

Avis du BRGM sur le modèle hydrodynamique et hydrodispersif du champ captant de Plobsheim (67)

BRGM/RP-60812-FR
Février 2012

Avis du BRGM sur le modèle hydrodynamique et hydrodispersif du champ captant de Plobsheim (67)

BRGM/RP-60812-FR

Février 2012

Étude réalisée dans le cadre du projet de service public 2011

A. Wuilleumier, J. Perrin
avec la collaboration de S. Urban

Vérificateur :

Nom : Y. Barthelemy

Date : 20/01/2012



Approbateur :

Nom : A-V. Barras

Date : 03/02/2012



En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique, l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

Mots clés : Hydrogéologie – modèle hydrodynamique – modèle Marthe – Alsace – Strasbourg – Plobsheim – alluvions du Rhin – Champ captant

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

A. Wuilleumier, J. Perrin, (2012), avec la collaboration de S. Urban – Avis du BRGM sur le modèle hydrodynamique et hydrodispersif du champ captant de Plobsheim (67). Rapport BRGM/RP-60812-FR. 63 pages, 18 fig., 6 tab., 3 annexes.

© BRGM, 2012, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Afin de garantir à long terme la sécurité qualitative et quantitative de ses approvisionnements en eau, la Communauté Urbaine de Strasbourg projette de diversifier ses ressources en eau potable : l'un des principaux projets du Schéma Directeur d'AEP est la création d'un champ captant à Plobsheim.

Considérant la grande sensibilité de ce projet et les enjeux considérables qu'il représente, l'ARS et la DREAL ont sollicité le BRGM afin qu'il émette un avis sur le modèle hydrodynamique et hydrodispersif du futur champ captant de Plobsheim. Le travail est cofinancé par l'AERM et le BRGM.

Le travail de modélisation conduit par le bureau d'études a été réalisé dans les règles de l'art, en respectant les procédures habituelles en la matière. Les résultats qui en découlent semblent réalistes et fiables mais plusieurs points doivent encore être améliorés pour permettre un contrôle plus poussé de la fiabilité du modèle et de ses prévisions.

Ainsi, la plupart des informations nécessaires à la compréhension du modèle sont fournies, à l'exception notable :

- de la valeur des charges imposées aux limites du modèle et de leur maintien ou non dans la phase de simulation des scénarios d'exploitation. Ceci est d'autant plus important que l'extension Nord-Sud du modèle semble insuffisante au regard de certains scénarios modélisés ;
- du bilan hydraulique des entrées / sorties du modèle, en particulier par les limites à charges imposées, ainsi que du bilan des échanges entre les différentes couches. L'évaluation par le modèle de l'alimentation de la nappe par le plan d'eau de Plobsheim constitue notamment un point critique dans la mesure où ce plan d'eau sera probablement amené à se colmater de plus en plus au cours du temps, comme en témoigne l'épaisse couche de sédiments fins qui s'y est déjà déposée.

L'absence de prise en compte dans le modèle de l'Altrhein, du Thumenrhein et du Rhin Tortu le rend impropre à évaluer l'impact du pompage sur ces cours d'eau. Or, leur proximité et les informations disponibles en bibliographie laissent supposer qu'ils interagissent avec la nappe alluviale.

Cet élément d'interrogation est renforcé par le fait que les rapports transmis par la DREAL et l'ARS laissent supposer que les eaux pompées lors du pompage d'essai ont été rejetées dans l'Altrhein. Parallèlement, le suivi piézométrique effectué à cette occasion (en particulier sur le Pz3 superficiel) montre une réalimentation probable de l'aquifère dans ce secteur, le pompage semblant partiellement réalimenté par ce cours d'eau. Si c'était le cas, les eaux rejetées dans l'Altrhein auraient pu biaiser le pompage d'essai en minorant les rabattements observés. Faute de point de mesure à l'amont de la confluence avec le Thumenrhein, il n'est pas possible de trancher cette question.

En termes de scénarios simulés, il est vivement suggéré de :

- simuler l'impact d'un pompage à 5000 m³/h compte tenu des attendus de fonctionnement du champ captant ;
- simuler un colmatage total du plan d'eau de Plobsheim pour se placer dans des conditions délibérément pessimistes. Ce scénario serait en fait une simple anticipation de l'évolution dans le temps de ce type d'ouvrage, en l'absence de curage.

A l'occasion de la mise en place du champ captant, il est vivement suggéré de prévoir un suivi piézométrique et hydrométrique au voisinage du champ captant et en particulier des :

- débits de l'Altrhein et du Thumenrhein à l'amont immédiat de leur confluence ;
- piézomètres accessibles dans le polder d'Erstein.

Il convient de rappeler, enfin, que le présent rapport est exclusivement axé sur la modélisation hydrogéologique du futur champ captant de Plobsheim. En particulier, ce rapport n'aborde pas du tout l'impact potentiel d'une baisse des niveaux de la nappe des alluvions sur les ouvrages d'art dont les fondations ont été dimensionnées sur la base d'un historique des fluctuations « naturelles » de la nappe.

Sommaire

1. Introduction	11
2. Travaux antérieurs à la version 2010-11 du modèle hydrogéologique.....	15
2.1. PREMIERE VERSION DU MODELE HYDROGEOLOGIQUE (2008).....	15
2.2. ACQUISITION DE DONNEES COMPLEMENTAIRES (2010).....	17
2.2.1. Rappel des investigations complémentaires mises en œuvre	17
2.2.2. Réalisation des forages : présence de l'intercalaire de moindre perméabilité.....	18
2.2.3. Réalisation et interprétation du pompage d'essai	23
2.2.4. Observation des rabattements induits dans les différents points de mesure, Altrhein et colmatage du plan d'eau de Plobsheim	24
2.2.5. Réalisation et interprétation de l'essai de traçage	28
2.2.6. Synthèse des remarques.....	29
3. Construction de la version 2010-11 modèle	31
3.1. EXTENSION GÉOGRAPHIQUE, MAILLAGE, NOMBRE DE COUCHES, CHOIX DES LIMITES ET PAS DE TEMPS	31
3.1.1. Extension et découpage horizontal et vertical du modèle	31
3.1.2. Pas de temps et période de calage du modèle en régime transitoire.....	34
3.2. TOPOGRAPHIE	34
3.3. CONSTRUCTION DE LA GÉOMÉTRIE DU MODÈLE HYDROGÉOLOGIQUE.....	35
3.4. INTÉGRATION DES PRÉLÈVEMENTS	36
3.5. INTÉGRATION DE LA RECHARGE.....	37
3.6. PRISE EN COMPTE DES RELATIONS NAPPE / EAUX DE SURFACE	38
3.6.1. Représentation des écoulements de surface dans le modèle maillé.....	38
3.6.2. Approche analytique de l'impact du pompage sur l'Altrhein.....	41
3.6.3. Synthèse concernant les relations entre la nappe et les eaux de surface.....	43
3.7. PRISE EN COMPTE DES GRAVIERES.....	44
4. Calage de la version 2010-11 du modèle	45
4.1. DÉMARCHE DE CALAGE ET RÉFÉRENCES UTILISÉES	45
4.1.1. Démarche de calage	45

4.1.2. Données de référence utilisées	45
4.2. VALEURS ATTRIBUÉES AUX PARAMÈTRES HYDROGÉOLOGIQUES	49
4.2.1. Perméabilité	49
4.2.2. Coefficient d'emmagasinement	52
4.2.3. Coefficients de dispersion et respects de critères liés à la modélisation hydrodispersive	53
4.3. QUALITÉ DU CALAGE AU VU DES RÉFÉRENCES UTILISÉES	55
4.3.1. Calage en régime permanent	55
4.3.2. Calage en régime transitoire.....	58
4.4. ANALYSES DE SENSIBILITÉ	58
5. Exploitation de la version 2010-11 du modèle.....	59
5.1. SCENARIO DU RAPPORT 2011	59
5.1.1. Hypothèses retenues.....	59
5.1.2. Choix de la valeur de la perméabilité de colmatage pour les scénarios de base de la simulation et de sa variante.....	60
5.2. AUTRES SCENARIOS	60
6. Conclusions.....	61
7. Bibliographie	63

Liste des illustrations

Figure 1 : « Zoom » sur le maillage du premier modèle développé par ANTEA.....	16
Figure 2 : Extension (en orange) de l'intercalaire de moindre perméabilité selon le projet LIFE	19
Figure 3 : Extension du modèle hydrogéologique (angles rouges, le modèle se prolonge symétriquement au Rhin côté Allemagne) et localisation du champ captant (carré bleu). Les forages avec logs géologiques validés saisis dans la BSS sont indiqués par les points rouges et leur code est repris dans le Tableau 1.....	20
Figure 4 : Profil géologique reliant les forages d'exploration 2009 (SAFEGE 2010)	23
Figure 5 : Plan de localisation des points de mesure suivis lors des pompages d'essai (rapport ANTEA 2010, page 59).....	25
Figure 6 : Observation du rabattement en fonction de la distance au puits de pompage (rapport ANTEA 2010, page 48).....	26
Figure 7 : Extension et maillage du modèle maillé (rapport ANTEA 2011, page 14).....	33

Figure 8 : Recharge prise en compte dans le cadre du modèle maillé de la plaine d'Alsace (BRGM, 1998)	38
Figure 9 : Mesures de débit sur les cours d'eau à proximité immédiate du futur champ captant (point rouge) : Thumenrhein (0.21-0.49 m ³ /s) ; Altrhein (3.08-3.69 m ³ /s). (rapport SAFEGE 2010, page 100).....	39
Figure 10 : Représentation des écoulements en eau de surface dans le modèle maillé (rapport ANTEA 2011, Annexe D)	40
Figure 11 : Résultat d'une simulation par formule analytique de l'influence du pompage sur le débit d'un cours d'eau et l'alimentation du pompage par le cours d'eau. Résultat pour un pompage à 5000 m ³ /h.....	43
Figure 12 : Chronique piézométrique de l'ouvrage 02726X0008 (en m).....	46
Figure 13 : Baisse du niveau piézométrique sur le piézomètre 02726X0008 lors du pompage d'essai du 23 au 30 novembre 2011	46
Figure 14 : Chronique piézométrique de l'ouvrage 02726X0042	47
Figure 15 : Champ de perméabilité avant calage pour la partie supérieure de l'aquifère alluvial (rapport BRGM 1998).....	50
Figure 16 : Champ de perméabilité avant calage pour la partie moyenne de l'aquifère alluvial (rapport BRGM 1998).....	51
Figure 17 : Diagramme de dispersion en cotes altimétriques, hors pompage (rapport ANTEA 2011, page 21)	56
Figure 18 : Diagramme de dispersion en rabattement (rapport ANTEA 2011, page 22)	57

Liste des tableaux

Tableau 1 : Lithologies décrites dans les forages suffisamment profonds de la zone d'étude (logs validés de la BSS)	21
Tableau 2 : Résultats de l'essai de traçage. Les paramètres indexés avec une * sont calculés par calage d'un modèle analytique sur la courbe de restitution.	29
Tableau 3 : Différentiel de débit entre entrée et sortie du polder d'Erstein (ULP- Ginger Environnement, 2005).....	41
Tableau 4 : Statistiques sommaires par décennie des niveaux piézométriques dans les piézomètres 02762X0008 et 02762X0042 (en m)	48
Tableau 5 : Débit global de drainage des giessens du polder d'Erstein (rapport ANTEA 2011, page 24)	49
Tableau 6 : Perméabilités et emmagasinelements résultant du calage du modèle en régime transitoire (rapport ANTEA 2011, page 25)	52

Liste des annexes

Annexe 1 : Localisation des piézomètres de la zone d'étude et fonds topographiques de 1956, 1979 et actuels.

Annexe 2 : Tableau des piézomètres ayant fait l'objet d'un suivi dans le secteur de Plobsheim

Annexe 3 : Coupe hydrogéologique Strasbourg – Offenbourg n°3

1. Introduction

Contexte de l'étude

La Communauté Urbaine de Strasbourg (CUS) a adopté en 1994 un schéma directeur d'Alimentation en Eau Potable (SDAEP). Afin de garantir à long terme la sécurité qualitative et quantitative de ses approvisionnements en eau, la CUS projette de diversifier ses ressources en eau potable : l'un des principaux projets du SDAEP est la création d'un champ captant à Plobsheim.

Son implantation prévisionnelle est située à 2,3 km au sud-est du centre urbain de Plobsheim. Il est prévu que ce champ captant se compose de 6 forages d'une profondeur de 80 mètres et d'un débit maximal de 1 000 m³/h chacun. La CUS envisage de mettre en service ce champ captant en 2014. Le projet prévoit également la mise en place de plusieurs kilomètres de conduites d'un diamètre de 800 à 1 000 mm pour relier les futurs forages au réseau d'eau potable de la CUS.

Le projet présente un enjeu majeur, à plusieurs titres :

- sur le plan sanitaire : la création du champ captant de Plobsheim est un maillon fondamental du futur réseau d'eau potable de la CUS. Sa mise en service est indispensable tant la vulnérabilité des ressources actuelles est forte, en particulier au forage d'Oberhaubergen et dans le champ captant du Polygone, complètement insérés dans le tissu urbain et industriel. En cas de pollution majeure des forages du Polygone – qui représentent actuellement environ 70% de l'alimentation en eau potable de la CUS - la CUS ne dispose actuellement d'aucun moyen d'alimentation de secours permettant de compenser une telle production.
- sur le plan environnemental : le choix de créer un champ captant de cette ampleur dans un milieu protégé reflète une volonté de protéger le plus efficacement possible les futures ressources en eau potable pour plusieurs dizaines d'années, mais soulève néanmoins des appréhensions, voire des réserves, de la part d'élus et de Services de l'Etat.
- sur le plan politique : les périmètres de protection touchent deux communes (Nordhouse et Erstein) qui ne sont pas sur le territoire de la CUS.

Considérant la grande sensibilité de ce projet et les enjeux considérables qu'il représente, l'ARS et la DREAL ont sollicité le BRGM afin qu'il émette un avis sur le modèle hydrodynamique et hydrodispersif du futur champ captant de Plobsheim.

Le travail est cofinancé par l'AERM et le BRGM ; il a été réalisé sur la base d'une analyse des documents fournis par l'ARS et la DREAL, à l'exclusion de toute acquisition de données complémentaires ou d'investigations de terrain, et dans un délai de deux mois à compter de la signature de la convention.

Historique des travaux soumis à l'avis du BRGM

Depuis 2007, de nombreuses études hydrogéologiques ont été réalisées sur le secteur de Plobsheim, qu'il s'agisse d'investigations de terrain (forages de reconnaissance, pompages d'essais, traçages,...) ou d'une modélisation hydrodynamique et hydrodispersive, c'est-à-dire représentant le transport d'éléments en solution dans l'eau.

Un premier modèle hydrogéologique a été élaboré et ses résultats présentés en 2008 (rapport ANTEA A48158/A). Il a été suivi par la réalisation d'investigations hydrogéologiques complémentaires courant 2009, avec mise à jour du modèle (rapport ANTEA A57129/A, 2010), puis en 2011 (rapport ANTEAGROUP, A63820/A) par une synthèse des travaux de modélisation hydrodynamique et hydrodispersive.

En 2010, le dossier préalable à la définition des périmètres de protection a été établi (rapport SAFEGE du 25 mars 2010) et un hydrogéologue agréé a établi un avis relatif à la délimitation des périmètres de protection : ces rapports fournissent un éclairage très utile sur l'ensemble des travaux antérieurs, notamment au travers des chapitres 4 des deux rapports.

Dans le présent rapport, l'essentiel des remarques porte sur la version 2010-11 du modèle, celle qui est décrite dans le rapport de synthèse (rapport ANTEAGROUP A63820/A, 2011) et dans le rapport ANTEA 2010 (dont les textes sont d'ailleurs parfois identiques).

Les références de l'ensemble des documents transmis par l'ARS et la DREAL sont présentées en bibliographie.

Cadre de l'avis du BRGM

L'avis du BRGM est présenté ici dans son intégralité. Il s'organise autour de trois pôles :

- apporter un avis sur le modèle conceptuel retenu pour la modélisation, notamment en termes de formations modélisées et de couches de modèle associées, d'extension géographique et de conditions aux limites, de choix et de longueur de la période de calage ;
- analyser la démarche employée pour le calage, en abordant les données d'entrée du modèle, les résultats en sortie au regard du bilan des flux, des relations infiltration-stockage-déstockage en eau, des relations nappe-rivières. L'analyse porte également sur les références utilisées pour ce calage (exhaustivité des chroniques piézométriques et des cartes piézométriques) ;
- apprécier la qualité du calage sur la base des éléments fournis dans les documents disponibles, en analysant les graphiques présentés et en s'assurant de la cohérence des paramètres hydrodynamiques et hydrodispersifs du modèle calé vis-à-vis de la gamme des valeurs connues pour les formations modélisées. Une attention particulière est portée aux valeurs de perméabilité utilisées dans le modèle, ainsi qu'à la cohérence de la représentation du

colmatage du plan d'eau de Plobsheim. En complément de l'analyse des documents fournis par l'ARS et la DREAL, le BRGM s'appuie sur la Banque de données du Sous-Sol afin de rechercher des informations – directes et indirectes – permettant de qualifier ce colmatage.

2. Travaux antérieurs à la version 2010-11 du modèle hydrogéologique

2.1. PREMIERE VERSION DU MODELE HYDROGEOLOGIQUE (2008)

La première version du modèle hydrogéologique a été réalisée avec le logiciel Marthe, développé et maintenu par le BRGM. Ce logiciel est dédié à la modélisation des écoulements souterrains et à la migration des pollutions au sein des aquifères. Il est donc parfaitement adapté à la problématique de modélisation du champ captant de Plobsheim.

La description de la construction du modèle 2008 demeure sommaire puisque l'on ne connaît pas, par exemple, son extension globale (la Figure 1 présentée en annexe du rapport d'ANTEA fournit un « zoom » du maillage), le nombre de mailles actives, les conditions aux limites utilisées, la distribution spatiales des épaisseurs des quatre couches modélisées, ni topographie de la première couche (correspondant à la surface du sol).

La présentation des quatre couches modélisées est très sommaire, le rapport faisant seulement état de (ANTEA, 2008, page 16) :

- « une couche superficielle (n°1) épaisse de 1 à 5 mètres, permettant de représenter les relations rivières/plans d'eau avec les aquifères sous-jacents ;
- une couche (n°2) représentant l'aquifère haut des alluvions rhénanes entre 15 m et 25 m de profondeur ;
- une couche (n°3) épaisse d'un mètre. représentant la couche argileuse ou limono-argileuse séparant l'aquifère haut et l'aquifère bas ;
- une couche (n°4) représentant l'aquifère graveleux inférieur, situé sous 25 mètres de profondeur. Cette couche est très variable compte tenu de la structure du substratum. »

L'absence d'une cartographie des épaisseurs des différentes couches ne permet pas, par exemple, d'identifier les hypothèses prises pour la première couche, ni de se faire une idée précise de la couche représentant le niveau intermédiaire de plus faible perméabilité. Il semble néanmoins que cette couche ait été considérée comme continue sur l'ensemble du domaine modélisé, ce qui n'est pas totalement conforme à la description faite en page 13 :

« Par sécurité et suite aux observations faites plus au Nord sous l'agglomération de Strasbourg, cette couche est considérée ainsi :

- non continue,
- non entièrement argileuse,
- épaisse d'environ un mètre et située entre 24 et 25 mètres de profondeur.
- séparant hydrauliquement, partiellement, les aquifères haut et bas. »

Il demeure donc une certaine ambiguïté quant à l'extension adoptée pour cette couche.

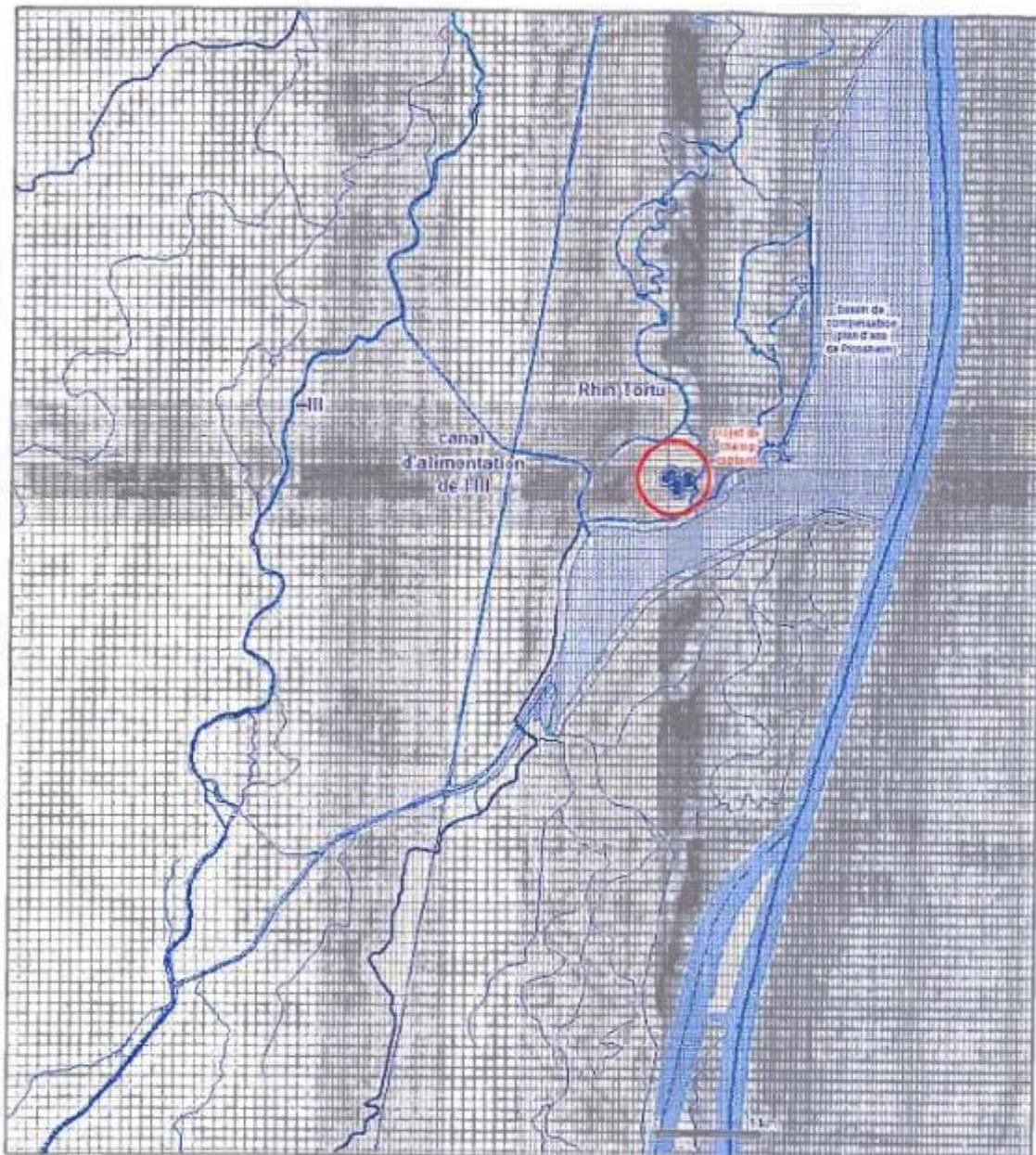


Figure 1 : « Zoom » sur le maillage du premier modèle développé par ANTEA

Le modèle a été réalisé en régime permanent (page 19) et a été calé sur une piézométrie dite « de référence », correspondant à une campagne piézométrique réalisée en janvier 1997. Le rapport présente la carte piézométrique (page 17) mais celle-ci ne comporte pas les points de mesure de niveau d'eau, ce qui ne permet pas d'apprécier sa précision.

Sans entrer davantage dans les hypothèses prises par le bureau d'études pour la construction du modèle hydrogéologique maillé, on note que le rapport passe d'un chapitre relatif à la construction du modèle (chapitre 4, page 16) au chapitre des

résultats des scénarios modélisés (chapitre 5, page 22) sans aucune présentation des résultats du calage. Le rapport ne présente ainsi ni diagramme de dispersion¹, ni cartographie de la piézométrie simulée dans les couches 2 et 4 du modèle (la carte piézométrique de référence étant utilisée pour caler la couche 2 et la couche 4 ?), ni bilan hydraulique entre entrées et sorties dans les différentes couches du modèle.

En l'absence de ces éléments, les résultats des scénarios d'exploitation ne peuvent être évalués. Compte tenu des améliorations substantielles apportées aux volets suivants de l'étude ANTEA – *a minima* en termes de présentation - l'analyse du premier modèle n'a pas été poursuivie davantage.

2.2. ACQUISITION DE DONNEES COMPLEMENTAIRES (2010)

2.2.1. Rappel des investigations complémentaires mises en œuvre

A la suite du premier modèle réalisé par ANTEA, des investigations complémentaires ont été mises en œuvre sur le site du projet de champ captant. Il s'est agi de la réalisation :

- du forage, de l'équipement et du développement d'un puits d'essai (du 22 juillet au 16 novembre 2009) ;
- de six piézomètres d'observation : Pz1 profond, Pz1 superficiel, Pz2 profond, Pz2 superficiel, Pz3 profond, Pz3 superficiel (du 17 août au 8 octobre 2009) ;
- d'un pompage d'essai par paliers (17 et 18 novembre 2009) ;
- d'un pompage d'essai en continu entre le 23 et le 30 novembre 2009 à un débit de 1007 m³/h, avec suivi sur les piézomètres forés, plusieurs puits et des niveaux d'eau superficielle. Cet essai s'est accompagné de la prise d'échantillons d'eau en sortie du puits de pompage après 24h, 48h et 72h de pompage ;
- d'une opération de traçages à l'occasion du pompage d'essai en continu ;
- de prélèvement d'échantillons d'eau pour la réalisation d'analyses chimiques en laboratoire (du 1^{er} au 3 décembre 2009), aussi bien dans les piézomètres captant la partie profonde de l'aquifère (Pz1 profond, Pz2 profond, Pz3 profond, sondage 1997), que dans les piézomètres captant la partie supérieure de l'aquifère (Pz1 superficiel, Pz2 superficiel, Pz3 superficiel, puits Bapst 2, puits Bapst 3, puits Jacob AEP, nouveau Pz de la gravière Nordhouse) et dans les eaux superficielles (Altrhein, étang du puits Jacob en relation avec le Rhin Tortu).

Ces investigations sont décrites dans les rapports ANTEA et SAFEGE de février et mars 2010, respectivement.

¹ Graphique dans lequel on représente, par piézomètre et pour un état piézométrique donné, la cote des niveaux simulés en regard de la cote des niveaux observés. Dans le cas d'un modèle restituant parfaitement les niveaux piézométriques, les points sont alignés sur une droite d'équation $y = x$.

2.2.2. Réalisation des forages : présence de l'intercalaire de moindre perméabilité

Cet aspect est traité aussi bien au regard des investigations effectuées sur le terrain que des données disponibles dans la Banque du Sous-Sol (BSS) gérée par le BRGM, et de différentes sources bibliographiques.

Un certain nombre de forages décrits dans la BSS présente des informations sur les lithologies rencontrées dans le secteur de Plobsheim, et sur leurs épaisseurs dans la tranche 0-100 m qui nous intéresse (Figure 3 et Tableau 1 – NB : pas d'information disponible sur les premiers 100m pour les forages 02725X0067, 02726X0059, 03082X0027). Ces informations montrent en particulier que l'intercalaire n'est argileux que dans un forage (02727X0045) entre 21 et 23.7 m de profondeur. Les autres sites qui montrent cette tendance argileuse sont les forages 02726X0001 (présence d'argile entre 54-57 m de profondeur), 02726X0004 (argile entre 55-57 m) et 02726X0277 (argile entre 68-69 m), toujours à des profondeurs significativement plus importantes.

Au droit du futur champ captant, les forages de reconnaissance réalisés en 2009 (3 piézomètres profonds, 3 piézomètres superficiels et un puits profond) n'ont montré la présence de matériaux argileux que sur deux ouvrages : argile sablonneuse plastique gris-brun entre 12 et 13 mètres sur Pz3 superficiel, sable fin légèrement argileux entre 12 et 15 mètres sur le puits d'essai. De plus, le forage de reconnaissance réalisé en 1997 à proximité du champ captant (02726X0277) ne montre pas de niveau argileux : selon le rapport ANTEA (2008), la description lithologique n'est pas suffisamment détaillée pour mettre en évidence un niveau argileux vers 20-30 m de profondeur. Enfin, le résultat d'une diagraphie gamma-ray (rapport ANTEA 2010, page 16) ne montre aucun signe de couche argileuse avant 98 m de profondeur.

Ces observations montrent qu'un niveau intermédiaire de faible perméabilité n'existe que localement, qu'il est très discontinu et situé à des profondeurs variables.

Cette vision est cohérente avec celle qui a été adoptée de façon plus globale pour la cartographie de cet intercalaire dans le cadre du projet européen LIFE (1995-96). A cette occasion, une carte avait été établie en collaboration entre le BRGM et le Service géologique du Baden Württemberg (cf. Figure 2). Cette figure montre cependant que cet intercalaire était supposé exister dans la zone du champ captant, ce qui n'est manifestement pas le cas d'après les nouveaux logs de sondages disponibles.

En sus de la cartographie, une série de coupes hydrogéologiques Strasbourg – Offenbourg a été réalisée (cf. coupe 3 en annexe 3). Cette coupe montre clairement l'absence de continuité de cet intercalaire entre l'Ill et le Rhin, avec de plus peu d'identification de niveaux argileux dans les logs retenus pour la coupe.

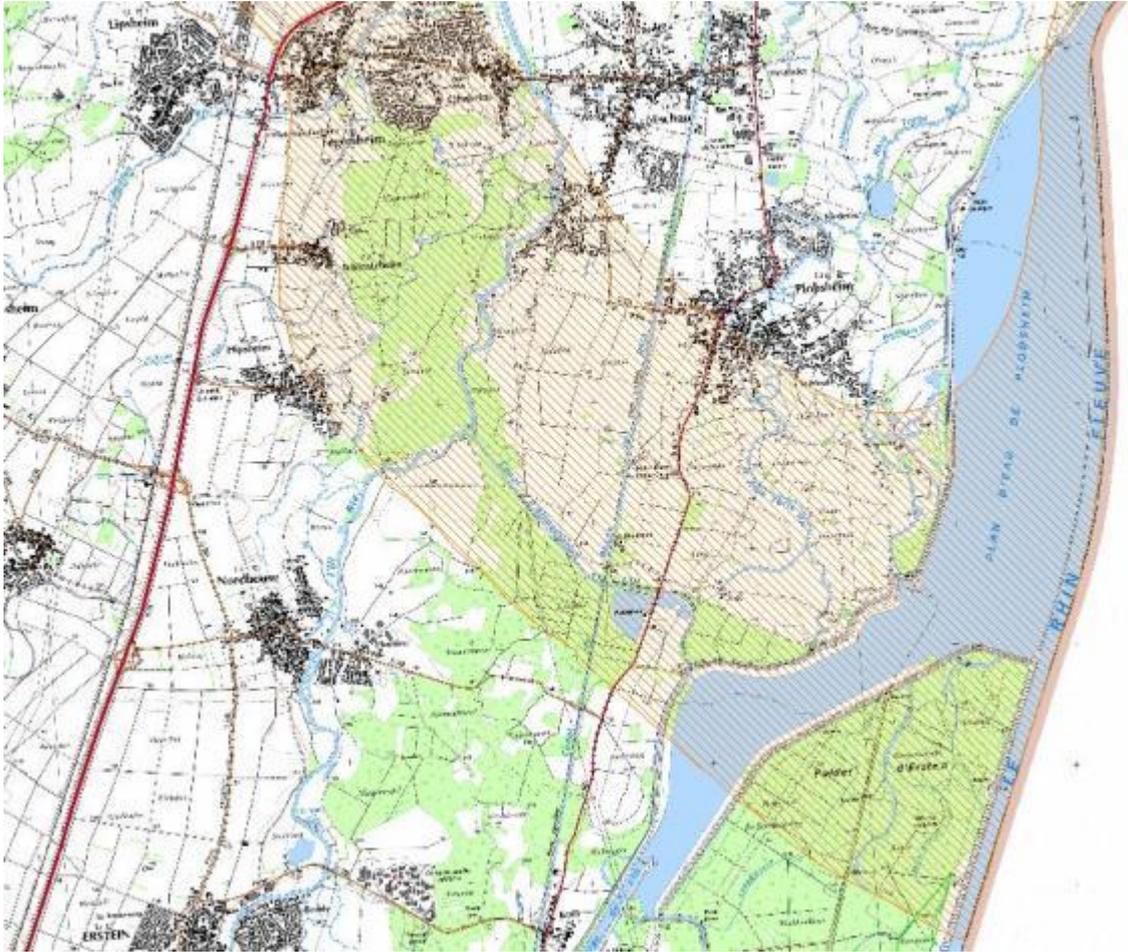


Figure 2 : Extension (en orange) de l'intercalaire de moindre perméabilité selon le projet LIFE

L'hydrogéologue agréé propose de son côté une vision similaire de cet intercalaire dans son avis de juillet 2010 (page 20) : « Ce niveau à tendance sablo-argileuse rencontré dans les ouvrages ci-dessus ne peut constituer un écran vis-à-vis des pollutions intervenant en surface. En effet, son argilosité qui pourrait lui conférer ce rôle est globalement insuffisante et sa continuité dans le plan n'est pas assurée. »

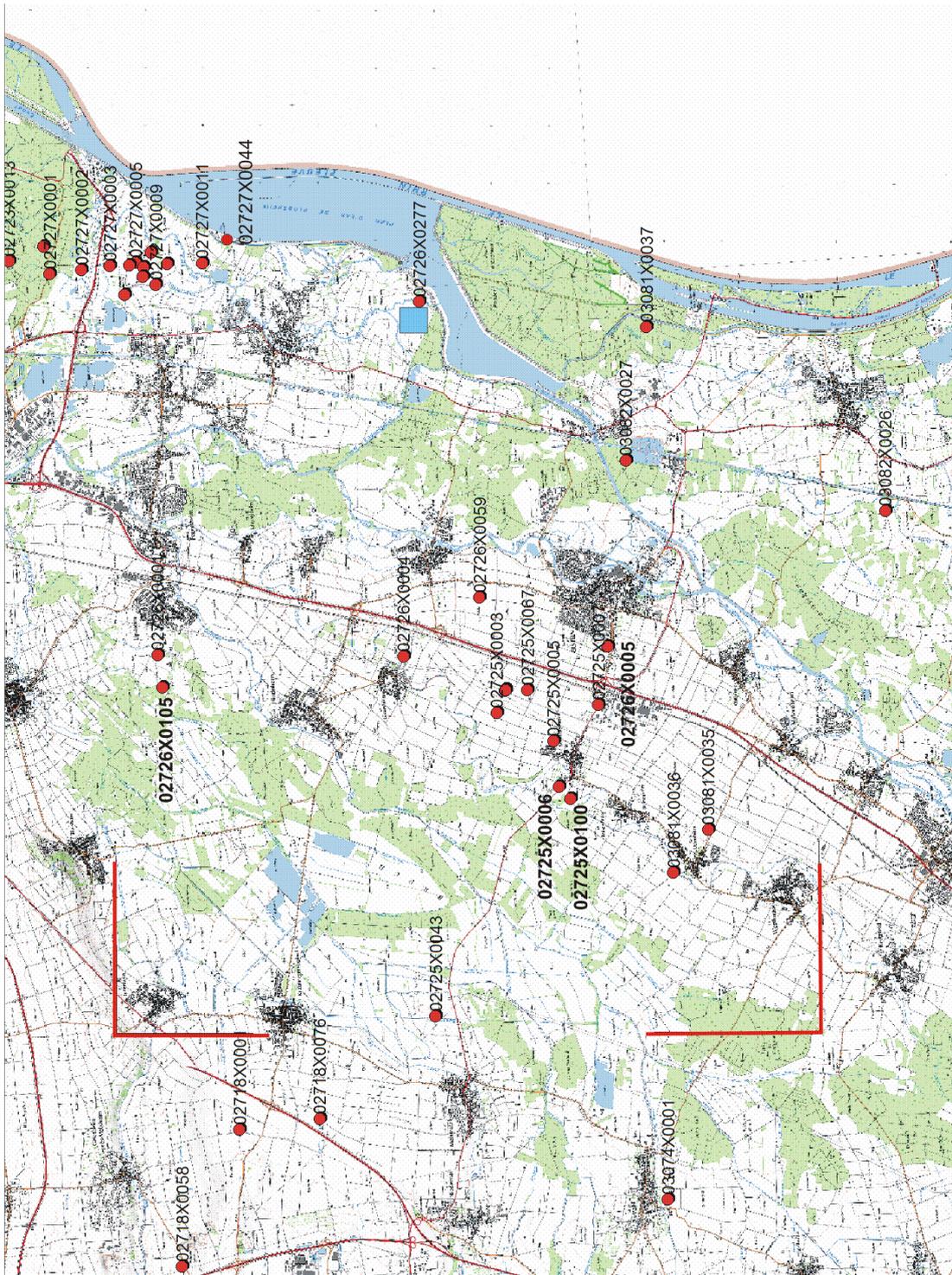


Figure 3 : Extension du modèle hydrogéologique (angles rouges, le modèle se prolonge symétriquement au Rhin côté Allemagne) et localisation du champ captant (carré bleu). Les forages avec logs géologiques validés saisis dans la BSS sont indiqués par les points rouges et leur code est repris dans le Tableau 1

Identifiant	Prof totale-m	Prof. Intervalle-m	Lithologie
P5-puits d'essai	83	0-12 12-15	galets,gravier, sable sable fin légèrement argileux
Pz1-sup	16	0-16	galets,gravier, sable
Pz1-prof	80	1-71	galets,gravier, sable
Pz2-sup	16	0-16	galets,gravier, sable
Pz2-prof	77	0-16 16-17	galets,gravier, sable sable fin
Pz3-sup	13.3	0-12 12-13	galets,gravier, sable argile sablonneuse
Pz3-prof	87	0-10 10-16	galets,gravier, sable 70% sable fin, gravier
02725X0003	280	1-63 63-72	sable; graviers. mame (33%<CO3<66%).
02725X0005	400	1.5-63 63-66	sable-graviers, galets argile sableuse.
02725X0006	615	0.5-75 75-90	gravier Graviers et sable fin.
02725X0007	518	78-80	sable argileux.
02725X0034	856	0-70	Argile sableuse; graviers.
02725X0043	1273	0-55 70-79 88-93	sable; graviers; galets. galets. graviers
02725X0100	980	0-112	Argile sableuse; graviers.
02726X0001	988	0-54 54-57 57-116	graviers argile mame (33%<CO3<66%).
02726X0004	85	1-55 55-57 57-80	sable; graviers; galets. argile argile sableuse; galets; graviers.
02726X0005	356	2-92 92-94	sable; graviers; galets argile; sable.
02726X0105	1815	0-77 77-167	Argiles lignite marnes lignite et alluvions pliocènes mame (33%<CO3<66%).
02726X0277	165	1-68 68-69 69-84 84-109	sable-graviers, galets argile; galets; graviers. galets, gravier, sable argile, sable
02727X0007	1315	0-75 78-125	sable; graviers; galets. sable; graviers; galets.
02727X0008	949	0-215	sable; graviers.
02727X0009	550	0-216	graviers.
02727X0010	873	0-160	sable; graviers; galets.
02727X0011	898	0.5-110	alluvions Wurm: sable, gravier, galet
02727X0044	30	0.4-2.7 2.7-30	argile sableuse jaune gravier, sable
02727X0045	23.7	0-21 21-23.7	gravier, galets, sable argile jaune, sable grossier
03081X0035	300	4-31 36-42 70-73	graviers sable, galets sable argileux.
03081X0036	339	1-58 58-69 69-76 79-85	galets. sable; graviers; galets. argile sableuse. sable, argile,gravier
03081X0037	664	0-66 66-153	graviers. sable; argile.

Tableau 1 : Lithologies décrites dans les forages suffisamment profonds de la zone d'étude (logs validés de la BSS)

D'après le rapport SAFEGE (2010) : « dans le secteur du projet de champ captant, la plupart des forages présentant une description assez complète de la lithologie entre 20 et 30 mètres de profondeur mettent en évidence la présence d'un niveau argileux situé entre 20 et 25 mètres de profondeur. Cette couche semi-perméable à imperméable d'une épaisseur allant de 0,4 à 2,7 m d'épaisseur, silto-argileuse à argileuse, individualise partiellement 2 aquifères, un superficiel et un profond. Ce niveau imperméable différenciant deux nappes (haute et basse) est fréquemment observé dans l'agglomération strasbourgeoise ». Cette interprétation est reprise pour constituer une coupe géologique présentée en Figure 4.

L'attribution d'un rôle semi-perméable/perméable à cette couche 3 nécessite d'être nuancée au regard des observations suivantes :

- 1) Les descriptions lithologiques en forage ont montré que cette couche est très discontinue et rarement argileuse (cf. paragraphe précédent).
- 2) Lors de l'essai de pompage, les réponses piézométriques ont été très similaires dans les piézomètres profonds et les piézomètres superficiels (à l'exception du Pz3 profond qui affiche un rabattement plus important que le Pz3 superficiel : ce qui pourrait indiquer un contraste significatif entre perméabilités horizontale et verticale, peut-être imputable à une faible perméabilité locale de « l'horizon argileux intermédiaire »).
- 3) L'injection d'un traceur artificiel dans le piézomètre Pz3 superficiel s'est faite au niveau des crépines situées entre 3.7-11.7 m de profondeur, c'est-à-dire au-dessus de la couche argileuse rencontrée entre 12-13 m de profondeur. Cependant le traceur a été détecté rapidement au puits de pompage dont les crépines commencent à 24 m sous la surface, ce qui atteste qu'il a cheminé au travers de la couche « argileuse ». La réponse du traceur est tout à fait similaire à celle obtenue pour le traceur injecté dans la partie plus profonde de l'aquifère (Pz3 profond), ce qui montre le caractère très discontinu de cette couche argileuse et son rôle protecteur très limité pour la tranche profonde de l'aquifère vis-à-vis des pollutions de surface.
- 4) Les données physico-chimiques collectées sur les piézomètres profonds montrent une eau oxygénée (ce qui ne serait pas le cas en situation de confinement), une chimie très similaire à celles des piézomètres superficiels, preuve d'une bonne homogénéisation, et une présence de contaminants issus de la surface (atrazine, tétrachloroéthylène), en concentrations plus élevées que dans les piézomètres superficiels.

Tous ces éléments montrent le rôle protecteur très limité, voire inexistant, de l'horizon intercalaire argileux correspondant à la couche 3. La coupe géologique de la Figure 4 est critiquable car elle présente un niveau sablo-argileux continu alors que les observations montrent qu'il doit s'agir de niveaux sableux (avec présence d'argile dans certains cas) discontinus tels qu'attendus dans les formations alluviales (chenaux ayant divagué au cours du temps). La présence de ce niveau discontinu a toutefois des implications sur l'anisotropie de l'aquifère compte tenu de la perméabilité plus faible de ces formations par rapport à la matrice sablo-graveleuse dominante.

Un bémol néanmoins concernant le rôle de cet intercalaire : les coefficients d'emmagasinement obtenus lors de l'interprétation du pompage d'essai sur les données du Pz3 profond et du puits de pompage qui montrent une valeur faible ($6.6 \cdot 10^{-5}$), typique d'un aquifère confiné ($< 5 \cdot 10^{-3}$ d'après Freeze et Cherry 1979). Sa prise en compte localement semble donc justifiée.

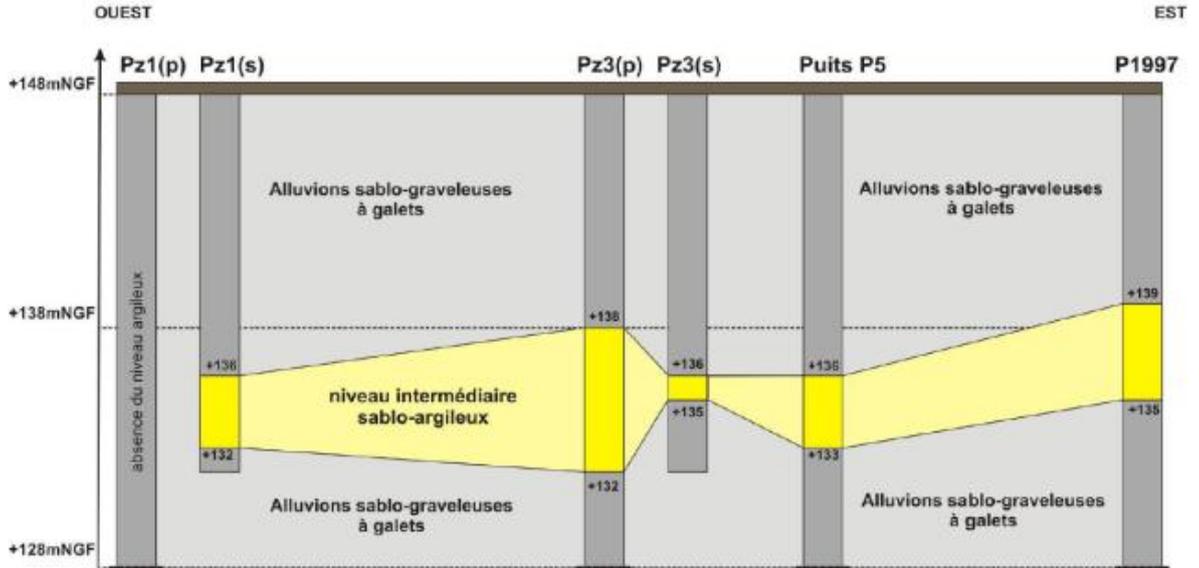


Figure 4 : Profil géologique reliant les forages d'exploration 2009 (SAFEGE 2010)

Au vu de l'ensemble de ces éléments, il apparaît peu réaliste de considérer une couche intermédiaire continue de moindre perméabilité. On verra par la suite qu'il semble (le rapport ANTEA ne présente pas de carte d'extension de ce niveau) qu'une représentation discontinue ou au moins hétérogène ait été adoptée dans le modèle, dans la mesure notamment où l'impact de l'intercalaire n'est que local. Notons que la perméabilité retenue pour cette couche – lorsqu'elle est présente – ($8 \cdot 10^{-4}$ m/s, hormis aux abords du puits de pompage et de Pz3 sup. et profond : $5 \cdot 10^{-6}$ m/s) correspond à celle d'un horizon tout à fait perméable.

2.2.3. Réalisation et interprétation du pompage d'essai

Un pompage continu au débit de $1\,007 \text{ m}^3/\text{h}$ a été effectué sur le puits d'exploration P5, du 23 au 30 novembre 2009 (7 jours) avec suivi par enregistreur automatique sur le puits pompé et plusieurs piézomètres. Le suivi de la remontée de la nappe après l'arrêt du pompage a duré environ 18 heures. Une telle expérience est la plus adéquate pour déterminer les propriétés hydrodynamiques (transmissivité, coefficient d'emmagasinement) représentatives de l'aquifère. L'interprétation des rabattements a été réalisée avec la formulation analytique de Theis, ce qui a permis de calculer une transmissivité et un emmagasinement pour l'aquifère, paramètres qui ont ensuite été utilisés pour la modélisation.

Le rejet des eaux de pompage a semble-t-il été effectué dans l'Altrhein : cela a en tout cas été le cas lors du développement de l'ouvrage, comme l'indique le rapport ANTEA 2010 en page 29 : « Pendant toutes ces opérations, les eaux issues du pompage ont été rejetées dans l'Altrhein, après passage par un bac de décantation. ». Si tel a bien été le cas, on ne peut exclure que le rejet des eaux dans l'Altrhein ait influencé le niveau d'eau dans les forages par réinfiltration partielle du débit pompé (cf. suite concernant la remontée du niveau d'eau après pompage au piézomètre Pz3 superficiel).

Les rabattements relevés sur plusieurs piézomètres (puits Bapst 1, puits Jacob, piézomètre Safege, piézomètre du plan d'eau de Plobsheim, Annexe E, ANTEA 2010) n'ont pas été interprétés. Afin d'exploiter au maximum les données acquises lors de cette expérience, il aurait été souhaitable d'interpréter toutes les mesures et d'utiliser des méthodes d'interprétation complémentaires : analyse diagnostic des rabattements (méthode des dérivées) permettant de déterminer la dimension des écoulements et la présence de limites, utilisation de modèles analytiques adaptés à des conditions de nappe libre, des conditions d'anisotropie, la présence d'une limite alimentée, etc. Ces interprétations additionnelles permettraient d'affiner le modèle hydrogéologique conceptuel de la zone d'étude.

2.2.4. Observation des rabattements induits dans les différents points de mesure, Altrhein et colmatage du plan d'eau de Plobsheim

Lors de l'essai de pompage de longue durée, on a observé :

- avant pompage, des plans d'eau en équilibre avec la nappe (plan d'eau gravière Nordhouse, Etang 2) et des plans d'eau et cours d'eau plus élevés que la nappe, alimentant donc potentiellement celle-ci : Plan d'eau Puits Jacob (+0.8 m), Rhin Tortu après seuil (+0.4 m), Plan d'eau Plobsheim (+2.3 m), Etang 1 (+0.5 m), Etang 3 (+1.0 m), Altrhein (+0.4 m).
- en fin de pompage, une baisse de niveau a été constatée sur les plans d'eau Etang 1 (-0.15 m) et Etang 2 (-0.07 m), alors qu'aucune baisse n'était identifiée sur le Plan d'eau Puits Jacob et Etang 3. Aucune mesure n'est disponible pour les autres plans d'eau/cours d'eau.

La localisation des différents points de mesure suivis lors des pompages d'essai est présentée en Figure 5. On note l'absence de points de mesure sur le polder d'Erstein.

Sur la Figure 6 (ANTEA 2010, page 48), une relation linéaire, conforme à la théorie des écoulements radiaux en milieu homogène, apparaît entre rabattement aux piézomètres en fin de pompage et distance pompage-piézo-mètres en échelle logarithmique. On voit cependant que les piézomètres Plan d'Eau Plobsheim, puits Bapst 2, Pz2 superficiel, Pz3 superficiel et Safege montrent des rabattements inférieurs de 7 à 15 cm aux attentes : cela peut être une indication de l'existence i) d'une limite alimentée à proximité de ces piézomètres, ou ii) d'une couche de plus faible perméabilité entre l'aquifère inférieur dans lequel le pompage est effectué et l'aquifère supérieur où sont implantés ces piézomètres.

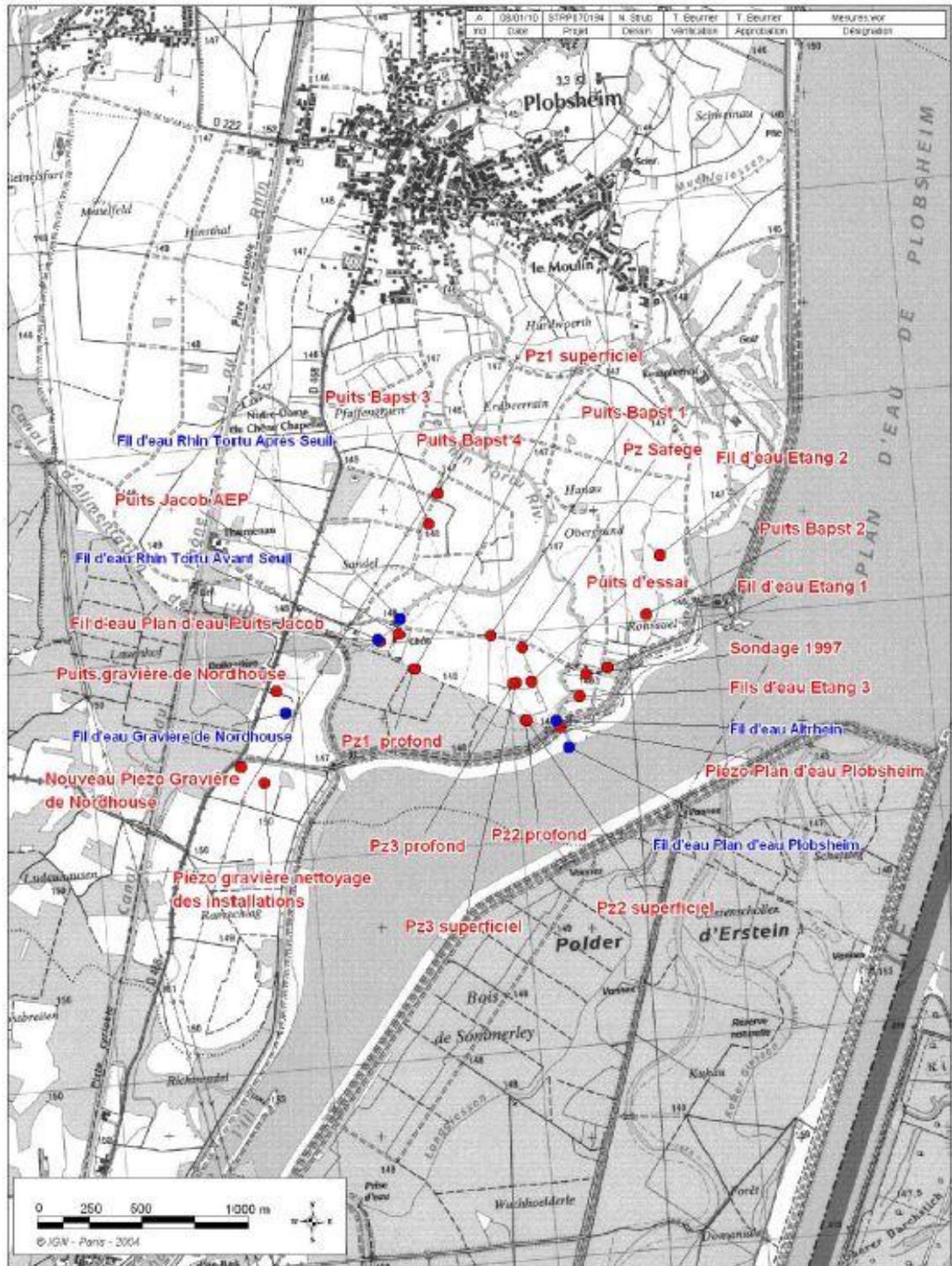


Figure 5 : Plan de localisation des points de mesure suivis lors des pompages d'essai (rapport ANTEA 2010, page 59)

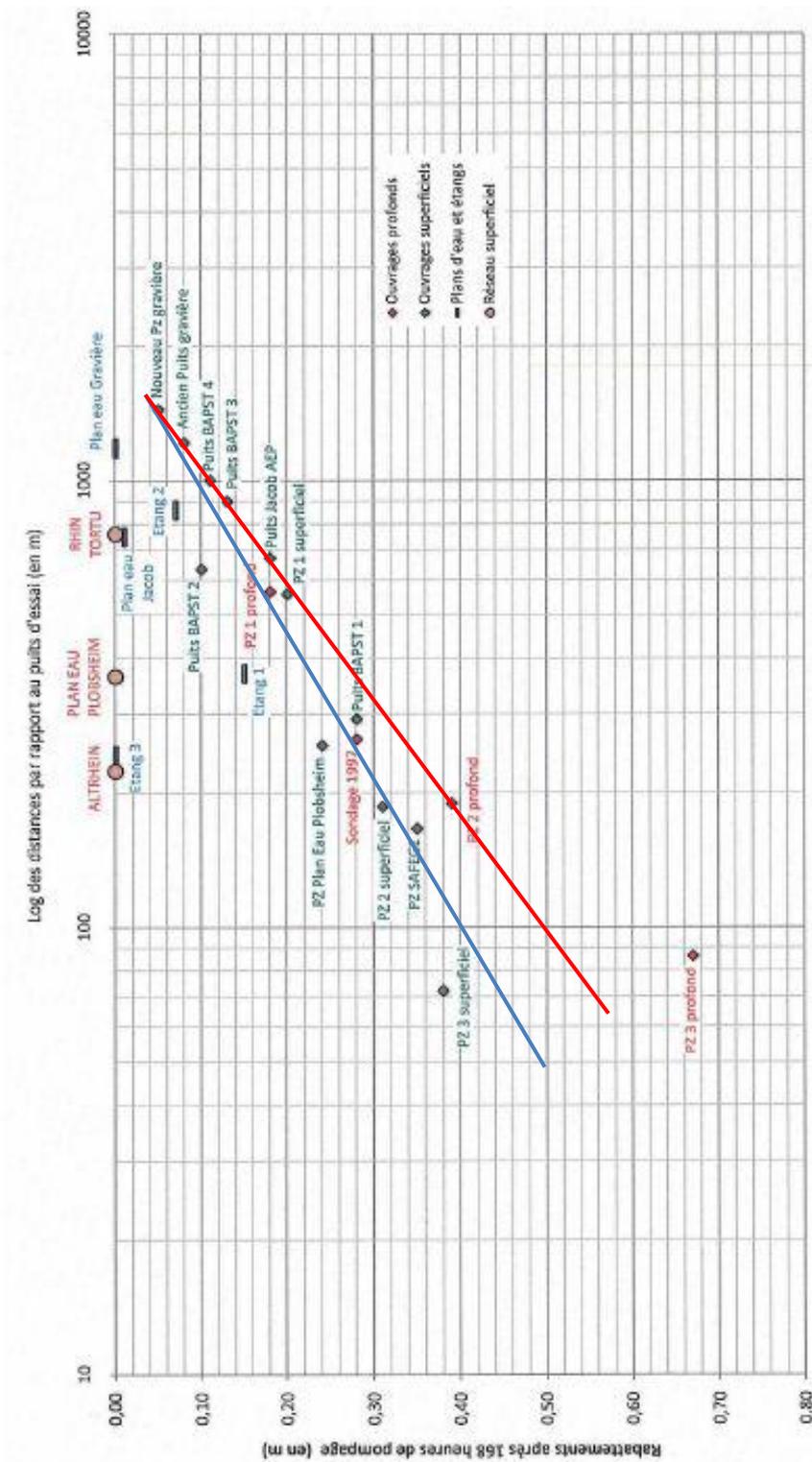


Figure 6 : Observation du rabattement en fonction de la distance au puits de pompage (rapport ANTEA 2010, page 48)

L'application de l'équation de Theis-Jacob définissant la valeur du rabattement en fonction de la distance au puits de pompage permet de calculer une valeur moyenne de la transmissivité, basée sur la relation linéaire indiquée précédemment. Selon la pente de la droite ajustée pour passer au mieux entre les différents points (cf. Figure 6 : droite bleue ou rouge), une transmissivité de 0.26 à 0.34 m²/s peut être calculée pour l'ensemble de l'aquifère au voisinage du puits de pompage. Ces valeurs sont cohérentes avec les interprétations effectuées individuellement sur les piézomètres.

Ruisseau Altrhein

Les rabattements observés sur Pz3 superficiel montrent que la remontée au niveau initial après pompage est extrêmement rapide, et beaucoup plus rapide que celle qui est simulée par le logiciel d'interprétation du pompage (rapport ANTEA 2010, page 41) ; qui plus est le niveau piézométrique remonte même au-dessus de son niveau initial. Ce comportement étonnant s'explique probablement par le fait que les eaux du pompage d'essai ont été rejetées dans le ruisseau Altrhein, et que l'on ne peut exclure qu'elles se soient en partie réinfiltrées dans la nappe. Cette hypothèse pourrait être vérifiée par un jaugeage différentiel dans l'Altrhein, entre son alimentation par le plan d'eau du Plobsheim et sa confluence avec le Thumenrhein (pour former le Rhin Tortu).

Lors des prélèvements d'eau effectués en 2009, on a remarqué des eaux moins minéralisées dans Pz2 superficiel (conductivité électrique CE = 420 µS/cm) et Pz3 superficiel (CE = 486 µS/cm) que dans la tranche profonde de la nappe (538-570 µS/cm) ; cette différence pourrait également être indicative d'une contribution des eaux de surface (Altrhein, CE = 392 µS/cm) à l'alimentation de la nappe.

Il est regrettable qu'un jaugeage différentiel n'ait pas été effectué dans l'Altrhein à l'occasion de ce pompage d'essai. La très grande proximité de ce ruisseau avec le puits de pompage et la discontinuité du niveau argileux intermédiaire rendent très probable une recharge de la nappe par infiltration, à moins que le lit de l'Altrhein ne soit colmaté.

L'absence de rabattement identifié sur l'Altrhein en sortie immédiate du plan d'eau de Plobsheim (rapport ANTEA 2010, page 48) ne signifie pas l'absence d'impact sur le fil de ce cours d'eau plus à l'aval. En effet, la situation de ce point de mesure soumet le fil de l'eau à une alimentation constante par le plan d'eau (via la chute de 1.70 m à 1.80 m, cf. page 46).

Pour finir, on remarque que des plans d'eau situés à l'Est de l'Altrhein subissent une baisse de leur niveau à l'occasion du pompage (Étang 1 – 15 cm – et étang 2 – 7 cm). Il serait très intéressant de pouvoir corréliser ces baisses de niveau à celle qui pourrait le cas échéant être mesurée sur l'Altrhein.

Plan d'eau de Plobsheim

La question du colmatage du **plan d'eau de Plobsheim** peut être appréhendée par différentes approches.

Tout d'abord, les informations sur sa profondeur initiale (4 m) et actuelle (1.7 m) sont indicatives d'une accumulation importante de sédiments fins (limons et silts peu compactés, SAFEGE 2010). Le forage 02727X0044 (Tableau 1) au droit de la base nautique de Plobsheim et à proximité immédiate du plan d'eau (Figure 3), montre la présence d'argiles entre 0.4-2.7 m de profondeur. Ces sédiments argileux indiquent qu'il existe, en plus des limons et silts, une couche peu perméable sous-jacente. Toutefois son extension latérale n'est *a priori* pas connue.

Des cartes topographiques retrouvées dans les archives du BRGM montrent l'évolution de l'occupation du territoire dans la zone du plan d'eau de Plobsheim (cf. annexe 1). La carte topographique du milieu des années 1950 montre notamment la situation antérieure à la mise en place du plan d'eau : on voit apparaître un chevelu hydrographique parcourant des terres émergeant de l'eau. L'alternance entre terres émergées et phréatiques (ainsi que les mesures piézométriques effectuées sur des ouvrages aujourd'hui sous les eaux) montrent bien que dans son état naturel la nappe est très proche de la surface du sol de l'époque, soit bien au-dessous du niveau actuel du plan d'eau. La pérennité de ce dernier nécessite donc un fort colmatage de son lit, notamment au regard de la topographie très plane de ses environs immédiats.

Enfin, lors du pompage, le piézomètre situé à proximité immédiate du plan d'eau a montré un rabattement significatif (0.24 m en fin de pompage) ce qui indique des apports très limités par le plan d'eau (SAFEGE 2010, p. 42). Dans le cas d'une alimentation significative de la nappe par le plan d'eau, le rabattement aurait été moindre, voire nul.

2.2.5. Réalisation et interprétation de l'essai de traçage

L'essai de traçage s'est déroulé simultanément au pompage d'essai, avec l'injection de deux traceurs le 23 novembre 2009 : 2 kg de fluorescéine dans le piézomètre Pz3 profond situé à 86 m du puits de pompage, et 2 kg de sulphorhodamine B dans le piézomètre Pz3 superficiel situé à 72 m du puits de pompage.

Le résultat de l'essai a été positif avec l'obtention de deux courbes de restitution relativement similaires. Les courbes de restitution ont été interprétées par un modèle analytique de transport advectif-dispersif en milieu poreux homogène. Le calage du modèle analytique sur les courbes de restitution observées n'est malheureusement pas présenté. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 2.

La vitesse moyenne du traceur semble calculée avec le temps moyen de restitution (défini par le temps lorsque les 2/3 du pic de concentration sont atteints). Il est plus conventionnel d'obtenir cette vitesse par le calage du modèle analytique. Toutefois les résultats devraient être assez similaires.

Les valeurs obtenues pour les porosités efficaces (4-5%) sont faibles par rapport aux valeurs connues pour des formations alluviales de galets-sable, même s'il s'agit sans doute de porosités cinématiques. Il serait souhaitable de rechercher d'autres valeurs de porosité efficace obtenues pour la nappe d'Alsace à des fins comparatives. Pour

mémoire, Banton et Bangoy (1997) propose comme ordre de grandeur de la porosité efficace :

- 20 à 30% pour des graviers ou un sable grossier ;
- 25 à 35% pour un sable fin ou moyen.

Notons cependant que les valeurs ci-dessus s'appliquent à un matériau homogène, tandis que la porosité d'un milieu poreux hétérogène composé de gravier, sable grossier, moyen et fin, est sensiblement inférieure du fait que l'espace poral entre les grains est occupé par des grains plus fins.

Une source d'information intéressante est le travail de modélisation actuellement conduit des deux côtés du Rhin dans le cadre de la LOGAR (Liaison Opérationnelle pour la Gestion de l'Aquifère Rhénan), mais il n'a pas été possible d'accéder à ces travaux dans les courts délais impartis à la présente expertise.

	Unité	Pz3-superficiel	Pz3-profond
Traceur		2kg sulforhodamine B	2 kg fluoresceine
Distance piézomètre-puits	m	72	86
Temps 1ere arrivée	h	14	15
Temps au pic	h	30	38
Concentration maximale	ppb	5.9	3.65
Temps moyen de restitution	h	39	68
Taux de restitution	%	33	21
Vitesse maximale du traceur	m/h	5.1	5.7
Vitesse modale du traceur	m/h	2.4	2.3
Vitesse moyenne du traceur	m/h	1.9	1.3
Porosité efficace*	%	4.3	5.2
Dispersivité longitudinale*	m	5	13
Coefficient de dispersion longitudinale*	m ² /s	2.6 10 ⁻³	5.2 10 ⁻³

*Tableau 2 : Résultats de l'essai de traçage. Les paramètres indexés avec une * sont calculés par calage d'un modèle analytique sur la courbe de restitution.*

2.2.6. Synthèse des remarques

Le rapport de présentation du premier modèle réalisé par ANTEA présente des lacunes importantes ne permettant pas d'établir la qualité de son calage. Compte tenu des améliorations sensibles apportées aux phases de modélisation ultérieures, l'étude du premier modèle n'a pas été poussée davantage.

Au regard des problématiques soulevées par l'administration [colmatage du plan d'eau de Plobsheim, intercalaire argileux, impact sur les phréatiques (petits ruisseaux alimentés par les débordements de nappe dans le polder d'Erstein) et l'Altrhein], il apparaît que les investigations complémentaires réalisées par ANTEA ont répondu à l'essentiel des questions posées, hormis pour deux aspects : la relation de l'Altrhein et

du Thumenrhein avec les eaux souterraines et l'impact des prélèvements sur le polder d'Erstein.

Les principales interrogations et remarques peuvent s'exprimer comme suit :

- Le niveau intercalaire est sans doute peu argileux, n'offrant qu'une faible protection contre les pollutions superficielles. Il lui est attribué un faible rôle hydraulique dans le modèle (perméabilité générale très voisine de la perméabilité de la couche supérieure des alluvions – impact observé inexistant à quelques centaines de mètres du projet de nouveau champ captant). Compte tenu de son caractère discontinu, il n'est pas exclu qu'il soit cependant présent par lentilles dans la zone impactée par le pompage, comme semble-t-il au niveau des deux piézomètres Pz3 ;
- l'alimentation de la nappe par l'Altrhein semble plausible, notamment en cas de pompage au niveau du champ captant. Il manque à cet égard un point de mesure à l'amont immédiat de la confluence de l'Altrhein et du Thumenrhein (soit à l'amont immédiat du Rhin Tortu) ;
- le plan d'eau de Plobsheim est notablement colmaté ;
- l'absence de suivi du niveau piézométrique dans le polder d'Erstein durant le pompage d'essai ne permet pas de quantifier l'impact éventuel du pompage sur cette zone (pas de point de calage). On note que le plan d'eau de Plobsheim ne jouant pas un rôle de barrière étanche, l'impact du rabattement se poursuit clairement au-delà de celui-ci.
- les valeurs de porosité efficace sont probablement un peu faibles, ce qui va dans le sens de la sécurité en majorant l'impact piézométrique des scénarios de pompage simulés avec le modèle.

3. Construction de la version 2010-11 modèle

3.1. EXTENSION GÉOGRAPHIQUE, MAILLAGE, NOMBRE DE COUCHES, CHOIX DES LIMITES ET PAS DE TEMPS

3.1.1. Extension et découpage horizontal et vertical du modèle

Ce modèle couvre une superficie de $22,3 \times 12 = 267,6 \text{ km}^2$ (cf. Figure 7, centrée sur le champ captant. Chacune des quatre couches du modèle est discrétisée :

- en 46 009 mailles actives (organisées en 417 lignes x 331 colonnes) dans une première version, dédiée au calage hydrodynamique restituant le pompage d'essai du 23 au 29/11/2009 ;
- en 80 802 mailles actives (organisées en 479 lignes x 402 colonnes) dans une deuxième version, dédiée au calage hydrodispersif reproduisant le traçage du 23 au 30/11/2009 ; ce maillage a été affiné autour de la zone de traçage pour bien tenir compte de la faible distance entre les piézomètres d'injection et le puits de pompage.

Les dimensions des mailles varient de :

- 100 x 100 mètres pour les plus grandes à 25 x 25 mètres pour les plus petites (au droit du futur champ captant) dans la première version du modèle ;
- 100 x 100 mètres pour les plus grandes à 3,1 x 3,1 mètres pour les plus petites (au droit du futur champ captant) dans la deuxième version.

La présentation de deux versions du modèle reflète un historique des travaux de modélisation, ce qui brouille un peu le paysage. Comme seule la version finale importe, à savoir celle qui a été utilisée pour la mise en œuvre des scénarios (2^{nde} version), seuls les résultats de calage obtenus avec cette version devraient être présentés dans le rapport.

Le modèle hydrogéologique est découpé en 4 couches, correspondant aux formations suivantes :

- Couche 1 : représente les échanges nappe-rivière ;
- Couche 2 : partie supérieure de l'aquifère alluvial ;
- Couche 3 : horizon discontinu localement argileux, intercalé entre les parties supérieure et inférieure de l'aquifère alluvial ;
- Couche 4 : partie inférieure de l'aquifère alluvial.

Ce découpage litho-stratigraphique est cohérent avec la succession des formations identifiées dans la zone d'étude.

Les conditions imposées aux limites du modèle correspondent à des potentiels imposés sur les quatre couches. Les valeurs de potentiel imposé ne sont pas indiquées et il n'est pas précisé non plus si elles sont identiques pour les quatre

couches. Ceci étant, il paraît difficile de différencier la charge de la partie inférieure de l'aquifère de celle de la partie supérieure, faute de données permettant de le faire. Il est donc vraisemblable que les potentiels imposés soient similaires pour toutes les couches. Le rapport n'indique pas non plus si des modifications ont été apportées aux conditions aux limites entre le calage en permanent, le calage en transitoire et la mise en œuvre des scénarios.

La taille du modèle et le choix des conditions aux limites associées sont à considérer notamment au regard des scénarios d'exploitation mis en œuvre : ainsi, en prenant une hypothèse de simulation pénalisante en termes de propagation du cône de rabattement (pompage permanent à 2054 m³/h, plan d'eau de Plobsheim colmaté, Figure 10 ANTEA 2011), l'isopièze correspondant à 2.5 cm de rabattement dans la couche n°2 est au maximum éloignée de moins de 5 km au sud du puits de pompage, donc à l'intérieur des limites du modèle. A 4108 m³/h pendant 4 semaines, un rabattement de 2.5 cm est également observé à 5 km au maximum (plan d'eau de Plobsheim colmaté, Figure 11 ANTEA 2011). Le rabattement induit dans la couche n°4 n'est pas présenté mais les résultats des simulations présentées en annexes E et G montrent que les rabattements induits à distance importante du champ captant sont identiques dans les couches 2 et 4 du modèle, ce qui montre d'ailleurs que la couche 3 ne joue plus de rôle dans la modélisation lorsque l'on s'éloigne du champ captant. Ceci est aussi très clairement expliqué dans le rapport 2010 en page 87 : « Au-delà d'une centaine de mètres des puits, les deux cartes d'isorabattement se superposent, l'horizon intermédiaire local étant peu marqué par rapport aux couches supérieures et inférieures ».

Pour revenir aux scénarios réalisés, la simulation présentée en annexe H montre un rabattement de 2.5 cm à environ 5 km au nord du champ captant. Or, à la lecture de la figure 4 page 14, il semble que la limite imposée au nord se situe à environ 5 km du champ captant (ce qui diffère des indications fournies par le rapport 2011 en page 12 : « les conditions limites, suffisamment éloignées du projet (environ 6 km au plus près), sont à potentiels imposés »).

On notera de plus que des simulations ont été effectuées en considérant une exploitation continue, 24h/24h à un débit de 5000 m³/h, les résultats étant présentés dans le rapport ANTEA 2010. Les courbes d'isorabattement en parties supérieure et inférieure de l'aquifère sont présentées en figure 40 et 41 (pages 88 et 89) : on note que la dernière courbe d'isorabattement tracée en totalité est celle de 30 cm. Un rabattement de 20 cm est simulé à environ 3 km au nord du champ captant, ce qui est supérieur à ce que l'on obtient dans le cas du scénario décrit précédemment (pompage à 4108 m³/h pendant 4 semaines). Dans ce cas, comme pour le précédent, il est fortement envisageable que le potentiel imposé en limite nord biaise les rabattements simulés.



Figure 7 : Extension et maillage du modèle maillé (rapport ANTEA 2011, page 14)

En tout état de cause, la limite prise au nord, et le cas échéant au sud, est trop proche du champ captant au moins pour l'un des scénarios mis en œuvre (colmatage marqué du bassin de Plobsheim, rabattement au terme de 4 semaines de pompage à 4108 m³/h). Les limites Est et Ouest sont, quant à elles, suffisamment éloignées du champ captant.

Cet aspect semble d'autant plus important que le champ captant est dimensionné pour produire 6000 m³/h et que le rapport ANTEA 2010 précise bien en page 85 que les « besoins en pointe du futur champ captant se situent à hauteur de 120 000 m³/j, soit un débit horaire moyen de 5000 m³/h ». Il est d'ailleurs étonnant que le rapport de synthèse de la modélisation hydrogéologique ne présente comme scénario maximal d'exploitation qu'un pompage à 4108 m³/h pendant 4 semaines.

Il est regrettable que ne figure pas dans le rapport une présentation de l'extension complète de la bulle de rabattement pour un pompage à 5000 m³/h. Pour information, un calcul du rayon d'influence par l'approximation de Jacob, avec une perméabilité de 4.6 10⁻³ m/s, une épaisseur saturée de 50 m et une porosité efficace de 5% donnerait une valeur légèrement supérieure à 5 km après 30 jours de pompage, ce qui corrobore le questionnement sur l'éloignement probablement insuffisant des limites du domaine modélisé. Ce calcul reste cependant estimatif dans la mesure où il ne prend pas en compte les interactions entre les deux parties de l'aquifère, ni leur relation avec les cours d'eau.

3.1.2. Pas de temps et période de calage du modèle en régime transitoire

Le pas de temps de la modélisation en régime transitoire n'est pas précisé.

La période de calage couvre une durée de 8 jours, correspondant à la période du 23 au 30/11/2009 au cours de laquelle le pompage d'essai a été effectué.

La période de calage demeure courte au regard de certains scénarios qui ont été simulés sur une période allant de 100 à 350 jours (cf. rapport 2011, pages 34-35 et rapport 2010, page 101). Sur de telles périodes de temps, la question de la variation saisonnière du niveau de la nappe se pose en effet, ce qui implique de faire des hypothèses sur la recharge, la période d'application du polluant, etc.

3.2. TOPOGRAPHIE

Le texte des rapports 2010 et 2011 relatifs à la topographie indique (ANTEA 2011, page 15) : « Le toit de l'aquifère alluvial correspond à la surface du sol. La topographie prise en compte dans le modèle au nord et au droit du futur champ captant de PLOBSHEIM correspond au MNT de 1998 de la COMMUNAUTE URBAINE DE STRASBOURG, ré-interpolé pour disposer d'une cote dans chaque maille représentant l'aquifère alluvial supérieur. Au sud, le modèle utilise les données topographiques issues de la cartographie IGN au 1/25 000. »

Le rapport 2011 précise que la cote interpolée a été appliquée au toit de la couche 1 du modèle.

Ne disposant pas du MNT de la CUS, il n'est pas possible de commenter de façon précise cet aspect. Notons pour mémoire que la BD Alti de l'IGN inclut un MNT au pas de 25 m mais qu'il n'existe pas à notre connaissance un MNT au pas de 3 m susceptible de fournir directement une information par cellule du modèle dans sa zone la plus fine. L'interpolation de données est donc nécessaire : il existe toutefois de nombreuses méthodes (IFW, spline, krigeage) paramétrables selon différents critères, ce qui peut conduire à des résultats le cas échéant significativement différents si les données initiales ne sont pas suffisamment denses. Dans leur ensemble, les niveaux piézométriques simulés ne sont probablement pas affectés par les incertitudes affectant la surface topographique, sauf au droit des cotes de débordement associées aux ruisseaux et « phréatiques ».

A noter que la carte de l'annexe B du rapport 2011 est difficilement lisible compte tenu des gammes de couleurs et des classes de valeurs retenues.

3.3. CONSTRUCTION DE LA GÉOMÉTRIE DU MODÈLE HYDROGÉOLOGIQUE

Pour sa modélisation, l'aquifère a été subdivisé en quatre couches successives :

- la **couche** sommitale (n°1), qui représente les échanges nappe-rivières. « L'épaisseur de la couche 1 (réseau superficiel) a été fixée à 2 m dans la plupart des cas » (rapport ANTEA 2011, page 15). L'absence d'une cartographie de l'épaisseur de cette couche ne permet pas de savoir dans quels secteurs l'épaisseur diffère de 2 m, ni dans quelles proportions.
- la **couche n°2**, qui représente la partie supérieure de l'aquifère alluvial. Le substratum de cette couche est cartographié (annexe C rapport ANTEA 2011). Cette carte étant présentée en cote altimétrique, il apparaît une « marche d'escalier » le long des limites du plan d'eau de Plobsheim. Les couleurs sont difficilement lisibles mais il est vraisemblable que l'écart observé corresponde à l'écart entre l'altitude du plan d'eau et celle des terrains limitrophes (1.70 m à 1.80 m)². Or, l'écart existant en topographie n'a pas de raison de se propager en profondeur puisque le plan d'eau est une création anthropique n'influençant pas la cote du substratum de la partie supérieure de l'aquifère alluvial. Pour mémoire, le bureau d'études a déterminé la cote de ce substratum à partir de l'hypothèse prise pour cartographier la couche 3 : celle-ci est supposée parallèle à celle de la topographie (cf. ci-dessous). La cartographie de la base de la partie supérieure de l'aquifère n'a donc pas été calée sur des observations lithologiques faites sur différents forages de la zone modélisée.
- la **couche n°3**, qui représente l'horizon discontinu localement argileux séparant les parties supérieure et inférieure de l'aquifère alluvial. Le rapport ANTEA 2011, page 15 indique : « L'horizon intermédiaire (sables argileux, argiles sableuses), correspondant à la couche 3, discontinu, séparant les parties supérieure et inférieure de l'aquifère alluvial, est assimilé à une couche d'épaisseur équivalente de deux mètres. Sa morphologie est supposée parallèle à celle de la surface topographique, avec calage de sa position au niveau du futur champ sur la base de la coupe géologique des ouvrages sur lesquels il a été reconnu (puits d'essai P5, Pz3, Pz2). Dans ces conditions, l'épaisseur de la partie supérieure de l'aquifère alluvial est de 12 à 15 mètres au droit du futur champ captant de PLOBSHEIM. ». Le rapport ne présente aucune carte d'extension de cette formation, les trois cartes présentées étant relatives au toit de la couche 1, au mur de la couche 2 et à celui de la couche 4. Il conviendrait de vérifier si cette couche a été intégrée dans le modèle sur la totalité de la surface modélisée. En tout état de cause, il aurait été intéressant de s'appuyer sur une mise à jour de la délimitation de la couche intercalaire faite dans le cadre du projet LIFE (1995-96), les nouvelles données acquises

² A la lecture de la carte, il semblerait que la cote du substratum de la couche 2 au niveau du plan d'eau soit inférieure à celle des terrains limitrophes. Dans ce cas, il est possible que la carte présentée corresponde en réalité à une carte de profondeur du substratum et non à une carte altimétrique.

sur la zone, en 2009 notamment, permettant d'améliorer la délimitation faite à l'époque.

- **la couche n°4**, qui représente la partie inférieure de l'aquifère alluvial, jusqu'au substratum imperméable. En page 15, le rapport ANTEA 2011 indique que : « la topographie du substratum des alluvions fait l'objet d'une cartographie par le BRGM. Cette cartographie est exploitée et ré-interpolée pour disposer d'une cote dans chaque maille de la base de l'aquifère alluvial inférieur ». Cette carte du substratum a été faite dans le cadre du projet LIFE à partir de cartes plus anciennes du SGAL basées en partie sur de la géophysique et la connaissance des sondages connus à l'époque. Il serait intéressant de voir dans quelle mesure les nouvelles profondeurs observées, en particulier au droit du champ captant, sont similaires à celles de la cartographie existante. Par ailleurs, le modèle gagnerait à bénéficier des travaux de modélisation réalisés dans le cadre de la LOGAR.

De façon générale, les cartes d'épaisseur des formations ne figurent pas en annexe des rapports du bureau d'études : c'est pourtant une information essentielle et leur absence nuit à la vérification de la cohérence géométrique du modèle.

3.4. INTÉGRATION DES PRÉLÈVEMENTS

Le rapport 2011 d'ANTEA indique en page 16 : « Les prélèvements effectués dans la nappe correspondent aux données déclarées à l'Agence de l'eau Rhin-Meuse (2004). Ils ont été affectés à la partie supérieure ou inférieure de l'aquifère selon l'information disponible sur la profondeur des forages et de leurs parties crépinées »

Il n'existe pas de cartographie ou de tableau des prélèvements pris en compte dans le modèle ANTEA, ce qui ne permet pas de vérifier les informations présentées. On note par ailleurs que les cartes d'iso-rabatement présentées dans les rapports ANTEA 2010 et 2011 ne montrent pas de rabattements centrés sur des sites différents de celui du futur champ captant de Plobsheim.

Pour mémoire, SAFEGE (pp.47-49) a réalisé un inventaire des points de prélèvement d'eau autour du champ captant. Ont notamment été identifiés les forages d'eau potable suivants :

- Forage de Nordhouse : prélèvement autorisé de 1200 m³/j, et prélèvement annuel décroissant de 35 000 à 28 000 m³/an entre 2005 et 2008 ;
- Forage d'Eschau: prélèvement autorisé de 3000 m³/j, et prélèvement annuel variant entre 527 000 et 680 000 m³/an entre 2005 et 2008 ;
- Forage de Fegersheim : prélèvement autorisé de 12 000 m³/j, et prélèvement annuel décroissant de 1 321 000 à 867 000 m³/an entre 2005 et 2008 ;
- Forage de Ichtratzheim : prélèvement autorisé de 20 000 m³/j, et prélèvement annuel de 371 000 m³ en 2008 (pas de prélèvement en 2005 et 2006).

Le captage AEP public de la commune d'Eschau (n°0272-6X-0002) est le plus proche du champ captant, à 4,8 km.

Il existe aussi des captages AEP à usage privé à proximité du futur champ captant, ainsi que des captages dédiés à un usage agricole ou industriel. Le plus proche est le puits Bapst 1 situé à 150 m du site.

3.5. INTÉGRATION DE LA RECHARGE

L'infiltration moyenne à partir des pluies efficaces est considérée égale à 180 mm/an sur toute la zone modélisée. La variabilité temporelle de cette recharge au cours de l'année n'est pas spécifiée et, semble-t-il, n'est pas prise en compte.

Pour la phase de calage en régime transitoire, le rapport indique en page 23 que « la recharge pluviale considérée ici est nulle, aucun évènement pluviométrique n'étant intervenu au cours du pompage d'essai du 23 au 29/11/2009. » De façon générale, l'absence de pluviométrie à une date donnée n'implique pas l'absence de recharge. En effet, l'eau transite dans la zone non saturée (à commencer par le sol) avant d'atteindre la nappe : un certain décalage dans le temps est observé entre un évènement pluvieux et un épisode de recharge. Ce décalage dans le temps est d'autant plus important que la zone non saturée (ZNS) est épaisse et que la perméabilité verticale des terrains est faible. Dans les alluvions de la nappe d'Alsace, la ZNS est faible et la perméabilité est forte, ce qui implique que le décalage dans le temps est faible.

Il aurait néanmoins été utile de présenter la pluviométrie des semaines précédentes afin de replacer l'essai de pompage dans un contexte météorologique plus large, de façon à s'assurer que les rabattements associés au pompage d'essai n'ont pas été atténués par des précipitations importantes survenues au cours des semaines précédentes.

Dans le cadre du modèle maillé de la plaine d'Alsace (couvrant une zone Mulhouse-Colmar), la carte de recharge présentée en Figure 8 avait été utilisée. Une valeur de $6.10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$ (minima de la zone bleue claire) correspond à 190 mm/an.

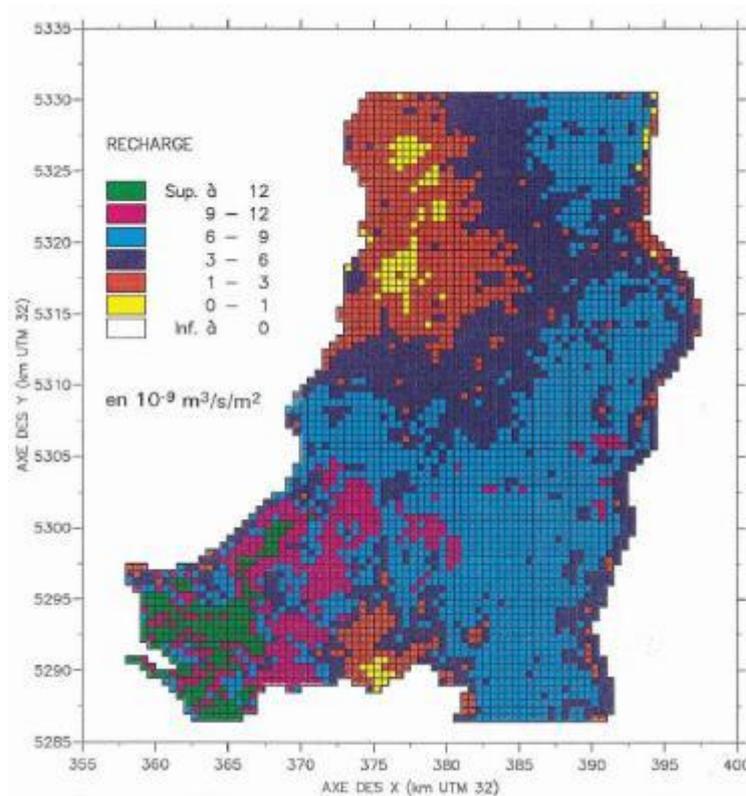


Figure 8 : Recharge prise en compte dans le cadre du modèle maillé de la plaine d'Alsace (BRGM, 1998)

3.6. PRISE EN COMPTE DES RELATIONS NAPPE / EAUX DE SURFACE

3.6.1. Représentation des écoulements de surface dans le modèle maillé

Plusieurs cours d'eau de tailles variées parcourent la zone modélisée : Rhin, Ill, Rhin Tortu (alimenté entre autres par l'Altrhein et le Thumenrhein), canal du Rhône au Rhin. Le Rhin Tortu a un débit de l'ordre de $3\text{-}4 \text{ m}^3/\text{s}$, les deux autres rivières (l'Altrhein et le Thumenrhein) ont des débits bien plus importants (Figure 9). D'après le rapport ANTEA (2008) : l'Ill draine la nappe, le canal du Rhône au Rhin est essentiellement imperméable et a peu d'interactions avec la nappe, le Rhin Tortu draine ou alimente la nappe en fonction des saisons.

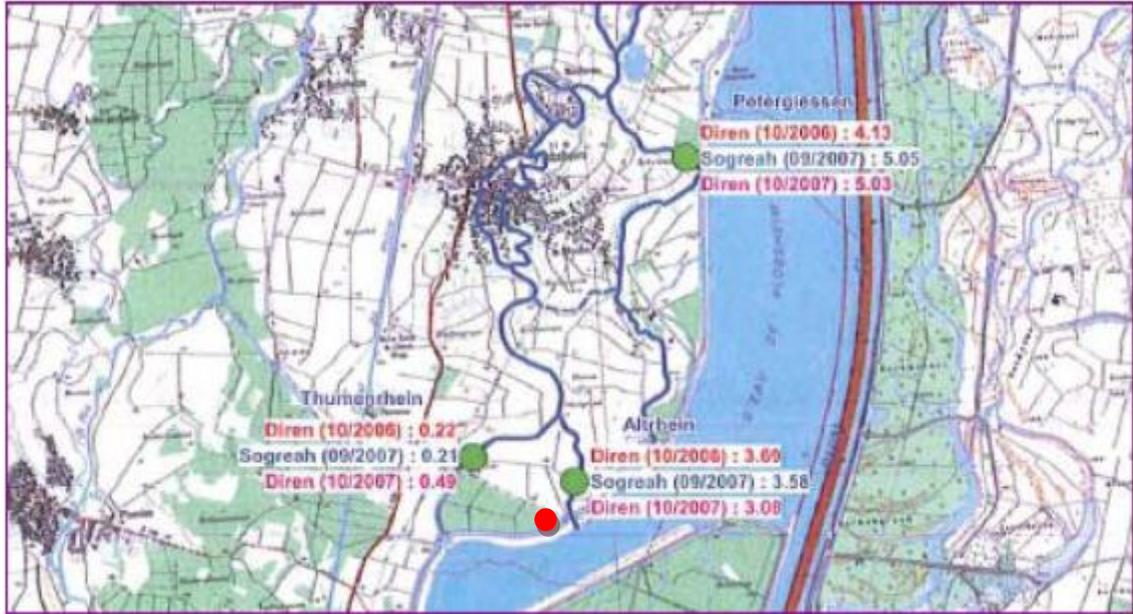


Figure 9 : Mesures de débit sur les cours d'eau à proximité immédiate du futur champ captant (point rouge) : Thunenrheine (0.21-0.49 m³/s) ; Altrhein (3.08-3.69 m³/s). (rapport SAFEGE 2010, page 100)

Plusieurs plans d'eau sont également présents dans la zone : plan d'eau de Plobsheim qui a pour rôle d'amortir les crues de l'Ill, étangs 1 à 3, plan d'eau de Plan Jacob. Le plan d'eau de Plobsheim est situé environ 2 m au-dessus du niveau de la nappe. Selon EDF, il est fortement colmaté avec un remplissage de sédiments fins d'une épaisseur jusqu'à 3 m sur les 4 m de profondeur d'eau initiale. Son volume est estimé à $12 \times 10^6 \text{ m}^3$ et sa surface à 700 ha (SAFEGE 2010), ce qui ferait une profondeur moyenne de 1.7 m.

Pour la modélisation, les cours d'eau principaux (Ill, Rhin, canal de décharge de l'Ill) sont représentés par des mailles à débordement dans la couche 1, mais ce n'est pas le cas du Rhin Tortu et de ses affluents qui ne sont pas pris en compte dans le modèle (cf. Figure 10). Les mailles de débordement permettent de faire déborder la nappe dans les cours d'eau mais elles ne permettent pas de prendre en compte l'alimentation de la nappe par les cours d'eau lorsque la nappe est en position d'étiage et *a fortiori* lorsque le champ captant est en opération, ce qu'explique ANTEA en page 16 de son rapport 2011.

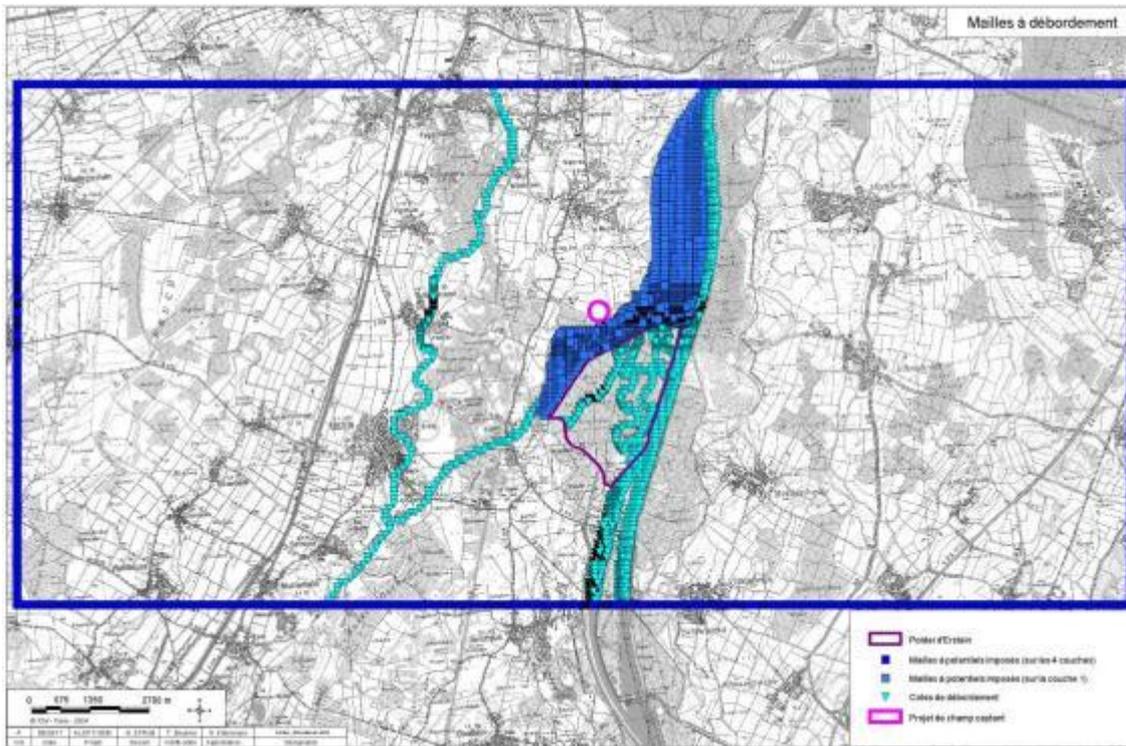


Figure 10 : Représentation des écoulements en eau de surface dans le modèle maillé (rapport ANTEA 2011, Annexe D)

Le plan d'eau de Plobsheim est représenté par une limite à potentiel imposé et une perméabilité significativement plus faible (10^{-6} m/s) que l'aquifère sous-jacent (10^{-3} m/s) afin de représenter le colmatage de la base du plan d'eau par des sédiments fins. Cette représentation est cohérente avec le niveau du plan d'eau situé environ 2 m au-dessus du toit de la nappe. Les plans d'eau Puits Jacob et Etang 3, également perchés au-dessus de la nappe probablement du fait de l'existence d'un colmatage, n'ont pas été pris en compte dans la modélisation (pas de charges imposées, ni équipotentiellles).

Pour mémoire, deux types de représentation des cours d'eau sont possibles dans un modèle hydrogéologique :

1. représentation du cours d'eau avec une simple capacité de drainage de la nappe (utilisation de « mailles à débordement ») ;
2. représentation du cours d'eau avec prise en compte des échanges avec la nappe au travers de l'écart de niveau entre le fil de l'eau dans le cours d'eau et le niveau de l'eau dans la nappe. L'intensité des échanges est aussi fonction de la « conductance » des berges.

Le premier mode de représentation a été adopté par ANTEA pour cette modélisation : il ne permet pas la prise en compte d'un cours d'eau perché au-dessus de la nappe et alimentant celle-ci de façon permanente. C'est pourquoi le plan d'eau de Plobsheim est simulé en tant que limite à potentiel imposé (cf. Figure 10).

La représentation utilisée pour les giessens du polder d'Erstein aurait pu être étendue plus à l'amont. En effet, le rapport SAFEGE indique en page 103 que le drainage de la nappe par deux cours d'eau (la Zembs et le Feldgraben) a été favorisé entre le polder et le hameau de Krafft au travers de travaux de curage. De plus, le même rapport indique que les giessens connaissent un mode de fonctionnement basé sur « une alimentation phréatique en période de basses eaux et une alimentation mixte par la nappe et les eaux du fleuve en période de hautes eaux ». Sous réserve de disposer de données de hauteur d'eau dans ces cours d'eau, il serait plus adapté de représenter ces cours d'eau selon le deuxième mode de représentation décrit ci-avant.

En tout état de cause, le bilan annuel du suivi scientifique du suivi du polder d'Erstein pour l'année 2004 met bien en avant le rôle de drainage de la nappe joué par celui-ci : un différentiel de débit de l'ordre de 25% est identifié entre l'aval et l'amont (cf. Tableau 3).

Période fev-dec 2004	Débits entrants totaux aux ouvrages de prise (m ³ /s)	Débits sortants (ouvrage de vidange amont) (m ³ /s)	Estimation du drainage (m ³ /s)	Part du drainage sur les débits sortants (%)
Moyenne	3,53	4,84	1,31	26,5
Ecart type	0,48	0,74	0,43	6,5

Tableau 3 : Différentiel de débit entre entrée et sortie du polder d'Erstein (ULP- Ginger Environnement, 2005)

L'absence de mailles à débordement le long des cours de l'Altrhein, du Thumenrhein et du Rhin Tortu a pour conséquence de négliger les échanges hydrauliques entre la nappe et ces cours d'eau, dans un sens et dans l'autre. Il en résulte, en particulier, que l'on ne peut simuler un éventuel impact du champ captant sur le débit de ces cours d'eau.

Au regard des informations figurant dans les différents rapports consultés (le rapport SAFEGE indique, par exemple, en page 100 : « le réseau du Rhin Tortu est en relation directe avec la nappe alluviale. Il la draine ou l'alimente selon les saisons »), ce choix de représentation semble inapproprié. L'absence de points de mesure sur ces deux cours d'eau, à l'amont immédiat de leur confluence, laisse en suspens la question de l'impact effectif du futur champ captant sur leur ligne d'eau.

Pour approcher cet impact, une approche analytique est proposée ci-après.

3.6.2. Approche analytique de l'impact du pompage sur l'Altrhein

Les observations de terrain fournissent plusieurs indications (piézométrie, chimie) de la contribution des eaux de surface (cours d'eau, étangs) à l'alimentation de la nappe. Cette contribution peut être évaluée dans un premier temps par des modèles analytiques tels qu'exposé brièvement ci-dessous :

1) Echanges nappe-rivière en conditions naturelles (avant pompage)

Le débit échangé entre la nappe et la rivière (Q_R) est donné par (Rushton 2007) :

$$Q_R = RC \cdot (h_{ref} - H_R)$$

Avec RC un coefficient d'échange proportionnel à la conductivité hydraulique de la nappe (K), H_R la cote de la surface de la rivière, h_{ref} la cote de la surface piézométrique de référence.

Rushton (2007) montre que RC est généralement compris entre $1.54 K$ et $2.25 K$. Si l'on prend la différence de charge mesurée avant l'essai de pompage (Altrhein 0.4 m au-dessus du niveau de la nappe), le débit d'alimentation de la nappe par la rivière sur un linéaire de 700 m (distance en bordure du champ captant) serait compris entre 0.4 et 0.6 m³/s. En prenant une différence de charge de 0.1 m, les débits seraient compris entre 0.1 et 0.16 m³/s.

2) Echanges nappe-rivière en conditions de pompage

En conditions de pompage, la contribution de la rivière (ΔQ) au débit pompé (Q_w) peut être approchée par la formule suivante (Hunt 1999) :

$$\frac{\Delta Q}{Q_w} = \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{SL^2}{4Tt}}$$

Avec S coefficient d'emmagasinement, L distance entre rivière et puits pompé, T transmissivité, t temps écoulé depuis le début du pompage.

En utilisant cette formule pour le cas de la rivière Altrhein, localisée à 300 m du barycentre du champ captant, on voit qu'après quelques jours de pompage seulement, plus de 90% du débit pompé provient de la rivière et ce, quel que soit le débit pompé. Dans le cas d'un pompage correspondant au champ captant à puissance de production maximale (5000 m³/h), le débit soutiré à la rivière serait de l'ordre de 1.3 m³/s (cf. Figure 11), ce qui est tout à fait significatif au vu du débit mesuré sur l'Altrhein (3-4 m³/s, Figure 9).

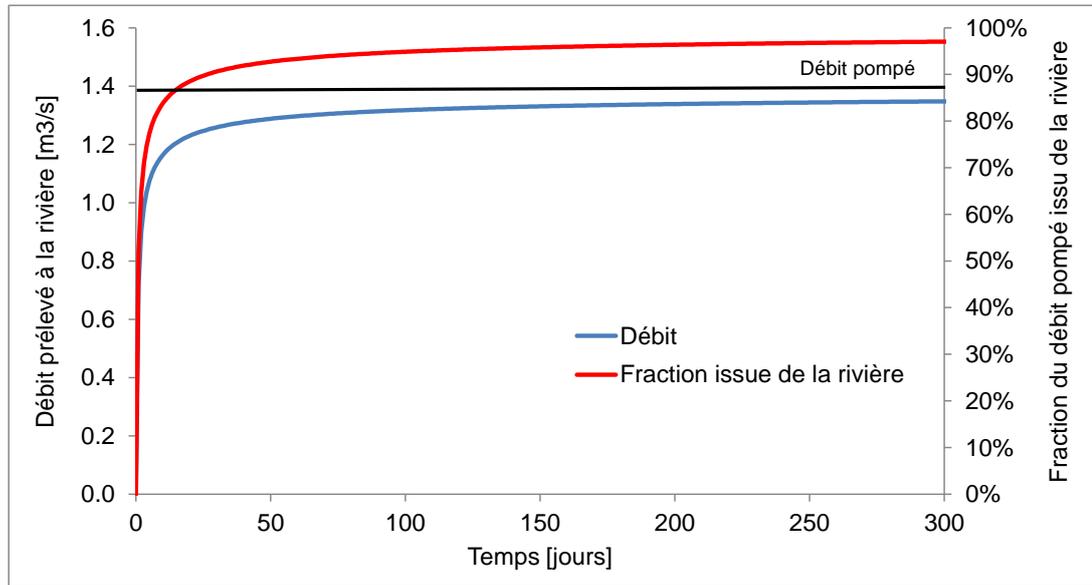


Figure 11 : Résultat d'une simulation par formule analytique de l'influence du pompage sur le débit d'un cours d'eau et l'alimentation du pompage par le cours d'eau. Résultat pour un pompage à 5000 m³/h

Selon cette approche, la rivière Altrhein, la plus proche du futur champ captant, verrait son débit significativement impacté par le pompage et les eaux pompées seraient essentiellement constituées par l'eau de la rivière. Ces résultats sont cependant à considérer comme purement indicatifs (ordres de grandeur) car l'utilisation de ces formules analytiques suppose par exemple que le lit de l'Altrhein ne soit pas colmaté et que la rivière recoupe l'aquifère sur toute sa hauteur.

3.6.3. Synthèse concernant les relations entre la nappe et les eaux de surface

En résumé et en l'état actuel du modèle, seuls les cours d'eau principaux sont modélisés par des mailles à débordement, qui ne permettent pas de simuler l'alimentation de la nappe par les cours d'eau. Cette alimentation existe potentiellement et devrait augmenter avec la mise en service du champ captant.

L'omission de cette alimentation dans le modèle a pour conséquences :

- de ne pas pouvoir évaluer la magnitude de l'alimentation de la nappe par les cours d'eau ni, *a fortiori*, l'impact des pompages en nappe sur les débits des cours d'eau ;
- de majorer le cône de rabattement (en amplitude et en extension) du fait d'une sous-évaluation de la réalimentation de la nappe par les cours d'eau ;
- de ne pas pouvoir évaluer l'impact de cette réalimentation sur la qualité de l'eau pompée, par le double mécanisme d'une dilution des débits souterrains mais

aussi de l'apport de contaminants superficiels (cf. page 33 du rapport de l'Hydrogéologue agréé 2010)

En ce qui concerne les plans d'eau, la perméabilité attribuée au fond du plan d'eau de Plobsheim (10^{-6} m/s) se situe dans la gamme de perméabilité généralement attribuée aux formations silteuses. Les étangs et le plan d'eau de Plan Jacob ne sont pas pris en compte dans le modèle ce qui peut se justifier au vu de leur taille réduite. Cependant, les étangs 1 et 2 ont été impactés par le pompage de longue durée (respectivement 0.15 et 0.07 m de rabattement en fin de pompage). La mise en service du champ captant aura donc un impact significatif au moins sur ces deux étangs.

Il serait souhaitable d'affiner la modélisation des cours d'eau en les représentant par des limites à potentiel imposé, afin de restituer leur rôle drainant ou infiltrant en fonction des charges piézométriques dans l'aquifère ; cette approche permettrait notamment d'évaluer les flux d'eau, voire de solutés, entre les cours d'eau et la nappe. Par ailleurs, des mesures complémentaires de débit des rivières et de conductivité électrique au fil de l'eau permettraient d'estimer les pertes/gains de débit entre sections successives en conditions naturelles. De telles mesures pourraient ensuite être répétées en conditions de pompage.

Il serait souhaitable d'identifier les investigations de terrain qui pourraient être mises en œuvre à moindre coût pour évaluer plus finement le rôle hydrogéologique du plan d'eau de Plobsheim. Par exemple, comparaisons entre débits entrants et sortants du plan d'eau afin d'établir un bilan hydrique, sondages pour apprécier l'épaisseur et la composition du colmatage, ainsi que l'extension de la couche argileuse sous-jacente, analyse granulométrique des sédiments de colmatage, analyses chimiques destinées à identifier dans la nappe des marqueurs spécifiques du plan d'eau de Plobsheim, etc.

Enfin, notons, comme le fait remarquer le bureau d'études SAFEGE dans son rapport (2010), que de futurs travaux de curage du plan d'eau pourraient impacter significativement le drainage du plan d'eau vers la nappe.

3.7. PRISE EN COMPTE DES GRAVIERES

Le rapport ANTEA 2011 indique en page 17 :

« Les informations disponibles sur la profondeur des gravières proches du futur champ captant (ancienne et nouvelle gravière de NORDHOUSE) montrent que celles-ci, d'une profondeur de l'ordre de 50 mètres (cote du fond : environ 98 mètres NGF), pénétreraient de manière importante dans la partie inférieure de l'aquifère alluvial. Elles mettraient en communication les parties supérieure et inférieure de l'aquifère. Elles sont prises en compte comme zones équipotentielles dans la partie supérieure de l'aquifère. »

Cette approche est adaptée mais il serait utile de s'assurer de la valeur retenue pour l'emmagasinement dans les mailles correspondantes.

4. Calage de la version 2010-11 du modèle

4.1. DÉMARCHE DE CALAGE ET RÉFÉRENCES UTILISÉES

4.1.1. Démarche de calage

La démarche de calage adoptée par ANTEA est conforme à ce qui est effectué habituellement pour les modèles hydrogéologiques maillés, à savoir :

- un calage en régime permanent, prenant comme référence les niveaux piézométriques et les niveaux des plans d'eau mesurés à la fin du pompage d'essai du 23 au 30/11/2009 à 1007 m³/h ;
- un calage en régime transitoire destiné à reproduire les niveaux piézométriques suivis pendant la phase de pompage, avec prise en compte du débit global des giessens du polder d'Erstein.

Les éléments de calage présentés dans les rapports ANTEA figurent au chapitre 0. Ils sont conformes à ce qui est attendu pour un modèle hydrogéologique maillé, hormis l'absence d'un bilan hydrogéologique des entrées et sorties du modèle, ainsi qu'un bilan des échanges entre les différentes couches. Ces bilans permettent de s'assurer que les ordres de grandeur des entrées et sorties du modèle sont cohérents avec les valeurs connues ou estimées. Le cas échéant, si des écarts importants apparaissent, les bilans peuvent aider à mieux appréhender les phénomènes hydrogéologiques impliqués et à réviser les schémas d'écoulement envisagés. Les bilans hydrauliques permettent aussi de s'assurer que les apports par les charges imposées (en l'occurrence les cours d'eau) sont cohérents avec les débits du réseau hydrographique. L'absence de ces bilans est d'autant plus regrettable que les hypothèses prises pour imposer les charges aux limites du modèle hydrogéologique ne sont pas indiquées.

4.1.2. Données de référence utilisées

Données piézométriques

En termes de données piézométriques, il existe de nombreux piézomètres dans un rayon de quelques kilomètres autour du futur champ captant mais seul un piézomètre dispose de mesures après le 18/12/2000 (cf. annexe 2 ; sources des données : Banque du Sous-Sol – www.infoterre.brgm.fr). A noter qu'il existe plusieurs ouvrages dans le polder d'Erstein qui pourraient permettre, s'ils sont accessibles, de suivre l'évolution du niveau piézométrique avant et pendant la mise en œuvre des pompes du futur champ captant.

La chronique du piézomètre d'indice BSS 02726X0008, (source des données : banque ADES, <http://www.ades.eaufrance.fr/>) est présentée en Figure 12.

Cette chronique inclut les mesures acquises sur la période du 23 au 30 novembre 2009 (cf. Figure 13).

Le rabattement observé est de 9 cm, ce qui est légèrement inférieur à la valeur simulée pour un régime permanent (11 cm environ, aussi bien en partie supérieure qu'inférieure de l'aquifère – cf. annexe E du rapport ANTEA 2011) mais ne correspond pas à un état stabilisé au vu de la courbe de décroissance du niveau piézométrique.

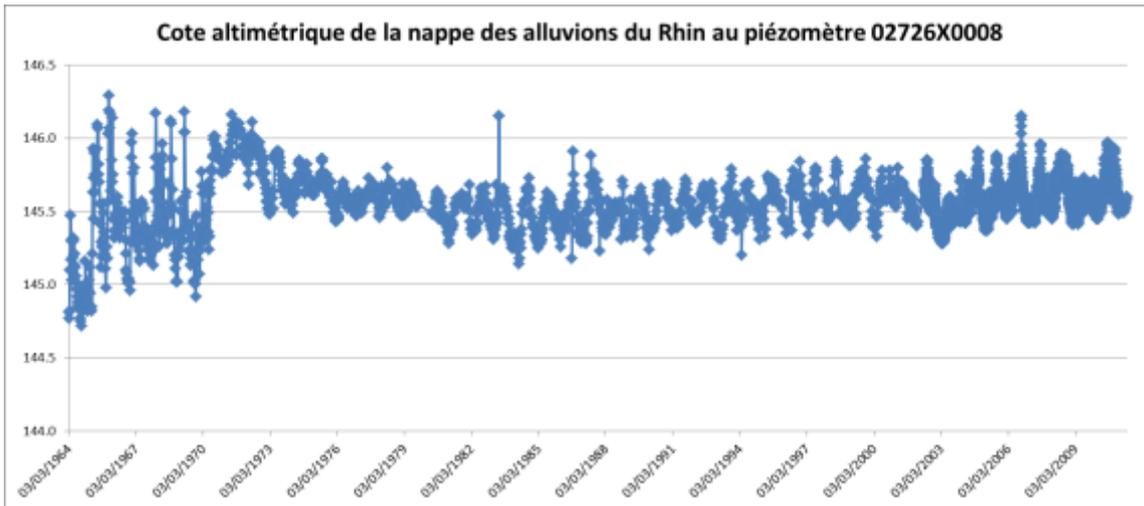


Figure 12 : Chronique piézométrique de l'ouvrage 02726X0008 (en m)

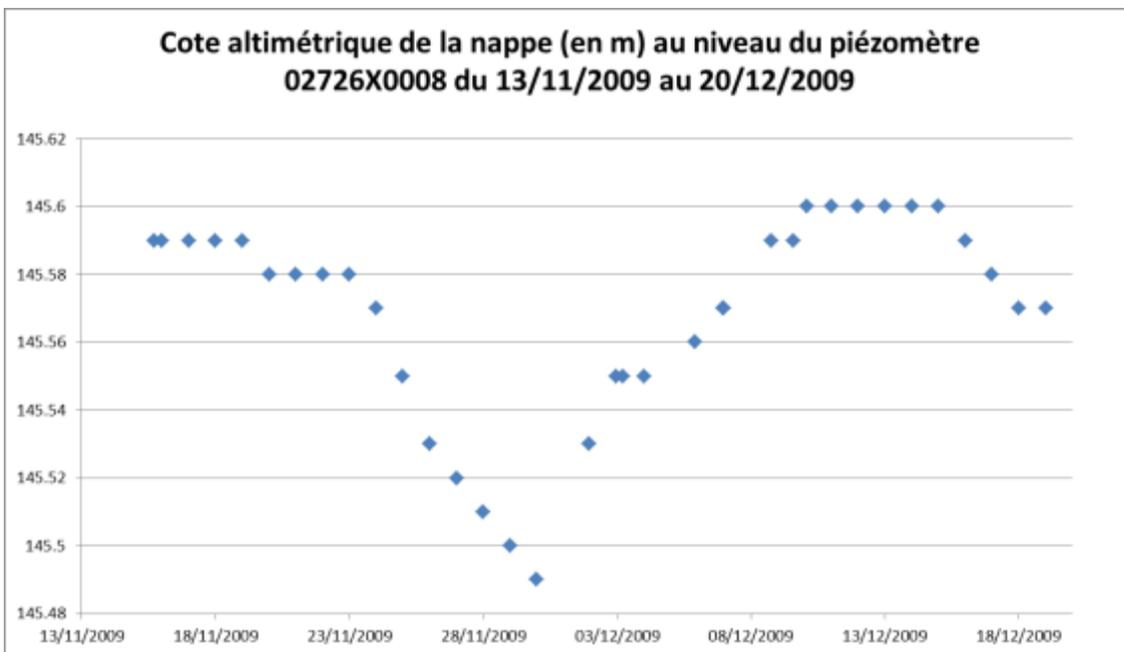


Figure 13 : Baisse du niveau piézométrique sur le piézomètre 02726X0008 lors du pompage d'essai du 23 au 30 novembre 2011

L'ensemble de la chronique du piézomètre 02726X0008 montre plusieurs types de comportement :

- du début de la chronique (1964) au tout début des années 1970 : une amplitude importante du niveau piézométrique, avec notamment des « pics » de niveau durant l'hiver ;
- vers 1971, une hausse du niveau piézométrique, suivi d'une baisse progressive de ce niveau jusqu'au début des années 1980. Ceci s'accompagne d'une baisse de l'amplitude annuelle des fluctuations qui reste la règle pour les années suivantes ;
- de la première moitié des années 1980 à la fin des années 1990 : une remontée progressive du niveau piézométrique moyen, d'une vingtaine de centimètres en une quinzaine d'années, soit environ 1.3 cm/an ;
- depuis le début des années 2000 : une poursuite de la remontée des niveaux, à un rythme plus faible, inférieur à 1 cm/an

Ces observations sont confirmées sur la chronique du piézomètre 02762X0042 pour la période sur laquelle elle est disponible (1955-1997). Le Tableau 4 présente par décennie quelques chiffres clefs de ces chroniques piézométriques.

Les deux piézomètres sont localisables sur la dernière carte topographique en annexe 1 de ce rapport.

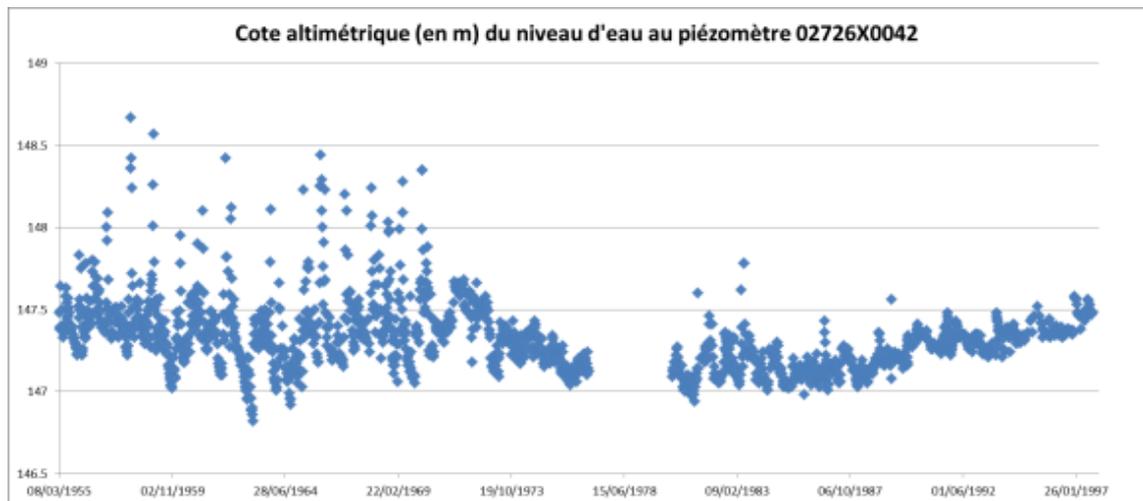


Figure 14 : Chronique piézométrique de l'ouvrage 02726X0042

Pour mémoire, le rapport SAFEGE (page 101) rappelle le cadre de mise en place du plan d'eau de Plobsheim : « Le vaste plan d'eau de Plobsheim (700 ha et 12 millions de m³ d'eau) s'étend sur les territoires des communes d'Eschau, de Plobsheim et d'Erstein. Il est issu de la constitution d'un bassin de compensation de la chaîne des 10 usines hydroélectriques sur le Rhin. Il joue un rôle d'espace tampon en permettant le stockage des suppléments de débits turbinés par les usines amont aux heures de pointe puis leur restitution au Rhin. Il est ouvert sur le Rhin par une passe de 400 m

située à 5 km en amont de la chute de Strasbourg. Il est autorisé par arrêté préfectoral du 26 avril 1971 ».

La première phase identifiée correspond à la période antérieure à la mise en service du plan d'eau de Plobsheim : l'absence d'écrêtage des crues s'observe par des remontées importantes du niveau piézométrique. Vers 1971, la mise en eau du plan d'eau provoque une remontée des niveaux sous l'effet d'une infiltration importante en fond de bassin. De 1972 à 1985, on assiste à un retour progressif à l'état initial en raison d'un colmatage croissant du fond du plan d'eau par accumulation de fines matières en suspension apportées par le Rhin et l'Ill. La très lente remontée observée depuis 1985 est plus délicate à interpréter. Elle reflète probablement une évolution générale de la nappe pouvant résulter, par exemple, de l'arrêt de gros pompages industriels et/ou d'aménagements sur le cours du Rhin se traduisant par une remontée du fil d'eau, etc.

02726X0008	MIN	MOY	MAX	ECART-TYPE		02726X0042	MIN	MOY	MAX	ECART-TYPE
1950-59						1955-59	147.19	147.44	148.16	0.20
1964-69	144.93	145.36	146.05	0.27		1960-69	147.06	147.38	148.16	0.23
1970-79	145.48	145.69	145.88	0.10		1970-79	147.16	147.35	147.59	0.10
1980-89	145.27	145.48	145.76	0.12		1980-89	147.02	147.15	147.42	0.09
1990-99	145.34	145.54	145.77	0.11		1990-97	147.26	147.35	147.46	0.04
2000-09	145.40	145.57	145.86	0.11		2000-09				

Tableau 4 : Statistiques sommaires par décennie des niveaux piézométriques dans les piézomètres 02762X0008 et 02762X0042 (en m)

Une interrogation demeure aussi concernant la référence piézométrique utilisée par ANTEA pour le calage du modèle ; en effet, les données acquises au cours du pompage d'essai ne couvrent qu'une faible part de la superficie du modèle hydrogéologique, ce qui conduit à s'interroger sur les données utilisées ailleurs. En particulier, quelles valeurs ont été considérées sur les 4 couches pour imposer un potentiel en limites du domaine ? Il est vraisemblable, compte tenu de l'historique du modèle, que les données de la piézométrie de janvier 1997 aient été utilisées mais les rapports 2010 et 2011 ne le précisent pas.

Il manque à cet effet une vue de la totalité des points de calage sur l'ensemble de la zone modélisée. Cet aspect est assez important dans la mesure où certains des scénarios mis en œuvre exploitent semble-t-il la quasi-totalité de l'extension du modèle en Nord-Sud.

Données de débit

En termes de données de débit, une demande a été adressée auprès de la DREAL concernant les phréatiques du secteur : aucun élément n'a été transmis dans les délais impartis pour la réalisation de cet avis. Nous ne pouvons donc pas confirmer que le bureau d'études ait utilisé l'ensemble des données de débit disponibles sur la zone d'étude.

La référence utilisée pour le calage du débit global de drainage dans le polder d'Erstein est une valeur de 2 m³/s : « le modèle a été ajusté de manière à ce que le débit de drainage global calculé pour l'ensemble des mailles représentant les giessens du polder atteigne environ 2 m³/s. » (rapport ANTEA 2011 page 24). Les critères retenus pour choisir ce débit de référence ne sont pas indiqués dans le rapport : seul figure le tableau présenté en Tableau 5. Celui-ci fournit les débits annuels (moyenne ? étiage ?) de 2003 à 2008. Ces valeurs montrent une très forte variabilité du débit (entre 1.20 et 2.27 m³/s pour une moyenne de 1.71 m³/s), ce qui conduit à s'interroger fortement sur le débit réel drainé par les giessens fin novembre 2009 et donc sur la fiabilité de cette valeur de référence.

Année	Débit global de drainage par les giessens sur l'ensemble du polder (m ³ /s)
2003	1,20
2004	1,31
2005	1,96
2006	1,76
2007	1,77
2008	2,27
Minimum	1,20
Maximum	2,27
Moyenne	1,71

Tableau 5 : Débit global de drainage des giessens du polder d'Erstein (rapport ANTEA 2011, page 24)

En outre et comme déjà souligné, il est fort regrettable que les débits de l'Altrhein et du Thumenrhein n'aient pas été jaugés juste à l'amont de leur confluence, ce qui aurait permis de fortement contraindre le calage du modèle dans le secteur du futur champ captant.

4.2. VALEURS ATTRIBUÉES AUX PARAMÈTRES HYDROGÉOLOGIQUES

4.2.1. Perméabilité

L'interprétation des rabattements observés dans les piézomètres et dans le forage de pompage lors du pompage continu à 1007 m³/h a permis d'évaluer la transmissivité de l'aquifère au droit du champ captant entre 3.0 et 5.5 10⁻¹m²/s, aussi bien pour les piézomètres superficiels que profonds.

La perméabilité de la formation doit ensuite être déduite de la transmissivité en divisant celle-ci par l'épaisseur productive de l'aquifère. La hauteur crépinée dans le puits de

pompage est de 57 m (cf. rapport ANTEA 2010, page 18), l'épaisseur totale des alluvions de 80 m, et l'épaisseur saturée de 79 m environ.

En se basant sur ces valeurs, la perméabilité des alluvions au voisinage du champ captant serait comprise entre 3.8 et $9.6 \cdot 10^{-3}$ m/s.

Les valeurs introduites dans le modèle figurent dans le Tableau 6. Sauf exceptions, les perméabilités des couches 2 et 4 (parties supérieure et inférieure de l'aquifère alluvial) sont comprises entre 2 et $8 \cdot 10^{-3}$ m/s, ce qui est en bonne adéquation avec l'interprétation du pompage d'essai.

Par ailleurs, le modèle hydrogéologique maillé développé par le BRGM en 1998 pour la nappe d'Alsace entre Mulhouse et Colmar utilise des champs de perméabilité dont l'ordre de grandeur est similaire (cf. Figure 15 et Figure 16), avec des valeurs comprises entre 10^{-2} et 10^{-3} m/s.

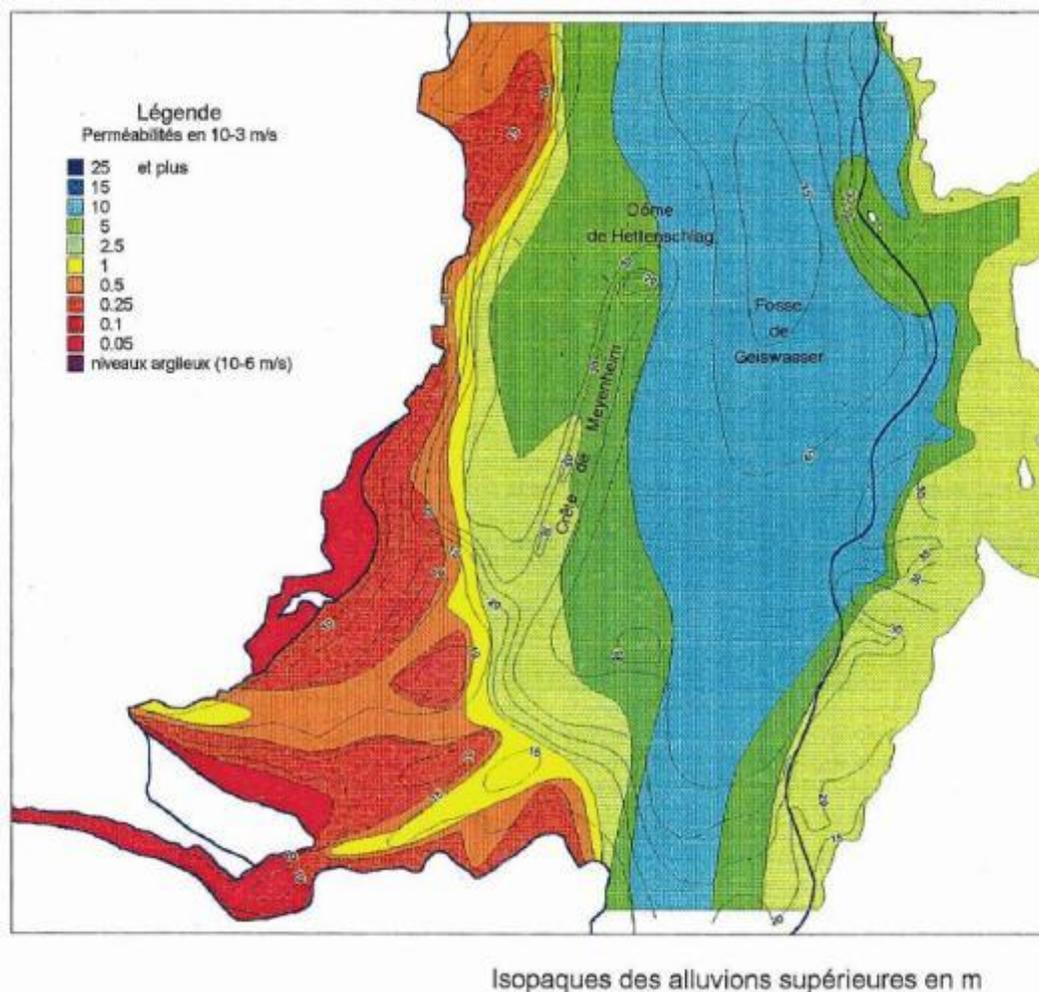


Figure 15 : Champ de perméabilité avant calage pour la partie supérieure de l'aquifère alluvial (rapport BRGM 1998)

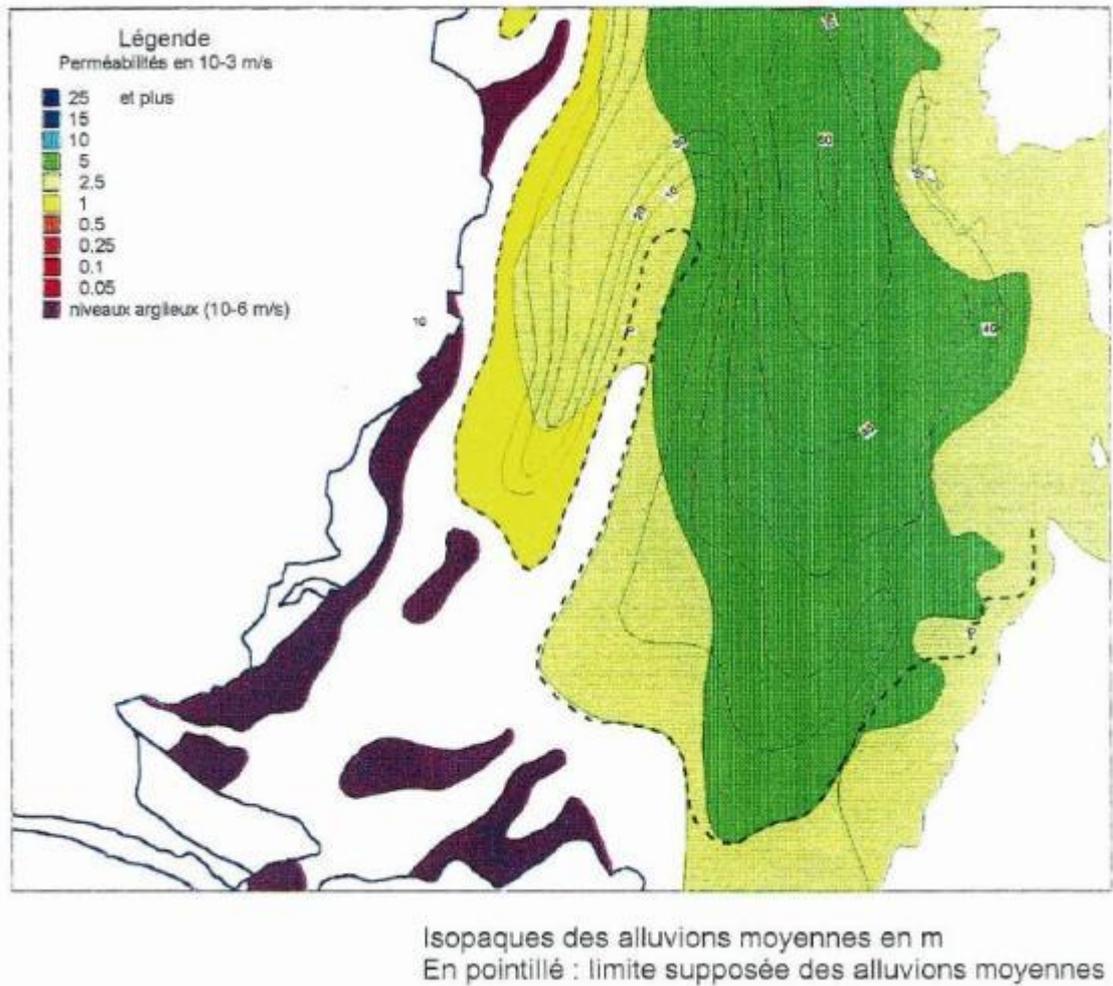


Figure 16 : Champ de perméabilité avant calage pour la partie moyenne de l'aquifère alluvial (rapport BRGM 1998)

L'attribution de valeurs de perméabilité par zones, « aux abords » des piézomètres, dénote de la volonté du bureau d'études de représenter au mieux les chroniques de rabattement observées lors du pompage d'essai. Cette approche, qui fournit souvent les meilleurs résultats de calage, se fait parfois au détriment de la cohérence d'ensemble du fonctionnement hydrogéologique du milieu, la zonation des perméabilités pouvant s'éloigner de la morphologie des dépôts alluvionnaires. Ceci étant, il convient de garder à l'esprit qu'un modèle consiste à proposer une vision équivalente des phénomènes réels, ceux-ci étant souvent très mal connus dans le détail. C'est d'ailleurs bien le cas pour la présente étude, comme l'atteste par exemple la méconnaissance de l'extension et de la nature de l'horizon intercalaire de moindre perméabilité. L'approche du bureau d'études est donc parfaitement recevable mais il serait nécessaire de l'illustrer par des cartes montrant la distribution spatiale des champs de perméabilité dans chacune des couches du modèle.

Il est à noter que la perméabilité attribuée à l'horizon intercalaire de moindre perméabilité (couche 3, $K=8 \cdot 10^{-4}$ m/s) est celle d'un bon aquifère, à peine plus faible que celle de la couche 2 (2.5 fois). De ce fait, cette couche participe significativement à l'écoulement et ne joue que localement un rôle d'éponte, au voisinage des ouvrages Pz2, Pz3 et du puits d'essai (perméabilité entre 10^{-5} et $5 \cdot 10^{-6}$ m/s).

Couches	Localisation	Perméabilité (m/s)	Coefficient d'emmagasinement
Couche 1 (hydrologie)	En général Plan d'eau de Plobsheim	$1,0 \cdot 10^{-3}$ $1,0 \cdot 10^{-6}$	$8,2 \cdot 10^{-2}$
Couche 2 (alluvions supérieures)	En général Abords Pz1 superficiel Abords Pz2 superficiel Abords Pz3 superficiel	$2,0 \cdot 10^{-3}$ $1,8 \cdot 10^{-3}$ $2,3 \cdot 10^{-3}$ $2,1 \cdot 10^{-3}$	$8,2 \cdot 10^{-2}$ $8,8 \cdot 10^{-2}$ $9,7 \cdot 10^{-2}$ $6,1 \cdot 10^{-2}$
Couche 3 (horizon intermédiaire)	En général Abords Pz2 superficiel/profond Abords Pz3 superficiel/profond Abords Puits d'essai (P5)	$8,0 \cdot 10^{-4}$ $1,0 \cdot 10^{-5}$ $8,0 \cdot 10^{-6}$ $5,0 \cdot 10^{-6}$	$5,3 \cdot 10^{-2}$
Couche 4 (alluvions inférieures)	En général Abords Pz1 profond Abords Pz2 profond Abords Pz3 profond Abords Sondage 1997 Abords Puits d'essai (P5)	$4,6 \cdot 10^{-3}$ $5,2 \cdot 10^{-3}$ $8,0 \cdot 10^{-3}$ $5,0 \cdot 10^{-4}$ $7,1 \cdot 10^{-3}$ $2,4 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-2}$ $5,5 \cdot 10^{-2}$ $2,0 \cdot 10^{-3}$ $2,0 \cdot 10^{-3}$ à $3,9 \cdot 10^{-5}$ $1,3 \cdot 10^{-2}$ $2,0 \cdot 10^{-3}$ à $3,9 \cdot 10^{-5}$

Tableau 6 : Perméabilités et emmagasineurs résultant du calage du modèle en régime transitoire (rapport ANTEA 2011, page 25)

4.2.2. Coefficient d'emmagasinement

L'interprétation du pompage d'essai a conduit aux valeurs suivantes pour le coefficient d'emmagasinement :

- $S = 6.6 \cdot 10^{-5}$ à $5.5 \cdot 10^{-2}$ pour les piézomètres profonds (d'après les figures 15 à 22 du rapport ANTEA 2010). On note que le tableau récapitulatif en page 35 fournit une valeur légèrement différente pour le puits d'essai et le Pz3 profond ($3.9 \cdot 10^{-5}$) ;
- $S = 8.8 \%$ à 10% pour les piézomètres superficiels.

Ces valeurs très contrastées traduisent des comportements hydrodynamiques distincts. Si tous les piézomètres superficiels révèlent un emmagasinement de nappe libre, il est significatif d'observer que les piézomètres profonds reflètent une large gamme d'emmagasineurs, de nappe libre à nappe captive. Dans le premier cas, l'horizon intercalaire ne joue probablement pas un rôle hydraulique significatif, alors que dans le second il se comporte sans doute comme un écran très peu perméable séparant un aquifère superficiel libre d'un aquifère profond captif.

L'essai de traçage entre Pz3 superficiel, Pz3 profond et le puits de pompage a de son côté donné les résultats suivants :

- Pz3 superficiel – puits de pompage : Porosité cinématique : 4.3 % ;
- Pz3 profond – puits de pompage : Porosité cinématique : 5.2 %.

La porosité cinématique est toujours inférieure à la porosité efficace, elle-même très proche du coefficient d'emmagasinement pour les nappes libres.

Les porosités cinématiques déduites de l'interprétation des traçages sont donc tout-à-fait cohérentes avec les coefficients d'emmagasinement déterminés d'après les pompages d'essai.

4.2.3. Coefficients de dispersion et respects de critères liés à la modélisation hydrodispersive

Coefficients de dispersion

Les coefficients de dispersion obtenus à partir de l'essai de traçage sont de 5 m et 13 m pour les deux couches du modèle. Ils ont été obtenus sur la base d'une distance parcourue dans l'aquifère de 70 à 85 m selon le puits d'injection utilisé. En règle générale, la dispersion d'un traceur est souvent proportionnelle à la distance parcourue : une approximation souvent faite consiste à prendre pour dispersion longitudinale un dixième de la distance parcourue. Les valeurs obtenues au cours de l'essai restent dans cet ordre de grandeur.

Cependant, dans le cadre du modèle maillé, des scénarios d'injection de polluants depuis la gravière Nordhouse ou l'isochrone à 50 jours ont par exemple été simulés (cf. rapport 2010, pages 98 à 101). Or, la gravière Nordhouse est éloignée d'un peu plus d'un kilomètre du champ captant, ce qui pourrait conduire, pour ce scénario, à revoir la valeur de la dispersion longitudinale.

Néanmoins, l'utilisation d'une valeur de dispersion plus forte conduit à « étaler » dans l'espace le panache du traceur, ce qui prolonge son observation dans le temps au niveau des forages mais diminue par contre l'intensité du pic observé. De fait, les valeurs utilisées dans le modèle ont tendance à amplifier en termes d'intensité l'impact de l'injection d'un polluant à partir d'un site éloigné.

ANTEA explique d'ailleurs ce phénomène dans le second paragraphe du chapitre 5.4.1 (rapport 2010, page 98).

Critères appliqués pour la modélisation hydrodispersive

Deux critères numériques doivent être respectés pour limiter la dispersion numérique des calculs dans les modélisations hydrodispersives. Ils s'appliquent aux nombres de Peclet et de Courant, qui s'expriment respectivement de la façon suivante en 1D :

$$Pe = dx / \alpha_L$$

$$Cr = u dt / dx$$

où :

- dx : taille de la maille (m)
- α_L : dispersivité longitudinale (m)
- u : vitesse réelle d'écoulement (m/s)
- dt : pas de temps (s)

Les contraintes qui s'appliquent à ces paramètres dépendent de la méthode de calcul utilisée pour simuler la propagation d'un soluté dans un aquifère. Avec la méthode aux différences finies, ces deux nombres doivent être inférieurs à 1. La méthode dite « TVD » ajuste automatiquement le pas de temps pour que le nombre de courant reste inférieur à 1. Une approche « Random Walk » est moins contraignante dès lors qu'on utilise un nombre de particules suffisant.

Ainsi, le choix de la méthode de calcul utilisée pour les simulations hydrodispersives est important, mais celle-ci n'est pas précisée dans les différents rapports.

Dans le cas présent, la dispersion longitudinale est de 5 m en couche supérieure et de 13 m en couche inférieure. Avec des mailles de 3.1 m de côté, la condition de Peclet est bien respectée. En revanche, elle ne l'est pas en dehors de la zone de maillage affinée, lorsque la maille est de 100 m.

La valeur du nombre de Courant dépend du pas de temps utilisé pour les simulations hydrodispersives. Celui-ci n'est pas précisé dans le rapport mais il est sans doute compris entre l'heure et la journée. En se basant sur une perméabilité de 0.002 m/s (valeur prise en général pour la couche 2, la couche 4 ayant généralement une perméabilité de 0.0046 m/s, cf. 4.2.1), un gradient de 0.1% (rapport de l'hydrogéologue agréé en page 20) et une porosité cinématique de 5% (cf. tableau en page 82 du rapport ANTEA 2010), on obtient une vitesse réelle hors pompage de l'ordre de $4 \cdot 10^{-5}$ m/s = 0.14 m/h = 3.5 m/j. Cette vitesse est à multiplier par 2.3 pour la couche inférieure de l'aquifère (soit 0.33 m /h ou 8 m/j environ).

Avec de telles vitesses réelles d'écoulement, le nombre de Courant est inférieur à 1 dans toutes les mailles du modèle si le pas de temps est horaire. Si le pas de temps est journalier, le nombre de Courant est partout inférieur à 1 dans la couche supérieure de l'aquifère, mais il est égal à 2.6 dans les mailles de 3.1 m de côté de la couche inférieure. Les simulations hydrodispersives au pas de temps journalier risquent donc de générer une dispersion numérique significative dans la couche inférieure, notamment au voisinage du forage en pompage où la vitesse de l'eau augmente du fait d'un gradient piézométrique accru, lequel induit un nombre de Courant plus important).

4.3. QUALITÉ DU CALAGE AU VU DES RÉFÉRENCES UTILISÉES

4.3.1. Calage en régime permanent

Pour l'analyse du calage en régime permanent, le rapport présente deux tableaux des niveaux observés et simulés en cotes altimétriques, avec et sans pompage à 1007 m³/h (pages 19 et 20), en attribuant un figuré de couleurs selon l'écart de calage. Les tableaux sont associés à deux diagrammes de dispersion destinés à représenter dans un graphique unique les niveaux observés et les niveaux simulés pour un état piézométrique donné. Ce type de représentation est habituel en la matière.

Le premier diagramme de dispersion (cf. Figure 17) présente les cotes piézométriques en régime hydraulique permanent « naturel ». La pente de la droite de régression est extrêmement proche de 1 et le R² proche de 0.90. De façon générale, ceci traduit un calage de bonne qualité, celle-ci étant d'ailleurs essentiellement dégradée par les difficultés de calage d'étang 3 et du point de mesure sur l'Altrhein, où le modèle sous-estime les niveaux d'environ 50 cm. On note cependant – et cette remarque est aussi valable pour le second diagramme de dispersion – que la droite de régression obtenue est fortement influencée par une valeur extrême qui correspond ici à la cote du plan d'eau de Plobsheim. Cette cote étant imposée dans le modèle, son intégration dans le diagramme de dispersion n'a pas lieu d'être puisqu'il ne s'agit pas d'un résultat de calage mais d'une hypothèse de construction du modèle. Le cas du second diagramme est différent parce que le point extrême correspond à un résultat du calage : le niveau dynamique mesuré au point de pompage.

Le diagramme de dispersion en rabattements (cf. Figure 18) présente une droite de régression dont la pente est très voisine de 1 pour un R² de 0.97 environ. Ce très bon résultat est fortement influencé par la valeur extrême. Les principales difficultés de calage concernent l'étang 3 et le plan d'eau de Plan Jacob, dont les lits sont sans doute colmatés puisqu'ils ne subissent pas de baisse de niveau pendant la semaine de pompage (leurs volumes contribuent à leur assurer une forte inertie).

Pour mémoire, le calage en régime permanent constitue une étape de calage souvent un peu artificielle, la phase importante étant le calage en régime transitoire qui vise à restituer le comportement transitoire de la nappe. Ce dernier permet en effet de mieux cerner les perméabilités et d'intégrer les coefficients d'emmagasinement pour bien représenter les fluctuations piézométriques.

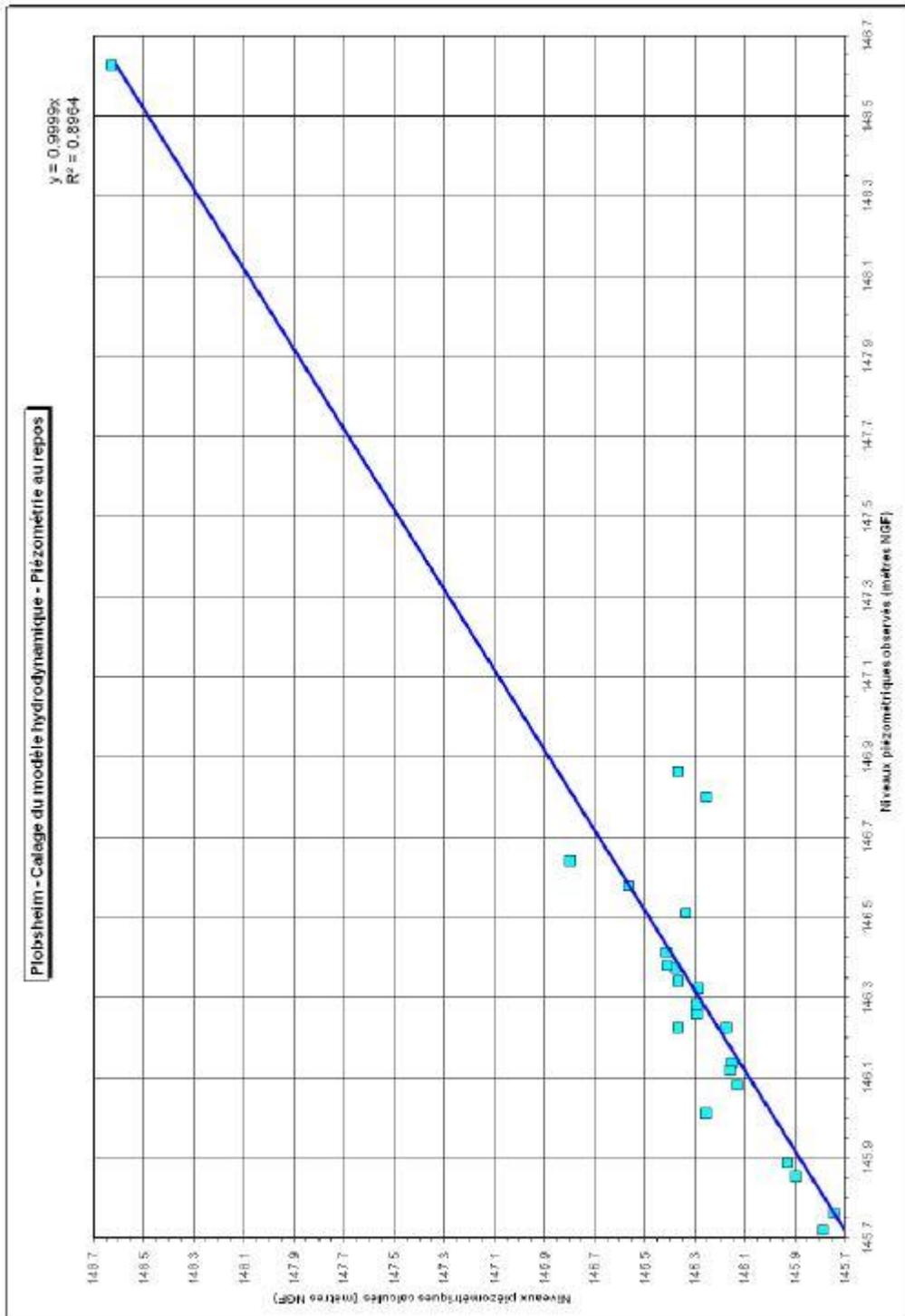


Figure 17 : Diagramme de dispersion en cotes altimétriques, hors pompage (rapport ANTEA 2011, page 21)

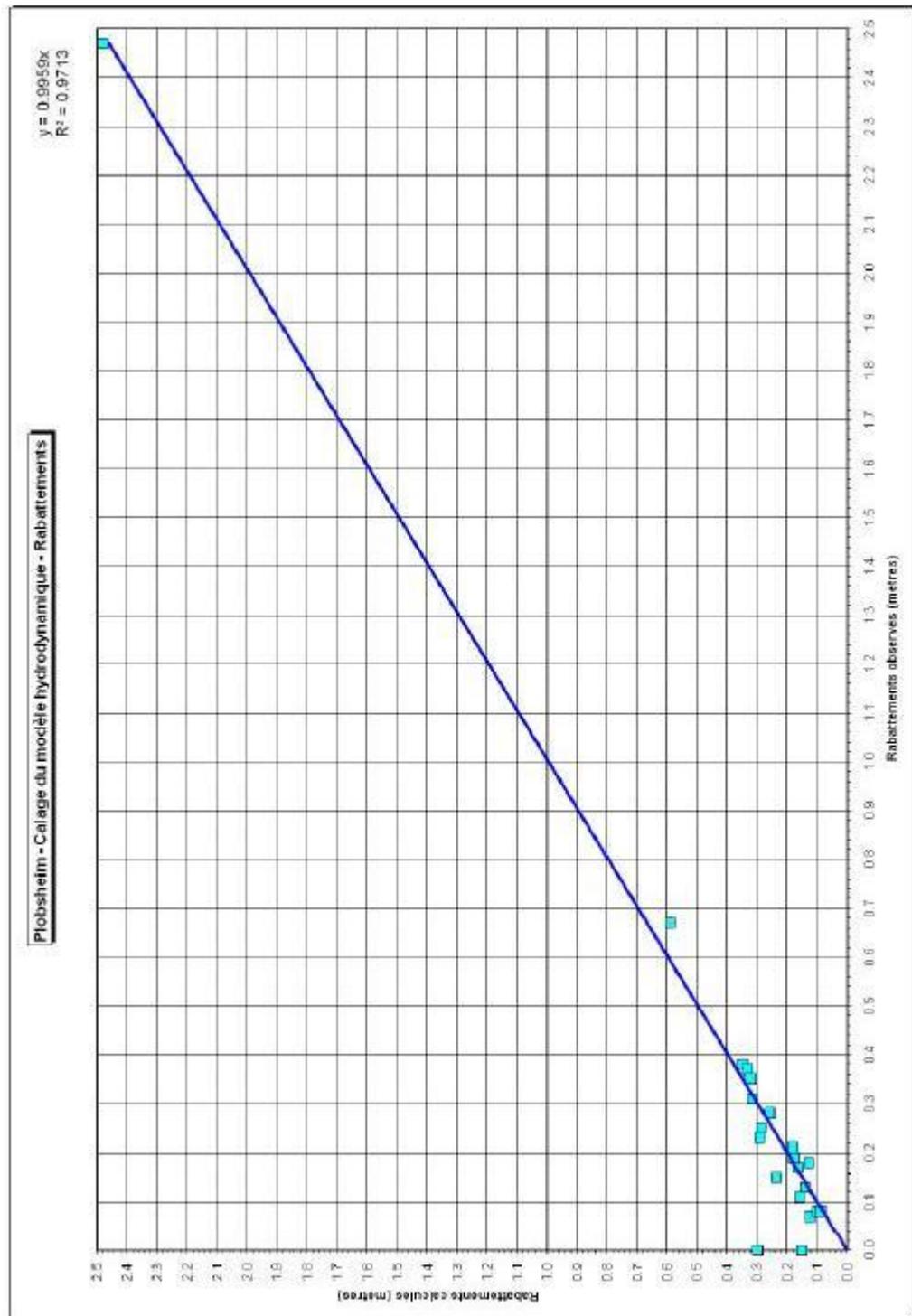


Figure 18 : Diagramme de dispersion en rabattement (rapport ANTEA 2011, page 22)

4.3.2. Calage en régime transitoire

Les cotes altimétriques de début et de fin de pompage sont fournies dans le tableau 6 du rapport ANTEA 2011 (page 26) et les chroniques de calage simulées/observées sont présentées en annexe F du même rapport, sous forme de chroniques de rabattement. Ce type de représentation en rabattements est moins riche qu'en niveaux piézométriques parce qu'il masque les écarts piézométriques. On constate la difficulté de calage rencontrée pour simuler la remontée du niveau piézométrique sur Pz3 superficiel, qui pourrait être dû à l'omission de l'Altrhein dans le modèle.

Les cartes de rabattement pour les couches 2 et 4 du modèle sont présentées en annexe G du rapport. Elles font apparaître à l'ouest l'impact de la gravière Nordhouse qui tamponne les rabattements alentour, ainsi que trois petits secteurs en bordure du plan d'eau de Plobsheim qui présentent des rabattements spécifiques, sans qu'il en soit donné explication dans le rapport.

Aucun calage n'est présenté sur les débits des cours d'eau.

Le rapport ne présente pas non plus de bilan hydraulique sur les entrées / sorties du modèle, ni de bilan d'échanges entre les différentes couches. Il serait par exemple intéressant de connaître les variations d'apport du plan d'eau de Plobsheim à la nappe sous-jacente et de s'assurer que les entrées et sorties par les limites à charges imposées évoluent dans des limites raisonnables.

4.4. ANALYSES DE SENSIBILITÉ

Des analyses de sensibilité ont été réalisées en tant que variantes des scénarios d'exploitation du champ captant. Elles sont présentées au chapitre suivant.

Il aurait été intéressant de réaliser ces analyses indépendamment des scénarios d'exploitation afin de mieux rendre compte de l'impact d'une hypothèse donnée sur le calage du modèle.

5. Exploitation de la version 2010-11 du modèle

Dans son rapport 2011, ANTEA indique en préambule de la présentation des simulations d'exploitation :

« Ne sont présentés ici que les scénarios traités en régime transitoire, qui prennent en compte de manière plus réaliste les conditions d'exploitation du champ captant que les simulations initiales en régime permanent.

Les scénarios traités sont les suivants :

- scénario de base supposant un colmatage marqué du bassin de Plobsheim ;
- variante supposant un colmatage moins prononcé. »

L'analyse se concentre donc sur les scénarios retenus dans le rapport 2011, avec un bref aperçu des scénarios antérieurs.

5.1. SCENARIO DU RAPPORT 2011

5.1.1. Hypothèses retenues

Les hypothèses retenues sont présentées sous la forme d'un extrait du rapport ANTEA 2011 (page 27) :

« Le programme de pompage proposé par la Communauté Urbaine de Strasbourg, et simulé, est le suivant :

- régime hydrodynamique permanent à 2 054 m³/h sur l'ensemble des six puits du futur champ captant (342,4 m³/h sur chaque ouvrage) correspondant à un volume journalier prélevé de 49 300 m³/jour ;
- suivi d'un pompage pendant 4 semaines à 4 108 m³/h sur l'ensemble des six puits (684,7 m³/h sur chaque ouvrage). Cette situation correspond à une mise hors fonctionnement totale du Polygone pendant une durée de 4 semaines, le relais étant pris par le futur champ captant de Plobsheim afin d'assurer la continuité de l'approvisionnement en eau, sur la base d'un volume journalier prélevé de 98 600 m³/jour ;
- retour à un régime de pompage à 2 054 m³/h. »

Comme indiqué précédemment, le champ captant est dimensionné pour produire 6000 m³/h et le rapport ANTEA 2010 précise bien en page 85 que les « besoins en pointe du futur champ captant se situent à hauteur de 120 000 m³/j, soit un débit horaire moyen de 5000 m³/h ».

Il est donc étonnant que le rapport de synthèse de la modélisation hydrogéologique ne présente comme scénario maximal d'exploitation qu'un pompage à 4108 m³/h pendant

4 semaines. Indépendamment des incertitudes liées au contexte hydrogéologique et aux hypothèses de construction du modèle, il paraît nécessaire de prendre en compte au moins un scénario d'exploitation au débit de pointe de fonctionnement du champ captant.

5.1.2. Choix de la valeur de la perméabilité de colmatage pour les scénarios de base de la simulation et de sa variante

Les hypothèses d'exploitation retenues pour le scénario de base et sa variante ne diffèrent que par la prise en compte d'une perméabilité du fond du plan d'eau de Plobsheim passant de 10^{-6} (scénario de base) à 10^{-5} m/s (variante).

Le choix des valeurs retenues pour cette perméabilité n'est pas justifié dans le rapport. Or, les chroniques piézométriques disponibles au voisinage du plan d'eau de Plobsheim laissent supposer que son colmatage est assez important, ce qui est classique pour ce type d'aménagement. Il serait certainement instructif de simuler un colmatage total du plan d'eau de Plobsheim afin d'apprécier l'impact hydraulique de ce schéma délibérément pénalisant (un tel colmatage amplifierait l'extension du cône de rabattement, notamment sous le polder d'Erstein). Une valeur de 10^{-9} m/s (qui est celle demandée pour les fonds de centre d'enfouissement technique) aurait ainsi pu être testée.

5.2. AUTRES SCENARIOS

Dans le cadre du rapport 2010 (pages 85 et suivantes), une simulation a été effectuée en considérant une exploitation en continu 24h/24h au débit de $5000 \text{ m}^3/\text{h}$, réparti sur les six futurs forages du champ captant.

Il y a peu de remarques spécifiques à faire concernant la mise en œuvre de ce scénario, si ce n'est de rappeler :

- que les rabattements calculés s'étendent sur des distances importantes et sont susceptibles d'être faussés par les charges imposées sur les limites, notamment nord, du modèle ;
- qu'il n'existe pas de données permettant de valider ces rabattements prévisionnels en dehors d'une zone de faible extension au voisinage du champ captant.

Plusieurs simulations de pollutions ont été conduites, dont l'une d'elles suppose une pollution de l'Altrhein. Le cours d'eau n'étant pas pris en compte dans le modèle, ne serait-ce que par des mailles à débordement, il serait nécessaire de préciser dans quelle couche et en quel lieu le polluant a été injecté.

Pour mémoire, le nombre de Courant maximal évalué pour cette simulation est élevé pour les mailles de 100 m si le pas de temps de la modélisation est journalier. Dans ce cas, la dispersion numérique pourrait devenir importante.

6. Conclusions

La lecture des différents rapports fournis par la DREAL et l'ARS a conduit à apporter un certain nombre de remarques et de commentaires qui sont détaillés au fil du présent rapport.

Tout d'abord, la construction du rapport de synthèse d'ANTEA (2011) rend très lisibles les hypothèses prises dans le modèle hydrogéologique. On trouve en particulier un très bon découpage entre les parties relatives aux contextes hydrogéologique (chapitre 2) et aux travaux antérieurs (chapitre 3), à la construction du modèle (chapitre 4), à son calage (chapitre 5), et à la simulation de différents scénarios (chapitre 6).

Le travail de modélisation a été réalisé dans les règles de l'art, en respectant les procédures habituelles en la matière. Les résultats qui en découlent semblent réalistes et fiables, mais plusieurs points doivent encore être améliorés pour permettre un contrôle plus poussé de la fiabilité du modèle et de ses prévisions.

La plupart des informations nécessaires à la compréhension du modèle sont fournies, à l'exception notable :

- de la valeur des charges imposées en limites du modèle ;
- des critères piézométriques pris en compte pour caler le modèle en dehors de la zone dans laquelle des données ont été acquises en fin novembre 2009 (utilisation de la carte piézométrique de janvier 1997 ?). De façon générale, les données de calage ne sont disponibles qu'au voisinage du futur champ captant, ce qui pose la question de la fiabilité des résultats dès que l'on s'éloigne de ce secteur investigué ;
- du bilan hydraulique des entrées / sorties du modèle, en particulier par les limites à charges imposées, ainsi que du bilan des échanges entre les différentes couches. L'évaluation par le modèle de l'alimentation de la nappe par le plan d'eau de Plobsheim constitue notamment un point critique dans la mesure où ce plan d'eau sera probablement amené à se colmater de plus en plus en raison de l'épaisse couche de sédiments fins qui s'y est déjà déposée. Les pompages pris en compte dans le modèle en dehors du champ captant ne sont pas spécifiés, ni localisés sur une carte.

Sans entrer dans le détail, il existe un certain nombre de possibilités d'amélioration du modèle, notamment :

- le recul des limites nord et sud qui sont probablement trop proches pour simuler des pompages importants dans le futur champ captant de Plobsheim sur de longues périodes ;
- la prise en compte de la chronique du piézomètre 02762X0008 pour améliorer le calage. Ce piézomètre a l'avantage de se situer en dehors de la zone dans laquelle il existe déjà de nombreuses données ;

- la prise en compte de données de débits pour le calage du modèle – sous réserve qu'elles soient disponibles à la DREAL ;
- l'affinement de la géométrie par la prise en compte des coupes lithologiques et la correction de la cote du substratum de la couche 2 à l'aplomb du plan d'eau de Plobsheim.

Ces modifications éventuelles ne remettent pas fondamentalement en cause les résultats fournis par le modèle.

Un point par contre plus important est relatif à l'absence de mailles à débordement dans le modèle pour simuler l'Altrhein et le Thumenrhein avant leur confluence, et le Rhin Tortu après celle-ci. Cette lacune ne permet pas de simuler le drainage de la nappe par ces cours d'eau, comme s'ils n'avaient aucune relation avec la nappe. Par ailleurs, l'existence de périodes durant lesquelles ces cours d'eau sont susceptibles d'alimenter la nappe incite à recommander la mise en œuvre d'une schématisation hydraulique où le modèle puisse aussi bien simuler le drainage que la recharge de la nappe par ces cours d'eau.

A propos du calage du modèle, la période de calage (10 jours environ) est courte vis-à-vis de scénarios prévisionnels couvrant plus d'une centaine de jours. En particulier, il ne semble pas réaliste de négliger la recharge de la nappe, ni pendant la phase de calage en transitoire ni, *a fortiori*, pendant toute la durée des scénarios prévisionnels.

En termes de simulations, il est vivement suggéré de simuler l'impact d'un pompage à 5000 m³/h compte tenu des attendus de fonctionnement du champ captant, ainsi que de présenter l'impact réciproque des différents prélèvements (AEP, privé, agricole, industriel) en cas de pompage aux débits autorisés pour chacun d'eux.

Par ailleurs, en cas de réalisation du champ captant, il sera nécessaire d'instrumenter le polder d'Erstein (comme c'était initialement prévu) et de suivre l'évolution du niveau de la ligne d'eau de l'Altrhein et du Thumenrhein avant leur confluence.

La plupart de ces remarques ne requièrent probablement que des compléments d'explication et d'illustration par le Bureau d'Études ANTEA.

Il convient de rappeler, enfin, que le présent rapport est exclusivement axé sur la modélisation hydrogéologique du futur champ captant de Plobsheim, sans préjuger de l'impact potentiel d'une baisse des niveaux d'eau dans la nappe des alluvions sur les ouvrages d'art dont les fondations ont été dimensionnées sur la base d'un historique des fluctuations « naturelles » de la nappe.

7. Bibliographie

Rapports transmis par la DREAL et l'ARS d'Alsace :

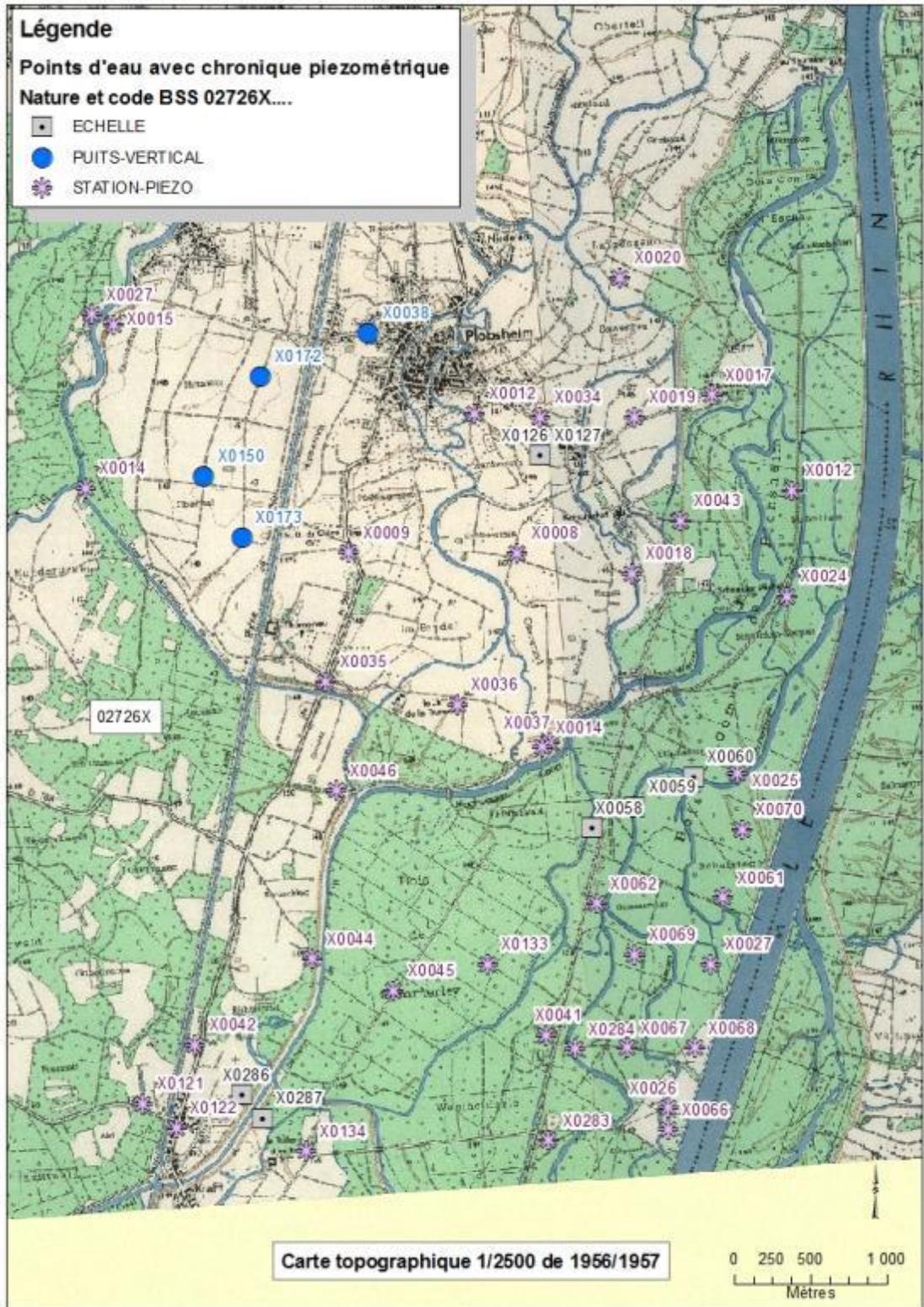
- ULP – GINGER ENVIRONNEMENT : Bilan annuel du suivi scientifique du polder d'Erstein. Synthèse des connaissances année 1. Juillet 2005.
- ANTEA - Communauté Urbaine de Strasbourg (CUS). Recherche de nouvelles ressources en eau à Plobsheim (67). Modélisation du futur champ captant. Rapport A48158/A. Janvier 2008 ;
- ANTEA - Communauté Urbaine de Strasbourg (CUS). Projet de nouveau champ captant de Plobsheim pour l'alimentation en eau potable (67). Présentation des investigations hydrogéologiques complémentaires. Rapport A57129/A. Février 2010 ;
- SAFEGE - Communauté Urbaine de Strasbourg (CUS). Création d'un champ captant d'alimentation en eau potable au Sud de l'agglomération strasbourgeoise. Dossier préalable à la définition des périmètres de protection. Version n°1. 25 mars 2010 ;
- GRAILLAT A. - Communauté Urbaine de Strasbourg (CUS). Périmètres de protection du futur champ captant d'alimentation en eau potable sur le territoire de la commune de Plobsheim. Avis de l'hydrogéologue agréé. Juillet 2010 ;
- ANTEAGROUP - Communauté Urbaine de Strasbourg (CUS). Projet de champ captant de Plobsheim pour l'alimentation en eau potable de la Communauté Urbaine de Strasbourg. Rapport de synthèse concernant la modélisation hydrodynamique. Rapport A63820/A. Septembre 2011.

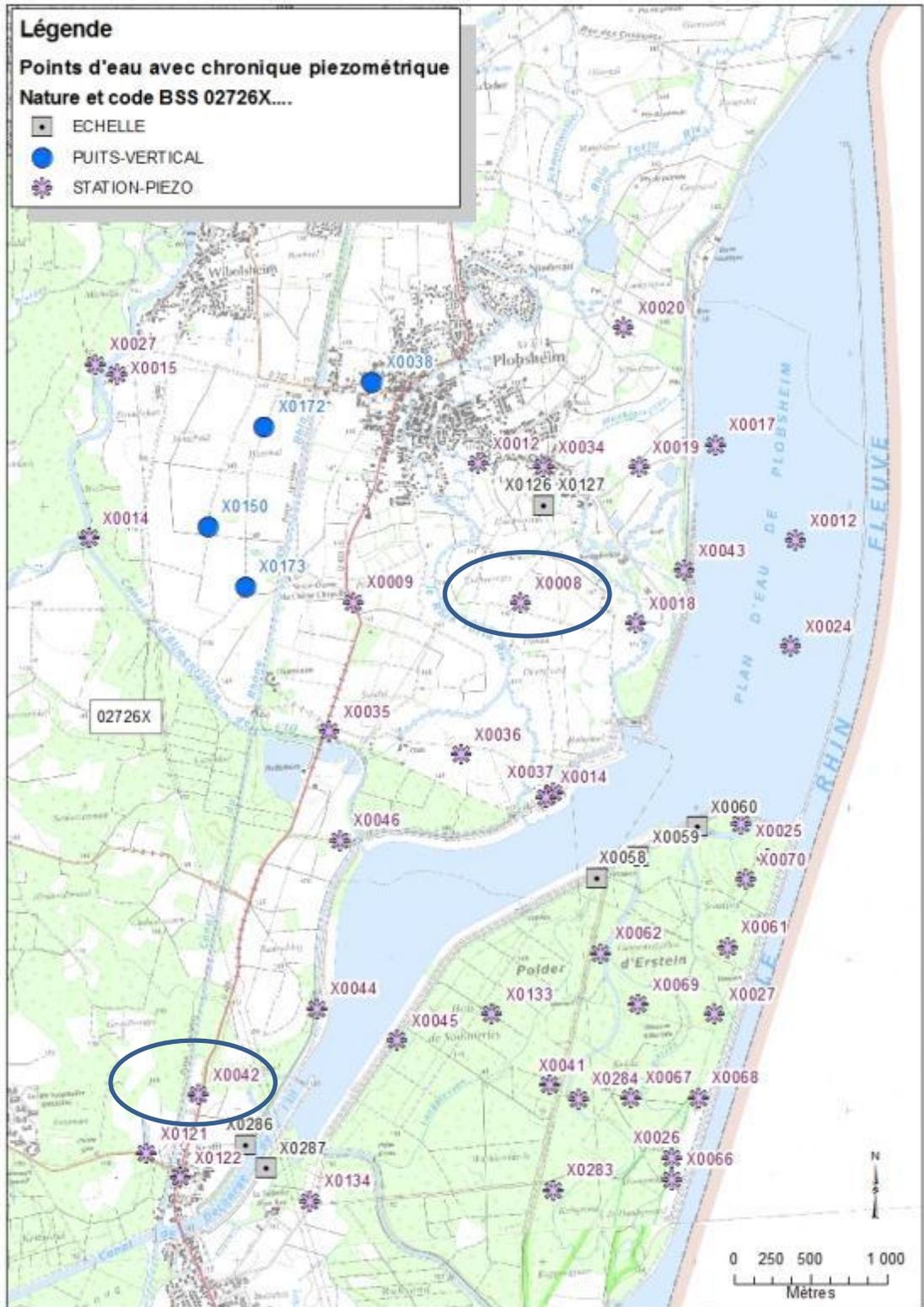
Autres documents consultés :

- Dossiers de la Banque du Sous-Sol des captages concernés, intégrant les coupes lithologiques et techniques (BRGM) ;
- Données disponibles dans ADES (BRGM) ;
- Cartes géologiques au 1 / 50 000 du département du Bas-Rhin (BRGM) ;
- Hunt, B. 1999. Unsteady stream depletion from ground water pumping. Ground Water 37, 98–102.
- Noyer M-L., Menjoz A., Elsass P., Thiery D., Martin J-C. (1998). Modèle de la nappe d'Alsace. Projet de développement 312. Rapport final BRGM/RR-40335-FR, 207 p.
- Rushton, K. 2007. Representation in regional models of saturated river–aquifer interaction for gaining/losing rivers. Journal of Hydrology 334: 262-281.

ANNEXE 1

Localisation des piézomètres de la zone d'étude et fonds topographiques de 1956, 1979 et actuels





ANNEXE 2

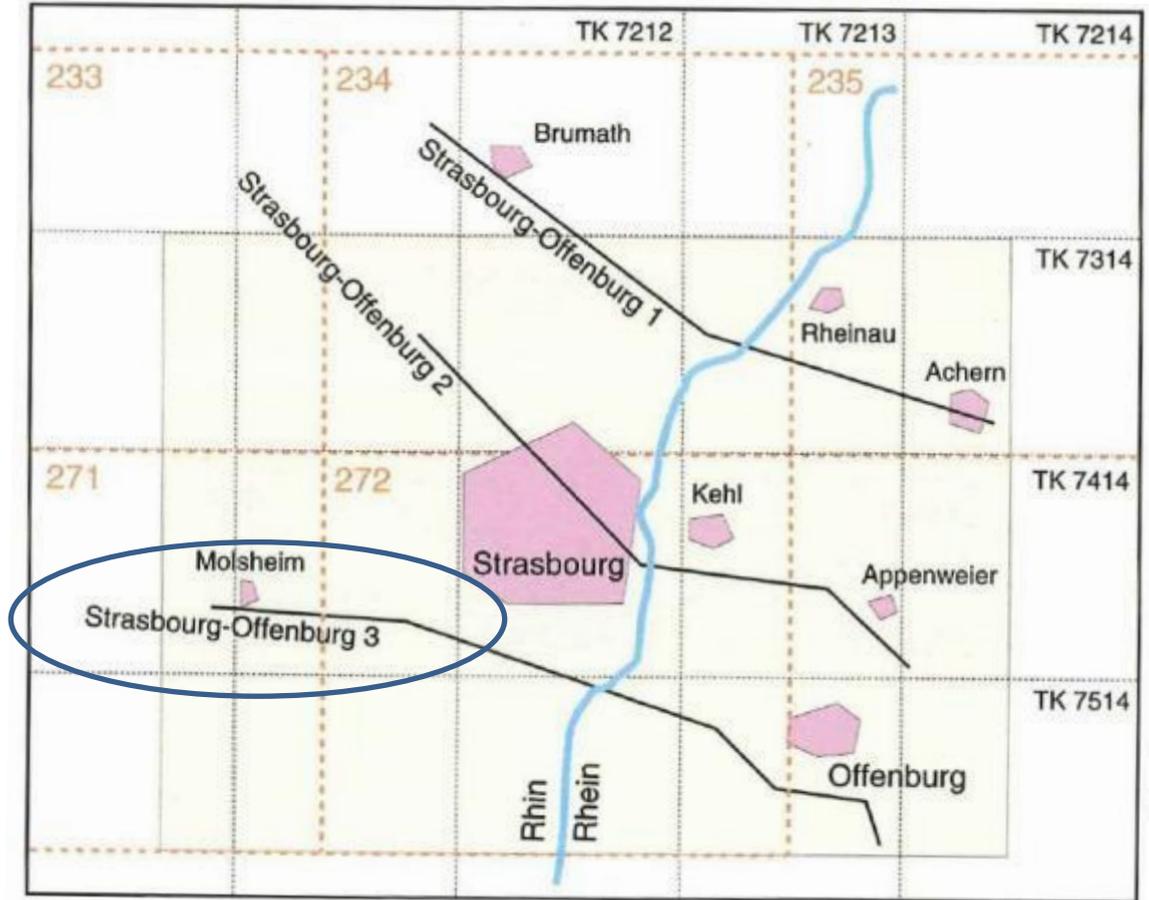
Tableau des piézomètres ayant fait l'objet d'un suivi dans le secteur de Plobsheim

Avis du BRGM sur le modèle hydrogéologique du champ captant de Plobsheim

INDICE	DESIGNATION	COMMUNE	XOUVL2E	YOUVL2E	Nbre_années_suivi	Nbre_mesures	DATEDEB	DATEFIN	PROF_MIN	PROF_MAX
02726X0008	Z35G	PLOBSHEIM	998980	2397980	34	1608	03/03/1964	15/06/2011	1.49	3.06
02726X0009	Z35H	PLOBSHEIM	997880	2397983	13	611	03/03/1964	28/12/1976	2.45	3.72
02726X0012	Z35N	BROQUE(LA)	998703	2398901	13	613	03/03/1964	28/12/1976	1.87	3.16
02726X0014	Z36A	ESCHAU	996151	2398408	13	611	03/03/1964	29/12/1976	1.19	2.01
02726X0015	Z36B	ESCHAU	996334	2399488	13	612	03/03/1964	28/12/1976	1.20	1.92
02726X0027	Z36C	ESCHAU	996194	2399559	13	612	03/03/1964	28/12/1976	1.67	2.40
02726X0034	Z35M	PLOBSHEIM	999133	2398880	3	122	03/03/1964	13/09/1966	1.10	2.57
02726X0035	Z35D	PLOBSHEIM	997728	2397133	4	159	03/03/1964	20/06/1967	1.38	3.24
02726X0036	Z35C	PLOBSHEIM	998587	2396981	7	287	03/03/1964	04/08/1970	0.98	2.76
02726X0037	F	PLOBSHEIM	999197	2396729	2	76	03/03/1964	14/09/1965	1.63	3.09
02726X0038		235 PLOBSHEIM	998005	2399433	22	1094	04/03/1955	28/12/1976	1.63	2.96
02726X0041	Z31C	ERSTEIN	999171	2394799	24	1068	27/03/1962	29/12/1997	1.46	3.43
02726X0042		230 ERSTEIN	996870	2394735	40	2108	08/03/1955	06/10/1997	1.39	3.24
02726X0044	S9	NORDHOUSE	997642	2395303	2	91	12/01/1971	19/12/1972	1.41	2.12
02726X0045	S10	ERSTEIN	998172	2395092	3	76	12/01/1971	28/01/1997	1.53	2.12
02726X0046	S11	NORDHOUSE	997796	2396413	2	94	12/01/1971	19/12/1972	3.37	4.07
02726X0121	PZ1	ERSTEIN	996529	2394346	13	468	06/09/1988	18/12/2000	1.33	1.97
02726X0122	PZ2	ERSTEIN	996749	2394186	13	449	06/09/1988	18/12/2000	1.51	2.14
02726X0126	E 2	ERSTEIN	999132	2398630	4	167	13/08/1990	15/12/1993	0.00	0.32
02726X0127	E 4	ERSTEIN	999132	2398630	3	156	07/01/1991	15/12/1993	-1.67	-1.22
02726X0133	PZF	ERSTEIN	998789	2395267	9	323	18/04/1989	29/12/1997	1.80	2.47
02726X0134	PZG	ERSTEIN	997598	2394033	9	325	18/04/1989	29/12/1997	2.45	3.02
02726X0150	F	PLOBSHEIM	996927	2398484	1	1	28/01/1997	28/01/1997	1.92	1.92
02726X0172	F	PLOBSHEIM	997297	2399144	1	1	28/01/1997	28/01/1997	1.88	1.88
02726X0173	F	PLOBSHEIM	997174	2398082	1	1	28/01/1997	28/01/1997	2.22	2.22
02726X0283	PZ S	ERSTEIN	999190	2394101	2	104	02/01/1996	29/12/1997	2.34	2.79
02726X0284	PZ T	ERSTEIN	999360	2394708	2	24	02/01/1996	29/12/1997	1.44	1.61
02726X0286	E4	ERSTEIN	997174	2394403	8	275	11/09/1990	29/12/1997	-1.00	-0.01
02726X0287	E5	ERSTEIN	997310	2394252	7	233	27/08/1991	29/12/1997	-0.05	0.76
02727X0012	Z35J	PLOBSHEIM	1000782	2398395	5	214	03/03/1964	17/12/1968	0.40	3.19
02727X0014	Z35R	PLOBSHEIM	999147	2396699	7	224	07/11/1967	13/11/1973	1.08	3.07
02727X0017	Z35K	PLOBSHEIM	1000254	2399027	4	131	04/03/1964	30/05/1967	1.21	2.75
02727X0018		235 PLOBSHEIM	999730	2397848	13	612	03/03/1964	28/12/1976	1.38	3.20
02727X0019	Z35L	PLOBSHEIM	999753	2398878	13	613	03/03/1964	28/12/1976	2.26	4.00
02727X0020	Z35P	PLOBSHEIM	999656	2399798	13	612	03/03/1964	28/12/1976	0.84	2.76
02727X0024	Z35E	PLOBSHEIM	1000750	2397695	5	193	04/03/1964	28/05/1968	0.48	3.06
02727X0025		235 PLOBSHEIM	1000427	2396525	2	83	03/01/1964	07/12/1965	1.39	3.74
02727X0026	S1	ERSTEIN	999970	2394316	2	74	12/01/1971	25/07/1972	2.05	2.83
02727X0027	S2	ERSTEIN	1000253	2395266	2	73	12/01/1971	25/07/1972	2.32	3.00
02727X0028	S3	PLOBSHEIM	1000596	2396295	6	294	12/01/1971	28/12/1976	1.62	2.65
02727X0043	S71	PLOBSHEIM	1000051	2398197	2	95	16/01/1971	19/12/1972	3.75	4.28
02727X0058	E1	NORDHOUSE	999475	2396168	9	325	18/04/1989	29/12/1997	-1.37	-0.19
02727X0059	E2	PLOBSHEIM	999751	2396307	9	325	18/04/1989	29/12/1997	-1.04	-0.15
02727X0060	E3	PLOBSHEIM	1000136	2396506	9	325	18/04/1989	29/12/1997	-1.16	-0.05
02727X0061	PZD	ERSTEIN	1000333	2395708	13	471	06/09/1988	18/12/2000	1.56	2.49
02727X0062	PZE	ERSTEIN	999504	2395667	9	366	18/04/1989	29/12/1997	2.04	3.11
02727X0066	PZ R	ERSTEIN	999972	2394175	2	72	02/01/1996	13/10/1997	2.36	2.89
02727X0067	PZ U	ERSTEIN	999702	2394713	2	93	02/01/1996	29/12/1997	1.61	2.06
02727X0068	PZ V	ERSTEIN	1000144	2394716	2	31	02/01/1996	07/04/1997	1.37	4.42
02727X0069	PZ WA	ERSTEIN	999752	2395330	2	104	02/01/1996	29/12/1997	1.59	2.10
02727X0070	PZ X	PLOBSHEIM	1000455	2396155	2	96	02/01/1996	29/12/1997	1.21	2.88

ANNEXE 3

Coupe hydrogéologique Strasbourg – Offenbourg n°3





Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Alsace
15, rue du Tanin
BP 70177 - Lingolsheim
67834 Tanneries Cedex France
Tél. : 03 88 77 48 90

www.brgm.fr