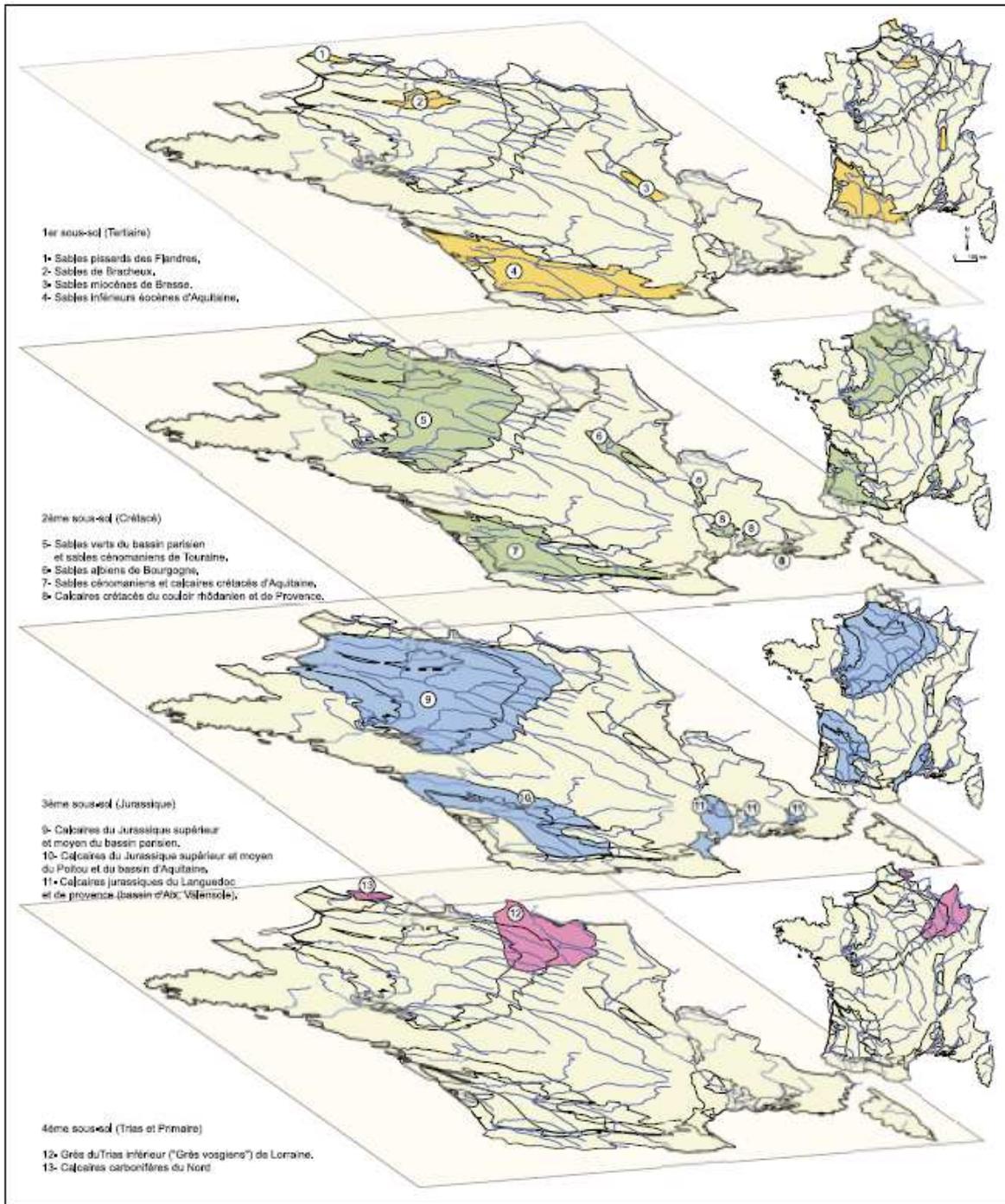


illustration 4 : Principaux aquifères à nappe captive du territoire français (J. Margat, 1980et 2003).

#### Aquifères continus

- a) **Aquifère continu, à nappe libre, monocouche :**  
Lithologie roches détritiques, poreuses et/ou fissurées (sables, grès, alluvions graveleuses, conglomérats) ; roches carbonatées poreuses et/ou fissurées (craie, dolomie, calcaires divers) ; roches volcaniques poreuses (lapillis, tufs).  
Caractéristiques perméabilité  $K = 1.10^{-2}$  à  $1.10^{-5}$  m/s.  
transmissivités moyennes élevées (ordre de  $1.10^{-1}$  à  $1.10$  m<sup>2</sup>/s).
- b) **Aquifère continu, à nappe libre, multicouche :**  
Lithologie mêmes types lithologiques que ceux de la classe précédente, mais à substratum semi-perméable et en liaison hydraulique avec des aquifères sous-jacents à nappe captive.  
Caractéristiques du même ordre de grandeur qu'en classe a).
- c) **Aquifère continu à nappe captive, monocouche ou multicouches, non affleurant, sous couverture imperméable ou semi-perméable, en continuité avec des aquifères de classe à périphérique ou en liaison hydraulique avec des aquifères supérieurs de classe b.**

#### Aquifères discontinus

- d) **Aquifère discontinu à surface libre, karstique ou volcanique :**  
Lithologie formations sédimentaires carbonatées (calcaires dolomies) ou volcaniques cohérentes, fracturées ou fissurées.  
Caractéristiques transmissivité due à fractures et chenaux :  $1.10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s.
- e) **Aquifère discontinu, à surface libre, de roches cristallines fracturées :**  
Lithologie roches cristallines fracturées : granites, migmatites principales, ou métamorphiques (gneiss).  
Caractéristiques transmissivités très variées en fonction de la densité et de la connexion des fractures : ordres de  $1.10^{-4}$  à  $1.10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s.

#### Aquifères semi-perméables

- f) **Couverture semi-perméable surmontant un aquifère de classe a) :**  
Lithologie sables argileux, argiles à silex, sidérolithique, calcaires argileux, conglomérats.  
Caractéristiques  $K = 1.10^{-4}$  à  $1.10^{-7}$  m/s.
- g) **Formations semi-perméables capacitives encaissant des aquifères locaux ou couverture de système multicouche :**  
Lithologie formations sédimentaires peu perméables (molasses, calcaires argileux), analogues à celles de la classe g), mais à fonctions séparées ou simultanées.  
Caractéristiques transmissivités :  $1.10^{-2}$  à  $1.10^{-1}$  m<sup>2</sup>/s.

illustration 5 : typologie des aquifères

Les principaux aquifères français dont les caractéristiques sont résumées dans l'illustration 6, classés par grandes catégories, sont les suivants :

## **2.2. BASSINS SEDIMENTAIRES**

Les bassins de Paris et aquitain, l'Alsace, le couloir Saône-Rhône, le Languedoc sont formés par un empilement de couches inégalement perméables. Ces bassins sont riches en réservoirs aquifères. D'après leur structure et les régimes d'écoulement des eaux souterraines, on y distingue trois types d'aquifères :

- de grands aquifères monocouches à nappe libre (illustration 3), formés de roches surtout carbonatées (craie, calcaire). Les nappes les plus importantes sont celles des aquifères de la craie dans le Nord de la France et d'une grande partie du bassin de Paris (Normandie, Picardie, Champagne, Sénonais), la nappe de la Beauce, la nappe des sables des Landes qui alimente le système multicouches d'Aquitaine qu'elle surmonte, mais peu productive ; dans ces aquifères, les vitesses d'écoulement sont variables, une fissuration pouvant coexister avec la porosité ;
- des aquifères stratifiés complexes ou multicouches, constitués surtout par des sédiments tertiaires, variés et hétérogènes, forment les régions centrales des bassins de Paris et aquitain -Île-de-France (nappe du Soissonais) et Bordelais. Ces systèmes comportent une nappe supérieure libre et en profondeur, plusieurs nappes semi-captives ;
- de grands aquifères captifs profonds (illustration 4) principalement sableux ou gréseux (nappe de l'Albien du Bassin de Paris) ou parfois carbonatés (calcaire carbonifère du Nord). Ce sont les réservoirs des nappes artésiennes classiques ; malgré leur grande profondeur, leur exploitation a été facilitée par un artésianisme initial fréquent. Mais celui-ci a rapidement décru et en général, disparu depuis l'exécution des premiers forages dans les quelques aires où ils se sont multipliés (nappe des Sables verts du Bassin de Paris, nappe des grès du Trias inférieur de Lorraine, nappe du calcaire carbonifère de la région de Lille, nappe inframolassique dans le Bassin aquitain).

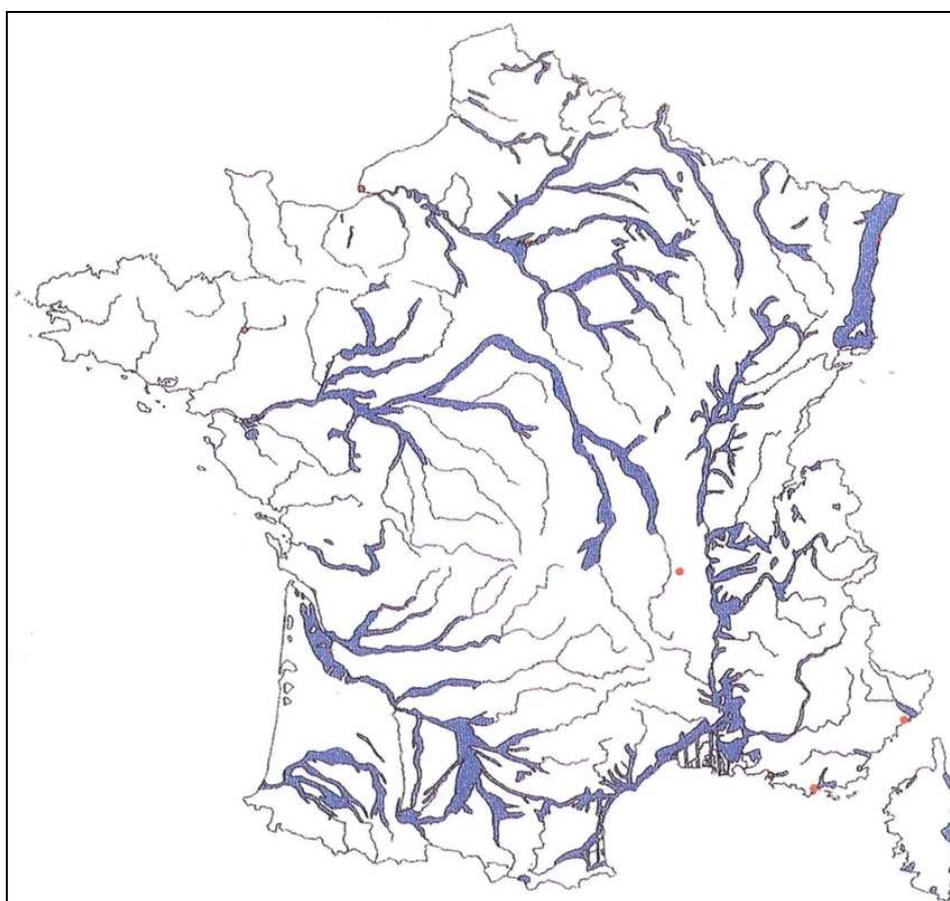
Formation aquifère	Position stratigraphique	Situation	Type de conductivité P milieu poreux F milieu fissuré	Porosité (S en nappe libre)	Épaisseur	Transmissivité m <sup>2</sup> /S
Alluvions graveleuses	Quaternaire Plio-quaternaire	Vallées fluviales, terrasses	P	0,03-0,2	5-40	10 <sup>-4</sup> -5.10 <sup>-1</sup>
		Plaine d'Alsace		0,05-0,15	10-250	1 à 5.10 <sup>-1</sup>
		Plaine du Roussillon		0,01-0,2	10-150	5.10 <sup>-4</sup> -3.10 <sup>-1</sup>
Sables  « Sables d'Ostricourt » « Sables verts »	Quaternaire  Pliocène Miocène Eocène Cénomanien Albien	Dunes côtières Landes (Aquitaine occ.)	P	0,05-0,1	10-150	10 <sup>-4</sup> -2.10 <sup>-1</sup>
		Languedoc (profondeur)	P	-	10,30	10 <sup>-4</sup> -10 <sup>-2</sup>
		Bresse (profondeur)	P	-	80	10 <sup>-3</sup>
		Nord, Flandre (→ Belgique)	P	0,01-0,05	15-45	10 <sup>-4</sup> -2.10 <sup>-1</sup>
		SO Bassin de Paris N Bassin aquitain N Bassin de Paris, Bourgogne	P	0,05-0,1	30-90	10 <sup>-4</sup> -10 <sup>-2</sup>
Sables, grès et calcaires mêlés  Molasses « Calcaire grossier » « Sables du Soissonais » « Sables inférieurs »	Oligo-miocène  Miocène Eocène Eocène	Centre Bassin de Paris S Ile-de-France, Beauce	M	0,001-0,15	50-130	10 <sup>-4</sup> -10 <sup>-1</sup>
		O Bassin aquitain			100-120	5.10 <sup>-4</sup> -3.10 <sup>-1</sup>
		N Bassin Subalpin, Bas-Dauphiné	M	0,1-0,05	100-600	1 à 5.10 <sup>-1</sup>
		Centre Bassin de Paris N Ile-de-France Centre et O Bassin aquitain	M	0,1-0,05	50-300	10 <sup>-4</sup> -10 <sup>-1</sup>
Grès « Grès du Luxembourg »  « Grès vosgien »	Lias Trias sup. (Rhetien) Permien, Tria	NE Bassin de Paris, N Lorraine	M		50-100	5.10 <sup>-4</sup> -1.10 <sup>-1</sup>
		E Bassin de Paris, Lorraine	M		10-30	5.10 <sup>-4</sup> -2.10 <sup>-1</sup>
		E Bassin de Paris, Vosges, Lorraine	M	0,10-0,15	50-500	5.10 <sup>-4</sup> -2.10 <sup>-1</sup>
Crâie	Crétacé sup.	Centre N et O Bassin de Paris = 100 000 km <sup>2</sup>	M (+ karst local)	0,001-0,05	100-500	10 <sup>-4</sup> -5.10 <sup>-1</sup>
Calcaires, dolomies « Calcaire de Brie de Champigny de Saint-Duen de Beauce »	Eocène Oligocène Crétacé sup. et moyen Crétacé inf. « Urgonien » Jurassique sup. et moyen (plusieurs couches)  Lias Trias (Muschelkalk) Dévonien Carbonifère	Centre Bassin de Paris S et SE Ile-de-France NO Bassin d'Aquitaine	F	0,001-0,01	40-100	2.10 <sup>-4</sup> -10 <sup>-1</sup>
		N Bassin aquitain Charentes + profondeur	F + karst	0,01-0,02	300-350	10 <sup>-4</sup> -2.10 <sup>-1</sup>
		Bassin Subalpin, Alpes, Provence	F + karst	0,01	200-400	10 <sup>-4</sup> (Vau-cluse) - 10 <sup>-1</sup>
		Bassin de Paris (périphérie + profondeur), Lorraine, Champagne, Bourgogne, Berry, Poitou, Normandie, Nord			∑ 100-800	10 <sup>-4</sup> -10 <sup>-1</sup>
		N et NE Bassin aquitain, Quercy, Charentes	F, M (dolomies) + karst	0,01	∑ 100-200	3.10 <sup>-4</sup> -4.10 <sup>-1</sup>
		Jura, Alpes, PréAlpes, S Massif central, Causses			∑ 600 - 1 500	-
		S Bassin de Paris, Poitou	F, M + karst	0,001-0,01	5-80	10 <sup>-4</sup> -5.10 <sup>-1</sup>
		E Bassin de Paris, Alpes, Provence	F + karst	0,005-0,01	30-100	5.10 <sup>-4</sup> -5.10 <sup>-1</sup>
Nord, Ardennes, S Massif central (Montagne Noire), Pyrénées	F + karst	0,01-0,2	30-50 (zones fissurées)	5.10 <sup>-4</sup> -10 <sup>-1</sup> 10 <sup>-4</sup> en zones fissurées		
Roches volcaniques : laves, projections	Quaternaire	Centre Massif central, Auvergne	P, F	0,01-0,1	10-200	5.10 <sup>-4</sup> -10 <sup>-1</sup>
Roches cristallines et métamorphiques	Antécambrien, Primaire	Massif armoricain, Massif central, Vosges, Alpes, Pyrénées, Maures, Corse	F	-	Zone fissurée : 100 à 200 m	-

illustration 6 : Caractéristiques des principales formations aquifères du territoire français (J. Margat, 1986)

### 2.3. AQUIFERES ALLUVIAUX

Les sables et graviers qui tapissent le fond des vallées forment tout un réseau de couloirs aquifères plus ou moins continus qui double celui des fleuves et rivières avec lequel les nappes sont pour la plupart en étroite liaison. Exception est faite pour quelques aquifères alluviaux étendus, analogues à ceux des couches sédimentaires décrites ci-dessus comme ceux d'une partie de la plaine d'Alsace, de la vallée du Rhône ou de la plaine de la Crau, en Provence.

La France est riche en plaines alluviales (illustration 7) et beaucoup de grandes villes puisent leur eau potable dans les alluvions. Les plus importantes sont celles des grands cours d'eau : Seine, Meuse et Moselle, Rhin, Loire et Allier, Saône, Rhône, Durance, Var.



**illustration 7 : Principales nappes alluviales de France**

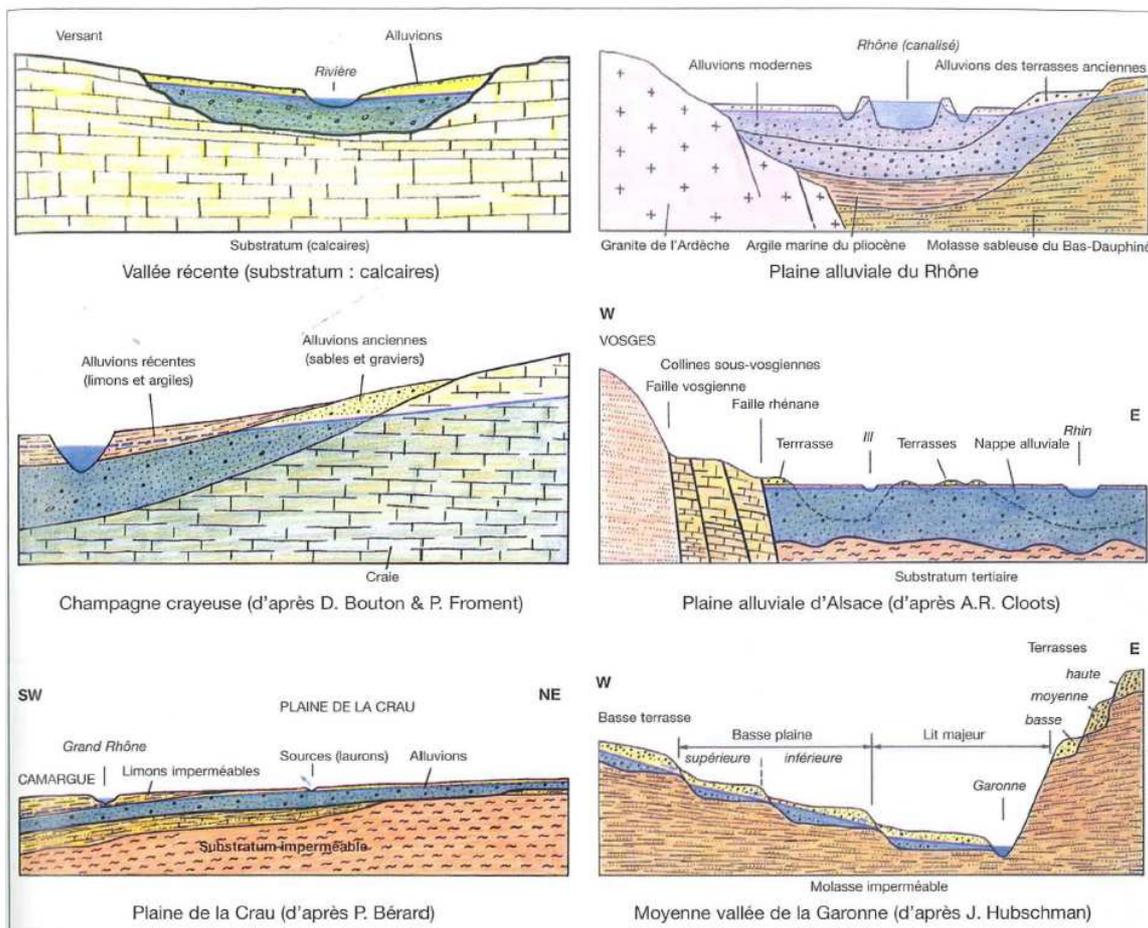
En hydrogéologie, on entend par alluvions tous dépôts fluviaux ou fluvio-glaciaires de sables grossiers, graviers, galets et blocs. Le transport et la mise en place par l'eau courante ont conduit à l'existence de sédiments, en général bien lavés, exempts d'argiles et donc poreux et perméables.

Lorsque la granulométrie des matériaux est à la fois grossière et homogène, les alluvions sont très perméables, mais si des sables fins occupent les vides entre les galets, la perméabilité peut être seulement modeste. La stratification est en général irrégulière et comporte des chenaux et des

masses lenticulaires de formation sableuse, voire argileuse, liés à la genèse du dépôt par un sesterce fluviale capricieux, divaguant, aux méandres sans cesse déplacés.

L'étagement des terrasses dans certaines vallées isole, par contre, les aquifères alluviaux des cours d'eau (Garonne). À nappe libre dans la plupart des cas, ces aquifères sont parfois captifs sous des couvertures limoneuses et argileuses, notamment dans les basses vallées non loin des embouchures. En général, plus perméables que les terrains dans lesquels elles sont encaissées, les alluvions font souvent office de drain intermédiaire entre les nappes des coteaux et les cours d'eau.

Les alternances climatiques, les événements exceptionnels mais répétés pendant la durée des temps quaternaires (plus d'un million d'années) ont permis la constitution d'épandages alluviaux de diverses natures (illustration 8) :



**illustration 8 : Principaux types d'aquifères alluviaux**

- Le type Rhône-alpin au sens large (Rhône, Doubs, Ain, Isère, Durance, Var...) présente des épandages épais d'une à plusieurs dizaines de mètres de cailloutis grossiers, calcaires et siliceux mêlés, parfois envahis de sable fin. Les épisodes d'apports anciens ont constitué des terrasses ultérieurement recreusées, au pied desquelles se sont installées d'autres alluvions plus récentes emboîtées dans les premières. La continuité hydraulique étant assurée, on a

alors affaire à de véritables systèmes aquifères. Le cours d'eau qui a donné naissance à ces alluvions a parfois disparu (plaine de Bièvre-Valloire en Dauphiné) ou changé de cours (plaine de la Crau). La plaine d'Alsace est un cas exceptionnel d'alluvions "alpines" dont l'épaisseur qui dépasse localement 100 mètres est due à l'enfoncement progressif du substratum; la partie française du bassin rhénan contient 50 milliards de mètres cubes d'eau. Presque partout dans le bassin rhodanien, la fin de l'alluvionnement est récente (elle remonte à environ 10 000 ans), les crues ont apporté depuis cette époque des limons argileux qui constituent une couverture peu perméable, épaisse de quelques mètres, et maintiennent parfois la nappe captive.

- Le type Pyrénées-Garonne comporte des terrasses à de nombreux étages ; souvent, ces niveaux ne sont pas communicants, il n'y a donc pas de système aquifère proprement dit. Les niveaux les plus hauts ne sont pas hydrauliquement soutenus par le cours d'eau. Les hautes terrasses sont également colmatées par l'altération des galets dont certains, en se décomposant, ont donné naissance à des produits argileux.
- Le type Massif central-Loire comporte surtout des graviers et des sables grossiers, presque exclusivement siliceux, avec peu de niveaux de terrasses, mais en revanche présente de vastes épandages d'épaisseur moyenne (environ 10 mètres), comme dans le val d'Orléans,
- Le type bassin de Paris-Seine présente des alluvions en général peu épais (5 à 10 mètres), dont les graviers et les galets sont souvent constitués de silex résiduels laissés par la destruction de la craie, mais des éléments calcaires proviennent également des roches les plus dures des auréoles jurassiques du bassin de Paris.
- Le type armoricain est représenté par des sables moyens à grossiers (par exemple, les alluvions de la Vilaine), de perméabilité modeste et d'épaisseur souvent peu supérieure à 5 mètres.
- Le type littoral méditerranéen (Camargue, Roussillon, Gapeau, Var, etc.), parfois influencé par un arrière-pays montagneux, comporte, par suite des fluctuations du niveau de la mer, d'importantes couches argileuses qui confèrent un caractère captif à certaines parties profondes.

A un classement basé sur des critères géologiques et géomorphologiques (importance du rôle du massif montagneux et des collines), on peut y superposer une typologie hydrologique, liée au régime naturel des cours d'eau actuels (nivo-glaciaire, nival de moyenne montagne, de plaine tempérée, méditerranéen, etc.), ainsi qu'au régime influencé par des aménagements (présence de barrages avec débit réservé et lâchers, de digues et de canaux). L'existence de biefs très calmes ou

l'eau est parfois plus haute que dans la nappe, entre écluses et barrages, peut engendrer l'alimentation de l'aquifère par l'eau de surface et favoriser le colmatage des berges.

La plupart des nappes alluviales sont en liaison hydraulique directe avec le cours d'eau et bénéficient donc de la réalimentation par celui-ci. La ressource exploitable n'a alors pour limite que le débit du fleuve.

#### **2.4. MASSIFS ANCIENS : AQUIFERE DE SOCLE**

« Les terrains cristallins et schisteux » qui dominent dans ces massifs ne comportent pas d'aquifères étendus. Il est cependant inexact de qualifier ces terrains « d'imperméables ». Les terrains anciens, non seulement les granites et roches similaires, mais les schistes, ont souvent une capacité non négligeable par leur zone altérée qui peut être épaisse de plusieurs dizaines de mètres; aussi contribuent-ils efficacement à régulariser l'écoulement des cours d'eau. Les sources y sont de faibles débits mais sont nombreuses et assez régulières. De plus, tous ces terrains sont fissurés et fracturés à des degrés divers et l'eau peut y circuler jusqu'à plusieurs centaines de mètres de profondeur et sur des distances très variées, parfois assez grandes. Ainsi s'explique l'origine de certaines sources d'eau thermo minérales.

Les « aquifères de socle » sont constitués de roches cristallines, plutoniques (granites, roches basiques, etc.) et métamorphiques (gneiss, schistes, micaschistes, etc. correspondant au métamorphisme de roches sédimentaires, volcaniques, cristallines, etc.). Mécaniquement et hydro géologiquement, il s'agit de roches dures (« hardrock » en anglais), dont les caractéristiques physiques sont liées, lorsqu'elles sont saines :

- pour les roches cristallines, à leurs propriétés initiales,
- pour ce qui concerne les roches métamorphiques, aux processus de métamorphisme qu'elles ont subi.

Elles présentent ainsi, malgré des origines et compositions très diverses, un comportement d'ensemble relativement homogène et des propriétés similaires. Elles se caractérisent ainsi principalement par une perméabilité de fissures et de fractures. Les aquifères qu'elles renferment sont classiquement considérés comme « discontinus » en raison de l'importante variabilité spatiale de leurs propriétés hydrodynamiques, par opposition aux aquifères de type poreux. Certaines formations de socle renferment également des calcaires ou des marbres, qui peuvent présenter des caractéristiques d'aquifères karstiques et ne seront de ce fait pas considérés dans le cadre du présent chapitre.

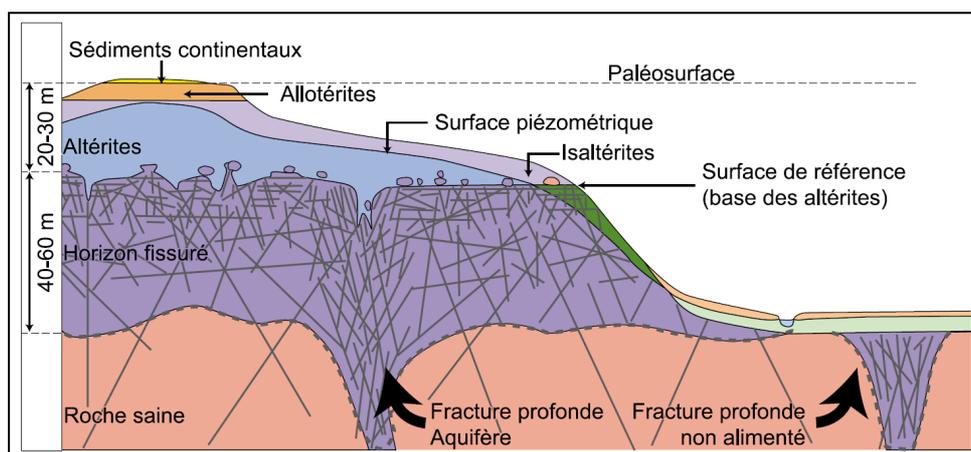
Les formations de socle montrent, à l'échelle de la France métropolitaine, une importante extension. Elles forment les massifs dits « anciens » : Massif armoricain, Massif central, Vosges et Ardennes. Elles sont également bien représentées au sein des chaînes récentes, pyrénéenne et alpine, et en Corse. En outre, le sous-sol de plusieurs Départements ou Territoires d'Outre-mer, Guyane (près de

90.000 km<sup>2</sup> de roches de socle), Saint-Pierre-et-Miquelon, Antarctique, etc. est quasi intégralement constitué de formations de socle.

Dans les régions relativement arrosées telles que les zones de socle du territoire métropolitain, les aquifères qui leur sont associés, compte tenu de leur médiocre perméabilité, se caractérisent par la présence de nombreuses sources de débordement, dispersées spatialement, montrant un faible débit unitaire, et d'émergences diffuses à l'origine d'un réseau hydrographique très dense.

La plupart des régions où affleurent les roches métamorphiques ou plutoniques sont des régions dites « stables » qui ont de ce fait été exposées, pendant des durées souvent très longues (plusieurs dizaines de millions d'années), à l'altération météorique, sous des climats chauds et humides. Les recherches développées depuis la fin des années 1990 sur les propriétés physiques acquises par les roches de socle au cours de l'altération météorique ont conduit à la mise en évidence, sous la partie meuble des profils, d'un horizon fissuré stratiforme de 50 à 100 m de puissance.

La mise en évidence de cet horizon fissuré sous la partie meuble des profils latéritiques a eu pour conséquence la mise au point d'un nouveau modèle conceptuel ( ) des aquifères de socle : ceux-ci apparaissent maintenant comme des aquifères multicouches stratiformes, avec des propriétés hydromécaniques (porosité, perméabilité) variant verticalement au sein du profil d'altération. Ces aquifères stratiformes peuvent intégrer des couloirs de fracturation d'origine tectonique. Dans le massif armoricain, deux études réalisées dans le Finistère et en Vendée ont montré que 80 à 85% de la réserve en eau souterraine est contenue dans l'horizon fissuré.



**illustration 9 : Modèle conceptuel stratiforme de la structure et des propriétés hydrogéologiques des aquifères de socle (Wyns, 2002)**

Les travaux récents menés sur les aquifères de roches de socle montrent donc que les propriétés hydrogéologiques de ces milieux sont étroitement dépendantes des caractéristiques physiques de la partie superficielle des roches de socle (100 premiers mètres environ), caractéristiques principalement liées aux processus d'altération qu'elles ont subi dans le passé, à l'échelle des temps géologiques, et aux effets éventuels de l'érosion ultérieure.

Plusieurs compartiments aux propriétés hydrogéologiques distinctes peuvent ainsi être distingués au sein des formations de socle ; du bas vers le haut (

) :

- le substratum rocheux sain. Il ne présente des perméabilités élevées que très localement, au droit des fractures d'origine tectonique, qui peuvent contribuer pour plusieurs  $\text{m}^3/\text{h}$  (jusqu'à 10 ou 20  $\text{m}^3/\text{h}$  dans certains cas) au débit instantané des forages.
- un horizon intermédiaire « fissuré - altéré » (ou horizon fissuré) est intercalé entre le substratum sain et les altérites. Il atteint en général, en France métropolitaine, une cinquantaine de mètres d'épaisseur. Il est caractérisé par la présence de fissures subhorizontales dans les granites, 10 par mètre en moyenne dans les premiers mètres sous les altérites, dont la fréquence décroît avec la profondeur. Ces quelques fractures perméables montrent une relative homogénéité de leur perméabilité (moyenne géométrique voisine de  $10^{-4}$  m/s) ; c'est donc plus leur nombre que leur perméabilité relative qui conditionne la productivité d'un forage.
- les formations meubles d'altération de ce substratum, les altérites (arènes en milieu granitique, saprolite au sein des roches métamorphiques), qui le recouvrent sur une épaisseur variable, de 0, là où cet horizon est totalement érodé, à plusieurs dizaines de mètres. Du fait de la présence quasi généralisée d'argile en leur sein, elles sont caractérisées par une relativement faible perméabilité, mais des capacités significatives d'emmagasinement.

Ces différents horizons constituent un aquifère composite dont les propriétés hydrogéologiques sont optimales, pour l'implantation de forages par exemple, dans les secteurs où ces trois compartiments sont présents, où ils combinent au mieux leurs caractéristiques hydrodynamiques respectives : capacitives pour les altérites et transmissives pour l'horizon fissuré-altéré et le substratum sain, là où ce dernier présente une fracturation d'origine tectonique.

La formation de l'horizon fissuré-altéré est donc étroitement liée au développement des altérites et, de ce fait, à la progression du front d'altération. Par conséquent, à l'échelle régionale, ces couches altérées sont parallèles aux paléo surfaces d'altération (paléo-paysage) contemporaines de l'altération.

Ce modèle hydrogéologique s'applique donc relativement bien aux régions n'ayant subi que des processus d'érosion modérés depuis les phases les plus récentes de mise en place généralisée de manteaux d'altération et qui, de ce fait, ont conservé une part significative de leur couverture d'altérites (Bretagne, Massif central, Vosges, Ardennes, avant-pays pyrénéen, etc.).

Dans les régions où cette couverture d'altération a été majoritairement déblayée par l'érosion (Alpes, Pyrénées, Corse, certains secteurs à fort relief des massifs « anciens »), les structures à vocation capacitive sont moins développées.

Les massifs cristallins des régions à fort relief (Alpes, Pyrénées) montrent une structure hydrogéologique singulière, caractérisée par des sources à gros débit (débit de crue pouvant atteindre le  $\text{m}^3/\text{s}$ ) et des venues d'eau importantes rencontrées lors de la réalisation de tunnels (35 ans après la foration du tunnel du Mont-Blanc, une venue d'eau d'un débit initial de l'ordre de  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  produit toujours plus de 200 l/s). Les recherches récentes sur ces milieux hydrogéologiques particuliers montrent, que les zones les plus perméables coïncident avec des :

- « zones de décompression superficielle », dont l'effet se fait néanmoins sentir sur une épaisseur de plusieurs centaines de mètres (5 à 600 m) et qui peut être amplifié par des processus de poussée au vide et de fauchage ou basculement ;
- zones de fracturation tectonique majeure.

Hors zones à fort relief, il est aussi couramment admis que les formations de socle saines (rocheuses) voient leur perméabilité décroître avec la profondeur. Cette décroissance est en accord avec le modèle conceptuel présenté plus haut. Elle résulte de la localisation des horizons les plus perméables à proximité de la surface (ou paléo surface) topographique et des propriétés de l'horizon fissuré-altéré.

À l'échelle des écoulements générés par l'exploitation d'un forage, les deux principaux horizons décrits ci-dessus, altérites et horizon fissuré-altéré, jouent respectivement, et en règle générale, un rôle capacitif et transmissif.

À l'échelle du bassin versant ou du versant, les propriétés de connectivité du réseau fissural que constitue l'horizon fissuré-altéré ne sont pas encore suffisamment connues, en l'état actuel des données disponibles, pour trancher entre les deux hypothèses suivantes :

- la première selon laquelle cet horizon, bien connecté horizontalement, pourrait présenter un tenseur de perméabilité à composante principale horizontale, et jouer de ce fait un rôle transmissif à cette échelle, en conduisant les eaux souterraines du sommet des versants vers les bas-fonds,
- la seconde où l'on considère que cet horizon, mal connecté horizontalement, présente plutôt un tenseur de perméabilité à composante principale verticale, ne permettant que des échanges « locaux » entre les altérites et le réseau fissural.

En tout état de cause, comme cela a été montré plus haut, seule une minorité des fissures qui peuvent être observées à l'affleurement ou en forage au sein de l'horizon fissuré-altéré présente des propriétés hydrauliques significatives.

L'exploitation traditionnelle des aquifères de socle repose sur le captage des nombreuses sources de débordement et émergences diffuses qui en sont issues.

En raison de leur très forte hétérogénéité apparente, les aquifères de socle n'ont que rarement fait l'objet, jusqu'à présent, d'une approche à l'échelle du bassin versant, seule à même d'autoriser la gestion globale et intégrée de leur ressource en eau, à long terme.

## **2.5. AQUIFÈRES VOLCANIQUES**

Les principaux caractères hydrogéologiques des formations volcaniques représentées en France sont abordés dans ce chapitre, néanmoins, seuls sont considérés les ensembles géologiques ayant conservé les propriétés hydrogéologiques originelles de formations volcaniques. Ainsi, par exemple, les unités volcaniques que renferment les régions de socle ou fortement tectonisées (massifs anciens, Pyrénées, Alpes, etc.) ont été complètement transformées du fait des processus de métamorphisme ou de déformation, qu'elles ont subies. Leurs propriétés hydrogéologiques ne correspondent alors plus à celles de roches volcaniques, mais, en général, à celles de roches de socle. En France, les principaux ensembles volcaniques habités sont représentés :

- par les îles volcaniques des DOM-TOM : îles de la Réunion, de Mayotte dans l'Océan Indien, de Martinique, de la Guadeloupe et de son archipel (les Saintes, Saint-Martin, Saint-Barthélemy) appartenant à l'arc antillais, de Polynésie au sein de l'Océan pacifique, etc.),
- en métropole, au sein d'un grand domaine positionné sur le Massif central : Monts du Cantal, Mont-Dore/Sancy, Cézalier, Chaîne des Puys, Aubrac, au cœur du Massif central, Coirons, Velay, Devès en bordure Sud-Est, Escandorgue sur sa limite méridionale, etc. Des massifs beaucoup plus circonscrits sont également dispersés dans d'autres régions du Massif central, en Languedoc, Causses, Bourgogne, Alsace, etc...

Les formations volcaniques présentent une extension relativement réduite par rapport aux grands ensembles hydrogéologiques tels que les bassins sédimentaires, les domaines de socle, etc. Cependant, les aquifères volcaniques présentent souvent, du fait de propriétés hydrogéologiques qui peuvent localement être très bonnes (sources au débit important, forte capacité d'infiltration, perméabilités élevées, etc.), une importance régionale, tant au sein de départements ou de territoires exclusivement ou quasi exclusivement composés de formations volcaniques (Réunion, Mayotte, Antilles, Polynésie, etc.) que dans les régions (Massif central essentiellement) où les ensembles volcaniques sont plus dispersés et moins étendus.

Les formations volcaniques se caractérisent en général par une structure complexe, avec des hétérogénéités présentes de l'échelle cartographique à celle du forage, souvent liées à la mise en place de ces formations en milieu aérien et selon une dynamique très active. Leur caractérisation hydrogéologique requiert donc des approches spécifiques.

La France dispose d'une bonne représentation des principaux types de volcanisme :

- **le volcanisme à dominante basaltique** est représenté essentiellement par :
  - des volcans boucliers, mis en place directement sur le plancher océanique (intra plaque océanique) et ayant pour origine des points chauds. Ils montrent en général un volcanisme peu différencié, à dominante de coulées basaltiques. Les îles de la Réunion, relativement récente, de Mayotte ou de Polynésie, plus anciennes et beaucoup plus disséquées par l'érosion, résultent essentiellement de l'empilement de laves basaltiques, sur plusieurs milliers de mètres d'épaisseur. Les coulées, d'épaisseur en moyenne métrique, se sont en général mises en place sur des surfaces relativement planes et peu inclinées, formant des planèzes. Elles sont inter stratifiées de paléosols et, de manière plus subordonnée, de formations pyroclastiques (scories, cendres, etc.).
  - des ensembles volcaniques à dominante basaltique, d'épaisseur et d'extension variable, mis en place en contexte continental, et qui reposent de ce fait sur un substratum non volcanique (socle cristallin ou métamorphique, bassins sédimentaires).
  - Les ensembles présentant une histoire relativement courte (la chaîne des Puys par exemple, avec une activité sur moins de 100.000 ans, la partie ouest du Velay comportent des maars résultant de l'interaction explosive entre une venue de magma et les eaux des aquifères superficiels ou résultant d'infiltration à l'aplomb de paléo-vallées par le jeu de fractures, des cônes de scories, qui restent largement prépondérants, situés à proximité des points d'émission, et des coulées, mises en place en général au sein de paléo vallées.
  - Enfin, des pointements plus dispersés, essentiellement basaltiques, sans grand intérêt hydrogéologique, existent du Languedoc à l'Alsace.
  
- **le volcanisme de type andésitique** est présent grâce aux volcans de l'arc insulaire antillais, qui résulte de la subduction de la plaque océanique nord-atlantique sous la plaque caraïbe. La Martinique, la Basse-Terre de Guadeloupe et une partie de son archipel (Saint-Martin, Saint-Barthélemy, Les Saintes) sont composés quasi exclusivement de formations volcaniques de type andésitique, tertiaires et quaternaires (seules la Basse-Terre, la Soufrière, et la Martinique, la Montagne Pelée, comportent des volcans actifs). Les formations sédimentaires sont limitées aux alluvions récentes, aux formations de plage et de mangrove et à quelques niveaux calcaires déposés lors de périodes prolongées d'arrêt du volcanisme.

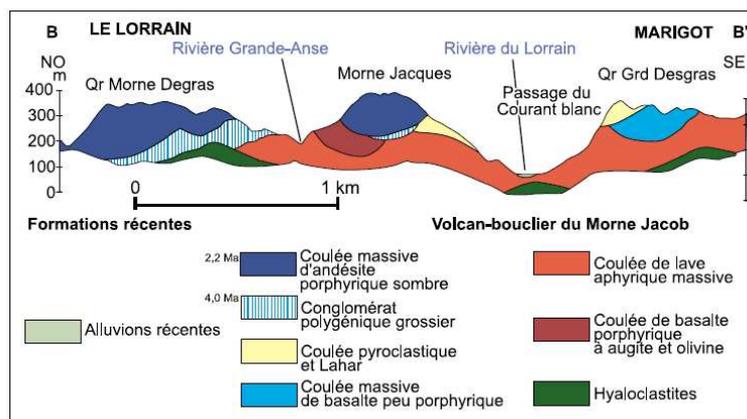
Les formations volcaniques sont très variées. Les hyaloclastites, témoins des phases initiales sous-marines du volcanisme, forment en général le soubassement des îles, sur plusieurs milliers de mètres d'épaisseur. Alternent ensuite différents types de laves, depuis des termes assez fluides jusqu'à des laves plus visqueuses (andésites,

dacites, rhyolites). Les produits de nature explosive, nuées ardentes, ponces, cendres, etc., sont très représentés, en particulier au sein des édifices récents. Enfin, les formations de démantèlement (lahars, coulées de débris, produits d'effondrement de type « Mount Saint-Helens » conglomérats, etc.) peuvent occuper de très grandes surfaces et combler des paléo-vallées larges et profondes.

- enfin, **des stratovolcans** (les monts du Cantal et le Mont-Dore/Sancy), constituent des édifices composites, mis en place sur une longue période (plus de 15 Ma pour le Cantal, environ 4 Ma pour le Mont-Dore/Sancy), de manière polyphasée et couvrant des aires importantes. À l'image des volcans antillais, ils présentent une structure complexe, marquée par une alternance de laves, en coulées et intrusions, et de formations pyroclastiques et de démantèlement. Ils ont aussi été affectés par des phases successives d'érosion et la formation de calderas.

Les formations volcaniques présentent donc une structure géologique fréquemment complexe, liée à des hétérogénéités à toutes les échelles :

- à l'échelle cartographique, la dynamique active de mise en place de ces formations concourt à une forte variabilité spatiale, latérale et verticale, des formations géologiques volcaniques, quelles soient volcaniques au sens strict, remaniées ou sédimentaires (conglomérats, alluvions, etc.). Des formations perméables et imperméables peuvent ainsi coexister à cette échelle (illustration 10),



**illustration 10 : Exemple de variabilité spatiale à l'échelle cartographique**

- cette variabilité lithologique se retrouve à l'échelle d'une formation donnée, compte tenu de la faible épaisseur unitaire des unités volcaniques homogènes
- au sein d'un même ensemble lithologique considéré globalement comme perméable coexistent des niveaux très perméables et d'autres quasi- imperméables. La présence

d'intrusions (dykes ou sills en particuliers) peut contribuer à un compartimentage des aquifères,

- enfin, les processus d'altération :
  - altération météorique d'une part, dont l'action est importante, tout particulièrement sous les climats, actuels ou anciens, de type tropical humide,
  - altération hydrothermale d'autre part, exacerbent ces hétérogénéités.

Ainsi coexistent, au sein des aquifères volcaniques, **perméabilité de fissures et perméabilité d'interstices**. La perméabilité de fissures est présente aussi bien au sein des :

- laves basiques (basaltes), essentiellement sous la forme de fissures de refroidissement, bien connues lorsque la fissuration se traduit par un débit en orgues,
- laves acides, où elle s'exprime surtout sous la forme de figures d'écoulement (figures de flux pouvant conférer aux laves un débit en plaquettes, d'épaisseur centimétrique).

La perméabilité d'interstices s'exprime dans différents contextes :

- au sein des formations basaltiques scoriacées : par les cônes de scories, lorsqu'ils ne sont pas altérés, par les niveaux scoriacés de toit et de base de coulée etc.
- au sein des formations pyroclastiques : ponces, nuées ardentes, lorsqu'elles ne sont pas soudées à chaud ou altérées, (illustration 11)

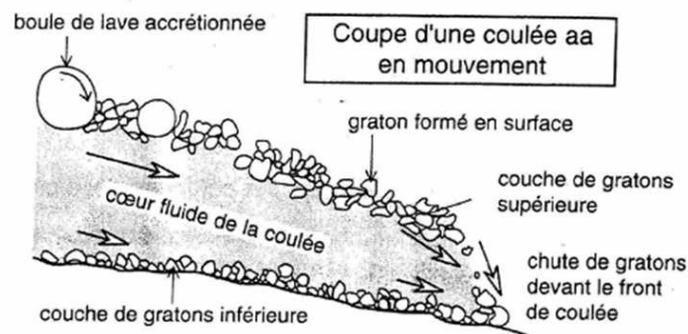


illustration 11 : Coupe d'une coulée « aa » en mouvement

- au sein des formations sédimentaires, des alluvions pour l'essentiel, associées aux laves, en particulier au sein des paléo-vallées.

Exceptionnellement, la présence de tunnels de laves (au sein de basaltes fluides), de troncs de végétaux décomposés ultérieurement à la mise en place de la formation qui les a fossilisés (lahars, cendres, etc.) concourent aussi à la perméabilité des roches volcaniques et, parfois à l'émergence de sources.

Comme conséquence de l'hétérogénéité des formations volcaniques, leurs modalités de fonctionnement sont très variables d'un type de formation volcanique et d'un contexte à un autre.

Certaines laves basaltiques saines, des nuées ardentes saines, etc. présentent une très forte capacité d'infiltration qui peut concourir à des pertes au niveau des cours d'eau voire à la quasi-inexistence de réseau hydrographique (chaîne des Puys). À l'opposé, des formations volcaniques intrinsèquement peu perméables ou argilisées conduisent à la prédominance du ruissellement sur la recharge des aquifères par infiltration (Cantal).

La relativement bonne perméabilité des faciès de base des coulées assure un bon drainage des eaux souterraines qui « ruissellent » au contact du socle en direction du cœur des paléo-vallées. La présence de coulées superposées, ou de dykes, peut conduire à l'établissement de nappes perchées, d'extension très locale ou plus importante.

La relativement bonne perméabilité des faciès scoriacés, fissurés ou fracturés des coulées de type basaltique conduit à une concentration des écoulements en zone saturée au sein des paléo-vallées de largeur et d'épaisseur relativement réduites par rapport à la taille de l'aquifère. Cette bonne perméabilité et la chenalisation des écoulements au sein de paléo-vallées se traduisent par la présence de sources à fort débit localisées en front de coulées, avec des vitesses d'écoulement très rapides dans les dernières centaines de mètres.

L'hétérogénéité des coulées conduit aussi, par des effets de « barrage », à une saturation plus importante des aquifères et, en conséquence, à des gradients piézométriques apparents beaucoup plus faibles. Ces effets liés aux hétérogénéités se marquent également par des phénomènes locaux de captivité des eaux souterraines.

A la Réunion, les observations conduisent à individualiser d'une part une nappe de base, généralisée à l'ensemble de l'île et comprise entre le niveau de la mer, en périphérie de l'île, et 1000 m NGR environ dans sa partie centrale, et, d'autre part, de nappes perchées situées dans les hauts. Cette configuration n'est pas retrouvée à Mayotte où les niveaux piézométriques sont quasiment calqués sur la surface topographique et où bassins versants de surface et souterrains semblent relativement bien coïncider.

Au sein des stratovolcans et en milieu andésitique, des configurations très variées de fonctionnement coexistent, depuis des situations proches de celles rencontrées au sein des laves basaltiques, jusqu'à des configurations de roches peu à très peu perméables. Des sources à fort débit (plusieurs dizaines de m<sup>3</sup>/h en étiage), issues de paléo-vallées et/ou liées à des structures fracturées, existent ainsi tant en Martinique (Dacites des Pitons du Carbet, nuées ardentes de la Montagne Pelée, etc.) qu'en Guadeloupe (andésites basiques du Sud de la Basse-Terre). Les contextes où la structure est plus complexe (absence de paléo-vallées bien individualisées ou fort morcellement des paléo-structures par la topographie actuelle, absence de substratum imperméable, etc.) conduisent à l'émergence de nombreuses sources aux débits moyens à faibles. Les figures d'écoulement des laves

jouent un rôle important du point de vue de leurs paramètres hydrodynamiques, ainsi que la fracturation d'origine tectonique.

Le fonctionnement de nappes potentiellement de grande taille (nappe de la Plaine du Lamentin en Martinique), dont l'intérêt stratégique pourrait être important, reste à comprendre : structure exacte de l'aquifère (géométrie verticale et latérale, rôle des différentes lithologies, de la fracturation d'origine tectonique, etc.) et des formations semi-perméables associées, qui peuvent jouer un rôle capacitif ; modalités de recharge, d'échange avec les eaux de surface (alimentation de l'aquifère, soutien du débit des cours d'eau, etc.), de relations avec les versants, dynamique de l'interface eau douce / eau salée, au niveau des zones de comblement quaternaire et de mangrove en particulier.

Les aquifères volcaniques sont captés au niveau de leurs exutoires (sources, de paléo-vallées pour l'essentiel) et par forages. Ils se distinguent néanmoins des autres aquifères par la fréquente réalisation, au moins à l'échelle mondiale, et dans quelques régions de France (Chaîne des Puys, Réunion pour l'essentiel), de galeries de captage qui, dans le cas de celles du Massif central, permettent de recueillir la quasi-intégralité des écoulements souterrains au sein d'une paléo-vallée et de les rediriger, souvent de manière gravitaire, vers les lieux de consommation.

Dans tous les cas, l'exploitation, la gestion et la protection des aquifères volcaniques requièrent, du fait de leur complexité, la mise en œuvre d'approches pluridisciplinaires, afin de disposer d'un modèle conceptuel de leur structure et de leur fonctionnement le plus proche possible de la réalité. Ainsi, une approche géologique, avec des compétences spécifiques à la géologie des formations volcaniques, est indispensable à tous les niveaux d'étude (depuis les phases préliminaires jusqu'aux travaux de modélisation, en passant par l'implantation et le suivi de forage) et à toutes les échelles de travail.

Les terrains volcaniques d'Auvergne, où s'entremêlent des roches très poreuses et des laves fissurées, forment des aquifères complexes.

## **2.6. AQUIFÈRES KARSTIQUES**

Le mot allemand « Karst » désigne à l'origine la zone des plateaux calcaires du Nord-Ouest de la péninsule balkanique entre la Carniole et l'Istrie. Le terme a été utilisé dès le XIXe siècle pour désigner d'abord les massifs calcaires des Balkans présentant les mêmes caractéristiques hydrographiques et morphologiques, avant d'être généralisé à toutes les régions calcaires présentant une hydrologie et une morphologie comparables.

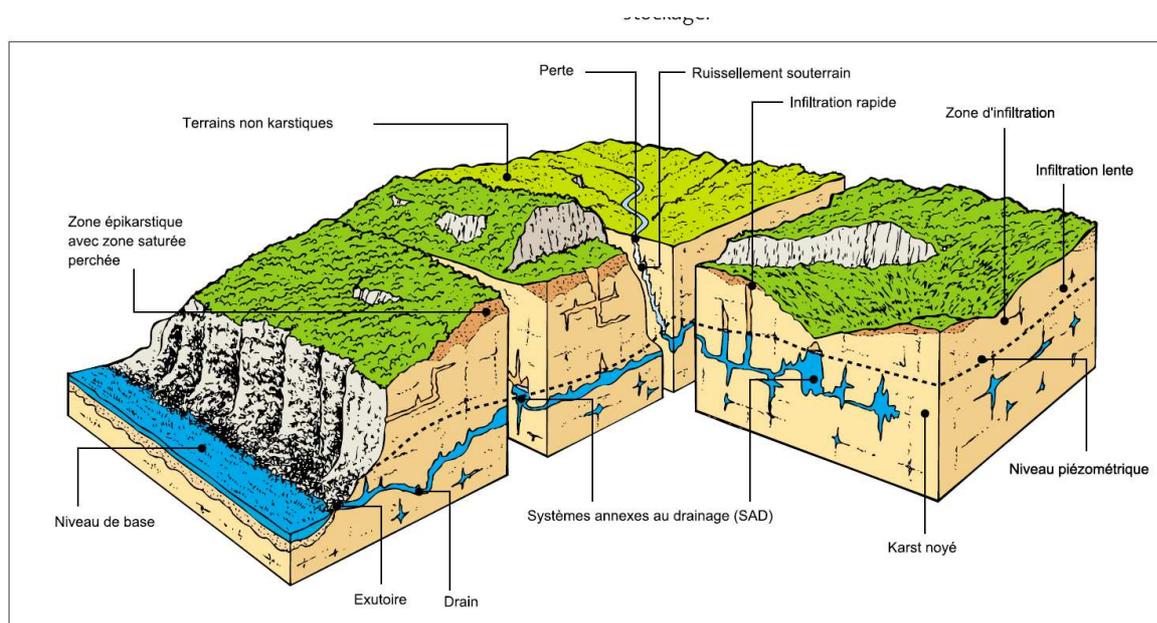
En effet, le karst est un paysage particulier créé par l'eau et dans lequel l'eau circule de façon

---

spécifique et complexe. L'originalité première du karst réside dans le fait que l'eau, dans son parcours souterrain, a développé un paysage souterrain complémentaire du paysage de surface. Les formes karstiques sont totalement créées par les écoulements d'eaux, souterraines surtout, dissolvant certaines roches, et en particulier les calcaires.

Les régions karstiques sont des régions où l'eau, souvent absente de la surface du sol, du fait de sa grande perméabilité, s'accumule dans les profondeurs, puis s'écoule en rivières souterraines et émerge en sources puissantes, comme aucun autre paysage n'en possède.

Ainsi, le karst est un milieu à très forte hétérogénéité, puisque les perméabilités peuvent varier de  $10^{-7}$  à  $10^{-1}$ . Des axes à forte perméabilité, drains ou conduits, organisés en réseau hiérarchisé, à la manière des réseaux fluviaux, constituent le «réseau de conduits». Ce réseau draine les parties de l'aquifère à plus faible perméabilité, représentées soit par les pores et les fissures de la roche, dans ce qui est dénommé « matrice » ou « bloc matriciel », soit par des vides karstiques de grandes dimensions, situés autour d'axes de drainage, constituant des réservoirs élémentaires, ou Systèmes Annexes au Drainage (SAD), indépendants les uns des autres, mais tous liés au drainage. Une représentation est ainsi proposée (illustration 12).



**illustration 12 : Modèle conceptuel du système karstique (d'après A. Mangin, 1975)**

Par conséquent, l'originalité de l'aquifère karstique réside dans :

- la transformation rapide à l'échelle géologique des caractéristiques hydrauliques de l'aquifère, sous l'effet de la karstification, en quelques milliers à quelques dizaines de milliers d'années ;
- l'existence de conditions de recharge variées au travers d'une zone d'infiltration complexe ;
- la séparation du stockage et du drainage de la zone noyée, confondus dans les autres

aquifères ;

- la hiérarchisation de cette séparation, conduisant à une structuration des écoulements depuis la surface jusqu'à la source, et donc comparable à celle des bassins versants superficiels ;
- l'existence de vitesses d'écoulement couvrant une très large gamme, aussi bien dans la zone d'infiltration que dans la zone noyée. L'épaisseur de la zone d'infiltration, ainsi que la présence d'une couverture sur la formation carbonatée conditionne grandement le développement du karst en profondeur et la durée nécessaire à ce développement. L'existence d'écoulements rapides préférentiels dans la zone d'infiltration est la condition primordiale, sinon unique, du développement d'une structure karstique en profondeur. Une zone d'infiltration peu épaisse favorise le développement rapide de conduits dans la zone noyée, au contraire d'une couverture de sédiments ou de sol ou une zone d'infiltration épaisse.

Comme la mise en place d'une structure karstique fonctionnelle peut être réalisée rapidement, il existe une grande variété d'aquifères karstiques, en fonction de l'état de développement de la karstification, depuis un pôle « aquifère fracturé » jusqu'à un pôle « aquifère karstique pur ».

Le karst a souvent été considéré comme un aquifère à risques et à problèmes.

« A risques », car il est réputé particulièrement sensible aux pollutions ;

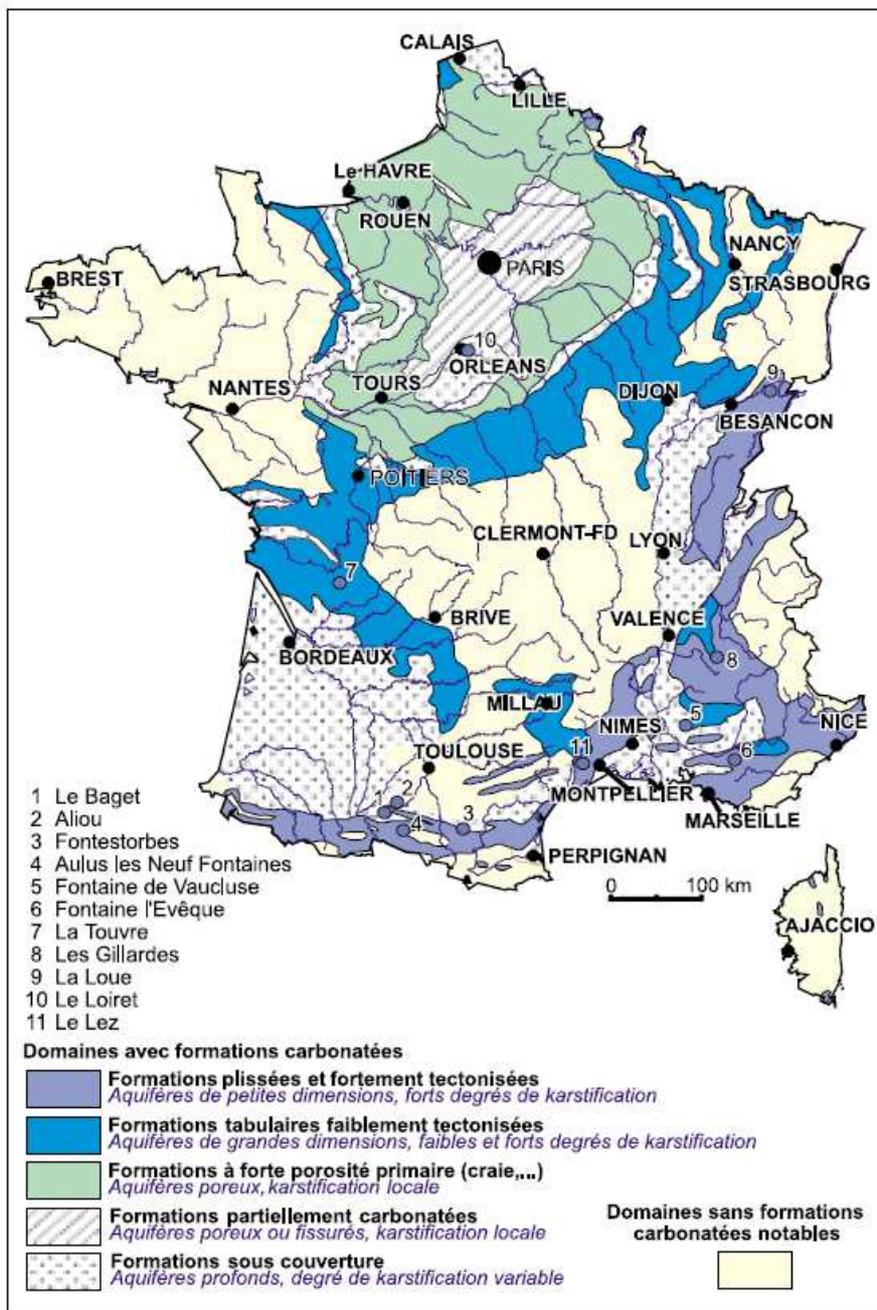
« à problèmes », car les nombreux échecs en matière de forages, de captages et de barrages peuvent alourdir considérablement les coûts d'exploration et d'exploitation.

Malgré cela, le captage des sources karstiques s'est imposé, sur certains sites, à l'homme par suite ;

- de la présence de gros débits localisés et bien visibles, mais souvent limités par les débits d'étiage des sources, souvent très inférieurs aux débits moyens annuels, du fait de leur forte variabilité ;
- d'absence de solution alternative, le karst typique coexiste rarement avec des aquifères poreux importants et distincts en termes de régime hydraulique.

Le karst fournit ainsi une part importante, sinon essentielle, des ressources en eau de nombreux pays. Occupant 35 % de la surface de la France (illustration 13), les formations carbonatées plus ou moins karstifiées satisfont au moins 30 % des besoins nationaux en eau potable, auxquels il faut ajouter les prélèvements notables, mais mal évalués, pour l'agriculture et l'industrie.

Les Alpes, les Préalpes, les Pyrénées ne comportent que des aquifères d'étendue moyenne et compartimentés mais assez nombreux : il s'agit surtout de massifs karstiques qui forment souvent les reliefs dominants : Chablais, Bauges, Chartreuse, Vercors et Dévoluy dans les chaînes subalpines, massifs de la Pierre-Saint-Martin, du Comminges, du Pays de Sault dans les Pyrénées. Le Jura est un ensemble aquifère étendu que l'on peut découper en un petit nombre de bassins

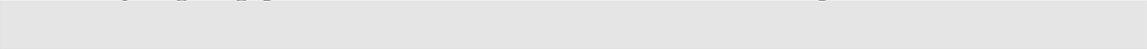


d'écoulements souterrains indépendants. En bordure des massifs anciens ou des chaînes de montagnes, de vastes plateaux calcaires, plus ou moins karstiques forment une auréole de réservoirs aquifères étendus à la périphérie

des grands bassins sédimentaires : de la Lorraine à la Bourgogne, au Berry et au Poitou ; du Quercy aux Causses du Sud du Massif central, aux garrigues du Languedoc et à la Haute Provence (illustration 13).

Les différentes formations géologiques, sédimentaires pour l'essentiel, qui composent ces systèmes aquifères ont des caractéristiques tant géométriques qu'hydrodynamiques très variées. Elles sont en outre très inégalement homogènes et continues. Les gammes de paramètres propres à chaque formation sont très larges dans la plupart des cas : porosités et perméabilités varient beaucoup suivant les faciès locaux (alluvions, sables plus ou moins argileux) ou les degrés de fissuration et leur distribution verticale (roches carbonatées, roches éruptives). La craie, par exemple, est bien plus fissurée, donc transmissive, dans les vallées que sous les plateaux, et cent à mille fois moins en profondeur, sous couverture de couches géologiques sus-jacentes.

**illustration 13 : Carte hydrogéologique des formations carbonatées karstifiables (d'après B. Marsaud)**



## 2.7. AQUIFÈRES LITTORAUX

Les nappes côtières, quelle que soit la formation aquifère qui les abrite, seront qualifiées de littorales dans la mesure où elles ont pour limite aval une mer ou un océan. Le niveau du potentiel imposé est alors le Zéro NGF.

Sur les 5.500 km de côtes de France métropolitaine, on dénombre :

- 95 aquifères superficiels littoraux de superficie variant de 25 à 3.200 km<sup>2</sup>,
- 17 aquifères profonds de 175 à 130.000 km<sup>2</sup>.

Le caractère complexe est surtout lié à la profonde et capricieuse interpénétration des eaux salées dans la « terre ferme ». Cordons littoraux, estuaires et étangs salés ou saumâtres constituent le théâtre d'une hydraulique extrêmement influencée par les contours irréguliers du trait de côte et des plans d'eau subordonnés à la mer.

Les milieux littoraux comportent notamment les zones humides les plus remarquables de France du point de vue de l'écosystème (Baie de Somme, Baie de Bourgneuf, étangs languedociens, de Camargue et de Biguglia en Corse).

La seule problématique qui différencie les aquifères littoraux des autres aquifères est celle du « Biseau salé » générée par la différence de densité, 1000 pour l'eau douce, et 1025 pour une eau salée à 30 g/l. Cette différence permet à l'eau des nappes continentales de « flotter » sur l'eau de mer. Ce phénomène bien connu en hydrologie permet à des fleuves de prolonger leur parcours en mer sur des dizaines de kilomètres (ex. l'Amazone). Réciproquement, dans les estuaires, l'eau salée pénètre dans les terres, spécialement lorsque le débit du fleuve est faible, tandis que l'eau douce poursuit son parcours en surface pour rejoindre la mer ouverte (illustration 14)

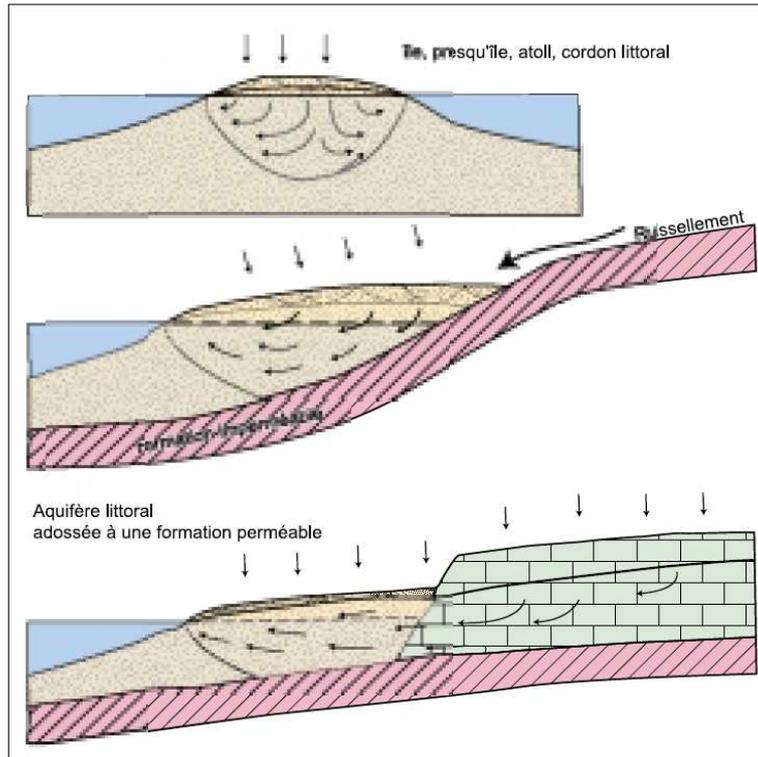


illustration 14 : Typologie des biseaux salés (V. Petit, 1996)

## 2.8. SYSTÈMES AQUIFÈRES ET RÉFÉRENTIEL HYDROGÉOLOGIQUE

### 2.8.1. SYSTEMES AQUIFERES

Le concept de système aquifère est né de la rencontre entre le savoir naturaliste de l'hydrogéologue et la connaissance des lois physiques qui régissent le comportement des eaux souterraines, formulées par l'hydraulicien.

Un système aquifère est l'ensemble du champ spatial continu dans lequel les effets de diverses impulsions naturelles ou artificielles, plus ou moins localisées et continues ou discontinues (apports ou soustractions d'eau, naturels ou artificiels, variations de niveau aux limites) peuvent se propager librement et influencer par conséquent le fonctionnement hydraulique, les écoulements et l'état des stocks, à terme défini dans le temps (réponse du système).

C'est un système physique fini et défini dans lequel les réactions à des actions projetées sont ainsi prévisibles, localisables et quantifiables, et il est le cadre spatial logique de l'évaluation et de la gestion des ressources en eau souterraine.

En théorie, un système aquifère n'est pas définissable indépendamment de l'ampleur et de la durée des actions envisageables. Mais en pratique, les structures hydrogéologiques sont assez hétérogènes

et offrent des discontinuités assez contrastées (y compris en fonction des relations entre aquifères et cours d'eau de surface) pour comporter des limites constituant des obstacles relativement fixes (dans l'espace) et stables (dans le temps) aux propagations d'influence, pour des gammes assez étendues de phénomènes.

Il est donc possible de définir des systèmes aquifères naturels déterminés par les conditions hydrogéologiques du territoire. La notion de système aquifère se substitue alors avantageusement à celles de « nappe » ou « réservoir aquifère », définies de manière vague ou trop exclusivement géologique, et appliquées souvent soit à des parties de système aquifère, soit à des ensembles de systèmes similaires mais indépendants.

Un système aquifère se définit davantage par sa configuration et ses conditions aux limites que par le degré de complexité de sa structure ou les types et le régime des impulsions auxquelles il est sujet. Ses limites sont principalement de deux types :

- limites à condition de flux, généralement déterminées par les structures géologiques : (flux nul dans le cas de limite étanche ; flux d'apport en cas d'affluence d'un aquifère limitrophe, ou flux sortant vers un aquifère subordonné) ou encore par des ouvrages d'exploitation à débit imposé ;
- limites à condition de potentiel (niveau) généralement fixées par les relations avec des cours d'eau ou des plans d'eau, mais aussi par des facteurs structuraux (ligne de sources) ou encore par des aménagements à niveau imposé : drain.

Chaque système aquifère délimité peut être schématisé par un modèle conceptuel hydrodynamique, base d'un modèle de simulation permettant de représenter son comportement, de quantifier les flux en jeu et de calculer ses réactions à des influences et à des exploitations. L'analyse des systèmes aquifères est donc inséparable des démarches de modélisation.

La reconnaissance et l'inventaire des systèmes aquifères d'un territoire résulte d'une « lecture hydraulique et systémique » des conditions hydrogéologiques déduites de la connaissance de la géologie structurale à toutes échelles, et des données d'observation directe des eaux souterraines. Cette reconnaissance s'appuie en priorité sur l'identification des limites dont les conditions hydrodynamiques sont définissables et qui circonscrivent aussi complètement que possible les systèmes à individualiser.

Les différents systèmes aquifères les plus courants en France peuvent être subdivisés en sous-systèmes de trois manières, suivant les cas :

- en parties à nappe libre ou à nappe captive, notamment dans les bassins sédimentaires de Paris et aquitain où des couches aquifères sont en partie profondes et en partie affleurante dans les « auréoles », sans rupture de continuité des réservoirs ;

- en couches aquifères élémentaires, dans les systèmes multicouches caractérisés (Île-de-France, Aquitaine occidentale) ;
- en bassins hydrogéologiques rapportés à des lieux d'émergence distincts (sources majeures, groupes de sources, cours d'eau drainants).

Ces systèmes aquifères peuvent être classés, suivant une typologie désormais classique, en cinq catégories :

- Aquifères monocouche à nappe libre (« phréatique ») prédominante. Exemples : la plupart des aquifères de la craie, quelques aquifères alluviaux étendus (Alsace, Crau ...).
- Aquifères monocouche à nappe captive prédominante. Exemples : aquifère des Sables verts du Bassin de Paris, aquifère des Grès du Trias de Lorraine.
- Aquifères multicouches, superpositions de couches aquifères et semi-perméables plus ou moins capacitives, avec ou sans nappe libre supérieure et flux de drainance internes significatifs. Exemple : système multicouche d'Aquitaine occidentale (Crétacé et Tertiaire).
- Aquifères discontinus karstiques, dont les parties distinctes assurent des fonctions respectives capacitives et conductrices (celles-ci étant assurées par des réseaux de drainage, ou parfois de distribution, tridimensionnels). Exemples : aquifères karstiques perchés comme le Vercors, le Vaucluse ou le Larzac, ou à prolongement captif sous couverture (paléo-karsts) comme le Quercy.
- Aquifères principalement alluviaux dont la dynamique a pour facteur prédominant les liaisons avec un cours d'eau (même variables dans le temps et l'espace). Exemple : aquifère de la vallée du Rhône.

Par ailleurs, les aquifères discontinus des terrains de socle cristallin ou métamorphique, voire volcanique, ainsi que les aquifères localisés dans plusieurs régions montagneuses (Alpes, Pyrénées) forment des ensembles de microsystemes de faible extension et à limites souvent floues, non individualisables dans une analyse globale du territoire.

En France, la définition des systèmes aquifères de première grandeur ( $> 100 \text{ km}^2$ ) du territoire métropolitain date de 1976. Elle a accompagné la première vague de modélisation, de même que la rénovation de la cartographie hydrogéologique de synthèse à petite échelle, à 1/1 500 000.

Initialement, environ 200 systèmes aquifères d'importance régionale ont été identifiés et délimités (certains se recouvrant dans les grands bassins sédimentaires où une vingtaine de systèmes profonds

sont distingués s'étendant sur la moitié environ du territoire).

La classification hydrogéologique systématique, assortie d'une nomenclature codée, aboutissant à la définition de cinq grandes catégories de domaines hydrogéologiques, était la suivante :

- grands systèmes aquifères, à nappes essentiellement libres ;
- grands systèmes aquifères captifs ;
- zones alluviales situées dans les domaines sans grand système aquifère individualisé ;
- domaines sans grand système aquifère individualisé, en terrains sédimentaires ;
- domaines sans grand système aquifère individualisé, en terrains cristallins.

À partir de 1980, ce découpage national initial a été retravaillé et affiné au niveau des six bassins hydrographiques par différents opérateurs.

Un des exercices a consisté à une représentation des aquifères par les aires affleurantes d'après les contours de la carte géologique (BD RHF V1). Cette méthode avait ses limites puisque les systèmes captifs ou multicouches, avaient une représentation tronquée. Il fut rapidement admis qu'une « version 2 » était nécessaire pour prendre en compte la dimension verticale qui manque à la « version 1 ».

## **2.8.2. REFERENTIEL HYDROGEOLOGIQUE DE LA FRANCE**

### *2.8.2.1. VERSION 1*

La construction du référentiel cartographique des eaux souterraines de la France, BD RHF(r) (Base de Données sur le Référentiel Hydrogéologique Français) est un projet complexe : d'une part car la connaissance du sous-sol n'est pas totale, d'autre part du fait que le découpage des couches géologiques en entités hydrogéologiques ne répond pas encore à des règles totalement stabilisées. Aussi a-t-il été décidé de procéder par étapes.

La Version V1 de BD RHF(r) constitue le résultat de la première étape. Elle a été réalisée à partir de la juxtaposition des versions locales développées depuis 1980. Il a donc été nécessaire de conduire un travail important de mise en cohérence et d'harmonisation, notamment aux limites des bassins ou des régions.

La Version V1 de BD RHF(c) rassemble sous le nom générique « d'entités hydrogéologiques », des systèmes aquifères et des domaines hydrogéologiques. Chaque entité hydrogéologique est considérée comme une unité de fonctionnement du milieu souterrain.

Cette première version demeure globalement limitée et présente des imperfections : les aquifères captifs ne sont pas représentés et elle reste très schématique pour certains domaines tels que les

karsts, les nappes alluviales ou les aquifères de terrains volcaniques notamment.

#### 2.8.2.2. VERSION 2 OU BD LISA

Par rapport à la version 1, la version 2 présente plusieurs innovations majeures.

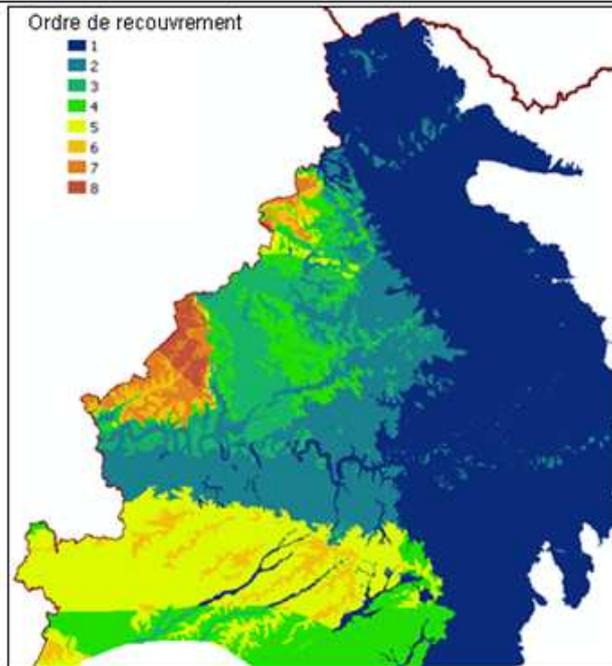
- Les entités hydrogéologiques du territoire sont délimitées suivant trois niveaux de détails correspondant à 3 niveaux possibles de cartographie:
  - au 1/ 1 000 000 (échelle nationale) ;
  - au 1/ 250 000 (échelle régionale) ;
  - au 1/ 50 000 (échelle locale).

Les limites hydrogéologiques des systèmes aquifères seront révisées et leur nature précisée (11 types de limites sont prévues).

- La dimension verticale, absente de la version 1, sera restituée grâce à un ordonnancement vertical des entités (des coupes transversales pourront être réalisées). Les entités hydrogéologiques non affleurantes sont ainsi prises en compte, ainsi que les structures aquifères multicouches.
- Les aquifères des formations volcaniques sont délimités.
- La mise en cohérence avec les différents objets, cours d'eau et bassins versants, du référentiel hydrographique de l'IGN, BD-Carthage®, est prévue.
- Le référentiel se présentera sous la forme d'un Système d'Information Géographique (SIG) permettant:
  - de visualiser les entités hydrogéologiques aux 3 niveaux de détail retenus pour le découpage ;
  - d'imprimer des cartes aux échelles définies pour ces 3 niveaux de détail ;
  - d'obtenir des informations sur les entités grâce à la base de données qui aura été constituée lors du découpage des entités.
- Le référentiel est sous-tendu par un "Modèle de gestion" développé sous ArcGis (version 9.2). Ce modèle, outre son rôle important dans la phase de construction du référentiel, permet de garantir la cohérence topologique de l'assemblage 3D des entités, de faciliter les mises à jour et de réaliser des "coupes hydrogéologiques" dans le référentiel.

Dans une seconde phase d'enrichissement du référentiel, il est prévu:

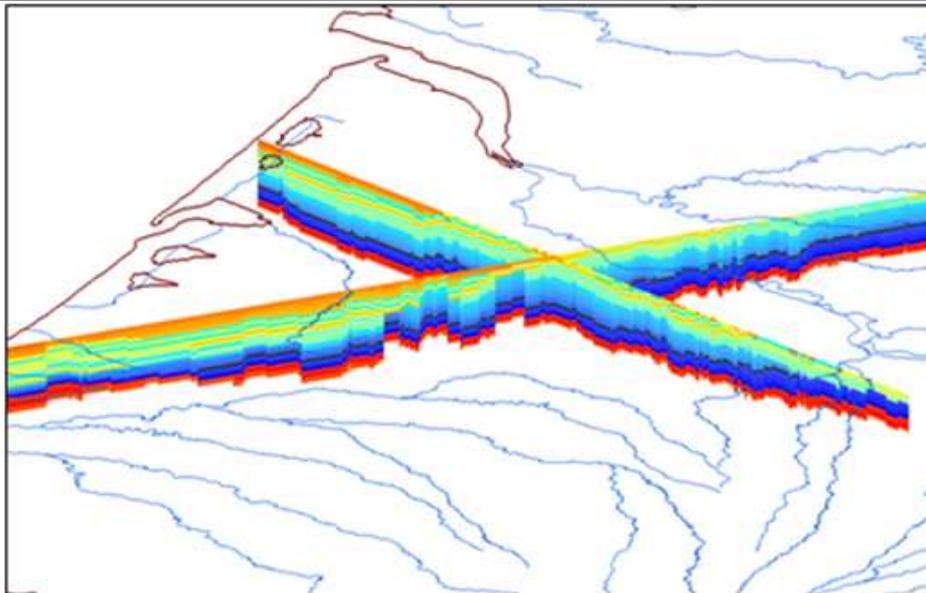
- une normalisation des noms d'entités et une nouvelle codification,
- des fiches descriptives détaillées et un enrichissement progressif de la base de données avec des coupes géologiques, des cartes piézométriques, ...



H28 A - SYSTEME AQUIFERE DES CALCAIRES DE L'AALÉNIEN  
AU KIMMÉRIDGIEN BASAL NORD ADOUR-GARONNE

Le modèle de gestion du référentiel identifie les différents niveaux de recouvrement d'une entité donnée, entité qui sera par exemple constituée :

- d'un polygone d'ordre relatif 1, c'est-à-dire à l'affleurement,
- d'un polygone d'ordre relatif 2, correspondant au recouvrement de l'entité par une autre entité  $E_i$ ,
- d'un polygone d'ordre relatif 3, correspondant au recouvrement de l'entité par une entité  $E_k$ , elle-même sous une entité  $E_n$ ,
- etc.



Exemple de "coupe hydrogéologique" (visualisation [ArcScene](#))

Illustration 15 : Exemples d'informations cartographiques obtenues à partir de BD LISA

### **2.8.3. MASSES D'EAU SOUTERRAINE**

La Directive européenne 2000/60/CE publiée le 22 décembre 2000 introduit le concept de « masse d'eau », pour les eaux de surface et les eaux souterraines. C'est à l'échelle de ces unités que devront être évalués régulièrement l'état qualitatif et quantitatif, et que seront prises les mesures pour préserver ou restaurer un bon état.

Les masses d'eaux superficielles et souterraines sont des concepts qui ne recouvrent pas totalement des «objets» connus en termes hydrographiques ou hydrogéologiques, tels que des bassins versants ou des systèmes aquifères.

Elles constituent les unités de base du référentiel à partir duquel doit être évalué tant l'état des ressources en eaux superficielles et souterraines à l'échelle d'un district que l'efficacité des mesures prises afin de respecter les exigences de la directive. Si c'est en effet à partir de l'évaluation de l'état initial des ressources et des scénarios tendanciels que seront définis les programmes de mesures à mettre en œuvre et qui figureront dans les plans de gestion des districts, c'est à l'échelle de chaque masse d'eau que seront appréciés les résultats des mesures proposées. La masse d'eau est d'abord la maille de travail à laquelle s'effectue l'évaluation du milieu. Les objectifs de bon état sont assignés aux masses d'eau : état écologique et chimique pour les masses d'eaux superficielles, étant chimique et quantitatif pour les masses d'eaux souterraines.

La masse d'eau correspond également à une approche opérationnelle : c'est à l'échelle de la masse d'eau que doivent être définies les modalités de surveillance et notamment, les réseaux de mesures, les actions réglementaires et de gestion à mettre en place pour assurer la protection et si nécessaire, la restauration de ces masses d'eau.

La masse d'eau est tout à la fois une unité :

- d'évaluation ;
- d'objectif ;
- de surveillance (réseaux de mesure quantitatifs et qualitatifs) ;
- d'action ou de gestion.

Le découpage en masses d'eau souterraines est donc indissociable :

- de l'analyse « pression - impact » visant à l'identification des zones à risque, c'est-à-dire de la caractérisation de l'état,
- de la problématique des réseaux de mesure.

Les masses d'eau sont délimitées sur la base de critères hydrogéologiques, en s'assurant de l'obtention d'unités de taille suffisante (Illustration 17). Elles peuvent avoir des échanges entre elles à condition qu'ils puissent être correctement appréhendés.

Tous les captages fournissant plus de 10 m<sup>3</sup>/jour d'eau potable ou utilisés pour l'alimentation en eau de plus de 50 personnes doivent être inclus dans une masse d'eau.

Les nappes profondes faisant l'objet d'un usage et/ou d'un enjeu constaté (géothermie, thermalisme, eaux salées utilisées pour l'aquaculture, etc.) doivent être incluses dans une masse d'eau.

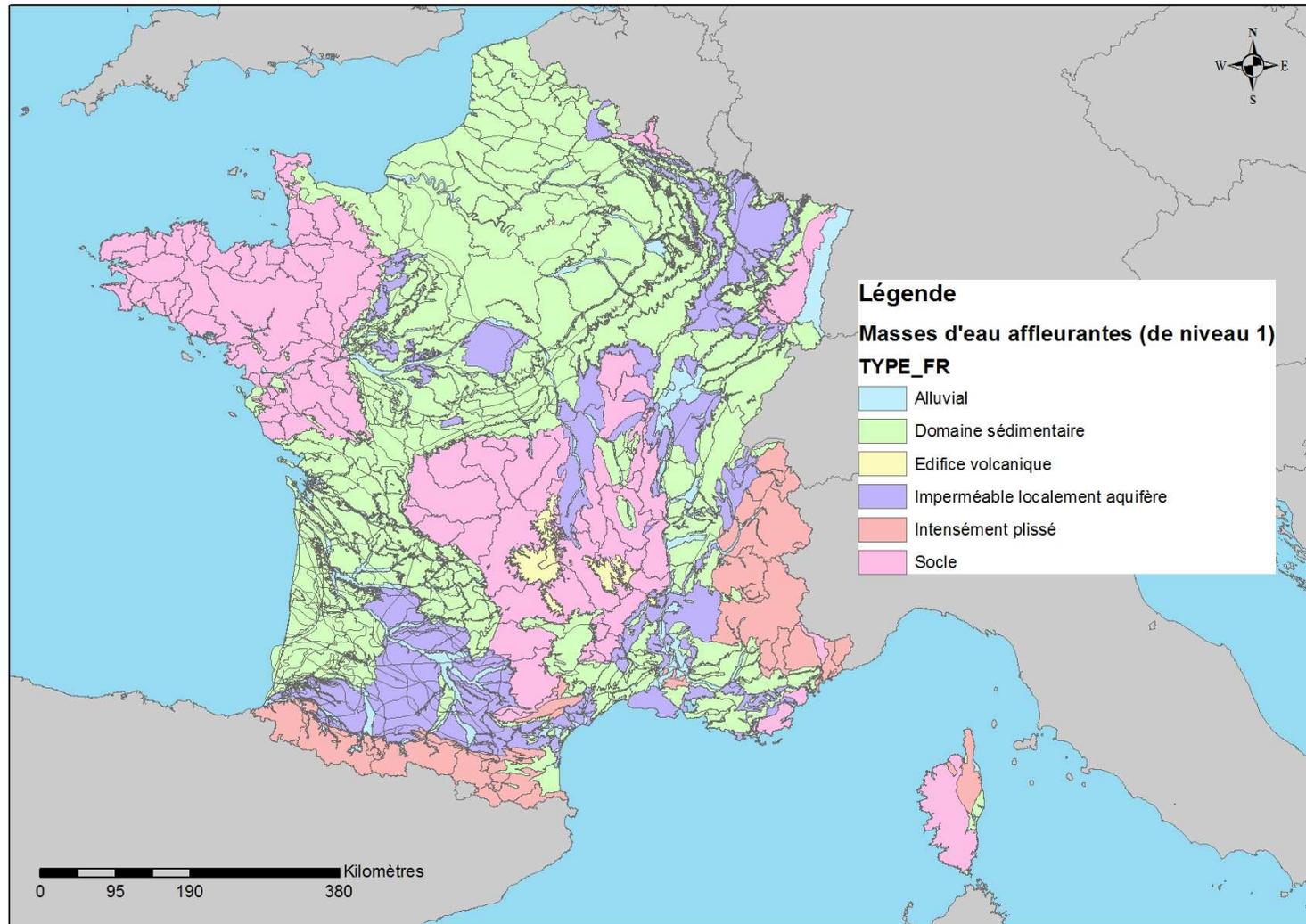
Une masse d'eau peut présenter une certaine hétérogénéité spatiale de son état qualitatif et quantitatif.

Les masses d'eaux souterraines peuvent être classées en un nombre restreint de types de réservoirs aquifères suivant leur comportement hydraulique. La typologie adoptée est fondée sur les caractéristiques intrinsèques (importance et type de perméabilité notamment) et fonctionnelles (nature et vitesse des écoulements) ; elle reprend en grande partie les définitions correspondant à des entités de niveau régional de la version 2 de BD RHF. Elle comporte (Illustration 16) :

- un premier niveau de deux caractéristiques principales suffisantes pour déterminer l'appartenance de la masse d'eau à l'une des six classes de la typologie ;
- un deuxième niveau de caractéristiques secondaires qui peuvent s'appliquer à tout ou partie d'une masse d'eau et s'ajouter les unes aux autres.

Niveau 1 principal			Niveau 2 secondaire	
Caractéristiques hydrogéologiques		Caractéristiques de gestion Règles de découpage ou d'agglomération		
Type de réservoir aquifère	Nature des écoulements			
Dominante SÉDIMENTAIRE non alluviale	Libre(s) et captif(s) dissociés	Libre	- Limites amont et aval des affleurements - Découpage en général par bassin versant hydrogéologique (ou topographique) en une ou plusieurs masses d'eau de taille significative pour la gestion - Cas particulier : découpage entre la crête piézométrique et le cours d'eau (écoulement dissymétrique) - Limite du bassin d'alimentation si connue	Ecoulement de type KARSTIQUE
		Captif		
	Libre et captif associés	Majoritairement captif	- Une seule masse d'eau libre et captive, majoritairement CAPTIVE - Limite amont = limite de la zone d'affleurement - Limite aval basée sur des critères d'usage potentiel AEP (potabilité, exploitabilité)	FRANCE LITORALE (risque d'intrusion marine)
		Majoritairement libre	- Une seule masse d'eau libre et captive, majoritairement LIBRE - Limite amont = limite de la zone d'affleurement - Limite en aval basée sur des critères d'usage potentiel AEP (potabilité, exploitabilité)	
ALLUVIAL	Libre / Captif	- Limite amont à partir de la zone où les alluvions sont suffisamment développées pour être exploitables pour l'AEP en relation plus ou moins étroite avec le cours d'eau - Limite latérale excluant les terrasses alluviales - Possibilité de regrouper des aquifères alluviaux disjoints à problématique de gestion	REGROUPÉS	
ÉDIFICE VOLCANIQUE	Libre / Captif	- Limite de l'extension de l'édifice volcanique - Si trans-district, possibilité d'un découpage en deux masses d'eau selon les limites des districts hydrographiques		
SOCLE	Libre / Captif	- Découpage par bassin hydrographique de taille significative - Possibilité implicite de regrouper des bassins versants contigus ayant une même problématique de gestion		
Système hydraulique composite propre aux zones INTENSEMENT PLISSÉES de montagne	Libre / Captif	- Découpage par croisement des grands ensembles litho-structuraux avec les grands bassins versants hydrographiques ou interfluve - Possibilité implicite de regrouper des bassins versants disjoints ayant une même problématique de gestion		
Système IMPERMÉABLE LOCALEMENT AQUIFÈRE	Libre / Captif	- Zone sédimentaire imperméable = enveloppe des petits aquifères sédimentaires disjoints à usage AEP disséminés, avec une même problématique de gestion		

Illustration 16 : Typologie des masses d'eau souterraine (M. Normand, D.Chadourne, 2003)



**Illustration 17 : Carte des masses d'eau souterraine de niveau 1 de la France**

## **2.9. EXPLOITATION DES EAUX SOUTERRAINES**

### **2.9.1. EVALUATION DES PRELEVEMENTS ANTERIEURS A L'ETUDE**

Le présent chapitre se propose de fournir quelques ordres de grandeurs sur l'exploitation des eaux souterraines en France métropolitaine (illustration 18). Les valeurs indiquées sont extraites de l'Atlas « Aquifères et eaux souterraines en France » et datent donc de 1999. L'inégalité des connaissances entre les différents gestionnaires impliqués ne permet pas de fournir des chiffres très précis mais seulement des évaluations. Si la tendance a pu être à l'augmentation jusque dans le milieu des années 2000, elle est maintenant tournée vers une amélioration de la connaissance de la situation réelle.

D'après ces chiffres les prélèvements en eaux souterraines représentent environ 20% des prélèvements totaux avec un volume annuel voisins d'environ 6200 hm<sup>3</sup>/an dont 60% environ sont destinés à l'AEP.

L'illustration 19 montre la répartition du nombre de captages AEP en France métropolitaine (2011). Elle permet de constater que la totalité du territoire et des principales formations géologiques sont exploitées même si en volume le constat est totalement différent.

En effet 40% du volume total prélevé est réalisé dans 12 aquifères et plus de 50% en une vingtaine.

Ordre (fig. 2)	Aquifère	Bassin	Prélèvement en hm <sup>3</sup> /an
1	Alsace, aquifère alluvial du Fossé rhénan	RM	500
2-2'	Aquifère multicouche du Bassin d'Aquitaine occidental : sables des Landes plio-quadernaires à nappe libre (2) ; Oligocène, Miocène, Eocène, Crétacé et Jurassique à nappes captives (2'). (1)	AG	350 à 450
3	Ensemble des systèmes aquifères coalescents de la craie de la région du Nord, au Nord du seuil de l'Artois (secteurs de Calais à Lille, Cambrai, Valenciennes) (5)	AP	360
4	Plaine de Lyon, aquifère alluvial (vallée du Rhône) (5)	RMC	~ 300
5	Côtes de Moselle, aquifère calcaire jurassique (2)	RM	225
6	Aquifères de la craie en Seine-Maritime et des alluvions de la basse vallée de la Seine (3)	SN	200
7	Sables du Soissonais + calcaire grossier, aquifère multicouche éocène, région parisienne et Nord d'Île-de-France (6)	SN	~ 180
8	Vallée de l'Isère, secteur de Grenoble, aquifère alluvial	RMC	~ 180
9	Grès du Trias inférieur en Lorraine (aquifère captif) (4)	RM	160
10	Beauce, aquifère du Calcaire de Beauce (5)	LB + SN	160
11	Vallée du Rhône r.g., Comtat/plaine Aigues-Sorgues et plaine d'Orange, aquifère alluvial (5)	RMC	~ 150
12	Vallée du Rhône r.g., secteur de Vienne à St Rambert d'Albon, aquifère alluvial (6)	RMC	~ 100
13	Val de Seine, Mantes-Vernon, aquifère alluvial et craie	SN	90 à 100
14	Picardie, aquifère de la craie dans le bassin de la Somme	AP	90
15	Roussillon, aquifère alluvial plio-quadernaire multicouche (5)	RMC	80
16	Pays d'Othe, aquifère de la craie	SN	~ 60
17	Champagne nord, aquifère de la craie	SN	~ 50
18	Provence, plaine de Crau, aquifère alluvial (5)	RMC	50
19	Basse vallée du Var, aquifère alluvial	RMC	50
20	Auvergne, aquifère des projections volcaniques de la Chaîne des Puys	LB	40
21	Brie, aquifère du Calcaire de Champigny	SN	35
22	Languedoc, aquifère karstique des calcaires du Crétacé inf. et du Jurassique sup. du Nord Montpellier (système de la source du Lèz)	RMC	35
23	Vallée du Rhône r.d. dans le Gard et basse vallée du Gardon, aquifère alluvial	RMC	~ 30
24	Plaine Saône-Doubs, aquifère alluvial	RMC	~ 30

**illustration 18 : Principaux prélèvements d'eau souterraine répartis par aquifère (estimation 1999).**

## Nombre de captages pour l'alimentation en eau potable par BV

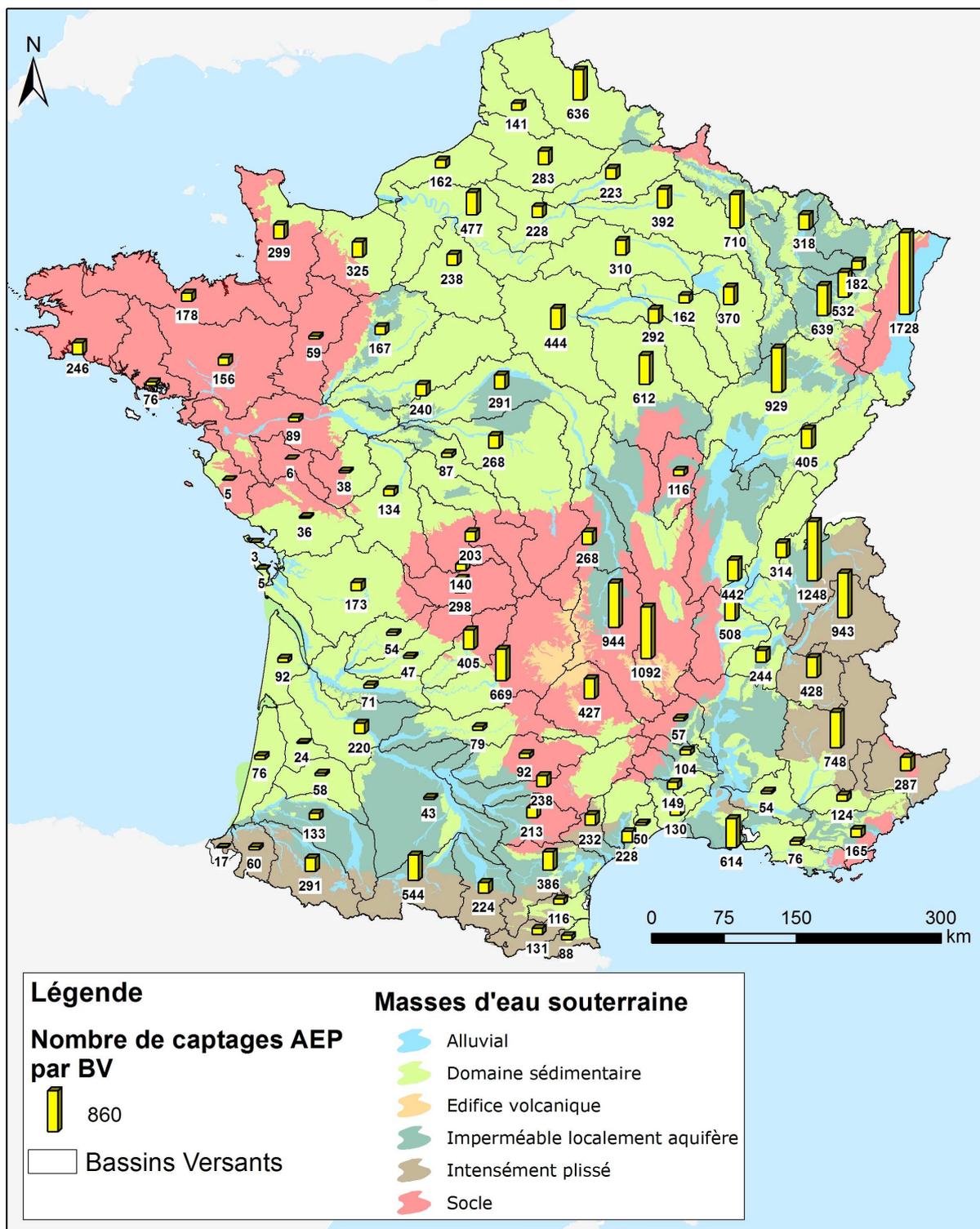


illustration 19 : Répartition et nombre des captages AEP par bassin versant « Explore »

Par ailleurs, on peut estimer que près de la moitié du volume total est tirée des aquifères alluviaux et indirectement soutirée des cours d'eau dans une large mesure. Le reste est prélevé principalement dans d'autres aquifères à nappe libre (30 à 35 %), dans la craie pour une bonne part, et enfin dans quelques aquifères profonds à nappe captive qui fut primitivement artésienne (eau jaillissante), mais ne l'est plus que rarement (15 à 20 %).

Si bien que la pression des prélèvements est très différente selon les types d'aquifères et leurs localisations géographiques. Une première approche, très macroscopique, peut consister à mettre en regard les prélèvements et les flux moyens d'eau souterraine totalisés dans chaque bassin, et à en déduire des « taux d'exploitation » moyens théoriques. Les tableaux (illustration 20 et illustration 21) fournissent une estimation de cette pression, il y a une dizaine d'années, au droit des grands bassins hydrographiques et au droit des principaux aquifères.

Bassin	Ressources naturelles en eau souterraine		(3) Prélèvements totaux en eau souterraine en 1999 (cf. tabl. 1)	Taux d'exploitation moyens globaux	
	(1) Ecoulement souterrain total approximatif  km <sup>3</sup> /an	(2) Flux global moyen des principaux aquifères régionaux (compris dans 1 km <sup>3</sup> /an)		Ratio 3/1  %	Ratio* 3/2  %
AG	22**	9**	0,64	2,9	7,1
AP	3,5	3	0,46	13,1	15,3
LB	20	6	0,98	4,9	16,3
RM	8,5	7	0,84	9,9	12,0
RMC	31**	15**	1,95	6,3	13,0
SN	15	10	1,25	8,3	12,5
Σ France	100	50	6,12	6,12	12,24

**illustration 20 : Prélèvements comparés aux ressources par bassin (1999)**

*\*provenant des principaux aquifères / \*\* part notable d'aquifères karstiques*

Bassin	Système aquifère	Superficie km²	Flux global moyen m³/an	Prélèvements totaux actuels m³/an	Taux d'exploitation approximatif %
AG	Sous-systèmes de l'aquifère multi-couche du Bassin aquitain : Sables des Landes plio-quaternaires (nappe libre) à Sables et calcaires miocènes (nappe captive).	13 000	1 400	≈ 100	≈ 7
	Sables inférieurs éocènes et aquifère « infra-molassique » (nappe captive).	≈ 15 000	210	≈ 100	≈ 50
		50 000	130	85	65
AP	Aquifère de la craie, région Lys-Dun-kerque (nappe libre).	630	100	≈ 50	50
	Aquifère de la craie, région Deule-Scarpe (nappe libre).	1 105	100	95	95
	Aquifère de la craie, bassin de la Somme (nappe libre).	5 670	1 030	≈ 90	9
	Calcaire carbonifère (nappe captive en France, libre p.p. en Belgique).	1 582	125b	25 (France) 110 (total)	88
LB (+ SN)	Calcaire de Beauce (LB + SN) (nappe libre et localement captive).	6 000	465	160	34
	Sables cénomaniens de Touraine (nappe captive).	25 000		20	
	Chaîne des Puys d'Auvergne, projections volcaniques (nappe libre).	260	110	40	36
RM	Aquifère alluvial de la plaine d'Alsace (nappe libre).	2 600	≈ 1 000 (700 à 1200)	500	50
	Calcaires jurassiques des Côtes de Meuse (nappe libre).	1 500	≈ 300	≈ 15	5
	Calcaires jurassiques des Côtes de Moselle (nappe libre).	3 300	≈ 600	225c	37
	Grès du Trias inférieur de Lorraine (nappe captive).	20 000	≈ 50	160c	320
RMC	Aquifère alluvial de la Plaine de Lyon s.l. (nappe libre).	480	140d	≈ 300	215
	Aquifère alluvial du Comtat et plaine Aigues-Sorgues, vallée du Rhône (nappe libre).	530	165	1500	90
	Aquifère alluvial de la Crau (nappe libre).	520	200e	50	25
	Aquifère alluvial plio-quaternaire multicouche du Roussillon (nappes libres et captives).	950	≈ 60	80	130
	Aquifère karstique du plateau de Vaucluse (nappe libre).	1 230	600	Σ	Σ
	Aquifère karstique des Grands Causses (RMC + AG) (nappes libres).	4 500	≈ 2 000f	Σ	Σ
	Aquifère karstique des calcaires du Crétacé inf. et du Jurassique sup. Nord de Montpellier (système de la Source du Lez).	707	160	41g	25
SN	Calcaire de Champigny, Brie (nappe captive).	3 500 (zone utile N-O : 400)	630 (190)	35	18
	Aquifère multicouche éocène des Sables du Soissonais et du calcaire grossier (nappe captive).	700	95	≈ 180	≈ 190
	« Sables verts » albiens du centre du Bassin de Paris.	Σ 75 000 (zone utile : 25 000 à 30 000)	25	18	72

illustration 21 : Flux naturels moyens et taux d'exploitations des principaux aquifères Français (1996)

## **2.9.2. EVALUATION DE LA PRESSION DES PRELEVEMENTS DANS LE CADRE DU PROJET EXPLORE 2070**

Le bureau d'étude B.I.P.E. a été chargé, dans le cadre du projet Explore, du LOT 7 (prospective : scénarios d'évolution démographique et socio-économique) qui comprend notamment l'inventaire des besoins en eau actuels et l'évolution de la demande à l'horizon 2070.

Pour définir les besoins actuels, l'ensemble des points de prélèvements de 2006 en France a été récupéré par le BIPE sur la base de données du Service de l'Observation et des Statistiques (SOeS) du Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement (MEDDTL). Ces prélèvements sont dissociés en trois usages (Alimentation en Eau potable, Agriculture et Industrie) puis ont été regroupés en bassins versants à l'échelle desquels les évolutions sur les prélèvements sont considérées homogènes.

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

Le tableau (illustration 22) récapitule les consommations en eau de 2006 (temps présent) et les besoins estimés en eau à horizon 2070 (temps futur) en eau souterraine par type de besoins. Les besoins en eau pour l'énergie ne sont pas ici comptabilisés car l'eau n'est pas consommée.

Date	AEP	Agricole	Industrie	Total
2006	3631	1276	1436	6344
2070	3100	1271	679	5050
Variation (%)	-14.6	-0.4	-52.7	-20.3

**illustration 22 : Prélèvements actuels (2006) et projection des prélèvements en 2070 en eau souterraine en Mm<sup>3</sup> (Source BIPE)**

Les volumes prélevés de 2006 en eau souterraine sont globalement peu différents de ceux de 1999

(+3.7%).

Globalement, d'après le BIPE, ces besoins devraient, à l'horizon 2070, fortement baisser en eau industrielle décroître pour l'AEP et rester stable pour l'irrigation. Sur le plan local, de fortes disparités sont cependant à prévoir par suite principalement de déplacement de population.

### **3. PREMIERES ANALYSES DE DIFFERENTS PARAMETRES ET INDICATEURS**

Ce chapitre a pour objectif de :

- Décrire une méthodologie permettant une évaluation des ressources en eau au moyen d'indicateurs
- Fournir une évaluation des ressources globales actuelles,
- Vérifier l'existence d'une éventuelle influence du changement climatique sur le comportement actuel des aquifères,
- Identifier et localiser les aquifères les plus vulnérable à la sécheresse.
- 

#### **3.1. PRÉCIPITATIONS TOTALES ET PRÉCIPITATIONS EFFICACES**

##### **3.1.1. RÉPARTITION DES PRÉCIPITATIONS MOYENNES ANNUELLES**

Il pleut en moyenne sur la France, 440 milliards de mètres cubes d'eau par an : soit un cube de 7,6 km d'arête, ou encore cinq fois le volume d'eau du lac Léman.

Si cette eau était uniformément répartie, ce volume équivaldrait à une couche de 80 cm, c'est-à-dire 800 litres par mètre carré. Mais cette ressource n'est pas équitablement distribuée dans l'espace (Illustration 23) et c'est encore plus variable selon les saisons et les années.

Sur près de 50 % du territoire, les pluies sont inférieures à la moyenne nationale alors qu'un tiers de la France reçoit à lui seul la moitié de leur volume total.

Les régions les plus arrosées sont d'abord les montagnes: les Alpes de Savoie, Cévennes, Pyrénées centrales et atlantiques, Cantal et Vosges où les pluies moyennes annuelles dépassent 1,5 m et localement 2 m (maximum : 2,80 m en Savoie, au plateau des Rognes) ; puis le Béarn, les Landes méridionales, les autres reliefs des Alpes, du Massif central (Limousin, Lyonnais) et du Jura qui reçoivent plus d'un mètre d'eau en année moyenne. Il tombe sur les montagnes autant ou même plus de neige que de pluie : la neige forme en moyenne 1/3 des précipitations au-dessus de 1 500 m, la moitié au-dessus de 2 000 m et plus des 2/3 au-dessus de 2 500 m.

Sont au contraire moins arrosées, les régions du littoral provençal et languedocien, le centre des bassins de Paris et aquitain, ainsi que certaines plaines intérieures aux pieds des massifs qui les abritent des vents humides (Limagne, Alsace), où les pluies moyennes sont inférieures à 60 cm

(minimums : 52 cm à Aigues-Mortes, 53 cm à Dreux).

Selon les années, les quantités d'eau tombées varient d'un rapport de 1 à 2 en général, et davantage dans la région méditerranéenne (de 1 à 3 ou 3,5). Au cours des années les plus sèches, il ne pleut que les trois-quarts ou même la moitié de la moyenne, alors que pour les années très pluvieuses, il tombe une fois et demie et jusqu'à deux fois plus d'eau que la moyenne. Les années à chute de pluie moyenne ne sont ni plus « normales » ni plus fréquentes que les autres. Par ailleurs, les répartitions saisonnières sont changeantes.

Sur la France, considérée globalement, le volume de pluie probable en année sèche de fréquence décennale - c'est-à-dire pouvant survenir 10 fois par siècle - ne serait que de 330 milliards de m<sup>3</sup> (60 cm). Ceci correspond aux quantités minimales assurées 9 années sur 10. Mais c'est une statistique : les écarts régionaux, et surtout locaux, par rapport à la moyenne, sont plus forts ; ils sont plus prononcés dans les régions méditerranéennes à moyenne déjà faible.

### **3.1.2. ÉVALUATION DES PRÉCIPITATIONS EFFICACES MOYENNES ANNUELLES SUR LA PÉRIODE 1970-1999**

Les pluies efficaces ou excédents pluviométriques sont les pluies totales diminuées de l'évapotranspiration réelle et de la variation de la quantité d'eau stockée dans le sol (réserve en eau utile du sol ou RU). Elles représentent la part des précipitations disponible pour l'écoulement superficiel et souterrain, donc y compris l'eau infiltrée transitant par les aquifères.

#### *3.1.2.1. ÉVALUATION ANTERIEURE A L'ÉTUDE : PÉRIODE 1970-1999*

Pour l'ensemble du territoire français, elles ont été calculées au Ministère de l'Écologie et du Développement durable (Direction de l'eau, Bureau de la connaissance des milieux aquatiques), sur les bases suivantes : Période 1970-1999, mailles communales (36 685) ; calcul par pas de temps mensuel suivant le modèle de Turc, avec  $RFU = 1/3 RU$ , une valeur de RU par canton (gamme de 25 à 260 mm) ; les données utilisées proviennent d'environ 2 500 postes pluviométriques, 1 000 postes thermométriques et 150 postes mesurant l'insolation.

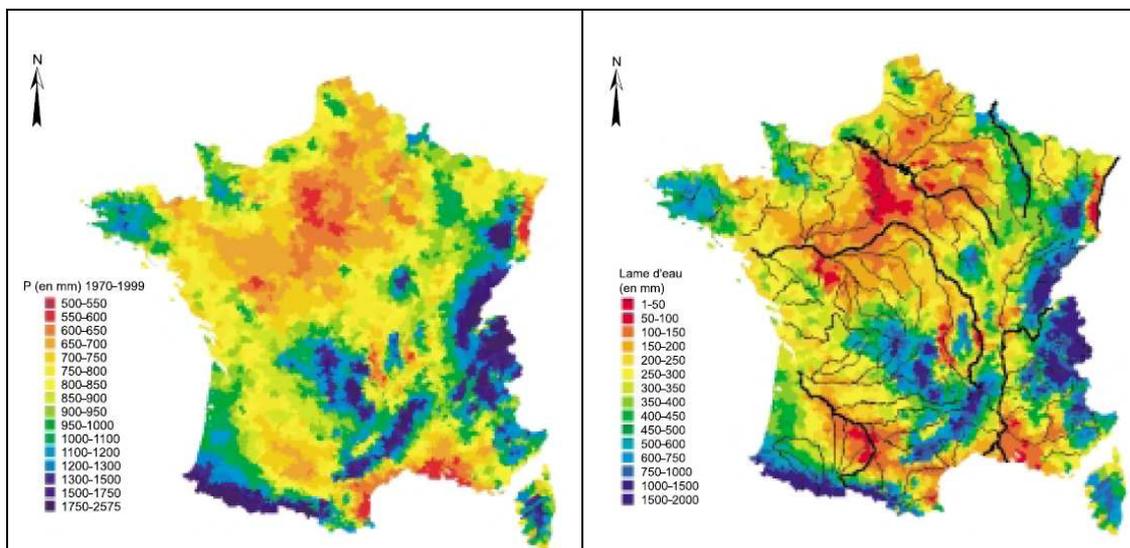
Par rapport aux estimations d'écoulement basées sur les données hydrométriques, cette approche assure une meilleure homogénéité spatio-temporelle et elle est indépendante de l'influence des utilisations. Elle requiert toutefois le calage des paramètres sur des écoulements locaux non influencés, à des échelles incluant l'écoulement souterrain.

La cartographie résultante donne la meilleure image possible de la répartition des apports d'eau moyens annuels sur l'ensemble du territoire métropolitain, où ils s'échelonnent de 40 mm à près de 2 m (Illustration 23).

Les régions les plus productrices d'écoulement local moyen annuel sont naturellement les principaux reliefs - Alpes, Jura, Cévennes, Pyrénées, Corse - ainsi que l'Ouest du Massif central, le

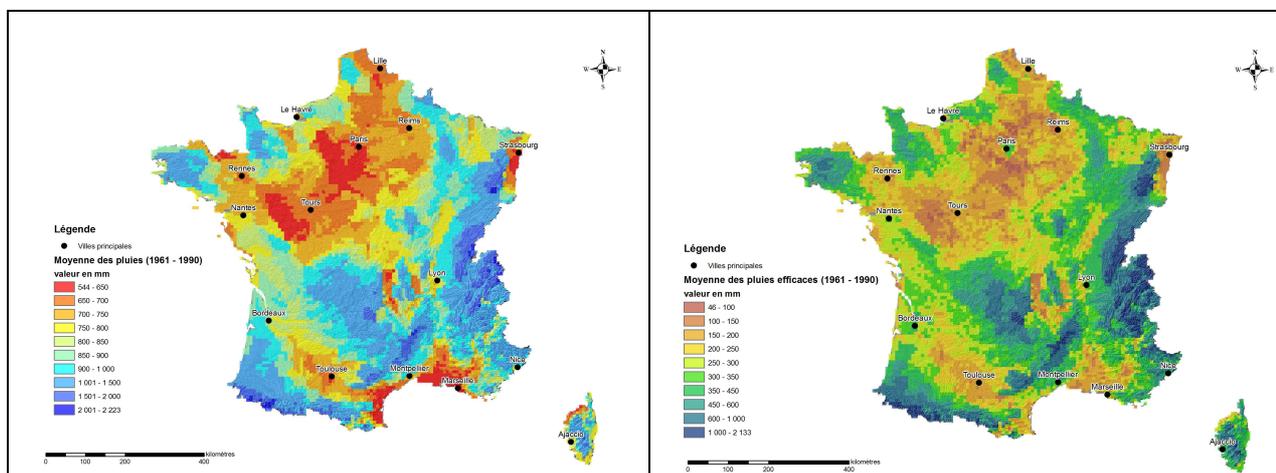
Morvan, la Bretagne occidentale, les Vosges et les Ardennes. Les plus dénuées (moins de 200 ou même 100 mm) sont le centre et le Sud-ouest du bassin Parisien, la Gascogne, la basse Provence et le bas Languedoc, ainsi que les plaines des fossés d'effondrement : Alsace et Limagnes.

Globalement l'écoulement moyen annuel formé sur le territoire français métropolitain, calculé suivant cette approche, s'élèverait à 200 km<sup>3</sup>/an.



**Illustration 23 : Pluviométrie moyenne interannuelle et Pluie efficace moyenne interannuelle (Période 1970-1999)**

### 3.1.2.2. EVALUATION DANS LE CADRE DU PROJET EXPLORÉ 2070 : PÉRIODE 1961-1990



**illustration 24 : Pluviométrie moyenne interannuelle et Pluie efficace moyenne interannuelle (Période 1961-1990)**

(source Météo France)

Hormis le découpage (beaucoup plus fin sur Illustration 23), il n'y a pas, semble-t-il, de différence significative entre ces cartes à l'exception peut-être des zones à très faibles pluies efficaces, zones beaucoup plus développées sur Illustration 23.

## 3.2. ANALYSE DE DIFFÉRENTS INDICATEURS

Une étude est actuellement en cours par le BRGM à la demande de l'ONEMA. Cette étude a pour objectif de cartographier la vulnérabilité des masses d'eau au changement climatique au moyen de croisements de données géomorphologiques et de résultats de modélisations.

Cette démarche nécessite de trouver les unités fonctionnelles les plus pertinentes permettant une bonne compréhension des phénomènes, dans le cas présent : répartition ruissellement/ percolation/ vidange de l'aquifère. Ces dernières semblent avoir été obtenues par le croisement de :

- masses d'eau de niveau 1,
- carte géologique au 1/1000 000è ;
- base de données sur les bassins versants « Carthage ».

### **3.2.1. INDICE DE DÉVELOPPEMENT ET DE PERSISTANCE DES RÉSEAUX (IDPR)**

La capacité du sol à laisser s'infiltrer ou ruisseler les eaux de surface dépend essentiellement de sa perméabilité relative. Par rapport à la pente, la pédologie, la couverture végétale et même la structure géologique, la lithologie (physique et chimique) du sous-sol a une influence primordiale sur l'établissement des réseaux hydrographiques naturels et sur le comportement hydrologique de ceux-ci. Un bassin formé de matériaux très perméables, comme les sables ou les calcaires, a une densité de drainage faible ; à l'inverse, un bassin constitué de roches imperméables mais molles et érodables comme les marnes et argiles, présente souvent une densité de drainage élevée. La densité de drainage est donc un indicateur révélateur de la constitution géologique du sous-sol.

En se fondant sur ce principe, des cartes détaillées indiquant le degré de perméabilité du sous-sol, et par conséquent, sa capacité à laisser s'infiltrer les pluies efficaces vers le milieu souterrain ou, au contraire, à les en empêcher en favorisant le ruissellement, peuvent être établies. L'illustration 25 en est un exemple à l'échelle de la France.

La méthodologie prend en compte dans chaque unité de bassin topographique, la comparaison entre les réseaux hydrographiques réels et calculés, la densité du réseau théorique indépendant (indice de développement ID) par rapport au réseau naturel existant (indice de persistance PR = densité de drainage). Les calculs s'appuient sur des modèles numériques de terrain (MNT) et le réseau naturel des rivières (BD Carthage IGN(c)).

Le résultat de l'IDPR peut être affecté à des unités spatiales de référence (unités fonctionnelles) afin de permettre leur intégration dans les outils SIG usuels. L'unité de référence, à l'échelle régionale est constituée de l'intersection de trois référentiels :

- référentiel des entités hydrogéologiques BD RHF(c) version 1 ;
- la carte géologique de France à l'échelle du million ;
- référentiel des zones hydrographiques BD CARTHAGE IGN(c) (plus ou moins assimilable à des bassins versants).

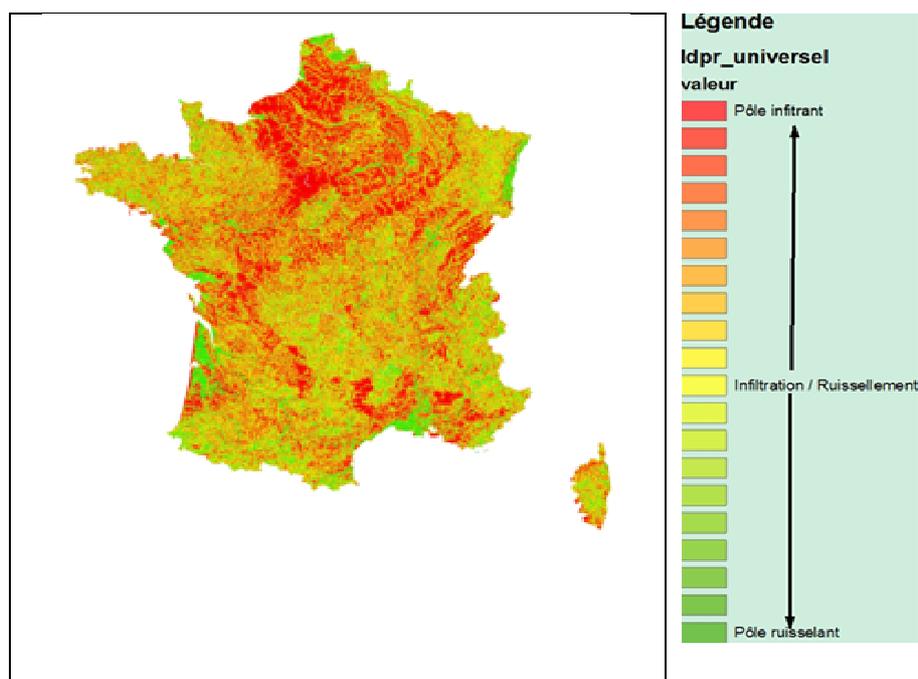


Illustration 25 : Report de l'IDPR

### **3.2.2. COMPARAISON IDPR ET RESULTATS DRAINC/RUNC (METEO FRANCE).**

Dans les fichiers transmis par Météo France dans le cadre du projet, figuraient pour chaque maille de 8km par 8km, outre les données climatologiques de bases, une évaluation de la pluie efficace et une décomposition de cette pluie efficace en une partie drainage (DRAINC) et une partie ruissellement (RUNC). L'illustration permet de comparer le rapport de DRAINC/RUNC et l'IDPR. L'analyse de cette illustration montre qu'il ne s'agit probablement pas de la même chose car :

- si quelques zones, dont notamment celle de la craie paraissent effectivement similaires et être fortement infiltrantes,
- toutes les autres zones, mêmes peu pentues, paraissent être très faiblement infiltrantes. La définition de ces paramètres (DRAINC et RUNC) paraît donc nécessairement différente des termes utilisés par nos soins sous le vocable « infiltration » et « ruissellement ». Ces notions de DRAINC et RUNC de Météo France ne pourront donc plus être exploitées à titre de comparaison dans la suite de ce rapport.

Répartition de la pluie efficace entre infiltration et ruissellement.  
 Comparaison entre 2 méthodes. A gauche : Safran(Météo France), à droite : IDPR (BRGM)

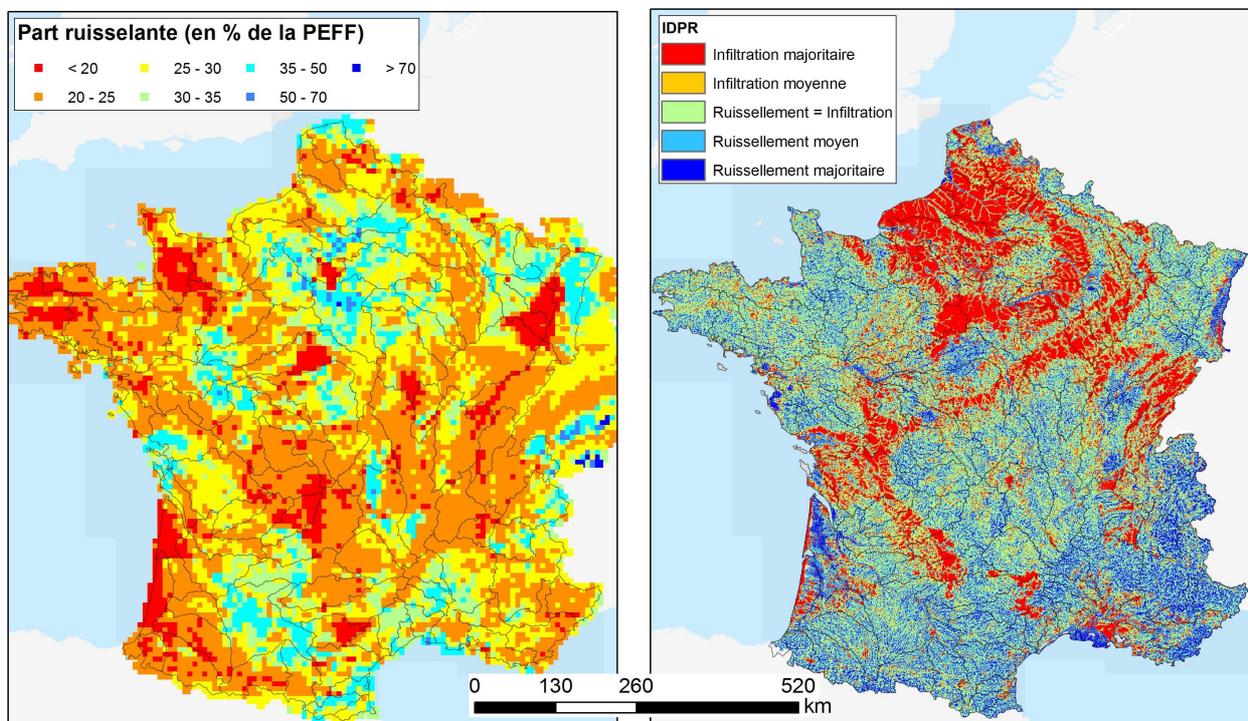


illustration 26 : Comparaison de la répartition de la pluie efficace safran entre infiltration et ruissellement a) fournie par Météo France b) par l'IDPR

### 3.2.3. EVALUATION DE LA RECHARGE DES AQUIFERES PAR L'IDPR

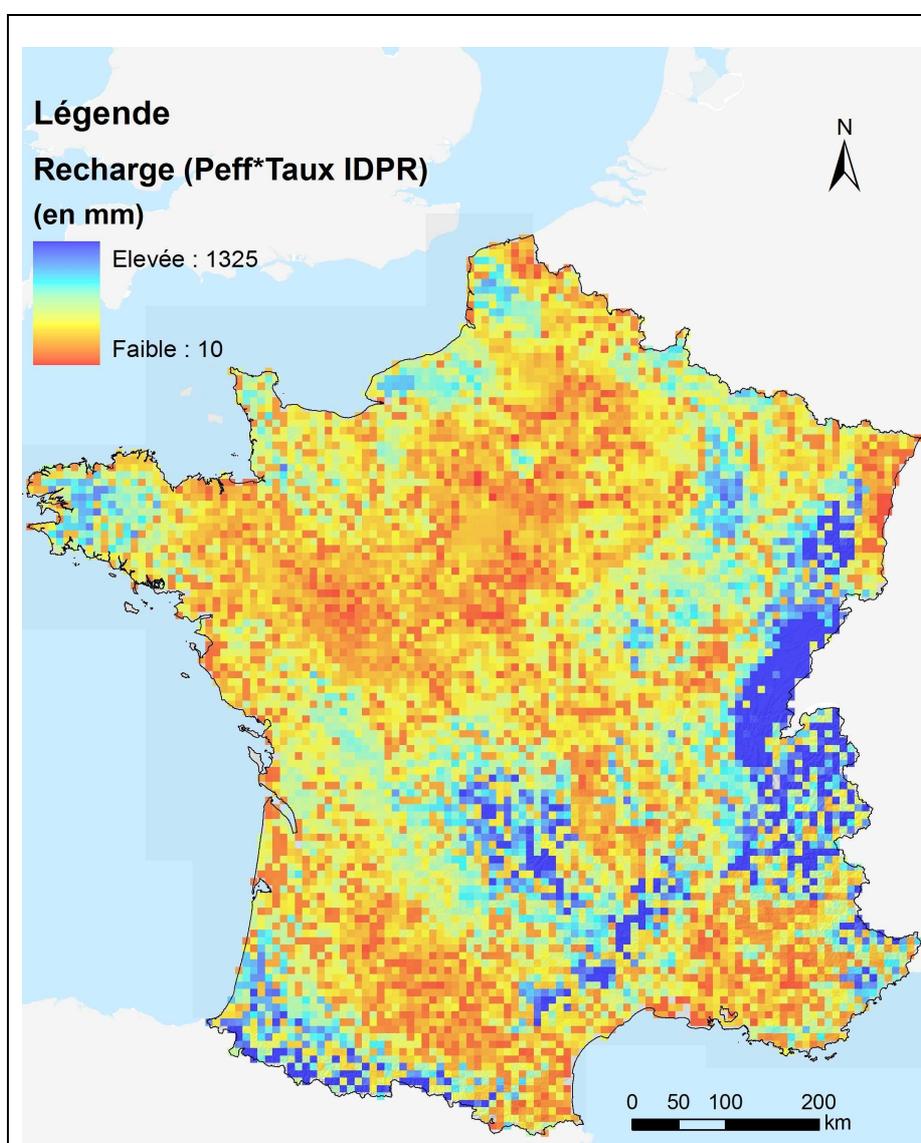
La répartition de la pluie efficace entre infiltration et ruissellement se fait en fonction de la classe IDPR des zones, selon les pourcentages présentés dans le tableau de l'illustration 27.

En utilisant l'IDPR (cf. §3.2.1), le tableau de correspondance (illustration 27) et la carte des pluies efficaces (illustration 24) on peut obtenir la carte d'évaluation de la recharge (Illustration 28) ou éventuellement celle du ruissellement annuel moyen sur la période 1961-1990

Valeur de l'IDPR	Signification	Proportion de la pluie efficace prise en compte pour l'estimation de l'infiltration	Proportion de la pluie efficace prise en compte pour l'estimation du ruissellement
0 - 200	Infiltration très majoritaire	80 %	20 %
200 - 400			
400 - 600	Infiltration Moyenne	70 %	30 %
600 - 800			

800 - 1000		60 %	40 %
1000 - 1200		50%	50 %
1200 - 1400			
1400 - 1600	Ruissellement moyen	40 %	60%
1600- 1800			
1800 -2000	Ruissellement majoritaire	20 %	80 %

**illustration 27 : Pourcentages retenus pour le calcul du ruissellement et de l'infiltration**



**Illustration 28 : Recharge moyenne interannuelle sur la période 1961-1990 calculée à partir de la pluie efficace Météo France**

### **3.3. PREMIERES ANALYSES DES LONGUES SERIES PIEZOMETRIQUES**

#### **3.3.1. INTRODUCTION**

L'étude de l'évolution du niveau des nappes d'eau souterraine sur de longues durées peut être un moyen d'appréhender et d'évaluer la part du changement climatique dans l'évolution des ressources en eau souterraine. Des corrélations entre précipitations, température et niveaux piézométriques ont été observées sur certains aquifères.

Alors que les approches actuelles sont plutôt basées sur la modélisation de la recharge, des méthodes statistiques basées sur des corrélations entre données piézométriques hydrométriques et climatologiques peuvent constituer une alternative pour déterminer si les variations de recharge des nappes s'accompagnent de tendances similaires ou contraires avec les précipitations et les températures. C'est une des directions d'étude que le BRGM mène actuellement à la demande de l'ONEMA (fiche : Établissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines). Cette étude a fait l'objet d'un rapport (BRGM/RP-59286-FR, février 2011) dont sont extraits les paragraphes suivants.

#### **3.3.2. SERIES PIEZOMETRIQUES LONGUE DUREE**

Afin de permettre à l'avenir de détecter une éventuelle influence de comportement des nappes sous l'effet d'un changement climatique, il convient de sélectionner les piézomètres en service qui pourraient servir de référence. Pour cela il convient de s'assurer que ces piézomètres :

- ont des séries de données homogènes et suffisamment longues pour permettre des analyses statistiques diverses permettant notamment de constater qu'ils ne sont actuellement pas influencés par le changement climatique ;
- qu'ils ne sont pas influencés par des activités anthropiques (pompages, barrage, écluse, ...) ou par des phénomènes naturels non représentatifs de l'état de la nappe (échange nappe- rivière, ...),
- qu'ils sont représentatifs de la nappe libre associée.

Un tri a été réalisé à partir des piézomètres figurant dans la banque de données ADES du BRGM (3344 piézomètres) afin de ne garder que ceux remplissant les conditions précédentes, et d'éliminer tous ceux dont les données paraissent douteuses.

La simple observation des chroniques permet d'en éliminer de nombreux (Illustration 29).

Par ailleurs afin de vérifier l'influence du changement climatique sur tous types d'aquifères et sur l'ensemble du territoire, il convient de sélectionner des chroniques à cycle annuel à cycle

pluriannuel et à cycle multiple réparties le mieux possible sur l'hexagone et/ou dans les DOM. Ce tri peut être réalisé par observation des chroniques (Illustrations 24 et 25) mais également par analyse des variogrammes.

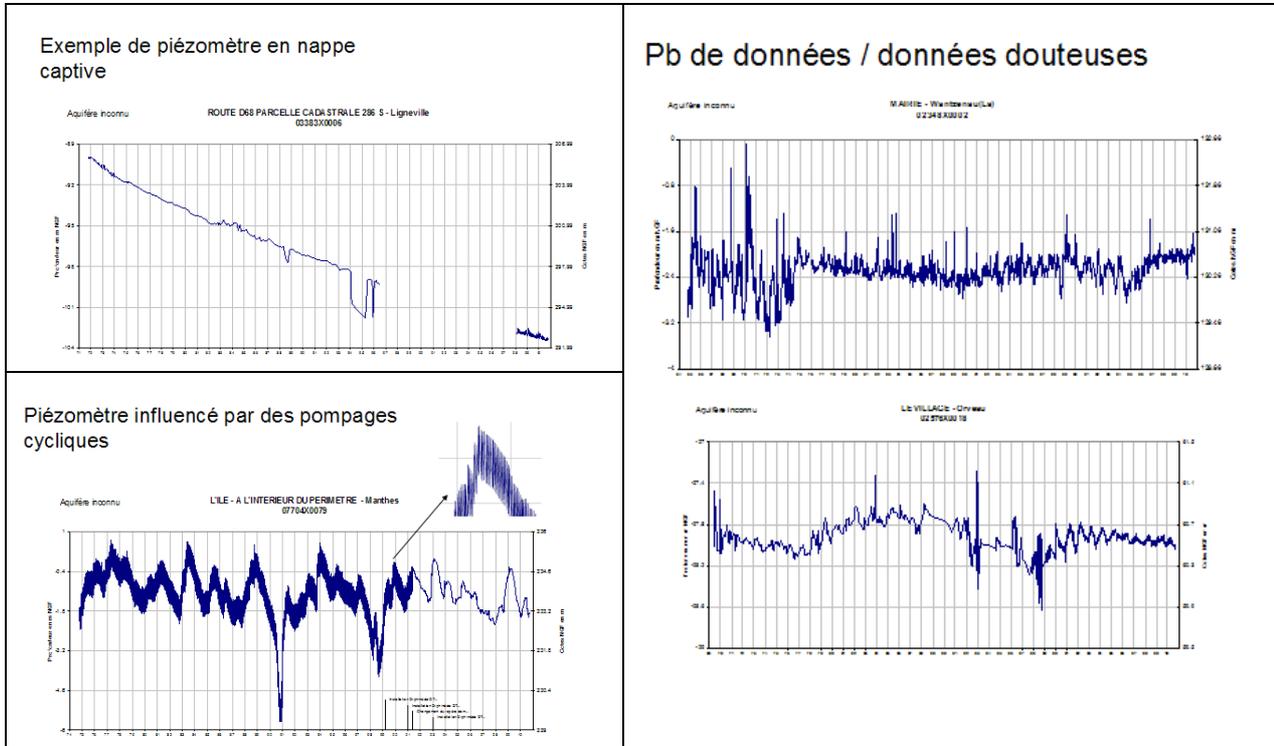
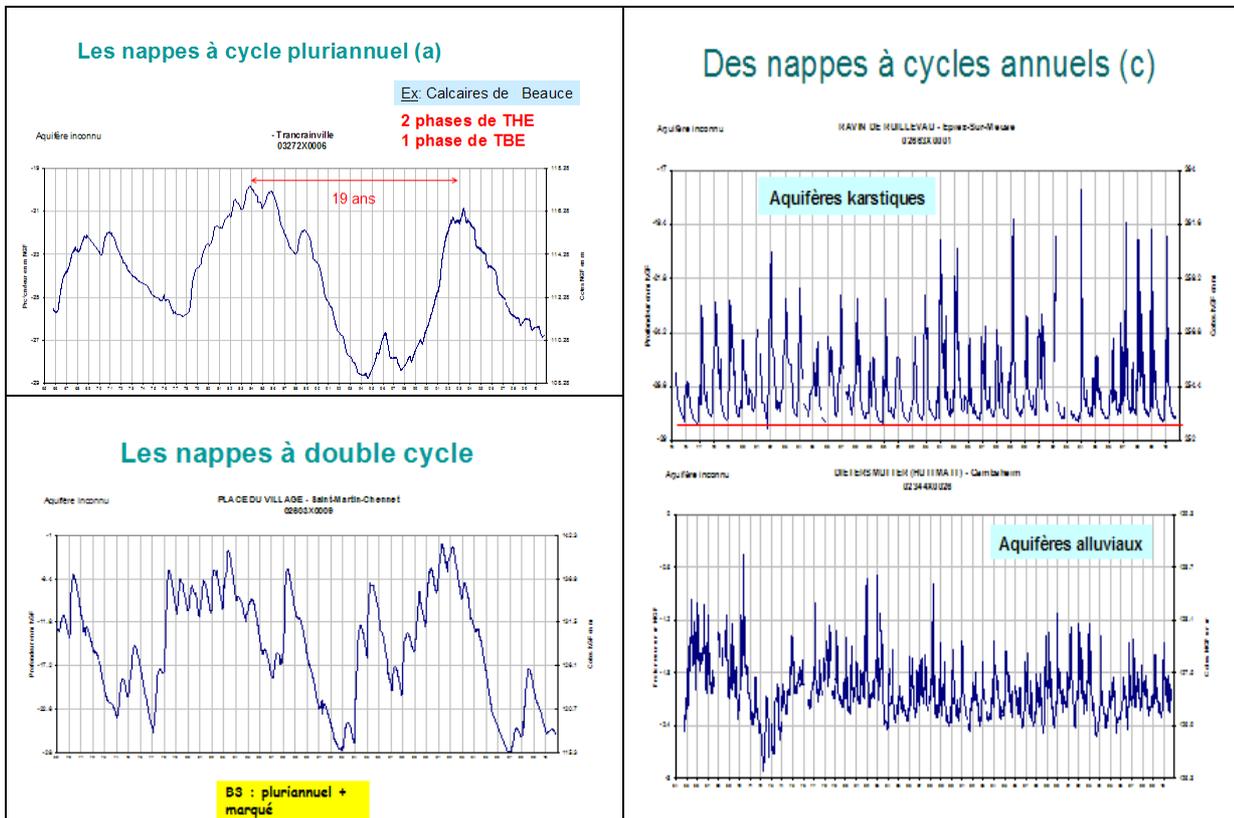


Illustration 29 : Exemples de chroniques de piézomètres à éliminer



### Illustration 30 : Exemples de chroniques de piézomètres à conserver

#### 3.3.3. ANALYSES STATISTIQUES SUR LES SERIES SELECTIONNEES

##### 3.3.3.1. ANALYSE DE TENDANCE SIMPLE

Après ces différentes sélections, l'échantillon comporte 377 piézomètres malheureusement mal répartis sur l'ensemble du territoire. On constate ainsi une densité forte dans le nord et dans l'est de la France et très faible dans le reste de l'Hexagone (illustration 30) Afin de détecter d'éventuelles tendances, des tests ont été réalisés. Même si l'on constate plus de baisse que de hausse, elle n'est pas généralisée et il faut vérifier qu'il n'y a pas d'influence anthropique ni de corrélation avec une baisse de la pluie efficace.

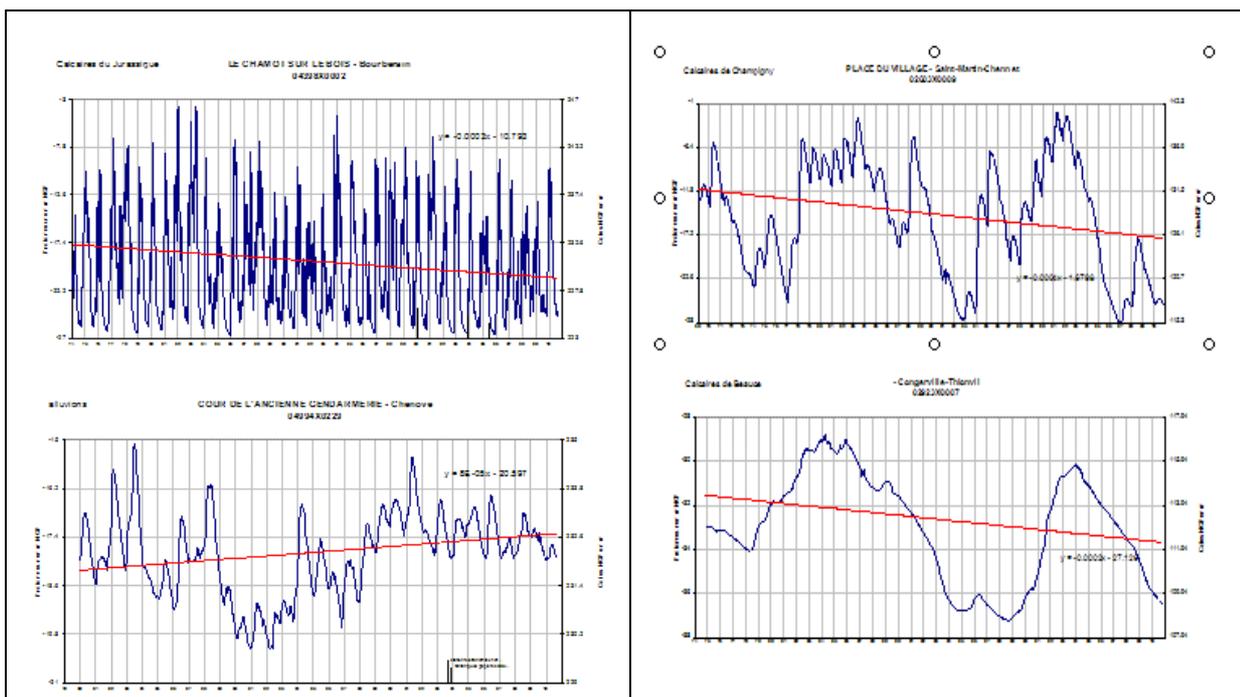


Illustration 31 : Exemple d'analyse de tendance simple

Après avoir vérifié l'existence ou l'absence de corrélation entre les niveaux piézométriques et les pluies efficaces, une analyse régionale pourra être menée pour vérifier si l'on constate ou non une tendance à un impact du changement climatique. Par ailleurs la série de référence de Météo France pourra être utilisée pour vérifier qu'elle ne génère pas de tendance.

##### 3.3.3.2. ANALYSE DE TENDANCE ET DE RUPTURE

Afin de déterminer l'existence de tendance et de rupture, des tests spécifiques, définis dans le

tableau ci-dessous, ont été réalisés sur 325 piezomètres.

## Tendance : méthodes et tests de significativité utilisés

	Pas d'autocorrélation	Autocorrélation significative (test de Ljung-Box)
<b>Régression linéaire</b> $Y = a.t + b + E$ Hypothèse nulle $H_0: a=0$	La statistique du test suit une loi de Student (droite de tendance calculée par méthode des moindres carrés)	Test modifié calcul d'un nombre $n^*$ (d'après Bayley et Hammersley)
<b>Mann-Kendall</b> $S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k)$ $\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{si } x_j - x_k > 0 \\ 0 & \text{si } x_j - x_k = 0 \\ -1 & \text{si } x_j - x_k < 0 \end{cases}$	La "statistique" Z du test suit une loi normale centrée-réduite $Z = \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} \text{ si } S > 0$ $Z = \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} \text{ si } S < 0$ $Z = 0 \text{ si } S = 0$	Test modifié calcul d'un nombre $n^*$ : 1) méthode de Bayley 2) méthode de Hamed et Rao

$n^*$  = "effective number of independant observations" calculé en faisant intervenir les coeff. d'autocorrélation. ( $n^* < n$ )

### Recherche de rupture : test de Pettitt

La variable de test s'apparente à la variable S du test de Mann-Kendall, mais dans ce cas les couples de valeur  $(x_j, x_i)$  sont formés par sélection d'une valeur de part et d'autre d'un point de rupture supposé de rang k dans la série.

En faisant varier k de 1 à n-1, on obtient la variable de test U en fonction de k.

La rupture possible se situerait alors au rang  $k_R$  correspondant au maximum de U(k).

#### Illustration 32 : Définition des tests réalisés

Les résultats de ces tests sont récapitulés, par type de chronique, dans l'illustration 33.

# Résultats

## Piézomètres à cycle annuel

118 piézomètres initialement, 9 non retenus.

*Option 1* : 31 avec baisse significative pour au moins une méthode et une variable, soit 28,5%.

*Option 2* : 34 avec baisse significative pour au moins une méthode et une variable, soit 31%.

## Piézomètres à double cycle avec annuel plus marqué (b1)

127 initial, 1 non retenu.

*Options 1 et 2* : 8 piézomètres avec baisse significative pour au moins une méthode et une variable, soit 6%.

## Piézomètres à cycle mixte (b2)

55 piézomètres, 3 non retenus

*Option 1* : aucune baisse significative

*Option 2* : 1 seul piézomètre avec valeurs de Décembre uniquement et au seuil 5%

## Piézomètres à double cycle avec pluri-annuel plus marqué (b3)

38 piézomètres

*Option 1* : un seul piézomètre (03302X1012) pour les valeurs minimales avec Mann-Kendall (au seuil de 1%)

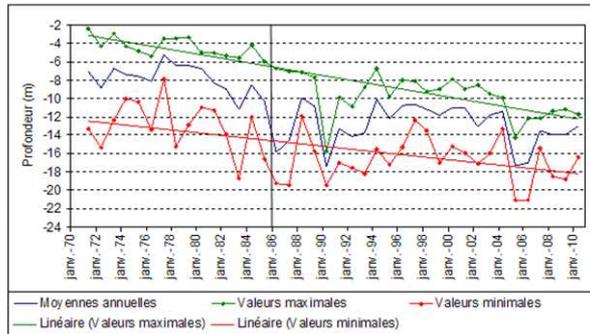
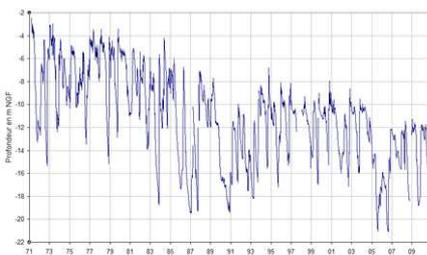
*Option 2* : aucun

Illustration 33 : Tableau récapitulant les résultats des tests réalisés

*Option 1* : avec tendance / *Option 2* : sans

## Exemple

### Piézomètre 09724X0023



	Autocorrélation	Test "modifié"	Significativité Régression	Significativité Man-Kendall	Test de Pettitt (rupture)
Valeurs moyennes	oui	oui	oui, au seuil 1%	oui, au seuil 5%	oui, au seuil 1% (en 1986)
Valeurs maximales	oui	oui	oui, au seuil 1%	oui, au seuil 1%	oui, au seuil 1% (en 1986)
Valeurs minimales	non	non	oui, au seuil 1%	oui, au seuil 1%	oui, au seuil 1% (en 1986)
Moyenne des maxi.	oui	oui	oui, au seuil 1%	oui, au seuil 5%	
Moyenne des min.	oui	oui	oui, au seuil 1%	oui, au seuil 5%	
Valeurs moyennes de Déc.	non	non	oui, au seuil 1%	oui, au seuil 1%	

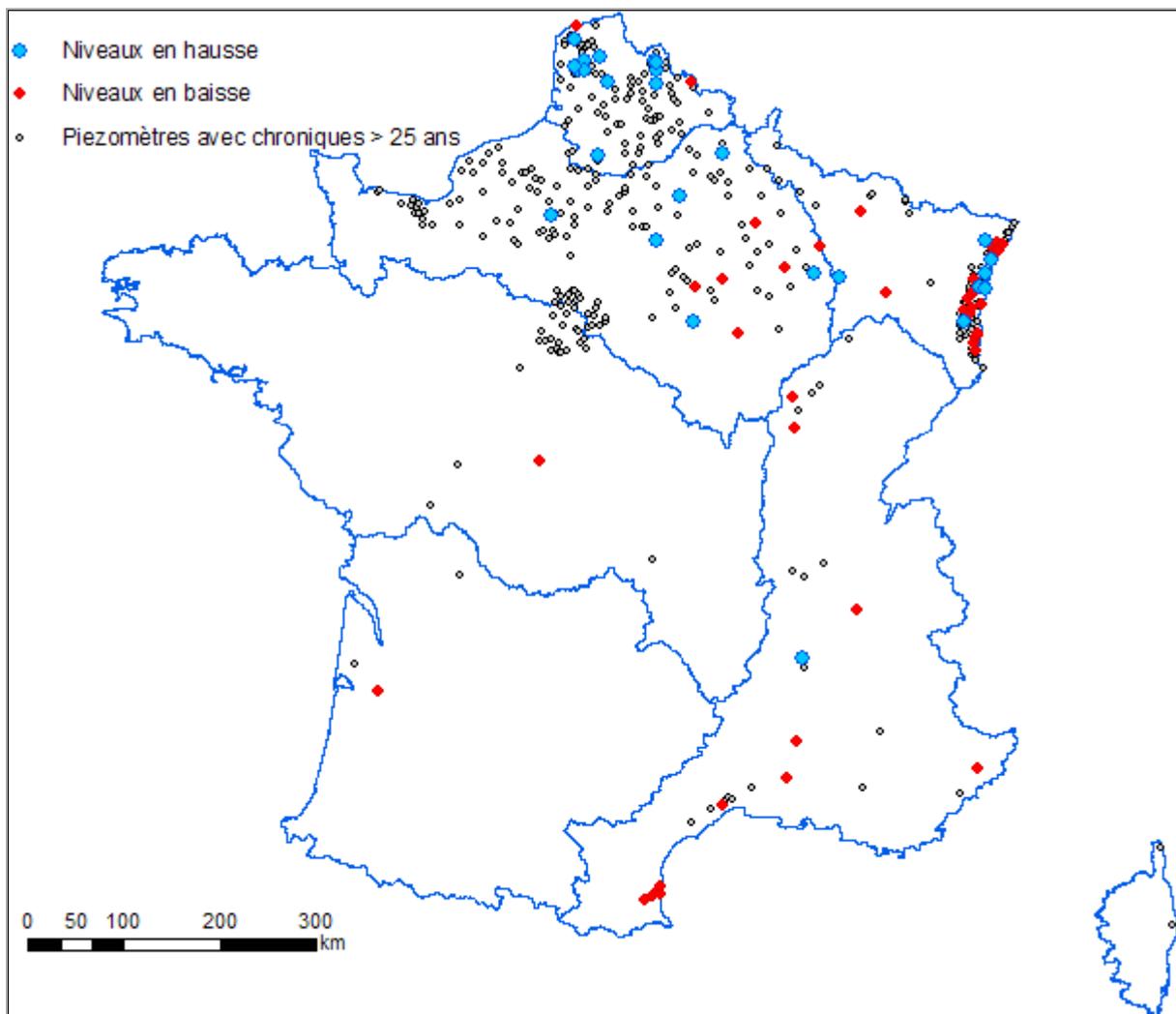
Avec l'option 2, les 2 tests (régression et Mann-Kendall), concluent pour toutes les variables à des tendances toutes significatives au seuil de risque de 1%.

Illustration 34 : Exemple de graphiques et de tableau de résultats réalisés lors de cette analyse

Sur les 377 piézomètres retenus,

- **44 présentent une baisse significative** pour au moins une méthode et une variable sur les 5 retenues, soit 13 %.
- **26 présentent une hausse significative** pour au moins une méthode et une variable sur les 5 retenues, soit 10,5 %.

La carte de illustration 35 précise la localisation des piézomètres, ceux en baisse significative et ceux en hausse significative. La carte de illustration 36 précise les masses d'eau captées par les piézomètres en baisse significative et en hausse significative.



**illustration 35 : Localisation des piézomètres à tendances significatives (baisse et hausse des niveaux), aux risques 1% et 5 % (70 piézomètres)**

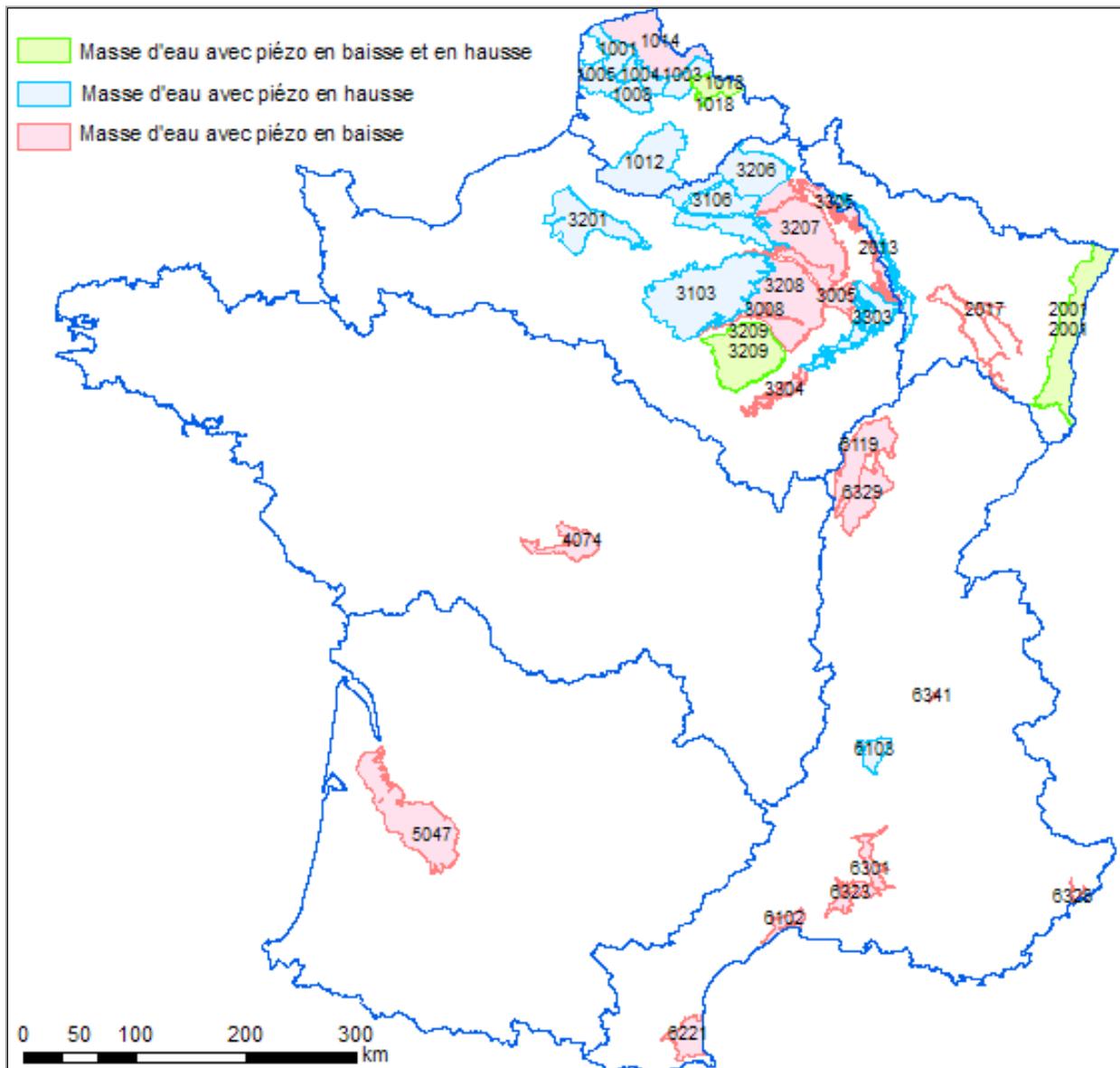


illustration 36 : *Masses d'eau captées par les piézomètres en baisse significative et en hausse significative*

Les piézomètres avec baisse significative des niveaux se répartissent sur 5 types de masses d'eau :

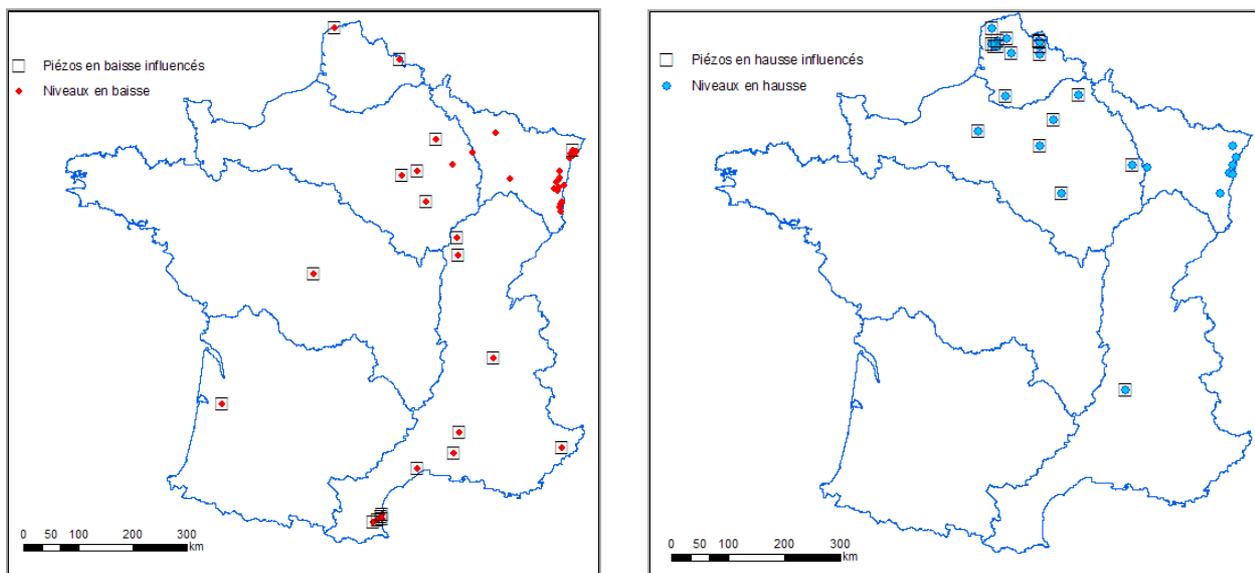
- masses d'eau de la Craie du bassin Seine Normandie (8 piézomètres),
- masses d'eau des Calcaires du Jurassique (7 piézomètres),
- *Pliocène de Haguenau et nappe d'Alsace* (12 piézomètres),
- Multicouche pliocène et alluvions quaternaires du Roussillon (6 piézomètres),
- divers systèmes alluvionnaires (10 piézomètres).

### 3.3.3.3. PIEZOMETRES INFLUENCES PAR LES PRELEVEMENTS

Parallèlement une analyse a été conduite pour savoir dans quelle mesure les piézomètres sélectionnés pour la recherche de tendances pouvait être influencés par des pompages. Elle a conduit aux résultats suivants :

- piézomètres dont les niveaux baissent : 21 (sur 44) sont influencés à des degrés divers. Pour les autres (Alsace et Lorraine), faute de données, il n'a pas été possible de conclure.
- piézomètres dont les niveaux sont à la hausse : 19 (sur 26) sont influencés à des degrés divers. Pour les autres (Alsace et Lorraine), faute de données, il n'a pas été possible de conclure.

Ces piézomètres sont reportés sur les cartes des illustrations 11 et 12.



**illustration 37 : Piézomètres à la baisse (rouge, à gauche) et à la hausse influencés par des prélèvements (bleue, à droite)**

#### 3.3.3.4. RELATION ENTRE RUPTURES DÉTECTÉES DANS LES SÉRIES ET ÉPISODES CLIMATIQUES PARTICULIERS

Les ruptures détectées par le test de Pettitt ont été comparées aux évolutions des précipitations sur une période de 30 à 40 ans aux stations climatologiques de Melun, Colmar, Reims, Dijon, St-Dizier et St-Quentin, stations qui ne sont pas trop éloignées de la majorité des piézomètres dont les niveaux sont en baisse (carrés rouges sur la figure ci-dessus) ou en hausse (carrés bleus).

Les dates de rupture indiquées par le test de Pettitt signalent :

- soit une hauteur de précipitations nettement inférieure ou supérieure à la moyenne,
- soit suivent ou bien précèdent une séquence climatique particulière, par exemple 1976 (la rupture est détectée en 1977), ou bien 1988 à Melun et St-Quentin (rupture détectée en 1989)

De cette étude, il ressort qu'il n'est actuellement pas possible de mettre en évidence un impact d'une tendance climatique significative sur le niveau des nappes (tendance climatique qui se manifeste clairement sur les températures, nettement moins sur les pluies, comme le montre en particulier l'étude de Météo-France : "A 50 year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system", International Journal of Climatology, 2009)

Les tendances à la baisse ou à la hausse significative des niveaux sur les piézomètres sélectionnés apparaissent largement déterminées par l'influence des prélèvements opérés dans le voisinage de ces piézomètres. Quant aux ruptures constatées dans les séries de niveaux, elles correspondent à des épisodes climatiques particuliers (plus secs, ou plus humides, mais avec ensuite un retour à la "normale").

### **3.4. VULNERABILITE A LA SECHERESSE DES AQUIFERES A NAPPE LIBRE**

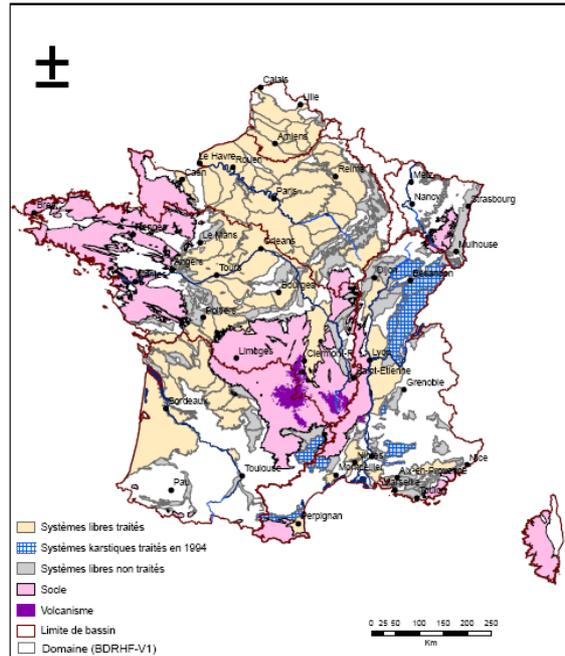
A la demande du MEDDTL, une étude a été réalisée, dans le cadre de la convention 2006, afin d'évaluer la résistance à la sécheresse des principaux aquifères à nappe libre (rapport BRGM/RP-55186-FR, décembre 2006). Les paragraphes suivants, extraits du rapport cité, précisent le domaine étudié, la méthodologie et résument les principaux résultats de l'étude.

#### **3.4.1. DOMAINE ETUDIE ET METHODOLOGIE**

##### *3.4.1.1. DOMAINE ETUDIE*

Les aquifères retenus sont ceux des bassins sédimentaires, sélectionnés en fonction de leur taille, de leur importance économique et des situations de déséquilibre apparues ces dernières années. Le référentiel utilisé dans le cadre de cette étude est la BDRHF\_V1. L'étude a porté sur 70 des 184 systèmes aquifères à nappe libre recensés représentant cependant 70% de la superficie totale. 12 aquifères karstiques, étudiés en 1994, ont été ajoutés.

L'illustration 38 récapitule la liste de ces aquifères et précise les limites des zones étudiées.



Code	Nom de l'aquifère (BDRHF-V1)	Code	Nom de l'aquifère (BDRHF-V1)
001	Artois	044	Gatine
003	Ternois	048	Touraine
004	Ponthieu	049	Veron et plateau de Ste Maure
005	Cambresis	055	Plateau de Gençay
006	Hainaut-Vermandois	056	Montmorillonais
007	Santerre	057	Brenne
008	Picardie	058	Berry Ouest
009	Pays de Caux	059	Berry Est
010	Vexin Normand	064	Nivernais
011	Thelle	072	Tonnerois Est
012	Vexin français	077	Chatillonnais et plateau de Langres
013	Paris-Valois-Tardenois-Soissonnais	109	Civraisien
014	Soissonnais nord	112	Aunis
015	Thiérache	113	Charente Nord
016	Laonnois-Porcien	116	Saintonge
018	Champagne Nord	118	Angoumois
019	Champagne centre	119	Périgord Nord
020	Champagne sud	120	Périgord Sud
022	Brie	121	Salardais
024	Hurepoix	124	Bouriane
025	Beauce	125	Blayais
026	Petite Beauce	126	Entre deux Mers
027	Sologne	127	Landes Aquitaine occidentale
028	Val-de-Seine	130	Plaine Garonne et Tarn
029	Sénonais	143	Pli de Montpellier
030	Othe	146	Roussillon
031	Gatinais Est	149	Garrigue Est
032	Gatinais Sud	150	Vistrenque
034	Lieuvin Ouche	151	Dombes
035	Roumois Neubourg	152	Bas Dauphiné
036	Plaine de Saint André – Thimerais	154	Plaine de Valence
037	Perche	157	Crau
038	Pays du Maine	167	Plan de Canjuers
040	Bessin	174	Bresse Châlonnaise
041	Plaine de Caen	176	Limagne
092	Jura alsacien	139	Causse Méjan et Noir
093	Jura Centre	141	Larzac
094	Haut Jura	144	Pays de Sault
095	Premier plateau du Jura	145	Corbières
096	Cote du Doubs	159	Royans
097	Haute Saône	162	Vaucluse

illustration 38 : Vulnérabilité à la sécheresse - Localisation et liste des aquifères traités

L'évaluation de la résistance à la sécheresse a été déterminée à l'aide de 3 critères :

- Le temps de demi-décroissance des niveaux piézométriques,
- L'indice de développement et de persistance des réseaux (IDPR), qui permet une approche indirecte de la partition ruissellement-infiltration,
- La taille du système aquifère qui, avec son épaisseur, détermine sa plus ou moins grande inertie.

Pour chaque critère, 5 classes de valeurs ont été constitués avec une note allant de 1 à 5, d'autant plus élevée que la valeur du critère traduit la capacité de l'aquifère à résister à la sécheresse.

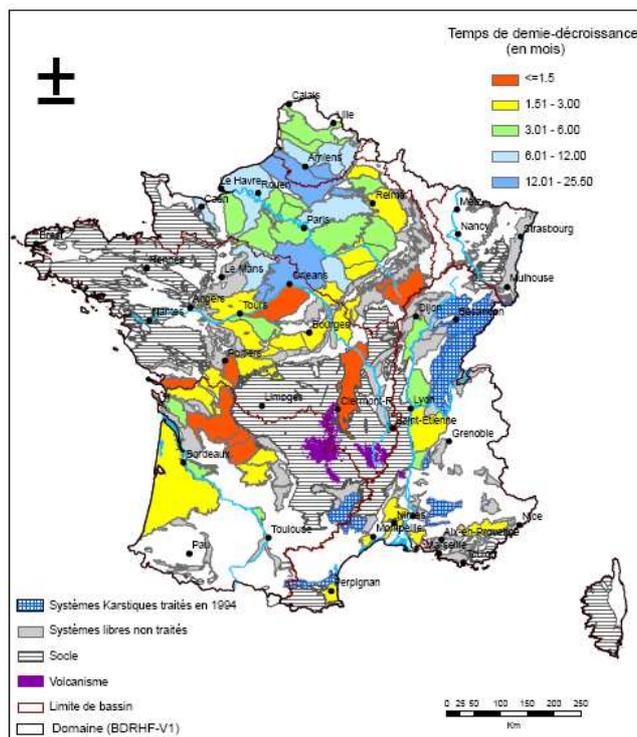
Pour chaque aquifère, un indicateur de résistance intrinsèque à la sécheresse a été calculé comme somme pondérée des notes de résistance attribuées à chaque critère, le temps de demi décroissance étant considéré comme le critère prépondérant.

Critères	Poids	Notation				
		Très peu résistant	Peu résistant	Résistance moyenne	Bonne résistance	Forte résistance
Temps de demi-décroissance	5	1	2	3	4	5
IDPR	2	1	2	3	4	5
Superficie	1	1	2	3	4	5

**illustration 39 : Pondération et notation des critères de résistance retenus**

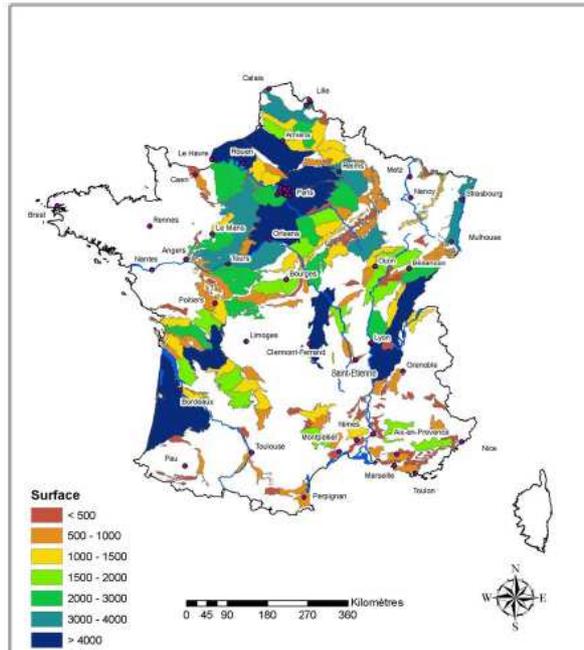
### **3.4.2. EVALUATIONS DES CRITERES**

Les illustrations suivantes fournissent les valeurs des critères de bases pour les différents aquifères.



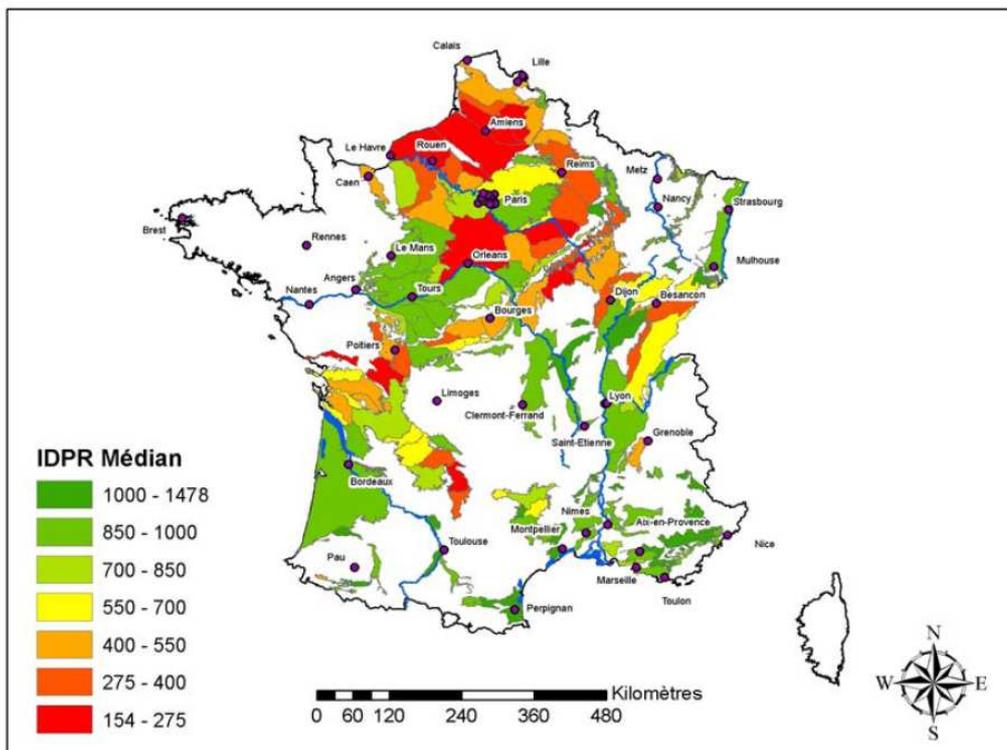
Code	Système aquifère	Tdemi (mois)	Code	Système aquifère	Tdemi (mois)
072	Tonnerrois Est	0.8	048	Touraine	3.6
077	Chatillonnais et plateau de L.	0.8	116	Saintonge	3.6
176	Limagne	0.8	020	Champagne sud	3.7
120	Périgord Sud	0.9	019	Champagne centre	3.8
027	Sologne	1.0	016	Laonnois-Porcien	3.9
118	Angoumois	1.1	126	Entre deux Mers	3.9
112	Aunis	1.2	154	Plaine de Valence	4.1
119	Périgord Nord	1.4	174	Bresse-Chalonnaise	4.1
055	Plateau de Gençay	1.5	003	Ternois	4.3
032	Gatinais Sud	1.6	036	Plaine de Saint André - Th.	4.3
113	Charente Nord	1.6	012	Vexin français	4.7
167	Plan de Canjuers	1.6	022	Brie	4.7
109	Civraisien	1.7	001	Artois	4.9
124	Bouriane	1.8	024	Hurepoix	5.0
030	Othe	1.9	011	Thelle	5.3
143	Pli de Montpellier	1.9	010	Vexin Normand	5.7
157	Crau	1.9	034	Lieuvin Ouche	5.7
015	Thiérache	2.0	130	Plaine Garonne et Tarn	6.0
044	Gatine	2.0	151	Dombes	6.0
058	Berry Ouest	2.0	006	Hainaut-Vermandois	6.1
152	Bas-Dauphiné	2.0	035	Roumois Neubourg	6.9
056	Montmorillonais	2.1	004	Ponthieu	7.1
064	Nivernais	2.1	031	Gatinais Est	7.6
127	Landes Aquitaine occident.	2.2	005	Cambresis	8.7
018	Champagne Nord	2.3	009	Pays de Caux	9.6
049	Veron et plateau de Ste Maure	2.3	040	Bessin	9.6
149	Garrigue Est	2.5	041	Plaine de Caen	9.6
059	Berry Est	2.6	037	Perche	11.9
029	Sénonais	2.7	013	Paris-Valois-Tardenois-Soissonais	12.0
121	Salardais	2.8	008	Picardie	12.3
146	Roussillon	2.8	007	Santerre	15.7
057	Brenne	2.9	028	Petite Beauce	16.0
028	Val-de-Seine	3.0	025	Beauce	19.0
150	Vistrenque	3.0	014	Soissonnais nord	25.5

illustration 40 : Temps de demi-décroissance des aquifères (en mois)



Code	Système aquifère	Superf. (km <sup>2</sup> )	Code	Système aquifère	Superf. (km <sup>2</sup> )
001	Artois	3812	044	Gatine	3843
003	Ternois	1132	048	Touraine	2105
004	Ponthieu	1789	049	Veron et plateau de Ste Maure	2365
005	Cambresis	2104	055	Plateau de Gençay	1301
006	Hainaut-Vermandois	1488	056	Montmorillonnais	2316
007	Santerre	1040	057	Brenne	629
008	Picardie	6745	058	Berry Ouest	1610
009	Pays de Caux	4290	059	Berry Est	1659
010	Vexin Normand	1210	064	Nivernais	2498
011	Thelle	758	072	Tonnerrois Est	429
012	Vexin français	1077	077	Chatillonnais et plateau de L.	3360
013	Paris-Valois-Tardenois-Soissonais	5197	109	Civraisien	1851
014	Soissonnais nord	688	112	Aunis	1223
015	Thiérache	1088	113	Charente Nord	2342
016	Laonnois-Porcien	1492	116	Saintonge	1252
018	Champagne Nord	3835	118	Angoumois	4930
019	Champagne centre	2830	119	Périgord Nord	1023
020	Champagne sud	848	120	Périgord Sud	1995
022	Brie	5131	121	Salardais	1264
024	Hurepoix	2871	124	Bouriane	1805
025	Beauce	8487	128	Entre deux Mers	1061
026	Petite Beauce	808	127	Landes Aquitaine occidentale	13775
027	Sologne	3825	130	Plaine Garonne et Tarn	400
028	Val-de-Seine	464	143	Pli de Montpellier	347
029	Sénonais	1804	146	Roussillon	861
030	Othe	1345	149	Garrigue Est	1231
031	Gatinois Est	2298	150	Vistrenque	452
032	Gatinois Sud	1558	151	Dombes	2305
034	Lieuvin Ouche	2618	152	Bas-Dauphiné	4406
035	Roumois Neubourg	2483	154	Plaine de Valence	666
036	Plaine de St André – Th.	3078	157	Crau	545
037	Perche	3608	187	Plan de Canjuers	1564
040	Bessin	382	174	Bresse-Chalonnaise	1685
041	Plaine de Caen	745	176	Limagne	5405

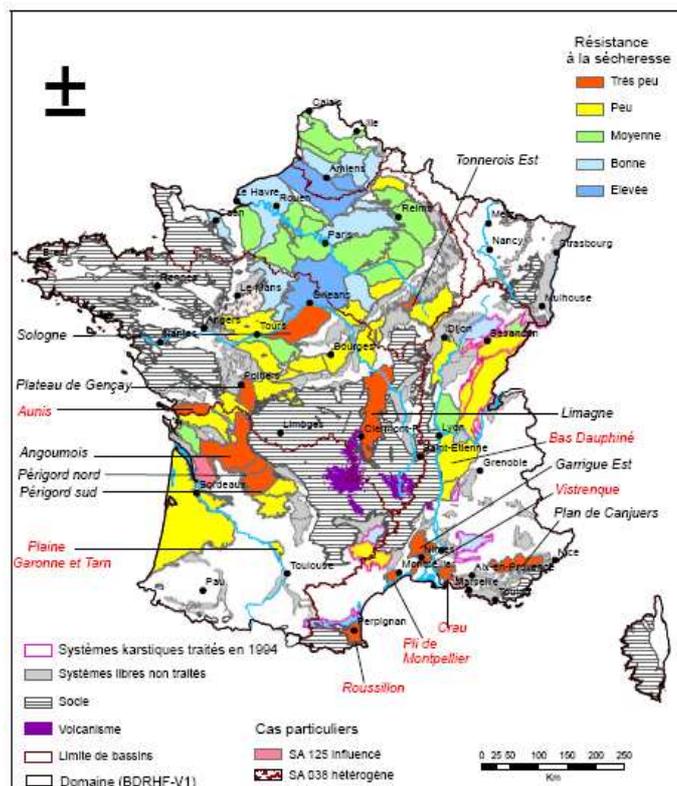
illustration 41 : Superficie des aquifères



Code	Système aquifère	IDPR	Code	Système aquifère	IDPR
001	Artois	456	044	Gatine	857
003	Ternois	324	048	Touraine	877
004	Ponthieu	202	049	Veron et plateau de Ste Maure	970
005	Cambresis	249	055	Plateau de Gençay	350
006	Hainaut-Vermandois	426	056	Montmorillonais	857
007	Santerre	191	057	Brenne	375
008	Picardie	189	058	Berry Ouest	530
009	Pays de Caux	154	059	Berry Est	515
010	Vexin Normand	293	064	Nivernais	489
011	Thelle	192	072	Tonnerois Est	265
012	Vexin français	497	077	Chatillonnais et plateau de L.	431
013	Paris-Valois-Tardenois-Soissonais	666	109	Civraisien	266
014	Soissonnais nord	897	112	Aunis	626
015	Thiérache	406	113	Charente Nord	541
016	Laonnois-Porcien	362	116	Saintonge	497
018	Champagne Nord	287	118	Angoumois	724
019	Champagne centre	282	119	Périgord Nord	560
020	Champagne sud	250	120	Périgord Sud	594
022	Brie	877	121	Salardais	369
024	Hurepoix	782	124	Bouriane	723
025	Beauce	225	126	Entre deux Mers	1000
026	Petite Beauce	824	127	Landes Aquitaine occidentale	942
027	Sologne	1000	130	Plaine Garonne et Tam	1341
028	Val-de-Seine	666	143	Pli de Montpellier	1004
029	Sénonais	220	146	Roussillon	1176
030	Othe	307	149	Garrigue Est	1000
031	Gatinois Est	450	150	Vistrenque	1000
032	Gatinois Sud	947	151	Dombes	948
034	Lieuvin Ouche	745	152	Bas-Dauphiné	948
035	Roumois Neubourg	277	154	Plaine de Valence	1000
036	Plaine de Saint André-Th.	543	157	Crau	820
037	Perche	946	167	Plan de Canjuers	1003
040	Bessin	471	174	Bresse-Chalonnaise	1000
041	Plaine de Caen	415	176	Limagne	1000

**illustration 42 : IDPR des systèmes aquifères**

### 3.4.3. RESULTATS : IRIS : INDICATEUR DE RESISTANCE INTRINSEQUE A LA SECHERESSE



Code	Système aquifère	IRIS	Code	Système aquifère	IRIS
027	Sologne	11	064	Nivernais	21
176	Limagne	12	109	Civraisien	21
112	Aunis	13	018	Champagne Nord	22
119	Périgord Nord	13	024	Hurepoix	22
143	Pli de Montpellier	13	048	Touraine	22
150	Vistrenque	13	151	Dombes	22
072	Tonnerois Est	14	029	Sénonais	23
146	Roussillon	14	022	Brie	24
120	Périgord Sud	14	034	Lieuvin Ouche	24
149	Garrigue Est	14	003	Ternois	25
055	Plateau de Gençay	15	010	Vexin Normand	25
167	Plan de Canjuers	15	012	Vexin français	25
118	Angoumois	16	016	Laonnois-Porcien	25
157	Crau	16	020	Champagne sud	25
028	Val-de-Seine	17	036	Plaine de Saint André – Th.	25
032	Gatinais Sud	17	116	Saintonge	25
077	Chatillonnais et plateau de L.	17	019	Champagne centre	26
049	Veron et plateau de Ste Maure	17	001	Artois	27
056	Montmorillonnais	17	011	Thelle	27
152	Bas-Dauphiné	18	037	Perche	28
044	Gatine	18	040	Bessin	29
130	Plaine Garonne et Tarn	18	006	Hainaut-Vermandois	30
058	Berry Ouest	19	041	Plaine de Caen	30
059	Berry Est	19	013	Paris-Valois-Tardenois-S.	31
113	Charente Nord	19	014	Soissonnais nord	31
124	Bouriane	19	031	Gatinais Est	31
126	Entre deux Mers	19	035	Roumois Neubourg	31
127	Landes Aquitaine occidentale	19	026	Petite Beauce	31
154	Plaine de Valence	19	004	Ponthieu	33
015	Thiérache	20	005	Cambresis	33
030	Othe	20	009	Pays de Caux	34
174	Bresse-Chalonnaise	20	007	Santerre	37
057	Brenne	20	008	Picardie	40
121	Salardais	20	025	Beauce	40

**illustration 43 : Classement des aquifères en fonction de IRIS**  
(en rouge les aquifères peu résistants)

Afin d'identifier les aquifères les plus sensibles, dans le cadre d'explores, nous avons reporté sur la carte des bassins versants « explore », une information qualitative (non actualisée : 2001) sur les

volumes de prélèvements redistribués au droit des aquifères traités.



Carte de résistance à la sécheresse de 80 systèmes aquifères libres et pression de prélèvements au droit de ces systèmes

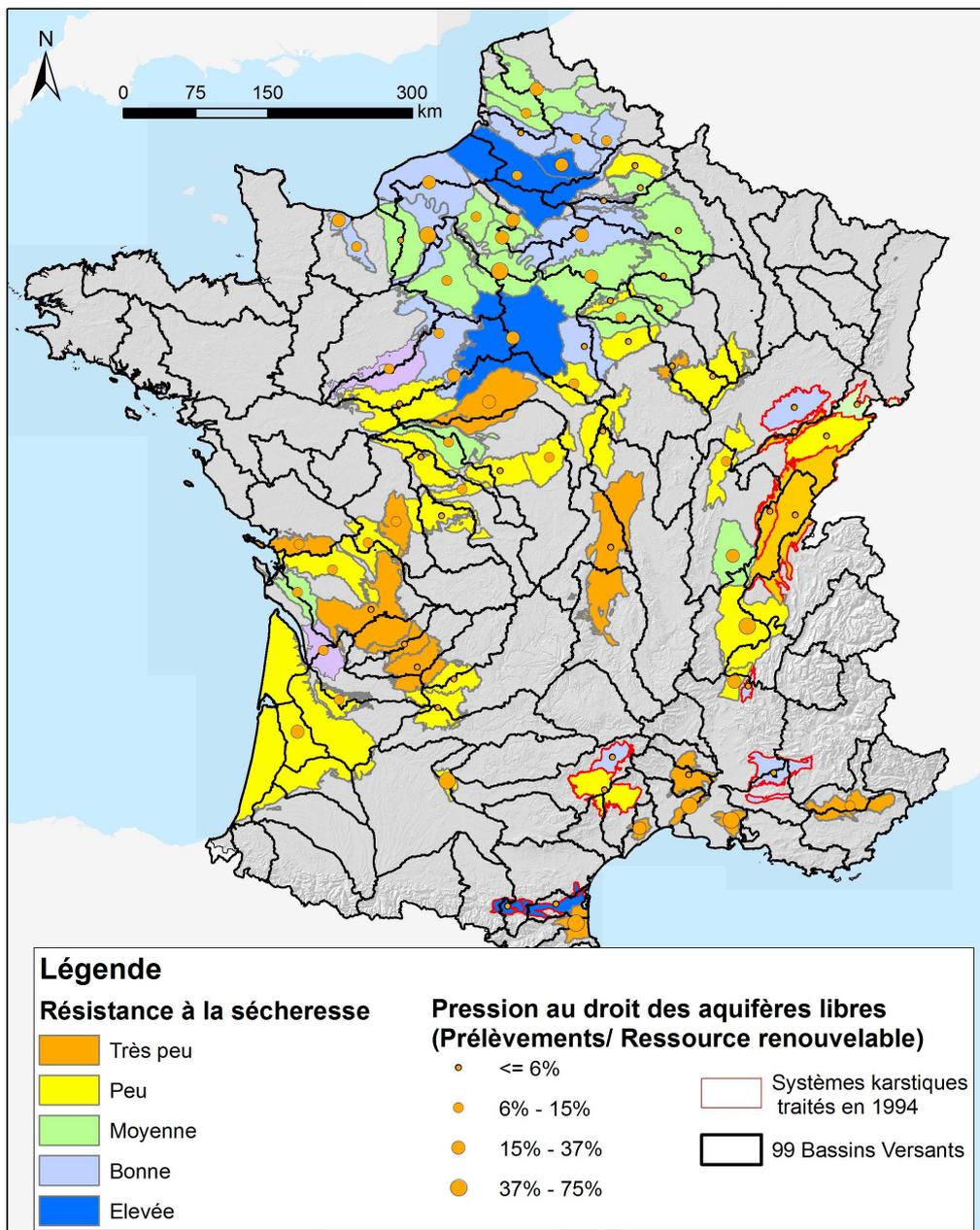


illustration 44 : carte de résistance à la sécheresse de 80 systèmes aquifères libres et pression des prélèvements au droit de ces systèmes

## **4. MODELISATIONS HYDRODYNAMIQUES DES AQUIFERES**

### **4.1. INTRODUCTION**

Les paragraphes suivants présentent les différents logiciels qui ont été utilisés au cours de cette étude ainsi que les principes généraux de modélisation.

Les différents modèles réalisés font l'objet de volumes séparés dans lesquels sont détaillés l'ensemble des opérations réalisées (construction, calage, exploitation...).

### **4.2. PRINCIPES GENERAUX DE MODELISATION**

#### **4.2.1. RAPPELS SUR LES PRINCIPES ET ETAPES DE LA MODELISATION**

##### *4.2.1.1. LES PRINCIPES*

Le principe de la modélisation consiste à reproduire une certaine réalité que l'on a pu mettre en équations pour ensuite faire des simulations ou des prévisions dans le temps. C'est le cas pour les modèles météorologiques, de prévisions des crues, de circulations océaniques... et également pour les modèles hydrogéologiques qui permettent de simuler les écoulements souterrains.

Dans le modèle présenté ici, le territoire est reproduit en trois dimensions en le découpant en portions unitaires (= mailles). Dans chaque maille différentes données sont introduites : une géométrie (topographie, profondeur d'une couche géologique), des caractéristiques hydrodynamiques (perméabilité et emmagasinement), éventuellement des flux entrants (infiltration de la pluie par exemple) ou sortant (prélèvements) etc.. Les variables spatio-temporelles calculées par le modèle (niveaux d'eau, débits entrant ou sortant,) sont comparées aux données acquises sur le terrain. Pour reproduire au mieux cette réalité, des paramètres (en particulier hydrodynamiques) du modèle doivent être ajustés (les valeurs initiales introduites étant des valeurs a priori destinées à initialiser le modèle), c'est la phase de calage. Une fois le calage jugé satisfaisant, le modèle peut être utilisé pour simuler l'impact sur une nappe de différents scénarios (climatiques, de prélèvements, ...).

##### *4.2.1.2. LES ETAPES*

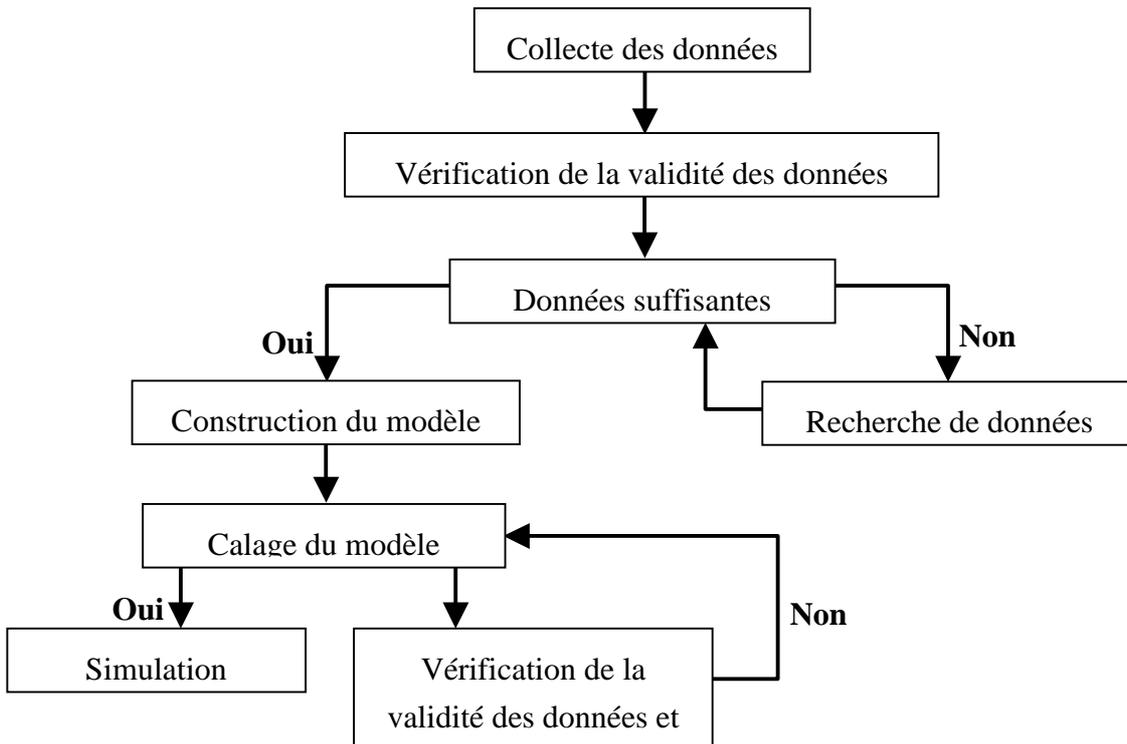
En premier lieu, il est nécessaire de définir précisément les objectifs du modèle.

Dans un second temps, un modèle conceptuel intégrant les éléments suivants est élaboré pour permettre de répondre aux questions posées :

- extension du modèle,

- nombre de couches,
- dimension du modèle : 1D, 2D (vertical ou horizontal), 3D,
- taille du maillage
- pas de temps (mensuel, décadaire, journalier ,...),
- ...

Une fois ces 2 premières phases réalisées, différentes étapes sont nécessaires à la modélisation (schéma synoptique en Illustration 45).



**Illustration 45 : Les étapes de la modélisation**

#### 4.2.1.2.1. Collecte des données

La construction d'un modèle hydrodynamique nécessite le recueil et la synthèse des données suivantes :

- Géologie : les données géologiques permettent de déterminer la géométrie des couches à modéliser à partir de la connaissance des toits et des murs des niveaux aquifères ou imperméables, issus de logs stratigraphiques, de l'analyse de diagraphies, de documents bibliographiques (thèse, rapport de bureaux d'études...),
- Hydrogéologie : caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère (perméabilité ou transmissivité, coefficient d'emmagasinement), piézométrie de la nappe en période de basses et de hautes eaux, conditions aux limites (niveaux, flux...),

- Hydrologie : réseau hydrographique (caractérisé par sa géométrie - largeur, longueur et profondeur - débits, niveaux...),
- Climatologie : la pluviométrie et l'évapotranspiration,
- Prélèvements : pour l'alimentation en eau potable (AEP), l'irrigation et autres (industrie, particuliers...).

La plupart du temps, une grande quantité de données est nécessaire et de nombreux organismes doivent être consultés, et ce souvent à plusieurs reprises, pour des compléments de données ou des précisions.

#### 4.2.1.2.2. La construction du modèle

Cette étape consiste à intégrer dans le logiciel de modélisation retenu les données qui vont permettre de construire différentes grilles du modèle : géométrie, conditions aux limites, recharge, propriétés hydrauliques...

#### 4.2.1.2.3. Le calage du modèle

Le but du calage consiste à reproduire les niveaux piézométriques observés. Cette étape est réalisée en ajustant au mieux les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère (perméabilité, emmagasinement) et dans le cas présent également les paramètres des cours d'eaux (perméabilité de colmatage des lits de rivières...).

Généralement le calage est réalisé en 2 phases afin de sérier les difficultés.

- 1<sup>ère</sup> étape: calage en régime permanent :

Les variables (données en entrée et variables calculées) ne dépendent pas du temps. Les niveaux calculés dans cette étape constituent l'état initial du régime transitoire qui va suivre, étape qui permet aussi de cerner le champ de perméabilité.

- 2<sup>ème</sup> étape : calage en régime transitoire :

Cette étape permet d'affiner le calage de l'ensemble des paramètres hydrodynamiques en restituant le plus précisément possible des chroniques piézométriques et/ou de débits de sources et de cours d'eau.

#### 4.2.1.2.4. Les simulations

Une fois le modèle calé, les phases de simulations de différents scénarios peuvent débiter.

#### 4.2.1.3. LE LOGICIEL MARTHE UTILISE POUR LA MODELISATION AU BRGM

Le code de calcul retenu dans le cadre des modélisations hydrodynamiques réalisées par le BRGM est MARTHE (**M**odélisation d'**A**quifères par un maillage **R**ectangulaire en régime **T**ransitoire pour le calcul **H**ydrodynamique des **E**coulements). Ce code, développé par le BRGM, utilise la méthode des différences finies et permet le calcul des écoulements de fluides et de transferts de masse et d'énergie en milieux poreux bidimensionnels (plan ou coupe verticale) et tridimensionnel [THIERY D. (2006)]. Les schémas peuvent être simples ou complexes (zone saturée et/ou non saturée, écoulements multiphasiques, prise en compte de la densité du fluide, prise en compte de la végétation, interaction entre cours d'eau et nappes, etc.) en régime permanent ou transitoire.

Il est également adapté à l'hydrogéologie urbaine ou karstique par sa possibilité de simuler des drains ou des canaux.

Le modèle tridimensionnel se présente sous la forme de grilles de calculs superposées avec un maillage parallélépipédique régulier ou irrégulier. Les cellules sont hydrauliquement connectées, le « motif de base » étant constitué par une cellule en relation avec les 6 mailles voisines (nord, sud, est, ouest, haut et bas). Dans chaque maille des valeurs sont entrées (cote des toits et des murs des couches, paramètres hydrodynamiques, conditions aux limites...) où sont calculés par le modèle (charge hydraulique).

L'interface graphique WinMarthe permet de préparer les données du code de calcul MARTHE. C'est donc un préprocesseur, puisqu'il peut être utilisé pour préparer, mettre en forme et contrôler les données numériques avant calculs. C'est également un post-processeur puisqu'il peut être utilisé, après la réalisation d'une simulation, pour visualiser les résultats obtenus sous forme de plages colorées, en plan ou en coupes verticales, ou sous forme d'iso valeurs. Il permet également l'exportation des résultats de calculs.

#### 4.2.1.4. PRINCIPE DU MODELE HYDROGEOLOGIQUE MODCOU UTILISE A ARMINES

Le logiciel MODCOU (Ledoux et al, 1989) permet de simuler de façon couplée les écoulements de surface et en nappes. Ce modèle utilise la méthode des différences finies sur des mailles carrées emboîtées pour la résolution des équations régissant les écoulements souterrains en milieu poreux. Les écoulements superficiels sont quant à eux simulés grâce à une modélisation paramétrique.

##### 4.2.1.4.1. Modélisation des écoulements souterrains en nappe

Les écoulements en nappe modélisés sont purement horizontaux (hypothèse de Dupuit) et sont donc régis par l'équation de diffusivité

$$\operatorname{div}(T \operatorname{grad} h) = Q + S \frac{\partial h}{\partial t}$$

Avec T la transmissivité du milieu poreux (m<sup>2</sup>/s), h la charge hydraulique (m), Q le débit surfacique prélevé (positif) ou injecté (négatif) (m/s) et S le coefficient d'emmagasinement (sans dimension). Cette équation est valable pour les nappes captives, ainsi que pour les nappes libres lorsque la variabilité spatiale de la charge hydraulique n'est pas trop importante.

La résolution de cette équation par la méthode des différences finies consiste en une discrétisation de ses différents termes grâce à un découpage du domaine modélisé en mailles carrées.

Chaque maille du modèle possède des propriétés hydrodynamiques homogènes (T et S) et les valeurs de la fonction charge hydraulique (h) sont calculées en chacune de ces mailles.

L'équation discrétisée pour la maille i s'écrit :

$$T_N(H_N - H_i) + T_E(H_E - H_i) + T_S(H_S - H_i) + T_W(H_W - H_i) = Q_i + a^2 S_i \frac{\partial H_i}{\partial t}$$

Avec TN, TE, TS et TW les transmissivités des mailles adjacentes à la maille i et situées respectivement au Nord, à l'Est, au Sud et à l'Ouest de celle-ci, HN, HE, HS et HW les cotes piézométriques dans ces mailles adjacentes, Hi la cote piézométrique dans la maille i, Qi le débit surfacique entrant ou sortant à la maille i, Si le coefficient d'emmagasinement de la maille i et a la longueur du côté de la maille i.

La résolution de cette équation discrétisée s'appuie sur la connaissance des conditions aux limites (débits ou potentiels imposés). On obtient alors la hauteur piézométrique en chaque maille du modèle.

##### 4.2.1.4.2. Modélisation des écoulements superficiels

En premier lieu, le réseau de drainage superficiel est déterminé grâce aux pentes locales, c'est-à-dire grâce aux différences d'altitude entre mailles de surface voisines. Un réseau hydrographique est déduit de ce schéma de drainage.

Chaque maille reçoit une certaine quantité d'eau déduite des données météorologiques (précipitations) à chaque pas de temps. Cette lame d'eau disponible au sol est répartie entre une lame d'eau évapo-transpirée et une lame d'eau disponible pour l'écoulement. Cette dernière est elle-

même répartition entre infiltration et ruissellement grâce à un modèle à réservoirs paramétré par les fonctions de production (illustration 46).

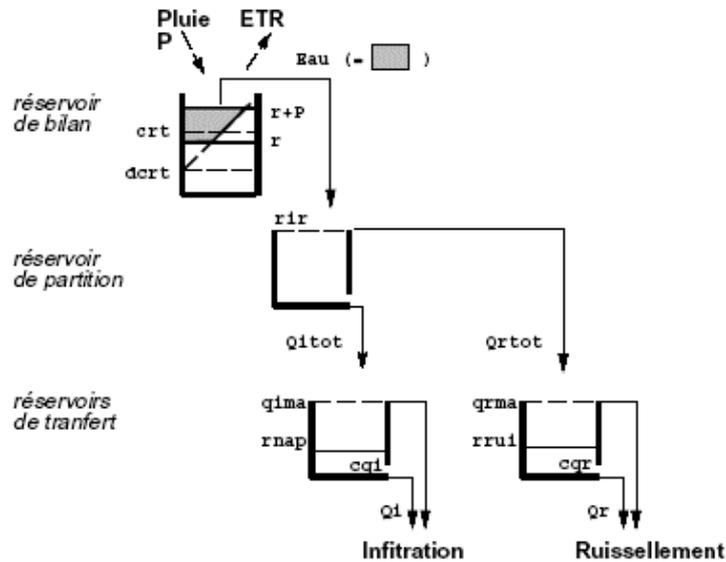


illustration 46: Schéma de fonctionnement du modèle à réservoirs.

Ce modèle à réservoir correspond à la représentation d'écoulements hortonien : les sols possèdent une certaine capacité d'infiltration qui lorsqu'elle est dépassée donne lieu à du ruissellement de surface.

En sortie de ce modèle on dispose pour chaque maille de surface de la lame d'eau ruisselée sur cette maille ainsi que de la lame d'eau infiltrée.

Les lames d'eau ruisselées sont transférées au réseau hydrographique par isochronisme (Golaz et al., 1998) : chaque zone isochrone d'un sous bassin est caractérisée par le temps que met la lame d'eau ruisselée sur cette zone pour atteindre la maille rivière exutoire du sous-bassin.

La lame d'eau ruisselée arrivant à la maille de rivière  $i$  au temps  $t$  est donnée par la formule :

$$Qr_i(t) = \sum_{k=0}^{K-1} \left( \sum_{j=1}^{N_k} qr_j(t - kdt) \right)$$

Où  $K$  est le nombre de zones isochrone du sous-bassin,  $N_k$  le nombre de mailles de la zone isochrone  $k$ , et  $qr_j(t-kdt)$  la lame d'eau ruisselée sur la maille  $j$  au temps  $t-kdt$  avec  $dt$  le pas de temps de calcul.

Le transfert des lames d'eau au sein du réseau hydrographique est assuré par un découpage en biefs de ce réseau. Chaque bief est constitué d'une zone isochrone, c'est-à-dire d'un ensemble de mailles rivières dont la lame d'eau va mettre le même temps à atteindre l'exutoire du bassin. A un instant donné, le volume d'eau s'écoulant d'un bief vers le bief aval est donné par l'expression  $x_{kb} \times V$  avec  $x_{kb}$  le coefficient de vidange du bief et  $V$  le volume d'eau contenu dans le bief.

Le volume d'eau dans un bief  $i$  au temps  $t+dt$  est donc égal au volume dans ce bief au temps  $t$  moins le volume vidangé entre  $t$  et  $t+dt$ , auquel il faut ajouter les volumes vidangés au niveau des biefs situés en amont direct de  $i$ . Ce volume est donné par la formule :

$$V_i(t + dt) = (1 - x_{kbi}) * (V_i(t) + Q_{ri}(t) + Q_{nap i}(t)) + \sum_{j=1}^N (x_{kbj} * (V_j(t) + Q_{rj}(t) + Q_{nap j}(t)))$$

Avec  $V_k(t)$  le volume d'eau contenu dans le bief  $k$  au temps  $t$ ,  $Q_{rk}(t)$  la lame d'eau ruisselée parvenant au bief  $k$  entre  $t$  et  $t+dt$ , et  $Q_{nap k}(t)$  la lame d'eau échangée avec le domaine souterrain sur le bief  $k$  entre  $t$  et  $t+dt$ .

#### 4.2.2. Echanges entre le domaine de surface et le domaine souterrain

Les échanges entre la surface et le souterrain ont lieu d'une part au niveau de toutes les mailles de surface connectées à une maille souterraine sous-jacente grâce au transfert des lames d'eau infiltrées de la surface vers le souterrain, et d'autre part au niveau des mailles rivières par la prise en compte des échanges nappe-rivière.

Ces échanges nappe-rivière peuvent s'effectuer dans les deux sens. Dans le cas où la nappe et la rivière sont connectées hydrauliquement, le débit passant de l'une à l'autre est :

$$Q = \max(T_p * (H - H_0), Q_{riv}, Q_{lim})$$

Avec  $H$  la cote piézométrique dans la nappe,  $H_0$  le niveau de l'eau dans la rivière, et  $T_p$  le coefficient de transfert nappe-rivière dépendant de la nature et de l'état du lit. Lorsque la nappe est alimentée par la rivière ( $H < H_0$ ), le débit est alors négatif, est limité à la fois par le débit disponible en rivière ( $Q_{riv}$ ), et le débit limite associé à la conductivité hydraulique du lit ( $Q_{lim}$ ).

Dans le cas où la nappe et la rivière sont déconnectées hydrauliquement (niveau de la nappe inférieur à la cote du fond du lit de la rivière), le débit s'infiltrant dans le lit de la rivière est égal au débit limite  $Q_0$  pouvant s'infiltrer (illustration 47).

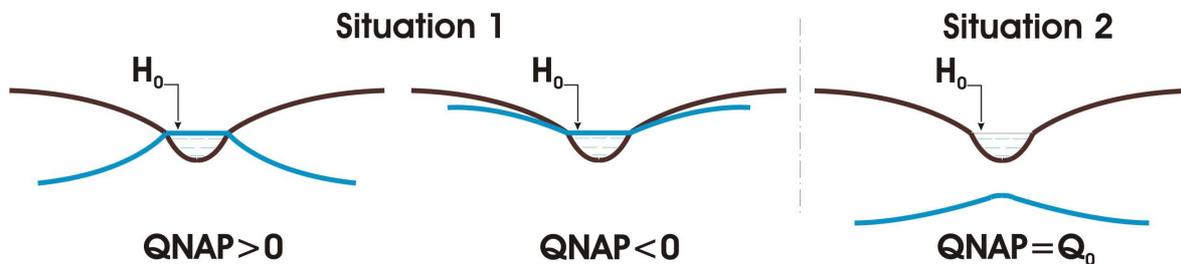
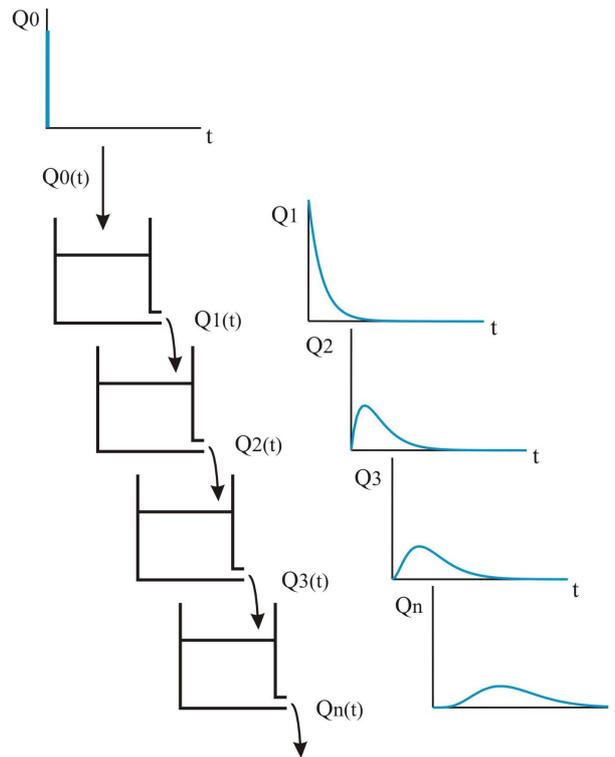


illustration 47 : Différents cas d'échanges hydrauliques entre nappe et rivière.

Dans tous les cas le débit échangé est limité par la capacité d'infiltration du lit de la rivière, ainsi que par le volume d'eau disponible dans la maille rivière.

##### 4.2.2.1.1. Transfert des lames d'eau infiltrées dans la zone non saturée

Un module supplémentaire peut être utilisé lors de la modélisation dans le cas où des épaisseurs de zone non saturée non négligeables existent. Ce module NONSAT utilise en entrée les données d'infiltration calculées par le module de surface, et leur applique un modèle en cascade de Nash qui introduit un retard à l'arrivée de ces lames d'eau dans la nappe (illustration 48).



**illustration 48 : Principe du modèle en cascade de Nash.**

Ce modèle utilise pour chaque maille où se produit l'infiltration deux paramètres : le nombre de réservoirs  $N$  et le temps de délai de ces réservoirs  $T$ .

Le débit en sortie du  $N$ ième réservoir au temps  $t$  résultant d'un débit d'infiltration  $dQ$  dans le premier réservoir au temps  $\tau$  inférieur à  $t$  est donné par la formule :

$$Q_N(t) = \frac{dQ(\tau)}{\tau * (N-1)!} * \exp\left(-\frac{t-\tau}{T}\right) * \left(\frac{t-\tau}{T}\right)^{N-1}$$

Le nombre de réservoirs utilisés est fonction de l'épaisseur de la zone non saturée, et le temps de délai dépend de la nature lithologique de la zone non saturée.

En sortie de ce module on dispose d'un fichier d'entrée MODCOU contenant les lames d'eau ruisselées inchangées et les lames d'eau infiltrées parvenant au domaine souterrain saturé à chaque pas de temps prenant en compte le transfert en domaine non saturé.

## 5. MODELISATIONS GLOBALES

### 5.1. INTRODUCTION

Dans le socle, le karst et les zones fortement plissées, ainsi que pour les aquifères alluviaux d'extension limitée il est possible de quantifier l'impact du changement climatique sur les niveaux piézométriques et sur les débits des cours d'eau au moyen de modélisations globales pluie-débit-niveau piézométrique avec des logiciels tels que GARDENIA ou TEMPO du BRGM. Ces modélisations nécessitent beaucoup moins de données et de temps de construction du modèle et sont, de ce fait particulièrement utiles dans le cadre d'études ayant des délais relativement courts.

Cette démarche a déjà été réalisée par le groupement sur de nombreux bassins versants. Par exemple dans la Somme, l'illustration 49 présente les niveaux actuels (bleu, période 1985-2005) et les niveaux simulés de la période 2070-2100 avec le scénario A2 sur le piézomètre de Morvilliers.

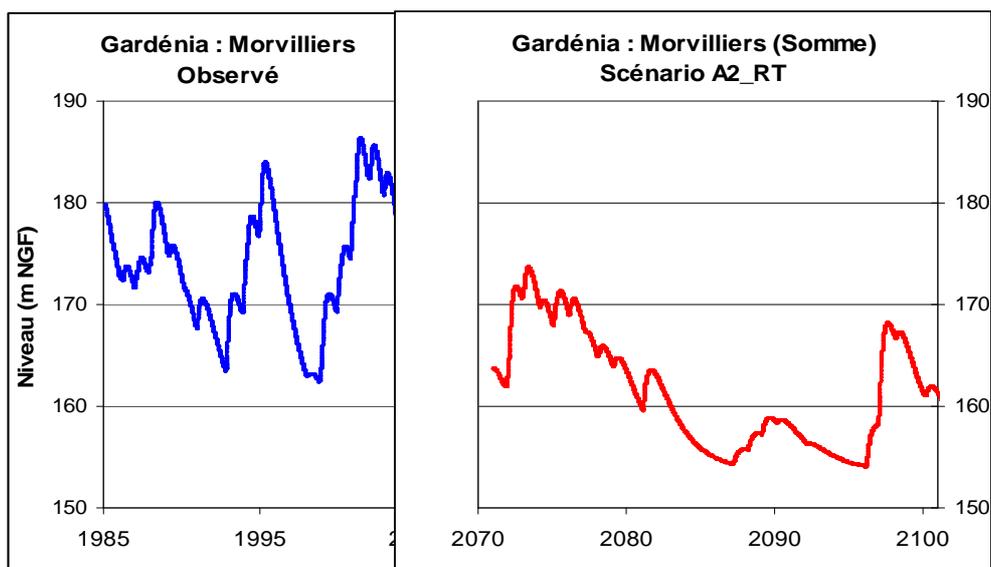
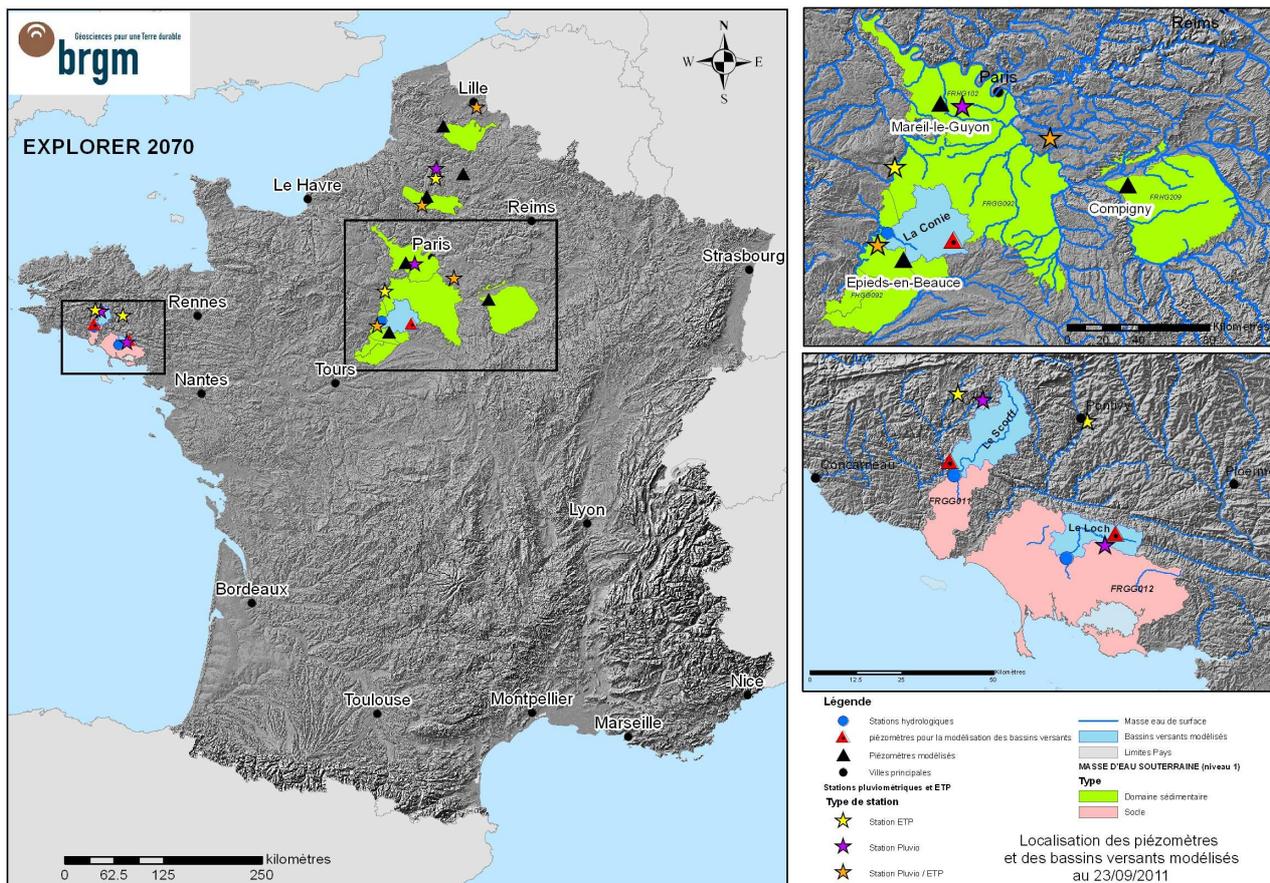


illustration 49 : Impact du changement climatique sur le piézomètre de Morvilliers

Par ailleurs dans le cadre de projets de recherches ou d'étude de service public, de nombreuses modélisations ont été réalisées avec les logiciels TEMPO ou GARDENIA du BRGM.

Plusieurs modélisations GARDENIA sur des bassins versants de Bretagne (socle) et/ou du massif central (volcanisme) ont été réalisées.



**Illustration 50 : Localisation des modélisations globales les plus récentes réalisées par le groupement**

Actuellement, le suivi des Débits Objectifs d’Etiage s’effectue par le biais de prévisions de niveaux piézométriques sur un certain nombre d’indicateurs de niveau des nappes. Pour illustrer les impacts du changement climatique sur ces indicateurs et vérifier la cohérence des résultats entre modèle global et modèle hydrodynamique, nous avons proposé de réaliser des modélisations globales sur quelques-uns de ces indicateurs (indicateur de Beauce, des Yvelines, .....). Enfin une modélisation TEMPO a été réalisée sur le bassin versant karstique du lez (cf. volume ).

## **5.2. MODELISATIONS GARDENIA DE DIFFERENTS BASSINS VERSANTS.**

### **5.2.1. OBJECTIF**

Plusieurs modélisations globales ont été réalisées à l’aide du logiciel GARDENIA du BRGM sur des petits bassins versants. Le but de ces modélisations étaient de :

- Quantifier la baisse des débits temps futurs sur des entités géologiques différentes (socles,..)

- Montrer l'impact du changement climatique sur des niveaux piézométriques actuellement utilisés comme indicateur,
- Vérifier la cohérence des résultats entre modèle global et modèle hydrodynamique.

## 5.2.2. RESULTATS DES MODELISATIONS

### 5.2.2.1. BASSIN VERSANT DU SCORFF

Ce bassin versant se situe en Bretagne sud et appartient au domaine du « socle ». L'illustration 52 fournit les graphiques de calage pluie débit niveau piézométrique sur la période 1996/2007. La simulation ne prend pas en considération d'éventuel pompage. L'ensemble des résultats figure sur la fiche ci jointe illustration 53. Le tableau (illustration 51) résume les principales variations des termes du bilan.

Variation entre 1961-90 et 2045-2065		
	Mini	Maxi
Pluie efficace	-34.5%	-8.0%
Recharge	-26.4%	-6.5%
Débit min. mensuel	-61.6%	-17.6%

illustration 51 : Variations des principaux termes du bilan du Scorff à Plouay

### 5.2.2.2. BASSIN VERSANT DE L'AVRE

Ce bassin versant se situe dans la Somme, et l'Avre est un affluent de la Somme.. L'illustration 55 fournit les graphiques de calage pluie débit niveau piézométrique sur la période 1987/2006 (graphiques du haut). Les graphiques du milieu montrent l'impact des prélèvements sur la piézométrie et les débits mesurés à la station pour la période de calage: Pour le période 2046-2065, les prélèvements ont été gardé égaux à ceux fournir pour l'année 2007 c'est-à-dire en moyenne de  $0.58 \text{ m}^3/\text{s}$  sur l'année soit  $18,2 \text{ Mm}^3$  ou l'équivalent de 28 mm de lame ruisselée. Les niveaux et débits prévisionnels sur la période 2045/2065 figurent sur le bas de l'illustration 55 . L'ensemble des résultats en prévision figurent sur (illustration 56). On notera la forte baisse tant au niveau débit minimum (environ 61%) que recharge et niveau (environ 3 m) qui s'explique toutefois par le maintien des pompages à valeur constante. La baisse réelle (hors prélèvements) ramène les taux de baisse du débit minimum au voisinage de 50%.

Modélisation globale : BV SCORFF (29) superficie : 300 Km<sup>2</sup>  
 Masse d'eau : 4011 Pas de temps : décadaire période de calage : 1996-2008

	Pluviométrique	Climatologique (ETP)	Piézométrique	Hydrométrique
Station	Ploerdut	Plouray	Guilligovarch	Plouay

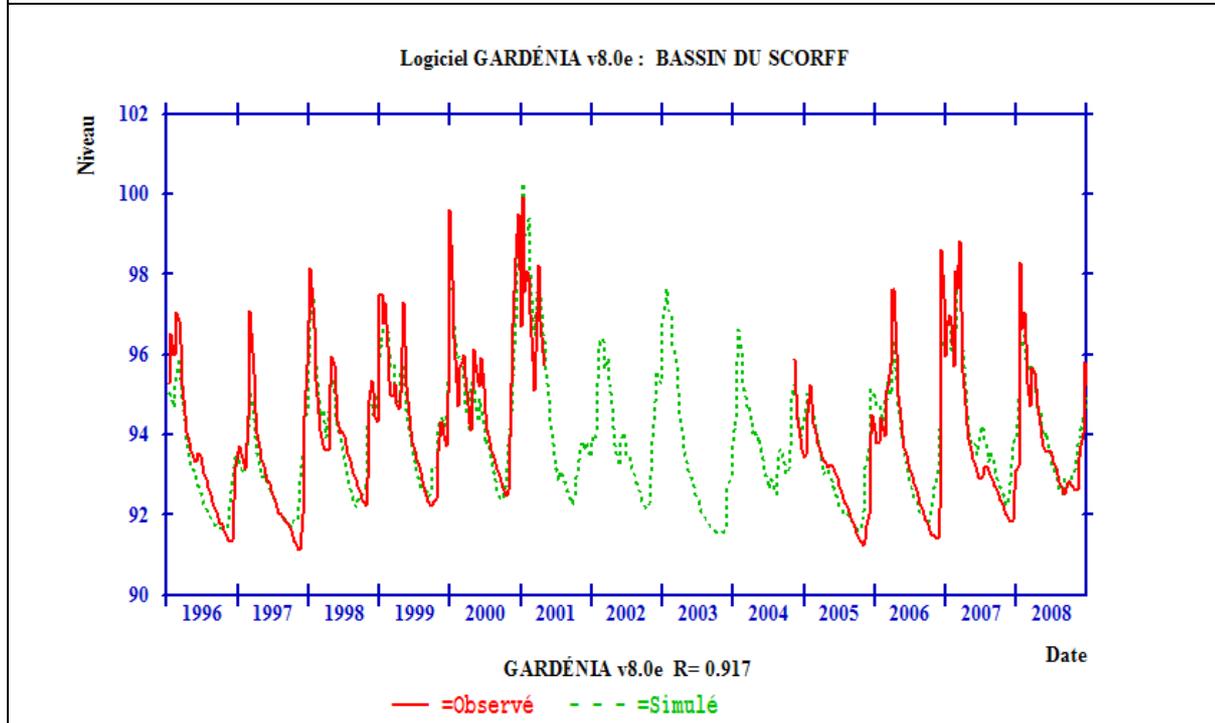
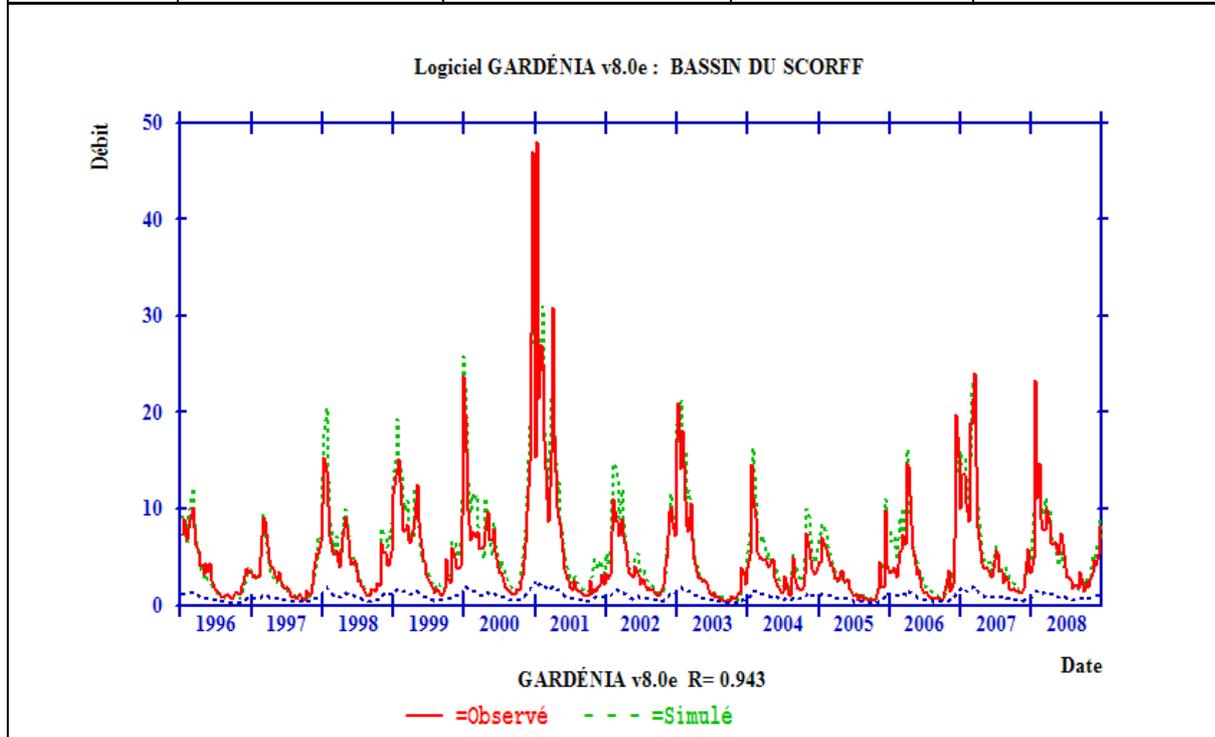


illustration 52: Modélisation globale du BV du Scorff : calage de la modélisation

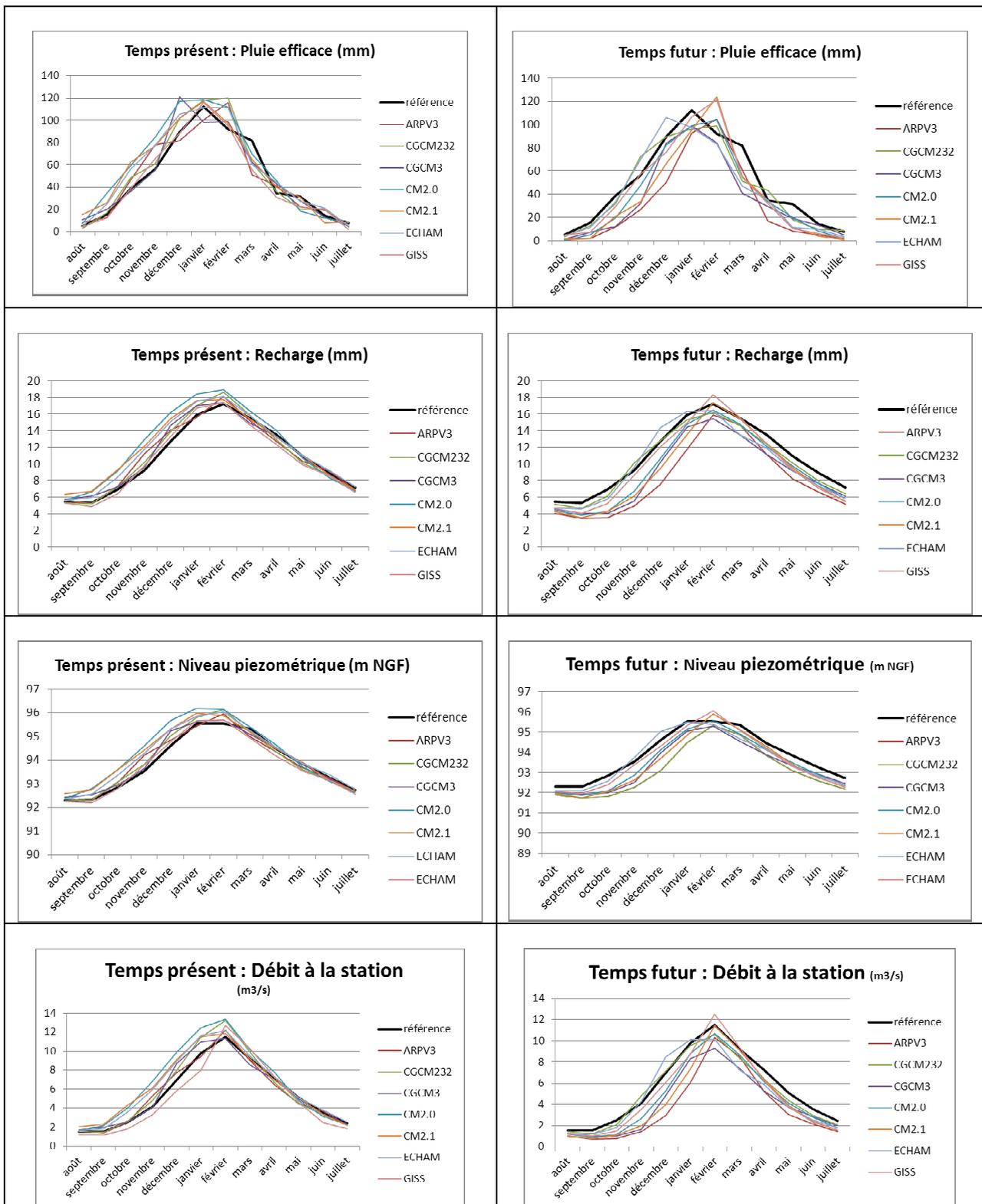


illustration 53 : Modélisation globale du BV du Scorff : comparaison Etat Présent / Etat Futur

### 5.2.2.3. BASSIN DE LA CONIE

Ce bassin versant se situe en Beauce, et la Conie est un affluent du Loir. Ce bassin est un peu particulier dans la mesure où le bassin hydrogéologique est nettement supérieur au bassin hydrologique et où il se produit des échanges interbassins non mesurés. Le piézomètre utilisé est d'ailleurs un indicateur réalisé à partir de 5 piézomètres. L'illustration 57 fournit les graphiques de calage pluie débit niveau piézométrique sur la période 1996/2007 (graphiques du haut) et la validation sur la période 1976-2007 (graphiques médians). Sur ces graphiques de débit sont indiqués une décomposition plausible des débits (débits lents: bleu foncé et très lents: rose). Les graphiques du bas montrent les valeurs de prélèvements sur la période 1976-2007 ainsi que les variations de niveau piézométrique sur la période 1976-2045: Pour la période 2046-2065, les prélèvements ont été gardé égaux à ceux fournis pour l'année 2007 c'est-à-dire en moyenne de 0.53 m<sup>3</sup>/s sur l'année soit 16,6 Mm<sup>3</sup> ou l'équivalent de 20 mm de lame ruisselée. L'ensemble des résultats en prévision figurent sur (illustration 58). Le tableau (illustration 54) résume les principales variations des termes du bilan. On notera la très forte baisse tant au niveau débit que recharge qui s'explique toutefois par le maintien des pompages à valeur constante. La baisse réelle (hors prélèvements) ramène les taux de baisse de la recharge moyenne au voisinage de 50%.

	Recharge	débit	
		moyen	minimum
moyenne	-62%	-81%	-97%
mini	-74%	-90%	-100%
maxi	-46%	-74%	-92%

**illustration 54 : Variations des principaux termes du bilan de la Conie à Conie Molitard (pompages maintenus).**

Modélisation globale : BV AVRE (80) superficie : 642 Km<sup>2</sup>  
 Masse d'eau : 4011 Pas de temps : mensuel période de calage : 1987-2006

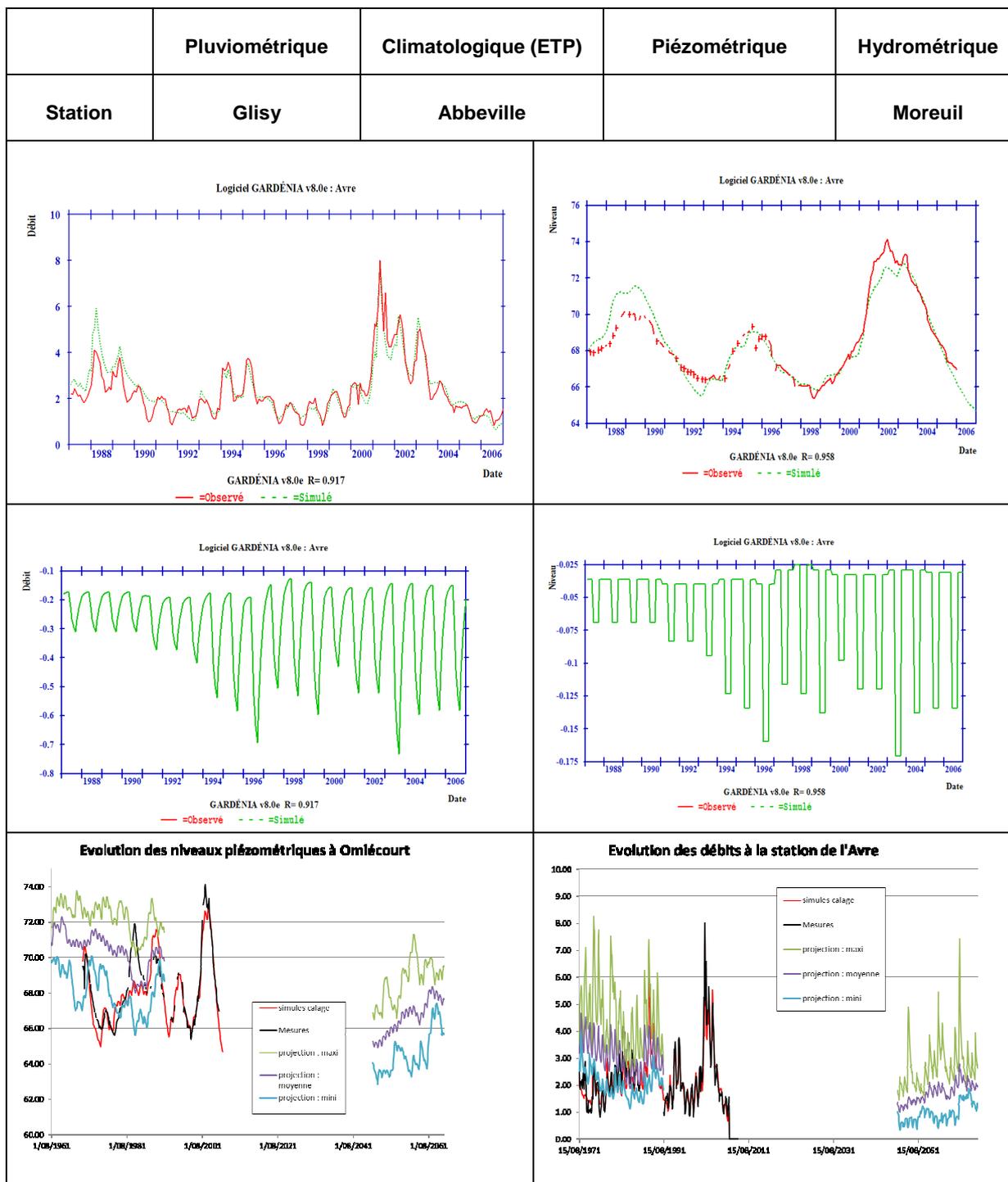
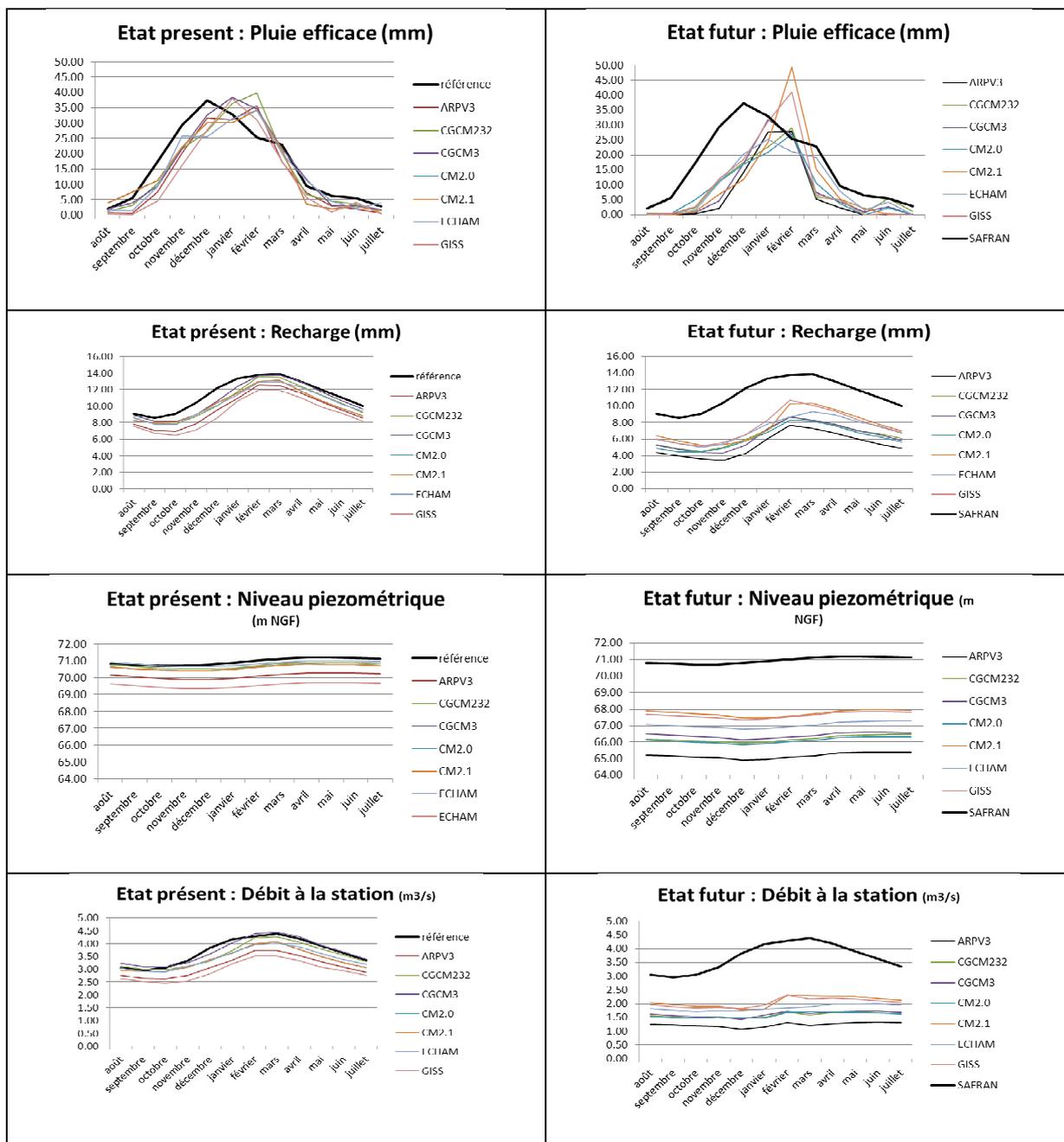


illustration 55 : Modélisation globale du BV de l'Avre : calage de la modélisation et évolution des niveaux piézométriques et des débits



Variation entre 1961-90 et 2045-2065		
	Mini	Maxi
Pluie efficace	-49.6%	-8.0%
Recharge	-44.7%	-6.5%
Débit min. mensuel	-61.6%	-17.6%

illustration 56 : Modélisation globale du BV de l'Avre : comparaison Etat Présent / Etat Futur

## Modélisation globale : BV CONIE (41) superficie : 850 Km<sup>2</sup>

Masse d'eau : 4092

Pas de temps : décadaire

Prélèvements : 1977- 2007

période de calage : 1996/2007 validation : 1976/2007

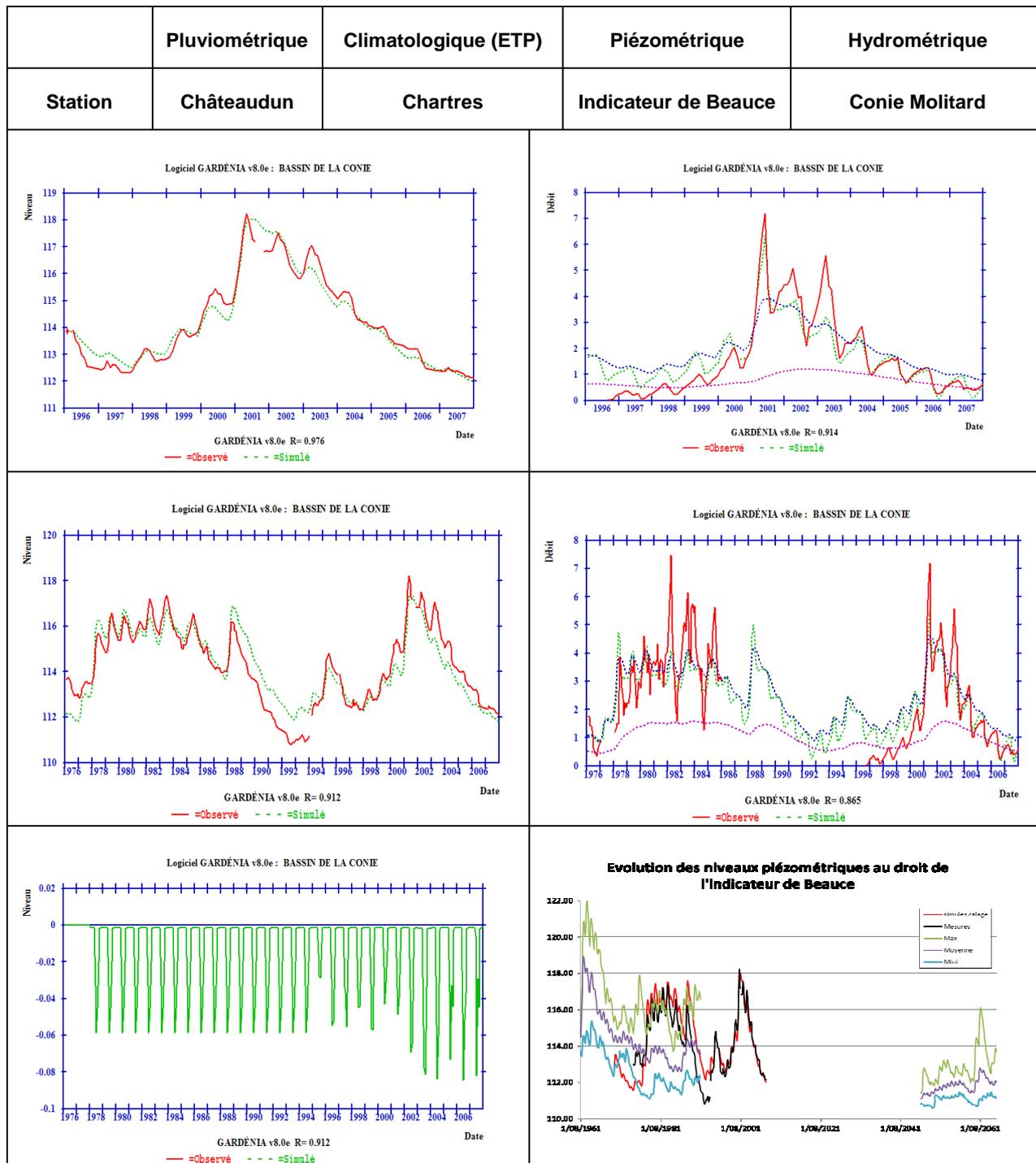


illustration 57 : Modélisation globale du BV de la Conie : calage de la modélisation et évolution des niveaux piézométriques

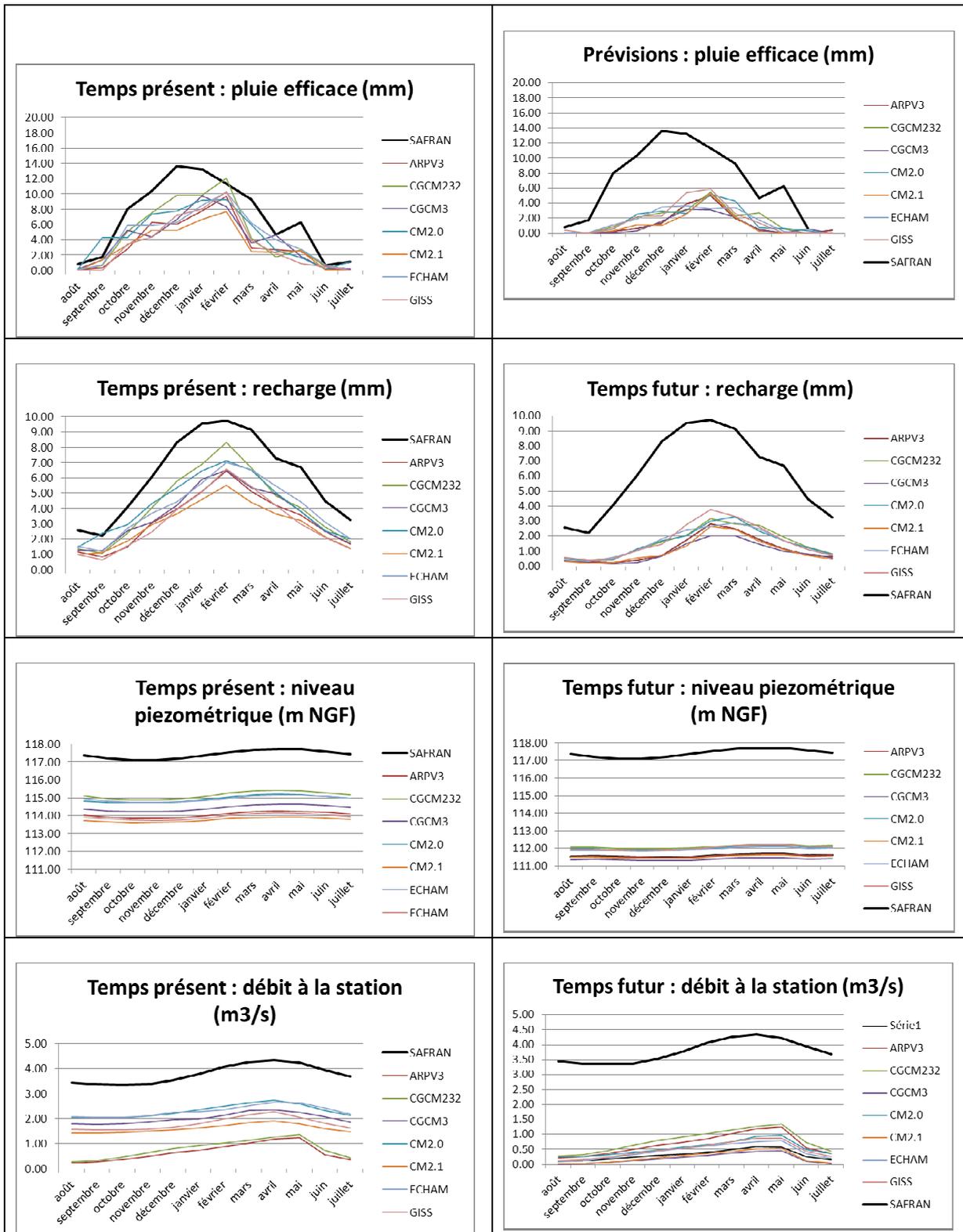


illustration 58 : Modélisation globale du BV de la Conie : comparaison Etat Présent / Etat Futur

#### 5.2.2.4. AUTRES MODELISATIONS

Il s'agit ici de la modélisation de 4 séries piézométriques situées dans le bassin parisien (3) et dans le Pas de Calais (1). L'illustration 59 présente les principaux résultats de ces modélisations.

	Indicateur 78		Compigny		Mareuil Le Guyon (78)		Tincques (62)	
	Mini	Maxi	Mini	Maxi	Mini	Maxi	Mini	Maxi
Pluie efficace %	-64.7%	-8.0%	-31.0%	-8.0%	-69.9%	-8.0%	-64%	-12.4%
Recharge %	-51.6%	-6.5%	-24.4%	-6.5%	-50.1%	-6.5%	-63.9%	-12.4%
Niveau Piézométrique (m)	-6.0	-2.7	-1.5	-1.0	-1.5	-0.2	-6.23	-1.4

**illustration 59 : Principaux résultats des modélisations de quatre séries piézométriques : écarts état présent/ état futur**

### **5.3. BASSIN VERSANT DE LA LOIRE**

#### **5.3.1. INTRODUCTION**

Une étude, Impact du Changement Climatique sur l'Hydrosystème Loire, regroupant de nombreux organismes (Université de Tours, UMR Sisyphe, Cemagref et BRGM avec la collaboration du CERFACS) a été réalisée en 2009-2010. Ce projet, ICC-HYDROQUAL, avait pour objectif de quantifier l'impact du changement climatique sur l'hydrologie le régime thermique et la biogéochimie de la Loire en considérant un scénario de gaz à effet de serre (A1B) pour 15 modèles climatiques utilisés dans le 4<sup>e</sup> rapport du GIEC et pour le modèle Arpege, les scénarii de gaz à effet de serre A1B, A2 et B1. (Le scénario A1B étant le plus critique pour la période 2046-2065 et le scénario A2 l'étant pour la période 2070-2100).

Aucun modèle hydrodynamique calé n'existant sur le bassin versant de la Loire, il nous a paru nécessaire d'intégrer la partie des résultats en hydrologie réalisée par le BRGM dans le cadre d'Explore2070.

#### **5.3.2. MODELISATIONS REALISEES**

Les modélisations hydrologiques du BRGM ont été réalisées au moyen du logiciel semi-distribué

EROS, constitué à la base de modélisation GARDENIA en grappe. Elles ont portées sur 68 sous bassins versants de la Loire. En plus de la totalité des données des stations hydrométriques existantes, les données de 27 piézomètres ont été utilisées pour la réalisation du calage qui a été réalisé sur la période 1970-1992. La période 1992-2007 a été ensuite utilisée pour validation.

### **5.3.3. RESULTATS OBTENUS**

#### *5.3.3.1. NIVEAUX PIEZOMETRIQUES*

Les graphiques suivant, présentés à titre d'exemple, permettent de constater une augmentation quasi régulière de la profondeur de la nappe à Foecy et à Tours (**illustration 60**). Elle fournit également, pour le piézomètre de Tours ; la valeur moyenne annuelle de la profondeur pour les 3 scénarii de Gaz à effet de serre.

En se cantonnant à l'observation de la période 2045-2065, on constate une augmentation régulière de la profondeur de la nappe avec des niveaux maxima équivalents pour les scénarii A1B et A2.

L'ensemble des 27 piézomètres, des masses d'eau de niveau 1, ont un comportement identique avec une augmentation de la profondeur dépendant principalement de la distance et altitude par rapport au cours d'eau.

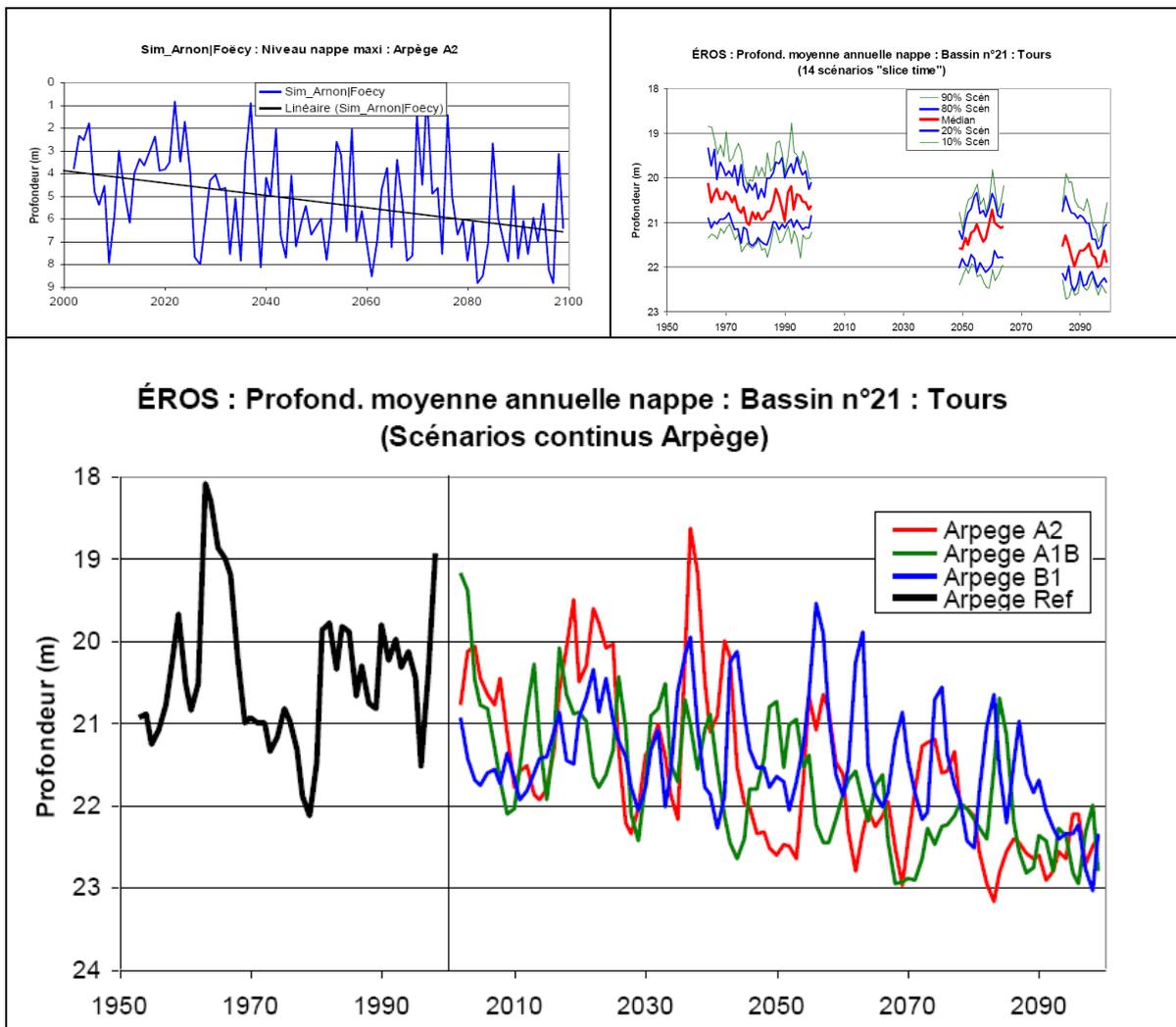


illustration 60 : Exemples de variation de niveaux piézométriques des nappes libres à proximité de Tours

Les niveaux piézométriques minima baissent, suivant la localisation du piézomètre, de -0.25 (vallées) à -8.5m (contrefort) avec une valeur moyenne de -1,8 m.

### 5.3.3.2. DEBITS MOYENS ANNUELS

Les débits moyens annuels temps présents obtenus ont été comparés aux débits moyens annuels du lot 3 (GR4) et se sont avérés très proches voire identiques au droit des 16 bassins versants « Explore » du bassin de la Loire.

Les baisses maximales simulées de débits (temps futurs) aux droits des différents bassins versants Explore de la Loire sont, par contre, moins importantes que celles fournis par le lot3 (GR4). Elles semblent plutôt voisines de celles obtenues par le lot 3 avec MODCOU.

	EROS	GR4
moyenne	-28.0	-40.5
minima	-40.1	-61.3
maxima	-19.4	-29.8

illustration 61 : Diminution maximale des débits aux droits des différents bassins versants  
« explore » de la Loire

L'ensemble des résultats obtenus au droit de ces bassins versants seront utilisés lors de l'analyse réalisée sur l'ensemble du territoire métropolitain.

## **6. RESULTATS DES MODELISATIONS HYDRODYNAMIQUES**

### **6.1. INTRODUCTION**

Les modélisations hydrodynamiques des aquifères (Bassin Parisien, bassin Aquitain, Poitou Charente Somme, Grande Terre en Guadeloupe) ainsi que la modélisation globale du Lez font l'objet de volumes séparés. Dans ce volume, à part quelques graphiques, seules les grandes lignes et les conclusions seront rappelées afin de fournir des éléments à la réalisation du chapitre 7. Pour plus de détail concernant ces modélisations, on se reportera aux volumes spécifiques ayant trait à chacune des modélisations réalisées : -

- des deux grands bassins sédimentaires
  - bassin parisien : volume 3
  - bassin aquitain : volume 4
- des aquifères du Jurassique de la région Poitou Charente : volume 5
- de l'aquifère alluvial de la plaine d'Alsace : volume 2
- de l'aquifère crayeux de la Somme : volume 6
- de l'aquifère calcaire de Grande Terre en Guadeloupe : volume 7 – DROM
- de la modélisation globale TEMPO du bassin Karstique du Lez : volume 8.

### **6.2. IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE**

#### **6.2.1. INTRODUCTION**

Les données d'évolution des prélèvements ont été fournies par le BIPE sous la forme de valeurs de volumes prélevés globaux, pour 2006 et pour deux scénarii différents pour 2070, par grandes unités hydrographiques, pour chaque utilisation de l'eau (AEP, Irrigation, Industrie,...), pour les eaux souterraines et de surface.

Les données 2006 du BIPE, issues d'une extraction de la base des Agences de l'Eau sous forme de données annuelles et sans information exhaustive sur la localisation et l'aquifère capté, ont été généralement abandonnées au profit de la base de données incluse dans le modèle existant.

Pour la première étape, étude des conséquences du changement climatique sur les cours d'eau et

nappes, les prélèvements ont donc été considérés comme constants sur les simulations temps présent et prospectives en prenant les valeurs intégrées déjà dans le modèle, il s'agissait la plupart du temps des données de l'année 2006.

## **6.2.2. BAISSÉ DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES**

### *6.2.2.1. BASSIN PARISIEN*

L'impact sur la piézométrie du bassin est sensible (illustration 62), toujours en liaison directe avec la diminution de la recharge par les eaux météoriques, notamment sur les grandes zones de plateaux (pays de Caux, plaine de Beauce) où la piézométrie est peu contrainte par un réseau hydrographique dense. Selon les scénarios, cette baisse peut localement dépasser 10 mètres. Pour la nappe de la craie, la baisse varie de 0, près des cours d'eau, à environ 7 m sur les plateaux avec un maximum d'environ 10 m en Normandie.

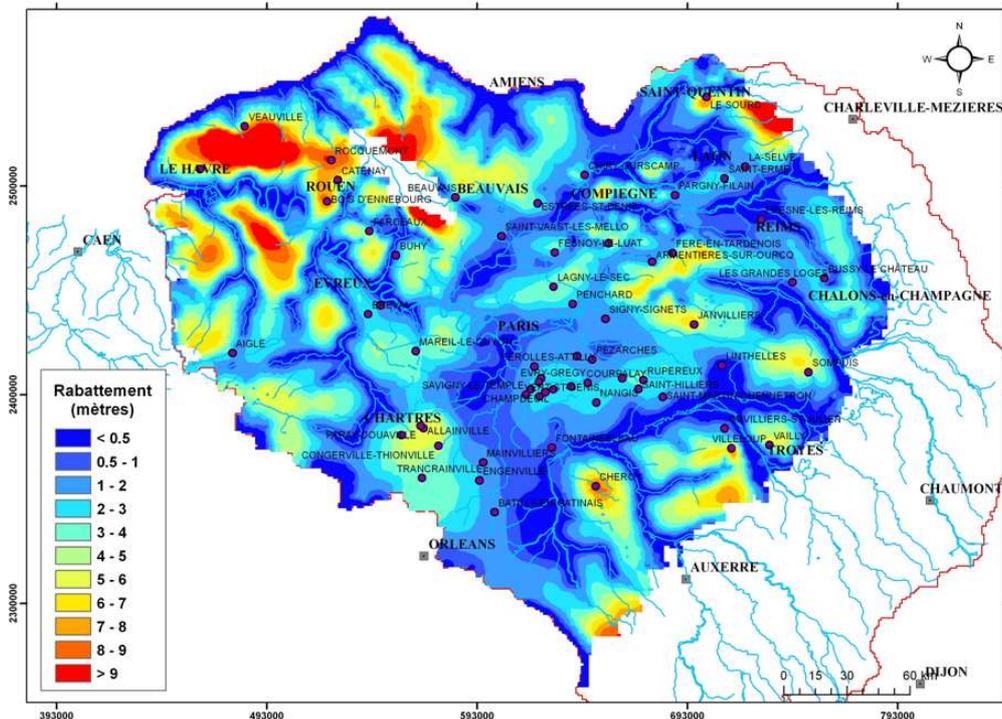
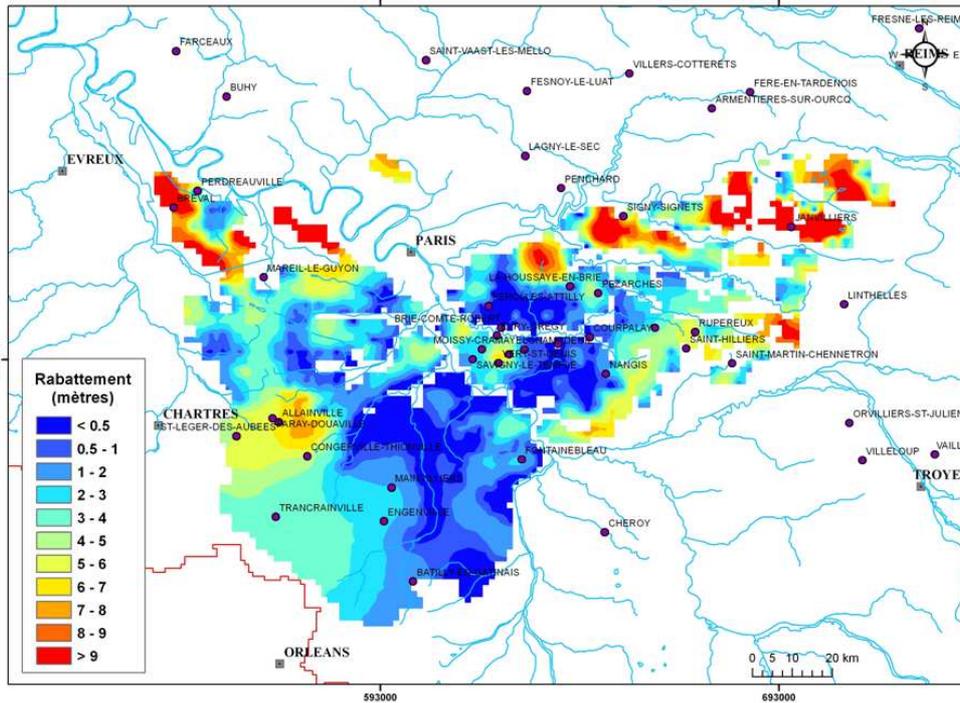
### *6.2.2.2. PLAINE D'ALSACE*

Pour la plupart des piézomètres, les projections indiquent de façon homogène une tendance à la baisse. En effet les niveaux simulés diminuent très légèrement, avec une baisse inférieure à 0.7 m en futur proche. Les niveaux simulés diminuent un peu plus fortement dans la partie Sud de l'aquifère, au Sud de Colmar, les diminutions les plus fortes se trouvant à l'extrémité Sud-Ouest de l'aquifère. Or on a vu que l'infiltration des rivières est très importante dans cette zone, mais aussi que les niveaux piézométriques simulés à l'actuel sont nettement sous-estimés. On peut donc penser que certains processus sont mal pris en compte par le modèle dans cette zone.

D'une manière générale on peut estimer que dans les parties basses de la plaine, il n'y aura pas d'influence sur les niveaux piézométriques mais que ceux-ci se produiront sur les contreforts.

### *6.2.2.3. POITOU CHARENTE*

L'illustration 63 fait apparaître la différence de la moyenne interannuelle de la surface piézométrique pour la simulation la plus pessimiste MRI-CGCM 2.3.2 pour le jurassique supérieur et le Dogger. La baisse des niveaux piézométriques est importante sur les zones de plateaux et assez faible dans les vallées (en général - 0,5 à -1 mètre mais avec des conséquences sur le débit des rivières). Pour le Jurassique supérieur et sur les zones hautes, cette baisse pourrait atteindre -8 à -10 mètres. Pour le Dogger, la baisse sur certains secteurs affleurant serait supérieure à -4 à -5 mètres. Enfin, pour l'Infra-Toarcien et sur les secteurs d'affleurement situés sur les plateaux la baisse serait du même ordre que pour le Dogger. Pour les zones captives des nappes du Dogger et de l'Infra-Toarcien, cette diminution est de plus en plus faible au fur et à mesure que l'on s'éloigne des



**illustration 62 : Bassin Parisien : Calcaire de Beauce (en haut) et Craie (en bas) - baisse du niveau moyen de la nappe sur la période 2046-2065(moyenne des sept modèles de climat) par rapport à la période de référence (1961-1990)**

secteurs d'affleurement.

Pour la simulation la plus optimiste GFDL-CM2.1, on obtient des niveaux légèrement inférieurs à la référence dans certains secteurs (-0,5 m en moyenne) mais également des niveaux plus hauts dans la zone centrale modélisée (0 à +0,5 m) et ce quelles que soient les nappes.

La variabilité des résultats sur la piézométrie est donc importante en fonction des données météorologiques générées par les différents modèles climatiques pour un même scénario de changement du climat.

#### 6.2.2.4. BASSIN AQUITAIN

L'analyse des cartes de différences piézométriques appuyée par celle des chroniques, révèle que dans le cas des modèles climatiques plus optimistes (cas du modèle GFDL-CM2.1, cf. illustration 64), une légère augmentation des niveaux piézométriques, pouvant atteindre 4 m, s'opère pour chaque nappe sur une large bande à proximité de la façade atlantique. Sur le reste du bassin, une baisse très modérée (inférieure à 2 m) de l'ensemble des nappes est observée.

Le modèle MRI-CGCM2.3.2 étant celui qui prévoit les plus fortes baisses de la recharge sur les zones d'affleurement des aquifères étudiés, c'est lui qui génère les plus fortes baisses piézométriques, plus de 10 m pour la nappe de l'Eocène moyen sur les bordures septentrionales et orientales du bassin et les zones de drainage entre aquifères, notamment entre le Miocène et l'Oligocène au centre et au sud-ouest du domaine modélisé et presque 10 m sur le plio-quaternaire (cf. illustration 64). 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.

Il faut noter pour conclure qu'il existe des variabilités importantes entre les résultats des différents modèles climatiques. 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.

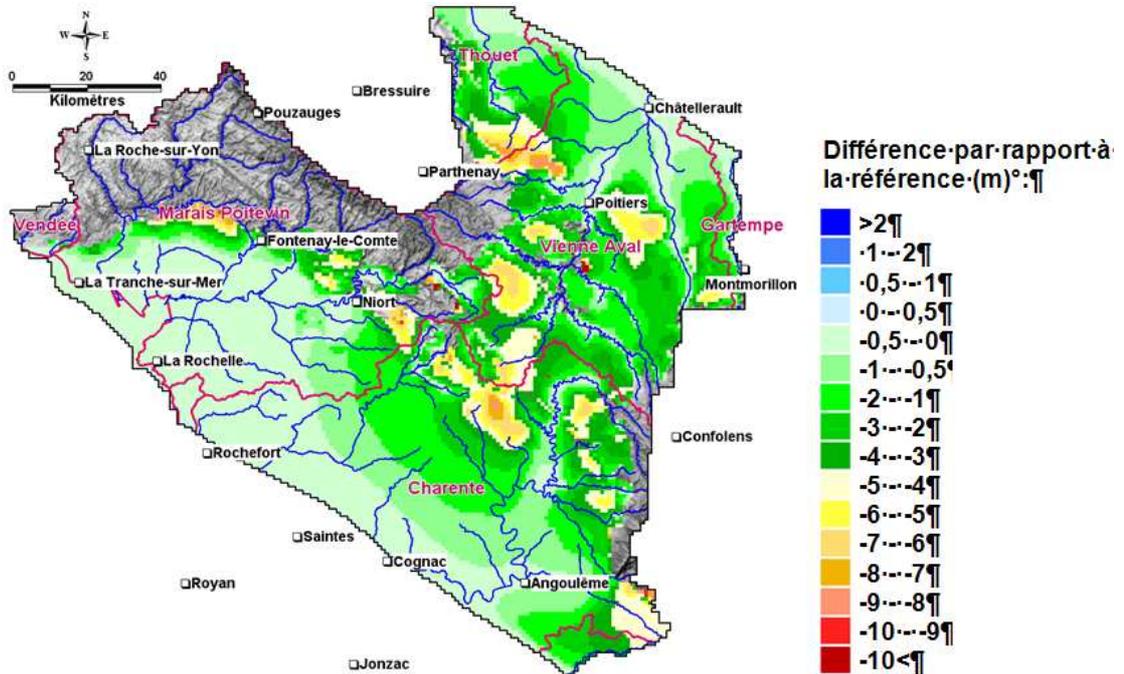
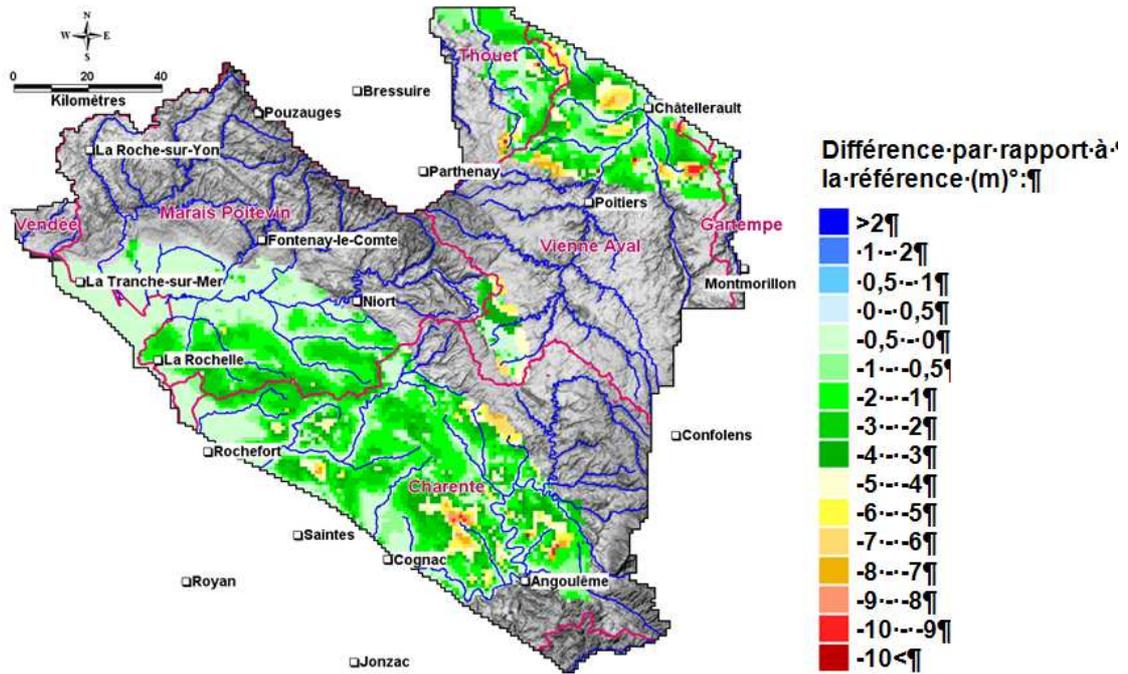


illustration 63 : Poitou Charente : Jurassique supérieur (en haut) et Dogger (en bas) - baisse du niveau moyen de la nappe sur la période 2046-2065 par rapport à la période de référence (1961-1990) pour la simulation la plus pessimiste MRI-CGCM 2.3.2

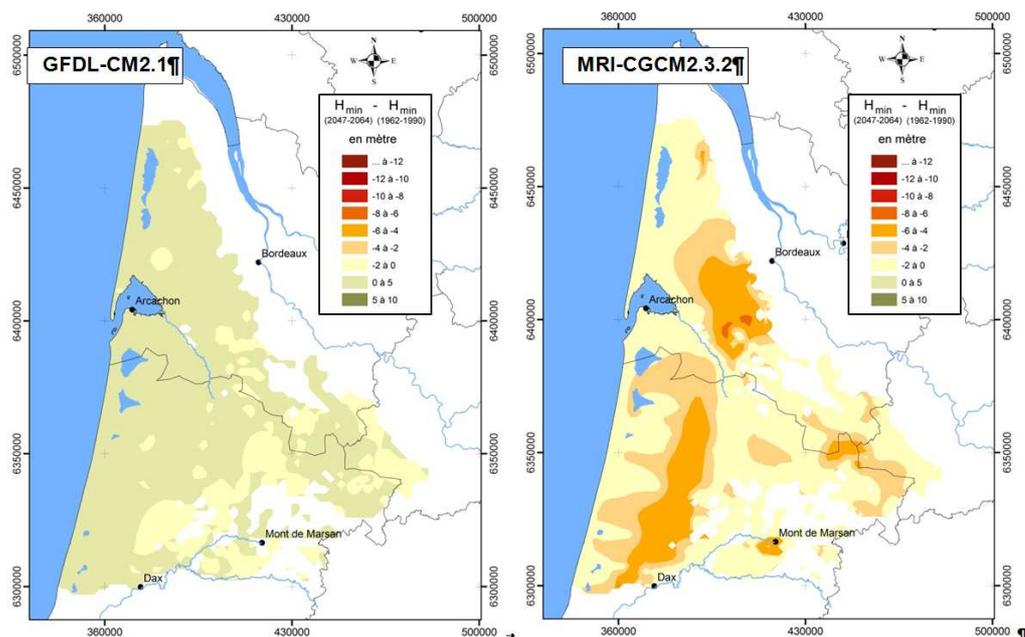


illustration 64 : Bassin Aquitain: Plio-quaternaire: baisse du niveau mini (CM2.1) et maxi (CGCM2.3.2) de la nappe sur la période 2046-2065 par rapport à la période de référence (61-90)

#### 6.2.2.5. SOMME

Par rapport au temps présent et pour tous les modèles climatiques étudiés, l'ensemble des piézomètres montrent une baisse du niveau moyen mensuel de la nappe liée à la baisse de la recharge. Les modèles ARPV3 et CFDL- CM2.0 sont les plus pessimistes alors que les modèles GISS et CFDL CM2.1 sont les plus optimistes.

L'amplitude des variations du niveau de la nappe dans un piézomètre dépend de la variation de la recharge mais aussi de la localisation du piézomètre. Sur les plateaux, les niveaux de la nappe sont relativement plus hauts et réagissent plus à la variation de la recharge comparé aux piézomètres qui sont proches de la rivière pour lesquels le niveau de la nappe est très liés au niveau de la rivière et à la cote topographique. Ainsi le piézomètre situé à Millencourt en Panthieu (Somme aval) affiche un rabattement du niveau de la nappe à l'horizon 2065 de 1m (moyenne des 7 modèles climatiques) alors que le piézomètre de Hangest (bassin versant de l'Avre) dans le Santerre affiche un rabattement moyen de 8.9 m avec de fortes disparités suivant le modèle (varie de 1.6 m à 10.7 m).

Dans les 3 piézomètres situés en rive droite de la Somme Millencourt en Panthieu, Cardonette et Hancourt, le rabattement varie de 0.4 m à 3m selon le piézomètre et le modèle climatique.

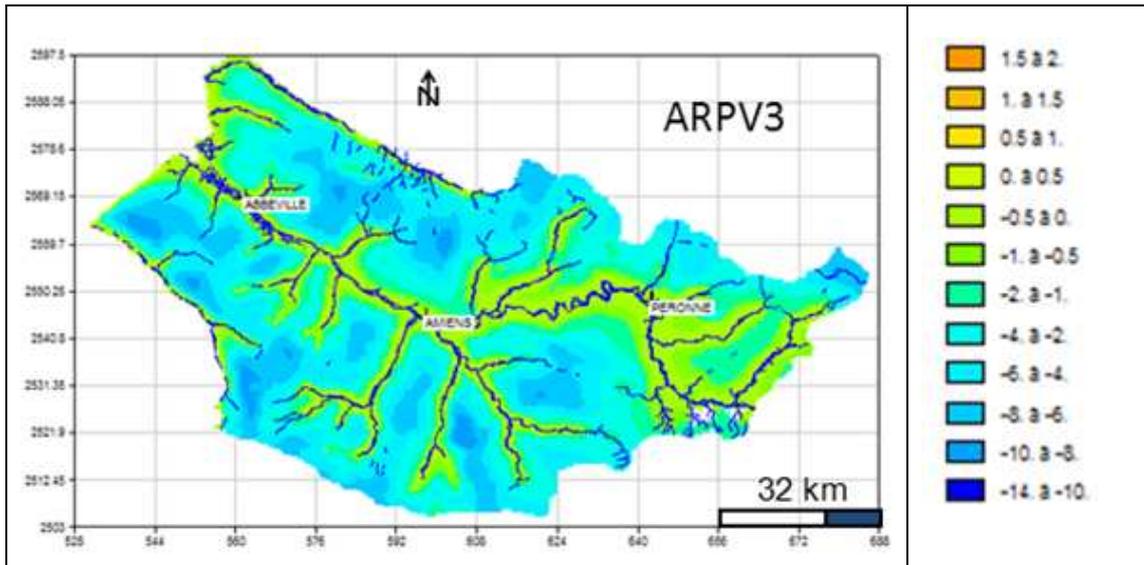


illustration 65 : Bassin de la Somme : baisse maximale du niveau moyen en mètres (ARPV3) de la nappe sur la période 2046-2065 par rapport à la période de référence (1961-1990)

### 6.2.3. EVOLUTION DES DEBITS DES COURS D'EAU

#### 6.2.3.1. BASSIN PARISIEN

L'illustration 66 reprend les principaux résultats obtenus en présentant, pour les six stations considérées, l'évolution relative moyenne (selon les 7 modèles de climat) des débits calculés en temps futur.

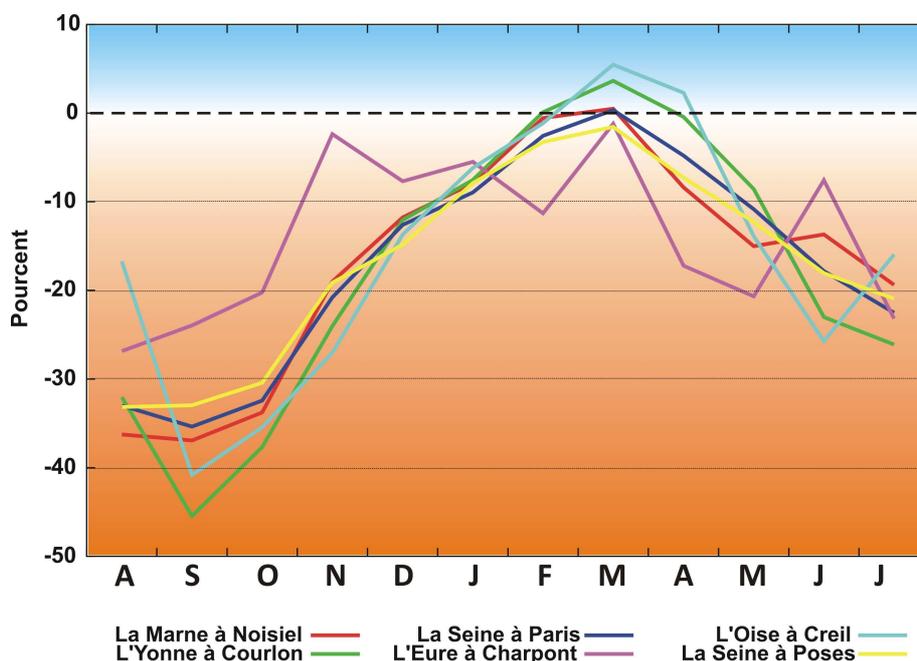


illustration 66: Evolution relative des débits moyens mensuels à l'horizon 2046-2065 (moyenne des 7 modèles de climat)

Ces résultats laissent globalement apparaître une baisse sensible (variable de 25 à 45 %) des débits d'étiage de fin d'été, en liaison avec une baisse sensible de la piézométrie des formations aquifères (cf chapitre précédent) et une variation relativement peu marquée des débits hivernaux.

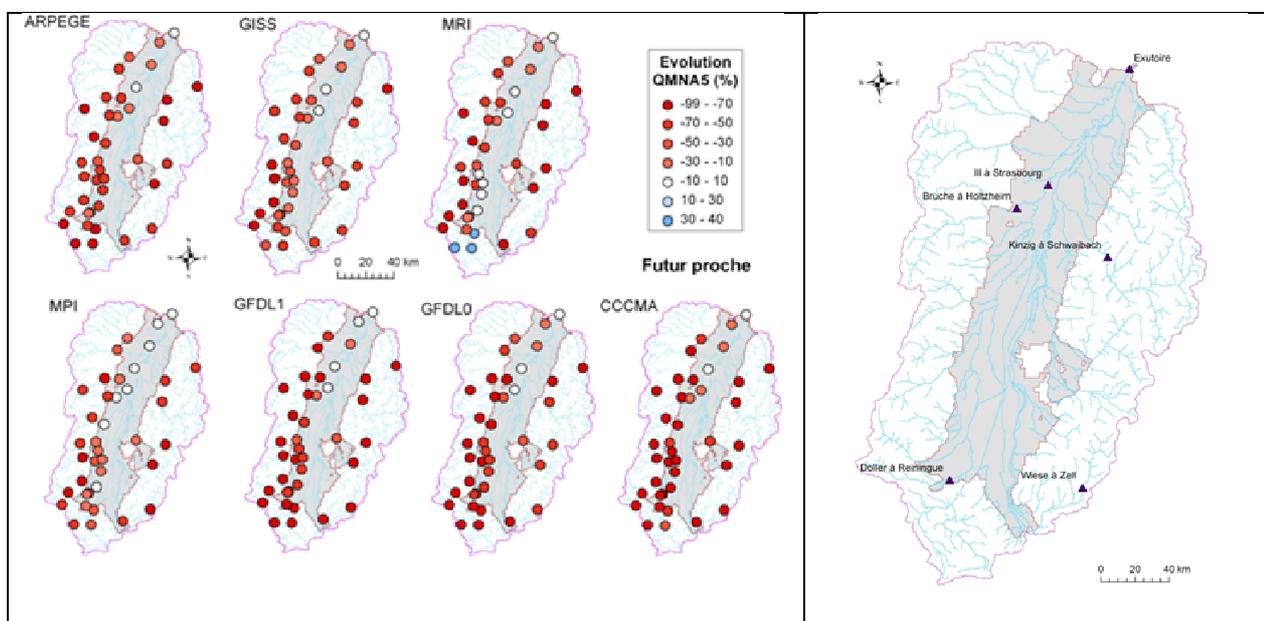
#### 6.2.3.2. PLAINE D'ALSACE

Pour les cinq stations situées à l'intérieur du bassin, on observe un changement dans la saisonnalité des débits, avec une concentration des plus forts débits sur les mois de janvier et février, et une augmentation des débits mensuels maximum. A l'exutoire, l'évolution par rapport au temps présent des moyennes multi-modèles des débits du Rhin est très marquée, avec une forte augmentation des débits hivernaux et une diminution importante des débits estivaux pour lesquels on obtient des valeurs identiques à celles de la période hivernale. On voit que l'incertitude liée au modèle climatique utilisé pour la simulation du bassin du Rhin Supérieur est faible, ce qui montre que

l'évolution des débits du Rhin à Lauterbourg est surtout déterminée par les évolutions sur son bassin en amont de Bâle.

Les résultats sont contrastées entre les sept modèles : sur la période 2046-2065 les modèles GFDL0, GFDL1 et GISS simulent des augmentations des débits à certaines stations de la plaine et des bassins montagneux, et des diminutions modérées pour les autres stations. Le modèle MPI projette des diminutions modérées, inférieures à 10 % à toutes les stations, sauf dans le Sundgau où il y a quelques faibles augmentations. Le modèle CCCMA projette des diminutions un peu plus marquées, jusqu'à -22 % environ et les modèles ARPEGE et MRI donnent les diminutions les plus fortes, jusqu'à -35 % dans la plaine. Pour ARPEGE les plus fortes diminutions se trouvent plutôt dans la partie Sud tandis que pour MRI elles se situent plutôt dans la partie Nord.

L'illustration 67 présente l'évolution des QMNA5 calculés aux stations hydrométriques entre les périodes temps présent et 2046-2065. Le QMNA5 montre une tendance marquée à la baisse, les diminutions les plus importantes ont lieu sur les bassins montagneux, mais aussi dans la plaine, en particulier dans les zones de forte infiltration des cours d'eau. Les baisses les plus modérées sont projetées dans la partie Nord de la plaine pour tous les modèles. Seule le modèle MRI projette des augmentations des QMNA5 assez importantes sur la Largue et l'Ill dans le Sundgau et des augmentations plus modérées pour l'Ill en amont de Colmar.



**illustration 67 : Evolution des débits minimaux mensuels de période de retour 5 ans simulés aux stations hydrométriques entre le temps présent et les périodes 2046-2065 avec les sept projections climatiques.**

Globalement, les débits QJXA10, correspondant au débit journalier maximum de période de retour 10 ans, augmentent pour la plupart des stations hydrométriques et la plupart des sept modèles climatiques de 15 à 30%. Le modèle ARPEGE se distingue par des diminutions sur la plupart des

stations plus marquées sur le Sundgau et le Sud de la plaine.

#### 6.2.3.3. BASSIN AQUITAIN

Ce modèle ne s'intéressant qu'aux nappes captives ou semi captives et ne représentant pas la couche superficielle ni les cours d'eau, il ne peut fournir les impacts sur les débits.

#### 6.2.3.4. POITOU CHARENTE

Globalement, les résultats des différentes simulations indiquent tous une diminution des débits des cours d'eau mais avec des ordres de grandeur très différents. Ainsi, pour les différents cours d'eau présentés ici, la baisse du débit moyen serait de l'ordre de 10% à 40%.

En ce qui concerne les étiages, ils devraient être plus sévères. Pour les différents cours d'eau, la baisse du débit moyen en période d'étiage pourrait atteindre 70% à 80% voire plus (modèle ARPV3 et CCCMA-CGM3 pour la Sèvre Niortaise et la Boutonne).

La moyenne des débits maximums devrait être également à la baisse. A noter que sur quelques simulations des pics sont visibles et correspondent pour certains cours d'eau à des débits observés en période d'inondation (1977, 1983, 1988).

Globalement, le débit de la Vienne à Ingrandes paraît assez peu impacté en hautes eaux (baisse de -10% à -20% pour les modèles les plus pessimistes), certaines simulations indiquent même des débits moyens supérieurs à ceux de la période de référence (GFLD-CM2.1 et GFLD-CM2.0)

A contrario, sur la période estivale et pour toutes les simulations le débit moyen mensuel interannuel est inférieur à ceux de la période de référence, pour les simulations ARPV3 et CCCMA-CGM3 cette diminution serait de l'ordre de -60%.

Pour la Boutonne, la Sèvre et le Clain, on note des débits moyens interannuels en baisse pouvant atteindre 40% à 50%, voire 70% pour la Boutonne, par rapport à la période de référence. Pour une des simulations, la plus « optimiste », les débits d'hiver pourraient, à contrario, être supérieurs de +20 à +40% en moyenne (GFDL-CM2.1), ce qui pourrait entraîner des phénomènes de crues sur les parties aval de certains bassins versant (Boutonne, Aume-Couture, Antenne, Curé, Mignon, Auxance...).

Seule la Touvre à Foulpougne, résurgence principale du système karstique de la Rochefoucauld, semble peu impactée : baisse modérée des débits d'environ 10% sauf en automne où la diminution pourrait atteindre 30%.

**Temps présent**

**Temps futur**

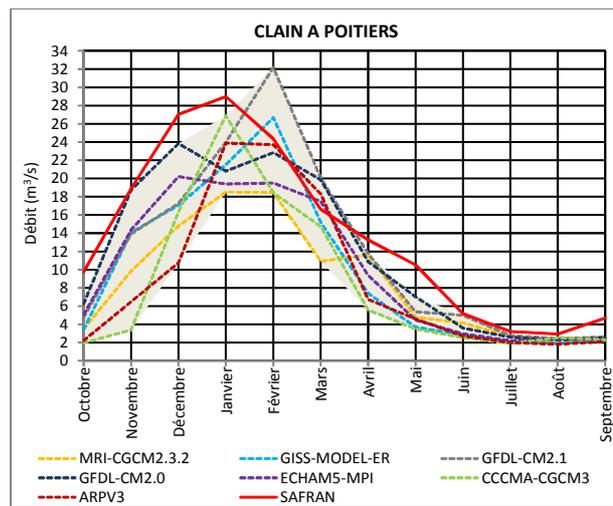
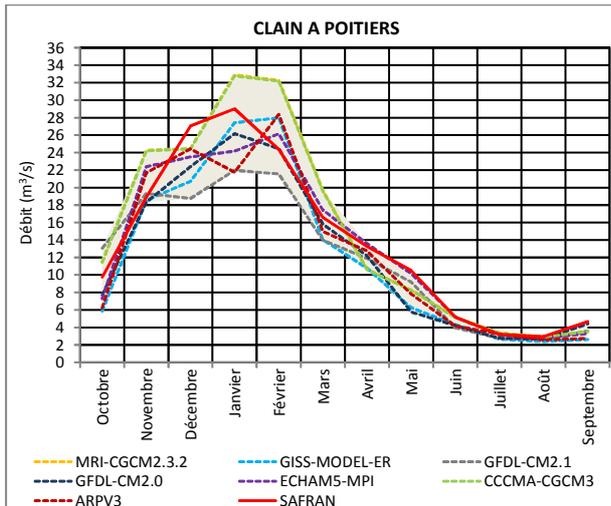
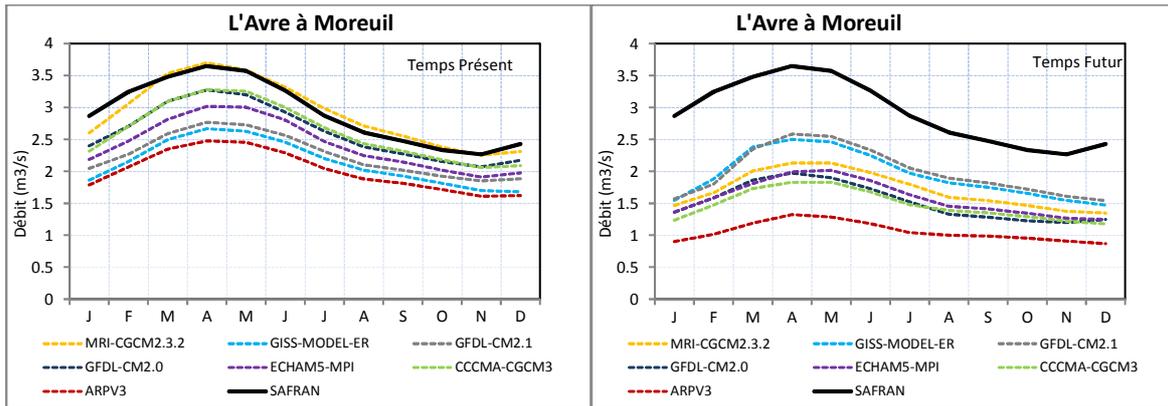


illustration 71 : Evolution mensuelle du débit du Clain à Poitiers

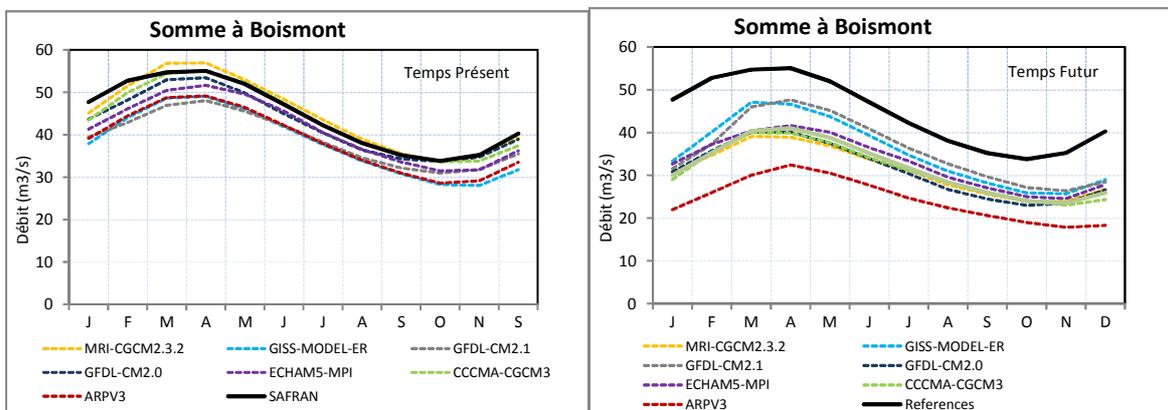
#### 6.2.3.5. BASSIN DE LA SOMME

De la même façon que pour les piézomètres, le débit moyen mensuel de la Somme et de ses deux principaux affluents, l'Avre et la Selle calculé pour les 7 modèles climatiques est analysé pour le temps présent et le temps futur.

Tous les modèles climatiques montrent une baisse du débit moyen mensuel de la Somme et de ses principaux affluents à l'horizon 2065. A la station Boismont, exutoire du bassin de la Somme, le débit à l'étiage serait réduit en moyenne de 23% avec cependant des disparités entre les modèles (de 33.69% pour ARPV3 à 8.5% pour GISS). La baisse est plus marquée dans l'Avre avec un débit d'étiage réduit de 32% avec des extrêmes de 44% pour ARPV3 et 8.7% pour GISS.



**illustration 68 : Evolution moyenne mensuelle du débit de l'Avre à la station de Moreuil (Bassin de l'Avre).**



**illustration 69 : Evolution moyenne mensuelle du débit de la Somme à la station de Boismont.**

## **6.3. IMPACT DES PRELEVEMENTS**

### **6.3.1. INTRODUCTION**

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

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

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

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

Les données de prélèvements de la plupart des modèles existants ayant fait l'objet d'un important travail de réactualisation au cours de ces dernières années, lequel faisait intervenir différents organismes responsables de la gestion des ressources en eaux souterraines (Agence de l'Eau, Conseils généraux, syndicats des eaux, exploitants, ...).

Aussi a-t-il été retenu généralement, comme conditions initiale de prélèvements, les données de la base du modèle concerné puis d'affecter à chaque point de pompage de ce modèle l'évolution des prélèvements estimée par le BIPE pour 2070, regroupés in fine par bassin versant, sur la base des regroupements effectués par le BIPE.

### 6.3.2. BASSIN DE LA SEINE

L'illustration 70 précise, pour un des deux scénarii d'évolution proposées, l'influence relative, à l'horizon 2046-2065, sur le débit moyen mensuel de l'Yonne, la Marne et la Seine. Ces résultats représentent une moyenne de l'ensemble des sept modèles de climat étudiés.

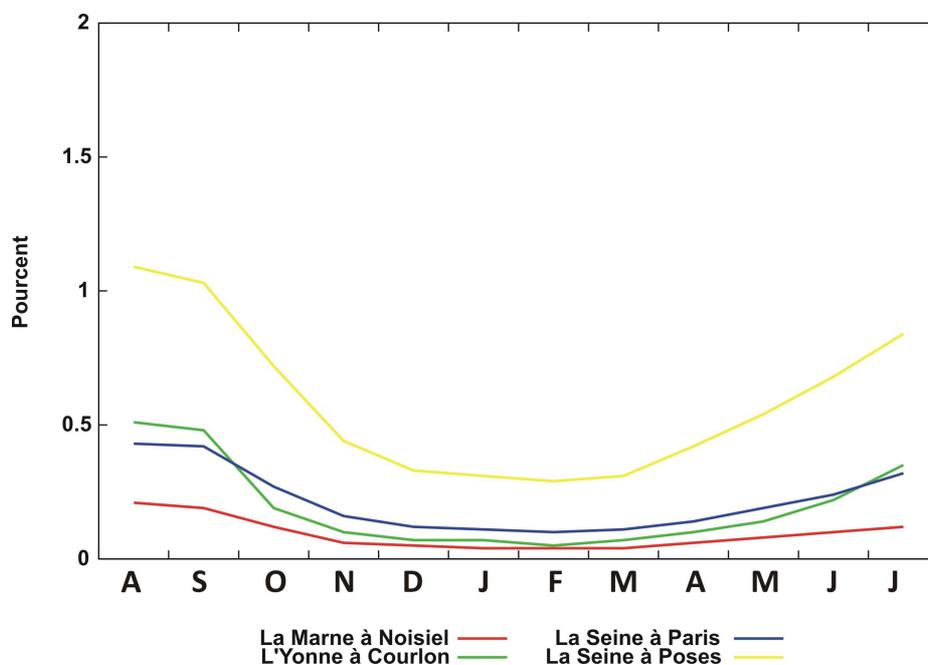


illustration 70 : Scénario 1 d'évolution des prélèvements : variation relative du débit moyen mensuel des grands cours d'eau du bassin de la Seine par rapport au débit moyen mensuel modélisé à l'horizon 2046-2065 sans évolution de prélèvements

### 6.3.3. PLAINE D'ALSACE

Pour ce modèle, l'ensemble des prélèvements ont été modifiés de façon homogène sur le bassin avec le taux d'évolution moyen estimé par le Bipe. Cela conduit à une forte réduction des prélèvements, allant de -38% à -40 % selon le scénario d'étalement.

La réduction des prélèvements conduit à limiter le rabattement du niveau piézométrique lié au changement climatique. Les deux scénarios du Bipe donnent des résultats très similaires. La diminution des pompages permet de réduire le rabattement de 36cm à 28cm en moyenne sur l'ensemble de la nappe.

#### **6.3.4. BASSIN AQUITAIN**

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

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

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

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

#### **6.3.5. BASSIN DE LA SOMME**

Dans le bassin de la Somme, les données de projection des prélèvements à l'horizon 2065 fournies par le BIPE prévoient une baisse des prélèvements AEP (entre -19 et -24% selon les scénarios) et des prélèvements pour l'industrie de -53% quel que soit le scénario étudiés. Cette réduction impactera de manière positive les niveaux de la nappe notamment dans les secteurs très sollicités pour ce type d'usage.

Les cartes de remontée du niveau de la nappe liée à la baisse des prélèvements montrent que globalement et pour tous les modèles climatiques une très faible augmentation moyenne du niveau de la nappe à l'échelle du bassin (0.05 à 0.06 m). Cependant, localement, des remontées de nappe les plus importantes sont obtenues au droit des mailles contenant les puits de prélèvements avec des valeurs de remontée pouvant atteindre 5 à 6m dans le Santerre.

#### **6.3.6. POITOU CHARENTE**

D'une façon globale, les niveaux piézométriques, tout comme les aquifères, sont peu impactés par les évolutions de prélèvements annoncés par le BIPE à horizon 2070. En effet, la baisse des prélèvements simulée est faible, en particulier pour l'irrigation qui représente presque 70% des volumes consommés en eau souterraine. Ainsi, la comparaison des simulations avec évolution et sans évolution montre des différences (augmentation du débit) qui restent non significatives d'environ :

- +0,1 % (200 à 300 l/s) sur l'année hydrologique sur la Vienne,
- +1% (100 l/s) sur la période d'étiage pour le Clain ou la Sèvre à Echiré,

- +2% en période d'étiage ce qui correspond à un gain de débit au maximum de +400 l/s à +500 l/s sur la Charente à Vindelle,
- +1% (40 l/s) en moyenne annuelle sur la Touvre,

Enfin, pour la Boutonne qui est fortement impactée par les prélèvements, l'augmentation des débits est plus importante en étiage, jusqu'à 4% selon certaines simulations.

## **6.4. CONCLUSION**

### **6.4.1. BASSIN PARISIEN**

Les simulations menées grâce aux projections de différents modèles climatiques permettent de dégager quelques grandes tendances de l'évolution possible (à l'horizon 2060) de l'hydrosystème du bassin de la Seine.

Si les projections climatiques désagrégées indiquent des évolutions contrastées des précipitations sur le domaine étudié avec une dispersion sensible selon les modèles de climat, elles vont toutes dans le sens d'une augmentation de la température moyenne (entre 1.5°C et 3.0°C). Ceci s'accompagne d'une augmentation sensible de l'évapotranspiration potentielle (ETP) de 10 à 25% selon les modèles.

Ces projections météorologiques à moyen terme ont pu être intégrées dans le modèle MODCOU, qui couple les écoulements de surface et souterrains, mis en place lors d'études précédentes sur le bassin de la Seine et calibré sur les données météorologiques présentes.

Au niveau des écoulements de surface, la prise en compte des projections météorologiques fait apparaître une baisse sensible de l'alimentation en eau des grandes formations aquifères du bassin puisque la baisse moyenne calculée pour l'ensemble des modèles de climat traité est de près de 19% et, localement, des variations de -20 à près de -30% ont été calculées sur certaines régions. Ces variations sont moins marquées au niveau des flux d'eau ruisselés en surface. Ces résultats peuvent faire craindre une diminution sensible des débits d'étiage de l'ensemble des cours d'eau du bassin et plus particulièrement sur les têtes de bassin ainsi qu'un allongement de la durée de ces étiages. En période hivernale, la légère baisse, en moyenne des sept modèles de climat analysés, des débits moyens mensuels semble moins robuste.

L'impact sur la piézométrie du bassin est sensible, toujours en liaison directe avec la diminution de la recharge par les eaux météoriques, notamment sur les grandes zones de plateaux (pays de Caux, plaine de Beauce) où la piézométrie est peu contrainte par un réseau hydrographique dense. Selon les scénarios, cette baisse peut localement dépasser 10 mètres.

La prise en compte de l'évolution des prélèvements, telle qu'estimée par la société d'études et de conseil en stratégie BIPE, et selon deux scénarios d'évolution démographique, ne modifie que de manière marginale (à

l'échelle du bassin) l'évolution du niveau moyen des formations aquifères même si localement, l'impact de la prise en compte de ses scénarios peut être importantes. Globalement, ces scénarios prévoient pourtant une baisse moyenne sur le bassin de l'ensemble des prélèvements en nappe de l'ordre de 25%, la plus grande partie (en volume) étant imputable aux prélèvements d'eau potable (A.E.P.). Cette baisse relative (fournie par petits bassins hydrographiques) a été appliquée uniformément aux prélèvements actuels pris en compte dans le modèle. Son impact sur le débit des grands cours d'eau du bassin reste très limité, même en période d'étiage, car la piézométrie évolue peu. Il est toutefois nécessaire de noter que ces scénarios ne supposent pas de modification des prélèvements d'origine agricole. Or les premiers calculs effectués dans le cadre du projet RExHySS montrent que, à surface cultivée et assolements inchangés, les besoins potentiels en irrigation augmentent de près de 50%.

Pour plus de détail, on peut se reporter au volume spécifique 3 ayant trait à la modélisation réalisée.

#### **6.4.2. BASSIN AQUITAIN**

Avant toute chose il est bon de rappeler que, contrairement aux autres modèles, le modèle du bassin Aquitain s'intéresse aux nappes captives ou semi captives et ne modélise pas les écoulements de surface et l'aquifère superficiel.

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

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

Dans un second temps, le Modèle Nord-Aquitain a permis d'évaluer l'impact de l'évolution de l'exploitation des eaux souterraines à l'horizon 2070. Les perspectives d'évolution des prélèvements ont été réalisées par le BIPE. Elles admettent globalement une augmentation des prélèvements sur l'ensemble de la façade atlantique alors que dans le reste du bassin, les nappes sont moins sollicitées. L'évaluation de l'impact de ce scénario a été entreprise en réalisant sur la période prospective (2047-2064) deux simulations par modèle climatique. La

première intègre les données de prélèvements de l'année 2006, issues de la base de prélèvement du MONA, alors que la seconde prend en compte une perspective d'évolution de ces prélèvements à l'horizon 2070 sur les recommandations du BIPE. Une différence entre les deux simulations permet d'évaluer l'impact de l'évolution des prélèvements par rapport à l'actuel.

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

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

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

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

influencés correspondent, comme dans les simulations réalisées ici, aux grandes zones urbanisées où se concentrent la majorité des forages d'alimentation en eau potable.

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

Pour plus de détail, on peut se reporter au volume spécifique 4 ayant trait à la modélisation réalisée.

### **6.4.3. PLAINE D'ALSACE**

Les simulations menées grâce aux projections des modèles climatiques nous permettent de dégager quelques grandes tendances pour l'évolution future de l'hydrosystème du fossé rhénan supérieur. Les projections climatiques désagrégées indiquent des évolutions contrastées des précipitations sur le domaine étudié, avec cependant globalement une augmentation marquée des précipitations hivernales, et une diminution marquée des précipitations estivales. Les précipitations annuelles sont caractérisées par une légère baisse. Pour tous les modèles climatiques, l'ETP et les températures augmentent en toutes saisons, et surtout en automne pour l'ETP.

Ces évolutions météorologiques sont traduites en termes d'écoulement par le modèle MODCOU, par une diminution de l'infiltration vers l'aquifère et du ruissellement de surface. Certains modèles plus humides projettent cependant une évolution quasi-nulle de ces écoulements. On constate aussi une évolution de leurs cycles annuels avec une concentration des plus forts écoulements sur les mois d'hiver, et une baisse pour les autres mois. Ceci peut faire craindre des étiages plus sévères et des crues ou des remontées de nappe plus importantes. Les cycles annuels des débits mensuels des cours d'eau suivent des évolutions similaires, les forts débits se trouvant plus concentrés sur les mois d'hiver par rapport à l'actuel. Les débits moyens simulés aux stations hydrométriques ont globalement tendance à la diminution, même si les modèles climatiques les plus humides projettent des augmentations de ces débits. De plus ces diminutions sont assez fortes dans la plaine, où l'infiltration des cours d'eau vers la nappe constitue un processus de recharge important de celle-ci.

Concernant l'évolution de la nappe alluviale, toutes les projections climatiques conduisent à une baisse de la recharge et des baisses assez limitées des niveaux piézométriques, inférieures au mètre. Ces baisses sont un peu plus marquées dans la partie extrême Sud-Ouest de la plaine, mais la piézométrie de cette zone était déjà mal reproduite à l'actuel avec les données météorologiques observées. Il faut noter que même si la baisse de la piézométrie est faible, cette évolution peut avoir un impact négatif pour l'équilibre de zones humides entretenues par la proximité du toit de la nappe au sol. De plus la reprise évaporative directe d'eau de la nappe, qui peut être significative dans les zones où celle-ci est sub-affleurante, n'est pas prise en compte dans le modèle hydrogéologique. Celle-ci pourrait accentuer les impacts négatifs du changement climatique sur les niveaux piézométriques, mais à terme elle devrait diminuer en raison de la plus grande profondeur moyenne du toit de la nappe.

Une autre conclusion sur ces impacts est une importance accrue de l'infiltration des cours d'eau pour la recharge de l'aquifère : même si les volumes infiltrés diminuent globalement, ils diminuent moins que la recharge issue des précipitations effectives et représentent donc une part encore plus grande qu'à l'actuel de la recharge totale. Ce résultat va dans le sens d'une plus grande vulnérabilité des eaux souterraines aux pollutions des cours d'eau de surface, et donc d'une dégradation possible de la qualité de cette importante ressource en eau potable.

Les résultats obtenus sur les débits de crue et d'étiage indiquent une plus grande sévérité des étiages, ainsi que des crues de plus forte intensité, mais ces statistiques doivent être considérées avec précaution, étant donné que les séries de valeurs utilisées pour les établir sont assez courtes.

Les scénarios du BIPE conduisent à une réduction marquée des prélèvements en nappe, qui permet de réduire l'impact du changement climatique sur le rabattement de la nappe d'environ 25%, cependant, ces scénarios ne prennent pas en compte l'impact du changement climatique sur les besoins en irrigation.

Pour plus de détail, on peut se reporter au volume spécifique 2 ayant trait à la modélisation réalisée.

#### **6.4.4. POITOU CHARENTE**

Les résultats des simulations réalisées avec le modèle des nappes du Jurassique de Poitou-Charentes pour tester le scénario du réchauffement climatique sur la période 2046-2065 montrent des situations assez différentes (en nappe comme en rivière) selon les bassins versants.

Sur les bassins versants à forte inertie, en particulier la Dive du Nord et les bassins voisins (Palu...) en nord Vienne, les débits de rivières devraient se trouver fortement impactés en hiver comme en été (même en supprimant toute irrigation).

L'impact serait légèrement moindre dans la partie centrale de la Région, de part et d'autre du seuil du Poitou, caractérisée par l'existence des nappes karstiques du Dogger et de l'Infra-Toarcien à inertie « moyenne ». Selon les scénarios simulés, on peut s'attendre à des débits plus faibles sur l'année, des débits d'étiages beaucoup plus sévères et pour la simulation GFDL-CM2.1 des épisodes de crues plus importants en hiver. Dans ces secteurs, les prélèvements en nappe (et en rivière) sont importants et les politiques de réduction qui se mettent actuellement en place (retenues, modifications des assolements...) devraient en partie compenser l'impact du réchauffement climatique par rapport aux débits d'étiage. Certaines sources utilisées pour l'eau potable (du Vivier à Niort par exemple), pourraient toutefois connaître des situations critiques encore plus importantes qu'actuellement.

Au niveau du Marais-Poitevin, les niveaux des nappes périphériques étant fortement marqués par les prélèvements, la réduction de ces derniers devrait améliorer nettement la situation des nappes en

été. Ce qui est à craindre surtout, à en croire les résultats des simulations, ce sont les niveaux de nappes plus bas en hiver et surtout au printemps, ce qui réduirait les apports à la zone humide. Enfin, le karst de la Touvre serait l'aquifère (et le cours d'eau) le moins impacté par l'évolution climatique. Toutefois, il convient de moduler ce constat issu des simulations, dans la mesure où les pertes des rivières Tardoire et Bandiat principalement contribue en grande part à l'alimentation de l'aquifère. L'introduction dans le modèle pour les simulations de chroniques de débits observés en 2006 peut donc fausser les résultats. Il en est de même pour les bassins impactés par les lâchers de barrage, où les chroniques 2006 rentrées ne sont pas forcément significatives des situations hivernales et printanières plus sèches futures.

Ces simulations montrent que les résultats obtenus combinent à la fois l'impact du changement climatique, fonction de la typologie du bassin versant, et des facteurs anthropiques (prélèvements et lâchers de barrage) qui peuvent être plus facilement maîtrisables mais qui restent une grande inconnue pour la paramétrisation du modèle en ce qui concerne la période 2046-2065. De ce fait, les situations d'étiage pourraient être finalement plus facilement maîtrisées que les crues hivernales.

Pour plus de détail, on peut se reporter au volume spécifique 5 ayant trait à la modélisation réalisée.

#### **6.4.5. LA SOMME**

Les eaux souterraines constituent la principale ressource en eau pour l'approvisionnement en eau potable du département de la Somme. Il est donc nécessaire d'évaluer les effets possibles des changements climatiques sur cette ressource pour qu'un plan de gestion de la ressource en eau et une stratégie d'adaptation puissent être élaborés.

Le modèle hydrodynamique du bassin de la Somme a été utilisé pour étudier l'impact du changement climatique sur la recharge de la nappe de la craie, sur son niveau piézométrique et sur le débit des cours d'eau qui la draine. Les simulations sont faites en utilisant les résultats de 7 modèles climatiques différents basés sur le scénario A1B du GIEC.

Les 7 modèles climatiques s'accordent sur une baisse de la recharge moyenne annuelle de la nappe et du débit des cours d'eau à l'horizon 2065. A l'échelle du bassin de la Somme, la baisse moyenne de la recharge calculée à partir des résultats des 7 modèles climatiques est de -18.7%. Néanmoins, une disparité importante des résultats existe entre les modèles. L'enveloppe de variation est entre -30.4% pour le modèle ARPV3 (le plus pessimiste) et -5.6% pour le modèle GISS. Par ailleurs, l'écart entre les saisons serait important, du fait que la conjonction entre une baisse des précipitations entre Mai et octobre et une augmentation de l'évapotranspiration réduirait davantage la recharge sur cette période.

Pour l'ensemble des modèles climatiques, l'impact sur le niveau de la nappe serait plus important

sur les plateaux que dans les vallées humides. Le rabattement de la nappe est de l'ordre de -10 m sur les plateaux (pour 5 modèles climatique) alors qu'il est entre 0.2 m et 0.5 m dans les vallées humides. Pour les modèles CFDL-CM2.1 et GISS-MODEL-ER l'impact sur le rabattement de la nappe est faible.

Par ailleurs, le débit moyen mensuel de la Somme et de ses principaux affluents diminuerait à l'horizon 2065. La moyenne des 7 modèles montre que le débit d'étiage à exutoire du bassin de la Somme serait réduit de -23% avec cependant des disparités entre les modèles (-33.69% pour ARPV3 et -8.5% pour GISS). La baisse est plus marquée dans l'Avre avec un débit d'étiage réduit de -32% (moyenne des 7 modèles), valeur que l'on peut comparer avec celles obtenues par modélisation globale (5.2.2.2) qui faisait état d'une baisse comprise entre -18 (minimum) et -62% (maximum).

Les incertitudes inhérentes aux modèles climatiques rendent l'exploitation de ces résultats assez difficiles pour élaborer une stratégie d'adaptation. Des travaux complémentaires sur l'évaluation des incertitudes sont nécessaires pour le développement d'un plan de gestion de la ressource.

Les simulations réalisés en utilisant les données de projection des prélèvements à l'horizon 2070 du BIPE montrent que la baisse des prélèvements AEP et Industrie, entraîne une légère hausse du niveau moyen de la nappe (5 à 6 cm) à l'échelle du bassin de la Somme. L'impact est visible surtout dans le Santerre notamment à l'amont de la Luce, et dans le secteur du l'Ingon et localement au droit des captages d'eau.

Pour plus de détail, on peut se reporter au volume spécifique 6 ayant trait à la modélisation réalisée.

#### **6.4.6. GRANDE TERRE EN GUADELOUPE**

Le modèle calé permet de calculer des bilans hydrodynamiques et d'analyser la réaction de l'aquifère aux différentes sollicitations externes que sont l'infiltration, les prélèvements, les débordements par les cours d'eau, les entrées et sorties d'eau par les limites du modèle. Il permet ainsi d'appréhender le fonctionnement de l'aquifère à travers ses fonctions de stockage et de déstockage. Afin de mieux visualiser le comportement de la nappe, l'analyse des bilans d'eau de l'aquifère de Grande-Terre a été fait pour chacune des grandes unités structurales : Grands-Fonds, Plaine des Grippons, Plateaux du Nord, Plateaux de l'Est.

L'analyse des bilans hydrodynamiques montre que la recharge globale atteint  $8.10^8$  m<sup>3</sup>/an et que les débits d'exploitation en Grande-Terre étaient (en 2005) largement inférieurs à cette recharge (maximum 5 % de la recharge).

Les ressources en eaux de la Guadeloupe semblent importantes et ne devraient pas baisser de façon extrême, même si l'on cerne mal, a priori, l'influence du changement climatique sur les cyclones et

sur la pluviométrie. On peut estimer, a priori, que le changement climatique pourrait, d'après les estimations réalisées sur d'autres îles telles que la Réunion, n'impacter qu'une augmentation de température de l'ordre de 2°C ce qui aurait pour conséquence d'augmenter l'ETP de l'ordre de 10% (variable suivant l'altimétrie), Grande Terre et la cote sous le vent étant alors les plus touchées.

Si cela s'avérait exact, il est probable que les ressources en eau seraient encore largement suffisantes mais que les trois problèmes les plus aigus de l'île concernant la ressource en eau subiraient une légère aggravation, il s'agit :

- De la mauvaise adéquation locale besoin/ressource, obligeant ainsi à envisager des transferts d'eau plus importants que ceux actuellement à l'étude, notamment le transfert de Basse Terre vers Pointe à Pitre voire Grande Terre,
- De la remontée du niveau marin qui va réduire la superficie notamment au droit de la plaine des Grippons (Grande terre) et surtout,
- Accentuer la remontée du biseau salé si l'on y associe des prélèvements trop importants le long du rivage, problème concernant Grande Terre mais pouvant également survenir à Marie Galante.

Pour plus de détail, on peut se reporter au volume spécifique 7 ayant trait à la modélisation réalisée.

#### **6.4.7. LE LEZ**

Cet aquifère, outre son caractère représentatif des karsts que l'on rencontre sur le pourtour méditerranéen français, est intensément exploité pour l'alimentation en eau de la ville de Montpellier.

Les scénarios climatiques montrent une diminution de -10% à -20% des cumuls de précipitation saisonniers futurs pour le printemps, l'été et l'automne, tandis que pour l'hiver on observe une augmentation de l'ordre de +10%, en moyenne multi-modèle. Les résultats obtenus pour l'ETP indiquent une augmentation en moyenne multi-modèle de l'ordre de +15% sur le cumul annuel, plus marquée sur l'automne. Concernant l'évolution des prélèvements, les projections du cabinet BIPE faites dans le cadre du lot 7 d'EXPLORE 2070 sur les prélèvements futurs tablent sur une augmentation moyenne annuelle de l'ordre de 20% des prélèvements sur la zone d'étude du Lez. Cette augmentation a été appliquée à la chronique de débit de prélèvement établie lors du calage du modèle, sans en modifier la dynamique saisonnière ( $Q_{\text{prel. total futur}} = 29\text{Mm}^3 + 20\% = 34,8\text{Mm}^3$ ). La réponse du modèle aux scénarios climatiques se traduit par une baisse de la précipitation efficace (recharge) de l'ordre de -10% à l'échelle annuelle, plus marquée en été (-40%) et en automne (-20%), en moyenne multi-modèle.

Cette baisse impacte le niveau piézométrique, qui subit une baisse de -2 m en moyenne annuelle, pouvant atteindre 6 m entre juillet et octobre. L'impact du scénario de prélèvement présente des ordres de grandeur similaires à ceux de l'impact du climat, avec une baisse de -1 m en période de

hautes eaux et de jusqu'à -5 m en période de sollicitation. L'effet combiné de l'évolution du climat et des prélèvements entraînerait ainsi une diminution des niveaux piézométriques pouvant aller jusqu'à 12 m par rapport au niveau actuel simulé en période de sollicitation. Une forte incertitude affecte tout de même ces résultats, avec une dispersion des résultats autour de la moyenne multi-modèle de l'ordre de 5 m de février à septembre et de l'ordre de 2 m d'octobre à janvier.

La cote piézométrique de 45 m NGF (en dessous de laquelle les exploitants de l'aquifère font appel à une ressource complémentaire (eau du Rhône) pour alimenter la ville de Montpellier) serait plus souvent atteinte en contexte de climat futur et encore plus souvent (jusqu'à 15% du temps) en appliquant le scénario d'augmentation des prélèvements. Cet accroissement de la sensibilité de l'exploitation de l'aquifère aurait lieu sans pour autant que l'on dépasse la cote de 35 m NGF, seuil d'exploitation actuel de l'aquifère, même sous l'influence combinée du climat et des prélèvements futurs.

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

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

Pour plus de détail, on peut se reporter au volume spécifique 8 ayant trait à la modélisation réalisée.

## **7. EXTENSION DES RESULTATS DES MODELES HYDRODYNAMIQUES**

### **7.1. INTRODUCTION**

Les modélisations hydrodynamiques existantes ont permis de préciser, au droit des principaux aquifères exploitées les ressources disponibles, les impacts du changement climatique ainsi que les impacts des prélèvements. Il n'en demeure pas moins que l'évaluation de ces impacts (changement climatique et prélèvements) se doit d'être réalisé au niveau de l'ensemble du territoire national (y compris les DOM).

Vu la difficulté, les données et le temps nécessaires à la construction et au calage d'un modèle hydrodynamique, il est apparu indispensable de trouver une méthode simple rapide et suffisamment précise permettant d'éteindre les résultats obtenus par modélisation à l'ensemble du territoire métropolitain.

### **7.2. METHODOLOGIE**

Initialement il avait été envisagé d'analyser et comparer les résultats obtenus au droit des modèles hydrodynamiques avec les résultats obtenus par le lot 3 (hydrologie de surface) afin de préciser à l'aide de différents indicateurs du type IDPR, rugosité voire autre, la répartition ruissellement infiltration.

Cette démarche conduite au niveau des bassins versants « explore » n'a pas été concluante dans la mesure où l'on n'a pas pu mettre en évidence de corrélation simple entre ces divers paramètres.

Deux raisons principales peuvent aisément être citées :

- Le nombre très limité de l'échantillon. Les bassins versants retenus étant conséquents, ils sont peu nombreux (99) or ce type d'analyse intègre une analyse statistique qui par conséquent nécessite une population étoffée.
- Le fait que les valeurs de débits fournies ne sont pas des débits naturels mais, pour certains, fortement influencés par des ouvrages qui sont généralement situés en partie amont de bassin et qui perturbent ainsi les valeurs de tous les bassins situés en aval.

N'ayant plus cette possibilité, la démarche consistera principalement à :

- Utiliser les données climatologiques de base (pluie et évapotranspiration) ainsi que les

résultats du lot 3 afin d'évaluer la pluviométrie efficace, paramètre qui constitue la borne maximale de la ressource renouvelable,

- Evaluer à partir de cette pluie efficace, la décomposition entre ruissellement rapide (eaux de surface) et infiltration (eau souterraine). Pour cela, nous proposons d'utiliser, après vérification par le biais des résultats modèles, l'IDPR.,
- Préciser, à la lumière des résultats de modélisations globales ou hydrodynamiques, les tendances des variations piézométriques et/ou du débit des rivières.

### **7.3. DONNEES TEMPS FUTUR**

Les principales données climatiques « temps présent » d'entrées des modèles, fournies par Météo France ont été globalement présentées dans les chapitres précédents (§3.1.2.2).

Les mêmes données ont été fournies, par maille de 8 km par 8 km, pour les différents modèles climatiques « temps présent et temps futur ». Les données spécifiquement utilisées dans les modèles hydrodynamiques sont présentées dans les volumes dédiés aux modélisations.

Concernant les données générales l'**illustration 71** et l'illustration 72 résume, à titre d'exemple, les principales variations de thermométrie et de pluviométrie annuelle des différents modèles par rapport à la valeur de référence. Ces graphiques permettent de constater que si la valeur moyenne des températures est à la hausse (environ 2 à 2,5°C) et la pluviométrie moyenne à la baisse (d'environ 6 à 8%), ces valeurs sont très variables d'un modèle climatique à l'autre et que les valeurs extrêmes peuvent être très différentes.

La température va avoir une influence significative sur l'EvapoTranspiration Potentielle (ETP), c'est-à-dire sur le pouvoir évaporant des plantes. Ces quelques degrés d'augmentation vont ainsi générer une augmentation très sensible de l'ETP (10 à 15% voire plus suivant les régions et les saisons). Cette augmentation de l'ETP va se retrouver directement en augmentation de l'évapotranspiration réelle (ETR) dans la mesure où les modèles utilisés n'intègrent pas une éventuelle adaptation de la végétation naturelle au changement climatique. Cette augmentation de l'ETR associée à une diminution, relativement faible en pourcentage mais significative en quantité de la pluviométrie, va ainsi conduire à une réduction drastique des pluies efficaces. Cette réduction est très variable suivant les régions et les modèles climatiques mais elle n'est que rarement inférieure à 20%.

Pour de plus amples détails, il conviendra de se reporter à la partie de rapport « Météo France » du lot 3.

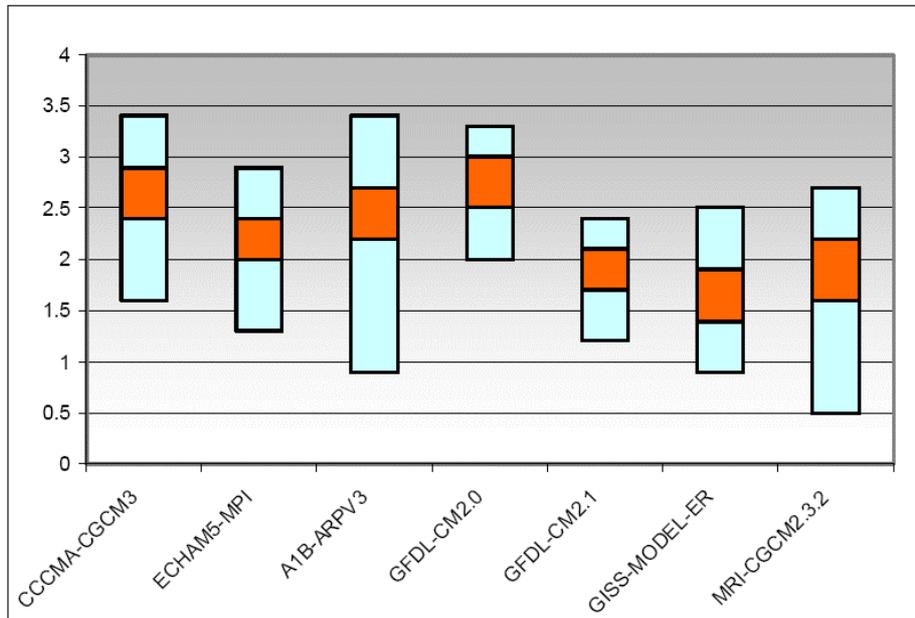


illustration 71 : Ecart de moyenne annuelle de la température quotidienne Safran simulé pour la France métropolitaine entre simulations 2046-2065 et référence 1961-1990 : intervalle de confiance et valeurs extrêmes. Pour l'ensemble des 7 simulations-scénario A1B (en °c) (source Lot 3)

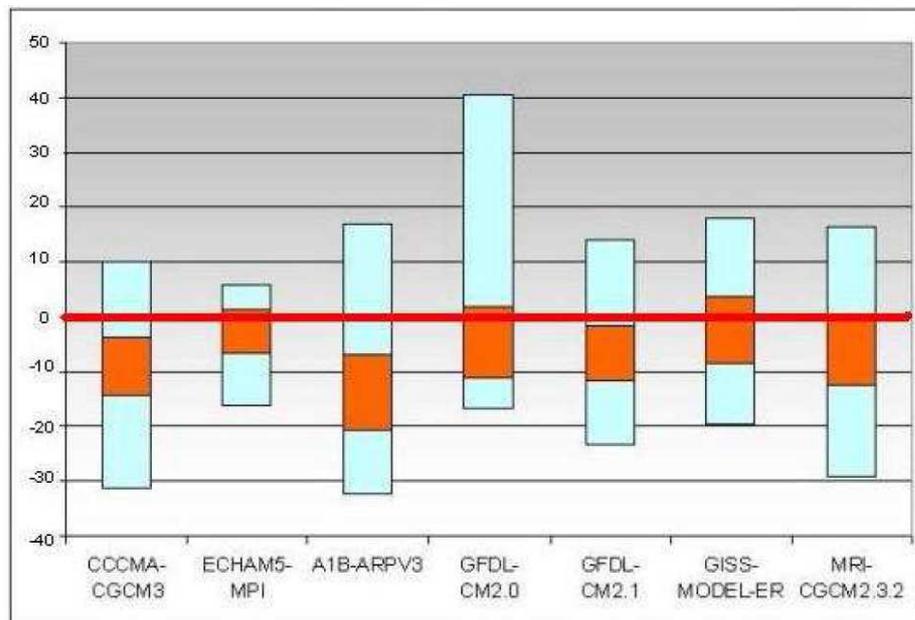


illustration 72 : Rapports moyens du cumul annuel pluviométrique Safran simulé pour la France métropolitaine, pour la période de référence 1961-1990 et rapport entre simulations 2046-2065 et référence pour l'ensemble des 7 simulations-scénario A1B (en % / valeur de réf.) (source Lot 3)

#### 7.4. ANALYSE DES PLUIES EFFICACES :

Les pluies efficaces constituent une information essentielle dans la mesure où elles représentent la totalité des ressources en eau et sont, si l'on considère les écoulements non mesurés comme négligeables et à la différence de stock près, égales à la lame ruisselée. On peut ainsi pour une

période suffisamment grande considérer, en première approximation, que pluie efficace et lame ruisselée sont égales. Sur l'**illustration 73** figurent par bassin versant « explore » les lames ruisselées moyennes interannuelles issues des modélisations GR4 du lot 3. :

- Sur la période 1961/1990 de référence (SAFRAN),
- Les valeurs minimales (en haut à droite), moyennes (bas à gauche) et maximales (bas à droite) obtenues, pour chaque bassin versant, avec les sept modélisations temps futurs

Ces lames ruisselées ont été calculées en définissant le débit moyen de chaque bassin explore, différence entre débit entrant et débit sortant, et en le divisant par sa superficie. Trois bassins, ayant des résultats négatifs ou nuls, sont ainsi représentés en gris foncé : Garonne, Loire moyenne et Rhône aval. Cela provient probablement de la conjonction de plusieurs causes : choix des points de calculs et confluences, ouvrages de régulations, prélèvements significatifs ....

Pour l'ensemble de ces bassins versants, cette **illustration 73** permet de constater une baisse globale de la lame ruisselée sur l'ensemble du territoire, baisse expliquée au paragraphe précédent.

### Modélisations GR4 - lame ruisselée moyenne interannuelle par bassin explore (en mm)

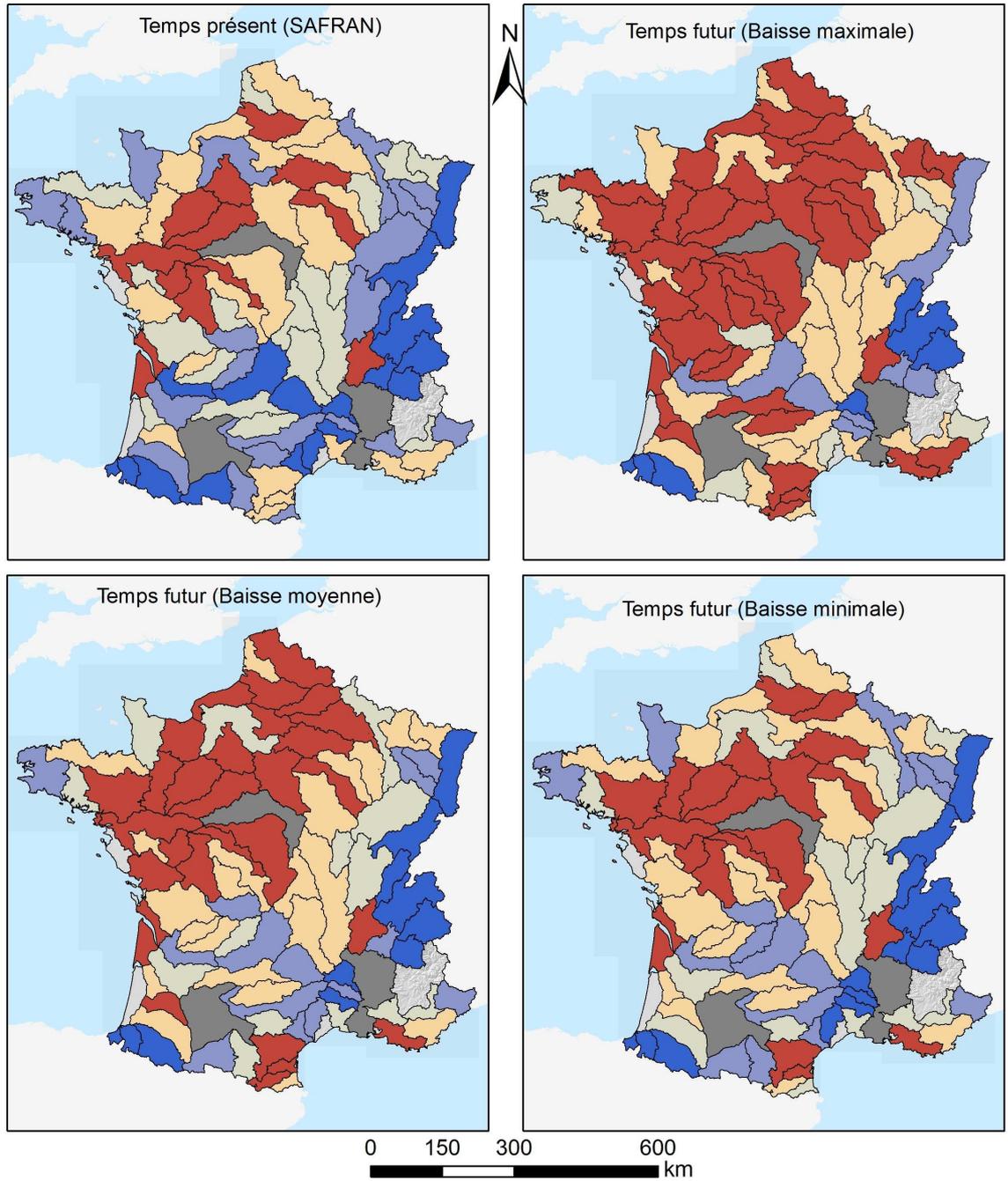
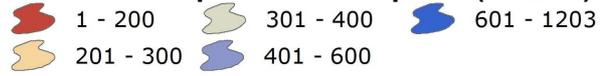


illustration 73 : Lame ruisselée moyenne interannuelle calculée à l'aide du modèle GR4 (Lot 3)

## 7.5. RECHARGE DES AQUIFERES

### 7.5.1. DECOMPOSITION DE LA PLUIE EFFICACE : IDPR

L'IDPR a fait l'objet d'une description détaillée au paragraphe 3.2.1. L'illustration 74 indique l'IDPR obtenue au droit des bassins versants « explore ».

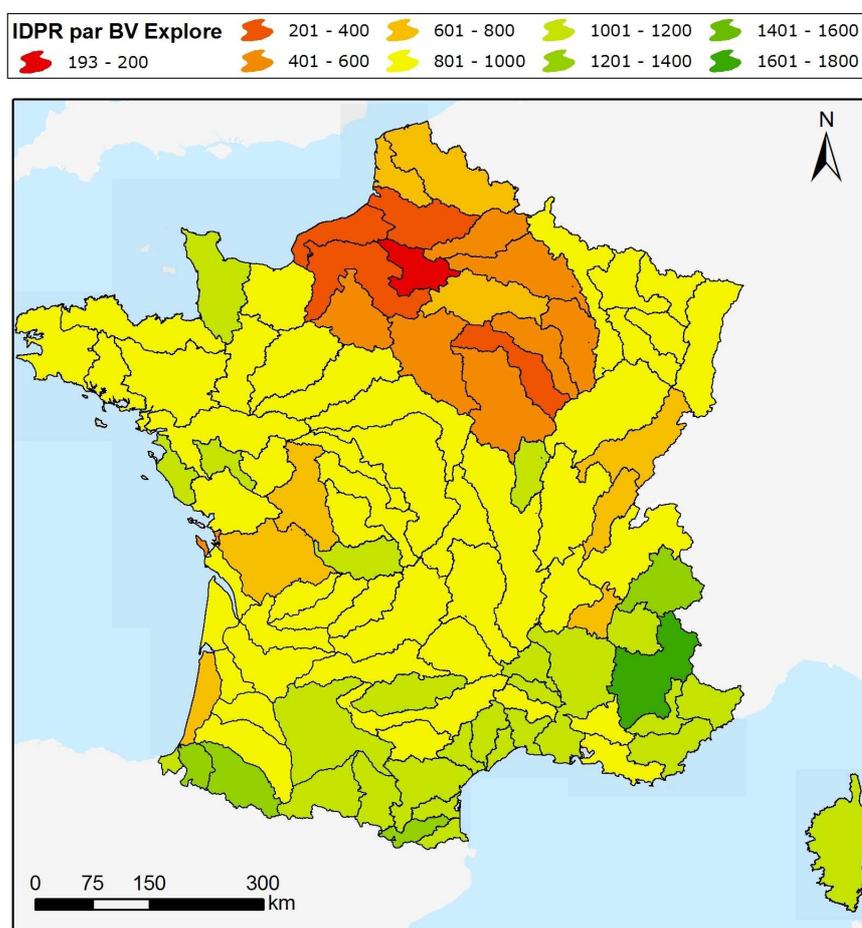


illustration 74 : IDPR calculée au droit des bassins versants explore

### 7.5.2. RECHARGE TEMPS PRESENT

L'illustration 75 permet de comparer les recharges obtenues au moyen des différentes modélisations du lot 3 et du lot 4, la figure :

- en haut à gauche est obtenue en utilisant les données des modélisations hydrodynamiques maillées des aquifères (Bassin Aquitain, Bassin Parisien, Poitou, Somme, Plaine d'Alsace) et par les résultats de la modélisation EROS du bassin de

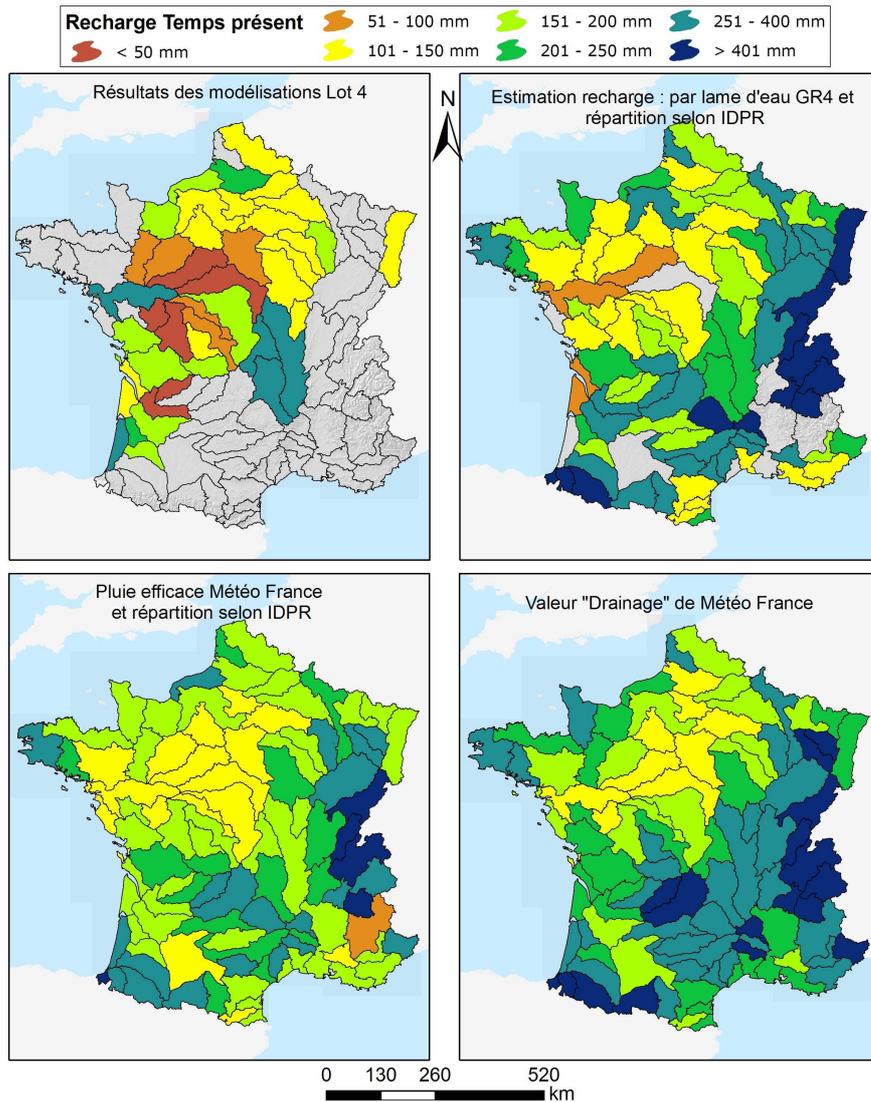
la Loire,

- en haut à droite, est obtenue en considérant l'application de l'IDPR à la lame d'eau ruisselée fournie par le lot 3 avec une modélisation GR4. Cette lame d'eau a été définie par bassin versant explore en soustrayant les débits d'entrée au débit de sortie.
- en bas à gauche, est obtenue en considérant l'application de l'IDPR à la Pluie efficace fournie par le lot 3 Météo France,
- en bas à droite, est obtenue en considérant la valeur de drainage fournie par le lot 3 Météo France, avec le modèle MODCOU.

Il est à noter que la recharge, par modélisation hydrodynamique des aquifères, indiquée pour chaque bassin versant est la recharge par infiltration. Au droit des plaines alluviales il convient, si les berges de la rivière ne sont pas colmatées, d'y ajouter une ressource supplémentaire due aux échanges nappe-rivière. La nappe peut, dans ce cas, se comporter comme un réservoir régulateur. Les principales nappes alluviales sont reportées sur l'illustration 7.

Cette recharge supplémentaire peut être très élevée, voire supérieure à la recharge par infiltration (exemple de la plaine d'Alsace,...) et c'est ce qui explique la différence entre les résultats (illustration 60) du Lot 4 (en haut à gauche) et du lot 3 (en haut à droite). Pour l'Alsace, comme pour certaines autres rivières transfrontalières il est délicat de considérer les apports du bassin versant comme ressource dans la mesure où nous ne maîtrisons pas les aménagements amont.

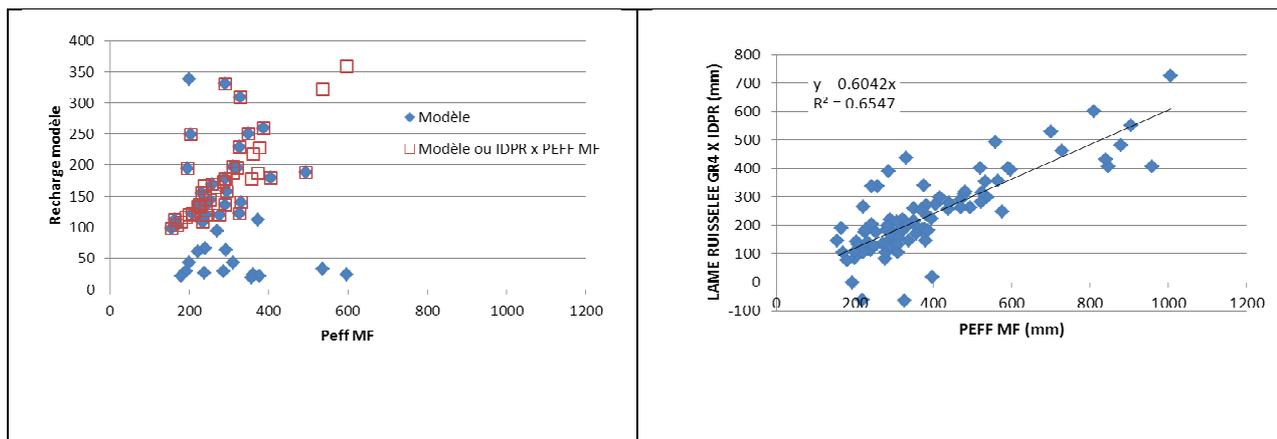
On constate également que la valeur « Drainage » de météo France paraît beaucoup plus forte que celles obtenues par les autres méthodes. Les valeurs fournies varient ainsi entre 66 et 81% de la pluie efficace avec une valeur moyenne de 75%.



**illustration 75 : Comparaison des recharges temps présent obtenues par modélisation hydrodynamique maillée, modélisation hydrologique, par IDPR et pluie efficace Météo France et les valeurs de Drainage Météo France.**

Afin de comparer les différentes valeurs obtenues l'illustration 76 fournit les corrélations entre la pluie efficace Météo France et la recharge:

- résultante des modèles hydrodynamiques (graphique de gauche, points bleus),
- calculée à partir de la lame ruisselée GR4 et de l'IDPR (graphique de droite).



**illustration 76 : Corrélation entre les recharges calculées et la pluie efficace Météo France**

L'analyse du graphique de gauche permet de constater qu'il y a deux catégories de points qui nuisent à l'obtention d'une corrélation acceptable:

- les recharges fournies par MONA (modèle du bassin aquitain) qui par construction ne s'intéresse qu'aux aquifères profonds (nappes captives). Les recharges calculées sont de ce fait très faibles car elles n'incluent pas les recharges des aquifères de surface,
- certaines valeurs du bassin de la Loire qui ont été définies au moyen du modèle EROS (modélisation hydrologique semi globale ; § 5.3) et calculées suivant la même méthodologie que celles de GR4 : différence entre débit entrant et débit sortant divisé par la superficie du bassin considéré. Or la présence d'ouvrages de régulation en amont, sur ces cours d'eau (Loire, Vienne, Creuse,..) crée des différences temporelles, du stockage, des pertes (évaporation) et/ou prélèvements qui s'additionnent, dans le cas de fleuves ou de grandes rivières, à des échanges nappes rivière, le tout pouvant ainsi conduire à des estimations faibles, nulles voire même négatives de la recharge.

L'analyse du graphique de droite de l'illustration 76 permet quant à lui de :

- confirmer le point précédent concernant la Loire car l'on retrouve la même problématique pour les bassins versant explore du Rhône moyen et Rhône aval, de la Loire moyenne et de la Garonne moyenne,
- constater une bonne corrélation, en éliminant ces 4 points, entre pluie efficace Météo France et lame ruisselée définie au moyen des résultats GR4 associés à l'IDPR.

Nous avons donc dans un premier temps remplacés les points de MONA et ceux du bassin de la Loire par les valeurs de recharge obtenues au moyen de l'IDPR et de la pluie efficace Météo France, points modifiés reportés sur le graphique de gauche de l'illustration 76 (carré rouge).

Dans un deuxième temps et afin de compléter les zones non modélisés, nous avons estimé la recharge des bassins versants explore au moyen de la pluie efficace Météo France et de l'IDPR (illustration 74). La corrélation ainsi obtenue figure sur l'illustration 77.

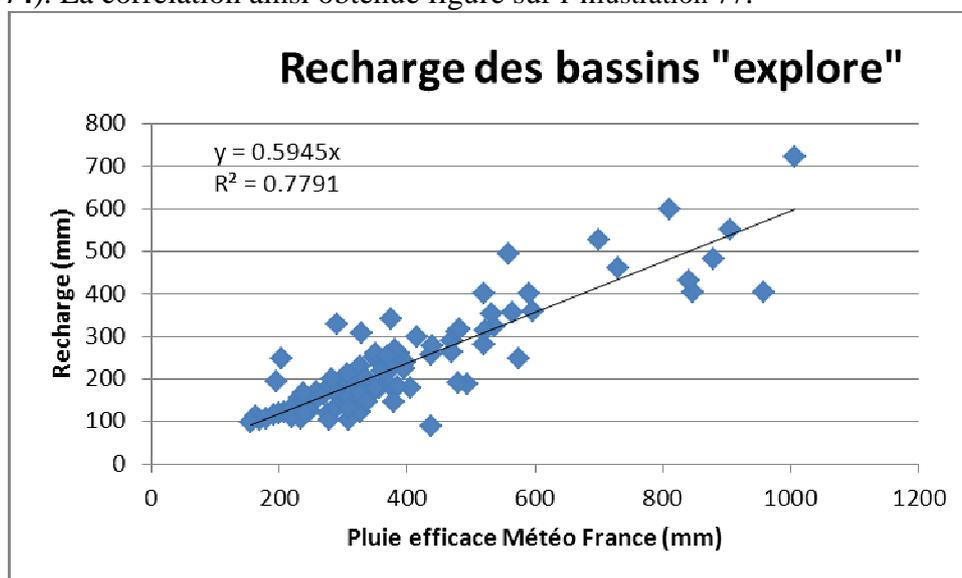


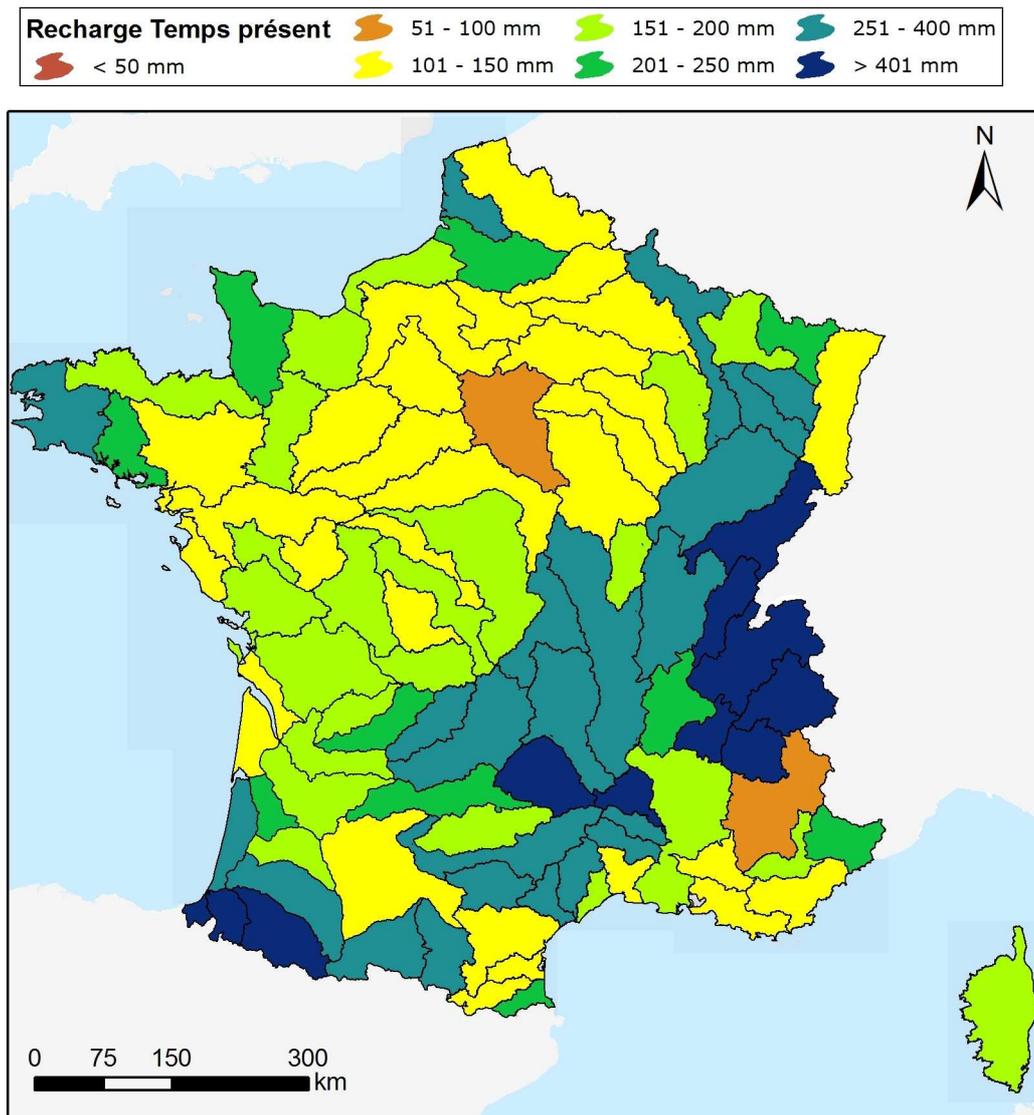
illustration 77 : Corrélation Pluie efficace Météo France- Recharge des bassins « Explore »

On peut noter que la pente est sensiblement identique à celle obtenue avec les valeurs issues de GR4 (illustration 76 graphique de droite), valeur qui représente le pourcentage moyen de la pluie efficace constituant la recharge.

La recharge retenue, in fine, pour les bassins versants explore (illustration 78) est ainsi constituée des valeurs :

- Obtenues par modélisations hydrodynamiques complétées pour les bassins non modélisés par,
- La recharge obtenue à l'aide de la lame ruisselée au moyen des résultats GR4 et de l'IDPR,
- pour les points manquants ou douteux restants (Rhône moyen, Rhône aval, Loire moyenne, Garonne moyenne), par la recharge obtenue à l'aide de la pluie efficace Météo France et de l'IDPR.

Hormis quelques bassins où les résultats fournissent une recharge proche voire supérieure à la pluie efficace et dont les valeurs peuvent être considérées comme légèrement surestimées, la recharge ainsi obtenue varie entre 20% (Durance\*) et 90 % de la pluie efficace avec une valeur moyenne comprise entre 55 et 60%. En valeur absolue, elles varient de 88 mm (Durance\*) ou 98 mm (Seine) à 600 mm (Pays Basque) voire 724 mm (Ain) autour d'une valeur moyenne d'environ 230 mm (Leyre, Cotentin,...).



**illustration 78 : Carte de la recharge temps présent**

*\*Nota Bene : Il faut toutefois noter que les débits utilisés ne sont pas des débits naturalisés et donc, hormis les recharges obtenues par modélisations hydrodynamiques, les prélèvements ne sont pas intégrés. Ils sont souvent, à part dans le sud de la France, inférieurs ou de l'ordre de la précision des débits des stations. Dans le sud ceux-ci peuvent atteindre des valeurs non négligeables et fausser les chiffres annoncés, c'est probablement le cas de la Durance amont.*

La recharge des aquifères profonds exploités d'Aquitaine est quant à elle évaluée comme variant entre 18 et 40 mm.

### 7.5.3. RECHARGE TEMPS FUTUR

La recharge temps futur est déterminée de façon similaire. Toutefois, afin de préciser les incertitudes dérivant des différents modèles climatiques utilisés dans le cadre de cette étude, il apparaît nécessaire de fournir non seulement la valeur moyenne obtenue par l'intermédiaire des sept modèles climatiques mais également les valeurs maximales et minimales des écarts évalués entre la recharge future et la recharge actuelle par chacun de ces modèles. Il y a donc trois cartes proposées permettant ainsi de fournir une évaluation moyenne et des évaluations minimales et maximales.

Sur chacune des illustrations, fournissant valeurs extrêmes et moyenne, il a été reporté :

- Variation de la recharge temps futur/temps présent obtenue par modélisation hydrodynamique maillée des aquifères (en haut à gauche),
- Variation de la recharge temps futur/temps présent obtenue par modélisation hydrologique GR4 (lame ruisselée) et IDPR (en haut à droite),
- La variation, in fine retenue, obtenue à partir des deux cartes précédentes.

Une corrélation entre les résultats obtenus avec les deux méthodes a bien été tentée mais n'a pas été possible tant l'écart entre les valeurs fournies par les différents modèles sont significatifs. A titre d'exemple l'illustration 66 montre la relation entre l'écart maximal de la recharge (recharge minimale) temps présent/temps futur obtenu par modélisation Lot 3 et modélisation Lot 4.

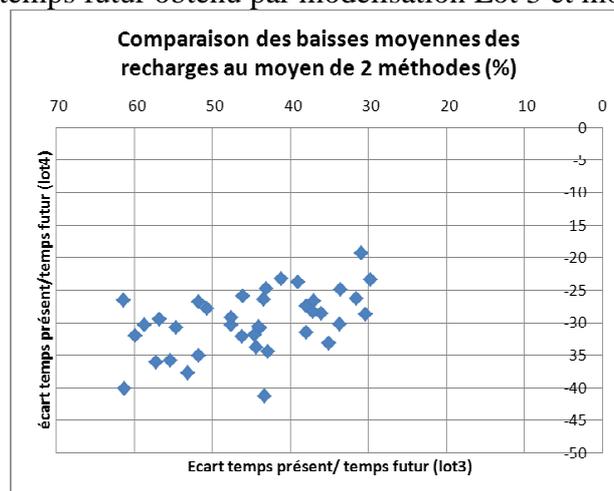


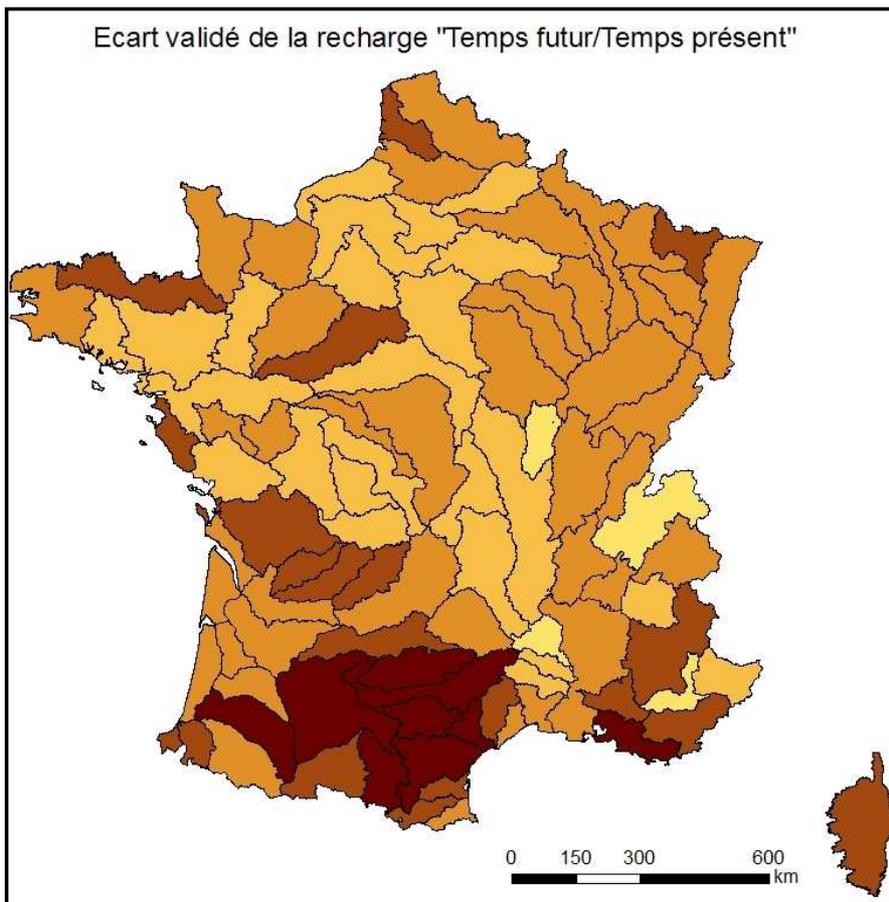
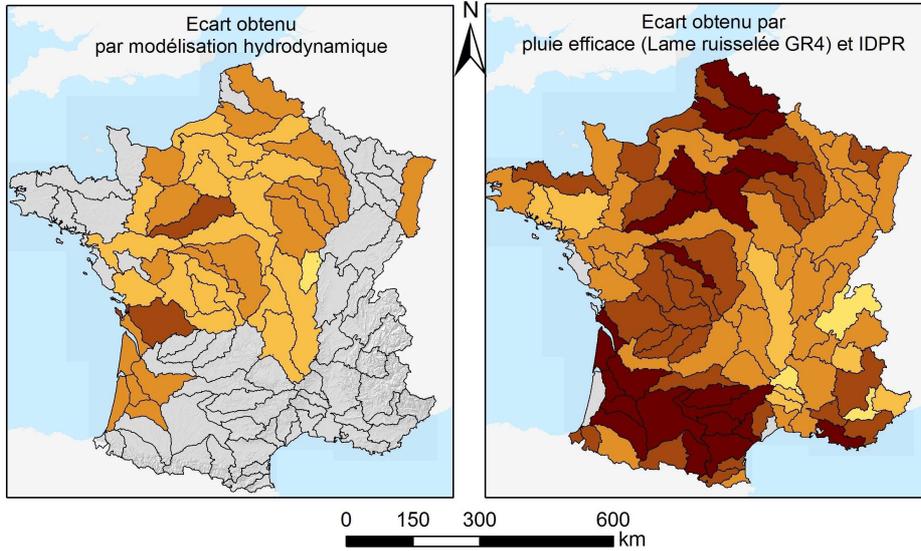
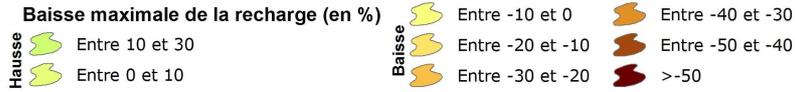
illustration 79 : Comparaison des écarts temps présent/temps futur de la recharge calculée par les lots 3 et 4

L'examen de ces cartes indique, pour la valeur moyenne (**illustration 81**), 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 55%.

Pour un certain nombre de bassins versants particuliers, non modélisés dans le cas du projet Explore, on peut citer notamment les bassins versants de montagne ayant une plaine aquifère située en aval du bassin et en amont immédiat de la mer (par exemple Plaine du var, ....) la recharge renouvelable sera directement dépendante des débits d'étiage qui sont susceptibles d'entrer dans cette plaine. Ces débits, fortement dépendants des débits de fonte des neiges, risquent par suite du réchauffement des températures de se trouver avancé de plusieurs semaines dans la saison. La période d'étiage serait ainsi prolongée et les débits d'étiage seraient ainsi plus sévères. Les réserves et/ou ressources renouvelables sont, dans ce cas, directement dépendantes des résultats du lot 3 (hydrologie de surface).

ECART MAXI DE LA RECHARGE "TEMPS FUTUR/TEMPS PRÉSENT"



- illustration 80 : Enveloppe maximale de l'écart de la recharge temps futur/ temps présent obtenue par modélisation hydrodynamique maillée et modélisation hydrologique et écart maximal retenu.

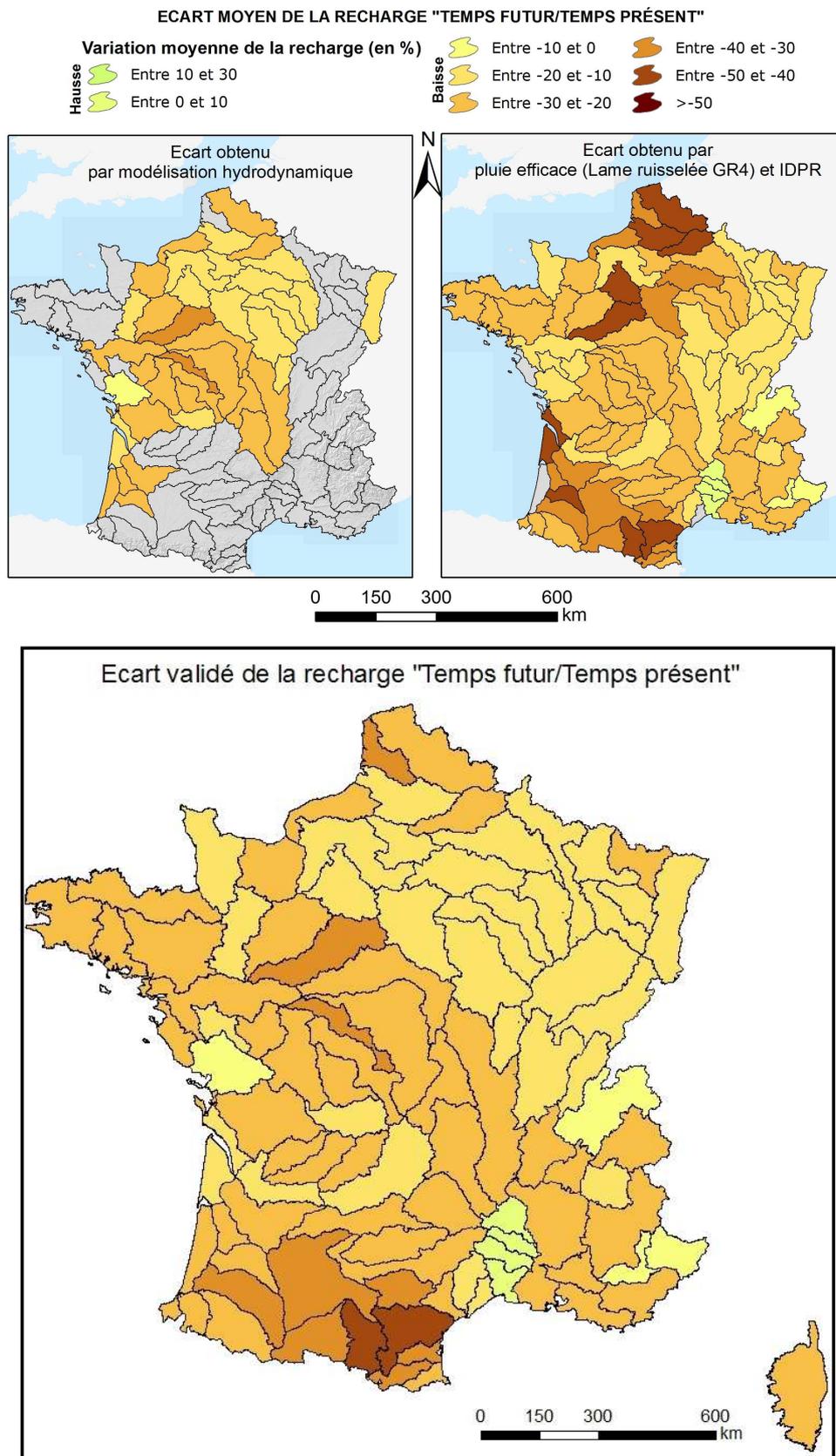


illustration 81 : Enveloppe moyenne de l'écart de la recharge temps futur/ temps présent obtenue par modélisation hydrodynamique maillée et modélisation hydrologique et écart maximal retenu.

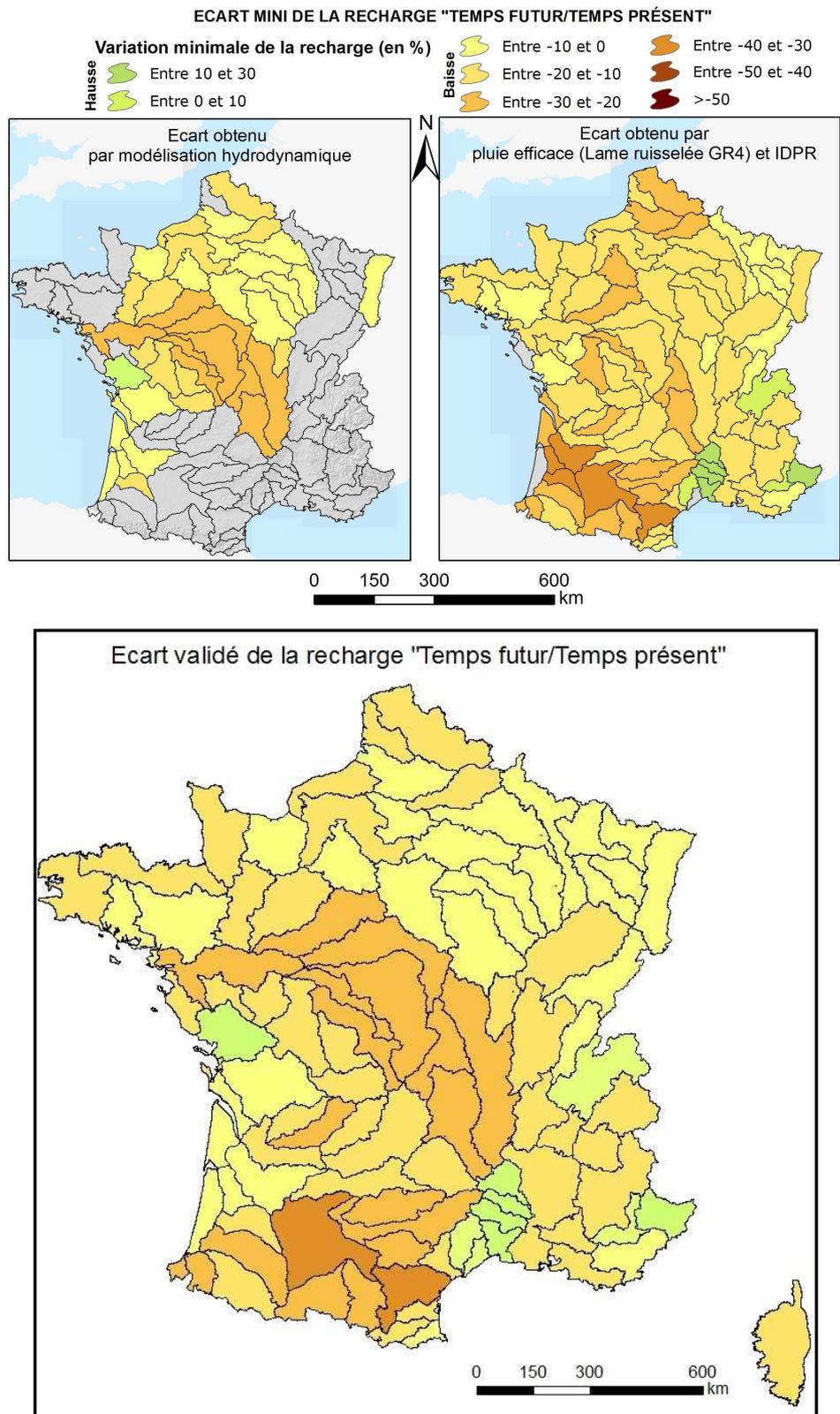


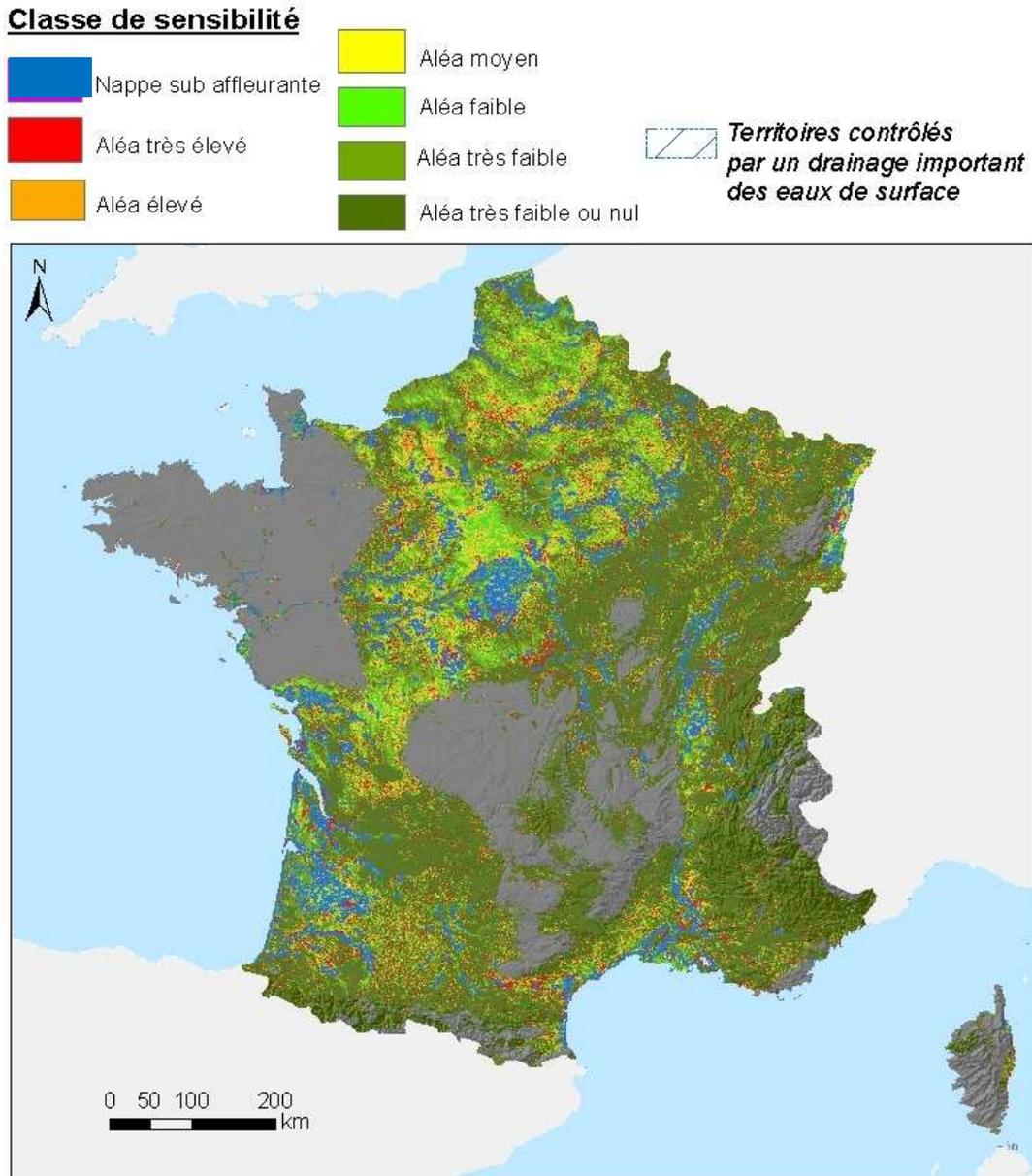
illustration 82 : Enveloppe minimale de l'écart de la recharge temps futur/ temps présent obtenue par modélisation hydrodynamique maillée et modélisation hydrologique et écart maximal retenu.

## **7.6. NIVEAUX PIEZOMETRIQUE**

### **7.6.1. EVENEMENTS EXCEPTIONNELS : REMONTEE DE NAPPE**

Par suite des prévisions climatiques émises qui prévoient toutes une diminution de la recharge, l'utilisation des modèles a été fortement orientée vers l'étude des baisses de niveaux piézométriques. Toutefois, certains modèles climatiques prévoient dans certaines régions des augmentations, pouvant être significatives, de la pluviométrie hivernale et une diminution par endroit des pompages (notamment industriels) qui pourraient, suivant les caractéristiques géologiques locales entraîner une augmentation momentanée des niveaux piézométriques. On pourrait donc, dans certains secteurs et notamment dans les secteurs déjà concernés, constater une aggravation des inondations par remontée de nappe.

L'illustration 83 présente les zones pouvant être actuellement soumises à remontées de nappes, zones qui sont susceptibles d'être impactées par l'évolution du climat et ou l'arrêt de pompage mais dont l'amplitude est difficile à estimer.



**illustration 83 : Carte de sensibilité aux remontées de nappes**

### **7.6.2. NIVEAU PIEZOMETRIQUE HORS EVENEMENTS EXCEPTIONNELS**

Ainsi que l'ont montré les différentes modélisations réalisées, quel que soit le modèle climatique envisagé, le changement climatique va occasionner une diminution de la recharge. Celle-ci va entraîner une baisse de la piézométrie. Cette baisse sera directement dépendante de la diminution de la recharge et de sa répartition temporelle mais aussi des caractéristiques spécifiques à chaque domaine aquifère.

Pour les nappes superficielles, cette baisse sera généralement forte sur les plateaux ou versants et beaucoup plus restreinte, voire nulle, à proximité des cours d'eau et/ou des plaines alluviales.

Par rapport au temps présent et pour tous les modèles climatiques étudiés, l'ensemble des piézomètres montrent une baisse du niveau moyen mensuel de la nappe liée à la baisse de la recharge. Les données issues des modèles ARPV3 et CFDL- CM2.0 sont celles qui fournissent les simulations les plus pessimistes alors que les données des modèles GISS et CFDL CM2.1 fournissent les plus optimistes, et ce avec une variabilité très importante.

L'amplitude des variations du niveau de la nappe dans un piézomètre dépend de la variation de la recharge mais aussi de la localisation du piézomètre. Sur les plateaux, les niveaux de la nappe sont relativement plus hauts et réagissent plus à la variation de la recharge comparé aux piézomètres qui sont proches de la rivière pour lesquels le niveau de la nappe est très liés au niveau de la rivière et à la cote topographique.

D'après les différentes modélisations réalisées il ressort :

- Que les modèles optimistes indiquent une légère baisse des niveaux de l'ordre de 0.5 m à 1.5 m, voire pour certaines régions (Aquitaine, Poitou, ) une hausse locale possible.
- Que les modèles pessimistes indiquent une baisse très limitée de la piézométrie au droit des plaines alluviales mais de fortes baisses, pouvant atteindre 10 m, sur les plateaux et ou contreforts au droit des bassins sédimentaires, les baisses étant conséquentes mais plus limitées sur le socle (1 à 4m).

Ces baisses des niveaux piézométriques sont susceptibles d'entraîner :

- Une diminution des débits d'étiage,
- Une diminution de la longueur des cours d'eau pérennes et par conséquence une augmentation des parties de cours d'eau régulièrement « à secs »,
- Une diminution, voire un assèchement, du débit des sources,
- Le long du littoral, une remontée du biseau salé (cf. §8).

## **7.7. EVOLUTION DES DEBITS**

De même que pour les niveaux piézométriques, les résultats concernant les débits sont très contrastés entre les sept modèles climatiques. Toutefois, pratiquement tous les modèles climatiques montrent une baisse du débit moyen mensuel des cours d'eau à l'horizon 2065. Par ailleurs, cette baisse semble diminuer du sud vers le nord de la France métropolitaine mais elle varie également en fonction de conditions locales spécifiques (géologie, altitude, présence d'ouvrages ...). Cette baisse varie globalement entre 10 et 40 % dans la moitié nord et 30 à 50% dans la moitié sud avec quelques extrêmes obtenus pour quelques modèles climatiques pouvant atteindre, semble-t-il, 70%. La répartition annuelle des débits est également modifiée dans la mesure où l'on constate :

- une aggravation des débits d'étiage (baisse variant généralement entre 30 et 70%),

- une stagnation voire une légère baisse des débits hivernaux.

Cette baisse relative des débits hivernaux n'empêche pas, toutefois, de constater, sur certains bassins versants et pour quelques modèles climatiques, la possible apparition de forts débits hivernaux (Somme, Rhin, ...) confirmant ainsi la possible apparition de crues longues. Pour les crues plus rapides, le pas de temps des modélisations ne permet pas de déterminer s'il peut y avoir un impact.

## 7.8. PRELEVEMENTS

### 7.8.1. PRELEVEMENTS 2006

L'illustration 84 fournit la répartition par bassin versant « explore » des prélèvements en eau souterraine 2006 fournie par le BIPE sur fond de la carte des recharges. On constate que les prélèvements les plus importants se situent dans le bassin Parisien, le Nord, la Plaine d'Alsace et la vallée du Rhône.

Dans le sud de la France, les prélèvements en eau souterraine sont relativement faibles car la majeure partie des prélèvements sont réalisés sur les eaux de surface.

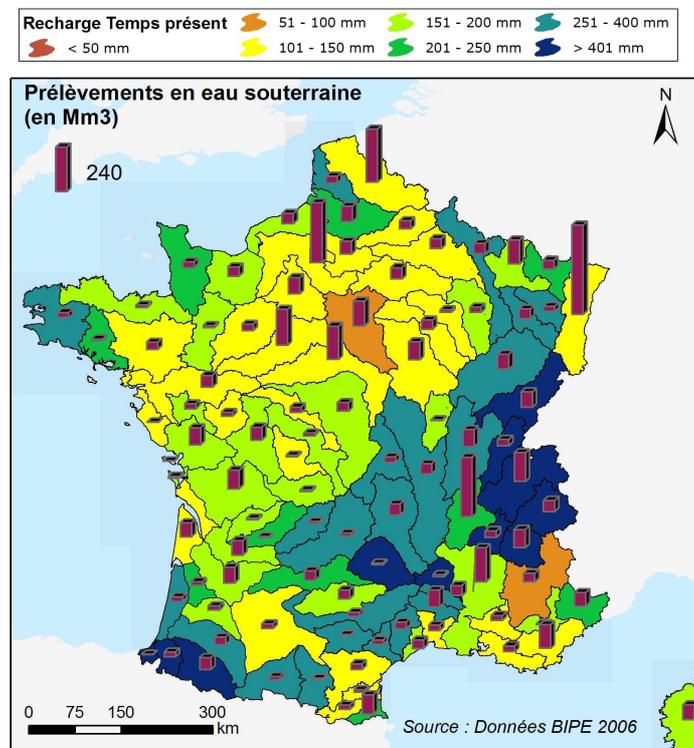


illustration 84 : Prélèvements en eau souterraine par bassin versant « explore » en 2006 (données BIPE)

### 7.8.2. PRESSION SUR LA RESSOURCE

L'illustration 85 fournit la pression par bassin versant « explore » liée aux prélèvements en eau souterraine 2006 fournie par le BIPE sur fond de la carte des recharges. On constate que la pression est maximale sur certains bassins du bassin Parisien (Loire Moyenne, Seine aval, ..) le Nord, la Plaine d'Alsace, la vallée du Rhône et le Tet. Toutefois ainsi que signalé précédemment, les recharges prises en compte n'incluent pas les échanges nappe rivière qui sont généralement importants au droit des grandes plaines alluviales telles que l'Alsace.

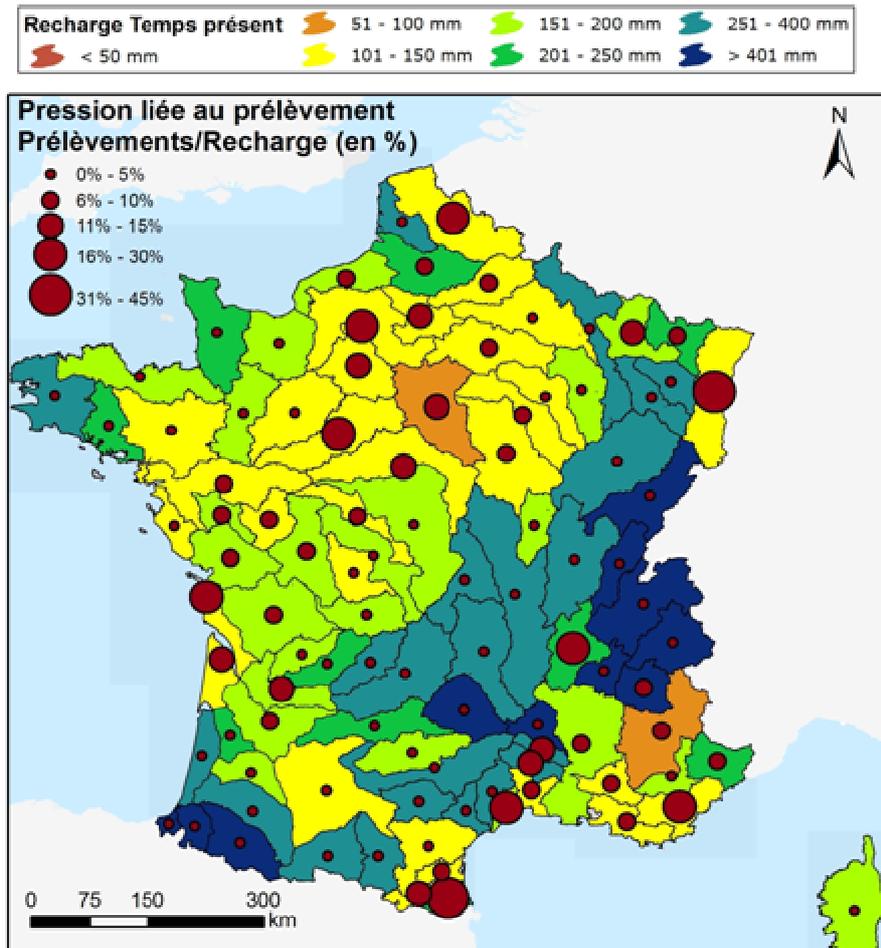


illustration 85 : Pression liée aux prélèvements en eau souterraine par bassin versant « explore » (données BIPE, 2006)

### 7.8.3. INFLUENCE DES PRELEVEMENTS EN 2070 SUR LES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES

L'illustration 86 montre la variation des prélèvements en eau souterraine proposé par le BIPE entre 2006 et 2070. On constate principalement :

- Une réduction très importante des prélèvements industriels,
- Une stagnation voire une baisse des prélèvements agricoles,
- Une augmentation de la demande AEP le long des côtes, notamment la côte atlantique, en Savoie et en Languedoc Roussillon.

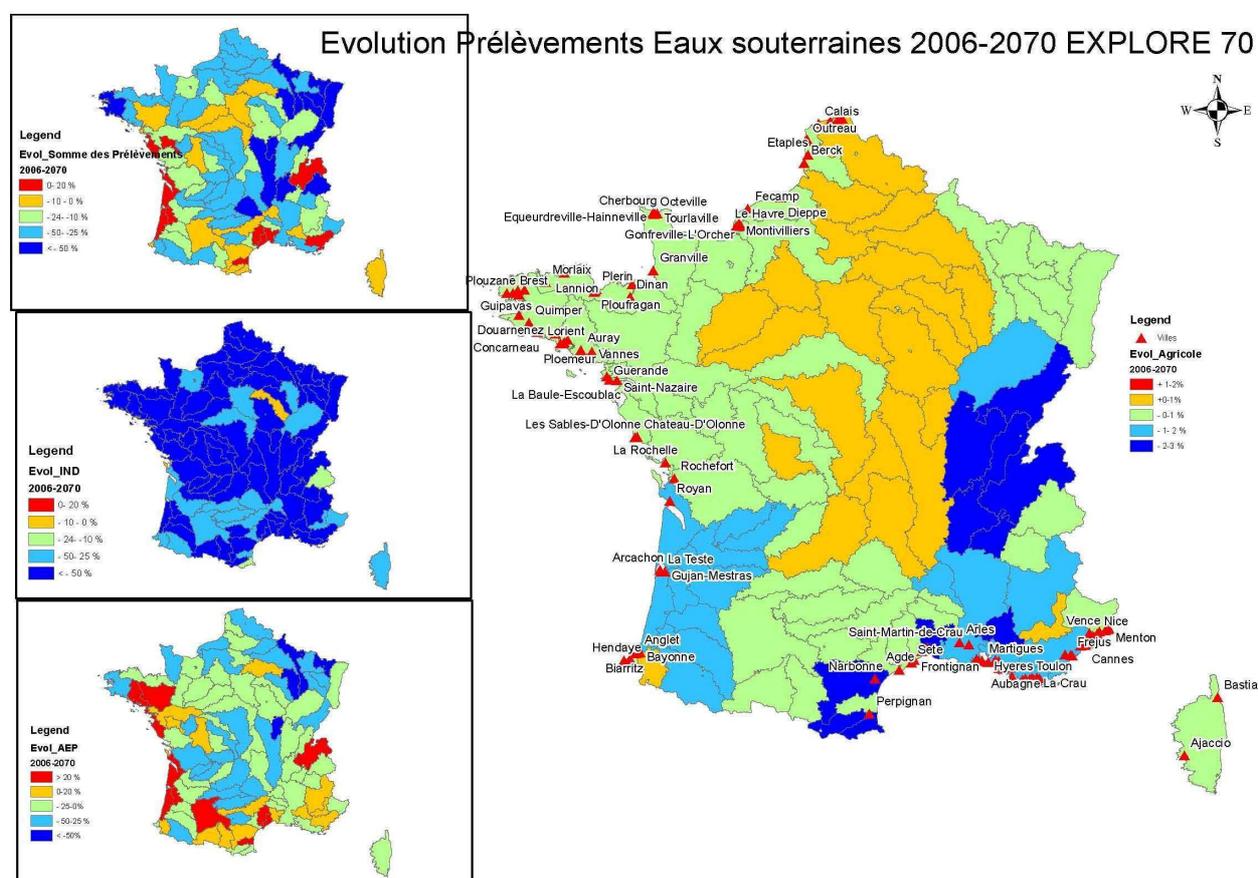


illustration 86 : Evolution des prélèvements en eaux souterraines entre 2006 et 2070

D'une manière générale la relativement faible influence de la prise en compte des modifications des prélèvements en nappe sur les niveaux piézométriques moyens des formations aquifères du bassin ne modifie que très faiblement la réponse sur le débit des grands cours d'eau.

Par suite de la variation des prélèvements en eau souterraine proposé par le BIPE entre 2006 et 2070 qui se caractérise par:

- Une réduction très importante des prélèvements industriels,

- Une stagnation voire une baisse globalement très légère des prélèvements agricoles,
- Une augmentation de la demande AEP le long des côtes, notamment la côte atlantique, en Savoie et en Languedoc Roussillon,

L'impact va généralement se limiter à :

- Une légère remontée des niveaux piézométriques, sauf au droit des ouvrages eux-mêmes où l'arrêt des pompages va entraîner une remontée ponctuelle importante,
- Une faible, voire insignifiante, augmentation des débits d'étiage,
- Une baisse au droit des zones où les prélèvements vont augmenter (cf. illustration 86), baisse dont l'amplitude dépendra notamment de l'augmentation de la demande mais également des caractéristiques de l'aquifère concerné. En aquitaine, par exemple, on notera notamment une baisse possible d'environ 2 m pour le plio-quatenaire le long de la côte, baisse pouvant atteindre 12 m pour l'Eocène.

## **8. IMPACT SUR LES AQUIFERES COTIERS**

Dans le cadre de l'action N°4 « Montée du niveau marin induite par le changement climatique : Conséquences sur l'intrusion saline dans les aquifères côtiers en Métropole » de la convention ONEMA-BRGM 2010, des premières actions ont été menées et font l'objet d'un rapport d'avancement (RP-59456-FR) dont sont extraits les résultats suivants. On se reportera au rapport pour de plus amples informations concernant la méthodologie.

### **8.1. INTRODUCTION**

Les aquifères côtiers ou littoraux sont en contact avec la mer ou l'océan qui constitue leur limite aval ; ils sont plus ou moins sensibles aux intrusions salines en conditions naturelles tout comme sous influence anthropique. Cette sensibilité est donc liée à des facteurs internes (le type d'aquifère, les propriétés hydrodynamiques, l'hétérogénéité) et à des facteurs externes : l'exploitation pour différents usages (alimentation en eau potable, tourisme, agriculture, industrie), la recharge (précipitation efficace), le niveau marin.

Les zones côtières font partie des secteurs les plus prisés par le tourisme ; elles sont également le lieu de sédentarisation des retraités français ou nord-européens. Elles constituent également des secteurs fortement convoités pour le maraîchage, l'arboriculture, en particulier sur la façade méditerranéenne. Les aquifères y représentent très souvent des ressources en eau importantes, tandis que les eaux de surface peuvent être sujettes à des forts étiages en été. Les enjeux de développement économique sont importants sur ces territoires.

L'augmentation du niveau marin associée aux changements climatiques constitue un des processus significatifs qui va jouer un rôle sur l'intrusion saline. Ainsi, selon les travaux du GICC, le réchauffement planétaire conduirait en 2100 à une augmentation du niveau marin comprise entre 110 et 880 mm, et à une migration du biseau salé.

L'impact d'une remontée de niveau marin et des modifications des conditions de recharge sur les aquifères côtiers nécessite de procéder à un diagnostic à l'échelle métropolitaine.

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. L'eau salée d'une densité moyenne de 1.025 kg/l a ainsi tendance à pénétrer vers les terres sous l'action du gradient de densité.

L'intrusion d'eau salée a de manière générale la forme d'un biseau plongeant vers l'intérieur des terres, d'où son appellation commune de « biseau salé ». Ce contact entre ces eaux de densité différentes va évoluer suivant les lois de la diffusion et de l'hydrodynamique mais également suivant l'exploitation de l'aquifère et sa recharge par les précipitations. Ce contact ne constitue par une interface nette, du fait de la miscibilité des fluides de densité différente, une zone de transition va prendre place.

Sous l'impact du changement climatique, plusieurs estimations co-existent actuellement pour l'élévation du niveau marin. Les estimations basses vont de 0.18 à 0.59 m pour 2100. D'autres proposent une élévation du niveau marin moyen de l'ordre du mètre ou au-delà

Aux vues des différentes publications sur le sujet ainsi que des rapports du GIEC, il est possible de donner une fourchette de l'estimation de l'élévation du niveau marin en 2100 : de 0,2 à 2m.

Dans le cadre de cette action il été choisi de retenir :

- Pour la façade Atlantique : scénarios avec 60 cm et 1m d'augmentation du niveau marin ;
- Pour la façade Méditerranéenne – scénarios de 0.35m et 1 m d'augmentation du niveau marin, se traduisant pour ce dernier en considérant les marées, vagues... par une augmentation de 1.6m (résultats du projet ANR MISEEVA).

## **8.2. METHODOLOGIES UTILISEES VIS-A-VIS DE LA VULNERABILITE DES AQUIFERES**

La vulnérabilité des aquifères a été définie par Margat dès 1968, comme étant le degré d'exposition de la nappe d'eau souterraine à une pollution exogène. L'agence américaine de l'environnement (US-EPA) fait la distinction entre les notions de sensibilité et de vulnérabilité d'un aquifère. Elle définit la sensibilité comme « la facilité relative avec laquelle un contaminant appliqué en surface peut atteindre un aquifère » et la vulnérabilité comme la sensibilité d'un aquifère en fonction des caractéristiques du milieu et de la nature du contaminant et de son mode d'application en surface.

Pour étudier la vulnérabilité des ressources en eaux face à divers sources de pollutions diffuses, de nombreuses méthodes ont été développés, allant des plus complexes avec des modèles prenant en compte les processus physiques, chimiques et biologiques dans la zone saturée, à des méthodes de cartographie et de pondération de différents critères pouvant affecter la vulnérabilité. Elles peuvent être classées selon trois grandes familles de méthodes (Mardhel et al., 2005) :

Les modèles de simulation : ils consistent à trouver une solution numérique à des équations mathématiques représentant le processus de transfert des polluants dans l'aquifère. Ils donnent une représentation de la vulnérabilité spécifique de la nappe car le « calage » des modèles dépend des caractéristiques des polluants pris en compte ;

Les méthodes statistiques : elles sont basées sur une variable qui dépend de la concentration de polluants ou d'une probabilité de distribution des polluants. Ces méthodes intègrent des données sur la distribution des contaminants dans l'aquifère et fournissent des caractéristiques sur les probabilités de contamination. Elles donnent une représentation de la vulnérabilité spécifique de la nappe.

Les méthodes de cartographies à index : elles se basent sur la superposition de cartes de divers paramètres caractérisant l'aquifère (critères de vulnérabilité), en donnant une note numérique à chaque paramètre. La combinaison des cartes se fait au moyen des outils de traitement multicritères et sous SIG. La représentation du degré de vulnérabilité en classes (intervalles de valeurs) permet une visualisation rapide concernant une zone donnée, et la comparaison aisée de la vulnérabilité de différentes zones.

Une méthode de type simulation est développée au point 8.3 sur le marais poitevin et une méthode de type cartographie à index est développée au point 8.2. Il s'agit de cartographier la vulnérabilité des aquifères côtiers vis-à-vis du contexte d'intrusion saline et de l'augmentation du risque lors d'une remontée du niveau marin à l'aide de la méthode GALDIT développée dans le cadre d'un projet européen, travail réalisé dans le cadre de la convention ONEMA-BRGM. .

La plupart des méthodes de cartographies à index sont basées sur l'affectation de pondérations (p) à quelques paramètres ou critères, préalablement sélectionnés pour l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines. En fonction de la variabilité naturelle des paramètres, des intervalles ou classes de valeurs sont prédéfinis. Des index, appelés aussi notes ou rangs (R), sont attribuées à chaque intervalle selon son importance dans le système aquifère étudié. L'index final de vulnérabilité est évalué par la somme pondérée des notes attribuées aux différents paramètres :

Dans les cas de la vulnérabilité intrinsèque, les paramètres sélectionnés prennent en compte, les trois milieux : le sol, la Zone Non Saturée (ZNS) et la Zone Saturée. Les paramètres les plus utilisés pour la cartographie de la vulnérabilité des aquifères sont les suivants :

Paramètres liés au sol : nature du sol (texture, structure), épaisseur, topographie (ruissellement/infiltration), nature lithologie de couverture au sens large y compris des formations géologiques sus-jacentes à l'aquifère ;

Paramètres liés à la zone non saturée : épaisseur de la ZNS, approximation de la conductivité hydraulique, nature lithologie, fracturation ;

Paramètres liés à la zone saturée : transmissivité/conductivité hydraulique, direction d'écoulement, lithologie, ...

Les méthodes les plus couramment utilisées sont explicitées dans plusieurs ouvrages et rapports, tel que par exemple dans le rapport BRGM de Vernoux et al. (2007).

Les méthodes de cartographie à index ont pour objectif de représenter les différents niveaux de vulnérabilité potentielle des eaux souterraines sur un support cartographique. Cette représentation utilise différentes échelles (nationale, régionale ou locale), selon les objectifs recherchés (communication, gestion de la ressource, protection de la ressource ou protection de captage) et la précision des différents paramètres de la vulnérabilité.

L'analyse de la vulnérabilité d'un aquifère par rapport à l'intrusion saline est un cas particulier à la fois de la vulnérabilité spécifique et de la vulnérabilité intrinsèque, d'une certaine manière. Des critères de salinisation doivent être pris en compte en plus des critères relatifs à la vulnérabilité intrinsèque. Dans ce sens, il s'agit d'une vulnérabilité spécifique. En termes de méthode de

cartographie à index, la méthode GALDIT est la seule méthode dédiée à la vulnérabilité des aquifères côtiers par rapport à l'intrusion saline.

La méthode GALDIT est une méthode de cartographie de la vulnérabilité des aquifères côtiers, dédiée aux risques d'intrusion saline. Elle a été initialement développée par *Chachadi et Lobo-Ferreira (2001)* dans le cadre du projet euro-indien COASTIN (programme INCO DEV du 4ème PCRD). La méthode a été notamment appliquée dans les régions côtières de Goa en Inde et d'Algarve au Portugal (*Lobo-Ferreira et al, 2005a 2005b*).

GALDIT est une approche de « cartographie à index » simple d'utilisation, nécessitant peu de données. La détermination de l'indice de vulnérabilité des eaux souterraines par rapport à l'intrusion saline est fondée sur la combinaison de six paramètres pouvant influencer l'intrusion saline potentielle :

- Le type d'aquifère, libre, captif et semi-captif (**G**roundwater occurrence) ;
- La conductivité hydraulique de l'aquifère (**A**quifer hydraulic conductivity) ;
- La profondeur de la nappe en dessous du niveau de la mer (**D**epth to groundwater **L**evel above sea) ;
- La distance par rapport à la côte (**D**istance from the shore) ;
- L'impact de l'état actuel de l'intrusion saline dans la zone d'étude (**I**mpact of existing status of seawater intrusion in the area) ;
- L'épaisseur de l'aquifère (**T**hickness of the aquifer).

Une indexation de la vulnérabilité et une classification des potentialités d'une intrusion saline dans un contexte géologique donné sont établies à partir des six paramètres de GALDIT.

### **8.3. TEST DE CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE DES AQUIFERES COTIERS A DIFFERENTES ECHELLES : NATIONALE ET REGIONALE**

La cartographie de la vulnérabilité des aquifères côtiers vis-à-vis d'une intrusion marine en contexte de surélévation de niveau marin, peut être abordée à l'échelle nationale – de la France Métropolitaine ainsi qu'à l'échelle régionale. Ce sont deux approches complémentaires.

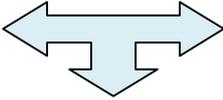
#### **8.3.1. DEMARCHE NATIONALE ?**

La première approche (échelle nationale) permet d'avoir un aperçu général de la situation actuelle et future des aquifères côtiers. Elle propose une classification de la sensibilité actuelle des aquifères vis-à-vis des intrusions marines, intègre des informations spatialisées en tant qu'indicateurs de salinité, issues essentiellement des bases de données ADES et des différentes études locales comprenant des données non bancarisées mais attestant d'intrusions salines. Une cartographie des zones basses à l'aide d'un MNT ainsi que de la pression démographique sur ces zones, fournissent des éléments à assembler afin d'obtenir une carte de vulnérabilité pour différents scénarios de surélévation du niveau marin.

La démarche nationale peut être schématisée comme suit :

(B) Cartographie des zones basses à l'aide du MNT et Méthode GALDIT  
⇒ Impact d'une remontée de niveau marin selon deux ou trois

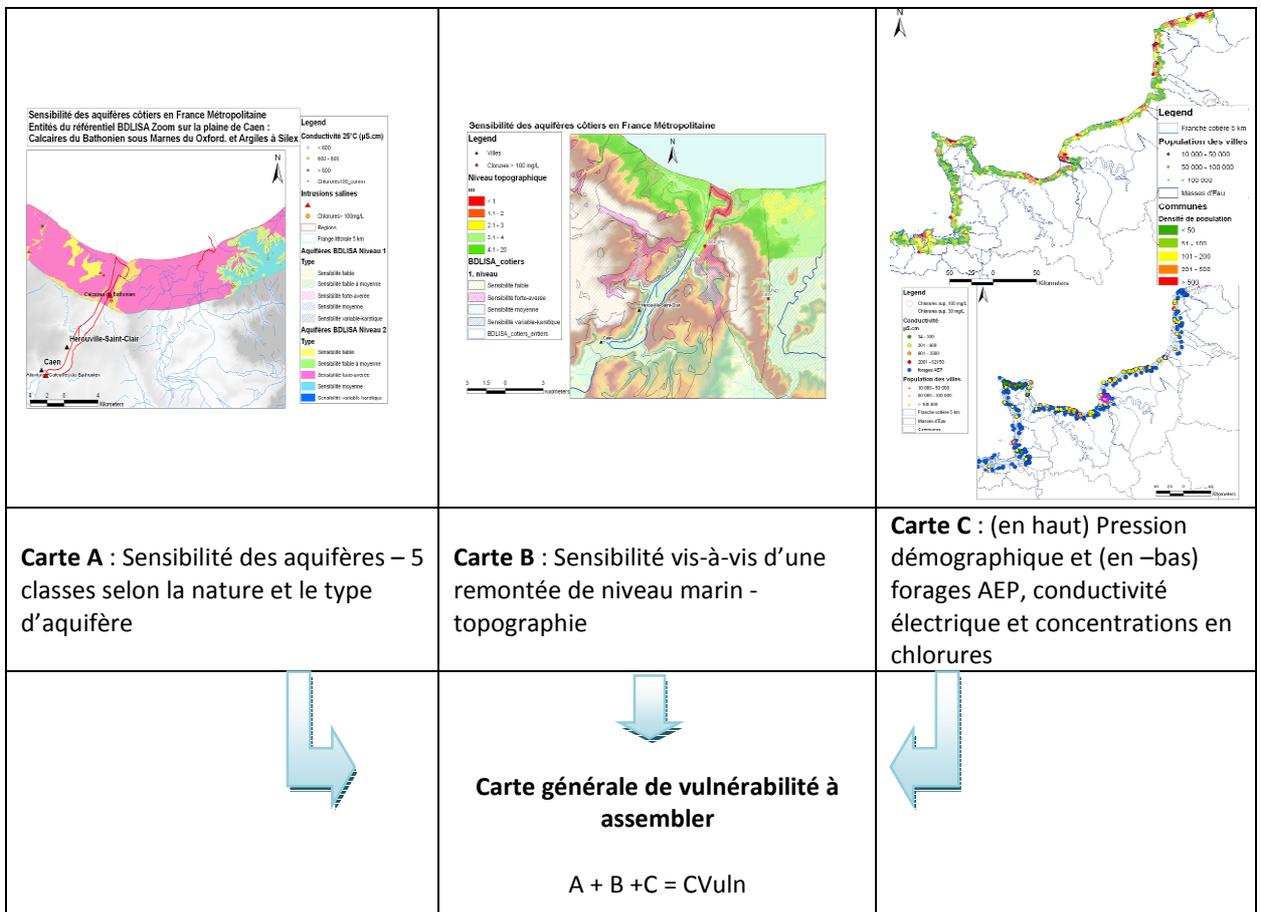
**(A) Extraction de la BDLISA et cartographie de la bande du littoral sur 5km des aquifères côtiers**  
 ⇒ **Classification de sensibilité vis-à-vis de l'intrusion saline actuelle**  
 ⇒ **Cartographie des données ponctuelles de salinité**



**Cartographie à l'échelle de la France métropolitaine de la vulnérabilité des aquifères côtiers (frange littorale) vis-à-vis de l'impact d'une remontée du niveau marin sur l'intrusion saline**

**(C) Cartographie de la pression**  
 ⇒ **Prélèvements des eaux souterraines**  
 ⇒ **Cartographie de la pression démographique actuelle et évolution de la population**

*Illustration 87 : Schéma de la démarche de cartographie nationale de la vulnérabilité des aquifères côtiers de la bande littorale vis-à-vis de l'intrusion marine dans un contexte de changement climatique et de remontée de niveau marin à l'échelle nationale*



*Illustration 88 : Illustration de la démarche de cartographie de la vulnérabilité des aquifères côtiers de la bande littorale vis-à-vis de l'intrusion marine dans un contexte de changement climatique et de remontée de niveau marin à l'échelle nationale*

### **8.3.2. CARTE A**

Le référentiel des systèmes aquifères BDLISA comprend un classement des entités :

- selon la NATURE des aquifères, traduite en notion de perméabilité/ conductivité hydraulique: unité imperméable, semi-perméable ou perméable
- selon le TYPE de milieux aquifères : milieu poreux, milieu fissuré, karstique ou à double porosité

Sur la base du référentiel BDLISA disponible à la fin 2010, les hydrosystèmes côtiers ont été cartographiés sur une bande de 5 km le long de la côte. Les zones non couvertes par le référentiel à la fin 2010 correspondent aux zones de la côte méditerranéenne ; cette couverture sera complétée en 2011 ; à défaut, les masses d'eau sont utilisées.

Le référentiel est basé sur un système de superposition des entités; il permet de caractériser en chaque endroit l'ORDRE de l'aquifère ou de la couche imperméable. Il est possible ainsi d'identifier facilement si un aquifère est libre ou non, s'il est situé sous une couverture de type couche imperméable. Ce référentiel reste en dimension « 2D1/2 » ; il n'intègre ni l'épaisseur de chaque entité, ni l'altitude de la base de l'entité.

La caractérisation de la sensibilité des aquifères côtiers vis-à-vis de l'intrusion saline – carte A – a été menée selon la classification proposée dans le cadre d'une étude réalisée en 2009 en Corse (BRGM-RP-56165-FR). La cartographie est effectuée à partir des informations de la BDLISA, des entités hydrogéologiques. Les cinq classes sont les suivantes :

**Classe « Sensibilité faible »** : Les entités de nature imperméable sont classées sous le vocable de « sensibilité faible ». Secteur caractérisé par des formations imperméables non aquifères : en général couche argileuse pouvant constituer une barrière de protection pour un aquifère sous-jacent ou situé en amont hydraulique vers l'intérieur des terres.

**Classe « Sensibilité faible à moyenne »** : Les entités de nature semi-perméable sont en général des sédiments plus ou moins argileux, avec une circulation restreinte mais pouvant comporter localement des aquifères plus perméables. C'est notamment le cas pour des structures multi-couches comme on peut les trouver dans des zones de deltas, de bassins sédimentaires. Des formations de socle, avec des perméabilités faibles ainsi que des aquifères compartimentés, mais localement semi-perméables font également partie de cette classe. Ces aquifères sont en général sensibles à une intrusion saline par biseau salé, pouvant être multiples et superposés, en fonction de la configuration, de la géométrie du multi-couche.

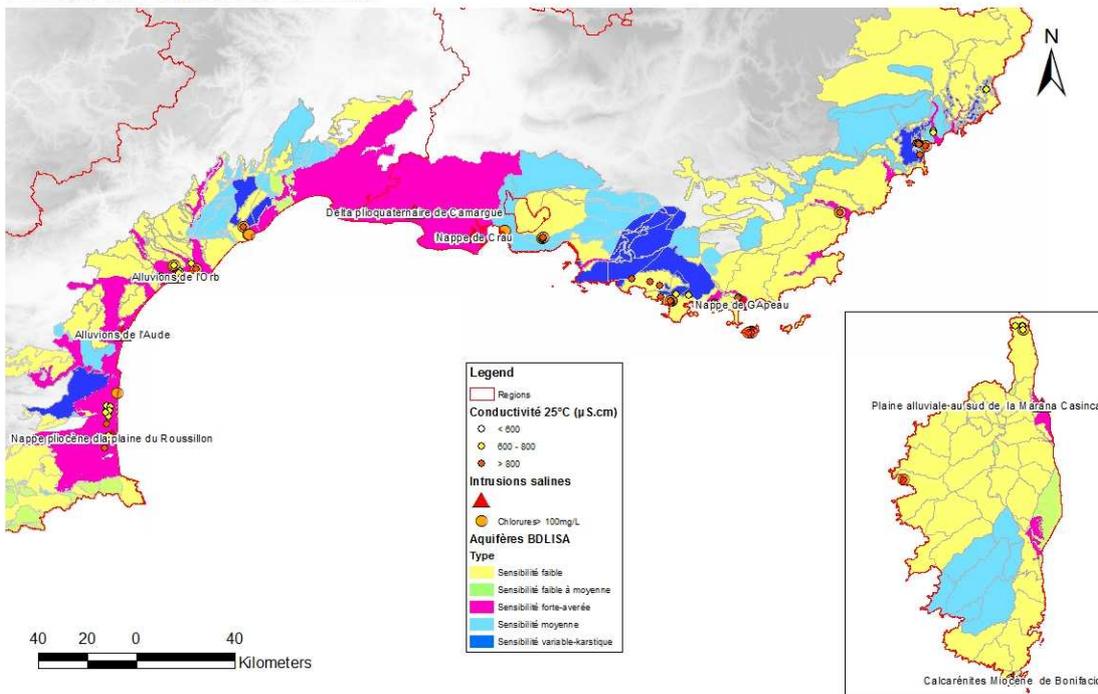
**Classe « Sensibilité moyenne »** : Les entités caractérisées par une perméabilité moyenne à élevée, pouvant correspondre à des aquifères sédimentaires (craies non karstifiées mais fissurées ; aquifères poreux caractérisés par une K moyenne de l'ordre de  $10^{-4}$  à  $10^{-6}$  m/s), des aquifères de socle (horizon d'altérites et horizon fissuré) au niveau de la zone de contact avec présence de sources côtières.

**Classe « Sensibilité variable – karstique »** : Les aquifères karstiques sont caractérisés par une forte hétérogénéité spatiale des zones de perméabilité hydraulique variable ; des vides de type conduit peuvent trouver place au niveau du littoral et s'organiser dans l'espace (en x et en z).

**Classe « Sensibilité forte »** : Les secteurs caractérisés par la prédominance d'alluvions perméables et l'existence de nappes d'accompagnement de rivière sont confrontés à l'intrusion combinée du biseau salé et du rentrant salé dans les cours d'eau pouvant donner lieu à de petits biseaux salés le long des cours d'eau dans les aquifères de part et d'autre.

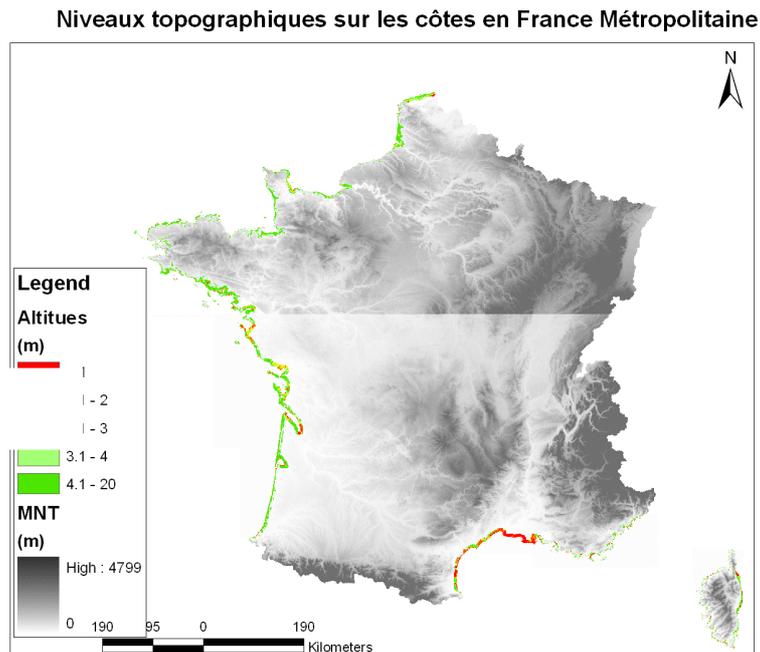
De plus, en croisant les informations de la bibliographie des études régionales, il est possible de qualifier une sixième classe, la **Classe « Sensibilité forte-avérée »** : les intrusions salines sont existantes et il y a un risque important d'aggravation liée aux conditions d'exploitation. Dans la plupart des cas, les zones d'intrusion saline sont des zones très localisées. Dans ce cas, il n'est pas envisageable d'attribuer la classe de « sensibilité forte avérée » pour un aquifère côtier de grande extension. Seules les localisations d'intrusion salines connues sont représentées.

**Sensibilité des aquifères côtiers en France Métropolitaine**  
**Entités du référentiel BDLISA**



*illustration 89 : Carte de sensibilité des aquifères côtiers vis-à-vis de l'intrusion marine pour la côte méditerranéenne*

**8.3.3. CARTE B : MNT**



*illustration 90 : Cartographie et tableau de la répartition des surfaces par altitude (0 à 1 m : risque de submersion permanente et temporaire (retour d'un événement tous les 20 ans) pour l'ensemble des côtes de Métropole*

Elévation du MNT IGN	Surface	Submersion permanente (SP)
		Submersion temporaire bi-décennale (ST20ans)
1m	786 km <sup>2</sup>	SP et ST
2m	993 km <sup>2</sup>	ST
3m	926 km <sup>2</sup>	ST

*Illustration 91 : Calcul des surfaces submersibles permanentes ou temporaires bi-décennales*

### **8.3.4. CARTE C**

La cartographie de la **pression anthropique** est un élément de la **carte C** de la méthode.

La pression anthropique est importante sur les zones littorales. Cette pression a bien évidemment des répercussions potentielles sur les ressources en eau – augmentation des prélèvements pour l'alimentation en eau potable de manière saisonnière liée au tourisme, aux résidences secondaires par ex. ; elle constitue un des facteurs externes impactant les aquifères côtiers.

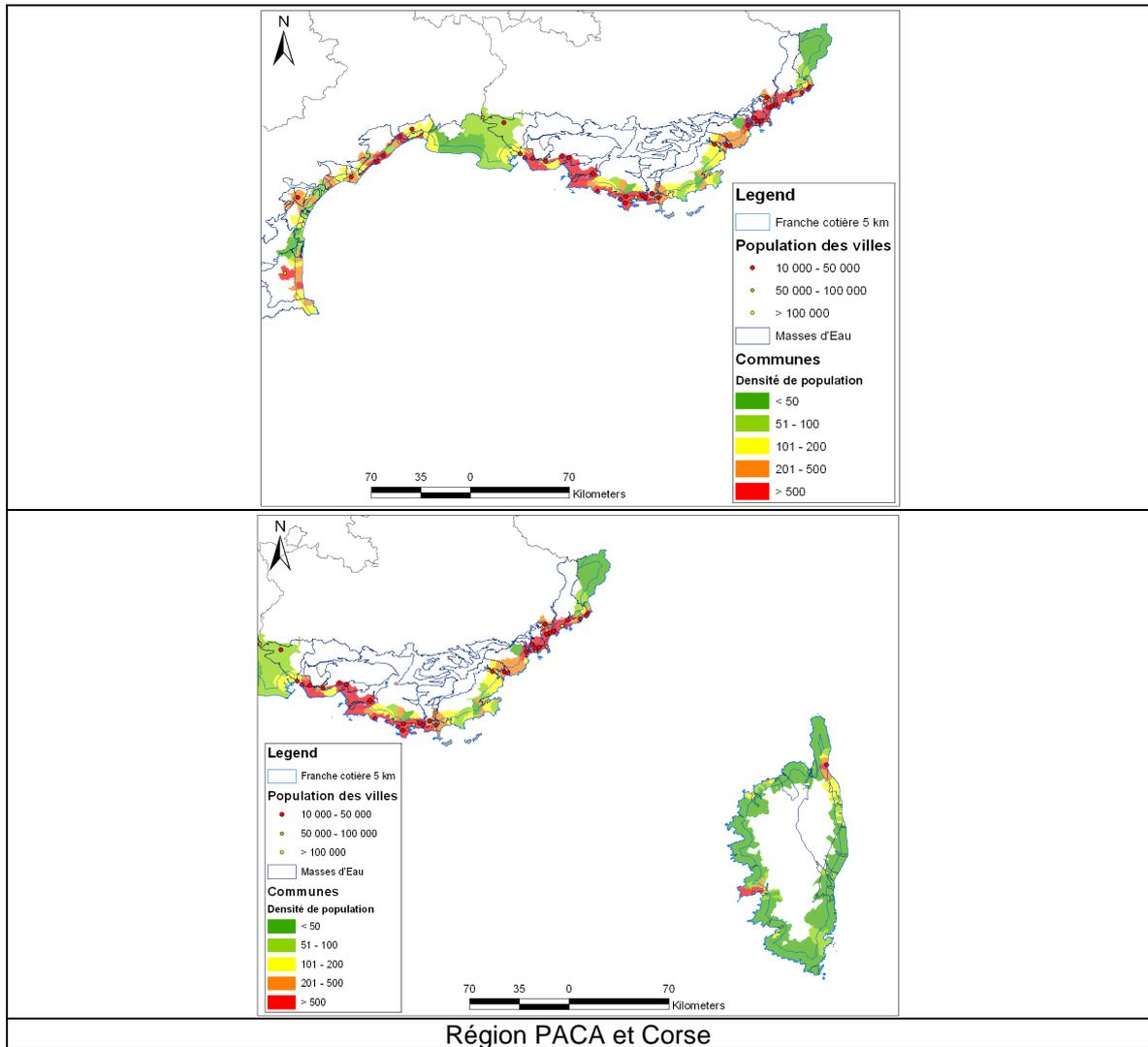


Illustration 92: Cartes des pressions anthropiques sur les aquifères côtiers de la France Métropolitaine

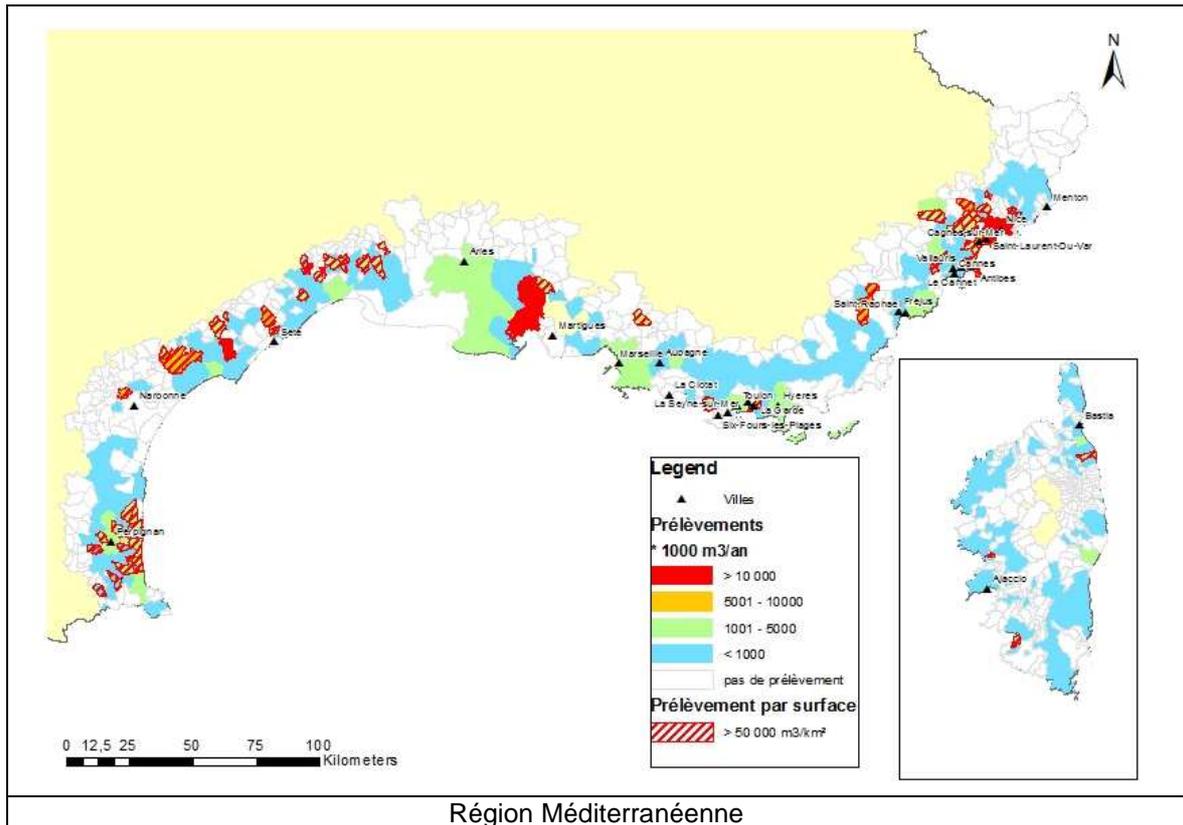


Illustration 93: Cartes des prélèvements des eaux souterraines (irrigation, AEP et industriel) sur la côte méditerranéenne et la côte atlantique

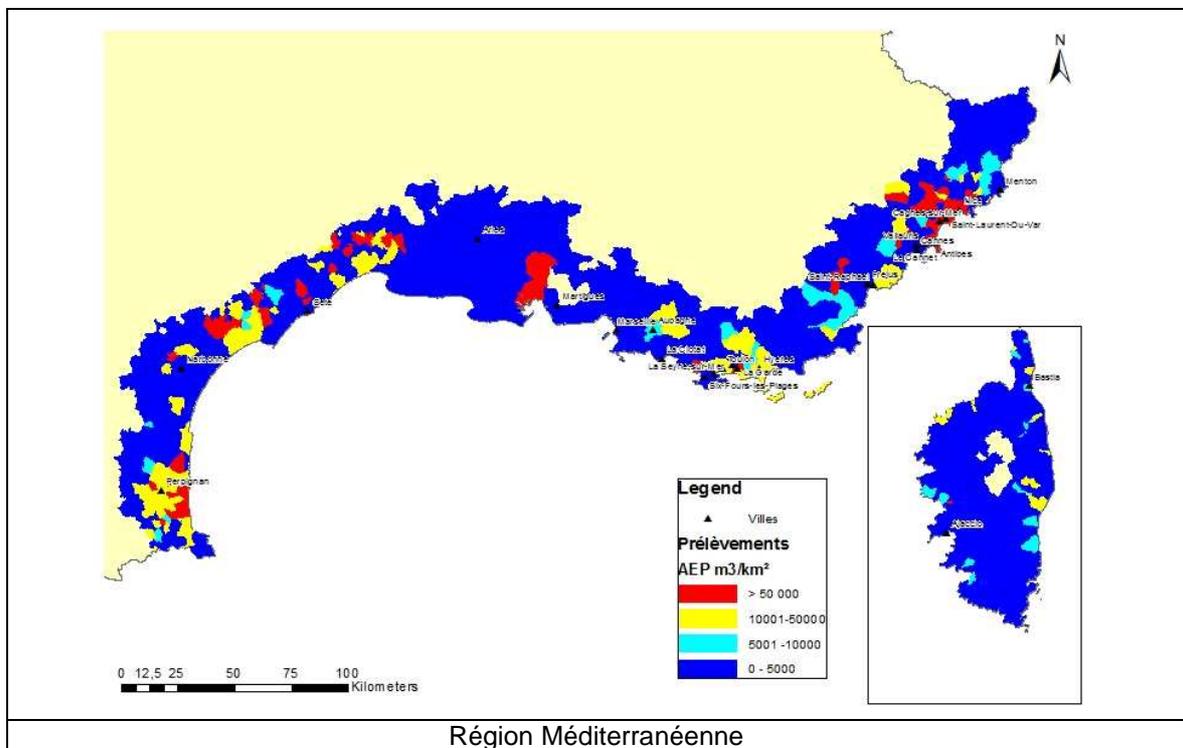


Illustration 94: Cartes des prélèvements des eaux souterraines pour les besoins en eau potable (AEP) sur la côte méditerranéenne

### 8.3.5. CARTE DE VULNERABILITE

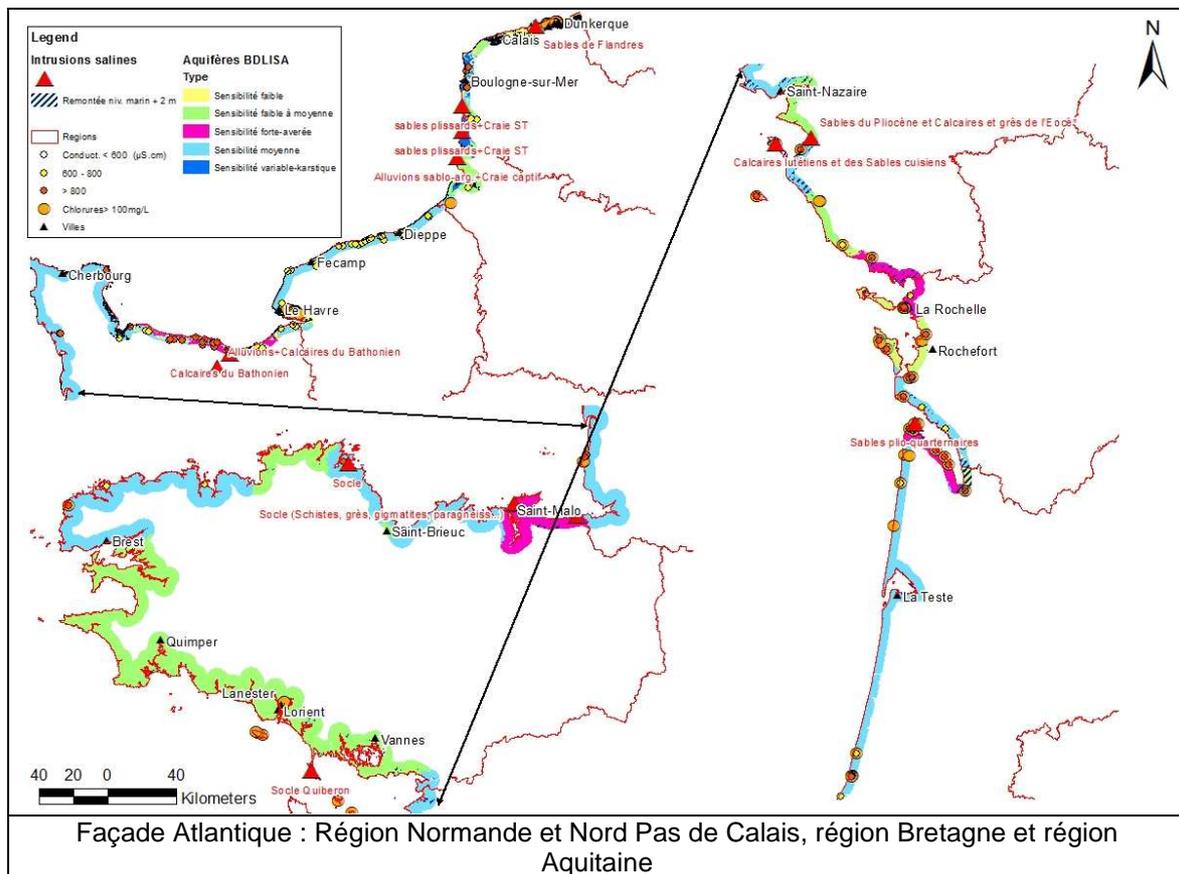
Ces cartes de pression globale, correspondant à la somme des prélèvements des eaux souterraines par l'irrigation, l'industrie et l'eau potable peuvent être ajoutées à la carte de sensibilité des nappes à l'échelle des côtes de la France Métropolitaine. Le résultat est la carte de vulnérabilité spécifique des nappes souterraines :

Les zones les plus vulnérables apparaissent :

- A l'est de la côte de la Corse
- Sur une grande partie de la côte de la région Languedoc-Roussillon
- Sur la côte nord du Poitou-Charentes
- Sur la côte au nord-est de la Bretagne
- Sur la côte du Calvados

Ces cartes de sensibilité des nappes et au niveau topographique inférieur à 2 m à l'échelle des côtes de la France Métropolitaine permet de cibler les nappes vulnérables, où la vulnérabilité accroîtra avec une remontée du niveau de la mer .

Ces zones se concentrent notamment autour de la méditerranée, sur la moitié du Languedoc-Roussillon et d'une manière beaucoup moins étendue en Corse au sud de Bastia, dans l'estuaire de la Gironde et dans le Pays de la Loire, notamment dans le marais Poitevin.



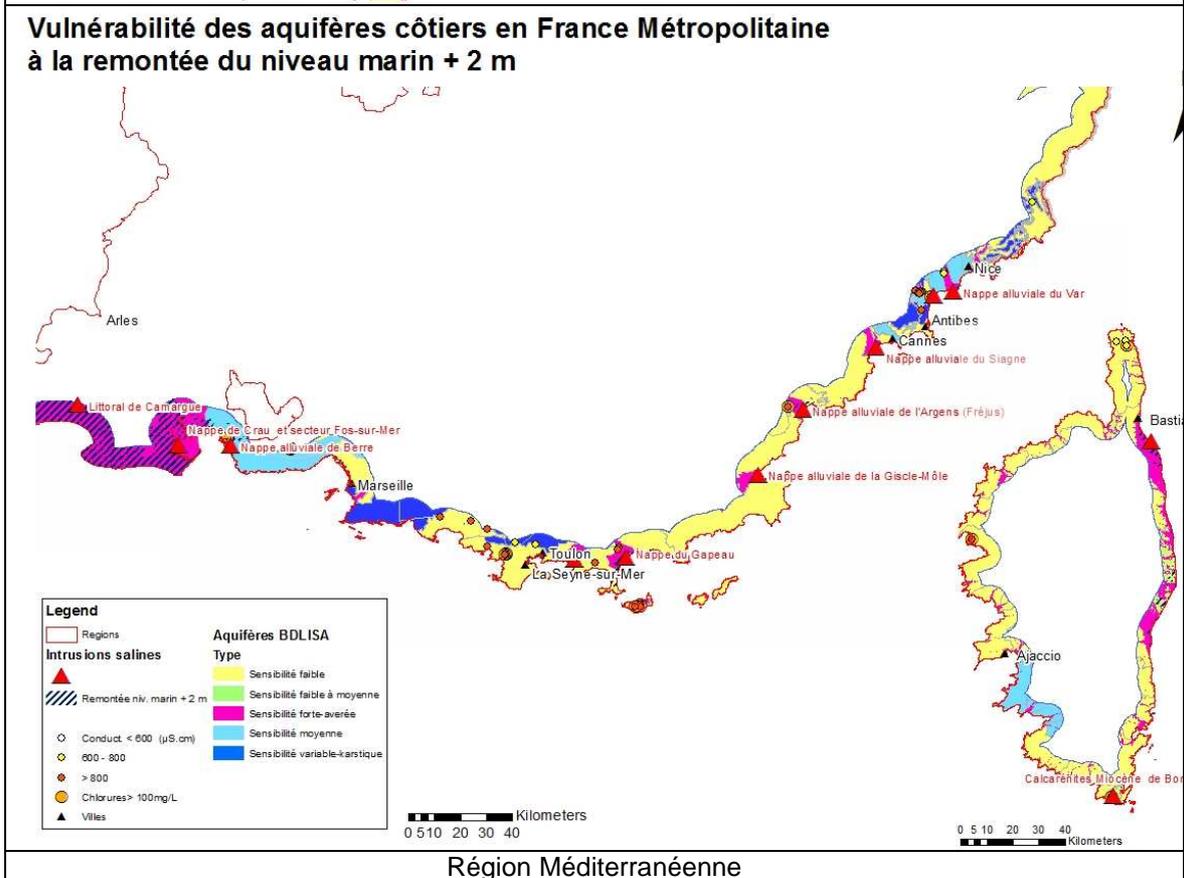
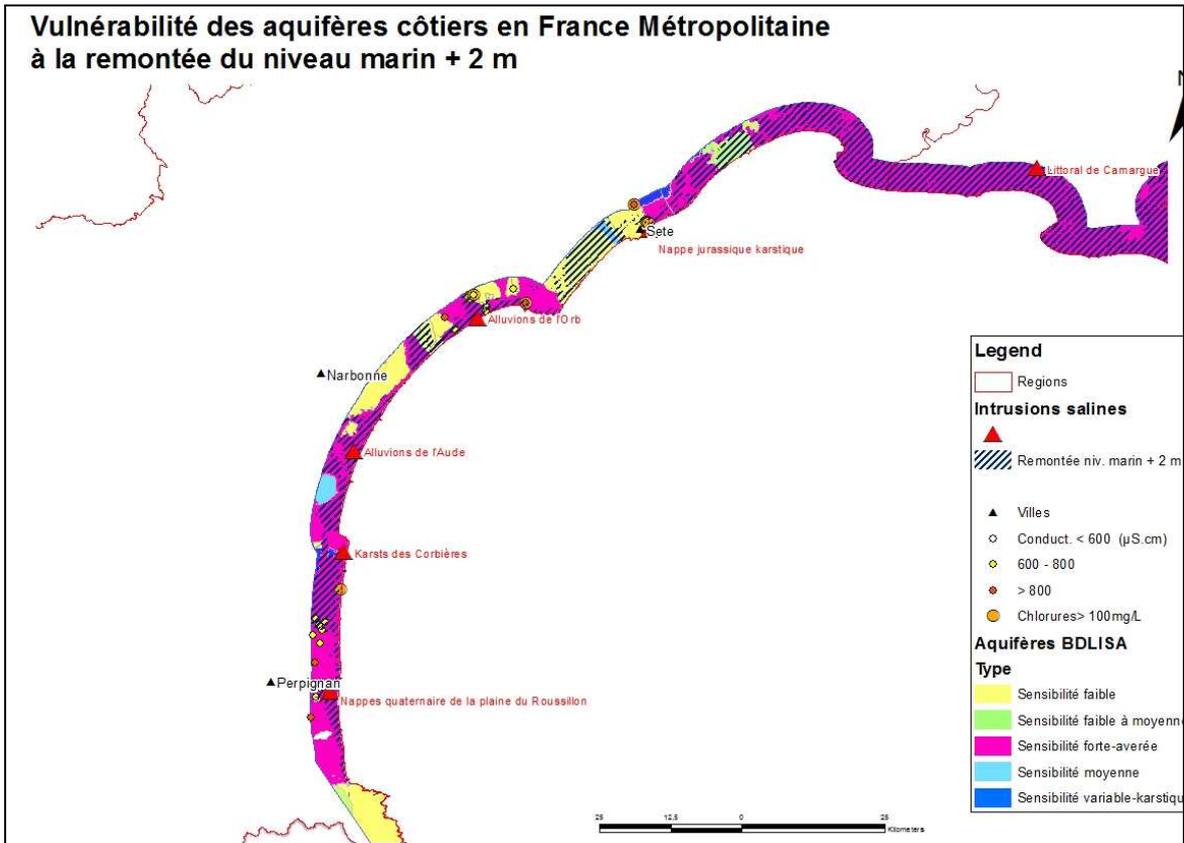


illustration 95: Cartes de la vulnérabilité des aquifères côtiers suivant la remontée du niveau marin

Quitte à présenter cette action, je trouve ça dommage de ne pas mettre les résultats correspondant à

ce qui a été développé au niveau des DOM à ce sujet également (pendant qu'on y ait...)

### **8.3.6. CONCLUSION**

Cette première approche, reposant sur l'utilisation d'un MNT et sur la pression démographique propose une classification de la sensibilité actuelle des aquifères côtiers et fournit une carte de vulnérabilité pour différents scénarios de surélévation du niveau marin.

Il en ressort que l'on recense de nombreux endroits à forte vulnérabilité notamment en méditerranée entre Marseille et l'Espagne. Dans ces zones à forte activité touristique, la surélévation du niveau marin associée à une forte demande estivale en eau risque de générer une remontée du biseau salé qui mettrait en danger la qualité des aquifères côtiers. Il est ainsi fortement probable qu'il faille dès à présent envisager un déplacement, vers l'intérieur des terres, des ouvrages de prélèvements les plus exposés.

## **8.4. PAR MODELISATION : MARAIS POITEVIN**

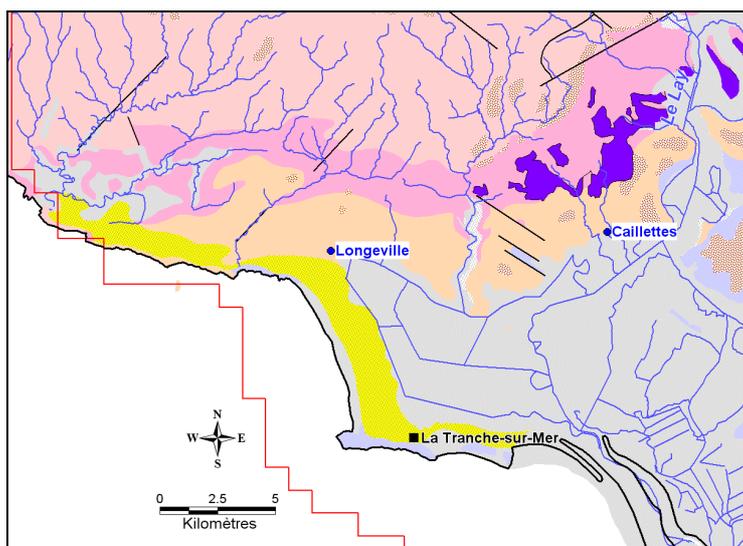
### **8.4.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE**

Les formations rencontrées du nord au sud de ce secteur sont les suivantes (illustration 96) :

Les terrains du socle qui présentent une grande variété de roches granitiques et métamorphiques, sont caractérisés par une structuration importante en relation avec de grands accidents de direction armoricaine (NO-SE). La densité du réseau hydrographique montre que le socle renferme peu de ressources souterraines (nappes localisées au sein des altérites) et que la part des ruissellements superficiels est importante.

Au-dessus du socle, reposent les formations du Jurassique inférieur (Lias) correspondant à l'aquifère de l'Infra-Toarcien. Ce réservoir est composé principalement de faciès calcaires plus ou moins dolomités et gréseux. Il est généralement captif sous les marnes toarciennes. On le trouve à l'affleurement dans certaines vallées à la faveur de l'érosion.

Au-dessus du Toarcien se superposent les calcaires karstifiés du Dogger. Le faciès réservoir est représenté par des calcaires oolithiques et dans une moindre mesure par des calcaires en plaquettes. Cet aquifère devient captif sous les formations du Jurassique supérieur peu épais dans ce secteur, et les argiles fluvio-marines (dénommées « Bri ») du Quaternaire formant le Marais-Poitevin.



Quaternaire - Tertiaire	Jurassique moyen et inférieur	Socle armoricain
Alluvions récentes	Calcaires marneux du Callovien	Terrains cristallophyliens indifférenciés
Dunes littorales	Bathonien et Bajocien indifférenciés	Faille
Marais (Bri)	Marnes du Toarcien-Aalénien	Réseau hydrographique (BDCARTHAGE) avec nom des principaux cours d'eau
Terrasses anciennes, altérites Tertiaire indifférencié	Infra-Toarcien indifférencié	Limite du modèle
Marnes et calcaires du Tertiaire		Piézomètre

illustration 96: **Contexte géologique de la zone d'étude du modèle hydrodynamique du Marais Poitevin**

#### 8.4.2. DESCRIPTION DU MODELE EXISTANT (CF. VOLUME)

Dans le cadre de cette action, un modèle hydrodynamique déjà existant a été utilisé ; il s'agit du modèle de gestion des prélèvements à la périphérie du Marais Poitevin qui est lui-même issu de l'adaptation du modèle des aquifères jurassiques en Poitou-Charentes [Domez O. et al. (2010), Putot E. et Bichot F. (2007), Touchard F. et al. (2002), Touchard F. et al. (2004)].

L'extension globale du modèle jurassique couvre une superficie de 19 280 km<sup>2</sup> (illustration 97). Concernant le maillage, la trame du kilomètre carré a été retenue. Les mailles en périphérie nord du Marais-Poitevin ont été subdivisées en mailles carrées de 333 m de côté (gigogne).

En « sortie » de modèle, des potentiels imposés ont été appliqués :

- Sur la limite ouest du modèle, qui correspond au niveau imposé par l'Océan Atlantique. Il est à noter que le modèle utilisé est un modèle monophasique et ne fait donc pas intervenir les paramètres spécifiques des eaux salines (l'existence d'un biseau salé et sa possible évolution ne peuvent donc pas être appréhendées). Pour tenir compte de l'effet densitaire des eaux marines, un potentiel « océan » de + 0,5 m NGF a été introduit dans le modèle initial.
- Sur les bordures nord-est et sud-ouest du modèle régional, qui sont très éloignées de la zone d'intérêt.

Les échanges nappes/rivières jouant un rôle important dans l'hydrodynamique régionale, les principaux cours d'eau ont été intégrés à l'aide du module "échanges nappes/rivières" du logiciel WinMarthe. Sur l'ensemble du bassin du Marais-Poitevin cela représente environ 1240 kilomètres de linéaires de cours d'eau.

La recharge a été estimée par zones, au pas mensuel, à travers un bilan classique fournissant la pluie efficace, à partir des données de précipitations et d'évapotranspiration sur 11 stations météorologiques, et des données de réserves utiles des sols. L'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux, développé par le BRGM, a ensuite été utilisé pour évaluer le fractionnement de cette pluie efficace entre ruissellement et infiltration. Au final, 99 zones de recharge/ruissellement ont été intégrées dans le modèle.

Le calage en régime transitoire a été réalisé sur la période 2000-2007 au pas de temps mensuel et hebdomadaire sur les mois de juin à août, et en intégrant les prélèvements pour l'AEP, l'irrigation et dans les cours d'eau.

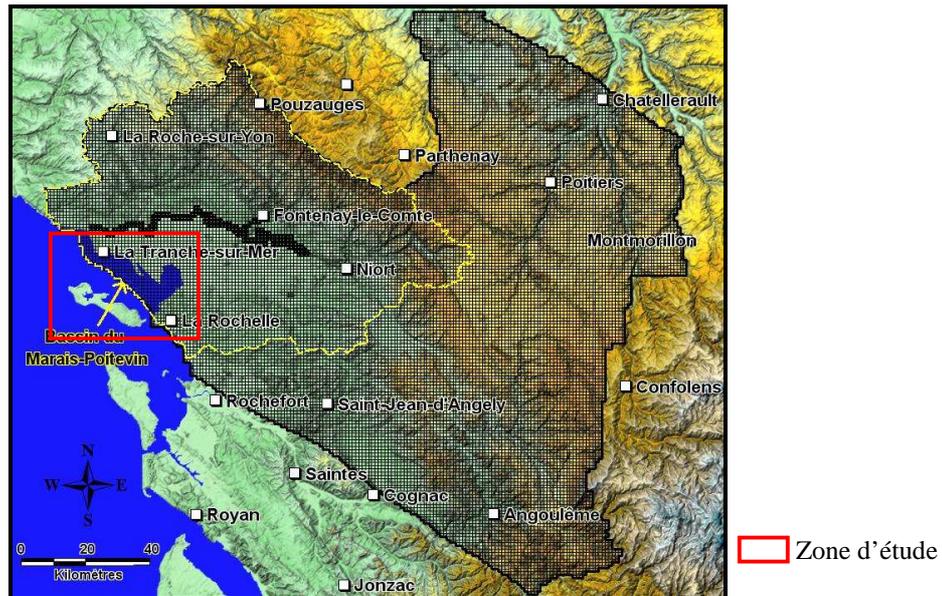


illustration 97: *Extension du modèle hydrodynamique développé sous MARTHE et zone d'étude*

Les calages pour les 2 piézomètres les plus proches de la bordure océanique sont visibles sur les illustrations (illustration 98 et illustration 99). Ces deux piézomètres, qui captent la nappe du Dogger, sont contrôlés en année humide, sur la période de basses eaux, par les niveaux d'eau dans les canaux à proximité (2000, 2001, 2002 et 2007). En année sèche (2003, 2004, 2005 et 2006), la charge hydraulique décroche du fait de l'absence de soutien des canaux (assèchement ou insuffisance de débits). Les chroniques piézométriques sont correctement restituées que ce soit en basses ou hautes eaux (peu d'écart entre les minimums simulés et observés). Longeville est toutefois légèrement mieux simulé. Le palier constaté en juin est plus ou moins bien restitué sur le piézomètre de Longeville.

A noter que la charge au droit du piézomètre de Longeville, du fait des prélèvements pour l'irrigation, est inférieure au 0 NGF en été, durant les années sèches.

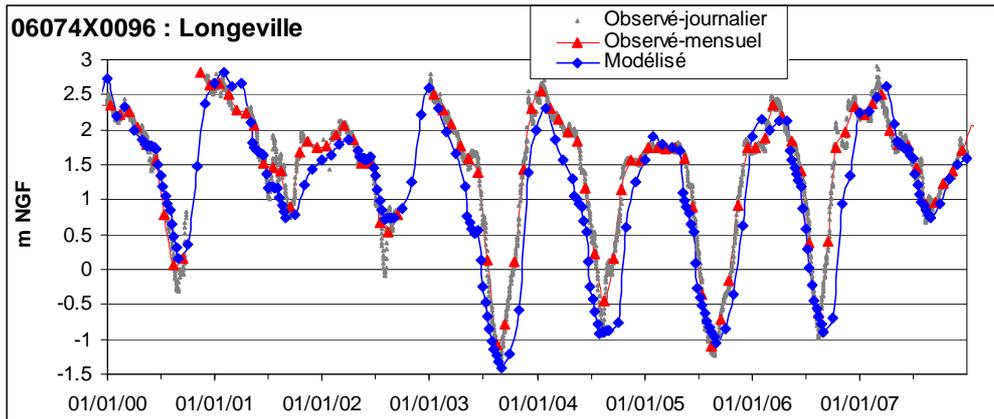


illustration 98 : **Comparaison des chroniques observée/simulée – piézomètre de Longeville (Dogger)**

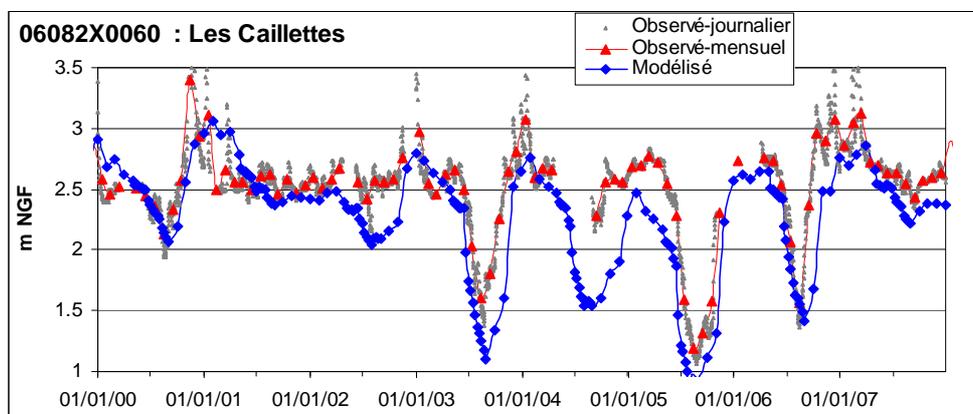


illustration 99 : **Comparaison des chroniques observée/simulée – piézomètre des Caillettes (Dogger)**

#### 8.4.2.1. DESCRIPTION DES SIMULATIONS

Deux simulations d'élévation du niveau marin ont été réalisées. Ces simulations sont basées sur les recommandations issues de la note de synthèse émanant du service du Climat et de l'efficacité énergétique [Direction générale de l'énergie et du climat (2010)]. Ainsi, pour uniformiser les évaluations effectuées dans le cadre des études sur les impacts du changement climatique, il a été choisi d'utiliser les hypothèses suivantes pour l'élévation du niveau des mers à l'horizon 2100 :

- Hypothèse optimiste : 0,40 m,
- Hypothèse pessimiste : 0,60 m,
- Hypothèse extrême : 1 m.

Dans le cadre de ce modèle seules les deux dernières hypothèses (2 simulations) ont été simulées.

Les simulations ont été réalisées sur les années 2000 à 2007 (période de calage du modèle), avec les mêmes paramètres que ceux du calage (recharge, prélèvements, hauteur d'eau imposée dans les canaux...) et au pas de temps mensuel. Cette période est intéressante, car elle présente une grande variabilité climatique. L'année 2005 se caractérise par une sécheresse exceptionnelle, contrairement à 2001 qui a été très humide (périodicité de retour au-delà de 10 ans). L'année 2006 apparaît représentative d'une année moyenne. Les années 2002, 2003 peuvent être considérées comme proches de la quinquennale sèche. Il n'apparaît donc pas nécessaire de générer des scénarios climatiques spécifiques.

La remontée océanique est appliquée en faisant varier les potentiels imposés dans le modèle sur la bordure océanique de 0,6 mètre et d'1 mètre (illustration 100). Il est à noter que la position de la ligne du rivage reste identique à l'actuel pour les différentes simulations.

Dans le secteur étudié, seul l'aquifère du Dogger est analysé, ce réservoir est en effet en contact plus ou moins direct avec l'Océan qui est naturellement son exutoire.

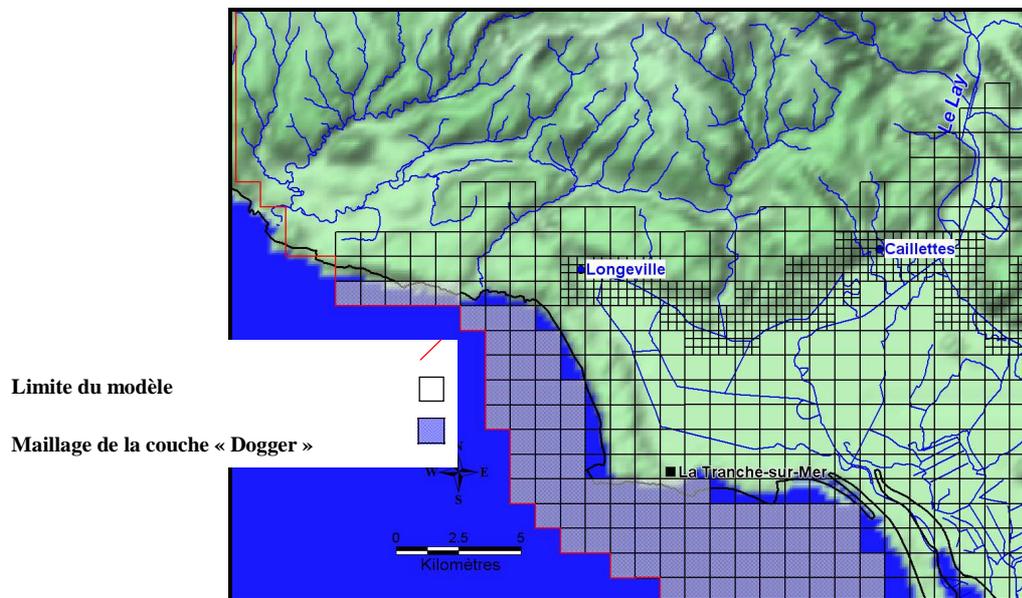


illustration 100: **Potentiels imposés au niveau de l'Océan**

#### 8.4.2.2. RESULTATS DES SIMULATIONS

Dans le modèle, le niveau océanique actuel étant considéré à la charge de + 0,5 m NGF (compensation de l'effet densitaire), les niveaux océaniques simulés correspondent à des élévations de 0,6 m et 1 m par rapport au + 0,5 m NGF. Les charges imposées, qui permettent de faire les simulations, sont respectivement égales à +1,1 m NGF et +1,5 m NGF.

#### 8.4.2.3. EFFETS SUR LES PIEZOMETRES

Seul le piézomètre de Longeville pourrait être influencé par la remontée océanique, ce « phénomène » étant visible seulement en année sèche et en basses eaux (*Illustration 101*).

La remontée océanique n'impacte pas le niveau de hautes eaux du fait vraisemblablement des cotes des eaux superficielles à proximité de ce piézomètre qui sont en hiver nettement supérieures au niveau de base simulé. C'est également le cas sur la période d'étiage en année humide ou le maintien en eaux des canaux vient soutenir le niveau du piézomètre.

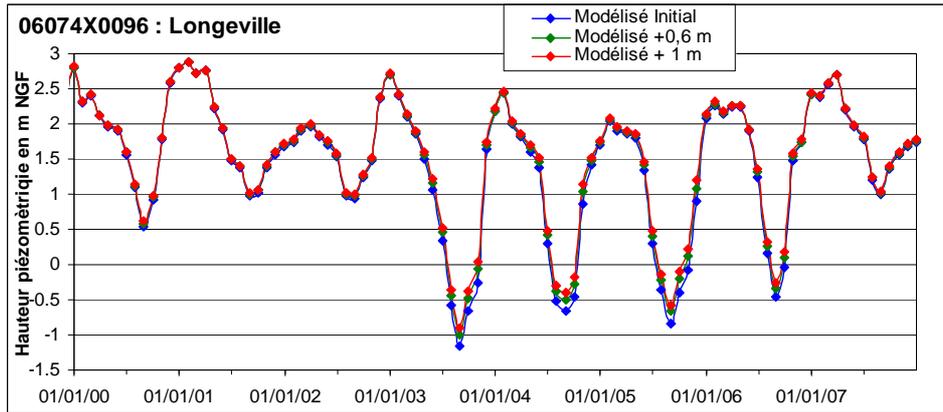


Illustration 101 : Effet de la remontée océanique sur le piézomètre de Longeville

Afin de mieux caractériser le transfert de pression au sein de l'aquifère du Dogger, des piézomètres virtuels (P1 et P2) ont été placés le long de la ligne de côte (Illustration 102).



Illustration 102 : localisation des piézomètres virtuels

La charge piézométrique dans le secteur du P1 (Illustration 103), localisé à l'embouchure du cours d'eau le Goulet (absence de cordon dunaire), est, à l'état initial (calage) et en période d'étiage, aux alentours du niveau océanique. Le niveau semble tout de même être influencé par les pompages situés au nord de ce secteur (Illustration 102).

La remontée océanique induit une augmentation de la charge globale de P1 (remontée du niveau de base).

En période de crues les niveaux restent, pour les deux simulations de remontée de l'Océan, au-dessus du niveau marin. La dépression engendrée par les pompages d'irrigation (avec les volumes

prélevés actuels) générerait, selon le modèle, des flux de l'Océan vers l'aquifère (différence de charge de -0,3 m pour une remontée océanique de +0,6 m et de -0,5 m pour une remontée à 1 m).

Le constat est légèrement différent pour P2 situé plus au Sud-Ouest. La dépression engendrée par les prélèvements autour du piézomètre de Longeville semble déjà impacter ce secteur puisque les niveaux simulés à l'état initial (calage) sont inférieurs au niveau marin de 0,5 mètres durant les années sèches et en période d'étiage.

Une augmentation du niveau océanique, avec les volumes prélevés actuellement, amplifierait ce phénomène avec des différences de charge entre la nappe et l'Océan dans ce secteur pouvant atteindre - 1 mètre environ (simulation de remontée du niveau marin de +1 mètre).

En années humides, les niveaux sont soutenus par le maintien des canaux en eaux.

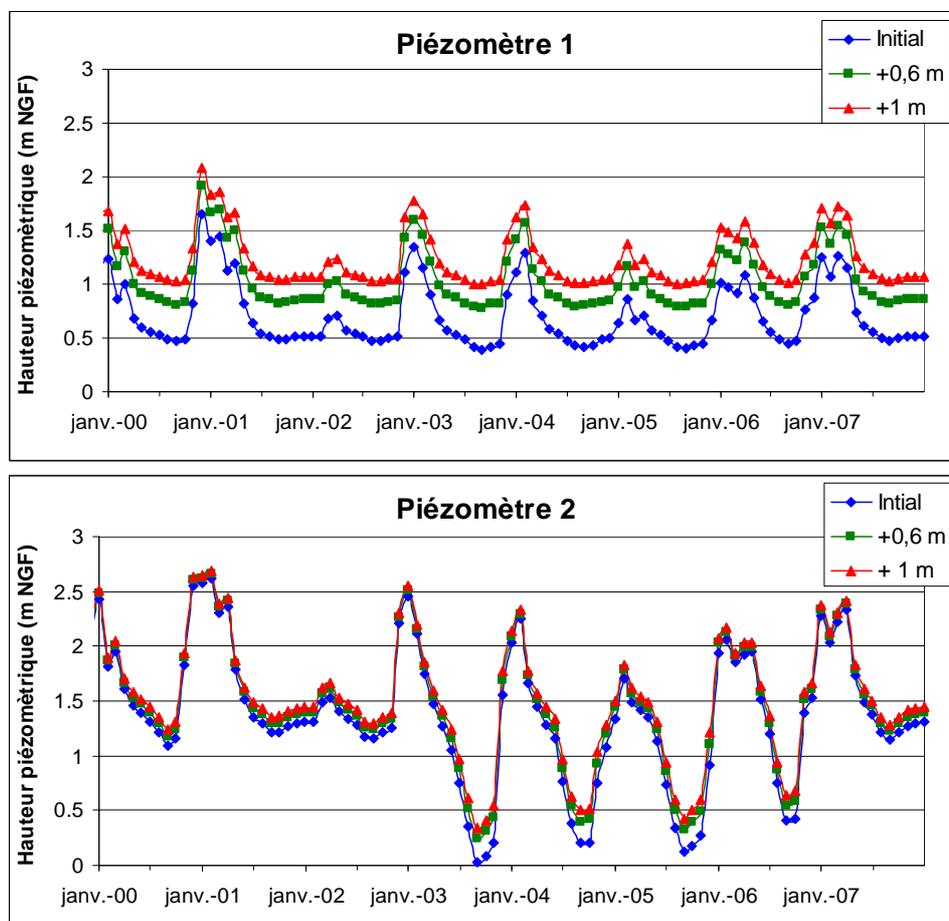


Illustration 103 : Résultats des simulations de remontée océanique sur les 2 piézomètres virtuels

#### 8.4.2.4. CARTOGRAPHIE DES RESULTATS

Les résultats cartographiques sont donnés pour l'année la plus humide (2001) et la plus sèche (2005) observées au cours de la période de simulation et pour les hautes eaux (mars) et basses eaux (octobre) (Illustration 104 et Illustration 105).

Pour plus de lisibilité, sur ces cartographies le niveau inférieur ou égal à celui de l'Océan (niveaux simulés) est représenté par la couleur bleue. Il convient de préciser que cela ne signifie pas qu'il y

ait forcément une invasion marine du fait que dans le modèle sont intégrés des potentiels imposés supérieurs au niveau de la mer pour tenir compte de la densité.

- **Année humide (Illustration 104) :**

En périodes de hautes-eaux, la remontée océanique semble impacter légèrement le littoral dans les secteurs où le cordon dunaire est assez restreint et ne joue donc pas ou peu le rôle de barrière hydraulique (à l'ouest du piézomètre de Longeville). Le niveau de la nappe serait égal à celui de l'Océan au maximum de la remontée (+1 mètre) à un peu plus d'un kilomètre au nord de la ligne de rivage actuelle.

En période de basses eaux, ce constat se dégrade largement puisque la charge de la nappe est inférieure ou du moins égale au niveau de l'Océan jusqu'au piézomètre de Longeville sur la simulation + 1 mètre.

- **En année sèche (Illustration 105) :**

Au cours des années sèches et en période de hautes eaux, les niveaux de nappe sont à l'équilibre avec celui de l'Océan très à l'intérieur des terres (plus de 3 kilomètres pour la simulation avec hypothèse +1 m).

En période de basses eaux, dans le modèle initial (calage) les niveaux de nappes sont inférieurs, voire en équilibre avec l'Océan, jusqu'à une limite située entre les piézomètres de Longeville et des Caillettes. Ceci est à relier aux dépressions engendrées par les nombreux pompages d'irrigation dans le secteur (charge dans le piézomètre de Longeville atteignant en période sèche des hauteurs situées entre -1,5 et - 1 m NGF)

Les simulations de l'augmentation du niveau marin, en maintenant les volumes prélevés actuels, engendrent des secteurs déprimés d'étendue importante (charges généralement inférieures aux 0 NGF actuel) et indiquent que le niveau des nappes pourrait être inférieur ou au mieux égal au niveau de l'océan sur plus d'une dizaine de kilomètres à l'intérieur des terres.

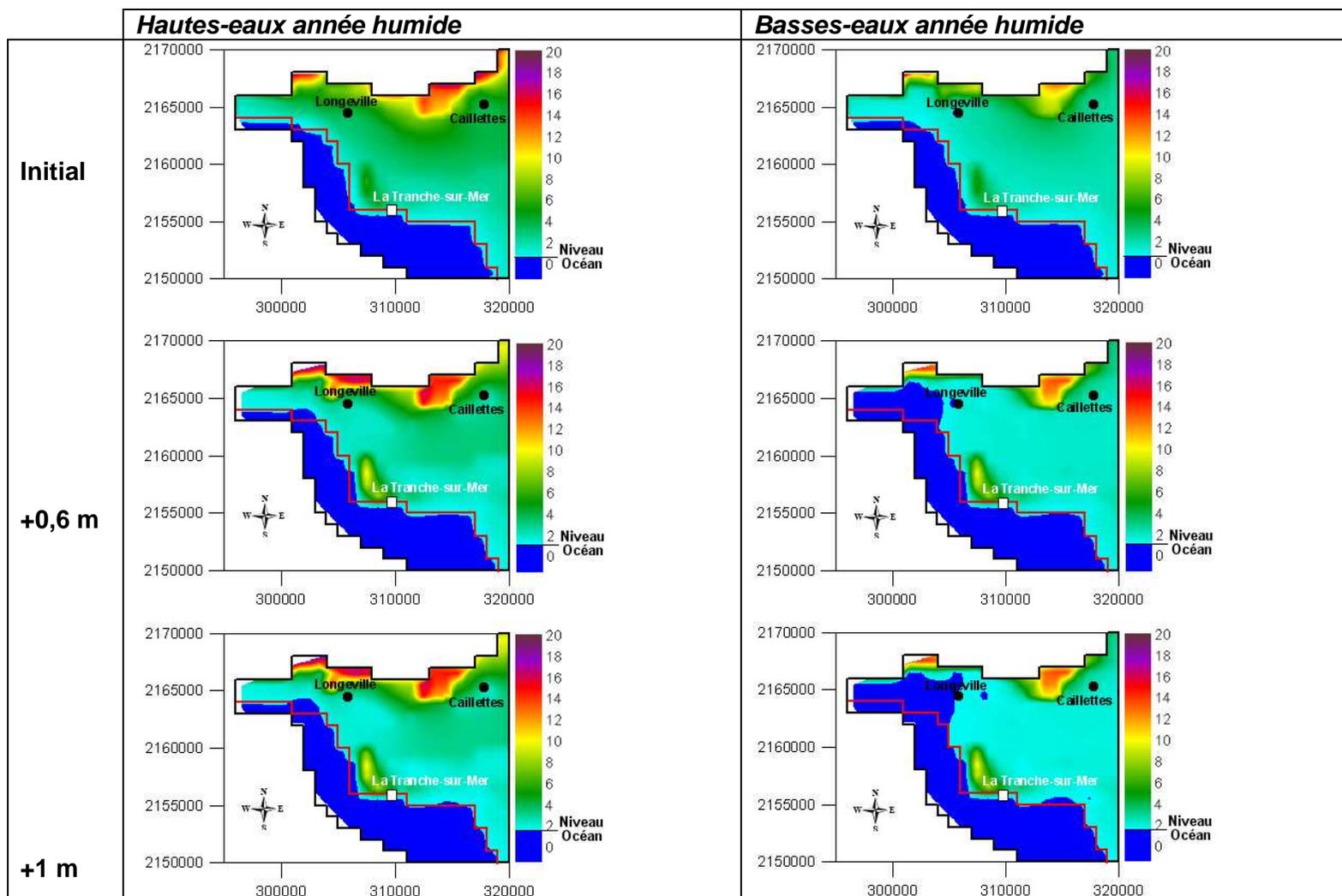


Illustration 104 : Comparaison pour les simulations pour les hautes et basses eaux 2001 (année humide)

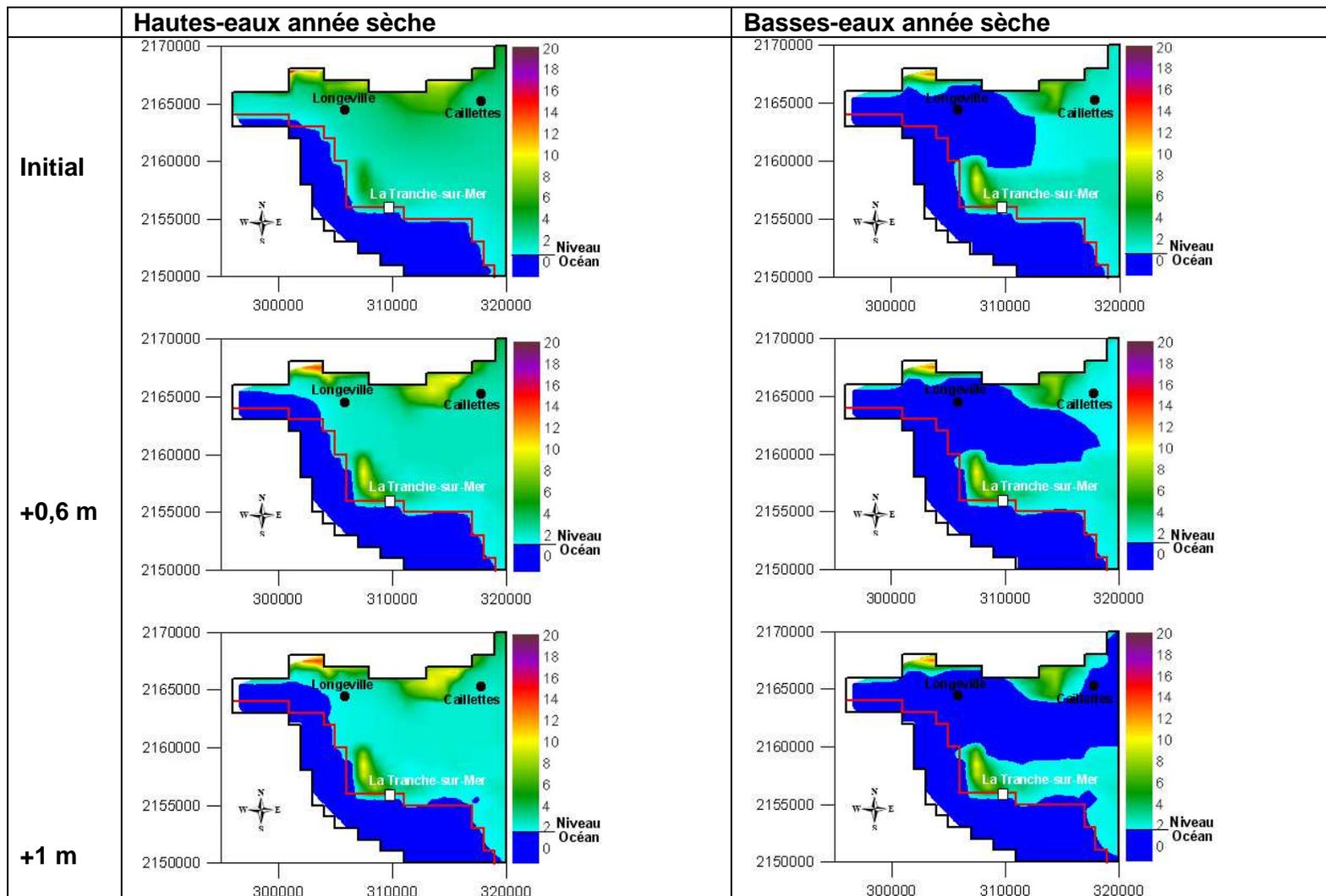


Illustration 105 : Comparaison pour les simulations pour les hauts et basses eaux 2005 (année sèche)

### **8.4.3. CONCLUSION**

Les premiers tests de simulation indiquent que l'effet d'une remontée de niveau marin et de salinité au niveau d'un estuaire n'a pas un impact très important ; l'impact associé aux prélèvements peut être tout aussi important. Il est possible que l'incertitude sur les flux entraîne une sous-estimation de l'extension du front salé notamment en période de prélèvement. Actuellement l'extension du front salé à l'intérieur des terres est de 200 mètres aussi bien au repos qu'en période de prélèvement. D'ici 100 ans l'augmentation de la côte moyenne de l'estuaire de +0.6m et un doublement de la salinité de l'estuaire entraînerait une progression du front salé d'une distance inférieure à 100 mètres. Enfin, malgré le choix du secteur présentant le plus grand nombre de données, il a été difficile d'étudier précisément les intrusions d'eau en provenance de l'estuaire. Ceci permet, encore une fois, de souligner la nécessité d'acquérir des données en vue de la construction d'un modèle à plus grande échelle visant à étudier l'impact du changement climatique sur les aquifères côtiers.

Par ailleurs, l'influence peut se faire sentir sur plusieurs kilomètres dans le cas du Marais Poitevin, sur la base des premiers résultats d'une modélisation hydrodynamique sans prise en compte de la salinité. Les simulations de l'augmentation du niveau marin, en maintenant les volumes prélevés actuels, engendrent des secteurs déprimés d'étendue importante (charges généralement inférieures aux 0 NGF actuel) et indiquent que le niveau des nappes pourrait être inférieur ou au mieux égal au niveau de l'océan sur plus d'une dizaine de kilomètres à l'intérieur des terres.

## Principales Références

Astie H. et Bellegarde R., 1974, Etudes des relations nappe-estuaire – compte rendu d'un pompage d'essai de longue durée sur le dispositif expérimental F.1, Rapport BRGM 74 AQI 53.

Aunay, B., 2007, Apport de la stratigraphie séquentielle à la gestion et à la modélisation des ressources en eau des aquifères côtiers. Thèse de doctorat en Hydrogéologie, Université Montpellier 2.

Auriol J. et Bellegarde R., 1977, Etude des risques de salure de la nappe des "Graves quaternaires" lors de la pose des conduits de prise et de rejet d'eau en Gironde, Rapport BRGM 77 SGN 134 AQI.

Bobba, A. G., 1998, Application of a numerical model to predict freshwater depth in islands due to climate change: Agatti island, India. *Journal of Environmental Hydrology* 6(10) : 1-13.

Bobba, A. G., 2002, Numerical modelling of saltwater intrusion due to human activities and sea-level change in the Codavari Delta, India. *Hydrological Sciences Journal* 47 : 67-80.

Canadell JG, Corinne Le Quéré, Michael R. Raupach, Christopher B. Field, Erik T. Buitenhuis, Philippe Ciais, Thomas J. Conway, RA. Houghton, Gregg Marland (2007) : Contributions to accelerating atmospheric CO<sub>2</sub> growth from economic activity carbon intensity and efficiency of natural sinks. *Proceedings of the National Academy of Science*.

Cazenave A., Dominh K., Guinehut S., Berthier E., Llovel W., Ramillien G., Ablain M., Larnicol G. (2009): Sea level budget over 2003-2008: a reevaluation from GRACE space gravimetry, satellite altimetry and Argo, *Global and Planetary Change*, 2 doi:10.106/j/gloplacha.208;10.004, 2009.

Cazenave A., Nerem R.S. (2004) : Present-day sea level rise : a synthesis, *Geosciences CR.*, Volume 340, Issue 11, Pages 761-770.

Chachadi A.G & Lobo-Ferreira, J.P (2005a), Assessing aquifer vulnerability to sea-water intrusion using GALDIT method: Part 2 – GALDIT Indicator Descriptions. IAHS and LNEC, *Proceedings of the 4th The Fourth Inter Celtic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources*, held at Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, July 11- 13, 2005.

Chachadi A.G. & Lobo-Ferreira, J.P (2001), Sea water intrusion vulnerability mapping of aquifers using GALDIT method. *Proc. Workshop on modelling in hydrogeology*, Anna University, Chennai, pp.143-156, and in *COASTIN A Coastal Policy Research Newsletter*, Number 4, March 2001. New Delhi, TERI, pp. 7-9.

Comte, J-C., 2008, Apport de la tomographie électrique à la modélisation des écoulements densitaires dans les aquifères côtiers. Thèse de doctorat en Hydrogéologie, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse.

Corbier P., Abou Akar A. et Karnay G. avec la collaboration de Léger A. (2007) Caractérisation des biseaux d'eau salée exploités sur le pourtour du Bassin d'Arcachon et expérimentation sur 3 sites tests. 119 pages, 83 illustrations, 4 annexes. (Rapport BRGM)

Corbier P., Capdeville J.P., Pedron N., Platel J.P, Winckel A., avec la collaboration de Lopez B. (2005) – SAGE Nappes profondes de Gironde – Atlas des zones à risques, 180 pages, 82 illustrations, 4 annexes. (Rapport BRGM)

Custodio, E., 1997. Seawater Intrusion in Coastal Aquifers. Guidelines for Study, Monitoring and Control, Water report n°11. Food and Agriculture Organization of the United Nation, Rome, Italie, 152 pp.

Custodio, E., 2002. Coastal aquifers as important natural hydrogeological structures dans Bocanegra, Martines and Massone (Editors), Groundwater and human development, 1905-1918.

DAUM J.R., avec la collaboration de BAKALOWICZ M., CHERY L., LONGIN G., (1996) – Méthodes et moyens de contrôle des biseaux salés dans les aquifères littoraux. Rap. BRGM R 38847, 77p., 27 fig., 5 tabl. (Rapport BRGM)

De Montety, V., 2008, Salinisation d'un aquifère captif côtier en contexte deltaïque – cas de la camargue (Delta du Rhône, France), Thèse de doctorat en Hydrogéologie, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse.

Direction générale de l'énergie et du climat (2010) - *Prise en compte de l'élévation du niveau de la mer en vue de l'estimation des impacts du changement climatique et des mesures d'adaptation possibles*. Direction générale de l'énergie et du climat / Service du climat et de l'efficacité énergétique / Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique, Synthèse n°2 - février 2010, 6p.

Douez O., Bichot F., Dequidt D., Dugrillon D., Putot E., Petit L. (2010) - *Contribution à la gestion des prélèvements à la périphérie du Marais Poitevin par modélisation hydrodynamique*. BRGM/RP-58297-FR, 239 p, 212 ill., 5 ann., 12 pl.

Feseker, T., 2007, Numerical studies on saltwater intrusion in a coastal aquifer in northwestern Germany. Hydrogeology Journal 15 : 267-279.

Frissant N., Bodéré G. (2009) – Sensibilité des masses d'eau souterraine aux intrusions salines en Corse. Inventaire des forages et puits publics destinés à l'AEP sensibles. Rapport BRGM/RP-56165-FR, 249 p. 30ill., 1ann. (Rapport BRGM)

Frissant N., Bodéré G. (2009) – Sensibilité des masses d'eau souterraine aux intrusions salines en Corse. Inventaire des forages et puits publics destinés à l'AEP sensibles. Rapport BRGM/RP-56165-FR, 249 p. 30 ill., 1 ann.

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

Giambastiani, B.M.S., Antonellini, M., Oude Essink, G.H.P., Stuurman, R..J., 2007, Saltwater intrusion in the unconfined coastal aquifer of Ravenna (Italy) : A numerical model. Journal of Hydrology 340 : 91-104

GIEC de 2007

GIEC. (2007). Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri,

Grinsted A., Moore AE J. C., Jevrejeva AE S., 2009 - Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100 AD, *Climate Dynamics*

Grinsted A., Moore AE J.C., Jevrejeva AE S. (2009) : Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100 AD, *Climate Dynamics*.

Hansen J. E., Scientific reticence and sea level rise, *Environmental research letter* 2, April June 2007, [http://www.iop.org/EJ/article/1748-9326/2/2/024002/erl7\\_2\\_024002.html](http://www.iop.org/EJ/article/1748-9326/2/2/024002/erl7_2_024002.html)

Hansen J.E. (2007) : Scientific reticence and sea level rise, *Environmental research letter* 2.

Herzberg, A., 1901. Die wasserversorgung einiger nordseebäder. *Jour. Gasbeleuchtung und Wasserversorgung*, 44: 815–819, 842–844.

Hubbert, M.K., 1940. The theory of groundwater motion, *Journal of Geology* 48 : 785-944.

IPCC. (2001). *Climate Change 2001 : The Scientific Basis*. Contribution of working group 1 to the Third Assessment Report of the intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK, New York, US, Cambridge University Press.

IPCC. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M.Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp

Krinner G., Julien J. (2007) : High resolution simulation of the surface mass balance of Greenland at the end of this century. *The Cryosphere Discuss.*, 1, 351-383.

Lacouture L. (1996) Faisabilité d'un modèle hydrogéologique sur la bordure sud du Marais Poitevin (17 – 79) – Bilan des connaissances. 51 pages, 16 illustrations, 10 annexes. (Rapport BRGM)

Langevin, C.D., Dausman, A.M., 2005, Numerical Simulation of Saltwater Intrusion in Response to Sea-Level Rise

Lobo-Ferreira, J.P, Chachadi, A.G., Diamantino, C., & Henriques, M.J. (2005b), Assessing aquifer vulnerability to sea-water intrusion using GALDIT method: Part 1 – Application to the Portuguese Aquifer of Monte Gordo. IAHS and LNEC, Proceedings of the 4th The Fourth Inter Celtic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources, held at Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, July 11- 13, 2005.

Lombard A., Garric G., Penduff T., Molines J.M. (2008): Regional variability of sea level change using a global ocean model at ¼° resolution, *Ocean Dyn.*

Louche, B., Crampon, N., Bracq, P., 1998, Qualité et comportement de l'aquifère crayeux sur le littoral Nord-Pas-de-Calais. *C. R. Acad. Sci ; Paris, Sciences de la terre et des planètes*, 327 : 463-470.

Meehl G.A., Stocker T.F., Collins W.D., Friedlingstein P., Gaye A.T., Gregory J.M., Kitoh A., Knutti R., Murphy J.M., Noda A., Raper S.C.B., Watterson I.G., Weaver A.J., Zhao Z.C. (2007): Global Climate Projections. In : *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*

Melloul, A., Collin, M., 2006, Hydrogeological in coastal aquifers due to sea level rise. *Ocean & Coastal Management* 49 : 281-297.

Moreau C.F., Sourisseau B., 1989, Marais de St Ciers (Gironde) - Etude des potentialités en eau souterraine de la nappe des graves par modélisation mathématique. (Rapport BRGM)

Petit V. (1996) - avec la collaboration pour les synthèses régionales: Caous JY. (Nord-Pas-de-Calais), Czernichowski I. (Picardie), de La Quèrière P. (Haute- Normandie), Mäzene B. (Basse-Normandie), Talbo H. (Bretagne), Ehiermael G. (Poitou-Charentes), Sourisseau B. (Aquitaine), Bérard P. (Languedoc-Roussillon), Bel F. (Provence-Côte-d'Azur). Les aquifères littoraux en France métropolitaine. Rapport BRGM R 39298. 120 p. 36 figures, 1 annexe.

Pfeffer, WT., Harper, JT., O'Neel, S., 2008. Kinematic constraints on glacier contributions to 21st-century sea-level rise. *Science* 321:1340–1343.

Putot E., Bichot F. (2007) - *CPER 2000-2006 Phase 4 - Modèle Infra-Toarcien Dogger : calage du modèle hydrodynamique en régime transitoire.* Rapport BRGM/RP- 55742-FR, 94 p., 86 ill., 7 tab., 8 ann.

Rahmstorf S.A. (2007) : Semi-empirical approach to projecting future sea-level rise ; *Science*, Vol. 215, pp. 368-369.

Rahmstorf, S. A., 2007 .Semi-empirical approach to projecting future sea-level rise; *Science*, Vol. 215, pp. 368-369.

Ranjan, S.P., Kazama, So., Sawamoto, M., 2006, Effects of climate and land use changes on groundwater resources in coastal aquifers. *Journal of Environmental Management* 80 : 25-35.

Ranjan, S.P., Kazama, So., Sawamoto, M., 2006, Effects of climate changes on coastal fresh groundwater resources. *Global Environmental Change* 16 : 388-399.

Ranjan, S.P., Kazama, So., Sawamoto, M., Sana, A., 2009, Global scale evaluation of coastal fresh groundwater resources. *Ocean & Coastal Management* 52 : 197-206.

Rignot, E., et al., 2008. Recent Antarctica ice mass loss from radar interferometry and regional climate modeling. *Nature Geoscience*, doi:10.1038/neo102.

Sourisseau B., 1987, Etudes hydrogéologiques et hydrogéotechniques sur le site de la centrale nucléaire du Blayais (Gironde) – Synthèse des travaux et de la surveillance des nappes de 1972 à 1984, Rapport BRGM 85 SGN 374 AQI.

Thiéry D. (1990) - *Logiciel MARTHE. Modélisation d'Aquifère par un maillage rectangulaire en régime transitoire pour un calcul hydrodynamique des écoulements - version 4.3.* Rapport BRGM R 32210 EAU 4S 90, 356 p.

Thiéry D., 2007, Modélisation 3D des écoulements à densité variable avec le logiciel MARTHE version 6.9. Rap. BRGM/RP-55871-FR, 88 p., 23 fig.

Thiéry D., Logiciel MARTHE Modélisation d'Aquifère par un maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Ecoulements, Rapport BRGM R-32210.

Touchard F., Bichot F., Karnay G. (2002) - *CPER 2000-2006 - Phase 1 - Outils pour la gestion de l'aquifère de l'Infra-Toarcien – Synthèse hydrogéologique de l'aquifère Infra-Toarcien en Poitou-Charentes*. Rapport BRGM/RP-51881-FR.

Touchard F., Karnay G., Bichot F. et al. (2004) - *CPER 2000-2006 - Phase 2 - Outils pour la gestion de l'aquifère de l'Infra-Toarcien - Réalisation de deux forages et modélisation géologique de l'aquifère*.

Tsimplis M., Marcos M., Somot S. (2008) : 21 st century Mediterranean sea level rise : Steric and atmospheric pressure contributions from a regional model, *Global and Planetary Change* Volume :63 Issue : 2-3 Pages : 105-111.

Vermeer, M., Rahmstorf, S. 2009. Global sea level linked to global temperature; *PNAS*, December 22, 2009, vol. 106 ,no. 51 , 21527–21532

Vuillaume Y., (1970), *Caractérisation géochimique de l'intrusion marine dans la nappe de la Crau*, 46p., 19 fig., 5 annexes.

Werner, A.D., Simmons, C.T., 2009, *Impact of Sea-Level Rise on Sea Water Intrusion in Coastal Aquifers*. *Ground Water* 47(2) : 197-204.