

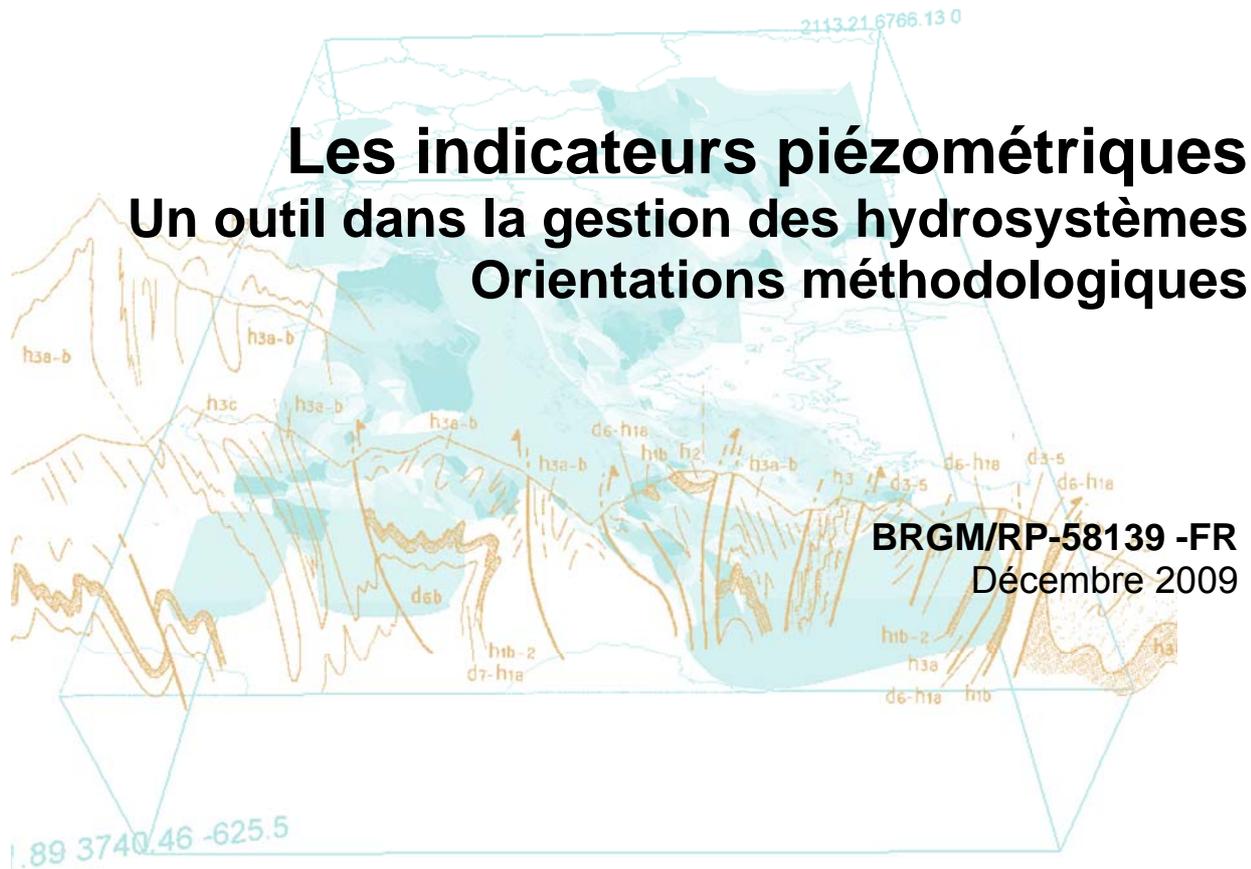
Document public



# Les indicateurs piézométriques

## Un outil dans la gestion des hydrosystèmes

### Orientations méthodologiques





Document public

# Les indicateurs piézométriques

## Un outil dans la gestion des hydrosystèmes

### Orientations méthodologiques

**BRGM/RP 58139 -FR**  
Décembre 2009

Étude réalisée dans le cadre des projets  
de Service public du BRGM

**J.J. Seguin**  
avec la collaboration de  
**E. Gomez et A. Wuilleumier**

#### Vérificateur

Nom : Ph. Stollsteiner  
Date : 11 Août 2010



#### Approbateur

Nom : Y. Barthélémy  
Date : 13 Août 2010



Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000

**Mots clés** : indicateurs piézométriques, volumes prélevables.

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

Seguin J.J., avec la collaboration de Gomez E., Wuilleumier A. – 2009 - Les indicateurs piézométriques. Un outil dans la gestion des hydrosystèmes. Orientations méthodologiques. BRGM/RP-58139-FR

© BRGM, 2010, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## Synthèse

Le suivi de l'état des nappes en France est assuré par de nombreux réseaux piézométriques. La banque nationale d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines, ADES, permet de rassembler et de mettre à disposition des données quantitatives (et qualitatives), régulièrement actualisées, provenant de ces réseaux.

Le *bulletin national de situation hydrologique* complète cet outil de suivi en synthétisant sous forme de cartes et de commentaires l'évolution mensuelle des ressources en eau. Il décrit la situation quantitative des milieux aquatiques (pluies efficaces, débits des cours d'eau, niveau des nappes d'eau souterraine, état de remplissage des barrages-réservoirs) et fournit une information synthétique sur les arrêtés préfectoraux pris pour limiter les usages de l'eau durant la période d'étiage. Des *bulletins de situation hydrologique et hydrogéologique*, régionaux ou de bassins, font aussi le point sur l'état des ressources en eau.

Les indicateurs piézométriques complètent ces "dispositifs" de suivi de l'état des nappes en définissant des seuils de gestion qui sont des niveaux piézométriques particuliers permettant de déclencher des alertes puis des mesures de restriction d'usage en cas d'amorce d'une situation critique pouvant générer des conflits d'usage ou bien menacer l'équilibre de l'hydrosystème considéré.

De tels indicateurs sont déjà mis en place (ou proposés) dans de nombreuses régions, pour des systèmes aquifères libres en général mais aussi pour des systèmes captifs. On peut citer (liste non exhaustive):

- les indicateurs piézométriques de la région Centre avec l'exemple de la nappe des Calcaires de Beauce;
- les "*indicateurs sécheresse*" d'Île de France avec l'exemple de l'indicateur des Yvelines;
- les indicateurs proposés pour la gestion des nappes du Sud de la Vendée, en relation avec la préservation du Marais poitevin;
- l'indicateur du karst de la Rochefoucauld en Poitou-Charentes;
- l'indicateur de la nappe de l'Albien.

La présente étude rappelle et décrit cet "existant" (sans viser à l'exhaustivité); elle tente de systématiser la notion d'indicateur piézométrique et propose quelques méthodes permettant de définir des *seuils de gestion* particuliers: piézométrie objectif d'étiage, piézométrie d'alerte, piézométrie de crise. Ces méthodes peuvent être regroupées dans deux catégories:

1) Analyse des séries piézométriques (et de débits dans le cas d'un cours d'eau en liaison avec la nappe) sans modélisation hydrodynamique:

- recherche de seuils "historiques" dans la série des niveaux,
- recherche de relations entre niveaux et débits (ou assecs observés),
- étude fréquentielle à partir des mesures disponibles,
- ajustement de lois de probabilité avec intervalles de confiance.

Très généralement, c'est une combinaison de ces méthodes qui doit être utilisée.

Dans le cas d'une relation nappe-cours d'eau avec soutien d'étiage du cours d'eau par la nappe, il faudra de plus tenir compte d'un débit minimum du cours d'eau à respecter (Débit Objectif d'Etiage par exemple), contrainte imposée dans la recherche d'un seuil de gestion piézométrique approprié.

2) Modélisation de l'hydrosystème (modèle spatialisé ou global), permettant de mieux comprendre le fonctionnement de l'hydrosystème et de réaliser des simulations prévisionnelles (prédétermination de niveaux). Suivant l'existence ou non d'objectifs à respecter (un seuil piézométrique, un débit de cours d'eau quand celui-ci est soutenu en période d'étiage par la nappe, ...), les simulations se feront avec ou sans "contraintes".

Plusieurs exemples pris dans des contextes hydrogéologiques variés illustrent la recherche de seuils de gestion. La plupart proviennent d'études déjà réalisées et certains ont été repris avec des données actualisées. D'autres sont relatifs à des études en cours ou bien ont été développés dans le cadre de la présente étude:

- bassin de l'Avre (nappe de la Craie en Picardie),
- bassin de la Somme-Soude (nappe de la Craie dans le département de la Marne),
- bassin de l'Eyre en Aquitaine (nappe libre du Plio-Quaternaire),
- bassin de la Barbuise (craie séno-turonienne dans l'Aube),
- nombreux bassins versants en Poitou-Charentes (nappes du Dogger et de l'Infra-Toarcien),
- nappes captives en Aquitaine.

Par ailleurs, un problème lié aux indicateurs est l'évaluation des volumes prélevables (circulaire du 30 Juin 2008 du MEEDEM *relative à la résorption des déficits quantitatifs en matière de prélèvement d'eau et gestion collective des prélèvements d'irrigation*). L'évaluation de ces volumes doit être si possible menée en cohérence avec la recherche de seuils de gestion. Deux exemples sont présentés, l'un est relatif aux nappes du Sud de la Vendée, l'autre à la nappe alluviale de l'Ariège.

Il est important de noter que les exemples présentés dans ce rapport sont traités dans un contexte de nappes qui ne sont pas nécessairement en "bon état quantitatif" au sens de la Directive Cadre Européenne (DCE). Tels qu'ils sont définis et calculés, ils correspondent à une satisfaction des usages 8 années sur 10. Mais cette étude est à vocation méthodologique et la démarche proposée pour la détermination des indicateurs reste pertinente même si les contraintes à prendre en compte pour respecter un bon état quantitatif de l'hydrosystème considéré (en particulier dans un contexte de relations nappe/cours d'eau) venaient à être modifiées (par exemple par une redéfinition des DOE).

Si le "bon état" existe ou s'il est restauré à terme (en définissant des volumes prélevables admissibles pour qu'il en soit ainsi), les indicateurs piézométriques (piézométrie objectif d'étiage ou de gestion, seuils d'alerte et de crise), fixés en tenant compte des éventuelles contraintes à respecter dans l'hydrosystème, deviennent alors des instruments de gestion de la ressource souterraine en permettant de suivre l'évolution des niveaux et donc de vérifier si le "bon état" est préservé où s'il y a risque de le "détériorer". Conformément à la circulaire du 30 Juin 2008, les "piézométries objectives" doivent alors être les garants d'une "gestion quantitative équilibrée" de la ressource ("*satisfaction des usages statistiquement 8 années sur 10*" mais aussi "*bon fonctionnement des milieux aquatiques*" associés).

## Sommaire

<b>1. Introduction</b> .....	<b>11</b>
1.1. POINTS DE REPÈRE.....	11
1.1.1. Débits objectif d'étiage et débit de crise .....	11
1.1.2. Piézométrie objectif d'étiage et piézométrie de crise.....	12
1.1.3. Autres indicateurs piézométriques .....	13
1.1.4. Indicateurs piézométriques et volumes prélevables .....	14
1.2. PRÉCONISATIONS DES SDAGE 2010-2015.....	14
1.2.1. SDAGE du bassin Loire-Bretagne .....	14
1.2.2. SDAGE du bassin Seine-Normandie.....	15
1.2.3. SDAGE du bassin Adour-Garonne.....	15
1.2.4. SDAGE du bassin Rhône-Méditerranée.....	16
1.2.5. SDAGES des districts Rhin et Meuse .....	17
1.2.6. SDAGE Artois-Picardie.....	18
1.3. INITIATIVES RÉGIONALES: UN EXEMPLE.....	19
1.4. OBJECTIF DE L'ÉTUDE.....	20
1.4.1. Orientations .....	20
1.4.2. Définition proposée pour un indicateur piézométrique .....	20
<b>2. Caractérisation de la dynamique des nappes</b> .....	<b>25</b>
2.1. NAPPES LIBRES DES BASSINS SÉDIMENTAIRES .....	25
2.1.1. Paramètres et facteurs influençant la dynamique d'une nappe.....	25
2.1.2. Types de cycles hydrodynamiques .....	25
2.1.3. Quantification de l'inertie des nappes.....	28
2.2. NAPPES ALLUVIALES.....	32
2.3. CAS DES AQUIFÈRES KARSTIQUES .....	33
2.3.1. Caractéristiques des systèmes karstiques .....	33
2.3.2. Analyse des courbes de récession par la méthode de Mangin .....	34
2.3.3. Autre modèle d'analyse des courbes de récession .....	35
2.4. AQUIFÈRES DE SOCLE .....	36
2.5. NAPPES CAPTIVES DES GRANDS BASSINS SÉDIMENTAIRES.....	39
2.5.1. Types de régimes hydrodynamiques.....	39
2.5.2. Exemple en Aquitaine.....	40
2.5.3. Nappes du Jurassique dans le Lot-et-Garonne .....	44

<b>3. Détermination d'indicateurs de gestion</b> .....	<b>47</b>
3.1. ANALYSE DU CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE ET DU FONCTIONNEMENT DE L'HYDROSYSTÈME .....	47
3.1.1. Contexte hydrogéologique .....	47
3.1.2. Analyse du fonctionnement de l'hydrosystème .....	50
3.1.3. Etablissement d'un bilan des flux dans l'hydrosystème .....	53
3.2. RECHERCHE D'INDICATEURS SANS MISE EN ŒUVRE D'UN MODÈLE ....	54
3.2.1. Recherche de "seuils historiques" associée à une analyse fréquentielle	54
3.2.2. Recherche de liaisons entre niveaux de nappe et débits du cours d'eau en connexion avec la nappe .....	59
3.2.3. Ajustement de lois de probabilité .....	78
3.3. UTILISATION D'UN MODÈLE GLOBAL .....	80
3.3.1. Données, calage et résultats.....	80
3.3.2. Exemple 1- Bassin versant de la Barbuise (Aube).....	81
3.3.3. Exemple 2 - Simulations prévisionnelles.....	87
3.4. CAS DES NAPPES CAPTIVES .....	93
3.4.1. Exemple en Aquitaine .....	93
3.4.2. Exemple de la nappe de l'Albien en Île de France .....	95
<b>4. Indicateurs piézométriques et volumes prélevables</b> .....	<b>97</b>
4.1. RECHERCHE D'INDICATEURS SANS MISE EN ŒUVRE D'UN MODÈLE ....	97
4.1.1. Méthode .....	97
4.2. UTILISATION D'UN MODÈLE.....	100
4.2.1. Modèle spatialisé .....	100
4.2.2. Modèle global.....	105
<b>5. Conclusion</b> .....	<b>113</b>
<b>6. Bibliographie</b> .....	<b>119</b>

## Liste des illustrations

Illustration 1 – Corrélation entre niveaux mesurés au piézomètre de Ruffec et pluies à Niort.....	26
Illustration 2 – Corrélation entre niveaux mesurés au piézomètre de Congerville et pluies à Chartres (pas de temps mensuel) .....	27
Illustration 3 - Exemple d'ajustement d'une loi exponentielle sur des niveaux piézométriques .....	29
Illustration 4 - Exemple de temps de réponse calculés pour 2 nappes d'inertie très différente .....	30
Illustration 5 – Exemple de corrélogrammes calculés pour 3 nappes évoluant suivant des cycles différents,.....	31
Illustration 6 – Schématisation de l'impact d'un pompage en nappe sur un cours d'eau .....	33
Illustration 7- Schéma conceptuel des aquifères de socle (R. Wyns, 1998) .....	36
Illustration 8 - Contribution globale annuelle des eaux souterraines à l'alimentation des rivières en zone de socle en Bretagne.....	37
Illustration 9 - Exemple de relation globale "niveau de nappe- débit" en zone de socle .....	38
Illustration 10 – Types d'évolution possible d'une nappe captive exploitée.....	40
Illustration 11 - Carte de répartition des 3 759 captages recensés dans la BD « Prélèvements » et limite d'extension du modèle Nord-Aquitain .....	41
Illustration 12 - Evolution des prélèvements par département (tous usages confondus) pour les 3 759 ouvrages contenus dans base de données des prélèvements.....	41
Illustration 13 - Coupe géologique schématique montrant les relations Aquifères Eocène-Estuaire.....	42
Illustration 14 – Quelques exemples de baisse des niveaux dans l'Eocène nord-aquitain .....	43
Illustration 15 - Prélèvements sur les forages exploités captant les nappes du Jurassique .....	44
Illustration 16 – Exemples de baisse continue des niveaux dans le Jurassique du Lot-et-Garonne .....	45
Illustration 17 - Exemple d'analyse d'un contexte hydrogéologique .....	48
Illustration 18 – Coupe transversale dans le bassin de la Barbuise .....	49
Illustration 19 – Aquifère du Plio-Quaternaire en Aquitaine - Délimitation des bassins versants de surface et souterrain de l'Eyre à partir de la station hydrométrique de Salles.....	49
Illustration 20 – Nappe de Bièvre-Valloire.....	51
Illustration 21- Bassin de la Somme-Soude.....	50
Illustration 22- Nappe de Bièvre-Valloire. Corrélation entre les pluies efficaces (année hydrologique hiver-printemps) et les pluies d'été (juin, juillet, août). .....	52
Illustration 23 – Nappe de Bièvre Valloire – Mise en relation de la pluie, de la pluie efficace et de la profondeur de la nappe.....	52
Illustration 24 - Seuils piézométriques définis pour la nappe des Calcaires de Beauce. ....	56

Illustration 25 – Comparaison de l'indicateur "Beauce centrale" (en noir) à des niveaux moyens mensuels de différentes fréquences de dépassement. ....	56
Illustration 26 - Seuil de "crise renforcée" défini au piézomètre de Montereau-sur-le-Jard (77) captant la nappe des Calcaires de Champigny .....	57
Illustration 27 - Seuils piézométriques définis au piézomètre de Montereau-sur-le-Jard (77).....	58
Illustration 28 – Quantiles des niveaux (moyennes mensuelles) calculés au piézomètre de Montereau-sur-le-Jard (77). Nappe des Calcaires de Champigny) et comparaison avec les valeurs des années 2007, 2008 et 2009 (moyennes mensuelles).....	58
Illustration 29 – Evolution des niveaux enregistrés au piézomètre des Grandes Loges (bassin de la Somme Soude) .....	60
Illustration 30 – Niveaux moyens mensuels au piézomètre des Grandes Loges et débits mensuels moyens de la Soude à Soudron (bassin de la Somme-Soude) .....	60
Illustration 31 – Piézomètre des Grandes-Loges. Corrélogramme des niveaux moyens mensuels .....	61
Illustration 32 - Graphique des fréquences cumulées des niveaux moyens mensuels minimum et maximum pour le piézomètre des Grandes-Loges.....	61
Illustration 33 - Bassin de la Somme-Soude - Définition de seuils piézométriques .....	62
Illustration 34 – Bassin de la Somme-Soude - Règle de gestion proposée .....	63
Illustration 35 – Débits d'étiage de la Soude (moyennes mensuelles) en fonction des niveaux moyens mensuels maximum au piézomètre des Grandes-Loges.....	64
Illustration 36 – Evolution des niveaux de la nappe aux piézomètres de Tilloloy, Coulemelle, Damery, Hangest et St. Mard .....	65
Illustration 37 – Bassin de l'Avre – Niveau de la nappe au piézomètre de Hangest et débit de l'Avre à la station de Moreuil.....	66
Illustration 38 - Corrélogramme des niveaux mesurés au piézomètre de Hangest .....	67
Illustration 39 - Corrélogramme croisé entre les niveaux au piézomètre de Hangest et les débits de l'Avre à Moreuil.....	67
Illustration 40 - Relation entre le débit d'étiage de l'Avre et le niveau de la nappe au piézomètre de Hangest à la date d'occurrence de ce débit. ....	68
Illustration 41- Relation entre les niveaux moyens du mois d'Avril et les débits moyens mensuels minimum de l'Avre.....	69
Illustration 42 – Relation entre les niveaux moyens du mois de Mai et les débits moyens mensuels minimum de l'Avre.....	69
Illustration 43 – Graphique des fréquences cumulées du niveau moyen au mois d'Avril .....	70
Illustration 44 - Graphique des fréquences cumulées du niveau à la date d'étiage de l'Avre .....	70
Illustration 45 – Carte piézométrique de la nappe du Plio-Quaternaire dans le secteur du bassin versant de l'Eyre et localisation des piézomètres .....	72
Illustration 46 - Evolution des niveaux de la nappe aux piézomètres .....	73
Illustration 47 - Evolution des débits de l'Eyre et mise en relation avec les niveaux mesurés au piézomètre de Pirac sur la période 1989-2009. ....	73

Illustration 48 – Bassin de l'Eyre – Corrélogramme des niveaux de la nappe mesurés au piézomètre de Pirac .....	74
Illustration 49 - Bassin de l'Eyre – Corrélogramme croisé des niveaux de la nappe mesurés au piézomètre de Pirac et des débits de l'Eyre.....	74
Illustration 50 – Débit moyen mensuel minimum de l'Eyre à Salles et niveau moyen du mois de Mai au piézomètre de Pirac.....	75
Illustration 51 - Fréquence cumulée du niveau moyen du mois de Mai .....	75
Illustration 52 – Fréquence cumulée des niveaux moyens mensuels minimum.....	76
Illustration 53 - Piézomètre de Saint-Martin-Chennetron : ajustement à une loi normale des niveaux piézométriques mensuels de décembre ("basses eaux") - Période 1969-2004 .....	78
Illustration 54 - Localisation des piézomètres et des stations de jaugeage.....	82
Illustration 55 - Débit de la Barbuise à Pouan-les-Vallées (courbe rouge) et niveaux de la nappe.....	82
Illustration 56 – Pluies efficaces (année hydrologique) calculées avec un modèle pluies-débits.....	83
Illustration 57 - Pluies efficaces et débits moyens mensuels minimum de la Barbuise.....	85
Illustration 58 – Fréquence cumulée de la pluie efficace dans le bassin de la Barbuise .....	85
Illustration 59 - Pluies efficaces et niveaux maximum de la nappe en avril-mai.....	85
Illustration 60 - Fréquence cumulée des niveaux maximum de la nappe en Avril-Mai dans le bassin de la Barbuise .....	86
Illustration 61 - Niveaux maximum de la nappe en Avril-Mai et débits moyens mensuels minimum de la Barbuise.....	86
Illustration 62 - Calculs de débits ou de niveaux à partir de n scénarios climatiques(ici n=5) .....	88
Illustration 63 - Exemple de prévision dans un environnement Excel .....	88
Illustration 64 – Localisation des piézomètres utilisés pour définir l'indicateur des Yvelines.....	89
Illustration 65 – Modélisation de l'indicateur des Yvelines et simulation prévisionnelle .....	91
Illustration 66 – Localisation de la zone d'étude bergeracoise et carte piézométrique de mars/avril 2006.....	94
Illustration 67 - Niveaux de la nappe du Dogger mesurés au piézomètre de Luçon.....	98
Illustration 68 - Niveaux année par année (ramenés à 0 au 1 <sup>er</sup> Juin) au piézomètre de Luçon.....	98
Illustration 69 - Mise en évidence d'une relation linéaire entre niveaux de la nappe et volumes pompés au piézomètre de Luçon en période estivale pour chacune des années retenues .....	98
Illustration 70 – Relation entre le volume moyen exploitable en été et une cote donnée à respecter sur le secteur du Lay à partir des données du piézomètre de Luçon.....	99
Illustration 71 - Points de contrôle des débits et hauteurs d'eau de l'Ariège, de l'Hers Vif et de la Lèze sur la zone modélisée .....	102
Illustration 72 - Zones de gestion de la nappe alluviale de l'Ariège.....	104

Illustration 73 - Modélisation pluie-débit avec introduction de niveaux piézométriques.....	105
Illustration 74 - La fonction de transfert "niveau-débit" permet de calculer la baisse des débits à l'exutoire à partir des rabattements de niveaux dus aux pompages .....	106
Illustration 75 – Bassins versants étudiés pour le calcul des volumes exploitables .....	109
Illustration 76 – Classification des bassins en fonction du volume exploitable .....	110
Illustration 77- Lame d'eau disponible pour les prélèvements par bassin versant en année "sèche" ( période de retour 1 année sur 4) .....	111
Illustration 78 -Volumes disponibles globaux rapportés aux valeurs de recharge issus du modèle MODCOU (année "sèche").....	112
Illustration 79 – Indicateurs piézométriques définis par le Warren County , en Virginie (USA) .....	114
Illustration 80 – Système d'alerte dans le plan sécheresse en Espagne .....	114
Illustration 81 – Exemple d'indicateurs mis en place par le New Jersey Department of Environmental Protection. ....	116
Illustration 82 –Combinaisons d'indicateurs mis en place par le "National Drought Mitigation Center (USA)" .....	117

## Liste des annexes

<b>Annexe 1 - Compléments théoriques .....</b>	<b>123</b>
<b>Annexe 2 - Dynamique des nappes "libres" .....</b>	<b>135</b>
<b>Annexe 3 - Temps de demi-décroissance des niveaux calculés sur 68 aquifères .....</b>	<b>141</b>
<b>Annexe 4 - Indicateurs piézométriques du bassin Loire-Bretagne .....</b>	<b>145</b>
<b>Annexe 5 - Localisation des aquifères cités dans l'étude .....</b>	<b>153</b>
<b>Annexe 6 - Quantification de l'influence sur les cours d'eau des pompages en nappes alluviales .....</b>	<b>159</b>

# 1. Introduction

Si le territoire national est globalement bien doté en eau (ressources renouvelables et stocks souterrains), les épisodes de déficit pluviométrique qui se sont succédés ces vingt dernières années (1989-1991, 1996-1997, 2003 et 2005-2006), ont révélé des secteurs plus fragiles que d'autres dans l'approvisionnement en eau des populations et des cultures, avec l'apparition de conflits d'usage. Ils ont aussi de nouveau mis en évidence l'interdépendance des eaux souterraines et superficielles: de nombreux cours d'eau en relation avec les nappes n'ont plus été alimentés par celles-ci en raison de la baisse des niveaux, conduisant à une réduction de leur débit estival voire à des assècs.

Durant ces épisodes, les réserves en eau des sols et des aquifères à nappe libre ont été diversement affectées suivant les régions et suivant les caractéristiques de la sécheresse, notamment la date de déclenchement de celle-ci dans le cycle hydrologique (sécheresse hivernale, printanière ou estivale) et sa durée. L'impact de ces déficits pluviométriques sur les nappes libres a été aussi plus ou moins important suivant l'état des réserves en début de sécheresse (réserves bien reconstituées avec des niveaux de nappes hauts ou bien niveaux déjà bas) et bien sûr suivant l'importance des prélèvements qui sollicitent les nappes en de telles périodes.

La sécheresse se manifeste donc sous divers aspects (sécheresse météorologique, sécheresse agricole, sécheresse hydrologique) et sera différemment ressentie par les acteurs sociaux suivant sa durée, le compartiment de l'hydrosystème affecté (sol, cours d'eau, nappe), le type d'activité économique touché (agriculture, alimentation en eau potable, production d'électricité dans le cas des cours d'eau). Dans les cas extrêmes, tout le fonctionnement de l'hydrosystème peut être perturbé durablement : la réserve en eau des sols est épuisée et les nappes, du fait d'une baisse importante de leurs niveaux (absence de recharge et pompages accrus), n'assurent plus le soutien d'étiage des cours d'eau, l'alimentation des sources et le soutien des marais.

Pour anticiper ces problèmes ou les atténuer et garantir au mieux la continuité des approvisionnements en eau des différents secteurs d'activité et des écosystèmes, la gestion des ressources en eau souterraine doit pouvoir s'appuyer sur des **indicateurs piézométriques** (dont on propose une définition à la fin de cette partie introductive), ou bien sur d'autres types d'indicateurs (à définir en fonction des particularités de certaines formations aquifères, par exemple les formations karstiques ou littorales).

## 1.1. POINTS DE REPÈRE

### 1.1.1. Débits objectif d'étiage et débit de crise

Pour les cours d'eau, des indicateurs de gestion ont été définis: il s'agit du DOE (débit objectif d'étiage) et du DCR (débit de crise). Dans le cas de nappes assurant le soutien d'étiage des cours d'eau, leur prise en compte est nécessaire en tant que contrainte utilisée pour définir des niveaux piézométriques permettant de respecter ces débits d'objectif.

Le glossaire mis en place sur le site Eaufrance ([www.eaufrance.fr](http://www.eaufrance.fr)) donne de ces deux débits les définitions suivantes:

**DOE**: "*valeur de débit d'étiage en un point (au point nodal) au-dessus de laquelle il est considéré que l'ensemble des usages (activités, prélèvements, rejets,...) en aval est en*

*équilibre avec le bon fonctionnement du milieu aquatique. C'est un objectif structurel, arrêté dans les SDAGE, SAGE et documents équivalents, qui prend en compte le développement des usages à un certain horizon (10 ans pour le SDAGE). Il peut être affecté d'une marge de tolérance et modulé dans l'année en fonction du régime (saisonnalité). L'objectif DOE est atteint par la maîtrise des autorisations de prélèvements en amont, par la mobilisation de ressources nouvelles et des programmes d'économies d'eau portant sur l'amont et aussi par un meilleur fonctionnement de l'hydrosystème".*

**DCR:** *"valeur de débit d'étiage au-dessous de laquelle l'alimentation en eau potable pour les besoins indispensables à la vie humaine et animale, ainsi que la survie des espèces présentes dans le milieu sont mises en péril. À ce niveau d'étiage, toutes les mesures possibles de restriction des consommations et des rejets doivent avoir été mises en œuvre (plan de crise)".*

Une définition plus opérationnelle du DOE était donnée par le SDAGE Adour-Garonne de 1996:

*"Le débit objectif d'étiage (DOE) est la valeur de débit fixée par le SDAGE Adour Garonne:*

- *au-dessus de laquelle sont assurés la coexistence normale de tous les usages et le bon fonctionnement du milieu aquatique,*
- *qui doit en conséquence être garantie chaque année pendant l'étiage, avec les tolérances définies comme suit : "le DOE est respecté pour l'étiage d'une année si, pendant cet étiage, le plus faible débit moyen de 10 jours consécutifs (VNC10) n'a pas été inférieur à 80 % du DOE (VCN10 >0,8 \* DOE)".*

*Le DOE ainsi défini doit être respecté statistiquement 8 années sur 10".*

Mais d'autres modes de calcul existent et le DOE peut correspondre :

- *au débit moyen mensuel le plus bas de fréquence quinquennale, le "QMNA5" (souvent utilisé comme DOE);*
- *à la moyenne des débits les plus bas observés pendant 30 jours consécutifs (VCN30).*

Suivant le mode de calcul choisi, les conséquences en termes de gestion de l'hydrosystème seront différentes, non seulement pour le cours d'eau bien sûr, mais aussi pour la nappe associée, sachant qu'une contrainte qui pourrait être imposée à celle-ci, dans sa contribution au soutien d'étiage du cours d'eau, sera le respect du DOE. Celui-ci pourra donc être plus ou moins contraignant pour les usagers ou plus ou moins protecteur pour l'hydrosystème.

Un second problème, introduisant un biais dans les calculs et dans les modélisations couplées "pluies-niveaux-débits" est l'influence sur le régime des cours d'eau des prélèvements et des différents ouvrages hydrauliques (influence dont il faudrait s'affranchir en "renaturalisant" les débits, problème difficile qui nécessite en premier lieu d'avoir des données sur les pompages, les lâchers de retenues,...).

### **1.1.2. Piézométrie objectif d'étiage et piézométrie de crise**

Calqués sur les deux indicateurs définis pour les cours d'eau (DOE et DCR), les concepts de POE (piézométrie objectif d'étiage) et PCR (piézométrie de crise) ont été introduits dans le SDAGE Adour Garonne de 1996. Ce SDAGE recommande que soient définis, pour les principaux systèmes aquifères, des points d'observation de la piézométrie des nappes et des cotes associées à ces points, POE et PCR, ainsi définis:

**Piézométrie objectif d'étiage (POE):** la cote du niveau de la nappe, fixée par le SDAGE ou un SAGE,

- au dessus de laquelle sont assurés la coexistence normale des usages et le bon fonctionnement quantitatif et qualitatif de la ressource souterraine et des cours d'eau qu'elle alimente,
- qui doit en conséquence être maintenue par une gestion à long terme des autorisations et des programmes relatifs aux prélèvements et aux autres usages.

**Piézométrie de crise (PCR):** la cote du niveau de la nappe, fixée par le SDAGE ou un SAGE,

- au dessous de laquelle sont mises en péril la pérennité notamment qualitative de la ressource souterraine, l'alimentation en eau potable qui y puise, la survie des milieux qu'elle alimente
- qui doit en conséquence être impérativement maintenue par toutes mesures préalables, notamment de restriction des usages, décidées par les préfets en application le cas échéant d'un plan de crise.

Mais ces deux notions de POE et PCR ne sont que de simples transpositions à l'hydrogéologie des concepts hydrologiques de DOE (débit objectif d'étiage) et DCR (débit de crise) et doivent donc être adaptées aux différents contextes hydrogéologiques de France.

Les études menées en Aquitaine depuis 2002 dans le cadre des Contrats de Plan Etat-Région (cf références bibliographiques), dans différents contextes hydrogéologiques (nappes libres et nappes captives profondes) montrent les difficultés rencontrées pour fixer de telles cotes piézométriques.

### 1.1.3. Autres indicateurs piézométriques

Dans de nombreuses régions, ont été mis en place des *indicateurs piézométriques d'alerte et de crise* : partant d'un premier seuil d'alerte (PSA: piézométrie seuil d'alerte), des niveaux intermédiaires sont fixés jusqu'à un seuil dit de crise (en général un seuil "historique").

C'est le cas dans plusieurs régions (cf références bibliographiques), en particulier dans les bassins Seine-Normandie (Île de France, Champagne-Ardenne) et Loire-Bretagne (dont la région Centre avec par exemple la nappe des Calcaires de Beauce, gérée depuis plus de 10 ans à l'aide d'indicateurs).

Fixés souvent sur la base d'une analyse statistique des séries de mesures disponibles, les PSA peuvent être révisés au cours du temps.

Dans le cas du Marais poitevin, le "*Rapport du groupe d'experts mis en place à la demande du Ministère chargé de l'Ecologie sur les niveaux d'eau dans le Marais poitevin, la piézométrie des nappes de bordure et les volumes prélevables pour l'irrigation dans le périmètre des SAGE du Lay, de la Vendée et de la Sèvre-Niortaise et du Marais poitevin*" (Octobre 2007) préconise:

" Aussi, pour chacune des unités hydrogéologiques, dont le périmètre reste à définir, il convient de préciser les piézomètres représentatifs pour lesquels il faut fixer :

- ♦ une piézométrie "objectif d'étiage de début d'étiage", ainsi qu'une date jusqu'à laquelle cette piézométrie doit être respectée, dans l'objectif de réduire la période d'assec des cours d'eau ou de tarissement des sources pour retrouver un bon état écologique ;
- ♦ une piézométrie "objectif d'étiage de fin d'étiage", permettant de garantir, 4 années sur 5, une reconstitution plus rapide de la nappe après la période d'étiage ;
- ♦ une piézométrie de crise ne devant pas être franchie pour éviter de mettre en péril un écosystème associé ou la pérennité de la nappe (intrusion d'eau salée par exemple).

Chaque SAGE devra prévoir des modalités de suivi et d'évaluation du dispositif de gestion mis en œuvre"....

#### 1.1.4. Indicateurs piézométriques et volumes prélevables

Fixer des niveaux piézométriques d'objectif c'est aussi, implicitement, fixer les volumes prélevables sous cette contrainte. Ainsi, la **circulaire du 30 Juin 2008** relative à la *"résorption des déficits quantitatifs en matière de prélèvements d'eau et de gestion collective des prélèvements d'irrigation"* précise que:

" Dans le cas général, une ressource en eau fait l'objet d'une gestion quantitative équilibrée lorsque, statistiquement, huit années sur dix en moyenne, les volumes et débits maximums autorisés ou déclarés dans cette ressource, quels qu'en soit leurs usages (irrigation, alimentation en eau potable, ...), peuvent en totalité être prélevés dans celle-ci tout en garantissant le bon fonctionnement des milieux aquatiques correspondants.

La garantie de bon fonctionnement peut, lorsqu'ils existent, s'observer par le respect des débits ou niveaux piézométriques d'objectifs, le cas échéant inscrits sous forme de Débit d'Objectif d'Étiage (DOE) ou de piézométrie d'objectif d'étiage (POE) dans les Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) ou les Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE)"

### 1.2. PRÉCONISATIONS DES SDAGE 2010-2015

On présente ci-dessous quelques extraits des SDAGE établis pour la période 2010-2015, dans lesquels les objectifs de gestion **quantitative** de la ressource en eau souterraine sont précisés, en termes d'indicateurs et/ou de volumes prélevables. Ces SDAGE mentionnent tous, quelle que soit la formulation, la nécessité de satisfaire d'une part les usages et d'autre part le bon fonctionnement du milieu aquatique mais certains (par exemple celui du bassin Rhône-Méditerranée, cf § 1.2.4 ci-après) mettent plutôt l'accent sur la priorité donnée aux zones *"s'avérant particulièrement importantes pour l'approvisionnement en eau potable actuel ou futur"*), donc sur la satisfaction des usages.

#### 1.2.1. SDAGE du bassin Loire-Bretagne

Le passage ci-dessous est extrait du document "**Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux du bassin Loire-Bretagne**" (chapitre 7A, *"Assurer l'équilibre entre la ressource et les besoins"*, page 57; en bleu, les points-clé en rapport avec la présente étude):

" En lien avec les contraintes économiques, le confort, la récurrence des années sèches, les besoins en eau évoluent alors que la ressource naturelle n'est pas extensible ; c'est donc l'alimentation des milieux naturels qui est pénalisée et il peut s'ensuivre une dégradation de ceux-ci dans les régions les plus exploitées.

La gestion de la ressource en eau s'appuie sur un certain nombre de valeurs dont la principale est le débit objectif d'étiage (DOE). Le DOE est un débit moyen mensuel au dessus duquel il est considéré que dans la zone d'influence du point nodal, l'ensemble des usages est possible en équilibre avec le bon fonctionnement du milieu aquatique.....

[...Le même type de principe peut être utilisé pour la gestion des nappes d'eau souterraines en définissant des piézométries objectif d'étiage \(POE\).](#)

Pour maintenir ou rétablir l'équilibre ressources / besoins et l'alimentation des milieux naturels, les alternatives ou moyens complémentaires suivants sont à privilégier :

- économiser l'eau dans les usages économiques et l'eau potable ;
- [appliquer la gestion volumétrique de la ressource en eau en fonction des disponibilités en fin de printemps et de l'évolution d'indicateurs sur le milieu en cours de campagne ;](#)
- [déterminer le volume exploitable dans les zones de répartition des eaux \(ZRE\)](#) ainsi que les masses d'eau où des problèmes quantitatifs récurrents sont rencontrés ;

- diminuer les prélèvements estivaux ;
- réaliser des réserves de substitution" .....

### 1.2.2. SDAGE du bassin Seine-Normandie

Le passage ci-dessous est extrait du document "**Le SDAGE du bassin de la Seine et des cours d'eau côtiers normands**" (§ 3.1.9, "*Défi 7: Gestion de la rareté de la ressource en eau*", pages 97 et 98; en bleu, les points-clé en rapport avec la présente étude):

" Il faut distinguer la gestion quantitative préventive de l'eau qui s'applique sur les masses d'eau en tension quantitative chronique, de la gestion de crise. Dans le premier cas, il s'agit de gérer la ressource en eau de façon continue dans le temps de manière à prévenir la surexploitation (orientations 24, 25 et 26). Dans le second cas (orientation 25), il s'agit de mettre en place un dispositif de restrictions progressives d'usages pour gérer les situations exceptionnelles de sécheresse".....

**Orientation 23** - Anticiper et prévenir les surexploitations globales ou locales des ressources en eau souterraine.

L'état quantitatif d'une eau souterraine est considéré comme bon lorsque les prélèvements ne dépassent pas la capacité de renouvellement de la ressource disponible, et lorsque l'alimentation en eau des écosystèmes aquatiques de surface et des zones humides directement dépendantes est assurée. Une part importante des zones humides est également directement liée au niveau des nappes.

**- Disposition 109 - Mettre en œuvre une gestion collective pour les masses d'eau ou partie de masses d'eau souterraines en mauvais état quantitatif**

Lorsqu'elle n'existe pas déjà, une structure de concertation réunissant l'ensemble des usagers sur le périmètre pertinent peut être mise en place à l'initiative du préfet ou d'un porteur de projet (SAGE, contrat de nappe...). Cette structure vise à promouvoir et favoriser une gestion collective économe et partagée entre les activités légalement exercées.

**- Disposition 110 - Définir des volumes maximaux prélevables pour les masses d'eau ou parties de masses d'eau souterraines en mauvais état quantitatif.**

Lorsque la structure de concertation prévue par la disposition 109 est mise en place, les masses d'eau, ou parties de masses d'eau identifiées dans le tableau de l'annexe 4 font l'objet d'un bilan détaillé en vue de déterminer les **limites maximales de prélèvements**.

L'impact spécifique des prélèvements pour les productions d'eau potable, industrielles et pour l'irrigation devra être mis en évidence, que ces prélèvements soient permanents ou temporaires. **Ces limites sont fixées de manière à ne pas engendrer de baisse inter-annuelle de la piézométrie susceptible de nuire à la production d'eau potable.** Elles garantissent par ailleurs le bon état des eaux de surface et des écosystèmes aquatiques qui leur sont associés. En zone littorale, elles visent aussi à éviter l'intrusion d'eaux saumâtres. Ces valeurs tiennent compte des prélèvements actuels et futurs. Une ré-alimentation de nappe peut y être étudiée afin de prévenir les déficits lors de la période d'étiage.

**Orientation 24** **Assurer une gestion spécifique par masse d'eau ou partie de masses d'eau souterraines."**

suivent les modalités de gestion pour différentes masses d'eau.

### 1.2.3. SDAGE du bassin Adour-Garonne

Le passage ci-dessous est extrait du document "**SDAGE du bassin Adour-Garonne**", Chapitre 5 "**Orientations et dispositions du SDAGE Adour-Garonne**", paragraphe "**Gérer durablement les eaux souterraines - Orientation C**", pages 83, 84 et 85):

#### **C7 Restaurer l'équilibre quantitatif**

Pour toutes les masses d'eaux souterraines qui ne sont pas en bon état quantitatif l'Etat ou les SAGE, en application de l'article L212-5-1 du code de l'environnement, **déterminent pour tous les usages le volume maximum prélevable compatible avec l'équilibre quantitatif des aquifères en fonction d'indicateurs précis, tels que par exemple les niveaux piézométriques et la recharge**. L'Etat délivre les autorisations de prélèvements correspondantes compatibles avec le volume maximum prélevable. Au plus tard le 31/12/2014, le volume total autorisé ne dépasse pas le volume maximum prélevable. Pour les prélèvements d'irrigation à usage agricole, l'autorisation est délivrée à l'organisme unique de gestion collective prévu par l'article L211-3 II 6° du code de l'environnement.

### **C13 Développer les démarches de gestion concertée**

Les collectivités et leurs groupements, l'Etat et ses établissements publics suscitent, initient et accompagnent des démarches de gestion concertée des eaux souterraines qui pourront le cas échéant aboutir à un SAGE.

#### **1.2.4. SDAGE du bassin Rhône-Méditerranée**

Le passage ci-dessous est extrait du document "**Bassin Rhône-Méditerranée - Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux 2010-2015**" - Chapitre 2, "*Orientations fondamentales et dispositions associées*" (§ "*Orientation fondamentale n°7 – Atteindre l'équilibre quantitatif en améliorant le partage de la ressource en eau et en anticipant l'avenir*", page 190 et 196). En bleu, les points-clé en rapport avec la présente étude.

#### **[Disposition 7-01] - Améliorer la connaissance de l'état de la ressource et des besoins**

La mise en œuvre d'une politique de gestion quantitative des ressources en eau nécessite au préalable une connaissance de l'état des ressources, des prélèvements et des besoins, en particulier dans les territoires (sous-bassins et/ou secteurs de masses d'eau souterraine) présentant des déséquilibres quantitatifs.

Toutefois, les secteurs qui ne présentent pas de déséquilibre avéré, mais pour lesquels les tendances laissent prévoir une évolution défavorable, notamment par le développement rapide de prélèvements soumis à seule déclaration, doivent faire l'objet d'une attention particulière.

Pour l'ensemble de ces territoires, les services et organismes en charge de la gestion de l'eau au niveau local évaluent:

- les volumes prélevés et les besoins pour les différents usages et le fonctionnement des milieux. Pour cela, tous les prélèvements en eaux superficielles ou souterraines, sont régulièrement recensés et équipés d'appareils de mesure. La mise en place de zones de répartition des eaux (ZRE), (cf. articles R 211-71 et suivants du code de l'environnement), peut contribuer à une meilleure connaissance et contrôle des prélèvements ;
- la situation quantitative des ressources en eau superficielle et souterraine (**suivi hydrométrique ou piézométrique, volumes maximaux prélevables**, relations entre milieux superficiels et souterrains, évaluation des situations non influencées) ;
- la disponibilité future de la ressource en réalisant des prévisions basées :
  - d'une part, sur les tendances connues actuellement ;
  - d'autre part, en intégrant le changement climatique dans des scénarios à moyen et long terme

#### **[Disposition 7-03] - Définir des niveaux piézométriques de référence et des volumes prélevables globaux pour les eaux souterraines**

Conformément à l'arrêté du 17 mars 2006 modifié, des niveaux piézométriques ou des volumes prélevables globaux sont définis sur un cycle annuel complet, en précisant les objectifs de quantité, dans le temps et dans l'espace, en des points stratégiques de référence.

Pour la définition des objectifs de quantité, sont prises en compte les contraintes liées :

- aux relations entre eaux superficielles et eaux souterraines. Une attention particulière sera apportée au rôle des eaux souterraines en tant qu'alimentation ou soutien d'étiage des cours d'eaux ;
- aux relations entre couches aquifères superposées ;
- à la maîtrise des intrusions de biseaux salés en zones littorales ;
- à la pratique des différents usages, en s'attachant à définir les conditions de satisfaction des plus exigeants, dont notamment l'eau potable en période de crise.

Dans les zones en déficit quantitatif avéré, le suivi quantitatif des eaux souterraines est assuré par la mise en place de points stratégiques de référence pour lesquels sont définis :

- des niveaux piézométriques de référence :
  - un niveau piézométrique d'alerte (NPA) : début de conflits d'usages et premières limitations de pompage ;
  - un niveau piézométrique de crise renforcée (NPCR) : niveau à ne jamais dépasser et donc d'interdiction des pompages à l'exception de l'alimentation en eau potable, qui peut faire l'objet de restrictions ;
- ou des volumes prélevables globaux.

Afin d'assurer une nécessaire cohérence avec la gestion des eaux de surface, ainsi qu'avec les politiques de gestion des situations de sécheresse, ces principes sont étendus à l'ensemble des zones présentant des déséquilibres qui compromettent l'atteinte du bon état, ou s'avérant particulièrement importantes pour l'approvisionnement en eau potable actuel ou futur".

### 1.2.5. SDAGES des districts Rhin et Meuse

Le passage ci-dessous est extrait du "Document d'accompagnement n°8, tome 19, des SDAGES des districts Rhin et Meuse" - *Eléments spécifiques aux eaux souterraines du district Rhin découlant de la directive 2006/118/CE - Etat quantitatif des eaux souterraines* (page 15). Il n'est pas fait explicitement mention de piézométrie d'objectif. Les recommandations s'appuient sur les éléments de cadrage apportés par la DCE et sur la directive 2006/118/CE du 12 Décembre 2006.

La DCE définit le bon état quantitatif des eaux souterraines ainsi :

« **Le bon état est celui où le niveau de l'eau souterraine dans la masse d'eau est tel que le taux annuel moyen de captage à long terme ne dépasse pas la ressource disponible de la masse d'eau souterraine.**

En conséquence, le niveau de l'eau souterraine n'est pas soumis à des modifications anthropogéniques telles qu'elles :

- empêcheraient d'atteindre les objectifs environnementaux pour les eaux de surface associées ;
- entraîneraient une détérioration importante de l'état de ces eaux ;
- occasionneraient des dommages importants aux écosystèmes terrestres qui dépendent directement de la masse d'eau souterraine (*etc.*) ;
- occasionneraient l'invasion d'eau salée".

L'objectif est donc d'assurer un équilibre sur le long terme entre les volumes s'écoulant au profit des autres milieux ou d'autres nappes, les volumes captés et la recharge de chaque nappe. **En termes de gestion quantitative, un autre objectif apparaît pour ce qui concerne la préservation des usages, donc de l'usage eau potable prépondérant pour les eaux souterraines.**

L'appréciation de l'état quantitatif des masses d'eau souterraines est réalisée à partir des éléments suivants (article 3 de l'arrêté du 17 décembre 2008) :

- l'évolution des niveaux piézométriques des eaux souterraines ;
- l'évolution de l'état des eaux de surface associées ;
- l'évolution des écosystèmes terrestres qui dépendent directement de la masse d'eau souterraine ;

- les modifications de la direction d'écoulement occasionnant une invasion d'eau salée ou autre ou montrant une tendance durable susceptible d'entraîner de telles invasions ;
- les Zones de répartition des eaux (ZRE).

L'analyse de l'état quantitatif des masses d'eau souterraine est éventuellement complétée à l'aide des éléments de contexte suivants :

- l'existence de conflits d'usage ;
- l'existence d'une réglementation traduisant un déséquilibre quantitatif: arrêts sécheresse fréquents, plan « sécheresse » régional ou départemental, etc. ;
- l'existence de mesures de gestion d'ordre quantitatif élaborées dans le cadre de SAGE, contrat de nappe ou de rivière, mise en place de procédures de gestion quantitative de l'eau, plans de gestion des étiages ou de ressources alternatives, etc.

En l'état actuel des réflexions, une masse d'eau souterraine est considérée en bon état quantitatif dès lors :

- qu'il n'est pas constaté d'évolution interannuelle défavorable de la piézométrie (baisse durable de la nappe hors effets climatiques) ;
- et que le niveau piézométrique qui s'établit en période d'étiage permette de satisfaire les besoins d'usage, sans risque d'effets induits préjudiciables sur les milieux aquatiques et terrestres associés, ni d'invasion salée ou autre.

Dans le district Rhin, une seule masse d'eau présente des problèmes quantitatifs : il s'agit de la masse d'eau N° 2005 : Grès vosgien captif non minéralisé.

#### 1.2.6. SDAGE Artois-Picardie

Le passage ci-dessous est extrait du document "**Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux - Bassin Artois-Picardie**" - Annexe C - Chapitre 3 – "*Méthodologie nationale d'évaluation de l'état quantitatif des eaux souterraines*" (pages 62 et 63).

Comme dans les SDAGES des districts Rhin et Meuse, il n'est pas fait explicitement mention de piézométrie d'objectif.

La DCE (paragraphe 2.1.2 de l'annexe V) définit le bon état quantitatif des eaux souterraines ainsi : « Le bon état est celui où le niveau de l'eau souterraine dans la masse d'eau est tel que le taux annuel moyen de captage à long terme ne dépasse pas la ressource disponible de la masse d'eau souterraine ».

En conséquence, le niveau de l'eau souterraine n'est pas soumis à des modifications anthropogéniques telles qu'elles :

- *empêcheraient d'atteindre les objectifs environnementaux pour les eaux de surface associées;*
- *entraîneraient une détérioration importante de l'état de ces eaux ;*
- *occasionneraient des dommages importants aux écosystèmes terrestres qui dépendent directement de la masse d'eau souterraine (...);*
- *occasionneraient l'invasion d'eau salée.*

L'objectif est donc d'assurer un équilibre sur le long terme entre les volumes s'écoulant au profit des autres milieux ou d'autres nappes, les volumes captés et la recharge de chaque nappe. En termes de gestion quantitative, un autre objectif apparaît pour ce qui concerne la préservation des usages, donc de l'usage eau potable prépondérant pour les eaux souterraines. L'appréciation de l'état quantitatif des masses d'eau souterraines est réalisée à partir des éléments suivants permettant de déceler une éventuelle dégradation :

- une représentation de l'évolution des niveaux piézométriques ;
- pour les aquifères en lien avec les eaux de surface :
  - une évaluation de l'évolution des débits des cours d'eau dépendant de ces aquifères (mise en évidence éventuelle d'une diminution anormale des débits en période d'étiage),
  - l'observation d'un assèchement anormal des cours d'eau et des sources, à l'étiage;

- à partir des mesures de qualité une vérification de la présence éventuelle d'une intrusion saline constatée ou la progression supposée du biseau salé, caractérisant l'impact de modifications anthropogéniques.

L'analyse de l'état quantitatif des masses d'eau souterraine peut éventuellement être complétée à l'aide des éléments de contexte suivants :

- l'existence de conflits d'usage,
- l'existence d'une réglementation traduisant un déséquilibre quantitatif : arrêtés sécheresse fréquents, Zone de Répartition des Eaux, Plan « sécheresse » régional ou départemental...
- l'existence de mesures de gestion d'ordre quantitatif élaborées dans le cadre de : SAGE, contrat de nappe ou de rivière, mise en place de procédures de gestion quantitative de l'eau, plans de gestion des étiages ou de ressources alternatives...

En l'état actuel des réflexions, une masse d'eau souterraine est considérée en bon état quantitatif dès lors :

- qu'il n'est pas constaté d'évolution interannuelle défavorable de la piézométrie (baisse durable de la nappe hors effets climatiques) ;
- et que le niveau piézométrique qui s'établit en période d'étiage permette de satisfaire les besoins d'usage, sans risque d'effets induits préjudiciables sur les milieux aquatiques et terrestres associés, ni d'invasion salée ou autre.

### 1.3. INITIATIVES RÉGIONALES: UN EXEMPLE

En Poitou-Charentes, suite aux épisodes de sécheresse qui ont sévèrement affecté la région de 2003 à 2005, une démarche régionale d'amélioration de la gestion de l'eau a été engagée par l'Etat. Il en est résulté l'adoption fin 2005 d'une plateforme intitulée "*Pour une gestion équilibrée de l'eau à l'échéance 2009 en Poitou-Charentes et sur le bassin versant du Marais Poitevin*" avec comme objectif d'améliorer significativement l'état de la ressource en eau de la région sur le plan quantitatif en fournissant quelques principes permettant de résorber des déséquilibres quantitatifs chroniques.

Ces principes sont rappelés dans une note de l'ORE (Observatoire régional de l'Environnement Poitou-Charentes) d'Avril 2009: "*Réseau partenarial des données sur l'eau. Gestion de la ressource en eau en 2009, en région Poitou-Charentes et dans le Marais Poitevin*". Ils sont listés ci-dessous:

- La généralisation des attributions volumétriques et leur révision progressive pour les adapter aux ressources disponibles 8 années sur 10 (objectif 2009).
- La mise en œuvre d'une gestion cohérente et solidaire des cours d'eau et des nappes qui leur sont liées.
- Le renforcement de la coordination sur les bassins interdépartementaux.
- Le développement des retenues de substitution.
- La mise en œuvre anticipée des mesures de restriction ou d'interdiction.
- L'harmonisation des mesures de restriction des prélèvements pour irrigation.
- L'harmonisation des mesures de restriction concernant les autres usages avec leurs mesures d'accompagnement.
- L'efficacité des plans de contrôle établis dans chaque département sera renforcée.
- L'évaluation interannuelle de la gestion de l'eau sera approfondie.
- Une large communication sur les mesures de gestion, et l'état des ressources sera réalisée.

Le document de l'ORE souligne que le constat de la DIREN Poitou-Charentes, début 2009, fait état d'importants progrès réalisés en termes de :

- révision de certains seuils de gestion,
- gestion de certaines nappes en cohérence avec les cours d'eau auxquelles elles sont liées,
- réduction des volumes autorisés,

- développement de retenues de substitution.

Une nouvelle plateforme, prévue pour les années 2009/2012, a été présentée en mars 2009 lors de la Conférence Régionale sur l'Eau. Parmi ses objectifs, on peut mentionner, en rapport avec la présente étude:

- **la mise en œuvre d'une gestion territoriale et temporelle des volumes prélevables globaux :**
  - via des limites hydrogéologiques cohérentes des zones de gestion
  - via des volumes printaniers à déterminer si cette information est synonyme de gain par rapport à la situation actuelle
  - via des volumes prélevables hivernaux fixés en fonction des prélèvements actuels autorisés
- **la mise en place d'indicateurs piézométriques représentatifs et des seuils de gestion efficaces.**

Sans multiplier les exemples, le besoin d'instruments de gestion de la ressource souterraine est clairement exprimé, en particulier via des indicateurs piézométriques fiables.

## **1.4. OBJECTIF DE L'ÉTUDE**

### **1.4.1. Orientations**

Dans tous les extraits de SDAGE ci-dessus, les conditions requises pour la nécessaire mise en place d'une politique de gestion de la ressource en eau souterraine qui soit équilibrée, qui préserve les écosystèmes, qui assure le soutien d'étiage des cours d'eau, ...sont diversement exprimées :

- dans le SDAGE Loire-Bretagne : définir une piézométrie objectif d'étiage et appliquer la gestion volumétrique de la ressource en eau en fonction des disponibilités en fin de printemps et de l'évolution d'indicateurs sur le milieu en cours de campagne; déterminer le volume exploitable dans les zones de répartition des eaux (ZRE) ;
- dans le SDAGE Adour-Garonne : déterminer le volume maximum prélevable compatible avec l'équilibre quantitatif des aquifères en fonction d'indicateurs précis, tels que par exemple les niveaux piézométriques et la recharge ;
- dans le SDAGE Rhône-Méditerranée : définir des niveaux piézométriques de référence: niveaux piézométrique d'alerte (NPA) et de crise (NPC).

Mais, à l'exception des bassins Rhin-Meuse et Artois-Picardie, où cela n'est pas explicitement mentionné, la nécessité de définir des "seuils" piézométriques et des volumes exploitables est bien soulignée.

Dans la présente étude, réalisée à la demande de l'ONEMA, on propose des orientations méthodologiques permettant de définir des indicateurs piézométriques. Pour cela, on présente différents contextes hydrogéologiques envisagés du point de vue de leur spécificité en matière de gestion de la ressource en eau souterraine (chapitre 2) et on détaille, en s'appuyant sur des exemples, quelques méthodes d'aide à la détermination de ces indicateurs (chapitre 3) et au calcul de volumes exploitables (chapitre 4).

### **1.4.2. Définition proposée pour un indicateur piézométrique**

Dans un souci d'unification de la terminologie, on utilise dans cette étude le concept d'indicateur piézométrique avec la définition suivante:

**Indicateur piézométrique** : variable de contrôle de l'état d'une ressource en eau souterraine soumise à des règles de gestion et associée à un piézomètre (ou plusieurs) de suivi de l'évolution de cette ressource. L'indicateur est caractérisé par une gamme de valeurs particulières (que l'on peut appeler **seuils de gestion**), qui correspondent à :

- un objectif de gestion : par exemple une piézométrie objectif d'étiage (**POE**),
- un (ou plusieurs) seuils d'alerte (**PSA**), destinés à anticiper une situation de crise,
- un seuil de crise (**PSC**).

Cette variable a une dimension temporelle :

- la "valeur seuil" considérée est associée à un certain intervalle de temps dans l'année,

et une dimension spatiale :

- elle fait référence à un piézomètre choisi comme représentatif du contexte, ou bien elle est associée à plusieurs piézomètres et correspond alors à une combinaison linéaire des valeurs relevées sur ces piézomètres (moyenne simple ou moyenne pondérée).

Suivant les contextes hydrogéologiques et les contraintes à respecter, cette variable sera :

- soit de nature probabiliste, conformément à la définition, donnée par la circulaire du 30 Juin 2008, d'une gestion quantitative équilibrée de la ressource, se traduisant opérationnellement par le respect des débits ou niveaux piézométriques d'objectifs huit années sur dix en moyenne;
- soit de nature déterministe : seuils à respecter impérativement.

Le piézomètre à rechercher pour construire l'indicateur doit être **représentatif** du fonctionnement hydrodynamique de la nappe dans le secteur aquifère qu'il a pour mission de contrôler : il ne doit pas être directement influencé (proximité d'un pompage) mais doit néanmoins être **sensible aux impacts** des prélèvements et des recharges. Si nécessaire, l'indicateur peut être construit à partir de plusieurs piézomètres.

### Remarques

1) Dans le cas d'une nappe en relation avec un cours d'eau dont elle assure le soutien d'étiage, l'objectif de gestion n'est pas tant piézométrique que débitmétrique : il faut en effet définir une cote piézométrique (POE) qui permette de garantir le DOE du cours d'eau, qui constitue donc la contrainte. Dans ce cas on verra, au travers d'exemples, que si l'on se fixe une valeur de DOE de période de retour quinquennale, la valeur de POE déterminée sous cette contrainte peut quant à elle avoir une période de retour différente, par exemple non dépassée 2 années sur 5. C'est donc une contrainte plus forte qui s'imposera dans la gestion de la nappe si la gestion du cours d'eau est jugée prioritaire.

2) Si la dénomination "POE" est bien adaptée aux nappes connectées hydrauliquement à un cours d'eau, elle ne l'est pas pour d'autres contextes, par exemple:

- pour des nappes captives, où il s'agit de maintenir des seuils piézométriques particuliers (cas du seuil piézométrique à respecter dans la nappe de l'Eocène en Gironde, au voisinage de l'Estuaire, pour exclure la possibilité de venues d'eau saumâtres vers la zone de pompage de la région bordelaise) ou bien, plus généralement, où il convient de respecter un état piézométrique garantissant une exploitation équilibrée de la nappe;

- pour des nappes littorales, où il s'agit de maintenir un niveau piézométrique permettant de contrer l'intrusion d'eau salée.

Pour de tels contextes, la valeur de l'indicateur correspondrait plutôt à une "*piézométrie objectif de gestion*" (POG).

**3) Le problème du calcul des volumes exploitables ne saurait être dissocié de la mise en place d'indicateurs piézométriques.**

4) La mise en place d'indicateurs piézométriques concerne en priorité les hydrosystèmes en déséquilibre, ou en tension quantitative, chronique ou épisodique, dont les nappes situées en ZRE (zones de répartition des eaux).

Les indicateurs dont il est question ici doivent aider les gestionnaires à déclencher des mesures exceptionnelles (restrictions d'usages principalement). Ils s'inscrivent dans une temporalité courte, période de "crise" ou annonciatrice de "crise" (alors que la DCE vise plutôt le long terme) et concernent un secteur aquifère souvent restreint, un bassin versant (alors que la DCE se préoccupe de l'état d'une masse d'eau).

Les exemples présentés dans ce rapport sont traités dans un contexte de nappes qui ne sont pas nécessairement en "bon état quantitatif" (cf. encadré ci-dessous pour la définition du bon état quantitatif). Tels qu'ils sont définis, ils correspondent à une satisfaction des usages 8 années sur 10.

Ils ne garantissent pas non plus le "bon état écologique" des masses d'eau, qui est un problème autre.

5) Cette étude est à vocation méthodologique et la démarche proposée pour la détermination des indicateurs reste pertinente même si les contraintes à prendre en compte pour respecter un bon état quantitatif de l'hydrosystème considéré (en particulier dans un contexte de relations nappe/cours d'eau) venaient à être modifiées (par exemple par une redéfinition des DOE).

Si le "bon état" existe ou s'il est restauré à terme (en définissant des volumes prélevables admissibles pour qu'il en soit ainsi), les indicateurs piézométriques (piézométrie objectif d'étiage ou de gestion, seuils d'alerte et de crise), fixés en tenant compte des éventuelles contraintes à respecter dans l'hydrosystème, deviennent alors des instruments de gestion de la ressource souterraine en permettant de suivre l'évolution des niveaux et donc de vérifier si le "bon état" est préservé où s'il y a risque de le "détériorer". Conformément à la circulaire du 30 Juin 2008, les "piézométries objectifs" doivent alors être les garants d'une "gestion quantitative équilibrée" de la ressource ("*satisfaction des usages statistiquement 8 années sur 10*" mais aussi "*bon fonctionnement des milieux aquatiques*" associés).

### **Le bon état quantitatif d'une masse d'eau souterraine**

La DCE (paragraphe 2.1.2 de l'annexe V) définit le bon état quantitatif des eaux souterraines ainsi : " Le bon état est celui où le niveau de l'eau souterraine dans la masse d'eau est tel que le taux annuel moyen de captage à long terme ne dépasse pas la ressource disponible de la masse d'eau souterraine ".

En conséquence, le niveau de l'eau souterraine n'est pas soumis à des modifications anthropogéniques telles qu'elles :

- empêcheraient d'atteindre les objectifs environnementaux pour les eaux de surface associées ;
- entraîneraient une détérioration importante de l'état de ces eaux ;
- occasionneraient des dommages importants aux écosystèmes terrestres qui dépendent directement de la masse d'eau souterraine (...);
- occasionneraient l'invasion d'eau salée. "

L'objectif est donc d'assurer un équilibre sur le long terme entre les volumes s'écoulant au profit des autres milieux ou d'autres nappes, les volumes captés et la recharge de chaque nappe. En termes de gestion quantitative, un autre objectif concerne la préservation des usages, et en priorité l'usage eau potable pour les eaux souterraines.

Les suivis effectués sur le réseau de surveillance d'une masse d'eau souterraine servent à évaluer l'état quantitatif de cette masse ou de ces masses d'eau.



## 2. Caractérisation de la dynamique des nappes

Aquifères alluviaux, aquifères de socle, aquifères karstiques, aquifères multicouches des bassins sédimentaires (à nappe libre et à nappes captives sous-jacentes), aquifères côtiers, autant d'hydrosystèmes ayant leur spécificité et qui devront être gérés en fonction de cette spécificité. Celle-ci se traduit par différents types d'évolutions piézométriques que l'on présente dans ce qui suit.

### 2.1. NAPPES LIBRES DES BASSINS SÉDIMENTAIRES

Aquifères alluviaux et aquifères karstiques sont traités spécifiquement aux § 2.2 et 2.3. Le cas des aquifères côtiers ne sera pas abordé dans ce document : sur la frange littorale, les indicateurs devant plutôt permettre de suivre l'évolution de la conductivité électrique de la nappe ou un paramètre chimique, par exemple les teneurs en chlorures.

#### 2.1.1. Paramètres et facteurs influençant la dynamique d'une nappe

La dynamique d'une nappe à surface libre, en milieux poreux, c'est-à-dire la façon dont elle va réagir soit à une action exercée sur elle (recharge, prélèvements) soit, au contraire, à une absence d'influence ("tarissement" en l'absence de recharge et de prélèvements) est sous la dépendance:

- de la perméabilité et du coefficient d'emmagasinement de l'aquifère (paramètres hydrodynamiques variant spatialement) ;
- de la géométrie de l'aquifère : extension et épaisseur ;
- de la position et de la nature des limites ;
- des connexions plus ou moins importantes de la nappe avec un réseau hydrographique et du plus ou moins grand développement de ce réseau ;
- des caractéristiques de la zone non saturée (épaisseur et nature), déterminant le temps d'arrivée à la nappe de la lame d'eau infiltrée à la surface ;
- du contexte géomorphologique.

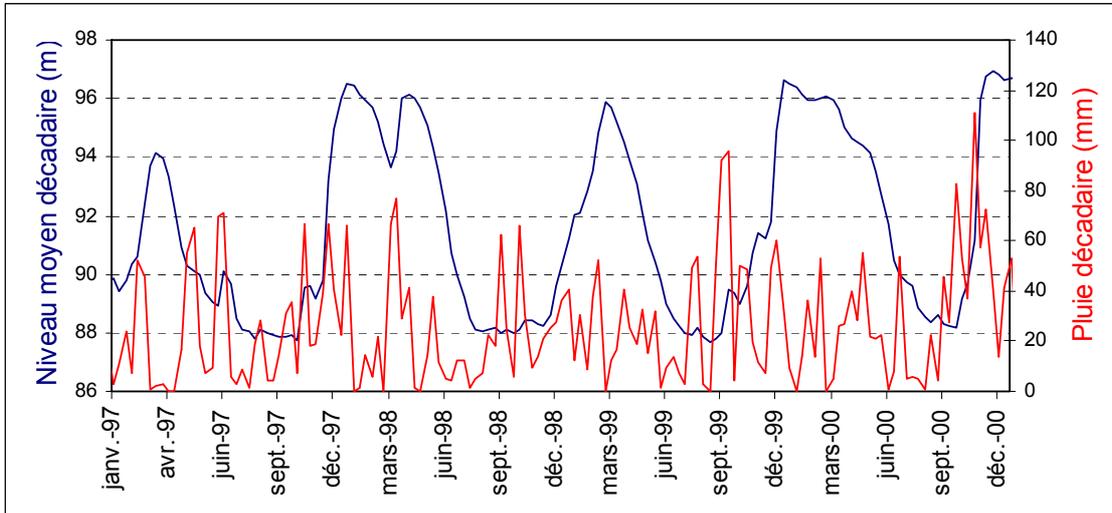
Concernant le contexte géomorphologique, on pourra trouver un exemple dans une étude réalisée par le Laboratoire de Géologie de l'Université de Rouen sur la nappe de la Craie en Normandie: "*Combined climatic and geological forcings on the spatio-temporal variability of piezometric levels in the chalk aquifer of Upper Normandy at pluridecennial scale*", Smail Slimani et al. - Hydrogeology Journal - 2009).

#### 2.1.2. Types de cycles hydrodynamiques

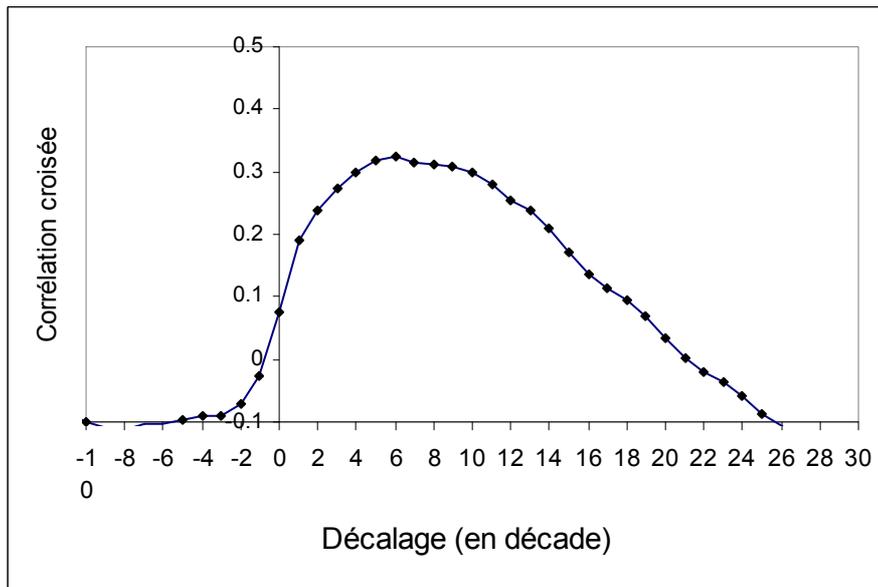
Les graphiques de l'annexe 2 illustrent ces différents types de comportement. On peut distinguer les nappes:

- à cycles annuels : par exemple les nappes du Jurassique supérieur et du Dogger en Poitou-Charentes, ....
- à cycles pluriannuels : par exemple la nappe des Calcaires de Beauce,
- à cycles courts intégrés dans des cycles longs, par exemple de nombreuses nappes de la Craie.

Ces différences de comportement, liées à la plus ou moins grande inertie des nappes (cf § 2.1.3), impliquent des modalités de gestion adaptées. Les illustrations 1 et 2 comparent une nappe à faible inertie (nappe du Dogger en Poitou-Charentes, au piézomètre de Ruffec) à une nappe à très forte inertie (nappe des Calcaires de Beauce, au piézomètre de Congerville dans l'Essonne).

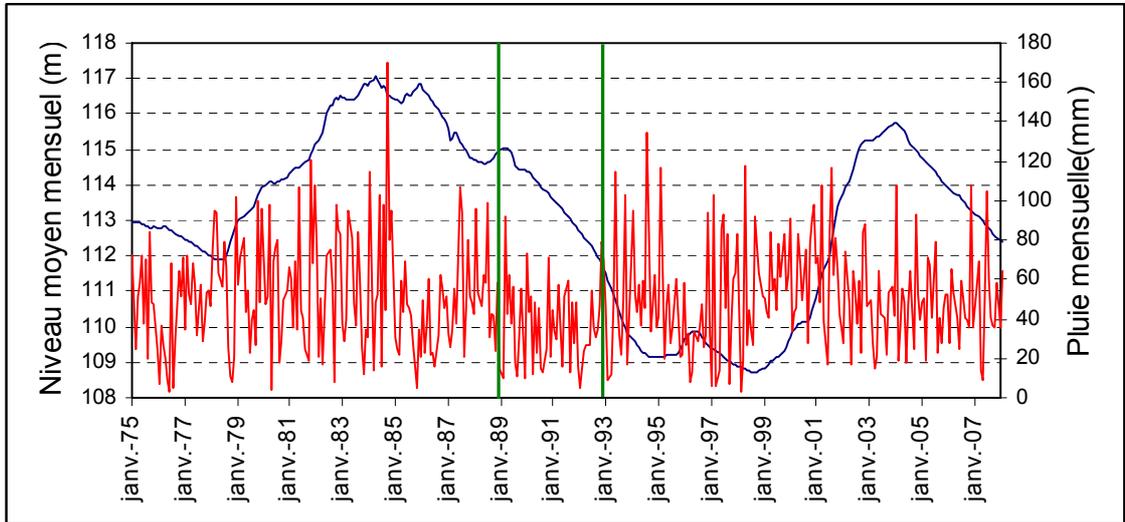


a) Niveau au piézomètre de Ruffec et pluie à Niort (1997-2000, au pas de temps décadaire)

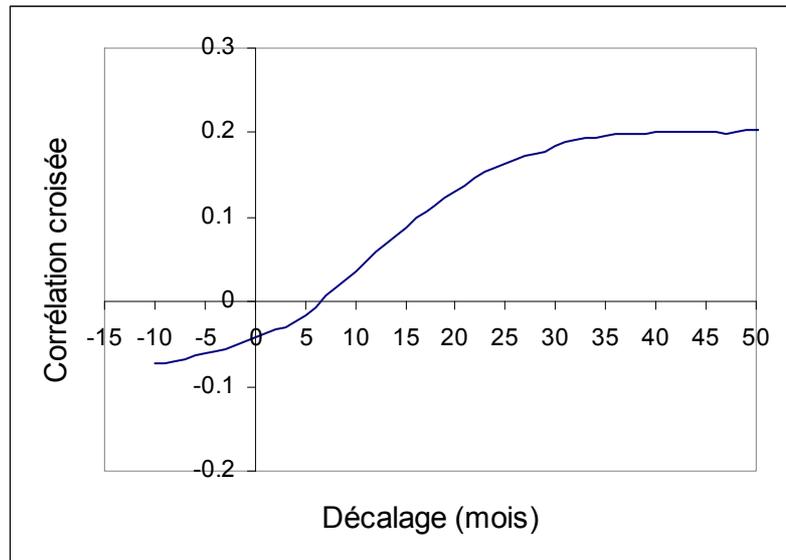


b) Corrélogramme croisé "Pluie à Niort – Niveau au piézomètre de Ruffec" calcul sur la période 1992-2006

*Illustration 1 – Corrélation entre niveaux mesurés au piézomètre de Ruffec et pluies à Niort (pas de temps décadaire)*



a) Niveau moyen mensuel au piézomètre de Congerville et pluie mensuelle à Chartres



b) Corrélogramme croisé "Pluie mensuelle à Chartres – Niveau moyen mensuel au piézomètre de Congerville"  
(calcul sur la période 1975-2007)

*Illustration 2 – Corrélation entre niveaux mesurés au piézomètre de Congerville et pluies à Chartres (pas de temps mensuel)*

L'analyse croisée pluies-niveaux, par l'intermédiaire du corrélogramme croisé (défini en annexe 1), indique une corrélation entre pluie et niveaux devenant maximale au bout de 60-70 jours pour le piézomètre de Ruffec et au bout de 40 mois (se prolongeant jusqu'à 50 mois) pour le piézomètre de Congerville.

Dans ce dernier cas, comme le montre clairement le graphique de l'illustration 2a, les niveaux continuent à baisser de 1993 à mai 1996 malgré des précipitations plus fortes sur cette période que celles de la période 1989-1992 (inférieures à 500 mm sur chacune de ces années). Suite à ces précipitations plus fortes, les niveaux amorcent une légère remontée en Mai 1996 (3 ans plus tard), la baisse globale se poursuivant néanmoins jusqu'à fin 1998.

### Conséquences pour la gestion

Dans le cas d'une nappe à cycle annuel, à forte réactivité, il est difficile d'anticiper l'évolution de la nappe tôt dans le cycle hydrologique, par exemple en début d'hiver après recharge automnale. Si les niveaux sont bas au début de l'hiver, ils peuvent remonter rapidement en Février ou Mars suite à précipitations plus fortes.

Pour les nappes à forte inertie, à cycles pluriannuels, il est par contre possible d'anticiper et de mettre en place des modalités de gestion graduelles, fonction par exemple du cumul annuel des pluies (ou des pluies efficaces), cet "indicateur pluviométrique" permettant de juger de la sévérité de l'étiage à venir (par comparaison avec des situations passées ou de situations résultant de simulations de scénarios climatiques).

### **2.1.3. Quantification de l'inertie des nappes**

Pour caractériser les nappes en fonction de leur inertie plusieurs outils peuvent être utilisés :

- le temps de demi-décroissance des niveaux, déduit d'une loi exponentielle ajustée sur une portion de courbe piézométrique décroissante ;
- le temps de "réponse moyen" déduit de la réponse impulsionnelle de l'hydrosystème (utilisation d'un modèle global "boîte noire") ;
- le corrélogramme de la chronique piézométrique (quantifiant la "mémoire" du système).

#### 2.1.3.1. Temps de demi-décroissance des niveaux

On peut en général caractériser la décroissance des niveaux d'une nappe, en l'absence de toute réalimentation pendant cette période (susceptible de rompre significativement cette décroissance), par une loi exponentielle du type:

$$H(t) = H_b + H_0 \cdot e^{-\alpha(t-t_0)}$$

avec :

$H(t)$  = charge hydraulique en un point donné et à un instant  $t$  (en m), mesurée par rapport à un plan de référence (0 NGF) ;

$H_b$  = charge hydraulique correspondant au niveau de base (en m) ;

$H_0$  = charge hydraulique au-dessus du niveau de base à la date  $t_0$  correspondant au début de la baisse des niveaux (en m) ;

$\alpha$  = constante de tarissement (en  $s^{-1}$ )

On peut relier la constante de temps  $\alpha$  au temps de demi-décroissance  $T_{\text{demi}}$  qui est le temps nécessaire pour qu'il y ait diminution de moitié de la charge hydraulique au-

dessus du niveau de base, soit :  $T_{\text{demi}} = \frac{\text{Ln}2}{\alpha}$

### Remarque

L'utilisation d'un modèle global ("à réservoirs") peut fournir aussi des temps caractéristiques similaires, par exemple des temps de "demi-vidange" dans le cas du logiciel Gardénia du BRGM.

### Exemple

Pour de nombreuses nappes (en particulier celles à cycles annuels), la baisse des niveaux qui s'amorce lorsqu'il n'y a plus de précipitations efficaces (en général en Avril-Mai), est bien simulée par une loi exponentielle, comme le montre l'exemple ci-dessous (illustration 3) pour les niveaux enregistrés au piézomètre de Marsilly (Charente-Maritime) captant la nappe de l'Aunis dans le Jurassique supérieur (système aquifère 112 de la BDRHF-V1).

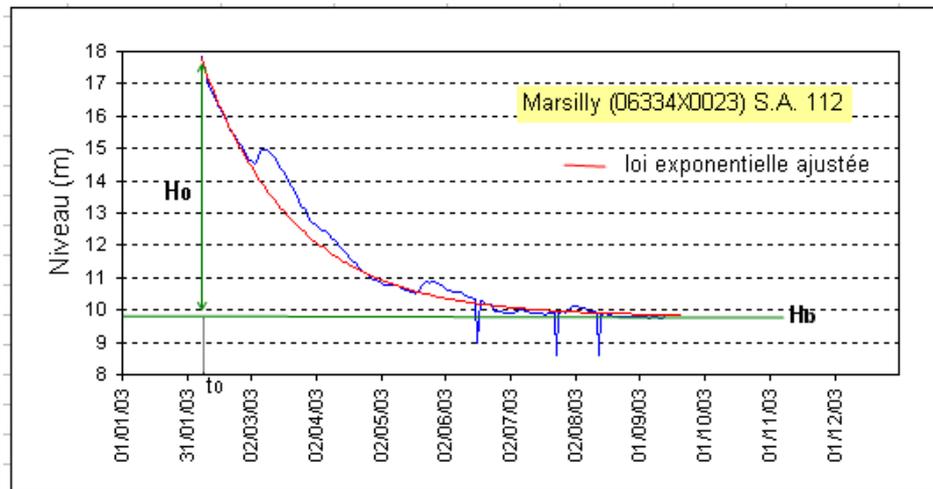


Illustration 3 - Exemple d'ajustement d'une loi exponentielle sur des niveaux piézométriques

#### 2.1.3.2. Application aux principaux aquifères à surface libre

En 2006, une étude visant à caractériser la résistance à la sécheresse des principaux aquifères à nappe libre de France a été réalisée par le BRGM à la demande de la Direction de l'Eau du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (rapport BRGM RP-55188-FR). Le temps de demi-décroissance des niveaux était l'un des critères utilisés pour caractériser la résistance à la sécheresse.

Les aquifères retenus dans l'étude sont ceux des bassins sédimentaires, sélectionnés en fonction de leur taille, de leur importance économique et des situations de déséquilibre apparues ces dernières années. Des secteurs particulièrement touchés en 2005, comme en région Poitou-Charentes, ont été traités avec une attention particulière. Parmi ces aquifères de bassins sédimentaires, les aquifères de milieux poreux ont été beaucoup plus traités en raison des données disponibles (longueur des chroniques piézométriques), plus rares pour les aquifères karstiques.

Le référentiel hydrogéologique utilisé est celui de la Base de Données du Référentiel Hydrogéologique Version 1 (BDRHF-V1).

Selon les chroniques disponibles, de 3 à parfois plus de 10 piézomètres ont été retenus par système aquifère pour être analysés. Ils ont été sélectionnés sur la base des critères suivants :

- utilisation du piézomètre dans l'étude de 1994 ;
- utilisation du piézomètre dans le bulletin de situation hydrologique national;
- piézomètre non ou peu influencé;
- densité et longueur de la chronique ;

Plus de 300 chroniques piézométriques ont été téléchargées en provenance d'ADES. Une période de baisse des niveaux a ensuite été sélectionnée pour chaque piézomètre afin de calculer un temps de demi-décroissance. Les résultats sont présentés en annexe 3.

### 2.1.3.3. Temps de réponse

Cette grandeur peut être obtenue en modélisant l'hydrosystème à l'aide d'un modèle global permettant de relier une ou plusieurs "entrées" du système avec une "sortie" via une ou plusieurs fonctions de transfert (ou réponses impulsionnelles).

Le temps de réponse d'un hydrosystème caractérisable par des entrées (pluies, ETP) et une sortie (niveaux ou débits) est déduit de la réponse impulsionnelle de ce système. Il s'agit d'une moyenne des valeurs de la réponse impulsionnelle pondérée par le temps.

Il peut y avoir plusieurs temps de réponse (illustration 4), fonction des caractéristiques hydrogéologiques du système, par exemple un temps de réponse court correspondant à des circulations rapides (macroporosité, fissures) et un temps de réponse long (porosité matricielle).

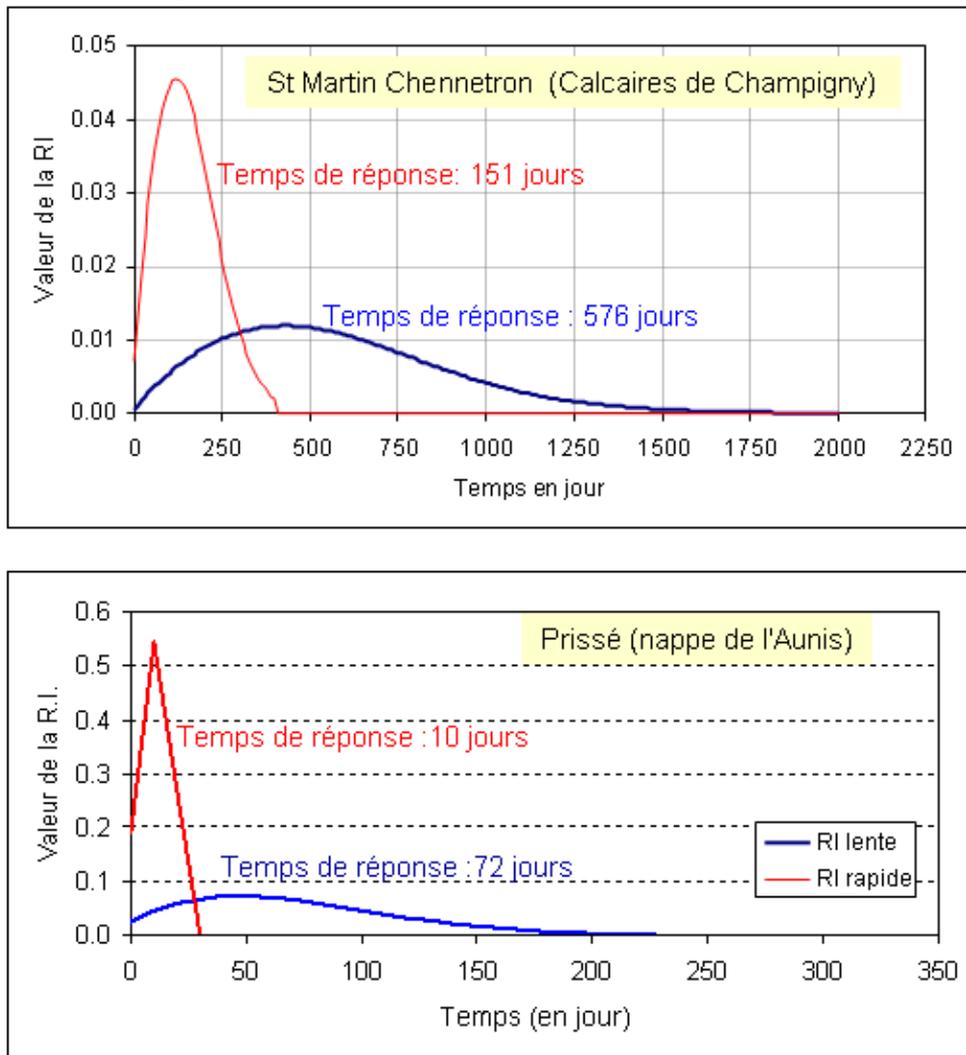


Illustration 4 - Exemple de temps de réponse calculés pour 2 nappes d'inertie très différente

### 2.1.3.4. Corrélogrammes

Dans une chronique de mesures piézométriques journalières, il existe une corrélation entre les valeurs successives de la série jusqu'à une certaine "portée" temporelle, fonction de l'inertie de la nappe. Cette corrélation peut se mesurer par l'intermédiaire d'un coefficient d'autocorrélation qui représente la corrélation de la série avec elle-même mais décalée d'un certain intervalle de temps.

Les valeurs du coefficient d'autocorrélation en fonction du décalage temporel permettent d'établir un graphique appelé corrélogramme (illustration 5, montrant des corrélogrammes caractérisant 3 types de nappe).

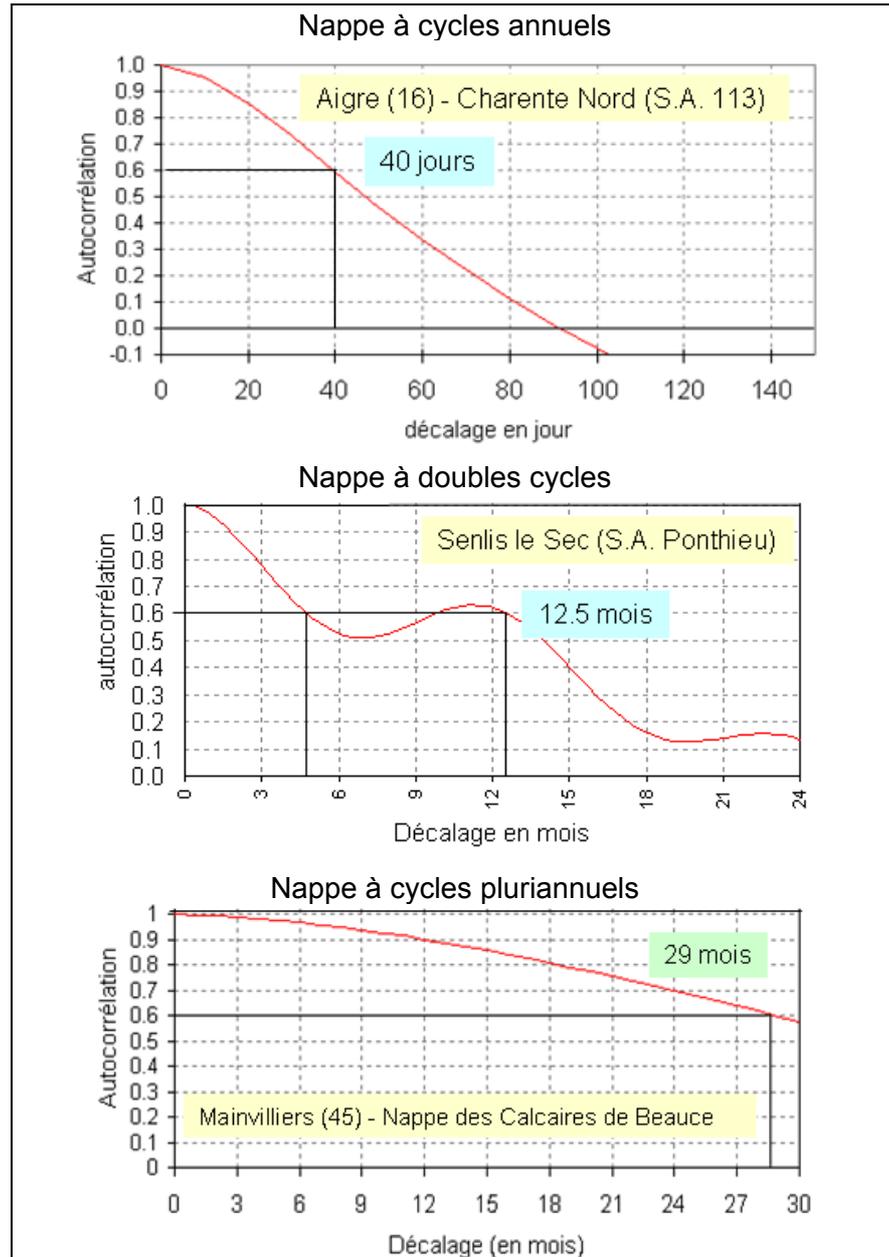


Illustration 5 – Exemple de corrélogrammes calculés pour 3 nappes évoluant suivant des cycles différents,

(la significativité de la corrélation est ici fixée à 0.6, mais ce choix dans ce cas précis n'a pas d'implication pour discriminer les ordres de grandeur des cycles temporels)

### 2.1.3.5. Hiérarchisation des nappes en fonction des quantificateurs d'inertie

Les temps caractéristiques ci-dessus correspondant à des concepts différents, les valeurs obtenues en appliquant ces trois méthodes au même hydrosystème ne sont bien sûr pas directement comparables entre elles, mais la hiérarchie obtenue est la même comme le montre le tableau ci-dessous.

Aquifère (BDRHF-V1)	Piézomètre	Temps de demi-décroissance (mois)	Durée d'autocorrélation (au seuil de 0.6) (mois)	Temps de réponse moyen déduit de la réponse impulsionnelle (mois)
Calcaires de Beauce	Mainvilliers	27	29	37
	Allainville	22	24	32
	Paray-Douville	20	24	30
Santerre	Omiécourt	14.5	13	
	Hangest	13	14	
Brie (Calcaires de Champigny)	St Martin Chenetron (double porosité)	11.8	11	19 (RI rapide) 5 (RI lente)
Cambresis	Barastre	9.8	12.2	
Ponthieu	Senlis le Sec (double porosité)	6.2	12.5	12 (RI rapide)
			4.5	3.5 (RI lente)
Artois	Tincques (double porosité)	5.4	11	
			4	
Civraisien/Dogger	Lorigné	1.9	2	0.5
Charente Nord	Aigre	0.7	1.3	0.5
Angoumois	Salignac	0.6	1.2	0.3

Tableau 1 - Inertie des nappes et temps caractéristiques

## 2.2. NAPPE ALLUVIALES

Les aquifères alluviaux en étroite relation avec un cours d'eau peuvent être drainés, alimentés (ou réalimentés) par le cours d'eau. Ils peuvent aussi être alternativement drainés ou alimentés suivant la période de l'année.

Dans le cas de nappes alluviales très exploitées, une partie significative des débits de pompage peut provenir du cours d'eau. Celui-ci subit alors un "préjudice" qui sera plus ou moins important suivant son débit : les cours d'eau à forts débits pourront soutenir durablement une nappe alluviale, ce qui ne sera pas le cas des cours d'eau à faibles débits.

Depuis longtemps, de nombreuses solutions analytiques sont disponibles pour étudier l'influence de pompages en nappes alluviales sur les cours d'eau qui les drainent ou les alimentent.

On en trouvera quelques unes en annexe 6 et dans le rapport suivant du BRGM :

" *Etude de l'influence de pompages en nappes alluviales sur le régime d'étiage du réseau superficiel* " - R. F. Lelievre (Géohydraulique). Rapport BRGM 69 SGL073 HYD.

Les solutions ont été établies dans le cas d'un seul pompage fonctionnant à débit constant. L'application du principe de superposition permet de les étendre aux cas de plusieurs pompages (convolution spatiale) avec des débits variables dans le temps (convolution temporelle). Théoriquement le principe de superposition ne s'applique qu'aux nappes captives (équations linéaires) mais il peut être étendu aux nappes libres si les fluctuations de niveaux de celles-ci ne sont pas trop importantes par rapport à l'épaisseur de la zone saturée.

Ces solutions sont établies à partir de la solution élémentaire de Theis en appliquant la méthode des "images" (pour tenir compte des limites, rivière, coteau,...). Elles permettent de calculer le débit soustrait au cours d'eau à un instant  $t$  après le début du pompage (illustration 6), débit considéré comme le "préjudice instantané" causé à la rivière.

Leur utilisation nécessite la connaissance des paramètres hydrodynamiques: transmissivité et coefficient d'emménagement.

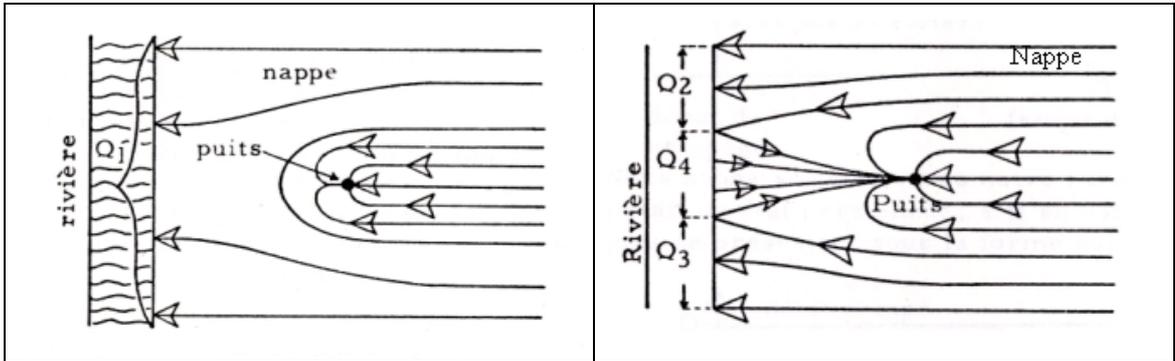


Illustration 6 – Schématisation de l'impact d'un pompage en nappe sur un cours d'eau  
(Rapport BRGM 69 SGL073 HYD)

Pour une application de ces solutions, voir par exemple "Impact sur le débit des cours d'eau des prélèvements d'eau souterraine des nappes connexes aux rivières" Rapport BRGM R 38930 (Juin 1996).

Dans des cas complexes (milieu hétérogène, géométrie quelconque,...) le recours à un modèle numérique est nécessaire.

## 2.3. CAS DES AQUIFÈRES KARSTIQUES

La gestion de la ressource par indicateur piézométrique n'est en général pas applicable pour les aquifères karstiques : il serait difficile de trouver un piézomètre qui soit représentatif et qui soit aussi positionné dans le bassin d'alimentation de la source. La variable de contrôle sera donc en général le débit à l'exutoire du bassin karstique. Néanmoins, dans certains cas, il pourrait être envisagé de coupler des niveaux enregistrés sur un piézomètre représentatif du système à un débit à l'exutoire du bassin. Un exemple en est donné pour le karst de la Rochefoucauld en Poitou-Charentes au § 3.2.2.4.

### 2.3.1. Caractéristiques des systèmes karstiques

Le fonctionnement de ces aquifères ne peut être déduit que d'une analyse fine des chroniques de débits aux émergences, renforcée éventuellement par le contrôle de paramètres chimiques.

Dans le document "Connaissance et gestion des ressources en eaux souterraines dans les régions karstiques – Guide technique n°3 - Juin 1999 - Bassin Rhône-Méditerranée-Corse ", il est recommandé d'étudier un aquifère karstique dans sa totalité, par une approche globale:

"... il est souhaitable d'étudier chaque aquifère karstique dans sa totalité, de manière à prendre en compte dans sa globalité l'organisation de son drainage souterrain et sa fonctionnalité. Dans ce but, le suivi en continu des écoulements aux exutoires du système (source pérenne, sources de trop plein) et le suivi du chimisme des eaux (enregistrement de la conductivité, campagnes

d'échantillonnages pour analyses chimiques) constituent les informations de base nécessaires à la compréhension du fonctionnement karstique"....

et :

" Le système karstique doit être étudié par une approche globale, qui permet de prendre en compte l'ensemble de l'unité de drainage. Cette approche doit répondre aux questions suivantes, relatives à l'étude, à l'exploration, à l'exploitation, à la gestion et à la protection des ressources en eau du système :

- Le système possède-t-il un fonctionnement karstique? C'est-à-dire possède-t-il une structure de drainage karstique qui soit fonctionnelle ?
- Quelle est l'extension du système ?
- Le système possède-t-il des réserves dans sa zone noyée ? Sont-elles importantes et cohérentes avec l'objectif ?
- Les ressources du système sont-elles suffisantes compte tenu des objectifs fixés ? Les réserves sont-elles importantes ? Leur qualité est-elle convenable ?
- Ces réserves autorisent-elles une surexploitation temporaire ?
- Existe-t-il des conduits anciens, habituellement sans écoulement souterrain rapide, susceptibles d'être réactivés lors de phénomènes exceptionnels (crues) ou nouveaux (pompage, mise en charge, etc.) ?
- Peut-on démontrer l'exploitabilité de l'aquifère ?
- Quels sont le dispositif de captage et sa localisation les plus appropriés, sur les plans quantitatif et qualitatif, compte tenu des caractéristiques de l'aquifère ?
- Quel est l'impact de l'exploitation sur les autres ressources et sur les autres milieux ?
- Connaissant la vulnérabilité du système, quel(s) scénario(s) peut (peuvent) être proposé(s) pour protéger la ressource en eau souterraine ? Comment définir les périmètres de protection ?

On pourra aussi consulter le rapport BRGM/RP-58237-FR "*Guide méthodologique. Les outils de l'hydrogéologie karstique pour la caractérisation de la structure et du fonctionnement des systèmes karstiques et l'évaluation de leur ressource*" (Dörfliiger et al, 2010).

Les contraintes à respecter relèvent plutôt de "débits objectifs". L'étude des hydrogrammes peut être abordée à l'aide des méthodes décrites ci-après.

### **2.3.2. Analyse des courbes de récession par la méthode de Mangin**

On ne rappelle ici que quelques éléments de la dynamique des écoulements dans les aquifères karstiques. Pour plus de précisions, on pourra se reporter aux thèses de:

- A. Mangin (1975): "*Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques*",
- B. Marsaud (1996): "*Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir de résultats expérimentaux*",
- B. Garry (2007) "*Etude des processus d'écoulement de la zone non saturée pour la modélisation des aquifères karstiques*".

On trouvera aussi en bibliographie quelques références d'articles et de rapports sur le sujet.

Cette analyse peut être mise à profit pour faire de la prévision à court terme.

#### **2.3.2.1. Méthode de Mangin**

Une possibilité d'analyse des courbes de récession des hydrogrammes consiste à utiliser le modèle proposé par Mangin en 1970. Dans ce modèle, le système karstique est représenté par 2 réservoirs:

- l'un correspond à la "*zone d'infiltration*" qui se vidange avec un certain débit  $q$ ,
- l'autre correspond à la "*zone noyée*" qui se vidange avec un débit  $Q$  lorsqu'elle n'est plus alimentée par la zone d'infiltration.

La courbe de récession est alors modélisée par la superposition :

1) du débit  $Q$ , exprimé par la formule classique de Maillet:

$$Q(t) = Q_0 \cdot e^{-\alpha \cdot t}$$

- $\alpha$  est le coefficient de tarissement
- $Q_0$  correspond au débit à la date où le tarissement devient effectif (fin de l'infiltration)

2) du débit  $q$ , pour lequel A. Mangin a proposé la fonction suivante:

$$q(t) = q_0 \frac{1 - \eta \cdot t}{1 + \varepsilon \cdot t}$$

- $q_0$  est le débit à la date du début de la décrue,
- $\eta$  est un coefficient caractérisant la vitesse d'infiltration (inverse d'un temps). Plages de valeurs possibles: de 0.001 à 0.1
- $\varepsilon$  est un coefficient (inverse d'un temps) caractérisant la concavité de la courbe  $q(t)$ . Des valeurs élevées indiquent une décrue d'abord très rapide qui se ralentit ensuite fortement. Plages de valeurs possibles de 0.001 à 10.

#### Remarque

Par rapport au modèle conceptuel de Mangin, d'autres auteurs (en particulier Emblanch, 1997, 2006) attribuent un rôle plus important à l'épikarst et à la zone non saturée de l'aquifère. Emblanch, en étudiant la Fontaine de Vaucluse, a ainsi mis en évidence un soutien d'étiage permanent (à Fontaine de Vaucluse) par des eaux provenant de la zone non saturée. De même, pour des systèmes karstiques ayant les mêmes caractéristiques que celui de Fontaine de Vaucluse (dont la zone non saturée est épaisse) et sous un climat identique (pas de période sans précipitation significative supérieure à quelques mois), le tarissement semble être un phénomène exceptionnel (Emblanch, 1997).

#### 2.3.2.2. Volume dynamique

L'intégration de la loi de Maillet à partir du moment où le tarissement devient effectif (débit  $Q_{dT}$ ) fournit un volume appelé "*volume dynamique*" par Mangin:

$$V_{Dyn} = \int_0^{\infty} Q_{dT} \cdot e^{-\alpha \cdot t} = \frac{Q_{dT}}{\alpha} \quad (V_{dyn} \text{ en m}^3 \text{ si } Q_{dT} \text{ en m}^3/\text{s} \text{ et } \alpha \text{ en s}^{-1})$$

La fraction (en %) de volume écoulé au bout d'une durée  $d$  du tarissement est donnée par :  $\%V_{éc} = 100 \cdot (1 - e^{-\alpha \cdot d})$

On trouvera une discussion de cette notion (théorique) de volume dynamique dans la thèse de B. Marsaud (1996).

#### 2.3.3. **Autre modèle d'analyse des courbes de récession**

La méthode de Mangin peut ne pas s'appliquer à tous les systèmes karstiques. Ainsi l'étude de la source des "*Cent-Fonts*" dans l'Hérault (rapport BRGM RP-51584-FR, 2002) a montré qu'avec la méthode de Mangin, on ne pouvait pas simuler de manière satisfaisante les débits mesurés et que l'on surestimait le temps d'infiltration et les volumes dynamiques.

La remise en question de la méthode de Mangin pour le système des *Cent-Fonts* est principalement due à l'alimentation continue de la zone noyée des *Cent-Fonts* par les pertes de la Buèges.

La méthode de Mangin a donc été modifiée en ajoutant une deuxième loi de vidange exponentielle pour représenter la recharge de la zone noyée par les pertes de la Buèges.

Le débit total est alors simulé par la somme suivante:

$$Q_{\text{tot}} = q_0 \frac{1 - \eta.t}{1 + \varepsilon.t} + Q_0 \cdot e^{-\alpha_1.t} + Q_1 \cdot e^{-\alpha_2.t}$$

Le 3<sup>ième</sup> terme représente la fonction de recharge de la zone noyée par les pertes de la Buèges.

## 2.4. AQUIFÈRES DE SOCLE

En zone de socle, l'unité territoriale de gestion de la ressource est en règle générale le bassin versant, qu'il s'agisse de problèmes quantitatifs ou qualitatifs.

Les aquifères de socle sont caractérisés par deux niveaux géologiques principaux (illustration 7):

- les altérites meubles, à porosité importante, de faible perméabilité en général, à rôle d'emménagement;
- l'horizon fissuré, à porosité plus faible mais cependant significative (1 à 5 %) et à perméabilité plus importante, à rôle transmissif dominant, collectant et distribuant les eaux issues de l'horizon d'altération sus-jacent.

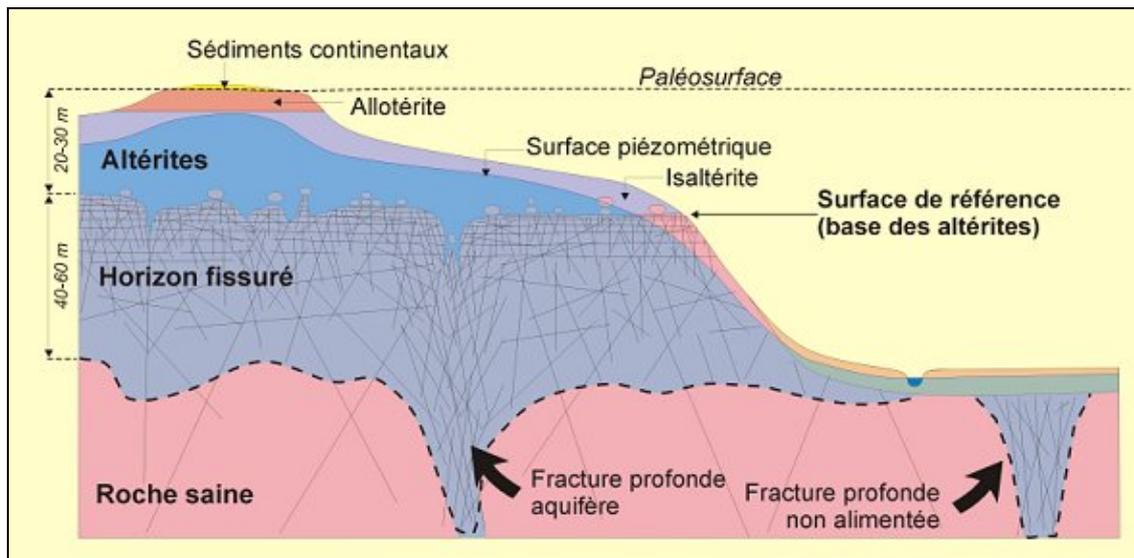


Illustration 7- Schéma conceptuel des aquifères de socle (R. Wyns, 1998)

Les études menées sur 70 bassins versants de socle en Bretagne (projet SILURES, rapport BRGM RP-56457-FR, 2008) montrent que plus de la moitié du débit annuel provient des eaux souterraines (illustration 8).

L'illustration 9 propose un exemple de relation (globale) entre niveaux de nappe et débits de rivière dans le bassin de l'Aber Ildut (Finistère).

Des indicateurs piézométriques ont été définis conjointement par la DIREN-Centre et le BRGM-Bretagne (cf chapitre 3). Ces indicateurs sont exploités par la DIREN-Centre.

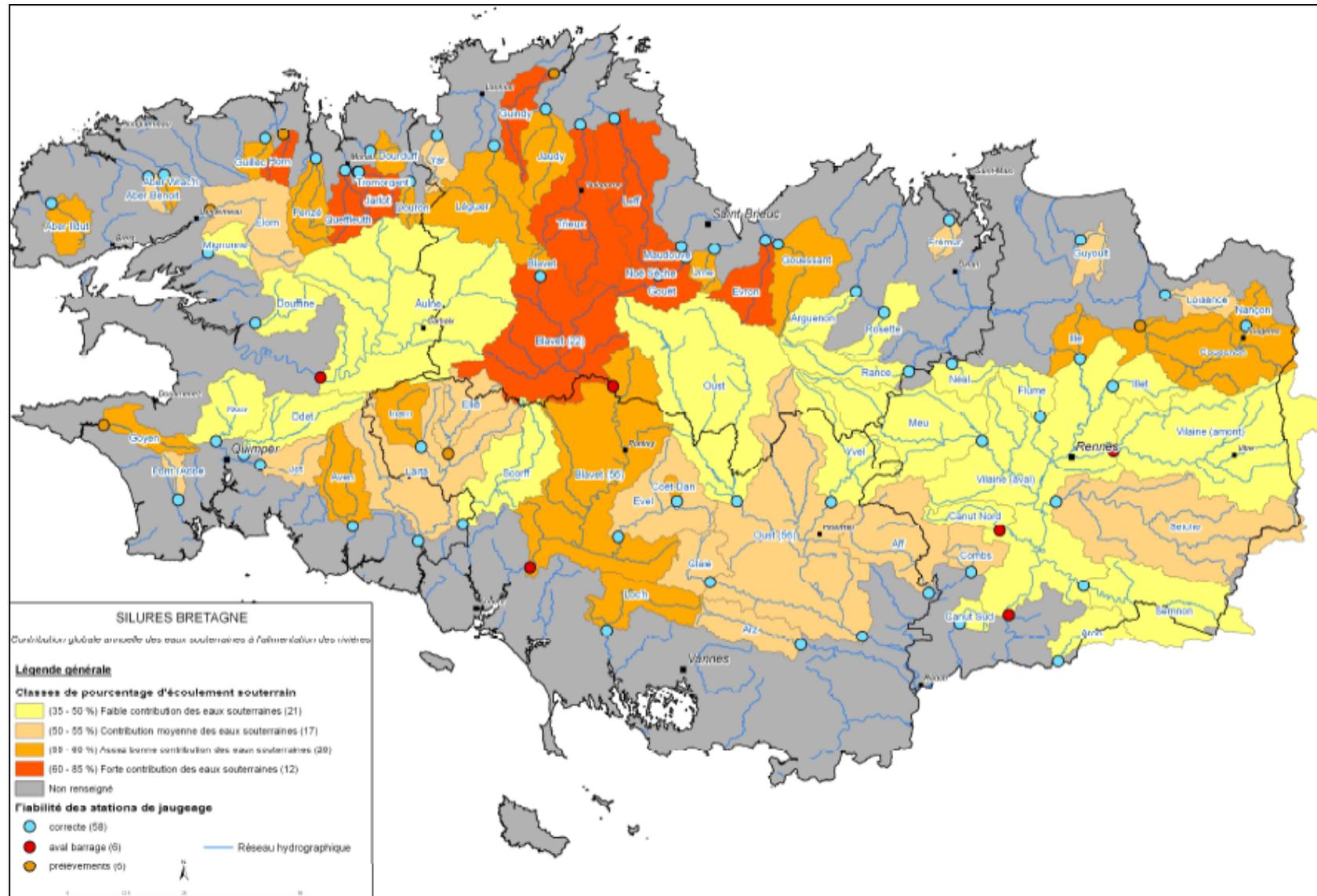
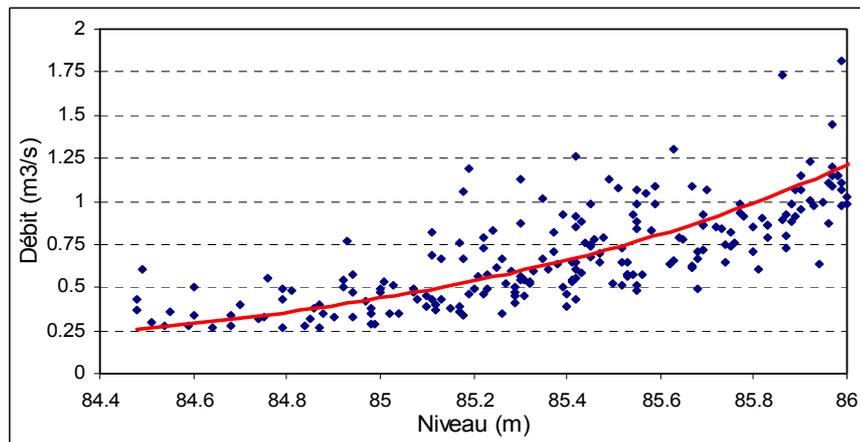
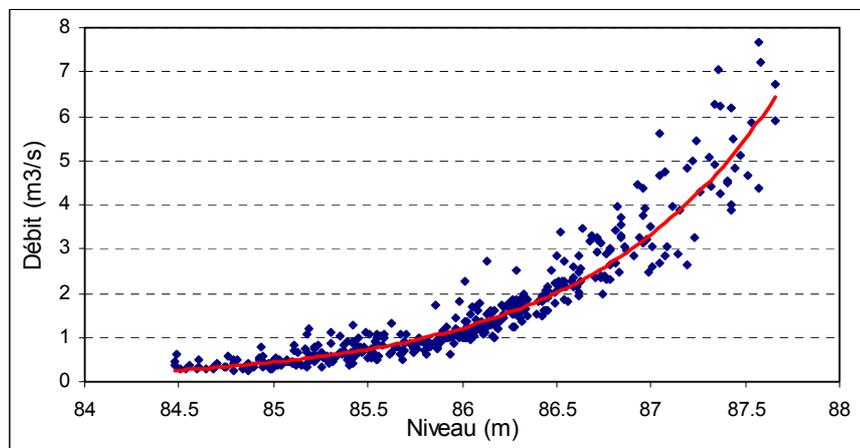
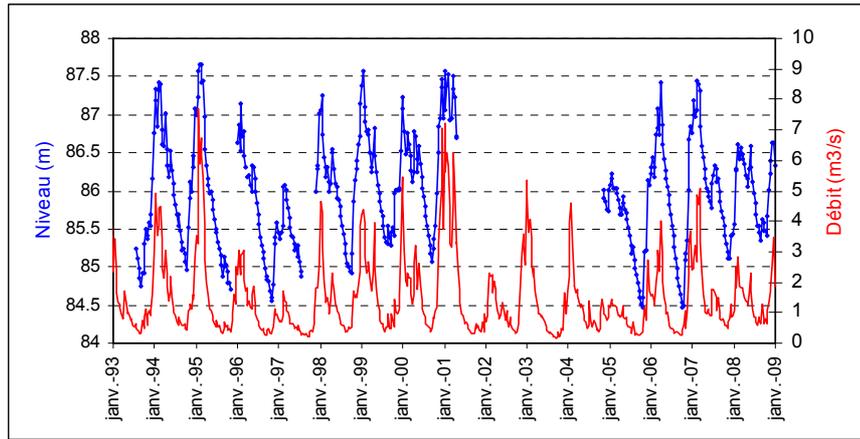


Illustration 8 - Contribution globale annuelle des eaux souterraines à l'alimentation des rivières en zone de socle en Bretagne  
source: rapport BRGM RP-56457-FR, 2008



*Illustration 9 - Exemple de relation globale "niveau de nappe- débit" en zone de socle en Bretagne*  
(Bassin versant de l'Aber Ildut – Station hydrométrique de Brèles et piézomètre de Plourin)

## 2.5. NAPPES CAPTIVES DES GRANDS BASSINS SÉDIMENTAIRES

### 2.5.1. Types de régimes hydrodynamiques

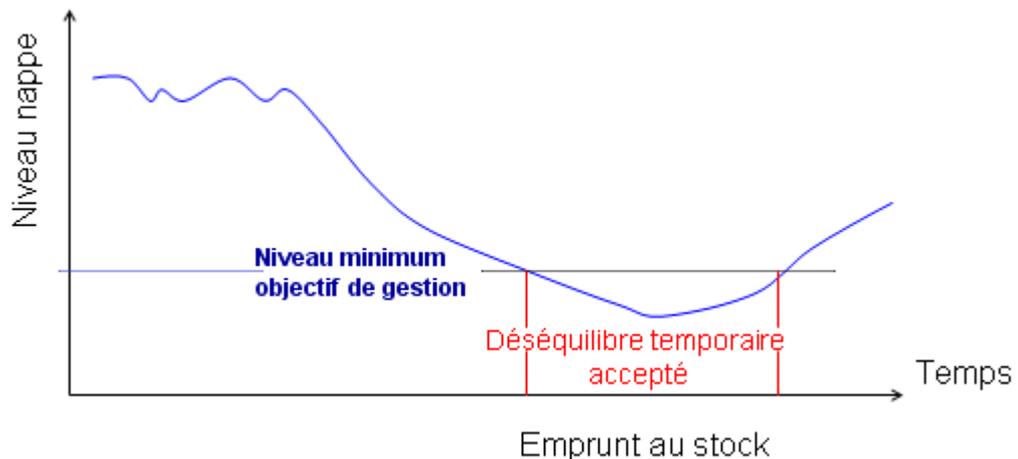
Les nappes captives profondes sont peu influencées par les cycles climatiques. Trois types de régime peuvent se rencontrer lorsque ces nappes captives sont exploitées:

#### 1) *Un régime d'équilibre dynamique*

En moyenne sur une durée de l'ordre de l'année, la quantité d'eau prélevée est inférieure ou au plus égale à la quantité d'eau alimentant la nappe directement (infiltration) ou indirectement (par effet induit des pompages sur les limites ou les flux de drainage éventuels). Cet équilibre peut être éventuellement rompu sur certaines périodes, en fonction des aléas climatiques.

#### 2) *Un régime de déséquilibre temporaire*

Sur la période considérée la quantité d'eau prélevée est supérieure aux apports (directs ou induits). La différence est prise sur la réserve en eau de l'aquifère (déstockage). Ce régime peut faire suite au précédent en raison d'une augmentation sensible des prélèvements, ceux-ci se stabilisant ensuite. Le nouvel état d'équilibre est atteint après une phase transitoire plus ou moins longue fonction des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère. Cet équilibre a pu être obtenu grâce à des apports d'eau supplémentaires venant des limites ou en raison d'une diminution des flux d'eau aux exutoires de la nappe (ce qui peut ne pas être souhaitable).



#### 3) *Un régime de déséquilibre durable*

C'est un cas extrême qui s'instaure lorsque l'exploitation de la nappe, les prélèvements restant constants, excède largement ses possibilités d'alimentation. Il y a rupture définitive d'équilibre et vidange de la nappe. C'est la situation de surexploitation.

Pour une nappe captive dont les niveaux baissent continûment il est difficile de prévoir l'état futur de la nappe (illustration 10 ci-dessous) et, en l'absence d'une situation de risque avéré, la détermination de "cotes piézométriques d'objectifs" est délicate. Elle peut néanmoins se faire sur la base des résultats fournis par un modèle.

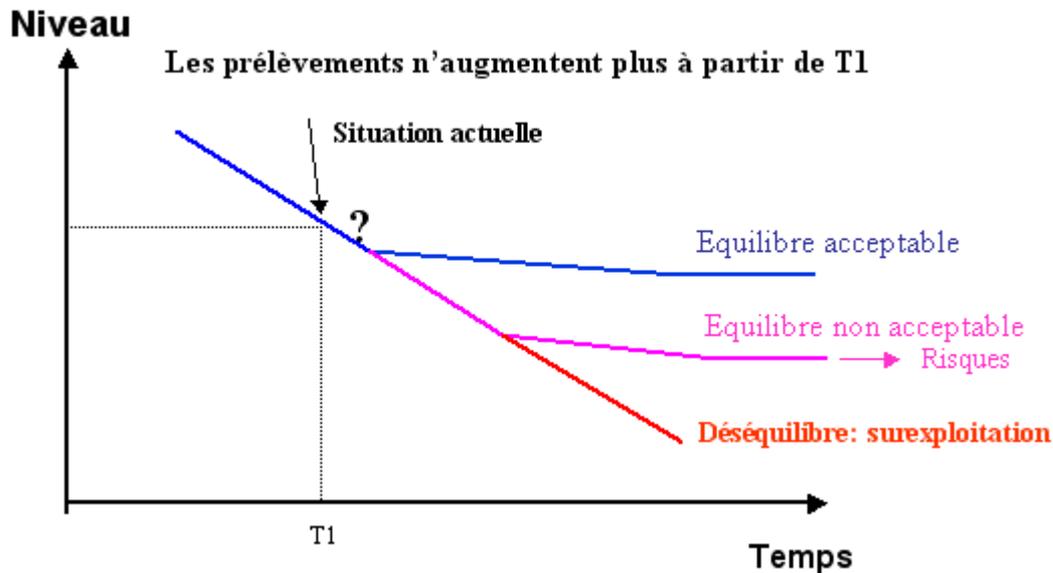


Illustration 10 – Types d'évolution possible d'une nappe captive exploitée

### 2.5.2. Exemple en Aquitaine

Dans le nord du bassin, de nombreux réservoirs aquifères, du Mio-Plio-Quaternaire au Jurassique, sont exploités pour l'AEP, l'irrigation (essentiellement la nappe libre du Mio-Plio-Quaternaire), l'industrie et la géothermie (nappes profondes).

Certaines nappes sont très sollicitées (dans l'Oligocène et l'Eocène en particulier, essentiellement pour l'AEP) avec comme conséquence une baisse continue des niveaux depuis de nombreuses années dans de nombreux secteurs, induisant un vaste cône de dépression piézométrique.

En effet, ces nappes (à l'exception du Mio-Plio-Quaternaire) sont captives et la recharge directe par infiltration est peu importante : même si certaines d'entre elles couvrent un vaste territoire (de 10 000 à 20 000 km<sup>2</sup> pour les plus étendues), les zones d'alimentation situées à leur périphérie sont restreintes : pour l'Eocène nord-aquitain par exemple, celles-ci représentent 5% seulement de la superficie de l'aquifère (environ 18 000 km<sup>2</sup>).

#### Prélèvements

En 2009, 3759 ouvrages sollicitant les 14 nappes (hors Plio-quaternaire) ont été recensés (illustration 11).

Les volumes prélevés en 2007, sur les 3759 captages, étaient de 325 millions de m<sup>3</sup>. L'évolution des prélèvements de 1972 à 2007 est présentée par l'illustration 12.

#### Evolution des niveaux

Les baisses de niveaux peuvent conduire à des situations d'approvisionnement peu sécuritaires tant sur le plan quantitatif que sur le plan qualitatif :

- renouvellement de la ressource compromis,
- risque de dénoyage des couches (cas par exemple de l'Oligocène à proximité de Bordeaux où la limite de captivité de la nappe s'est déplacée de quelques km vers l'aval hydraulique en 20 ans)
- perte de productivité des forages,
- diminution du débit des sources,
- détérioration de la qualité des eaux par introduction d'éléments chimiques venant de zones plus lointaines,

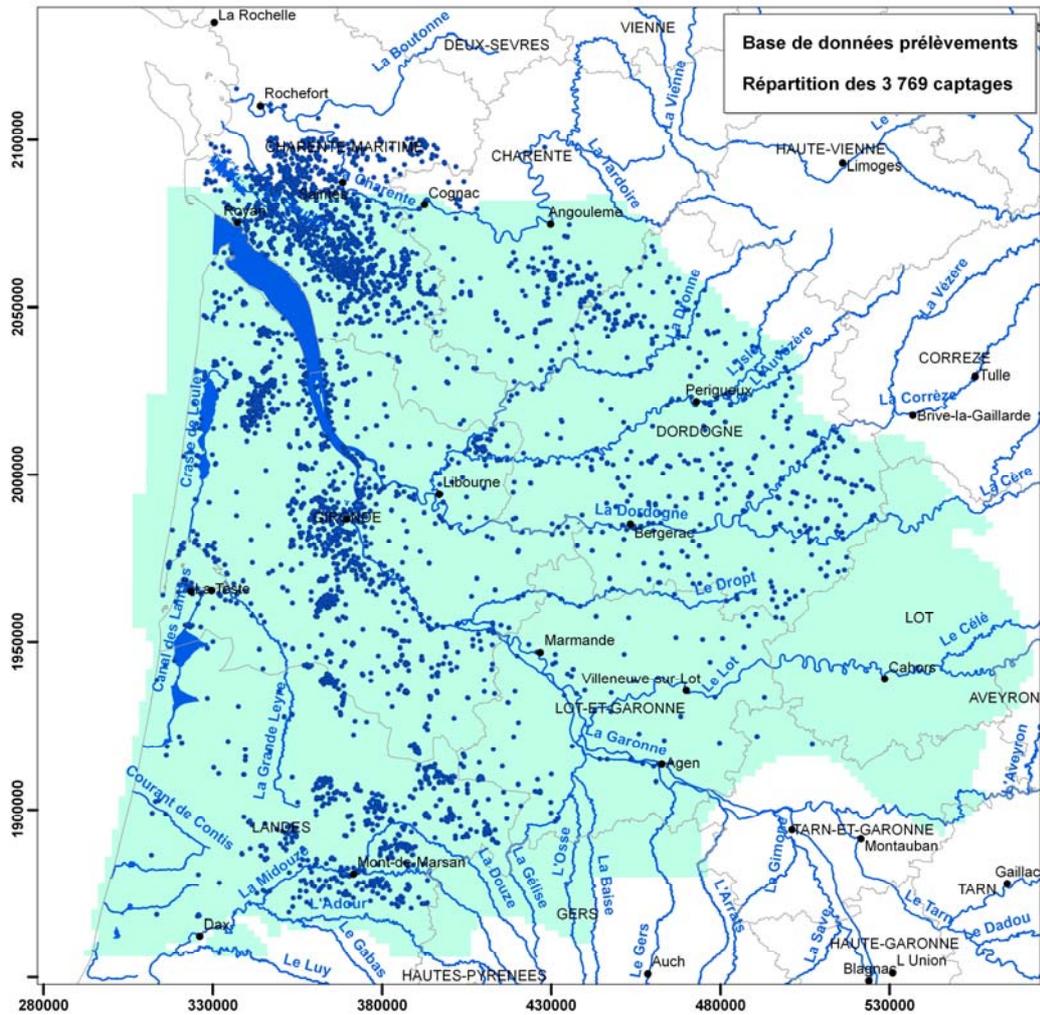


Illustration 11 - Carte de répartition des 3 759 captages recensés dans la BD « Prélèvements » et limite d'extension du modèle Nord-Aquitain

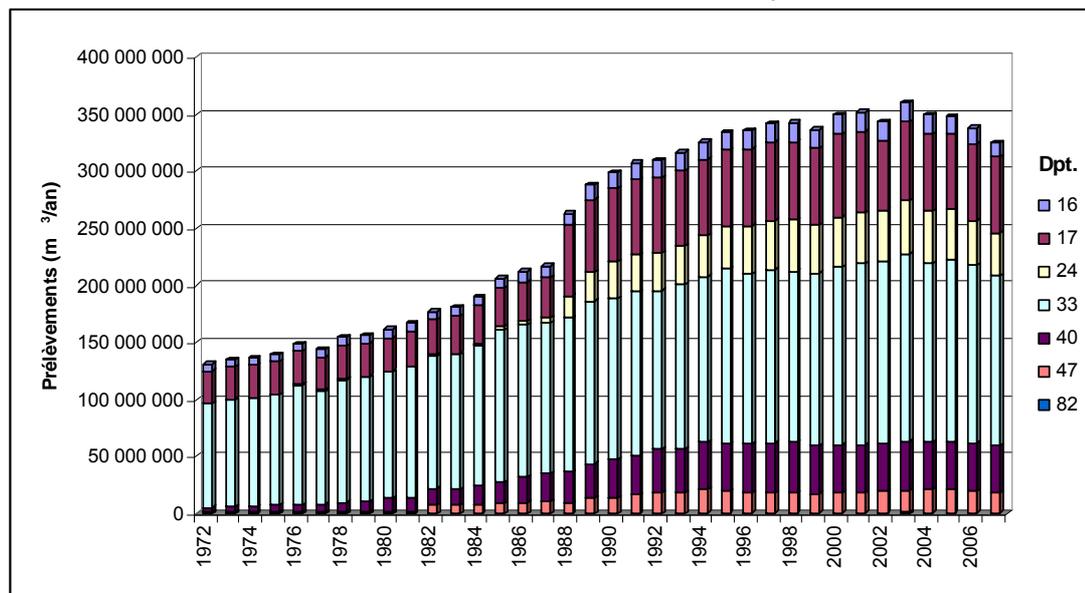


Illustration 12 - Evolution des prélèvements par département (tous usages confondus) pour les 3 759 ouvrages contenus dans base de données des prélèvements  
Source des 2 illustrations: rapport BRGM RP-57878 (2009)

- risque d'intrusion d'eaux saumâtres aux limites (estuaire de la Garonne).

Si la dépression piézométrique de la nappe Eocène dans la région bordelaise continuait à s'étendre, la possibilité de venues d'eau chargée en sels provenant du complexe estuarien (estuaire de la Garonne et nappes salées fossiles contenues dans des formations superficielles) ne serait pas à exclure (illustration 13). Dans ce secteur, l'Eocène est en effet affleurant sous l'estuaire mais une zone piézométrique "haute" (actuellement à +3, +4 m) fait office de protection. Cette zone sensible (appelée "bourrelet piézométrique" fait l'objet d'un suivi régulier.

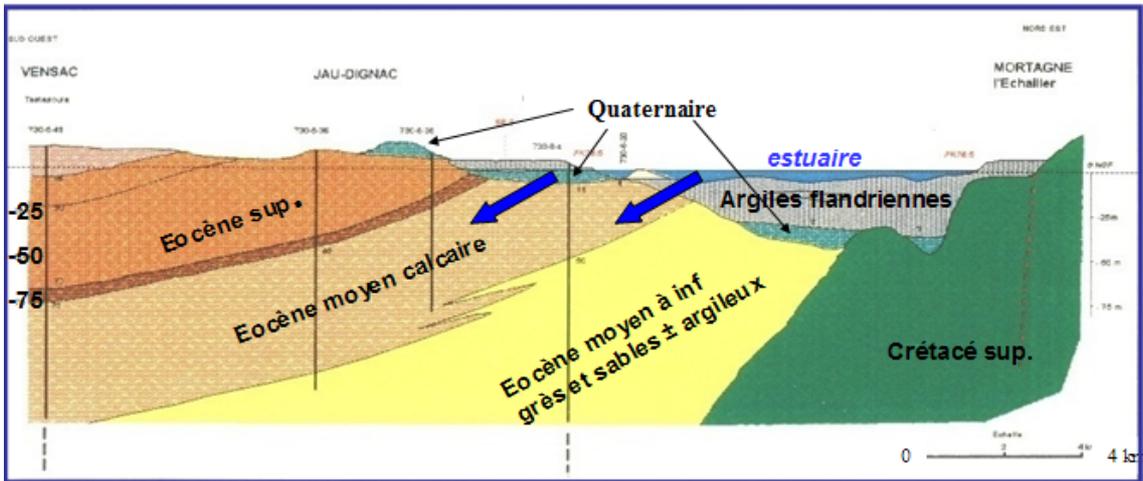


Illustration 13 - Coupe géologique schématique montrant les relations Aquifères Eocène-Estuaire

Des exemples de baisse des niveaux dans l'aquifère de l'Eocène moyen sont fournis par l'illustration 14.

Pour fournir aux acteurs locaux des éléments de décision permettant de mettre en place une politique de gestion raisonnée de la ressource, un modèle hydrodynamique multicouches a été construit (1998) et utilisé en particulier dans le cadre du SAGE "Nappes profondes de Gironde" (2000-2003). Ce modèle a été régulièrement actualisé et affiné (il comprend actuellement 15 couches aquifères) et dernièrement utilisé (rapport BRGM/RP-57878-FR, 2009) pour simuler différents scénarios (climatiques, démographiques, prélèvements).

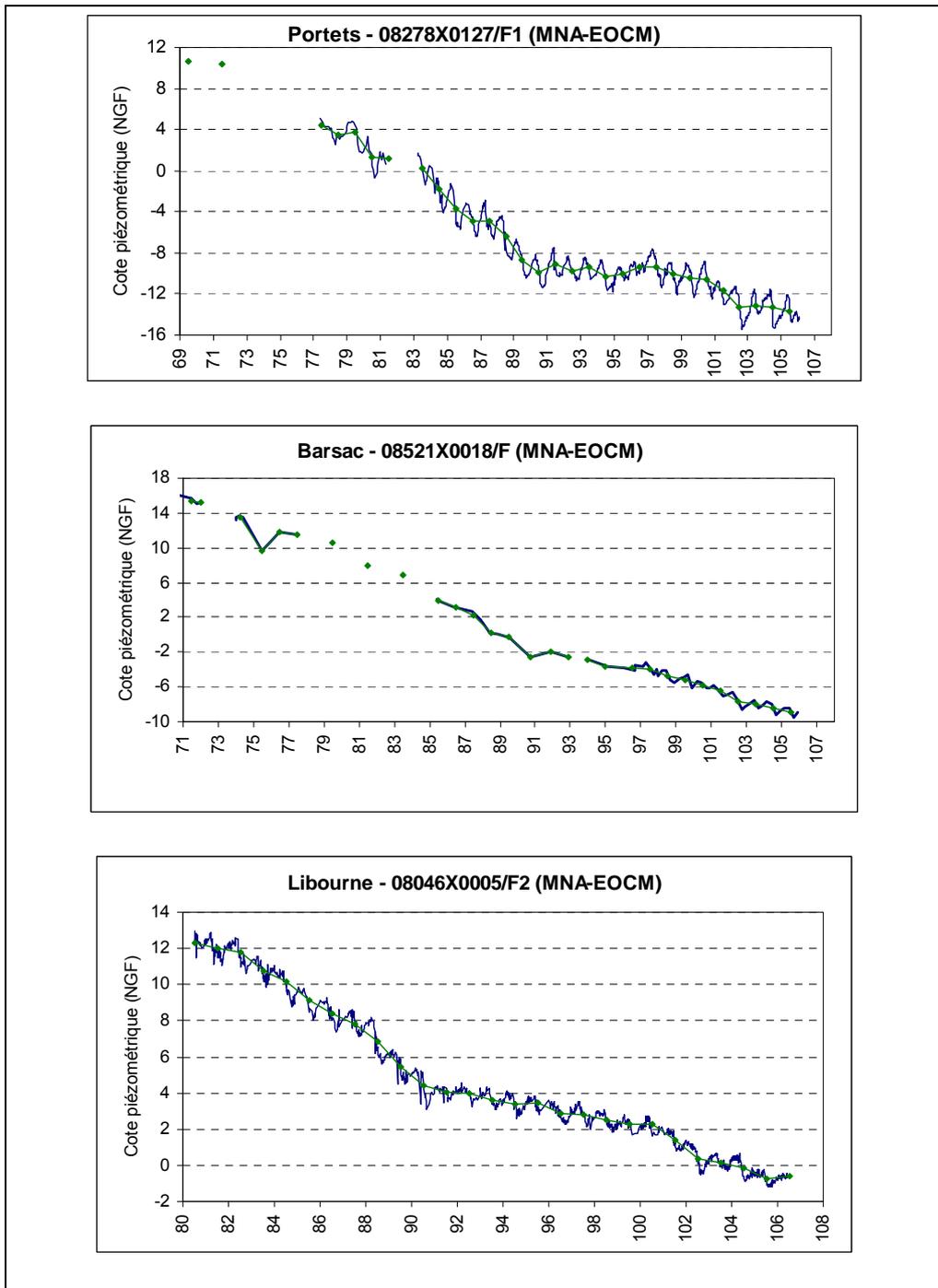


Illustration 14 – Quelques exemples de baisse des niveaux dans l'Eocène nord-aquitain

### 2.5.3. Nappes du Jurassique dans le Lot-et-Garonne

Quatre réservoirs aquifères calcaires plus ou moins karstiques sont séparés par des formations marneuses ou marno-calcaires. Ce sont, de "bas en haut" (avec leurs épaisseurs indiquées entre parenthèses) :

- les grès et calcaires dolomitiques du Lias inférieur et moyen,
- les calcaires et dolomies du Bajocien (120/150 m),
- les calcaires du Bathonien supérieur / Callovien / Oxfordien (100/130 m),
- les calcaires de l'Oxfordien / Kimméridgien basal (100/200 m).

Les épontes imperméables intra-jurassiques sont de bas en haut :

- les marnes du Toarcien (30/40 m)
- les calcaires marneux du Bathonien inférieur (50/70 m) qui ont tendance à disparaître vers l'Ouest
- les marnes de l'Oxfordien supérieur (100/150 m)
- les marno-calcaires du Kimméridgien (plus de 200 m) qui séparent partout les aquifères jurassiques des aquifères du Crétacé.

Presque tous les forages captant ces réservoirs présentent une baisse continue des niveaux (illustration 16), la baisse moyenne étant de l'ordre de 1,2 m/an (une remontée des niveaux est toutefois observée depuis 2005 pour les forages de Tournon d'Agenais et de Penne d'Agenais, tous deux situés au nord-est du département).

Les niveaux baissent indépendamment des fluctuations des volumes prélevés (de l'ordre de 7 millions de m<sup>3</sup>/an ces dernières années, illustration 16). Il semble donc qu'il existe un déficit entre les entrées (recharge) et les sorties (pompages) qui se traduit par un déstockage dans les aquifères concernés.

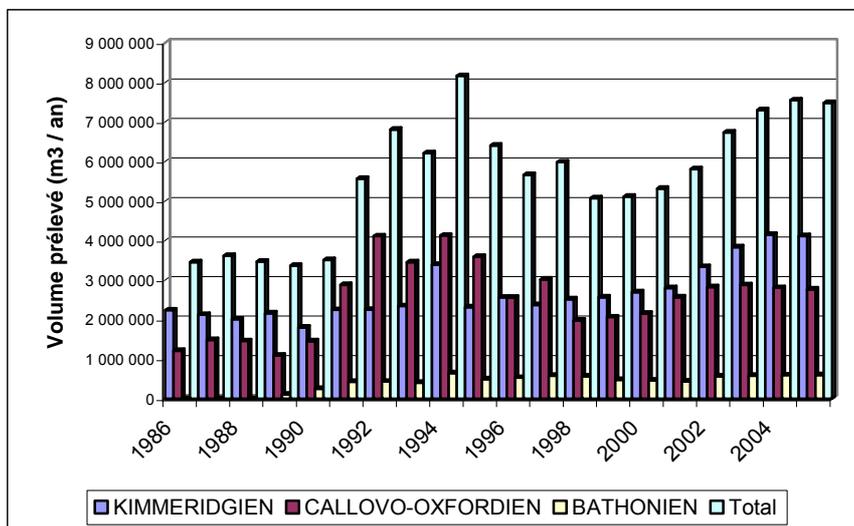
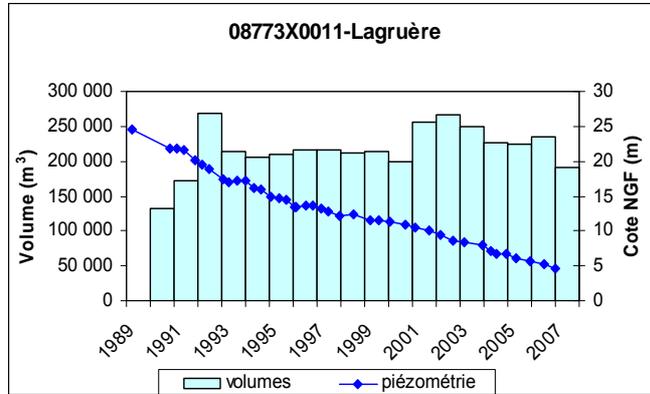


Illustration 15 - Prélèvements sur les forages exploités captant les nappes du Jurassique en Lot-et-Garonne (1986 – 2005)

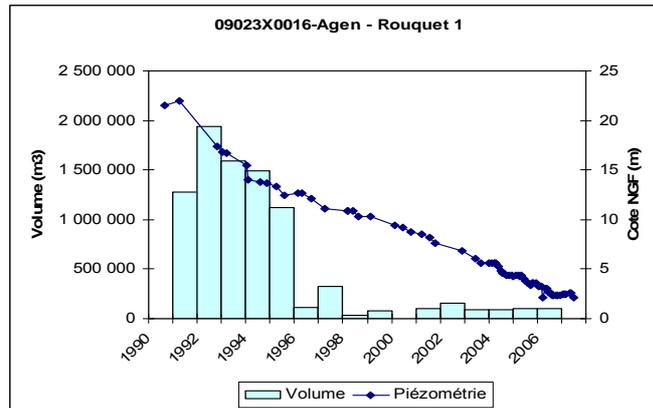
Source: rapport BRGM (2008)

**Remarque:** lorsque les prélèvements augmentent d'une année à l'autre, la baisse des niveaux est un phénomène transitoire "normal". Par contre, la situation est plus inquiétante lorsque les niveaux ne cessent de baisser alors que les prélèvements sont stables depuis plusieurs années.

Le **forage Mouliot** à Lagruère capte les calcaires du Callovo-Oxfordien.  
Baisse des niveaux de 20 m en 20 ans



Le forage Rouquet à Agen capte les Calcaires du Callovo-Oxfordien  
Baisse des niveaux de 20 m en 18 ans



Le forage Brot à Clairac capte les calcaires du Kimméridgien.  
Baisse des niveaux de 45 m en 34 ans

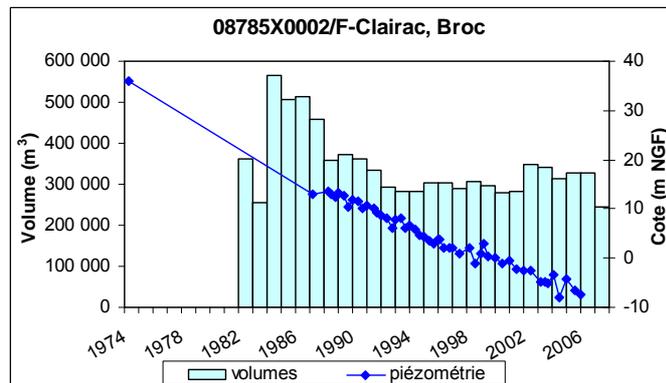


Illustration 16 – Exemples de baisse continue des niveaux dans le Jurassique du Lot-et-Garonne



### 3. Détermination d'indicateurs de gestion

Deux types d'approche sont envisageables, suivant l'hydrosystème considéré et les données disponibles.

**1)** Analyse des mesures de niveaux (et de débits dans le cas d'un cours d'eau en liaison avec la nappe) sans modélisation hydrodynamique. Dans cette approche, on peut mettre en œuvre l'une des méthodes suivantes ou bien, en général, une combinaison de ces méthodes :

- recherche de seuils "historiques",
- recherche de corrélations entre niveaux et débits (ou assecs observés),
- étude fréquentielle à partir des mesures disponibles,
- ajustement de lois de probabilité.

Des précisions sur l'analyse fréquentielle et l'ajustement de lois de probabilité sont fournies en annexe 1.

Des outils d'analyse des séries temporelles de niveaux et débits peuvent aussi être utilisés pour obtenir une vision synthétique des relations de dépendance existant dans (corrélogrammes simples) et entre ces séries (corrélogrammes croisés).

**2)** Utilisation d'un modèle (spatialisé ou global) et simulations prévisionnelles (prédétermination de niveaux). Suivant l'existence ou non d'objectifs à respecter (un seuil piézométrique, un débit de cours d'eau quand celui-ci est soutenu en période d'étiage par la nappe, ...), on peut distinguer:

- des simulations sans "contraintes",
- des simulations sous "contraintes".

On s'appuie dans ce qui suit sur plusieurs exemples pris dans des contextes hydrogéologiques variés ; certains ont été extraits d'études déjà réalisées (les données ont alors été actualisées), d'autres ont été développés dans le cadre de la présente étude.

Il s'agit ici d'illustrer une démarche que l'on a tenté d'appliquer à chaque cas. Des compléments théoriques sont fournis en annexe 1, en particulier sur la notion de "périodes de retour" (qui suppose la stationnarité des séries temporelles, cf. remarque du §1.1 de l'annexe 1), ce qui a toujours été supposé pour les exemples étudiés dans le chapitre 3.2.2).

Mais, préalablement à toute étude visant à définir un indicateur, il est indispensable d'analyser le fonctionnement de l'hydrosystème considéré, en particulier pour bien le délimiter en rapport avec l'objectif fixé et aussi afin de bien établir l'existence d'une relation nappe-cours d'eau.

#### 3.1. ANALYSE DU CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE ET DU FONCTIONNEMENT DE L'HYDROSYSTÈME

##### 3.1.1. Contexte hydrogéologique

L'illustration 17, extraite d'une note technique de la DIREN Ile-de-France, présente une coupe topographique et géologique montrant une succession de bassins versants entaillant le tertiaire d'Île de France. Les cours d'eau Aubette et Viosne, dans le Vexin, peuvent être regroupés. Ils drainent le système multicouche de l'Eocène inférieur dans sa partie lutétienne.

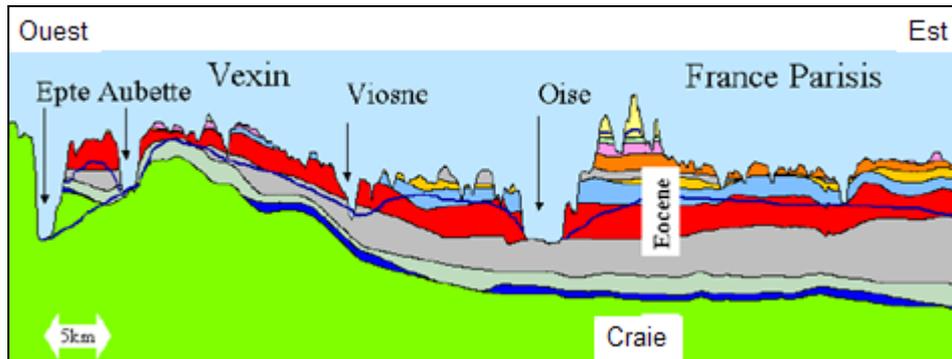


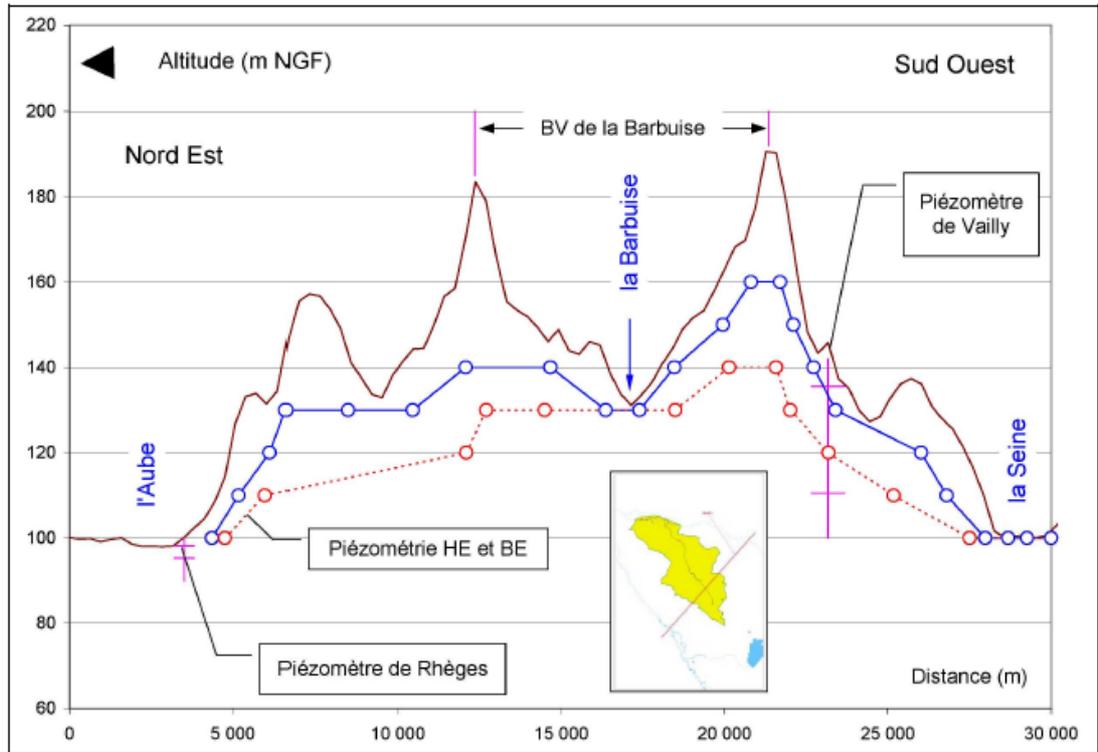
Illustration 17 - Exemple d'analyse d'un contexte hydrogéologique  
Source: Note méthodologique DIREN Ile de France du 09/04/2009

L'Epte, quant à elle, draine le substratum de craie et *a priori* ne peut pas être regroupée avec les deux cours d'eau précédents.

Les cours d'eau situés en rive gauche de l'Oise, dans les secteurs France et Parisis, s'écoulent quant à eux sur des couches imperméables. Ils ne peuvent pas être mis en relation directe avec une nappe régionale ou alors seulement par drainage ou avec des nappes locales. Il convient alors de gérer séparément l'étiage des cours d'eau et celui de la nappe.

L'illustration 18 présente un 2<sup>ème</sup> exemple dans le bassin de la Barbuise et met bien en évidence le drainage de la nappe de la craie par la Barbuise tant en situation de "hautes eaux" qu'en situation de "basses eaux".

Le 3<sup>ème</sup> exemple concerne la nappe libre du Plio-Quaternaire en Aquitaine et montre la délimitation du bassin versant de l'Eyre à partir de la station hydrométrique de Salles et celle du bassin souterrain obtenu à partir d'une carte piézométrique (illustration 19). La bonne superposition des 2 bassins facilite l'établissement d'un bilan hydrogéologique, mais cette approche si elle est nécessaire (dans la mesure des données disponibles) n'est cependant pas suffisante, car dans le cas d'un système multicouche (ce qui est le cas ici), il faudrait vérifier qu'il n'existe pas de flux de drainage significatif (ascendant ou descendant) avec la nappe sous jacente (ce qui nécessite aussi des informations sur cette nappe).



HE = "hautes eaux" BE = "basses eaux"

Illustration 18 – Coupe transversale dans le bassin de la Barbuise

Source: Rapport BRGM RP-53178-FR (2004)

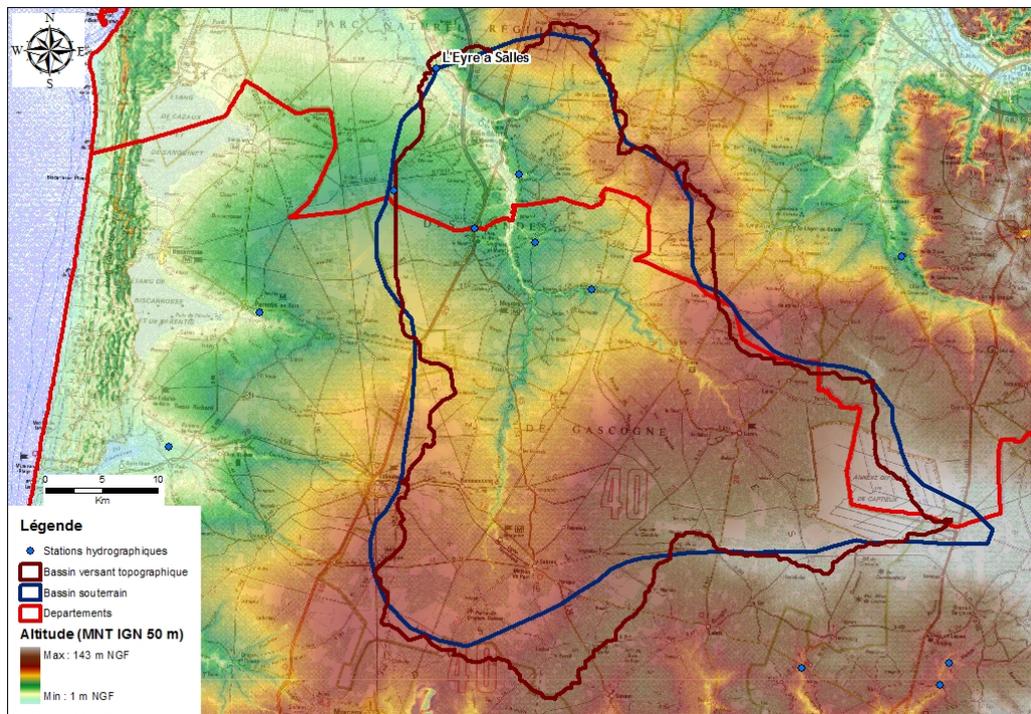


Illustration 19 – Aquifère du Plio-Quaternaire en Aquitaine - Délimitation des bassins versants de surface et souterrain de l'Eyre à partir de la station hydrométrique de Salles.

### 3.1.2. Analyse du fonctionnement de l'hydrosystème

#### 3.1.2.1. Modèle conceptuel

Dans l'exemple de l'illustration 20 ci-après, la nappe des alluvions fluvio-glaciaires est alimentée directement par les pluies efficaces mais aussi par les sables molassiques sous-jacents.

#### 3.1.2.2. Prélèvements dans la nappe

Le recensement des prélèvements en nappe est bien sûr nécessaire pour évaluer la pression exercée sur la nappe et leur impact éventuel sur les cours d'eau connectés à la nappe. L'illustration 21 montre un exemple de répartition des forages en fonction de la distance au cours d'eau.

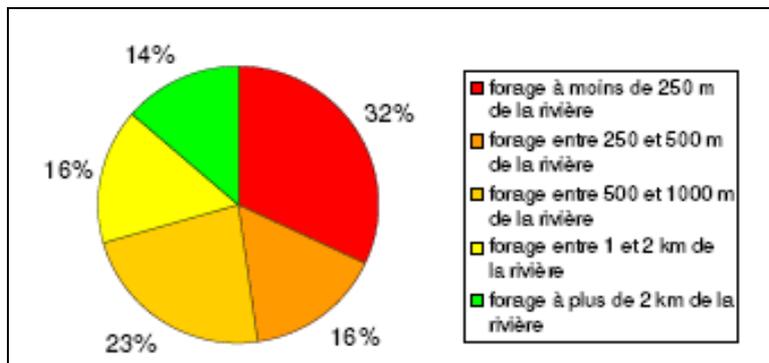


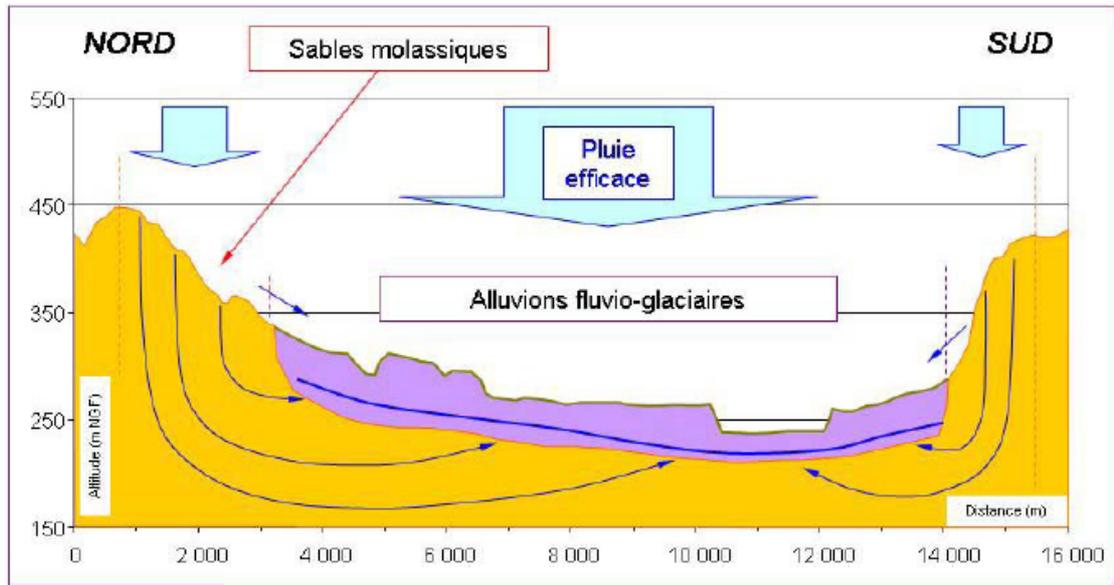
Illustration 20- Bassin de la Somme-Soude.  
Répartition des forages par rapport à leur distance à la rivière  
Source: rapport BRGM RP54178-FR (2006)

#### 3.1.2.3. Pluies et pluies efficaces

Une analyse préalable des pluies (illustration 22), un calcul des pluies efficaces (lame d'eau "disponible" pour l'infiltration et le ruissellement, issue d'un bilan pluie-ETP-réserve en eau des sols) ainsi que la mise en relation des pluies efficaces et des niveaux de la nappe étudiée (illustration 23) font partie des éléments essentiels de compréhension du fonctionnement de l'hydrosystème.

#### *Remarque*

*Etant donné l'importance que revêt l'estimation de la pluie efficace comme entrée souvent dominante dans le cycle hydrogéologique, il convient de s'assurer que la précision de la méthode employée pour l'estimer soit en rapport avec l'incertitude acceptable du modèle d'une part, et avec ses échelles spatiale et temporelle d'autre part. Par exemple, l'usage de modèles simplifiés de calcul de l'ETP (type Turc, ...) doit être exceptionnel et on devra leur préférer des versions plus précises (Penman-Monteith, Oudin, ...), voire effectuer un calage de la recharge dans une fourchette cohérente avec la pluviométrie et l'usage du sol.*



*Illustration 21 – Nappe de Bièvre-Valloire.*

*Schématisation des échanges entre les sables molassiques et les alluvions fluvio-glaciaires.*

Source: rapport BRGM RP-56651 (2008)

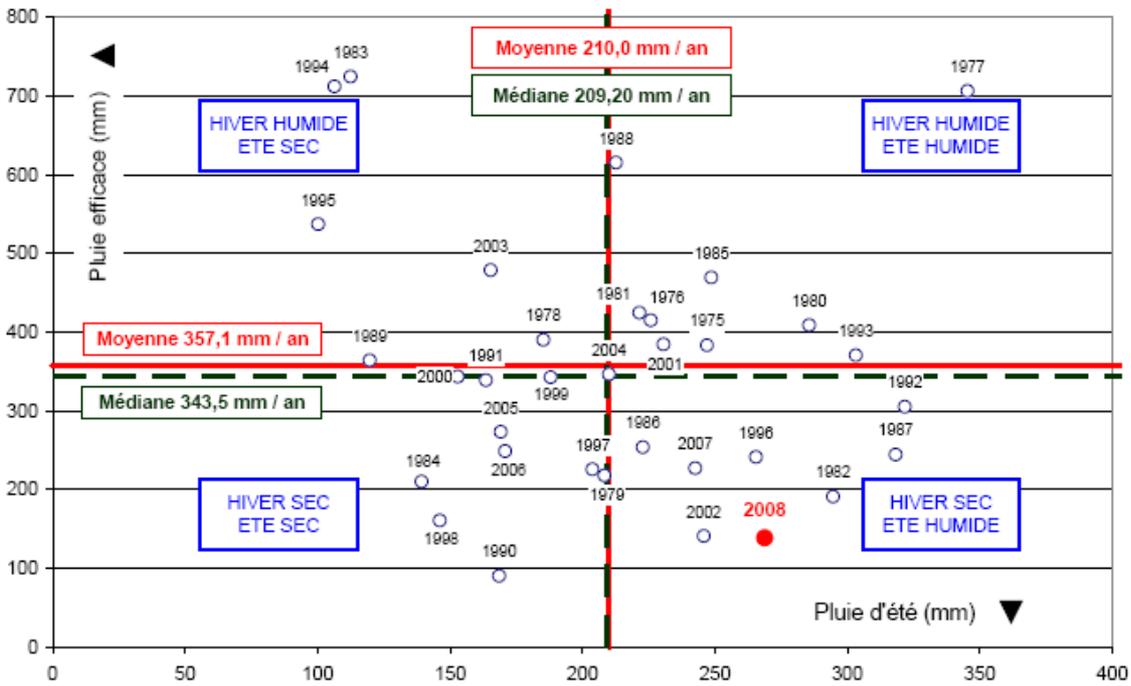
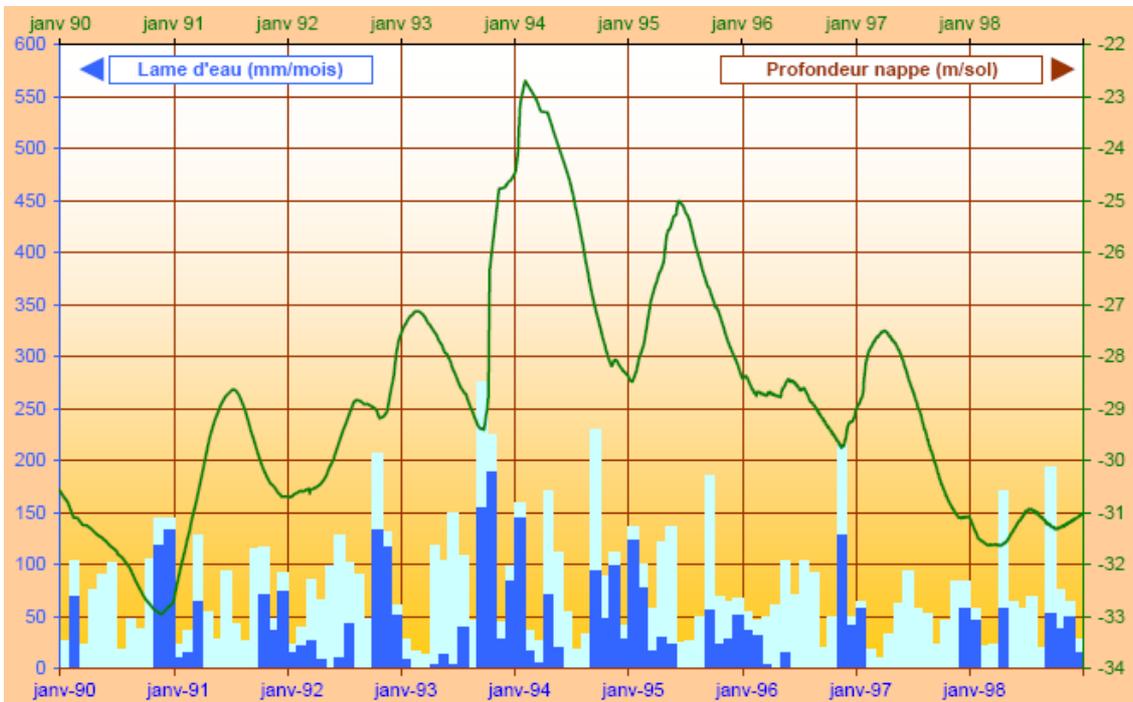


Illustration 22- Nappe de Bièvre-Valloire. Corrélation entre les pluies efficaces (année hydrologique hiver-printemps) et les pluies d'été (juin, juillet, août).  
 Source: rapport BRGM RP-56651 (2008)



En bleu clair la pluie, en bleu foncé la pluie efficace, en vert la profondeur de la nappe

Illustration 23 – Nappe de Bièvre Valloire – Mise en relation de la pluie, de la pluie efficace et de la profondeur de la nappe  
 Source: rapport BRGM RP-56651 (2008)

### 3.1.3. Etablissement d'un bilan des flux dans l'hydrosystème

Un tel bilan est un préalable nécessaire dans l'évaluation de volumes exploitables. La confrontation pluie efficace annuelle / prélèvements dans le bassin est un premier élément d'appréciation de la pression exercée sur la ressource.

L'exemple du bassin de l'Oise dans le département de l'Aisne (tableau ci-dessous) montre la grande variabilité du rapport *prélèvements/pluies efficaces* sur les 4 années considérées (2004 à 2007), de 15 % à 56 % en année déficitaire.

	2004	2005	2006	2007
Ressources (Pluies efficaces en mm/an)	91,8	47,4	152,3	172
Ressources (Pluies efficaces en millions m3)	33,2	17,2	55,1	62,3
Prélèvements en millions m3 (nappe et rivières)	10,1	9,6	10,6	9,5
Prélèvements/Ressources	30.4 %	55.8 %	19.2 %	15.2

*Exemple – Confrontation Pluies efficaces / Prélèvements dans le bassin versant de l'Oise (superficie de 362 km<sup>2</sup>), situé dans département de l'Aisne.*

Source: Atlas hydrogéologique numérique de l'Aisne- Rapport BRGM RP-57439-FR- 2009  
(Les prélèvements englobent eaux souterraines et eaux de surface)

Pour le bassin étudié, il faut:

- calculer la pluie efficace (à partir de la pluie, de l'ETP et de la "réserve utile" des sols) au pas de temps décadaire (ou journalier) ; les valeurs décadaires pourront ensuite être agrégées aux pas de temps mensuel ou annuel en fonction de la finalité du bilan ;
- connaître le débit du cours d'eau à l'exutoire (si possible) du bassin ;
- recenser les volumes prélevés dans la nappe de la craie et dans les cours d'eau pour les usages domestique, agricole et industriel ;
- recenser les volumes d'eau rejetés, en particulier par les stations d'épuration du bassin.

#### Difficultés pour établir un bilan

- 1) imprécision sur les prélèvements, souvent mal connus ou connus au pas de temps annuel seulement ;
- 2) méconnaissance des flux souterrains entrant ou quittant le bassin souterrain (qui peut ne pas être un système clos en coïncidence avec le bassin versant de surface) ;
- 3) méconnaissance des apports éventuels provenant d'un aquifère sous-jacent par drainance ascendante ;
- 4) imprécision sur la partition entre recharge de la nappe et ruissellement ;
- 5) de plus, l'inertie des nappes, lorsqu'elle est importante (cf chapitre 2) rend difficile l'établissement d'un bilan à un pas de temps inférieur à l'année (stockage de la lame d'eau infiltrée puis écoulements différés vers les cours d'eau).

Une modélisation de l'hydrosystème, si les données sont suffisamment abondantes (il faut en particulier des chroniques piézométriques de plusieurs années pour le calage du modèle) permet de mieux cerner certains postes du bilan :

- la partition de la pluie efficace entre recharge de la nappe et ruissellement sera obtenue à l'issue du calage (mais cela ne garantit pas néanmoins l'unicité de cette partition);
- la contribution des eaux souterraines au débit des cours d'eau sera calculée et un bilan pas de temps par pas de temps pourra être établi.

### 3.2. RECHERCHE D'INDICATEURS SANS MISE EN ŒUVRE D'UN MODÈLE

#### 3.2.1. Recherche de "seuils historiques" associée à une analyse fréquentielle

Dans de nombreuses régions, en particulier dans les bassins Seine-Normandie et Loire-Bretagne, des indicateurs piézométriques ont été définis en analysant les chroniques piézométriques de longue durée disponibles.

*La recherche de "seuils historiques"*, méthode très pragmatique, consiste à repérer dans les chroniques piézométriques de longue durée, des niveaux particuliers (historiquement bas) ayant eu des conséquences sur l'hydrosystème (cessation du soutien d'étiage des cours d'eau, rupture durable d'équilibre,...) et sur l'utilisation de la ressource (limitation des prélèvements, apparition de conflits d'usage).

Une analyse fréquentielle (détermination de fréquences de dépassement de tel ou tel niveau) est en général associée à cette méthode.

L'indicateur piézométrique se décline alors en "**seuils d'alerte**", conduisant, lorsqu'ils sont franchis, à un "**seuil de crise**". Les "seuils d'alerte" peuvent éventuellement être précédés d'un "**seuil de vigilance**".

L'indicateur est associé soit à un piézomètre unique, soit à plusieurs piézomètres qui ont été utilisés pour le construire (il s'agit en général d'une moyenne des niveaux enregistrés). Cette **chronique synthétique virtuelle** est alors considérée comme l'indicateur piézométrique lui-même auquel sont associés des seuils particuliers.

##### 3.2.1.1. Exemple 1 : les indicateurs piézométriques en région Centre

En région Centre, un réseau piézométrique relativement dense (171 stations automatiques avec télétransmission) permet de suivre l'évolution des niveaux dans 11 aquifères (annexe 4).

Les aquifères d'importance régionale (Calcaires de Beauce, Craie, Cénomaniens, Jurassique supérieur, Jurassique moyen, Trias) ont été subdivisés en secteurs (20 au total), chacun faisant l'objet d'un suivi à l'aide d'un indicateur synthétique (au sens d'une chronique synthétique virtuelle)

Chacun de ces 20 indicateurs est construit à partir d'une moyenne des niveaux enregistrés sur des piézomètres représentatifs du secteur aquifère qu'il contrôle (suivant les secteurs, de 2 à 8 piézomètres entrent dans la composition de l'indicateur).

Les indicateurs sont mis à jour à fréquence hebdomadaire depuis 2007 par la DREAL Centre.

##### **Cas de la nappe des Calcaires de Beauce**

La nappe est libre (sauf en quelques secteurs). Elle est très sollicitée pour l'alimentation en eau potable, l'industrie ainsi que l'irrigation, ce dernier usage s'étant considérablement développé depuis 1976 et surtout 1990.

Son alimentation dépend exclusivement des précipitations (essentiellement les pluies hivernales). Elle alimente la Seine, le Loir, la Loire, directement ou par l'intermédiaire de petits affluents (Juine, Essonne, Eure, Conie, Aigre, Mauves) qui en dépendent entièrement pour leur écoulement (illustration A13 en annexe 4). Plusieurs épisodes de recharge déficitaire, l'accroissement des prélèvements, l'importance des enjeux, ont

conduit, dès 1995, à la mise en place d'une politique de gestion par l'intermédiaire d'indicateurs piézométriques.

• *De 1995 à 2003*

En mars 1995, un accord appelé "*Charte Nappe de Beauce*" était signé entre l'administration d'une part et les organisations professionnelles d'autre part (syndicats d'irrigants). Cette charte permettait le déclenchement des mesures de limitation de l'irrigation à partir du suivi d'un indicateur du niveau moyen de la nappe et de la détermination de trois seuils d'alerte :

- Seuil d'alerte n°1 : 106,8 m, correspondant au niveau d'avril 1990,
- Seuil d'alerte n°2 : 105,6 m, correspondant au niveau de décembre 1976,
- Seuil d'alerte n°3 : 103,9 m, correspondant au niveau de janvier 1994.

Pour construire cet indicateur, l'aquifère avait été subdivisé en 9 secteurs correspondant aux zones d'alimentation des principales rivières ("bassins versants" souterrains) et dans chaque secteur un piézomètre représentatif avait été choisi (suivi depuis au moins 20 ans).

L'indicateur piézométrique était alors calculé en effectuant la moyenne, pondérée par la superficie des bassins souterrains, des niveaux mesurés dans ces piézomètres.

Ces trois seuils avaient été repris dans le SDAGE Loire-Bretagne de 1996 qui définissait en outre le seuil n° 3 comme un seuil de crise.

• *Actuellement*

Pour la piézométrie, 4 secteurs aquifères ont été délimités : Beauce centrale, Beauce Fusain-Montargois, Beauce blésoise, Calcaires sous Sologne ; deux "zones d'alerte" ont été définies : Beauce centrale et Beauce blésoise (illustration A13 en annexe 4).

L'indicateur piézométrique de référence pour la zone Beauce centrale est la moyenne des niveaux de la nappe mesurés au droit des cinq stations piézométriques listées ci-après.

Indice BSS	Commune d'implantation	Département
03287X0018	Batilly-en-Gâtinais	45
03622X0027	Epieds-en-Beauce	45
02558X0034	Saint-Léger-des-Aubées	28
03263X0004	Fains-la-Folie	28
03626X0026	Ouzouer-le-Marché	41

Il y a 3 seuils d'alerte (S1, S2, S3), et un seuil de crise (illustration 24). Le seuil de crise est fixé à la cote 110.75 m (valeur de l'année 1992).

Pour l'année en cours, l'indicateur est comparé aux niveaux moyens mensuels de différentes fréquences de dépassement (illustration 25): "décennal sec" (niveau mensuel dépassé 9 années sur 10, fréquence de non dépassement de 0.1), "quinquennal sec" (niveau mensuel dépassé 4 années sur 5, fréquence de non dépassement de 0.2), "quinquennal humide" (niveau mensuel dépassé 1 année sur 5, fréquence de non dépassement de 0.8) et "décennal humide" (niveau mensuel dépassé 1 année sur 10, fréquence de non dépassement de 0.9).

Le volume de prélèvement attribué à chaque agriculteur pour la campagne à venir est déterminé en fonction de la valeur de l'indicateur en sortie d'hiver. Il est décroissant entre le seuil S1 et le seuil de crise.

En cours de campagne, l'état d'alerte puis l'état de crise peuvent éventuellement être constatés et déclencher des mesures complémentaires de limitation des prélèvements.

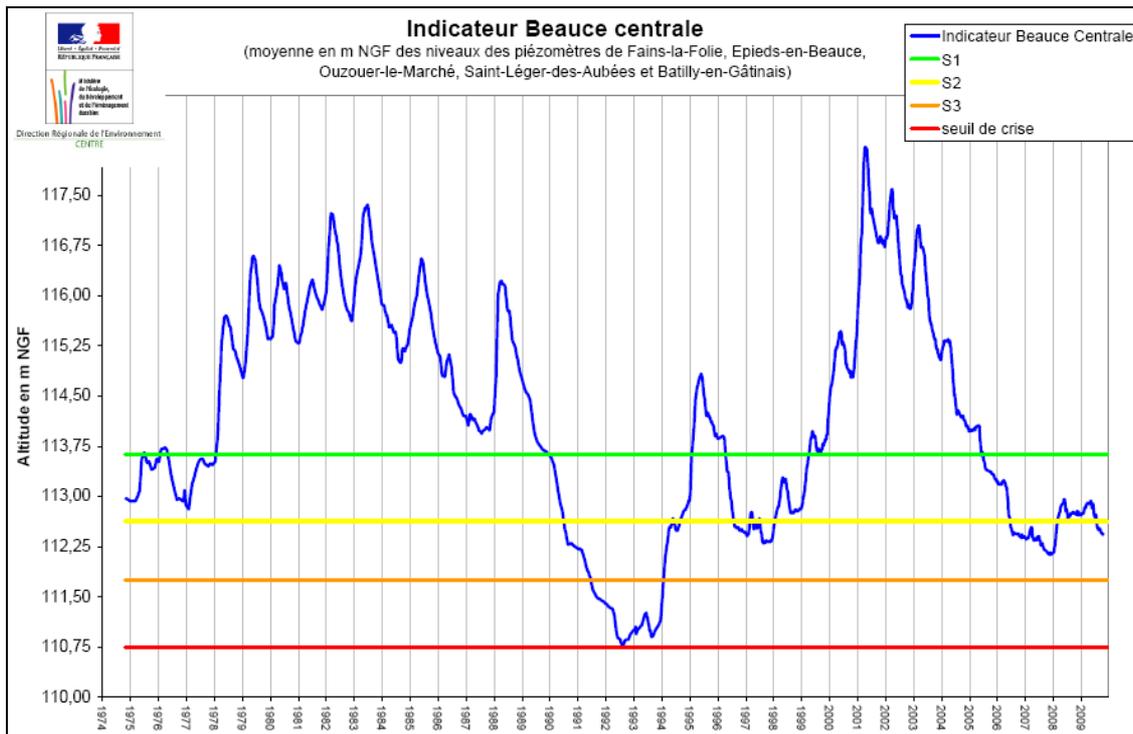


Illustration 24 - Seuils piézométriques définis pour la nappe des Calcaires de Beauce. (Beauce centrale)

S1 = 113,63 m S2 = 112,63 m S3 = 111,75 m Seuil de crise = 110,75 m

[http://www.centre.ecologie.gouv.fr/nappe\\_de\\_beauce.htm](http://www.centre.ecologie.gouv.fr/nappe_de_beauce.htm)

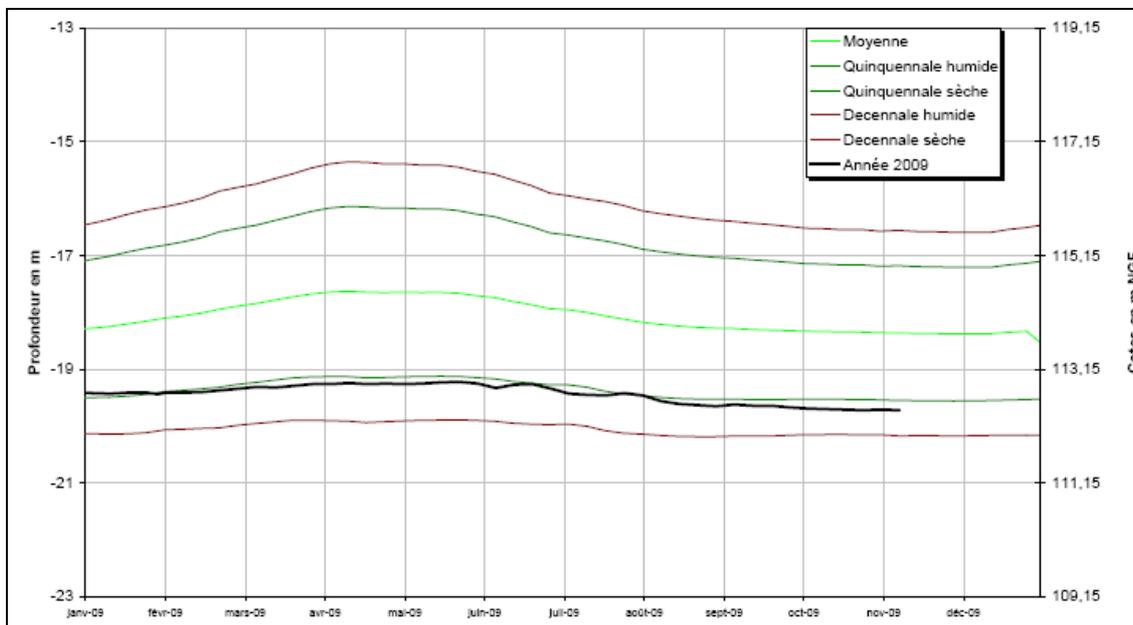


Illustration 25 – Comparaison de l'indicateur "Beauce centrale" (en noir) à des niveaux moyens mensuels de différentes fréquences de dépassement.

[http://www.centre.ecologie.gouv.fr/nappe\\_de\\_beauce.htm](http://www.centre.ecologie.gouv.fr/nappe_de_beauce.htm)

### 3.1.1.2. Exemple 2 : les "indicateurs sécheresse" d'Île de France

En Île de France, un réseau de 18 piézomètres a été mis en place pour suivre l'évolution des niveaux des principales nappes.

Sur ces piézomètres, 4 seuils piézométriques ont été fixés, par analogie avec les seuils définis dans le "plan sécheresse" des cours d'eau:

- un seuil de vigilance,
- un seuil d'alerte,
- un seuil de crise,
- un seuil de crise renforcé.

Le seuil de crise renforcé a été fixé à partir d'une analyse des chroniques piézométriques de longue durée : recherche des niveaux bas correspondant à des sécheresses.

La sécheresse des années 1992-1993 a été retenue comme sécheresse de référence pour définir le seuil de crise renforcé ; celui-ci a été calé légèrement au-dessus des niveaux les plus bas de cette période (illustration 26), avec l'exemple du piézomètre de Montereau-sur-le-Jard, en Seine-et-Marne, qui montre le franchissement du "seuil de crise renforcé" en 2009).

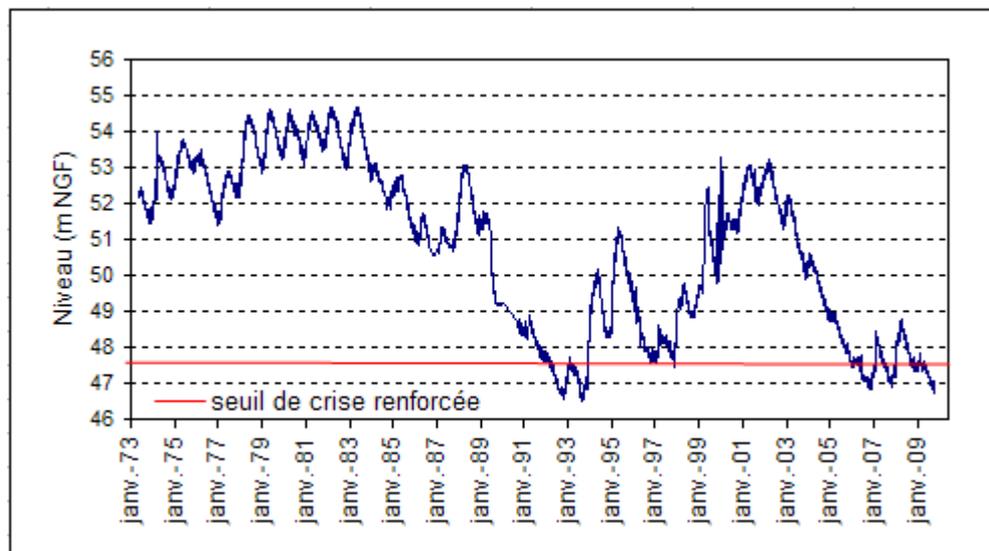


Illustration 26 - Seuil de "crise renforcée" défini au piézomètre de Montereau-sur-le-Jard (77) captant la nappe des Calcaires de Champigny

Le seuil de vigilance a été défini par une analyse statistique et correspond à des niveaux moyens mensuels de période de retour 3-5 ans (illustrations 27 et 28).

#### Cas de l'indicateur des Yvelines

Cet indicateur a été construit en faisant la moyenne des niveaux de 3 piézomètres au comportement similaire: Mareil-le-Guyon, Perdreauville et Théméricourt.

Une modélisation de cet indicateur a été réalisée (cf § 3.2.3.3).

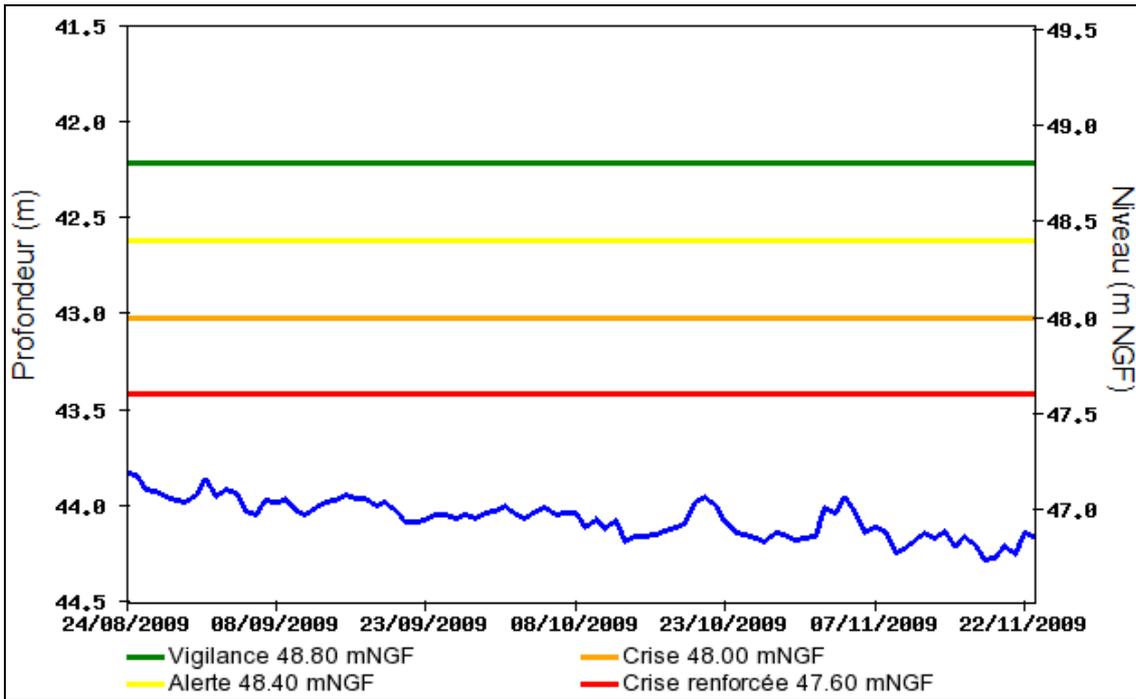


Illustration 27 - Seuils piézométriques définis au piézomètre de Montereau-sur-le-Jard (77).  
Nappe des Calcaires de Champigny

En bleu la chronique des niveaux mesurés

Source: <http://seine-normandie.brgm.fr>

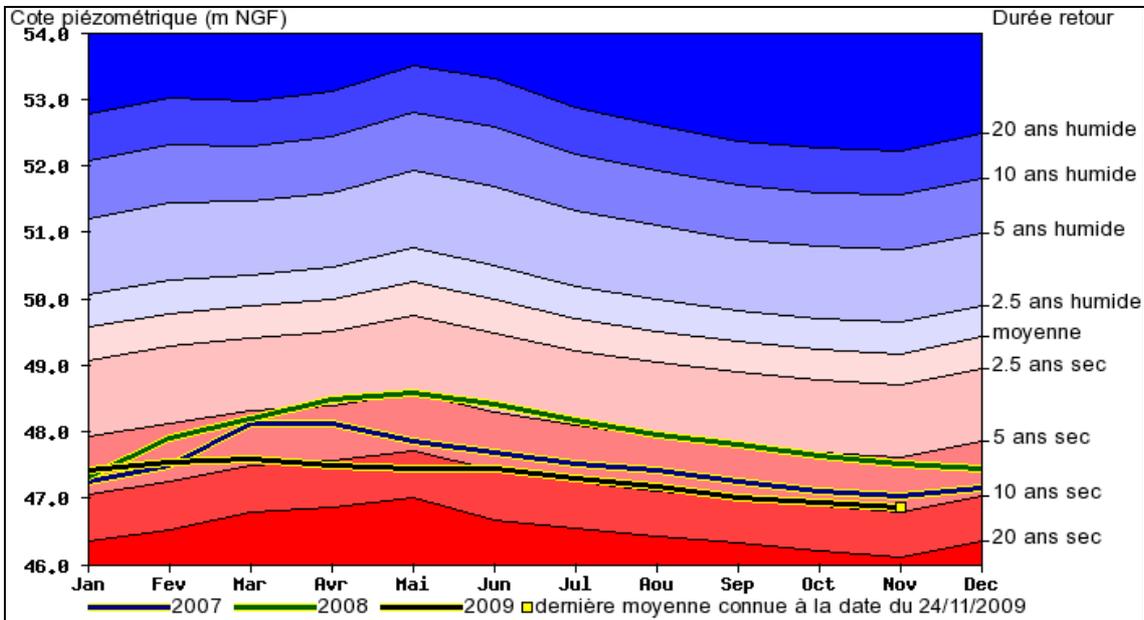


Illustration 28 – Quantiles des niveaux (moyennes mensuelles) calculés au piézomètre de Montereau-sur-le-Jard (77). Nappe des Calcaires de Champigny) et comparaison avec les valeurs des années 2007, 2008 et 2009 (moyennes mensuelles)

Source: <http://seine-normandie.brgm.fr>

### 3.2.2. Recherche de liaisons entre niveaux de nappe et débits du cours d'eau en connexion avec la nappe

#### 3.2.2.1. Exemple 1 : bassin de la Somme-Soude (département de la Marne)

L'étude est présentée en détail dans le rapport BRGM RP-54178-FR (2006). Ce qui suit est un résumé de la démarche, actualisé avec les données postérieures à l'étude et complété par quelques éléments supplémentaires d'analyse.

- *Contexte hydrogéologique*

La craie du Sénonien et du Turonien, à l'affleurement dans la Champagne crayeuse, constitue le réservoir aquifère le plus important de la région Champagne-Ardenne. Le substratum de la nappe est constitué par la craie marneuse du Turonien moyen, rencontrée à une profondeur moyenne de 25 m, pouvant atteindre 30 à 40 m dans les secteurs les plus altérés ; à l'affleurement ce niveau serait plus perméable que sous la couverture de craie du Sénonien et ferait en fait partie du réservoir de la nappe de la craie. La limite inférieure du réservoir se caractériserait donc par une réduction progressive de la fissuration de la craie avec la profondeur.

La nappe est libre sur la zone d'étude (localisée sur l'illustration A16 de l'annexe 5) et les écoulements souterrains convergent vers la vallée de la Marne. La nappe de la craie fournit donc la plus grande partie des débits des rivières, dont elle régularise dans une large mesure le régime. Dans les vallées, la nappe de la craie se raccorde à celle des alluvions, formant alors avec cette dernière un ensemble unique.

- *Pluie efficace*

Le calage d'un modèle "pluie-débit" sur la bassin versant de la Soude a permis de calculer la pluie efficace : sur la période 1975-2005 la moyenne est de 186 mm.

- *Prélèvements*

Les seules données disponibles pour le bassin versant de la Soude sont les prélèvements totaux en 2003 (irrigation, AEP et industrie) d'un volume de 974 472 m<sup>3</sup>, soit une lame d'eau de 9.3 mm (pour une superficie du bassin versant de 105 km<sup>2</sup>), représentant 5 % de la pluie efficace.

Dans le bassin de la Somme-Soude, près de la moitié (48%) des ouvrages sont situés à moins de 500 m de la rivière, dont les deux tiers à moins de 250 m (illustration 21 déjà présentée ci-dessus).

- *Choix d'un piézomètre de référence*

Aucun des piézomètres du secteur d'étude ne présentait des données de qualité suffisante pour être choisi comme référence. Les relevés de niveau de nappe obtenus auprès d'irrigants et des industriels du secteur d'étude ne sont pas assez précis et les chroniques pas assez longues pour être utilisables.

La seule chronique piézométrique de longue durée fiable et représentative dans un rayon de quelques kilomètres autour du secteur d'étude se trouve aux Grandes-Loges (illustration 29). Il s'agit d'un piézomètre du réseau suivi par le BRGM (indice national 01584X0023/LV3) situé plus au nord et qui possède une longue chronique de mesures, ininterrompue depuis 1969, avec un pas de temps généralement journalier depuis sa mise en service.

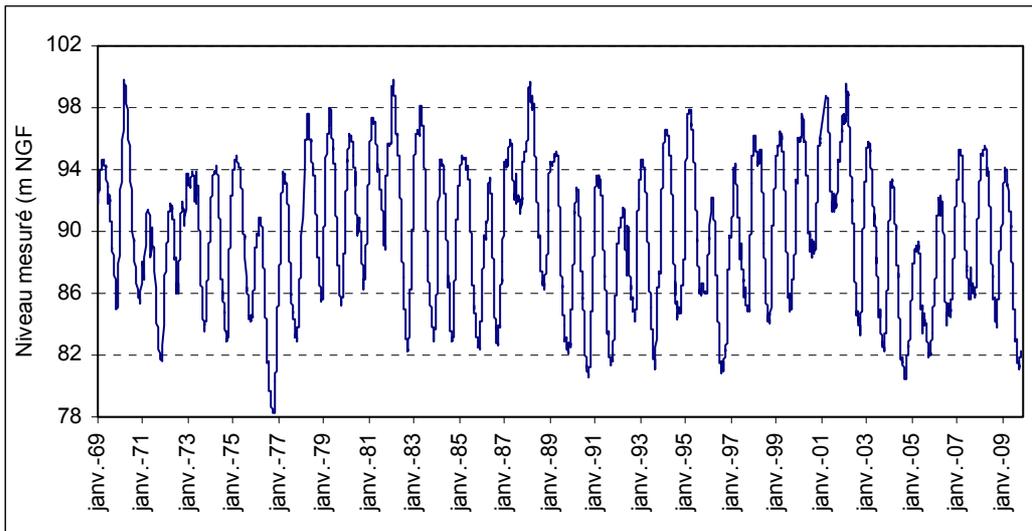


Illustration 29 – Evolution des niveaux enregistrés au piézomètre des Grandes Loges (bassin de la Somme Soude)

- Station hydrométrique

Les débits de la Soude sont mesurés depuis 1968 à la station de Soudron, suivie par la DREAL Champagne-Ardenne (code station H5213310). La superficie du bassin versant correspondant est de 105 km<sup>2</sup>. La valeur du QMNA5 est de **36 l/s**.

L'illustration 30 présente l'évolution des débits moyens mensuels de la Soude de 1970 à 2008 mise en relation avec l'évolution des niveaux moyens mensuels au piézomètre des Grandes-Loges.

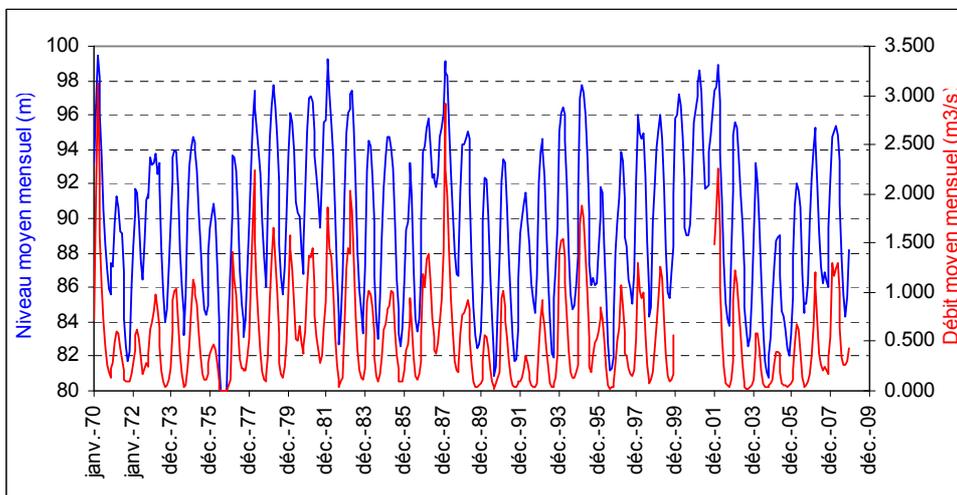
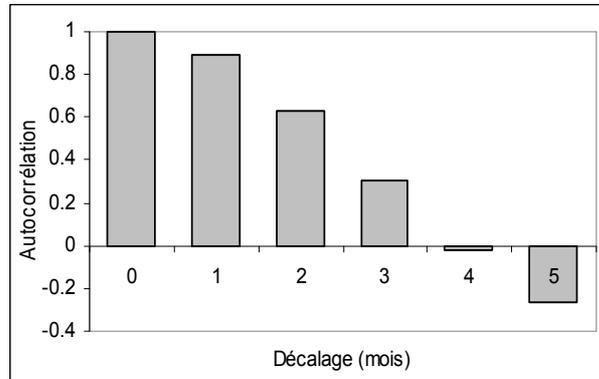


Illustration 30 – Niveaux moyens mensuels au piézomètre des Grandes Loges et débits mensuels moyens de la Soude à Soudron (bassin de la Somme-Soude)

- *Corrélogramme*

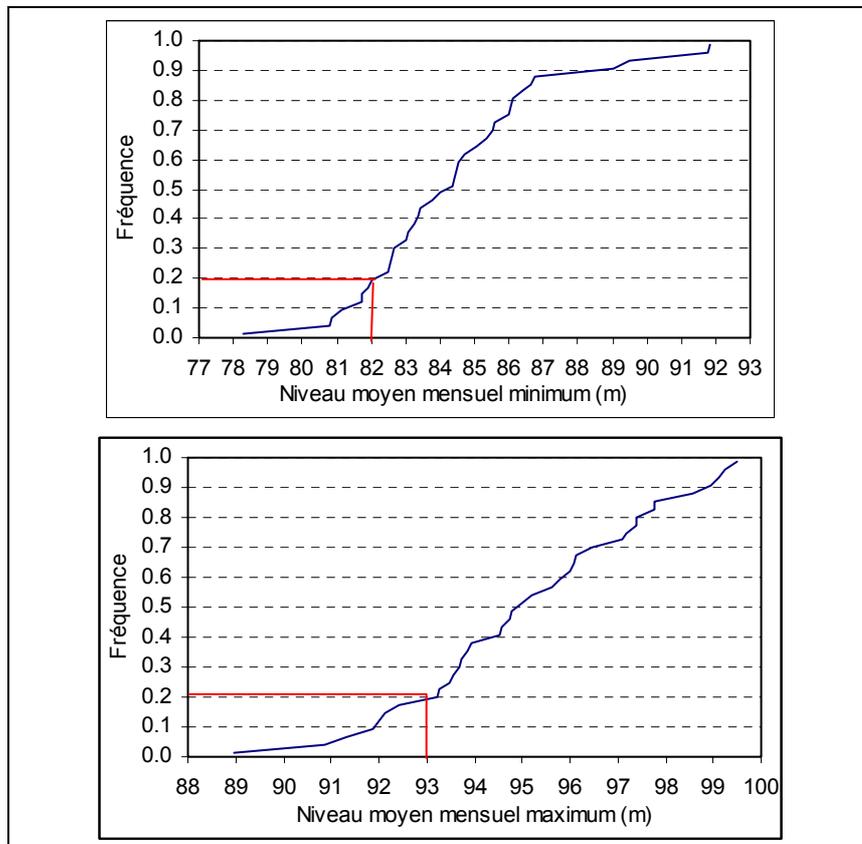
La nappe présente peu d'inertie comme le souligne le corrélogramme des niveaux au piézomètre des Grandes-Loges (illustration 31). Le coefficient d'autocorrélation décroît très rapidement et n'est plus que de 0.4 au bout de 3 mois.



*Illustration 31 – Piézomètre des Grandes-Loges. Corrélogramme des niveaux moyens mensuels*

- *Période de retour des niveaux moyens mensuels minimum et maximum*

Le niveau moyen mensuel minimum de période de retour "5 ans sec" (fréquence de 0.2) est de 82 m et le niveau moyen mensuel maximum de même période de retour est de 93 m (illustration 32).



*Illustration 32 - Graphique des fréquences cumulées des niveaux moyens mensuels minimum et maximum pour le piézomètre des Grandes-Loges*

• Recherche d'une relation exploitable entre niveaux et débits

L'étude de 2006 a permis d'établir, sur la période 1969-2005, une relation approximativement linéaire entre le niveau piézométrique aux Grandes-Loges au 15 avril de chaque année (période de l'année où la nappe atteint sa cote maximale) et le nombre de jours entre mai et août (période de l'année où les prélèvements agricoles dans les nappes sont les plus importants) où le débit de la Soude à Soudron est inférieur au QMNA5. Depuis 1969, en effet, il a été observé pour huit années un débit de la Soude à Soudron inférieur au QMNA5 avec un nombre de jours compris entre 1 (en 1992) et 69 (en 1976).

Année	Nombre de jour où le débit de la Soude à Soudron est inférieur au QMNA5 (entre mai et août)	Niveau piézométrique au 15 avril aux Grandes-Loges (m NGF)
1974	9	94,08
1976	69	89,90
1990	18	92,17
1991	9	93,16
1992	1	91,52
1993	29	92,55
1996	43	91,80
2005	45	88,95

La relation obtenue est la suivante (R2 non mentionné dans le rapport cité) :

$$\text{Nb max. jour } Q < \text{QMNA5 mai-août} = (-14.49 \times \text{NP Grandes-Loges 15/04}) + 1\,372$$

La droite matérialisant cette relation est reportée sur le graphique de l'illustration 33.

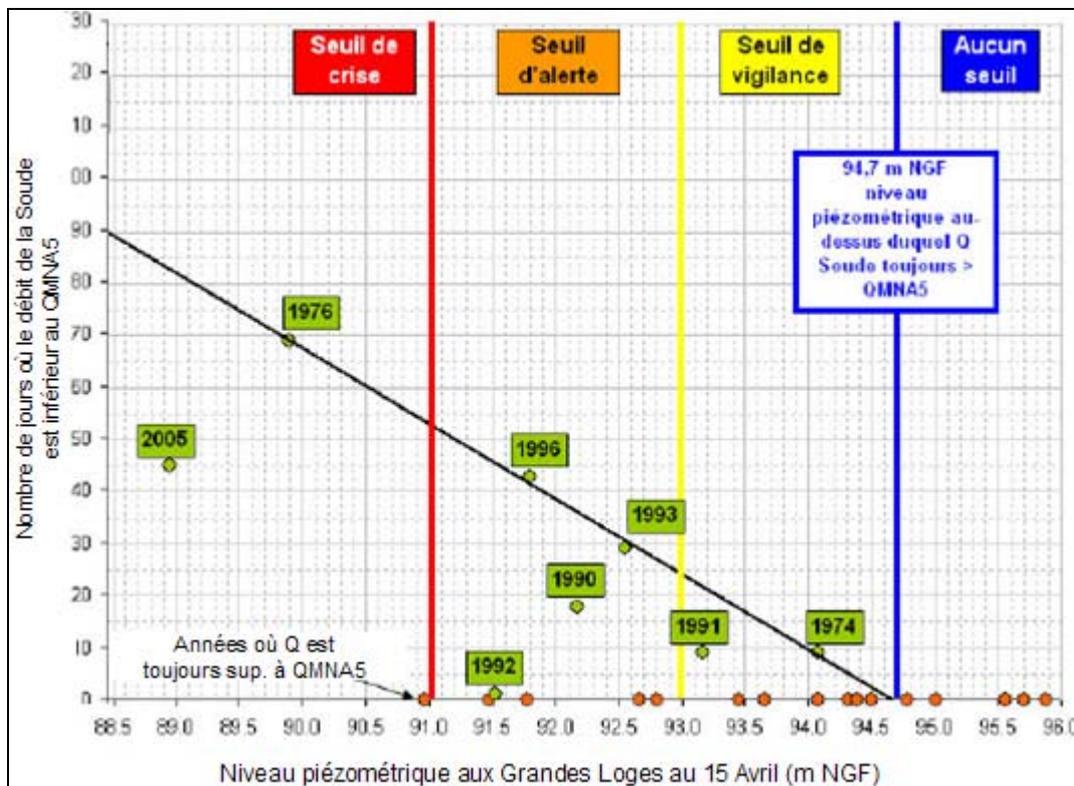


Illustration 33 - Bassin de la Somme-Soude - Définition de seuils piézométriques  
Source: rapport BRGM RP-54178-FR

D'après cette relation, quand le niveau piézométrique aux Grandes-Loges le 15 avril est supérieur à la cote 94,7 m NGF, le débit de la Soude à Soudron entre mai et août n'est jamais inférieur au QMNA5. Le risque d'assec est donc peu probable.

• *Proposition d'une règle de gestion*

L'étude de 2006 propose de retenir comme index de gestion la cote piézométrique de la nappe au Grandes-Loges le 15 avril de l'année en cours pour établir les règles de gestion au moment de la plus forte consommation en eau, c'est-à-dire de mai à août. L'instauration de trois seuils est proposée (illustration 34) :

- niveau atteignant 94,7 m NGF : seuil de vigilance
- niveau atteignant 93 m NGF: seuil d'alerte
- niveau atteignant 91 m NGF: seuil de crise

<u>Niveau piézométrique (NP) aux Grandes-Loges au 15 avril</u>	<u>Seuil</u>	<u>Préconisations</u>
NP ≥ 95	Aucun seuil	Aucune restriction
93 ≤ NP < 95	Seuil de vigilance	Les prélèvements doivent être surveillés et utilisés au plus juste
91 ≤ NP < 93	Seuil d'alerte	Des critères de priorités peuvent être instaurés pour les différents prélèvements. Ces critères doivent tenir compte des différents usages mais également être le résultat d'accords concertés entre les usagers, le seuil de crise étant le plus restrictif.
NP < 91	Seuil de crise	

Illustration 34 – Bassin de la Somme-Soude - Règle de gestion proposée

Source: rapport BRGM RP-54178-FR

• *Analyse niveaux-débits au pas de temps mensuel*

Dans le cadre de cette étude, il a été recherché, sur la période 1970-2008, une relation entre les niveaux moyens minimum de la Soude (en général en Septembre-Octobre-Novembre) et les niveaux moyens maximum au piézomètre des Grandes-Loges (en général en Mars-Avril-Mai). Le graphique établi (illustration 35) montre qu'une telle relation n'existe pas.

En revanche, ce graphique confirme, au pas de temps mensuel, le choix des différents seuils piézométriques retenus dans l'étude de 2006 :

- lorsque les niveaux mensuels maximum sont supérieurs à 95 m, la probabilité d'avoir un débit inférieur au QMNA5 est très faible (un seul cas, survenu en 2003 avec un débit moyen de la Soude de 10l/s en Octobre pour un niveau maximum de 95.6 m en Février).
- lorsque les niveaux maximum deviennent inférieurs à 93 m, la probabilité d'être sous le QMNA5 est forte.
- le seuil de crise peut être fixé à 91 m.

**Rappelons que ces seuils de gestion, tels qu'ils sont définis, correspondent à une satisfaction des usages 8 années sur 10 et ne garantissent pas**

**nécessairement le "bon état écologique" des masses d'eau, qui est un problème autre.**

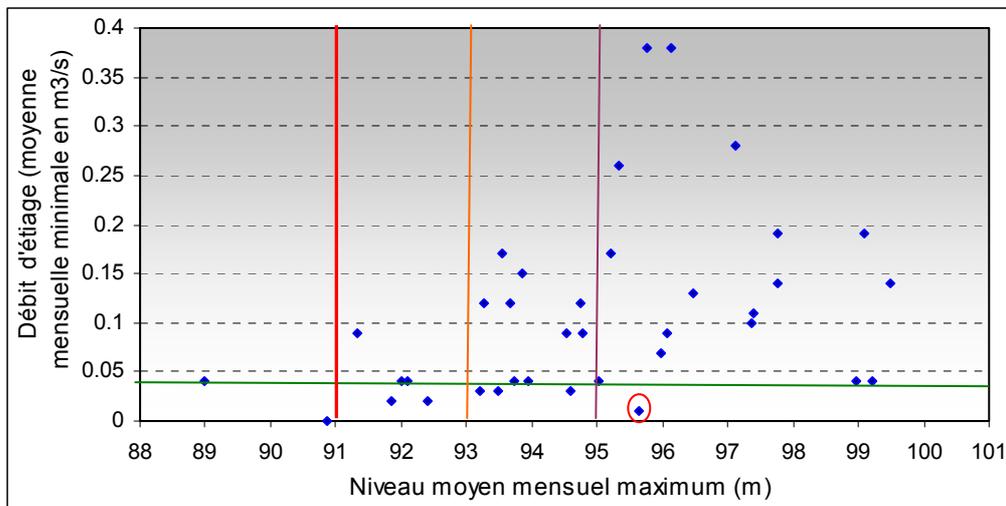


Illustration 35 – Débits d'étiage de la Soude (moyennes mensuelles) en fonction des niveaux moyens mensuels maximum au piézomètre des Grandes-Loges.

On a vu ci-dessus (illustration 32) que cette valeur du seuil d'alerte, 93 m, est en moyenne dépassée 4 années sur 5 (donc de fréquence "quinquennale sèche").

**Dans le bassin de la Soude, un niveau piézométrique mensuel maximum de période de retour 5 ans "sec" (93 m à mi-avril) permettrait de respecter un débit mensuel minimum de la Soude de même période de retour (QMNA5=0.036 m³/s).**

**Cette valeur de 93 m peut correspondre à une piézométrie objectif d'étiage (POE) ; elle représente aussi un seuil d'alerte à prendre en considération lors de la période des hautes eaux de la nappe (Mars-Avril-Mai).**

Le seuil de crise, 91 m, correspond quant à lui à un niveau de période de retour de 1 année sur 20 (d'après la fonction de répartition établie sur la période des 39 années de données disponibles, illustration 32 ci-dessus).

### 3.2.2.2. Exemple 2 : nappe de la Craie en Picardie

L'exemple choisi, traité dans le cadre de cette étude, concerne le bassin de l'Avre situé au centre de la Picardie. Le secteur amont du bassin versant, au sud, est situé en partie dans l'Oise ; la plus grande partie du bassin est néanmoins dans la Somme. Il est long de 45 km du sud-est au nord-ouest pour une largeur maximale de 50 km (illustration A17 en annexe 5).

#### • Contexte hydrogéologique

L'aquifère exploité est celui de la craie. La nappe, libre, est drainée par l'Avre et ses affluents ; elle s'écoule naturellement vers les vallées à la faveur de fissures qui sont en général plus développées dans la partie supérieure de la craie. Le fond des vallées peut ainsi être le siège d'un sous-écoulement important par l'intermédiaire des alluvions grossières qui forment un drain naturel.

#### • Niveaux de la nappe

Dans le bassin, les niveaux de la nappe de la craie sont enregistrés aux piézomètres suivants, d'amont en aval : Tilloloy (00813X0043), St-Mard (00637X0094), Damery

(00637X0093), Hangest-en-Santerre (00636X0020), Coulemelle (00803X0003) et Thennes (00624X0085).

L'évolution des niveaux piézométriques est caractérisée par des cycles annuels qui se superposent à des cycles plus longs (illustration 36). Les cycles annuels traduisent la succession des épisodes de recharge et de tarissement de la nappe.

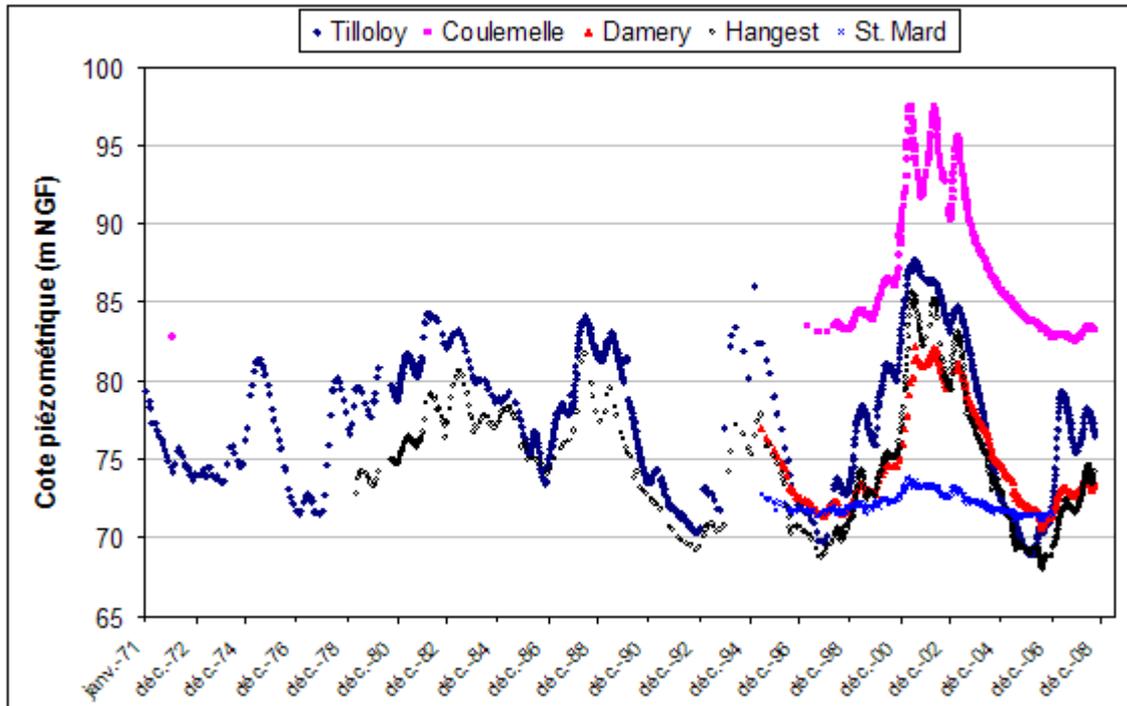


Illustration 36 – Evolution des niveaux de la nappe aux piézomètres de Tilloloy, Coulemelle, Damery, Hangest et St. Mard

L'amplitude des fluctuations est d'autant plus importante que les piézomètres sont éloignés de la rivière. Ainsi, le piézomètre de St. Mard montre une amplitude annuelle inférieure à 1 m tandis que l'amplitude annuelle sur les autres piézomètres est comprise entre 2 et 4 m.

Les niveaux ont été particulièrement bas en 2006 pour la plupart des piézomètres (à la suite d'une longue période de tarissement qui a débuté en 2003).

Les piézomètres se comportent de façon similaire. Les périodes d'étiage s'observent généralement en décembre-janvier sauf pour le piézomètre de St. Mard, situé à proximité de l'Avre, où la période d'étiage se situe vers le mois d'août.

- *Débits de l'Avre*

Le débit de l'Avre est enregistré aux stations de jaugeage de Moreuil, située à 20 km en amont de la confluence de l'Avre avec la Somme, et de St-Mard, située à 45 km en amont de la confluence et de la Somme.

Le débit annuel moyen de l'Avre à Moreuil est de 2.27 m<sup>3</sup>/s (calculé sur une période de 41 ans). Le débit objectif d'étiage (DOE) a été fixé à la valeur du **QMNA5**, soit **1 m<sup>3</sup>/s**.

Les graphiques de l'illustration 37 retracent l'évolution des niveaux de la nappe au piézomètre de Hangest et celle des débits de l'Avre à Moreuil.

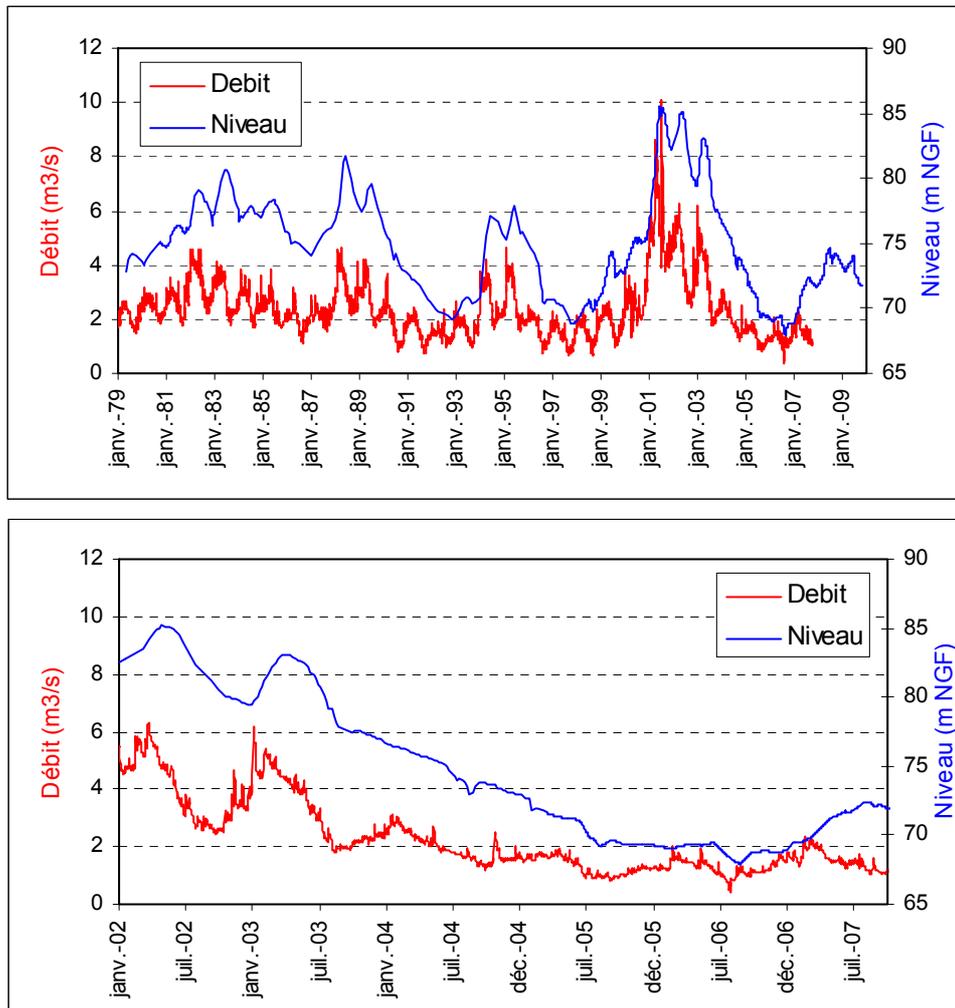


Illustration 37 – Bassin de l'Avre – Niveau de la nappe au piézomètre de Hangest et débit de l'Avre à la station de Moreuil.

• *Prélèvements*

Dans le bassin de l'Avre, la nappe de la craie est sollicitée pour:

- l'AEP: 39 forages situés pour la plupart d'entre eux dans les sous-bassins de la Noye et des Trois-Doms,
- l'irrigation : 83 forages agricoles,
- l'industrie (peu significatif) : 4 forages.

L'irrigation progresse de 1990 à 2005, représentant respectivement 27 % et 52 % du volume total prélevé. En 2005, le volume total prélevé s'établit à environ 18 millions de m<sup>3</sup>/an. Rapportés à la ressource renouvelable moyenne sur le bassin (259 Mm<sup>3</sup> pour une pluie efficace annuelle moyenne de 200 mm), ces prélèvements n'en représentent que 7 %, ce qui traduit mal la situation critique de certaines années. **Au pas de temps annuel, le rapport entre la ressource renouvelable et les prélèvements peut donc ne pas être un bon indicateur de stress hydrique.**

- *Corrélogramme des niveaux*

Au bout de 12 mois, les niveaux restent encore assez fortement corrélés entre eux (autocorrélation de 0.63), le corrélogramme reflétant plus les cycles longs que les cycles courts annuels.

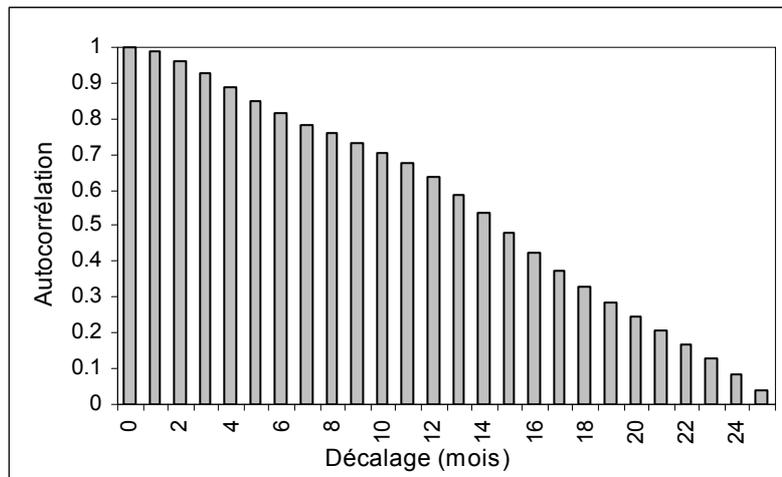


Illustration 38 - Corrélogramme des niveaux mesurés au piézomètre de Hangest (bassin de l'Avre)

- *Corrélogrammes croisés débits-niveaux*

Les corrélations les plus fortes entre débits et niveaux s'observent pour des décalages de 2 à 4 mois environ (corrélation supérieure à 0.8, illustration 39, partie droite du corrélogramme), ce qui peut s'interpréter comme la différence des temps de réaction entre la nappe et le cours d'eau suite à des épisodes pluvieux.

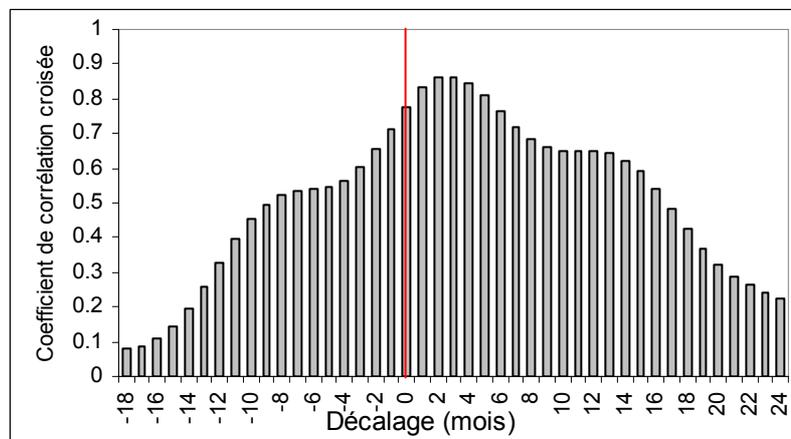


Illustration 39 - Corrélogramme croisé entre les niveaux au piézomètre de Hangest et les débits de l'Avre à Moreuil.

• *Relations débits-niveaux*

Une relation approximativement linéaire (coefficient de détermination  $R^2$  de 0.86) a pu être obtenue entre le débit d'étiage de l'Avre (mesure journalière) et le niveau de la nappe à la date d'étiage de l'Avre pour le piézomètre de Hangest (illustration 40).

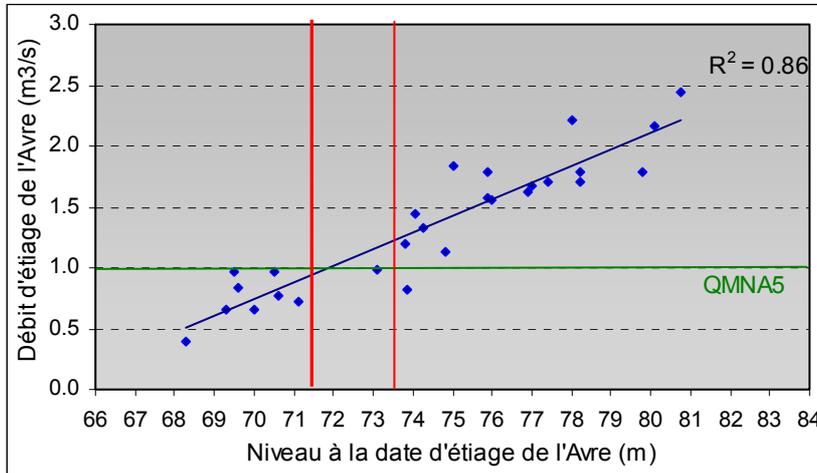


Illustration 40 - Relation entre le débit d'étiage de l'Avre et le niveau de la nappe au piézomètre de Hangest à la date d'occurrence de ce débit.

A l'examen du graphique ci-dessus, il apparaît que le débit objectif d'étiage de  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  ne sera très probablement pas respecté si les cotes piézométriques à la date d'étiage de l'Avre sont inférieures à 73,5 m.

Cette cote piézométrique peut être considérée comme un **seuil de crise** qu'il faut donc éviter d'atteindre.

*Remarque:* la cote 71.5 m peut être considérée comme un **seuil de crise renforcée**.

Le corrélogramme croisé débits–niveaux (illustration 39 ci-dessus) montre que les corrélations entre débits et niveaux sont maximales pour des décalages de 2 à 4 mois. Les débits mensuels minimum de l'Avre s'observant généralement en Août et Septembre, une relation a été recherchée entre ces débits et les niveaux de la nappe aux mois de Mai et d'Avril, 3 et 4 mois auparavant (illustrations 41 et 42).

Dans les deux cas, une relation approximativement linéaire peut être mise en évidence, meilleure avec les niveaux du mois de Mai (coefficient de détermination  $R^2 = 0.73$  contre 0.64 pour Avril).

Si l'on retient le niveau moyen du mois de Mai pour définir un seuil d'alerte, le graphique niveau-débit (illustration 42) montre que ce seuil pourrait être pris égal à 74.5 m. En retenant le mois d'Avril, où la corrélation est moindre mais qui permet une plus grande anticipation, le seuil d'alerte pourrait être pris égal à 75 m.

*Remarque*

Ces niveaux critiques n'ont pas la signification d'une piézométrie objectif d'étiage (POE) qui serait définie comme le DOE : par exemple, au piézomètre de Hangest, le niveau mensuel minimum de période de retour 5 ans "sec" est en effet de 69.5 m, soit 2 m plus bas que le seuil de crise renforcée défini ci-dessus (ce "PMNA5" calculé sur la période des 30 ans de données ne s'observe cependant pas sur la période 1979-1991, où les minima sont plus élevés que sur la période qui suit ; cet aspect de la **non stationnarité des séries** est précisé en annexe 1 ; il n'en est pas tenu compte dans cet exemple qui illustre seulement une démarche).

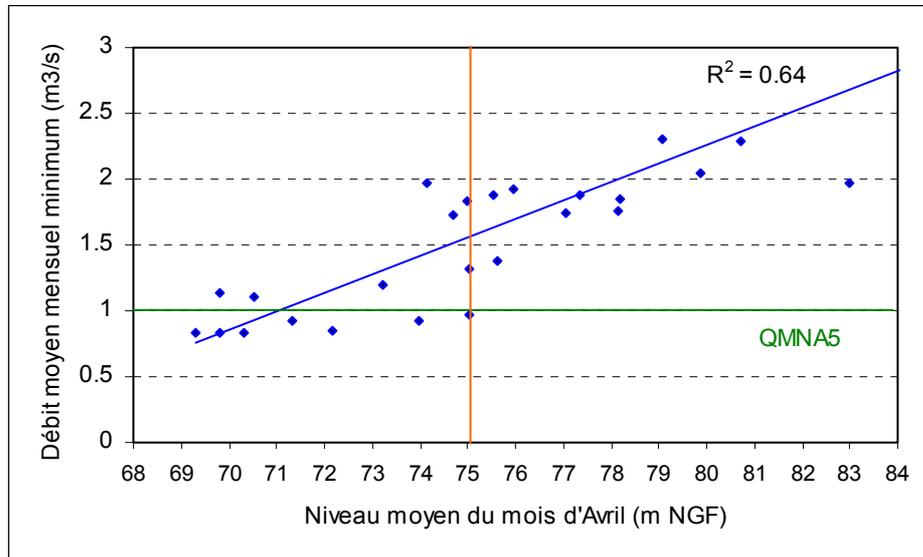


Illustration 41- Relation entre les niveaux moyens du mois d'Avril et les débits moyens mensuels minimum de l'Avre

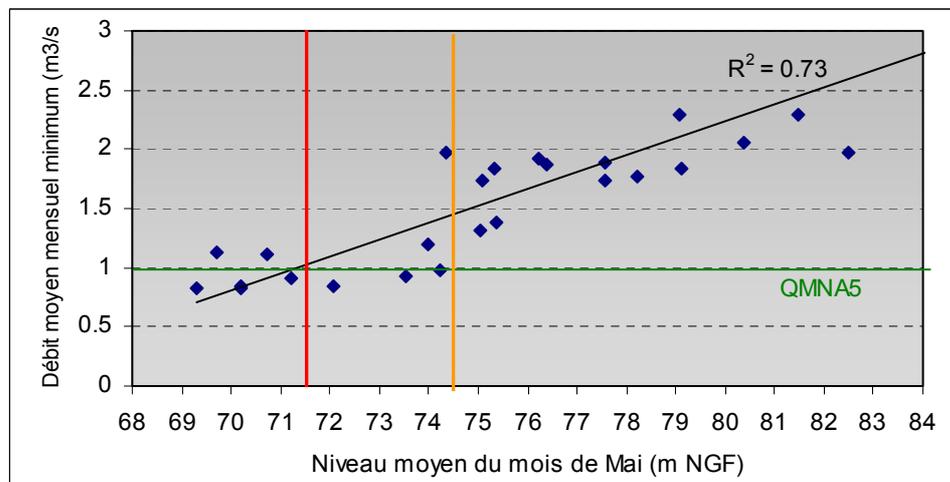
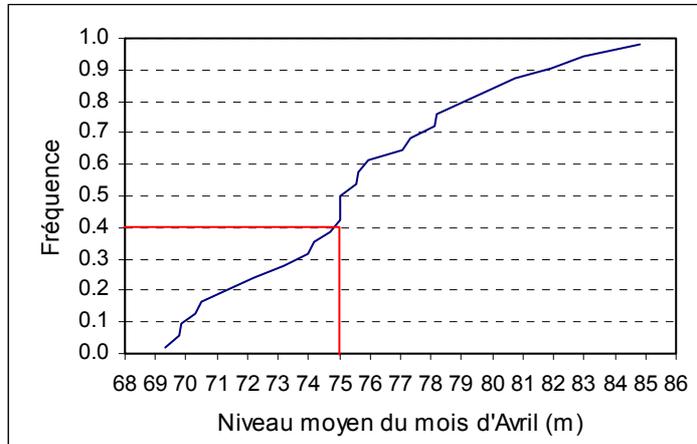


Illustration 42 – Relation entre les niveaux moyens du mois de Mai et les débits moyens mensuels minimum de l'Avre

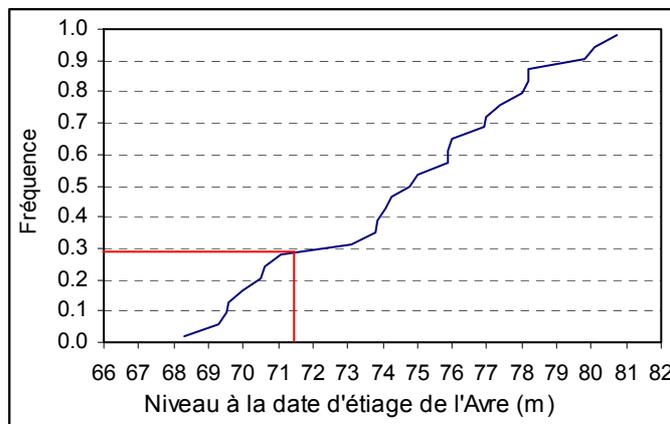
- *Période de retour du seuil d'alerte et du seuil de crise renforcée*

Pour le mois d'Avril, la lecture du diagramme des fréquences cumulées (illustration 43) montre que la fréquence de non dépassement du seuil d'alerte (75 m) est de 0.4, soit une valeur non dépassée en moyenne 2 années sur 5 (pour le mois de Mai, la fréquence de non dépassement du seuil est la même).



*Illustration 43 – Graphique des fréquences cumulées du niveau moyen au mois d'Avril pour le piézomètre de Hangest*

Quant au seuil de crise renforcée défini ci-dessus (71.5m) sa fréquence de non dépassement est en moyenne de 3 années sur 10 (illustration 44).



*Illustration 44 - Graphique des fréquences cumulées du niveau à la date d'étiage de l'Avre pour le piézomètre de Hangest*

Dans le bassin de l'Avre, un niveau piézométrique moyen du mois d'Avril égal à 75 m, non dépassé 2 années sur 5 (période de retour de 2.5 ans en moyenne), permettrait de respecter le QMNA5 de l'Avre (la contrainte est donc plus forte sur la nappe).

Ce seuil d'alerte pourrait aussi correspondre à une piézométrie objectif d'étiage (POE).

**Comme dans les exemples qui précèdent, ces seuils correspondent à une satisfaction des usages 8 années sur 10 et ne garantissent pas nécessairement le "bon état écologique" des masses d'eau.**

### 3.2.2.3. Bassin de l'Eyre en Aquitaine (nappe du Plio-quaternaire)

Ce bassin (illustration 45) est suivi depuis 2002 dans le cadre des études du Contrat de Plan Etat-Région : rapports BRGM RP-52912-FR (2003), RP-53658-FR (2005), et RP-55241-FR (2006). Une actualisation a été faite en 2009 (rapport à paraître). On résume ci-dessous la démarche de l'étude.

#### • Contexte hydrogéologique

L'aquifère est constitué par un ensemble de formations sableuses ou graveleuses évoluant verticalement et latéralement (d'âge Miocène à Pléistocène) avec intercalations de niveaux argileux. Ces formations sont recouvertes par le manteau sableux du "Sable des Landes", se décomposant lui-même en une partie basale de sables fins blanchâtres fluviatiles et une partie supérieure de sables jaunâtres éolisés, reprise des formations précédentes. La puissance de l'ensemble varie d'une dizaine à une trentaine de mètres dans la partie est du bassin, et d'une manière générale, vers l'ouest, s'épaissit pour atteindre une quarantaine de mètres.

La nappe est drainée par l'Eyre.

Contrairement au cas précédent, il n'a pas été possible d'établir une relation bien nette entre niveaux de la nappe et débits du cours d'eau **à différentes périodes**, malgré un bon coefficient de corrélation croisé (indicateur **global** de corrélation qui renseigne aussi sur le décalage temporel entre recharge de la nappe et débit à l'exutoire, cf illustration 49).

#### • Niveaux

Deux séries de données piézométriques sont disponibles aux forages *Pirac* (08502X0104/F), situé sur la commune de *Mios*, et *Boutox* (08744X0005/PZE) sur la commune de Belin-Beliet (illustration 46).

Les niveaux évoluent suivant un cycle annuel, traduisant la succession d'épisodes de recharge et de tarissement de la nappe (illustration 47).

Au piézomètre du Pirac, sur la chronique de 20 ans, les niveaux fluctuent entre 8 et 9.5 m NGF.

Au piézomètre de Boutox, sur la chronique de 14 ans, les niveaux fluctuent entre 37.5 et 40.5 m NGF.

#### • Débits

Les débits de l'Eyre sont mesurés à la station hydrométrique de Salles, mise en service en 1967 et exploitée par la DIREN Aquitaine depuis 1990 (superficie du bassin versant : 1 650 km<sup>2</sup>).

Les données utilisées ci-dessous proviennent de la Banque nationale de données pour l'hydrométrie et l'hydrologie ("Banque Hydro" : <http://hydro.rnde.tm.fr>).

L'évolution des débits de 1989 à juin 2009 est présentée par l'illustration 47 au pas de temps journalier.

Les statistiques réalisées sur les valeurs moyennes annuelles des 20 années de mesure permettent de déduire les valeurs caractéristiques suivantes :

- débit moyen annuel : 17,2 m<sup>3</sup>/s (lame d'eau : 329 mm) ;
- débit moyen d'une année quinquennale sèche (période de retour 5 ans) : 13 m<sup>3</sup>/s ;
- débit moyen d'une année quinquennale humide : 21 m<sup>3</sup>/s.
- débit moyen mensuel correspondant au **QMNA5** : **5,4 m<sup>3</sup>/s**
- débit moyen journalier correspondant au VCN<sub>10</sub> quinquennal : 5,1 m<sup>3</sup>/s

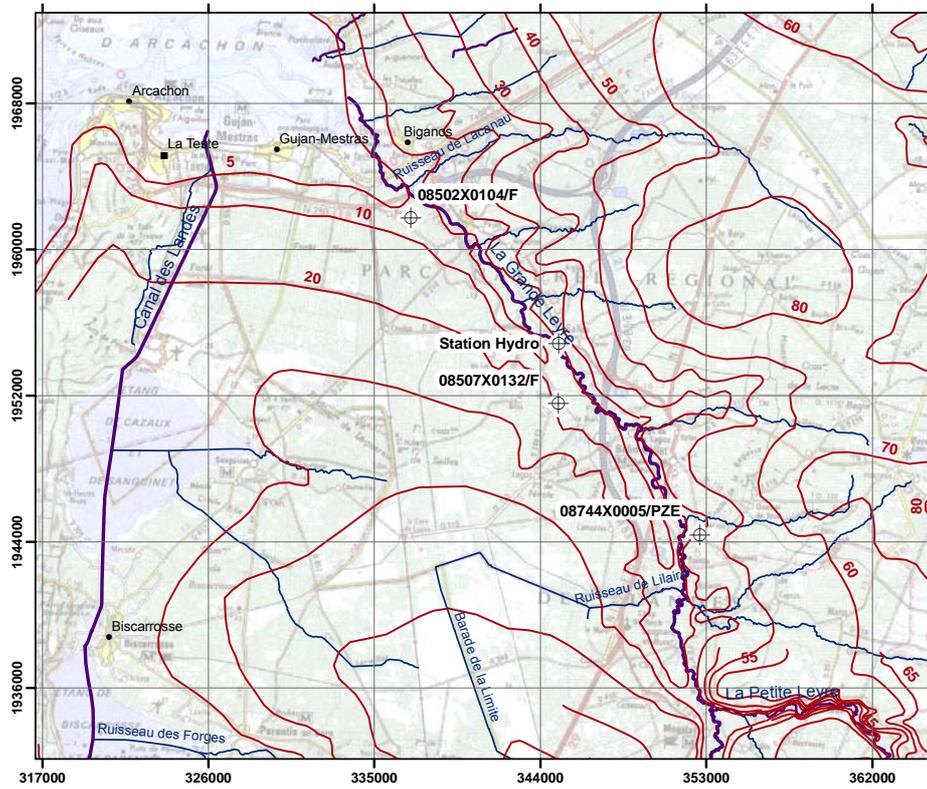


Illustration 45 – Carte piézométrique de la nappe du Plio-Quaternaire dans le secteur du bassin versant de l'Eyre et localisation des piézomètres

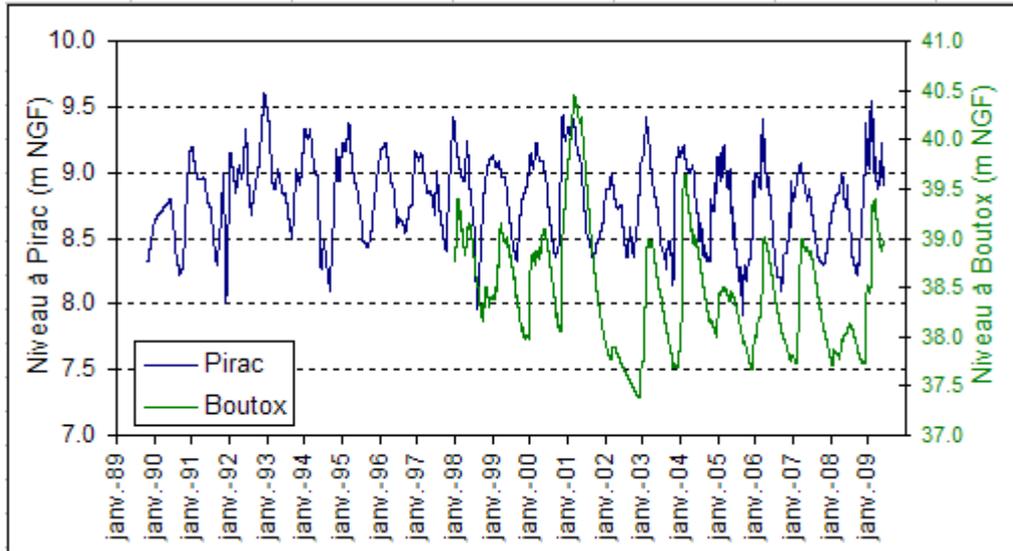


Illustration 46 - Evolution des niveaux de la nappe aux piézomètres de Boutox (08744X0005/PZE) et de Pirac(08502X0104/F)

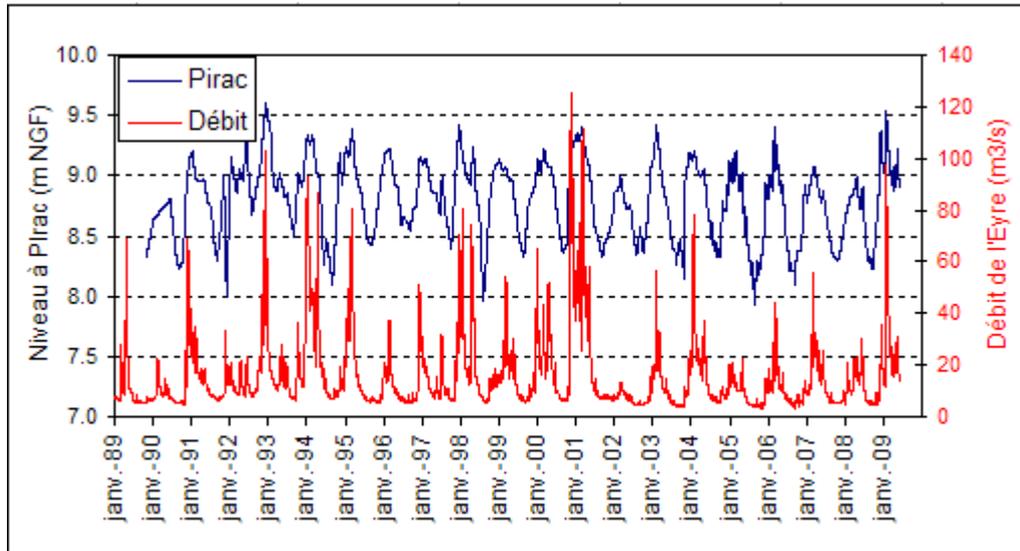


Illustration 47 - Evolution des débits de l'Eyre et mise en relation avec les niveaux mesurés au piézomètre de Pirac sur la période 1989-2009.

• *Prélèvements*

Les prélèvements sont essentiellement destinés à l'irrigation, donc saisonniers. Dans le bassin, les données disponibles concernent 176 forages agricoles ; pour les années 2004, 2005 et 2006, ils s'élevaient respectivement à 4.19, 5.70 et 4.74 millions de m<sup>3</sup>. Les prélèvements autorisés pour l'année 2008 sont aussi fournis (7.76 millions de m<sup>3</sup>).

• *Corrélogramme des niveaux*

Le corrélogramme (illustration 48) tracé à partir des moyennes mensuelles des niveaux au piézomètre de Pirac montre que l'autocorrélation (significative) est de l'ordre de 1 à 1.5 mois. A 2 mois, l'autocorrélation devient inférieure à 0.5. La décroissance des niveaux est donc rapide.

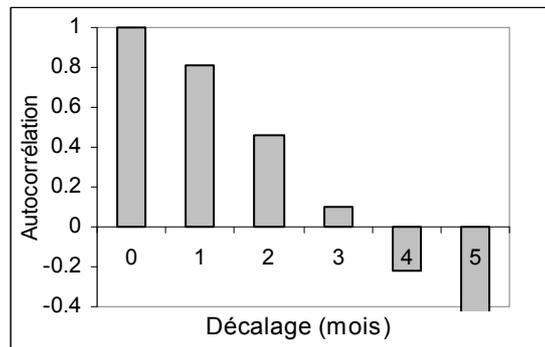


Illustration 48 – Bassin de l'Eyre – Corrélogramme des niveaux de la nappe mesurés au piézomètre de Pirac

• *Corrélogramme croisé débits-niveaux*

La corrélation temporelle entre niveaux et débits est forte (illustration 49) : nappe et cours d'eau réagissent rapidement aux précipitations et de façon presque synchrone ; le déphasage est inférieur au mois (ce que montre aussi l'illustration 47 ci-dessus superposant niveaux et débits).

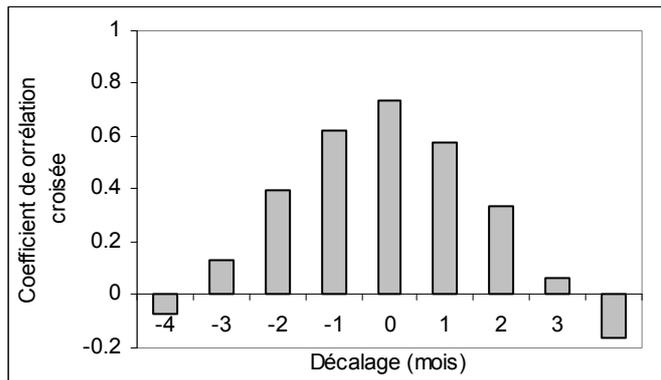


Illustration 49 - Bassin de l'Eyre – Corrélogramme croisé des niveaux de la nappe mesurés au piézomètre de Pirac et des débits de l'Eyre

- *Recherche d'une relation entre les débits de l'Eyre et les niveaux de la nappe*

Les débits les plus faibles de l'Eyre s'observent très généralement en Août ou Septembre. Différents essais de mise en relation entre débits et niveaux ont été réalisés, en valeurs moyennes mensuelles comme en valeurs journalières et en introduisant des décalages de 1, 2 ou 3 mois entre niveaux et débits.

L'illustration 50 montre un essai (pour lequel le coefficient de détermination  $R^2$  n'est pas trop mauvais) entre les débits moyens mensuels les plus bas et les niveaux moyens du mois de Mai.

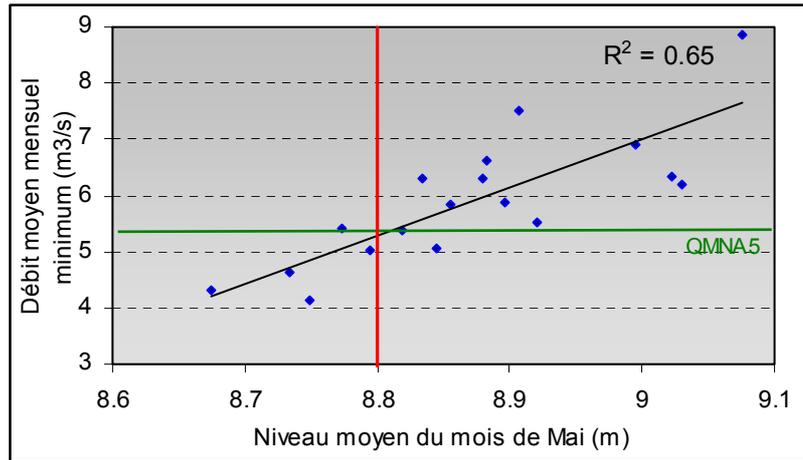


Illustration 50 – Débit moyen mensuel minimum de l'Eyre à Salles et niveau moyen du mois de Mai au piézomètre de Pirac

- *Périodes de retour des niveaux*

La distribution des fréquences cumulées (fonction de répartition) pour les niveaux moyens du mois de Mai au piézomètre de Pirac est présentée à l'illustration 51.

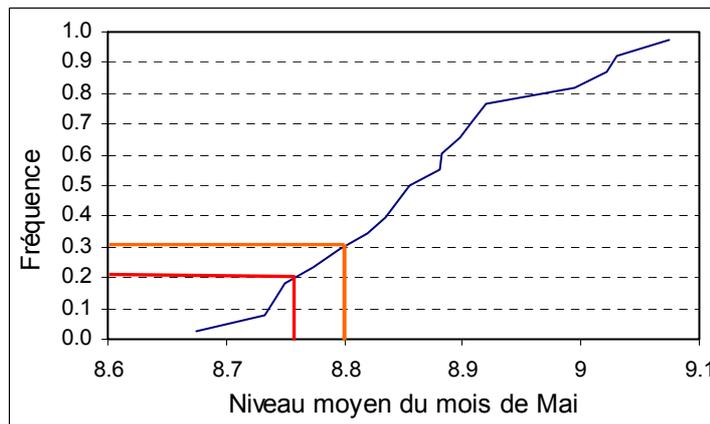


Illustration 51 - Fréquence cumulée du niveau moyen du mois de Mai au piézomètre de Pirac

A Pirac, le niveau qui permettrait de respecter le QMNA5 de l'Eyre est de fréquence 0.3 (non dépassé 3 années sur 10, soit une période de retour de 3.3 ans en moyenne), sa valeur étant de 8.8 m, niveau moyen du mois de Mai.

Remarque

A Pirac, le niveau mensuel minimum de période de retour 5 ans (« 5 ans sec») est d'environ 8.2 m (illustration 52).

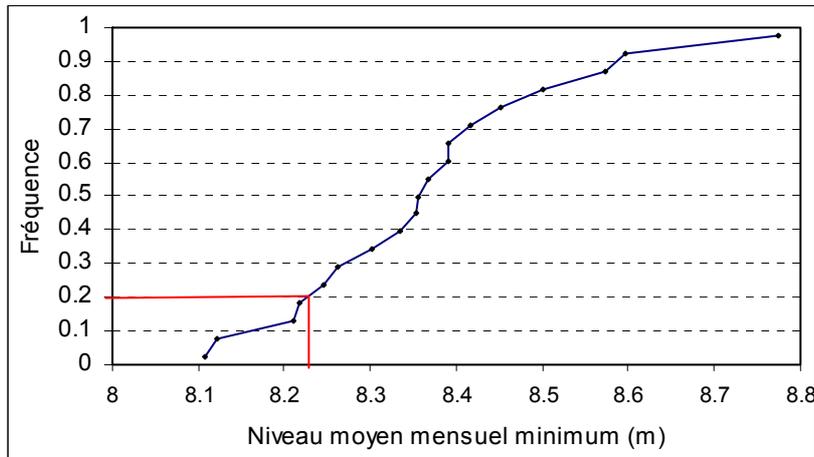


Illustration 52 – Fréquence cumulée des niveaux moyens mensuels minimum au piézomètre de Pirac

• *Conclusion*

**Compte tenu de la corrélation assez faible entre niveaux et débits, il serait pénalisant (pour l'exploitation de la nappe) de considérer une piézométrie objectif d'étiage de fréquence 0.3 (à respecter 7 années sur 10), la nappe n'étant pas particulièrement soumise à forte pression. De plus, la différence est très faible entre cette valeur de fréquence 0.3 et celle de fréquence 0.2 (8.75m) qui pourrait alors être choisie non comme POE mais comme seuil d'alerte.**

Cet exemple, illustre les difficultés que l'on peut rencontrer dans la recherche d'un indicateur piézométrique:

- il n'existe pas de corrélation simple et directement utilisable entre le débit d'étiage du cours d'eau et les niveaux piézométriques de la nappe, qui fluctuent d'ailleurs assez faiblement (la source de l'Eyre pourrait être soutenue à l'étiage par la nappe de l'Oligocène, sous-jacente à la nappe du Plio-quatenaire) ;
- l'absence de données précises sur l'évolution des prélèvements entre 1998 et 2009 ne permet pas d'évaluer leur impact sur le fonctionnement de l'hydrosystème.

Dans le cadre des Contrats de Plan entre l'Etat et la Région Aquitaine (Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine), le bassin de l'Eyre fait l'objet d'un suivi régulier depuis 2002. En année 5 du Contrat 2002-2006, une étude hydro-climatique poussée a été faite sur ce bassin (Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine – Piézométries d'objectif d'étiage et de crise – Module 3 – Année 5. Rapport BRGM 2010). De plus, une modélisation globale pluies-niveaux-débits a été réalisée (piézomètres de Pirac et Boutox).

Cette étude, menée indépendamment des aspects traités ci-dessus, conclut aussi à la mise en place non pas d'une piézométrie objectif d'étiage mais d'une **piézométrie d'alerte de période de retour 5 ans "sec"** et d'une **piézométrie de crise de période de retour 20 ans "sec"** en choisissant le piézomètre de Boutox pour le suivi de la nappe (sur la base des modélisations effectuées).

Elle propose aussi de confirmer le dépassement des quantiles de référence (5ans "sec" et 10 ans "sec") sur deux mois consécutifs à partir de Février avant d'enclencher un processus décisionnel.

#### 3.2.2.4. Karst de La Rochefoucauld en Poitou-Charentes

Cet exemple illustre un **mode de gestion de système karstique associant les débits à l'exutoire du système et les niveaux d'un piézomètre**. Ce mode de gestion est décrit dans "*Le karst de la Rochefoucauld. Un exemple de gestion prévisionnelle d'un aquifère karstique*" (B. de Grissac, M. Laroque, M. Razack ) - in "*Pour une gestion active des ressources en eau d'origine karstique*". Séminaire national 27,28 et 29 novembre 1996 - Montpellier. Rapport BRGM R 40126 - Juillet 1998.

Le réseau karstique de La Rochefoucauld, situé dans le département de la Charente, s'est développé dans des calcaires d'âge Jurassique moyen à supérieur, depuis l'étage Aalénien jusqu'à la base du Kimméridgien inférieur. L'exutoire principal de ce système est constitué de 3 émergences contiguës : Le Bouillant, Le Dormant, et La Font de Lussac, constituant la source de la Touvre. Le débit moyen de ces trois résurgences varie de 12 à 15 m<sup>3</sup>/s.

La Touvre est, en débit, la deuxième résurgence de France après la "Fontaine de Vaucluse". Elle alimente en eau potable l'agglomération d'Angoulême et contribue de manière importante au débit de la Charente.

La gestion de cette ressource importante repose sur une équation permettant d'estimer le débit de la Touvre en fin d'étiage à partir des niveaux enregistrés sur un piézomètre de référence (piézomètre F1 de la Rochefoucauld). La méthode utilisée est la suivante :

- 1) une courbe de décroissance théorique des niveaux, non influencée par des précipitations, a été ajustée sur les niveaux relevés au piézomètre (une courbe polynômiale de degré 3); cette courbe, ne prenant pas en compte l'influence possible de précipitations, correspond donc à une situation pessimiste, que toute recharge survenant ne pourra qu'améliorer (option sécuritaire);
- 2) une analyse statistique croisée des niveaux mesurés au piézomètre de référence et des débits de la Touvre, a permis de construire une équation permettant l'estimation d'un débit minimal à partir du niveau piézométrique (régression linéaire).
- 3) à partir des niveaux observés la première quinzaine de juin (au 15/06), une prévision des niveaux fin septembre (30/09) est émise à partir de la courbe de décroissance théorique de l'étape 1. L'équation de régression niveau-débit permet ensuite d'établir une prévision du débit théorique de la Touvre au 30/09.

En fonction des valeurs du débit prévu, la gestion prévisionnelle mise en place comprend 4 seuils d'alerte : le seuil d'alerte 1 déclenche une information sur la situation, les 3 autres conduisent à des restrictions progressives de l'irrigation.

### 3.2.3. Ajustement de lois de probabilité

La méthode est intéressante si l'on souhaite estimer un événement dont la période de retour  $T$  excède le nombre d'années de mesures  $n$  disponible, par exemple  $T=50$  ans à partir de  $n=30$  ou  $T=20$  ans à partir de  $n=15$  (ce qui, dans ce dernier cas, est néanmoins un peu court). En pratique, il est recommandé de ne pas rechercher un quantile dont la probabilité d'apparition corresponde à une période de retour supérieure au triple de la longueur de l'échantillon (qui doit être néanmoins suffisante pour bien "caler" la loi de probabilité).

Deuxième intérêt, **elle fournit un intervalle de confiance** encadrant la valeur estimée pour une période de retour donnée.

On choisit un modèle fréquentiel (une loi de probabilité) que l'on tente d'ajuster au mieux sur la série de données étudiée. Si le choix du modèle est bien fondé, il devient alors possible d'émettre des prédictions à partir de ce modèle fréquentiel.

Une fois le modèle retenu, les incertitudes sur les prévisions, inhérentes à une démarche probabiliste, peuvent être évaluées par l'intermédiaire d'intervalles de confiance que l'on reporte sur le graphique fréquence-valeurs sous la forme de "courbes enveloppes" encadrant la courbe théorique représentant le modèle fréquentiel.

Cet intervalle, qui se calcule à un certain seuil de confiance, par exemple 95 %, doit être interprété comme l'intervalle qui doit contenir, avec une probabilité correspondant au seuil de confiance, la "vraie" valeur (inconnue) à prédire.

Une telle démarche probabiliste nécessite plusieurs étapes décrites en annexe 1. On présente ci-dessous un exemple correspondant aux niveaux de la nappe des Calcaires de Champigny mesurée au piézomètre de St Martin-Chennetron (illustration 53 et tableaux 2 et 3).

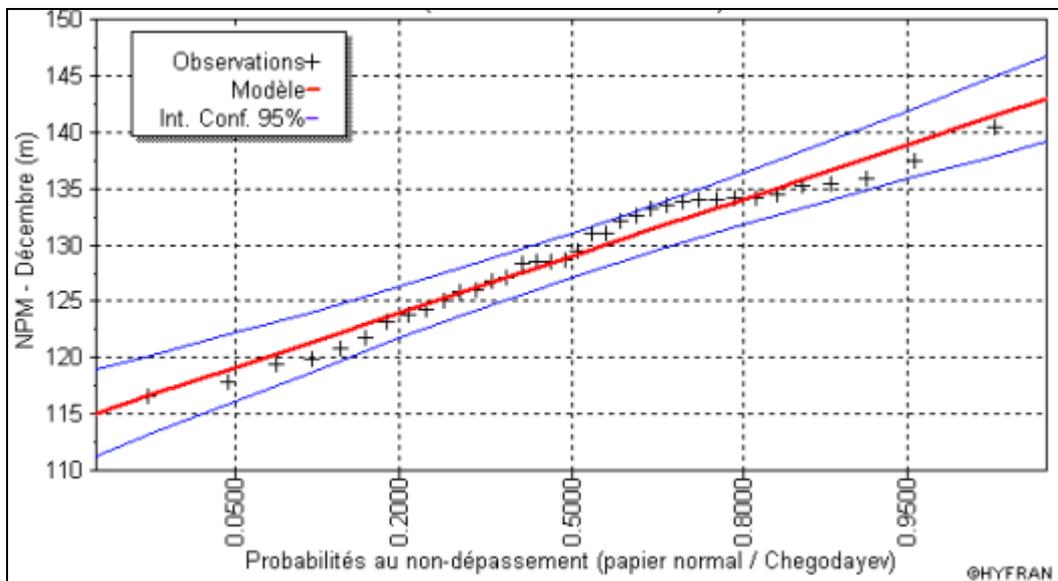


Illustration 53 - Piézomètre de Saint-Martin-Chennetron : ajustement à une loi normale des niveaux piézométriques mensuels de décembre ("basses eaux") - Période 1969-2004

Exemple de résultats

Période de retour en années		Fréquence au non dépassement	Borne inférieure de l'intervalle de confiance à 95%	Valeur médiane	Borne supérieure de l'intervalle de confiance à 95%
Années Humide	100	0.990	139.13	142.94	146.74
	50	0.980	137.82	141.31	144.79
	20	0.950	135.83	138.86	141.88
	10	0.900	134.03	136.68	139.34
	5	0.800	131.76	134.05	136.33
	3	0.667	129.54	131.59	133.63
	2	<b>0.500</b>	<b>127.06</b>	<b>129.01</b>	<b>130.97</b>
Années Sèches	3	0.300	123.79	125.88	127.96
	5	0.200	121.69	123.98	126.26
	10	0.100	118.68	121.34	124.00
	20	0.050	116.14	119.16	122.19
	50	0.020	113.24	116.72	120.20
	100	0.010	111.28	115.09	118.89

Tableau 2 - Piézomètre de St Martin Chennetron - Ajustement fréquentiel à une loi normale des cotes piézométriques de décembre. Bornes de l'intervalle de confiance à 95% et valeur médiane

Période de retour en années		Fréquence au non dépassement	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Années Humides	100	0.990	146.70	145.99	145.23	144.41	143.61	143.03	142.94
	50	0.980	144.95	144.29	143.56	142.77	141.99	141.42	141.31
	20	0.950	142.34	141.74	141.06	140.31	139.56	139.00	138.86
	10	0.900	140.02	139.48	138.83	138.12	137.40	136.85	136.68
	5	0.800	137.21	136.73	136.14	135.48	134.79	134.25	134.05
	3	0.667	134.59	134.17	133.62	133.00	132.35	131.82	131.59
	2	<b>0.500</b>	<b>131.84</b>	<b>131.48</b>	<b>130.99</b>	<b>130.41</b>	<b>129.79</b>	<b>129.27</b>	<b>129.01</b>
Années Sèches	3	0.300	128.49	128.21	127.78	127.26	126.68	126.17	125.88
	5	0.200	126.47	126.23	125.83	125.35	124.79	124.30	123.98
	10	0.100	123.65	123.49	123.14	122.70	122.18	121.69	121.34
	20	0.050	121.33	121.22	120.91	120.52	120.02	119.54	119.16
	50	0.020	118.72	118.67	118.41	118.06	117.59	117.12	116.72
	100	0.010	116.98	116.97	116.74	116.42	115.97	115.51	115.09

Tableau 3- Piézomètre de St Martin Chennetron - Ajustement fréquentiel à une loi normale des cotes piézométriques pour les mois de Juin à Décembre

Source des 2 illustrations : rapport BRGM/RP-54221-FR (2005)

### 3.3. UTILISATION D'UN MODÈLE GLOBAL

Les modèles globaux peuvent être de type "conceptuel" (hydrosystème simulé par un assemblage de réservoirs) ou de type "boîte noire" (hydrosystème simulé par des fonctions de transfert). L'hydrosystème modélisé est un bassin versant (avec comme hypothèse que le bassin souterrain coïncide approximativement avec le bassin versant, ce qui n'est pas toujours le cas).

Un modèle global peut venir en complément de l'analyse historique présentée ci-dessus. Il peut :

- apporter une aide dans la compréhension du fonctionnement hydrodynamique du bassin étudié ;
- fournir un bilan des flux à chaque pas de temps de la modélisation (avec un calcul des pluies efficaces ; exemple au § 3.3.2) ;
- être utilisé pour reconstituer des lacunes dans la série de niveaux ou de débits ;
- être utilisé pour émettre des prévisions de niveaux ou de débits. Dans ce cas, il est en effet intéressant d'avoir la probabilité que le seuil de crise soit atteint (exemples au § 3.3.3.2) lorsque le seuil d'alerte est franchi (en supposant que rien ne change dans l'intervalle).

#### 3.3.1. Données, calage et résultats

Les données nécessaires pour la mise en œuvre de ces modèles sont :

- des séries de pluie et d'évapotranspiration,
- une ou des séries d'observations, débits et/ou niveaux, non nécessairement continues, mais pour une période recouvrant les séries précédentes. Ces observations sont utilisées pour le calage du modèle.

Ces modèles fonctionnent avec quelques paramètres : à partir de valeurs initiales fournies par l'utilisateur, le logiciel fait varier ces paramètres (dans une gamme de valeurs définie par l'utilisateur) et recherche, par un algorithme d'optimisation, un jeu de valeurs permettant d'obtenir les résultats les plus proches possibles de la série d'observations.

Après calage, on obtient :

- les valeurs simulées et une représentation graphique permettant de les comparer aux observations ;
- un critère numérique d'évaluation de la qualité de l'ajustement ;
- un bilan hydrologique avec les différentes composantes de l'écoulement : évapotranspiration réelle, ruissellement, infiltration, plus éventuellement les flux souterrains quittant l'emprise du bassin versant.

*Remarque : il faut être prudent dans l'interprétation du bilan, dont on ne peut pas toujours garantir que la décomposition en différents flux soit unique.*

Après calage, il est aussi possible d'émettre des prévisions niveaux/débits en introduisant des scénarios climatiques (pluies, ETP) et en effectuant des statistiques. pour obtenir une évaluation probabiliste des niveaux (ou des débits).

### 3.3.2. Exemple 1- Bassin versant de la Barbuise (Aube).

L'exemple présenté ci-après concerne le bassin versant de la Barbuise (rapport BRGM RP-53178-FR, 2004). Ce bassin versant, d'une superficie de 187 km<sup>2</sup> à la station hydrométrique de Pouan-les-Vallées (illustration 54), est situé dans le département de l'Aube à l'intérieur d'un triangle limité au Nord par l'Aube, au Sud-Ouest par la Seine et au Sud-Est par la limite d'extension Sud de la Craie (illustration A18 en annexe 5).

L'approche menée ici complète l'étude 2004 (**avec des données actualisées jusqu'en 2009**) en suivant la méthodologie utilisée dans les exemples précédents.

Des indicateurs piézométriques ont été définis à partir de la mise en relation des niveaux et des débits comme présenté ci-dessus, mais cette approche a été couplée ici à une analyse des pluies efficaces fournies par le modèle global pluies-débits mis en œuvre dans l'étude 2004.

- *Contexte hydrogéologique*

Le bassin s'étend en totalité sur les formations affleurantes de la craie séno-turonienne qui constitue le réservoir aquifère le plus important de la région Champagne-Ardenne. Le substratum de la nappe est théoriquement le Turonien moyen, représenté par une craie marneuse qui constitue le mur de l'aquifère généralement situé à une profondeur moyenne de 25 m. Cette profondeur peut atteindre 30 à 40 m dans les secteurs les plus altérés. Ce substratum est caractérisé également par l'apparition de niveaux crayeux peu ou non fissurés.

La nappe est libre sur la zone d'étude et les écoulements souterrains convergent vers les vallées. La nappe de la craie fournit donc la plus grande part des débits des rivières, dont elle régularise dans une large mesure le régime ; elle alimente également pour l'essentiel les aquifères alluviaux.

- *Débits*

Les débits de la Barbuise sont mesurés à la station de Pouan-les-Vallées gérée par la DIREN Champagne-Ardenne depuis 1970. Cette rivière a connu de nombreuses périodes d'assecs ou de débits très faibles (inférieurs à 10 l/s en moyenne mensuelle). Ces situations ont été observées au cours de périodes particulièrement sèches : été 1976, et périodes de sécheresse 1990, 1991, 1996, 2005.

L'évolution des débits moyens mensuels de Septembre 1970 à Août 2007 est présentée par l'illustration 55.

Le tableau 4 ci-dessous fournit quelques valeurs caractéristiques des débits de basses eaux.

Fréquence	VCN3 (m3/s)	VCN10 (m3/s)	QMNA (m3/s)
biennale	0.200 [0.140 ; 0.270]	0.210 [0.150 ; 0.280]	0.240 [0.170 ; 0.310]
quinquennale sèche	0.011 [0.000 ; 0.080]	0.015 [0.000 ; 0.086]	0.026 [0.000 ; 0.100]

Les valeurs entre crochets représentent les bornes de l'intervalle de confiance dans lequel la valeur exacte du paramètre estimé a 95% de chance de se trouver

Tableau 4 – Probabilité de non dépassement de débits de la Barbuise en basses eaux (ajustement d'une loi de Gauss) - Données calculées sur 38 ans

Source: Banque Hydro



Illustration 54 - Localisation des piézomètres et des stations de jaugeage  
Source: rapport BRGM RP-53178-FR (2004)

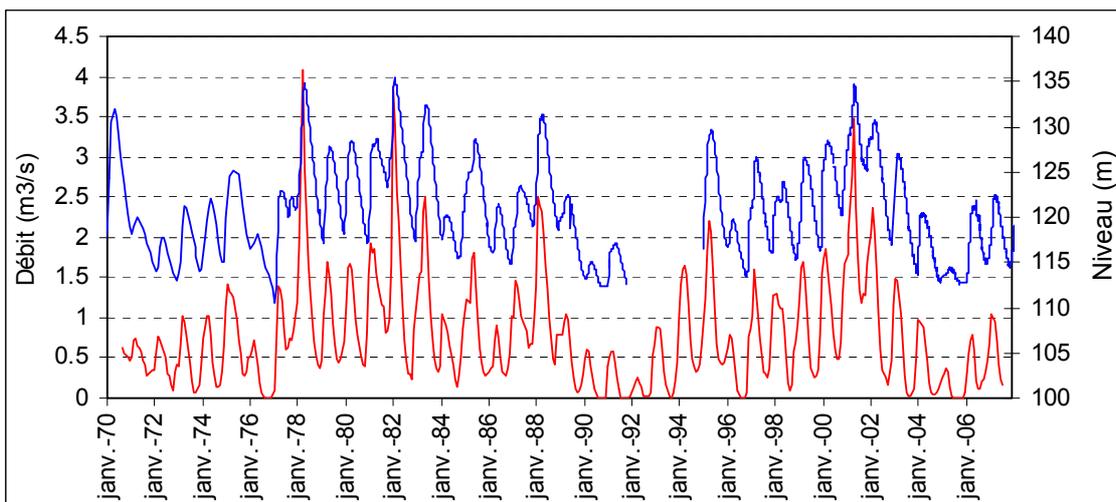


Illustration 55 - Débit de la Barbuise à Pouan-les-Vallées (courbe rouge) et niveaux de la nappe au piézomètre de Vailly (courbe bleue)

• *Niveaux*

Il existe 3 piézomètres dans le voisinage de la zone d'étude (illustration 54 ci-dessus):

- 02628X0005 (Nogent-sur-Aube, nappe des alluvions de l'Aube),
- 02621X0009 (Rhèges-Bessy, nappe des alluvions de l'Aube),
- 02982X0013 (Vailly, nappe de la craie).

Les piézomètres de Nogent-sur-Aube et de Rhèges-Bessy captent les alluvions de l'Aube. Ils sont peu représentatifs de la situation hydrogéologique de la nappe de la craie dans le bassin versant de la Barbuise.

Le piézomètre de Vailly, est situé à l'extérieur du bassin versant de la Barbuise mais est bien représentatif de l'état de la nappe de la craie dans le secteur étudié. L'évolution des niveaux enregistrés sur ce piézomètre est présentée en illustration 55 ci-dessus (superposée à celle des débits).

• *Modélisation*

Une modélisation globale pluies-débits et pluies-niveaux a été réalisée au pas de temps mensuel avec le logiciel Gardénia du BRGM.

Cette modélisation a permis d'obtenir les pluies efficaces sur le bassin versant (illustration 56).

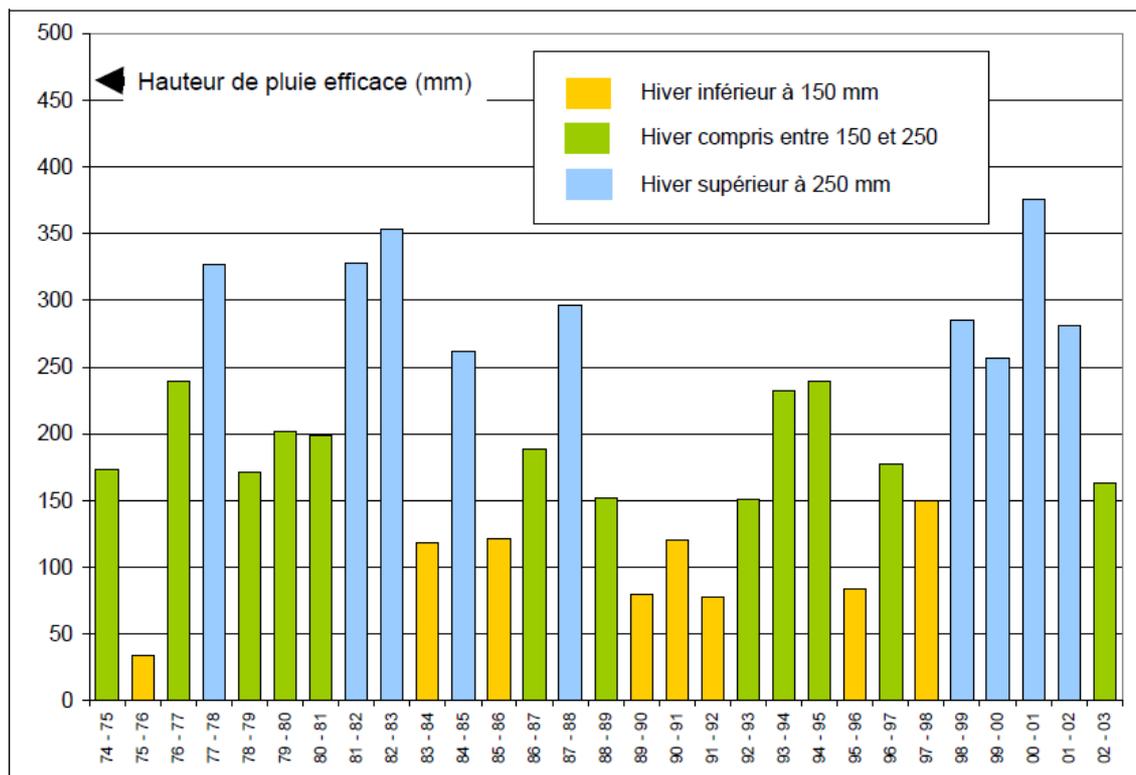


Illustration 56 – Pluies efficaces (année hydrologique) calculées avec un modèle pluies-débits. Source: rapport BRGM RP-53178-FR (2004)

• *Pluies efficaces et débits, pluies efficaces et niveaux*

Il n'y a pas de relation nette entre pluies efficaces (calculées par année hydrologique) et débits moyens mensuels minimum de la Barbuise (en général sur la période Août, Septembre, Octobre). L'illustration 57 montre tout au plus:

- que la probabilité d'avoir un assec est forte pour des pluies efficaces inférieures à 125 mm (valeur non dépassée 2 années sur 10, illustration 58),
- que la probabilité d'avoir des débits très faibles est importante pour des pluies efficaces inférieures à 150 mm (valeur non dépassée 3 années sur 10).

Il n'y a pas non plus de relation nette entre les pluies efficaces et les niveaux maximum de la nappe en Avril-Mai (illustration 59).

Pour des pluies efficaces inférieures à 125 mm, les niveaux de la nappe en Avril-Mai seront très probablement inférieurs à la cote 120 m ou voisins de cette cote (non dépassée 2 années sur 10, illustration 60) et pour des pluies efficaces inférieures à 150 mm, ces niveaux seront très probablement inférieurs à la cote 123 m (non dépassée 4 années sur 10, illustration 60).

• *Niveaux et débits*

Le graphique mettant en relation les niveaux maximum de la nappe en Avril-Mai et les débits moyens mensuels minimum de la Barbuise (illustration 61) fait clairement apparaître la cote 120 m comme un seuil critique qui, s'il était franchi en Avril-Mai, conduirait à un risque important d'assec de la rivière en Août-Septembre.

**Cette valeur de 120 m, de période de retour "5 ans sec", peut être considérée comme un seuil de crise. Elle peut aussi être mise en relation avec une valeur de pluie efficace de 125 mm de même période de retour.**

**La valeur de 123 m, de période de retour 2.5 ans (non dépassée 2 années sur 5) peut quant à elle être considérée comme un seuil d'alerte.**

Remarque

La règle de gestion proposée dans l'étude 2004 était la suivante :

- pour une cote de la nappe en avril-mai située au-delà de 128,5 m NGF, il serait autorisé un prélèvement total 1,1 Mm<sup>3</sup> pour l'irrigation sur la période de juin à septembre ;
- pour des cotes comprises entre 120 et 128.5 m NGF, les volumes autorisés devraient diminuer progressivement ;
- pour une cote de la nappe inférieure à 120 m NGF, les prélèvements pour l'irrigation risquent de conduire à des conflits d'usage et des mesures exceptionnelles de restriction devront être prises.

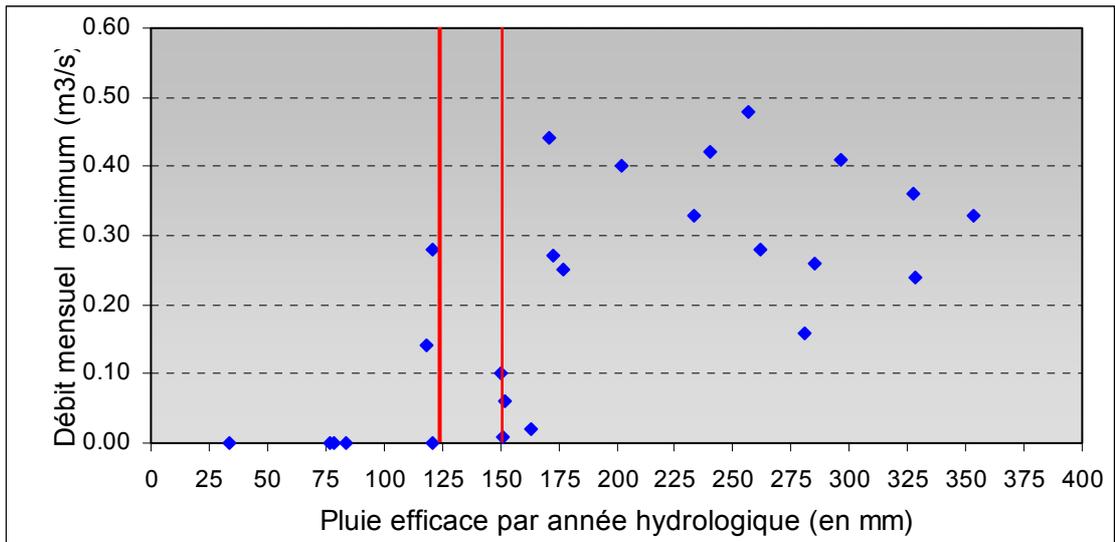


Illustration 57 - Pluies efficaces et débits moyens mensuels minimum de la Barbuise

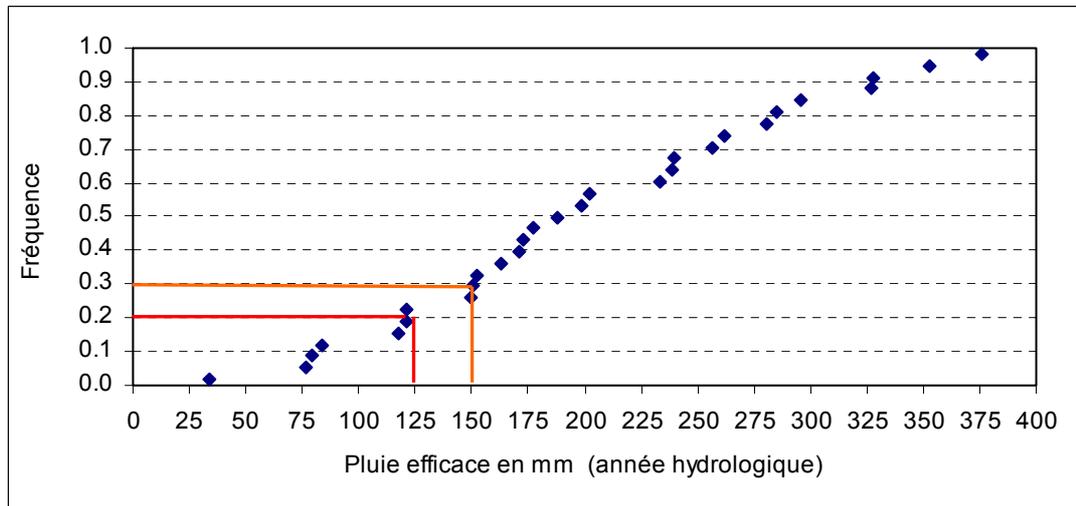


Illustration 58 – Fréquence cumulée de la pluie efficace dans le bassin de la Barbuise

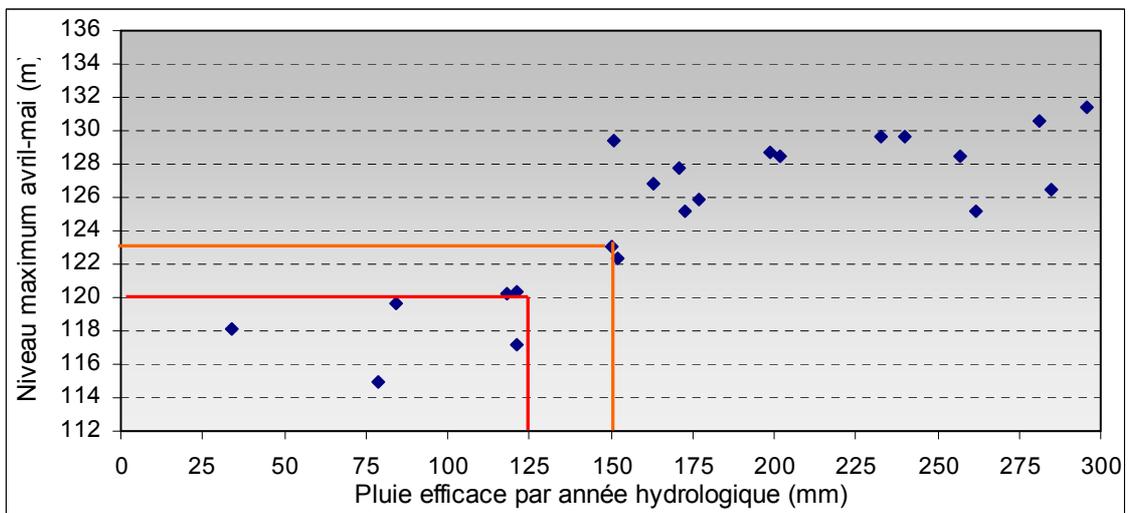


Illustration 59 - Pluies efficaces et niveaux maximum de la nappe en avril-mai.

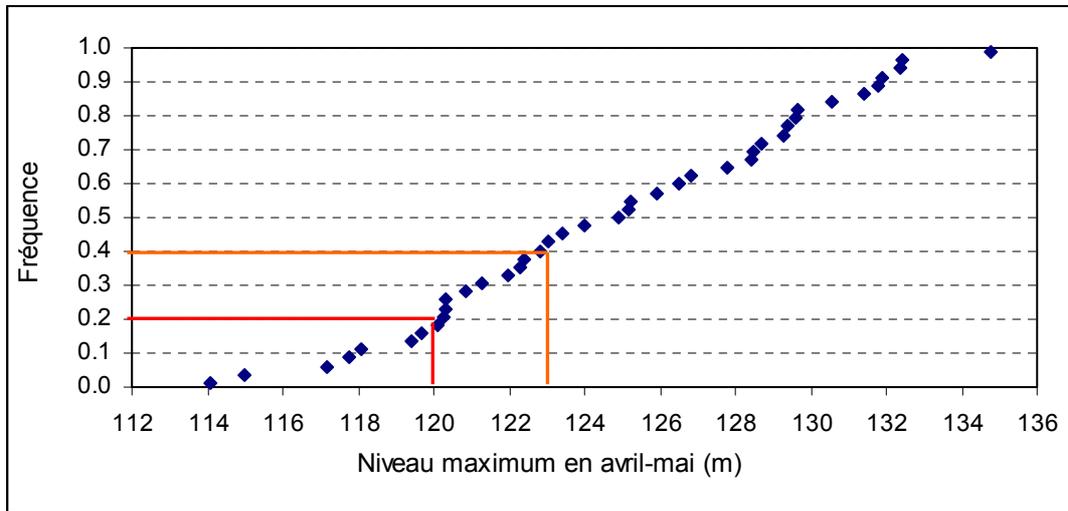


Illustration 60 - Fréquence cumulée des niveaux maximum de la nappe en Avril-Mai dans le bassin de la Barbuise

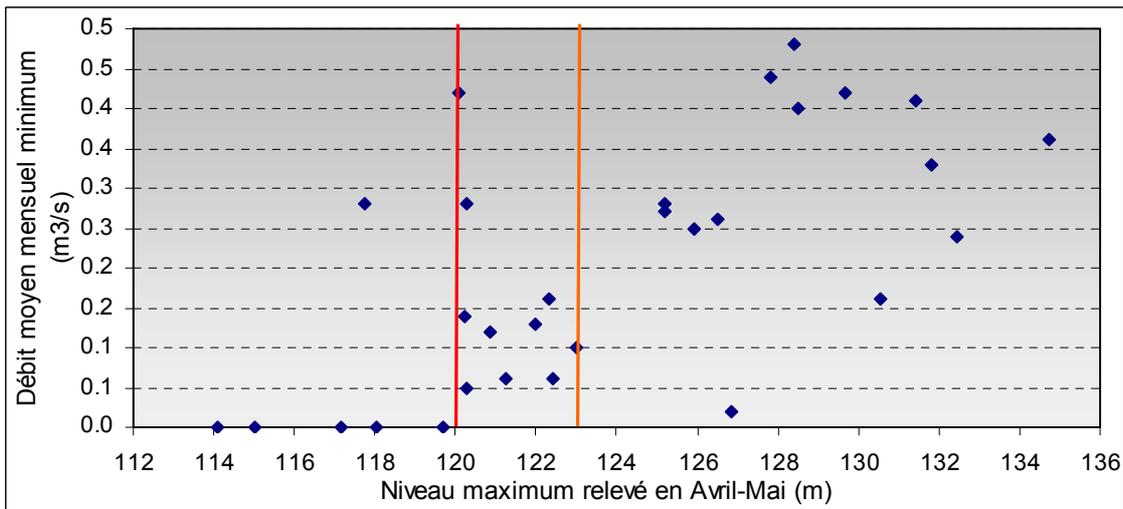


Illustration 61 - Niveaux maximum de la nappe en Avril-Mai et débits moyens mensuels minimum de la Barbuise

### 3.3.3. Exemple 2 - Simulations prévisionnelles

Ce type d'approche peut être utilisé pour compléter "l'analyse historique" surtout si la longueur de la chronique n'est pas suffisante pour calculer des périodes de retour "fiables" ou bien si elle est incomplète. On peut alors disposer d'une chronique plus importante pour établir des corrélations.

#### 3.3.3.1. Principe

Une fois le modèle calé, la phase de prévision (débits, niveaux) peut être mise en œuvre.

On ignore bien sûr le temps qu'il fera sur la période de prévision. L'idée est alors de raisonner de façon probabiliste.

On peut utiliser un générateur de pluies (et d'ETP) pour produire un grand nombre de scénarios climatiques suivant un processus stochastique mais reproduisant néanmoins les caractéristiques des séquences climatiques passées (moyenne, saisonnalité, ...).

Pour que les fréquences calculées soient significatives, plusieurs centaines de scénarios sont nécessaires.

Le modèle ayant été calé, on peut donc pour chacun des  $n$  scénarios climatiques faire le calcul de la variable de sortie (débit ou niveau) sur la période de prévision choisie et à un pas de temps défini (par exemple décennie par décennie ou mois par mois sur 5 ans).

On obtient alors  $n$  scénarios pour les niveaux (cf illustration 62 ci-après avec  $n=5$ ).

Les résultats de toutes les simulations sont ensuite regroupés intervalle de temps par intervalle de temps (par décennie ou par mois).

Sur chacun de ces intervalles de temps les niveaux sont classés par ordre croissant, ce qui revient à construire une distribution cumulée des fréquences.

Les valeurs correspondant à ces différentes fréquences sont calculées pas de temps par pas de temps et reportées ensuite sur un graphique (illustration 63) où les courbes tracées doivent s'interpréter non pas comme représentant des chroniques continues (c'est-à-dire des courbes d'évolution possibles avec une certaine fréquence d'apparition) mais comme des suites de valeurs correspondant chacune à une certaine fréquence de non dépassement (ou de dépassement) sur l'intervalle de temps considéré.

Sur ce graphique, sont reportées les valeurs correspondant à 7 fréquences particulières réparties en deux groupes correspondant aux années dites "humides" et aux années dites "sèches" de part et d'autre d'une valeur "médiane" correspondant à la valeur qui divise la "population" statistique sur l'intervalle de temps considéré en deux parties d'effectifs égaux (la valeur médiane est dépassée, ou non dépassée, une année sur 2).

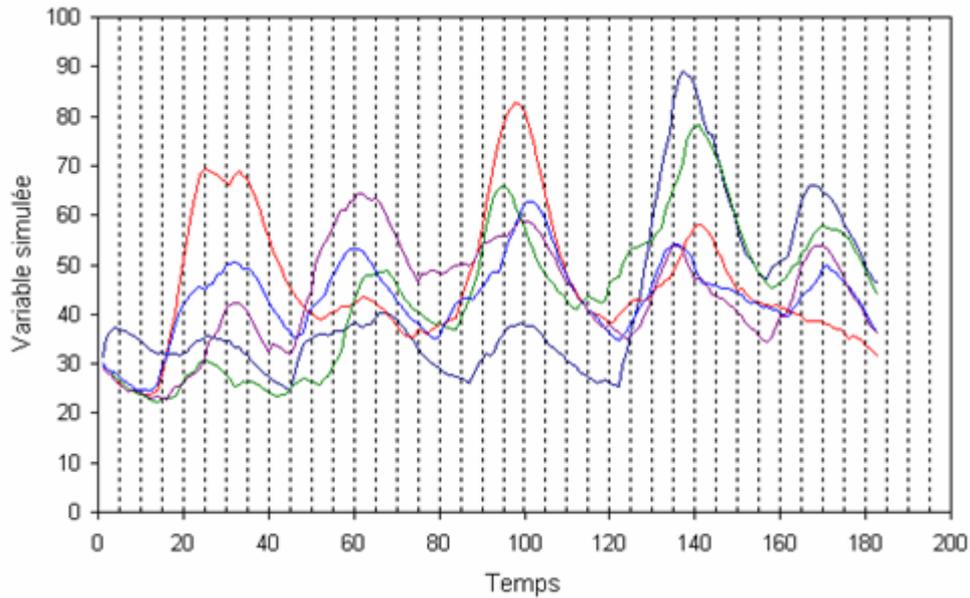
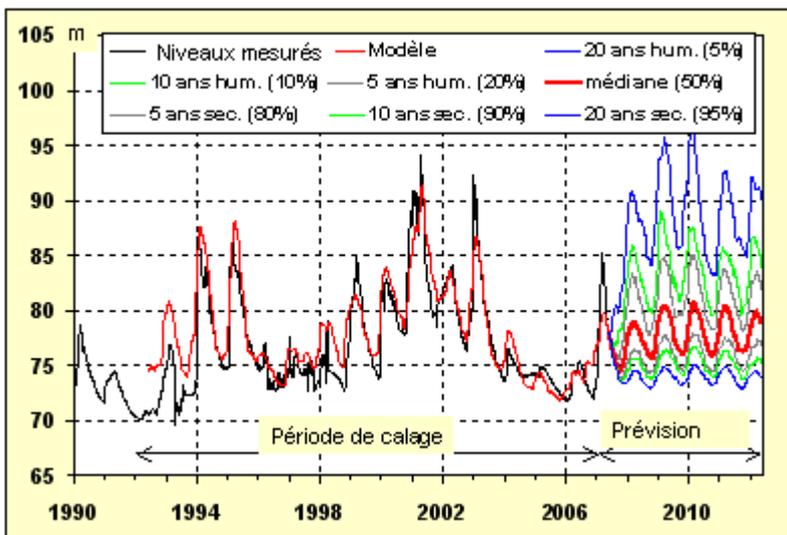


Illustration 62 - Calculs de débits ou de niveaux à partir de n scénarios climatiques(ici n=5)



Les "20 ans humides" s'interprètent comme la valeur de niveau ou de débit **dépassée en moyenne 1 année sur 20**. Les "20 ans secs" s'interprètent comme la valeur de niveau ou de débit qui n'est **pas dépassée en moyenne 1 année sur 20**. De même pour les autres fréquences.

Illustration 63 - Exemple de prévision dans un environnement Excel

### 3.3.3.2. L'indicateur piézométrique des Yvelines.

L'indicateur piézométrique des Yvelines est construit en faisant la moyenne des niveaux enregistrés sur 3 piézomètres : Mareil le Guyon, Perdreauville et Théméricourt (illustration 64).

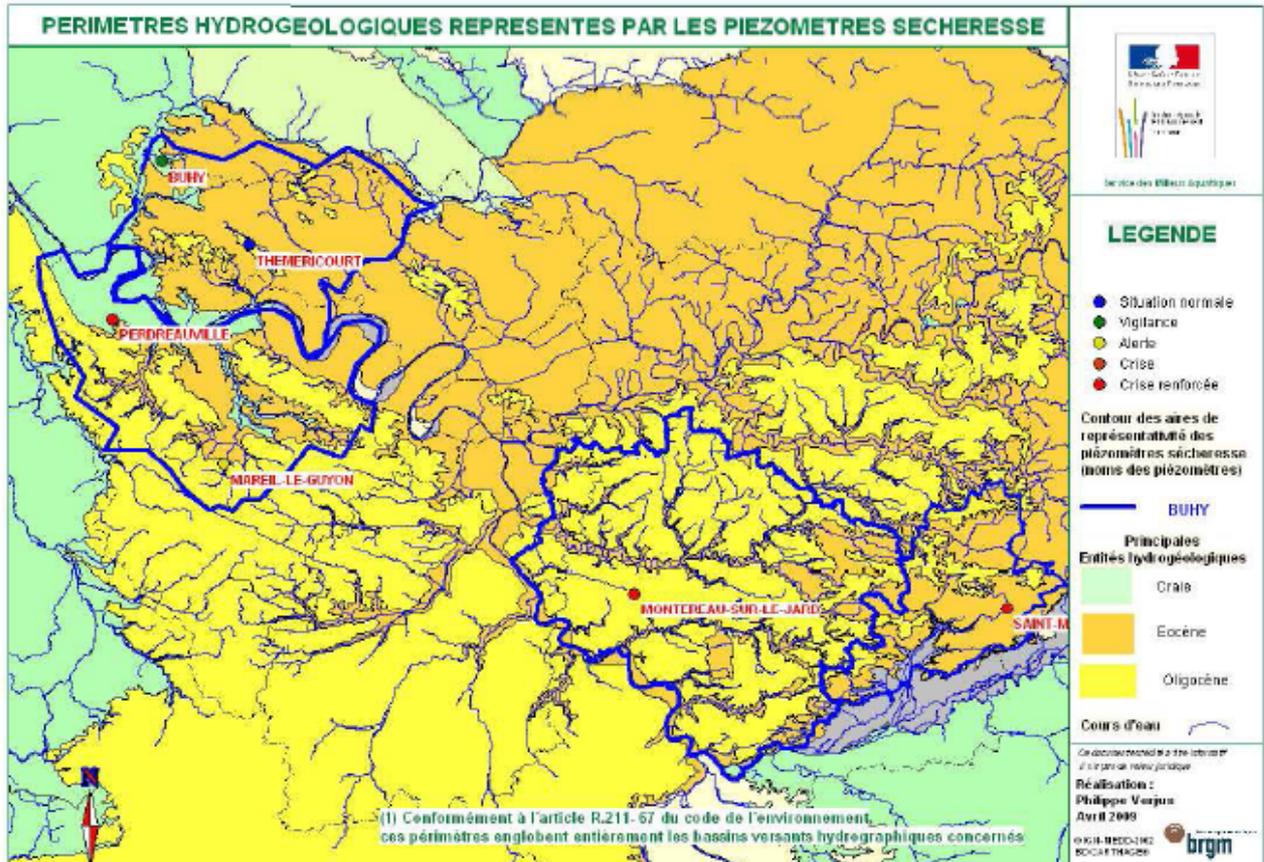


Illustration 64 – Localisation des piézomètres utilisés pour définir l'indicateur des Yvelines.

Source: Note méthodologique DIREN Ile de France du 09/04/2009

Cet indicateur, dont les valeurs ont été obtenues par moyenne des valeurs des trois piézomètres précédents, est supposé être représentatif des variations piézométriques de l'ensemble de cette zone géographique.

Une modélisation de cet indicateur ainsi que des simulations prévisionnelles ont été réalisées pour la DIREN IDF (Octobre 2009).

Pour juger de l'influence sur les résultats de la période de calage et du choix de la station pluviométrique, plusieurs calages ont été réalisés :

- le premier a porté sur la période 1998/2008 avec les données pluviométriques de la station de Trappes : coefficient d'ajustement de 0,924 ;
- le deuxième a été réalisé sur la même période mais avec les données pluviométriques de la station de Wy Dit : coefficient d'ajustement de 0,852 ;
- le troisième a été réalisé avec les mêmes données pluviométriques que le précédent mais sur la période 2000-2009 : coefficient d'ajustement de 0,993

L'analyse des calages suggère que la pluviométrie à Trappes est prédominante sur la période antérieure à 2000 et que celle de Wy Dit (Vexin) devient prédominante après 2000.

Il ressort de la mise en œuvre de ces différentes modalités de calage que les prévisions, pour être fiables, nécessitent des séries de mesures suffisamment longues et de qualité, ainsi que des précautions dans le choix des données pluviométriques et de la période de calage.

*Remarque : Les bassins versants modélisés ne font pas l'objet, semble-t-il, de prélèvements (fil de l'eau, puits, forages, ...) suffisants pour perturber les bilans réalisés. Dans le cas contraire, des prévisions peuvent également être réalisées mais il est alors nécessaire de préciser par pas de temps, lors du calage, les volumes prélevés. Les variations temporelles de ces volumes ne pouvant être spatialisées, l'influence simulée de ces pompages constitue un handicap supplémentaire pour obtenir des prévisions fiables.*

...

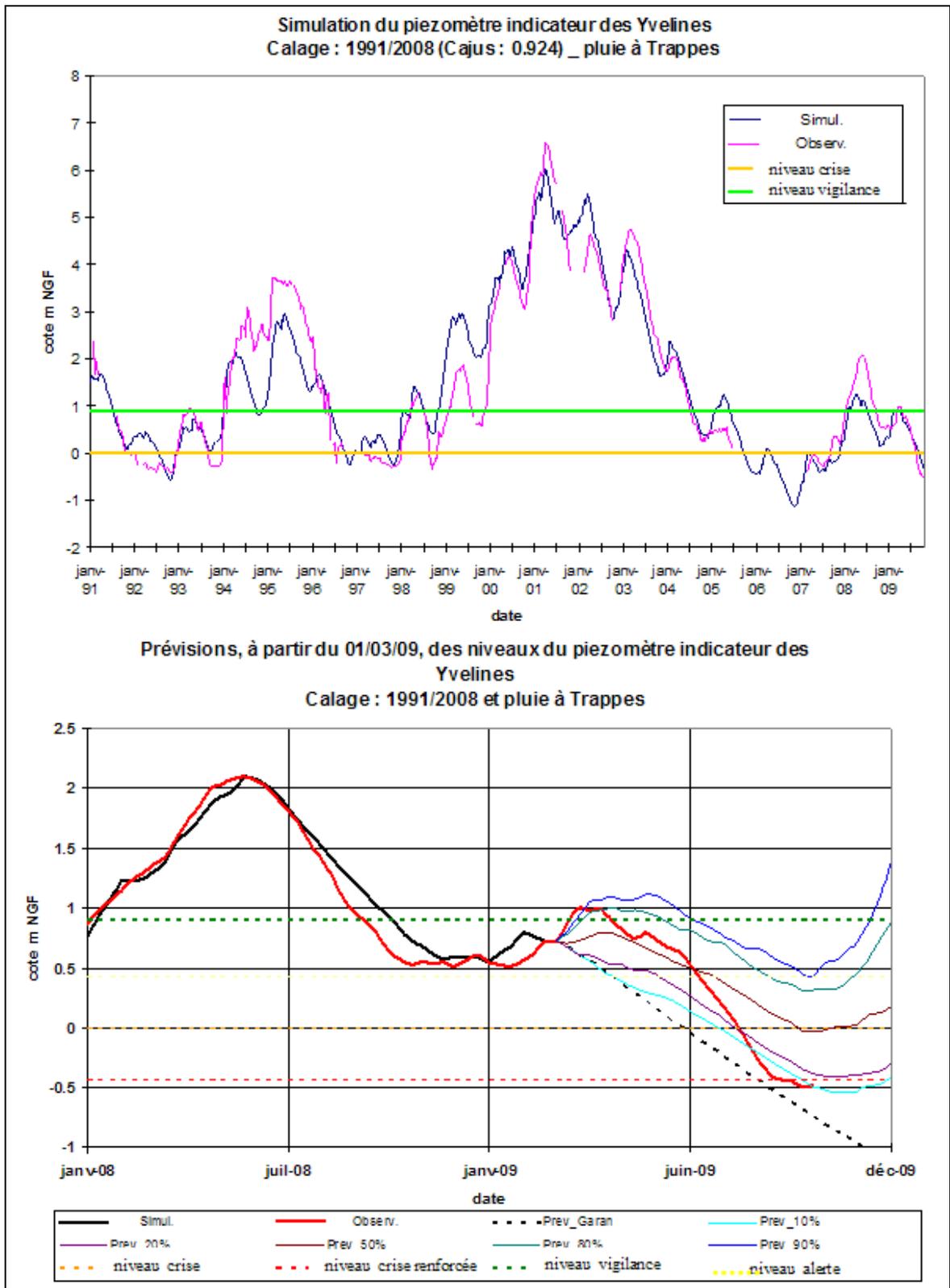


Illustration 65 – Modélisation de l'indicateur des Yvelines et simulation prévisionnelle

### 3.3.3.3. Exemple en Poitou-Charentes

Plusieurs études ont été réalisées par le BRGM à la demande de la DIREN et des MISE des 4 départements de la région Poitou-Charentes (cf références bibliographiques).

Un important travail de modélisation a été réalisé à l'aide du logiciel Tempo du BRGM ; il a permis de mieux comprendre le fonctionnement des hydrosystèmes étudiés, cette compréhension représentant une aide essentielle dans la définition d'indicateurs piézométriques.

Une proposition de découpage régional en 40 zones de gestion se répartissant comme suit [une zone n'étant comptée qu'une fois dans le cas d'un partage entre 2 départements] :

- 15 zones en Vienne,
- 5 zones en Deux-Sèvres + les secteurs de socle,
- 9 zones en Charente,
- 10 zones en Charente-Maritime.

D'une manière générale, l'analyse des chroniques piézométriques et les résultats des simulations ont mis en évidence l'existence de 2 grands types de comportement :

- Les piézomètres situés plutôt à l'amont des bassins versants pour lesquels on observe un comportement relativement "naturel" avec un faible impact des prélèvements et une courbe de vidange de l'aquifère durant le printemps et l'été avec des niveaux dépendant de l'état de remplissage de la ressource. Ce type de piézomètre est donc un bon indicateur de l'état de la ressource souterraine.
- Les piézomètres situés à l'aval, au niveau des vallées, fortement impactés par les prélèvements, soit d'une manière nette, soit d'une manière plus diffuse et moins évidente sur les chroniques de mesures. L'évolution des niveaux sur ces piézomètres est souvent encadrée par des seuils hauts, dits de débordement, et surtout bas, niveau de base imposé par la rivière.

Cette analyse a conduit à repérer les piézomètres peu influencés et bons indicateurs de l'état de la ressource, en général situés à l'amont des bassins versants, et présentant de préférence des battements annuels importants. Pour chaque zone de gestion, un (dans certain cas plusieurs) piézomètre est sélectionné et proposé en gestion.

**Il a été recommandé que les niveaux de période de retour "5 ans sec" soient considérés comme des seuils de crise.**

**Compte tenu des relations des nappes avec les rivières, il a été aussi recommandé de coupler cet indicateur de l'état de la ressource souterraine avec des seuils de débit sur les rivières, en dehors des zones en nappe profonde.**

Parallèlement, ce dispositif pourrait être complété par un ou plusieurs autres indicateurs permettant de gérer des problématiques locales : protection d'un forage AEP, assèchement d'un cours d'eau ou d'une source, assèchement d'une zone humide, ... Ces autres indicateurs pourraient être des forages ou des débits de source.

### 3.4. CAS DES NAPPES CAPTIVES

#### 3.4.1. Exemple en Aquitaine

On reprend ici l'exemple des nappes captives de la région Aquitaine, le contexte ayant été précisé ci-dessus (§ 2.5.2). L'exploitation intensive de certaines de ces nappes (en particulier dans l'Oligocène et l'Eocène) a entraîné une baisse importante des niveaux. Il donc été décidé de construire un modèle hydrodynamique de gestion de la ressource afin de chiffrer, dans un premier temps, la réduction des prélèvements à opérer pour restaurer un équilibre et, dans un deuxième temps, pour simuler différents scénarios (climatiques, démographiques, "reconfiguration" des prélèvements).

##### Le Modèle Nord-Aquitain

Ce Modèle Nord-Aquitain (MONA), dans sa version actuelle (3.3), simule les écoulements souterrains dans 15 couches : Plio-quatenaire, Langhien-serravalien (Helvétien), Aquitaniens-Burdigaliens, Oligocène, Eocène supérieur, Eocène moyen, Eocène inférieur, Campano – Maastrichtien, Coniacien-Santonien, Turonien, Céno-manien, Tithonien, Kimmeridgien, Bathonien-Calovo-Oxfordien et Bajocien.

Le modèle fonctionne au pas de temps annuel (année de départ : 1970). La taille des mailles est de 2km×2km (67 000 mailles de calcul). Il a été calé sur 380 chroniques piézométriques.

*Remarque: le modèle ne représente pas de manière explicite les écoulements dans les éponges : il simule seulement les flux de drainage au travers de celles-ci en tenant compte de leurs perméabilités et de leurs épaisseurs.*

##### Volumes maximum prélevables objectifs et piézométrie associée

**L'état piézométrique à respecter (piézométrie objectif de gestion) découlera du scénario retenu pour fixer les volumes maximum prélevables (volumes maximum prélevables objectifs ou VMPO).**

Les valeurs de niveaux qui définissent cet état seront les résultats des simulations réalisées avec le modèle à partir des volumes maximum prélevables (rapport BRGM RP-57878-FR à paraître).

Cette piézométrie sera une "piézométrie objectif de gestion" vers laquelle il faudra tendre non seulement pour rétablir l'équilibre global des nappes mais aussi pour instaurer des niveaux sécuritaires permettant de faire face à des situations de crise (climatique par exemple) sans mettre en péril les secteurs les plus vulnérables.

##### Cas de l'Eocène bergeracois

Les études menées depuis plusieurs années dans la région de Bergerac ont montré l'influence des conditions d'exploitation de la zone bordelaise sur la piézométrie de l'Eocène du Bergeracois (illustration 66).

L'utilisation du modèle Nord-Aquitain dans sa version MONA V3.1–2003 (rapports BRGM/RP-52602-FR, RP-53659-FR et RP-54220-FR et RP-55241-FR) a confirmé ce constat. Les différents scénarios de prélèvements testés ont démontré que la modulation des prélèvements dans l'un des 2 secteurs considérés, bordelais ou bergeracois, avait des répercussions sur l'autre secteur, même si les effets sont atténués par la distance. La gestion de cette ressource importante pour le bergeracois ne peut donc se concevoir sans son intégration dans un plan de gestion globale impliquant non seulement la Gironde, mais aussi le Lot-et-Garonne.

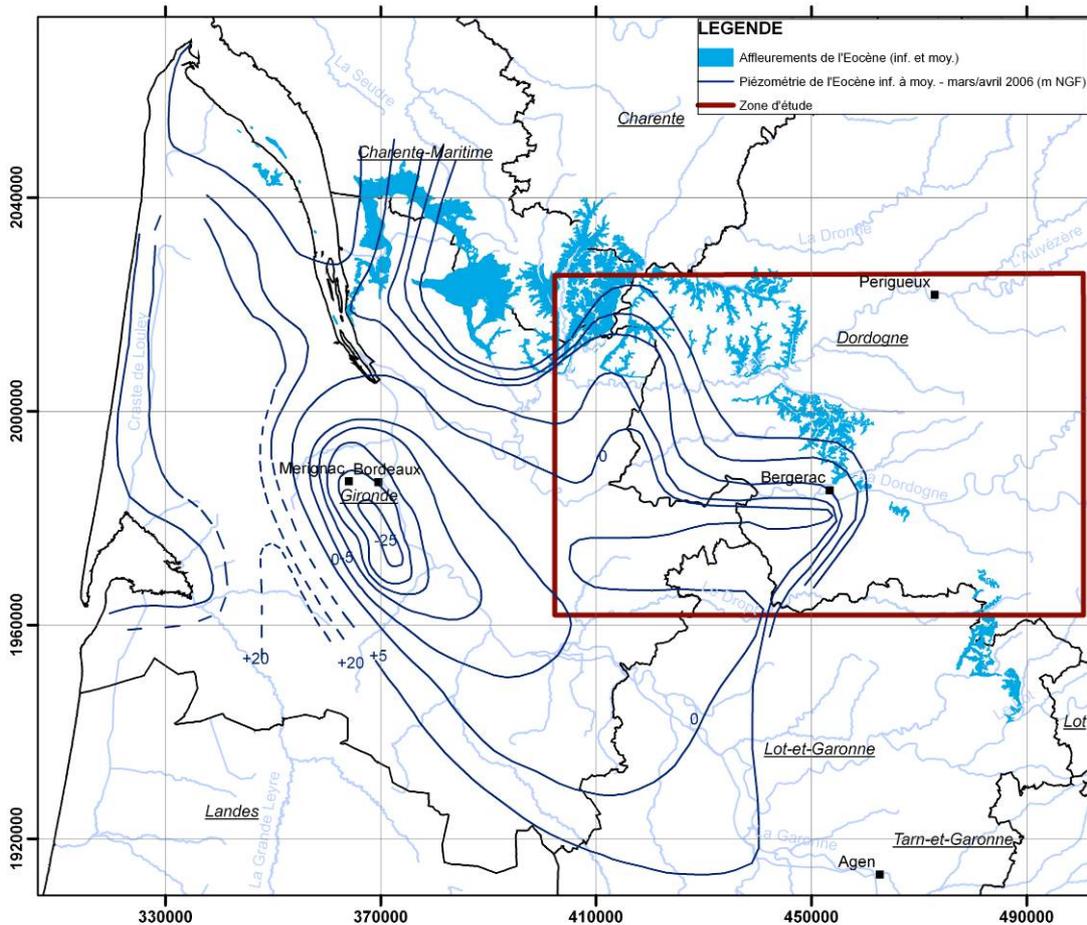


Illustration 66 – Localisation de la zone d'étude bergeracoise et carte piézométrique de mars/avril 2006

La fixation de règles de gestion (cotes piézométriques (crise et/ou objectif) et de volumes maximum prélevables objectifs doit se faire à l'échelle de ces nappes en intégrant les besoins et les objectifs des 3 départements concernés : la définition de cotes piézométriques de gestion dans le Bergeracois reste donc dépendante de cette même opération dans les deux autres départements.

#### Unités de gestion

Les caractéristiques des nappes profondes (structuration en bassins, dynamique propre, vulnérabilité) ont conduit à subdiviser le territoire girondin en grandes unités de gestion relevant chacune d'une problématique propre. Ce découpage répondait à 2 objectifs :

- d'une part définir des sous-ensembles aquifères relativement indépendants de façon à pouvoir appliquer à chacun un mode de gestion adapté ;
- d'autre part constituer des cadres territoriaux caractérisés chacun par des dispositifs de contrôle des niveaux (réseaux piézométriques) et des prélèvements.

#### Propositions d'indicateur

1) Dans le cadre du Sage "*Nappes profondes de Gironde*", le BRGM a proposé en 2002 (rapport BRGM/RP-51777-FR, 2002) d'utiliser un indicateur de suivi piézométrique calculé à partir d'un état piézométrique d'objectif de gestion et d'un état

piézométrique d'alerte, tous deux issus de simulations de scénarios de volumes prélevables. Pour chaque piézomètre de surveillance retenu, l'indicateur (calculé annuellement) est donné par:

$$ISP = \frac{\bar{H}_i - H_{al}}{H_{obj} - H_{al}}$$

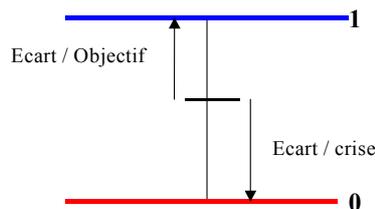
$\bar{H}_i$  est la valeur moyenne de la piézométrie calculée sur l'année i,  
 $H_{obj}$  est la valeur de la piézométrie d'objectif,  
 $H_{al}$  est la valeur de la piézométrie d'alerte.

#### Caractéristiques de l'indicateur

Lorsque ISP tend vers 0, la "cote d'alerte" se précise (s'il est négatif cette cote est dépassée). Lorsqu'il tend vers 1, on se rapproche de l'objectif de gestion. Si l'indice est supérieur à 1, l'objectif est dépassé (situation sécuritaire).

ISP peut être exprimé en % et être alors interprété en terme d'*écart relatif* par rapport à la piézométrie d'alerte.

Corrélativement,  $(1-ISP) \times 100$  exprime un *écart relatif* par rapport à la piézométrie d'objectif et mesure en quelque sorte "l'effort" qu'il reste à fournir pour atteindre un objectif par rapport un effort maximum qui serait celui à fournir si l'on partait d'un niveau de crise (ou d'alerte).



2) Un autre type d'indicateur a été proposé par le SMEGREG (Syndicat Mixte d'Etudes pour la Gestion de la Ressource en Eau du département de la Gironde) : il s'agirait de suivre globalement l'évolution de la nappe Eocène en calculant le volume de la dépression piézométrique à partir d'un état de référence (le calcul serait réalisé par krigeage à partir des mesures faites sur les très nombreux piézomètres de suivi).

3) Les seuils de crise correspondraient à des niveaux à respecter impérativement, en particulier dans le secteur de l'estuaire, sur le "bourrelet" piézométrique. Dans d'autres secteurs, il pourrait s'agir par exemple d'une certaine cote au dessus du mur des formations aquifères de façon à éviter un dénoyage.

### 3.4.2. Exemple de la nappe de l'Albien en Île de France

La nappe de l'Albien est une ressource stratégique pour l'alimentation en eau potable de l'Île- de- France; elle doit être exploitée de manière à préserver sa fonction de secours en cas de pollution des autres ressources. Un modèle hydrodynamique maillé a été construit pour en comprendre le fonctionnement et être utilisé comme outil d'aide à la gestion.

L'évolution de la nappe est suivie à l'aide d'un indicateur qui est une combinaison linéaire des niveaux enregistrés sur 3 piézomètres : l'Isle Adam (H1), Paris XIII (H2), La Houssaye en Brie (H3). Le niveau "synthétique" de l'indicateur est donné par :

$$H_{ind} = aH_1 + bH_2 + cH_3 .$$

a, b et c étant 3 coefficients déterminés de façon à ce que l'indicateur représente au mieux l'évolution du niveau moyen de la nappe (utilisation du modèle de gestion dans la mise en place de cet indicateur).

a = **0.334941** pour l'Isle Adam

b = **0.299319** pour Paris XIII

c = **0.408454** pour La Houssaye en Brie

Référence: Vernoux J.F. (2004) - *Réseau piézométrique du bassin Seine-Normandie. Stations de surveillance de la nappe de l'Albien*. Rapport BRGM/RP-53009-FR.

(Les modalités de calcul de ces 3 coefficients ne sont pas indiquées).

...

## 4. Indicateurs piézométriques et volumes prélevables

### 4.1. RECHERCHE D'INDICATEURS SANS MISE EN ŒUVRE D'UN MODÈLE

La méthode présentée ci-dessous a été utilisée dans le cadre des études portant sur la gestion des nappes du sud de la Vendée. Elle est exposée dans le rapport du bureau d'études Calligée N08-85138C ("*Phase 3: étude d'un cadre de gestion des nappes du Sud-Vendée compatible avec les enjeux écologiques et économiques*", Nov. 2008).

#### Objectif

Calculer des volumes prélevables en respectant des seuils piézométriques (donc préalablement fixés).

#### Données indispensables

Il est nécessaire de bien connaître les prélèvements effectués dans les nappes.

#### Hypothèse

La méthode repose sur l'hypothèse qu'en l'absence de précipitation à partir d'une certaine date  $t_0$  il existe une relation linéaire entre le volume cumulé pompé et la baisse de niveau de la nappe.

#### Conditions d'application

Nappes à cycles annuels (réagissant rapidement, en particulier aux pompages).

#### 4.1.1. Méthode

##### 1) Analyse des chroniques piézométriques et choix des années de référence

On sélectionne dans les chroniques piézométriques les années où il n'y a pas (ou peu) d'influence des précipitations sur les niveaux à partir de la date  $t_0$  jusqu'à une date  $t_1$ . En prenant comme exemple le piézomètre de Luçon captant la nappe du Dogger (illustration 67), cette sélection peut être facilitée par la construction d'un graphique tel que celui présenté par l'illustration 68 où, sur la période  $t_0-t_1$ , on reporte les niveaux de chacune des années de la chronique, chaque niveau étant ramené à 0 à la date  $t_0$ . Le graphique montre qu'il est possible de retenir les années 2000, 2003, 2005, peu influencées par une recharge estivale, comme années de référence.

##### 2) Recherche d'une relation reliant niveaux et volumes prélevés

En reprenant l'exemple du piézomètre de Luçon, le graphique de l'illustration 69 (extrait du rapport Calligée) montre clairement que la relation linéaire postulée entre niveaux et volumes cumulés pompés est vérifiée pour chacune des années retenues.

##### 3) Calcul d'un volume spécifique

Ces relations linéaires permettent d'obtenir un volume spécifique (volume prélevé par mètre de rabattement de la nappe). Dans le cas du piézomètre de Luçon, il est compris entre 2.2 et 2.3 Mm<sup>3</sup> par m de rabattement (les pentes des droites sont presque identiques).

##### 4) Extension aux autres piézomètres de référence

La méthode doit être appliquée à plusieurs piézomètres pour que l'on puisse obtenir un volume spécifique moyen par secteur.

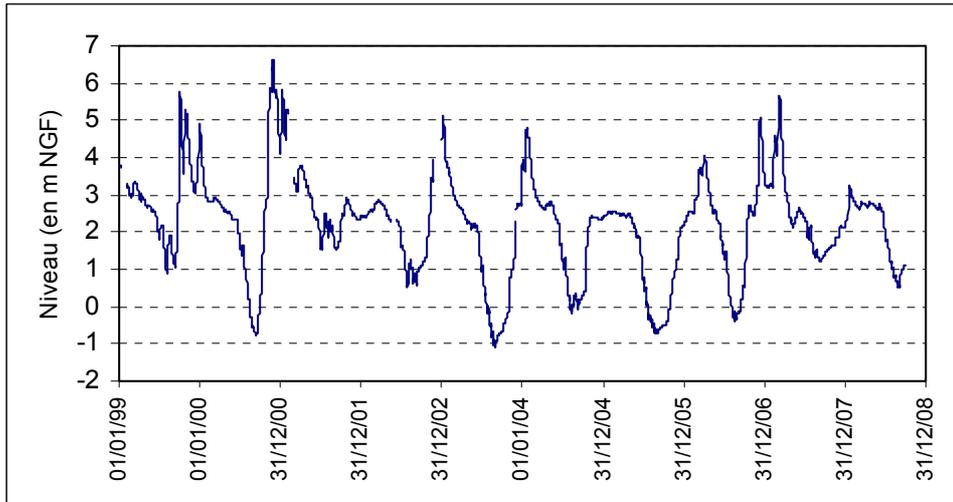


Illustration 67 - Niveaux de la nappe du Dogger mesurés au piézomètre de Luçon

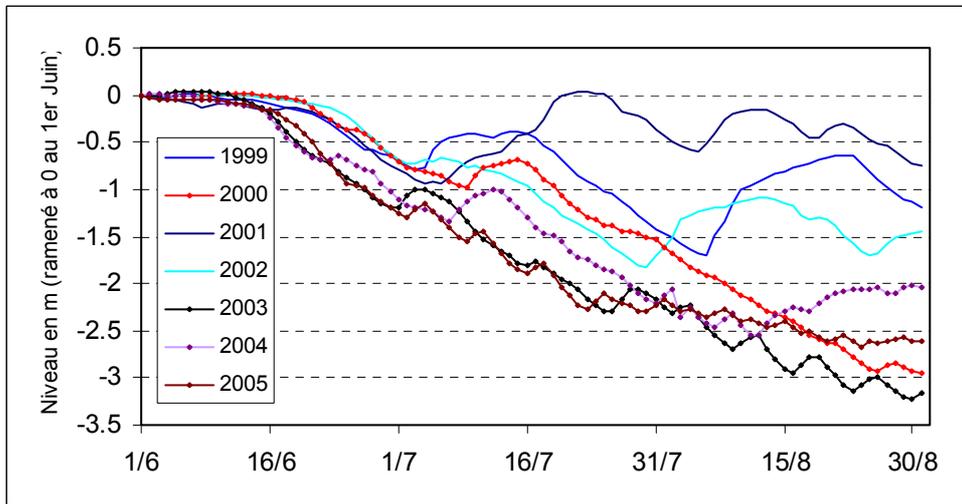


Illustration 68 - Niveaux année par année (ramenés à 0 au 1<sup>er</sup> Juin) au piézomètre de Luçon

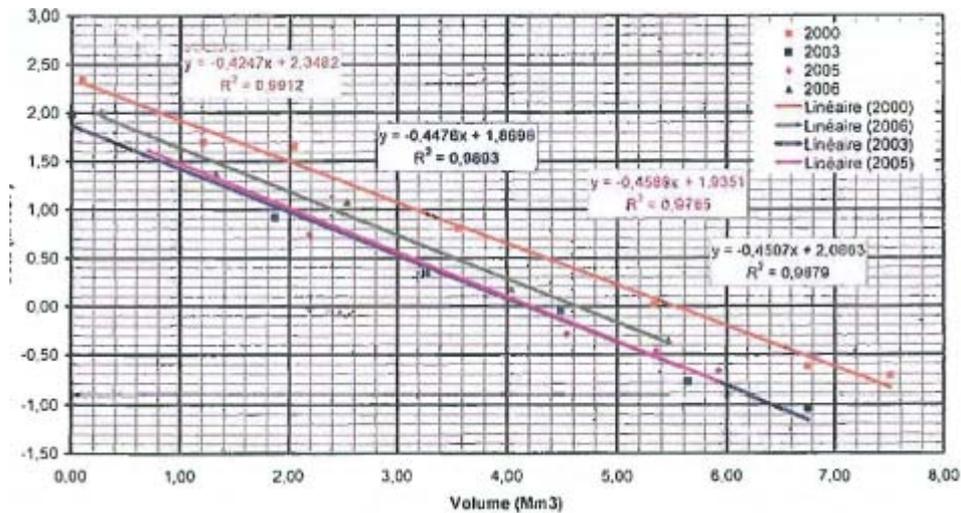


Illustration 69 - Mise en évidence d'une relation linéaire entre niveaux de la nappe et volumes pompés au piézomètre de Luçon en période estivale pour chacune des années retenues

Source illustration 69 : rapport Calligée N08-85138C

Année	Secteur du Lay		Secteur de la Vendée		Secteur des Autises	
	Longeville	Luçon	Saint Aubin	Le Langon	Oulmes	Azéré
2000	3,5	2,3	3,6	12,0	1,4	
2003	2,2	2,2	3,3	4,2	1,8	2,5
2005	2,2	2,2	3,3	3,4	1,3	2,8
2006	2,1	2,2	3,3	3,7	1,5	2,8
Valeur Moyenne retenue	2,2 Mm <sup>3</sup> /m		3,4 Mm <sup>3</sup> /m		1,4 Mm <sup>3</sup> /m	2,7 Mm <sup>3</sup> /m

5) Calcul des volumes prélevables pour respecter les piézométries objectifs

En retenant sur un secteur donné un volume spécifique moyen  $V_{sp}$  (par exemple 2.2 Mm<sup>3</sup> dans le secteur du Lay, tableau ci-dessus), on peut calculer pour chaque année, à partir de la date  $t_0$ , un volume exploitable permettant de respecter les seuils piézométriques fixés.

Si  $H_0$  est le niveau de la nappe à  $t=t_0$  et si  $H_{obj}$  est le niveau à respecter, le volume exploitable sur une année  $i$  est:

$$V_{exp}^i = (H_0 - H_{obj})V_{sp}$$

On calcule ensuite un volume moyen  $\overline{V_{exp}}$  à partir des volumes annuels.

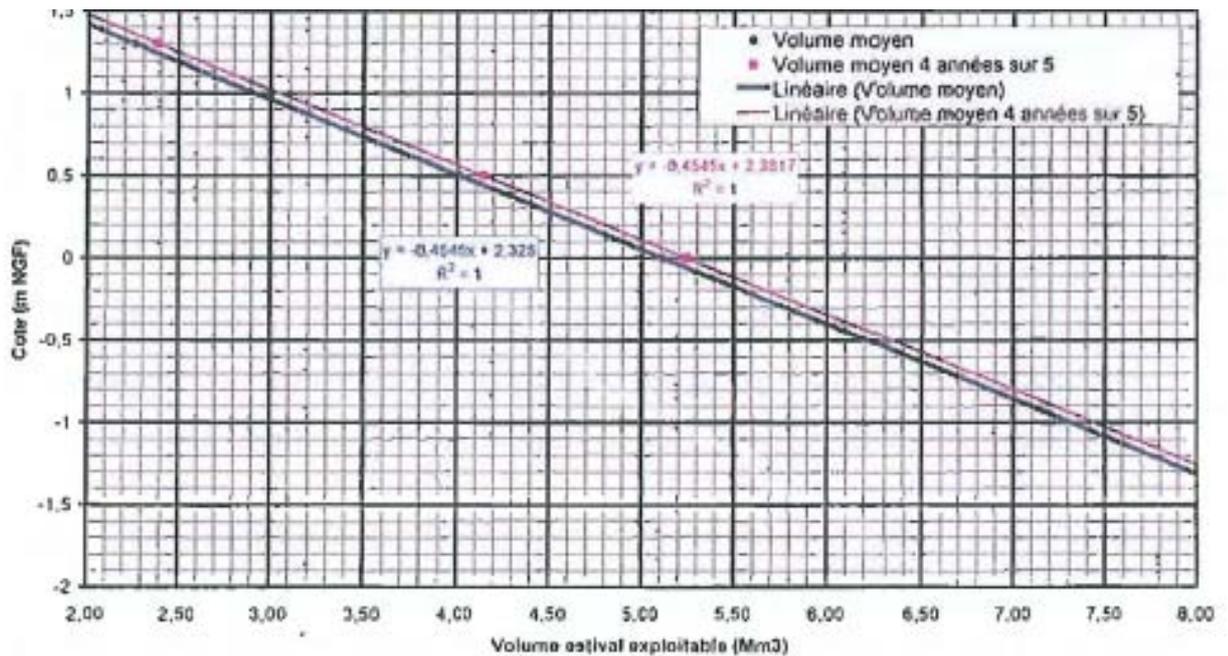


Illustration 70 – Relation entre le volume moyen exploitable en été et une cote donnée à respecter sur le secteur du Lay à partir des données du piézomètre de Luçon.

Source: rapport Calligée N08-85138C

## 4.2. UTILISATION D'UN MODÈLE

### 4.2.1. Modèle spatialisé

#### 4.2.1.1. Méthode

Le modèle de nappe doit être couplé au réseau hydrographique ("condition d'échange nappe/rivière"). Il doit être calé en régime transitoire au moins au pas de temps mensuel.

On définit ensuite quelques scénarios climatiques dont l'impact sur les niveaux de la nappe sera simulé. Pour un scénario climatique et pour une configuration donnée de prélèvements, l'objectif est de vérifier que les débits objectifs fixés dans un ou plusieurs cours d'eau sont bien respectés (DOE ou DCR). Dans le cas contraire, une réduction des prélèvements est nécessaire.

Exemple de scénarios climatiques définis sur 2 trimestres de recharge possible de la nappe : Oct, Nov., Déc. d'une part, Janv., Fév., Mars, d'autre part. Pour chacun de ces trimestres, 3 possibilités climatiques peuvent être envisagées :

S = Trimestre peu pluvieux    N = trimestre "normal"    H = trimestre très pluvieux

soit 9 combinaisons possibles résumées dans le tableau ci-dessous

	Oct., Nov., Déc. année i			
		S	N	H
Janv., Fév., Mars année i+1	S	SS	SN	SH
	N	NS	NN	NH
	H	HS	HN	HH

Le scénario S peut être du quinquennal "sec" ou du décennal "sec".

Le scénario H peut être du quinquennal "humide" ou du décennal "humide".

Le scénario N peut être un scénario médian.

Pour un scénario climatique donné et dans une unité de gestion donnée, le volume exploitable est calculé comme suit, en supposant un modèle de nappe discrétisé en mailles carrées:

$$V_{\text{exp}} = \sum_i (H_{\text{sc}}^i - H_{\text{ref}}^i) S_i \cdot A_i$$

$H_{\text{sc}}^i$  est le niveau de la nappe dans la maille i pour le scénario climatique simulé,

$H_{\text{ref}}^i$  est le niveau de la nappe dans la maille i pour l'état piézométrique de référence (permettant de respecter un débit objectif dans les cours d'eau),

$S_i$  est le coefficient d'emménagement dans la maille i,

$A_i$  est la superficie de la maille i.

La sommation se fait sur l'ensemble des mailles couvrant l'unité de gestion.

#### 4.2.1.2. Exemple : nappe alluviale de l'Ariège (rapport BRGM/RP 57184-FR, 2009)

##### 1) Contexte hydrogéologique

La nappe alluviale de l'Ariège est caractérisée par :

- une phase de recharge hivernale débutant au mois de novembre avec un maximum des niveaux généralement atteint en février. A cette époque de l'année, les sols sont saturés et la lame d'eau infiltrée importante. Selon l'intensité et la persistance de la période pluvieuse, une décrue partielle intervient entre février et avril, suivie d'une nouvelle phase de recharge printanière observée généralement entre mai et juin,
- une phase de tarissement régulière et prononcée des niveaux d'eau démarrant au début de l'été, entre mai et juin,
- une phase de décroissance très lente correspondant à l'étiage et se poursuivant habituellement jusqu'au mois de novembre.

La profondeur de la nappe par rapport au sol est variable, elle peut dépasser dix mètres dans le secteur de Pamiers et être inférieure à un mètre autour de Mazères ou dans le nord de la plaine, sur Pinsaguel. Elle est en moyenne de 3,5 mètres par rapport au sol.

##### 2) Le réseau hydrographique (illustration 71)

Suite au plan de gestion des étiages (PGE), élaboré en 2004, la Garonne et ses affluents, dont l'Ariège, sont classés par le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) comme rivières déficitaires à très déficitaires.

Le SDAGE et le PGE ont ainsi fixé des valeurs de Débit d'Objectif d'Etiage (DOE) et de Débit de Crise (DCR).

Les DOE et DCR de l'Ariège à la station hydrologique de Auterive (code station O1712510, en service depuis 1966) sont respectivement fixés à 17 et 8 m<sup>3</sup>/s et ceux de l'Hers Vif à celle de Calmont (code station O1662910, en service depuis 1996) sont de 3,5 et de 1,5 m<sup>3</sup>/s.

Six stations appartenant au réseau hydrométrique géré par la DIREN de Midi-Pyrénées fournissent des mesures de débits et de hauteurs d'eau pour les tronçons de rivières Ariège, Hers Vif et Lèze appartenant au secteur d'étude (illustration 71). Parmi les six stations, trois d'entre elles sont situées à l'intérieur du domaine modélisé et permettent ainsi de contrôler la restitution des données de débits et de hauteurs d'eau fournies par le modèle au cours du calage. Il s'agit des points de suivi de Calmont (code station O1662910) sur l'Hers Vif, de Auterive (code station O1712510) sur l'Ariège et de Labarthe-sur-Lèze (code station O1874010) sur la Lèze.

En complément de ces informations, cinq points de mesures du fil de l'eau de l'Ariège et de l'Hers Vif ont été sélectionnés au niveau de ponts jalonnant le secteur d'étude. Ce suivi engagé en août 2005 s'est poursuivi à une fréquence bimestrielle jusqu'en août 2008.

##### 3) Le modèle hydrodynamique

Le modèle couvre la zone des alluvions récentes de l'Ariège et de l'Hers Vif, des formations fluviatiles quaternaires de la basse plaine et de celles des basses terrasses. Il est limité latéralement par les coteaux molassiques, par les terrasses plus anciennes et par l'Ariège et l'Hers Vif.

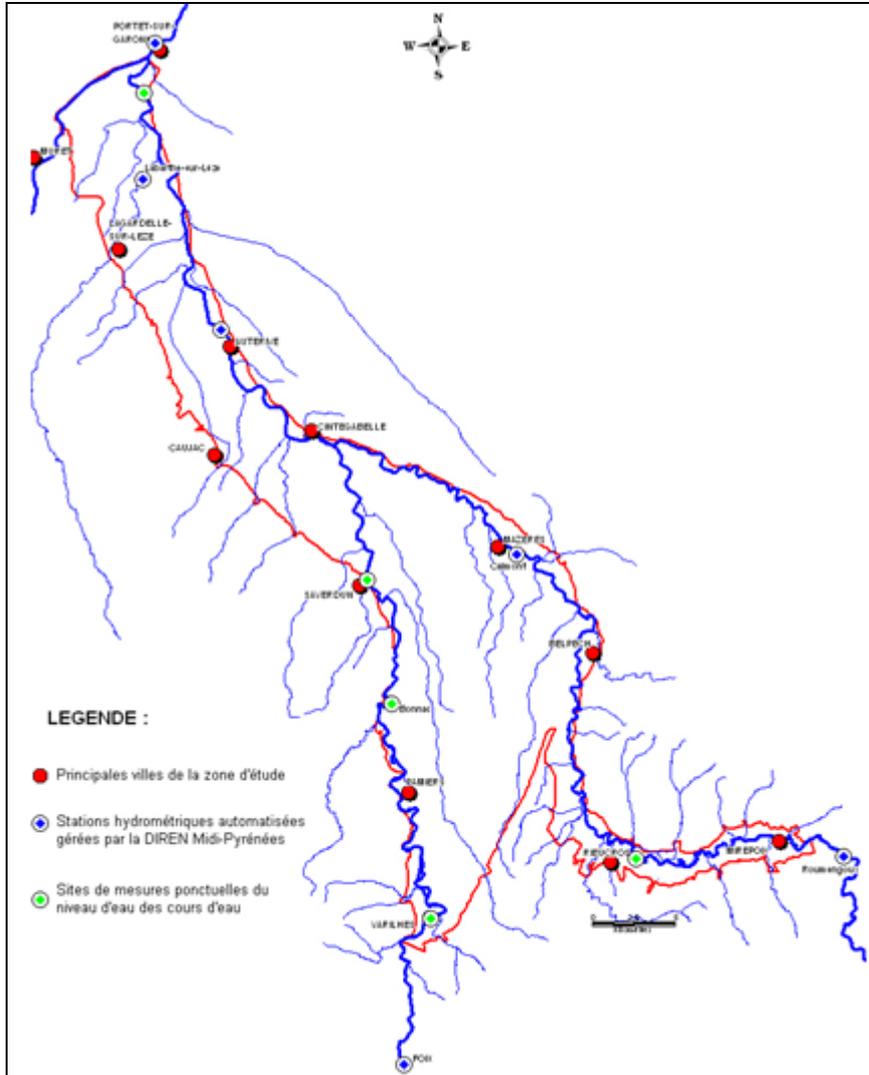


Illustration 71 - Points de contrôle des débits et hauteurs d'eau de l'Ariège, de l'Hers Vif et de la Lèze sur la zone modélisée

Le modèle comprend 2 couches : l'une pour les alluvions, l'autre pour la molasse sous-jacente.

La taille des mailles est de 250 m et le pas de temps de la modélisation est de 1 mois.

Le modèle a été calé à partir des niveaux piézométriques de la nappe mesurés dans 23 ouvrages de référence, d'une part, et à partir des chroniques de débits mesurés aux deux points nodaux présents sur la zone modélisée, d'autre part. Ce couplage nappe / rivière permet ainsi de relier l'état piézométrique de la nappe avec les débits des cours d'eau.

#### 4) *Définition d'unités de gestion*

Le fonctionnement hydraulique du système n'étant pas homogène sur l'ensemble de la plaine (caractéristiques des terrasses, distance aux coteaux, aux cours d'eau, ...), une zonation de l'aquifère alluvial a été effectuée.

Dans la zone modélisée, cinq unités de gestion sont identifiées. Leur délimitation intègre la prise en compte conjointe de la géologie (distinction entre terrasses) et des lignes de courant issues de la piézométrie (caractérisation des directions et sens des écoulements souterrains). Certains de ces ensembles ont été ensuite subdivisés en fonction de la répartition des valeurs de coefficient d'emmagasinement (issues du calage du modèle) et des principaux points de prélèvement, ce qui conduit en définitive à 8 zones (illustration 72).

#### 5) *Détermination d'un état piézométrique de référence*

Dans un premier temps, un seuil limite, dont le dépassement serait dommageable pour la ressource, a été défini (cette notion pourrait être assimilée à un volume réservé). Il correspond ici à l'état piézométrique modélisé associé au maintien du débit d'objectif d'étiage (DOE) de l'Ariège (mesuré à Auterive) et de l'Hers Vif (mesuré à Calmont). Ce choix est en accord avec la problématique du Plan de Gestion d'Etiages (PGE) de la Garonne et de l'Ariège classées par le SDAGE comme rivière déficitaire à très déficitaire.

La période de simulation faisant suite à celle considérée pour le calage comprend 2 années moyennes (24 pas de temps mensuels avec recharges et prélèvements d'une année "moyenne"), introduites pour stabiliser les niveaux piézométriques du modèle avant d'intégrer les valeurs du scénario de référence sur les 12 derniers mois.

Une année décennale sèche a été prise en compte pour les 12 derniers pas de temps. Les valeurs d'infiltration et de ruissellement correspondant à cet état sont issues des pluies efficaces calculées à partir de l'analyse statistique des données météorologiques (le pourcentage de répartition entre l'infiltration et le ruissellement étant celui obtenu au terme du calage du modèle).

Les données statistiques des différentes stations hydrologiques intéressant la zone d'étude proviennent de la Banque HYDRO. Il s'agit des débits moyens interannuels et des débits mensuels correspondant à une année sèche de période de retour de 10 ans. Ces éléments ont également été intégrés au modèle pour simuler au plus juste le fonctionnement couplé nappe / rivières lors d'une année décennale sèche.

L'état piézométrique simulé pour la fin du mois de septembre correspondant à une année décennale sèche (fin de la période d'irrigation) a été considéré comme état de référence. Il s'agit du seuil à ne pas dépasser pour préserver les DOE dans l'Hers Vif et l'Ariège.

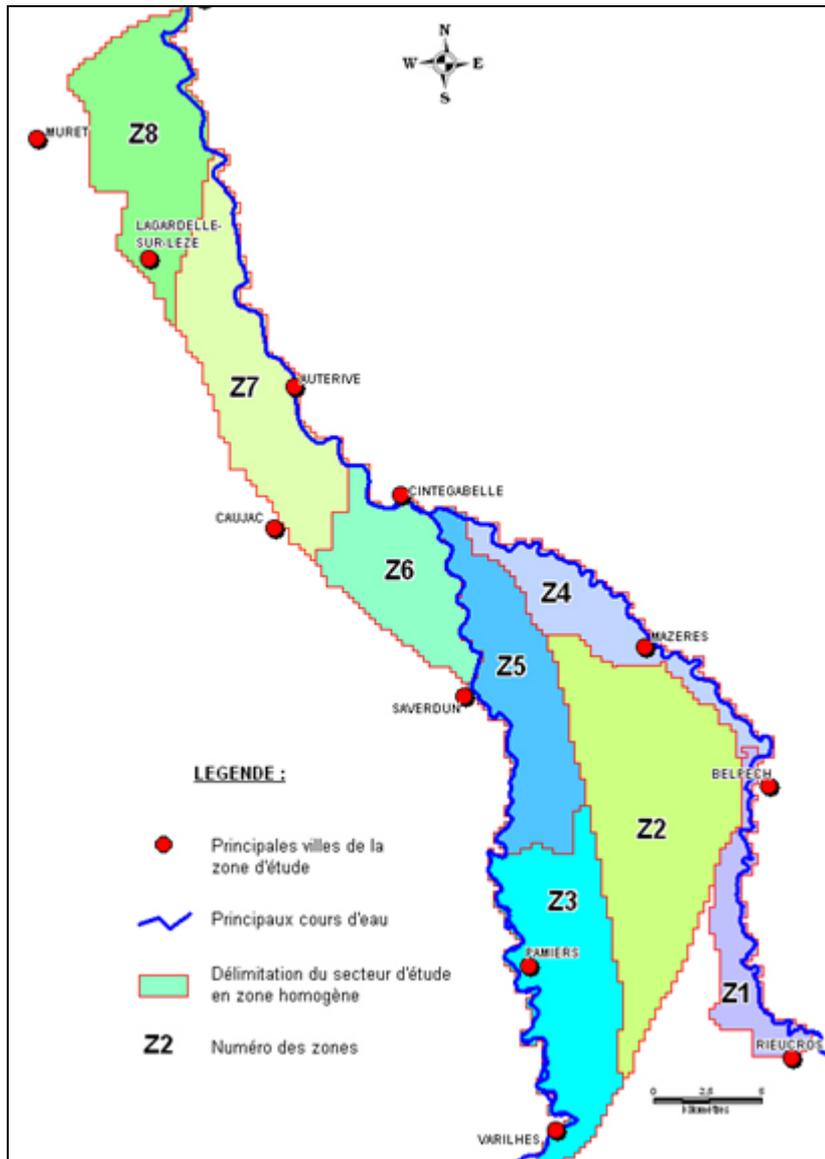


Illustration 72 - Zones de gestion de la nappe alluviale de l'Ariège

#### 6) Simulations de différents scénarios climatiques

Six scénarios climatiques ont été définis. Les valeurs mensuelles de pluie efficace associées aux six scénarios climatiques retenus ont été intégrées au modèle pour simuler les piézométries correspondantes. Six simulations différentes en régime transitoire ont donc été réalisées au pas de temps mensuel.

Six états piézométriques simulés pour la fin du mois d'avril, avant le début de la période d'irrigation des cultures, sont ainsi générés.

Les volumes prélevables pendant la période d'irrigation (de mai à septembre) sont définis en soustrayant ces six états piézométriques simulés à celui de référence (préservant les DOE).

## 4.2.2. Modèle global

On expose ci-dessous le principe de ces simulations réalisées avec le logiciel Tempo du BRGM.

### 4.2.2.1. Principe des simulations avec le logiciel TEMPO

1) La prévision des débits à l'exutoire du bassin est faite en introduisant comme entrée supplémentaire (outre la pluie et l'ETP) les niveaux mesurés sur un piézomètre représentatif de la nappe, ceci pour obtenir la fonction de transfert permettant de relier le niveau de la nappe au débit à l'exutoire (illustration 73).

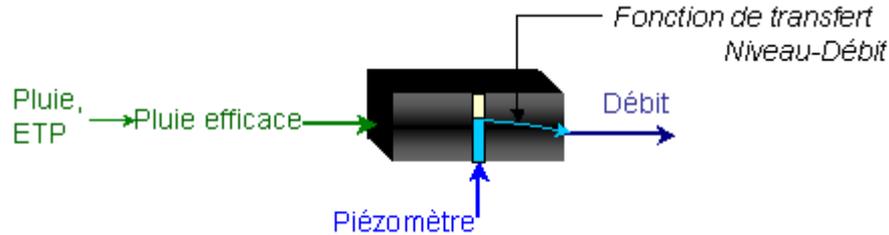


Illustration 73 - Modélisation pluie-débit avec introduction de niveaux piézométriques

2) A la phase de calage succède la phase de prévision des débits du cours d'eau, les valeurs étant simulées pour différents quantiles.

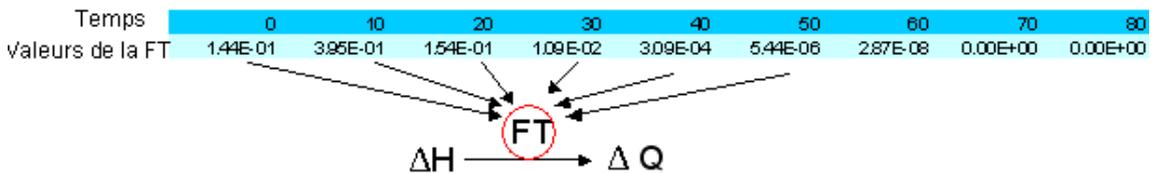
3) On se fixe un "débit objectif" à respecter : Débit Objectif d'Etiage (DOE) ou Débit de Crise (DCR).

On se donne un plan de répartition des prélèvements en nappe sur la saison d'irrigation, divisée en période (mois, décade, ...), par exemple:

Période 1	Période 2	Période 3	Période 4	Période 5
10 %	20%	20%	25%	25%

4) Pour expliquer le processus de calcul, supposons que les rabattements induits par les prélèvements soient connus.

La fonction de transfert "Niveau de nappe-Débit", issue de la phase de calage, permet de calculer l'impact sur les débits du cours d'eau des rabattements dus aux pompages:



Un rabattement  $\Delta H$  sur une période de temps  $\Delta t$  induira une diminution  $\Delta Q$  du débit à l'exutoire (illustration 74). Cette diminution du débit se fera avec un temps retard plus ou moins important suivant la "réactivité" de la nappe.

Connaissant les débits non "influencés" du cours d'eau (ceux issus de la prévision, pour différentes fréquences), il est alors possible d'en soustraire à chaque période  $p_i$  (et pour chaque fréquence) les baisses  $\Delta Q_i$  calculées et donc de vérifier si les objectifs de débits (DOE ou DCR) sont respectés ou non.

Si  $Q_i - \Delta Q_i < Q_{obj}$ , alors le plan de gestion des prélèvements est à revoir à la baisse.

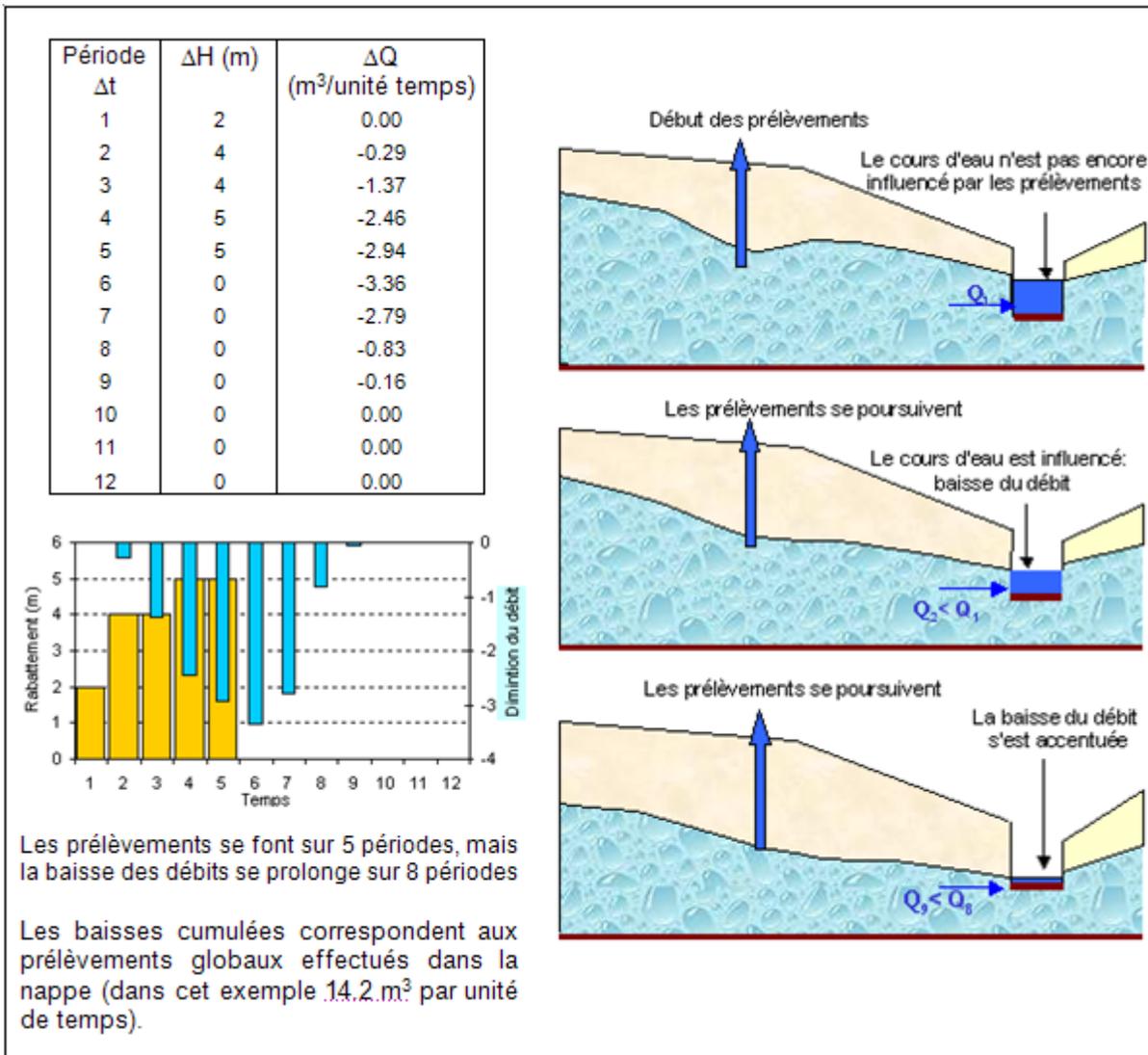


Illustration 74 - La fonction de transfert "niveau-débit" permet de calculer la baisse des débits à l'exutoire à partir des rabattements de niveaux dus aux pompages

5) En fait, les rabattements ne sont pas connus (et les volumes prélevables non plus). On dispose seulement :

- d'un débit objectif,
- d'un plan de répartition des prélèvements, des débits "non influencés" issus du calcul prévisionnel,
- de la fonction de transfert permettant de passer des niveaux aux débits.

La démarche décrite ci-dessus est alors inversée : le logiciel part du débit objectif, fixé comme contrainte sur toutes les périodes, et recherche, suivant un processus itératif automatique (procédure d'optimisation sous contrainte), les rabattements  $\Delta H_i$  admissibles sur chaque période. La suite des rabattements doit aussi être conforme, en %, au plan de répartition des prélèvements (par exemple, 10 % en période 1, 20 % en période 2, ...) puisqu'il y a proportionnalité entre prélèvement et rabattement induit. Chaque rabattement, considéré isolément, provoque une baisse de débit à l'exutoire, décalée et étalée dans le temps. Si le débit objectif est respecté, ces baisses correspondent au volume prélevable sur chaque période.

Il faut être prudent dans l'interprétation des volumes calculés.

Ces volumes peuvent être en effet:

- soit des volumes dont il faut déduire les volumes déjà prélevés si le calage du modèle de transfert s'est fait en contexte non influencé (ou très peu) ; dans ce cas, en effet, la fonction de transfert n'intègre pas les prélèvements et les prévisions volumiques faites sont globales.
- soit des volumes que l'on peut prélever en plus de ceux qui le sont déjà si le calage a tenu compte des baisses en utilisant des piézomètres influencés.

**Cette démarche n'étant pas spatialisée et les résultats dépendant de la qualité du calage, une bonne connaissance du contexte est indispensable.**

#### 4.2.2.2. Application à l'estimation des volumes disponibles dans le bassin Seine-Normandie.

L'étude, réalisée à la demande de la DIREN Ile-de-France, est présentée dans le rapport BRGM/RP-56690 (2008) "*Bassin Seine-Normandie : estimation des volumes disponibles pour les prélèvements. Compléments sur 38 bassins*". On reprend ci-dessous quelques éléments essentiels de ce rapport accompagnant la présentation des résultats, notamment les précautions à prendre pour les interpréter et les exploiter.

Ces volumes ont été calculés (comme décrit ci-dessus) avec la contrainte qu'un débit moyen mensuel sec de récurrence 5 ans (QMNA5) soit maintenu dans le cours d'eau:

- dans le cas d'une année dite "médiane" ;
- dans le cas d'une année dite "sèche", correspondant à une fréquence de non dépassement de 1 année sur 4 (fréquence cumulée de 0.25).

Ils ont été ensuite déduits d'une analyse fréquentielle par décade faite à partir des résultats de toutes les simulations du débit du cours d'eau (256 chroniques simulées sur 10 ans au pas de temps décadaire).

Si le calage du modèle de transfert s'est fait en contexte non influencé (ou très peu), la fonction de transfert "*niveau de nappe - débit du cours d'eau*" n'intègre pas les prélèvements et les prévisions volumiques faites sont globales. Pour connaître le volume réellement exploitable, il faut alors déduire les volumes déjà prélevés.

Si le calage a tenu compte des prélèvements, les volumes déjà prélevés pour l'irrigation en étiage sont à ajouter au volume exploitable, pour obtenir le volume global.

Le rapport précise aussi que les volumes calculés doivent plutôt être considérés comme des "indicateurs volumiques", car de nombreux facteurs ne sont pas explicitement pris en compte, en particulier la distribution géographique des prélèvements, puisque la modélisation est globale, et la répartition temporelle des prélèvements, mal connue.

Dans le cas fréquent où les forages sont situés à proximité des cours d'eau, l'estimation basée sur le critère de non franchissement en moyenne du débit quinquennal sec mensuel peut s'avérer insuffisante. En effet, il est possible que des franchissements de ce seuil soient observés dans la réalité alors que le modèle prévoit encore une certaine ressource disponible. C'est par exemple le cas de l'Essonne à Boulancourt, du Puisieux et de la Bezonde. Par ailleurs, dans le cas de plusieurs nappes superposées, la répartition des prélèvements et des apports à la rivière par les différentes nappes est essentielle et non prise en compte par TEMPO. De ce point de vue, la méthode sera d'autant plus adaptée que l'aquifère est unique, exploité de manière homogène spatialement. À l'inverse, les estimations sur des cours d'eau drainant plusieurs formations aquifères, dont certaines sont exploitées et pas d'autres, sont à confronter avec une analyse hydrogéologique.

L'illustration 75 localise les bassins versants étudiés et l'illustration 76 les classe suivant l'importance du volume exploitable pour une année médiane et une année de fréquence de non dépassement de 0.25 (année "sèche", 1 année sur 4).

L'illustration 77 propose une cartographie des bassins versants en fonction de la lame d'eau disponible pour les prélèvements en année sèche et sur l'illustration 78 les volumes disponibles ont été rapportés aux valeurs de recharge des nappes fournies par le modèle MODCOU (PIREN Seine).

**Remarque : les volumes ainsi calculés ne garantissent pas nécessairement le "bon état écologique" des masses d'eau.**

...

Les indicateurs piézométriques. Un outil dans la gestion des hydrosystèmes.

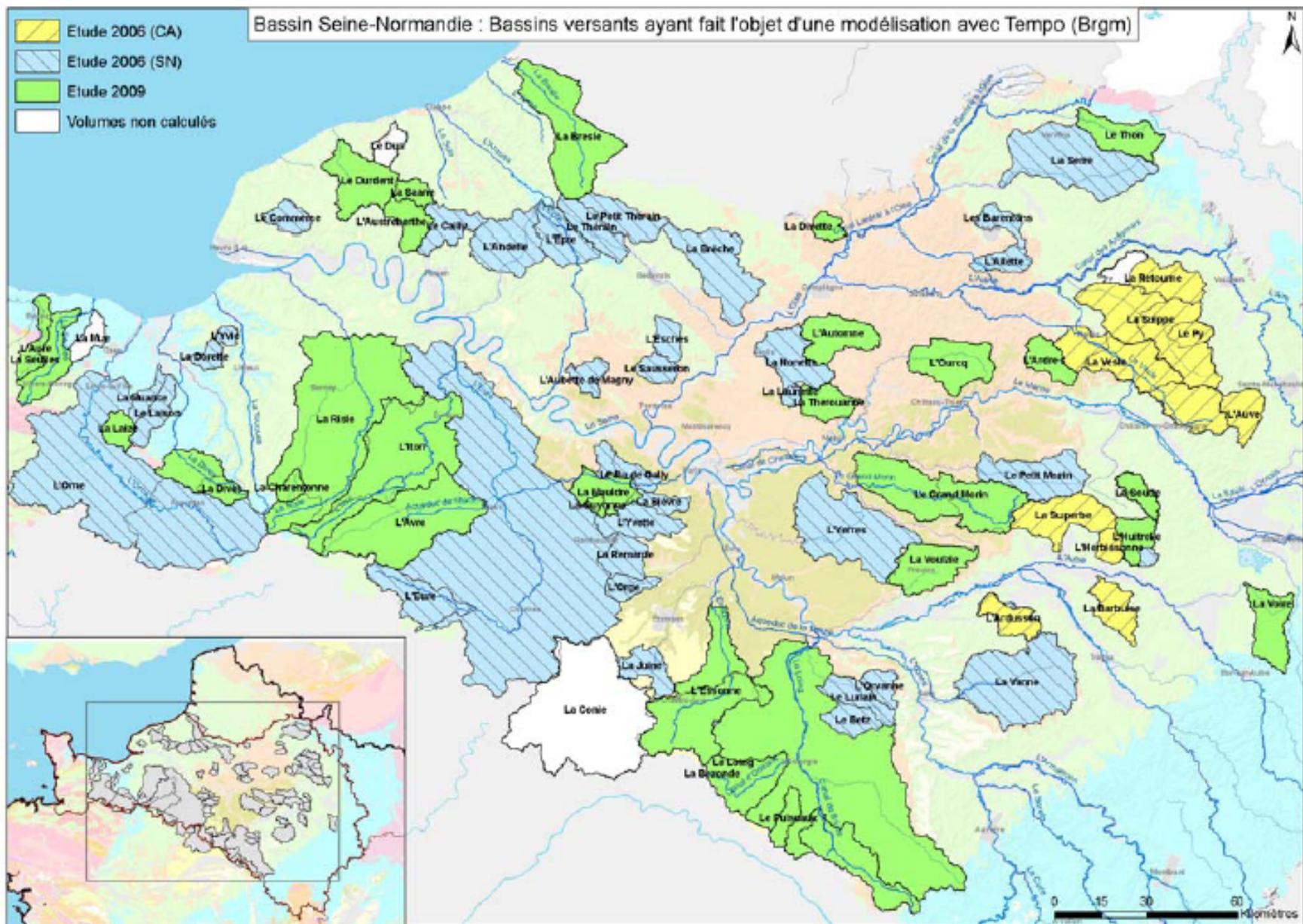


Illustration 75 – Bassins versants étudiés pour le calcul des volumes exploitables

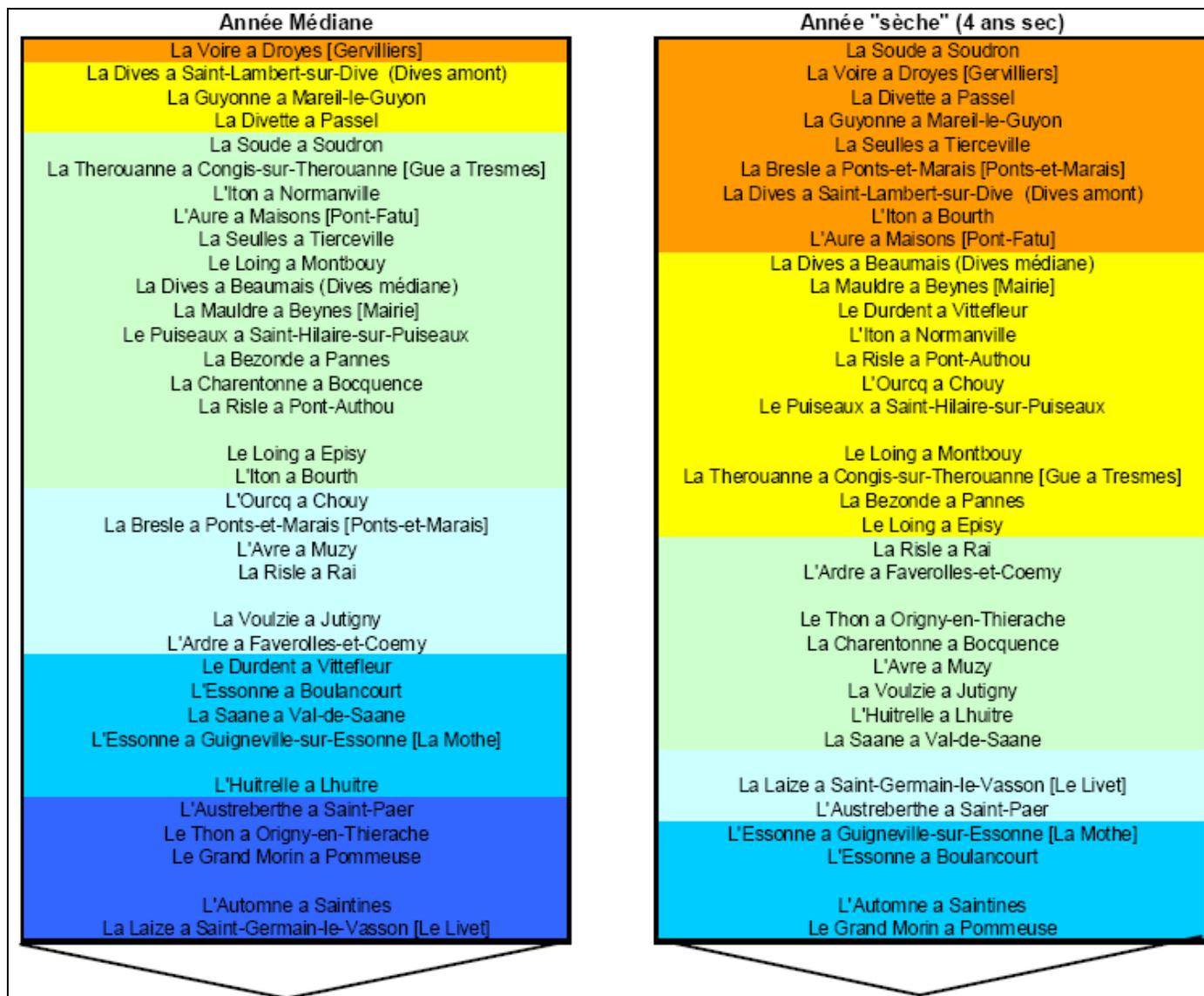


Illustration 76 – Classification des bassins en fonction du volume exploitable

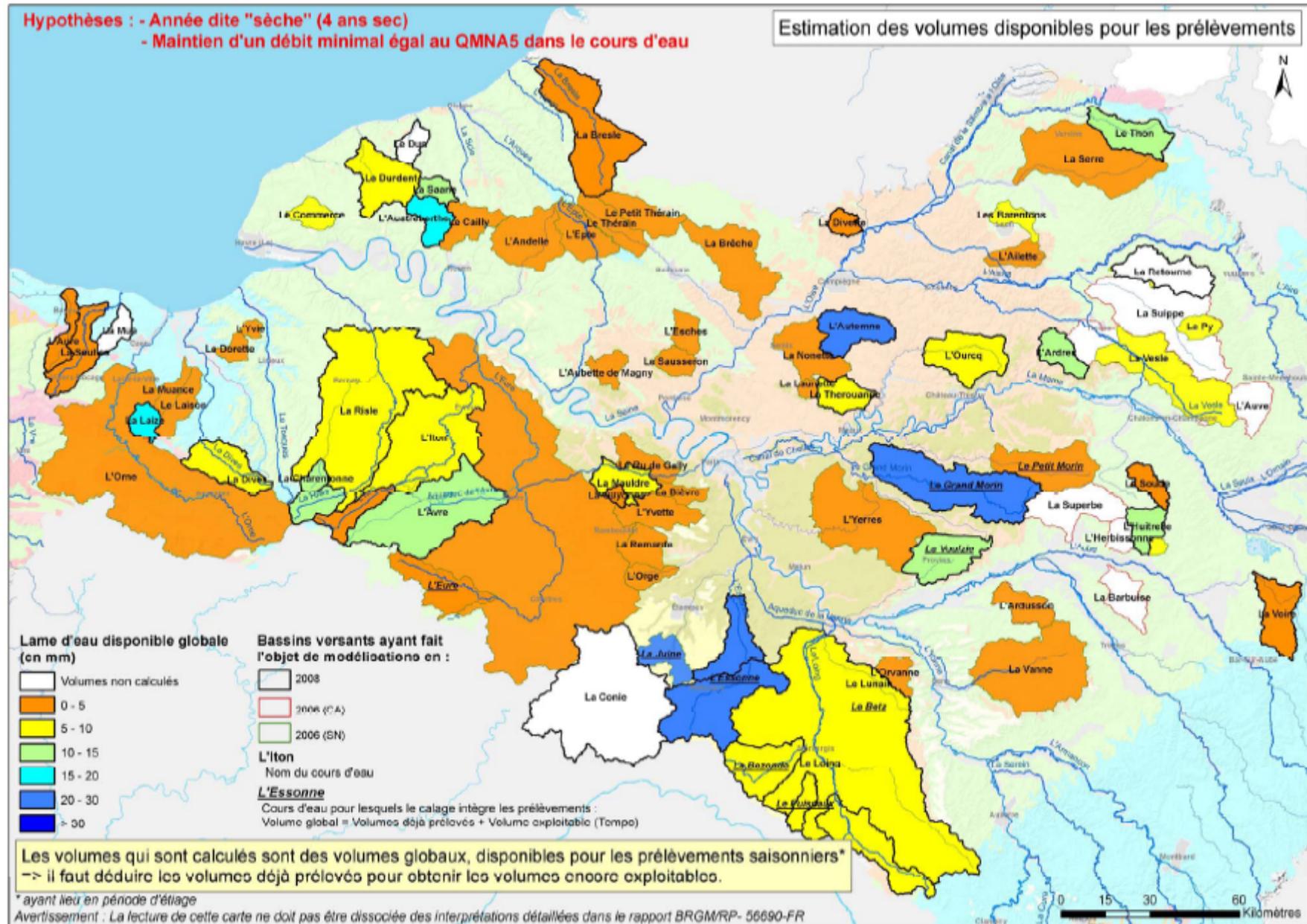


Illustration 77- Lame d'eau disponible pour les prélèvements par bassin versant en année "sèche" ( période de retour 1 année sur 4)

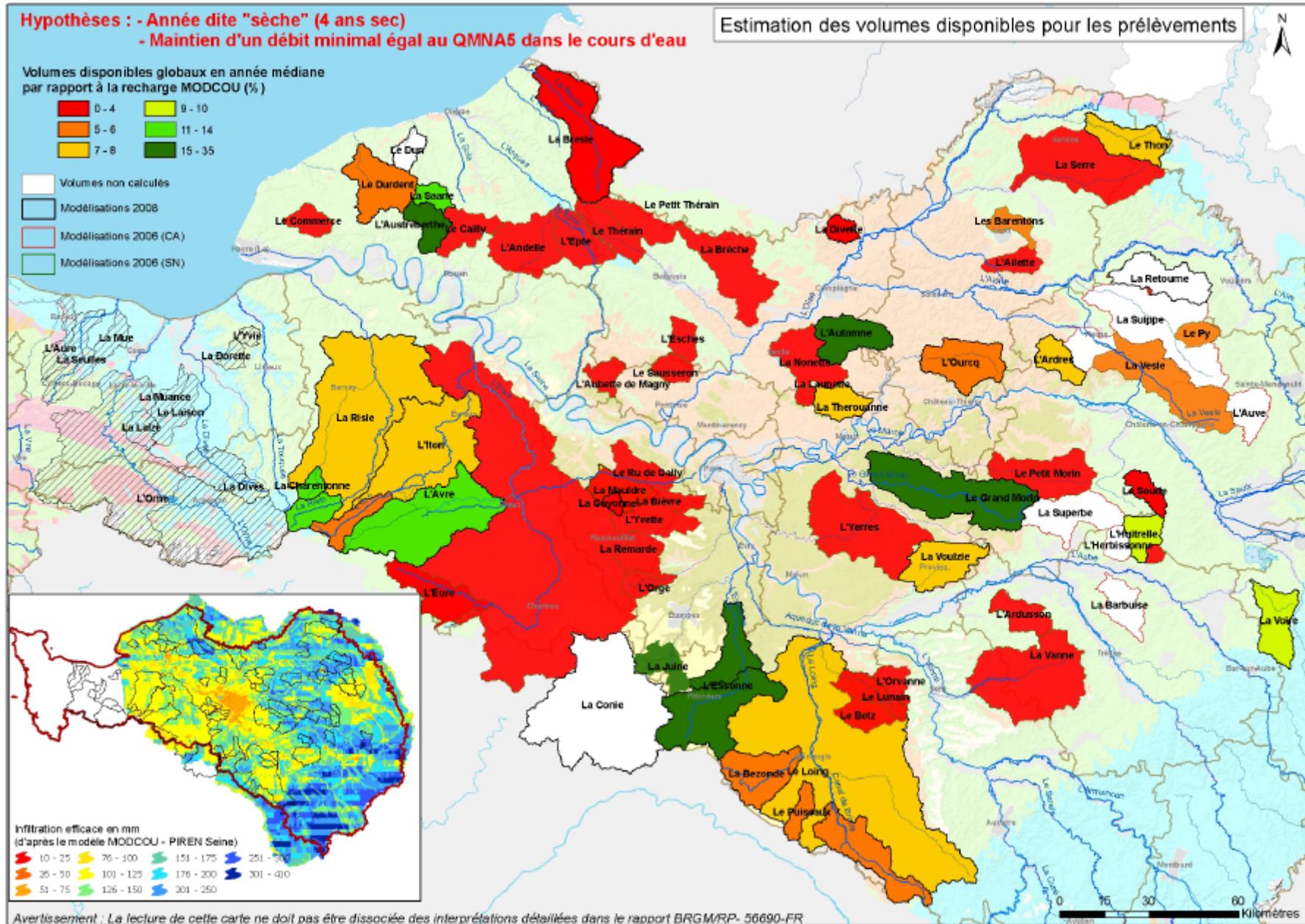


Illustration 78 -Volumes disponibles globaux rapportés aux valeurs de recharge issus du modèle MODCOU (année "sèche")  
BRGM/RP-58139-FR

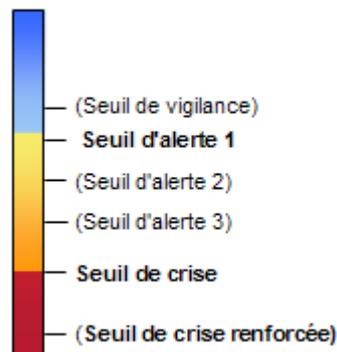
## 5. Conclusion

Cette étude, au travers des exemples cités ou traités, montre que différentes stratégies doivent être mises en œuvre selon le contexte hydrogéologique pour aboutir à la détermination de *seuils de gestion* associés à un indicateur piézométrique.

Dans la partie introductive de ce rapport, un indicateur piézométrique a été défini comme *une variable de contrôle de l'état d'une ressource en eau souterraine soumise à des règles de gestion et associée à un piézomètre (ou plusieurs) de suivi de l'évolution de cette ressource. L'indicateur est caractérisé par une gamme de valeurs particulières, ou seuils de gestion, qui correspondent à :*

- *un objectif de gestion : par exemple une piézométrie objectif d'étiage (POE),*
- *un (ou plusieurs) niveaux d'alerte (PSA), destinés à anticiper une situation de crise,*
- *un seuil de crise (PSC).*

Selon l'acuité du problème, on peut renforcer la surveillance en introduisant un seuil de vigilance, un deuxième, voire un troisième seuil d'alerte et un seuil de crise renforcée, d'où un indicateur pouvant comprendre 3 à 6 seuils de gestion :



Cette gradation, et l'analyse fréquentielle qui conduit souvent à la mettre en place, est commune et se retrouve dans d'autres pays sous des formes proches (illustrations 80 et 81) avec toujours les notions d'alerte et de crise.

Ce type de gradation (en substituant à la piézométrie objectif d'étiage une *piézométrie objectif de gestion*) peut aussi s'appliquer aux aquifères à nappe captive, mais avec des modalités de gestion bien sûr différentes.

### Modalités de gestion

#### Nappe libre en relation avec un cours d'eau imposant son seuil de gestion

D'une façon générale, la recherche de seuils de gestion dans un bassin souterrain donné en relation avec un cours d'eau nécessite une analyse croisée des précipitations, des débits et des niveaux sur une période la plus longue possible. La recherche de liaisons entre niveaux et débits n'est pas toujours évidente.

Dans le cas de nappes contribuant au soutien d'étiage d'un cours d'eau, l'existence de contraintes à respecter sur les cours d'eau (DOE, DCR, seuils piézométriques particuliers) implique de définir des indicateurs piézométriques en cohérence avec ces

Ground Water Levels – The County currently monitors 1 real-time Blue Ridge Shadows Observation Well, USGS Local Number 45V 3 well as part of the long-term monitoring network. Ground water monitoring wells will be used to monitor shallow ground water responses to drought conditions. Measured ground water levels will be compared with historic level statistics for the period of record. Measured ground water levels above the 25th percentile for all historic levels will be defined as normal conditions. Measured ground water levels between the 10th and 25th percentiles for all historic levels will be defined as drought watch conditions. **Measured ground water levels between the 5th and 10th percentile for all historic levels will be defined as drought warning conditions. Measured ground water levels below the 5th percentile for all historic levels will be defined as drought emergency conditions.** Additional data may be available from the groundwater monitoring network established and maintained by USGS. USGS is working with the County to expand the data network in the FY2008-2009.

Illustration 79 – Indicateurs piézométriques définis par le Warren County , en Virginie (USA)  
(Réf. 4.12)

TYPES OF MITIGATION MEASURES							
Indicator	1-0.5	0.5-0.4	0.4-0.3	0.3-0.2	0.2-0.15	0.15-0.1	0.1-0
Status	Normal	Pre-alert		Alert		Emergency	
Objective	Planning	Information-control		Conservation		Restrictions	
Type of measure	Strategic			Tactics		Emergency	

Illustration 80 – Système d'alerte dans le plan sécheresse en Espagne  
Source: Estrela T., Vargas E. (Ref. 4.2)

contraintes. Dans certains cas, il sera alors possible que le débit que l'on s'autorise à franchir 1 année sur 5 impose une contrainte plus forte sur la nappe, avec un niveau de fréquence plus élevée à respecter (par exemple non transgression 2 années sur 5).

Par ailleurs, il existe plusieurs modalités de calcul du DOE et, selon ce qui a été calculé, les conséquences en termes de gestion de l'hydrosystème seront différentes, non seulement pour le cours d'eau bien sûr, mais aussi pour la nappe associée, sachant qu'une contrainte qui pourrait être imposée à celle-ci, dans sa contribution au soutien d'étiage du cours d'eau, sera le respect du DOE.

Le DOE pourra donc être plus ou moins contraignant pour les usagers ou plus ou moins protecteur pour l'hydrosystème.

#### Nappe libre sans contrainte de gestion associée

Lorsqu'il n'y a pas de contraintes strictes à respecter, le problème de la détermination de seuils de gestion est moins évident à traiter et il serait souvent trop strict de fixer comme règle générale une piézométrie d'objectif à respecter de fréquence quinquennale "sèche".

#### Indicateurs piézométriques et volumes prélevables

Le calcul de volumes exploitables nécessite de nombreuses données, dont bien sûr les prélèvements. On peut l'aborder sans modèle hydrodynamique (comme dans l'étude Calligée présentée dans ce rapport), en recherchant une relation entre prélèvements et niveaux et avec la contrainte de respecter une piézométrie d'objectif préalablement définie.

Néanmoins, un modèle spatialisé reste la voie la plus sûre pour garantir, d'une part une cohérence spatiale entre plusieurs indicateurs piézométriques contrôlant un même bassin, et d'autre part une cohérence des seuils de gestion avec les volumes prélevables. Un modèle global permettrait aussi d'obtenir, indirectement, la piézométrie à respecter (valeur et période) pour que le soutien à l'étiage soit possible et soit en conformité avec les DOE et DCR. Mais la méthode suppose une certaine homogénéité des prélèvements à l'échelle du bassin étudié (qui ne doit pas être de taille trop grande pour que l'on puisse trouver un piézomètre représentatif).

#### Exploitation des indicateurs

Les indicateurs piézométriques qui sont déjà opérationnels sur certaines nappes ont fait l'objet de discussions avec les acteurs concernés, ont été testés et parfois révisés en fonction des retours d'expérience. Cette gestion concertée de la ressource est d'ailleurs préconisée par les SDAGE 2010-2015:

*" Lorsqu'elle n'existe pas déjà, une structure de concertation réunissant l'ensemble des usagers sur le périmètre pertinent peut être mise en place à l'initiative du préfet ou d'un porteur de projet (SAGE, contrat de nappe...). Cette structure vise à promouvoir et favoriser une gestion collective économe et partagée entre les activités légalement exercées" (Disposition 109 du SDAGE du bassin Seine Normandie - Mettre en œuvre une gestion collective pour les masses d'eau ou parties de masses d'eau souterraines en mauvais état quantitatif)*

*" Les collectivités et leurs groupements, l'Etat et ses établissements publics suscitent, initient et accompagnent des démarches de gestion concertée des eaux souterraines*

qui pourront le cas échéant aboutir à un SAGE" (Orientation C13 du SDAGE du bassin Adour-Garonne).

Par ailleurs, comme le souligne le texte ci-dessous (illustration 81), relatif à la mise en place d'indicateurs par le New Jersey Department of Environmental Protection (DEP), les seuils de gestion mis en place ne doivent pas être considérés comme des "déclencheurs" provoquant automatiquement un changement de gradation dans le système d'alerte accompagné de mesures de restriction.

Les franchissements de seuils doivent préalablement faire l'objet d'une évaluation du risque en fonction du contexte climatique en cours.

The New Jersey Department of Environmental Protection (DEP) devised a set of drought indicators to monitor regional water-supply sources. The indicators are designed to: (1) integrate large amounts of data about water-supply sources; (2) communicate to the public and decision makers accurate information; (3) be reasonable; (4) be based on real-time data; and (5) be distributed quickly over the Internet.

There are drought indicators for precipitation, streamflow, reservoir levels, and ground-water levels. Each is assigned to one of four conditions: (1) near or above normal, (2) moderately dry, (3) severely dry, or (4) extremely dry. New Jersey is divided into six drought regions (fig. 1) and indicators are evaluated for the water-supply sources important to each (fig. 2). These are updated weekly during dry periods and the results are available on the Internet.

**These indicators are not triggers that automatically cause a change in drought status. DEP water-supply professionals evaluate them with best professional judgment and input from purveyors and recommend an appropriate drought status for each region (normal, watch, warning or emergency).** The DEP Commissioner has the authority to declare drought watches and warnings, but only the Governor can declare or lift a drought emergency.

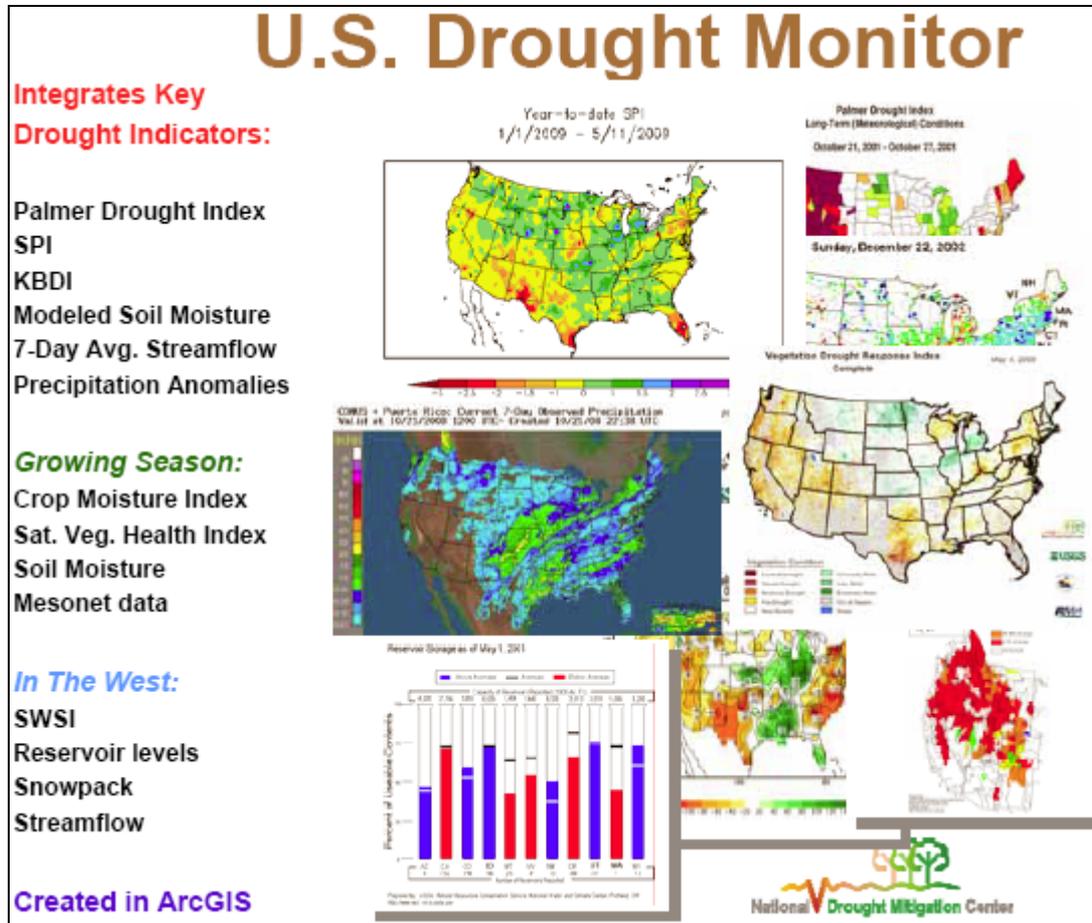
*Illustration 81 – Exemple d'indicateurs mis en place par le New Jersey Department of Environmental Protection.*

### Intégration des indicateurs piézométriques dans des "plans sécheresse"

Il existe une abondante littérature consacrée à la sécheresse et aux indicateurs (cf. quelques références en bibliographie). Les indicateurs piézométriques pourraient s'intégrer dans des systèmes d'alerte plus généraux tels les plans sécheresses en association avec des indicateurs climatiques, hydrologiques, voire agronomiques (réserves en eau du sol). L'illustration 82 montre un exemple de combinaisons de tels indicateurs utilisés par le *National Drought Mitigation Center* (USA). Des précisions sur les indices utilisés pourront être trouvées sur le site de cette structure:

<http://drought.unl.edu/whatis/indices.htm>

...



A mesonet is a network of weather stations that observe weather phenomenon ranging from 1 mile to 150 miles.

*Illustration 82 –Combinaisons d'indicateurs mis en place par le "National Drought Mitigation Center (USA)"*

Source: Svoboda M. – 2009 (réf. 4.10)



## 6. Bibliographie

### 1. Etudes BRGM sur indicateurs et volumes prélevables

#### Bassin Seine-Normandie

ALLIER D., ASFIRANE F., WUILLEUMIER A. (2008) - Bassin Seine Normandie. Estimation des volumes disponibles pour les prélèvements. Compléments sur 38 bassins versants. BRGM/RP-56690-FR, Novembre 2008.

PINAULT J.L., ALLIER D., CHABART M., PANNET P., PERCEVAL W. (2006) - Prévision des volumes d'eau exploitables de 10 bassins versants en champagne crayeuse. BRGM/RP-55087-FR.

PINAULT J.L., ALLIER.D., VERJUS P. (2006) - Bassin Seine-Normandie. Estimation du volume disponible aux prélèvements de 45 petits bassins versants. BRGM/RP-55232-FR.

PINAULT J.L., ARNAUD L. (2006) - Analyse critique des données piézométriques et prévision de niveaux non influencés en Haute-Normandie. BRGM/RP-54628-FR.

NORMAND M., PINAULT J.L., SEGUIN J.J., VERNOUX J.F. (2005) – Assistance au plan sécheresse en Ile de France. Analyse critique des données piézométriques et prévision de niveaux non influencés. BRGM/RP-54221-FR.

#### Région Poitou-Charentes

BICHOT F., LAVIE J., DEQUIDT D., THINON-LARMINACH M. (2008) - Analyse des chroniques piézométriques et hydrologiques avec le logiciel TEMPO pour la gestion des prélèvements en nappe. Phase 3 - Actualisation des modèles précédents - Traitement des bassins versants de la Vienne, du Thouet/Sèvre nantaise, du Sud des Charentes. BRGM/RP-56481-FR.

BICHOT.F., LAVIE.J., PINAULT.J.L., THINON.LARMINACH.M. – 2008 - Analyse des chroniques piézométriques et hydrologiques avec le logiciel TEMPO pour la gestion des prélèvements - Phase 2 : Bassin versant de la Charente. BRGM/RP-55485-FR

BICHOT.F. - 2007- Analyse des chroniques piézométriques autour du Marais Poitevin en Vendée en vue de l'établissement de POE et PCR. Contribution au groupe d'experts. BRGM/RP-55349-FR

BICHOT F., LAVIE J., PINAULT JL., THINON-LARMINACH M. (2007) – Recherche d'indicateur piézométriques pour la gestion des prélèvements en nappe. Phase 1 : bassins de la Dive du Nord, du Clain de la Sèvre Niortaise, de la Boutonne et de la Seudre. BRGM/RP-54569-FR.

ROUXEL E., BICHOT F., PINAULT J.L., LERECULEY A. (2007) - Recherche d'indicateurs de gestion pour les eaux souterraines - Bassins vendéens au Nord du Marais-Poitevin. BRGM/RP-55505-FR.

#### Région Aquitaine

GOMEZ E., SCHOMBURGK S., WUILLEUMIER A. – 2010 - Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine – Piézométries d'objectif d'étiage et de crise – Module 3 – Année 5. Rapport à paraître.

GOMEZ E., PEDRON N. – 2009 - Utilisation du Modèle Nord-Aquitain (MONA) pour appuyer la définition des volumes prélevables dans les aquifères profonds du Nord du Bassin aquitain. BRGM/RP-57878-FR.

GOMEZ E., PEDRON N. WINCKEL A., CORBIER P. (2007) – Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine – Piézométries d'objectif d'étiage et de crise – Module 3 – Année 4. BRGM/RP-56615-FR.

SAPLAIROLES M., BUSCARLET E. - 2009 –Gestion des systèmes aquifères alluviaux dans le bassin Adour-Garonne - Modélisation de la nappe alluviale de l'Ariège et de l'Hers Vif. Année 3. BRGM/RP-57184-FR.

SEGUIN J.J. – 2002 - Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux "Nappes profondes de Gironde". Orientations de gestion et propositions d'indicateurs piézométriques pour le tableau de bord du SAGE. BRGM/RP-51777-FR

WINCKEL A., SEGUIN J.J., PEDRON N. (2005) Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine – Piézométries objectif d'étiage et de crise – Module 3 – Année 2. BRGM/RP-53658-FR.

WINCKEL A., CORBIER P., PEDRON N. (2006) – Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine – Piézométries d'objectif d'étiage et de crise – Module 3 – Année 3. BRGM/RP-55241-FR.

WUILLEUMIER A., PEDRON N. – 2009 - Evaluation des ressources en eaux souterraines disponibles du bassin versant de la Lizonne (24). BRGM/RP-57836-FR.

#### Région Nord Pas-de-Calais

ALLIER D., PUTOT E., PETIT V. (2008) - Bassin Artois-Picardie. Mise en œuvre d'un outil de prévision des volumes disponibles pour les prélèvements sur 13 bassins versants. BRGM/RP-56212-FR.

#### Région Rhône-Alpes

MARTIN J.C., PUTOT E., BRENOT A. (2008) – Élaboration de règles de gestion volumique en eau de la nappe de Bièvre-Valloire. Phase 2 - Modélisation globale des écoulements souterrains. Phase 3 - Élaboration de règles de gestion volumique. BRGM/RP-56651-FR.

## **2. Autres références en France**

1] Aquilina L., Ladouche B., Bakalowicz M., Schoen R., Petelet E. -1999 - Caractérisation du fonctionnement des systèmes karstiques nord-montpellierains. Synthèse générale Rapport BRGM R40746.

2] Bassin Rhône-Méditerranée-Corse – 1999- Connaissance et gestion des ressources en eaux souterraines dans les régions karstiques. Guide technique n°3 - Juin 1999.

3] Billault P., Verley F. – 2005 – Problématique de gestion des nappes libres du Jurassique à l'étiage: cas de la Champagne berrichonne et du Poitou. Bulletin d'information des géologues du bassin de Paris. Actes du colloque "Géologie et hydrogéologie du bassin de Paris". Vol. 42, n°3, Sept. 2005.

4] Billault P., Cherier G., Verjus Ph., Verley F. – 2005 – Piézométrie et gestion de la nappe des Calcaires de Beauce. Bulletin d'information des géologues du bassin de Paris. Actes du colloque "Géologie et hydrogéologie du bassin de Paris". Vol. 42, n°3, Sept. 2005.

- 5] Calligée - 2008 - Phase 3: étude d'un cadre de gestion des nappes du Sud-Vendée compatible avec les enjeux écologiques et économiques. Rapport N08-85138C.
- 6] Collectif – 2007 - Rapport du groupe d'experts mis en place à la demande du ministère chargé de l'écologie sur les niveaux d'eau dans le Marais poitevin, la piézométrie des nappes de bordure et les volumes prélevables pour l'irrigation dans le périmètre des SAGE du Lay, de la Vendée et de la Sèvre-Niortaise et du Marais poitevin.
- 7] Documents du SAGE "Nappes profondes de Gironde" (approuvé le 25 Nov. 2003). Téléchargeable à partir du site: <http://www.sage-nappes33.org/>
- 8] Dörfliger N. et al.- 2010 - Guide méthodologique. Les outils de l'hydrogéologie karstique pour la caractérisation de la structure et du fonctionnement des systèmes karstiques et l'évaluation de leur ressource. Rapport BRGM/RP-58237-FR
- 9] Grissac B. de, Laroque M., Razack M. -1998 - Le karst de la Rochefoucauld. Un exemple de gestion prévisionnelle d'un aquifère karstique. In: Pour une gestion active des ressources en eau d'origine karstique. Séminaire national 27,28 et 29 novembre 1996 - Montpellier. Rapport BRGM R 40126, 1998.
- 10] Lastennet R., Puig J.M., Emblanch C., Blavoux B. - 1995 – Influence de la zone non saturée sur le fonctionnement des systèmes karstiques. Mise en évidence dans les sources du Nord-Vaucluse. Hydrogéologie, n°4, 1995.
- 11] Pellerin F.M. – 2004 – Piézométries objectif d'alerte et de crise et débits objectif d'alerte et de crise, la seule combinaison protectrice des grands ensembles de marais en période d'étiage. Exemple du Marais poitevin. Note technique rédigée dans le cadre du SAGE "Sèvre Niortaise et Marais poitevin".
- 12] Smail Slimani et al. – 2009 - Combined climatic and geological forcings on the spatio-temporal variability of piezometric levels in the chalk aquifer of Upper Normandy (France) at pluridecennial scale. Hydrogeology Journal, published on line 3 July 2009.
- 13] Vernoux J.F., Lions J., Petelet-Giraud E., Seguin J.J. (2009) – Synthèse bibliographique sur les relations entre eau souterraine et eau de surface en lien avec la DCE. Rapport BRGM/RP-57044-FR
- 14] Verjus Ph. - 2006 - Prise en compte des nappes d'eau souterraines dans le plan sécheresse. Colloque international - Gestion des grands aquifères - 30 mai-1er juin 2006, Dijon, France.
- 15] Verjus Ph., Reynaud A., Biau E. – 2008 – Gestion de la nappe de Champigny (Ile-de-France). Géologues, n° 159, Déc. 2008.

### 3. Thèses

- 1] Abi-Zeid, I. -1997- La modélisation stochastique des étiages et de leurs durées en vue de l'analyse du risque. Thèse INRS-Eau (Université du Québec) – ENGREF.
- 2] Christin F. – 2008 - Etude de la modélisation hydrodynamique de surface et hydraulique souterraine et de leur couplage dans un but d'aider à la gestion des hydrosystèmes aménagés. Thèse Agro-Paris-Tech.
- 3] Garry B. - 2007 - Etude des processus d'écoulements de la zone non saturée pour la modélisation des aquifères karstiques. Thèse Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse.
- 4] Mangin A. - 1975 - Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse Université de Dijon.

5] Marsaud B. - 1996 - Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir de résultats expérimentaux. Thèse Université Paris 11, Orsay.

6] Renard B. – 2006 - Détection et prise en compte d'éventuels impacts du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques en France. Thèse INP Grenoble.

#### **4. Quelques références internationales (parmi de très nombreuses) sur les "plans sécheresse" et les indicateurs associés.**

1] Fowler H.J., Kilsby C.G., O'Connell P.E. – 2003 - Modeling the impacts of climatic change and variability on the reliability, resilience and vulnerability of a water resource system. *Water Resources Research*, 39(8).

2] Estrela T., Vargas E. – 2008 - Drought Management Plans in the Spanish River Basins. *Options méditerranéennes, série A n° 80*.

3] Hashimoto T., Loucks D. P., Stedinger J. -1982 - Reliability, resilience and vulnerability for water resources system performance evaluation. *Water Resources Research*, 18(1).

4] Hoffman J., Domber S. – 2003 - New Jersey Water-Supply Drought Indicators. New Jersey Geological Survey.

5] Kjeldsen T.R., Rosbjerg D. – 2004 - Choice of reliability, resilience and vulnerability estimators for risk assessments of water resources systems. *Hydrological Sciences–Journal*, 49(5) October 2004.

6] Hayes M. J. - What is Drought? Drought Indices - National Drought Mitigation Center. <http://drought.unl.edu/>

7] Peters E., Van Lanen H.A.J., Forfs P.J.J.F., Bier G. – 2005 - Drought in groundwater. Drought distribution and performance indicators. *Journal of Hydrology* 306 (2005).

8] Schreffler C.L. – 1997 - Drought-trigger groundwater levels and analysis of historical water levels trends in Chester County, Pennsylvania. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. *Water-Resources Investigations. Report 97-4113*.

9] Steinemann A. C. – 2006 - Developing Multiple Indicators and Triggers for Drought Plans. *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol. 132, No. 3, May/June 2006.

10] Svoboda M. - 2009 - Sharpening the Global Focus on Drought. An NDMC Overview Monitoring Program Area Leader National Drought Mitigation Center. University of Nebraska-Lincoln. International Seminar on Drought and Climate Risk Management Conference, La Serena, Chile, May 27-28, 2009.

11] 7th Framework Programme. Theme 6. Environment (Including Climate Change). Xerochore, an exercise to assess research needs and policy choices in areas of drought. Background Document II (D. 5.1.). Synthesis report on Management and Policy Options for Conference on Drought. Work Package 5.

12] Warren County Drought Response Plan –2008 - Warren County, Virginia  
<http://www.docstoc.com/docs/24783030/DROUGHT-RESPONSE-PLAN>

## **Annexe 1 - Compléments théoriques**



## 1. Période de retour

### 1.1. Définition

Pour une variable  $X$  qui évolue dans le temps, on définit classiquement une période de retour comme suit : "une valeur  $x$  de la variable  $X$  a une période de retour  $T$  si le temps séparant deux dépassements successifs de  $x$  vaut **en moyenne**  $T$ ", ce qui pourrait aussi se formuler ainsi : "une valeur  $x$  de période de retour  $T$  ans est dépassée **en moyenne** tous les  $T$  ans" et l'on peut associer à la période de retour une probabilité de non dépassement.

Si  $P$  est la probabilité de non dépassement, on définira une période de retour par :

$$T = \frac{1}{1 - P(X < x)} \quad \text{si } P > 0.5$$
$$T = \frac{1}{P(X < x)} \quad \text{si } P < 0.5$$

Par exemple:

- une valeur  $h$  d'une série piézométrique  $H(t)$  de probabilité de non dépassement de 0.1 a une période de retour de 10 ans (décennal "sec").
- une valeur  $h$  de probabilité de non dépassement de 0.9 a aussi une période de retour de 10 ans, mais en décennal "humide".

### Remarque

En fait, si le phénomène décrit par la variable  $X$  n'est pas stationnaire, la période de retour sera elle aussi dépendante du temps et il n'est plus possible de relier directement (comme ci-dessus) la période de retour à la probabilité de non dépassement.

Cet aspect est bien détaillé dans la thèse de Benjamin Renard (2006) : "*Détection et prise en compte d'éventuels impacts du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques en France*" (thèse INP Grenoble).

Dans la présente étude, les périodes de retour ont toujours été calculées en supposant la stationnarité des séries de données.

### 1.2. Méthode de calcul

Dans une chronique de niveaux de nappe ou de débits de cours d'eau (avec un pas de temps mensuel, décadaire ou journalier), on souhaite connaître les périodes de retour d'une variable caractérisant un "événement" particulier, par exemple le niveau de la nappe en période de basses eaux sur un mois donné (ou une décade).

Dans la chronique de plusieurs années, on extrait pour chacune des années les valeurs de la variable considérée (si l'on s'intéresse à des valeurs mensuelles ou décadaires et si la chronique est au pas de temps journalier, on calcule préalablement une moyenne mensuelle ou décadaire).

Avec la série de valeurs ainsi constituée, on construit une fonction de répartition en classant par ordre croissant les valeurs et en calculant les fréquences de non dépassement (fréquences cumulées) avec une formule du type :

$$\hat{F}(x_i) = \frac{i - a}{n + b}$$

n est le nombre de valeurs, a un paramètre pouvant prendre les valeurs 0, 0.5 ou 1 et b un paramètre de valeur 0 ou 1.

En hydrologie, on prend souvent a=0.5 et b=0 ("formule de Hazen", qui permet d'obtenir une symétrie autour de la médiane):

$$\hat{F}(x_i) = \frac{i - 0.5}{n}$$

On porte en abscisses les valeurs de la variable (par exemple des niveaux) et en ordonnées les fréquences cumulées (illustration A1) ce qui permet ensuite par lecture du graphique de calculer une fréquence de dépassement ou de non dépassement.

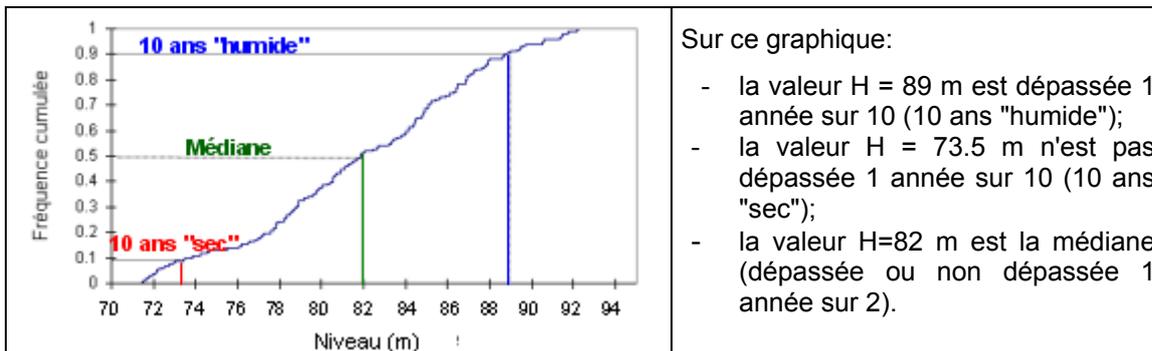


Illustration A1 – Courbe de fréquence cumulée

### 1.3. Méthodes de calcul des quantiles

Pour obtenir la valeur d'une variable correspondant à une période de retour donnée (5 ans, 10 ans, ...) plusieurs méthodes existent, ne fournissant d'ailleurs pas toutes les mêmes résultats pour un quantile donné.

Outre la méthode de calcul appliquée par Excel, il en existe d'autres utilisées dans des logiciels uniquement dédiés à l'analyse statistique (SAS, MiniTab, ...).

La méthode proposée par défaut dans le logiciel SAS (qui en propose plusieurs), s'applique comme suit:

1) On ordonne la série des valeurs (niveaux ou profondeurs) par ordre croissant.

2) Soit p le percentile considéré et n le nombre de valeurs de la série. On calcule le produit np que l'on décompose en une partie entière j et une partie décimale d:

$$np = j + d$$

La valeur correspondant au percentile p est donnée par:

$$V_p = \frac{(x_j + x_{j+1})}{2} \quad \text{si } d=0 \quad j \text{ étant la partie entière du produit } np$$

$$V_p = x_{j+1} \quad \text{si } d>0$$

Autres formules:

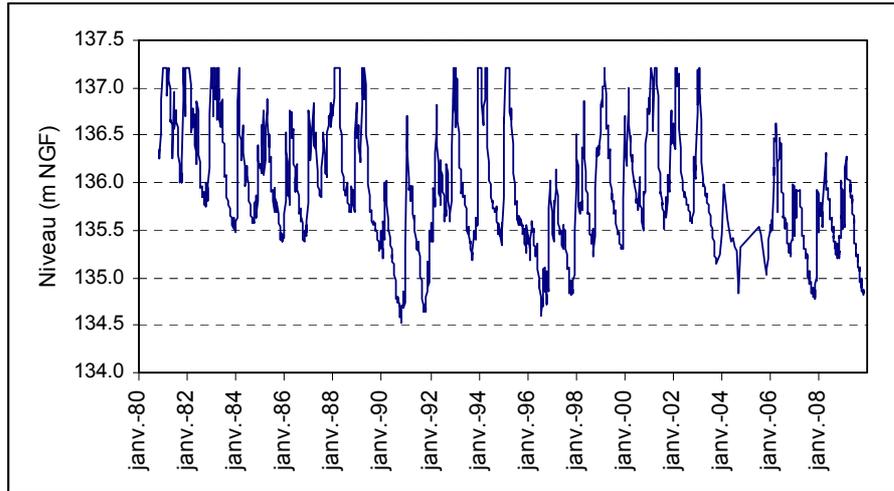
Excel:  $V_p = (1-d)*x(j+1)+d*x(j+2)$

SAS méthode 4:  $V_p = (1-d)*x(j)+d*x(j+1)$

#### 1.4. Exemple

Une analyse fréquentielle a été effectuée sur des niveaux piézométriques de la nappe de la craie en Artois-Picardie. Pour chaque série piézométrique, cette analyse a été conduite sur des séries de valeurs décadaires correspondant à des "niveaux d'étiage" de la nappe captée.

L'exemple du piézomètre 00383X0229/PZSP6 de Taisnières-en-Thiérache pour le bassin de l'Helpe Majeure est présenté par l'illustration A2.



*Illustration A2 – Evolution des niveaux au piézomètre 00383X0229/PZSP6 de Taisnières-en-Thiérache dans le BV de l'Helpe Mineure*

La majorité des niveaux d'étiage se situent courant octobre. La période d'étiage considérée dans l'analyse fréquentielle recouvre les mois de septembre, octobre et novembre.

##### Constitution de séries de valeurs décadaires

A partir des chroniques de données journalières s'étendant sur les périodes retenues pour l'analyse, les valeurs décadaires moyennes de niveau piézométrique ont été calculées pour la période d'étiage.

Pour le piézomètre de Taisnières-en-Thiérache, 27 années de mesure au pas de temps journalier sont disponibles à la période de plus bas niveau. A partir de ces données journalières, les 9 valeurs décadaires moyennes de septembre à novembre ont été calculées de 1981 à 2007 (illustration A3 page suivante).

La distribution cumulée des fréquences pour la 3<sup>ème</sup> décade de Novembre est présentée par l'illustration A4.

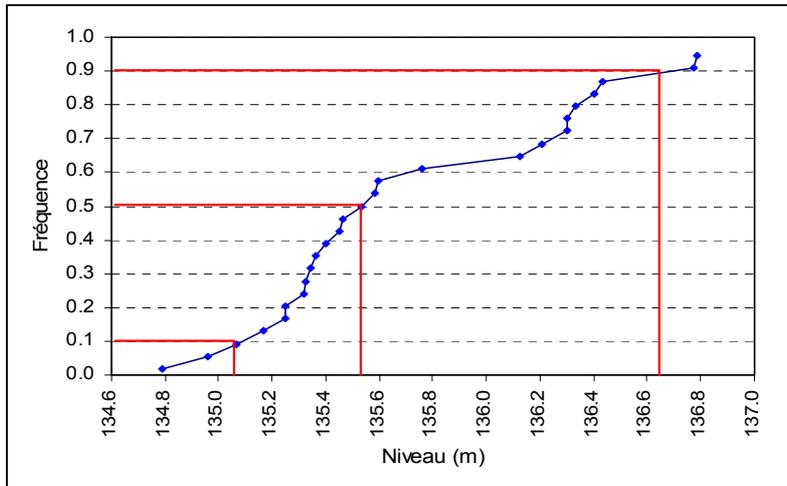


Illustration A4 - Courbe de fréquence cumulée des niveaux du piézomètre 00383X0229/PZSP6 de Taisnières-en-Thiérache pour la 3<sup>ème</sup> décennie de novembre

- le niveau H = 135 m n'est pas dépassé environ 1 année sur 10 (10 ans "secs")
- le niveau H = 135,5 m est proche de la médiane
- le niveau H = 136,3 m est dépassé environ 1 année sur 10 (10 ans "humides")

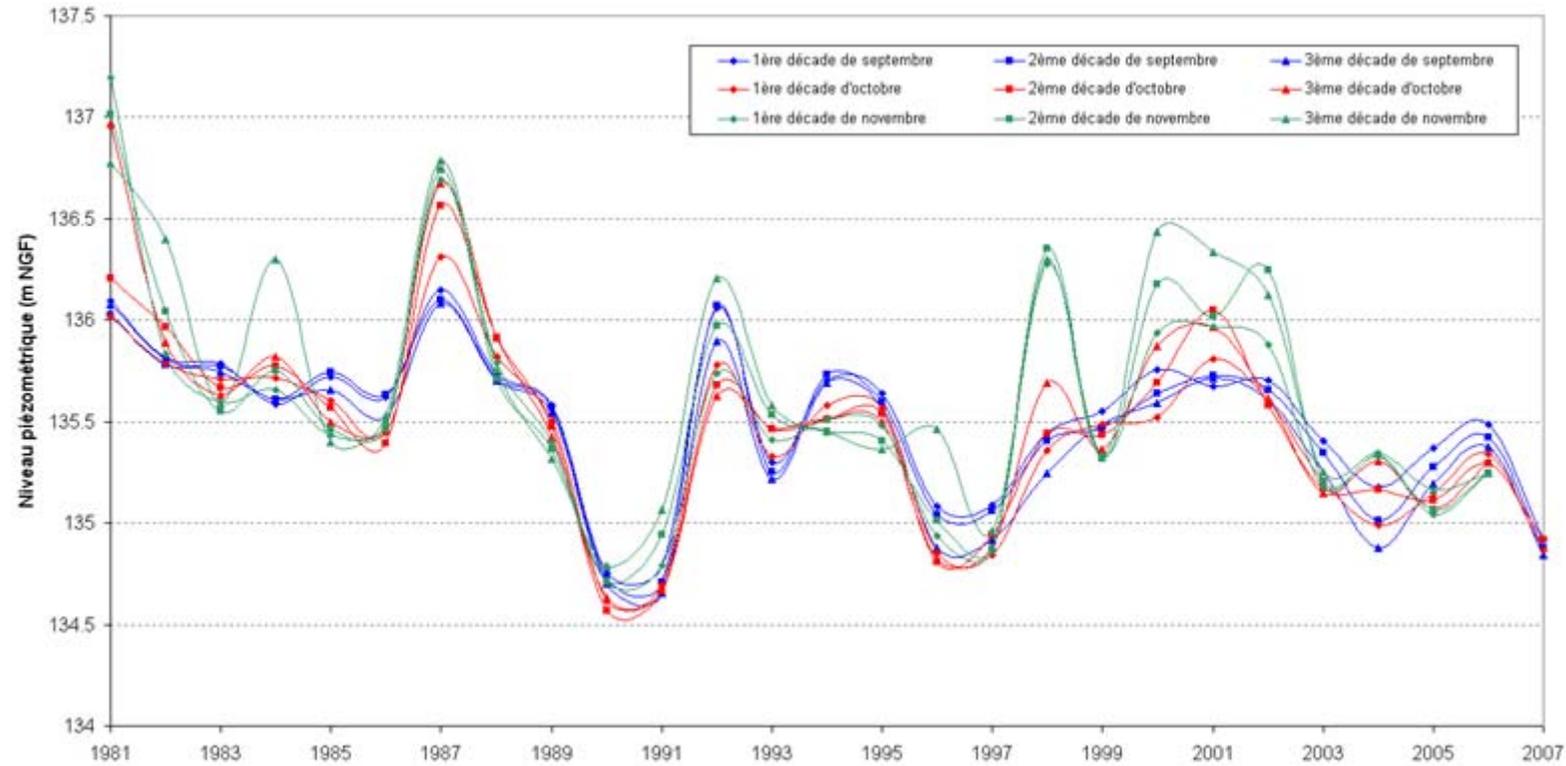


Illustration A3 - Séries des niveaux piézométriques moyens décadaires en période d'étiage, de 1981 à 2007 (piézomètre 00383X0229/PZSP6 de Taisnières-en-Thiérache)



## 2. Corrélogrammes

### *Corrélogramme simple*

Il permet de mettre en évidence dans une série de données temporelles le degré de corrélation existant entre valeurs successives de la série pour des intervalles de temps croissants (on parle d'auto-corrélation). Le corrélogramme représente graphiquement la corrélation qui existe entre les valeurs de la série lorsqu'elles sont décalées de 1 pas de temps, puis 2 pas de temps, puis 3, ....

### *Corrélogramme croisé*

Il permet de mettre en évidence les corrélations temporelles pouvant exister entre 2 séries pour des intervalles de temps croissants. Le corrélogramme croisé représente graphiquement la corrélation qui existe entre les valeurs successives des 2 séries lorsqu'elles sont décalées de 1 pas de temps, puis 2 pas de temps, puis 3, ....

Le corrélogramme croisé peut fournir aussi une indication sur le temps de réponse de l'hydrosystème suite à un épisode pluvieux (c'est le décalage temporel pour lequel la corrélation est maximale entre les 2 séries).

## 3. Ajustements de lois de probabilités: démarche

Pour illustrer la démarche, on choisit comme exemple une chronique de niveaux piézométriques au pas de temps journalier et l'on s'intéresse aux "niveaux d'étiage" en moyennes mensuelles.

### 3.1. Constitution de la série de données à étudier

A partir de cette chronique (qui doit couvrir plusieurs années car il faut un minimum d'années pour que la méthode soit pertinente), on calcule mois par mois les valeurs mensuelles et l'on extrait celles correspondant à la variable étudiée.

Il faut préalablement compléter la série de données journalières en cas de valeurs manquantes (différentes techniques peuvent être utilisées dont l'interpolation linéaire est la plus simple si l'analyse de la chronique le permet et si les intervalles de temps "lacunaires" ne sont pas trop grands).

### 3.2. Contrôle de la série constituée

Toute démarche probabiliste repose sur la notion d'indépendance des observations traitées. Il faut donc s'assurer que les valeurs successives de la série constituée sont bien indépendantes les unes des autres. C'est généralement le cas en hydrologie pour des valeurs mensuelles : dans une série pluriannuelle de débits moyens mensuels, le débit d'un mois donné est en général indépendant de celui du mois précédent (sans soutien d'une nappe). C'est encore plus vrai pour des valeurs moyennes annuelles.

En revanche, dans l'étude des nappes, le niveau d'un mois donné dépend en général du niveau des mois précédents, la "longueur temporelle" de cette dépendance étant d'autant plus grande que "l'inertie" de la nappe est importante (par exemple la nappe des Calcaires de Beauce où les temps de régulation sont très longs, de plusieurs années). Il y a autocorrélation (corrélation entre elles des valeurs successives de la série).

Lorsque dans une série pluriannuelle de niveaux moyens mensuels on extrait les valeurs d'un mois donné pour constituer une série "dérivée", cette autocorrélation peut

s'atténuer, voire disparaître. Dans le cas des grandes nappes, une autocorrélation significative peut néanmoins persister (cf. § 2.2. dynamique des nappes). C'est la raison pour laquelle il faut vérifier que la série dérivée vérifie bien la notion d'indépendance. Cette vérification peut se faire par l'intermédiaire d'un corrélogramme.

Ceci est illustré par l'illustration A5 ci-après pour les niveaux mesurés au piézomètre de Saint-Martin-Chennetron captant la nappe des Calcaires de Champigny.

L'autocorrélation d'une portée de l'ordre de l'année mise en évidence dans la série des valeurs mensuelles successives est bien sûr retranscrite par l'autocorrélation des valeurs mensuelles de Décembre (niveaux les plus bas observés). Les valeurs espacées de 1 an apparaissent en effet encore faiblement corrélées (coefficient égal à 0.67, illustration A6).

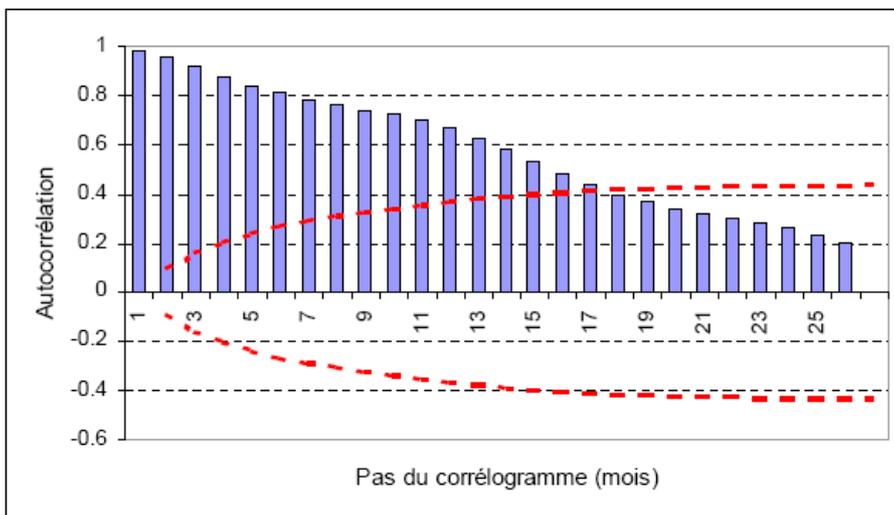


Illustration A5 - Corrélogramme des niveaux moyens mensuels de Janvier 1969 à Mars 2005

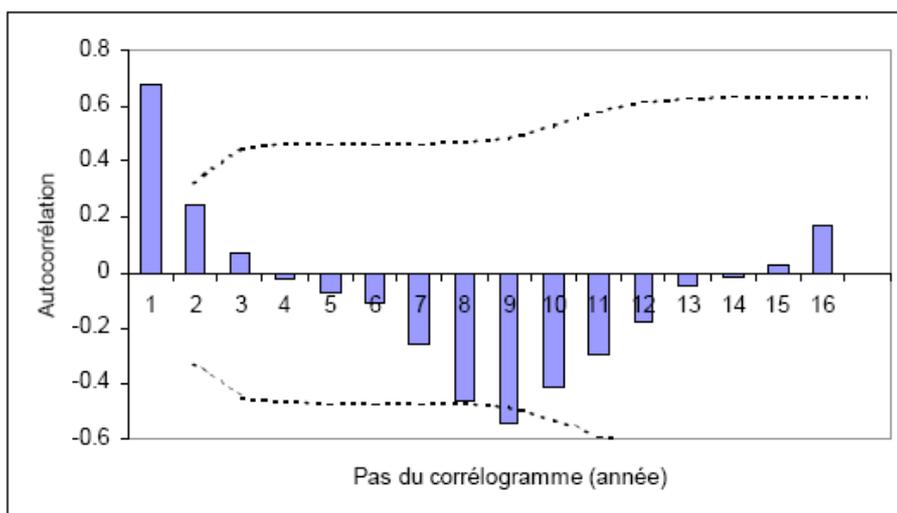


Illustration A6 - Corrélogramme des niveaux moyens mensuels de Décembre (1969 à 2004)

### 3.3. Choix d'un modèle fréquentiel et test d'adéquation

Le choix d'un modèle fréquentiel est capital, car c'est du bien fondé de ce choix que dépendra la qualité des prédictions émises. Plusieurs lois peuvent être testées :

- la loi normale,
- la loi log-normale
- la loi de Gumbel et la loi de Pearson III susceptibles de décrire des séries de maxima ou de minima
- .....

L'ajustement d'un modèle fréquentiel doit être systématiquement accompagné d'un test d'adéquation. On teste l'hypothèse, pour un niveau de signification donné (qui définit la condition de rejet de l'hypothèse, en général 5%), que la répartition des données traitées est bien conforme à celle prévue par le modèle fréquentiel choisi. Il existe de nombreux tests possibles, un test peut en effet être bien adapté pour une certaine loi et ne pas l'être pour une autre. Le choix du test approprié est donc important puisque de lui dépendra l'acceptation ou le rejet du modèle testé.

### 3.4. Quantification des incertitudes

Une fois le modèle fréquentiel retenu, les incertitudes sur les valeurs calculées, inhérentes à une démarche probabiliste, peuvent être évaluées par l'intermédiaire d'intervalles de confiance que l'on reporte sur le graphique fréquence-valeurs sous la forme de "courbes enveloppes" encadrant la courbe théorique représentant le modèle fréquentiel (cette courbe peut être une droite dans un graphique approprié).

Cet intervalle de confiance, qui se calcule à un certain seuil de confiance, par exemple 95%, doit être interprété comme l'intervalle qui doit contenir, avec une probabilité correspondant au seuil de confiance, la "vraie" valeur (inconnue) à prédire.

L'intervalle de confiance est d'autant plus petit que l'adéquation entre la loi ajustée et l'échantillon est bonne. Il est d'autant plus petit que le seuil de confiance considéré est petit.

Le niveau d'une nappe dont le modèle fréquentiel nous dit que sa probabilité d'occurrence est de  $p$  % sera donc encadré par deux bornes définissant un intervalle à l'intérieur duquel la valeur du niveau à prédire aura 95 chances sur 100 de s'y trouver (pour un calcul avec un seuil de confiance de 95%). Ainsi, pour le mois de décembre, la cote piézométrique de période de retour 10 ans sec a 95 chances sur 100 d'être comprise entre 118,68 et 124,00 m NGF, la valeur médiane étant de 121,34 m NGF.



## **Annexe 2 - Dynamique des nappes "libres" Quelques exemples**



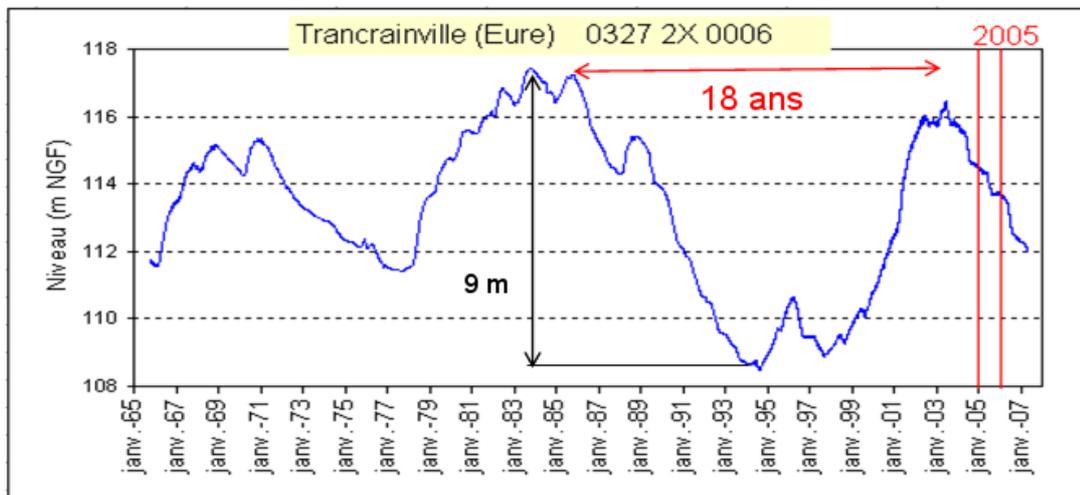
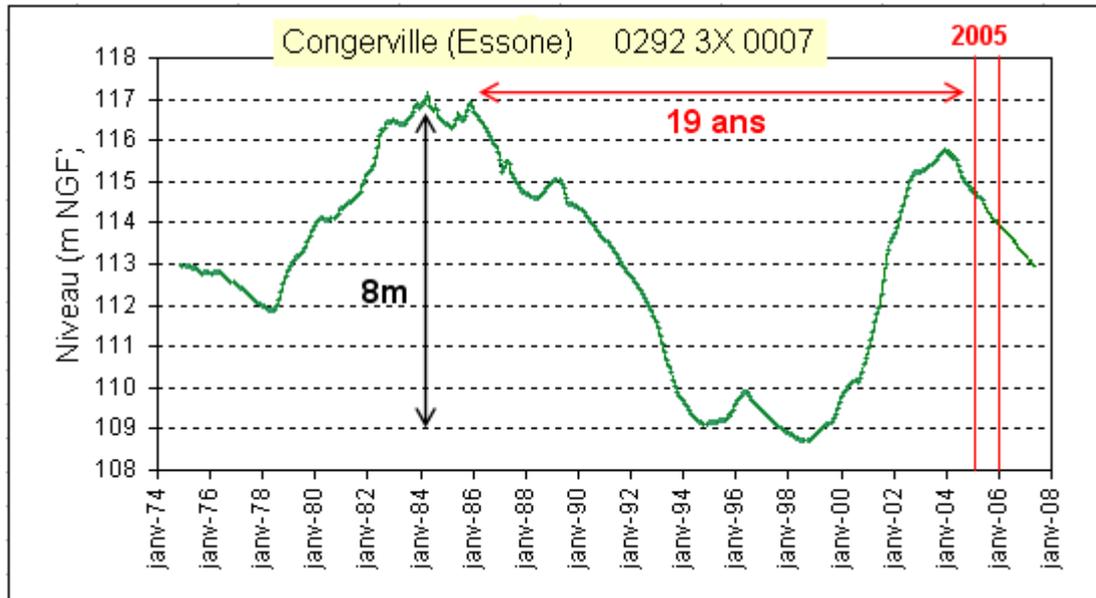


Illustration A7 - Exemple de nappe à cycles pluriannuels : la nappe des Calcaires de Beauce

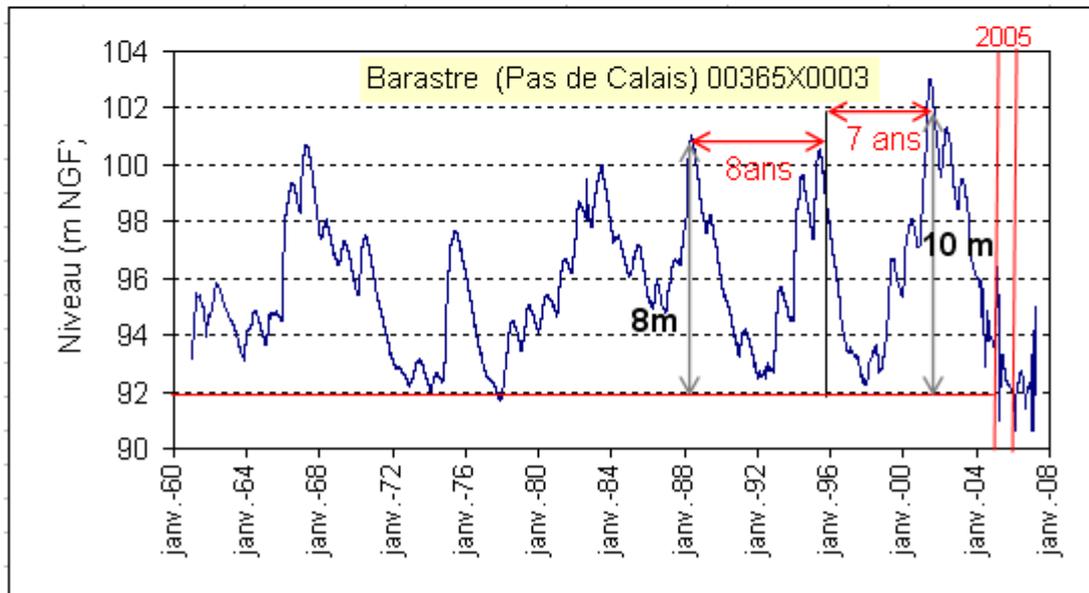
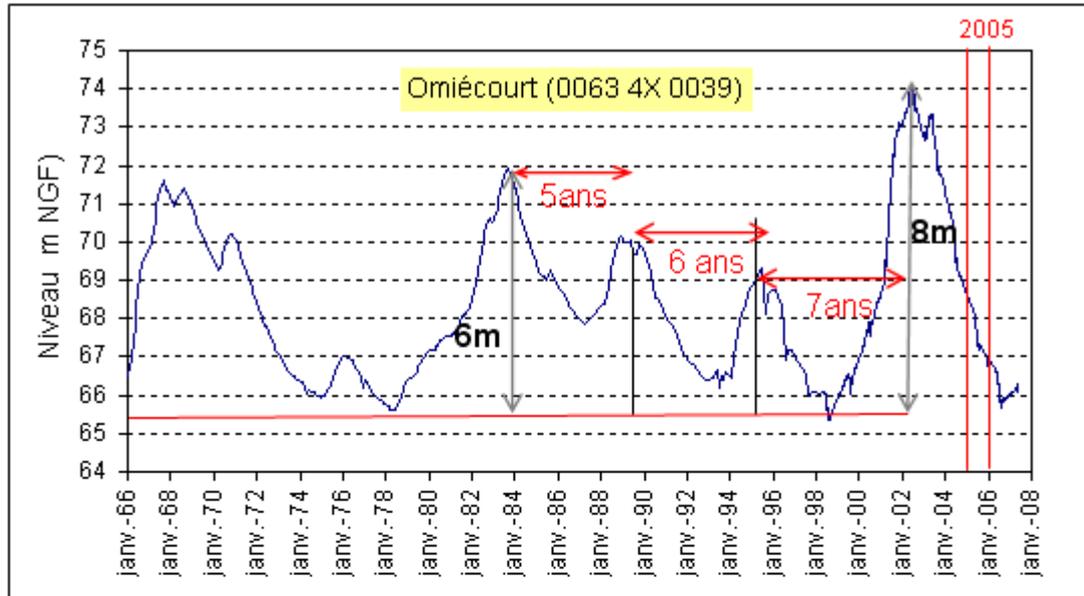
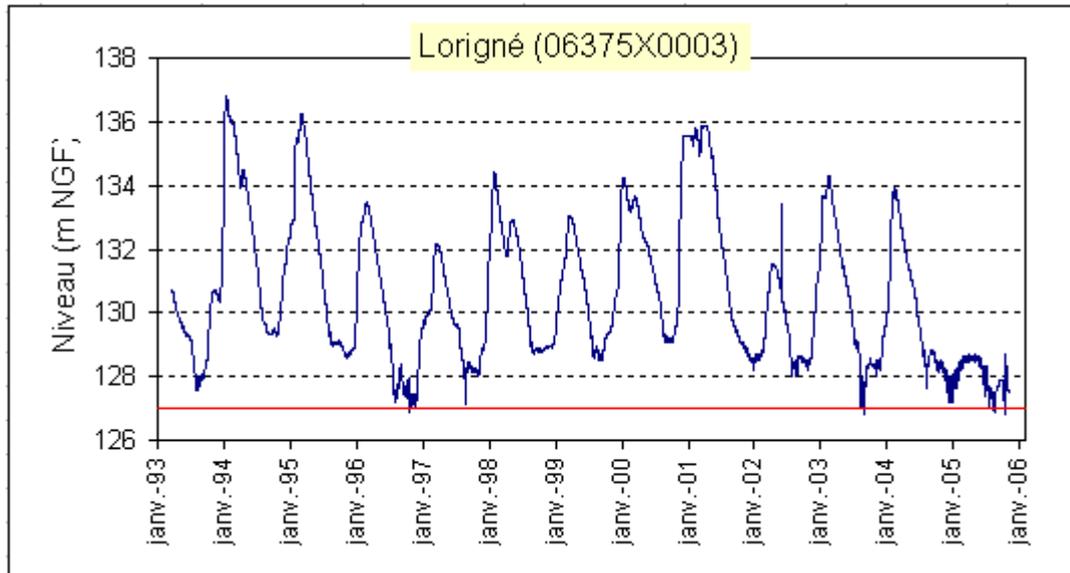
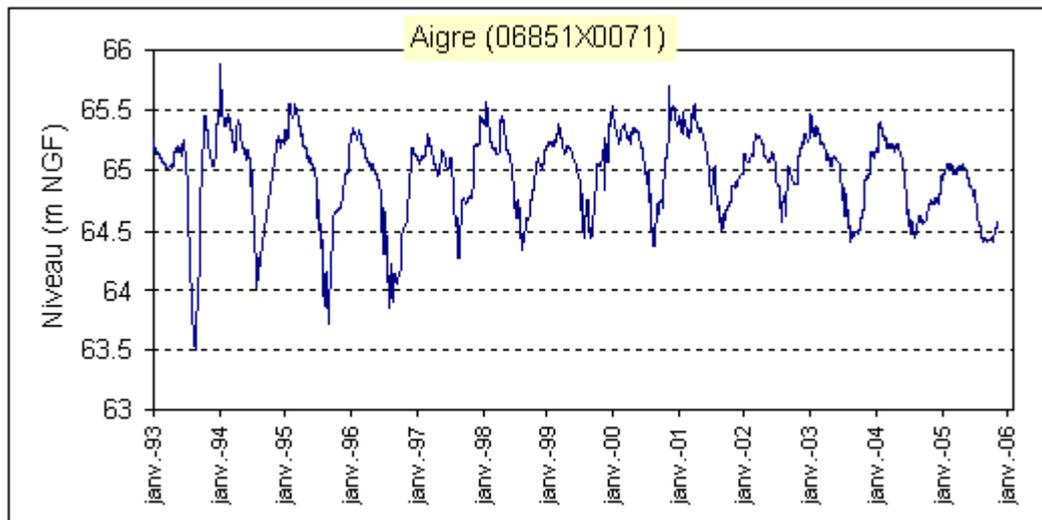


Illustration A8 - Exemple de nappes à cycle pluriannuel (systèmes aquifères du Santerre et de Cambrèsis)



Système aquifère du "Civraisien-Dogger" (SA 109a2) dans le Jurassique moyen et supérieur



Système aquifère de "Charente-nord" (SA 113) dans le Jurassique supérieur

*Illustration A9 - Exemple de nappes à cycle annuel en Poitou-Charentes*



## **Annexe 3 - Temps de demi-décroissance des niveaux calculés sur 68 aquifères**



Code	Système aquifère	Tdemi (mois)	Code	Système aquifère	Tdemi (mois)
072	Tonnerrois Est	0.6	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	Gâtinais 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	Gâtine	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	Montmorillonnais	2.1	004	Ponthieu	7.1
064	Nivernais	2.1	031	Gâtinais Est	7.6
127	Landes Aquitaine occident.	2.2	005	Cambrésis	8.7
018	Champagne Nord	2.3	009	Pays de Caux	9.5
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	026	Petite Beauce	16.0
028	Val-de-Seine	3.0	025	Beauce	19.0
150	Vistrenque	3.0	014	Soissonais nord	25.5

Illustration A11 – Moyenne des temps de demi-décroissance (mois) calculée sur 68 aquifères

- En rouge, les aquifères de faible inertie (temps de demi-décroissance < 1.5 mois)
- En bleu, les aquifères à forte inertie (temps de demi-décroissance > 12 mois)

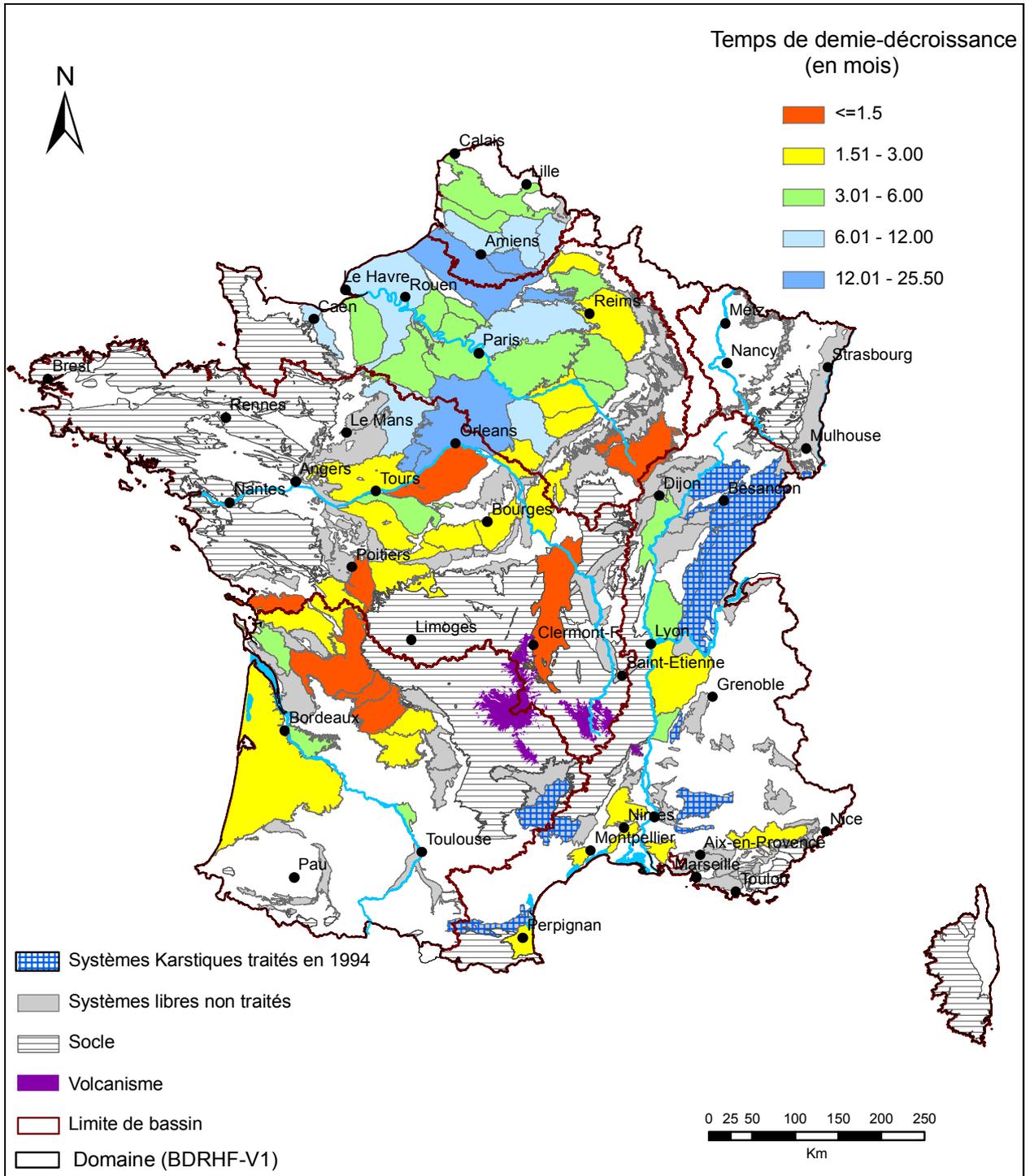


Illustration A12 - Temps de demi-décroissance par système aquifère

## **Annexe 4 - Indicateurs piézométriques du bassin Loire-Bretagne**

([www.centre.ecologie.gouv.fr](http://www.centre.ecologie.gouv.fr))



## 1) Région Centre

N°	Nom de l'Indicateur	Listes des piézomètres composant les indicateurs
1	<a href="#">Beauce centrale</a>	Fains-la-Folie, Saint-Léger-des-Aubées, Ouzouer-le-Marché, Epieds-en-Beauce, Batilly-en-Gâtinais
2	<a href="#">Beauce Fusain-Montarquois</a>	Corbeilles-en-Gâtinais, Nogent-sur-Vernisson
3	<a href="#">Beauce Blésoise</a>	Séris, Villeromain, Oucques, Champigny-en-Beauce
4	<a href="#">Calcaires sous Sologne</a>	Saint-Cyr-en-Val, Crouy-sur-Cosson, Millancay
5	<a href="#">Craie Est Loire</a>	Chevannes, Chuelles
6	<a href="#">Craie Nord</a>	Langey, Magny, Maintenon, Chateauneuf-en-Thymerais, Bû
7	<a href="#">Craie Loir-et-Cher/Indre-et-Loire</a>	Fortan, Santenay, Ambloy, Channay-sur-Lathan
8	<a href="#">Craie Sud Indre-et-Loire</a>	Villaines-les-Rochers, Ballan-Miré, Villeloin-Coulanges, La Celle-Guenand
9	<a href="#">Cénomaniens Nord</a>	Arrou, Charbonnières, Moulhard, Montigny-le-Chartif, Saint-Agil
10	<a href="#">Cénomaniens Nord Loire</a>	Monnaie, Trôo, Morée, Orchaie
11	<a href="#">Cénomaniens Tours/Vallée du Cher</a>	Tours, Seigy
12	<a href="#">Cénomaniens Sud Indre-et-Loire</a>	Civray-sur-Esves, Le Grand-Pressigny, Bourgueil
13	<a href="#">Cénomaniens Indre</a>	Baudres, Pellevoisin, Murs
14	<a href="#">Cénomaniens Cher</a>	Nancay, La Chapelle d'Angillon
15	<a href="#">Malm Eure et Loir</a>	Fréigny, Trizay-Coutretot
16	<a href="#">Malm Cher</a>	Osmercy, Villequiers, Plaimpied-Givaudins, Veuqueres, Rians, Vornay
17	<a href="#">Malm Indre</a>	Villedieu-sur-Indre, Paudy, Fontgombault, Liniez, Saint-Martin-de-Lamps, La Chapelle-Orthemale, Issoudun, Déols
18	<a href="#">Dogger libre</a>	Nérondes, Blet, Ambrault
19	<a href="#">Dogger captif</a>	Saint-Baudel, Chez-Benoît, Arthon, Ruffec-le-Château, Luant, Ardentes
20	<a href="#">Trias</a>	Mallet, Montgivray, Le Menoux

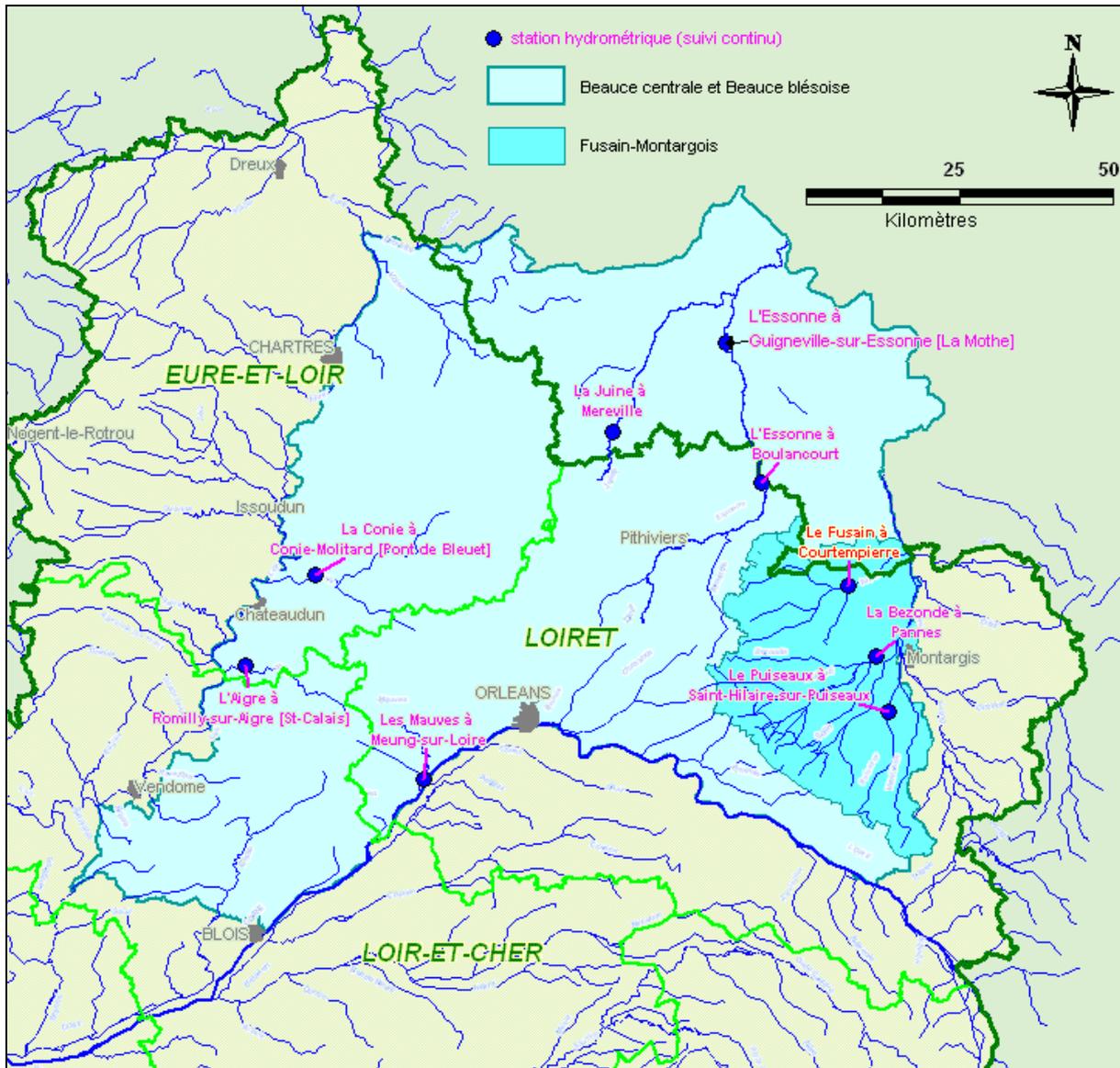


Illustration A13 – Délimitation des zones d'alerte pour la nappe des Calcaires de Beauce

## 2) Autres régions du bassin

<b>Région Rhône Alpes</b>	
▶ <b>Nappe du Forez</b>	St Galmier
<b>Région Auvergne</b>	
▶ <b>Bassin de Volvic</b>	3 Piézos situés à Charbonnières les Varennes
<b>Région Bourgogne</b>	
▶ <b>Alluvions de la Loire</b>	Vitry sur Loire
▶ <b>Calcaires du Nivernais</b>	Bouhy
<b>Région Poitou Charentes</b>	
▶ <b>Infra Toarcien (Vienne)</b>	Celle, Lecescault, St Romain, Couhé
▶ <b>Dogger Centre (Vienne)</b>	Romagne, Magné
▶ <b>Dogger Est (Vienne)</b>	Migné Auxances, Villiers, Ayrion
▶ <b>Jurassique Sup Mignon Courance</b>	St Hilaire la Palud, Prissé la Charrière, Le Bourdet
▶ <b>Jurassique Sup Oxfordien (Vienne)</b>	Champigny le Sec, Chabournay, Cuhon
▶ <b>Cénomaniens (Vienne)</b>	Lenclouire, Archigny
<b>Département de la Vendée</b>	
▶ <b>Sédimentaire Est</b>	Oulmes
▶ <b>Sédimentaire Sud</b>	Luçon, St Aubin la Plaine
▶ <b>Socle</b>	La Roche sur Yon
▶ <b>Marais Breton</b>	Bouin
<b>Département de la Sarthe</b>	
▶ <b>Bajo Bathonien Ouest Sarthe</b>	Conlie, St Pierre des Bois, St Rémy du Val
▶ <b>Cénomaniens Captif Sud Sarthe</b>	Bouloire, Mansigné, Villaines sous Malicorne
▶ <b>Cénomaniens Libre Le Mans</b>	Savigné l'Evêque

▶ <b>Oxfordien Est Sarthois</b>	Le Luart
<b>Département de l'Orne</b>	
▶ <b>Bathonien Captif</b>	Occagnes, St Loyer des Champs
▶ <b>Bathonien Libre</b>	St Germain de Clairfeuil, Alençon
▶ <b>Cénomaniens Libre</b>	Bubertre, Moulicent, St Maurice les Charencey
▶ <b>Cénomaniens Captif</b>	St Hilaire sur Erre, Mauves sur Huisnes
<b>Département du Morbihan</b>	
▶ <b>Socle Morbihan</b>	Ploerdut, Bieuzy, Guer
<b>Département du Finistère</b>	
▶ <b>Socle Cornouailles</b>	Landrevarzec, Landudec, Scaër
▶ <b>Socle Léon</b>	Plouvorn, St Divy
<b>Département de la Loire Atlantique</b>	
▶ <b>Socle 44</b>	Derval, Mouzillon
▶ <b>Pliocène 44</b>	Nort sur Erdre

"Ces indicateurs ont été créés à dire d'expert par les gestionnaires des différents réseaux. Ils ont pour but de représenter le fonctionnement d'un aquifère ou d'une partie d'aquifère jugée relativement homogène et suffisamment importante à l'échelle du bassin. Tous les aquifères ne sont donc pas représentés.

Les indicateurs sont constitués par la moyenne d'un ou plusieurs piézomètres. Aucun coefficient de pondération n'est actuellement appliqué pour compenser les différences de fluctuations piézométriques ni pour tenir compte de la surface de bassin versant représentée par chaque piézomètre.

Seuls les piézomètres disposant de plus de 10 ans de chronique ont été retenus dans la composition des indicateurs de façon à pouvoir les comparer aux décennales".

### Exploitation des indicateurs

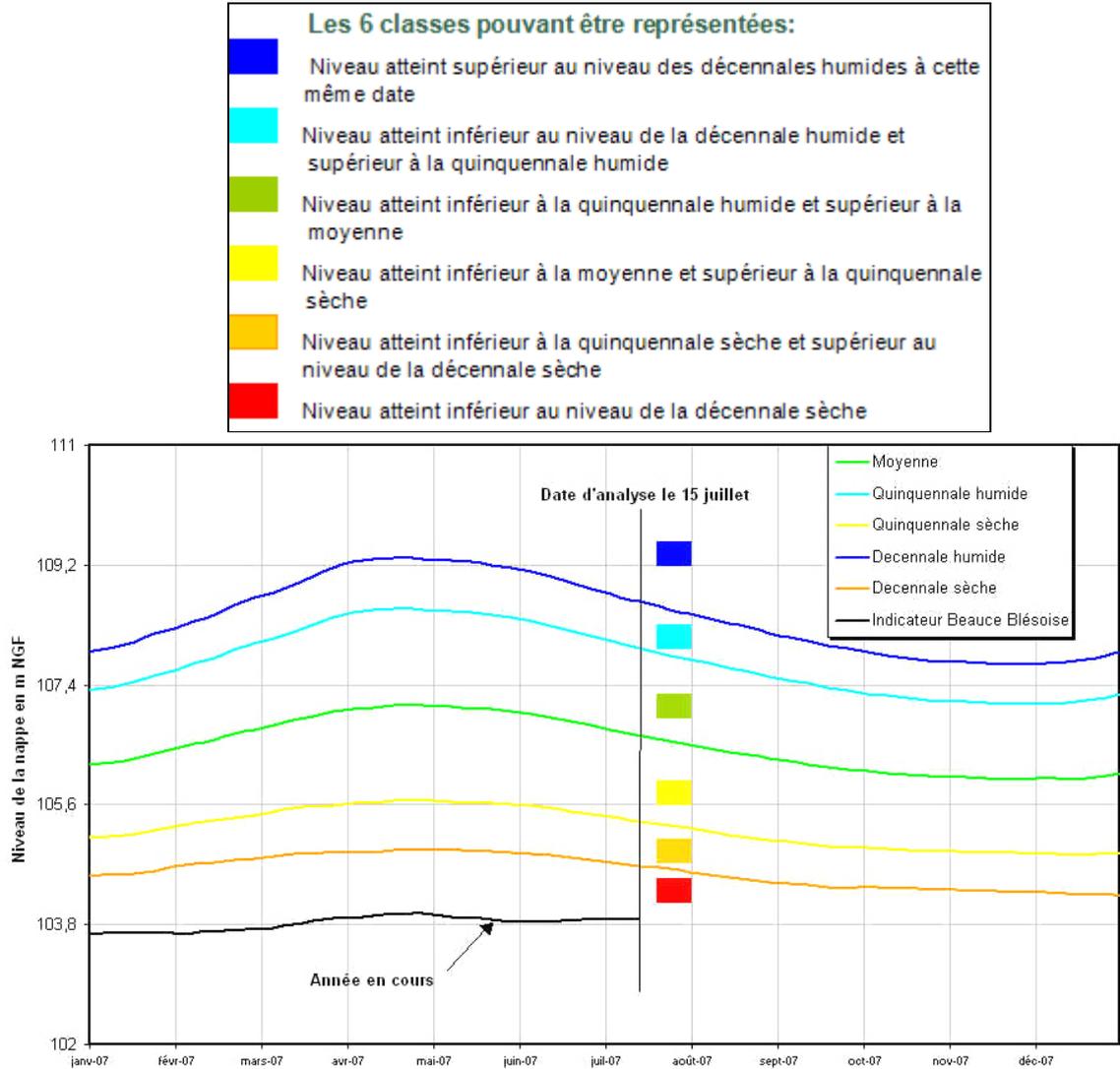
Ce qui suit (figures et texte en italique) est extrait du site :

[http://www.centre.ecologie.gouv.fr/Hydrogeologie/methodologie-analyses\\_bassin.htm](http://www.centre.ecologie.gouv.fr/Hydrogeologie/methodologie-analyses_bassin.htm)

"A une date déterminée (au 15 juillet sur la courbe de l'illustration A14), le niveau est comparé aux niveaux statistiques et représenté par des figurés de couleur dont la signification est expliquée ci-dessous (il est inférieur à la décennale sèche dans l'exemple).

Par souci de cohérence, les statistiques sont établies pour l'ensemble des piézomètres ou des indicateurs sur une période commune 1995 - 2007.

La recherche d'homogénéité à l'échelle du bassin pour tous les indicateurs affichés peut conduire, par effet de seuil, à des différences, que ce soit en tendance ou en classe, avec les cartes et analyses publiées à l'échelle régionale ou locale".



*Illustration A14 – Exemple de représentation graphique des indicateurs piézométriques dans le bassin Loire-Bretagne*  
 (Remarque : sur cette illustration, il s'agit plutôt de la médiane et non de la moyenne)

Une carte (illustration A15) synthétise la situation des nappes à une date donnée sur l'ensemble du bassin à l'aide de 3 figurés qui permettent d'indiquer une tendance du niveau de la nappe pour chaque indicateur.

△	Niveau en hausse
□	Niveau stable
▽	Niveau en baisse

*"Cette tendance est donnée en comparant le niveau à la date d'analyse par rapport au niveau mesuré un mois plus tôt.  
 En cas d'absence de données à la date d'analyse, l'indicateur concerné n'est représenté sur la carte que par un point sans figuré ni classe".*

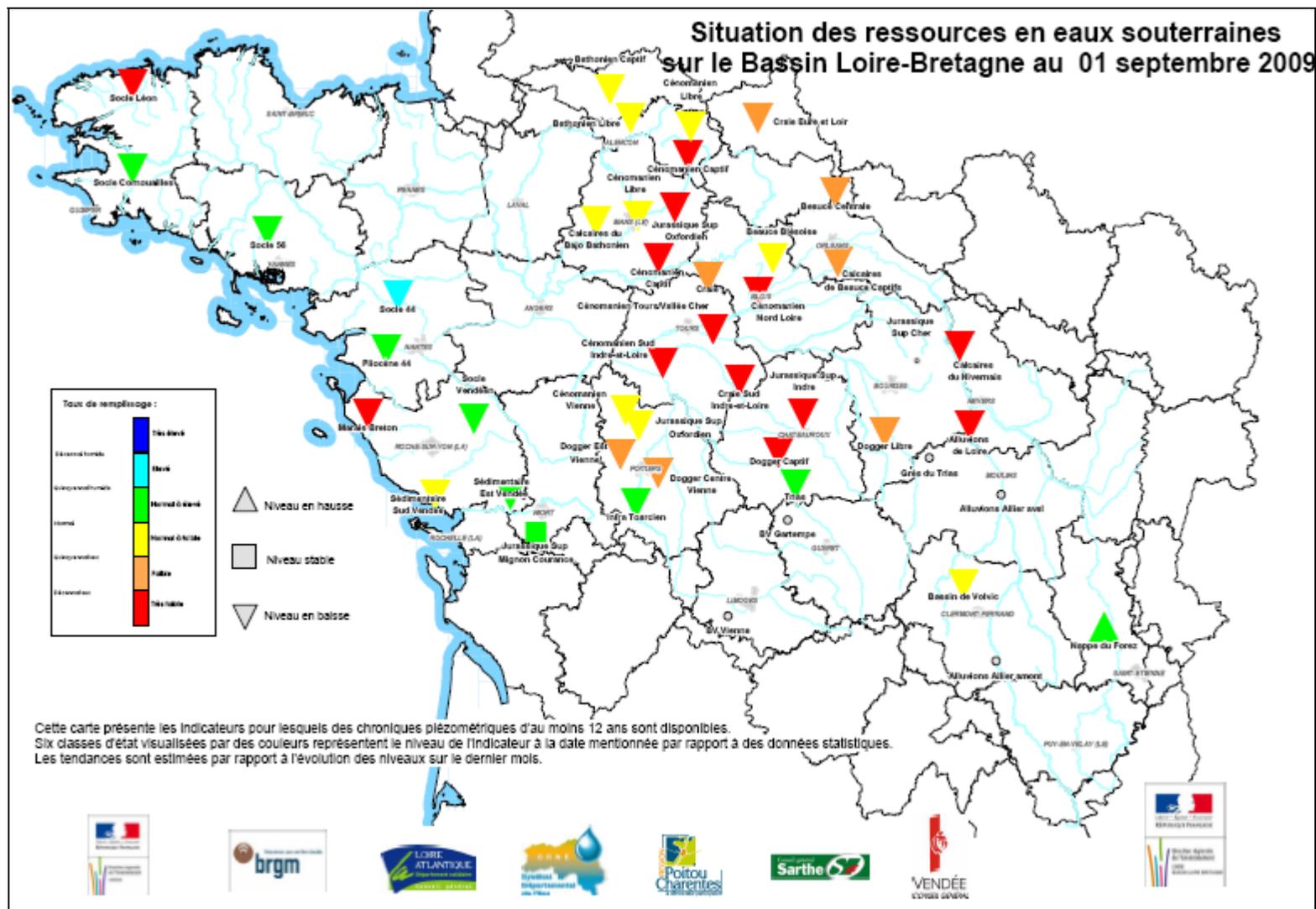


Illustration A15 – Exemple de représentation cartographique d'indicateurs piézométriques à l'échelle d'un bassin.

## **Annexe 5 - Localisation des aquifères cités dans l'étude**



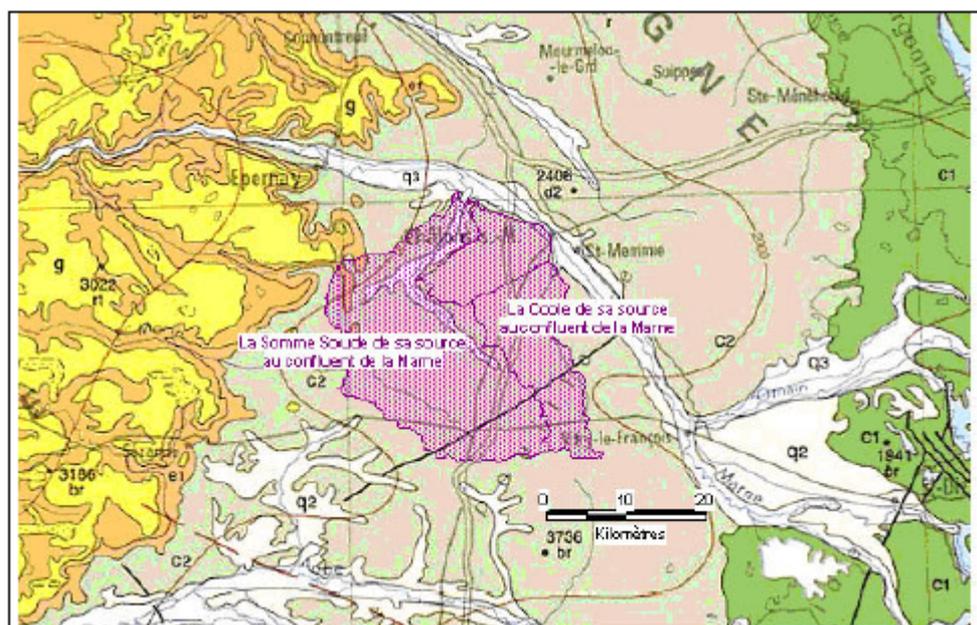


Illustration A16 – Bassin de la Somme-Soude

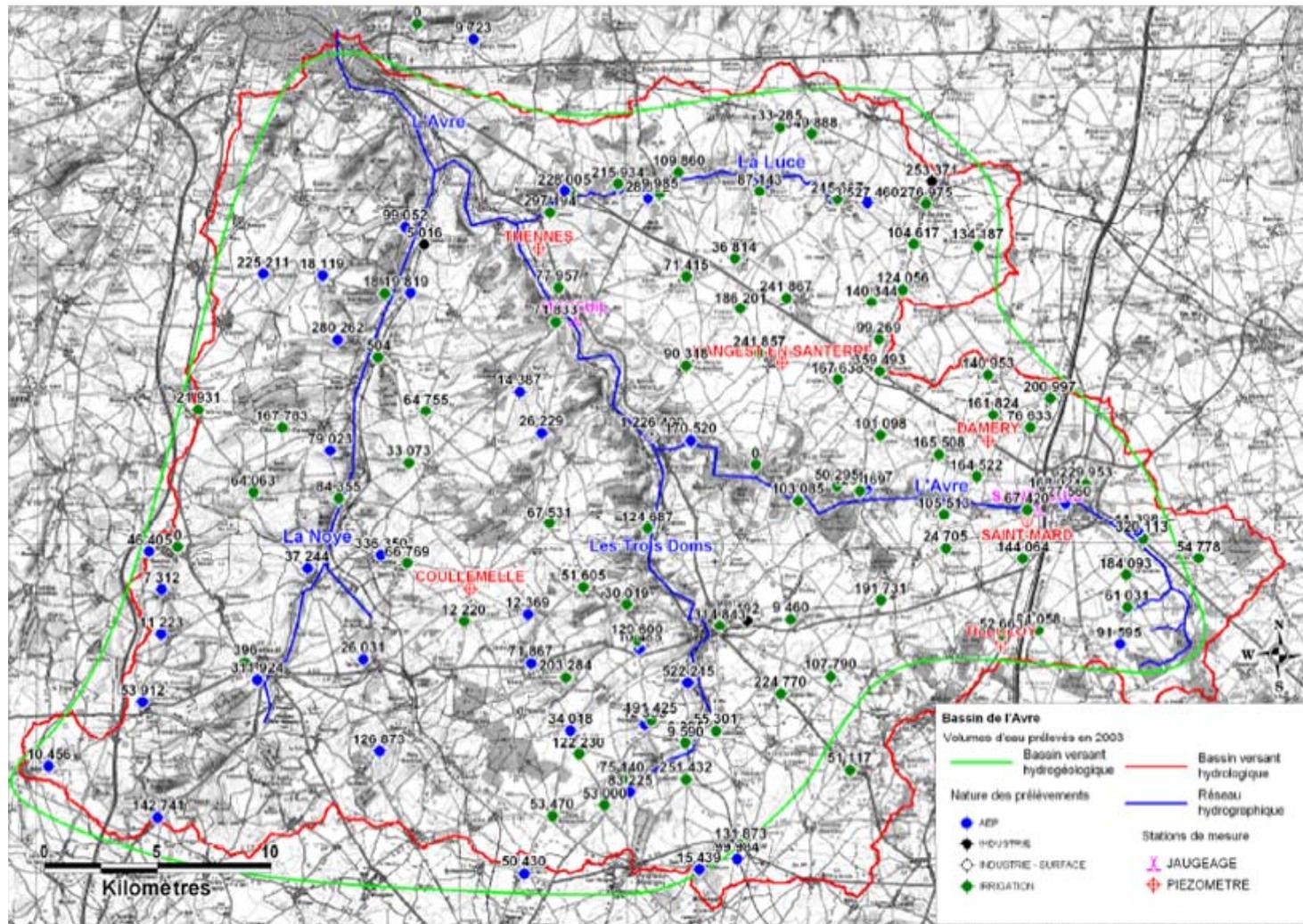


Illustration A17 – Bassin de l'Avre

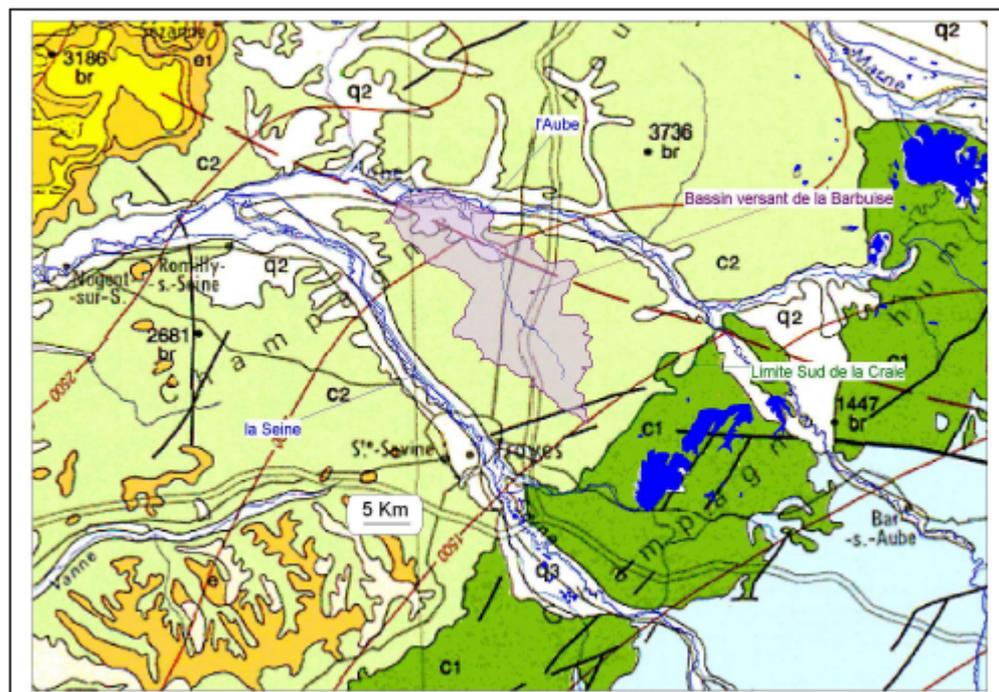
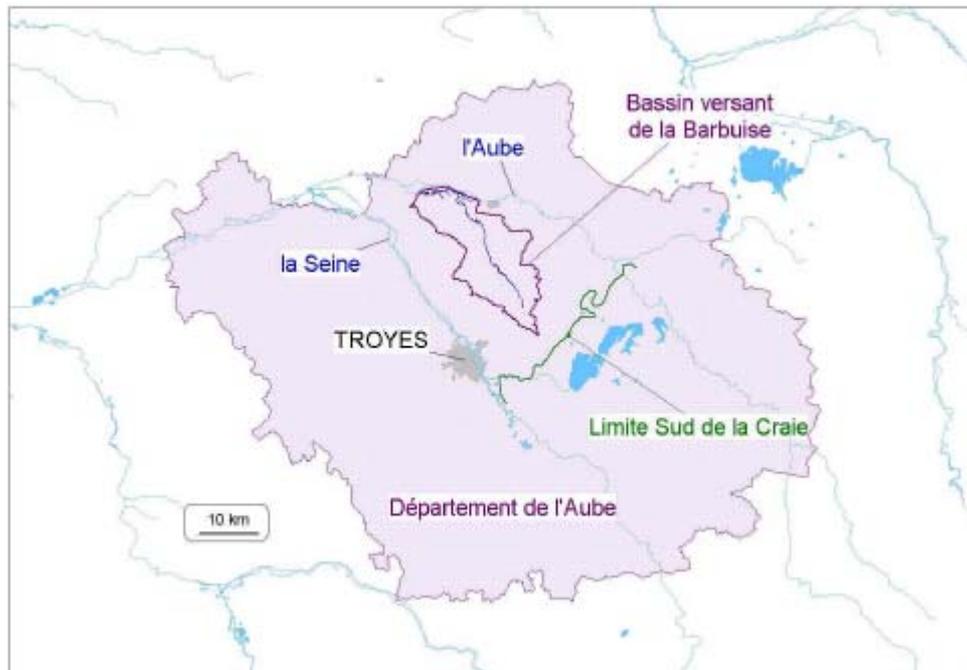


Illustration A18 – Bassin de la Barbuise



## **Annexe 6 - Quantification de l'influence sur les cours d'eau des pompages en nappes alluviales**



## Solutions analytiques pour quelques configurations

### Configuration 1

Le cas le plus simple correspond à la configuration suivante :

- nappe captive (ou libre, en supposant la linéarisation applicable), bornée par un cours d'eau rectiligne de grande longueur et non limitée par ailleurs (milieu semi-infini) ;
- nappe supposée d'épaisseur à peu près constante et milieu homogène (transmissivité T constante ainsi que le coefficient d'emmagasinement S) ;
- la liaison nappe cours d'eau est totale (pas de colmatage des berges) ;
- pompage à débit constant

*Notations :*

- $D = T/S$  est la diffusivité de l'aquifère
- $d$  est la distance du puits à la berge
- $Q_p$  est le débit de pompage
- $Q_{riv}(t)$  est le débit soustrait à la rivière à la date  $t$

$$\beta = \frac{d}{2\sqrt{Dt}}$$

- $erfc$  est la "fonction erreur complémentaire" :  $erfc(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt$

- $i^2erfc$  est l'intégrale répétée 2 fois de la fonction  $erfc$  :

$$i^2erfc(x) = \int_x^{\infty} ierfc(t)dt \quad \text{et} \quad ierfc(x) = \int_x^{\infty} erfc(t)dt$$

La solution est, dans ce cas très simple, donnée par :

$$\frac{Q_{riv}(t)}{Q_p} = erfc\left(\frac{d}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

et la fraction du volume soustrait sur l'intervalle  $[0, t]$  est donnée par:

$$\boxed{\frac{V_{riv}(t)}{V_p} = 4i^2erfc\left(\frac{d}{2\sqrt{Dt}}\right)} \quad [C1]$$

### Configuration 2

Même configuration que celle de l'exemple 1 avec en plus l'existence d'un colmatage des berges du cours d'eau.

*Notations :* les mêmes que celles de l'exemple 1 plus :

- $K_b$  : perméabilité de la couche colmatée
- $E$  : largeur de la couche colmatée
- $\alpha = \frac{K_b}{e}$

Solution :

$$\frac{Q_{riv}(t)}{Q_p} = \operatorname{erfc}(\beta) - \exp\left[\left(\beta + \frac{1}{2\alpha\beta}\right)^2 - \beta^2\right] \operatorname{erfc}\left(\beta + \frac{1}{2\alpha\beta}\right)$$

$$\frac{V_{riv}(t)}{V_p} = 4i^2 \operatorname{erfc}(\beta r - \frac{4}{\sqrt{\pi}} \alpha \beta e^{-\beta^2} + 4\alpha^2 \beta^2 \left[ \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \operatorname{erfc}\beta - \exp\left(\beta + \frac{1}{2\alpha\beta}\right)^2 - \beta^2 \operatorname{erfc}\left(\beta + \frac{1}{2\alpha\beta}\right)\right])$$

[C2]

### Configuration 3

Même configuration que celle de l'exemple 1 avec en plus l'existence d'un coteau imperméable parallèle au cour d'eau et situé à une distance  $l$  de celui-ci.

Notations : les mêmes que celles de l'exemple 1 plus :  $\lambda = \frac{l}{d}$

Solution :

$$\frac{Q_{riv}(t)}{Q_p} = \operatorname{erfc}(\beta) + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n [\operatorname{erfc}(2n\lambda + 1)\beta - \operatorname{erfc}(2n\lambda - 1)\beta]$$

$$\frac{V_{riv}(t)}{V_p} = 4i^2 \operatorname{erfc}(\beta r + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n [4i^2 \operatorname{erfc}(2n\lambda + 1)\beta - 4i^2 \operatorname{erfc}(2n\lambda - 1)\beta])$$
 [C3]

### Autres configurations

D'autres configurations sont traitées dans le rapport ci-dessous:

" *Etude de l'influence de pompages en nappes alluviales sur le régime d'étiage du réseau superficiel* " - R. F. Lelievre (Géohydraulique). Rapport BRGM 69 SGL073 HYD.

Des solutions plus complexes ont été ultérieurement développées (cf. références bibliographiques, en particulier B. Hunt).

Le logiciel STRMDEPL08 de l'USGS (cf. bibliographie) permet d'effectuer des calculs à partir de quelques solutions. Il est téléchargeable à l'adresse suivante:

<http://mi.water.usgs.gov/software/groundwater/strmdepl08/index.html>

...



**Centre scientifique et technique**  
3, avenue Claude-Guillemain  
BP 36009  
45060 – Orléans Cedex 2 – France  
Tél. : 02 38 64 34 34