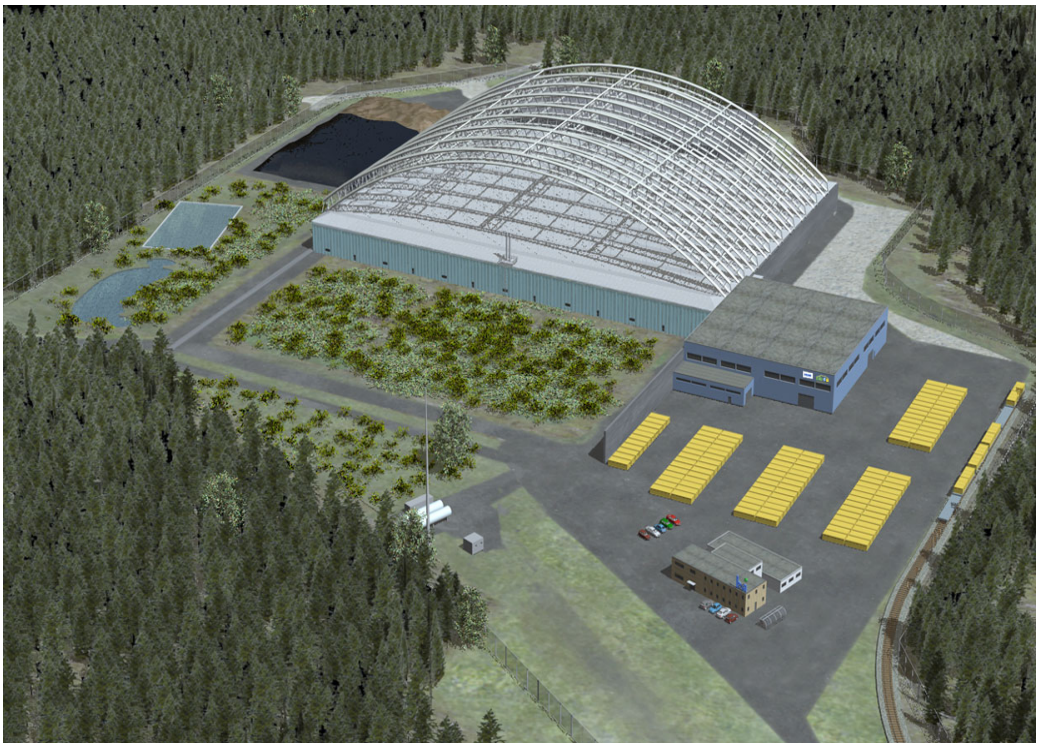
Betriebs-AG

Assainissement définitif de la décharge industrielle de Bonfol

Projet de construction



Synthèse des réponses aux exigences E1

Commentaires sur les exigences E2

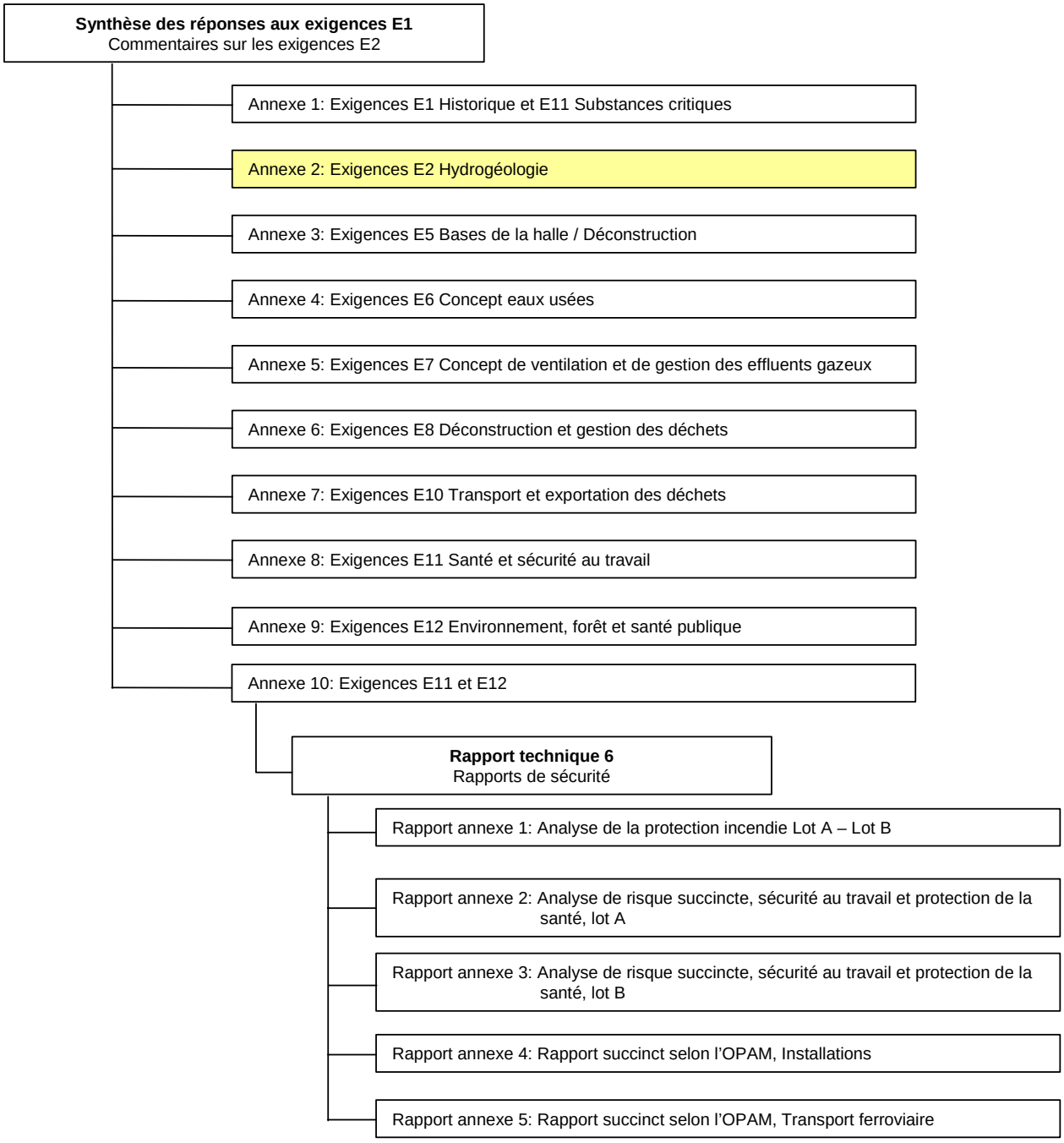
Annexe 2 :

Exigences E2 Hydrogéologie

15 novembre 2006

Indication pour le lecteur:

Le graphique présenté ci-dessous a été établi afin de clarifier la structure du dossier « Synthèse des réponses aux exigences E1 / Commentaires sur les exigences E2 ». Le présent rapport est indiqué en couleur dans le graphique.



Betriebs-AG

Assainissement définitif de la décharge industrielle de Bonfol

Compléments selon exigences de la prise de position OEPN du 08.09.04

2. Géologie et hydrogéologie

2.1 Hydrodynamisme de la Formation des Argiles bigarrées de Bonfol

2.2 Hydrodynamisme de la Formation des Argiles bigarrées de Bonfol

2.3 Hydrodynamisme des cailloutis de Sundgau

2.4 Hydrodynamisme de la Série des Vosges

2.5 Modélisation des écoulements

2.6 Barrières hydrauliques, vérification de leur efficacité

2.7 Surveillance des eaux souterraines

2.8 Barrières hydrauliques, augmentation de leur efficacité

Introduction

Le présent document répond aux exigences E1 et E2 selon la prise de position OEPN du 08.09.04 pour les domaines

2. Hydrogéologie

2.1 Hydrodynamisme de la Formation des Argiles bigarrées de Bonfol

2.2 Hydrodynamisme de la Formation des Argiles bigarrées de Bonfol

2.3 Hydrodynamisme des cailloutis du Sundgau

2.4 Hydrodynamisme de la Série des Vosges

2.5 Modélisation des écoulements

2.6 Barrières hydrauliques, vérification de leur efficacité.

2.7 Surveillance des eaux souterraines

2.8 Barrières hydrauliques, augmentation de leur efficacité

L'élaboration de ce document s'est faite en collaboration avec les autorités cantonales, selon les règles fixées dans l'accord particulier N° 1 concernant les modalités de collaboration ainsi que les procédures de planification et d'autorisation de construire liées au projet d'assainissement définitif de la décharge industrielle de Bonfol.

Cette collaboration se fait également en application de l'article 23 OSites ainsi que de l'Aide à l'exécution de l'OFEV "Sites contaminés, Instruments de coopération pour la gestion des sites contaminés" (2000). La collaboration doit se faire dans le respect des rôles de chacune des Parties, c'est-à-dire d'une part, le rôle de la personne chargée de l'assainissement (la BCI) et, d'autre part, le rôle de suivi et de contrôle de l'autorité compétente (la RCJU). Pour respecter ces objectifs, les règles de collaboration suivantes ont été mises en place:

a) La collaboration se fait principalement sous forme de séances de travail.

b) Avant chacune de ces séances de travail, les Parties conviennent de la date de la séance, des participants et des documents à livrer en vue de la préparation de ladite séance. Les documents devront être transmis par les Parties au moins une semaine à l'avance.

c) Les décisions prises dans les séances doivent être validées par un procès-verbal signé par les Parties. Pour le cas où une décision ne pourrait être prise au cours d'une séance, les participants en motivent les raisons et conviennent de la suite de la procédure.

Par souci de transparence, l'ensemble des documents ainsi que des procès verbaux de séance sont fournis dans ce dossier. Les informations principales qui en découlent peuvent être résumées sous la forme suivante:

2.1 Hydrodynamisme de la Formation des Argiles bigarrées de Bonfol

Les différences relevées entre les perméabilités attribuées aux lentilles sablo-limoneuses et sableuses de la Formation des Argiles bigarrées de Bonfol et celles qui sont reportées dans la littérature pour des lithologies similaires doivent être expliquées.

Les différences relevées entre les perméabilités attribuées aux lentilles sablo-limoneuses et sableuses de la Formation des Argiles bigarrées de Bonfol et celles qui sont reportées dans la littérature pour des lithologies similaires sont plausibles. Le terme de "bien trié" qui a été utilisé dans le projet d'assainissement 2003 n'est en fait pas correct. La fraction fine est suffisamment importante pour colmater les vides entre les grains et conférer de faibles perméabilités à ces sables.

Un scénario plausible de recharge de l'aquifère des cailloutis du Sundgau indique, calculs simples à l'appui, qu'il n'est pas nécessaire de disposer d'une zone d'infiltration précise à forte perméabilité, pour expliquer les débits qui transitent dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau. Une perméabilité moyenne à l'infiltration de 3.6 à $5.7 \cdot 10^{-9}$ m/s permet d'expliquer le débit drainé par l'aquifère des cailloutis du Sundgau.

Entre 700 et 900 m au sud est de la décharge, la présence d'un dôme piézométrique est présentée dans les cartes de bci. Ce dôme dessiné uniquement sur la base du potentiel mesuré au début de 1992 au piézomètre SP41 (situé 800 m à l'est de la décharge et actuellement détruit), marque la ligne de partage des eaux dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau entre le bassin versant de la Largue (sources des affluents de la Largue) et l'aquifère passant sous la DIB.

2.2 Hydrodynamisme de la Formation des Argiles bigarrées de Bonfol

Les connaissances sur l'extension, le volume et la connectivité des zones sableuses en fonction des nouvelles informations acquises devront être constamment tenues à jour.

Cette exigence sera suivie durant tous le processus d'assainissement.

2.3 Hydrodynamisme des cailloutis du Sundgau

Le nivellement du réseau de piézomètres existant devra être effectué afin de contrôler les niveaux piézométriques. Les écoulements seront ensuite réévalués si nécessaire.

Le réseau de surveillance sera réévalué avec l'OEPN et, si nécessaire, complété, notamment à l'E et au SE.

Un nivellement en juin 2004 de l'ensemble des points de mesures importants dans la région de la DIB a été réalisé suite à la mise en place au début de 2004 de nouveaux points de référence géométriques par le géomètre officiel. Sur cette base, les cotes des repères sur les tubes piézométriques ont quelque peu changé. Une carte des équipotentielles dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau a été effectuée sur la base de ces nouveaux nivellements et transmise à l'OEPN.

Cette carte montre pour la date du 3 novembre 2004, les niveaux piézométriques de l'aquifère des cailloutis du Sundgau, extrapolés sur la base des anciennes et des nouvelles données topographiques. Des petites différences sont observées mais elles ne remettent pas en cause l'image globale de la piézométrie de l'aquifère et des directions d'écoulement des eaux souterraines. Les conclusions tirées sur la base des anciennes cartes piézométriques restent valables.

Il n'y a donc pas lieu de modifier le réseau de surveillance sur la base de cette nouvelle mensuration.

Le réseau de surveillance a été réévalué avec l'OEPN et ses experts. 4 nouveaux forages SG ont été mis en place en septembre-octobre 2006 suite aux recommandations tirées de la modélisation mathématique.

2.4 Hydrodynamisme de la Série des Vosges

Des piézomètres devront être posés dans la série des Vosges dans le but d'augmenter les connaissances sur les écoulements. Une coordination entre la bci, l'OEPN et le BRGM devra être engagée pour le positionnement des forages.

Les autorités ont défini l'emplacement de trois forages. Suite à la mise en place des trois nouveaux forages dans la série des Vosges en septembre-octobre 2006, un premier prélèvement d'eau y a été réalisé. Dans les forages VG64 et VG65, les résultats d'analyses (type CSS) ne montrent la présence d'aucune des substances recherchées. Des traces de HHV ont été mises en évidence dans le forage VG46, dans une lentille sableuse de la partie sommitale de la Série des Vosges. Ces forages ont dès à présent été intégrés au programme de la grande campagne de surveillance qui a lieu fin octobre 2006. Les résultats d'analyses ne sont pas encore connus à la date de rédaction du présent document.

2.5 Modélisation des écoulements

L'utilisation d'un modèle performant est indispensable pour la génération de maillages et de conditions limites adéquates et pour retracer les aspects transitoires, tridimensionnels et variablement saturés des écoulements.

Les conditions-limites, telles que les hypothèses, les données, la paramétrisation des variables utilisées, doivent être confirmées pour la quantification des écoulements locaux et régionaux de la DIB, le dimensionnement et la localisation des forages d'interception.

La modélisation de sources de pollution sous la DIB sera faite afin d'apporter des connaissances: sur les effets de dilution et de dispersion des cailloutis du Sundgau, sur la taille du panache étendu en aval, pour l'interprétation des concentrations mesurées sur le terrain.

L'effet hydraulique des failles et des fractures sur les écoulements régionaux devra être pris en compte.

Les experts et représentants du canton ont conclu que l'on peut se contenter de modéliser les écoulements horizontaux dans les cailloutis du Sundgau avec comme avantage d'augmenter le niveau de détail. En effet, les zones perméables de la série des Vosges situées au nord et à l'ouest de la décharge, n'ont qu'une influence négligeable sur les écoulements dans les cailloutis du Sundgau dans le secteur de la

décharge. Etant donné l'utilisation d'un modèle local, les aspects tridimensionnels, génération des maillages et variablement saturé ne sont pas déterminants pour la modélisation envisagée. Le logiciel utilisé devra par contre permettre de modéliser les fluctuations de la nappe libre sous l'effet des pompages.

Il a été décidé avec les experts du canton de faire la mise à jour de la modélisation à l'aide des données provenant des forages et des essais de pompage réalisés après la modélisation de 2002, d'étendre la surface modélisée vers l'amont pour intégrer dans le modèle la zone de dôme piézométrique situé au sud-est de la décharge, de simuler l'alimentation du bassin versant plutôt qu'une limite de potentiel à l'amont du modèle et de déplacer la limite de potentiel aval le plus en aval possible.

Suite aux précisions concernant le modèle utilisé (Modflow), les experts et les représentants du Canton arrivent à la conclusion que l'on peut utiliser ce modèle. Une première version du modèle a été présentée et discutée en séances à l'OEPN le 19.09.2005 et le 09.11.2005. Un complément concernant les paramètres de dispersivité a été présenté. Enfin, une adaptation du modèle mathématique a été réalisée suite au calage de ce dernier sur les données de l'essai de pompage simultané, réalisé en février et mars 2006. L'ensemble de ces données sont consignées dans un rapport de synthèse. Le modèle présenté dans le rapport de synthèse permet de simuler l'hydrodynamisme et le transport dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau de la région de la DIB. Il est calé sur les données hydrologiques et de transport à disposition. Il peut être utilisé pour la simulation de contaminations potentielles des eaux de l'aquifère des cailloutis du Sundgau dans la région de la DIB, ainsi que leur assainissement par voie hydraulique. Plusieurs scénarios de contamination potentielle de l'aquifère durant les travaux d'assainissement, sont présentés dans ce rapport avec les résultats de calculs montrant comment les panaches contaminés résultant de ces scénarios, peuvent être interceptés par pompage dans les forages SG.

La nécessité de prendre en compte l'effet hydraulique des failles et des fractures sur les écoulements régionaux est liée aux différents points précités. Les failles et fractures n'ont pas d'influence significative sur les écoulements souterrains dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau à modéliser dans le secteur de la DIB. Seule la zone de fracture de direction globale N-20, passant au droit des installations de la STEP de la décharge, est prise en compte dans le modèle. Elle forme la limite nord ouest du modèle, au-delà de laquelle, les eaux souterraines quittent l'aquifère des cailloutis du Sundgau.

2.6 Barrières hydrauliques, vérification de leur efficacité.

Afin de vérifier l'efficacité des barrières hydrauliques, les éléments suivants devront impérativement être vérifiés et confirmés par des essais in situ:

a. les débits pouvant être réellement prélevés dans les forages

b. la constance des débits sur une longue durée

c. les distances de rabattement

d. l'homogénéité de l'aquifère du Sundgau.

Les débits qu'il est possible de pomper dans chaque forage SG ont été testés lors des divers essais de pompage réalisés dans la presque totalité des forages SG entre

2000 et 2004. Un nouvel essai de pompage simultané de 98 m3/ jour au total, durant 14 jours, dans 5 forages, a été réalisé en février – mars 2006. Il a permis de mieux fixer les classes de perméabilité du modèle mathématique et de définir par simulation mathématique le débit qu'il est possible de pomper de manière réaliste de l'aquifère des cailloutis du Sundgau à l'aval de la DIB, soit au total 145 m3/jour dans 6 forages simultanément. Avec un tel débit, on capte selon la simulation des écoulements souterrains, 99% des lignes d'écoulement passant sous la DIB. En fonction de l'hétérogénéité du milieu et de la qualité des données hydrogéologiques, ce débit est réaliste pour un pompage sur une longue durée avec une marge d'erreur inférieure à ±10%. Les 4 nouveaux forages implantés dans les Cailloutis du Sundgau feront l'objet de nouveaux essais de pompages afin de tester les débits pouvant être pompés sur une longue période.

2.7 Surveillance des eaux souterraines

L'état initial devra être présenté dans la notice d'impact.

Un plan d'échantillonnage et les méthodes analytiques utilisées durant et après les travaux d'assainissement doivent être développés dans le but de contrôler les eaux souterraines.

Les seuils d'intervention pour la mise en fonction des barrières hydrauliques devront être précisés.

Le réseau de surveillance doit être optimisé afin de contrôler les fuites potentielles des lentilles sableuses et de la décharge lors des travaux.

L'état initial des eaux souterraines, est présenté de manière synthétique dans la NIE. L'information provient des nombreuses études réalisées depuis plusieurs années pour la compréhension du milieu souterrain et de l'eau qu'il contient.

Un plan d'échantillonnage et le réseau de surveillance des eaux souterraines ainsi que les seuils d'intervention pour la mise en fonction des barrières hydrauliques durant les travaux de préparation et d'assainissement, sont présentés dans la NIE. Sur cette base et en tenant compte des 7 nouveaux forages récemment réalisés, le CSS (concept de surveillance et de sécurité) sera adapté pour la phase chantier puis pour la phase assainissement. En ce qui concerne la surveillance de l'environnement après les travaux d'assainissement, le CSS sera adapté en temps voulu, à la fin des travaux d'assainissement.

2.8 Barrières hydrauliques, augmentation de leur efficacité

Les panneaux d'interception dans les cailloutis du Sundgau devront être prolongés et densifiés.

Ce point est présenté dans l'exigence 2.5. La réalisation de 4 nouveaux forages dans les Cailloutis du Sundgau répond à cette exigence.

Résumé du dossier de remise des compléments

E2.1	Type de demande **: E1**	**Hydrogéologie**

Hydrodynamisme de la Formation des Argiles bigarrées de Bonfol

Exigences (cf. prise de position de l'OEPN du 08.09.04) :

Les différences relevées entre les perméabilités attribuées aux lentilles sablo-limoneuses et sableuses de la Formation des Argiles bigarrées de Bonfol et celles qui sont reportées dans la littérature pour des lithologies similaires doivent être expliquées. Quatre compléments concernant les incertitudes sur la perméabilité des argiles de Bonfol et l'alimentation de l'aquifère des cailloutis du Sundgau, sont demandés :

1. *Utilisation du terme « bien trié » pour des sables ayant une faible perméabilité*
2. *Rapport entre perméabilités horizontale et verticale indiquées dans l'annexe 6 du rapport N° 4 du projet d'assainissement OSites*
3. *Présenter un scénario plausible de recharge de l'aquifère des cailloutis du Sundgau*
4. *Vérifier la valeur des niveaux dans l'annexe 3.10 du rapport 6.1 du projet d'assainissement OSites*

Informations et réponses fournies (selon numérotation ci-dessus) :	
Document initial concernant les exigences 2.1, 2.3, 2.4, 2.5	Annexe 2.1.1
Note complémentaire concernant les exigences 2.1 et 2.3	Annexe 2.1.2
1. Le terme de "bien trié" n'est pas correct car la courbe granulométrique, s'aplatit très nettement vers la gauche dans la partie fine des sables et dans les fractions limoneuses et argileuses. La fraction fine est suffisamment importante pour colmater les vides entre les grains et conférer de faibles perméabilités à ces sables. Les perméabilités mentionnées (Figure 2 et annexe 6 du rapport N° 4 du projet d'assainissement) sont donc plausibles.	Annexe 2.1.1 Annexe 2.1.2
2. L'explication des différences entre « V » et « H » est donnée par rapport à l'orientation de la mesure à l'oedomètre. La mesure « H » à l'oedomètre se fait dans le plan horizontal et correspond de ce fait à une perméabilité verticale et vice versa, d'où la confusion.	Annexe 2.1.2
3. La note indique, calculs simples à l'appui, qu'il n'est pas nécessaire de disposer d'une zone d'infiltration précise à forte perméabilité, pour expliquer les débits qui transitent dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau. Une perméabilité moyenne à l'infiltration de 3.6 et $5.7 \bullet 10^{-9}$ m/s permet d'expliquer le débit drainé par l'aquifère des cailloutis du Sundgau.	Annexe 2.1.1 Annexe 2.1.2
4. Entre 700 et 900 m à l'Est de la décharge, la carte de l'annexe 3.10 du rapport N° 6.1 du projet d'assainissement indique la présence d'un dôme piézométrique. Ce dôme dessiné uniquement sur la base du potentiel mesuré au début de 1992 au piézomètre SP41 (situé 800 m à l'est de la décharge et actuellement détruit), marque la ligne de partage des eaux dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau entre le bassin versant de la Largue (sources des affluents de la Largue) et l'aquifère passant sous la DIB.	Annexe 2.1.2

Position OEPN sur informations et réponses fournies et éléments à prendre en compte dans le projet:	
L'OEPN a accepté les éléments fournis pour les réponses aux divers points relatifs à la demande, tout en insistant sur le fait qu'ils devaient être repris dans les bases du modèle mathématique de simulation des écoulements et du transport dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau.	PV 08.03.05 **COUVA_2** (16.10.06)

E2.2	Type de demande **: E2**	**Hydrogéologie**
Hydrodynamisme de la Formation des Argiles bigarrées de Bonfol		
Exigences (cf. prise de position de l'OEPN du 08.09.04) :		
Les connaissances sur l'extension, le volume et la connectivité des zones sableuses en fonction des nouvelles informations acquises devront être constamment tenues à jour.		
Informations et réponses fournies (selon numérotation ci-dessus) :		
Cette exigence sera suivie durant tous le processus d'assainissement.		
Position OEPN sur informations et réponses fournies et éléments à prendre en compte dans le projet:		

E2.3	Type de demande **: E1**	**Hydrogéologie**

Hydrodynamisme des cailloutis du Sundgau

Exigences (cf. prise de position de l'OEPN du 08.09.04) :

1. *Le nivellement du réseau de piézomètres existant devra être effectué afin de contrôler les niveaux piézométriques. Les écoulements seront ensuite réévalués si nécessaire.*
2. *Le réseau de surveillance sera réévalué avec l'OEPN et, si nécessaire, complété, notamment à l'E et au SE*

Informations et réponses fournies (selon numérotation ci-dessus) :	
Document initial concernant les exigences 2.1, 2.3, 2.4, 2.5	Annexe 2.1.1
Note complémentaire concernant les exigences 2.1 et 2.3	Annexe 2.1.2
Note complémentaire concernant la dispersivité	Annexe 2.5.2
Rapport complémentaire présentant l'adaptation du modèle mathématique suite à l'essai de pompage multiple de février et mars 2006	Annexe 2.5.3
Rapport de modélisation mathématique des écoulements souterrains dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau	Annexe 2.5.1
Carte des équipotentielles dans les cailloutis du Sundgau	Annexe 2.1.2 (carte en annexe)
Mise en place de nouveaux points de surveillance des eaux souterraines : Note concernant la situation et la description des forages prévus du 4 août 2006 et réponse de l'OEPN du 16 août 2006.	Annexe 2.3.1
1. Un nivellement en juin 2004 de l'ensemble des points de mesures importants dans la région de la DIB a été réalisé suite à la mise en place au début de 2004 de nouveaux points de référence géométriques par le géomètre officiel. Sur cette base, les cotes des repères sur les tubes piézométriques ont quelque peu changé (cf. rapport annuel 2003). Une carte des équipotentielles dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau a été effectuée sur la base de ces nouveaux nivellements et transmise à l'OEPN. Cette carte montre pour la date du 3 novembre 2004, les niveaux piézométriques de l'aquifère des cailloutis du Sundgau, extrapolés sur la base des anciennes et des nouvelles données topographiques. Des petites différences sont observées mais elles ne remettent pas en cause l'image globale de la piézométrie de l'aquifère et des directions d'écoulement des eaux souterraines. Les conclusions tirées sur la base des anciennes cartes piézométriques restent valables.	Annexe 2.1.1 Rapport annuel 2003 Annexe 2.1.2 (carte en annexe)
1. La simulation mathématique des écoulements souterrains dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau montre qu'en cas de fuite grave d'eau polluée depuis le secteur de la DIB jusque dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau, le réseau actuel complété de deux forages SG60 (à l'E-NE de SG20) et SG61 (entre SG19 et SG44), permet de capter l'ensemble des lignes d'écoulement	Annexe 2.5.1

passant sous la DIB. Elle permet également de vérifier la qualité d'une intervention en cas de pollution grave et de définir ainsi le programme de surveillance adéquat. 4 nouveaux forages ont été réalisés dans les cailloutis du Sundgau : Note concernant la situation et la description des forages prévus du 4 août 2006 et réponse de l'OEPN du 16 août 2006.	Annexe 2.3.1
Position OEPN sur informations et réponses fournies et éléments à prendre en compte dans le projet:	
1. Carte piézométrique et conclusions OK	PV 08.03.2005
2. L'exigence a été validée au cours de la séance N° 7 du 09.11.2005, sur la base des éléments fournis dans le rapport de modélisation mathématique.	PV 09.11.2005
L'OEPN a accepté les éléments fournis pour les réponses aux deux points relatifs à la demande. Dans un courrier transmis à la bci le 16 août 2006, en réponse à une note bci du 4 août 2006 et au rapport de modélisation du 28 juin 2006 (annexe 2.5.1), il a validé les implantations de 4 nouveaux piézomètres dans les Cailloutis du Sundgau pour y assurer le contrôle des écoulements souterrains. A ce stade, il a été admis que la vérification du modèle mathématique de simulation des écoulements et du transport dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau devait encore être réalisée par des essais de pompage (exigence E2, n° 2.6)	**COUVA_2** (16.10.06)

E2.4	Type de demande **: E1**	**Hydrogéologie**
Hydrodynamisme de la série des Vosges		
Exigences (cf. prise de position de l'OEPN du 08.09.04) :		
Des piézomètres devront être posés dans la série des Vosges dans le but d'augmenter les connaissances sur les écoulements. Une coordination entre la bci, l'OEPN et le BRGM devra être engagée pour le positionnement des forages.		
Informations et réponses fournies (selon numérotation ci-dessus) :		
Document initial concernant les exigences 2.1, 2.3, 2.4, 2.5 Rapport sur l'hydrogéologie de la série des Vosges Rapport d'essai de pompage au forage VG53 Emplacement de trois nouveaux forages dans la série des Vosges		Annexe 2.1.1 Annexe 2.4.1 Annexe 2.4.2 Annexe 2.4.3 Annexe 2.3.1
Le rapport complémentaire (Annexe 2.4.1) a été présenté par bci à l'OEPN le 8 mars 2005 et discuté à la séance du 25 mai 2005. Il apporte des compléments concernant l'hydrogéologie de la série des Vosges, suite aux séances du 03.02.05 et du 09.02.05 (informelle), durant lesquelles l'hydrogéologie de la région de la DIB et de la série des Vosges a été expliquée par bci aux experts de l'OEPN. Par ailleurs, en accord avec l'OEPN (PV 25.05.05), un essai de pompage a été réalisé dans le corps sableux découvert dans la série des Vosges au forage VG53 (Annexe 2.4.2). Il indique que ce corps sableux recoupé par VG53 est d'assez grandes dimensions (supérieure à 30 - 50 m de diamètre), et qu'il possède une perméabilité relativement élevée pour des sables, à savoir 6.0E-5 m/s. Les résultats des analyses indiquent que l'eau du corps sableux de VG53 n'est pas polluée.		Annexe 2.1.1 Annexe 2.4.1 Annexe 2.4.2
Les autorités ont défini l'emplacement de trois nouveaux forages. Ces trois nouveaux forages dans la série des Vosges ont été réalisés en septembre-octobre 2006.		Annexe 2.4.3 Annexe 2.3.1
Position OEPN sur informations et réponses fournies et éléments à prendre en compte dans le projet:		
L'OEPN a validé la présente exigence, avec l'accord du BRGM (lettre du 14 juin 2006). Sur la base de la note bci du 4 août 2006, l'OEPN a ensuite validé les implantions exactes des piézomètres, qui ont été réalisés en automne 2006. L'OEPN demande que ces 3 points soient bien évidemment intégrés dans le programme CSS actuellement en vigueur.		**COUVA_2** (16.10.06)

E2.5	Type de demande **: E1**	**Hydrogéologie**

Modélisation des écoulements

Exigences (cf. prise de position de l'OEPN du 08.09.04) :

1. *L'utilisation d'un modèle performant est indispensable pour la génération de maillages et de conditions limites adéquates et pour retracer les aspects transitoires, tridimensionnels et variablement saturés des écoulements.*
2. *Les conditions-limites, telles que les hypothèses, les données, la paramétrisation des variables utilisées, doivent être confirmées pour la quantification des écoulements locaux et régionaux de la DIB, le dimensionnement et la localisation des forages d'interception.*
3. *La modélisation de sources de pollution sous la DIB sera faite afin d'apporter des connaissances: sur les effets de dilution et de dispersion des cailloutis du Sundgau, sur la taille du panache étendu en aval, pour l'interprétation des concentrations mesurées sur le terrain.*
4. *L'effet hydraulique des failles et des fractures sur les écoulements régionaux devra être pris en compte.*

Informations et réponses fournies (selon numérotation ci-dessus) :	
Document initial concernant les exigences 2.1, 2.3, 2.4, 2.5	Annexe 2.1.1
Note complémentaire concernant la dispersivité	Annexe 2.5.2
Adaptation du modèle suite à l'essai de pompage simultané	Annexe 2.5.3
Scénarios de simulation des écoulements et du transport souterrain	Annexe 2.5.4
Rapport de synthèse de la modélisation mathématique	Annexe 2.5.1
1. Les experts et représentants du canton ont conclu que l'on peut se contenter de modéliser les écoulements horizontaux dans les cailloutis du Sundgau avec comme avantage d'augmenter le niveau de détail. En effet, les zones perméables de la série des Vosges situées au nord et à l'ouest de la décharge, n'ont qu'une influence négligeable sur les écoulements dans les cailloutis du Sundgau dans le secteur de la décharge. Etant donné l'utilisation d'un modèle local, les aspexts tridimentionnels, génération des maillages et variablement saturé ne sont pas déterminants pour la modélisation envisagée. Le logiciel utilisé devra par contre permettre de modéliser les fluctuation de la nappe libre sous l'effet des pompages.	Annexe 2.1.1 PV 15.12.2004
2. Il a été décidé avec les experts du canton de faire la mise à jour de la modélisation à l'aide des données provenant des forages et des essais de pompage réalisés après la modélisation de 2002, d'étendre la surface modélisée vers l'amont pour intégrer dans le modèle la zone de dôme piézométrique situé au sud-est de la décharge, de simuler l'alimentation du bassin versant plutôt qu'une limite de potentiel à l'amont du modèle et de déplacer la limite de potentiel aval, le plus en aval possible.	Annexe 2.1.1 PV 15.12.2004
3. Plusieurs séances ont eu lieu au sujet de la modélisation mathématique des eaux souterraines, portant sur le type de logiciel et le bassin versant à modéliser (PV 10.12.2004), le milieu aquifère à simuler ainsi que le type, les limites et les	

objectifs du modèle (PV 15.12.2004), la présentation des résultats provisoires de la modélisation (PV : 27.06.2005, 19.09.2005, 09.11.2005, 24.04.2006). Au cours de ces séances, des discussions constructives avec les experts du canton ont eu lieu et plusieurs informations complémentaires ont été demandées. Une première version du modèle (Annexe 2.5.1) a été présentée et discutée en séances à l'OEPN le 19.09.2005 et le 09.11.2005 (voir PV correspondant). Un complément concernant les paramètres de dispersivité a été présenté dans la note complémentaire (Annexe 2.5.2). Enfin, une adaptation du modèle mathématique a été réalisée suite au calage de ce dernier sur les données de l'essai de pompage simultané, réalisé en février et mars 2006 (annexe 2.5.3). L'ensemble de ces données sont consignées dans le rapport de synthèse (Annexe 2.5.1) et la note complémentaire (Annexe 2.5.2). Le modèle présenté au rapport de synthèse (Annexe 2.5.1) permet de simuler l'hydrodynamisme et le transport dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau de la région de la DIB. Il est calé sur les données hydrologiques et de transport à disposition. Il peut être utilisé pour la simulation de contaminations potentielles des eaux de l'aquifère des cailloutis du Sundgau dans la région de la DIB, ainsi que leur assainissement par voie hydraulique. Plusieurs scénarios de contamination potentielle de l'aquifère durant les travaux d'assainissement, sont présentés dans ce rapport (Annexe 2.5.1) avec les résultats de calculs montrant comment les panaches contaminés résultant de ces scénarios, peuvent être interceptés par pompage dans les forages SG. Une note du 19.05.2006 (Annexe 2.5.4) présente les scénarios de contamination potentielle qui sont présentés dans le rapport de synthèse (Annexe 2.5.1).	Annexe 2.5.1 Annexe 2.5.2 Annexe 2.5.3 Annexe 2.5.1 Annexe 2.5.4
4. Les failles et fractures n'ont pas d'influence significative sur les écoulements souterrains dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau à modéliser dans le secteur de la DIB. Seule la zone de fracture de direction globale N-20, passant au droit des installations de la STEP de la décharge, est prise en compte dans le modèle. Elle forme la limite nordouest du modèle, au-delà de laquelle, les eaux souterraines quittent l'aquifère des cailloutis du Sundgau.	Annexe 2.5.1
Position OEPN sur informations et réponses fournies et éléments à prendre en compte dans le projet:	
L'OEPN a validé la présente exigence. A ce stade, il a été admis que la vérification du modèle mathématique de simulation des écoulements et du transport dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau devait encore être réalisée par des essais de pompage (exigence E2, n° 2.6).	PV 15.12.04 PV 19.09.05 PV 09.11.05 PV 24.04.06 **COUVA_2** (16.10.06)

E2.6	Type de demande **: E2**	**Hydrogéologie**
Barrières hydrauliques, vérification de leur efficacité		
Exigences (cf. prise de position de l'OEPN du 08.09.04) :		
1. Afin de vérifier l'efficacité des barrières hydrauliques, les éléments suivants devront impérativement être vérifiés et confirmés par des essais in situ: *a. les débits pouvant être réellement prélevés dans les forages* *b. la constance des débits sur une longue durée* *c. les distances de rabattement* *d. l'homogénéité de l'aquifère du Sundgau.*		
Informations et réponses fournies (selon numérotation ci-dessus) :		
Note complémentaire concernant la dispersivité		Annexe 2.5.2
Adaptation du modèle suite à l'essai de pompage simultané		Annexe 2.5.3
Rapport de synthèse de la modélisation mathématique		Annexe 2.5.1
1. Les débits qu'il est possible de pomper dans chaque forage SG ont été testés lors des divers essais de pompage réalisés dans la presque totalité des forages SG entre 2000 et 2004 (cf. rapport N° 4 du projet d'assainissement et rapports techniques annuels de la DIB). Un nouvel essai de pompage simultané de 98 m^3/ jours au total, durant 14 jours, dans 5 forages, a été réalisé en février – mars 2006 (cf. Annexe 2.5.1). Il a permis de mieux fixer les classes de perméabilité du modèle mathématique et définir par simulation mathématique, le débit qu'il est possible de pomper de manière réaliste de l'aquifère des cailloutis du Sundgau à l'aval de la DIB, soit au total 145 m^3/jour dans 6 forages simultanément. Avec un tel débit, on capte selon la simulation des écoulements souterrains, le 99% des lignes d'écoulement passant sous la DIB (Annexe 2.5.1). En fonction de l'hétérogénéité du milieu et de la qualité des données hydrogéologiques, ce débit est réaliste pour un pompage sur une longue durée avec une marge d'erreur inférieure à ±10%. Les rabattements relatifs et les zones de capture en cours de pompage sont présentés dans le rapport de synthèse (Annexe 2.5.1). Les 4 nouveaux forages implantés dans les Cailloutis du Sundgau feront l'objet de nouveaux essais de pompages afin de tester les débits pouvant être pompés sur une longue période.		Annexe 2.5.1
Position OEPN sur informations et réponses fournies et éléments à prendre en compte dans le projet:		
Les installations de traitement de l'eau souterraine doivent être dimensionnées pour accepter un maximum de 160 m^3/jour (145 + 10%) d'eau souterraine polluée en cas de contamination grave et à large échelle des eaux souterraines sous la DIB.		Annexe 2.5.1

E2.7	Type de demande **: E2**	**Hydrogéologie**
Surveillance des eaux souterraines		
Exigences (cf. prise de position de l'OEPN du 08.09.04) :		
1. L'état initial devra être présenté dans la notice d'impact. *2. Un plan d'échantillonnage et les méthodes analytiques utilisées durant et après les travaux d'assainissement doivent être développés dans le but de contrôler les eaux souterraines.* *3 Les seuils d'intervention pour la mise en fonction des barrières hydrauliques devront être précisés.* *4 Le réseau de surveillance doit être optimisé afin de contrôler les fuites potentielles des lentilles sableuses et de la décharge lors des travaux.*		
Informations et réponses fournies (selon numérotation ci-dessus) :		
Concept de surveillance et sécurité (CSS) avant l'assainissement : version du 30.08.2005 approuvée par l'OEPN le 08.09.2005		CSS
1. L'état initial des eaux souterraines, est présenté de manière synthétique dans la NIE. L'information provient des nombreuses études réalisées depuis plusieurs années pour la compréhension du milieu souterrain et de l'eau qu'il contient.		notice d'impact sur l'environnement
2.-4. Un plan d'échantillonnage et le réseau de surveillance des eaux souterraines ainsi que les seuils d'intervention pour la mise en fonction des barrières hydrauliques durant les travaux de préparation et d'assainissement, sont présentés dans la NIE. Sur cette base et en tenant compte des 7 nouveaux forages récemment réalisés, le CSS (concept de surveillance et de sécurité) sera adapté pour la phase chantier puis pour la phase assainissement. En ce qui concerne la surveillance de l'environnement après les travaux d'assainissement, le CSS sera adapté en temps voulu, à la fin des travaux d'assainissement.		notice d'impact sur l'environnement
Position OEPN sur informations et réponses fournies et éléments à prendre en compte dans le projet:		
1.-4. L'ensemble des éléments qui concernent la phase chantier et la phase assainissement sont présentés dans la NIE et seront repris en détail dans les versions du CSS adaptées à ces 2 phases. La surveillance de l'environnement se fera alors en fonction des prescriptions de ces versions adaptées du CSS.		

E2.8	Type de demande **: E2**	**Hydrogéologie**
Barrières hydrauliques, augmentation de leur efficacité Exigence E2		
Exigences (cf. prise de position de l'OEPN du 08.09.04) :		
1. Les panneaux d'interception dans les cailloutis du Sundgau devront être prolongés et densifiés.		
Informations et réponses fournies (selon numérotation ci-dessus) :		
Ce point est présenté dans l'exigence 2.5. La réalisation de 4 nouveaux forages dans les Cailloutis du Sundgau répond à cette exigence.		
Position OEPN sur informations et réponses fournies et éléments à prendre en compte dans le projet:		

Informations et réponses fournies

Betriebs-AG

Assainissement définitif de la décharge industrielle de Bonfol

Compléments selon exigences de la prise de position OEPN du 08.09.04

2. Géologie et hydrogéologie

2.1 Hydrodynamisme de la Formation des Argiles Bigarrées de Bonfol

2.3 Hydrodynamisme des cailloutis de Sundgau

2.4 Hydrodynamisme de la Série des Vosges

2.5 Modélisation des écoulements

Annexe 2.1.1 (document initial)

IG DIB

Projet d'assainissement définitif de la décharge industrielle de Bonfol DIB
Demandes des autorités jurassiennes
concernant la géologie et l'hydrogéologie de la DIB (demandes 2.1, 2.3, 2.4, 2.5)

Les aspects touchant à la géologie et à l'hydrogéologie de la décharge ont été établis sur la base des documents [1] à [7]. Les éléments pertinents sont résumés dans le rapport annexe N° 4 [8] au projet d'assainissement et sont repris dans le rapport principal, chapitre 4.2, du projet d'assainissement.

Ces connaissances forment une des bases pour l'évaluation des risques [9] et la définition des objectifs d'assainissement [10]. L'acquisition de nouvelles données ne se justifie que lorsque les informations disponibles ne sont pas suffisantes pour l'évaluation des risques avant, pendant et après l'assainissement.

Ci-dessous un bref commentaire est donné concernant les demandes du canton citées en titre et publiées dans le document 'prise de position, version 15-9-04'. Le texte de ces demandes est répété en italique.

2.1 HYDRODYNAMISME DE LA FORMATION DES ARGILES BIGARREES DE BONFOL

Les différences relevées entre les perméabilités attribuées aux lentilles sablo-limoneuses et sableuses de la Formation des Argiles bigarrées de Bonfol et celles qui sont reportées dans la littérature pour des lithologies similaires doivent être expliquées.

Les perméabilités résumées en annexe 6 du rapport annexe 'Géologie et hydrogéologie' [8] ont été obtenues par essais en laboratoire sur des échantillons non remaniés. La plupart des sables, déposés dans des environnements fluviatiles de plaine inondable ou fluvio-lacustres ont une granulométrie très large. Les divers taux d'argiles et de limons qu'ils contiennent font que leur perméabilité peut varier considérablement. Les mesures oedométriques de la perméabilité varient de $2.5*10^{-7}$ $^{m}/_{s}$ à $1*10^{-9}$ $^{m}/_{s}$ pour des échantillons 'sables'.

La norme VSS 670010b par exemple donne des valeurs indicatives de $1*10^{-6}$ $^{m}/_{s}$ à $1*10^{-8}$ $^{m}/_{s}$ pour les sables limono-argileux. En tenant compte du fait que la granulométrie indicative de ladite norme contient moins d'éléments très fins que les échantillons de Bonfol, les perméabilités indiquées dans le rapport [8] correspondent aux valeurs indiquées en littérature.

Afin de tenir compte de la présence éventuelle de zones plus perméables, les bilans d'eau s'exfiltrant de la décharge ont été réalisés en supposant la présence localisée en bordure de la décharge de sables limono-argileux de perméabilité horizontale de 10^{-6} $^{m}/_{s}$ (voir [9], p. 45 et [10], Anhang 2.1). Les valeurs des perméabilités considérées pour l'évaluation des risques et l'établissement des objectifs d'assainissement ont donc été choisies de manière prudente et sont en adéquation aussi bien avec les valeurs mesurées qu'avec celles présentées dans la littérature.

2.3 HYDRODYNAMISME DES CAILLOUTIS DU SUNDGAU

1. *Le nivellement du réseau de piézomètres existant devra être effectué afin de contrôler les niveaux piézométriques. Les écoulements seront ensuite réévalués si nécessaire.*
2. *Le réseau de surveillance sera réévalué avec l'OEPN et, si nécessaire, complété, notamment à l'E et au SE.*

Point 1

Un nouveau nivellement de l'ensemble des piézomètres a été réalisé en juin 2004 sur la base des nouveaux points géodésiques mis en place à la fin 2003. Les données sont publiées dans le rapport annuel 2003 publié le 23 juillet 2004 [11]. Les différences de cotes par rapport aux anciennes valeurs vont pour la plupart dans le même sens avec quelques exceptions. Les différences absolues constatées sont inférieures à 15 cm, avec une exception (-26 cm).

Les cartes piézométriques seront redessinées sur la base de ces nouvelles données. Nous n'attendons pas de changement significatif dans le diagnostic concernant les écoulements souterrains dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau.

Point 2

En 2003, le réseau de surveillance a été complété par quatre forages dans les Cailloutis du Sundgau au N et au NE de la décharge. Nous estimons qu'actuellement le réseau de surveillance peut être considéré comme suffisant. Les terrains au SE de la décharge se trouvent à l'amont hydraulique et ne se prêtent donc pas à la surveillance des exfiltrations éventuelles depuis la décharge.

2.4 HYDRODYNAMISME DE LA SERIE DES VOSGES

Une discussion pour coordination entre la bci, l'OEPN et le BRGM sera engagée sur l'implantation des piézomètres qui devraient être posés dans la série des Vosges.

Dans le périmètre de la décharge, la série des Vosges est un aquitard. Une connexion hydraulique importante depuis les cailloutis du Sundgau vers la série des Vosges n'intervient qu'à l'aval de notre système d'observation des eaux des cailloutis du Sundgau, à des endroits où il serait trop tard pour intervenir en cas de contamination massive des eaux souterraines. C'est pourquoi le dispositif d'observation des eaux souterraines se restreint aux Cailloutis du Sundgau (perméables) dans l'environnement proche de la décharge. Ils drainent les eaux passant sous la décharge et son environnement.

2.5 MODELISATION DES ECOULEMENTS

1. *L'utilisation d'un modèle performant est indispensable pour la génération de maillages et de conditions limites adéquates et pour retracer les aspects transitoires, tridimensionnels et variablement saturés des écoulements.*
2. *Les conditions-limites, telles que les hypothèses, les données, la paramétrisation des variables utilisées, doivent être confirmées pour:*
    a) *la quantification des écoulements locaux et régionaux de la DIB,*
    b) *le dimensionnement et la localisation des forages d'interception.*
3. *La modélisation de sources de pollution sous la DIB sera faite afin d'apporter des connaissances:*
    c) *sur les effets de dilution et de dispersion des Cailloutis du Sundgau,*
    d) *sur la taille du panache étendu en aval,*
    e) *pour l'interprétation des concentrations mesurées sur le terrain.*

4. *L'effet hydraulique des failles et des fractures sur les écoulements régionaux devra être pris en compte.*

Point 1

Le modèle utilisé jusqu'à présent est le logiciel Visual Modflow, avec lequel nous avons obtenus des résultats cohérents avec les mesures in situ. La routine de calcul de ce logiciel a été développée par le gouvernement américain pour des applications officielles. Ce logiciel est encore et toujours développé. Pour des applications courantes d'ingénierie, il permet d'obtenir des résultats stables et fiables en 2-D et 3-D. En alternative, nous avons la possibilité de travailler avec le logiciel Feflow, offrant certaines possibilités techniques supplémentaires, mais qui a notre avis n'apporteraient pas une amélioration significative à la modélisation.

Point 2.a)

Les écoulements **locaux** dans les cailloutis du Sundgau ont été quantifiés par la modélisation effectuée et vérifiés par des essais de pompage. Les résultats de ceux-ci vont nous permettre de compléter et d'affiner le modèle mathématique.

Par contre une modélisation déterministe en 3 dimensions de l'ensemble du site au niveau **régional** demanderait un très grand effort d'acquisition de données et de calculs pour obtenir peu d'information en plus des résultats très cohérents obtenus en se concentrant sur les écoulements dans la série des cailloutis du Sundgau.

En effet, si l'on prend en compte les systèmes d'écoulement du haut en bas, nous constatons qu'on peut avoir des zones non saturées à plusieurs niveaux différents sur une même verticale (base du recouvrement quaternaire, sommet des cailloutis du Sundgau et dans la partie supérieure de chaque corps sableux important de la série des Vosges). Par ailleurs, l'aquifère régional se situe dans le karst, caractérisé par un écoulement dans des milieux fissurés à perméabilités élevées et des échanges lents avec le milieu poreux de l'environnement large de la DIB.

Point 2.b)

Les forages existants permettent d'intercepter les eaux des Cailloutis du Sundgau à l'aval de la décharge. Le dimensionnement s'est fait par une modélisation se basant sur des essais de pompage. Une vérification sera faite par une nouvelle modélisation (voir 3.) et par des essais de pompage simultanés dans les forages d'interception.

Point 3

D'accord. Une mise à jour de la modélisation mathématique du site est prévue, avec l'objectif principal de tester des scénarios de contamination accidentelle lors des travaux d'assainissement :

- Evaluer l'étendue de la contamination éventuelle en fonction de divers scénarios, respectivement définir quelle importance devrait avoir la contamination éventuelle pour tel ou tel impact sur les eaux souterraines.

- Définir les mesures d'intervention (pompage) nécessaires pour éviter le transfert d'une éventuelle contamination au delà des écrans 1, respectivement 2 de forages mis en place.

Cette mise à jour du modèle nous permettra alors de

- modéliser le transport de substances (divers scénarios de contamination de l'aquifère des Cailloutis du Sundgau),
- pronostiquer le comportement de panaches contaminés dans les Cailloutis du Sundgau
- modéliser en transitoire les pompages nécessaires à empêcher l'extension vers l'aval d'une éventuelle contamination dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau.

Point 4

Il n'y a pas d'informations géologiques et hydrauliques fiables dans la région du site concernant des failles et fractures. Une modélisation déterministe ne pourra par conséquent pas être réalisée sur la base des données actuelles. Seul un modèle hydraulique conceptuel pourrait être réalisé à l'échelle régionale, permettant de tester diverses hypothèses.

Par ailleurs, les investigations géologiques et hydrogéologiques ne nous donnent aucune évidence que, dans le périmètre de la surveillance, les Cailloutis du Sundgau seraient déplacés par une faille ou que l'écoulement des eaux des Cailloutis du Sundgau serait influencé par des failles.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Bericht über die Sondermüll-Deponie Bonfol, H. Schmassmann, 1982

[2] Essai de traçage dans la perte du ruisseau des Adevins à Bonfol, CSD, 1982

[3] SMDB, Risikoanalyse Bonfoltone, Band 1, Datensammlung, CSD, 1992

[4] Sondermülldeponie Bonfol - Risikoanalyse Stand 1991, CSD, 1988

[5] DIB, Rapport de synthèse hydrogéologique 2002, CSD, 2002

[6] Carte géologique de Bonfol 1 :25'000, atlas géologique de la Suisse

[7] DIB/SMDB Rapports annuels/Jahresberichte, CSD, 1983 bis 2002

[8] Assainissement définitif de la décharge industrielle de Bonfol, projet d'assainissement selon OSites, rapport annexe 4, "Géologie et hydrogéologie", IG DIB, 2003

[9] Assainissement définitif de la décharge industrielle de Bonfol, projet d'assainissement selon OSites, rapport annexe 6.1 "Chemische Risikobewertung", BMG, 2003

[10] Assainissement définitif de la décharge industrielle de Bonfol, projet d'assainissement selon OSites, rapport annexe 6.2 "Sanierungsziele", IG DIB, 2003

[11] bci Betriebs-AG, Rapport annuel DIB 2003, 23 juillet 2004

Betriebs-AG

Assainissement définitif de la décharge industrielle de Bonfol

Compléments selon exigences de la prise de position OEPN du 08.09.04

2. Géologie et hydrogéologie

2.1 Hydrodynamisme de la Formation des Argiles Bigarrées de Bonfol

2.3 Hydrodynamisme des cailloutis de Sundgau

Annexe 2.1.2

IG DIB

Projet d'assainissement définitif de la décharge industrielle de Bonfol DIB
Note complémentaire suite aux demandes des autorités jurassiennes concernant la géologie et l'hydrogéologie de la DIB (exigences 2.1 et 2.3)

Deux séances du groupe hydrogéologie ont eu lieu le 10 et le 15 décembre 2004 à l'OEPN à St Ursanne en vue de répondre aux exigences 2.1 à 2.5 des autorités jurassiennes, suite à l'évaluation du dossier du projet d'assainissement de la DIB, annexe N°4 [1] d'octobre 2003 (cf. procès verbaux des séances mentionnées).

Exigence 2.1 :

Quatre compléments concernant les incertitudes sur la perméabilité des argiles de Bonfol et l'alimentation de l'aquifère des cailloutis du Sundgau, sont demandés pour fin janvier 2005 :

1. Utilisation du terme « bien trié » pour des sables ayant une faible perméabilité.
2. Rapport entre perméabilités horizontale et verticale indiquées dans l'annexe 6 du rapport N° 4 [1].
3. Présenter un scénario plausible de recharge de l'aquifère des cailloutis du Sundgau.
4. Vérifier la valeur des niveaux dans l'annexe 3.10 du rapport 6.1 [2].

Exigence 2.3 :

Un complément d'information est demandé pour fin janvier 2005 :

1. Elaborer la carte des équipotentielles sur la base des nouveaux nivellements effectués en 2004.

D'autres compléments d'information concernant la modélisation mathématique des écoulements souterrains ainsi qu'un essai de pompage à grande échelle demandent un temps d'élaboration plus grand. Conformément aux PV des séances du 10 et du 15.12.04, les résultats de ces investigations seront donnés en juin prochain, respectivement à la fin 2005.

Compléments d'information concernant l'exigence 2.1 :

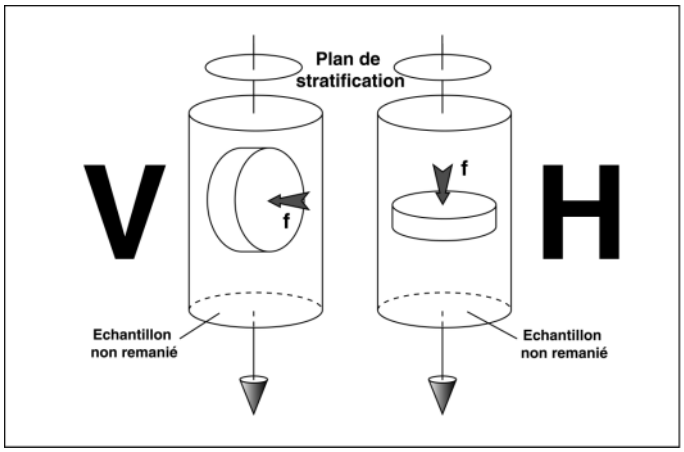
Point 1 :
Utilisation du terme « bien trié » pour des sables ayant une faible perméabilité

En évaluant à nouveau les courbes granulométriques des sables mentionnés, on constate qu'effectivement, la fraction sableuse et graveleuse des 4 échantillons correspond à un pourcentage de 80 à 85 %. Ceci veut dire aussi que la fraction fine est comprise entre 15 et 20 %. La fraction argileuse uniquement s'étend entre 5.5 et 12.4 %. Il ne s'agit donc pas de sables de plage bien triés, car la courbe granulométrique, s'aplatit très nettement vers la gauche dans la partie fine des sables et dans les fractions limoneuses et argileuses. Selon la norme USCS, il s'agit de SM-ML (sables limoneux) et de SM-SC (sables limono-argileux). La fraction fine est suffisamment importante pour colmater les vides entre les grains et conférer

de faibles perméabilités à ces sables. Les perméabilités définies à l'oedomètre (Figure 2 et annexe 6 du rapport 4 [1]) sont donc plausibles. Le terme 'bien trié' n'est donc pas correct. Il a probablement son origine dans une mauvaise traduction de l'allemand 'gut abgestuft'.

Point 2 :
Rapport entre perméabilités horizontale et verticale indiquées dans l'annexe 6 du rapport N° 4 [1].

Dans l'annexe 6 du rapport 4, les indications « V », respectivement « H » n'indiquent pas la direction de la perméabilité, mais le sens dans lequel est posé l'anneau de mesure oedométrique dans l'espace par rapport à l'échantillon mesuré (cf. figure ci-dessous). L'indication est reprise tel quel du rapport d'analyse géotechnique. Ainsi, la mesure oedométrique « V » signifie que le plan de l'anneau est vertical. Etant donné que la perméabilité est mesurée perpendiculairement à ce plan, elle correspond à une perméabilité horizontale ou Kxy. La mesure « H » correspond par conséquent à une perméabilité verticale ou Kz.



Les valeurs moyennes pour les classes granulométriques « limons argileux et sableux » et « sables limoneux » données dans le tableau 1 du rapport 4 (page 11), sont légèrement plus élevées pour Kz que pour Kxy, alors qu'on s'attend au contraire (dépôt horizontal des sédiments et des feuillets argileux, limitant la perméabilité dans le sens vertical). Ceci provient du fait que les moyennes sont faites sur des nombres d'échantillons différents pour Kxy que pour Kz.

L'annexe 6 du rapport N° 4 [1] donne les résultats d'analyses de certains échantillons sur lesquels la perméabilité a été testée à la fois dans le sens xy (V) et dans le sens z (H). Le rapport Kxy/Kz déduit de ces mesures donne :

- *pour un sable limoneux du forage SG47, Kxy/Kz = 4.1*
- *pour un limon argileux du forage SG18b, Kxy/Kz = 7.0*
- *pour deux argiles des forages SG 46 et SG47, la moyenne de Kxy/Kz = 1.5*

Ces données sont tout à fait plausibles. Le rapport Kxy/Kz relativement faible pour les argiles peut être expliqué par le fait que les mesures « V » et « H » ne sont pas réalisées strictement sur la même portion de matériel, mais sur des portions adjacentes de matériel très

semblables, qui peuvent présenter de faibles variations des caractéristiques ou des inhomogénéités non visibles à l'œil nu.

Point 3 :
Présenter un scénario plausible de recharge de l'aquifère des cailloutis du Sundgau.

L'étude de risques de 1992 [3] et les études hydrogéologiques qu'elle synthétise indiquent que l'alimentation principale de l'aquifère des cailloutis du Sundgau se fait par infiltration directement dans cet aquifère, à l'amont hydrogéologique de la DIB et à des endroits où les cailloutis du Sundgau se retrouvent en surface des terrains ou à faible profondeur. Les évaluations faites par la suite n'ont permis ni de confirmer, ni d'infirmer cette explication. Les cailloutis du Sundgau observés à 1 km au SE de la décharge (cf. situation à l'annexe 1 du rapport [1]), font très probablement partie du bassin versant des sources Q1 à Q6 (cf. situation sur la carte annexe 3.10 du rapport [2]). Par contre, l'affluent Est du Rosersbach, 500 m à l'est de la décharge, s'écoule dans les graviers de la formation des cailloutis du Sundgau. Au bord de cet affluent, le niveau piézométrique mesuré à l'époque dans le piézomètre SP40 (voir situation sur la carte annexe 3.10 du rapport [2]), mis en place en 1991 et par la suite détruit par les forestiers, se situait largement en dessous du lit du cours d'eau. Ceci indique que le cours d'eau peut alimenter directement l'aquifère à l'endroit de SP40 et sur environ 300 m à l'amont de ce point. Plus à l'amont encore, sur environ 200 m supplémentaires, ce cours d'eau peut également alimenter l'aquifère au travers d'une faible couche de matériaux peu perméables à la base de la série des argiles de Bonfol.

Si l'on fait l'hypothèse que l'alimentation de l'aquifère des cailloutis du Sundgau a lieu de manière plus ou moins uniforme au travers de la formation des argiles de Bonfol dans l'ensemble du bassin versant de l'aquifère à l'amont de la décharge, soit une surface de 800 x 450 m = 360'000 m^2, le calcul à l'aide de la loi de Darcy indique qu'une perméabilité verticale moyenne (de la zone d'infiltration) comprise entre 3.6 et 5.7•10^{-9} m/s permet d'expliquer le débit drainé par l'aquifère des cailloutis du Sundgau, qui est évalué entre 113 et 177 m^3/j (rapport [1] p 18 et rapport [4] p. 54). Ceci correspond à la perméabilité de matériaux tels que des sables argileux et des limons argileux.

Par conséquent, nous concluons qu'il n'est pas nécessaire de disposer d'une zone d'infiltration précise à forte perméabilité, pour expliquer les débits qui transitent dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau. Ce scénario d'une alimentation diffuse sur le bassin versant avec quelques régions plus perméables ou présentant une couverture très faible sur les cailloutis du Sundgau est compatible avec les observations hydrauliques dans les forages SG : Elles montrent que l'aquifère est très peu influencé par les variations des conditions d'infiltration (fluctuations pluriannuelles du niveau piézométrique et réaction plusieurs mois après les périodes de sécheresse, respectivement de forte pluviosité).

Point 4 :
Vérifier la valeur des niveaux dans l'annexe 3.10 du rapport annexe 6.1 [2].

A) : Dôme piézométrique 800 m à l'Est de la décharge.

Entre 700 et 900 m à l'Est de la décharge, la carte de l'annexe 3.10 du rapport [2] indique la présence d'un dôme piézométrique. Les données topographiques, géomorphologiques et géologiques indiquent, qu'à cet endroit, il y a une ligne de partage des eaux souterraines. Le dôme en question est identifié et dessiné uniquement sur la base du potentiel mesuré au début de 1992 au piézomètre SP41 (situé 800 m à l'est de la décharge). Ce piézomètre avait été détruit par les forestiers quelques temps après sa mise en place en décembre 1991. L'emplacement réel du dôme piézométrique en question, ne correspond peut-être pas tout à fait au dessin de l'annexe 3.10 du rapport [2]. Ce manque de précision n'a cependant pas d'influence significative sur l'appréciation générale de la situation hydrogéologique de la DIB.

B) : Indication de la cote piézométrique de SG19

Sur la carte de l'annexe 3.10 du rapport [2], une erreur s'est glissée dans l'indication de la cote piézométrique moyenne au forage SG19. La valeur correcte est 456.60 et non 458.00 (cf. cotes indiquées en annexe 11 du rapport N° 4 [1] où l'indication est donnée au centimètre près.

Complément d'information concernant l'exigence 2.3 :

Point 1 :
Elaborer la carte des équipotentielles sur la base des nouveaux nivellements effectués en 2004

La carte est donnée en annexe. Elle montre pour la date du 3 novembre 2004, les niveaux piézométriques de l'aquifère des cailloutis du Sundgau, extrapolés sur la base des anciennes et des nouvelles données topographiques. Des petites différences sont observées mais elles ne remettent pas en cause l'image globale de la piézométrie de l'aquifère et des directions d'écoulement des eaux souterraines. Les conclusions tirées sur la base des anciennes cartes piézométriques restent valables.

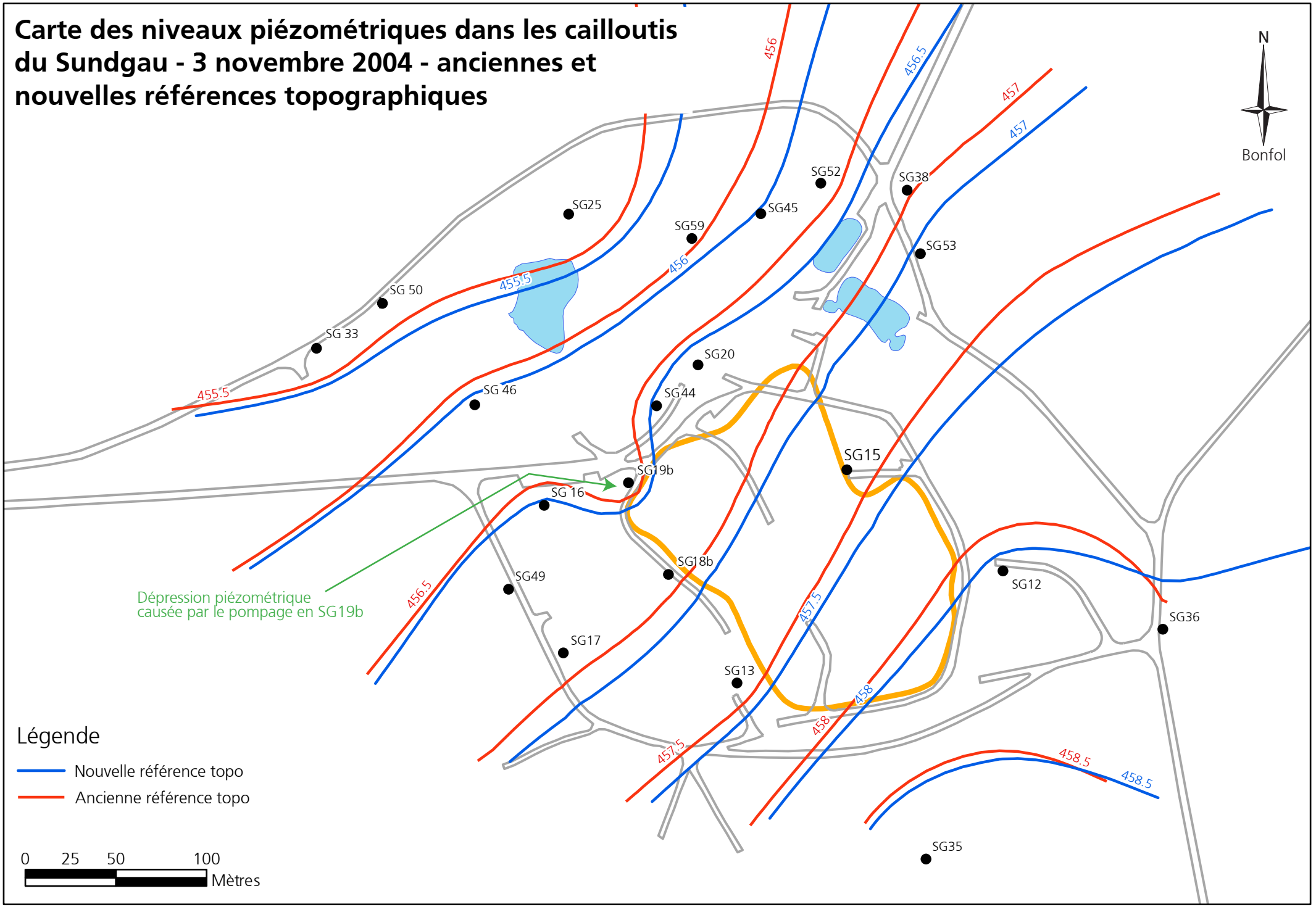
BIBLIOGRAPHIE

[1] Assainissement définitif de la décharge industrielle de Bonfol, projet d'assainissement selon OSites, rapport annexe 4, "Géologie et hydrogéologie", IG DIB, 2003

[2] Assainissement définitif de la décharge industrielle de Bonfol, projet d'assainissement selon OSites, rapport annexe 6.1 "Chemische Risikobewertung", BMG, 2003

[3] Sondermülldeponie Bonfol - Risikoanalyse Stand 1991, CSD, 1992

[4] DIB, Rapport de synthèse hydrogéologique 2002, CSD, 2002


Carte des niveaux piézométriques dans les cailloutis du Sundgau - 3 novembre 2004 - anciennes et nouvelles références topographiques
N
Bonfol
SG25
SG59
SG45
SG52
SG38
SG53
SG 50
SG 33
SG 46
SG20
SG44
SG15
SG19b
SG 16
SG18b
SG49
SG12
SG36
SG17
SG13
SG35
455.5
456
456.5
457
457.5
458
458.5
Dépression piézométrique causée par le pompage en SG19b
Légende
Nouvelle référence topo
Ancienne référence topo
0 25 50 100
Mètres

Betriebs-AG

Assainissement définitif de la décharge industrielle de Bonfol

Compléments selon exigences de la prise de position OEPN du 08.09.04

2. Géologie et hydrogéologie

2.3 Hydrodynamisme de cailloutis du Sundgau

Annexe 2.3.1

Betriebs-AG

Assainissement définitif de la décharge industrielle de Bonfol

Mise en place de nouveaux points de surveillance des eaux souterraines

Note concernant la situation et la description des forages prévus

4 août 2006

C'S'D' Ingénieurs et Géologues SA

Ingénieurs
Géologues
Spécialistes de l'environnement
Rue de la Chaumont 13, CP 134
2900 Porrentruy 2

Téléphone: +41(0)32-465 50 30
Fax: +41(0)32-465 50 31
E-mail: porrentruy@csd.ch
Internet: www.csd.ch

Table des matières

1 Contexte 1

2 Implantation des forages 1

2.1 Forages dans les cailloutis du Sundgau 1

2.2 Forages dans la série des Vosges 2

2.3 Coordonnées des forages implantés 2

3 Description des forages 2

3.1 Forages dans les cailloutis du Sundgau 2

3.2 Forages dans la série des Vosges 3

Liste des annexes

Annexe 1 Situation des nouveaux forages implantés

Annexe 2 Situation des nouveaux forages dans la série des Vosges : Comparaison avec les propositions de l'OEPN

1 Contexte

Dans le cadre de la réalisation de l'assainissement définitif de la DIB et des réponses aux exigences des autorités cantonales, il a été convenu de mettre en place de nouveaux points de surveillance des eaux souterraines. Les nouveaux piézomètres permettront de compléter les réseaux de surveillance existant pour le suivi environnemental des travaux d'assainissement. En cas de mise en évidence d'une pollution, un certain nombre de ces points situés dans le secteur proche de la DIB pourra également être utilisé comme forages d'intervention.

Le nombre et la disposition des points de surveillance à mettre en place ont été présentés dans la version provisoire de la notice d'impact sur l'environnement du 28 juin 2006 :

- **Cailloutis du Sundgau** : la modélisation mathématique des écoulements souterrains dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau recommande la mise en place de 5 nouveaux piézomètres.
- **Série des Vosges** : les autorités cantonales demandent le renforcement de la surveillance dans les passées sableuses de cette formation par la mise en place de 3 forages supplémentaires.

2 Implantation des forages

2.1 Forages dans les cailloutis du Sundgau

L'implantation des forages destinés à la surveillance des eaux souterraines de l'aquifère des cailloutis du Sundgau est présentée sur les plans de l'annexe 1.

La modélisation des écoulements souterrains recommande la mise en place de 5 forages. Toutefois, seuls 4 sondages seront réalisés. Le point recommandé à l'ouest de la DIB, entre les forages existants SG13 et SG18b ne pourra pas être réalisé car il se trouverait à l'intérieur de la halle d'excavation une fois construites les installations nécessaires à l'assainissement de la DIB. Or, la mise en place d'un nouveau piézomètre à l'intérieur d'une des halles n'est pas souhaitable. Les risques de pollution par by-pass pourraient être plus importants que les avantages apportés par un nouveau point de surveillance dans ce secteur, d'autant plus que les eaux captées s'écoulent au droit d'une zone où les argiles de Bonfol sont épaisses et où la DIB n'est pas très profonde.

Les 4 autres points proposés au Nord de la DIB ne sont pas remis en cause :

- Le forage SG60, situé sur le premier écran de forages, environ 30 m à l'ENE de SG20, améliorera sensiblement l'efficacité du dispositif d'observation des eaux souterraines à l'aval immédiat de la DIB.
- Le forage SG61, situé sur le premier écran de forages, entre SG19b et SG44, permettra de réduire l'espace important entre ces deux forages que le dispositif actuel ne permet pas de capter ni d'échantillonner de manière sûre.

- Les forages SG62 et SG63, situés sur le deuxième écran de forages, permettront de combler la lacune d'observation existant dans cet écran entre SG46 et SG59, respectivement SG25.

2.2 Forages dans la série des Vosges

L'implantation des forages destinés à la surveillance des eaux souterraines de l'aquifère des cailloutis du Sundgau est présentée sur les plans des annexes 1 et 2.

Les trois forages ont été mis en place sur la base du plan fourni à la bci par l'OEPN, plan reproduit dans la NIE du 28 juin 2006. Leur implantation réelle, adaptée en fonction des conditions du terrain, est comparée aux situations demandées par les autorités sur le plan de l'annexe 2.

- Le sondage VG46 sera réalisé 2 m au Sud-Ouest de SG46, au Nord-Ouest de la DIB.
- Le forage VG64 sera situé environ 300 m au Nord de la DIB, au centre du triangle formé par les piézomètres SVG31, VG53 et VG46, sur le flanc sud du vallon du Bois Banal.
- Le forage VG65 sera mis en place environ 250 m à l'Ouest de la DIB.

2.3 Coordonnées des forages implantés

Les coordonnées des forages implantés sur le terrain sont indiquées dans le tableau ci-dessous :

Forage	X	Y	Cote terrain [m]
SG60	579556	259480	Env. 471.00
SG61	579499	259422	474.60
SG62	579472	259502	Env. 471.80
SG63	579446	259470	Env. 471.70
VG46	579411	259441	474.30
VG64	579508	259714	469.70
VG65	579218	259310	460.10

3 Description des forages

3.1 Forages dans les cailloutis du Sundgau

Les forages dans les cailloutis du Sundgau traverseront cette formation aquifère et seront poursuivi 3 mètres sous le sommet de la série des Vosges. Ceci permettra de documenter la lithologie du sommet de cette série et de mettre en place un sac à boue en fond de

piézomètre. Les profondeurs approximatives attendues sur la base des connaissances actuelles sont les suivantes :

Forage	Profondeur	Base des CS	Epaisseur des CS
SG60	21.0 m	- 18.0 m	Env. 6 m
SG61	23.5 m	- 20.5 m	Env. 5 m
SG62	23.0 m	- 20.0 m	Env. 6 m
SG63	23.0 m	- 20.0 m	Env. 6 m

3.2 Forages dans la série des Vosges

Le forage VG46 a pour objectif de capter les eaux de la lentille sableuse aquifère mise en évidence dans la série des Vosges lors de la réalisation du forage SG46. Cette passée sableuse mesure 4.5 mètres d'épaisseur et son toit se situe environ 1 m sous la base des cailloutis du Sundgau. La lentille, mesurée en SG46, se situe entre 20 et 24.5 m de profondeur. Le forage sera poursuivi 2 m sous la base de ce niveau sableux pour mettre en place un sac à boues (profondeur totale estimée = env. 26.5 m).

Le forage VG64 a pour objectif de capter d'éventuels niveaux sableux situés dans le sommet de la série des Vosges au Nord de la DIB, entre VG53 et SVG31. Le forage sera réalisé jusqu'à une profondeur maximale de 10 mètres sous la base des cailloutis du Sundgau (celle-ci est estimée sur la base des connaissances actuelles à environ 16 m de profondeur), ou jusqu'à la base d'un éventuel niveau sableux touché par le forage. Dans ce cas, le forage sera poursuivi 2 m sous le niveau sableux pour mettre en place un sac à boues (profondeur totale estimée = minimum 26.0 m).

Dans le secteur du forage VG65, on estime sur la base des connaissances actuelles que le sommet de la série des Vosges devrait devenir sableux. L'eau des cailloutis du Sundgau, subaffleurants dans le secteur, devrait donc s'y écouler. Le forage sera réalisé jusqu'au premier imperméable rencontré, soit à environ 13 m de profondeur selon les connaissances actuelles. Le forage sera poursuivi 2 m dans le niveau imperméable pour mettre en place un sac à boues (profondeur totale estimée = 15 m).

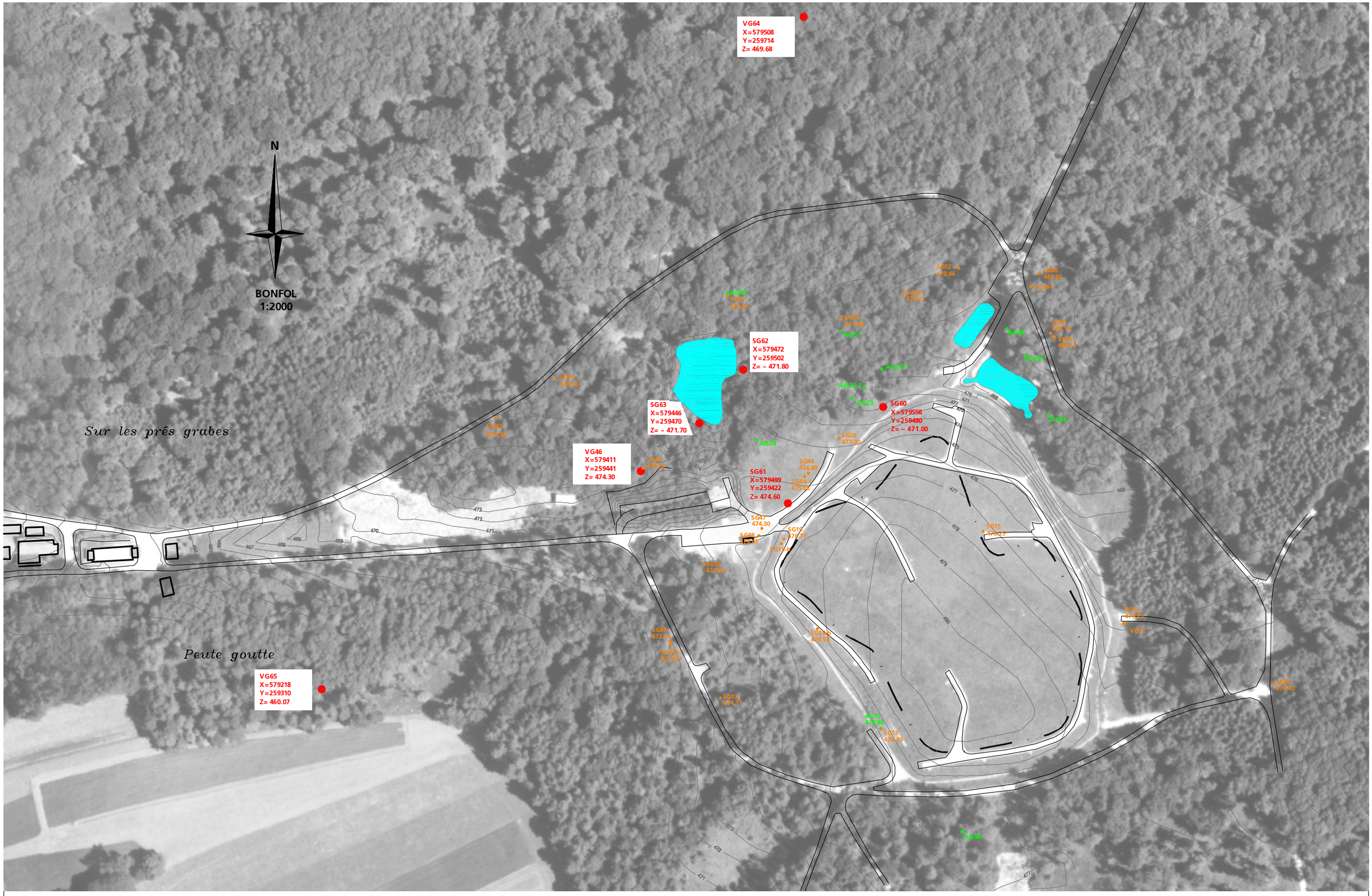
CSD Ingénieurs et Géologues SA

J. Thierrin G. Monin

Porrentruy, le 4 août 2006
JU5155.106.653

Annexe 1

Situation des nouveaux forages implantés



Orthophoto réalisée par la République et Canton du Jura, édition 1998

CSD Ingénieurs et Géologues SA

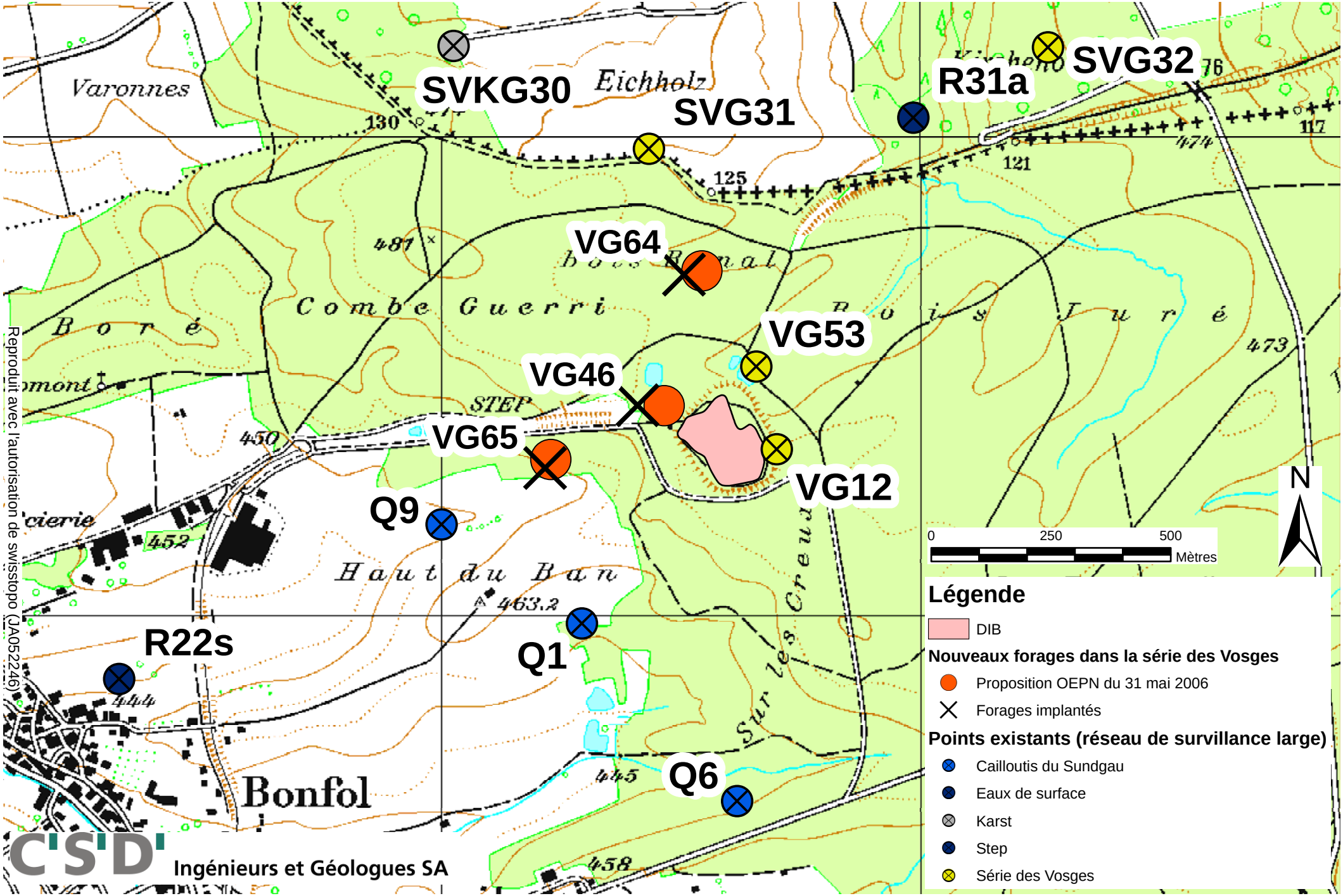
Décharge industrielle de Bonfol

Implantation forages 2006 JU5155.106.653 / CF/Gmo / 28.07.06

Annexe 2

Situation des nouveaux forages dans la série des Vosges : Comparaison avec les propositions de l'OEPN

Nouveaux forages dans la série des Vosges, août 2006



Reproduit avec l'autorisation de swisstopo (JA052246)

C'S'D' Ingénieurs et Géologues SA

JURA CH RÉPUBLIQUE ET CANTON DU JURA

DÉPARTEMENT DE L'ENVIRONNEMENT ET DE L'ÉQUIPEMENT

OFFICE DES EAUX ET DE LA PROTECTION DE LA NATURE

Les Champs Fallat
CH-2882 Saint-Ursanne

t +41 32 420 48 00
f +41 32 420 48 11
oepn@jura.ch

Office des eaux et de la protection de la nature – Les Champs-Fallat, 2882 Saint-Ursanne

bci Betriebs-AG
c/o Ciba Spezialitätenchemie AG
M. Michael Fischer
K-24.2.27, Postfach
4002 Basel

St-Ursanne, le 16 août 2006

DIB – Mise en place de nouveaux points de surveillances des eaux souterraines – Note bci du 4 août 2006 "situation et description des forages prévus"

Monsieur,

Nous avons bien reçu par mail le 7 août 2006 la note mentionnée en objet.

En ce qui concerne le positionnement des forages dans la série des Vosges, cette note reprend les demandes formulées par les courriers de l'OEPN et du BRGM des 31 mai et 14 juin 2006.

Pour ce qui est des forages dans les cailloutis du Sundgau, nous validons également l'implantation des forages proposés qui découle des résultats de la modélisation. Nous avons bien pris note que seuls 4 forages seront réalisés, au lieu des 5 prévus initialement par la modélisation, puisqu'il ne serait en effet pas souhaitable de réaliser un forage dans la zone où sera implantée la halle d'excavation.

Dans ce contexte, il nous serait important de savoir si d'autres piézomètres existants seront également à l'intérieur des futures constructions, et si cela devait être le cas, ne devraient-ils pas être bouchés et remplacés par d'autres points en bordure du site construit.

D'autre part, l'OEPN tient à être tenu informé de l'évolution des travaux par le géologue chargé du suivi, en particulier sur la nature des terrains, la configuration des équipements mis en place et les profondeurs de forages qui auront été définies en fonction de la lithologie des terrains traversés.

En restant à votre entière disposition, nous vous adressons, Monsieur, nos salutations les meilleures.

Jean-Pierre Meusy
Chef d'Office

Betriebs-AG

Assainissement définitif de la décharge industrielle de Bonfol

Compléments selon exigences de la prise de position OEPN du 08.09.04

2. Géologie et hydrogéologie

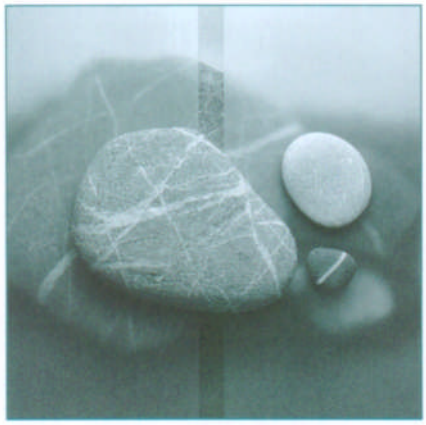
2.4 Hydrodynamisme de la Série des Vosges

Annexe 2.4.1

C'S'D' Ingénieurs et Géologues SA

Ingénieurs
Géologues
Spécialistes de l'environnement
Rue de la Chaumont 13, CP 134
2900 Porrentruy 2

Téléphone: +41 (0)32-466 58 58
Fax: +41 (0)32-466 57 21
E-mail: porrentruy@csd.ch
Internet: www.csd.ch



C'S'D'

Environnement
Sciences de la terre
Génie civil
Déchets et dépollution
Installations de traitement

BCI SA

HYDROGÉOLOGIE DE LA RÉGION DE LA DIB

Compléments concernant la série des Vosges

Porrentruy, 24 février 2005
JU5150A-18 / J. Thierrin
CSD Ingénieurs et géologues SA
La Chaumont 13, CP 134
CH-2900 Porrentruy 2
Tél. +41 32-466 58 58
Fax +41 32-466 57 21
E-mail porrentruy@csd.ch
www.csd.ch

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION 1

1. TRANSFERT D'EAU DES CAILLOUTIS VERS LA SÉRIE DES VOSGES 1

1.1 Nature et perméabilité des matériaux du sommet de la série des Vosges 2

1.2 Résultats des investigations géophysiques 2

1.3 Potentiel hydraulique dans les cailloutis du Sundgau 3

1.4 Données chimiques du panache contaminé à l'aval de SG19b 4

1.5 Conclusions 4

2. CARTE PIÉZOMÉTRIQUE POUR LES FORAGES VG 4

3. PIÉZOMÉTRIE DE LA SÉRIE DES VOSGES PRÈS DE LA STEP 5

4. CHUTE PIÉZOMÉTRIQUE À L'OUEST DE LA STEP 6

5. RÉFÉRENCES ..... ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.

6. RÉSULTATS D'ANALYSES DANS LA SÉRIE DES VOSGES 7

7. CARTE PIÉZOMÉTRIQUE 8

8. RÉFÉRENCES 8

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Extrait de l'annexe 3.10 du rapport [9], piézométrie dans le secteur de la STEP 6

Figure 2 : Extrait de l'annexe 2 du rapport [10], Coupe géologique E-W de la région de Bonfol 6

Figure 3 : Extrait de l'annexe 2 du rapport [10], Coupe géologique N-S de la région de Bonfol 7

ANNEXES

ANNEXE A Composition du toit de la série des Vosges

ANNEXE B Profils de tomographie géoélectrique

ANNEXE C Tableau des données chimiques pour les forages VG12, VG53, SVKG30, SVG31 et SVG32 entre 2002 et 2004

INTRODUCTION

Lors de la séance du groupe de projet DIB du 3 février 2005 à St Ursanne, il a été décidé que CSD organise une séance d'explication des données hydrogéologiques aux experts du canton du Jura. Cette séance a eu lieu le 9 février 2005 avec Daniel Hunkeler (expert du canton, CHYN), André Bapst (expert du canton, MFR), Rémi Luttenbacher (bci) et Joseph Thierrin (CSD). Diverses données hydrogéologiques concernant le secteur de la DIB et plus précisément, la série des Vosges ont été expliquées aux experts. Il s'agit d'informations contenues dans des rapports publiés, entre autres les rapports et documents [1] à [7].

Au terme de cette séance, les experts ont demandé à la bci et à CSD, de clarifier les points suivants :

1. Justifier le concept de CSD que la presque totalité de l'eau souterraine passe depuis les cailloutis du Sundgau dans la série des Vosges, seulement au-delà du deuxième écran de forages et non pas entre le premier et le deuxième écran de forages SG ; justifier qu'il n'y a pas de transfert diffus des cailloutis du Sundgau vers la série des Vosges entre les 2 écrans de forages.
2. Justifier pourquoi CSD trouve qu'il n'est pas correct de réaliser une carte piézométrique dans la série des Vosges sur la base des cotes piézométriques de l'ensemble des points VG (Donnée de la lentille sableuse sous SG46, de VG53, VG12, SVG31, SVG32 et SVP91 entre autres).
3. Expliquer pourquoi CSD estime que le seul endroit où on peut faire une carte piézométrique dans la série des Vosges est le secteur de la STEP avec les données piézométriques du début des années 1990.
4. Préciser les éléments hydrogéologiques qui expliquent la brusque chute du niveau piézométrique à l'ouest de la STEP
5. Donner les arguments qui font dire à CSD que le phénomène de perte de l'eau depuis les cailloutis du Sundgau vers la série des Vosges, devrait suivre aussi au NW et au nord de la décharge, le schéma observé à l'ouest de la STEP
6. Faire une synthèse des résultats d'analyses des substances typiques de la DIB (DOC, Br- et VOC) dans les points de mesure de la série des Vosges (VG12, VG53, SVKG30, SVG31 et SVG32)
7. Refaire une carte piézométrique actuelle avec tous les forages SG, y compris GS34 et SG37 qui manquent sur la carte de novembre 2004

Le présent rapport développe ces points de manière succincte, en guise de préparation à la séance du groupe de projet DIB, agendée au 8 mars 2005 à l'OEPN.

1. TRANSFERT D'EAU DES CAILLOUTIS VERS LA SÉRIE DES VOSGES

La demande des experts est la suivante :

Justifier le concept de CSD que la presque totalité de l'eau souterraine passe depuis les cailloutis du Sundgau dans la série des Vosges, seulement au-delà du deuxième écran de forages et non pas entre le premier et le deuxième écran de forages SG ; justifier qu'il n'y a pas de transfert diffus des cailloutis du Sundgau vers la série des Vosges entre les 2 écrans de forages.

Les éléments permettant de justifier ce concept sont les suivants :

1. nature et perméabilité des matériaux du sommet de la série des Vosges, observés en forages
2. résultats des investigations géophysiques
3. potentiel hydraulique dans les cailloutis du Sundgau
4. données chimiques du panache contaminé à l'aval de SG19b

1.1 Nature et perméabilité des matériaux du sommet de la série des Vosges

La série des Vosges a été traversée partiellement et décrite dans les 31 forages énumérés au tableau de l'Annexe A. C'est dans les forages SG11 et VG12 qu'elle a été traversée sur la plus grande épaisseur (50, resp. 80 m). Elle présente essentiellement des faciès argileux avec des alternances sableuses plus ou moins importantes. Les membres de cette série ainsi que des séries plus récentes sont des sols meubles compactés mais non indurés. Il ne s'agit donc pas de roches. Leur style de déformation est plastique. Cette série remplit un petit graben et présente une surépaisseur locale importante.

Dans les alentours proches de la décharge, tous les forages montrent un faciès argileux sur plusieurs mètres d'épaisseur au toit de cette série, la rendant très peu perméable à l'infiltration. Sur les carottes de forages, ces matériaux argileux sont très facilement reconnaissables à leur couleur brun chocolat. Systématiquement, ce sont des argiles du même type qui apparaissent sous les cailloutis du Sundgau, indiquant qu'il se sont déposés dans un milieu qui englobe l'ensemble du secteur actuellement observé à l'aide des forages SG autour de la DIB.

Les analyses du tableau ci-dessous, réalisées sur des matériaux prélevés dans cette couche argileuse de la série des Vosges, sous les cailloutis du Sundgau, indiquent que ces matériaux argileux sont très peu perméables. Les perméabilités comprises entre $1 \bullet 10^{-11}$ et $1 \bullet 10^{-12}$ m/s, sont très faibles en comparaison à celles définies pour les cailloutis du Sundgau (proches de $1 \bullet 10^{-4}$ m/s), c'est-à-dire approximativement 10 millions de fois plus faibles. A quelques endroits, on observe des lentilles sableuses incluses dans ces séries argileuses du sommet de la série des Vosges. Leur faible proportion en comparaison aux séries argileuses indiquent qu'elles sont probablement confinées et que même si elles peuvent présenter localement une perméablité relativement élevée, l'eau ne peut pas y circuler en quantité significative.

Date	Forage	Profondeur	Matériau	Classification USCS	% Argile	% Limon	% Sable	% Gravier	% Pierre	Kxy = Perméabilité horizontale; Kv = Perméabilité verticale	Perméabilité mesurée à l'oedomètre [m/s]
2001	SG18b	27.20-27.65	argile limoneuse	CH	34.8	52.8	11.9	0.5	0.0	Kxy	1.24E-11
2001	SG18b	27.20-27.66	argile limoneuse	CH	34.8	52.8	11.9	0.5	0.0	Kv	7.46E-12

Le fait que les matériaux de la série des Vosges soient systématiquement en très grande proportion argileux dans les quelques mètres sous les cailloutis du Sundgau, ainsi que le fait que ces argiles soient très peu perméables sont des éléments qui justifient que la presque totalité des eaux qui circulent dans les cailloutis du Sundgau sous la DIB, s'écoulent horizontalement dans cet aquifère jusqu'au moins au niveau du deuxième écran de forages SG.

La question suivante a été posée : « Pourrait-il y avoir une infiltration significative d'eau dans la série des Vosges entre le premier et le deuxième écran de forages de surveillance de l'aquifère des cailloutis du Sundgau ? ». La surface totale comprise entre ces deux écrans de forages au nord et à l'ouest de la DIB est d'environ 33'200 m^2. Le débit passant au travers de l'écran de forages N° 1 est de l'ordre de 105 m^3/j (cf. p. 54 du rapport [1]). Pour perdre une fraction significative de ce volume (10 %), il faudrait que la perméabilité verticale moyenne des matériaux situés sous les cailloutis du Sundgau soit de $3.5 \bullet 10^{-9}$ m/s, soit environ 500 fois supérieure à la perméabilité des terrains effectivement observés à la base des cailloutis du Sundgau, dans les forages. Ce scénario n'est pas réaliste.

1.2 Résultats des investigations géophysiques

Parmi les 4 types d'investigations géophysiques (sismique et sondages géoélectriques en 1973 ainsi que tomographie géoélectrique et RMTR depuis l'an 2000), seules les méthodes électriques (sondages géoélectriques et tomographie géoélectrique) fournissent des informations sur la nature des matériaux situés

sous les cailloutis du Sundgau. L'avantage de ces méthodes est de pouvoir définir l'empilement des couches électriquement conductrices (argiles et limons) et électriquement résistantes (sables et graviers).

La méthode des **sondages électriques** est limitée du fait que chaque sondage est interprété pour lui-même et que l'empiètement latéral des électrodes (environ 5 fois plus grand que la profondeur d'investigation) peut induire des distorsion dans les résultats si la nature des terrains de faible profondeur varie latéralement. Ainsi, l'interprétation des courbes de sondages indique le plus souvent de manière correcte la succession verticale des couches, mais le calcul de leurs épaisseurs et résistivités électriques respectives peut être entaché d'erreurs très importantes. L'interprétation des sondages géoélectriques de 1973, donnée dans le rapport [6], indique que partout, dans le secteur de la décharge, on a un empilement de haut en bas de type « conducteur » (= série des argiles de Bonfol) sur « résistant » (= cailloutis du Sundgau) sur « conducteur » (= partie supérieure de la série des Vosges). Les seuls sondages qui indiquent la présence de terrains électriquement résistants sur de grandes profondeurs, sans retrouver de terrain électriquement conducteur plus profondément, se situent à plus de 400 m à l'ouest de la DIB, c'est-à-dire dans le secteur de la STEP et plus à l'ouest.

La **tomographie géoélectrique** fournit des informations analogues à celles de sondages électriques, mais comme il s'agit d'une série de nombreux sondages électriques alignés sur un même profil, les influences latérales peuvent être prises en compte dans les calculs d'interprétation. Ainsi, l'image donnée pour chaque profil est suffisamment cohérente pour pouvoir interpoler les données d'un forage à l'autre. Malgré tout, les erreurs sur l'épaisseur des diverses couches mises en évidence et sur leurs résistivité vraies, peuvent s'avérer importantes. De même, dans le type de terrain étudié, qui présente une forte proportion de matériaux électriquement très conducteurs, l'information à une profondeur supérieure à 20 - 30 m devient très floue du fait de la faiblesse des signaux électriques captés pour ces profondeurs d'investigation. Pour cette même raison, les profils réalisés près de la décharge et près des installations électriques de la chambre principale et de la STEP sont perturbées par des courants vagabonds qui rendent impossible toute interprétation des données. Le profil de tomographie géoélectrique de l'annexe B1, correspondant à des mesures à l'aide du dispositif Wenner, orienté Est – Ouest, au nord de la DIB, au droit de forages SG33, SG25, SG45 et SG38, illustre les résultats et les limites de cette méthode. Le profil montre bien l'empilement des couches « résistant de surface » (= lehm et sables en surface) sur « conducteur » (= série des argiles de Bonfol) sur « résistant » (= cailloutis du Sundgau) sur « conducteur » (= partie supérieure de la série des Vosges). On observe que les cailloutis du Sundgau ne forment pas une couche uniforme mais présentent des secteurs mieux développés que d'autres. On remarque aussi surtout que la profondeur calculée de cette couche, de même que son épaisseur, sont plus grandes que ce qui est effectivement observé en forage. Cependant, on observe bien que sous les cailloutis du Sundgau, on retrouve systématiquement une couche électriquement conductrice. Ce profil a permis la mise en place des forages SG50, SG59 et SG52. Le profil géoélectrique de l'annexe B2, effectué à l'ouest de la décharge, entre les forages SG16, SG17 et G5, à l'aide du dispositif dipôle-dipôle, donne une image plus nette à faible profondeur, du fait de la plus grande sélectivité spatiale de la méthode, avec la détermination relativement correcte de la profondeur et de l'épaisseur des cailloutis du Sundgau, mais une très faible définition des résistivités électriques apparentes, plus en profondeur. Néanmoins, il montre que les cailloutis du Sundgau reposent sur un terrain électriquement conducteur, correspondant au sommet argileux de la série des Vosges.

1.3 Potentiel hydraulique dans les cailloutis du Sundgau

Hormis la forte incurvation vers le sud des isopièzes à l'ouest de la DIB, les diverses cartes isopièzes données en Annexe 5.4 du rapport [1] ne montrent pas d'anomalie flagrante de l'organisation des potentiels hydrauliques dans le secteur de la décharge, qui pourraient indiquer une éventuelle « fuite » d'eau vers le bas depuis les cailloutis du Sundgau vers la série des Vosges. Si localement, entre les forages qui indiquent tous la présence d'une couche imperméable sous les cailloutis du Sundgau, il y avait un secteur très perméable présentant une connexion hydraulique vers le bas avec les corps sableux de la série des Vosges (dans lesquels le potentiel hydraulique est d'environ 10 m plus bas que dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau), les cartes isopièzes devraient montrer la présence d'un ou plusieurs points bas piézométriques. Or cela n'est pas observé. Le fait que les gradients croissent au nord et à l'ouest du dispositif d'observation des cailloutis du Sundgau, indique plutôt qu'un tel phénomène a lieu à l'extérieur de ce dispositif d'observation.

1.4 Données chimiques du panache contaminé à l'aval de SG19b

Les informations publiées dans le rapport annuel 2003 [7] de surveillance environnementale de la DIB indiquent que le panache s'écoule horizontalement de SG19 en direction de SG50, en passant quelque peu au nord-est de SG46. Bien que le centre du panache n'ait pas été recoupé par ces deux derniers forages, ils indiquent bien la direction que prennent les écoulements souterrains à l'aval hydraulique de la DIB, en phase avec les informations hydrauliques publiées dans le rapport hydrogéologique [1].

1.5 Conclusions

Les arguments géologiques, géophysiques, hydrauliques et chimiques confirment la position de la bci et de CSD concernant l'organisation des écoulements souterrains dans les cailloutis du Sundgau : Dans le secteur observé de l'aquifère des cailloutis du Sundgau (écrans 1 et 2 de forages d'observation), les écoulements souterrains sont essentiellement horizontaux. Les efforts de surveillance et éventuellement d'intervention doivent se concentrer sur cette portion de l'aquifère. Il n'est pas nié que dans ce secteur, une petite part des écoulements quitte verticalement l'aquifère des cailloutis du Sundgau vers la série des Vosges, étant donné que dans les corps sableux profonds de cette série, les potentiels hydrauliques sont significativement inférieurs à ceux de l'aquifère des cailloutis du Sundgau. Cependant, cette proportion est négligeable, la partie sommitale de la série des Vosges essentiellement argileuse, étant presque imperméable.

2. CARTE PIÉZOMÉTRIQUE POUR LES FORAGES VG

La demande des experts est la suivante :

Justifier pourquoi CSD trouve qu'il n'est pas correct de réaliser une carte piézométrique dans la série des Vosges sur la base des cotes piézométriques de l'ensemble des points VG (donnée de la lentille sableuse sous SG46, de VG53, VG12, SVG31, SVG32 et SVP91 entre autres).

Eléments de réponse :

Les corps sableux dans lesquels on mesure des potentiels hydrauliques par ces points de mesure, sont pour la plupart isolés hydrauliquement les uns des autres :

- Un corps sableux situé sous le forage SG46 a été observé en cours de forage. Son potentiel hydraulique était analogue à celui prévalant dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau. Le trou du forage a été isolé hydrauliquement à l'aide d'un bouchon d'argile et le piézomètre a été mis en place pour capter, respectivement observer l'eau des cailloutis du Sundgau. Le corps sableux observé est très probablement une lentille sableuse isolée hydrauliquement dans les corps argileux de la partie supérieure de la série des Vosges. Son potentiel ne peut pas être en relation hydraulique directe avec celui d'autres corps sableux mis en évidence dans les autres forages de la série des Vosges.
- Entre 6 et 10 m de profondeur sous la formation des cailloutis du Sundgau, dans le forage VG53, un corps sableux a été découvert et capté par ce forage. Il est isolé hydrauliquement de la formation des cailloutis du Sundgau par une couche argileuse de 6 m d'épaisseur. Le potentiel hydraulique observé dans ce corps sableux est environ 10 m inférieur à celui de l'aquifère des cailloutis du Sundgau, observé en SG53. Il n'est pas impossible que ce corps sableux s'étende latéralement jusque dans le secteur de SVG31 avec lequel il pourrait y avoir un équilibre hydraulique (très faible gradient), les deux forages présentant un potentiel hydraulique analogue. Cependant, aucune évidence géologique hormis quelques indices géophysiques, n'a été démontrée concernant cette hypothèse. Par ailleurs, le corps aquifère découvert dans VG53 n'a aucune relation hydraulique avec le corps aquifère observé dans VG12 (cf. ci-dessous).
- Le forage VG12 permet d'observer les eaux d'une couche sableuse (sables à Hipparions) située sous la série argileuse des Vosges. Cette couche ne peut pas présenter de connexion hydraulique importante et directe avec les autres corps sableux de la série des Vosges, cette série épaisse d'environ 80 m, traversée de part en part par le forage VG12, étant en très grande partie argileuse. Cette couche des sables à Hipparions s'étend régionalement sur de grandes distances. Elle est décrite

au SE de Bonfol, dans le secteur des étangs de Bonfol, puis plus au sud, à Vendlincourt et à Charmoille. Ce corps sableux sous VG12 est probablement en connexion latérale avec l'aquifère karstique régional et avec des séries plus sableuses de la série des Vosges en-dehors de notre dispositif d'observation, comme la série des sables à Hipparions de la région des étangs de Bonfol, tel que le commente Schmassmann dans les rapports [3] et [8].

- Le forage SVG31 recoupe 4.8 m d'épaisseur de cailloutis du Sundgau sous 2.9 m d'argiles de Bonfol. En-dessous, la série des Vosges a été recoupée sur 32.3 m d'épaisseur. Elle est constituée d'une alternance de petits bancs métriques à décimétriques de sables intercalés entre des argiles, la proportion de sables étant de 17 %. Le niveau piézométrique se situe vers 25 m de profondeur, indiquant que les cailloutis du Sundgau sont totalement désaturés. A cet endroit situé 550 m au nord de la DIB, les cailloutis sont déjà un peu remontés tectoniquement par l'anticlinal de Pfetterhouse et les eaux de cet aquifère ont rejoint des corps perméables plus profonds. D'un point de vue hydraulique, il est possible qu'il y ait une connexion entre ce point et les forages SVKG30 et VG53, présentant un potentiel hydraulique relativement proche. Cependant, aucune évidence hydrogéologique ne peut être apportée à ce sujet.
- Le forage SVG32 recoupe 6.5 m de lehms du Quaternaire, puis 7 m de sables et graviers de la série du Sundgau, puis 11.4 m d'épaisseur d'argiles de la série des Vosges. Le niveau piézométrique observé dans ce forage se trouve en moyenne très proche de la base des cailloutis du Sundgau si bien que cette formation est presque en tout temps totalement désaturée. Néanmoins, du fait du caractère imperméable des niveaux sous-jacents, il apparaît clairement que les eaux observée dans ce forage sont celles de l'aquifère des cailloutis du Sundgau. De ce fait, les potentiels observés à ce points de mesure n'ont pas de relation avec ceux observés dans les corps sableux ailleurs dans la série des Vosges.
- Le piézomètre SVP91 situé 200 m à l'W-SW de la DIB, présente probablement le niveau de décharge de l'aquifère des cailloutis du Sundgau dans un niveau sableux du sommet de la série des Vosges.

En conclusion, on observe que les corps sableux de la série des Vosges sont peu représentés dans cette série essentiellement argileuse et très peu perméable. Ils sont hydrauliquement isolés les uns des autres. L'établissement d'une carte piézométrique reliant les potentiels mesurés dans chacun des corps observés, serait incorrect.

3. PIÉZOMÉTRIE DE LA SÉRIE DES VOSGES PRÈS DE LA STEP

La demande des experts est la suivante :

Expliquer pourquoi CSD estime que le seul endroit où on peut faire une carte piézométrique dans la série des Vosges est le secteur de la STEP avec les données piézométriques du début des années 1990.

La carte de ce secteur est donnée en Figure 1. Il s'agit d'un extrait de l'annexe 3.10 du rapport [9].

Eléments de réponse :

Il s'agit d'une nappe qu'on peut considérer comme libre, sans aquifère perché en dessus, contrairement au reste de la série des Vosges.

Il s'agit d'une petite région dans laquelle plusieurs piézomètres avaient été implantés dans des terrains "semblables" de la série des Vosges.

Malheureusement, suite aux dégâts occasionnés dans ce secteur par l'ouragan Lothar, la plupart des piézomètres de ce secteur ne sont plus accessibles.

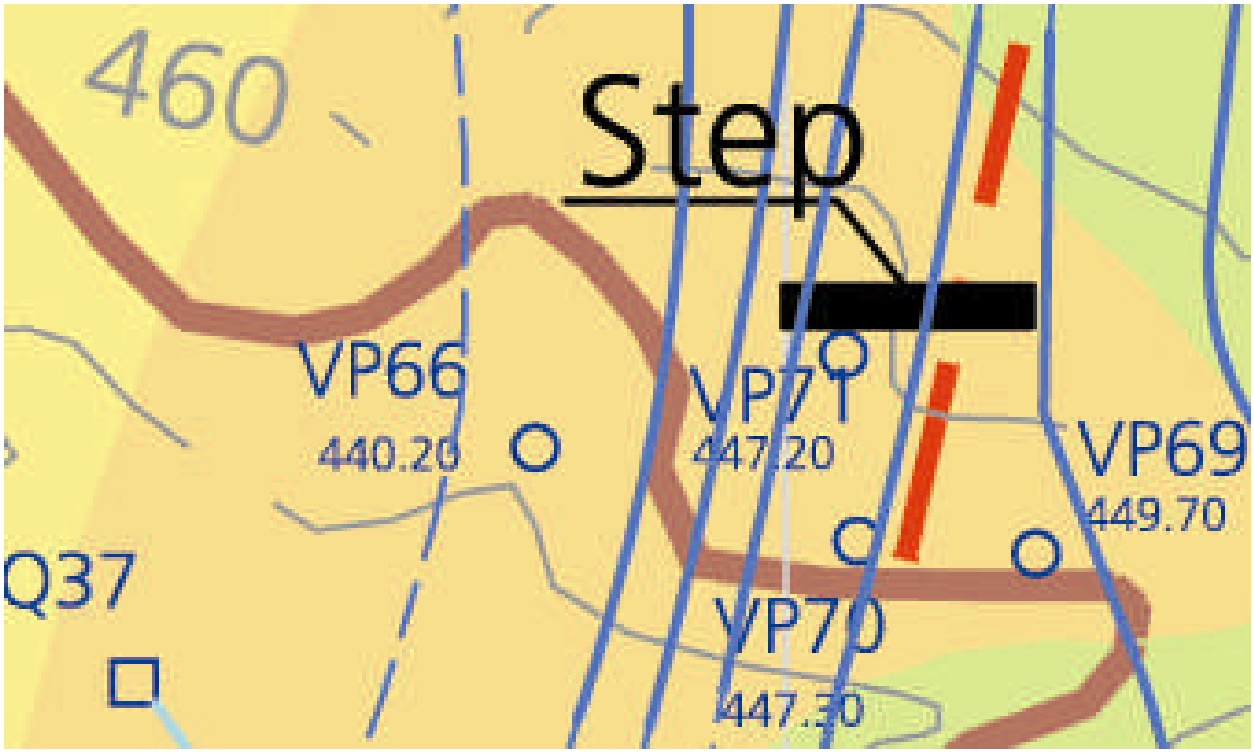


Figure 1 : Extrait de l'annexe 3.10 du rapport [9], piézométrie dans le secteur de la STEP

4. CHUTE PIÉZOMÉTRIQUE À L'OUEST DE LA STEP

La demande des experts est la suivante :

Préciser les éléments hydrogéologiques qui expliquent la brusque chute du niveau piézométrique à l'ouest de la STEP. L'explication suivante est donnée :

A l'ouest de la STEP, on retrouve un corps sableux de la série des Vosges, remonté latéralement, par une faille, dans la région ouest du synclinal près du centre duquel se trouve la décharge. A cet endroit indiqué par une flèche rouge sur la Figure 2, les matériaux argileux peu perméables, situés encore sous la nappe libre observée au niveau de la STEP, on disparu du fait de la remontée de ces sables. Ces sables sont latéralement en connexion avec le karst ou des couches plus profondes du Tertiaire, dont le potentiel hydraulique est plus bas. De ce fait, on observe une brusque chute du potentiel à l'ouest des piézomètres VP70 et VP71.

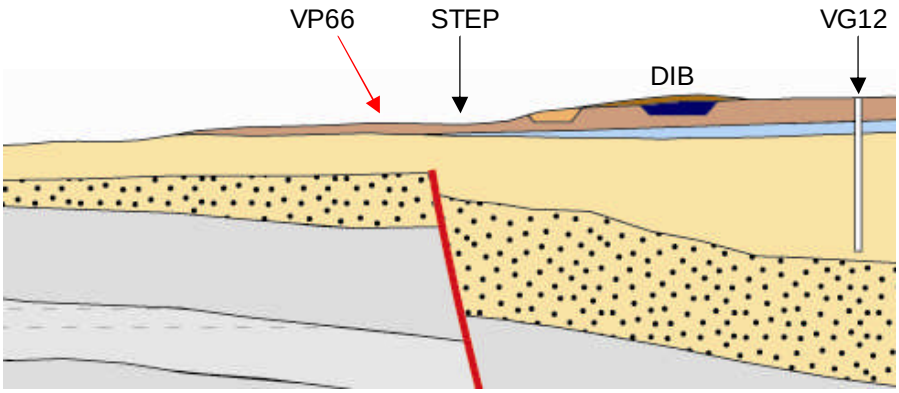


Figure 2 : Extrait de l'annexe 2 du rapport [10], Coupe géologique E-W de la région de Bonfol

5. TRANSFERT D'EAU VERS LA SÉRIE DES VOSGES

La demande des experts est la suivante : Donner les arguments qui font dire à CSD que le phénomène de perte de l'eau depuis les cailloutis du Sundgau vers la série des Vosges, devrait suivre aussi au NW et au nord de la décharge, le schéma observé à l'ouest de la STEP

La réponse à cette question est la suivante :

Les études géologiques montrent que les terrains de la région de la DIB sont affectés par des failles de direction globale N-S qui déplacent verticalement des blocs de terrains les uns par rapport aux autres. Ce style cassant du déplacement des terrains, est représenté sur les coupes géologiques E-W dont un extrait est donné en Figure 2. Par contre, dans l'autre direction, les déformations principales se font sous forme de plissements, ce qui est représenté sur la coupe N-S de la Figure 3, par un plissement synclinal dont le centre est occupé par la DIB. Les fractures semblent être plus anciennes que les plissements car elles affectent principalement les terrains tertiaires déposés avant la formation des cailloutis du Sundgau et n'affectent pas cette dernière. Par contre les plissements qui ont commencé probablement avant le début du dépôt de la série des Vosges, se sont poursuivis jusqu'après le dépôt de la série des cailloutis du Sundgau qui a été déformée par ces plissements et remontée jusqu'au sommet de l'anticlinal de Pfetterhouse (flèche rouge en Figure 3).

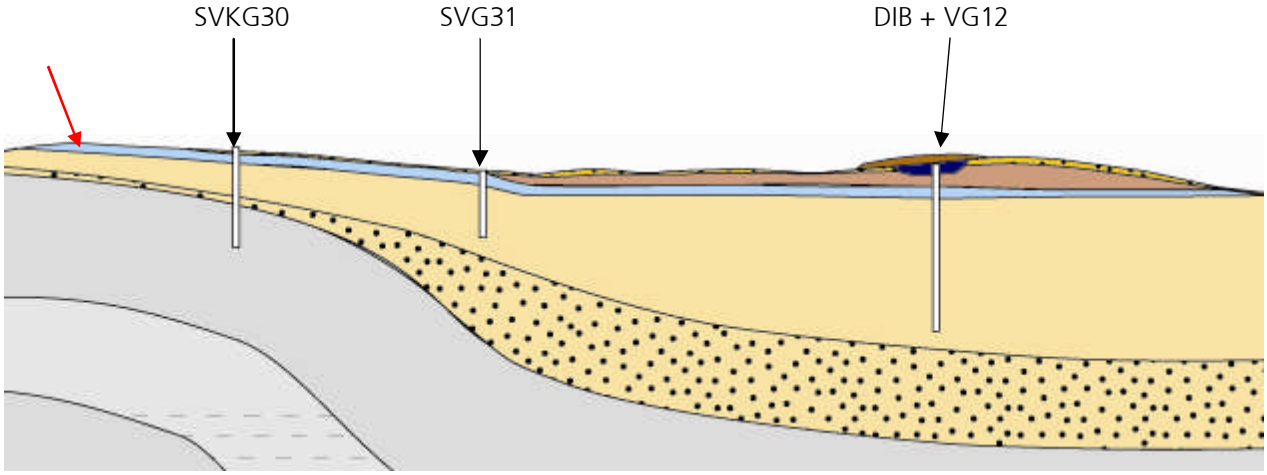


Figure 3 : Extrait de l'annexe 2 du rapport [10], Coupe géologique N-S de la région de Bonfol

La forme synclinale présente un plongement axial vers le nord-est. Ainsi, les couches profondes perméables (sables à Hipparions ou autres couches perméables) de la série des Vosges arrivent en surface ou à faible profondeur sur une ligne qui passe depuis les étangs de Bonfol jusqu'à l'ouest de la STEP, puis tourne vers le nord et le N-E globalement en direction de SVG31 au sud duquel on retrouve en géophysique, une épaisse couche sableuse.

A l'endroit où ces couches sableuses arrivent près de la surface, sous la formation des cailloutis du Sundgau, les membres argileux imperméables de la série des Vosges disparaissent et les eaux contenues dans les cailloutis du Sundgau descendent dans les corps sableux dont le potentiel hydraulique est en équilibre avec le système karstique régional ou avec des membres aquifères plus profond du Tertiaire.

6. RÉSULTATS D'ANALYSES DANS LA SÉRIE DES VOSGES

La demande des experts est la suivante : Faire une synthèse des résultats d'analyses des substances typiques de la DIB (DOC, Br- et VOC) dans les points de mesure de la série des Vosges (VG12, VG53, SVKG30, SVG31 et SVG32)

Les résultats des analyses de 2002 à 2004 dans ces forages, se trouvent aux tableaux des annexes C1 à C4. **Elles révèlent que ces points d'eau ne sont pas pollués par la DIB**. Seules quelques traces de composés organiques ont été détectés sporadiquement dans certains forages. Ces traces présentent des concentrations

très basses et ne se retrouvent pas systématiquement. Elles peuvent provenir d'influences diverses comme une erreur d'analyse ou une contamination non contrôlable de l'échantillon lors des prélèvements, ou de son conditionnement en laboratoire. VG53 situé à l'est de la décharge a montré le 5 mai 2003 (première analyse dans ce forage) la présence de 5 µg/l de dioxane. Cette teneur est probablement à relier à une influence des travaux de forage qui ont apporté vers le corps sableux observé par ce piézomètre, quelques traces du dioxane présent à faibles concentrations dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau au nord-est de la décharge (voir explications de ces concentrations dans les rapports annuels de surveillance). Cette substance n'a plus été retrouvée lors de la campagne d'analyses de 2004, lors de laquelle, aucune trace de polluant n'a été observée dans les forages de la série des Vosges.

7. CARTE PIÉZOMÉTRIQUE

La demande des experts est la suivante :

Refaire une carte piézométrique actuelle avec tous les forages SG, y compris GS34 et SG37 qui manquent sur la carte de novembre 2004.

Réponse :

Une carte sera réalisée en prenant en compte l'ensemble des points de mesures encore accessibles et qui, pour certains ne sont plus mesurés systématiquement. Pour cela, une nouvelle campagne de mesures spécifiques doit être réalisée. La carte en question sera présentée à la séance du 8 mars.

8. RÉFÉRENCES

[1] Décharge industrielle de Bonfol, Rapport de synthèse hydrogéologique 2002, CSD, 2002

[2] Décharge industrielle de Bonfol, campagne de forages 2001, CSD, 2003

[3] Rapport sur les résultats des forages G11-13, H. Schmassmann, 1965

[4] Décharge industrielle de Bonfol, campagne de forages 2003, Logs de forages

[5] Sondermülldeponie Bonfol - Risikoanalyse Stand 1991, CSD, 1992

[6] SMDB, Risikoanalyse Bonfoltone, Band 1, Datensammlung, Band 2 Anhänge, CSD, 1988

[7] bci Betriebs-AG, Rapport annuel DIB 2003, 23 juillet 2004

[8] Bericht über die Sondermüll-Deponie Bonfol, H. Schmassmann, 1982

[9] Assainissement définitif de la décharge industrielle de Bonfol, projet d'assainissement selon OSites, rapport annexe 6.1 "Chemische Risikobewertung", BMG, 2003

[10] Assainissement définitif de la décharge industrielle de Bonfol, projet d'assainissement selon OSites, rapport annexe 4, "Géologie et hydrogéologie", IG DIB, 2003

CSD Ingénieurs et géologues SA

Porrentruy, le 24 février 2005 J. Thierrin G. Monin

ANNEXE A

COMPOSITION DU TOIT DE LA SÉRIE DES VOSGES

Composition du toit de la série des Vosges

Forage	Distance et direction depuis la DIB	Epaisseur recoupée de la série des Vosges*	épaisseur de terrains argileux [%]	épaisseur de limons argileux [%]	épaisseur de limons [%]	Épais-seur de sables [%]	Épais-seur de graviers [%]
SG11 **	Bord nord	11.1 m **	75	-	-	23	2
VG12 ***	25 m E	17.2 m **	100	-	-	-	-
SVKG30	950 m N-NW	20.9 m	6	-	-	91.5	2.5
SVG31	500 m N-NW	32.3 m	83	-	-	17	-
SVG32	1000 m NE	11.4 m	100	-	-	-	-
SG13	16 m SW	2.95 m	100	-	-	-	-
SG15	3 m NE	4.8 m	98	-	-	2	-
SG16	46 m W	4.92 m	100	-	-	-	-
SG17	80 m SW	1.4 m	100	-	-	-	-
SG18	4 m SW	3.64 m	100	-	-	-	-
SG18b	8 m SW	5.0 m	80		20		
SG19	7 m W	1.6 m	100	-	-	-	-
SG19b	7 m W	8.3	75			25	
SG20	35 m N-NW	2.6 m	100	-	-	-	-
SG25	150 m NW	3.9 m	96	-	4	-	-
SG33	200 m W-NW	2.0 m	100	-	-	-	-
SG34	200 m SW	12 m	15.0	85.0	-	-	-
SG35	100 m S	3.1	26	45	-	29	-
SG36	120 m E-SE	2.1 m	100	-	-	-	-
SG37	220 m E-NE	1.8	22	78	-	-	-
SG38	120 m N	3.8 m	18.4	81.6	-	-	-
SG44	25 m N-NW	5.7	86.5	-	-	10	3.5
SG45	86 m N	5.0	93.0	-	-	6.0	-
SG46	100 m NW	7.45	38.0	-	-	62	-
SG47	21 m NW	5.7	79.0	10	-	11	-
SG48	21 m NW	2.75	100	-	-	-	-
SG49	80 m W	5	100	-	-	-	-
SG50	170 m NW	6.3	51	14	3	32	-
SG59	80 m N	5.6	90	10	-	-	-
SG52	100 m N	4.4	100	-	-	-	-
VG53	90 m NE	6.0	100	-	-	-	-

*: Epaisseur de la série des Vosges (SV) recoupée dans le forage

: **SG11: Contrairement à Schmassmann, la base de la série des cailloutis du Sundgau est placée à la cote 452 m, à la base d'une petite couche de graviers et non à 453.50. Jusqu'à 11 mètres en dessous des cailloutis du Sundgau, la série des Vosges recoupée dans ce forage, contient 75 % d'argiles

***: **VG12:** jusqu'à la profondeur de 37.0 m, contient une couche argileuse épaisse de plus de 17 m sous les cailloutis du Sundgau.

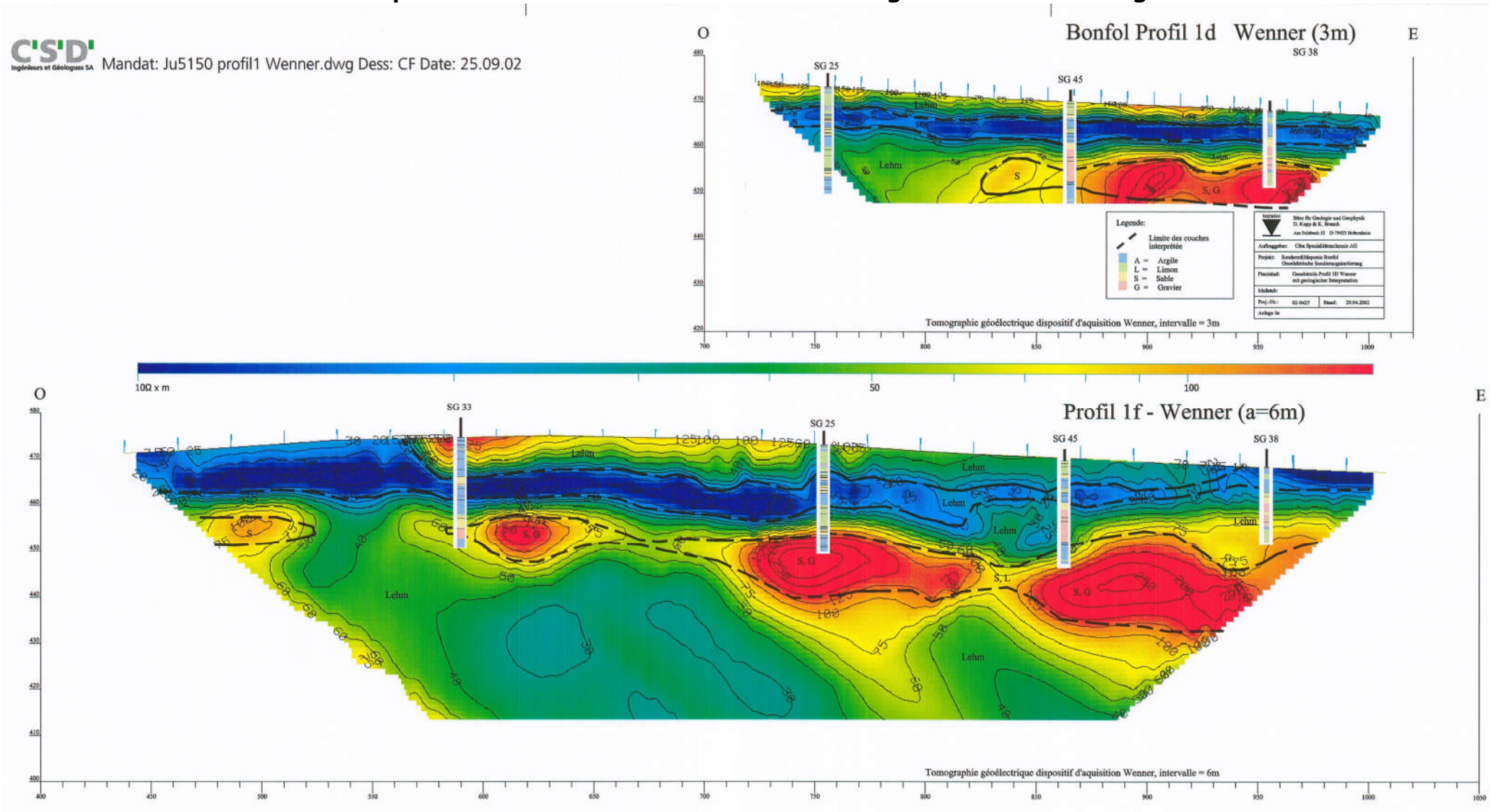
ANNEXE B

PROFILS DE TOMOGRAPHIE GÉOÉLECTRIQUE

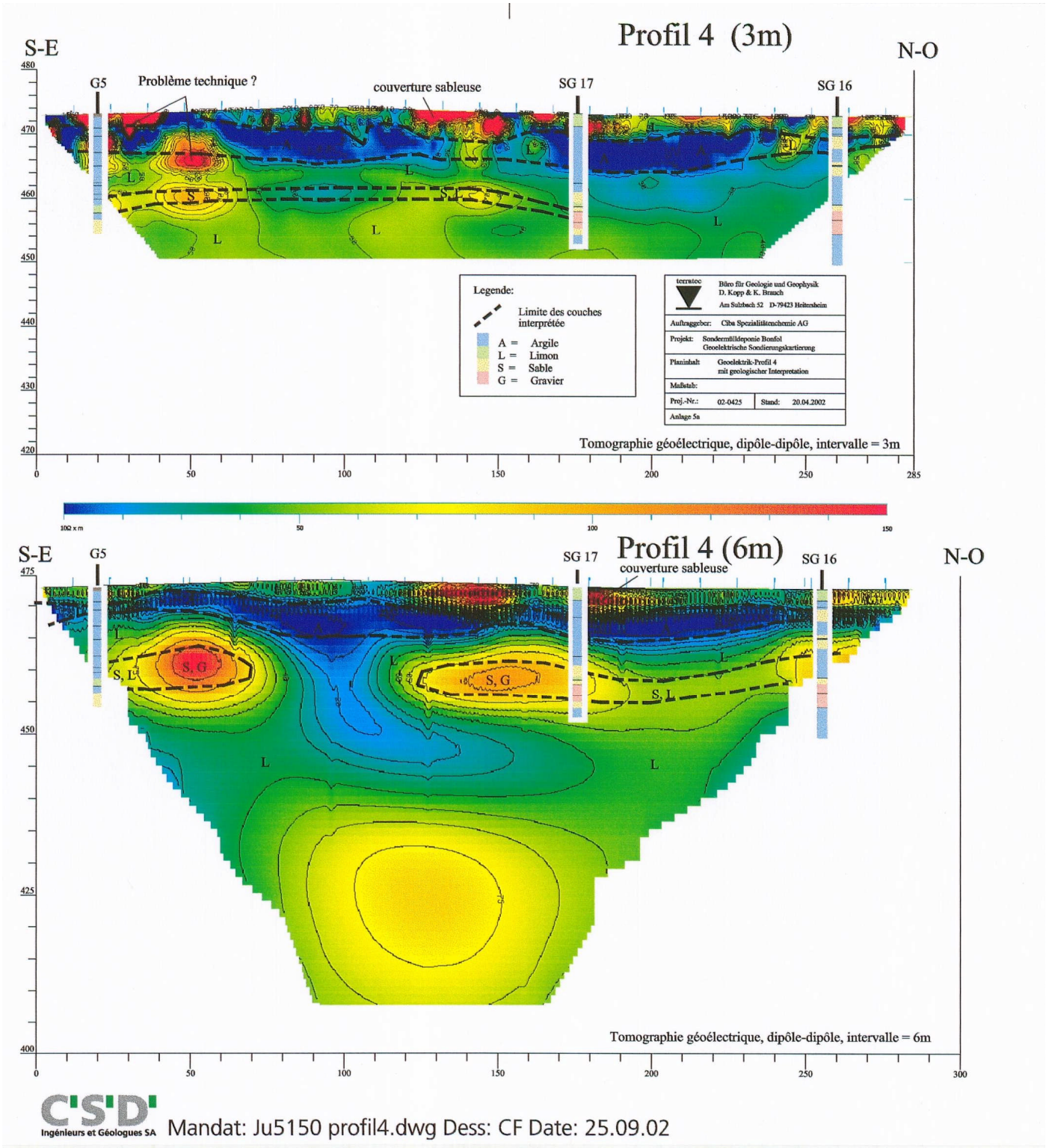
Annexe B1 : Profil 1 avec dispositif Wenner au nord de la DIB le long de l'écran de forages N° 2

Annexe B2 : Profil 4 avec dispositif dipôle – dipôle à l'ouest de la DIB

Annexe B1 :Profil 1 avec dispositif Wenner au nord de la DIB le long de l'écran de forages N° 2



Annexe B2 :Profil 4 avec dispositif dipôle – dipôle à l'ouest de la DIB



ANNEXE C

TABLEAU DES DONNÉES CHIMIQUES POUR LES FORAGES VG12, VG53, SVKG30, SVG31 ET SVG32 ENTRE 2002 ET 2004

Annexe C1 : Analyses des 28 et 29 mai 2002

Annexe C2 : Analyses des 5 et 6 mai 2003

Annexe C3 : Analyses du 15 octobre 2003

Annexe C4 : Analyses des 4 et 5 mai 2004

Annexe C1 : Analyses des 28 et 29 mai 2002

Date	Nom	Unité	SVG31	SVG32	SVKG30	G12 (29.05.02	VG53
28.05.2002	Niveau	m	22.45	12.62	>34	36.84	
28.05.2002	Conductivité électrique à 25°C	µS/cm	414	270	374	373	
28.05.2002	Bromure	mg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
28.05.2002	DOC	mg/l	3.6	0.6	0.4	0.4	
28.05.2002	Oxygène dissous	mg/l	6.3	5.8	6.1	0.8	
28.05.2002	pH		6.9	6.8	6.8	7.4	
28.05.2002	Température	°C	12.4	12.6	12.6	11.9	
28.05.2002	1,1,1-trichloréthane	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	
28.05.2002	1,1,2,2-tétrachloréthane	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	
28.05.2002	1,1,2-trichloréthane	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	
28.05.2002	1,1-dichloréthène	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	
28.05.2002	1,2,3-trichlorobenzène	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	
28.05.2002	1,2,4-trichlorobenzène	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	
28.05.2002	1,2-dibrométhane	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	
28.05.2002	1,2-dichloréthane	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	
28.05.2002	1,2-cis-dichloréthène	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	
28.05.2002	1,2-trans-dichloréthène	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	
28.05.2002	1,2-dichlorobenzène	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	
28.05.2002	1,2-dichloropropane	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	
28.05.2002	1,3,5-trichlorobenzène	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	
28.05.2002	1,3-dichlorobenzène	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	
28.05.2002	1,4-dichlorobenzène	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	
28.05.2002	2,3-dichloraniline	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
28.05.2002	2,4,6-triméthylaniline	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
28.05.2002	2,4/2,5-dichloroaniline	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
28.05.2002	2,4-diméthylaniline	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
28.05.2002	2,4-dinitrotoluène	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
28.05.2002	2,6-diméthylaniline	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
28.05.2002	2,6-dinitrotoluène	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
28.05.2002	2-chloraniline	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
28.05.2002	3,4-dichloraniline	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
28.05.2002	4-chloraniline	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
28.05.2002	Acétate d'éthyle	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
28.05.2002	Aniline	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
28.05.2002	Benzène	µg/l	**2.1**	<0.1	<0.1	<0.1	
28.05.2002	Bromoforme	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	
28.05.2002	Chlorobenzène	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	
28.05.2002	chloroforme	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	
28.05.2002	chlorure de vinyle	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	
28.05.2002	Cumène	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
28.05.2002	dichlorométhane	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	
28.05.2002	Dioxane	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
28.05.2002	m-Nitrotoluène	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
28.05.2002	m-toluidine	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
28.05.2002	N,N-diméthylaniline	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
28.05.2002	n-butylbenzène	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
28.05.2002	Nitrobenzène	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
28.05.2002	o-Nitrotoluol	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
28.05.2002	o-Toluidine	µg/l	**0.05**	<0.1	<0.1	<0.1	
28.05.2002	p-nitrotoluoène	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
28.05.2002	p-toluidine	µg/l	**0.05**	<0.1	<0.1	<0.1	
28.05.2002	tétrachloréthene	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	
28.05.2002	tétrachlorméthane	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	
28.05.2002	Tétrahydrofurane	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
28.05.2002	Toluène	µg/l	**1**	<0.1	<0.1	<0.1	
28.05.2002	trichloroéthène	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	
28.05.2002	Xylène	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	**2.6**	

Annexe C2 : Analyses des 5 et 6 mai 2003

Date	Nom	Unité	SVG31	SVG32	SVKG30	VG12 (06.05.03)	VG53
05.05.2003	Niveau	m	22.1	11.78	38.66	36.55	23.16
05.05.2003	Conductivité électrique à 25°C	µS/cm	365	246	379	396	224
05.05.2003	Bromure	mg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2
05.05.2003	DOC	mg/l	2.6	0.6	0.4	0.5	0.5
05.05.2003	Oxygène dissous	mg/l	5.1	5	8.4	4.1	6.9
05.05.2003	pH		8.1	7.1	7.1	6.7	6.6
05.05.2003	Température	°C	11.5	10.7	11.6	10.8	9.8
05.05.2003	1,1,1-trichloréthane	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
05.05.2003	1,1,2,2-tétrachloréthane	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
05.05.2003	1,1,2-trichloréthane	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
05.05.2003	1,1-dichloréthène	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
05.05.2003	1,2,3-trichlorobenzène	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
05.05.2003	1,2,4-trichlorobenzène	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
05.05.2003	1,2-dibrométhane	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
05.05.2003	1,2-dichloréthane	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
05.05.2003	1,2-cis-dichloréthène	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
05.05.2003	1,2-trans-dichloréthène	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
05.05.2003	1,2-dichlorobenzène	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
05.05.2003	1,2-dichloropropane	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
05.05.2003	1,3,5-trichlorobenzène	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
05.05.2003	1,3-dichlorobenzène	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
05.05.2003	1,4-dichlorobenzène	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
05.05.2003	2,3-dichloraniline	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
05.05.2003	2,4,6-triméthylaniline	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
05.05.2003	2,4-diméthylaniline	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
05.05.2003	2,4-dinitrotoluène	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
05.05.2003	2,6-diméthylaniline	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
05.05.2003	2,6-dinitrotoluène	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
05.05.2003	2-chloraniline	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
05.05.2003	3,4-dichloraniline	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
05.05.2003	3-chloraniline	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
05.05.2003	4-chloraniline	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
05.05.2003	Acétate d'éthyle	µg/l	<1	<1	<1	<1	<1
05.05.2003	Aniline	µg/l	<0.1	**0.65**	<0.1	<0.1	<0.1
05.05.2003	Benzène	µg/l	<1	<1	<1	<1	<1
05.05.2003	Bromoforme	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
05.05.2003	Chlorobenzène	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
05.05.2003	Chloroforme	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
05.05.2003	Chlorure de vinyle	µg/l	<1	<1	<1	<1	<1
05.05.2003	Cumène	µg/l	<1	<1	<1	<1	<1
05.05.2003	Dichlorométhane	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
05.05.2003	Dioxane	µg/l	<2	<2	<2	<2	**5**
05.05.2003	m-Nitrotoluol	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
05.05.2003	m-toluidine	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
05.05.2003	N,N-diméthylaniline	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
05.05.2003	n-butylbenzène	µg/l	<1	<1	<1	<1	<1
05.05.2003	Nitrobenzène	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
05.05.2003	o-nitrotoluène	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
05.05.2003	o-toluidine	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
05.05.2003	p-nitrotoluoène	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
05.05.2003	p-toluidine	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
05.05.2003	tétrachloréthene	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
05.05.2003	tétrachlorométhane	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
05.05.2003	Tétrahydrofurane	µg/l	<1	<1	<1	<1	<1
05.05.2003	Toluène	µg/l	<1	<1	**2**	<1	<1
05.05.2003	Trichloroéthène	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
05.05.2003	Xylène	µg/l	<1	<1	<1	<1	<1

Annexe C3 : Analyses du 15 octobre 2003

Date	Nom	Unité	SVG31	SVG32	SVKG30	VG12	VG53
15.10.2003	Conductivité à 20°C	µS/cm	411		333		238
15.10.2003	Bromure	mg/l	<0.1		<0.1		0.1
15.10.2003	DOC	mg/l	2.7		<0.1		0.1
15.10.2003	DBO5	mg/l	1		0.9		0.9
15.10.2003	pH		7.62		7.48		7.09
15.10.2003	Matières en suspension	mg/l	20		24		26
15.10.2003	Potassium	mg/l	1.2		0.6		0.4
15.10.2003	Sodium	mg/l	4.7		4.8		4.5
15.10.2003	Calcium	mg/l	80		70		44
15.10.2003	Magnésium	mg/l	4.4		1.9		3.2
15.10.2003	Chlorures	mg/l	14		6		3.7
15.10.2003	NH4+	mg/l	0.01		0.01		0.005
15.10.2003	Nitrates	mg/l	71		10.4		0.5
15.10.2003	N-Kjeldahl	mg/l	0.2		<0.1		<0.1
15.10.2003	Nitrites	mg/l	0.475		0.001		<0.001
15.10.2003	N-Organique	mg/l	0.1		<0.1		<0.1
15.10.2003	N-Total	mg/l	16.3		2.3		0.1
15.10.2003	Oxydabilité	mg/l	13		1.6		1.4
15.10.2003	Phosphore	mg/l	0.123		0.129		0.129
15.10.2003	Phosphore total	mg/l	0.23		0.17		0.17
15.10.2003	Sulfate	mg/l	13		2.4		2.2
15.10.2003	TOC	mg/l	3.1		0.2		0.2
15.10.2003	1,1,1-trichloréthane	µg/l	<0.1		<0.1		<0.1
15.10.2003	1,1,2,2-tétrachloréthane	µg/l	<0.1		<0.1		<0.1
15.10.2003	1,1,2-trichloréthane	µg/l	<0.2		<0.2		<0.2
15.10.2003	1,1-dichloréthane	µg/l	<0.1		<0.1		<0.1
15.10.2003	1,1-dichloréthène	µg/l	<0.1		<0.1		<0.1
15.10.2003	1,1-dichloropropène	µg/l	<0.05		<0.05		<0.05
15.10.2003	1,2,3-trichlorobenzène	µg/l	<0.05		<0.05		<0.05
15.10.2003	1,2,3-trichloropropane	µg/l	<0.2		<0.2		<0.2
15.10.2003	1,2,4-trichlorobenzène	µg/l	<0.05		<0.05		<0.05
15.10.2003	1,2,4-triméthylbenzène	µg/l	<0.05		<0.05		<0.05
15.10.2003	1,2-dibrométhane	µg/l	<0.2		<0.2		<0.2
15.10.2003	1,2-Dibromo-3-chloropropane	µg/l	<1		<1		<1
15.10.2003	1,2-dichloréthane	µg/l	<0.2		<0.2		<0.2
15.10.2003	1,2-dichloréthène (cis)	µg/l	<0.1		<0.1		<0.1
15.10.2003	1,2-dichloréthène (trans)	µg/l	<0.1		<0.1		<0.1
15.10.2003	1,2-dichlorobenzène	µg/l	<0.05		<0.05		<0.05
15.10.2003	1,2-dichloropropane	µg/l	<0.1		<0.1		<0.1
15.10.2003	1,3,5-triméthylbenzène	µg/l	<0.05		<0.05		<0.05
15.10.2003	1,3-dichlorobenzène	µg/l	<0.05		<0.05		<0.05
15.10.2003	1,3-dichloropropane	µg/l	<0.2		<0.2		<0.2
15.10.2003	1,4-dichlorobenzène	µg/l	<0.05		<0.05		<0.05
15.10.2003	2,2-dichloropropane	µg/l	<0.2		<0.2		<0.2
15.10.2003	2-chlorotoluène	µg/l	<0.05		<0.05		<0.05
15.10.2003	4-chlorotoluène	µg/l	<0.05		<0.05		<0.05
15.10.2003	Acétate d'éthyl	µg/l	<0.1		<0.1		<0.1
15.10.2003	Benzène	µg/l	<0.1		<0.1		<0.1
15.10.2003	Bromobenzène	µg/l	<0.1		<0.1		<0.1
15.10.2003	Bromochlorométhane	µg/l	<0.2		<0.2		<0.2
15.10.2003	Bromodichlorométhane	µg/l	<0.2		<0.2		<0.2
15.10.2003	Bromoform	µg/l	<0.2		<0.2		<0.2
15.10.2003	Bromométhane	µg/l	<0.2		<0.2		<0.2
15.10.2003	Chlorobenzène	µg/l	<0.05		<0.05		<0.05
15.10.2003	Chloroéthane	µg/l	<0.2		<0.2		<0.2
15.10.2003	chloroforme	µg/l	<0.1		<0.1		<0.1
15.10.2003	Chlorométhane	µg/l	<1		<1		<1
15.10.2003	chlorure de vinyle	µg/l	<0.2		<0.2		<0.2
15.10.2003	cis-1,3-Dichloropropène	µg/l	<0.2		<0.2		<0.2
15.10.2003	Cumol	µg/l	<0.05		<0.05		<0.05
15.10.2003	Dibromochlorométhane	µg/l	<0.2		<0.2		<0.2
15.10.2003	Dibromométhane	µg/l	<0.2		<0.2		<0.2
15.10.2003	Dichlorodifluorométhane	µg/l	<1		<1		<1
15.10.2003	dichlorométhane	µg/l	<0.1		<0.1		<0.1
15.10.2003	Hexachlorobutadiène	µg/l	<0.05		<0.05		<0.05
15.10.2003	m/p-Xylène	µg/l	<0.1		<0.1		<0.1
15.10.2003	MTBE	µg/l	<0.1		<0.1		<0.1
15.10.2003	Naphthalène	µg/l	<0.2		<0.2		<0.2
15.10.2003	n-butylbenzène	µg/l	<0.05		<0.05		<0.05
15.10.2003	n-Propylbenzol	µg/l	<0.05		<0.05		<0.05
15.10.2003	o-Xylol	µg/l	<0.1		<0.1		<0.1
15.10.2003	Phénols totaux	µg/l	**0.04**		**0.04**		**0.02**
15.10.2003	p-Isopropyltoluène	µg/l	<0.05		<0.05		<0.05
15.10.2003	sec-Butylbenzène	µg/l	<0.05		<0.05		<0.05
15.10.2003	Styrène	µg/l	<0.05		<0.05		<0.05
15.10.2003	tert-Butylbenzène	µg/l	<0.05		<0.05		<0.05
15.10.2003	tétrachloréthene	µg/l	<0.05		<0.05		<0.05
15.10.2003	tétrachlorméthane	µg/l	<0.05		<0.05		**0.08**
15.10.2003	Toluène	µg/l	<0.1		<0.1		<0.1
15.10.2003	trans-1,3-Dichloropropène	µg/l	<0.2		<0.2		<0.2
15.10.2003	trichloroéthène	µg/l	<0.1		<0.1		**0.37**
15.10.2003	Trichlorofluorométhane	µg/l	<0.1		<0.1		<0.1

Annexe C4 : Analyses des 4 et 5 mai 2004

Date	Nom	Unité	SVG31	SVG32	SVKG30	VG12 (05.05.04)	VG53 (05.05.04)
04.05.2004	Niveau piézométrique	m	22.88	13.98	38.62	37.14	23.6
04.05.2004	Conductivité électrique à 25°C	µS/cm	390	432	364	411	237
04.05.2004	Bromure	mg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.5	<0.5
04.05.2004	DOC	mg/l	2.68	0.46	0.2	0.3	0.29
04.05.2004	Oxygène dissous	mg/l		1.12	7.74	1.5	5.2
04.05.2004	pH		7.84	6.93	7.45	7.65	6.88
04.05.2004	température	°C	10.4	9.4	11.7	12	8.8
04.05.2004	1,1,1-trichloréthane	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
04.05.2004	1,1,2,2-tétrachloréthane	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
04.05.2004	1,1,2-trichloréthane	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
04.05.2004	1,1-dichloréthane	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
04.05.2004	1,1-dichloréthène	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
04.05.2004	1,2,3-trichlorobenzène	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
04.05.2004	1,2,4-trichlorobenzène	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
04.05.2004	1,2-dibrométhane	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
04.05.2004	1,2-dichloréthane	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
04.05.2004	1,2-cis-dichloréthène	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
04.05.2004	1,2-trans-dichloréthène	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
04.05.2004	1,2-dichlorobenzène	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
04.05.2004	1,2-dichloropropane	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
04.05.2004	1,3,5-trichlorobenzène	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
04.05.2004	1,3-dichlorobenzène	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
04.05.2004	1,4-dichlorobenzène	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
04.05.2004	2,3-dichloraniline	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
04.05.2004	2,4,6-triméthylaniline	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
04.05.2004	2,4/2,5-dichloroaniline	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
04.05.2004	2,4-diméthylaniline	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
04.05.2004	2,4-dinitrotoluène	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
04.05.2004	2,6-diméthylaniline	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
04.05.2004	2,6-dinitrotoluène	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
04.05.2004	2-chloraniline	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
04.05.2004	3,4-dichloraniline	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
04.05.2004	4-chloraniline	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
04.05.2004	Acétate d'éthyle	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
04.05.2004	Aniline	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
04.05.2004	Benzène	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
04.05.2004	Bromoforme	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.1	<0.1
04.05.2004	Chlorobenzène	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
04.05.2004	Chloroforme	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
04.05.2004	Cumène	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
04.05.2004	Dichlorométhane	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
04.05.2004	Dioxane	µg/l	<2	<2	<2	<2	<2
04.05.2004	m/p-Xylène	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
04.05.2004	m-Nitrotoluol	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
04.05.2004	m-toluidine	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
04.05.2004	N,N-diméthylaniline	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
04.05.2004	n-butylbenzène	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
04.05.2004	Nitrobenzène	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
04.05.2004	o-Nitrotoluol	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
04.05.2004	o-toluidine	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
04.05.2004	o-xylène	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
04.05.2004	p-nitrotoluoène	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
04.05.2004	p-toluidine	µg/l	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
04.05.2004	Tétrachloréthene	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
04.05.2004	Tétrachlorméthane	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
04.05.2004	Tétrahydrofurane	µg/l	<1	<1	<1	<1	<1
04.05.2004	Toluène	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
04.05.2004	Trichloroéthène	µg/l	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5

Betriebs-AG

Assainissement définitif de la décharge industrielle de Bonfol

Compléments selon exigences de la prise de position OEPN du 08.09.04

2. Géologie et hydrogéologie

2.4 Hydrodynamisme de la Série des Vosges

Annexe 2.4.2

C'S'D' Ingénieurs et Géologues SA

Ingénieurs
Géologues
Spécialistes de l'environnement
Rue de la Chaumont 13, CP 134
2900 Porrentruy 2

Téléphone: +41 (0)32-466 58 58
Fax: +41 (0)32-466 57 21
E-mail: porrentruy@csd.ch
Internet: www.csd.ch

Betriebs-AG

Décharge industrielle de Bonfol (DIB)

Essai de pompage dans le forage VG53

19 août 2005

C'S'D' Ingénieurs et Géologues SA

Ingénieurs
Géologues
Spécialistes de l'environnement
Rue de la Chaumont 13, CP 134
2900 Porrentruy 2

Téléphone: +41 (0)32-466 58 58
Fax: +41 (0)32-466 57 21
E-mail: porrentruy@csd.ch
Internet: www.csd.ch

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION 1

2. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE 1

2.1 Géologie et équipement du forage 1

2.2 Fluctuations piézométriques 2

3. RÉSULTATS DE L'ESSAI 4

3.1 Conditions de départ 4

3.2 Déroulement de l'essai 4

3.3 Contrôle des fluctuations piézométriques dues à la pression atmosphérique 5

3.4 Qualité chimique des eaux 5

3.5 Interprétation 6

3.5.1 Paramètres hydrauliques 6

3.5.2 Connexion avec l'aquifère des cailloutis du Sundgau 7

4. CONCLUSIONS 7

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Résultats des analyses chimiques de l'eau du forage VG53 durant l'essai de pompage. 6

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Extrait du log de forage de VG 53. 1

Figure 2 : Fluctuations piézométriques dans SG36 et VG53. 2

Figure 3 : Fluctuations piézométriques dans les forages suivis durant l'essai de pompage en VG53. 3

Figure 4 : Courbe de rabattement durant l'essai de pompage en VG53. 4

ANNEXES

ANNEXE A Plan de situation

1. INTRODUCTION

Le forage VG53 intercepte un corps sableux de la série des Vosges. Afin de déterminer les conditions hydrogéologiques régnant dans ce corps, il a été décidé en séance du 25.05.05 à l'OEPN, de procéder à un essai de pompage d'au moins 10 jours. Cet essai s'est déroulé du 8 au 22 juin 2005.

2. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

2.1 Géologie et équipement du forage

Initialement, le forage 53 devait être implanté dans les cailloutis du Sundgau. Suite à la découverte d'une lentille sableuse aquifère lors du contrôle usuel des matériaux du toit de la Série des Vosges, la décision a été prise de mettre en place un piézomètre au niveau de ce corps sableux (VG53). Un second forage a ensuite été implanté dans les cailloutis du Sundgau comme prévu initialement (SG53).

Les données de tomographie géoélectrique réalisée en 2003 indiquaient la présence de terrains électriquement conducteurs sous une couche peu perméable en dessous des cailloutis du Sundgau. Le forage VG53 a confirmé ces données.

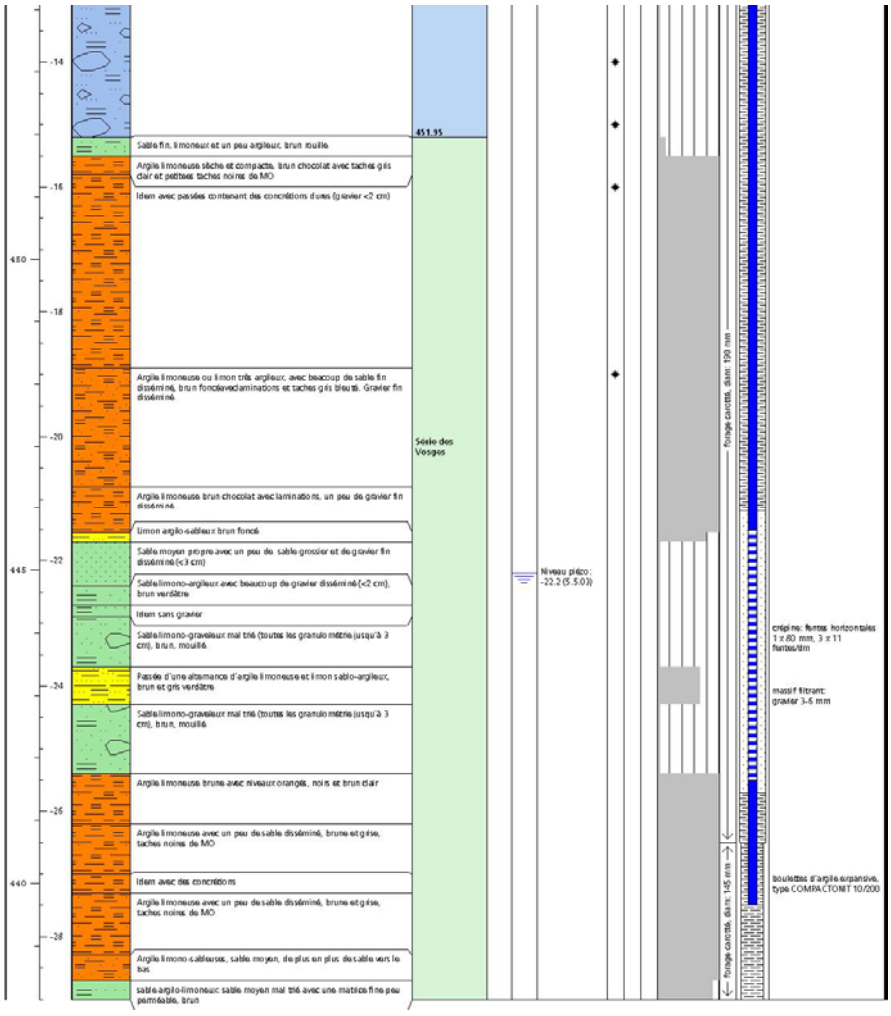


Figure 1 : Extrait du log de forage de VG 53.

De -15.5 m à -21.5 m, sous les cailloutis du Sundgau, le forage a rencontré 6 m d'argile compacte du sommet de la série des Vosges. Ensuite, entre -21.5 m et -25.4 m, il a traversé le corps sableux détecté par les investigations géophysiques. Plus profondément, le forage a encore traversé plus de 3 m d'argiles avant de rencontrer à nouveau des sables (Figure 1). Le tube de 4½'' est crépiné uniquement au droit du corps sableux, entre -21.5 et -25.5 m. Le reste du tube est aveugle et isolé par un bouchon d'argile gonflante

2.2 Fluctuations piézométriques

La Figure 2 donne un aperçu des fluctuations piézométriques dans le forage SG36, utilisé comme référence dans les cailloutis du Sundgau, et le forage VG53. Les fluctuations de niveau piézométrique dépendantes de la pression atmosphériques sont très semblables (amplitude et timing) dans tous les piézomètres des cailloutis du Sundgau[1]. On constate cependant qu'elles sont sensiblement plus élevées (environ 50 %) dans le forage VG53 (série des Vosges), avec des fluctuations atteignant souvent 30 cm sur un cycle haute pression – basse pression alors que la baisse saisonnière de novembre 2004 à avril 2005 est de l'ordre de 20 cm seulement. Les mesures en continu sont effectuées à l'aide d'appareils de type « Orphimedes » commercialisés par l'entreprise OTT.

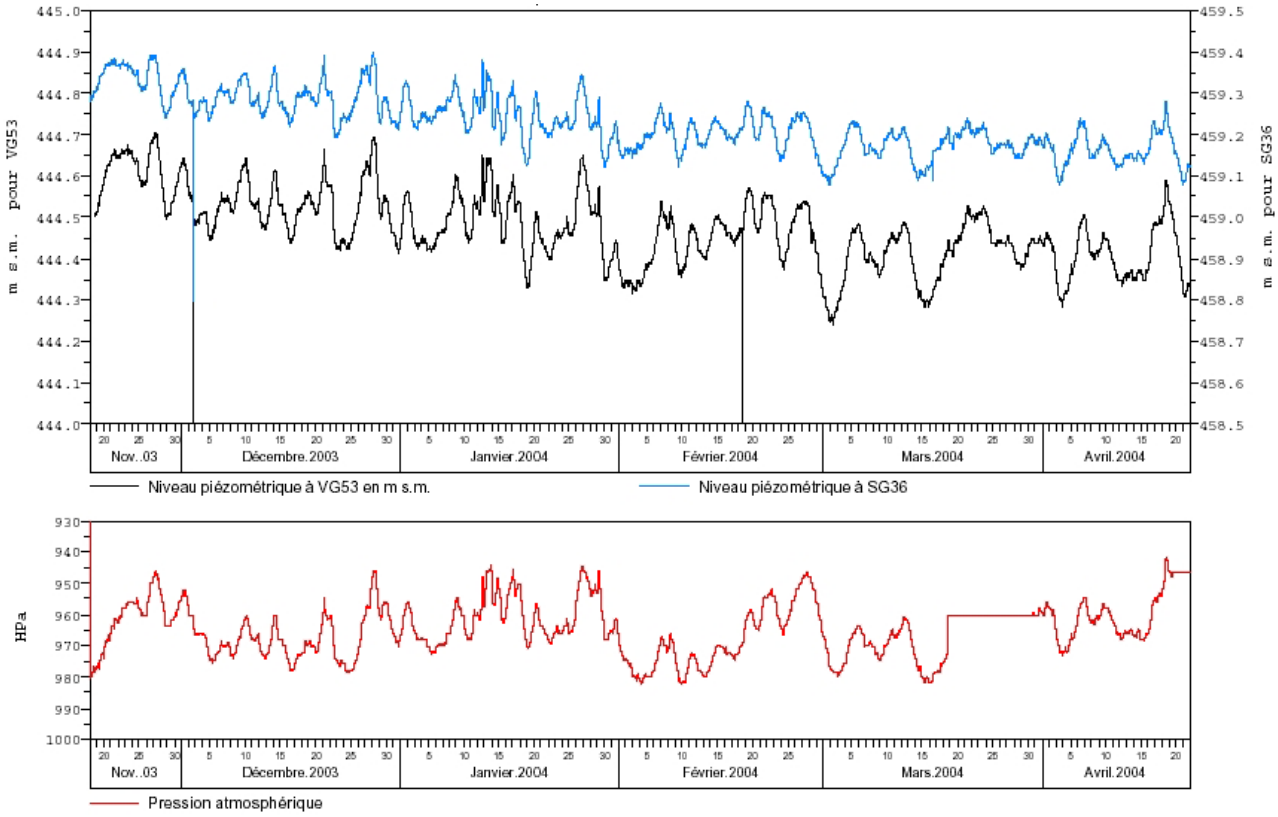


Figure 2 : Fluctuations piézométriques dans SG36 et VG53.

Durant l'essai de pompage, les fluctuations piézométriques aux forages sont indiquées à la Figure 3. Une ligne continue indique la mesure en continu à l'aide d'un Orphimedes et une ligne avec points discrets indique un suivi par des mesures journalières à la sonde piézométrique. Les remarques suivantes sont à faire par rapport aux niveaux piézométriques présentés sur cette figure :

- Au forage SVG31, l'Orphimedes a été installé suite à un pompage pour prélèvement effectué par l'OEPN. Le niveau piézométrique n'était pas encore complètement remonté au moment de l'installation de l'appareil.

[1] CSD, 2002 : Décharge industrielle de Bonfol (DIB) – Rapport de synthèse hydrogéologique 2002, 24 mai 2002.

- A ce même forage, le niveau piézométrique a subi le 14 juin une nette influence des précipitations. Ceci indique qu'une partie du renouvellement de l'eau à ce forage dépend d'un impluvium peu protégé comme celui des cailloutis du Sundgau affleurant en surface aux alentours de ce forage. Il est très probable que le forage lui-même crée un by-pass entre cette formation et les niveaux perméables de la Série des Vosges plus profonds.
- Toujours à SVG31, l'Orphimedes est tombé en panne le 17.06.05 ; Des mesures ponctuelles ont été réalisées dès le 22.06.05.

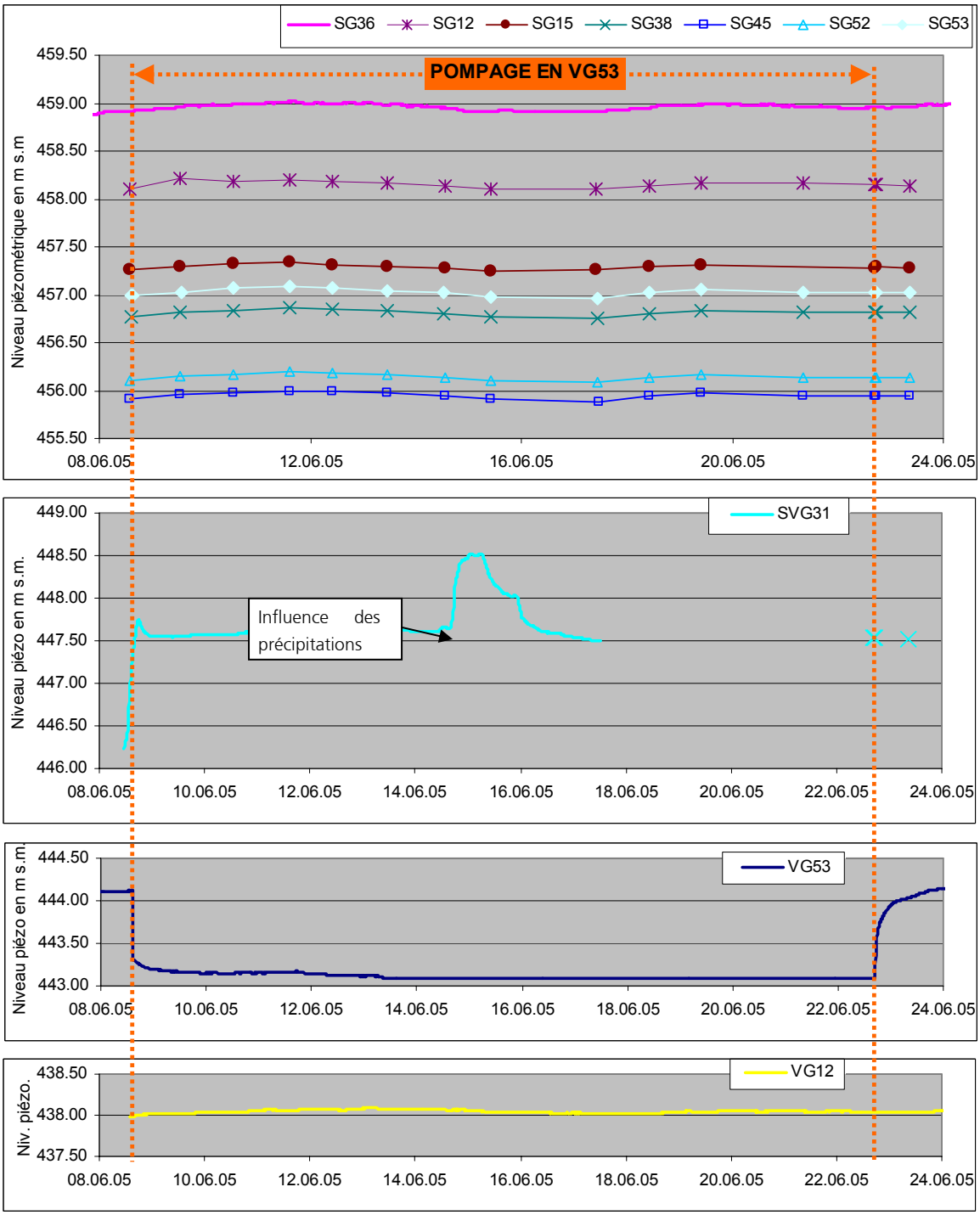


Figure 3 : Fluctuations piézométriques dans les forages suivis durant l'essai de pompage en VG53.

- Dans les piézomètres suivis par des mesures journalières (SG12, SG15, SG38, SG45, SG52 et SG53), la fluctuation observée suit celle mesurée en continu au forage SG36. Elle dépend essentiellement des

variations de pression atmosphérique (Figure 2). La baisse des niveaux observée au milieu de la période de pompage est donc totalement indépendante du pompage lui-même

- Durant la période de l'essai de pompage, la fluctuation maximale de niveau dépendant des variations de pression atmosphérique, est de 10 cm dans les cailloutis du Sundgau. A SVG31, une fluctuation dépendante de la pression atmosphérique analogue semble aussi se dessiner. Dans VG12, une influence de la pression atmosphérique est également observable. Les fluctuations semblent cependant montrer un décalage temporel et une amplitude inférieure à celle observée dans les cailloutis du Sundgau.
- Durant l'essai de pompage à VG53, aucun autre piézomètre parmi les points d'eau observés, ne montre une influence due à l'essai

3. RÉSULTATS DE L'ESSAI

3.1 Conditions de départ

Pour des raisons techniques, la pompe n'avait pas pu être placée au fond du forage; durant l'essai, la crépine de la pompe se situait approximativement à la cote de 442.75 m d'altitude, ce qui n'a pas permis de pomper avec un rabattement maximal au puits. Néanmoins, les résultats de l'essai sont significatifs.

3.2 Déroulement de l'essai

Afin de contrôler l'éventuelle influence de l'essai de pompage sur d'autres piézomètres, des appareils de mesure automatique du niveau piézométrique de type « Orphimedes » ont été placés le 8.07.05, dans les forages suivants : VG53, VG12 et SVG31. Le piézomètre SG36 était déjà équipé de tels appareils depuis août 2000 et le VG53 avait été observé précédemment (Figure 2).

La courbe de rabattement est donnée à la Figure 4. Depuis le 13 juin à 8 heures 40, jusqu'à l'arrêt de la pompe le 22.06.05 à 17 h 13, le niveau est descendu en dessous de la cote mesurable à cause de la présence de la pompe, le niveau se trouvant entre 443.09, sommet de la pompe et 442.75, cote supérieure de la crépine de la pompe. En effet, durant l'essai, le niveau n'est pas descendu au niveau de la crépine (écoulement toujours laminaire à la sortie du tuyau d'exhaure.)

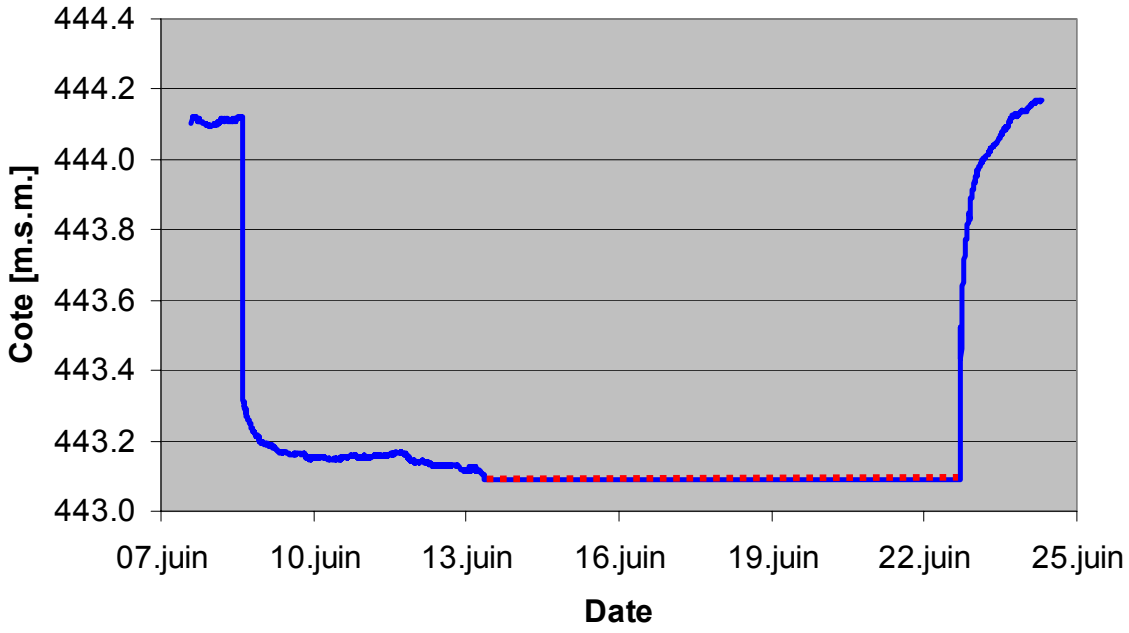


Figure 4 : Courbe de rabattement durant l'essai de pompage en VG53.

Les principales données concernant cet essai sont les suivantes :

- Début de l'essai: 08.06.05, 14 h 23; fin essai: 22.06.05, 17 h 13.
- Durée de l'essai: 14 j, 2 h et 50 min.
- Débit pompé: 5.0 l/min, constant donnant un volume total pompé de 102 m^3 à la fin de l'essai.
- Rabattement stabilisé entre 443.09 m et 442.75 m après 5 j.
- Autre(s) piézomètre(s) influencé(s) par l'essai : aucun.

Lors de l'arrêt du pompage, le clapet anti-retour de la pompe n'a pas fonctionné, causant une vidange dans le forage de l'eau contenue dans le tuyau d'exhaure. Ceci explique un petit pic de remontée rapide dans les minutes qui suivent l'arrêt du pompage.

3.3 Contrôle des fluctuations piézométriques dues à la pression atmosphérique

Le niveau piézométrique en VG53 réagit avec la pression atmosphérique, avec une amplitude plus importante que dans les cailloutis du Sundgau (cf. § 2.2). Cependant, une correction du niveau en fonction des fluctuations piézométriques durant l'essai s'est avéré infructueuse, la courbe de rabattement résultant de plusieurs types de corrections n'ayant pas de sens. Pour cette raison, la courbe non corrigée présentée à la Figure 4, a été utilisée pour la définition de la perméabilité.

Malgré cela, on constate que le niveau piézométrique est plus haut après le pompage qu'avant. Cela s'explique par une différence de pression atmosphérique (pression plus faible le 22 juin que le 8 juin).

3.4 Qualité chimique des eaux

Durant l'essai, un échantillon d'eau a été prélevé chaque jour. Un prélèvement sur deux a été analysé. Les résultats de ces analyses sont donnés au Tableau 1.

On constate qu'aucune substance n'a été trouvée à une concentration dépassant la limite de quantification.

Tableau 1 : Résultats des analyses chimiques de l'eau du forage VG53 durant l'essai de pompage.

*gem. Altl.verordnung 814.680									
Probenbezeichnung >		VG53	VG53	VG53	VG53	VG53	VG53	VG53	VG53
	Grenzwert*	08.06.2005	10.06.2005	12.06.2005	14.06.2005	16.06.2005	18.06.2005	20.06.2005	22.06.2005
	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
1,1-Dichlorethen	30	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Dichlormethan	20	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
trans-Dichlorethen		<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
cis-1,2-Dichlorethen		<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Chloroform	40	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
1,2-Dichlorethan	3	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
1,1,1-Trichlorethan	2'000	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Tetrachlorkohlenstoff	2	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
1,2-Dichlorpropan	5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Trichlorethen	70	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
1,1,2-Trichlorethan		<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
1,2-Dibromethan	0,05	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Tetrachlorethen	40	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Chlorbenzol	700	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Bromoform		<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
1,1,2,2-Tetrachlorethan	1	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
1,3-Dichlorbenzol	3'000	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
1,4-Dichlorbenzol	10	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
1,2-Dichlorbenzol	3'000	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
1,3,5-Trichlorbenzol		<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
1,2,4-Trichlorbenzol	400	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
1,2,3-Trichlorbenzol		<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Tetrahydrofuran		<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Dioxan		<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Vinylchlorid		<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Bromid (mg/l)		<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2

3.5 Interprétation

3.5.1 Paramètres hydrauliques

Les informations suivantes sont tirées de cet essai :

- **Perméabilité** : La perméabilité calculée à l'aide de la formule de Porchet est de 6.0E-5 m/s. Il s'agit d'une perméabilité relativement élevée pour ce type de matériau. Elle correspond à la valeur de perméabilité la plus élevée mesurée pour des sables dans le secteur de la décharge de Bonfol.
- **Zone de capture** : A la fin de l'essai, le diamètre de la zone de capture considérée comme cylindrique s'élevait à approximativement 18 m.
- **Limites d'alimentation** : Durant l'essai, l'apport d'eau n'a pas été restreint par une limite d'alimentation. Ceci est attesté par la courbe de remontée rapide et la stabilisation du niveau à une valeur plus ou moins constante pour un débit d'exhaure très constant. Le corps sableux recoupé par VG53 a donc des dimensions relativement grandes (>30 à 50 m de diamètre compte tenu du faible débit pompé), ce qui peut correspondre au résultat de l'étude géophysique. Celle-ci indique la présence d'un corps sableux dans la série des Vosges sur une longueur d'environ 250 m, entre les secteurs des forages SG36 et SG38. Si l'on extrapole ces dimensions, il est possible que le corps sableux trouvé en VG53 soit en connexion avec le corps sableux important trouvé entre les profondeurs de 28.5 et 47.8 m dans le forage SVG11.

3.5.2 Connexion avec l'aquifère des cailloutis du Sundgau.

L'essai de pompage en VG53 confirme que le corps sableux recoupé par VG53 est hydrauliquement totalement déconnecté de l'aquifère des cailloutis du Sundgau. Différents éléments permettent de soutenir cette affirmation :

- Le potentiel hydraulique à l'intérieur du corps sableux de VG53 est d'environ 10 m inférieur à celui observé dans les cailloutis du Sundgau.
- Ces deux niveaux aquifères sont séparés par 6 mètres d'argile compacte que l'on peut considérer comme imperméable.
- Le pompage dans la lentille sableuse n'a eu strictement aucune influence sur le niveau des cailloutis du Sundgau dans les 7 forages suivis durant l'essai.
- Les fluctuations piézométriques dues aux variations de la pression atmosphérique observées en VG53 et dans les cailloutis du Sundgau ne sont pas semblables. Elles présentent des différences dans les amplitudes et de légers décalages temporels. Ces fluctuations sont par contre identiques et synchronisées dans l'ensemble des forages SG dont les niveaux piézométriques ont été suivis de manière continue durant ces dernières années.
- Les cailloutis du Sundgau bénéficiant d'un régime d'alimentation très amorti et lent, il est certain qu'une couche très peu perméable sépare l'aquifère des cailloutis du Sundgau du corps sableux de VG53. Si une connexion, formée du type de sables observés en VG53, existait entre ces deux corps aquifères, il suffirait d'une surface de 20 m^2 pour vider totalement l'aquifère des cailloutis du Sundgau (débit sous la DIB : 105 m^3/j) vers le corps sableux de la série des Vosges.

4. CONCLUSIONS

L'essai de pompage en VG53 a mis en évidence que le corps sableux recoupé par VG53 est d'assez grande dimensions (supérieure à 30 - 50 m de diamètre, confirmant les informations de la géophysique qui indiquent la présence d'un corps sableux sur au moins 250 m de long entre SG38 et SG36). Il apporte l'information que ce corps sableux possède une perméabilité relativement élevée pour des sables, à savoir 6.0E-5 m/s. Il confirme également que ce corps sableux ne peut pas être en contact direct avec l'aquifère des cailloutis du Sundgau car ce dernier se viderait alors dans la série des Vosges. Les résultats des analyses indiquent que l'eau du corps sableux de VG53 n'est pas polluée par des composants organo-volatils en provenance de la DIB.

Si un nouvel essai de pompage devait avoir lieu à ce puits, nous recommandons d'abaisser le niveau de la pompe.

CSD Ingénieurs et Géologues SA

J. Thierrin P. Brulhart

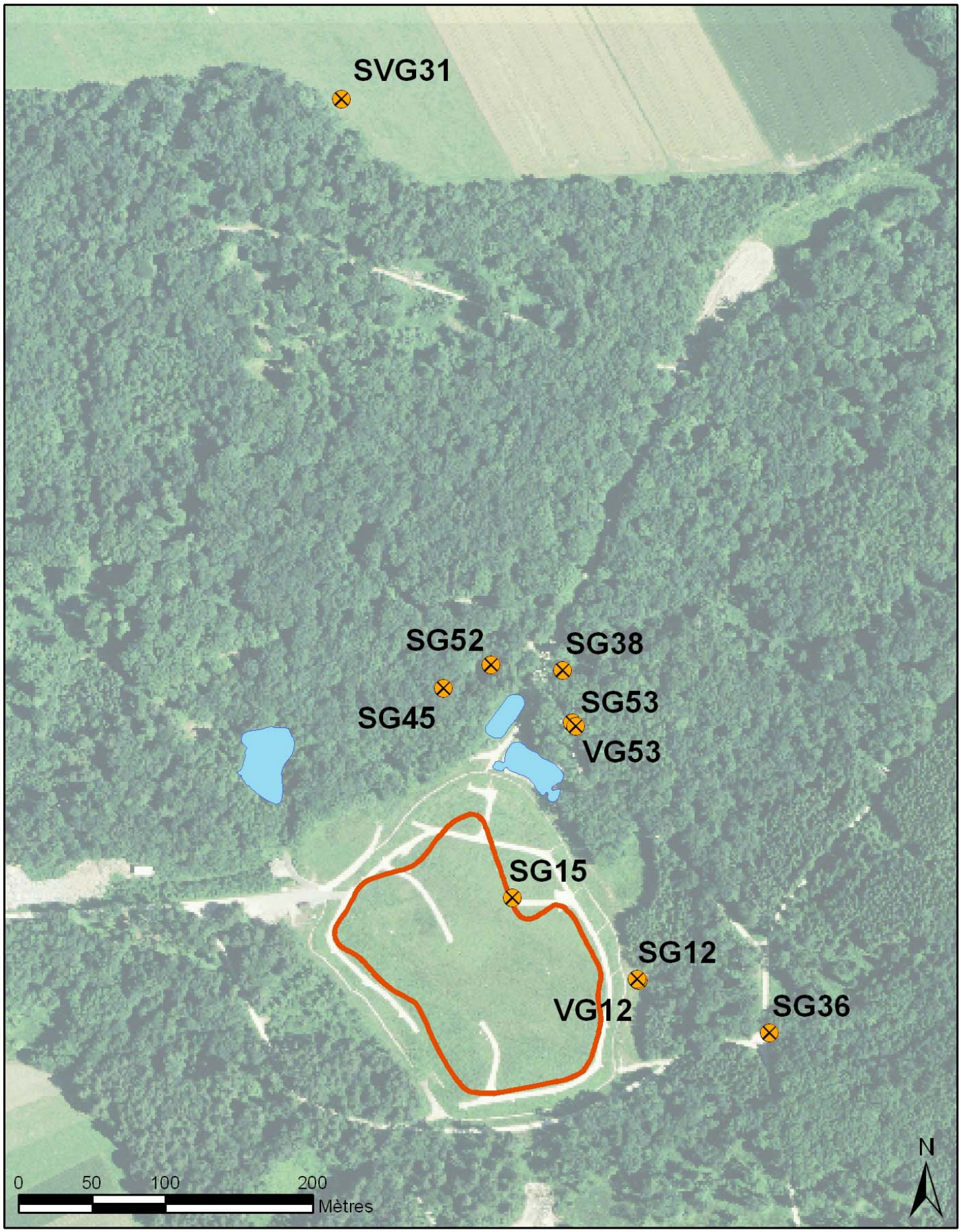
Collaborateur: G. Monin

Porrentruy, le 19 août 2005
W:\MANDATS\Bonfol\JU5153-2005\Géol-Hydrogéologie\VG53\Rapport essai pompage VG53-2005-V2.doc

ANNEXE A

PLAN DE SITUATION

Situation des forages suivis en continu durant le pompage en VG53



Légende

Forages | Etangs | Décharge industrielle

C'S'D'
Ingénieurs et Géologues SA

Betriebs-AG

Assainissement définitif de la décharge industrielle de Bonfol

Compléments selon exigences de la prise de position OEPN du 08.09.04

2. Géologie et hydrogéologie

2.4 Hydrodynamisme de la Série des Vosges

Annexe 2.4.3

JURA CH RÉPUBLIQUE ET CANTON DU JURA
DÉPARTEMENT DE L'ENVIRONNEMENT ET DE L'ÉQUIPEMENT

OFFICE DES EAUX ET DE LA PROTECTION DE LA NATURE

Les Champs Fallat
CH-2882 Saint-Ursanne

t +41 32 420 48 00
f +41 32 420 48 11
oepn@jura.ch

Office des eaux et de la protection de la nature – Les Champs-Fallat, 2882 Saint-Ursanne

BRGM
Service géologique régional Alsace
A l'attention de Monsieur Philippe Elsass
15, Rue du Tanin – Lingolsheim
BP117
F- 67834 TANNERIES cedex
FRANCE

Saint-Ursanne, le 31 mai 2006

DIB. Projet d'assainissement
Prise de position: Exigence E1- 2.4 - hydrodynamisme dans la Série des Vosges

Monsieur,

Pour donner suite à la lettre de bci du 17 mai dernier, concernant sa décision de réaliser trois piézomètres dans la Série des Vosges aux emplacements que nous lui assignerons, nous vous prions de bien vouloir vous prononcer sur ceux que nous avons retenus pour leur implantation.

Ces emplacements avaient été discutés au cours de la séance du 8 mars 2005 entre la bci et nos experts du Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel (CHYN), et vous avaient également été ensuite présentés au cours de notre rencontre du 25 mai 2005.

1. Rappel de l'exigence 2.4. Hydrodynamisme de la série des Vosges :

Des piézomètres devront être posés dans la série des Vosges dans le but d'augmenter les connaissances sur les écoulements. Une coordination entre la bci, l'OEPN et le BRGM devra être engagée pour le positionnement des forages.

2. But fixé par l'OEPN :

Il s'agit d'approfondir les connaissances hydrogéologiques régionales pour disposer d'un modèle conceptuel cohérent concernant le transfert des eaux à travers la partie supérieure de la série des Vosges (selon PV n° 3 du 03.02.05). Trois piézomètres supplémentaires dans la série des Vosges, dans lesquels il sera nécessaire de conduire divers essais hydrauliques, sont proposés:

→ Pour augmenter, dans une proportion très raisonnable, les connaissances piézométriques actuellement très lacunaires dans les zones sableuses supérieures de cette formation,

→ Pour confirmer ou infirmer l'absence d'infiltrations verticales significatives dans cette formation à partir des Cailloutis du Sundgau dans la région de la DIB,

→ Pour confirmer ou infirmer les hypothèses émises concernant la continuité hydraulique (verticale et horizontale) entre les niveaux sableux de cette formation,

→ Pour consolider le dimensionnement du dispositif de sécurité en levant les inconnues sur les écoulements en profondeur, tant en intensité qu'en direction,

→ Pour réaliser un modèle conceptuel des écoulements régionaux.

3. Emplacements proposés pour l'implantation des 3 piézomètres supplémentaires

3.1 Premier piézomètre supplémentaire: à coté de SG 46

Le but de ce piézomètre est de confirmer ou d'infirmer l'existence d'infiltrations diffuses verticales de polluants de la nappe des cailloutis du Sundgau vers la Série des Vosges.

Importance d'un piézomètre dans ce secteur :

- Acquérir des données complémentaires sur le panache contaminé qui s'étend dans les Cailloutis du Sundgau à partir de SG19 vers SG46, SG50 et SG33.
- Vérifier la présence de connexions hydrauliques entre les Cailloutis du Sundgau et la partie supérieure de la Série des Vosges. La coupe géologique du forage SG46 indique la présence d'une couche sableuse d'environ 5 m au toit de la série des Vosges sous une couche argileuse inférieure à 1 m.
- Réaliser des essais de pompage afin de vérifier si la densité et la profondeur des barrières hydrauliques sont adéquates pour intercepter totalement une pollution.

3.2 Deuxième piézomètre supplémentaire: entre VG53 et SVG31

Il s'agira de confirmer ou d'infirmer la continuité hydraulique des couches sableuses dans les 10 mètres supérieurs de la Série des Vosges, présumée sur de relativement grandes distances.

Importance d'un piézomètre dans ce secteur :

- Acquérir des données fondamentales par piézométrie et essais de pompage dans la zone qui s'étend au Nord de la DIB.

3.3 Troisième piézomètre supplémentaire: entre la STEP et SVP91

A proximité de la STEP de la DIB, d'anciens sondages, dont les tubes piézométriques sont aujourd'hui détruits, avaient ont montré que dans cette zone:

- la Série des Vosges était particulièrement sableuse,
- qu'une nappe libre s'y développait (continuité hydraulique),
- que les gradients hydrauliques étaient importants.

D'après les informations transmises par CSD (note complémentaire du 24 février 2005), le piézomètre SVP91, qui était situé à 200 m à l' W-SW de la DIB, présentait probablement le niveau de décharge de l'aquifère des Cailloutis du Sundgau dans un niveau sableux au sommet de la Série des Vosges. SVP91 ayant été détruit, il s'agira de confirmer cette hypothèse.

Importance d'un piézomètre dans ce secteur :

- Déterminer par piézométrie et essais de pompage, les caractéristiques hydrogéologiques de la nappe de la Série des Vosges dans la zone à l' W-SW de la DIB.

Nous vous serions reconnaissants de nous transmettre votre réponse le plus rapidement possible, idéalement avant la mi-juin, afin que nous puissions ensuite informer la bci sur les emplacements définitifs qui seront attribués à ces 3 sondages complémentaires.

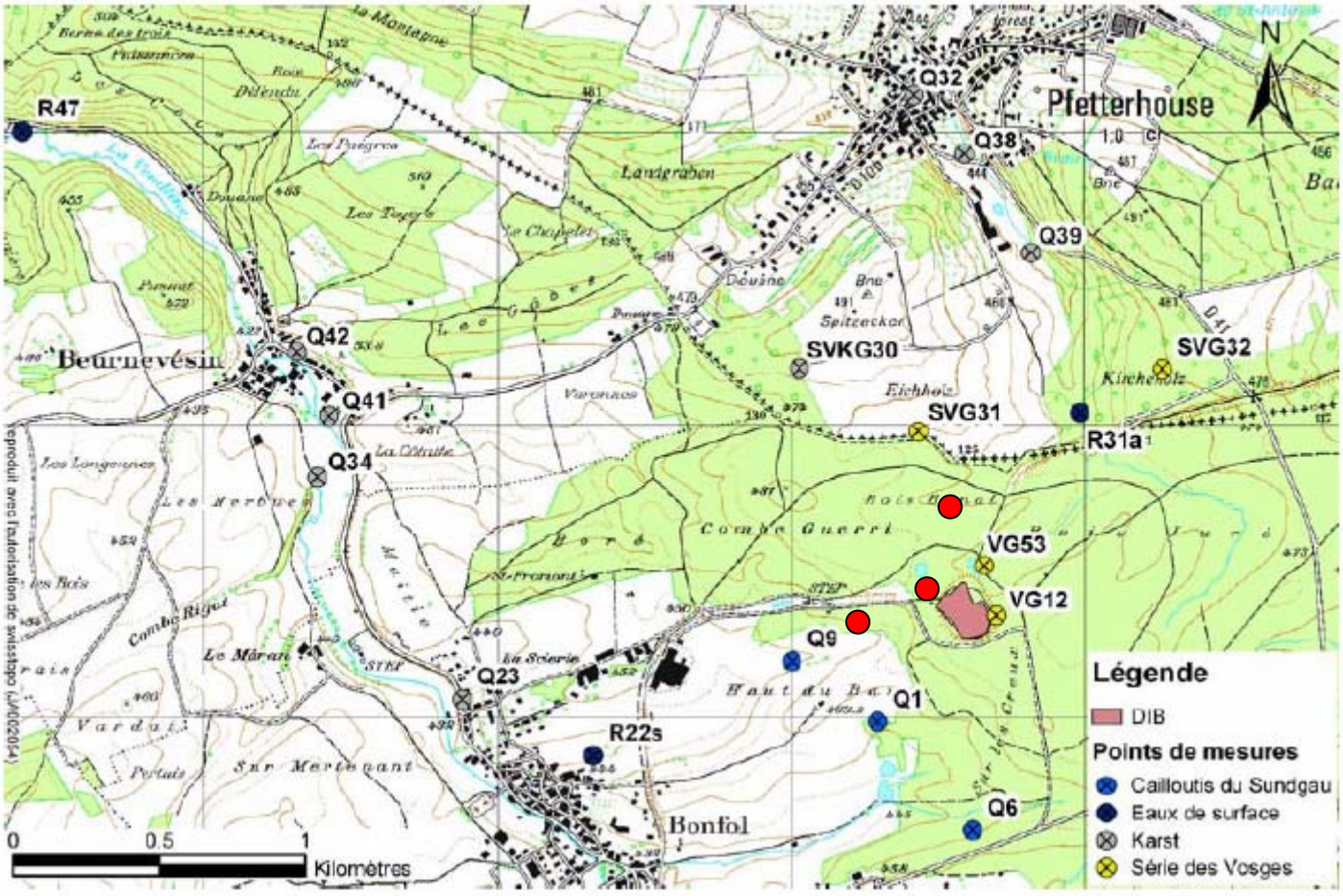
En restant bien entendu à votre disposition pour tout complément d'information, et au besoin pour vous rencontrer si vous le jugez nécessaire, nous vous prions d'agréer, Monsieur, nos meilleures salutations.

Jean-Pierre Meusy
Chef d'Office

Jean Fernex
Coordinateur environnement

Annexe : - plan de situation avec emplacements proposés pour les piézomètres
- Copie du Courrier bci du 17 mai 2006

Copies :- Sous-Préfecture d'Altrich ; M. le Sous-Préfet J. Normand ; 5, rue Ch. de Gaulle ; BP 1021 ; F-68134 Altkirch
- DIREN Alsace ; M. Baptiste Blanchard ; 8, rue Adolphe Seyboth ; F- 67080 Strasbourg
- DDAF du Haut-Rhin ; M. Benjamin Grebot, Cité administrative - Bât. K, F- 68026 Colmar
- bci Betriebs-AG - c/o Ciba Spezialitätenchemie AG ; M. Mikael Fischer ; K-24.2.27 Postfach ; 4002 Basel



● Nouveaux piézomètres dans la série des Vosges proposés

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Copie

Lingolsheim, le 14 juin 2006

OEPN
Les Champs Fallat
CH-2882 SAINT-URSANNE

A l'attention de MM. Meusy et Fernex

N/Réf. : ALS06L015/PE/av
Objet : DIB Projet d'assainissement

Messieurs,

Nous avons bien reçu votre courrier du 31 mai 2006 au sujet des propositions d'implantation de piézomètres dans la Série des Vosges à Bonfol. Nous sommes évidemment d'accord avec cette initiative, puisqu'elle correspond à une demande de la partie française exprimée depuis l'année 2000.

L'objectif de ces piézomètres est d'éclaircir le fonctionnement hydrogéologique de la Série des Vosges et de voir s'il existe des possibilités de transfert de polluants de la décharge vers les eaux souterraines, notamment en vue des travaux d'assainissement. En effet, pour le côté français, un impact éventuel des futurs travaux passerait tout d'abord par les eaux superficielles et ensuite par les eaux souterraines de la Série des Vosges sous-jacente au site, qui sont elles-mêmes en liaison hydraulique avec le karst qui alimente notamment la fontaine de Pfetterhouse.

Notre opinion dès le début était qu'il manquait des informations sur les écoulements dans la Série des Vosges ainsi que des points de mesure pouvant nous alerter sur un impact éventuel sur les eaux souterraines de cette formation.

Les trois ouvrages proposés sont bien argumentés. Le premier piézomètre à côté de SG46 permettra de reconnaître les connections hydrauliques entre les Cailloutis du Sundgau et la partie sableuse de la Série des Vosges la plus proche de la décharge et donc d'évaluer cette possibilité de transfert.

Le second piézomètre proposé entre VG53 et SVG31 correspond à notre demande d'implantation d'ouvrages permettant d'avoir une idée des directions d'écoulement dans la Série des Vosges au Nord de la décharge. Il est possible qu'un seul ouvrage ne permette pas de répondre entièrement à la question, mais ceci devra être apprécié au vu de l'ensemble des résultats de cette campagne.

Le troisième ouvrage concerne les écoulements vers l'Ouest (côté suisse) que l'on peut supposer si cette partie de la Série des Vosges est effectivement beaucoup plus sableuse et perméable. Il n'est pas impossible que les écoulements dans la Série des Vosges divergent avec un exutoire à l'Ouest et un exutoire au Nord.

En conclusion, nous considérons que la campagne de trois piézomètres telle qu'elle est proposée apportera beaucoup d'éclaircissements sur les questions que nous nous posons. Il est cependant possible qu'après l'évaluation des résultats il subsiste une interrogation sur les écoulements vers le côté français au Nord de la décharge, ou qu'il soit mis en évidence une possibilité de transfert pour laquelle il manquerait un ouvrage de surveillance.

Nous vous donnons donc notre approbation sur cette campagne sous réserve que des compléments éventuels puissent être envisagés suite à l'évaluation des résultats.

Je vous prie d'agréer, Messieurs, l'expression de nos sincères salutations.

P Elsass

Philippe ELSASS
Directeur du Service Géologique
Régional Alsace

Copie : B. Blanchard, DIREN Alsace

Betriebs-AG

Assainissement définitif de la décharge industrielle de Bonfol

Compléments selon exigences de la prise de position OEPN du 08.09.04

2. Géologie et hydrogéologie

2.5 Modélisation des écoulements

Annexe 2.5.1

C'S'D' Ingénieurs et Géologues SA

Ingénieurs
Géologues
Spécialistes de l'environnement
Rue de la Chaumont 13, CP 134
2900 Porrentruy 2

Téléphone: +41 (0)32-466 58 58
Fax: +41 (0)32-466 57 21
E-mail: porrentruy@csd.ch
Internet: www.csd.ch

Betriebs-AG

Assainissement définitif de la décharge industrielle de Bonfol

Modélisation mathématique des écoulements souterrains dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau (secteur de la DIB)

15 novembre 2006

C'S'D' Ingénieurs et Géologues SA

Ingénieurs
Géologues
Spécialistes de l'environnement
Rue de la Chaumont 13, CP 134
2900 Porrentruy 2

Téléphone: +41(0)32-465 50 30
Fax: +41(0)32-465 50 31
E-mail: porrentruy@csd.ch
Internet: www.csd.ch

Table des matières

1 Introduction 1

1.1 Contexte 1

1.2 Conditions cadres fixées pour la modélisation 2

1.3 Objectifs de la modélisation 3

1.4 Objectifs de l'essai de pompage simultané 3

2 Essai de pompage multiple de février et mars 2006 4

2.1 Déroulement de l'essai 4

2.2 Monitoring et correction des niveaux piézométriques 4

2.3 Interprétation des données de l'essai 9

2.4 Suivi analytique du pompage simultané 12

3 Construction du modèle 13

3.1 Généralités 13

3.2 Dimensions du modèle géologique 14

3.3 Géométrie des formations hydrogéologiques 15

3.3.1 Stratigraphie 15

3.3.2 Données de base 16

3.3.3 Profils géologiques 17

3.4 Définition des limites du modèle des écoulements 18

3.5 Caractéristiques hydrauliques des cailloutis du Sundgau 21

3.5.1 Piézométrie 21

3.5.2 Sources 23

3.5.3 Perméabilité de l'aquifère 23

3.5.4 Renouvellement des eaux souterraines par infiltration des pluies 24

4 Calibration du volet hydraulique du modèle 26

4.1 Calibration par étapes 26

4.2 Renouvellement de l'eau souterraine 26

4.3 Perméabilités hydrauliques 27

4.4 Direction des écoulements souterrains 29
4.5 Simulation du pompage continu en SG19b 29
4.6 Simulation de l'essai de pompage simultané 32
4.6.1 Surface piézométrique 35
4.7 Résultat de la calibration du modèle hydraulique 36
4.8 Évaluation de la simulation hydraulique 37
4.9 Incertitudes du modèle 38

5 Calibration du volet transport du modèle 39
5.1 Données de base 39
5.2 Simulation du panache SG19 41
5.3 Dispersivité hydraulique et dispersion numérique 45
5.4 Discussion des résultats 46
5.5 Conclusions 48

6 Scénarios de pompage des eaux passant sous la DIB 49
6.1 Scénario 1 : Pompage dans 4 forages existants 50
6.2 Scénario 2 : Pompage dans 5 forages existants 51
6.3 Scénario 3 : Pompage dans 6 forages existants 52
6.4 Conclusions 53

7 Scénarios de contamination des eaux souterraines 54
7.1 Scénario N° 1 de simulation d'une contamination 56
7.2 Scénario N° 2 de simulation d'une contamination 58
7.3 Scénario N° 3 de simulation d'une contamination 61
7.4 Scénario N° 4 de simulation d'une contamination 64
7.5 Scénario N° 5 de simulation d'une contamination catastrophe 68
7.6 Scénario N° 6 de simulation d'une contamination catastrophe 72
7.7 Conclusions concernant les scénarios 1 à 6 78

8 Évaluation du réseau de surveillance actuel 82

9 Conclusions, recommandations et perspectives..... 84

10 Références 90

Liste des annexes

Annexe 1 Carte géologique du périmètre du modèle et piézométrie de l'aquifère des cailloutis du Sundgau 93

Annexe 2 Coupes géologiques Est-Ouest et Nord-Sud à travers le périmètre du modèle 94

Annexe 3 Carte des perméabilités dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau 95

Annexe 4 Carte de l'infiltration potentielle dans la région de la DIB 96

Liste des tableaux

Tableau 1: Données générales de l'essai de pompage. 4

Tableau 2: Interprétation de l'essai sur les 4 premiers jours de pompage (méthode de Jacob). 11

Tableau 3: Résultats des essais de pompage dans les cailloutis du Sundgau. 23

Tableau 4: Classes de perméabilité du modèle mathématique après calage 28

Tableau 5: Rabattements mesurés et calculés aux divers forages surveillés aux alentours de SG19b, suite au pompage de 20 m^3/j dans ce forage. 31

Tableau 6: Modifications de la perméabilité aux forages pour tenir compte des effets de puits. 32

Tableau 7: Amélioration de la simulation de l'essai de pompage par le nouveau calage du modèle. 34

Tableau 8: Résultats du bilan des entrées et sorties après calibration avec pompage en SG19b. 38

Tableau 9: Concentrations mesurées aux divers points d'observation. 42

Tableau 10: Simulation du panache pollué à l'aval de SG19b : Comparaison des concentrations mesurées et calculées aux divers points d'observation. 45

Tableau 11: Données relatives au transfert, obtenues après calibration du modèle sur le panache. 45

Tableau 12: Données principales des scénarios de pompage maximal simulés dans 4, 5, respectivement 6 forages au front de la décharge. 49

Tableau 13: Résultats du bilan des entrées et sorties après calibration pour chaque scénario. 49

Liste des figures

Figure 1: Cotes altimétriques brutes du niveau d'eau aux puits de pompage 5

Figure 2: Cotes altimétriques corrigées du niveau d'eau aux puits de pompage 5

Figure 3: Cotes altimétriques brutes du niveau d'eau aux piézomètres d'observation 6

Figure 4: Cotes altimétriques corrigées du niveau d'eau aux piézomètres d'observation 7

Figure 5: Cotes altimétriques brutes et corrigées du niveau d'eau au piézomètre SG36 8

Figure 6: Cotes altimétriques brutes et corrigées du niveau d'eau au piézomètre SG50 8

Figure 7: Niveau observé durant l'essai au forage d'observation SG48 10

Figure 8: Niveau observé durant l'essai de pompage multiple au forage SG19b 10

Figure 9: Niveau observé durant l'essai de pompage multiple au forage SG44 11

Figure 10: Coupe géologique synthétique au niveau de la DIB. La décharge est implantée dans la série des argiles de Bonfol qui contient des lentilles sableuses. Les argiles reposent sur la formation aquifère des cailloutis du Sundgau. Plus bas, la série des Vosges constitue un aquiclude local. 16

Figure 11: Région du modèle : En blanc, surface active du modèle sur laquelle l'alimentation se fait par infiltration ; en bleu : surface désactivée ; en rouge : limite de potentiel aval du modèle ; ligne noires : topographie avec équidistance 5 m ; lignes bleues : équipotentielles calculées dans les cailloutis du Sundgau ; flèches vertes : directions d'écoulement. 19

Figure 12: Grille de calcul du modèle avec cellules de 36 m x 32 m et raffinement progressif de leur grandeur jusqu'à 0.2 x 0.2 m au voisinage des puits avec comme exemple ici SG19b..... 20

Figure 13: Évolution pluriannuelle de la piézométrie dans les cailloutis du Sundgau et période prise en compte pour établir la moyenne. Exemple des forages SG15 et SG17 et comparaison avec le cumul des précipitations enregistrées entre les 6e et 42e mois qui précède la mesure piézométrique (voir explication dans le texte). Les traits fins en gris correspondent aux moyennes mobiles sur 3 mesures. 22

Figure 14: Classes de réalimentation du modèle (cf. explications dans le texte). 27

Figure 15: Classes de perméabilité du modèle (cf. explications dans le texte et au Tableau 4). 28

Figure 16: Détail montrant la ligne d'écoulement (rouge) à l'aval de SG19b. 29

Figure 17: Distribution des équipotentielles pour le modèle calibré avec pompage en SG19b, avec indication des lignes de courant alimentant ce forage. 30

Figure 18: Distribution des équipotentielles pour le modèle calibré avec pompage en SG19b, détail de la Figure 17 ; temps écoulé entre les flèches sur les lignes d'écoulement : 30 jours. 30

Figure 19: Résultats de la calibration du modèle sur la base des niveaux piézométriques, de gauche à droite et de haut en bas, les forages SG13, SG16, SG19b, SG20 et SG44. 33

Figure 20: Résultats de la calibration du modèle sur la base des niveaux piézométriques aux forages SG15, SG18b, SG19, SG46, SG48, SG50, SG53 et SG59..... 34

Figure 21: Surface piézométrique calculée avant le début de l'essai de pompage, le 17 février 2006..... 35

Figure 22: Surface piézométrique calculée avant la fin de l'essai de pompage, le 6 mars 2006..... 36

Figure 23: Résultats de la calibration du modèle sur la base des niveaux piézométriques..... 37

Figure 24 : Suivi du pompage en SG19b, évolution des concentrations dans l'eau pompée en SG19b depuis le début du pompage..... 40

Figure 25 : Suivi du pompage en SG19b, évolution des concentrations en SG47. 40

Figure 26 : Suivi du pompage en SG19b, évolution des concentrations en SG48. 41

Figure 27 : Simulation du panache pollué à l'aval de SG19b : En haut de gauche à droite, avant le début du pompage en SG19b, jours 365, 730 et 1000 depuis le début de la pollution ; jour 1000 : enclenchement du pompage 20 m3/j en SG19b ; en bas de gauche à droite état aux jours 1030, 1100 et 1500. 43

Figure 28 : Simulation du panache pollué à l'aval de SG19b : jour 0 = début de la contamination ; jour 1000 = début du pompage en SG19b. Courbes d'évolution temporelle de la somme des concentrations en HHV aux divers forages d'observation. 44

Figure 29: Dépendance de la valeur de la dispersivité en fonction de l'échelle d'observation [27] 48

Figure 30: Scénario 1 de pompage simultané maximum aux forages SG13, SG19b, SG44 et SG20..... 50

Figure 31: Scénario 2 de pompage simultané maximum aux forages SG13, SG16, SG19b, SG44 et SG20..... 51

Figure 32: Scénario 3 de pompage simultané maximum aux forages SG13, SG16, SG19b, SG20, SG44 et SG15. 52

Figure 33: Emplacement des forages SG de surveillance de l'aquifère, avec en bleu clair, les points 1 à 6 des scénarios de contamination de l'aquifère depuis la DIB et en jaune, les forages SG60 et SG61 déjà prévus. 54

Figure 34 : Scénario de contamination 1 ; état du panache simulé après 30, 60, 90, 365, 730 et 1000 jours..... 56

Figure 35 : Scénario de contamination 1 : Courbes d'évolution chimique (Σ HHV) aux points d'observation. 57

Figure 36 : Scénario de contamination 2 ; état du panache simulé après 30, 60, 90, 365, 720 et 1000 jours..... 59

Figure 37 : Scénario de contamination 2 : Courbes d'évolution chimique (Σ HHV) aux points d'observation 59

Figure 38 : Scénario de contamination 2 ; zone de capture du forage SG61 (35 m^3/j)..... 60

Figure 39 : Scénario de contamination 2 ; pompage dès le jour 140 à SG61 ; état du panache simulé après 90, 150, 180, 210, 240 et 375 jours. 61

Figure 40 : Scénario de contamination 3 ; état du panache simulé après 30, 60, 90, 365, 720 et 1000 jours..... 62

Figure 41 : Scénario de contamination 3 : Courbes d'évolution chimique (Σ HHV) aux points d'observation 62

Figure 42 : Scénario de contamination 3 ; zone de capture des pompages aux forages SG44 et SG20 (35 m^3/j chacun)..... 63

Figure 43 : Scénario de contamination 3 : pompage dès le jour 140 à SG20 ; état du panache simulé après 180, 240 et 400 jours depuis le début de la pollution. 64

Figure 44 : Scénario de contamination 4 ; état du panache simulé après 30, 60, 90, 365, 720 et 1000 jours. 65

Figure 45 : Scénario de contamination 4 : Courbes d'évolution chimique (Σ HHV) aux points d'observation 65

Figure 46 : Scénario de contamination 4 ; pompage à SG60 (forage prévu) de 35 m^3/j dès le jour 185 ; état du panache simulé après 90, 180, 210, 240, 270 et 410 jours. 67

Figure 47 : Scénario catastrophe 5a par déversement souterrain de liquide durant 2 jours au trou de Laufon ; état du panache simulé après 1 et 30 jours. 68

Figure 48 : Scénario catastrophe 5a par déversement souterrain de liquide durant 2 jours au trou de Laufon : Courbes d'évolution chimique (Σ HHV) au point d'observation SG44. 69

Figure 49 : Scénario catastrophe 5b : Déversement souterrain de liquide durant 100 jours au trou de Laufon ; possibilité d'intercepter les lignes d'écoulement par un pompage simultané maximal de 42 m^3/jour à chacun des forages SG44 et SG20. 71

Figure 50 : Scénario catastrophe 5b : Déversement souterrain de liquide durant 100 jours au trou de Laufon ; possibilité d'intercepter les lignes d'écoulement par un pompage de 42 m^3/jour au forage SG44. 71

Figure 51 : Scénario catastrophe 6a par déversement souterrain de liquide durant 2 jours au dépôt 3 ; état du panache simulé après 10, 90, 150, 210, 270 et 365 jours. 73

Figure 52 : Scénario catastrophe 6a par déversement souterrain de liquide durant 2 jours au dépôt 3 : Courbes d'évolution chimique (Σ HHV) aux points d'observation. 74

Figure 53 : Scénario catastrophe 6b par déversement souterrain de liquide durant 100 jours au dépôt 3 : état du panache simulé après 10, 60, 90, 140, 200 et 260 jours. 75

Figure 54 : Scénario catastrophe 6b par déversement souterrain de liquide durant 100 jours au dépôt 3 : Courbes d'évolution chimique (Σ HHV) aux points d'observation. 76

Figure 55 : Scénario catastrophe 6b au dépôt 3: Zone de capture pour un pompage maximal à SG16 (17 m^3/j), SG19b (50 m^3/j) et SG61 (33 m^3/j)..... 76

Figure 56 : Scénario catastrophe 6b au dépôt 3: Zone de capture pour un pompage maximal à SG16 (16 m^3/j), SG19b (52 m^3/j) et SG46 (40 m^3/j)..... 77

Figure 57: Zones de capture autour de chaque forage, desquelles l'eau a été pompée et échantillonnée pour analyses au cours des divers essais de pompage réalisés entre 2000 et 2004. Deux lignes de courant convergent à SG19b où a lieu un pompage de 20 m^3/j. 82

Figure 58: Localisation (en jaune) des 4 nouveaux forages SG mis récemment en place suite aux recommandations tirées de la présente étude. En violet, le cinquième forage initialement proposé, a du être abandonné pour des raisons de conflits avec les futures infrastructures d'assainissement 87

Figure 59: Lignes de courants pour pompages simultanés dans deux écrans de forages à l'exemple de pompages dans SG16, SG19b et SG46 (tiré de la Figure 56). En vert, les lignes de courant en direction de SG46..... 88

1 Introduction

1.1 Contexte

Le projet d'assainissement définitif de la décharge industrielle de Bonfol (DIB) [1] a été remis par la bci aux autorités cantonales jurassiennes le 4 décembre 2003. Celles-ci ont pris position sur le projet le 8 septembre 2004 et différents compléments d'études ont été demandés [2]. Plusieurs exigences concernent l'aspect « Hydrogéologie » du projet.

La mise à jour en 2005 et 2006 du modèle mathématique des écoulements souterrains dans le secteur de la DIB, établi en 2002 [3], permet d'apporter une réponse au point 2 de l'exigence 2.3 ainsi qu'aux exigences 2.5 et 2.6 des autorités cantonales jurassiennes [2] :

2.3. Hydrodynamisme des Cailloutis du Sundgau

2. *Le réseau de surveillance sera réévalué avec l'OEPN et, si nécessaire, complété, notamment à l'E et au SE.*

2.5. Modélisation des écoulements

1. *L'utilisation d'un modèle performant est indispensable pour la génération de maillages et de conditions limites adéquates et pour retracer les aspects transitoires, tridimensionnels et variablement saturés des écoulements.*
2. *Les conditions limites, telles que les hypothèses, les données, la paramétrisation des variables utilisées, doivent être confirmées pour:*
   a) *la quantification des écoulements locaux et régionaux de la DIB,*
   b) *le dimensionnement et la localisation des forages d'interception.*
3. *La modélisation de sources de pollution sous la DIB sera faite afin d'apporter des connaissances:*
   a) *sur les effets de dilution et de dispersion des Cailloutis du Sundgau,*
   b) *sur la taille du panache étendu en aval,*
   c) *pour l'interprétation des concentrations mesurées sur le terrain.*
4. *L'effet hydraulique des failles et des fractures sur les écoulements régionaux devra être pris en compte.*

2.6. Barrières hydrauliques, vérification de leur efficacité

1. *Afin de vérifier l'efficacité des barrières hydrauliques, les éléments suivants devront impérativement être vérifiés et confirmés par des essais in situ:*
   a) *les débits pouvant être réellement prélevés dans les forages*
   b) *la constance des débits sur une longue durée*
   c) *les distances de rabattement*
   d) *l'homogénéité de l'aquifère du Sundgau*

Ce rapport rend compte des résultats des travaux de calage du modèle mathématique des écoulements et du transport dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau. Il présente également les résultats d'un essai de pompage simultané dans 5 forages en février – mars 2006. Ces travaux ont permis de répondre aux exigences du canton, énumérées ci-dessus.

1.2 Conditions cadres fixées pour la modélisation

Les 3 premiers points de l'exigence 2.5 ont été discutés et précisés de la façon suivante avec les experts du canton du Jura [4 à 7] :

- La modélisation des écoulements souterrains pourra se réduire à celle des écoulements horizontaux dans les cailloutis du Sundgau.
- L'actualisation du modèle sera réalisée sur la base de la nouvelle mensuration des environs de la DIB.
- Les données des forages et des essais de pompage réalisés depuis 2002 seront prises en compte.
- La surface du modèle sera étendue afin d'intégrer la zone de dôme piézométrique située au sud-est de la décharge et de déplacer la limite de potentiel aval le plus en aval possible.
- L'alimentation des cailloutis du Sundgau en amont de la DIB sera simulée par des zones de recharge plutôt que par la mise en place d'une limite de potentiel imposé à l'amont.
- La mise à jour du modèle existant sera effectuée à l'aide d'un logiciel permettant de modéliser les fluctuations de la nappe libre sous l'effet des pompages. Le logiciel Visual Modflow® est suffisamment performant et répond à cette exigence. Toutefois, en cas de nécessité, un autre logiciel pourra être utilisé.

Le dernier point de l'exigence 2.5 est lié aux différents points précités. Les failles et fractures n'ont pas d'influence significative sur les écoulements souterrains dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau à modéliser dans le secteur de la DIB. Seule la zone de fracture de direction globale N-20, passant au droit des installations de la STEP de la décharge, est prise en compte dans le modèle. Elle forme la limite nord-ouest du modèle, au-delà de laquelle, les eaux souterraines quittent l'aquifère des cailloutis du Sundgau.

1.3 Objectifs de la modélisation

- Simulation déterministe des écoulements et du transport dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau, avec comme objectif de tester les barrières hydrauliques existantes.
- Test de scénarios de contamination accidentelle plausibles avant et lors des travaux d'assainissement.
- En fonction de ces scénarios, évaluation de l'étendue probable de la contamination.
- Vérifier si le nombre de forages est suffisant pour assurer la surveillance.
- Définition de la localisation, de la fréquence et de la durée de pompage pour les échantillonnages.
- Définition des mesures d'intervention (pompage) nécessaires pour éviter le transfert d'une éventuelle contamination au-delà des écrans de forages.

1.4 Objectifs de l'essai de pompage simultané

L'objectif poursuivi par l'étude est d'améliorer la fiabilité du modèle mathématique surtout du point de vue du diagnostic hydraulique quantitatif. L'intégration des résultats de l'essai de pompage de février et mars 2006 dans la calibration du modèle mathématique permet d'apporter des précisions quant aux débits qu'il est possible ou nécessaire de pomper en cas d'intervention hydraulique dans l'aquifère.

2 Essai de pompage multiple de février et mars 2006

2.1 Déroulement de l'essai

L'essai de pompage a débuté le 20 février 2006 pour se terminer 14 jours plus tard, le 6 mars 2006. Il s'est fait simultanément dans 5 forages. Un seul palier de pompage avec des débits plausibles, n'aboutissant pas à un assèchement des forages et permettant une mesure en continu des niveaux tout au long de l'essai a été effectué. Durant l'essai, les débits sont restés constants au cours du temps. Il est à noter qu'à SG19b, la pompe actuellement en fonction ne permet pas de pomper plus de 24.5 m^3/j, alors que la valeur préconisée initialement était de 30 m^3/j.

Tableau 1: Données générales de l'essai de pompage.

Forage	SG13	SG16	SG19b	SG20	SG44
Début du pompage	20.02.2006 10:12	20.02.2006 10:51	20.02.2006 10:32	20.02.2006 11:32	20.02.2006 11:12
Fin du pompage	06.03.2006 11:47	06.03.2006 11:57	06.03.2006 12:16	06.03.2006 12:37	06.03.2006 12:27
Durée pompage [jours]	14.07	14.05	14.07	14.05	14.05
Débit moyen [l/min]	8	10	17	16	17
Débit moyen [m³/jour]	11.5	14.4	24.5	23.0	24.5
Volume total pompé [m³]	162	202	344	324	344
Rabattement final approx [cm]	190	100	40	60	170

Les rabattements observés ont fortement varié d'un forage à l'autre. Le plus faible rabattement observé (40 cm dans SG19b) apparaît logique étant donné qu'avant l'essai, 20 m^3/j étaient déjà pompés dans ce forage, en permanence depuis le 25 avril 2002. En SG20, le pompage de 23 m^3/j a occasionné un rabattement total de 60 cm alors qu'en SG13, il se montait à 190 cm pour un débit de 11.5 m^3/j. Ces différences reflètent la variabilité de la transmissivité hydraulique au sein de l'aquifère.

2.2 Monitoring et correction des niveaux piézométriques

Une mesure en continu des niveaux piézométriques a été réalisée dans les 5 forages servant aux pompages ainsi que dans 8 autres piézomètres, à savoir SG15, SG18b, SG19, SG46, SG48, SG49-1, SG53 et SG59.

La mesure en continu dans SG46 n'a pas fourni de résultats interprétables du fait d'une défectuosité technique de l'appareil de mesure ; cependant, les mesures journalières à la sonde de niveau ont permis d'interpréter l'essai aussi à ce point. De même, dans le forage SG49-1, des apports d'eau rapides depuis la surface lors des pluies intenses et de la fonte des neiges, ont perturbé les valeurs mesurées, si bien que la série de mesures n'est pas interprétable dans le cadre de l'essai de pompage.

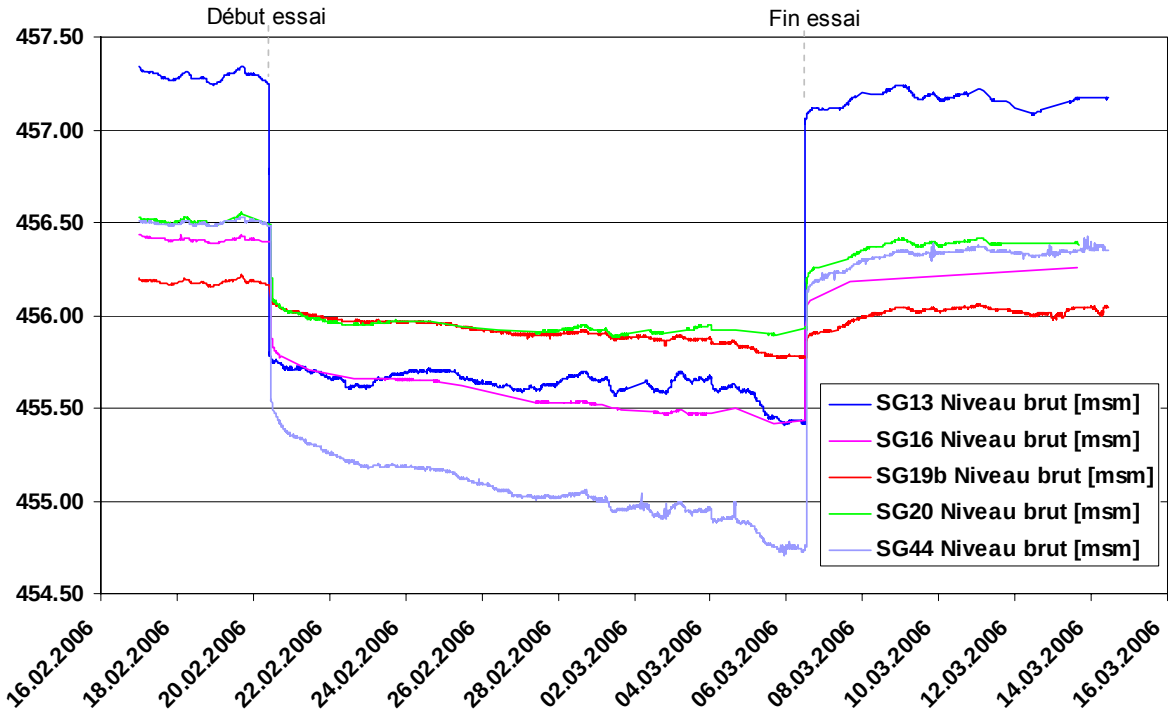


Figure 1: Cotes altimétriques brutes du niveau d'eau aux puits de pompage

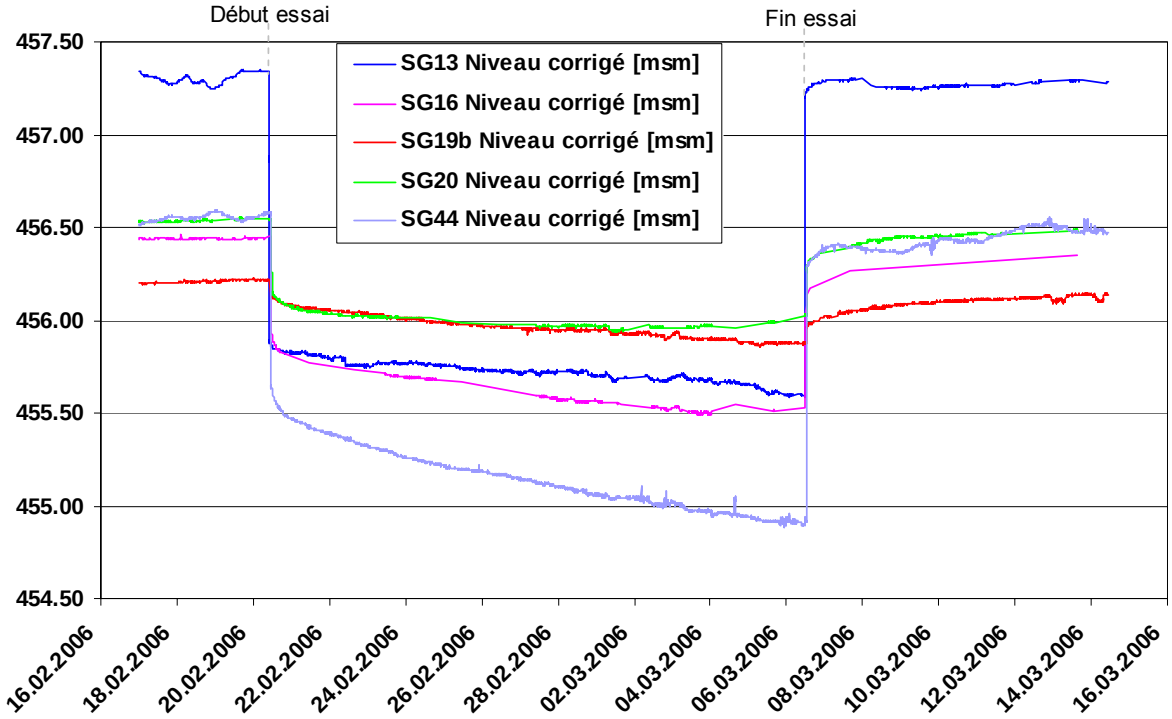


Figure 2: Cotes altimétriques corrigées du niveau d'eau aux puits de pompage

Les autres mesures ont été influencées par les variations de pression atmosphériques, l'aquifère étant semi-confiné à confiné. De ce fait, une correction des mesures

en fonction de l'effet de la pression sur un forage non influencé, s'est avérée nécessaire. Elle a été réalisée selon la méthode présentée au paragraphe 4.5.5 du rapport [3] de synthèse hydrogéologique 2002. Les variations piézométriques utilisées pour cette correction sont celles observées dans les forages SG36 (Figure 5) et SG50 (Figure 6).

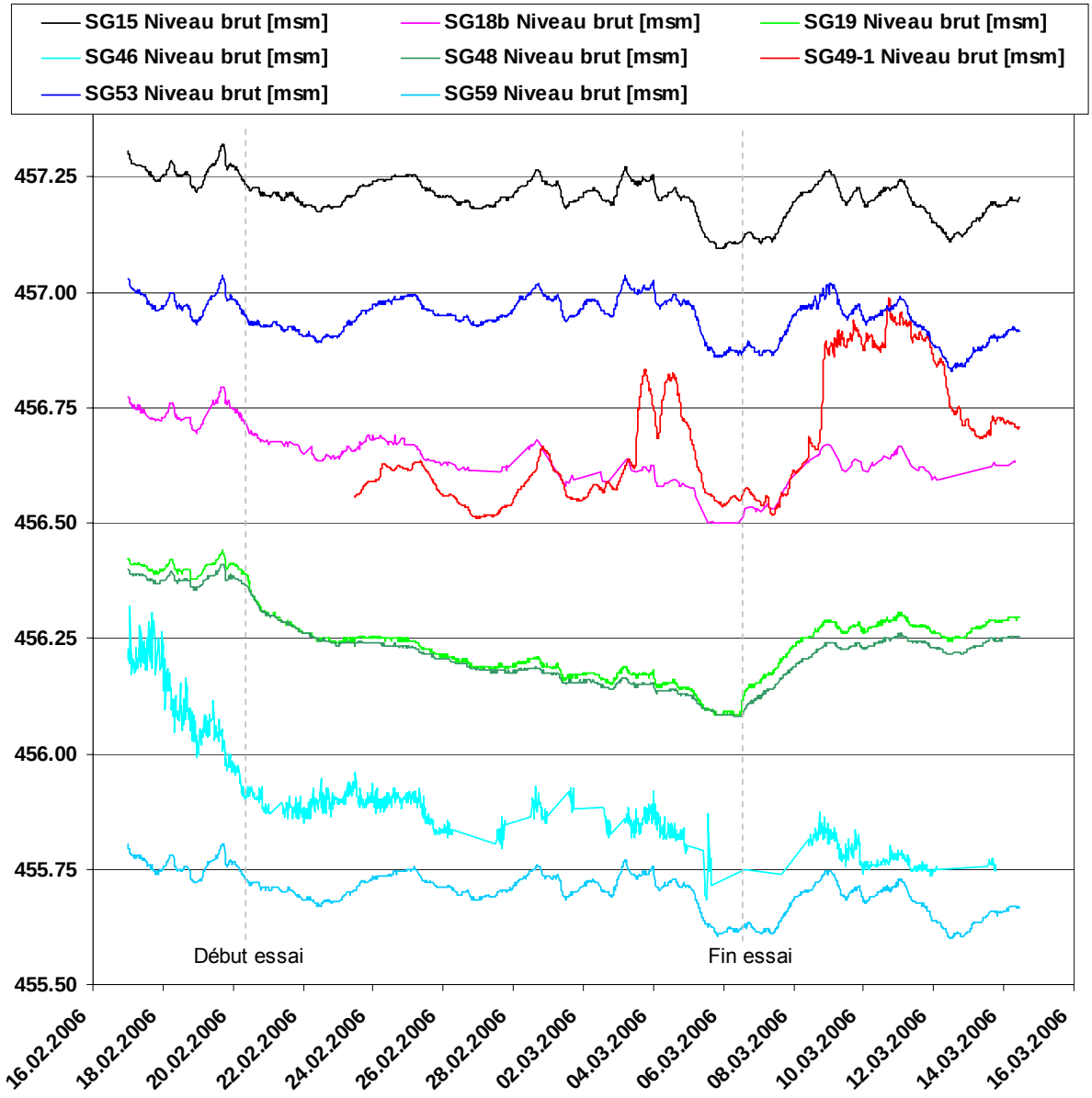


Figure 3: Cotes altimétriques brutes du niveau d'eau aux piézomètres d'observation

La Figure 1 et la Figure 3 présentent les mesures de cote altimétrique brutes dans les puits de pompage, respectivement aux piézomètres d'observation. La Figure 2 et la Figure 4 présentent les mesures corrigées à ces mêmes points d'eau.

La Figure 2 indique que les pompages se sont déroulés de manière continue, sans modification notable des débits de pompage. A la fin de l'essai, la plupart des niveaux n'étaient pas encore stabilisés et poursuivaient leur descente.

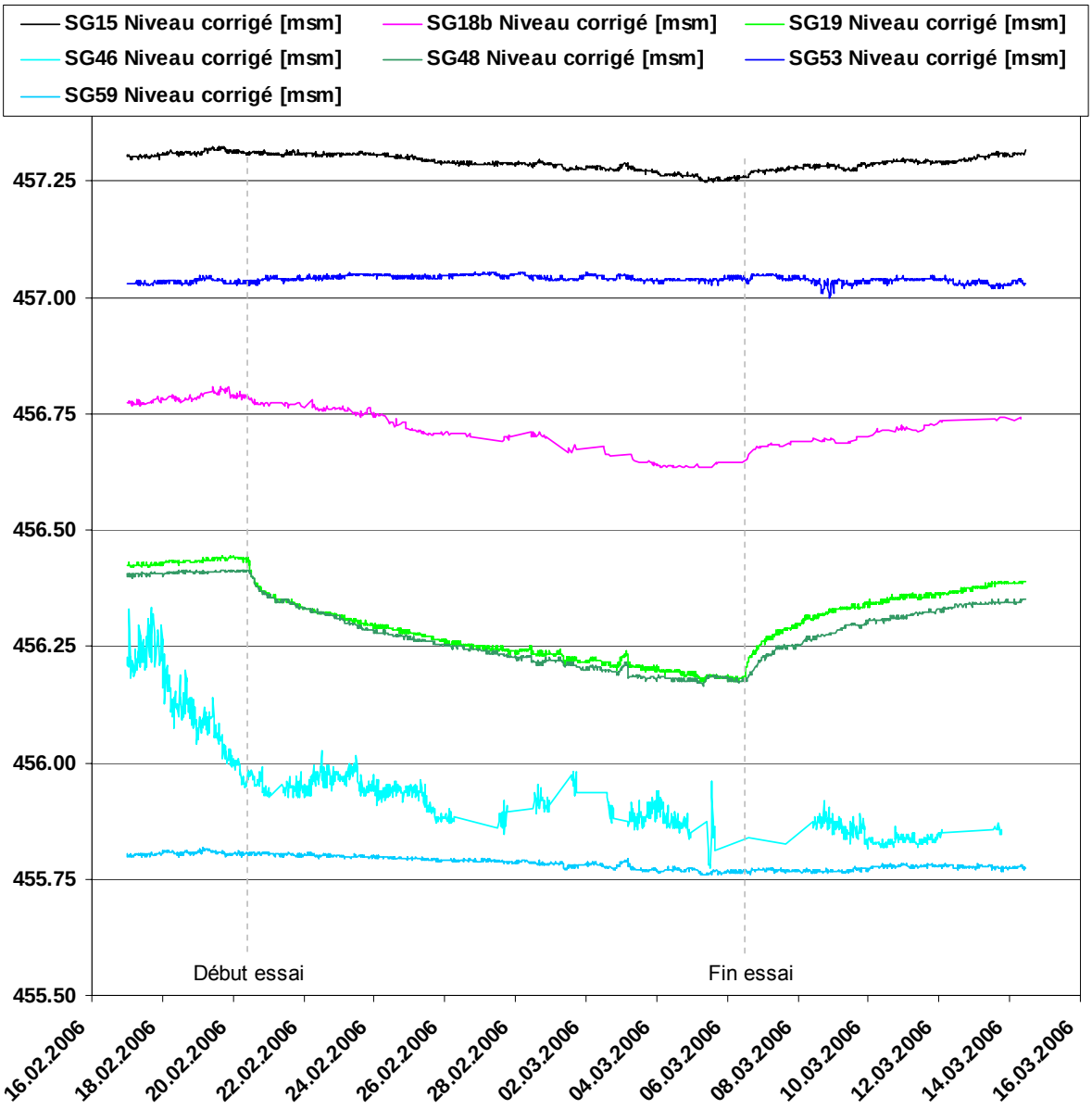


Figure 4: Cotes altimétriques corrigées du niveau d'eau aux piézomètres d'observation

Les fluctuations de niveaux brutes indiquées à la Figure 3 montrent qu'à l'exception de SG49-1, les niveaux ont uniquement réagi aux fluctuations de pression atmosphériques et non aux fortes précipitations qui ont eu lieu durant l'essai (70 mm de précipitations tombés entre le 3 et le 5 mars sous forme de pluie au début, puis sous forme de neige avec un tapis neigeux de 60 cm d'épaisseur qui a entièrement fondu entre le 8 et le 10 mars, période durant laquelle 31 mm de pluie sont tombés).

La Figure 4 indique que les pompages ont eu un effet très net sur les niveaux aux piézomètres SG19 et SG48 situés près de SG19b ; ils ont également provoqué un faible rabattement aux forages SG15 (6 cm), SG18b (18 cm), SG46 (10 cm, mesures journalières à la sonde piézométrique) et SG59 (env. 6 cm avec un retard d'environ 3 jours). Sans correction de ces niveaux concernant les effets de la pression atmosphérique, il ne serait pas possible d'en interpréter les données (cf. Figure 3).

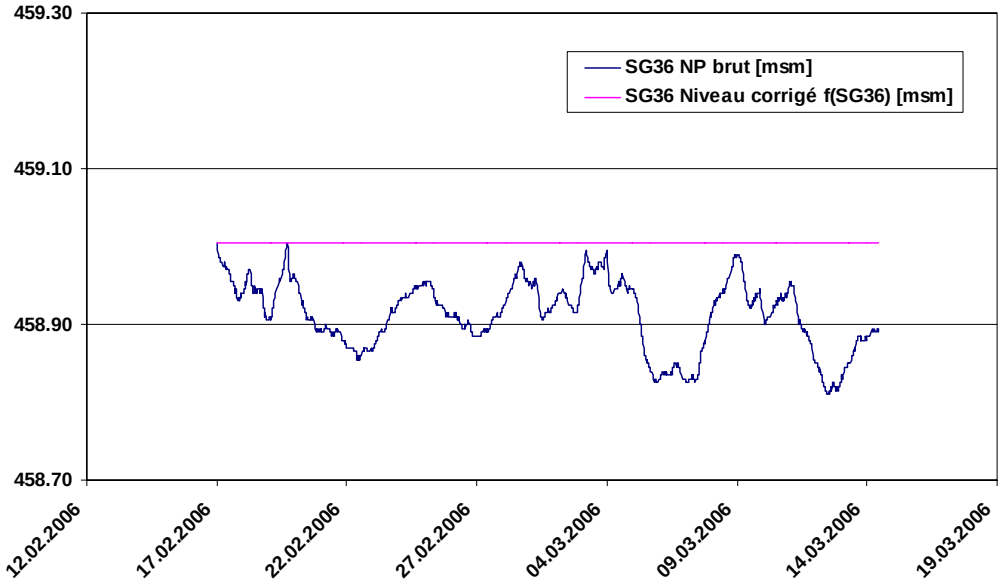


Figure 5: Cotes altimétriques brutes et corrigées du niveau d'eau au piézomètre SG36

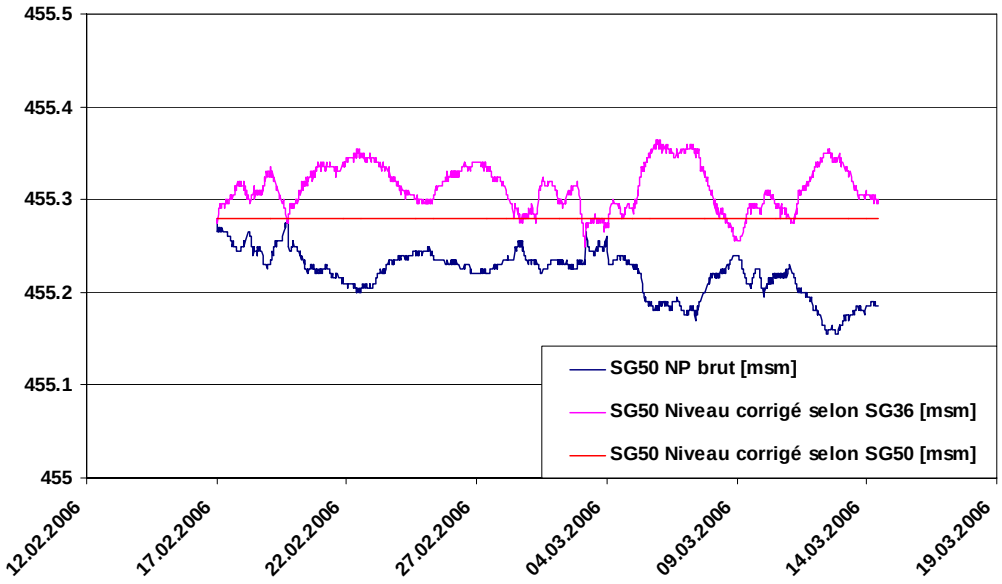


Figure 6: Cotes altimétriques brutes et corrigées du niveau d'eau au piézomètre SG50

On remarque sur la Figure 6 que la fluctuation à SG50 est plus faible que celle à SG36 durant l'essai. Pour les forages SG16, SG19, SG19b, SG20, SG46 et SG48,

situés dans le secteur NW de la décharge, la correction a été faite sur la base du niveau au forage SG50. Par contre, pour les forages SG13 et SG53 situés au Sud et à l'Est du réseau d'observation, elle a été réalisée sur la base du niveau au forage SG36. Sur les forages SG18b, SG15, SG44 et SG59, la correction optimale a été trouvée à l'aide d'une proportion variable d'influence de type SG36 (Figure 5) et de type SG50 (Figure 6).

La Figure 5 et la Figure 6 montrent la manière de corriger les niveaux observés dans un forage en fonction de ceux de SG36, respectivement de SG50. Il se fait simplement en soustrayant toute fluctuation depuis le début des mesures. Si l'on corrige les niveaux d'un forage par lui-même, on obtient une ligne droite (Figure 5). Si par contre, les fluctuations de niveau engendrées par les variations de pression atmosphériques sont moins importantes dans le forage à corriger que dans le forage de référence, le niveau corrigé présente de nouvelles fluctuations inverses à celles observées dans les données brutes. C'est le cas si l'on corrige les niveaux de SG50 avec ceux de SG36 dont le niveau réagit avec une amplitude beaucoup plus élevée aux variations de pression atmosphérique (Figure 6). De ce fait, les niveaux de SG18b, SG15, SG44 et SG59 ont été corrigés en utilisant une courbe de correction intermédiaire entre celle de SG36 et celle de SG50.

2.3 Interprétation des données de l'essai

L'essai simultané a permis d'obtenir une nouvelle estimation de la perméabilité dans le secteur des forages par l'interprétation des données de rabattement sur les premiers jours de l'essai, avant que les pompages dans les autres forages n'aient une influence sur le forage considéré.

La Figure 7 montre l'évolution temporelle du niveau d'eau dans le forage SG48 (forage d'observation seulement), avec en abscisse logarithmique, le temps en secondes démarrant au moment où le pompage en SG19b a débuté. Ce forage se situe à 16 m de SG19b, à 39 m de SG16 et à 45 m de SG44. Le début de la baisse du niveau piézométrique a lieu après 4'800 secondes ou 1 heure et demie. La deuxième rupture de pente sur ce graphique, située après 210'000 secondes ou 2.4 jours, coïncide avec l'arrivée de l'influence piézométrique exercée par les pompages en SG16 et en SG44. Cette information renseigne que si une rupture de pente de la courbe de descente ou rabattement piézométrique survient après 2 à 3 jours dans le graphique analogue à celui de la Figure 7 mais dessiné pour l'un des 5 puits de pompage (cf. exemples à la Figure 8 et à la Figure 9), on observe alors l'influence du rabattement causé par le pompage dans un forage voisin.

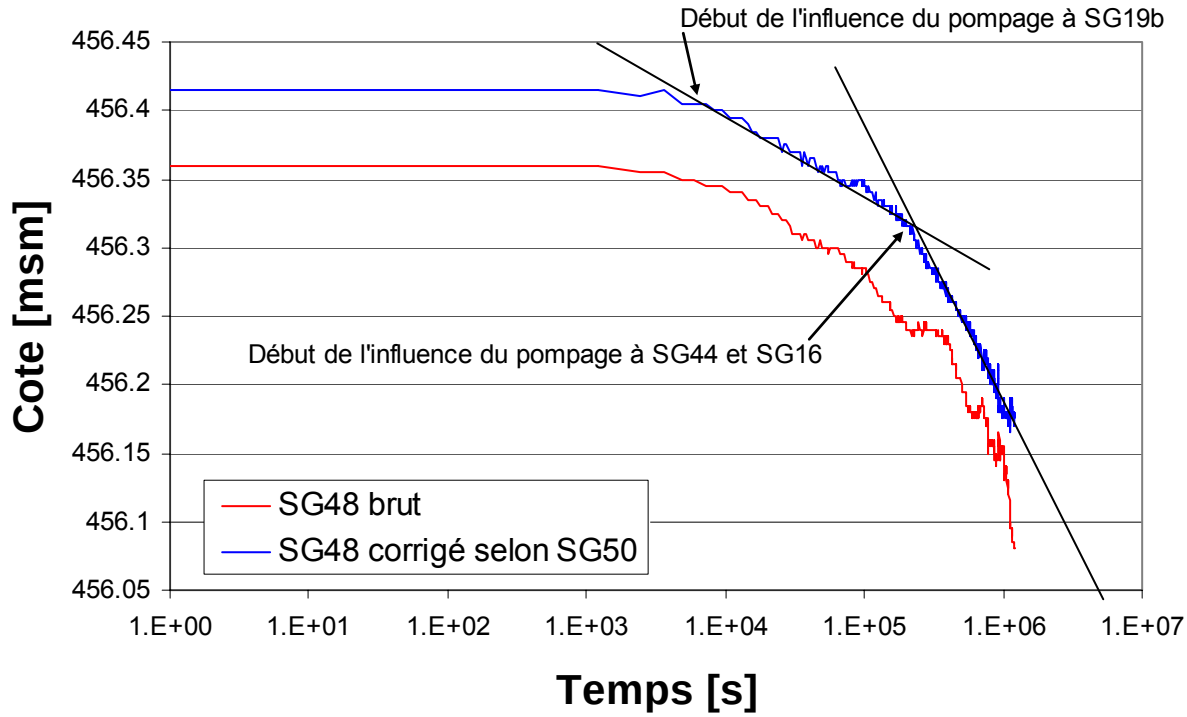


Figure 7: Niveau observé durant l'essai au forage d'observation SG48

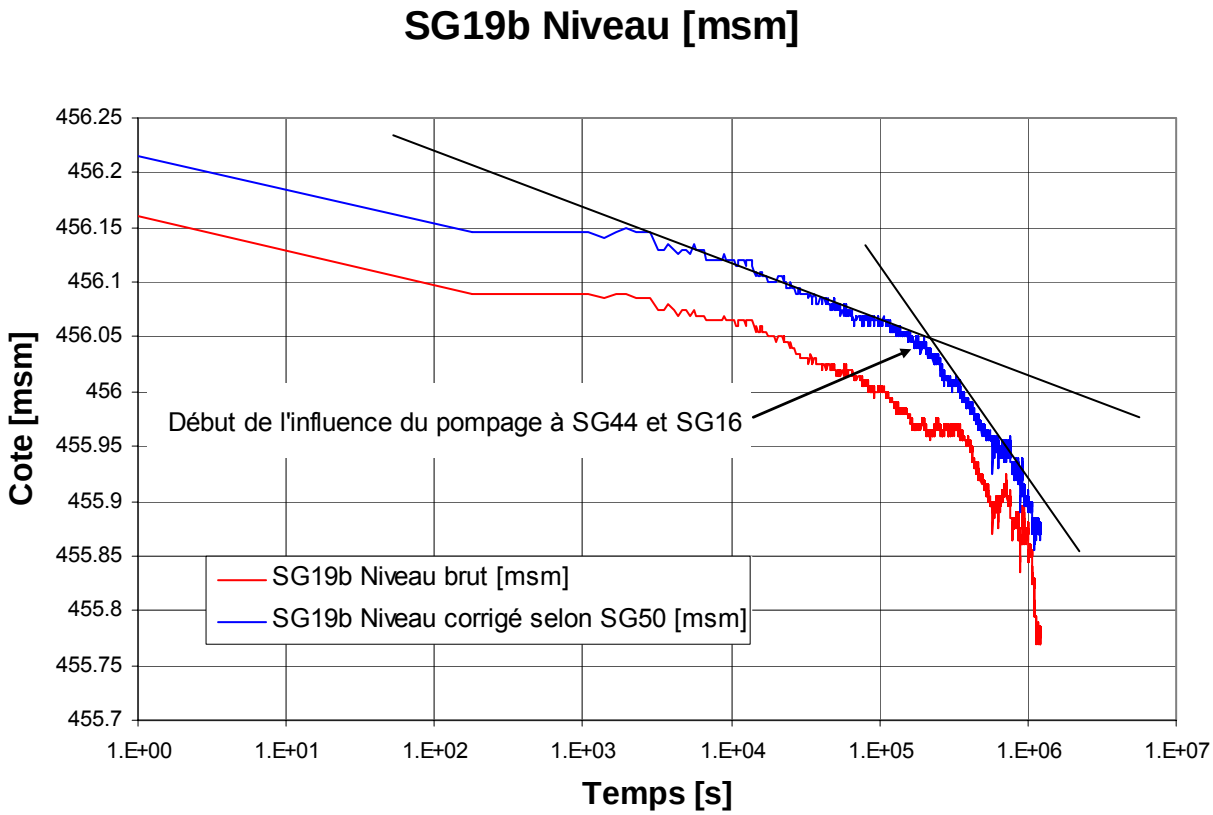


Figure 8: Niveau observé durant l'essai de pompage multiple au forage SG19b

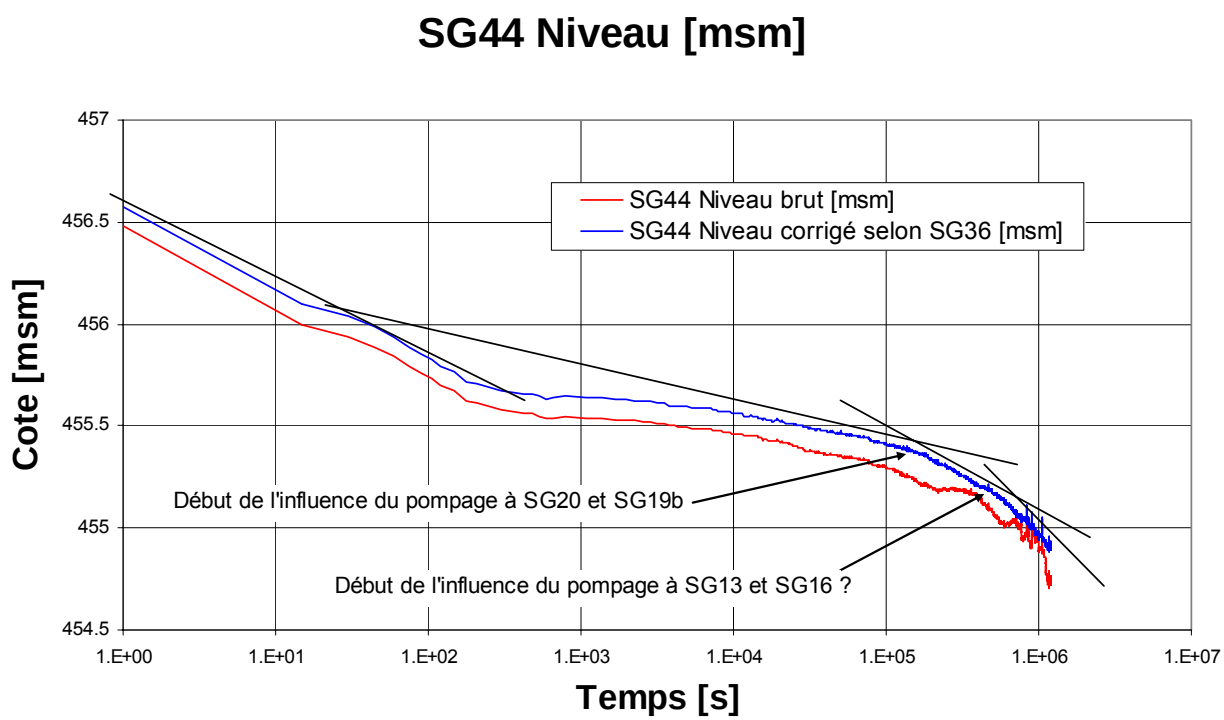


Figure 9: Niveau observé durant l'essai de pompage multiple au forage SG44

L'interprétation de la courbe de rabattement a donc eu lieu sur la partie de cette courbe encore non influencée par les pompages voisins.

Le Tableau 2 résume les résultats de cette interprétation faite à l'aide de la méthode de Jacob sur les 2 premiers jours de pompage durant lesquels, il n'y a probablement pas encore d'influence réciproque marquée des pompages sur les autres puits. Une certaine marge d'erreur est observée pour un même puits, qui dépend entre autres de la géologie autour du puits, d'effets divers dans le puits lui-même, de la stabilité des débits pompés et de l'influence barométrique sur les niveaux piézométriques. Du fait de ces causes d'erreur, une définition claire des coefficients d'emmagasinement par la méthode de Jacob présente trop d'incertitude. Les fourchettes de perméabilité définies (Tableau 2) correspondent aux valeurs définies après calibration du modèle (Tableau 4 et Tableau 6).

Tableau 2: Interprétation de l'essai sur les 4 premiers jours de pompage (méthode de Jacob).

Forage	Perméabilité [m/s]	Remarques
SG13	Valeur moyenne 1.2×10^{-5}, extrêmes 5×10^{-6} à 8×10^{-5}	Réaction variable du puits en fonction du temps ou variation du débit pompé
SG16	1.0×10^{-4}, puis 3.3×10^{-5}	
SG19b	1.4×10^{-4}	Interprétation sensible (pompage continu)
SG44	3.5×10^{-5} à 1.1×10^{-4}	Courbe de rabattement perturbée (Figure 9)
SG20	de 1.0×10^{-4} à 3.5×10^{-4}	Stabilisation du rabattement après 8 jours

2.4 Suivi analytique du pompage simultané

Le pompage simultané a fait l'objet d'un suivi analytique avec prélèvements d'eau aux 5 forages où avaient lieu les pompages, les 1er, 5ème, 9ème et 14ème jours de l'essai. Ont été analysés : les bromures, les éthers et les HHV. Mis à part le forage SG19b, où les concentrations habituelles en contaminants ont été mesurées (cf. Figure 24), les analyses effectuées tout au long du pompage simultané n'ont pas mis en évidence la présence de contaminants à des concentrations supérieures au seuil de quantification (voir résultats détaillés en Annexe 1 de [8]).

3 Construction du modèle

3.1 Généralités

La simulation des écoulements souterrains dans les cailloutis du Sundgau est réalisée à l'aide du logiciel Visual Modflow Pro® (version 4). Il s'agit d'un modèle à différences finies.

Les dimensions du secteur à modéliser ont été définies de manière à englober l'ensemble du bassin versant hydrogéologique de l'aquifère passant sous la DIB et latéralement, de la manière la plus large possible en fonction des données géologiques disponibles, afin d'éviter les effets de bords sur les écoulements hydrauliques simulés dans le secteur de la décharge.

Les conditions géologiques et hydrogéologiques dans le secteur de la DIB sont très bien documentées. Par contre, en dehors du secteur de la DIB et jusqu'aux limites de la région modélisée, ces conditions sont moins bien connues car la densité des informations recueillies par forages y est faible pour une modélisation détaillée. Ceci rend difficile la reconstitution des structures géologiques et des relations hydrogéologiques. De même, les mécanismes de recharge de l'aquifère (infiltration, apports extérieurs en bordure du modèle, etc.) ne sont pas connus avec précision du fait du manque d'information sur la perméabilité des terrains de couverture et sur la géométrie de la formation des cailloutis du Sundgau à l'amont de la DIB. Toutefois, la précision du modèle à ses limites n'a pas d'influence significative sur l'objectif principal de la modélisation, qui consiste à simuler les écoulements des eaux souterraines dans le secteur de la décharge ainsi qu'à évaluer l'efficacité des barrières de forages d'observation et d'intervention.

L'ensemble des données provenant du secteur de la DIB ainsi que les sources Q1 à Q6 est calé en altitude selon la nouvelle mensuration [9]. Les points plus éloignés sont basés sur l'ancienne mensuration, qui présente une différence maximale de 15 cm, soit inférieure aux incertitudes du modèle dans les secteurs périphériques.

La géométrie des couches du modèle a été déterminée à l'aide de profils géologiques préalablement construits (cf. chapitre 3.3.3). Ces profils constituent une extrapolation des données du domaine de la décharge, relativement bien étudié, en directions des zones périphériques du modèle, moins bien connues. La surface du modèle étant très grande par rapport au secteur de la décharge, il faut compter avec une variabilité importante de la fiabilité des résultats aux limites du modèle, notamment à l'est et au nord-ouest.

Le secteur de SG34 présente une singularité. Ce point (niveau des eaux souterraines se situant à env. 455.5 m) a un impact important sur la forme des écoulements des eaux souterraines à l'intérieur du périmètre d'investigation. La prise en compte de ce point SG34, ainsi que des sources Q1 à Q6, implique que localement la direction des écoulements s'oriente vers le sud-ouest. L'évaluation du profil de forage de SG34 montre que le niveau perméable attribué à la formation des cailloutis du Sundgau est de faible épaisseur (30 cm) et qu'il est essentiellement composé de sables fins. D'anciens forages à proximité de SG34, G1 à G9, le piézomètre SVP91 et diverses informations géologiques indiquent que les cailloutis du Sundgau présentent une épaisseur très faible dans cette zone et sont, d'un point de vue lithologique, beaucoup plus fin (sables et limons) que sous la décharge où les graviers prédominent. D'un point de vue hydraulique, cela signifie que SG34 se trouve dans une zone périphérique de l'aquifère, faiblement perméable et présentant un gradient important vers l'ouest, du fait de la pente importante des terrains et de la présence d'exutoires naturels de l'aquifère, plus à l'ouest et au S-W.

Lors de la séance intermédiaire du 19 juillet 2005, en accord avec les représentants des autorités, il a été décidé, au vu des différentes réflexions, que les mesures du niveau des eaux souterraines en SG34 seraient prises en compte dans la modélisation.

Les données présentées au chapitre 2 ont permis d'affiner la calibration du modèle. Cette calibration sur la base de l'essai de pompage multiple s'est déroulée en mode hydraulique transitoire alors que les premières étapes de calage se sont faites en mode permanent.

3.2 Dimensions du modèle géologique

Les dimensions du périmètre d'investigation (Figure 11) atteignent 1.8 km en direction est-ouest (entre les coordonnées 578.700 et 580.500) et 1.6 km en direction nord-sud (entre les coordonnées 258.600 et 260.200). La surface totale du périmètre du modèle géologique atteint 2,88 km^2. Elle a été divisée selon un maillage uniforme, si bien que le modèle se compose au total de 2500 cellules de 36 m x 32 m.

Suite à la définition des limites de la modélisation des écoulements (cf. sous-chapitre 3.4) un certain nombre de cellules ont été désactivées (surface bleue en Figure 11). La surface nette du modèle est ainsi passée à environ 1,6 km^2, soit 1400 cellules actives.

Lors de la simulation des pompages en aval de la décharge, la grille a été progressivement affinée. Dans ce secteur, les cellules ont finalement une taille de 0,2 m x 0,2 m (taille des piézomètres existants, cf. Figure 12).

3.3 Géométrie des formations hydrogéologiques

3.3.1 Stratigraphie

La géologie de la région de la DIB est décrite en détail dans [1] et [3]. Pour mémoire, rappelons qu'elle se compose de l'empilement stratigraphique des formations suivantes :

1. Couche de couverture quaternaire : Sédiments fins d'altération des formations sous-jacentes, dépôts de loess ou alluvions des ruisseaux et des rivières.
2. Formation des argiles bigarrées de Bonfol : Dépôts molassiques d'origine fluviatile et lacustre, composés essentiellement d'argiles et de limons argileux, avec des passées de sables. Cette formation n'est développée que dans la région de Bonfol où elle atteint 20 mètres d'épaisseur. Il n'y a pas de nappe d'eau souterraine continue dans cette formation, mais des corps perméables indépendants en général hermétiquement entourés d'argiles.
3. Formation des cailloutis du Sundgau : Graviers sableux plus ou moins bien triés, limoneux et localement argileux, surmontés par des sables et des limons. Ils présentent une épaisseur variant entre 1 et 10 m dans le secteur de la DIB.
4. Formation de la série des Vosges : Dépassant les 80 m d'épaisseur dans le secteur de la DIB, cette formation présente essentiellement des faciès argileux avec des alternances sableuses plus ou moins importantes. Au droit de la DIB, les argiles prédominantes au sommet de cette série forment un aquiclude. Elles empêchent tout transport vertical des eaux des cailloutis du Sundgau vers le bas. A l'ouest d'un accident tectonique synsédimentaire passant au niveau de la STEP, les argiles disparaissent et la série des Vosges devient sableuse.
5. Formation de l'Oligocène (système de Bourogne) : Succession de lithologies diverses n'apparaissant en surface qu'à Bonfol et à Pfetterhouse.
6. Calcaires du Jurassique : Calcaires fissurés et karstiques du Malm d'une épaisseur totale de 250 m, situés à environ 200 m sous la surface au droit de la DIB. Les calcaires du Malm forment l'aquifère régional.

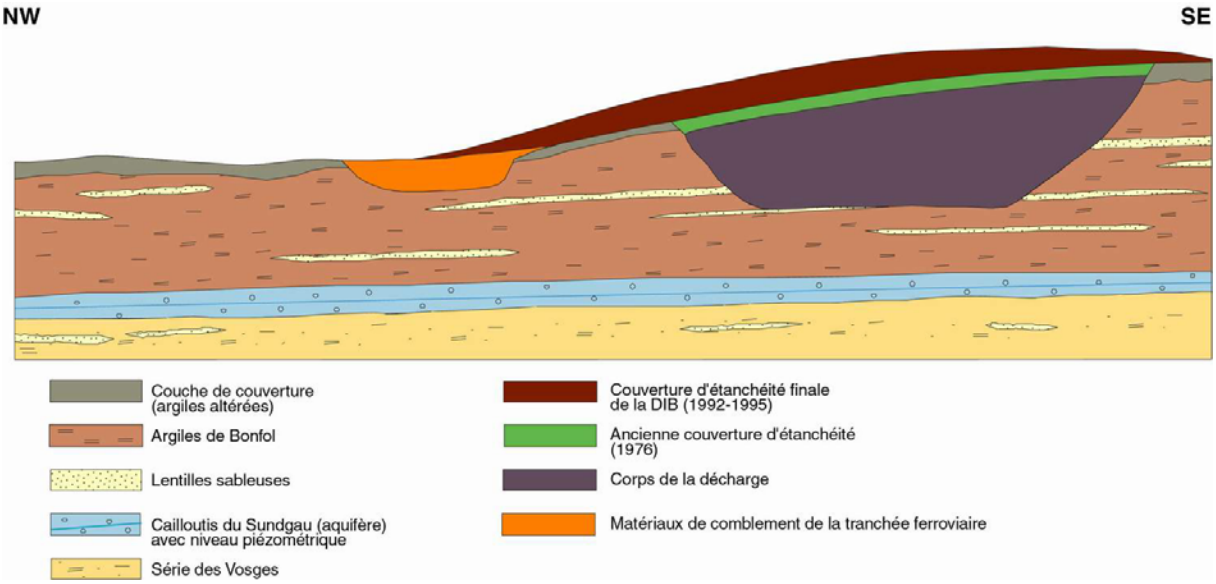


Figure 10: Coupe géologique synthétique au niveau de la DIB. La décharge est implantée dans la série des argiles de Bonfol qui contient des lentilles sableuses. Les argiles reposent sur la formation aquifère des cailloutis du Sundgau. Plus bas, la série des Vosges constitue un aquiclude local.

Seules les unités 1 à 4 font partie de l'environnement immédiat de la DIB (Figure 10). Au droit de la décharge, les niveaux 5 et 6 sont situés à grande profondeur (plus de 100 m). Ils n'interviennent pas dans l'hydraulique des cailloutis du Sundgau et n'ont donc pas été pris en compte dans le modèle.

Pour des raisons de simplification, la couverture quaternaire a été intégrée aux argiles de Bonfol. Le modèle se résume donc comme un niveau aquifère (cailloutis du Sundgau + série des Vosges sableuse à l'ouest de la STEP) intercalé entre 2 niveaux peu perméables (argiles de Bonfol au toit et Série des Vosges marneuse à la base).

3.3.2 Données de base

La géométrie de ces trois entités (limites d'occurrence, toit et base) a été définie en compilant et synthétisant l'ensemble des données géologiques, hydrogéologiques et géophysiques existantes dans la région de la DIB. La densité de ces informations est inégalement répartie géographiquement. Elles se concentrent bien évidemment dans les environs immédiats de la décharge.

Ces informations sont constituées des données suivantes :

- **Les cartes géologiques et hydrogéologiques** de la région [10] et [11].

- **Levés de forages** : 53 données de forages carottés ayant atteint au minimum le toit des cailloutis du Sundgau (36 ont atteint la série des Vosges) constituent les éléments géologiques les plus fiables et précis [12] à [18].
- **Sondages pénétrométriques** : Plus d'une centaine de sondages au pénétromètre, essentiellement dans les environs immédiats de la DIB. Toutefois, seule une dizaine de sondages réalisés dans les secteurs plus périphériques ont été utilisés [19] et [20].
- **Fouilles à la pelle mécanique** dans le secteur de la STEP et plus au sud : Ces sondages permettent de localiser la base des argiles de Bonfol dans ce secteur et de préciser la lithologie de la série des Vosges dans ce secteur [19] et [21].
- **Situation des sources** : La position des sources Q1 à Q6 et Q9 a été reprise de [19]. Leur altitude a fait l'objet d'un nivellement spécifique le 27 juillet 2005.
- **Profils sismiques** : 2 profils de sismique réfraction réalisée en 1973 se croisent au Nord de la DIB [22]. Ils permettent de connaître la stratigraphie et les structures en grand.
- **Sondages géoélectriques** : Une campagne de sondages géoélectriques a permis de préciser l'occurrence et l'épaisseur des argiles de Bonfol [23].
- **Profils de tomographie géoélectrique** : Il s'agit de 2 profils relativement courts réalisés juste au nord de la DIB en 2000 [3] et 8 profils supplémentaires réalisés autour ainsi qu'à l'Ouest et au Nord de la décharge en 2002.
- **Mesures RMT-R** : Des mesures RMT-R sont venues compléter les profils de tomographies géoélectriques acquis en 2002.

3.3.3 Profils géologiques

Les données ponctuelles récoltées ont été extrapolées sur l'ensemble du périmètre du modèle géométrique à l'aide des données périphériques disponibles et sur la base de la géologie régionale données par la carte géologique [10] et les données géophysiques [22 et 23]. En bordure, le modèle reste conceptuel.

Cette extrapolation a été matérialisée sous la forme d'une centaine de profils géologiques qui ont ensuite été utilisés pour l'introduction du modèle géologique dans le logiciel.

La base de l'aquifère des cailloutis du Sundgau, obtenue à l'aide des profils géologiques est peu accidentée et cette surface montre une faible inclinaison d'est en ouest en direction de la faille synsédimentaire d'orientation Nord à N-20 et passant au droit de la STEP de la décharge.

Cette faille synsédimentaire est soulignée par un changement de faciès de la série des Vosges qui devient sableuse dans le compartiment occidental. Cette interprétation est concordante avec l'histoire géologique régionale [10]. Elle est suggérée par les données des sondages dans le secteur de la STEP [19], des forages réalisés en France [15] ainsi que par l'ensemble des données géophysiques qui recoupent son tracé. Ce changement de faciès est également souligné par la piézométrie dans le secteur de la STEP [3]. Elle est marquée par un brusque approfondissement des isopièzes indiquant un transfert des eaux de l'aquifère des cailloutis du Sundgau vers la série des Vosges suite à la disparition du toit argileux de cette formation.

3.4 Définition des limites du modèle des écoulements

Les limites du modèle ont été choisies de manière à ce que la décharge occupe une position centrale dans la région simulée et que les bords correspondent aux limites du bassin versant hydrogéologique. L'aquifère à modéliser est limité comme suit (cf. Figure 11 et Annexe 1) :

- à l'est et au sud-est, par la ligne de partage des eaux de surface aux confins du bassin versant de la Largue, qui représente également une limite hydrogéologique simulée par une limite de flux nul dans le modèle.
- au sud-ouest par la ligne de sources Q1 à Q6 + Q9 qui constituent dans ce secteur, l'exutoire et la limite physique de l'aquifère des cailloutis du Sundgau, ligne simulée par une limite de potentiels imposés (cotes réelles des sources).
- à l'ouest, par l'accident tectonique de direction N-S à N-20 (cf. § 3.3), le long duquel les eaux de l'aquifère des cailloutis du Sundgau rejoignent des couches plus profondes de la série des Vosges, simulé par une limite de potentiels imposés.
- au nord par une discontinuité géologique et hydrogéologique le long du pied sud de l'anticlinal de Pfetterhouse ; cette ligne est simulée par une limite de potentiels imposés.

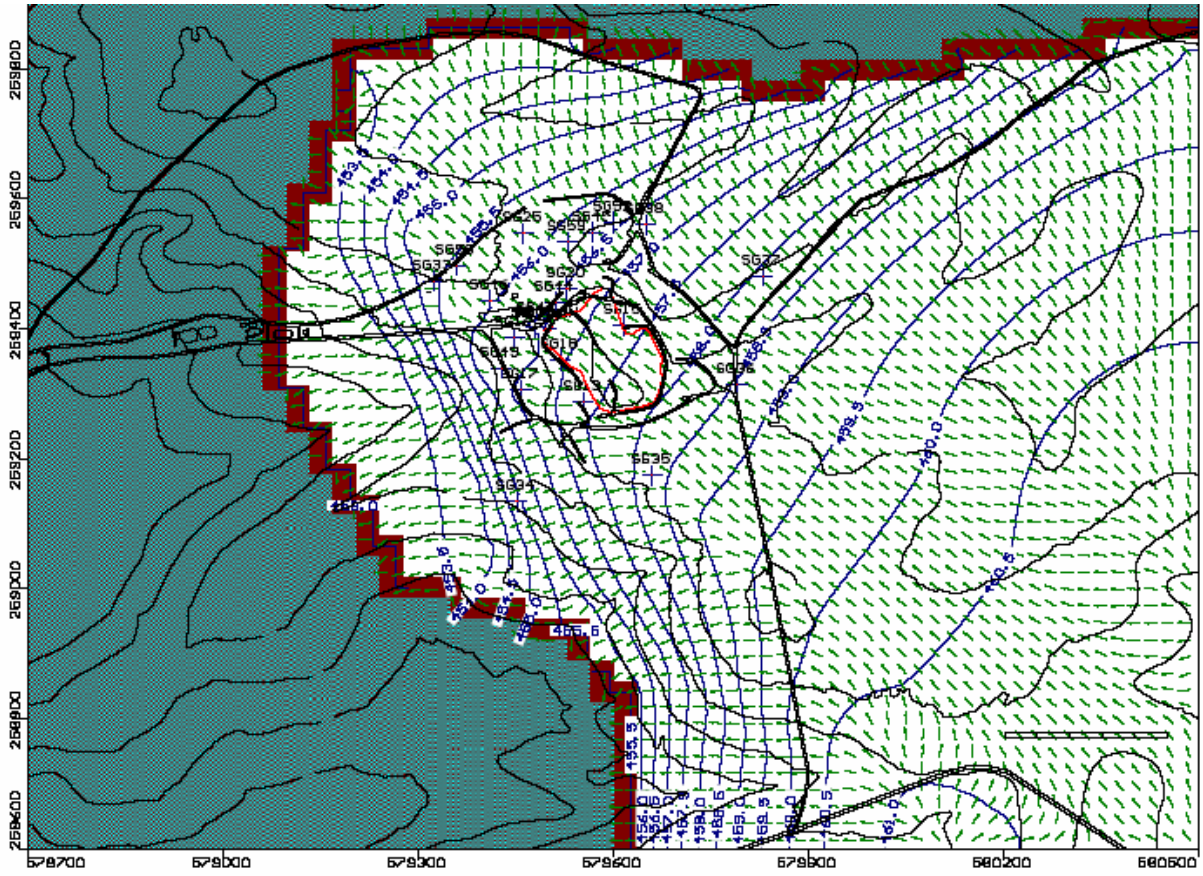


Figure 11: Région du modèle : En blanc, surface active du modèle sur laquelle l'alimentation se fait par infiltration ; en bleu : surface désactivée ; en rouge : limite de potentiel aval du modèle ; ligne noires : topographie avec équidistance 5 m ; lignes bleues : équipotentielles calculées dans les cailloutis du Sundgau ; flèches vertes : directions d'écoulement.

Dans la verticale, le modèle est subdivisé en 3 couches principales :

- La couche supérieure correspondant à la position de la formation des argiles de Bonfol : cette couche est cependant inactive dans le modèle.
- La couche centrale correspondant à la formation des cailloutis du Sundgau, subdivisée en fonction des différentes classes de perméabilité, comme indiquées au § 3.5.3 et à l'annexe 3.
- La couche inférieure du modèle représentant la partie supérieure de la série des Vosges. Une perméabilité unique et très faible (5 x 10^{-11} m/s déduite de l'observation des matériaux dans les forages), est attribuée à ces terrains dans les limites de la zone activée du modèle géologique. La faible perméabilité de cette couche implique des écoulements horizontaux dans la couche intermédiaire des cailloutis du Sundgau, conformément aux hypothèses de travail admises.

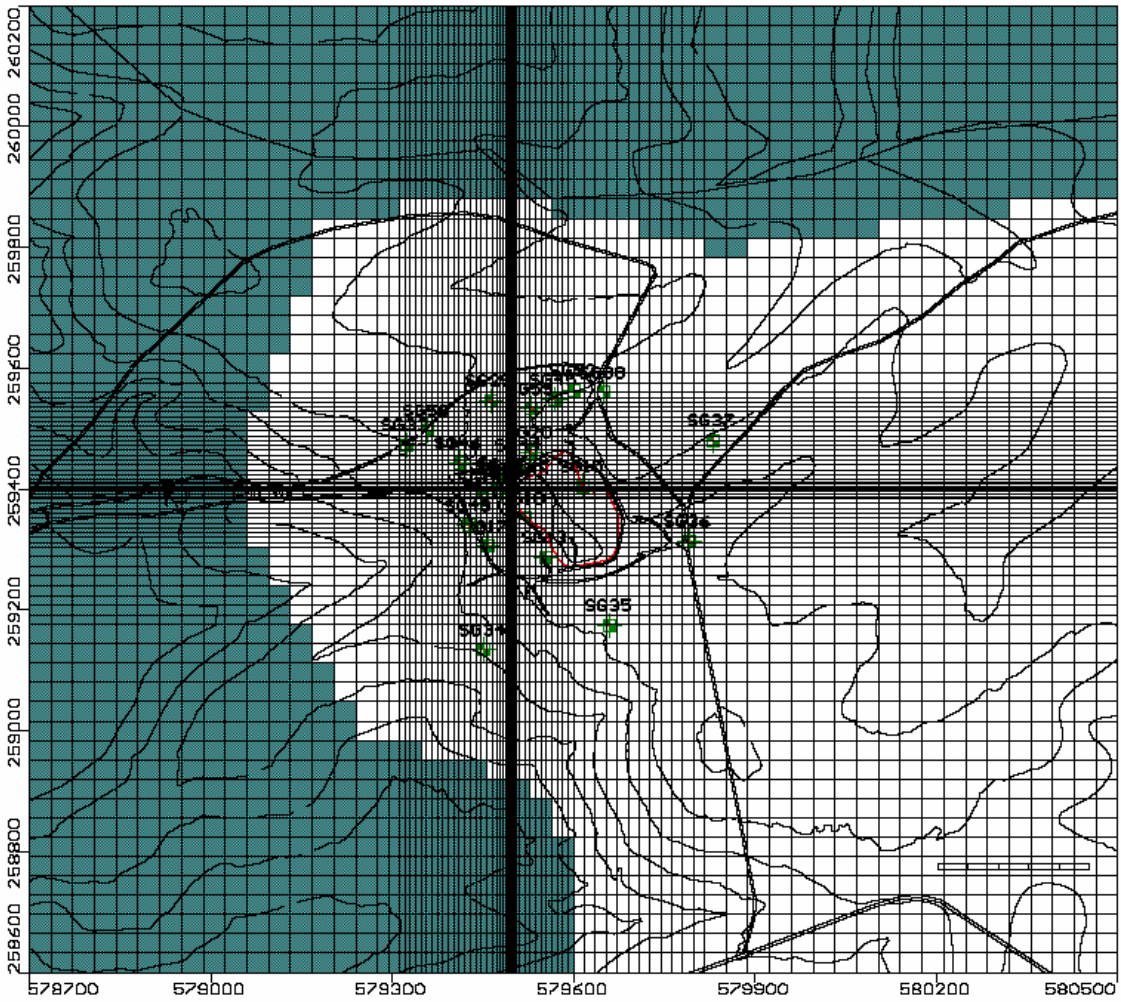


Figure 12: Grille de calcul du modèle avec cellules de 36 m x 32 m et raffinement progressif de leur grandeur jusqu'à 0.2 x 0.2 m au voisinage des puits avec comme exemple ici SG19b.

Les données inconnues du modèle sont les quantités d'eau entrant et sortant aux limites (bilan) ainsi que le renouvellement des eaux souterraines.

Pour cette raison, dans un premier temps, une évaluation de la quantité d'eau souterraine transitant dans le modèle a été réalisée à l'aide d'un modèle, dont les bords ouest et est ont été définis comme des limites aux potentiels imposés (selon les hydroisohypses de l'Annexe 1). Dans cette première phase, le renouvellement des eaux souterraines par infiltration n'a pas été pris en compte. Cette première évaluation a permis après calage, de définir le flux transitant dans le modèle à environ 300 m^3/jour.

Par la suite, les travaux de modélisation se sont poursuivis en simulant une alimentation distribuée sur l'ensemble des terrains du bassin versant hydrogéologique modélisé, selon les classes d'alimentation décrites au § 3.5.4. La valeur indiquée ci-

dessus de 300 m^3/jour a été prise comme donnée quantitative de départ avant la calibration.

3.5 Caractéristiques hydrauliques des cailloutis du Sundgau

3.5.1 Piézométrie

Les isohypses ont été interpolés sur la base des valeurs de 23 points de mesures piézométriques. Il a déjà été démontré que l'ensemble des piézomètres dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau montrent des évolutions du niveau des eaux souterraines très semblables [3], avec des variations annuelles très faibles (<50 cm). Par contre, du fait que cette nappe d'eau souterraine est semi-captive sous la couche des argiles de Bonfol très peu perméables, les niveaux piézométriques réagissent très fortement aux variations de la pression atmosphérique [3]. Ces variations de niveau peuvent ainsi dépasser les 25 cm d'amplitude en moins de 2 jours.

Pour cette raison, ainsi que pour uniformiser les données de mesures réparties sur des périodes de temps différentes, la construction du plan des hydroisohypses a été réalisée de manière relative, sur la base des valeurs moyennes de la période janvier 1990 à décembre 2002 de quelques piézomètres présentant une série de mesures complète. Cette période a, entre autres, été choisie car elle couvre approximativement un cycle de variation pluriannuel (Figure 13). L'amplitude totale des variations des isohypses se situe pour cette période entre 50 et 60 cm. Le niveau varie lentement et avec la même amplitude dans tous les forages.

La Figure 13 montre que les oscillations des niveaux piézométriques ne sont liées aux précipitations qu'avec un retard très important. L'étude de la relation entre les pluies et les niveaux piézométriques montre en effet une corrélation presque optimale du niveau piézométrique mesuré, avec les précipitations cumulées du 6e au 42e mois précédant cette valeur de niveau. A titre d'exemple, la mesure piézométrique du 1er décembre 2004 peut être corrélée avec la somme des précipitations tombées entre le 1er juin 2001 et le 1er juin 2004. Cette corrélation mathématique explique ainsi l'observation hydrogéologique faite depuis longtemps, que l'hydraulique des eaux souterraines bénéficie d'un effet tampon naturel très important dû à la combinaison des temps d'infiltration entre la surface et l'aquifère des cailloutis du Sundgau et les temps de transit à l'intérieur même de l'aquifère. Cette corrélation permet d'affirmer que les eaux de l'aquifère sont renouvelées principalement par infiltration d'eau météorique au travers de la formation des argiles de Bonfol et des limons de couverture très peu perméables, surmontant l'aquifère des cailloutis du Sundgau. Cette zone

d'infiltration doit se situer préférentiellement aux endroits où la formation des argiles de Bonfol est la moins épaisse et aux endroits où la pente des terrains est la moins importante (cf. § 3.5.4).

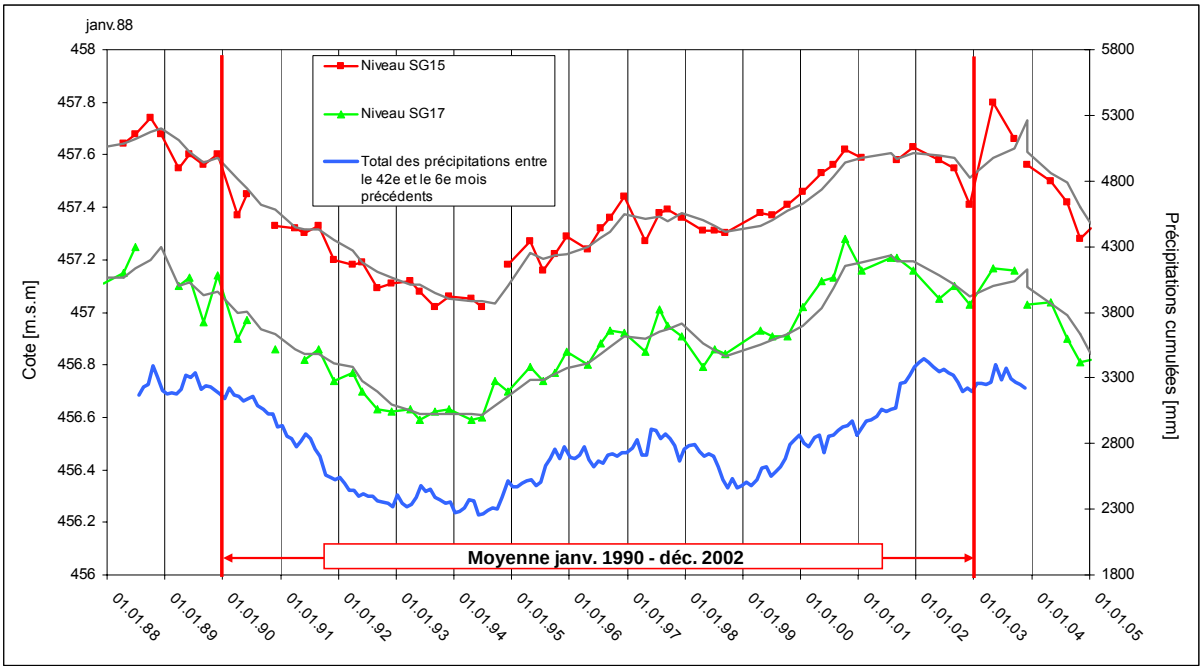


Figure 13: Évolution pluriannuelle de la piézométrie dans les cailloutis du Sundgau et période prise en compte pour établir la moyenne. Exemple des forages SG15 et SG17 et comparaison avec le cumul des précipitations enregistrées entre les 6e et 42e mois qui précède la mesure piézométrique (voir explication dans le texte). Les traits fins en gris correspondent aux moyennes mobiles sur 3 mesures.

La direction générale de l'écoulement des eaux souterraines est globalement orientée du sud-est vers le nord-ouest, avec une large diffluence à l'aval hydraulique de la DIB, la principale partie des écoulements se dirigeant vers le N-W, en suivant un large chenal bien développé des cailloutis du Sundgau et, une partie des écoulements moins importante partant vers l'ouest et le sud-ouest dans des terrains aquifères peu développés et peu perméables. A l'ouest du système, on note une augmentation significative du gradient hydraulique dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau, à l'amont des sources Q1 à Q6 et Q9, ainsi que dans la série des Vosges, à l'ouest de l'accident tectonique passant par la STEP (cf. § 3.3.1), en dehors du périmètre de simulation des écoulements.

Le plus haut niveau des eaux souterraines se situe à la cote 464 m, le niveau le plus bas à 450 m. Le gradient moyen de la nappe est ainsi d'environ 0,0075 (0.75%), ce qui est relativement faible.

3.5.2 Sources

Dans le secteur de recherches, des exutoires de l'aquifère sont observés depuis plusieurs années à la limite sud-ouest du modèle. Les sources Q2 à Q6 forment une ligne de sources apparaissant au bas de la formation des cailloutis du Sundgau, surmontant les limons argileux très peu perméables de la série des Vosges. De nombreuses petites sources secondaires et des mouillures sont également observables entre les sources principales. Selon [3], les débits des sources oscillent entre des minima situés aux alentours de 1 à 6 l/min et des maxima allant de 3 à 12 l/min. Le débit cumulé moyen de toutes les sources du secteur (Q1 à Q6 + Q9) est évalué à environ 35 m^3/jour.

3.5.3 Perméabilité de l'aquifère

La perméabilité des matériaux aquifères de la formation des cailloutis du Sundgau a été mesurée sur le terrain par des essais de pompage dans 20 forages. Les valeurs inférieures et supérieures des calculs ainsi que la valeur considérée comme représentative du secteur du forage testé, sont indiquées au Tableau 3.

A l'aide d'informations supplémentaires (géophysique), ces résultats permettent de délimiter des zones de perméabilité équivalente. La zonation des valeurs K et les variations possibles des valeurs à l'intérieur de chacune des zones sont représentées en Annexe 3.

Tableau 3: Résultats des essais de pompage dans les cailloutis du Sundgau.

N° Forage	Perméabilité inférieure [m/s]	Perméabilité supérieure [m/s]	Perméabilité « réaliste » [m/s]
SG12	1.1E-05	1.1E-04	6.0E-05
SG13	6.4E-05	8.0E-05	7.2E-05
SG15	2.0E-04	3.2E-04	3.0E-04
SG16	2.3E-04	2.8E-04	2.8E-04
SG17	5.8E-05	8.1E-05	7.0E-05
SG18	1.4E-05	2.1E-05	1.8E-05
SG19	1.2E-04	2.8E-04	2.0E-04
SG20	8.0E-05	1.1E-04	1.0E-04
SG25	9.8E-05	1.7E-04	1.3E-04
SG33	4.8E-05	6.1E-05	5.4E-05
SG35	1.5E-05	-	1.5E-05
SG36	4.9E-06	1.8E-05	5.0E-05
SG38	2.3E-05	6.1E-05	4.2E-05
SG44	7.6E-05	1.6E-04	1.2E-04

SG45	3.3E-05	3.9E-05	3.6E-05
SG46	3.3E-04	4.3E-04	3.8E-04
SG49	3.2E-05	3.2E-05	3.2E-05
SG50	1.8E-05	2.0E-05	2.0E-05
SG52	2.1E-05	-	2.1E-05
SG53	2.1E-04	-	2.1E-04
Moyenne	**8.4E-05**	**1.3E-04**	**1.1E-04**

3.5.4 Renouvellement des eaux souterraines par infiltration des pluies

Dans la région de la DIB, la somme des précipitations annuelles montre d'importantes variations : entre 665 et 1260 mm/an, avec une moyenne de 950 mm/an. Le secteur de la DIB présente des terrains peu voire très peu perméables en surface. Il faut donc s'attendre à des valeurs de renouvellement relativement faibles. Il n'existe à notre connaissance pas de données spécifiques pour de tels terrains composés de molasse tertiaire argileuse.

La Figure 13 montre que l'alimentation de l'aquifère des cailloutis du Sundgau est corrélée avec les précipitations, mais avec un certain retard et un effet tampon important (§ 3.5.1). Le taux annuel moyen d'alimentation naturelle de l'aquifère restait toutefois mal connu jusqu'à présent. La présente modélisation mathématique a cependant permis d'évaluer le renouvellement moyen de l'eau dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau à 376 m^3/jour sur l'ensemble de la surface active du modèle (1.6 km^2), soit l'équivalent de 100 mm/an, comme indiqué au § 4.2.

La valeur de l'infiltration efficace vers l'aquifère des cailloutis du Sundgau a été évaluée sur la base de scénarios de renouvellement des eaux souterraines, testés directement lors du calage du modèle, en fonction des flux dans les cailloutis du Sundgau, préalablement déterminés. Ces scénarios ont été établis, sur la base d'une zonation du périmètre du modèle en classes d'infiltration efficace ou de renouvellement des eaux, établies en fonction de la géologie des terrains de surface, de l'épaisseur de la formation des argiles de Bonfol et de la pente des terrains (Annexe 4). Les différentes zones d'infiltration distinguées sur l'Annexe 4 sont définies comme suit :

- Zone 1 : Renouvellement très faible, estimé à 5 mm/an : Secteur où la formation des argiles de Bonfol présente la plus grande épaisseur (>15 m, [3]) et au travers de laquelle, les eaux transitent très lentement et se font drainer essentiellement latéralement.

- Zone 2 : Renouvellement faible, estimé entre 50 et 100 mm/an : Secteur où la formation des argiles de Bonfol a 10 à 15 m d'épaisseur et où la pente est relativement grande.
- Zone 3 : Renouvellement faible, estimé entre 80 à 130 mm/an : Secteur où la formation des argiles de Bonfol présente une épaisseur de 5 à 10 m, voire inférieure à l'ouest et où la pente des terrains est relativement grande.
- Zone 4 : Renouvellement moyen, estimé entre 100 et 180 mm/an : Secteur à l'est du bassin d'alimentation, présentant une faible pente et où des écoulements latéraux dans la formation des argiles de Bonfol peuvent moins bien se produire. Cette zone englobe aussi des endroits où la formation des argiles de Bonfol peut présenter de plus grandes épaisseurs (surtout au SE de la DIB) mais où anciennement, il y a eu des excavations pour l'exploitation de l'argile, encore visibles actuellement.
- Zone 5 : Renouvellement moyen à élevé, entre 150 et 200 mm/an : Dans ce secteur, la formation des argiles de Bonfol peut avoir de faibles épaisseurs (< 5 m sur les cailloutis du Sundgau) ou être totalement absente.

4 Calibration du volet hydraulique du modèle

4.1 Calibration par étapes

Étant donné que le renouvellement des eaux souterraines par les précipitations, ainsi que les apports latéraux, respectivement les débits d'exutoire souterrain aux limites du modèle, ne sont au départ pas connus et ne sont que des estimations, la calibration à l'aide du seul ajustement des valeurs de perméabilités dans la zone concernée n'est pas suffisante. Une adaptation des potentiels aux limites nord et nord-ouest s'est avérée nécessaire à chaque étape de calibration.

En cours de calibration, un seul paramètre a été modifié à la fois (calibration par étapes), afin de pouvoir évaluer de manière explicite son impact sur les écoulements simulés. Ainsi, au total, plus de 50 étapes de calibration ont été réalisées. Le modèle a été calibré de manière à ce que les débits sortant du modèle (partie sud de la ligne de potentiels imposés, Figure 11) dans la région des sources Q1 à Q6 + Q9, concordent avec les valeurs observées sur le terrain. Par ailleurs, l'observation des données chimiques à l'aval de SG19b (polluants retrouvés en SG46 et SG50, cf. chap. 5) a été prise en compte dans la calibration du modèle hydraulique, en ce qui concerne la direction des écoulements (cf. Figure 16).

4.2 Renouvellement de l'eau souterraine

La Figure 14 présente l'organisation des différentes classes de renouvellement des eaux définies sur une première calibration de classes de perméabilité et des limites de potentiels à l'aval du modèle, en restant proche des fourchettes plausibles d'infiltration efficace indiquées à l' Annexe 4 et au § 3.5.4. Les classes d'infiltration suivantes, indiquées sur la Figure 14, sont déduites de cette calibration :

- Secteur en bleu foncé sur la Figure 14, correspondant à la zone 1 en Annexe 4 : Renouvellement très faible : 5 mm/an.
- Secteurs en bleu moyen entre le secteur bleu foncé et les secteurs rouges (zone 2 en Annexe 4) : Renouvellement faible : 50 mm/an.
- Secteurs en rouge (zone 3 en Annexe 4) : Renouvellement faible : 75 mm/an.
- Secteur en jaune foncé (zones 4 et 5 en Annexe 4) : Renouvellement moyen : 150 mm/an.

La valeur moyenne du renouvellement de l'eau dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau ainsi obtenue pour l'ensemble de la surface de la simulation est de l'ordre de 100 mm/an. Elle est tout à fait plausible compte tenu de la situation en forêt de la plus grande partie du secteur modélisé, de la faible à très faible perméabilité des terrains de surface (argiles de Bonfol) et des importants coefficients de ruissellement qui en découlent (les débits des ruisseaux de la région augmentent fortement en cas de précipitations).

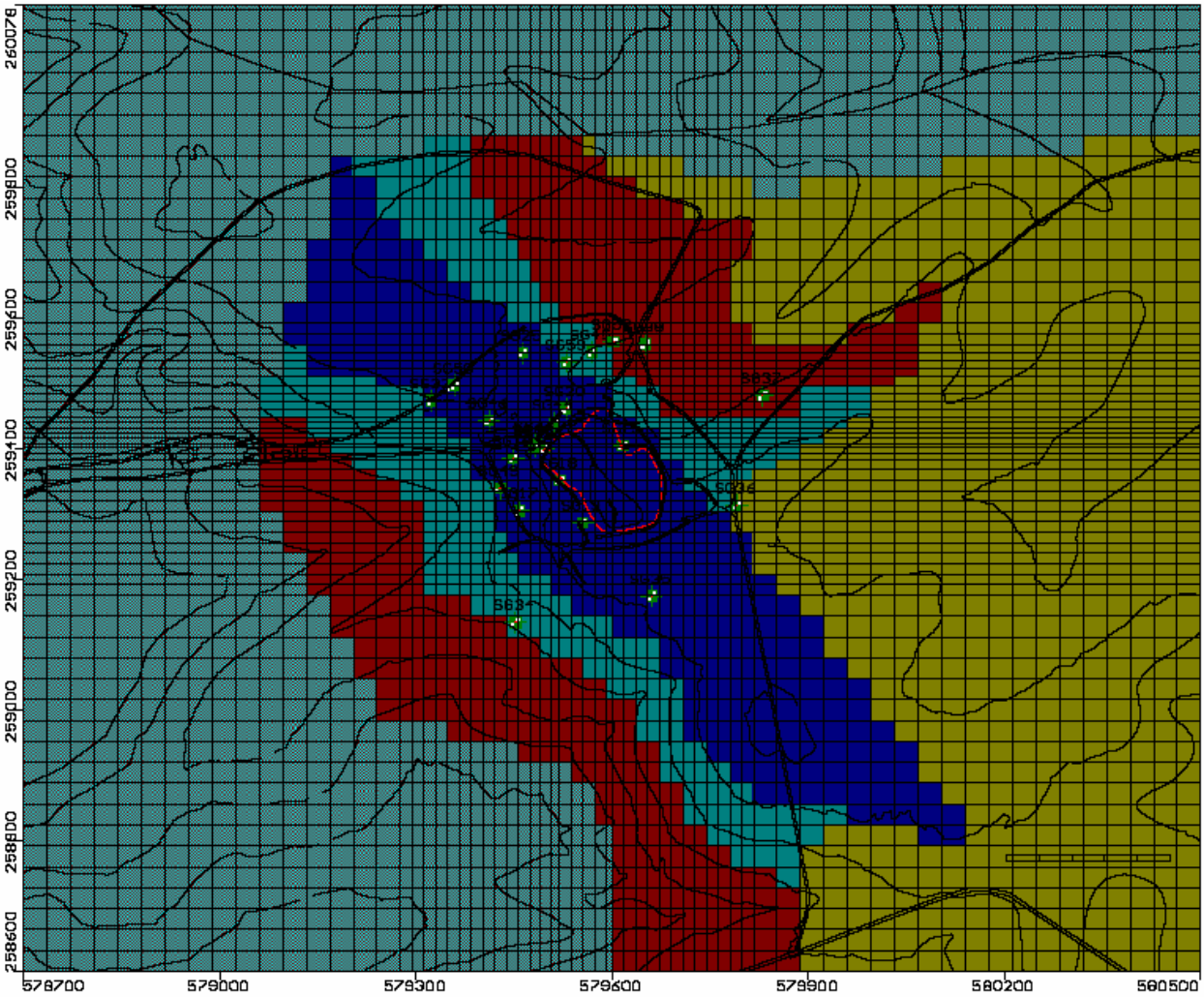


Figure 14: Classes de réalimentation du modèle (cf. explications dans le texte).

4.3 Perméabilités hydrauliques

Après calage du modèle des écoulements, les classes de perméabilité utilisées pour la simulation se distribuent comme indiquées à la Figure 15 et au Tableau 4.

Tableau 4: Classes de perméabilité du modèle mathématique après calage.

Classe de perméabilité	Couleur de la classe de perméabilité	Perméabilité dans le modèle calibré [m/s]
1	Gris clair	5.0×10^{-6}
2	Rouge foncé	1.1×10^{-5}
3	Lila	5.0×10^{-5}
4	Bleu foncé	6.0×10^{-5}
5	Gris foncé	8.0×10^{-5}
6	Bleu moyen	1.0×10^{-4}
7	Bleu clair (chenal perméable)	2.2×10^{-4}
8	Rouge clair	2.0×10^{-5}

La carte initiale des perméabilités (Annexe 3) déduite des données géologiques, hydrogéologiques et géophysiques, a pu être utilisée presque telle quelle, à l'exception de quelques secteurs au SW, à l'W et au NW de la décharge dont la géométrie et la perméabilité ont dû être modifiées au cours du processus de calage (Figure 15).

L'épaisseur de l'aquifère est très petite par rapport à son étendue horizontale et aucune information directe sur la perméabilité verticale n'est disponible. Pour la description de l'écoulement des eaux souterraines régionales, on part de l'hypothèse que la perméabilité verticale est répartie de manière homogène.

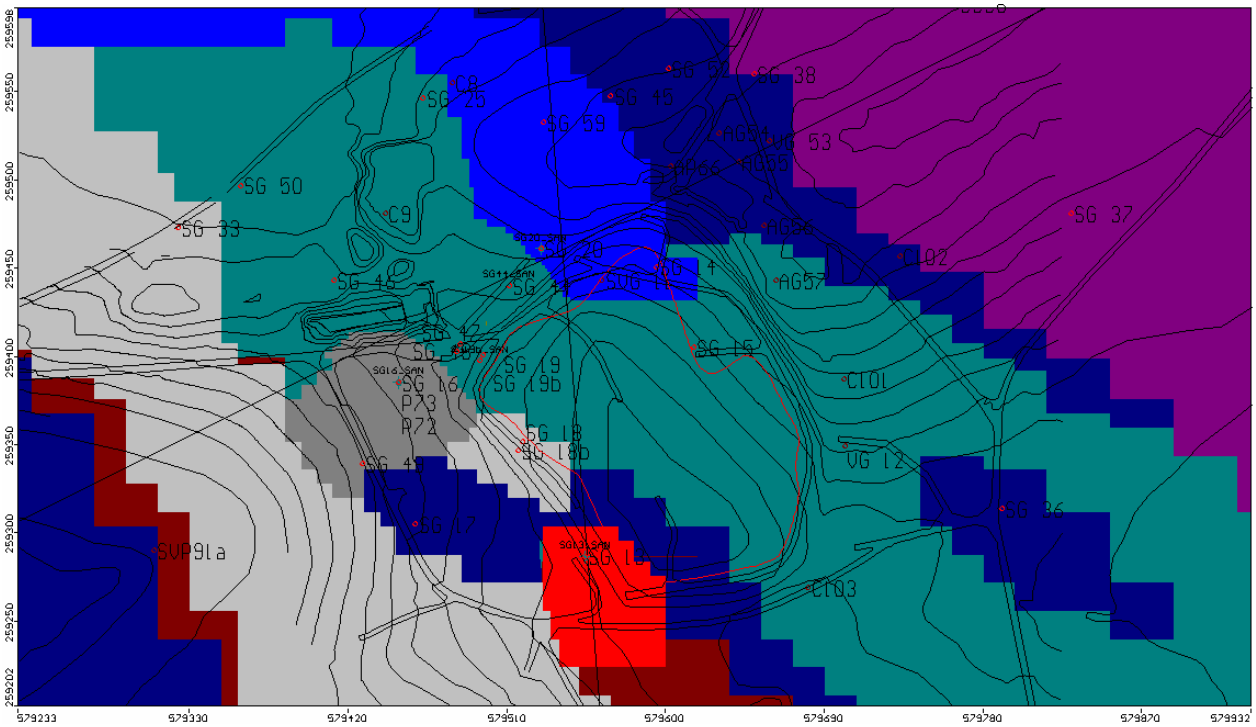


Figure 15: Classes de perméabilité du modèle (cf. explications dans le texte et au Tableau 4).

4.4 Direction des écoulements souterrains

A un seul endroit dans le système, à l'aval des forages SG19 et SG19b, une pollution des eaux souterraines donne une information sur la direction d'écoulement des eaux souterraines. Cette information a également servi à la calibration du modèle, forçant à diminuer la perméabilité dans les terrains situés à l'ouest de la DIB.

La Figure 16 ci-dessous indique que la ligne d'écoulement modélisée à l'aval de SG19b (ligne rouge sur la figure), passe par SG46 et SG50, ce qui est conforme aux observations (cf. chap. 5).

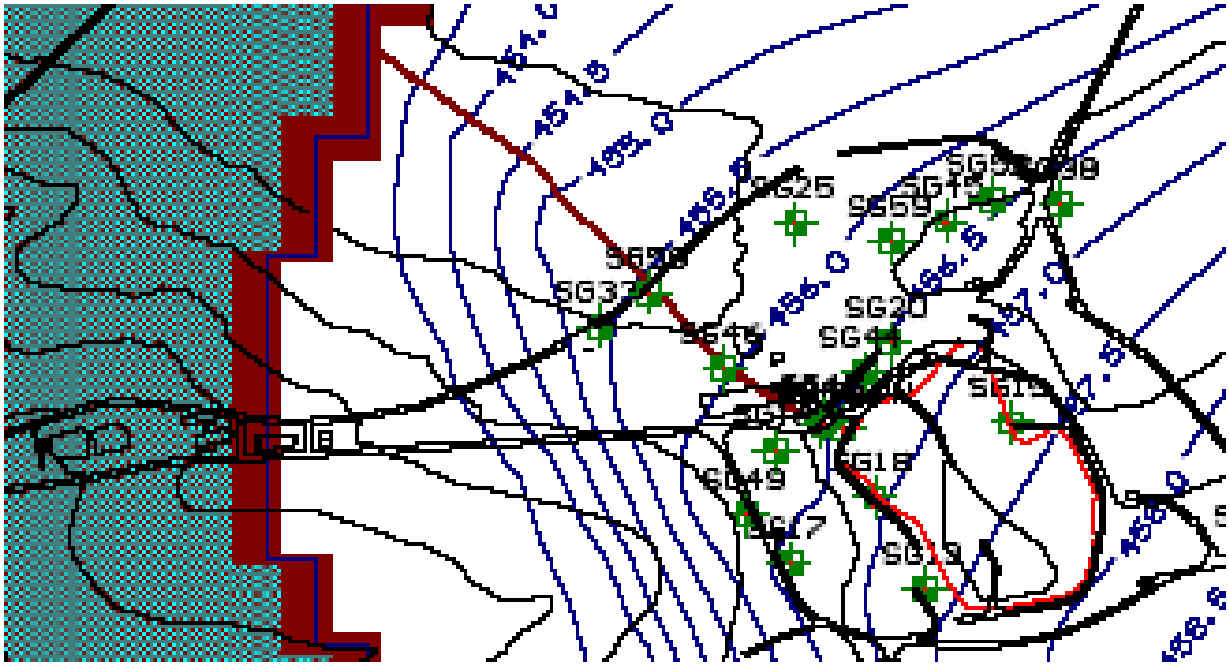


Figure 16: Détail montrant la ligne d'écoulement (rouge) à l'aval de SG19b.

4.5 Simulation du pompage continu en SG19b

Sur la base du modèle s'écoulement stationnaire obtenu, une simulation du pompage continu en SG19b a ensuite été réalisée en mode transitoire. La quantité d'eau prélevée s'élève à 20 m^3/jour. La zone d'influence de ce pompage a été déterminée à l'aide de la technique « inverse particle tracking » depuis la crépine du piézomètre (Figure 17 et Figure 18).

Le temps de transit de l'eau en aquifère sous l'ensemble de la décharge (SE-NW), atteint environ 200 jours.

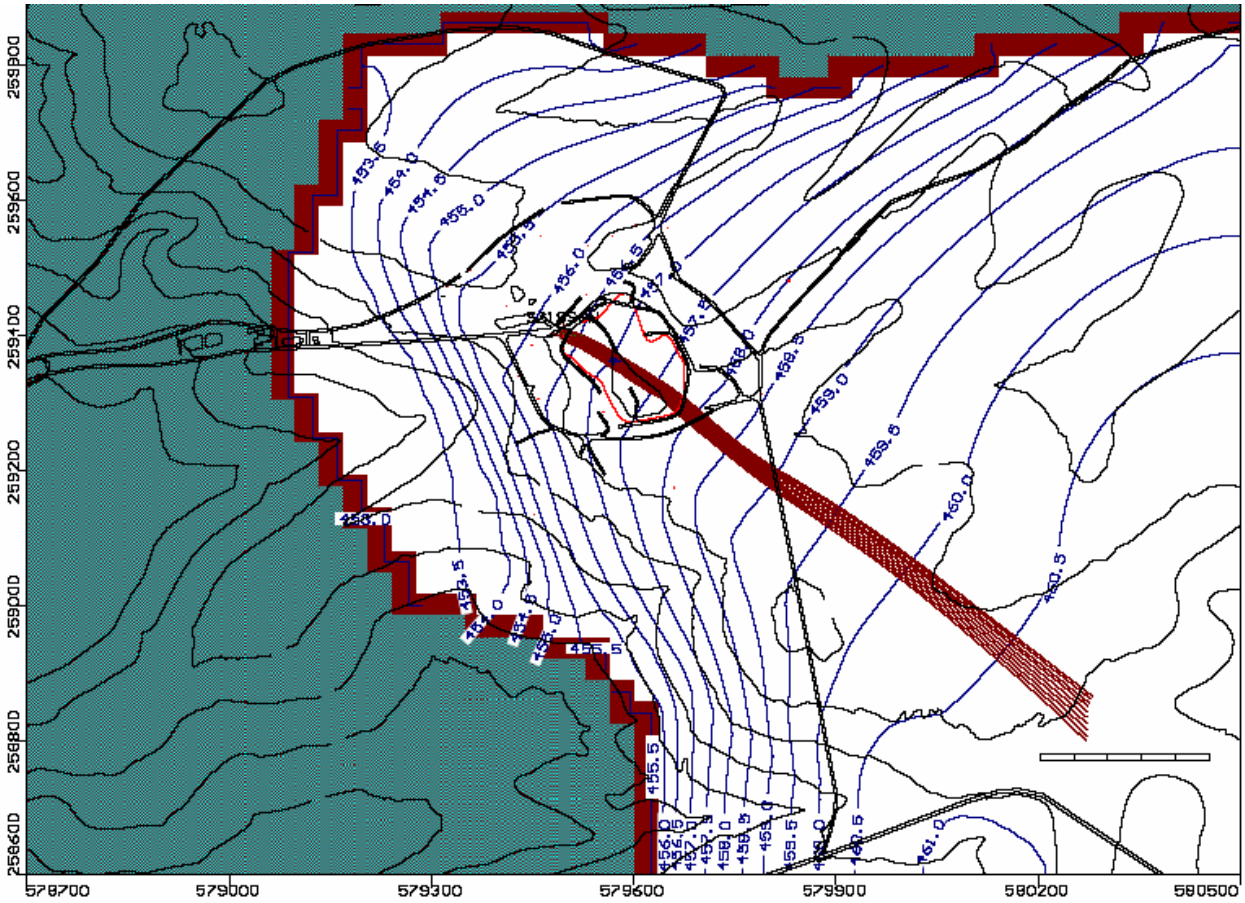


Figure 17: Distribution des équipotentielles pour le modèle calibré avec pompage en SG19b, avec indication des lignes de courant alimentant ce forage.

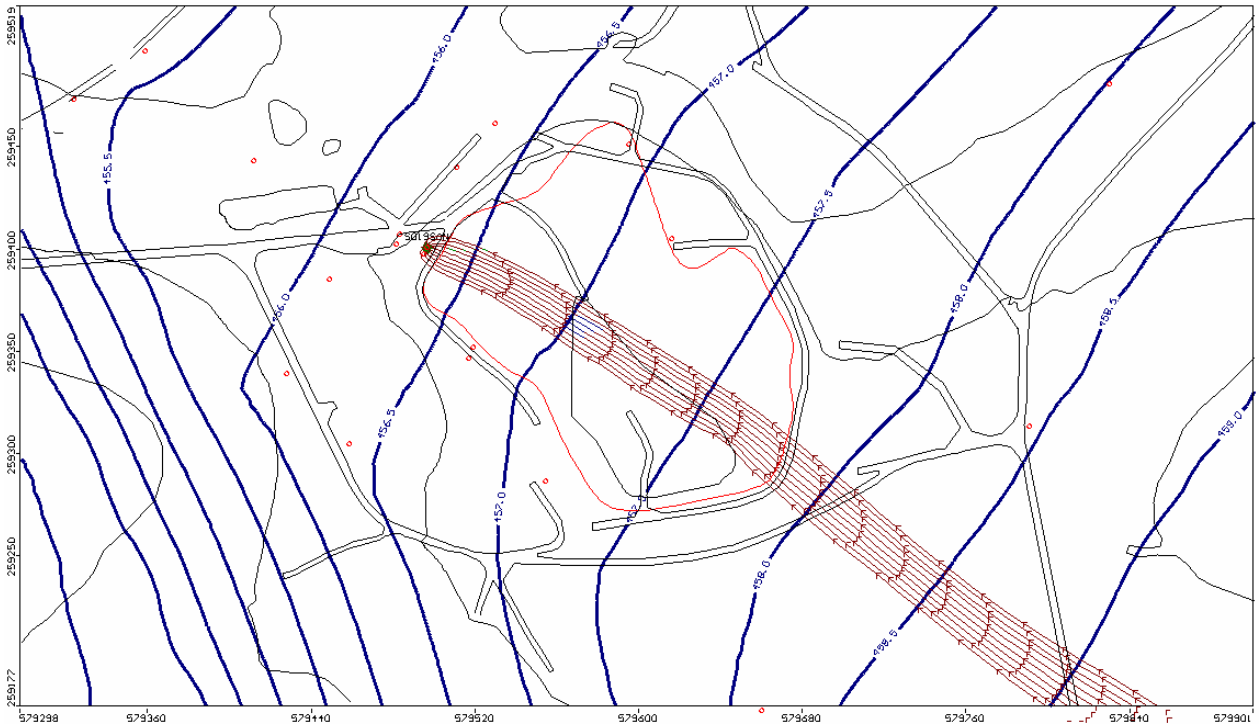


Figure 18: Distribution des équipotentielles pour le modèle calibré avec pompage en SG19b, détail de la Figure 17 ; temps écoulé entre les flèches sur les lignes d'écoulement : 30 jours.

Le cône de rabattement causé par le pompage de 20 m^3/jour au piézomètre SG19b simulé, montre une forme analogue aux données mesurées : Depuis le début du pompage en SG19b, le suivi en continu des niveaux piézométriques en SG15, SG16, SG18b, SG19, SG20, SG25, SG46 et SG48 indique qu'un état stationnaire (stabilisation du rabattement aux divers forages) se met en place entre le 15ème et le 30ème jour suivant le début du pompage, respectivement l'augmentation du pompage de 10 à 20 m^3/jour, le 25 avril 2002. Le Tableau 5 indique les rabattements mesurés plus de 1 mois après l'augmentation du débit le 25.04.02, à divers forages surveillés aux alentours de SG19b ; il indique également les rabattements calculés par modélisation en écoulements permanents avec un pompage de 20 m^3/j en SG19b, après calibration du modèle.

Tableau 5: Rabattements mesurés et calculés aux divers forages surveillés aux alentours de SG19b, suite au pompage de 20 m^3/j dans ce forage.

Forage	Distance depuis SG19b [m]	Rabattement mesuré [m]	Rabattement calculé par le modèle [m]
SG19b	- - -	0.51	0.43
SG15	120	~0.05	0.05
SG16	50	0.21	0.15
SG18b	58	0.08	0.16
SG19	3.5	0.26	0.34
SG20	73	0.13	0.12
SG46	95	~0.05	0.10
SG48	16	(>0.13) *	0.25

* : Le forage SG48 ayant été mis en place après le début du pompage en SG19b, seule une partie du rabattement (suite à l'augmentation du débit de pompage le 25.04.02) a pu être mesuré.

D'une manière générale, les rabattements calculés par le modèle sont du même ordre de grandeur que ceux mesurés, confirmant ainsi qu'en modélisation hydraulique, la calibration du modèle atteint un bon niveau de correspondance avec les phénomènes observés. Dans le détail, une concordance optimale ne peut pas être obtenue. D'une part, les enregistrements de terrain sont difficiles à interpréter du fait de la constante fluctuation des niveaux piézométriques due aux variations de pression atmosphérique. D'autre part, le milieu naturel est hétérogène, alors que dans le modèle, de grandes zones de perméabilités uniformes ont été simulées.

Cette simulation et ses résultats proches de la réalité des mesures de terrain montre que l'utilisation du présent modèle est adaptée pour la modélisation mathématique de pompages, aussi bien dans le cas de la surveillance de la qualité des eaux des cailloutis du Sundgau que dans celui d'interventions en cas d'accident.

4.6 Simulation de l'essai de pompage simultané

L'essai de pompage simultané réalisé en fin février et début mars 2006, a permis d'ajuster les classes de perméabilité du modèle (Figure 15), d'améliorer la calibration et de préciser les débits de pompage possibles aux forages utilisés pour cet essai. Aux forages où, lors de la simulation de l'essai de pompage multiple, les rabattements calculés étaient trop importants ou trop faibles par rapport aux valeurs mesurées, quand bien même les rabattements calculés aux piézomètres de contrôle ainsi que la surface piézométrique simulée coïncidaient avec les données mesurées, un ajustement local de la perméabilité sur le pourtour des forages a été effectué. Ceci provient du fait que l'interprétation d'un essai de pompage ne donne pas un résultat unique : Le rapport [3] (Tableau 3) indique pour chaque essai de pompage effectué entre 2000 et 2002, une fourchette de perméabilités déduites de diverses méthodes d'interprétation. Il indique aussi une perméabilité réaliste du milieu déduite des méthodes qui intègrent le rabattement dans d'autres forages d'observation et non pas des méthodes qui se basent uniquement sur le rabattement observé à l'intérieur du puits de pompage. Ainsi, les classes de perméabilités indiquées au Tableau 4 ont été définies surtout sur la base de ces valeurs réalistes de perméabilité. Le rabattement dans le puits de pompage peut être influencé par divers effets locaux autour du puits (perméabilité perturbée dans et autour du massif filtrant et de la crépine, etc.) qu'on appelle effets de puits qui le plus souvent ont un effet négatif sur le rabattement pour un même débit pompé, mais qui peuvent également avoir un effet positif, par exemple s'il se crée une auréole de matériel délavé et perméable autour du puits. Afin de compenser ces effets de puits, la perméabilité locale sur une couronne de 20 cm autour de certains forages, a été adaptée de manière à simuler au mieux les rabattements observés lors de l'essai de pompage multiple. A SG19b et SG44, une nette diminution de la perméabilité locale a été nécessaire pour reproduire les rabattements importants observés au cours de l'essai, tandis qu'à SG20, la perméabilité locale a été augmentée (Tableau 6).

Tableau 6: Modifications de la perméabilité aux forages pour tenir compte des effets de puits.

Forage	Classe de perméabilité dans le secteur du forage [m/s]	Perméabilité imposée à l'enveloppe du forage pour corriger l'effet de puits [m/s]
SG13	2.0×10^{-5}	2.0×10^{-5}
SG16	8.0×10^{-5}	6.0×10^{-5}
SG19b	2.2×10^{-4}	6.0×10^{-5}
SG44	2.2×10^{-4}	1.5×10^{-5}
SG20	1.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}

Sur la base des ajustements du modèle décrits ci-dessus, la Figure 19 donne les résultats de comparaison entre les niveaux calculés et les niveaux mesurés dans les forages où ont eu lieu les pompages. Les valeurs absolues des rabattements calculés et mesurés correspondent bien. On observe un petit décalage entre les niveaux calculés et les niveaux mesurés qui provient du calage global du modèle indiqué à la Figure 23.

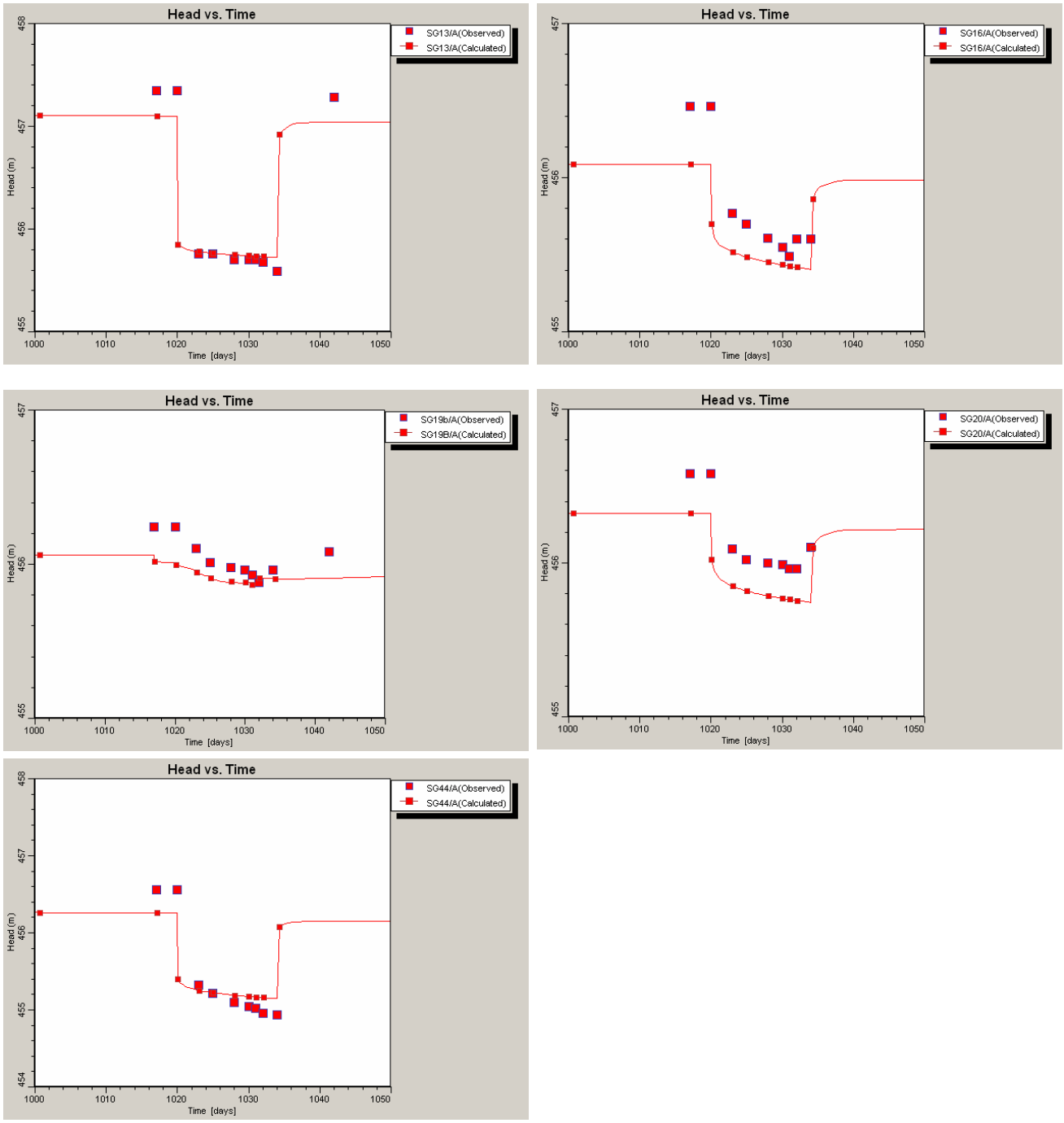


Figure 19: Résultats de la calibration du modèle sur la base des niveaux piézométriques, de gauche à droite et de haut en bas, les forages SG13, SG16, SG19b, SG20 et SG44.

Le Tableau 7 donne la différence entre le rabattement total mesuré in situ et le rabattement total calculé par le modèle à la fin de l'essai de pompage multiple de février – mars 2006, pour le modèle avant (modèle du 31.10.2005) et après calibration faite sur la base de cet essai. La moyenne de cette différence après calibration est de 22.5 cm pour un rabattement total observé variant d'un forage à l'autre, entre 35 et 172 cm. Cette différence positive a été gardée pour éviter que le modèle sous-estime les débits et flux lors des scénarios de pompage.

Tableau 7: Amélioration de la simulation de l'essai de pompage par le nouveau calage du modèle.

Forage pompé	Rabattement mesuré - rabattement calculé avant calage du modèle [cm]	Rabattement mesuré - rabattement calculé après calage du modèle [cm]
SG13	120 cm	26 cm
SG16	62 cm	24 cm
SG19b	23 cm	15 cm
SG44	133 cm	44 cm
SG20	14 cm	4 cm

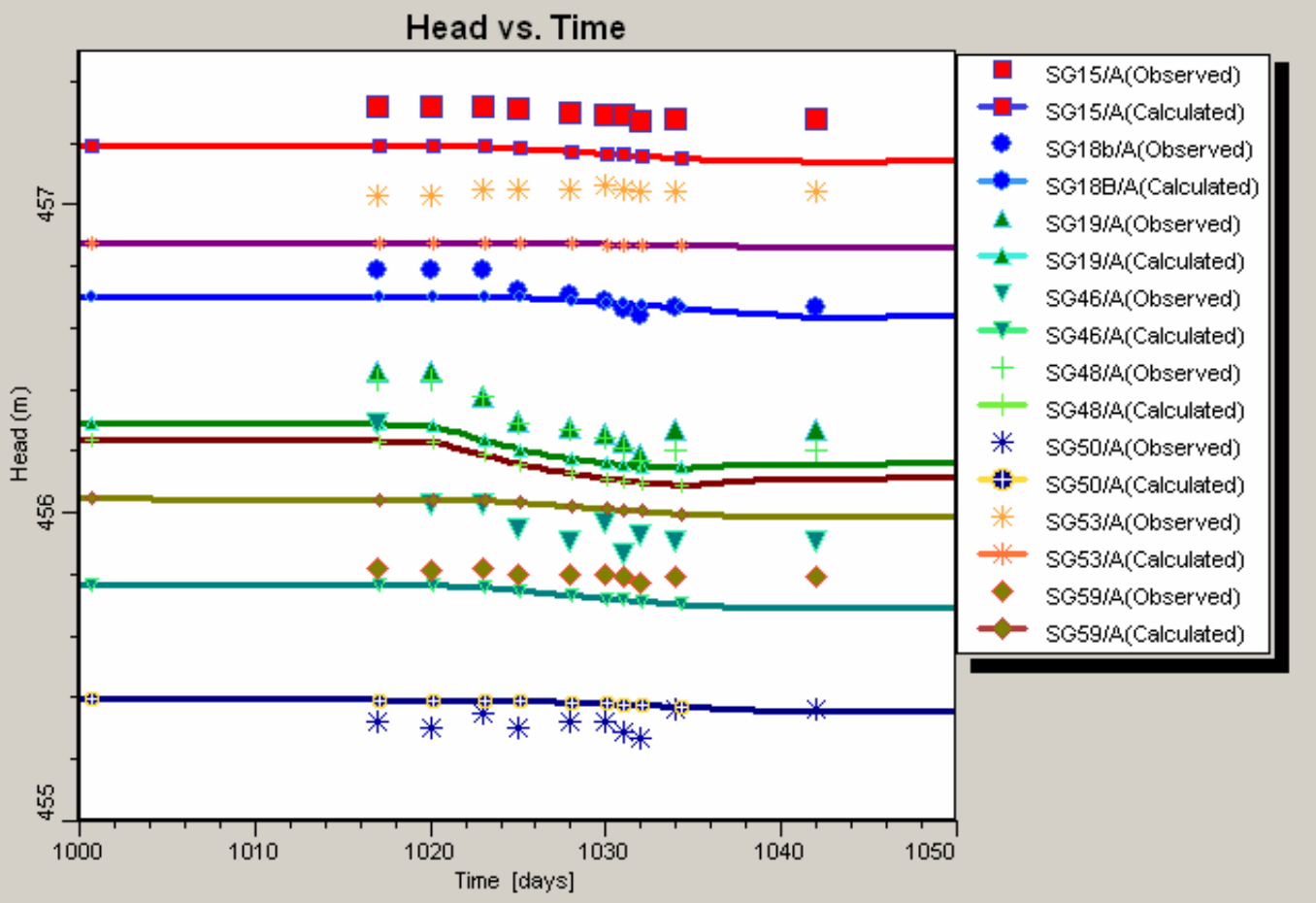


Figure 20: Résultats de la calibration du modèle sur la base des niveaux piézométriques aux forages SG15, SG18b, SG19, SG46, SG48, SG50, SG53 et SG59

La Figure 20 donne les valeurs de comparaison entre les niveaux mesurés et les niveaux calculés aux piézomètres d'observation durant l'essai de pompage. Mis à part le fait que les séries sont décalées de quelques cm ou dm les unes par rapport aux autres (effet de calage global du modèle), on remarque que la réaction de l'aquifère avec un faible rabattement aux divers points d'observation durant l'essai de pompage, est très bien reproduite par le modèle.

4.6.1 Surface piézométrique

Le modèle calé a permis de calculer les surfaces piézométriques à divers moments au cours de l'essai de pompage. La Figure 21 représente l'état avant le début de l'essai de pompage le 17 février 2006 et la Figure 22, l'état juste avant l'arrêt des pompes le 6 mars 2006. Elles montrent que le rabattement global provoqué par l'essai de pompage se situe entre 5 et 20 cm dans la région proche de la DIB, ce qui correspond aux valeurs de rabattement mesurées (Figure 4).

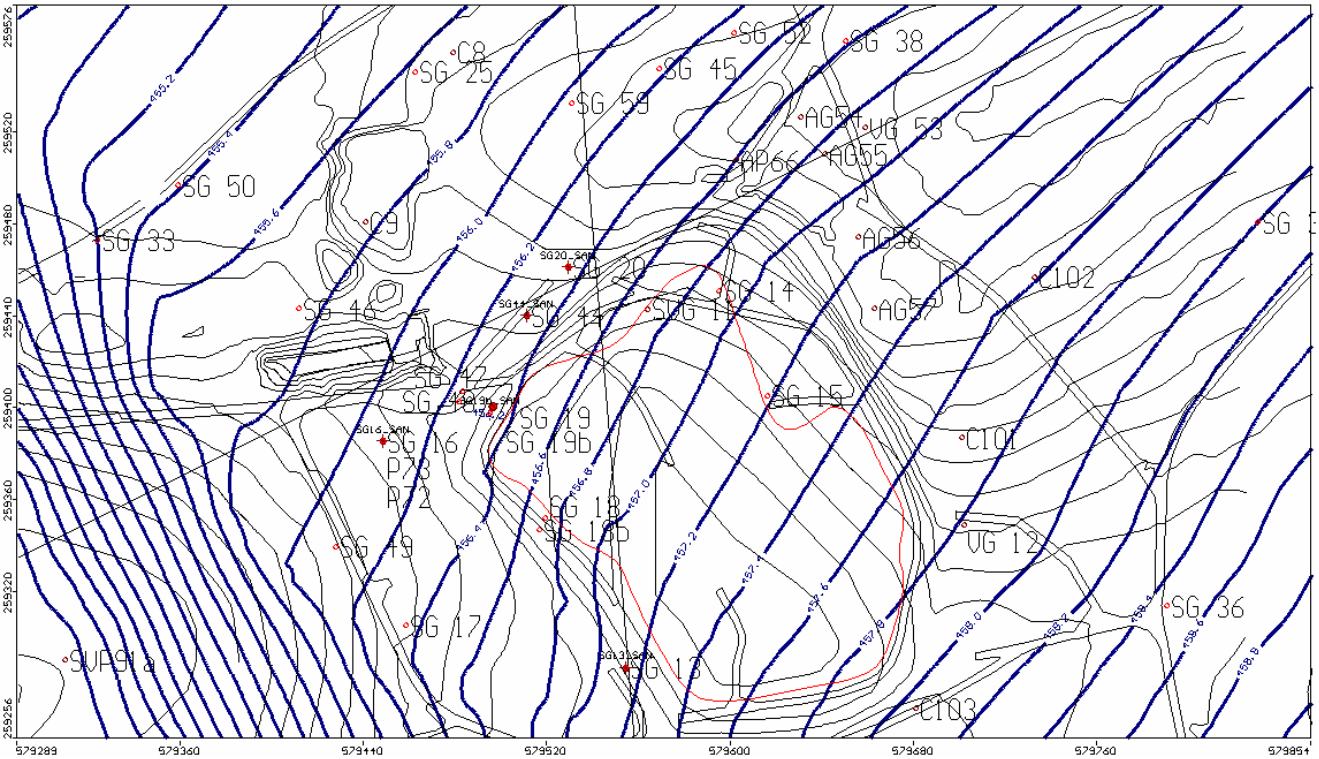


Figure 21: Surface piézométrique calculée avant le début de l'essai de pompage, le 17 février 2006.

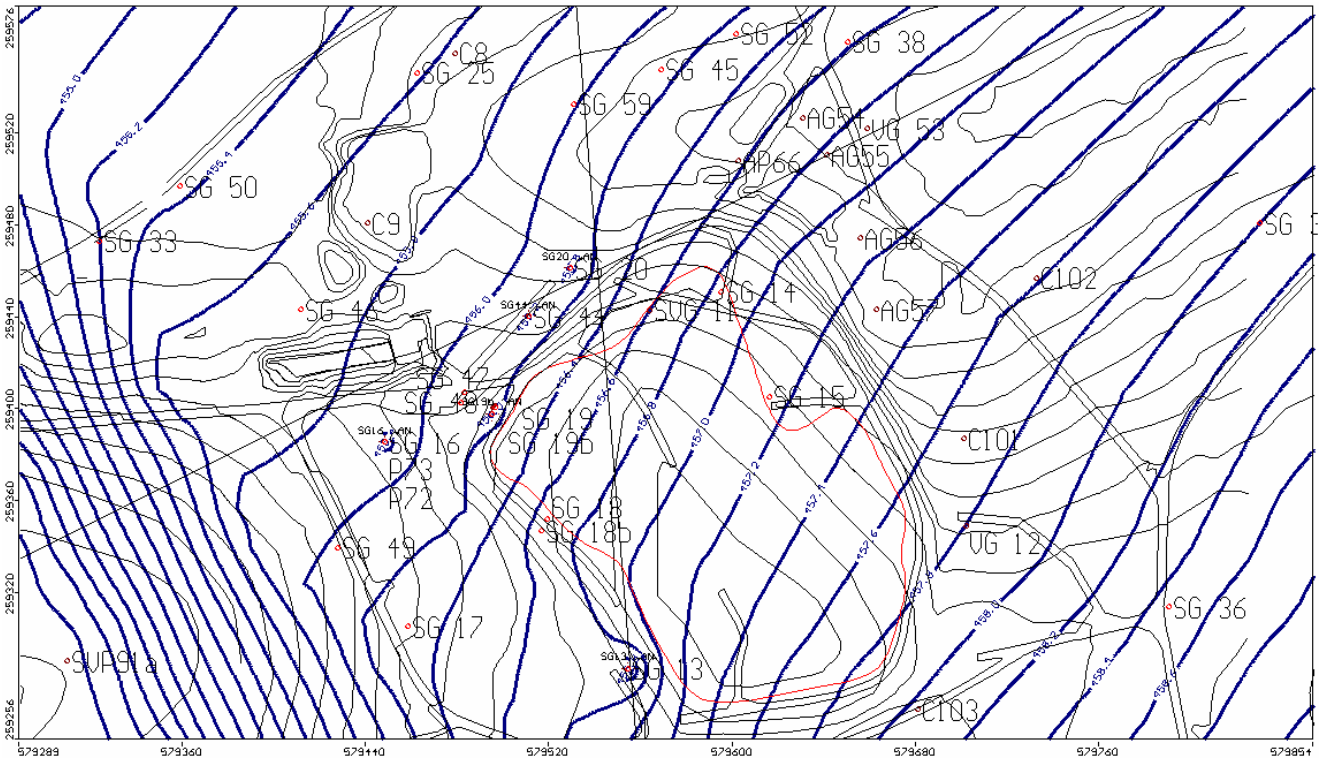


Figure 22: Surface piézométrique calculée avant la fin de l'essai de pompage, le 6 mars 2006.

4.7 Résultat de la calibration du modèle hydraulique

La Figure 23 indique les écarts maximaux positifs et négatifs entre les potentiels calculés et potentiels mesurés à la fin du processus de calibration de la partie hydraulique du modèle. La corrélation est indiquée sous la forme de l'écart moyen au carré (SEE - Standard Error of the Estimate) entre la valeur de la hauteur du piézomètre mesurée et celle calculée. Les lignes interrompues rouges correspondent à l'intervalle de confiance de 95 % des valeurs. Les lignes interrompues bleues correspondent à l'intervalle dans lequel se trouvent le 95 % des valeurs calculées.

Les écarts se rapportent aux valeurs calculées: un signe positif signifie que le potentiel calculé est trop élevé par rapport à la valeur mesurée, alors qu'un signe négatif indique une valeur calculée trop faible. Les résultats de la simulation ne sont représentés graphiquement que pour la dernière étape de calibration. L'écart moyen au carré (SEE) s'élève à 0,062 m. La moyenne des résiduels est de -0.048 m et la moyenne des valeurs absolues des résiduels est de 0.222 m, valeurs tout à fait acceptables dans le présent contexte.

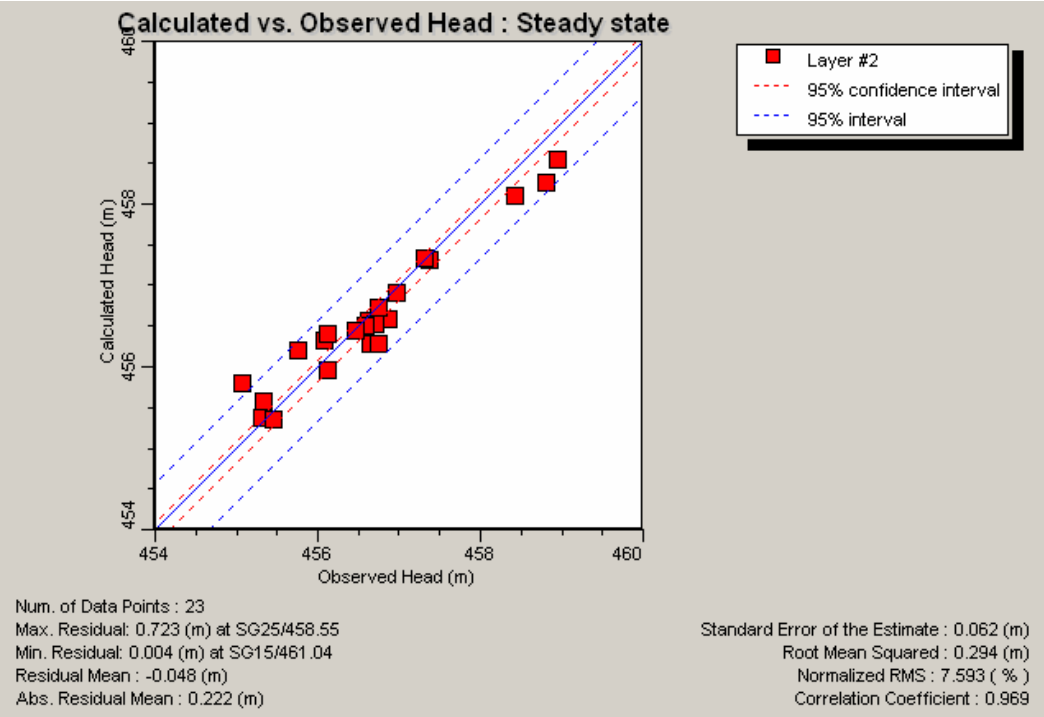


Figure 23: Résultats de la calibration du modèle sur la base des niveaux piézométriques.

Lors des dernières étapes de calibration, les valeurs des classes de perméabilité initialement définies sur la base des essais de pompage ont été quelque peu modifiées pour obtenir des effets locaux. Particulièrement, les efforts de modélisation ont permis de mettre en évidence qu'à l'ouest du chenal perméable de direction SE-NW, passant sous la décharge, il doit se trouver une bande de terrain très peu perméable de la formation des cailloutis du Sundgau, qui empêche l'aquifère de se vider rapidement en direction de l'ouest. Cette bande de terrain a été modélisée par une bande peu perméable indiquée en couleur gris clair sur la Figure 15. Ces travaux de calibration apportent une amélioration supplémentaire, même si l'écart maximal atteint encore 0.72 m à SG25, secteur dans lequel une tendance significative montre que les potentiels calculés sont trop élevés (SG25 et SG59). La calibration peut toutefois être considérée comme terminée.

4.8 Évaluation de la simulation hydraulique

La calibration de la partie hydraulique du modèle sur la base d'un état stationnaire sans pompage, puis de manière transitoire avec le pompage en SG19 et ensuite de manière également transitoire sur l'essai de pompage simultané de février-mars 2006 donne un bon résultat du point de vue de la corrélation. La comparaison entre les potentiels mesurés et calculés sans le pompage est représentée à la Figure 23.

La distribution du renouvellement des eaux souterraines (recharge) a été optimisée de manière itérative dans les diverses classes indiquées sur la Figure 14.

En régime permanent, le bilan des flux entrant et sortant du modèle avec le pompage SG19b est donné au Tableau 8 :

Tableau 8: Résultats du bilan des entrées et sorties après calibration avec pompage en SG19b.

	Flux entrant:	**Flux sortant:**
Limite de potentiel imposé [m³/j]	39	394
Puits [m³/j]	0	20
Recharge (infiltration) [m³/j]	375	0
Total [m³/j]	**414**	**414**

Les sources ont été modélisées comme ligne de potentiels imposés. La quantité d'eau calculée, qui sort du périmètre du modèle par les sources est du même ordre que celle observée sur le terrain (cf. § 3.5.2).

4.9 Incertitudes du modèle

Un modèle reproduit une certaine vision de la réalité qui dépend entièrement des données à disposition et de leur qualité. Il n'a pas la prétention de reproduire exactement la réalité. De ce point de vue, chaque modèle est grevé d'incertitudes et il s'agit donc d'en tenir compte lors de l'interprétation des résultats.

5 Calibration du volet transport du modèle

Au forage SG19, la présence d'une faible pollution est connue depuis la fin des années 80. En 2001, le nouveau forage SG46 a mis en évidence un panache pollué relativement étroit dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau. Ce panache nommé « panache SG19 », a été observé dans les forages SG19, SG19b, SG47, SG48, SG46, SG50 et dans une moindre mesure dans SG33. Les évaluations et calculs faits par le bureau BMG pour l'étude de risques 2002 [25] indiquent que la quantité totale des HHV (hydrocarbures halogénés volatils) s'écoulant dans ce panache est comprise entre 1.6 kg (valeur réaliste) et 4.7 kg (valeur pessimiste) de HHV par an. Bien que les concentrations soient faibles, une action de pompage est en cours en SG19b depuis novembre 2001 afin de stopper cette contamination.

La modélisation du panache pollué de SG19 a été réalisée afin de :

- contribuer à caler le modèle sur les données chimiques à l'aval de SG 19b,
- tester les hypothèses antérieures concernant la source de pollution à l'amont de SG19,
- mieux définir les paramètres de transport du modèle, particulièrement les dispersivités longitudinale et transversale.

5.1 Données de base

Les analyses faites sur les échantillons prélevés durant l'essai de pompage en SG46 (17 – 26 septembre 2001) ont démontré la présence d'une contamination analogue à celle déjà connue depuis plusieurs années en SG19 [20]. Dès le 9 novembre 2001, un pompage continu en SG19b a été mis en place dans le but de capter les eaux souterraines polluées. L'efficacité de ce pompage est contrôlée à l'aide de mesures faites dans les forages SG47 et SG48, mis en place en décembre 2001 [17]. Le pompage a débuté avec un débit de 20 m^3/jour, puis de 10 m^3/jour entre le 22 novembre 2001 et le 25 avril 2002. Depuis cette date, il se poursuit avec un débit constant fixé à 20 m^3/jour (Figure 24). Les résultats correspondants sont présentés régulièrement dans les rapports techniques annuels [24].

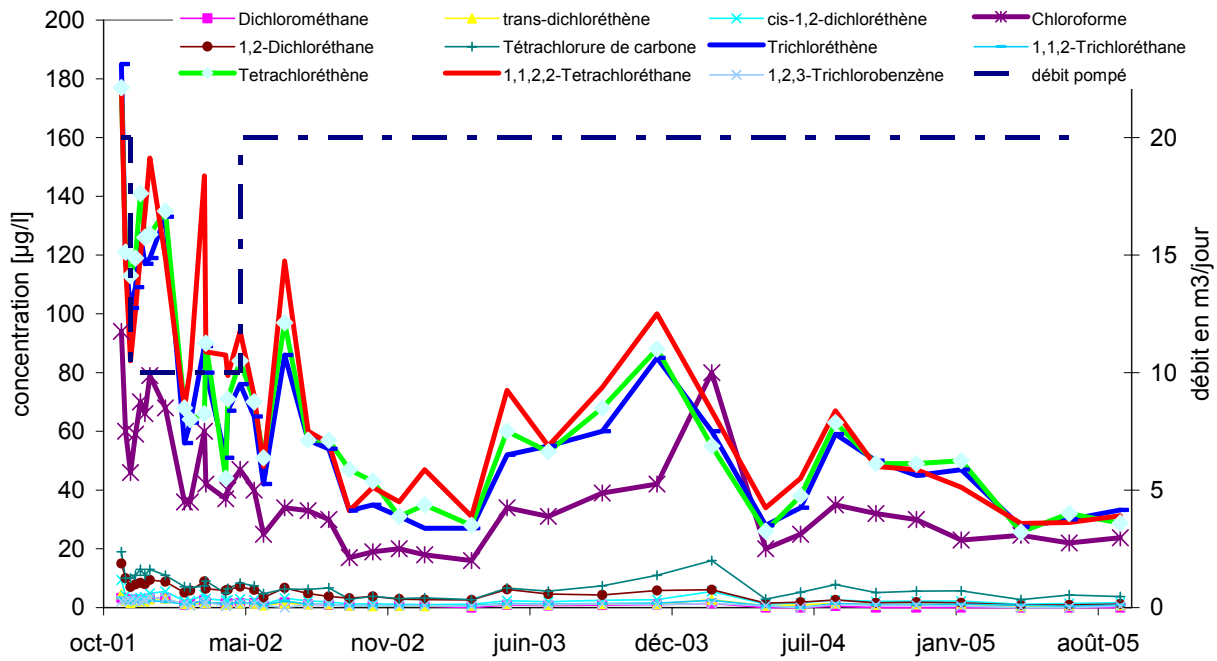


Figure 24 : Suivi du pompage en SG19b, évolution des concentrations dans l'eau pompée en SG19b depuis le début du pompage.

En SG47 et SG48, on observe l'impact positif de l'action de pompage en SG19b sur la qualité des eaux situées à l'aval hydraulique. En moyenne 95 % de la contamination a été supprimée en SG47 (Figure 25) et en SG48 (Figure 26), par rapport à la situation qui prévalait au début du pompage en SG19b. Ce n'est que lorsque le débit a été augmenté à 20 m^3/j le 25 avril 2002, que les concentrations à l'aval hydraulique de SG19b ont sensiblement diminué.

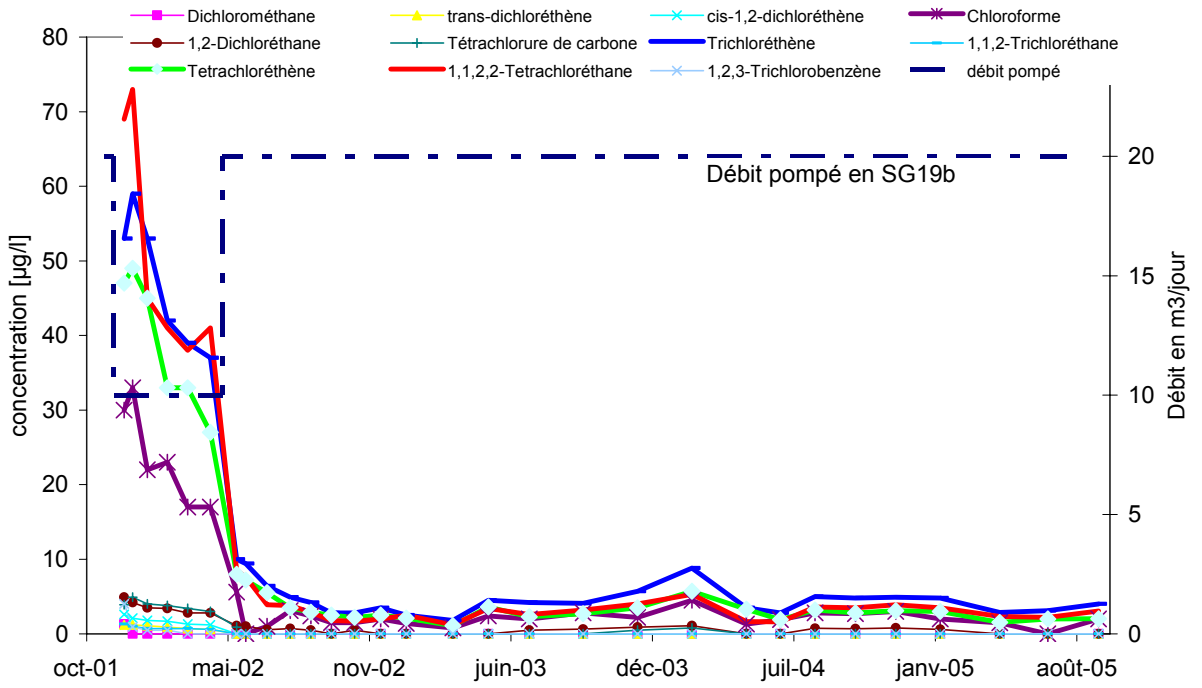


Figure 25 : Suivi du pompage en SG19b, évolution des concentrations en SG47.

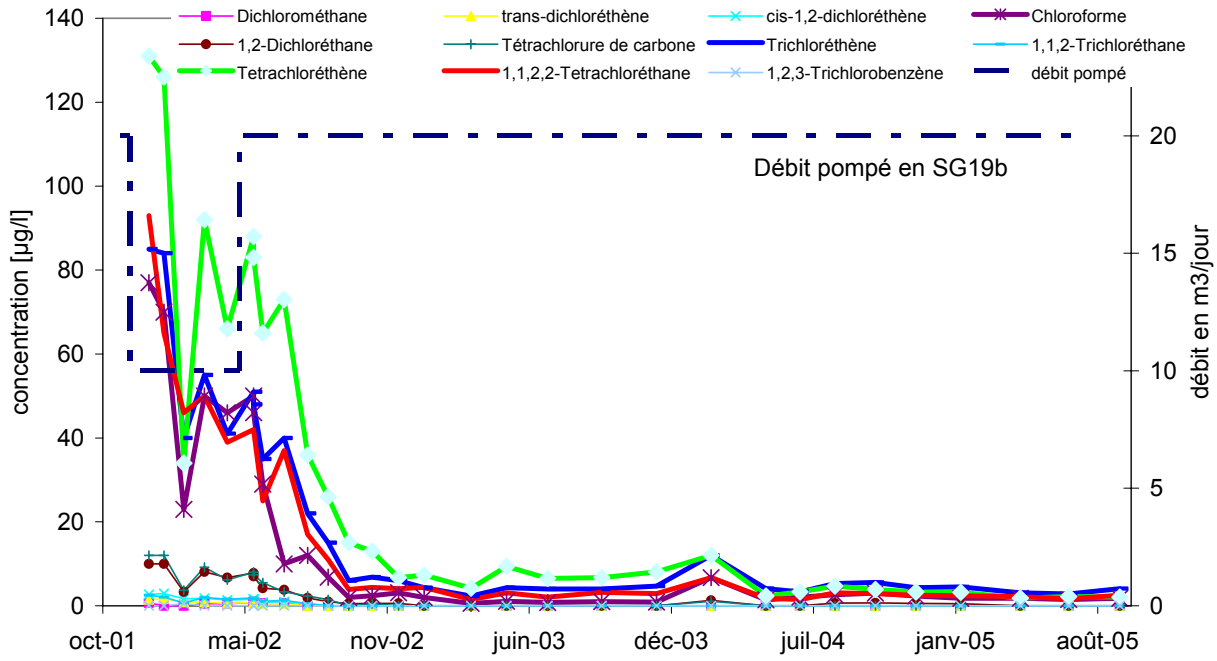


Figure 26 : Suivi du pompage en SG19b, évolution des concentrations en SG48.

5.2 Simulation du panache SG19

Le paramètre choisi pour la simulation du panache SG19 est la somme des HHV car il comprend de nombreux paramètres tels que le tétrachloréthène, le trichloréthène et le 1,1,2,2-tétrachloréthane, qui peuvent s'avérer problématiques pour l'environnement. Les autres paramètres tels que le DOC ou les bromures n'ont pas été choisis car le premier est formé de nombreuses substances biodégradables, ce qui rendrait le calcul trop entaché d'incertitudes ; le second, quand bien même il s'agit d'un traceur typique de la décharge, présente des valeurs trop proches de la limite de quantification à la source de contamination et particulièrement dans le panache.

Le Tableau 9 présente les teneurs moyennes en HHV mesurées aux divers points d'observation avant et depuis le pompage en SG19b.

Selon les études réalisées pour le projet d'assainissement, les données de base pour le transport de substances, sont les suivantes :

- Quantité de matière à la source de contamination : valeur réaliste : 1.6 kg HHV par an [25].
- Adsorption : les divers HHV observés dans le panache contaminé sont très peu adsorbés dans le milieu des cailloutis du Sundgau [26]. De ce fait, le phénomène d'adsorption a été négligé dans les calculs de modélisation.

- La largeur du panache pollué ne dépasse pas 25 m au droit de SG19b (données déduites des calculs et observations réalisés par CSD pour déterminer le débit de pompage en SG19b).

Tableau 9: Concentrations mesurées aux divers points d'observation.

Forage	Valeur moyenne de la somme des HHV avant, respectivement au début du pompage en SG19b	Valeur moyenne de la somme des HHV depuis août 2002 jusqu'à septembre 2005
SG19b	450 µg/l	183 µg/l (= pompage du panache pollué)
SG47	225 µg/l	12 µg/l
SG48	415 µg/l	19 µg/l
SG46	25 - 170 µg/l *	7.2 - 17 µg/l *
SG33	0.5 - 3.0 µg/l	1.3 µg/l
SG50 **	35.0 µg/l (5 valeurs de 2003)	12 µg/l (valeurs de 2004-2005)

* : Valeurs élevées en SG46 obtenues seulement après un pompage de plusieurs jours, car ce forage se trouve en bordure du panache pollué.

** : SG50 a été foré en 2003, 515 jours après le début du pompage en SG19b

Après simulation de diverses situations concernant la source de contamination et les paramètres de transfert, le résultat le plus plausible est donné à la Figure 27, à la Figure 28 et au Tableau 10. Les données de transfert utilisées pour cette simulation sont indiquées au Tableau 11 et commentées au § 5.3.

La simulation du transport de matière en écoulements transitoires présentée à la Figure 27 s'est déroulée en deux phases :

1. Phase 1 : Simulation d'une source de contamination s'écoulant sans intervention par pompage. Le temps simulé pour cette phase a été choisi arbitrairement à 1000 jours (partie supérieure de la Figure 27). Durant ce laps de temps, des conditions plus ou moins stationnaires se mettent en place surtout en ce qui concerne le cœur du panache (secteur en vert clair de plus de 100 µg/l ou 0.1 mg/l), les bords du panache pouvant encore croître latéralement dans les secteurs moins perméables.

2. Phase 2 : Dès le jour 1000, intervention par pompage de 20 m^3/jour dans le forage SG19b, sans arrêt durant 500 jours (partie inférieure de la Figure 27).

Durant la phase 2, on observe que le pompage retient une grande partie de la pollution provenant de l'amont de SG19b en interceptant le cœur du panache (partie de plus grande concentration). Le reste du panache qui ne peut pas revenir en arrière vers SG19b, poursuit sa route vers l'aval. Cela se voit bien 100 jours après le début

du pompage (jour 1100) où l'on observe le cœur du panache (concentrations > 0.1 mg/l) dépourvu d'apports de substances.

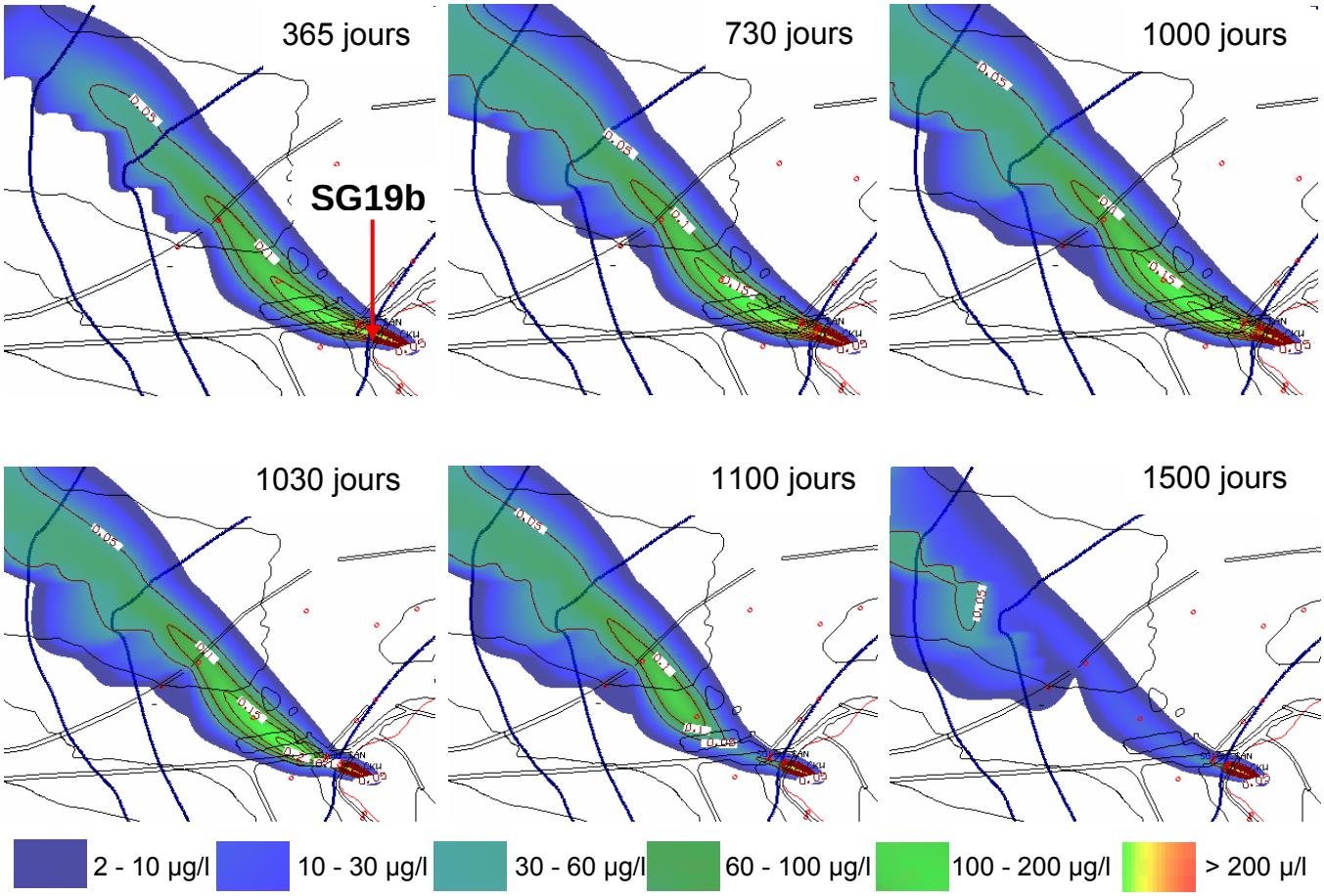


Figure 27 : Simulation du panache pollué à l'aval de SG19b : En haut de gauche à droite, avant le début du pompage en SG19b, jours 365, 730 et 1000 depuis le début de la pollution ; jour 1000 : enclenchement du pompage 20 m3/j en SG19b ; en bas de gauche à droite état aux jours 1030, 1100 et 1500.

Après 500 jours de pompage (jour 1500), le panache s'est notablement rétrécit à l'aval de SG19b et les concentrations y ont fortement décru. Le reste du panache continue son cheminement vers le NW ainsi que dans des terrains peu perméables plus à l'W-NW. A l'aval du forage SG19b, dans le sillon perméable des cailloutis du Sundgau (cf. Figure 15), le panache restant présente de très faibles concentrations (≤10 µg/l) en HHV. Il est formé par la fraction de pollution qui n'est pas captée par le pompage en SG19b et peut de ce fait poursuivre son cheminement vers l'aval.

Le même résultat est présenté sous une autre forme à la Figure 28. Elle indique l'évolution temporelle des concentrations totales de HHV simulées aux divers points d'observation. On constate que :

- Après l'activation de la source au jour 1, la pollution atteint les forages SG19b, SG47 et SG48, puis plus tard, les forages SG46 et SG50. Bien plus tard enfin,

vers le jour 1000, des concentrations à peine décelables (somme des HHV égale à 2 µg/l) atteignent le forage SG33.

- Après un certain temps, où les concentrations augmentent rapidement, ces dernières atteignent un plateau correspondant à l'état d'équilibre du panache pollué. Les valeurs calculées fluctuent quelque peu car la modélisation se fait en écoulements transitoires et à chaque pas de temps principal, la solution des calculs converge vers des valeurs qui peuvent s'écarter quelque peu (±5%) de part et d'autre de la courbe de tendance. Il s'agit là de perturbations numériques liées aux effets de grille (maillage) qui n'affectent toutefois pas l'évolution générale du processus physique.

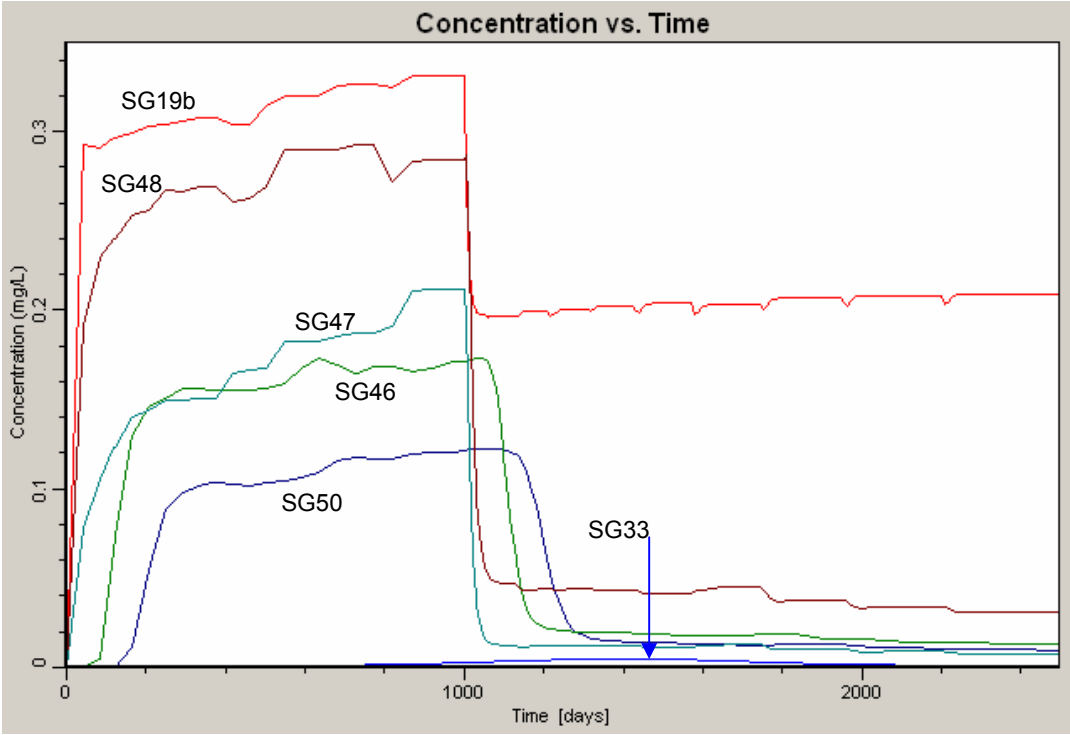


Figure 28 : Simulation du panache pollué à l'aval de SG19b : jour 0 = début de la contamination ; jour 1000 = début du pompage en SG19b. Courbes d'évolution temporelle de la somme des concentrations en HHV aux divers forages d'observation.

- Dès que le pompage en SG19b est activé (jour 1000), les concentrations calculées pour le forage SG19b décroissent jusqu'à une valeur proche de 200 µg/l (= 0.2 mg/l). Cette valeur est très proche de ce que l'on observe depuis août 2002 au forage SG19b (cf. Tableau 10). Multipliée par le débit pompé, elle correspond au flux de la source de contamination, à savoir 0.2 mg/l ou 0.2 g/m^3 x 20 m^3/j = 4 g/jour ou 1.46 kg/an. Étant donné que la plus grande part de la pollution est extraite du système par le pompage en SG19b, la concentration observée aux autres forages situés plus à l'aval diminue drastiquement pour atteindre des valeurs inférieures à 20 µg/l, à l'exception de SG48 où

cette valeur baisse progressivement de 40 à 30 µg/l entre les jours 1400 et 2500, c'est-à-dire 400 à 1500 jours après le début du pompage.

Tableau 10: Simulation du panache pollué à l'aval de SG19b : Comparaison des concentrations mesurées et calculées aux divers points d'observation.

	Σ HHV avant le pompage en SG19b		Σ HHV après l'activation du pompage en SG19b	
Forage	Valeur mesurée [µg/l]	Valeur calculée (jour 1000) [µg/l]	Valeur moyenne d'août 2002 à septembre 2005 [µg/l]	Valeur moyenne calculée (jours 1300 à 2500) [µg/l]
SG19b	450	330	183	201
SG47	225	210	12	9.3
SG48	415	285	19	36
SG46	25 – 170 *	170	7.2 – 17 *	15.6
SG33	0.5 - 3.0	3	1.3	2.0
SG50	**	120	12	12.5

* : Valeurs élevées en SG46 obtenues seulement après un pompage de plusieurs jours, car ce forage se trouve en bordure du panache pollué.

** : pour SG50, la première analyse (35 µg/l) a été réalisée 542 jours après le début du pompage en SG19b, résultat sûrement déjà modifié par l'influence du pompage en SG19b (cf. Figure 28).

Tableau 11: Données relatives au transfert, obtenues après calibration du modèle sur le panache.

Paramètre	Donnée utilisée pour la simulation après calibration
Dispersivité longitudinale α_L	2 m
Dispersivité transversale α_T	0.1 m
Retardation (adsorption - désorption)	aucune retardation (cf. texte)
Grandeur des cellules du modèle	maximum 2.5 m
Source de contamination : Grandeur	3 x 3 m
Source de contamination : Localisation	35 m au SE de SG19b
Flux de contamination à la source	1.6 kg Σ HHV par an, soit 92 g/m^3 injecté à raison de 17 m^3/an
Largeur du panache à SG19b	24 m

5.3 Dispersivité hydraulique et dispersion numérique

Une étude complémentaire [31] a été réalisée pour évaluer l'effet de la dispersion mathématique des calculs sur les résultats du transport simulé. Elle aboutit aux conclusions suivantes :

- Le principal résultat de l'étude est que l'on peut à l'aide du modèle déterministe MODFLOW et grâce au fait que la dispersion numérique des résultats est faible (méthode de calcul MOC), simuler un panache beaucoup plus étroit

que le panache réel de SG19. De ce fait, ce logiciel est adéquat pour la simulation de scénarios de pollution dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau.

- Les simulations indiquent que l'éventualité d'avoir un panache très étroit et très concentré dans le secteur de SG19b, n'est pas réaliste.
- Dans la simulation déterministe Modflow, de faibles variations de la valeur de dispersivité transversale occasionnent une grande variation de la largeur et de l'ouverture du panache simulé. Une variation significative de la dispersivité longitudinale a aussi un effet sur la largeur du panache simulé, effet qui reste cependant négligeable. De ce fait, le calage des fonctions de transport sur un panache existant, en l'occurrence le panache SG19, revêt une importance primordiale pour l'extrapolation du modèle à d'autres secteurs de l'aquifère, afin de simuler divers scénarios de contamination et d'assainissement. **Le calage décrit au chapitre 5.2 ci-dessus est satisfaisant. Il permet, tout en restant dans des conditions hydrogéologiques analogues et en gardant les mêmes paramètres de dispersivité, de représenter ailleurs divers scénarios de contamination, respectivement d'assainissement de l'aquifère.**

5.4 Discussion des résultats

Le résultat indiqué au Tableau 10 sur la base des données est satisfaisant compte tenu de l'étroitesse du panache de grande concentration au niveau de SG19b.

En situation avant pompage en SG19b, les valeurs calculées pour SG19b et SG48 sont inférieures à celles observées ; les autres valeurs calculées correspondent aux concentrations observées. Ce résultat peut être considéré comme bon, une analyse de sensibilité montrant en effet, que si la source ponctuelle de pollution est déplacée de 1 ou 2 mètres vers le NE ou le SW, les concentrations calculées pour SG19b, SG47 et SG48 sans pompage en SG19b peuvent fortement varier par rapport aux données du Tableau 10, car le centre du panache avec de hautes concentrations est relativement étroit. Ce phénomène a été également observé en réalité avec des différences de concentrations en HHV importantes entre les forages SG19 et SG19b [29] d'une part et les forages SG47 et SG48 (Figure 25 et Figure 26) d'autre part, pourtant très proches les uns des autres.

En situation après que le pompage en SG19b soit activé, les valeurs calculées correspondent bien aux observations pour l'ensemble des points.

Sur la base des données du modèle, la source de contamination ne peut pas se trouver à plus de 50 m au SE de SG19b car dans ces conditions, même si la source de pollution était ponctuelle (1 x 1 m), le panache serait trop large au droit de SG19b et contournerait la zone de capture du pompage.

La modélisation déterministe à l'aide du logiciel à différences finies MODFLOW pose le problème de la dispersion mathématique des concentrations mesurées (cf. [31]). Ce phénomène est bien connu dans la littérature : Que la modélisation se fasse à l'aide de la méthode des différences finies ou des éléments finis, la problématique reste la même. La littérature spécialisée [27] indique que pour diminuer au mieux les distorsions des résultats dus à la dispersion mathématique, les conditions suivantes doivent être satisfaites :

- Le nombre de Courant Co doit être plus petit que 1 : $Co = \frac{u\Delta t}{\Delta x} < 1$. Le logiciel Visual MODFLOW utilisé pour la présente simulation intègre cette condition en imposant Co = 0.7 et en calculant Δt (pas de temps pour les itérations du calcul) en fonction de Δx (grandeur des mailles de la grille du modèle).
- Le nombre de Péclet Pe doit être plus petit que 2 : $Pe = \frac{\Delta x}{\alpha_L} < 2$. Pour la région modélisée, cette condition a été respectée en diminuant la grandeur de la maille à 2.5 x 2.5 m (Δx = 2.5) ou plus petite (0.2 x 0.2 m à SG19b) et en prenant comme dispersivité longitudinale α_L = 2 m.

Si l'ouverture du panache calculé est encore trop large, la littérature spécialisée recommande de diminuer encore α_L ainsi que la dispersivité transversale α_T. Afin de simuler au mieux la forme du panache pollué à l'aval de SG19, les coefficients suivants ont été pris en compte pour la simulation : α_L= 2.0 m et α_T = 0.1 m. La Figure 29 tirée de [27] est une synthèse de nombreuses études qui ont déterminé la dispersivité longitudinale à l'intérieur d'aquifères, en fonction de la grandeur du panache contaminé ou de l'essai de traçage observé. Le domaine correspondant à l'observation de ces phénomènes dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau est indiqué en rouge. On constate que la valeur de α_L = 2.0 m, déduite du calage du modèle sur le panache SG19, est tout à fait plausible. Concernant la largeur ou l'ouverture du panache, c'est surtout la valeur de la dispersivité transversale qui entre en ligne de compte. Il est admis dans la littérature, sur la base des très nombreuses expériences, que la valeur de la dispersivité transversale α_T est globalement d'un facteur 10 à 20 inférieur à la valeur de la dispersivité longitudinale α_L en ce qui concerne les essais de laboratoire (petite échelle) et d'un facteur 3 à 100 inférieur à la valeur de la dispersivité longitudinale α_L en ce qui concerne les observations de terrain [27]. La valeur optimale de α_T déduite de la simulation du panache SG19 (Tableau 11) est

d'un facteur 20 inférieure à celle de α_L, ce qui entre tout à fait dans cet ordre de grandeur.

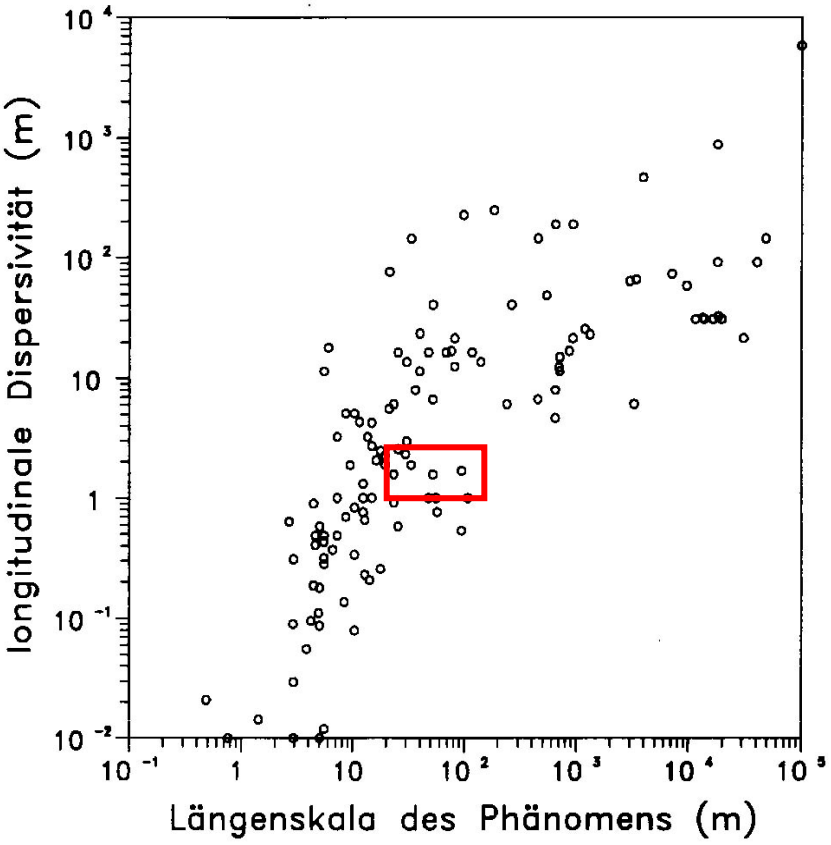


Figure 29: Dépendance de la valeur de la dispersivité en fonction de l'échelle d'observation [27]

5.5 Conclusions

En conclusion, la simulation du panache contaminé SG19 a permis de définir des paramètres réalistes pour la simulation du transport de substances dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau à l'aide du modèle développé. De tels scénarios peuvent être évalués pour affiner le dispositif de surveillance des eaux souterraines et définir les mesures d'intervention à mettre en œuvre en cas de contamination de l'aquifère.

6 Scénarios de pompage des eaux passant sous la DIB

La calibration hydraulique du modèle détaillée au chapitre 4, permet d'évaluer divers scénarios de pompage de la totalité des eaux passant sous la DIB en cas de contamination grave de l'aquifère, au cours des travaux d'assainissement. L'essai de pompage multiple ayant permis de définir les débits maximaux qu'il est possible de pomper à chaque puits, le modèle calé sur ces données, permet de tester un scénario de pompage à débit maximal et réaliste pour chaque constellation de puits utilisés pour un pompage simultané. Trois scénarios sont présentés au Tableau 12, pour un pompage maximal simultané dans 4, 5 et respectivement 6 forages SG situés à l'aval hydraulique de la décharge.

Tableau 12: Données principales des scénarios de pompage maximal simulés dans 4, 5, respectivement 6 forages au front de la décharge.

Puits activé N°	Débit essai 1 * [m^3/j]	Débit essai 2 ** [m^3/j]	Scénario de pompage simultané maximal		
			1 [m^3/j]	2 [m^3/j]	3 [m^3/j]
SG13 (15.4 m^3/j) *	15.4	11.5	15	15	15
SG19b (64.8 m^3/j) *	64.8	24.5	45	45	45
SG20 (46.1 m^3/j) *	46.1	23	35	35	35
SG44 (60.4 m^3/j) *	60.4	24.5	30	30	30
SG16 (37.4 m^3/j) *	37.4	14.4		10	10
SG15 (57.6 m^3/j) *	57.6	- - -			10
Nombre de puits en action			4	5	6
Débit pompé total [m^3/j] **			125	135	145
Nombre lignes d'écoulement			100	100	100
Lignes traversant le dispositif			10	2	1
Pourcentage de lignes captées			90	98	99

* : Essai 1 : Débit moyen pompé lors de l'essai de pompage de 10 jours à chaque puits entre 2000 et 2002.
** : Essai 2 : Essai de pompage multiple de février – mars 2006 : Débit de pompage à chaque puits

Tableau 13: Résultats du bilan des entrées et sorties après calibration pour chaque scénario.

Éléments du bilan	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Flux entrant			
Recharge (infiltration) [m³/j]	402	402	402
Limite de potentiel imposé [m³/j]	41	42	43
Flux sortant			
Puits [m³/j]	125	135	145
Limite de potentiel imposé [m³/j]	318	309	300
Bilan entrant - sortant [m³/j]	**0**	**0**	**0**

Les résultats sont donnés aux Figures 16 à 18 ci-dessous, qui représentent la distribution de 100 lignes d'écoulement à l'intérieur de l'aquifère des cailloutis du Sundgau

passant sous la décharge, captées par les divers forages activés pour la simulation des scénarios mentionnés. Ces lignes d'écoulement sont simulées à l'aide de la méthode de « particle tracking ». Les espaces entre les petites flèches échelonnées sur chaque ligne d'écoulement correspondent à une durée d'écoulement de 30 jours. De part et d'autre de la décharge, entre 5 et 6 lignes d'écoulement ainsi modélisées dépassent le périmètre de cette dernière, afin de tester largement l'ensemble des lignes d'écoulement passant sous la décharge.

Les débits totaux pompés pour les scénarios 1 à 3 s'échelonnent entre 125 et 145 m^3/j (Tableau 12). Ils restent dans le même ordre de grandeur de ce qui avait été énoncé dans le rapport [3] en 2002 mais leur marge d'erreur est maintenant beaucoup plus faible.

Le bilan des entrées et sorties du modèle est donné dans le Tableau 13. Les entrées proviennent à environ 90 % de la recharge de l'aquifère (alimentation par les pluies) et à près de 10 % des limites de potentiels imposés. Les débits pompés diminuent proportionnellement les débits sortant du modèle par les limites de potentiels.

6.1 Scénario 1 : Pompage dans 4 forages existants

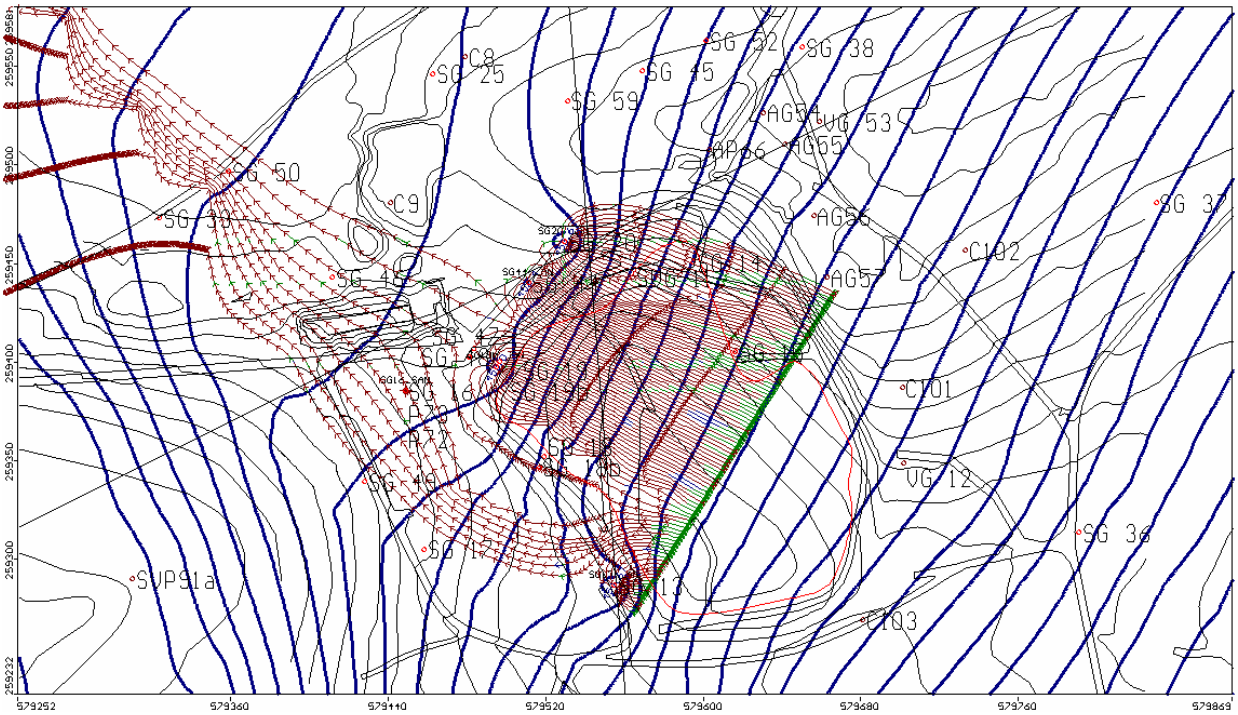


Figure 30: Scénario 1 de pompage simultané maximum aux forages SG13, SG19b, SG44 et SG20.

La Figure 30 montre que sur la base du modèle calibré (chapitre 4), en pompant dans les 4 forages SG13, SG19b, SG44 et SG20 (scénario 1) avec les débits de

pompage maximaux modélisables en situation permanente et compte tenu des effets de puits (§ 4.6), 90 % des lignes de courant introduites dans le modèle peuvent être captées.

On constate que surtout entre les forages SG13 et SG19b, dans un secteur relativement peu perméable, des lignes d'écoulement peuvent passer au travers du dispositif de pompage. De même, entre les forages SG19b et SG44, secteur relativement perméable, deux lignes d'écoulement peuvent « échapper » au pompage. Les forages SG44 et SG20 captent l'ensemble des lignes d'écoulement au nord de la DIB.

Sur la base de ce résultat, on constate que le forage SG16 doit être activé pour améliorer le captage des eaux souterraines au NW de la décharge (cf. scénario 2).

6.2 Scénario 2 : Pompage dans 5 forages existants

La Figure 31 montre qu'en pompant dans les 5 forages SG13, SG16, SG19b, SG44 et SG20 (scénario 2) avec les débits de pompage maximaux modélisables en situation permanente et compte tenu des effets de puits mentionnés au § 4.6, 98 % des lignes de courant introduites dans le modèle peuvent être captées.

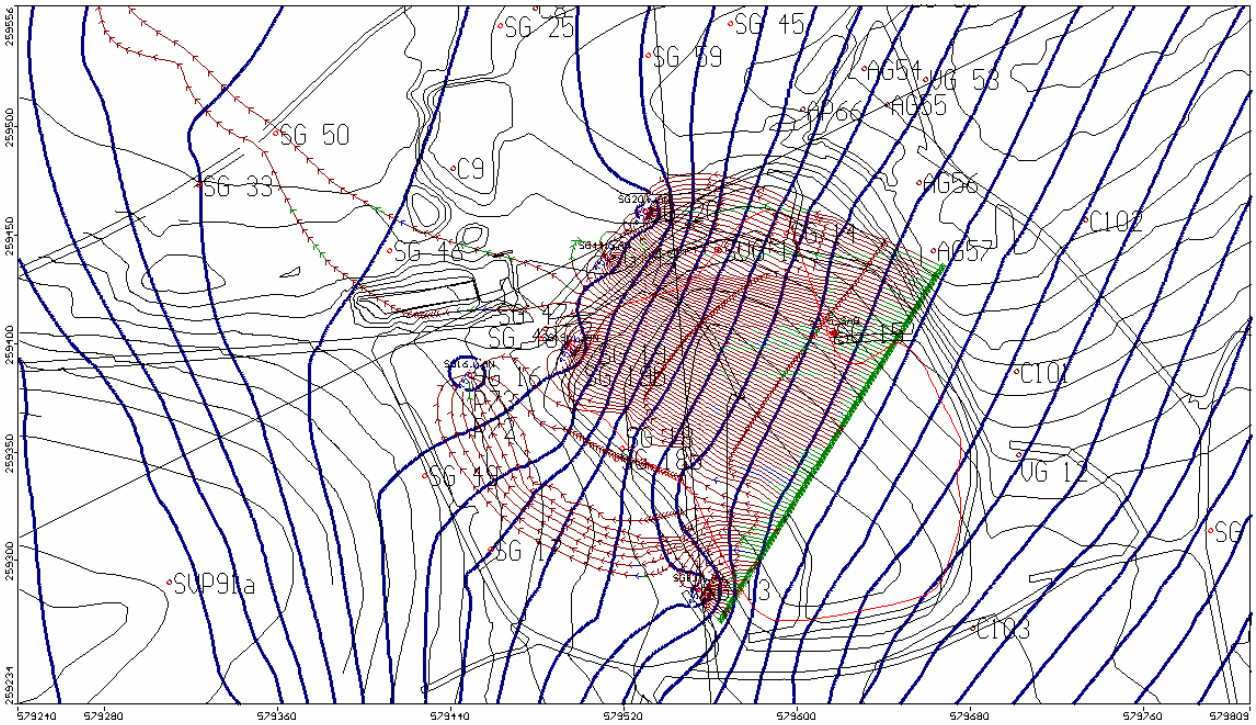


Figure 31: Scénario 2 de pompage simultané maximum aux forages SG13, SG16, SG19b, SG44 et SG20.

On constate que les deux seules lignes d'écoulement non captées par les pompages activés passent au travers du dispositif entre les forages SG19b et SG44, secteur relativement perméable.

6.3 Scénario 3 : Pompage dans 6 forages existants

En plus du pompage aux forages du scénario 2, le scénario 3 active également un pompage au forage SG15 situé partiellement à l'amont des écoulements. L'objectif est d'enlever à ce forage une eau potentiellement moins ou non polluée, en cas de contamination sous la décharge nécessitant une intervention hydraulique importante.

La Figure 32 montre qu'en pompant dans les 6 forages SG13, SG16, SG19b, SG44, SG20 et SG15 (scénario 3) avec les débits de pompage maximaux modélisables en situation permanente et compte tenu des effets de puits mentionnés au § 4.6, 99 % des lignes de courant introduites dans le modèle peuvent être captées.

On constate que la seule ligne d'écoulement non captée par les pompages activés passe au travers du dispositif entre les forages SG19b et SG44, secteur relativement perméable.

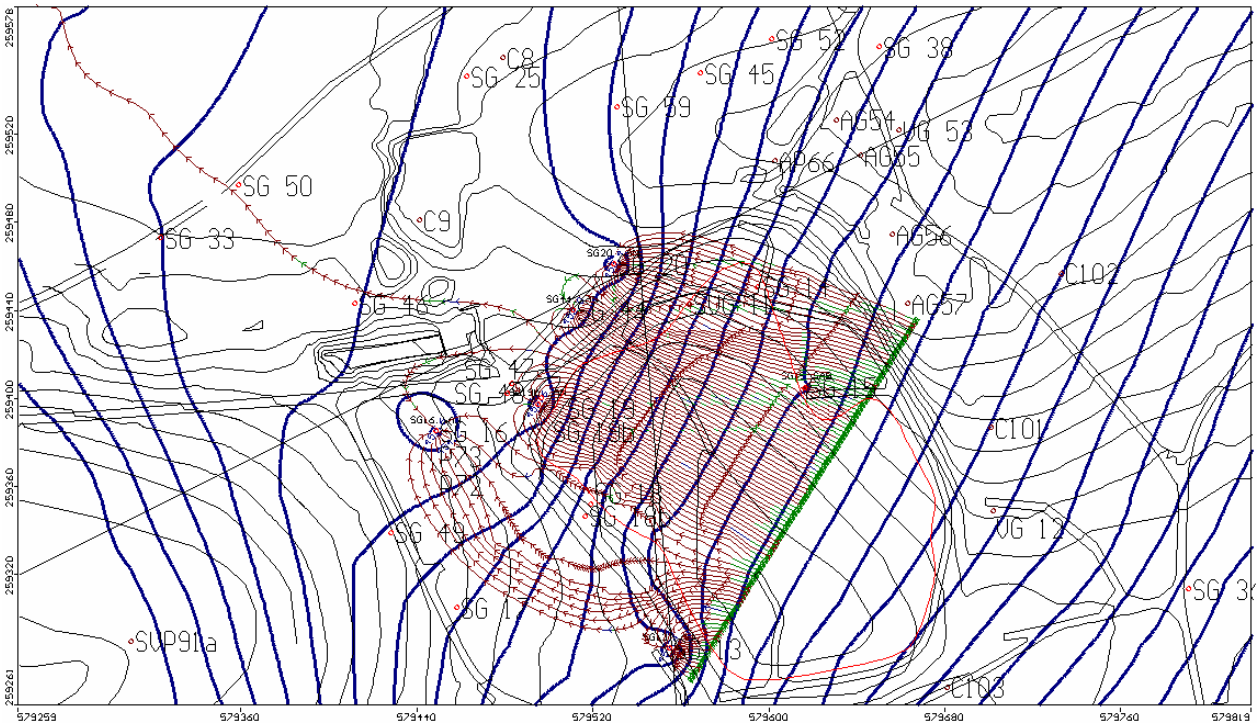


Figure 32: Scénario 3 de pompage simultané maximum aux forages SG13, SG16, SG19b, SG20, SG44 et SG15.

6.4 Conclusions

Les scénarios de pompages simultanés indiquent que :

- Avec les forages existants, il est possible de pomper une très grande partie des eaux souterraines passant sous la DIB avec des débits totaux situés entre 125 et 145 m^3/ jour au total.
- L'espace situé entre les forages SG19b et SG44 d'observation est trop important pour pourvoir assurer un captage total d'éventuelles eaux contaminées passant sous la DIB. Pour cette raison, nous recommandons la mise en place d'un nouveau forage entre SG19b et SG44, indiqué comme forage SG61 à la Figure 33 (cf. chap. 7).
- Les lignes d'écoulement passant sous le coin NE de la DIB peuvent être captées par le forage SG20 car elles sont fortement incurvées par l'effet du pompage. Cependant, pour la surveillance normale de ce secteur délicat, étant donnée la faible épaisseur de la formation des argiles de Bonfol au NE de la DIB, nous recommandons de placer un nouveau forage d'observation environ 30 m à l'E-NE du forage SG20. Ce nouveau forage est indiqué comme forage SG60 à la Figure 33 (cf. chap. 7).
- Un pompage intensif dans les forages SG13 et/ou SG16 permet de contrôler par pompage, une grande partie des lignes d'écoulement passant sous le secteur SW et W de la DIB.

7 Scénarios de contamination des eaux souterraines

Les données de base prises en compte pour le calage du modèle sur le panache pollué à l'aval de SG19 (chap. 5), ont été utilisées pour la simulation de divers scénarios de pollution pouvant survenir lors des travaux d'assainissement de la DIB. Les scénarios suivants ont été définis avec l'OEPN :

- Simulation de 4 points de contamination (Points 1 à 4), analogues à celui se trouvant à l'amont de SG19b, situés quelques mètres à l'intérieur de la décharge et pour lesquels, la trajectoire des écoulements souterrains passe entre deux forages d'observation existants. La description des simulations à ces 4 points fait l'objet des § 7.1 à 7.4.
- Simulation de deux scénarios catastrophe aux points 5 et 6 se trouvant dans des points bas de la décharge, avec la perte de grandes quantités de lixiviats en un laps de temps de 2, respectivement 100 jours : cf. § 7.5 et 7.6.

Ces points dont les coordonnées sont indiquées plus bas, figurent sur la Figure 33.

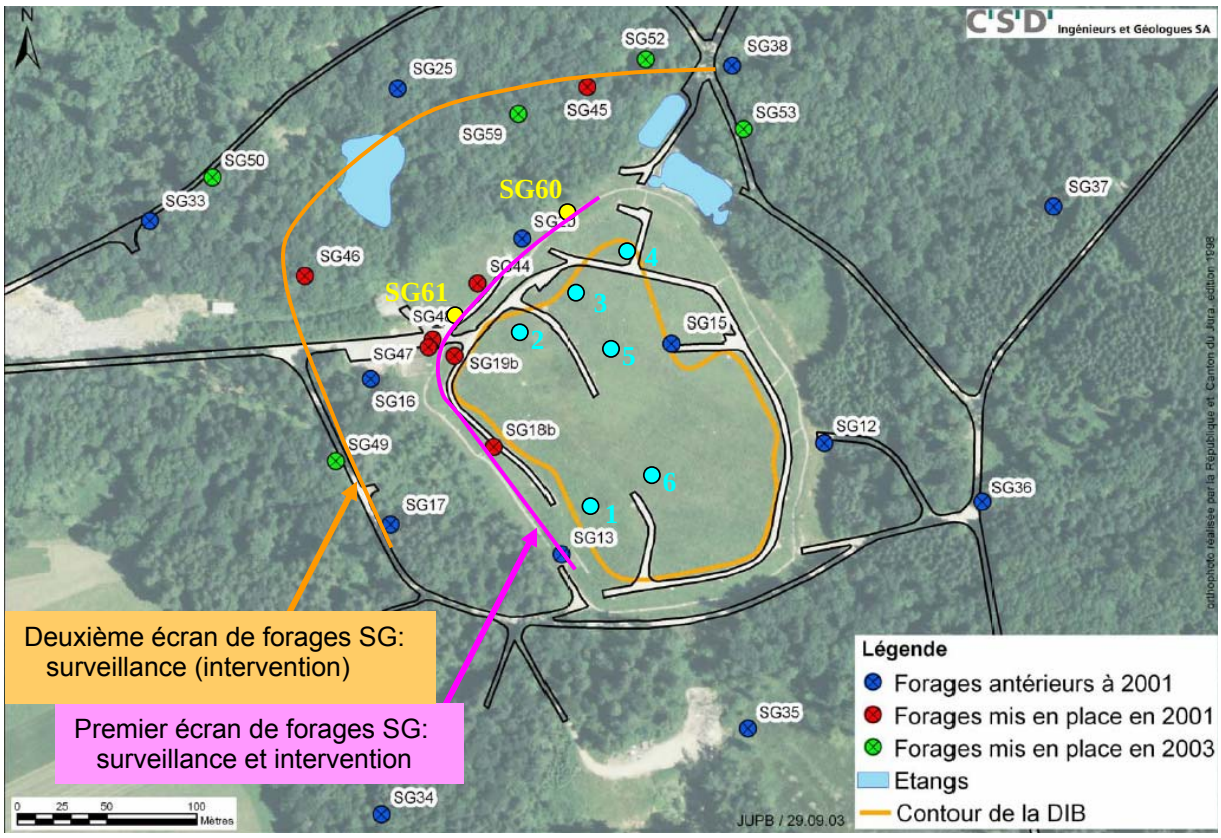


Figure 33: Emplacement des forages SG de surveillance de l'aquifère, avec en bleu clair, les points 1 à 6 des scénarios de contamination de l'aquifère depuis la DIB et en jaune, les forages SG60 et SG61 déjà prévus.

- Point 1: 579576 / 259312
- Point 2: 579525 / 259410
- Point 3: 579557 / 259429
- Point 4: 579593 / 259457
- Point 5 : 579586 / 259401 (compartiment 6 de la DIB „Trou de Laufon“).
- Point 6 : 579603 / 259334 (compartiment 3 de la DIB).

Aux points 1 à 4, des conditions similaires à celles de la contamination étudiée dans le panache SG19 (chap. 5) ont été simulées, à savoir l'arrivée dans l'aquifère de lixiviats transportant 1.6 kg Σ HHV par an, soit 92 g/m^3 injecté à raison de 17 m^3/an, sur une surface d'aquifère de 3 x 3 m. L'objectif de cette simulation est d'évaluer les conditions dans lesquelles les substances se déplacent et de quelle manière elles peuvent être observées, respectivement interceptées aux forages d'observation actuels. L'emplacement des points, proches du bord aval de la DIB, a été choisi de manière à se trouver dans des situations très peu favorables, permettant d'évaluer si la densité des points actuels d'observation est suffisante ou non.

Ces simulations poursuivent les objectifs suivants :

- Vérifier que de tels scénarios sont détectables avec le réseau d'observation actuel additionné des 2 forages SG60 et SG61.
- Définir une fréquence de contrôle adéquate.
- Définir et évaluer des mesures d'intervention possibles permettant de capter un panache contaminé provoqué par une telle fuite.

Aux points 5 et 6, situés dans des bas-fonds de deux compartiments de la décharge, sont simulés des scénarios catastrophe d'une éventuelle fuite de lixiviats dans une fouille qui serait pratiquée dans les matériaux naturels sous le fond de la décharge. Ces scénarios poursuivent les mêmes objectifs que les simulations aux points 1 à 4. Les simulations prévoient d'une part une fuite de courte durée due à une éventuelle négligence durant les travaux d'assainissement sous le fond de la décharge (fuite de 20 m^3 au total durant 2 jours = scénarios 5a, resp. 6a) et d'autre part, un scénario catastrophe très improbable, au cours duquel durant 100 jours consécutifs, 1000 m^3 au total, correspondant à la moitié des lixiviats contenus actuellement dans la décharge, s'infiltreraient dans une fouille d'assainissement en cours de travaux, sans qu'il soit possible de stopper cette infiltration. Les éléments concernant la source de pollution potentielle sont les suivants :

- Grandeur de la source de pollution : 10 x 10 m correspondant à la grandeur d'une éventuelle lentille sableuse sous la décharge, découverte au moment des travaux d'assainissement des sols pollués sous la décharge. Cette lentille

serait en contact hydraulique avec le sommet de l'aquifère des cailloutis du Sundgau.

- Débit d'exfiltration à la source de pollution : 10 m^3/j. Il s'agit du flux qui peut transiter à travers une surface de 100 m^2 (fouille de 10 x 10m), dont la perméabilité se situe juste en dessus de $1 \cdot 10^{-6}$ m/s, correspondant au haut de la fourchette de perméabilités mesurées (worst case) dans les corps sableux de la formation des argiles de Bonfol.
- Flux chimique à la source de pollution : 200 mg HHV/l ou 200 g/m^3 pour 10 m^3/jour = 2.0 kg/jour. La concentration correspond à la moyenne des concentrations mesurées dans les lixiviats de la décharge.

7.1 Scénario N° 1 de simulation d'une contamination

Le point 1 correspondant à la source de pollution de ce scénario (Figure 33), se situe 12 m à l'intérieur du périmètre de la DIB, 35 m au NE du piézomètre SG13. Les résultats de la simulation sont présentés à la Figure 34 et à la Figure 35.

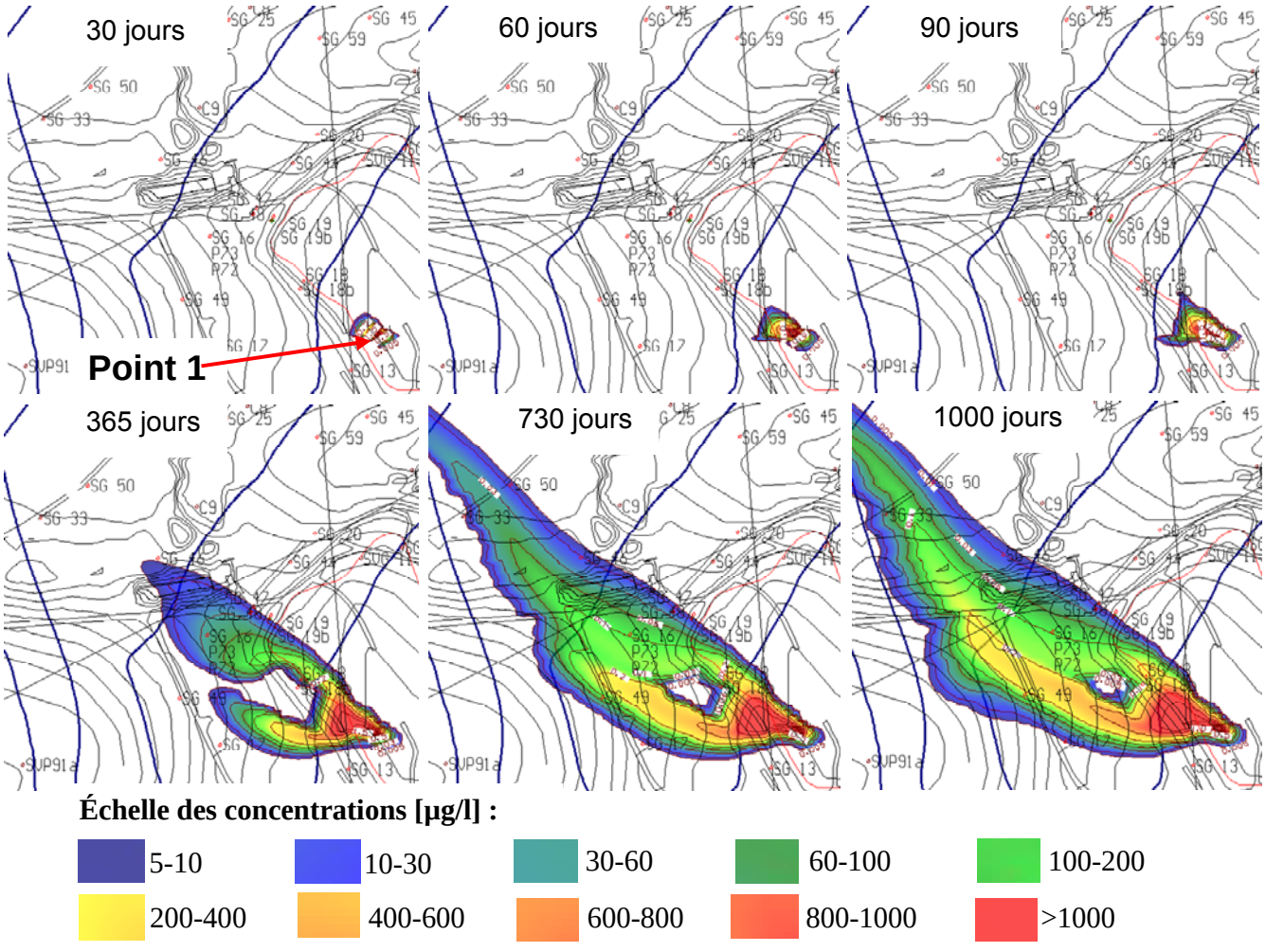


Figure 34 : Scénario de contamination 1 ; état du panache simulé après 30, 60, 90, 365, 730 et 1000 jours.

Le panache à l'aval du point 1 passe autour d'une plage de faible perméabilité simulée dans les alentours et à l'ouest du forage SG18b. Du fait des contrastes de perméabilité, le panache progresse plus rapidement dans les zones de plus grande perméabilité que dans les plages de faible perméabilité. Dans ces conditions, où le panache pollué risque à priori de passer entre deux points d'observation, il est retrouvé à une valeur significative de la somme des HHV, supérieure à 5 µg/l, après environ 250 jours de trajet souterrain, aux forages SG48, SG16 et SG19b et, après une année, à SG46 (cf. Figure 35). Après 420 jours, les polluants arrivent aux forages SG50, SG18b et SG49 et enfin après 2 ans à SG17 et SG33 (Figure 34). Dans les conditions simulées, il faut plus de 6 mois depuis le début de la pollution jusqu'à ce qu'elle puisse être détectée à l'un des points d'observation. Les valeurs simulées pour SG19b (0 à 10 µg/l Σ HHV), ne seraient pas suffisantes pour indiquer de manière significative l'arrivée d'une nouvelle pollution à ce forage déjà pollué. La branche du panache qui part en direction ouest depuis ce point 1, peut passer par un secteur peu surveillé entre SG13 et SG18b qui fait que le panache est détecté seulement après 420 jours de trajet souterrain. Un forage de surveillance complémentaire entre SG13 et SG18b serait donc recommandé. Toutefois, les contraintes liées au projet d'assainissement de la DIB rendent la mise en place de ce forage impossible, cf. chapitre 9).

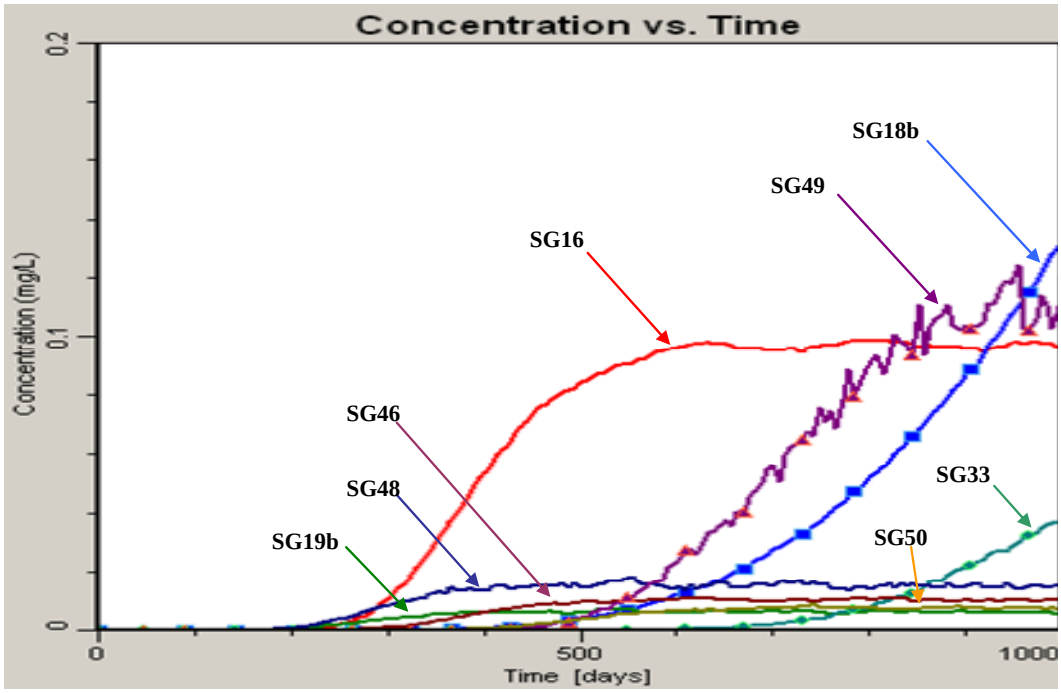


Figure 35 : Scénario de contamination 1 : Courbes d'évolution chimique (Σ HHV) aux points d'observation.

Cette simulation d'un point dont les eaux s'écoulent vers un secteur peu perméable de l'aquifère des cailloutis du Sundgau montre que depuis le début de la pollution, il faut près de deux années jusqu'à ce que le front de pollution dépasse le deuxième écran d'observation de l'aquifère des cailloutis du Sundgau.

Du point de vue de l'assainissement d'un tel panache, une contamination survenant au point 1 serait détectée à terme dans au moins 8 forages d'observation. Une constellation adéquate de pompages dans un ou plusieurs de ces forages existants permettrait d'extraire cette contamination de l'aquifère (cf. Figure 55 et Figure 56).

7.2 Scénario N° 2 de simulation d'une contamination

Le point N° 2 de contamination simulée se situe 10 m à l'intérieur du périmètre de la DIB (Figure 33). A l'aval hydraulique de ce point, la trajectoire des écoulements dans les cailloutis du Sundgau passe entre les forages SG19b et SG44, endroit pour lequel les simulations hydrauliques ont montré une lacune d'observation et de possibilité d'intervention (cf. § 6.4). C'est pourquoi, la mise en place d'un nouveau forage SG61 (cf. Figure 33 et chapitre 6) est d'ores et déjà prévue.

Le panache à l'aval du point 2 s'élargit rapidement après un mois déjà pour commencer à être observé au forage SG44 en valeur significative de la somme des HHV, supérieure à 5 µg/l (Figure 36 et Figure 37). Puis, après 4 mois, il n'est observé que de manière latérale par le forage SG50.

Selon la simulation de la Figure 36, la contamination est retrouvée à une valeur significative de la somme des HHV (supérieure à 5 µg/l), après 10 à 20 jours déjà au futur forage SG61, après 20 jours à SG44 et après environ 200 jours de trajet souterrain au forage SG50 (Figure 37). Le panache se développe dans un secteur très perméable de l'aquifère (Figure 15), ce qui fait que le transfert de polluants hors du dispositif d'observation du deuxième écran de forages (SG50) se fait déjà après 150 jours. De ce fait, après 1 an, le panache a déjà acquis un état d'équilibre (Figure 36) dans le secteur observé par les forages SG.

La Figure 38 indique à l'aide de la technique « inverse particle tracking », la zone de capture du forage SG61 pour un pompage maximal de 35 m^3/j (valeur réaliste sur la base des perméabilités observées aux forages proches SG20 et SG44). On aperçoit que le point de contamination potentielle du scénario de contamination N° 2 se trouve dans cette zone de capture. Sur cette base, l'assainissement hydraulique du scénario 2 peut se faire uniquement par pompage dans le forage SG61 (Figure 39).

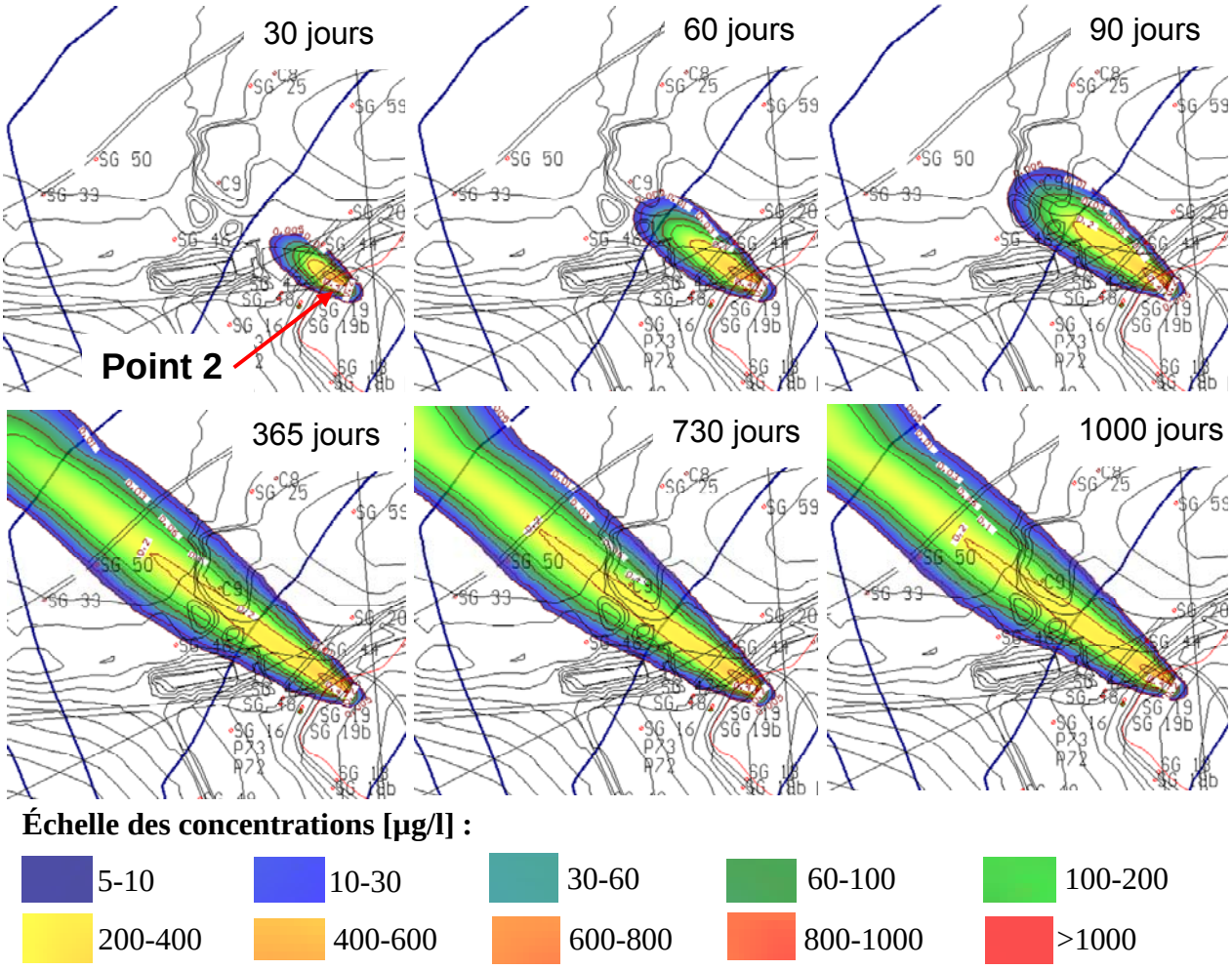


Figure 36 : Scénario de contamination 2 ; état du panache simulé après 30, 60, 90, 365, 720 et 1000 jours.

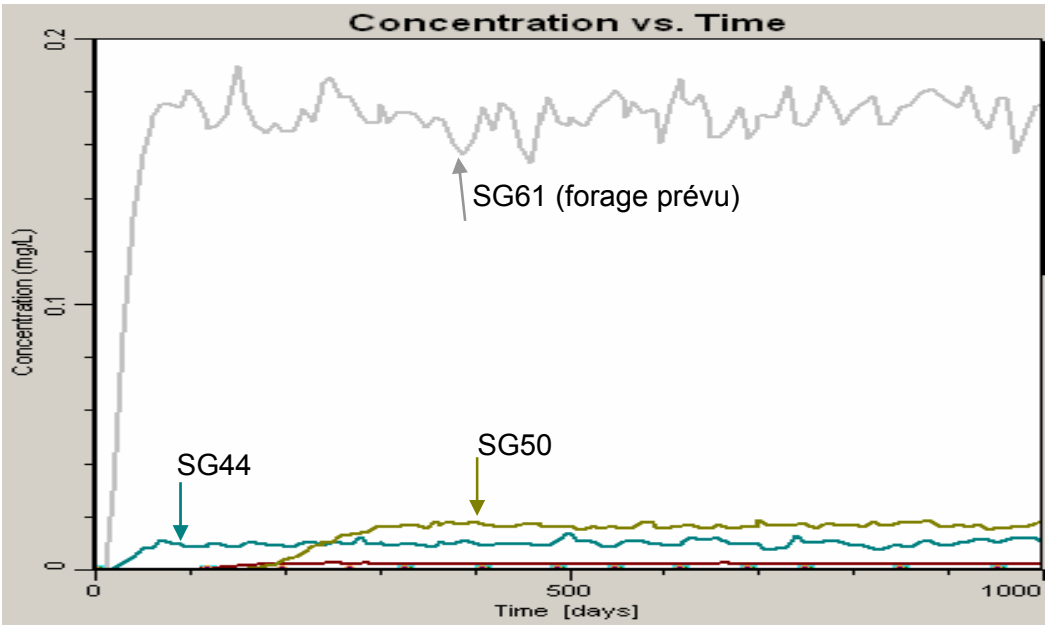


Figure 37 : Scénario de contamination 2 : Courbes d'évolution chimique (Σ HHV) aux points d'observation

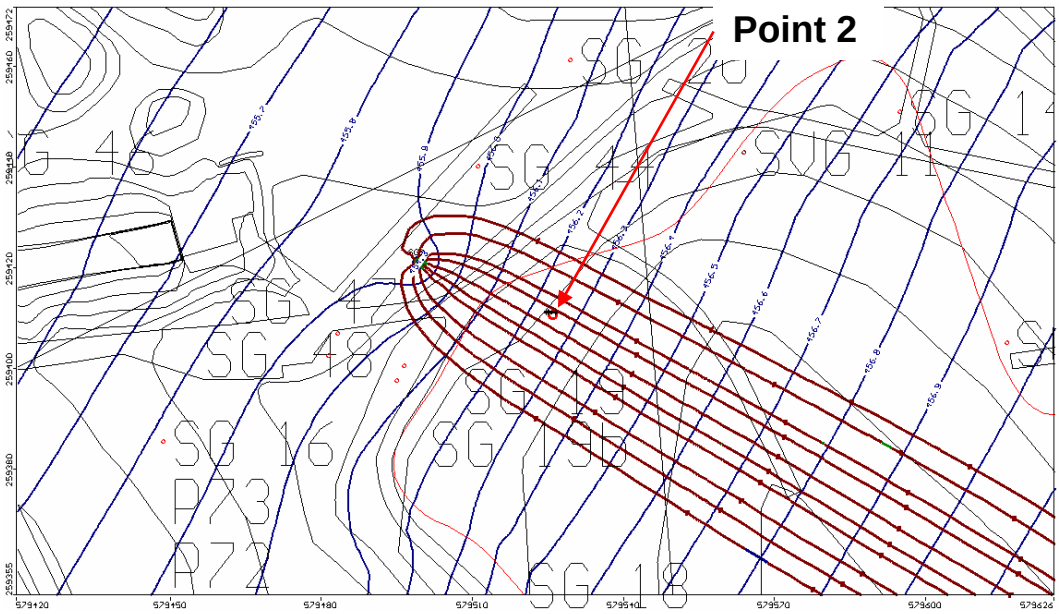


Figure 38 : Scénario de contamination 2 ; zone de capture du forage SG61 (35 m^3/j).

La Figure 39 montre que si le pompage est enclenché 140 jours (c'est-à-dire l'intervalle de temps entre 2 campagnes de prélèvement selon le CSS 2005 [30]) après l'observation de la pollution au forage SG61, c'est-à-dire au jour 150, le panache est sectionné par le pompage qui parvient à enlever la totalité de la pollution supplémentaire provenant de l'amont. Après 225 jours de pompage (jour 375), on observe que la partie du panache qui n'a pas pu être interceptée par le pompage, continue sa trajectoire avec une concentration maximale (somme des HHV) inférieure à 200 µg/l, pour un total de 435 grammes de polluants qui n'est pas intercepté par le pompage. Plus à l'aval, ces 435 g de contaminants quittent le domaine des cailloutis du Sundgau pendant un laps de temps d'au moins 250 jours, avec une concentration maximale de 150 µg/l, correspondant à une charge moyenne inférieure à 2 grammes HHV par jour.

Il est à noter que ce scénario est un scénario worst case dans la mesure où l'on considère que le panache atteint le forage d'observation et d'intervention SG61 le jour suivant le prélèvement d'un échantillon.

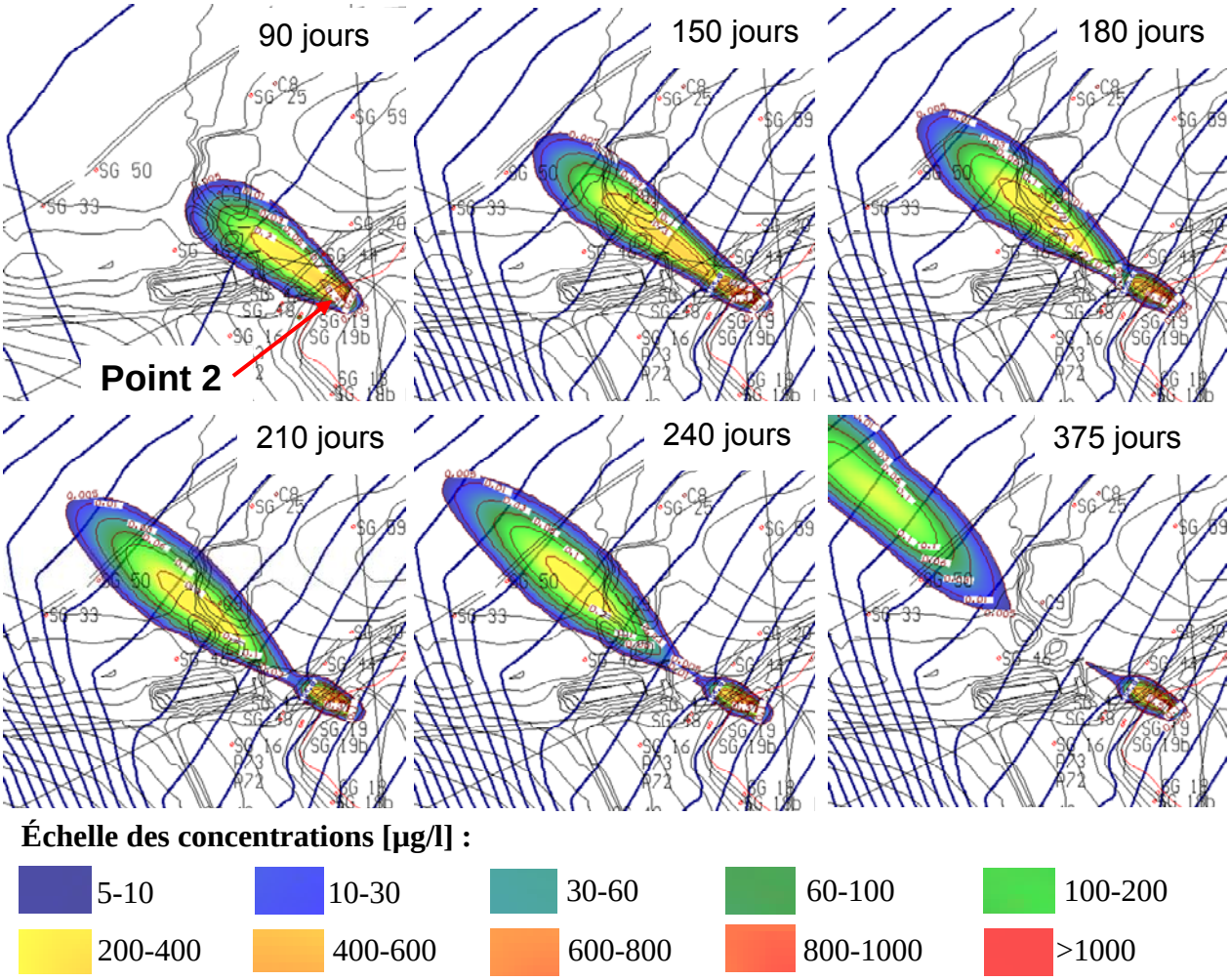


Figure 39 : Scénario de contamination 2 ; pompage dès le jour 140 à SG61 ; état du panache simulé après 90, 150, 180, 210, 240 et 375 jours.

7.3 Scénario N° 3 de simulation d'une contamination

Le point N° 3 de contamination potentielle simulée (scénario 3) se situe 6 m à l'intérieur du périmètre de la DIB (Figure 40). A l'aval hydraulique de ce point, la trajectoire des écoulements dans les cailloutis du Sundgau passe entre les forages SG20 et SG44.

Le panache à l'aval du point 3 s'agrandit rapidement pour commencer à être observé après 40 jours aux forages SG20 et SG44, en valeur significative de la somme des HHV (Figure 41). Il n'est observé dans aucun autre forage. Si la dispersivité effective du milieu était plus faible que celle reproduite par le modèle, un tel panache ne pourrait pas être observé par les forages d'observation en place, à moins d'y réaliser un pompage suffisamment long pour agrandir leur zone de capture (cf. Figure 57).

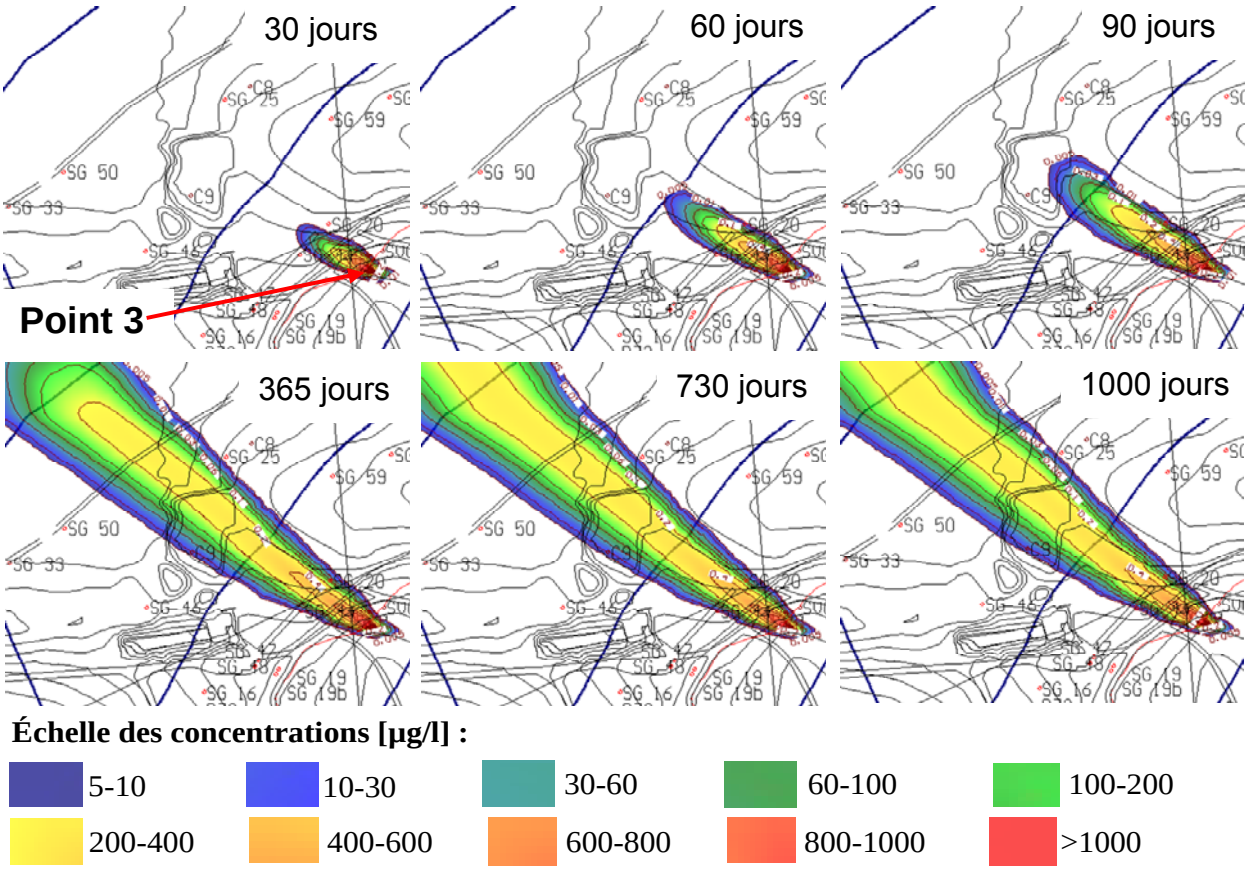


Figure 40 : Scénario de contamination 3 ; état du panache simulé après 30, 60, 90, 365, 720 et 1000 jours.

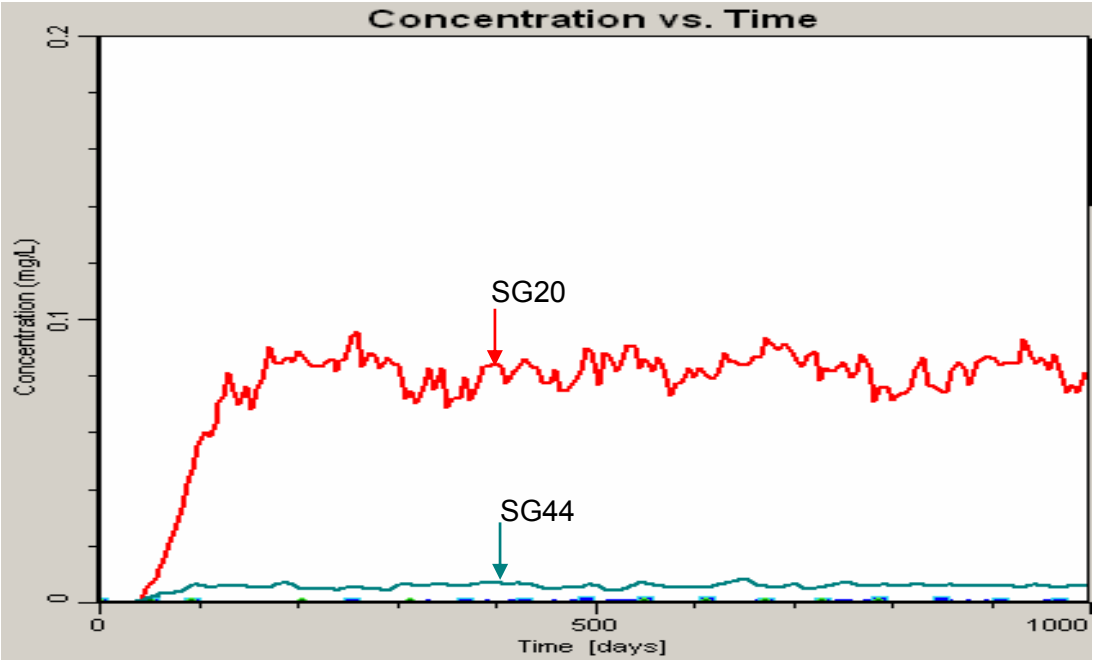


Figure 41 : Scénario de contamination 3 : Courbes d'évolution chimique (Σ HHV) aux points d'observation

La Figure 42 indique à l'aide de la technique « inverse particle tracking », les zones de capture des forages SG44 et SG20, lorsqu'on effectue un pompage intensif de 35 m^3/j à chaque forage (débits de pompage plausibles selon le modèle). On aperçoit que le point de contamination potentielle du scénario de contamination N° 3 se trouve dans la zone de capture du pompage en SG20. Sur cette base, la simulation de l'assainissement hydraulique du scénario 3 s'est faite uniquement par pompage dans le forage SG20, ce qu'indique la Figure 43. Cette dernière, montre l'effet du pompage en SG 20 (pompage 42 m^3/jour, proche du maximum possible) qui débute au jour 180 après le début de la pollution, respectivement 140 jours après l'arrivée de la pollution à SG20 et SG44 : Par abaissement de la surface piézométrique aux alentours de SG20, le panache est dévié de sa trajectoire et, est très nettement scindé en deux au jour 240 déjà. Au jour 400 le panache provenant de la source de contamination est totalement « aspiré » par SG20, tandis que le panache résiduel qui s'était écoulé trop à l'aval pour pouvoir refluer vers le pompage, poursuit son cheminement vers l'aval. Ce panache résiduel possède une concentration maximale (somme des HHV) de l'ordre de 200 µg/l, pour un total de 570 grammes de polluant qui n'est pas intercepté par le pompage. Plus à l'aval, ces 570 g de contaminants quittent le domaine des cailloutis du Sundgau pendant un laps de temps d'au moins 300 jours, avec une concentration maximale de 150 µg/l, ce qui correspond à une dilution du cœur du panache d'un facteur 10 par rapport à la concentration initiale. Cette simulation montre que par le pompage à un seul forage, on peut, à l'aval du front N et NW de la décharge, assainir tout type de panache pollué dont la largeur est comprise entre 30 et 60 m, suivant sa trajectoire initiale.

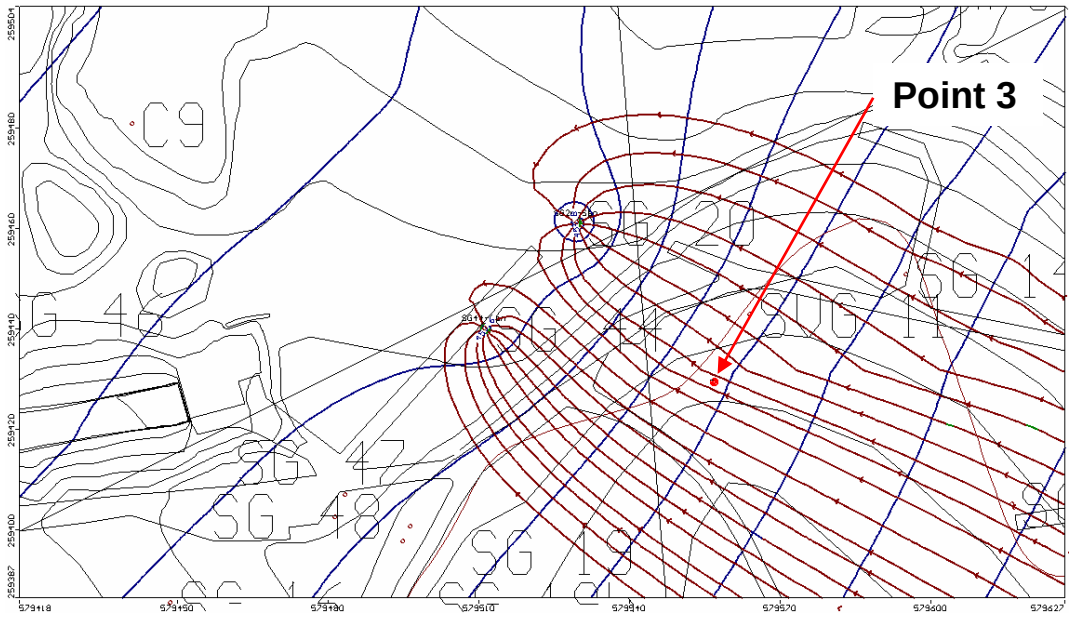


Figure 42 : Scénario de contamination 3 ; zone de capture des pompages aux forages SG44 et SG20 (35 m^3/j chacun).

Il est à noter que ce scénario est un scénario worst case dans la mesure où l'on considère que le panache atteint les forages SG20 et SG44 le jour suivant le prélèvement d'un échantillon.

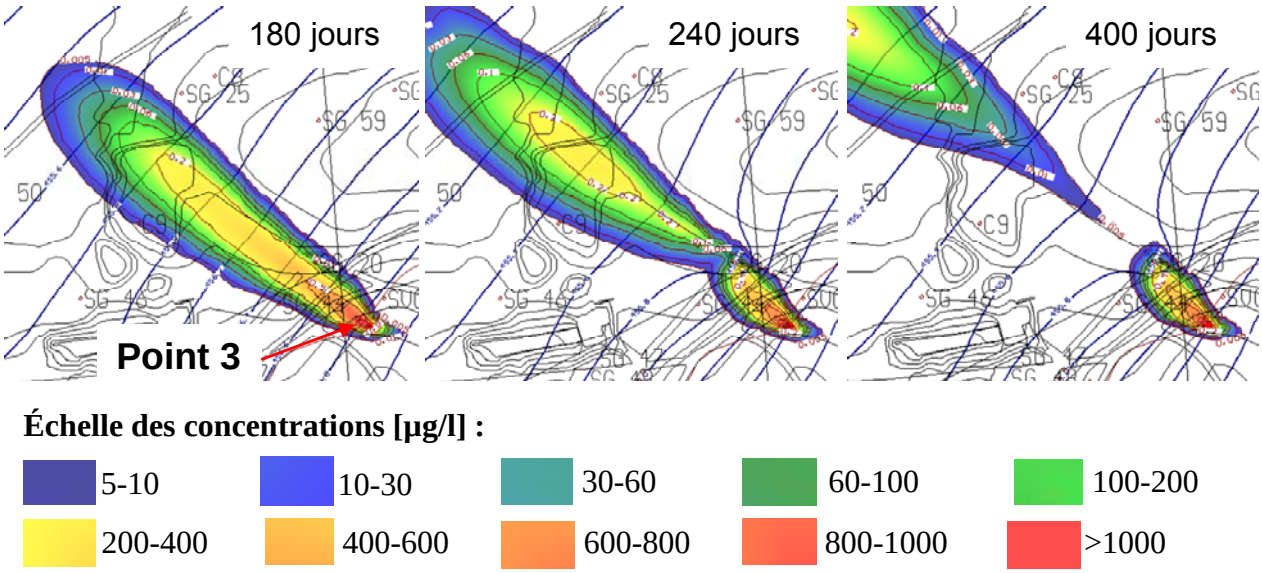


Figure 43 : Scénario de contamination 3 : pompage dès le jour 140 à SG20 ; état du panache simulé après 180, 240 et 400 jours depuis le début de la pollution.

7.4 Scénario N° 4 de simulation d'une contamination

Le point N° 4 de contamination potentielle simulée (scénario 4) se situe en bordure nord-est de la DIB, à proximité de l'ancien forage SG14 (Figure 44), dans une zone très perméable des cailloutis du Sundgau (Figure 15). A l'aval hydraulique de ce point, les lignes d'écoulement dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau passent à l'est du forage SG20.

Le panache s'allonge rapidement et n'est observable dans aucun des forages existants du premier écran de forages SG, à l'exception du nouveau forage prévu SG60 (cf. § 6.4) après 40 jours déjà, ce qui justifie la mise en place de ce forage. Le panache pollué commence à être observé en valeur significative de la somme des HHV, supérieure à 5 µg/l, au forage SG59 après 150 jours et au forage SG25 après 220 jours (Figure 44, Figure 45). Jusqu'au niveau de SG25 (2ème écran de forages d'observation), le panache montre un état d'équilibre peu après un an depuis le début de la contamination.

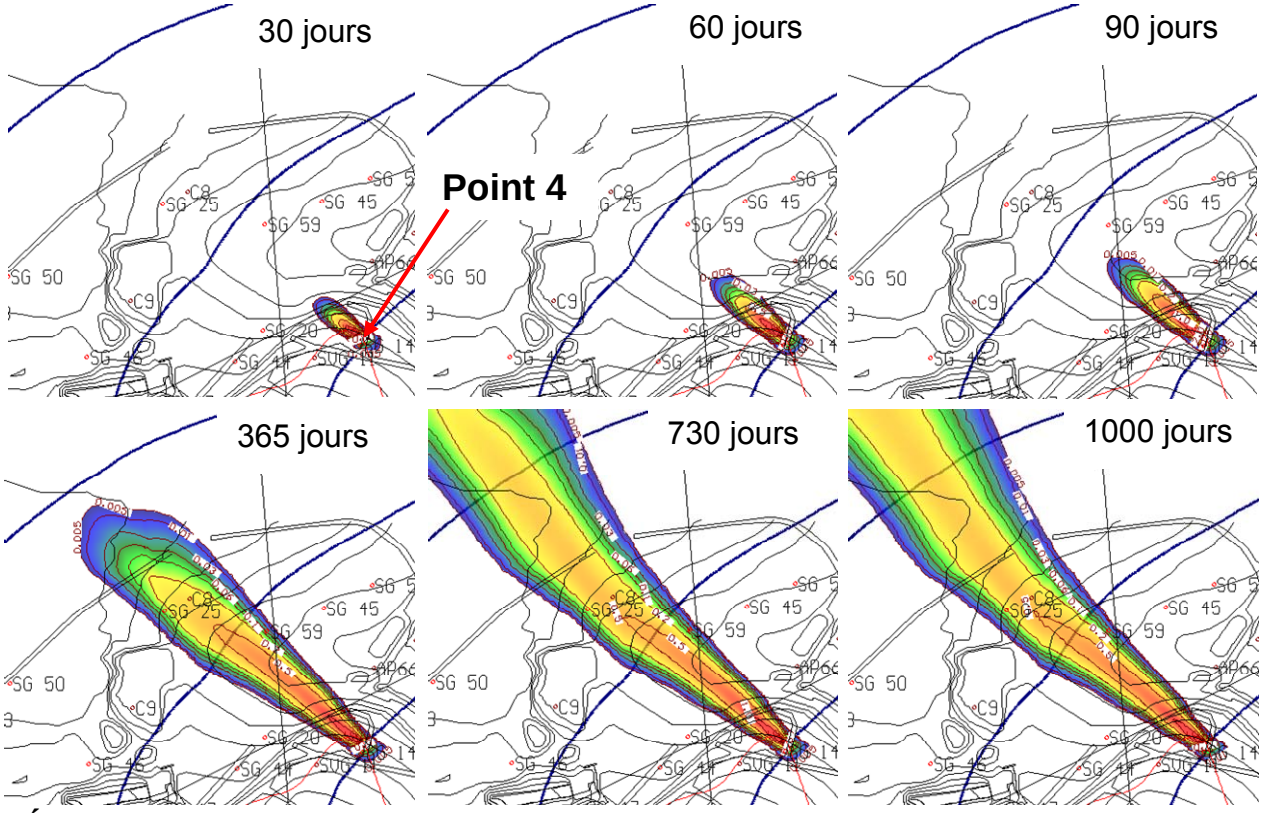


Figure 44 : Scénario de contamination 4 ; état du panache simulé après 30, 60, 90, 365, 720 et 1000 jours.

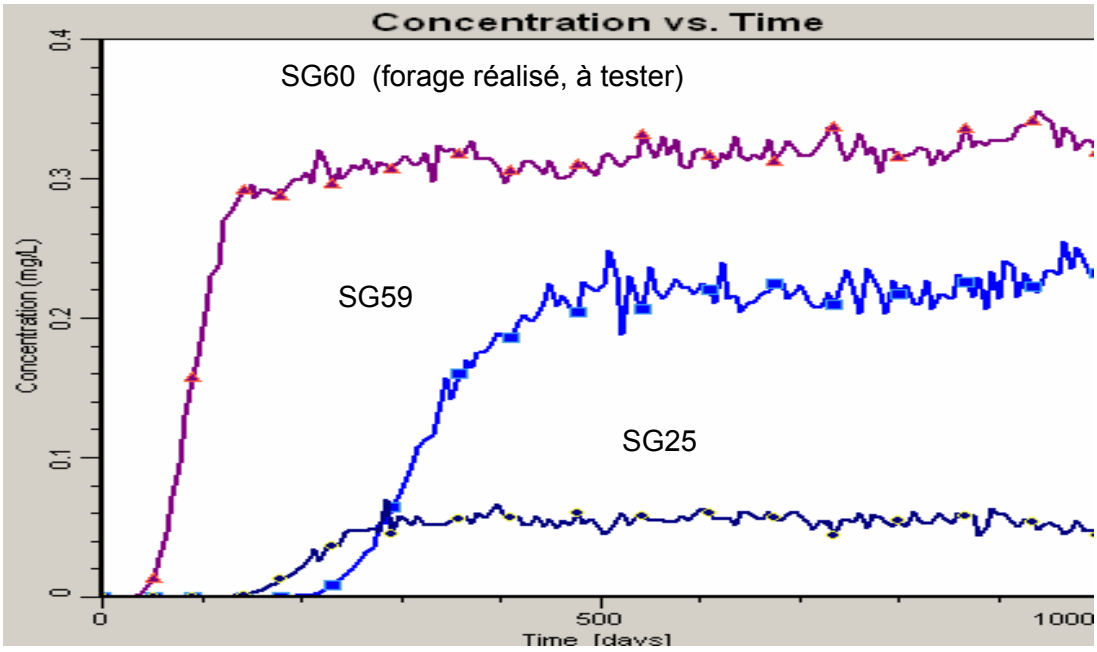


Figure 45 : Scénario de contamination 4 : Courbes d'évolution chimique (Σ HHV) aux points d'observation

La Figure 46 montre que si le pompage est enclenché 140 jours après l'apparition de la pollution au forage SG60, c'est-à-dire au jour 180, le panache est sectionné par le pompage qui parvient à enlever la totalité de la pollution provenant de l'amont. Cet effet est visible au jour 410, c'est-à-dire 130 jours après le début du pompage. A partir de ce moment, on observe que la partie du panache qui n'a pas pu être interceptée par le pompage (panache résiduel), continue sa trajectoire avec une concentration maximale (somme des HHV) inférieure à 300 µg/l, pour un total de 505 grammes de HHV. Ce panache résiduel s'étend ensuite toujours plus pour quitter l'aquifère des cailloutis du Sundgau sur une durée de plus de 350 jours avec une concentration maximale inférieure à 200 µg/l, ce qui correspond une dilution au cœur du panache, d'un facteur 7 par rapport à la concentration initiale. Ce facteur de dilution est faible car dans ce cas de figure, le pompage démarre 140 jours après l'arrivée du panache pollué à SG60, à un moment où la concentration au centre de ce panache est déjà élevée ; le panache résiduel qui s'écoule vers l'aval après démarrage du pompage, contient donc encore des concentrations importantes en son centre, peu diluées par rapport aux concentrations à l'origine de la contamination. Pour éviter ce transfert vers l'aval d'un panache résiduel encore relativement concentré, la cadence d'observation dans le premier écran de forages d'observation doit être plus rapide. Par exemple, une cadence d'observation tous les 60 jours permettrait de démarrer un pompage d'intervention avant que la concentration au centre du panache atteigne une valeur très élevée au droit du premier écran de forages. De cette manière, la concentration au centre du panache résiduel resterait très faible.

Il est à noter que ce scénario est un scénario worst case dans la mesure où l'on considère que le panache atteint le forage d'observation et d'intervention SG60 le lendemain du prélèvement d'un échantillon.

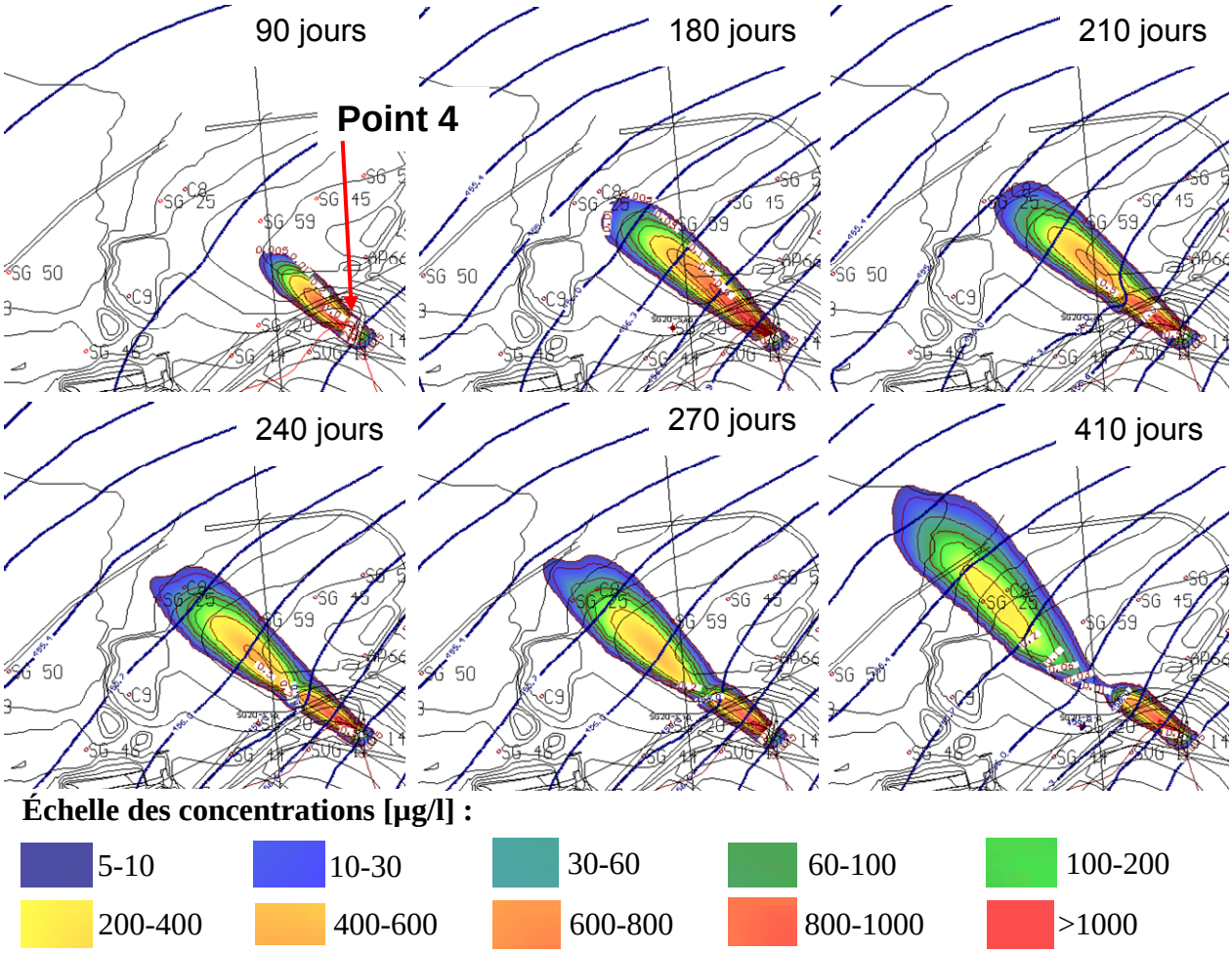


Figure 46 : Scénario de contamination 4 ; pompage à SG60 (forage prévu) de 35 m^3/j dès le jour 185 ; état du panache simulé après 90, 180, 210, 240, 270 et 410 jours.

7.5 Scénario N° 5 de simulation d'une contamination catastrophe

Bien que peu probable, le scénario catastrophe typique se déroulant durant les travaux d'excavation de la décharge serait le fait de percer la base de la formation des argiles de Bonfol et laisser s'écouler une nappe de liquides contaminés vers l'aquifère des cailloutis du Sundgau.

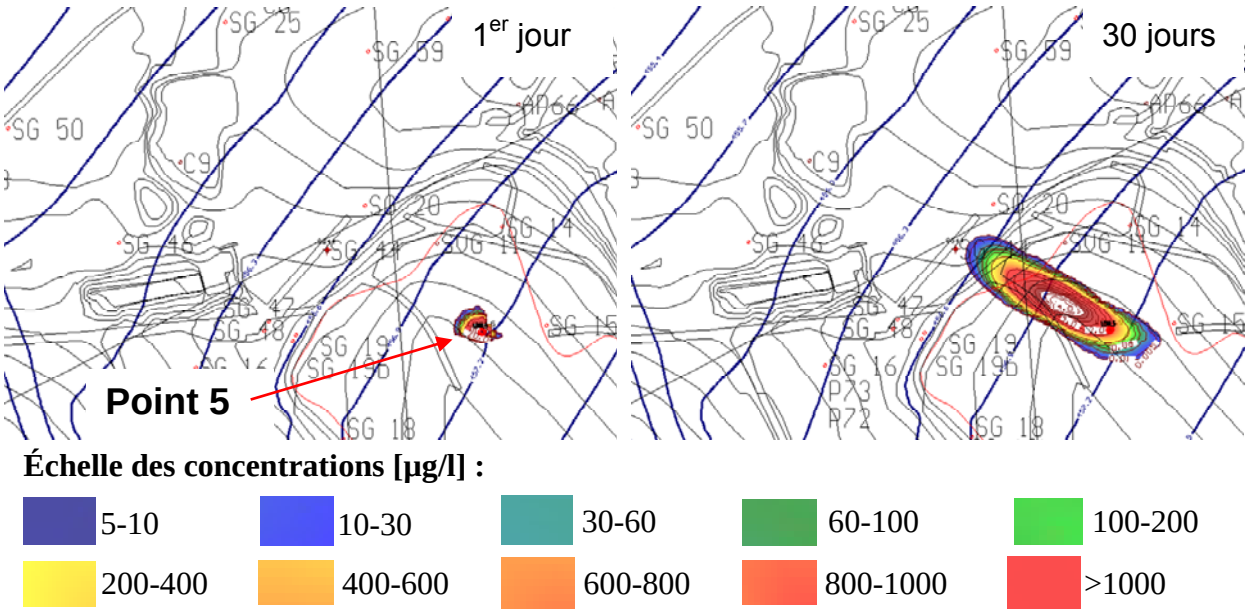


Figure 47 : Scénario catastrophe 5a par déversement souterrain de liquide durant 2 jours au trou de Laufon ; état du panache simulé après 1 et 30 jours.

Le scénario 5a (Figure 47) correspond à la perte durant deux jours de 10 m^3/j de liquides contenant 200 mg/l de HHV (cf. texte d'introduction du chapitre 7).

La Figure 48 indique que cette contamination serait observable dès le 40ème jour depuis le début de la pollution, seulement dans le forage SG44. Les simulations successives montrent qu'elle ne serait visible dans aucun autre forage d'observation SG. Au 90ème jour, le centre de gravité du panache se trouve au niveau de la première ligne de forages d'observation et intervention avec une largeur de 35 m ; au 160ème jour, il se trouve entre SG46 et SG59 et au 240ème jour, entre SG 25 et SG50. Il possède alors une largeur de 75 m. Pour un tel panache pollué, le dispositif d'observation du deuxième écran de forages est par conséquent insuffisant. Il est nécessaire de compléter le réseau d'observation du deuxième écran de forages SG dans le secteur limité par les forages SG46, SG50, SG25 et SG59.

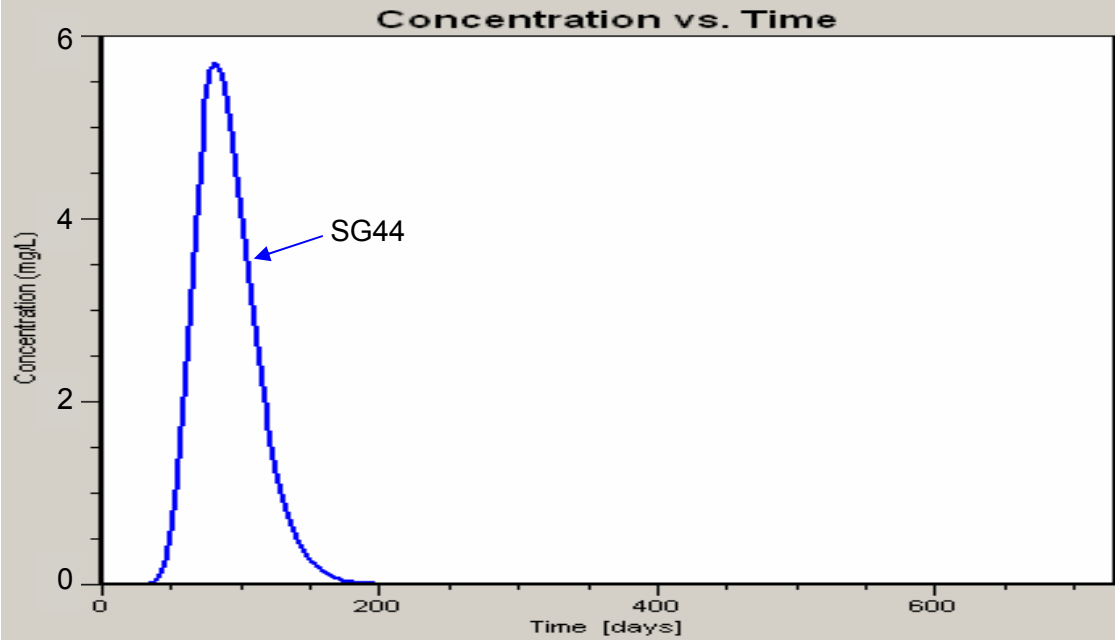


Figure 48 : Scénario catastrophe 5a par déversement souterrain de liquide durant 2 jours au trou de Laufon : Courbes d'évolution chimique (Σ HHV) au point d'observation SG44.

Selon le CSS de 2005 [30], les campagnes de surveillance des forages SG du premier écran à l'aval de la DIB, sont échelonnées tous les 130 à 140 jours (4 mois et demi). Si la contamination arrive au forage SG44 le lendemain d'une campagne de surveillance, elle ne serait observée qu'à partir du jour 180, au moment où la totalité du panache serait passé au niveau de cette première ligne de forages SG. Une intervention par pompage sur cette première ligne n'aurait pas d'utilité, le panache étant déjà passé. La simulation indique cependant que ce panache pourrait encore être intercepté entre SG25 et SG50 si des forages d'intervention étaient rapidement mis en place. Si tel n'était pas le cas, ce panache quitterait la série des cailloutis du Sundgau dès le jour 430, sur une durée d'au moins 200 jours, avec une concentration maximale de 2 mg/l. En conséquence, ce type de scénario doit être pris en compte pour définir la fréquence d'échantillonnage durant les travaux d'assainissement.

Une analyse tous les 60 jours au premier écran de forages SG permettrait de détecter un tel panache dès le jour 100 après le début de la pollution alors que le centre de gravité du panache se trouve juste à l'aval de ce premier écran de forages et que le front du panache se trouve sur la ligne séparant SG46 et SG59. La présence de forages SG de surveillance et intervention entre SG46 et SG59 permettrait

d'intercepter ce panache. Pour cette raison, il est souhaitable de mettre en place 2 nouveaux forages entre SG46 et SG59.

Scénario 5b : Selon les indications en tête de chapitre 7, un scénario catastrophe plus critique résulterait d'une fuite de liquide contenant 200 mg HHV/l au point N° 5 et qui durerait 100 jours, laissant au total 1000 m^3 d'eau ou de lixiviats, contenant 200 mg/l de HHV, s'infiltrer vers l'aquifère. Cette catastrophe ne pourrait pas passer inaperçue. Des mesures de surveillance des eaux souterraines et d'intervention par pompage seraient prises immédiatement.

La Figure 49 montre l'organisation des lignes d'écoulement pour un pompage simultané maximal selon le modèle (cf. § 4.6) de 42 m^3/jour à chacun des forages SG44 et SG20. On observe que les lignes d'écoulement passant au droit du point 5 et du panache formé après 15 jours, seraient captées en très grande partie par le pompage à SG44 et une petite partie par le pompage à SG20. A titre d'information, l'espace entre deux flèches sur les lignes d'écoulement en Figure 49 et en Figure 50 correspond à 30 jours de trajet souterrain. Elles ne tiennent pas compte de l'accélération des écoulements due à l'injection de 10 m^3/jour d'eau contaminée au point 5.

La Figure 50 est analogue à la Figure 49 mais seul le pompage de 42 m^3/jour est activé au forage SG44. On observe que la zone de capture de ce forage englobe la presque totalité du panache. L'effet du pompage à SG44 serait analogue à ce qui est montré sur la Figure 39, la Figure 43 et la Figure 46 : Une très grande partie, voire la totalité de la contamination serait captée par l'intervention hydraulique.

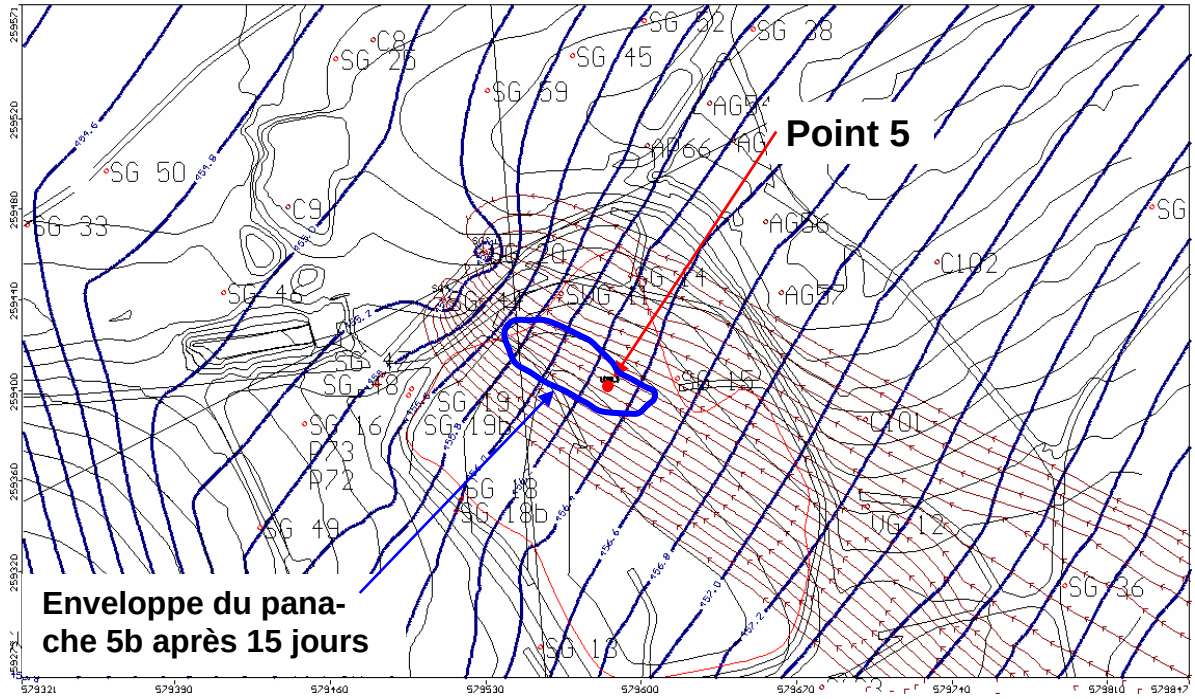


Figure 49 : Scénario catastrophe 5b : Déversement souterrain de liquide durant 100 jours au trou de Laufon ; possibilité d'intercepter les lignes d'écoulement par un pompage simultané maximal de 42 m^3/jour à chacun des forages SG44 et SG20.

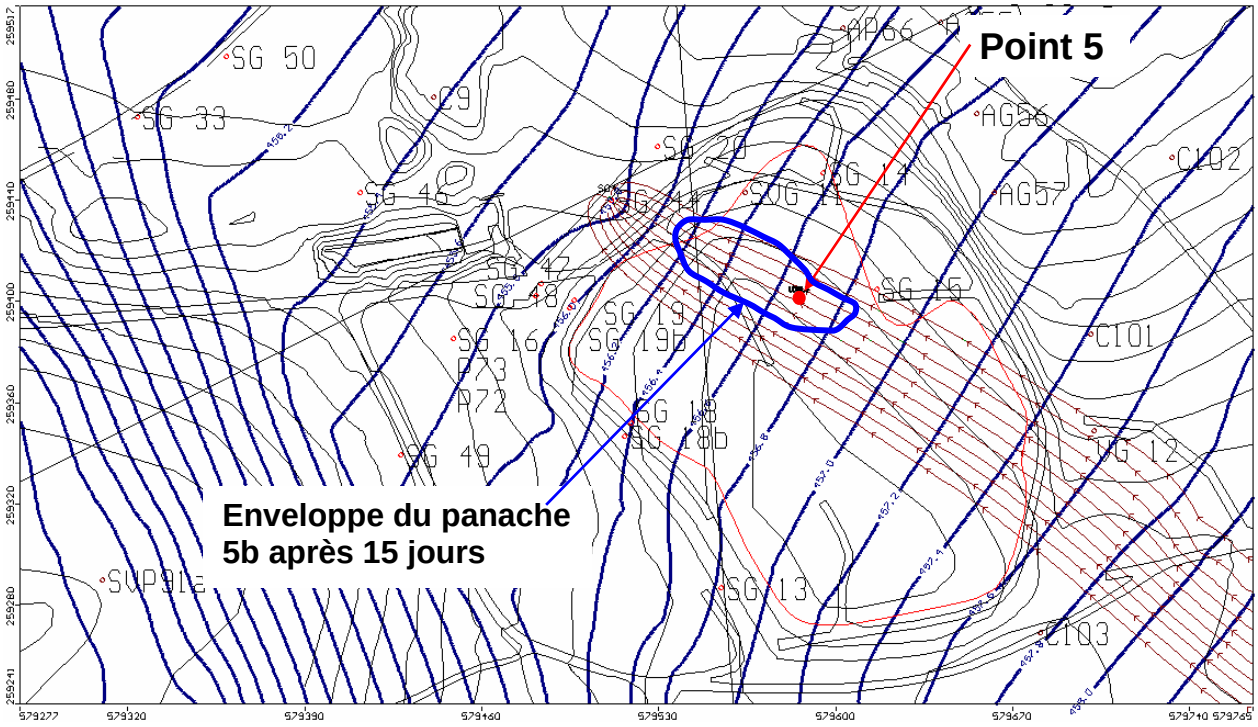


Figure 50 : Scénario catastrophe 5b : Déversement souterrain de liquide durant 100 jours au trou de Laufon ; possibilité d'intercepter les lignes d'écoulement par un pompage de 42 m^3/jour au forage SG44.

Sur la Figure 49 et la Figure 50, l'enveloppe du panache 5b (ligne de concentration de 5 µg/l) simulée après 15 jours d'écoulement, tient compte de l'effet de remontée piézométrique due aux 10 m^3/jour de liquides supplémentaires arrivant dans l'aquifère avec la contamination. On constate dans ce cas de figure que l'augmentation du niveau piézométrique, respectivement l'élargissement du panache contaminé qu'elle occasionne ont un effet limité (inversion de gradient sur une distance de l'ordre de 20 m à l'amont hydraulique de la zone d'infiltration) et ne modifient pas la direction globale des flux.

7.6 Scénario N° 6 de simulation d'une contamination catastrophe

Ce scénario catastrophe correspond à une situation similaire à celle du scénario 5, mais dont la source de contamination est simulée dans le bas-fond du dépôt 3, à l'aval hydraulique duquel il y a plusieurs forages d'observation, contrairement à la situation prévalant à l'aval du scénario 5. Bien que peu probable, ce scénario se déroulant durant les travaux d'excavation de la décharge (cf. description en introduction du chapitre 7), simule l'infiltration depuis la DIB, d'une nappe de liquides contaminés vers l'aquifère des cailloutis du Sundgau.

Le scénario 6a (Figure 51) correspond à la perte durant deux jours de 10 m^3/jour de liquides contenant 200 mg/l de HHV. La Figure 51 et la Figure 52 indiquent que cette contamination serait observable dès le 80ème jour depuis le début de la pollution, aux forages SG19b, SG47 et SG48, puis 80 jours plus tard aux forages SG16 et SG46. Les concentrations maximales observées seraient de l'ordre de 2 à 3 mg/l (Σ HHV). Au 150ème jour, le centre de gravité du panache se trouve au niveau de la première ligne de forages d'observation et intervention.

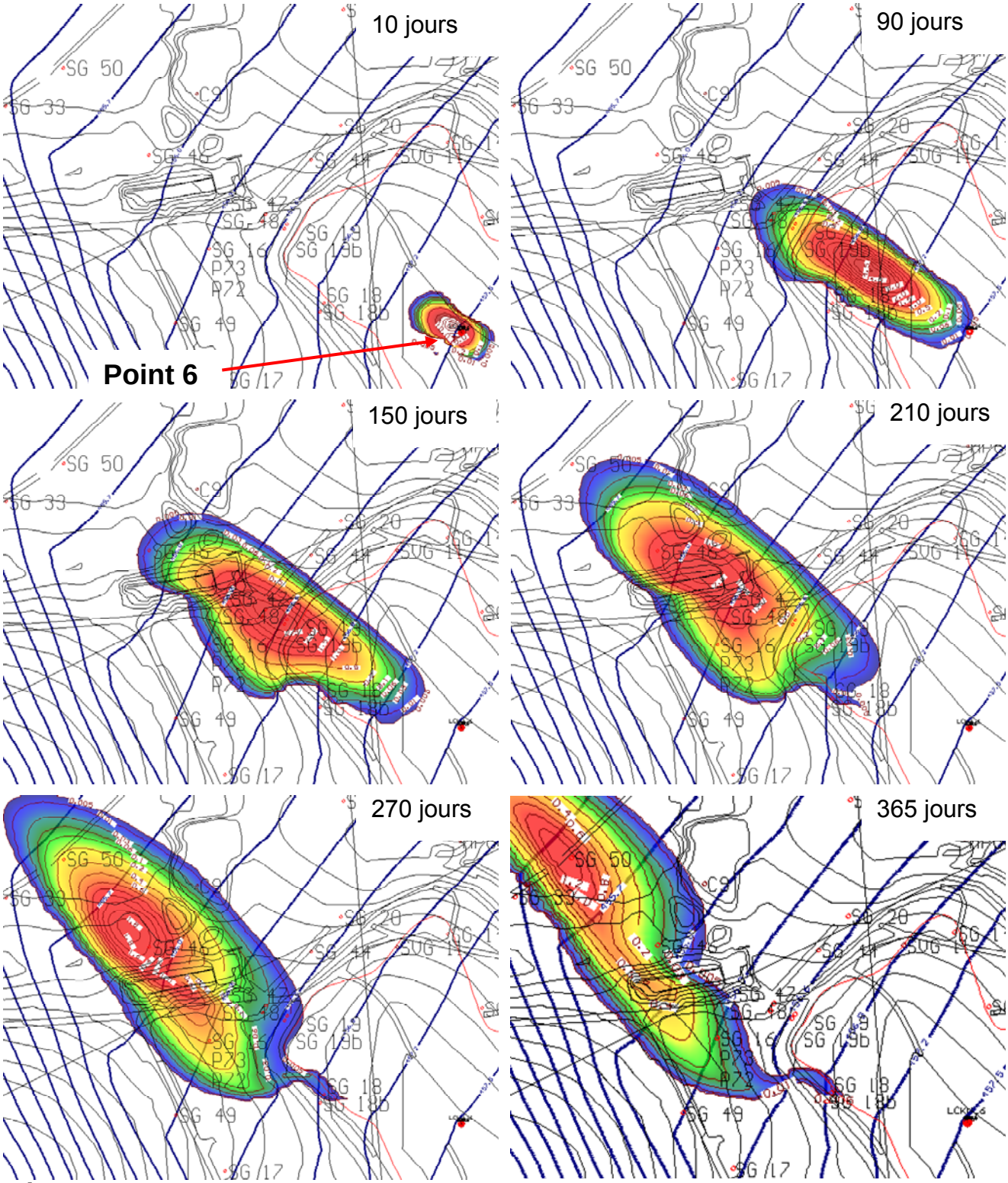


Figure 51 : Scénario catastrophe 6a par déversement souterrain de liquide durant 2 jours au dépôt 3 ; état du panache simulé après 10, 90, 150, 210, 270 et 365 jours.

Si la contamination arrive au forage SG19b du premier écran de forages d'observation, le lendemain d'une campagne de surveillance, échelonnée selon le CSS de 2005 [30], tous les 130 à 140 jours (4 mois et demi), elle ne serait observée que au jour 210, au moment où la presque totalité du panache serait passée au niveau de la première ligne de forages SG.

Si aucun pompage n'est réalisé, la simulation indique que ce panache quitterait la série des cailloutis du Sundgau seulement dès le jour 440, sur une durée d'au moins 500 jours, avec une concentration maximale inférieure à 1000 µg/l Σ HHV, ce qui correspond à une dilution d'un facteur 200 au cœur du panache, par rapport aux concentrations de départ.

Si un pompage est entrepris dès le jour 210, dans SG16, SG19b et SG46 comme indiqué à la Figure 56, une grande partie du panache peut être intercepté et pompé. Ce panache serait coupé en deux, environ 90 % étant interceptée par les pompages. Un panache résiduel contenant environ 400 g de HHV, quitterait la série des cailloutis du Sundgau dès le jour 440, sur une durée d'environ 360 jours, avec une concentration maximale en son centre inférieure à 200 µg/l Σ HHV. Il s'agit d'une dilution d'un facteur 1000 par rapport à la pollution injectée au départ.

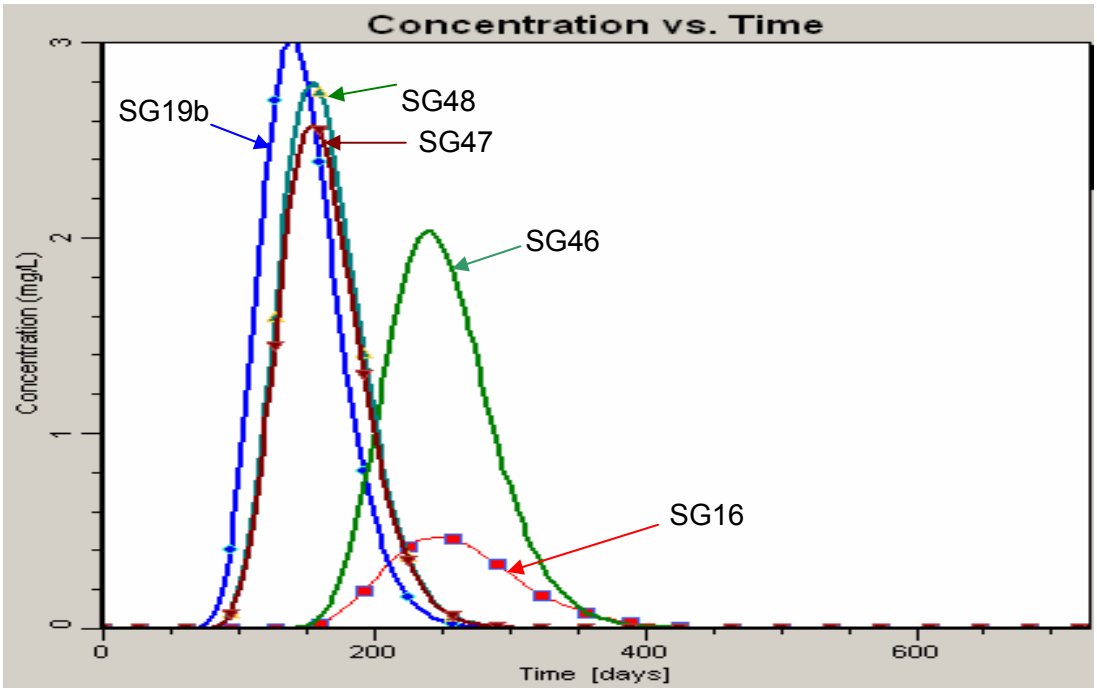


Figure 52 : Scénario catastrophe 6a par déversement souterrain de liquide durant 2 jours au dépôt 3 : Courbes d'évolution chimique (Σ HHV) aux points d'observation.

Scénario 6b : Selon les indications en tête du chapitre 7, un scénario catastrophe plus critique résulterait d'une fuite analogue à celle décrite ci-dessus au scénario

N° 6a, mais qui durerait 100 jours, laissant au total 1000 m^3 d'eau ou de lixiviats, contenant 200 mg/l de HHV, s'infiltrer vers l'aquifère. Le panache contaminé ainsi provoqué serait de très grande taille et présenterait en son centre des concentrations de l'ordre de 100 à 120 mg/l de HHV (Figure 53 et Figure 54). Cette simulation tient compte de l'effet de remontée piézométrique due aux 10 m^3/jour de liquides supplémentaires arrivant dans l'aquifère avec la contamination.

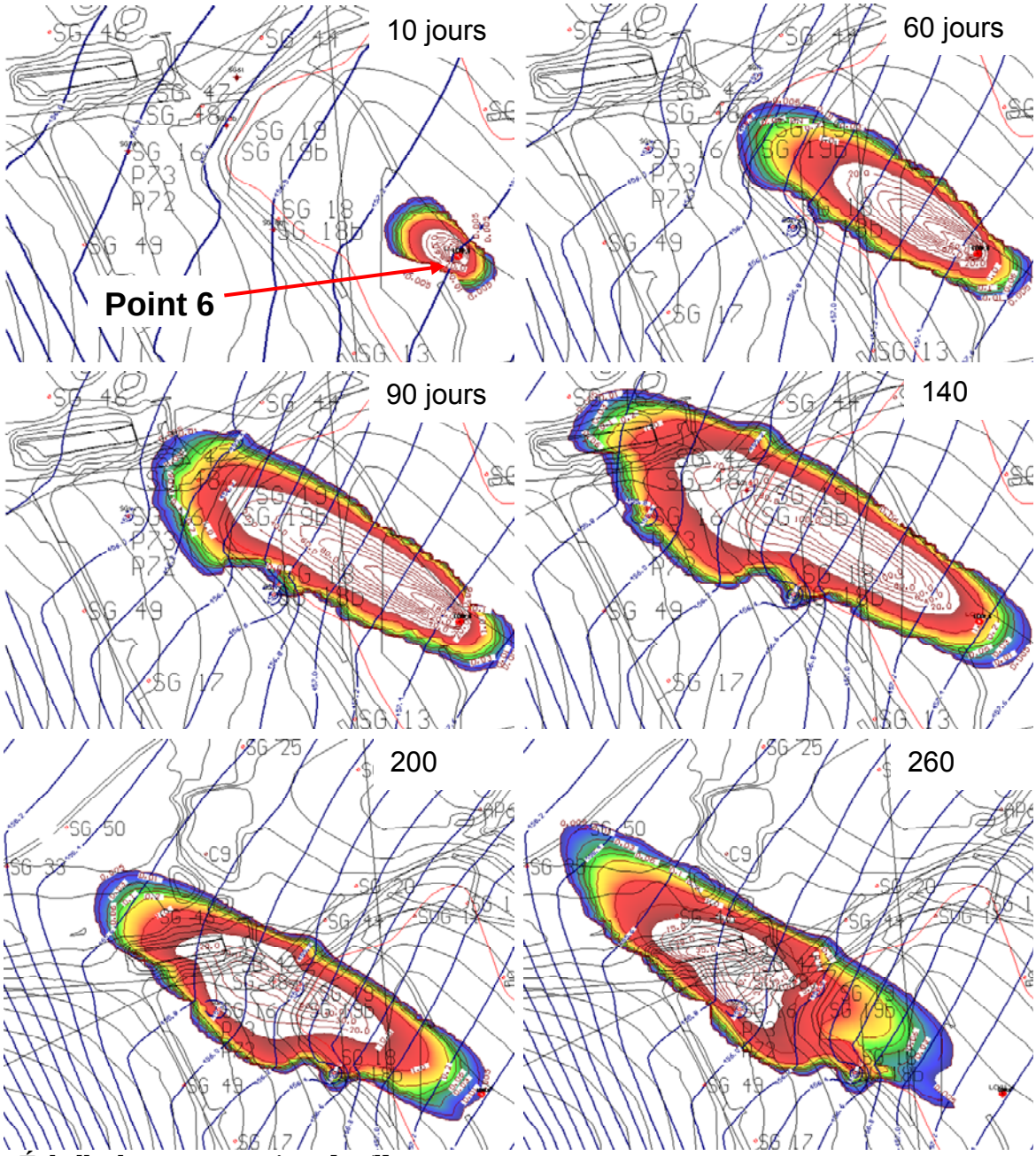


Figure 53 : Scénario catastrophe 6b par déversement souterrain de liquide durant 100 jours au dépôt 3 : état du panache simulé après 10, 60, 90, 140, 200 et 260 jours.

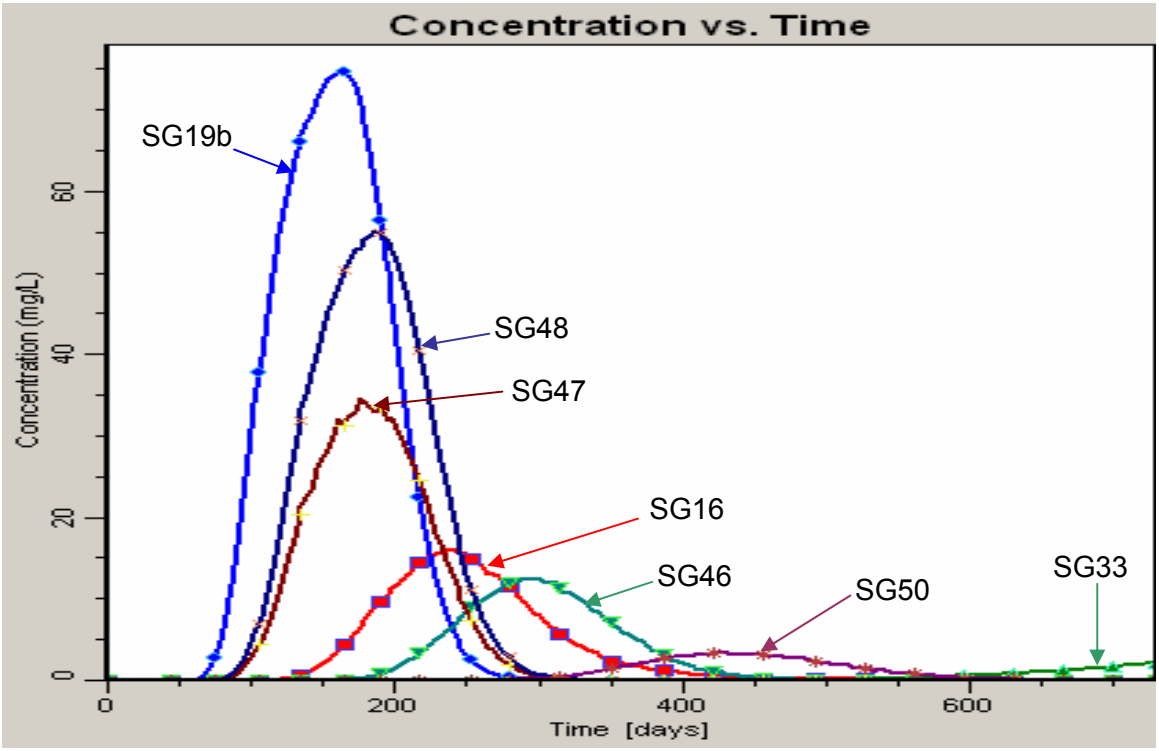


Figure 54 : Scénario catastrophe 6b par déversement souterrain de liquide durant 100 jours au dépôt 3 : Courbes d'évolution chimique (Σ HHV) aux points d'observation.

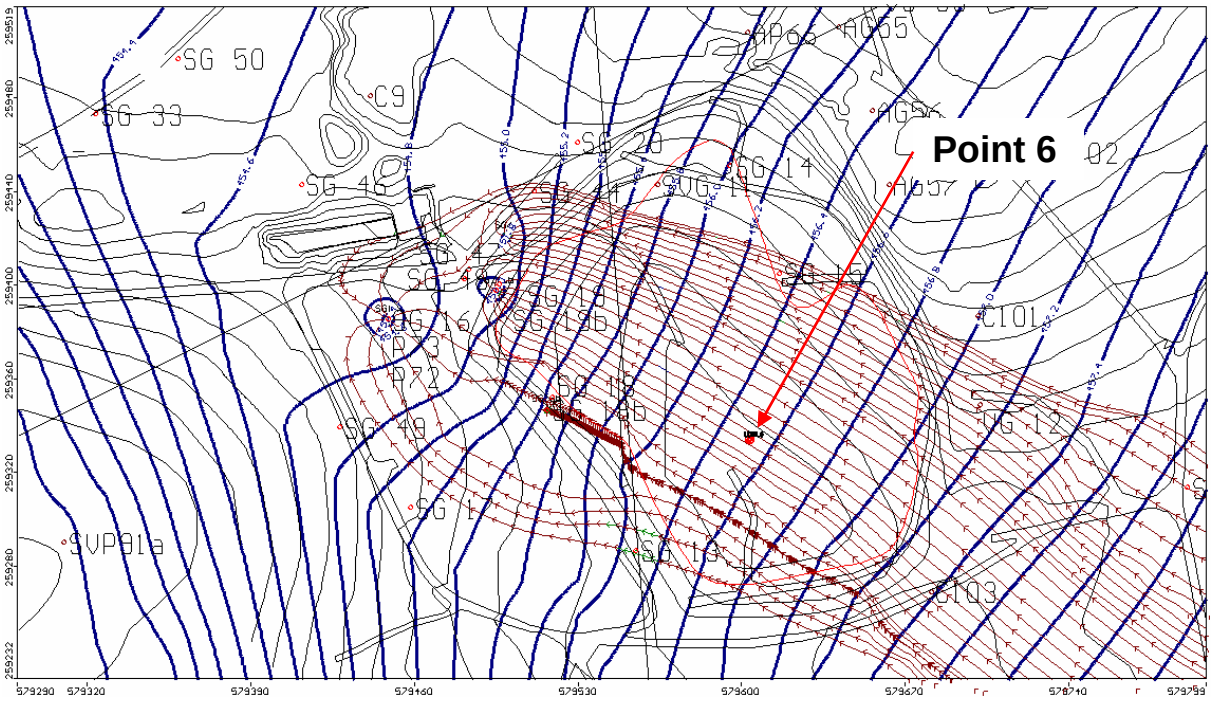


Figure 55 : Scénario catastrophe 6b au dépôt 3: Zone de capture pour un pompage maximal à SG16 (17 m^3/j), SG19b (50 m^3/j) et SG61 (33 m^3/j).

Comme pour le scénario 5b, la fuite ne pourrait pas passer inaperçue. L'enclenchement d'une batterie de pompages dans les puits d'intervention permettrait de capter ce panache selon les schémas de la Figure 55 et de la Figure 56. Pour ces constellations de pompages, un débit total (maximum selon le modèle) de 100 m^3/j à SG16 (17 m^3/j), SG19b (50 m^3/j) et SG61 (33 m^3/j), selon la Figure 55 ou de 108 m^3/j à SG16 (16 m^3/j), SG19b (52 m^3/j) et SG46 (40 m^3/j), selon la Figure 56, permettrait de capter la totalité des lignes d'écoulement englobant le panache de la Figure 53. Selon cette simulation, la totalité du panache pollué pourrait être captée.

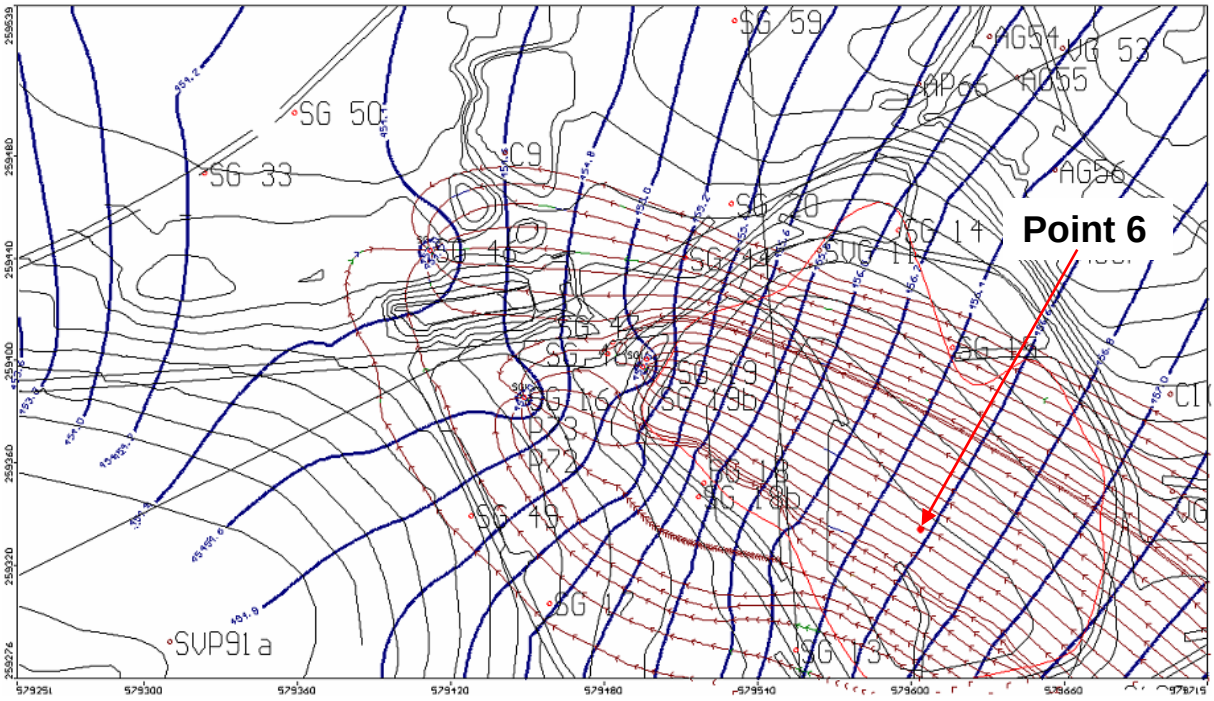


Figure 56 : Scénario catastrophe 6b au dépôt 3: Zone de capture pour un pompage maximal à SG16 (16 m^3/j), SG19b (52 m^3/j) et SG46 (40 m^3/j).

7.7 Conclusions concernant les scénarios 1 à 6

Scénario 1 : La simulation d'un point de pollution à l'ouest de la DIB (scénario N° 1) indique que :

- La densité des points de surveillance proches de la DIB au NW (SG18b, SG19b et le futur forage SG61) ainsi que ceux du deuxième écran de forages d'observation (SG16, SG49 et SG17) est suffisante car un panache pollué, issu d'une source de contamination dans le secteur ouest de la décharge, serait observé dans un ou plusieurs forages existants avant qu'il n'ait quitté le dispositif de surveillance. Cependant, il subsiste un espace important entre SG13 et SG18b, laissant la possibilité à un panache pollué ou à une partie de panache de quitter le secteur de la DIB durant plus d'une année (420 jours), sans pouvoir être observé dans un forage du premier écran de forages SG (Figure 33). Un forage complémentaire de surveillance entre SG13 et SG18b serait donc souhaitable pour compléter le dispositif de surveillance à l'ouest de la DIB.
- Sur la base du scénario 1, le temps actuel entre deux campagnes d'échantillonnage (130 à 140 jours selon le CSS de 2005 [30]), nécessaire à l'organisation d'une intervention hydraulique, est suffisant étant donné que sur la frange ouest de la décharge, les vitesses d'écoulement de l'eau souterraine sont relativement faibles et que l'on dispose de deux forages à grand débits (SG19b et SG46) pour des interventions hydrauliques dans la direction des écoulements du sillon à forte perméabilité.

Scénarios 2, 3 et 4 : Ces trois scénarios montrent que :

- Une pollution plus ou moins ponctuelle (quelques m^2 de surface à la source de contamination), survenant à la frange nord de la DIB, atteint dans les 60 premiers jours d'écoulement souterrain, au moins un forage de la ligne de forages d'observation SG19b - SG61 - SG44 - SG20 - SG60.
- A l'aval du front nord et nord-ouest de la DIB, la mise en place des forages SG60 et SG61 (Figure 33) est nécessaire pour compléter le premier écran de forages de surveillance, dans le sillon perméable des cailloutis du Sundgau. Une plus grande densité de forages de surveillance sur cette partie du front de la DIB serait redondante.
- Une contamination de faible à moyenne étendue, au front nord et nord-ouest de la décharge, formant un panache de 30 à 60 m de large, suivant sa trajec-

toire initiale, peut être interceptée en totalité par le pompage dans un seul des forages du premier écran complété de SG60 et SG61.

- La cadence d'observation actuelle (une analyse tous les 130 à 140 jours) fait que si une pollution atteint un forage du premier écran d'observation le lendemain d'une campagne de surveillance, le front de la contamination se trouve approximativement au niveau de la ligne SG25 – SG50 au moment où cette contamination est effectivement observée dans le premier écran. Une partie du panache pollué peut ainsi être perdue dans l'environnement.
- Si un panache du type SG19 est sectionné par une intervention hydraulique dans le premier écran de forages, la contamination résiduelle qui poursuit son cheminement dans les eaux souterraines s'étend fortement. Si typiquement ce panache n'a pas pu être intercepté durant 150 jours dès le moment où son front a dépassé le premier écran de forages, la quantité résiduelle de substance qui quittera à terme l'aquifère des cailloutis du Sundgau vers la série des Vosges sableuse, puis vers le karst, ne dépassera pas 2 grammes de HHV par jour. Dans la mesure où l'intervalle entre 2 campagnes de prélèvement préconisé dans le présent rapport (60 jours au lieu de 4,5 mois actuellement, cf. § 9) sera adopté, cette quantité sera fortement réduite. La quantité de substance pouvant effectivement quitter le site par ce vecteur, dépend de plusieurs facteurs décrits et évalués dans l'analyse de risques [25].
- Les panaches simulés atteignent une largeur de 50 à 80 m au niveau du deuxième écran de forages SG. Entre SG25 et SG50, respectivement entre SG59 et SG46, l'espace est trop important (115 m, respectivement 145 m) et ne permet pas d'observer un éventuel panache pollué (cf. Figure 36 et Figure 40). Deux forages SG supplémentaires dans ce secteur permettraient de compléter le deuxième écran de forages. S'ils étaient réalisés entre SG59 et SG46, ils pourraient également être utilisés pour des interventions hydrauliques en cas de nécessité.

Scénario 5 :

La simulation du scénario catastrophe 5a correspondant à un déversement intensif d'eau polluée durant 2 jours au point 5 (Trou de Laufon), indique que :

- Au niveau du premier écran de forages SG, la largeur du panache provoqué serait d'environ 35 m, analogue à l'espace maximal séparant les forages du premier écran (32 m entre SG20 et SG44), une fois que les forages SG60 et

SG61 seront en place. Le panache serait alors détectable par le premier écran de forages SG.

- Il ne serait par contre aucunement détecté dans le deuxième écran de forages SG. Il est donc nécessaire de compléter le réseau d'observation du deuxième écran de forages SG dans le secteur limité par les forages SG46, SG50, SG25 et SG59 (cf. scénarios 2 à 4).

- Le panache produit par le scénario 5a, pourrait passer entre les mailles du filet d'observation temporel : La contamination mettrait environ 100 jours pour passer au travers du premier écran de forages SG (Figure 48), ce qui est inférieur au pas temporel de mesure du CSS 2005 [30]. En conséquence, ce type de scénario doit être pris en compte pour définir la fréquence d'échantillonnage durant les travaux d'assainissement. Une analyse tous les 60 jours au niveau du premier écran de forages SG, permettrait de bien détecter un tel panache[1]. L'activation d'un pompage au premier écran de forages, 60 jours après qu'une contamination de type scénario 5a ait atteint cet écran, permet de capter environ 50 % de la contamination du panache. L'activation d'un pompage sur la ligne SG46 – SG59 permettrait d'en capter la presque totalité. Par conséquent, la mise en place de 2 forages d'observation et intervention SG entre SG46 et SG59, permettrait de compléter de manière efficace le dispositif d'observation et d'intervention hydraulique.

- Une surveillance stricte du chantier d'excavation de la décharge sera nécessaire pour éviter qu'une fuite du type scénario 5a puisse avoir lieu.

La simulation du scénario catastrophe 5b correspondant à un déversement intensif d'eau polluée durant 100 jours au point 5 (Trou de Laufon), indique que :

- La largeur du panache provoqué serait plus grande que la largeur maximale séparant deux forages du premier écran (32 m entre SG20 et SG44), une fois que les forages SG60 et SG61 seront en place.

[1] La Figure 48 montre la courbe d'évolution chimique au forage SG44, lors du passage du nuage de pollution provoqué par l'infiltration de liquides très pollués durant 2 jours seulement au point 5. Le passage de ce panache dure un peu plus de 100 jours. Une mesure tous les 60 jours permettrait de prélever au moins une fois une eau dont la concentration dépasse le tiers de la concentration maximale sur la ligne d'écoulement passant par le forage. Il s'agirait d'une concentration énorme par rapport aux concentrations inférieures aux seuils de quantification, observées habituellement à ce forage. Des mesures de contrôle puis d'intervention seraient aussitôt prises, ce qui permettrait d'intervenir avant que le front du panache de pollution ait dépassé le deuxième écran de forages. Le cas échéant, ce deuxième écran pourrait également être activé pour une intervention par pompage.

- Suivant l'emplacement de la source de contamination par rapport aux lignes d'écoulement, le pompage de cette contamination par un seul forage, voire par deux forages en pompage intensif, est possible.
- Une surveillance stricte du chantier d'excavation de la décharge et l'instruction précise du personnel s'occupant des travaux d'excavation, seront nécessaires pour éviter qu'une fuite du type scénario 5b puisse avoir lieu.

Scénario 6 :

La simulation du scénario catastrophe 6a correspondant à un déversement intensif d'eau polluée durant 2 jours au point 6 (Dépôt 3), indique que :

- La largeur du panache provoqué atteindrait plus de 60 m au niveau du premier écran de forages. Il serait observable dans au moins 5 forages contrôlés régulièrement (Figure 52).
- La disposition des forages actuels (SG16, SG19b et SG46) et un pompage optimal dans ces derniers, permettrait de capter environ 90 % de la contamination de ce panache si le pompage était activé 140 jours après que la contamination soit arrivée dans un forage d'observation.
- Une fréquence d'observation tous les 60 jours plutôt que tous les 130 à 140 jours selon le CSS 2005, permettrait de détecter suffisamment tôt une telle pollution et permettrait de mettre en œuvre à temps les pompages nécessaires pour capter l'ensemble de ce panache.

La simulation du scénario catastrophe 6b correspondant à un déversement intensif d'eau polluée durant 100 jours au point 6 (Dépôt 3), indique que :

- Le panache pourrait être intercepté efficacement par un pompage intensif de 100 m^3/j dans les forages SG19b, SG61 et SG16 (Figure 55), respectivement de 108 m^3/j dans les forages SG16, SG19b et SG46 (Figure 56).

8 Évaluation du réseau de surveillance actuel

La Figure 57 montre l'ensemble des forages dans les cailloutis du Sundgau qui ont fait l'objet d'essais de pompage entre 2000 et 2004. Les plages bleues correspondent pour chaque forage, à la zone captée lors de chaque essai de pompage de 10 jours, durant lesquels au moins trois échantillons d'eau prélevés au début, au milieu et à la fin de l'essai ont été analysés. Superposées aux lignes d'écoulement calculées à l'aide de la version 2002 du modèle mathématique, ces zones de capture montrent qu'à l'exception de quelques secteurs isolés au sud-ouest de la décharge, l'ensemble des lignes d'écoulement ont été échantillonnées et l'eau correspondante a été analysée. Sur la base des investigations de 2000 à 2002, seul un secteur a été défini comme panache contaminé provenant d'un foyer de pollution. Il s'agit du panache SG19–SG46 qui a été confirmé par la mise en place en 2003 du forage SG50.

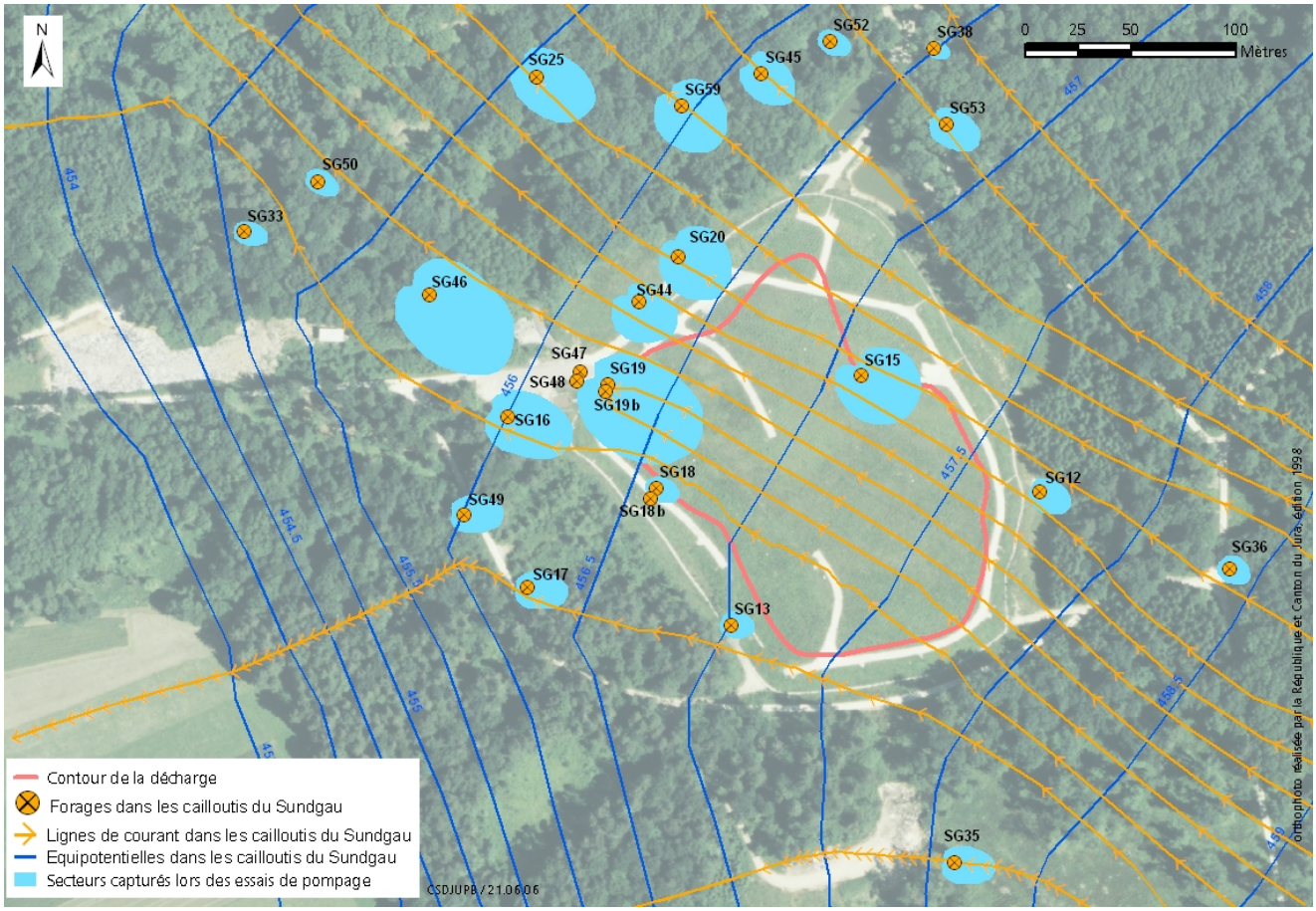


Figure 57: Zones de capture autour de chaque forage, desquelles l'eau a été pompée et échantillonnée pour analyses au cours des divers essais de pompage réalisés entre 2000 et 2004. Deux lignes de courant convergent à SG19b où a lieu un pompage de 20 m^3/j.

Il est donc possible de tester par des pompages d'environ 10 jours dans les forages existants et par l'analyse des eaux, la presque totalité des lignes d'écoulement qui passent sous la décharge et ainsi, d'évaluer si un foyer de pollution provenant directement de la DIB, contamine les eaux de l'aquifère des cailloutis du Sundgau.

L'observation des lignes d'écoulement recoupées par les plages bleues sur la Figure 57, indique que dans le secteur nord-est de la décharge, à l'est du forage SG20 (endroit où la perméabilité des cailloutis du Sundgau est élevée (Figure 15), mais où l'épaisseur de la formation des argiles de Bonfol est faible), l'écran de forages proche de la DIB ne permet pas de détecter le passage d'un éventuel panache pollué. Ce dernier serait observé seulement dans le deuxième écran de forages. De ce fait, il est recommandé de placer un nouveau forage (SG60, cf. Figure 33) de surveillance environ 30 m à l'E-NE du forage SG20.

Par ailleurs, entre les forages SG13 et SG18b, secteur à perméabilité relativement faible et où les écoulements se dirigent vers l'ouest, une lacune d'observation subsiste, ce que l'évaluation du scénario 1 (§ 7.1) de modélisation a mis en évidence. De ce fait, il est recommandé de placer un nouveau forage SG de surveillance entre SG13 et SG18b.

La Figure 57 met également en évidence le manque d'information au niveau du deuxième écran de forages SG, entre SG46 et SG59, ce que les scénarios 2, 3 et 5 ont confirmé.

Il peut exister des situations où le premier écran de forages ne permet pas d'observer une contamination. Par exemple si une succession de lentilles ou corps sableux dans la formation des argiles de Bonfol laisse filtrer de la contamination au-delà du premier écran de forages, comme c'est le cas pour la lentille sableuse « AG23 ». Le deuxième écran de forages a également pour objectif de mettre en évidence une telle pollution. Dans le cas de la lentille sableuse « AG23 », une telle pollution passant par des connexions hydrauliques entre des secteurs sableux de la formation des argiles de Bonfol, ne peut pas transporter de grands flux de pollution (discontinuité du milieu, faible perméabilité, faible gradient…), comme c'est potentiellement le cas dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau. Le risque pour la qualité des eaux souterraines dans les formations aquifères est par conséquent très faible. Par ailleurs, on a pu observer que le milieu anaérobie régnant dans la lentille sableuse « AG23 » permet par dégradation biologique, d'éliminer la presque totalité des substances dangereuses pour l'environnement, avant un éventuel transfert vers l'aquifère des cailloutis du Sundgau (cf. § 6.3.3 dans [9]).

9 Conclusions, recommandations et perspectives

Le présent rapport fait état de la réactualisation en 2006 du modèle mathématique des écoulements souterrains et du transport de substances dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau. Les données de base utilisées pour la construction du modèle et sa calibration sont décrites et argumentées.

Les objectifs de l'étude définis au § 1.3 ont été atteints :

- Le présent rapport présente un modèle adéquat de simulation déterministe des écoulements et du transport dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau.
- Les scénarios de contamination accidentelle définis avec les autorités de protection de l'environnement ont été simulés et les conclusions qui en découlent ont été tirées.
- Une évaluation du dispositif d'observation et d'intervention par forages a été réalisée, aboutissant à recommander la mise en place de nouveaux forages.
- La fréquence des pompages pour les échantillonnages durant la phase d'assainissement de la DIB a été recommandée (2 mois). La durée du pompage à chaque point d'eau existant lors des échantillonnages, est donnée dans le CSS [30] et pourra être réadaptée en fonction des essais de pompages à réaliser sur les nouveaux forages implantés dans les Cailloutis du Sundgau.
- Les mesures d'intervention par pompage, nécessaires pour éviter le transfert d'une éventuelle contamination au-delà des écrans de forages, ont été définies pour chaque scénario de pollution simulé.

Les principales conclusions et recommandations de ce rapport sont :

- **Les infrastructures de pompage en cas d'intervention** (pompes, matériel pour adductions électriques, etc.) existantes in situ ou directement disponibles pour la surveillance environnementale du site, permettent d'extraire de l'aquifère au premier écran de forages, le débit maximal donné par le modèle de 125 à 145 m^3/jour. Une intervention hydraulique par pompage des eaux de l'aquifère peut donc être réalisée rapidement en cas de nécessité.
- **Calibration du volet hydraulique du modèle :** La simulation de l'état stationnaire (sans le pompage continu en SG19b) est qualifiée de bonne. Les niveaux calculés sont très proches des données piézométriques mesurées, à l'exception de la région du piézomètre SG25, au nord de la DIB, où les poten-

tiels calculés sont trop élevés. Ceci découle de l'incertitude quant à la géométrie du système en dehors de la région proche de la DIB. La cohérence du modèle est démontrée par la simulation du pompage continu en SG19b de 20 m^3/jour et par celle d'un pompage simultané dans 5 forages, effectuée en février et mars 2006. Les résultats du calcul montrent, au niveau du rabattement induit, des valeurs comparables à ce qui peut réellement être observé. La calibration hydraulique sur la base de l'essai de pompage multiple de février – mars 2006 a permis de diminuer considérablement la marge d'erreur ou d'incertitude sur les débits qui s'écoulent dans l'aquifère et sur ceux qu'il est possible de pomper aux divers puits actuellement activables. Cette erreur est estimée à moins de 10% de part et d'autre des chiffres donnés au Tableau 12. Le modèle confirme qu'à l'ouest de la décharge, la formation des cailloutis du Sundgau est peu perméable, tout comme l'indiquent les forages SG13, SG17, SG18b et SG49.

- **Calibration du volet transport du modèle :** Le travail de calibration a porté sur la simulation du panache pollué SG19, sur la base des données observées avant le début du pompage, ainsi que celles observées depuis la mise en marche du pompage continu en SG19b qui a provoqué l'amenuisement progressif du panache pollué plus à l'aval. Des valeurs réalistes concernant les paramètres de transport ont pu être définies, servant de base à la simulation de scénarios de pollutions.

- **Débits de pompage de la barrière d'intervention à l'aval immédiat de la DIB** : Le modèle montre qu'il est possible, dans le cas d'un pompage en continu aux 5 forages testés durant l'essai de pompage multiple, d'extraire 15 m^3/j à SG13, 10 m^3/j à SG16, 45 m^3/j à SG19b, 30 m^3/j à SG44 et 35 m^3/j à SG20, totalisant 135 m^3/j. Cette constellation de pompages ne constitue pas une solution unique. Les nouveaux forages mis en place en septembre et octobre 2006 (SG60 à SG63, cf. ci-dessous), ainsi que l'activation du pompage en SG46, permettent d'envisager d'autres constellations de pompages spécifiques aux différents scénarios de pollution. Celles-ci pourront être testées après recalibration du modèle présenté dans ce document sur la base des informations issues des nouveaux forages.

- **Dispositif de surveillance de l'aquifère des cailloutis du Sundgau :** La présente étude conclut que le dispositif de surveillance doit être complété par la mise en place de 5 nouveaux forages d'observation et d'intervention dans le premier et le deuxième écran de forages.

Quatre de ces forages ont été récemment mis en place (septembre et octobre 2006). Leur situation est présentée sur la Figure 58. Le cinquième n'a toutefois pas été réalisé car :

- la situation idéale déterminée dans la présente étude (point violet sur la Figure 58, entre les forages SG13 et SG18b) se trouve être dans le secteur de la future zone de transfert des déchets entre les halles d'excavation et de préparation ; le risque de polluer la nappe des Cailloutis du Sundgau par un by-pass direct si ce forage devait être endommagé est ainsi trop élevé ;
- la mise en place de ce forage en-dehors de l'emprise des futures bâtiments l'aurait repoussé au niveau du deuxième écran et n'aurait pas permis d'atteindre l'objectif recherché, soit la détection précoce d'un éventuel panache de contamination passant entre SG18b et SG13 (cf. scénario 1, § 7.1). Dans la configuration actuelle, cette détection ne se fait que 420 jours après le début de la contamination ;

Toutefois, il faut souligner que le fait de renoncer à ce forage ne remet pas en cause l'efficacité du système d'intervention en cas de contamination. Une contamination du type scénario 1 (§ 7.1) serait à terme détectée dans au moins 8 forages d'observation et la mise en route d'une constellation adéquate de pompages dans un ou plusieurs forages existants permettrait d'extraire cette contamination de l'aquifère. Précisons également que le risque d'une contamination des eaux souterraines par percolation des lixiviats de la décharge au travers de la série des argiles de Bonfol est moins important dans ce secteur qu'au nord ou à l'est de la décharge, car l'épaisseur des argiles entre la base de la décharge et l'aquifère des cailloutis du Sundgau est la plus grande de l'ensemble du site.

Les 4 nouveaux forages (Figure 58) devraient permettre d'améliorer le dispositif de surveillance et de compléter efficacement l'écran N° 1 de forages d'intervention hydraulique à l'aval immédiat de la DIB :

<u>Premier écran de forages</u> :

- Forage **SG60** environ 30 m à l'E-NE de SG20. Ce forage devrait améliorer sensiblement l'efficacité du dispositif d'observation des eaux souterraines à l'aval immédiat de la décharge. Son efficacité devra être vérifiée par un essai de pompage puis par la réactualisation du modèle mathématique.

- Forage **SG61** entre SG19b et SG44. Ce forage réduit l'espace important entre ces deux forages que le dispositif initial ne permettait pas de capter ni d'échantillonner de manière sûre. Son efficacité devra être vérifiée par un essai de pompage puis par la réactualisation du modèle mathématique.

Deuxième écran de forages :

- Forages SG62 et SG63 entre SG46 et SG59. Ces forages devraient permettre de combler une lacune d'observation dans le deuxième écran de forages de surveillance SG au nord de la décharge. Leur efficacité devra encore être démontrée par un essai de pompage puis par la réactualisation du modèle mathématique.

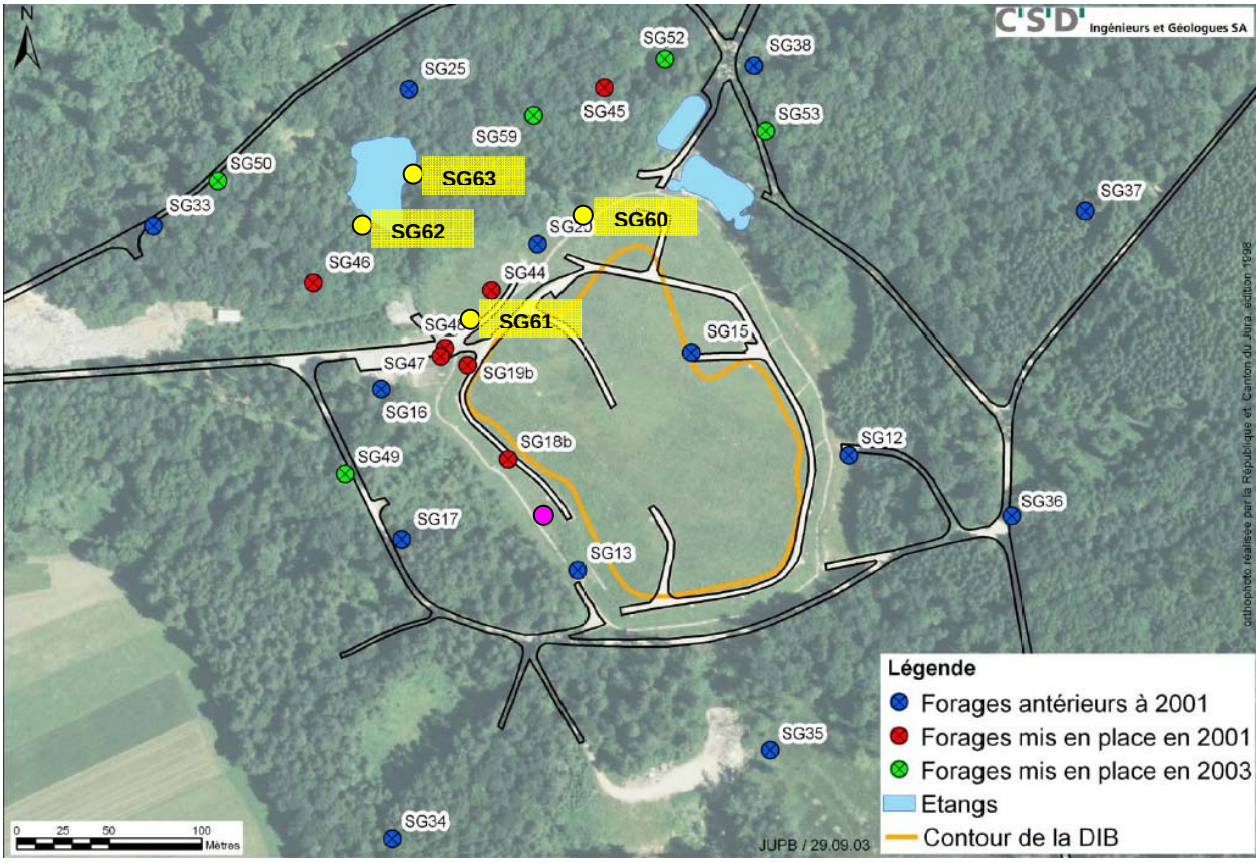


Figure 58: Localisation (en jaune) des 4 nouveaux forages SG mis récemment en place suite aux recommandations tirées de la présente étude. En violet, le cinquième forage initialement proposé, a du être abandonné pour des raisons de conflits avec les futures infrastructures d'assainissement.

- **Dispositif d'intervention** : Lors des travaux d'assainissement, il est possible mais peu probable que survienne une fuite importante de liquides pollués vers l'aquifère des cailloutis du Sundgau. Cette éventualité simulée par les scénarios 5

et 6 aboutit à la conclusion que si l'on veut intervenir de manière efficace pour éviter qu'un panache très pollué quitte le dispositif de surveillance formé par les écrans 1 et 2, le deuxième écran de forages SG de surveillance doit aussi pouvoir fonctionner comme barrière d'intervention hydraulique. La Figure 57 montre que les forages SG46, SG25, SG59 et SG45 ont des débits suffisants pour réaliser une intervention hydraulique efficace. Par contre, les forages SG33 et SG50 ne permettent pas une intervention efficace. Nous recommandons donc de combler la lacune de forages de surveillance et d'intervention entre SG46 et le secteur SG25-SG59 par la pose de 2 nouveaux forages, comme indiqué à la Figure 58. Le principe d'utiliser le deuxième écran de forages pour une intervention est démontré par la Figure 59. Sur cette dernière, les lignes de courant captées par le forage SG46 sont marquées en vert. SG16 et SG19b attirent les écoulements provenant de l'amont hydrologique et modifient de ce fait en l'élargissant, le champ des écoulements affluant à SG46. Les lignes d'écoulement captées par ce dernier englobent celles captées par les deux premiers, garantissant ainsi le captage complet d'un éventuel panache contaminé de grande ampleur situé à l'amont de SG19. Ainsi, même si le débit d'un forage du deuxième écran est relativement faible, sa zone de capture peut être considérablement élargie par le jeu des pompages sur le premier écran.

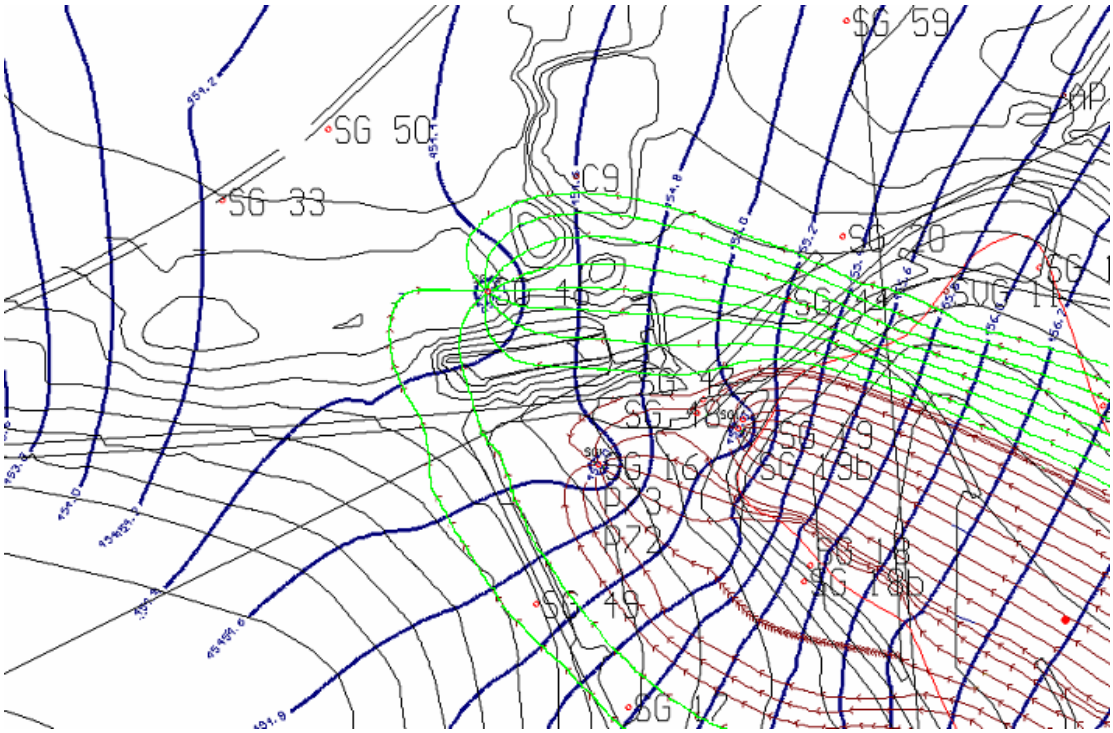


Figure 59: Lignes de courants pour pompages simultanés dans deux écrans de forages à l'exemple de pompages dans SG16, SG19b et SG46 (tiré de la Figure 56). En vert, les lignes de courant en direction de SG46.

- **Programme de surveillance durant les travaux d'assainissement :** la présente étude conclut que le CSS actuel doit être modifié comme suit au niveau des fréquences pour la surveillance des eaux souterraines, pendant l'assainissement de la DIB :
    - Grandes campagnes d'analyses tous les 8 mois de manière à faire coïncider avec la fréquence des petites campagnes.
    - Petites campagnes d'analyses tous les 2 mois aux points SG13, SG15, SG16, SG18b, SG19b, SG20, SG44, SG47 et SG48.

  La nécessité d'adapter cette liste suite à la mise en place des nouveaux forages (SG60 à SG63) devra faire l'objet d'une évaluation en fonction du résultat des essais de pompages qui y seront réalisés.

Les principales perspectives du point de vue de la présente modélisation, suite à la mise en place des 4 nouveaux forages (Figure 58), sont les suivantes :

- Réalisation d'essais de pompage pour tester les caractéristiques hydrauliques des piézomètres mis en place ;
- Mise à jour du CSS
- Recalibration du modèle mathématique présenté dans ce document sur la base des informations issues de la réalisation des nouveaux forages et des essais de pompage ;
- Evaluation des dispositifs de surveillance des cailloutis du Sundgau et d'intervention, complétés par les nouveaux forages, sur la base des scénarios de contamination des eaux souterraines du chapitre 7 et de la nouvelle fréquence prévue pour la surveillance des eaux souterraines ;
- Recommandations éventuelles pour améliorer les dispositifs en cas de mise en évidence de lacunes résiduelles.

10 Références

[1] bci Betriebs-AG : Assainissement définitif de la décharge industrielle de Bonfol - Projet d'assainissement selon l'OSites. Rapport principal, 12 rapports annexes et un dossier de plans. IGDIB, Schlieren et Porrentruy, le 27.11.2003.

[2] République et Canton du Jura – DEE – OEPN : Décharge industrielle de Bonfol – Projet d'assainissement. Prise de position (dans le cadre de l'évaluation selon art. 18 OSites). St-Ursanne, le 8 septembre 2004.

[3] CSD Ingénieurs et Géologues SA : Décharge industrielle de Bonfol – Rapport de synthèse hydrogéologique 2002. Porrentruy, le 24 mai 2002 – bci Basler Chemische Industrie, Bâle.

[4] Procès-verbal de la séance n°1 du Groupe hydrogéologie – DIB à l'OEPN. St-Ursanne, le 10 décembre 2004.

[5] Procès-verbal de la séance n°2 du Groupe hydrogéologie – DIB à l'OEPN. St-Ursanne, le 15 décembre 2004.

[6] Procès-verbal de la séance n°3 du Groupe hydrogéologie – DIB à l'OEPN. St-Ursanne, le 3 février 2005.

[7] Procès-verbal de la séance n°4 du Groupe hydrogéologie – DIB à l'OEPN. St-Ursanne, le 8 mars 2005.

[8] CSD Ingénieurs et Géologues SA (2006) : Décharge industrielle de Bonfol (DIB). Modélisation mathématique des écoulements souterrains dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau. Adaptation du modèle mathématique suite à l'essai de pompage multiple de février et mars 2006 – Rapport du 19 mai 2006 pour bci Betriebs-AG, Bâle, 16 pp.

[9] CSD Ingénieurs et Géologues SA (2004) : Décharge industrielle de Bonfol (DIB). Rapport annuel 2003. Rapport du 23.07.04 pour bci Betriebs-AG, Bâle.

[10] Liniger : Carte géologique 1 :25'000 Bonfol, feuille 1065. Atlas géologique de la Suisse. Commission géologique Suisse, Berne.

[11] Gretillat, P.-A., Lièvre, A., Fernex, J. (1992): Carte hydrogéologique de l'Ajoie (Canton du Jura, Suisse) - Éléments pour la gestion et la protection des eaux. Office des Eaux et de la Protection de la Nature, CH-2882 St-Ursanne.

[12] Schmassmann H.R. (1982) : Rapport sur la décharge industrielle de Bonfol 1961 - 1981. Rapport du 25.08.82, pour J.R. Geigy SA Bâle.

[13] CSD AG (1984) : Deponie Bonfol : Jahresbericht 1983. Rapport BE1393B, 22.05.84 für die Entsorgungsgruppe der Baslerchemie, Basel.

[14] CSD Colombi Schmutz Dorthe SA (1987) : Commune de Bonfol – Sondermülldeponie Bonfol SMDB : Jahresbericht 1986. Rapport BE 1743-6.1, du 17 novembre 1987 pour Entsorgungsgruppe der Basler Chemie, Bâle.

[15] BRGM (1991) : Décharge industrielle de Bonfol : Mise en place d'un réseau de contrôle de la qualité des eaux en territoire français à Pfetterhouse et Courtavon (Haut-Rhin). Résultats des contrôles effectués entre 1988 et 1990. Rapport R33527 ALS 4S91 pour Ciba-Geigy AG du 12.09.91, 27 pp., 3 annexes.

[16] CSD Colombi Schmutz Dorthe SA (1991) : Sondermülldeponie Bonfol: Jahresbericht 1990. Rapport BE 2666-8.1, du 20 septembre 1991 pour Ciba – Geigy - BCI, Bâle.

[17] CSD Ingénieurs et Géologues SA (2003) : Décharge industrielle de Bonfol. Campagnes de forages 2001 – Rapport JU5150 du 18.02.2003 pour bci, Bâle.

[18] CSD Ingénieurs et Géologues SA (2005) : Décharge industrielle de Bonfol (DIB). Campagne de forages 2003 – Rapport JU5152-11.1/40 du 29 juillet 2005 pour bci Betriebs-AG, Bâle.

[19] CSD Colombi Schmutz Dorthe SA (1985) : Commune de Bonfol – Deponie Bonfol : Jahresbericht 1984. Rapport BE 1744, du 28 juin 1985 pour Entsorgungsgruppe der Basler Chemie, Bâle.

[20] CSD Colombi Schmutz Dorthe SA (1992) : Décharge industrielle de Bonfol: Rapport annuel 1991. Rapport BE 2783-8.1, du 9 novembre 1992 pour Ciba – Geigy - BCI, Bâle.

[21] CSD Colombi Schmutz Dorthe SA (1987) : Commune de Bonfol – Deponie Bonfol : Jahresbericht 1986. Rapport BE 1743-6.1, du 17 novembre 1987 pour Entsorgungsgruppe der Basler Chemie, Bâle.

[22] Duret Reber AG : Deponie Bonfol. Refraktionsseismische Untersuchungen. Rapport pour Ciba-Geigy AG, Basel du 13 septembre 1973. 9 pp., 2 ann.

[23] Duret Reber AG : Deponie Bonfol. Geoelektrische Untersuchungen für Ciba-Geigy AG Basel. Rapport du 9 novembre 1973. 14 pp., 6 ann.

[24] CSD Ingénieurs et Géologues SA (2005) : Décharge industrielle de Bonfol (DIB). Rapport technique annuel 2004 – Rapport du 16 août 2005 pour bci Betriebs-AG, Bâle, 73 pp, 7 annexes.

[25] bci Betriebs AG (2003) : Definitive Sanierung der Sondermülldeponie Bonfol Chemische Risikobewertung Deponie Bonfol, Stand Ende 2002 – Beilagenbericht Nr 6.1 zum Sanierungsprojekt. Ingenieurbüro BMG, August 2003.

[26] bci Betriebs AG (2003) : Definitive Sanierung der Sondermülldeponie Bonfol Sanierungsziele – Beilagenbericht Nr 6.2 zum Sanierungsprojekt. Ingenieurbüro BMG, November 2003.

[27] Kinzelbach, W., Rausch, R. (1995) : Grundwassermodellierung – Eine Einführung mit Übungen. Bornträger, 283 pp.

[28] CSD Colombi Schmutz Dorthe AG (1992) : Sondermülldeponie Bonfol. - Risikoanalyse Stand 1991. Rapport für Ciba-Geigy AG, August 1992, 115 S.

[29] CSD Ingénieurs et Géologues SA (2002) : Décharge industrielle de Bonfol. Rapport annuel 2001 – Rapport du 17.05.02 pour bci Betriebs-AG, Bâle.

[30] bci Betriebs AG : Décharge industrielle de Bonfol (DIB). Concept de surveillance et de sécurité (CSS), version du 30.08.2005 approuvée par l'OEPN le 08.09.2005, 74 pp, 6 annexes, 4 plans.

[31] CSD Ingénieurs et Géologues SA (2005) : Décharge industrielle de Bonfol (DIB). Modélisation mathématique des écoulements souterrains dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau (secteur de la DIB). Note complémentaire concernant la dispersivité du 03.03.2006, pour bci Betriebs-AG, Bâle, 16 pp, 8 fig., 6 tab.

CSD Ingénieurs et Géologues SA

Joseph Thierrin Bernhard Matter

Collaborateurs chargés de l'étude :

Irina Przybylski

Joseph Thierrin

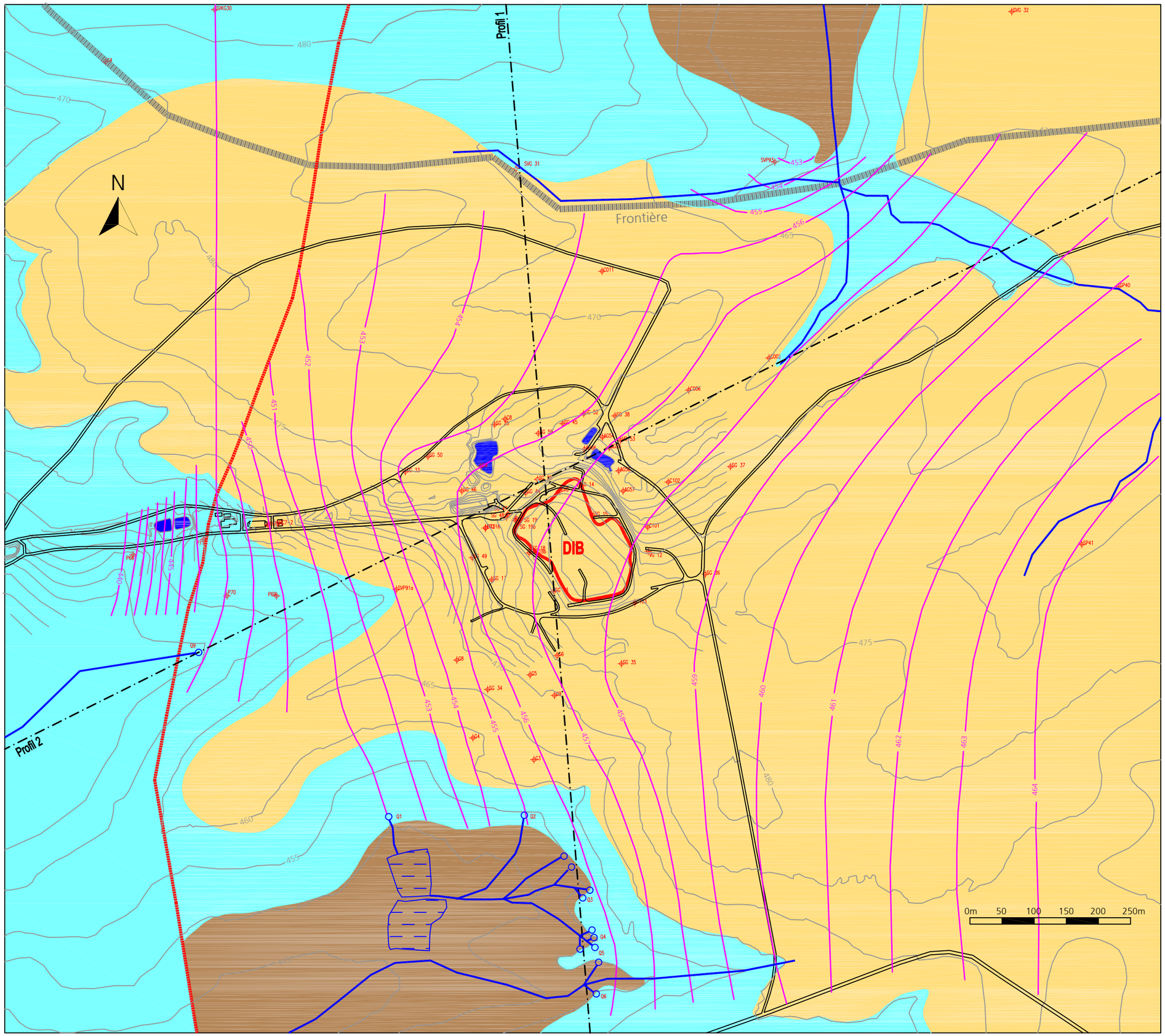
Grégoire Monin

Porrentruy, le 15 novembre 2006
JU5206.100.34

Annexe 1

Carte géologique du périmètre du modèle et piézo-métrie de l'aquifère des cailloutis du Sundgau

Carte géologique et hydrogéologique de la région de la DIB Bonfol Piézométrie moyenne janvier 1990-décembre 2002



Stratigraphie :

- AB — Argiles de Bonfol
- CS + SVs — Cailloutis du Sundgau + Série des Vosges sableuse
- SVm — Série des Vosges marneuse

- Faille
- Coupe géologique
- Courbes de niveau
- Isopièzes (moyenne 1990-2002)

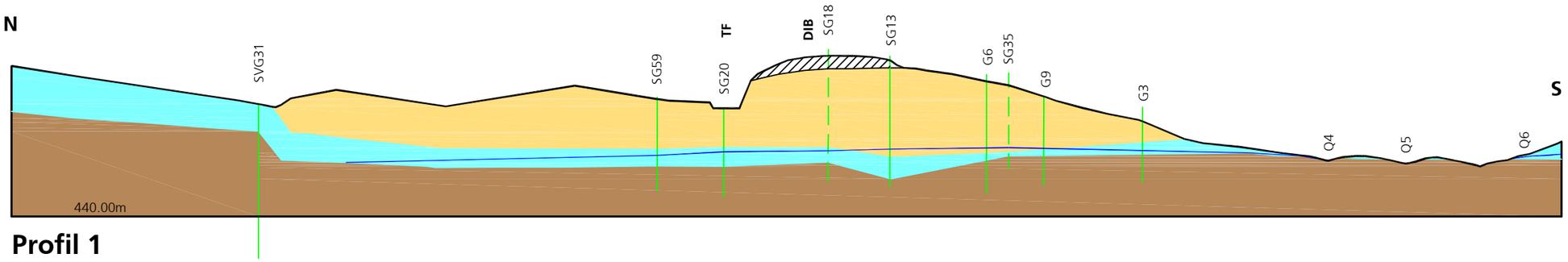
C'S'D'
Ingénieurs et Géologues SA

Date : 12.08 2005 dess.GMO/CF

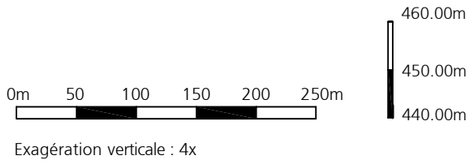
Annexe 2

Coupes géologiques Est-Ouest et Nord-Sud à travers le périmètre du modèle

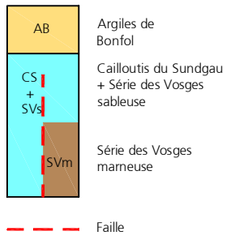
Profils géologiques 1 et 2
région de la DIB Bonfol
17.03.05



Profil 1



Exagération verticale : 4x

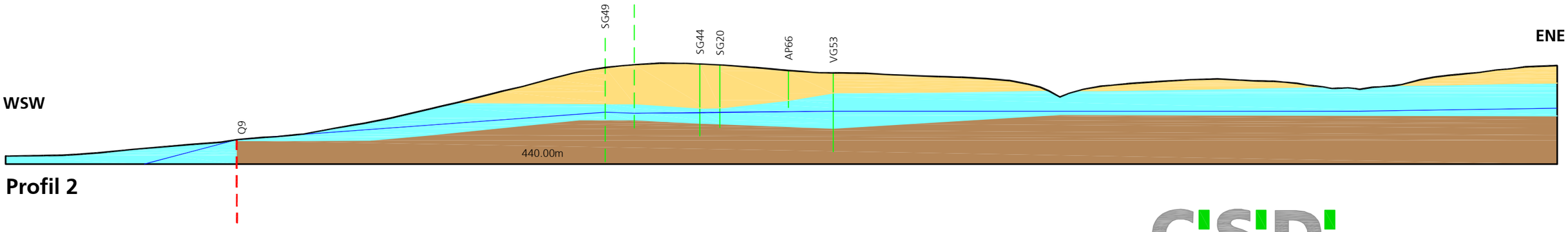


Argiles de Bonfol

Cailloutis du Sundgau + Série des Vosges sableuse

Série des Vosges marneuse

Faille



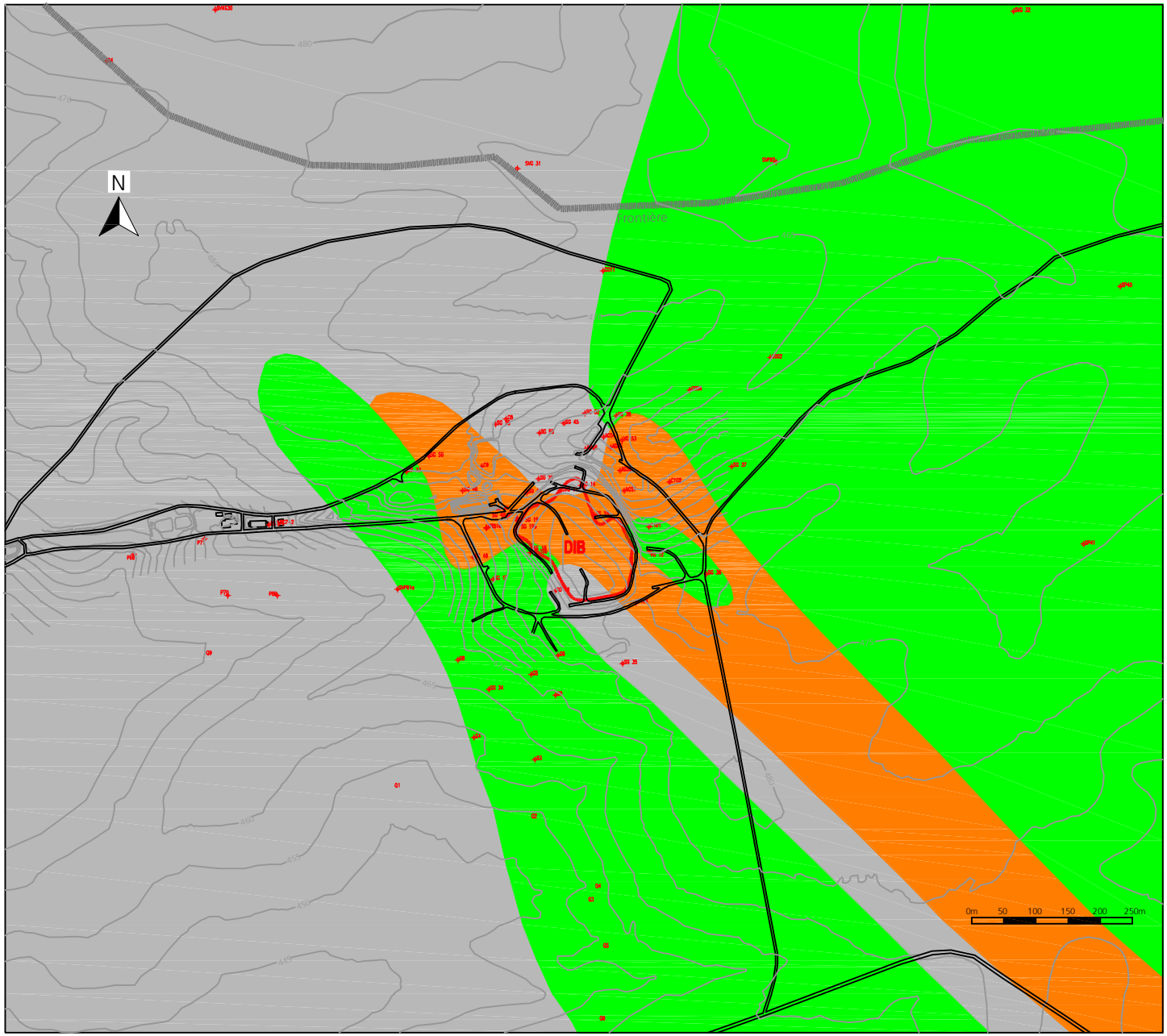
Profil 2

C'S'D'

Ingénieurs et Géologues SA

Annexe 3

Carte des perméabilités dans l'aquifère des caillou-tis du Sundgau



Carte des perméabilités 08.06.2005 Gmo

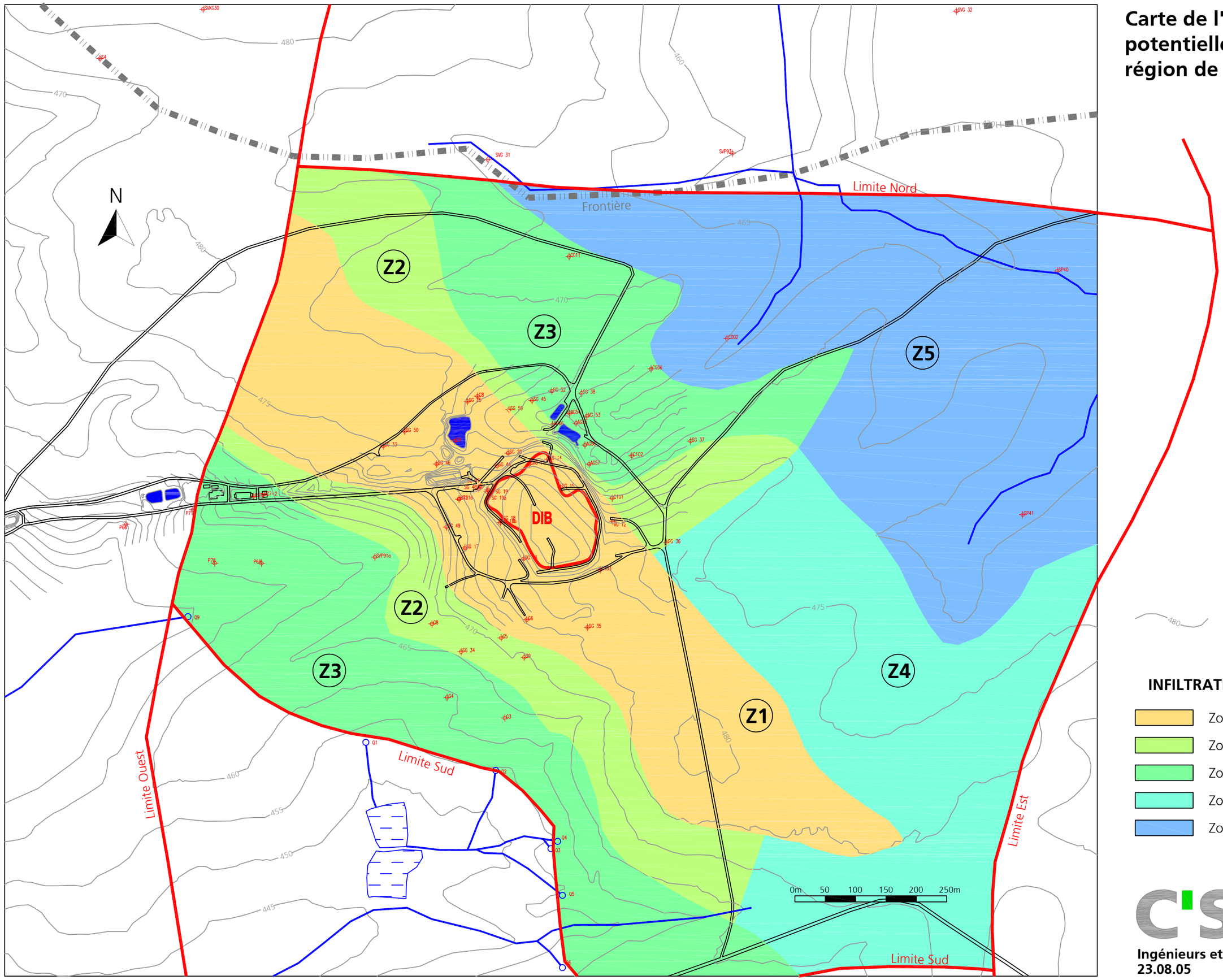
- Perméabilité faible (4,1E-5 - 7,9E-5)
- Perméabilité moyenne (7,0E-5 - 1,1E-4)
- Perméabilité haute (2,2E-4 - 3,3E-4)

C'S'D' Ingénieurs et Géologues SA

Annexe 4

Carte de l'infiltration potentielle dans la région de la DIB

Carte de l'infiltration potentielle dans la région de la DIB



Courbes de niveau

INFILTRATION

- Zone 1 : 5 mm/an
- Zone 2 : 50-100 mm/an
- Zone 3 : 80-130 mm/an
- Zone 4 : 100-180 mm/an
- Zone 5 : 150-200 mm/an

CSD
Ingénieurs et Géologues SA

23.08.05

Betriebs-AG

Assainissement définitif de la décharge industrielle de Bonfol

Compléments selon exigences de la prise de position OEPN du 08.09.04

2. Géologie et hydrogéologie

2.5 Modélisation des écoulements

Annexe 2.5.2

C'S'D' Ingénieurs et Géologues SA

Ingénieurs
Géologues
Spécialistes de l'environnement
Rue de la Chaumont 13, CP 134
2900 Porrentruy 2

Téléphone: +41 (0)32-466 58 58
Fax: +41 (0)32-466 57 21
E-mail: porrentruy@csd.ch
Internet: www.csd.ch

Betriebs-AG

Décharge industrielle de Bonfol (DIB)

Modélisation mathématique des écoulements souterrains dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau (secteur de la DIB)

Note complémentaire concernant la dispersivité

3 mars 2006

C'S'D' Ingénieurs et Géologues SA

Ingénieurs
Géologues
Spécialistes de l'environnement
Rue de la Chaumont 13, CP 134
2900 Porrentruy 2

Téléphone: +41 (0)32-466 58 58
Fax: +41 (0)32-466 57 21
E-mail: porrentruy@csd.ch
Internet: www.csd.ch

Table des matières

1 Introduction 1

2 Largeur du panache pollué à la hauteur de SG19b 4

3 Diffluence à l'aval de SG19b 5

4 Évaluation de la dispersion numérique lors des simulations à l'aide du logiciel MODFLOW 6

4.1 Simulation MODFLOW 1 7

4.2 Simulation MODFLOW 2 8

4.3 Simulation SOLUTRANS 1 9

4.4 Simulation SOLUTRANS 2 10

4.5 Simulation SOLUTRANS 3 11

5 Comparaison des résultats des deux modélisations 12

5.1 MODFLOW 1 et SOLUTRANS 2 + 3 12

5.2 MODFLOW 2 et SOLUTRANS 1 13

5.3 Conclusions 14

6 Éléments pour de nouveaux essais de pompage 15

7 Références 16

Liste des tableaux

Tableau 1: Données relatives au transport en solution, obtenues après calibration sur le panache SG19, du modèle MODFLOW..... 2

Tableau 2: Données de base pour la simulation analytique à l'aide du logiciel SOLUTRANS. 7

Tableau 3: Données pour la simulation MODFLOW 2. 9

Tableau 4: Données relatives à la simulation SOLUTRANS 1. 9

Tableau 5: Données relatives à la simulation SOLUTRANS 2. 10

Tableau 6: Comparaison des résultats des simulations SOLUTRANS et MODFLOW..... 12

Liste des figures

Figure 1: Dépendance de la valeur de la dispersivité en fonction de l'échelle d'observation 3

Figure 2: Zones de capture pour pompages à SG16, SG44 et SG19b 4

Figure 3: Lignes d'écoulement à l'aval de SG19b. 5

Figure 4: Panache SG19b simulé à l'aide du logiciel MODFLOW, 1000 jours après le début de la source de contamination...... 7

Figure 5: Simulation MODFLOW 2...... 8

Figure 6: Simulation SOLUTRANS 1. 9

Figure 7: Simulation SOLUTRANS 2. 10

Figure 8: Simulation SOLUTRANS 3. 11

1 Introduction

En complément du rapport CSD du 31 octobre 2005, intitulé «Décharge industrielle de Bonfol (DIB) - Modélisation mathématique des écoulements souterrains dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau (secteur de la DIB) » [1], la présente note apporte des précisions sur :

a) les éléments de détermination de la largeur du panache pollué à la hauteur de SG19b (chap.2), informations déduites de :

   - la grandeur des zones de capture autour des forages SG16 et SG44 lors des essais de pompage de 10 jours et,
   - pompages avec 10 et 20 m3/j en SG19b ;

b) une information quantitative concernant l'élargissement du panache pollué par diffluence hydraulique à l'aval de SG19b (chap. 3) ;

c) une évaluation de la dispersion numérique ou mathématique des résultats des simulations MODFLOW, par comparaison de ces résultats avec une modélisation analytique (réalisée à l'aide du logiciel SOLUTRANS), compte tenu de la diffluence observée (cf. chap. 4) ;

d) les éléments hydrauliques requis pour l'essai de pompage dans plusieurs forages à la fois selon les exigences E2-6 et E2-8 (chap. 5), essai en cours à la date de rédaction de cette note.

Cette note complémentaire a été proposée lors de la séance de présentation du modèle mathématique par bci et CSD à l'OEPN et ses experts le 9 novembre 2005. Un complément d'information était demandé par l'expert de l'OEPN quant au choix des paramètres de dispersivité dans le modèle et l'éventuelle trop grande dispersion numérique engendrée par la méthode de calcul du logiciel MODFLOW.

A titre de rappel, les paramètres de transport en solution du modèle ont été calés sur les données à disposition concernant le panache pollué observé à l'aval de SG19 et SG19b (nommé ci-après « panache SG19 »), ainsi que les tests en colonnes de laboratoire effectués sur le matériel des cailloutis du Sundgau, dans le cadre du projet d'assainissement du site. Ces données de base sont indiquées au Tableau 1.

Tableau 1: Données relatives au transport en solution, obtenues après calibration sur le panache SG19, du modèle MODFLOW présenté dans le rapport [1].

Paramètre	Donnée utilisée pour la simulation de scénarios après calibration du modèle sur le panache SG19.
Dispersivité longitudinale α_L	2 m
Dispersivité transversale α_T	0.1 m
Retardation (adsorption - désorption)	aucune retardation
Grandeur des cellules du modèle	maximum 2.5 m de côté
Source de contamination : Grandeur	3 x 3 m
Source de contamination : Localisation	35 m au SE de SG19b
Flux de contamination à la source	1.6 kg Σ HHV par an, soit 92 g/m^3 injecté à raison de 17 m^3/an
Largeur du panache à SG19b	25 m

La justification des valeurs relatives à ces paramètres est donnée dans le rapport [1].

Les valeurs de dispersivité longitudinale α_L et transversale α_T ont été définies par calage sur la forme plausible du panache avant le début du pompage des eaux contaminées en SG19b, le 9 novembre 2001. Il s'agit des paramètres qui ont le plus d'importance quant à l'élargissement et à l'aplatissement du panache pollué, durant son trajet vers l'aval des écoulements. Ces valeurs ont été jugées potentiellement trop faibles par les experts de l'OEPN compte tenu de la largeur du panache en question. L'auteur de la modélisation ne nie pas que la méthode de résolution des équations par éléments finis ou par différences finies, peut présenter une certaine dispersion numérique des résultats. Les spécialistes qui ont publié sur le sujet l'acceptent aussi [5] « Zum Ausgleich dieses numerischen Effektes kann man den Wert der realen Dispersion entsprechend reduzieren. Genauer spricht man von der Korrektur des Abschneidefehlers. ». La méthode de calcul MOC (Method of Characteristics) utilisée pour la simulation à l'aide du logiciel MODFLOW est cependant, selon les information donnée par l'éditeur du logiciel [6] la méthode de résolution de l'advection dans MODFLOW qui engendre le moins de dispersion numérique « The MOC uses a conventional particle tracking technique based on a mixed Eulerian-Lagrangian method for solving the advection…. The main advantage of the MOC technique is that it is virtually free of numerical dispersion ». Par ailleurs, les valeurs de dispersivité longitudinale α_L = 2.0 m et de dispersivité transversale α_T = 0.1 m déduites de ce calage, correspondent tout à fait aux données de la littérature. La **Figure 1** tirée de [4] est une synthèse de nombreuses études qui ont déterminé la dispersivité longitudinale à l'intérieur d'aquifères, en fonction de la grandeur du panache contaminé ou de l'essai de traçage observé. Le domaine correspondant à l'observation de ces phénomènes dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau est indiqué en rouge. On constate que l'hypothèse posée α_L = 2.0 m est tout à fait plausible. Concernant la largeur ou l'ouverture du panache, c'est surtout la valeur de la dispersivité transversale qui entre

en ligne de compte. Il est admis dans la littérature, sur la base des très nombreuses expériences, que la valeur de la dispersivité transversale α_T est globalement d'un facteur 10 à 20 inférieur à la valeur de la dispersivité longitudinale α_L en ce qui concerne les essais de laboratoire (petite échelle) et d'un facteur 3 à 100 inférieur à la valeur de la dispersivité longitudinale α_L en ce qui concerne les observations de terrain [4]. La valeur optimale de α_T déduite de la simulation du panache SG19 (Tableau 1) est d'un facteur 20 inférieure à celle de α_L, ce qui entre tout à fait dans cet ordre de grandeur.

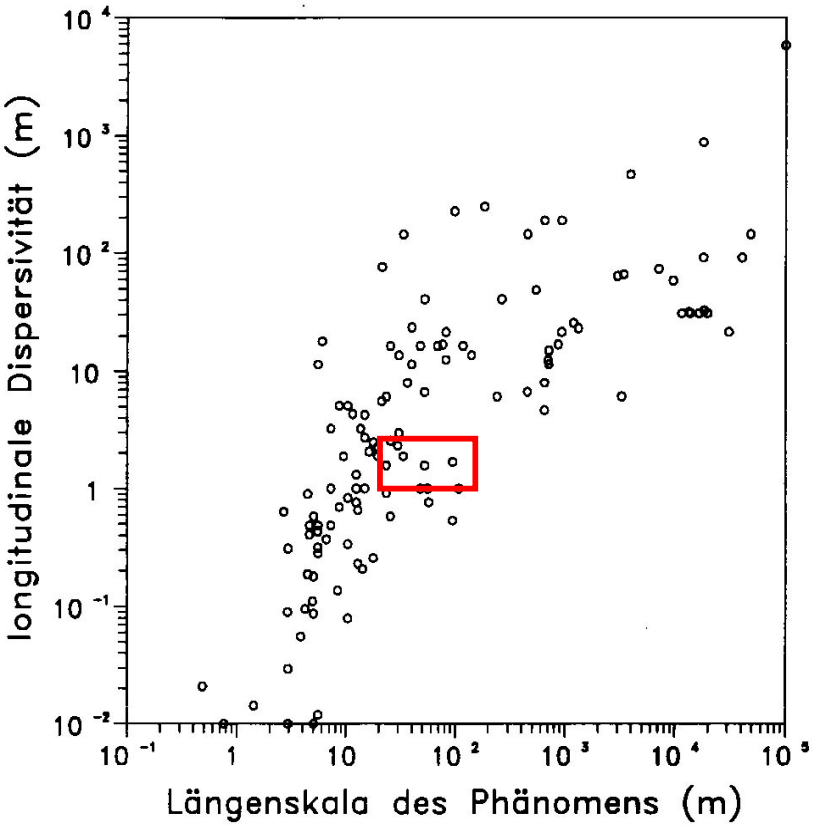


Figure 1: Dépendance de la valeur de la dispersivité en fonction de l'échelle d'observation

2 Largeur du panache pollué à la hauteur de SG19b

Les éléments suivants ont permis de définir la largeur du panache pollué à la hauteur de SG19b :

- Distance entre les zones de capture des essais de pompage en SG16 et en SG44 (**Figure 2**). Durant les essais de pompage dans ces deux forages, aucune pollution n'a été découverte, indiquant que le panache pollué de SG19b est plus étroit que la distance entre ces deux zones de capture qui est de 45 m. La largeur du panache contaminé passant par SG19, respectivement SG19b est donc inférieure à 45 m.

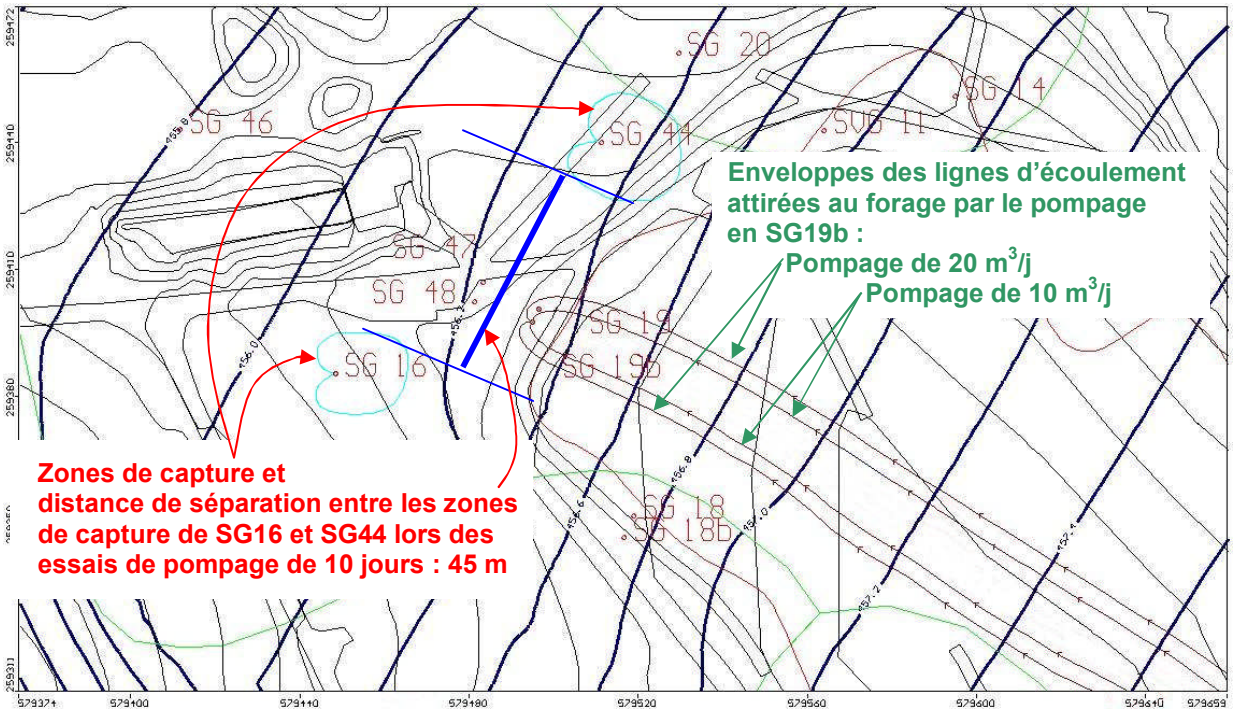


Figure 2: Zones de capture pour pompages à SG16, SG44 et SG19b

- Baisse des concentrations aux forages SG47 et SG48 : Lors du pompage de 10 m3/j en SG19b, entre le 22.11.01 et le 25.04.02, les concentrations en polluants dans ces deux forages n'ont pas décru de manière importante, indiquant que la largeur du panache au droit de SG19b était plus grande que la largeur de la zone de capture. Selon le modèle mathématique actuel, cette dernière était de l'ordre de 10 m (**Figure 2**). Juste après l'augmentation à 20 m3/j du débit de pompage en SG19b, le 25.04.02, la concentration en polluants a très nettement diminué en SG47 (rapide diminution) et en SG48 (diminution plus lente) pour atteindre des concentrations environ 10 fois inférieures aux concentrations durant le pompage à 10 m3/j. Ceci indique que la zone de capture relative au pompage de 20 m3/j

en SG19b, qui est de 18 m, sur la base de la modélisation d'octobre 2005 (**Figure 2**), permet de capter la presque totalité du panache contaminé. La largeur de ce dernier, à l'amont immédiat du forage SG19b, se situe donc entre la largeur des deux zones de capture, soit entre 10 et 18 m. Compte tenu de la lente diminution de la pollution à SG48, on peut affirmer que cette largeur se situe probablement entre 15 et 18 m.

3 Diffluence à l'aval de SG19b

La **Figure 3** indique la manière dont s'écoulent deux lignes d'écoulement partant à 9 m de part et d'autre du forage SG19b, sur la base du modèle mathématique actuel. Cette représentation des lignes d'écoulement par la technique du « particle tracking » ne tient pas compte des phénomènes de dispersion hydrodynamique dans le milieu. Elle permet donc de visualiser le phénomène d'écartement et de resserrement des lignes de courant induites uniquement par les différences de vitesses d'écoulement, la distribution des classes de perméabilité et le phénomène de diffluence. Arrivées à la hauteur de SG46, 115 m à l'aval de SG19b, ces lignes d'écoulement se trouvent séparées de 32.0 m et de seulement 19.0 m au droit de SG50, 200 m à l'aval de SG19b.

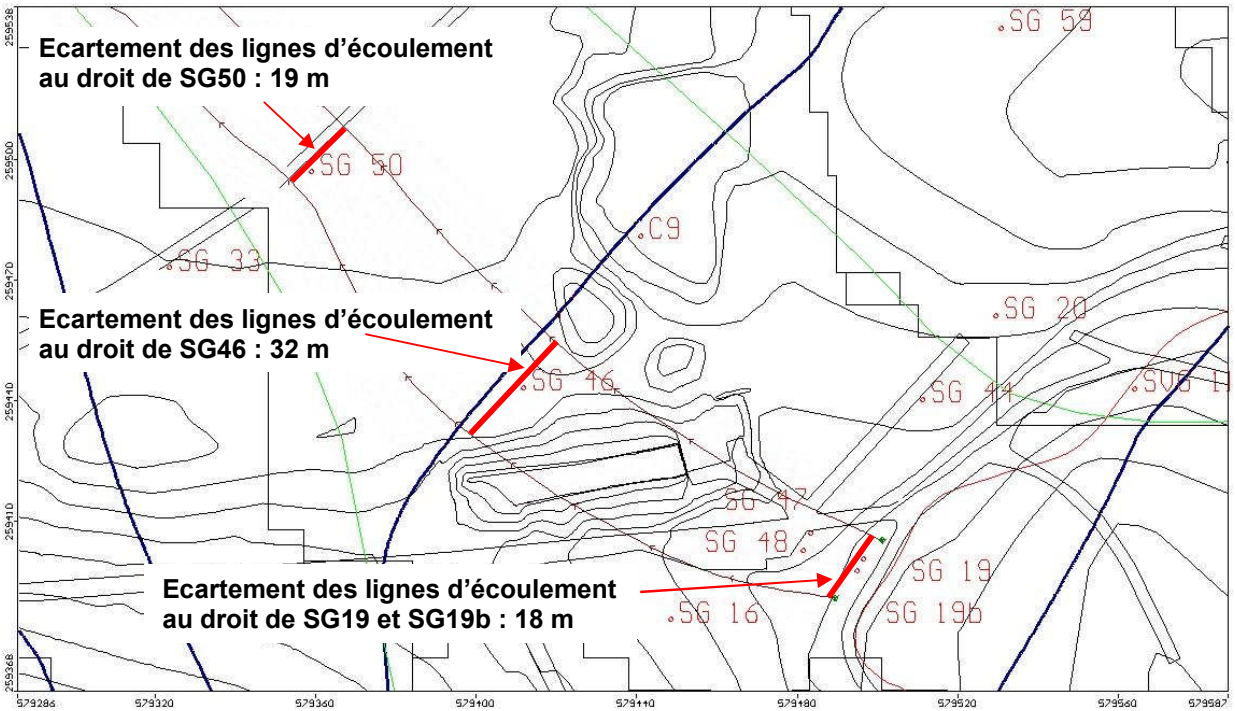


Figure 3: Lignes d'écoulement à l'aval de SG19b partant d'une largeur maximale (18 m) du panache au droit de ce forage.

Ce resserrement au droit de SG50 est dû à la distribution des champs de perméabilité du modèle mathématique. On constate donc que surtout entre SG19b et SG46, le phénomène de diffluence augmente nettement la largeur du panache pollué. Ce phénomène de diffluence doit être ajouté au phénomène de dispersion hydrodynamique pour expliquer la largeur du panache contaminé modélisé à la figure 16 du rapport [1].

4 Évaluation de la dispersion numérique lors des simulations à l'aide du logiciel MODFLOW

Une remarque faite par les experts de l'OEPN sur les résultats des simulations du transport dans le rapport [1], figures 16, 18 et 21, était que les panaches simulés par MODFLOW semblent présenter un élargissement supérieur à ce à quoi on s'attendrait avec les paramètres de dispersivité choisis (α_L = 2.0 m et α_T = 0.1 m), surtout α_T, relativement faibles. Afin d'évaluer la dispersivité intrinsèque induite par la routine de calcul de ce modèle, sur un maillage de différences finies de maximum 2.5 x 2.5 m, les simulations suivantes ont été réalisées :

- Simulations déterministes du transport à l'aide du logiciel MODFLOW avec des paramètres de dispersivité latérale et longitudinale nuls pour évaluer la dispersion numérique des résultats.
- Diverses simulations analytiques du panache à l'aide du modèle analytique SOLUTRANS[1], afin de quantifier la dispersion numérique induite par le modèle MODFLOW, lors de la simulation du transport de substances.

L'objectif global est de comparer les paramètres de dispersivité définis par la modélisation analytique du panache avec ceux déduits du modèle MODFLOW, afin de quantifier la dispersion numérique des résultats que ce dernier induit. Les données de base du modèle MODFLOW, utilisées pour la comparaison avec les simulations analytiques sont tirées de la **Figure 4**. La méthode de calcul du transport de substances utilisée lors de la modélisation MODFLOW est la méthode MOC (method of characteristics) réputée fournir des résultats pratiquement exempts de dispersion numérique [6].

Les données de base des simulations analytiques sont indiquées au Tableau 2.

[1] SOLUTRANS (Fitts Geosolutions, Scarborough, USA, 1999) est un programme de modélisation en 3 dimensions du transport en solution, basé sur les solutions analytiques publiées par [2] et [3]. Ce programme permet de calculer le transport en solution dans un milieu aquifère homogène en tenant compte de la dispersion, la retardation et la décroissance de concentration de premier ordre, dans un champ d'écoulement unidimensionnel et uniforme.

Tableau 2: Données de base pour la simulation analytique à l'aide du logiciel SOLUTRANS.

Paramètre	Donnée utilisée pour la simulation
Epaisseur de l'aquifère	3.5 m
Largeur de la source de contamination	3.0 m
Localisation de la source de contamination	35 m au SE de SG19b
Perméabilité	$2.2 \cdot 10^{-4}$ m/s
Gradient	0.56%
Vitesse de l'eau souterraine	0.7 m/jour
Flux de matière à la source de contamination	1.6 kg Somme HHV par an
Durée de la source de pollution	1'000 jours avant la situation modélisée
Dispersivité	variable testée par la modélisation
Diffusion	aucune diffusion modélisée, négligeable par rapport à la dispersivité
Retardation	aucune retardation modélisée
Dégradation	aucune dégradation modélisée

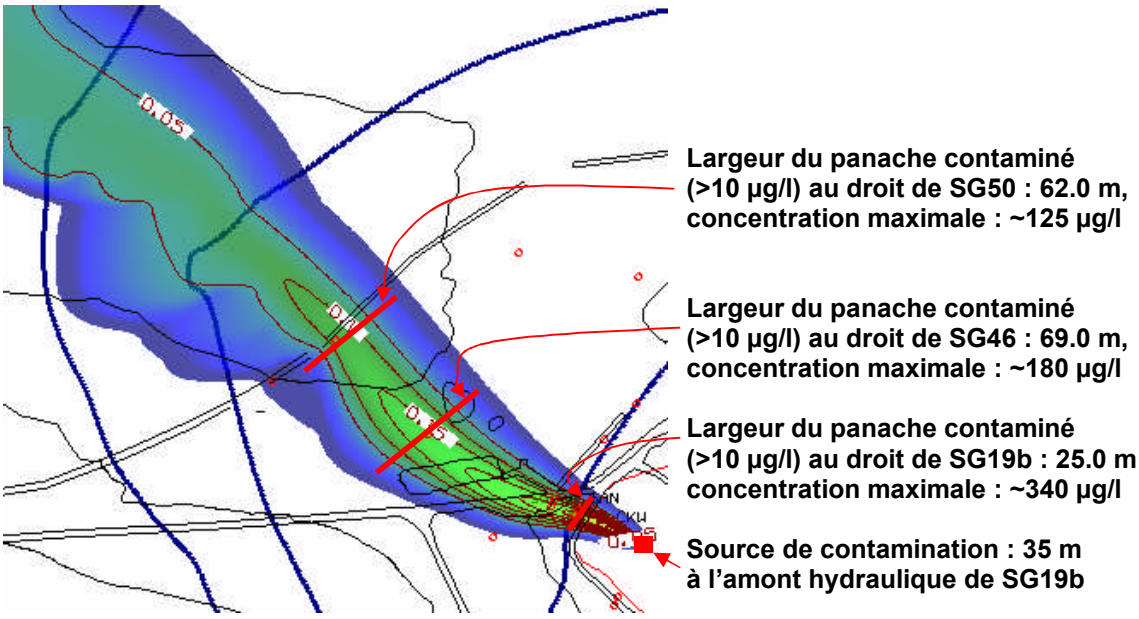


Figure 4: Panache SG19b simulé à l'aide du logiciel MODFLOW, 1000 jours après le début de la source de contamination (cf. figure 16 du rapport [1]).

4.1 Simulation MODFLOW 1

Cette simulation est présentée à la figure 16 et commentée au chapitre 3 du rapport [1]. Elle correspond au meilleur calage du modèle par rapport aux éléments connus du panache SG19. La **Figure 4** donne les caractéristiques du panache simulé après 1000 jours d'activation de la source de pollution, situation pour laquelle le panache se trouve plus ou moins en état d'équilibre (cf. informations au Tableau 6).

4.2 Simulation MODFLOW 2

La simulation de la **Figure 5a** correspond aux mêmes conditions que la simulation Modflow 1 (Tableau 2), à l'exception qu'on a imposé une valeur nulle à la dispersivité transversale. Elle permet d'évaluer la dispersivité numérique latérale du modèle. On constate qu'à de très faibles valeurs de α_T (entre 0 et 0.1 m), la forme du panache peut varier fortement (différence entre la **Figure 5a** et la **Figure 4**). De même, on constate que l'effet de diffluence décrit au § 3 est bien visible sur le premier tiers du panache.

A titre de comparaison, la **Figure 5b** présente les résultats d'une simulation où α_L = 0.0 m et α_T = 0.0 m. On constate par rapport à la **Figure 5a**, qu'à la suite d'une diminution très significative de la dispersivité longitudinale α_L (de 2.0 à 0.0 m), on n'observe plus qu'un faible rétrécissement du panache (cf. Tableau 3). Dans le modèle déterministe, une variation de la dispersivité longitudinale a un effet (dû à la dispersion numérique des résultats) sur la largeur du panache modélisée. Cet effet dépend probablement en partie de l'orientation du panache par rapport à l'orientation de la grille du modèle. Cette influence reste cependant négligeable.

La simulation MODFLOW 2 (**Figure 5a**) montre que l'on peut à l'aide du modèle déterministe MODFLOW et grâce au fait que la dispersion numérique des résultats est faible, simuler un panache beaucoup plus étroit que le panache réel de SG19. De ce fait et compte tenu des informations données dans le rapport [1], ce logiciel est adéquat pour la simulation de scénarios de pollution dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau.

Une comparaison de ces résultats avec la simulation analytique est faite au chapitre 5. (cf. Tableau 6).

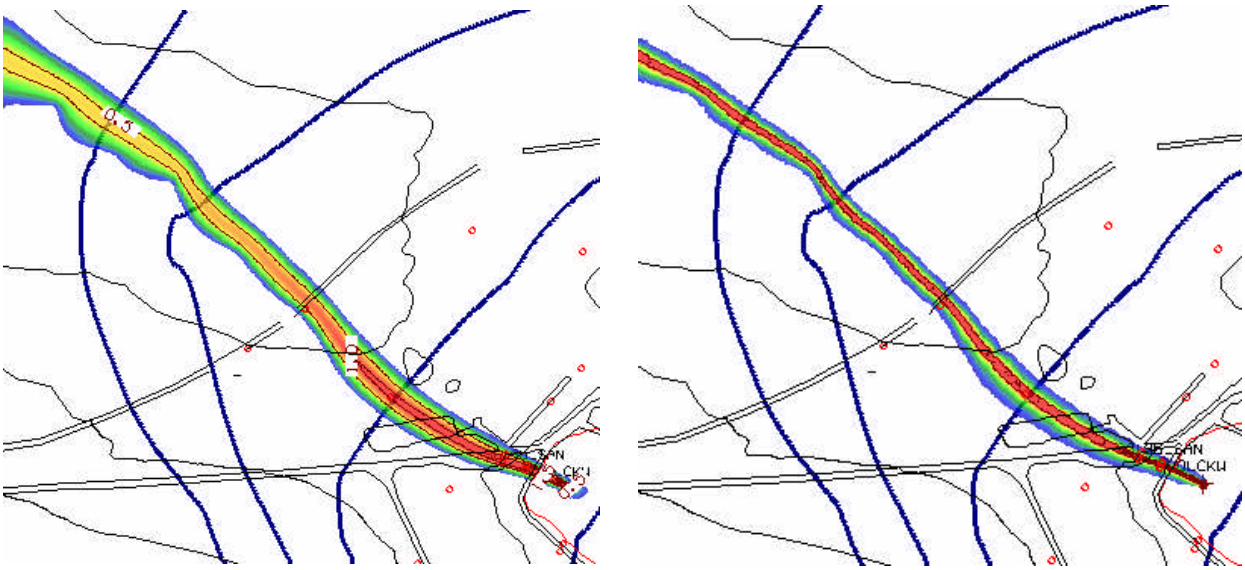


Figure 5: Simulation MODFLOW 2 : a) à gauche : Panache de la Figure 4 simulé pour α_L = 2.0 m et α_T = 0.0 m ; b) à droite : Panache de la Figure 4 simulé pour α_L = 0.0 m et α_T = 0.0 m.

Tableau 3: Données pour la simulation MODFLOW 2.

Paramètre	**Figure 5a)**	**Figure 5b)**
Dispersivité longitudinale α_L [m]	2.0	0.0
Dispersivité longitudinale α_T [m]	0.0	0.0
Largeur du panache contaminé à la source de pollution [m]	3.0	3.0
Largeur du panache (> 10 µg/l) au droit de SG19b [m]	9.2	7.2
Largeur du panache (> 10 µg/l) au droit de SG46 [m]	23.2	19.5
Largeur du panache (> 10 µg/l) au droit de SG50 [m]	17.6	12.0

4.3 Simulation SOLUTRANS 1

Pour cette simulation, les conditions de départ (Tableau 4) ont été choisies pour coïncider avec celles de la simulation MODFLOW 2 (**Figure 5a**, § 4.2).

Tableau 4: Données relatives à la simulation SOLUTRANS 1.

Paramètre	Donnée utilisée pour la simulation
Dispersivité longitudinale α_L [m]	2.0
Dispersivité transversale α_T [m]	à faire varier proche d'une valeur nulle
Largeur de la source de contamination [m]	3.0
Localisation de la source de contamination	35 m au SE de SG19b
Concentration initiale	1.6 kg HHV/an ou 2.98 mg/l

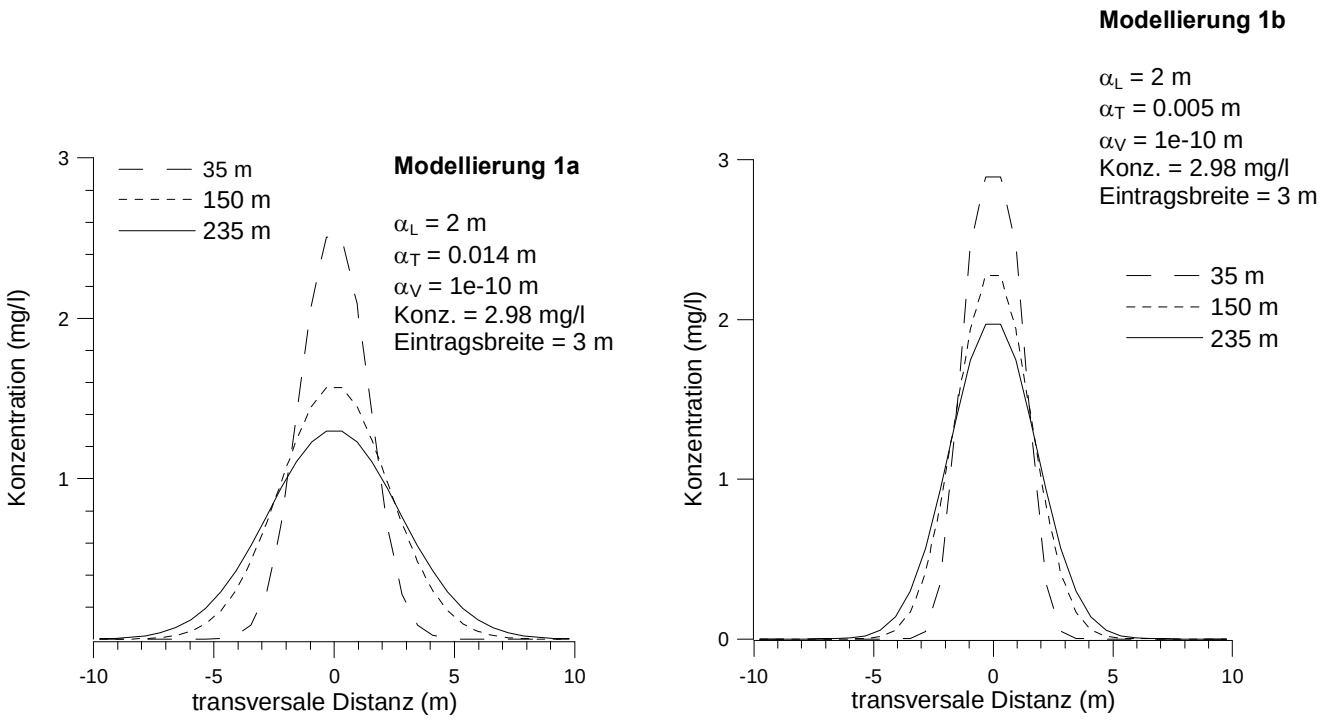


Figure 6: Simulation SOLUTRANS 1 a) à gauche : Simulation du panache de la Figure 5a ; b) à droite : Simulation du panache de la Figure 5b.

Comme pour les autres simulations, le résultat de la modélisation est calculé pour l'état du panache après 1000 jours d'activation de la source de pollution. Les distances 35, 150 et 235 m relatives aux profils de concentrations transversaux de la **Figure 6**, correspondent aux distances depuis la source de pollution présumée, jusqu'au droit des piézomètres SG19b, SG46 et SG50.

On constate qu'avec une dispersivité transversale très faible (α_T compris entre 0.005 et 0.014 m), on obtient des panaches relativement comparables à ceux de la simulation MODFLOW 2, effectuée avec $\alpha_T = 0$. Une comparaison de ces résultats est faite au chapitre 5 et au Tableau 6.

4.4 Simulation SOLUTRANS 2

Pour cette simulation, les conditions de départ (Tableau 5) ont été choisies pour coïncider avec celles de la simulation du panache SG19b, indiquées au § 3.2, tableau 6 du rapport [1]. Le résultat est donné à la **Figure 7**, sous forme de profils de concentration transversaux au panache, aux mêmes distances de 35, 150 et 235 m.

Tableau 5: Données relatives à la simulation SOLUTRANS 2.

Paramètre	Donnée utilisée pour la simulation
Dispersivité longitudinale α_L	2 m
Dispersivité transversale α_T	0.1 m
Largeur de la source de contamination	3 m
Localisation de la source de contamination	35 m au SE de SG19b
Concentration initiale	1.6 kg HHV/an ou 2.98 mg/l

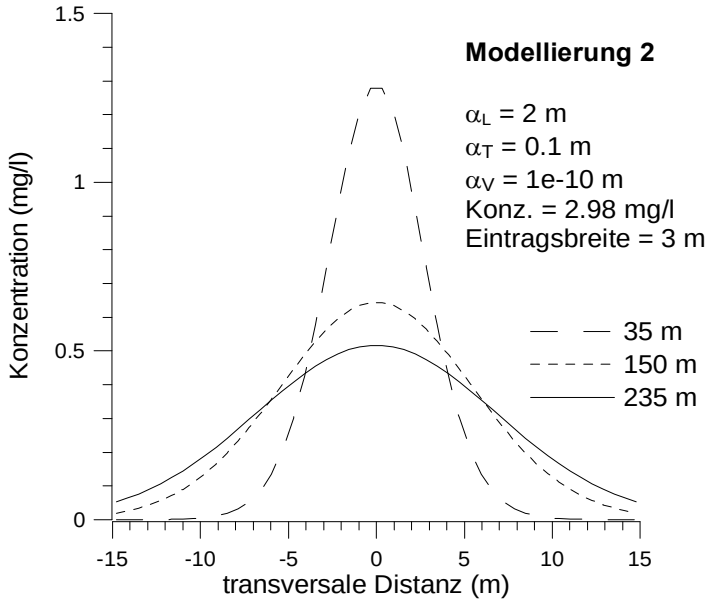


Figure 7: Simulation SOLUTRANS 2 : Profils de concentration au travers du panache après 1000 jours de transport depuis la source.

Le Tableau 6 au chap. 5, synthétise ces résultats. Avec les conditions de départ indiquées, le panache simulé reste sur toute sa longueur beaucoup plus étroit et présente des concentrations maximales plus élevées que le panache simulé à l'aide du logiciel MODFLOW.

4.5 Simulation SOLUTRANS 3

Pour cette simulation, des conditions de départ analogues à celles de la simulation SOLUTRANS 2 ont été choisies.

Depuis cette situation, la valeur de la dispersivité transversale α_T a été adaptée au mieux, de manière à créer un panache similaire à celui de la simulation MODFLOW 1. Le résultat est calculé pour l'état du panache après 1000 jours d'activation de la source de pollution (**Figure 8**). Le Tableau 6 synthétise ces résultats : Avec les conditions indiquées et une valeur de α_T = 0.28 m, le panache simulé approche pour le mieux la forme du panache de la simulation MODFLOW 1.

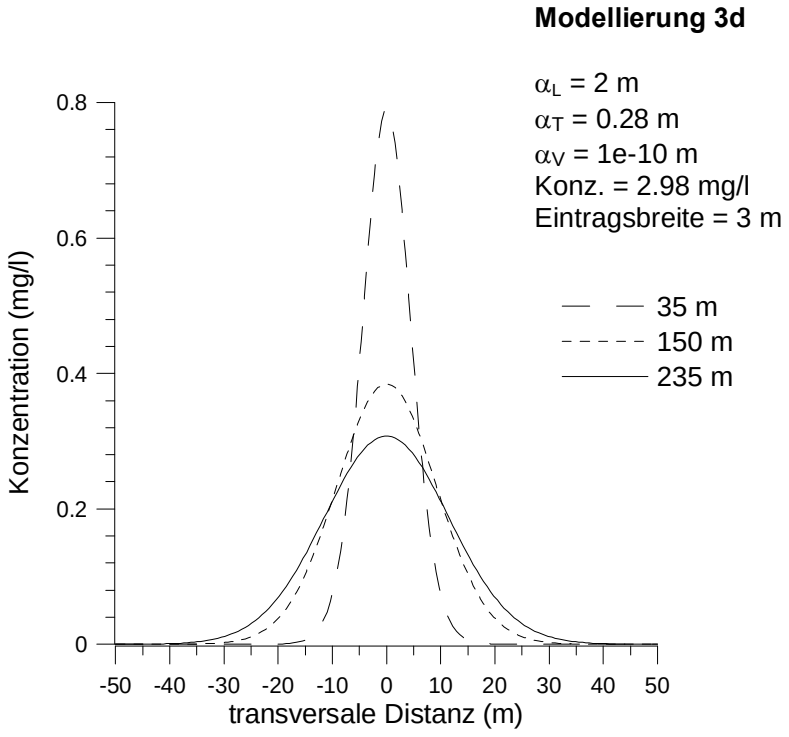


Figure 8: Simulation SOLUTRANS 3 : Profils de concentration au travers du panache.

5 Comparaison des résultats des deux modélisations

Les principaux résultats des simulations déterministes MODFLOW 1 et 2 et analytiques SOLUTRANS 1, 2 et 3, décrites au chapitre 4, sont données au Tableau 6. La simulation MODFLOW 1 doit être comparée aux simulations SOLUTRANS 2 et 3 (cf. § 5.1) et la simulation MODFLOW 2 doit être comparée à la simulation SOLUTRANS 1 (cf. § 5.2).

Tableau 6: Comparaison des résultats des simulations SOLUTRANS et MODFLOW.

Simulation	**MODFLOW**		**SOLUTRANS**		
Paramètre	**1**	**2**	**1**	**2**	**3**
Dispersivité longitudinale α_L [m]	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Dispersivité transversale α_T [m]	0.1	0.0	0.014	0.1	0.28
Grandeur (largeur) de la source de pollution [m]	3 x 3	3 x 3	3	3	3
Distance de la source jusqu'à SG19b [m]	35	35	35	35	35
Largeur du panache (>10 µg/l) au droit de SG19b [m]	25	9.2	9.0	20	30
Largeur du panache (>50 µg/l) au droit de SG19b [m]	18	8.4	8.0	14.2	22
Concentration maximale au droit de SG19b [µg/l]	340	1500	2580	1300	800
Largeur du panache (>10 µg/l) au droit de SG46 [m]	69 (55)*	23.2 (19.3)*	14.5	32	52
Largeur du panache (>50 µg/l) au droit de SG46 [m]	46 (32)*	19.4 (15.5)*	12.4	25	37
Concentration maximale au droit de SG46 [µg/l]	180	1150	1580	650	380
Largeur du panache à SG46, due à la diffluence [m]	14	3.9	0	0	0
Largeur du panache (>10 µg/l) au droit de SG50 [m]	62 (61)*	17.6 (16.9)*	17.6	44	62
Largeur du panache (>50 µg/l) au droit de SG50 [m]	32 (31)*	16.0 (15.3)*	14.5	30	45
Concentration maximale au droit de SG50 [µg/l]	125	930	1280	520	300
Largeur du panache à SG50, due à la diffluence [m]	1	0.7	0	0	0

* : Entre parenthèses : valeurs attribuées uniquement à la dispersivité sur la base des informations déduites de la Figure 3 et de la Figure 4.

5.1 MODFLOW 1 et SOLUTRANS 2 + 3

On observe les éléments suivants :

- En utilisant dans le modèle analytique (SOLUTRANS 2) des coefficients de dispersivité analogues à ceux du modèle déterministe, on obtient un panache systématiquement plus étroit et plus concentré que dans MODFLOW 1. Si l'on corrige la largeur du panache dans MODFLOW 1 de tout effet de diffluence, l'écart entre les largeurs de panaches calculées se resserre toutefois. La différence restante provient en grande partie de la dispersion numérique des résultats dans ce dernier, dépendant du maillage du modèle déterministe et de la méthode de calcul.

- Pour obtenir à l'aide de la solution analytique un panache analogue à celui de la simulation déterministe, il faut augmenter la dispersivité transversale jusqu'à 0.28 m dans la simulation analytique (SOLUTRANS 3), valeur 2.8 fois plus élevée que pour la simulation déterministe.
- Ainsi, en comparant ces deux simulations, on déduit une dispersivité numérique transversale des résultats de 0.28 – 0.1 = 0.18 m.
- Les différences entre les concentrations maximales calculées pour chaque distance depuis la source de pollution, environ deux fois plus élevées dans la solution analytique (SOLUTRANS 3) que dans la solution déterministe, sont explicable par le fait que dans cette dernière on a une discrétisation complète du terrain incluant des variations d'épaisseur et de perméabilité de l'aquifère que n'inclut pas la modélisation analytique. Ces différences peuvent aussi pour une certaine part, dépendre des approches mathématiques très différentes des deux types de modélisation.

De ces comparaisons, on peut tirer les enseignements suivants :

- Compte tenu d'une certaine adaptation de la valeur de la dispersivité transversale, la comparaison entre les résultats des deux types de simulation est satisfaisante.
- Pour caler le modèle déterministe MODFLOW (résolution des équations par la méthode MOC), la valeur de la dispersivité transversale peut être adaptée selon les recommandations de Kinzelbach et Rausch [4], créant un décalage par rapport à la valeur à utiliser dans une simulation analytique, mais sans influencer négativement la qualité de la modélisation.

5.2 MODFLOW 2 et SOLUTRANS 1

On observe les éléments suivants :

- MODFLOW (avec la méthode de résolution des calculs MOC) permet de simuler des panaches très étroits démontrant ainsi la faible dispersion numérique des résultats.
- Pour le cas modélisé, la dispersion numérique du logiciel Modflow est comprise entre 0.014 et 0.005 m, que l'on prenne en compte l'effet transversal de la dispersivité longitudinale dans MODFLOW ou non. Cette valeur se situe entre 5 et 14% de la dispersivité latérale (0.1 m) de la simulation MODFLOW 1.

De ces comparaisons, on peut tirer les enseignements suivants :

- Les concentrations maximales déduites des simulations SOLUTRANS 1 et MODFLOW 2 sont très largement plus élevées que ce qui a été observé dans les forages SG19, SG19b, SG47 et SG48, au centre du panache pollué (cf. chapitre 3, figures 13 à 15 du rapport [1]). De ce fait, l'éventualité d'avoir un panache très étroit et très concentré dans le secteur de SG19b, n'est pas réaliste. En effet la presque totalité du panache est actuellement captée par le pompage en SG19b, indiquant que la source de pollution produit environ 1.6 kg de HHV par an. C'est cette quantité qui a été utilisée comme source de pollution dans les modèles. Elle doit donc être dispersée dans le milieu avec un étalement du panache pollué, pour que les concentrations aux divers points d'observation ne dépassent pas les concentrations décrites au chapitre 3 du rapport [1].
- Compte tenu de l'incertitude sur l'extrapolation des données chimiques entre chaque point de mesure sur le terrain, l'influence de la dispersion numérique induite par la routine de calcul MOC de Modflow peut être négligée, respectivement compensée selon les recommandations de Kinzelbach et Rausch [4].
- Les constatations ci-dessus ont pour conséquence que tout type de scénario de pollution de l'aquifère des cailloutis du Sundgau peut être modélisé à l'aide du logiciel MODFLOW.

5.3 Conclusions

Le principal résultat de la simulation MODFLOW 2 (**Figure 5a**) est que l'on peut à l'aide du modèle déterministe MODFLOW et grâce au fait que la dispersion numérique des résultats est faible, simuler un panache beaucoup plus étroit que le panache réel de SG19. De ce fait et compte tenu des informations données dans le rapport [1], ce logiciel est adéquat pour la simulation de scénarios de pollution dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau.

Par ailleurs, les simulations indiquent que l'éventualité d'avoir un panache très étroit et très concentré dans le secteur de SG19b, n'est pas réaliste.

Dans la simulation déterministe Modflow (résolution des équations à l'aide de la méthode MOC), de faibles variations de la valeur de dispersivité transversale occasionnent une grande variation de la largeur et de l'ouverture du panache simulé. Une variation significative de la dispersivité longitudinale a aussi un effet sur la largeur du panache simulé, effet qui reste cependant négligeable. En effet, par rapport aux

observations faites aux § 5.1 et 5.2, on constate qu'il n'y a pas de linéarité concernant la différence de dispersivité transversale entre les simulations déterministes et analytiques faites pour α_T = 0.0 m et α_T = 0.1 m. Pour les premières, la dispersion numérique transversale égale 0.014 m et pour les deuxièmes, elle égale 0.18 m. De ce fait, le calage des fonctions de transport sur un panache existant, en l'occurrence le panache SG19, revêt une importance primordiale pour l'extrapolation du modèle à d'autres secteurs de l'aquifère, afin de simuler divers scénarios de contamination et d'assainissement. Le calage décrit au chapitre 3 du rapport [1] est satisfaisant. Il permet, tout en restant dans des conditions hydrogéologiques analogues et en gardant les mêmes paramètres de dispersivité, de représenter ailleurs divers scénarios de contamination, respectivement d'assainissement de l'aquifère.

6 Éléments pour de nouveaux essais de pompage

A la date de rédaction de cette note complémentaire, un essai de pompage en pompant simultanément dans les 5 forages d'observation / intervention du scénario 2 présenté au chap. 5 du rapport [1], est en cours. Les objectifs de cet essai de pompage qui devrait durer 15 jours sont les suivants :

- Tester en vraie grandeur si le matériel et les installations à disposition actuellement (installations électriques, matériel, systèmes de contrôle et d'évacuation des eaux, etc.) sont adéquates pour la réalisation d'un pompage simultané de moyenne à longue durée dans plusieurs forages ;
- Obtenir des informations sur les interactions entre forages en période de pompage simultané, sur les débits maximaux qu'il est possible de pomper dans l'aquifère durant de telles périodes ;
- Obtenir les informations hydrauliques nécessaires pour affiner la calibration du modèle mathématique, à savoir entre autres :
    - le débit de l'aquifère sous la décharge permettant d'affiner les valeurs attribuées aux diverses classes de perméabilité,
    - les valeurs des rabattements induits aux forages situés dans le rayon d'action de ces pompages,

Le scénario 2 a été choisi car, sur la base des simulations réalisée dans [1], il permettrait déjà, au cours d'un pompage maximal aux divers forages, de capter l'ensemble des lignes d'écoulement passant sous la décharge.

7 Références

[1] CSD Ingénieurs et Géologues SA (2005) : Décharge industrielle de Bonfol (DIB). Modélisation mathématique des écoulements souterrains dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau (secteur de la DIB). Rapport du 31.10.05 pour bci Betriebs-AG, Bâle, 55 pp, 35 fig, 7 tab, 4 ann.

[2] Liej, F.J., Skaggs, T.H. & van Genuchten, M.T. (1991) : Analytical solutions for solute transport in three-dimensional semi-infinite porous media. Water Resources Research, v 27(10), 2719-2733.

[3] Liej, F.J., Toride, N., & van Genuchten, M.T. (1993) : Journal of Hydrology, v. 151, 193-228

[4] Kinzelbach, W., Rausch, R. (1995) : Grundwassermodellierung – Eine Einführung mit Übungen. Bornträger, 283 pp.

[5] Holzbecher, E. (1996) : Modellierung dynamischer Prozesse in der Hydrologie – Grundwasser und ungesättigte Zone ; Eine Einführung – Springer Verrlag, 337 S.

[6] Waterloo hydrogeologic, Inc., Waterloo, Ontario, Canada (1992 – 2005) : Visual Modflow – User's Manual, 311 pp.

CSD Ingénieurs et Géologues SA

Joseph Thierrin Bernhard Matter

Collaborateurs chargés de l'étude :

Irina Przybylski

Joseph Thierrin

Porrentruy, le 3 mars 2006
Réf. JU5155-106

Betriebs-AG

Assainissement définitif de la décharge industrielle de Bonfol

Compléments selon exigences de la prise de position OEPN du 08.09.04

2. Géologie et hydrogéologie

2.5 Modélisation des écoulements

Annexe 2.5.3

C'S'D' Ingénieurs et Géologues SA

Ingénieurs
Géologues
Spécialistes de l'environnement
Rue de la Chaumont 13, CP 134
2900 Porrentruy 2

Téléphone: +41 (0)32-466 58 58
Fax: +41 (0)32-466 57 21
E-mail: porrentruy@csd.ch
Internet: www.csd.ch

Betriebs-AG

Décharge industrielle de Bonfol (DIB)

Modélisation mathématique des écoulements souterrains dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau (secteur de la DIB)

Adaptation du modèle mathématique suite à l'essai de pompage multiple de février et mars 2006

19 mai 2006

C'S'D' Ingénieurs et Géologues SA

Ingénieurs
Géologues
Spécialistes de l'environnement
Rue de la Chaumont 13, CP 134
2900 Porrentruy 2

Téléphone: +41 (0)32-466 58 58
Fax: +41 (0)32-466 57 21
E-mail: porrentruy@csd.ch
Internet: www.csd.ch

Table des matières

1 Introduction 1

2 Essai de pompage multiple de février et mars 2006 2

2.1 Déroulement de l'essai 2

2.2 Monitoring et correction des niveaux piézométriques 2

2.3 Interprétation des données de l'essai 7

2.4 Suivi analytique du pompage simultané 10

3 Nouvelle calibration du modèle mathématique 11

3.1 Calage par ajustement de la perméabilité 11

3.2 Résultats du calage 14

3.3 Surface piézométrique 16

4 Scénarios de pompage des eaux passant sous la DIB 18

4.1 Scénario 1 : Pompage dans 4 forages existants 19

4.2 Scénario 2 : Pompage dans 5 forages existants 20

4.3 Scénario 3 : Pompage dans 6 forages existants 21

5 Conclusions et recommandations 22

6 Références 24

Liste des annexes

Annexe 1 Analyses effectuées au cours du pompage simultané de février – mars 2006 aux forages SG13, SG16, SG19b, SG20 et SG44 25

Liste des tableaux

Tableau 1: Données générales de l'essai de pompage. 2

Tableau 2: Interprétation de l'essai sur les 4 premiers jours de pompage (méthode de Jacob). 9

Tableau 3: Classes de perméabilité du modèle mathématique après calage..... 11

Tableau 4: Modifications de la perméabilité aux forages pour tenir compte des effets de puits. 12

Tableau 5: Amélioration de la simulation de l'essai de pompage par le nouveau calage du modèle. 15

Tableau 6: Données principales des scénarios de pompage maximal simulés dans 4, 5, respectivement 6 forages au front de la décharge. 18

Tableau 7: Résultats du bilan des entrées et sorties après calibration pour chaque scénario. 18

Liste des figures

Figure 1: Cotes altimétriques brutes du niveau d'eau aux puits de pompage 3

Figure 2: Cotes altimétriques corrigées du niveau d'eau aux puits de pompage 3

Figure 3: Cotes altimétriques brutes du niveau d'eau aux piézomètres d'observation 4

Figure 4: Cotes altimétriques corrigées du niveau d'eau aux piézomètres d'observation 5

Figure 5: Cotes altimétriques brutes et corrigées du niveau d'eau au piézomètre SG36 6

Figure 6: Cotes altimétriques brutes et corrigées du niveau d'eau au piézomètre SG50 6

Figure 7: Niveau observé durant l'essai au forage d'observation SG48 8

Figure 8: Niveau observé durant l'essai de pompage multiple au forage SG19b 8

Figure 9: Niveau observé durant l'essai de pompage multiple au forage SG44 9

Figure 10: Classes de perméabilité du modèle du 31.10.2005 (Figure 7 de [1]) 13

Figure 11: Classes de perméabilité du modèle calibré sur la base de l'essai de pompage de février et mars 2006 ; les valeurs de perméabilité sont listées au Tableau 3. 13

Figure 12: Résultats de la calibration du modèle sur la base des niveaux piézométriques, de gauche à droite et de haut en bas, les forages SG13, SG16, SG19b, SG20 et SG44. 14

Figure 13: Résultats de la calibration du modèle sur la base des niveaux piézométriques aux forages SG15, SG18b, SG19, SG46, SG48, SG50, SG53 et SG59 15

Figure 14: Surface piézométrique calculée avant le début de l'essai de pompage, le 17 février 2006. 16

Figure 15: Surface piézométrique calculée avant la fin de l'essai de pompage, le 6 mars 2006 17

Figure 16: Scénario 1 de pompage simultané maximum aux forages SG13, SG19b, SG44 et SG20. 19

Figure 17: Scénario 2 de pompage simultané maximum aux forages SG13, SG16, SG19b, SG44 et SG20 20

Figure 18: Scénario 3 de pompage simultané maximum aux forages SG13, SG16, SG19b, SG20, SG44 et SG15. 21

1 Introduction

En complément au rapport CSD du 31 octobre 2005, intitulé «Décharge industrielle de Bonfol (DIB) - Modélisation mathématique des écoulements souterrains dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau (secteur de la DIB) » [1], la présente note apporte les éléments nouveaux concernant le calage du modèle mathématique sur la base de l'essai de pompage multiple dans 5 forages simultanément, réalisé en février et mars 2006.

L'objectif poursuivi par l'étude est d'améliorer la fiabilité du modèle mathématique surtout du point de vue du diagnostic hydraulique quantitatif. Le rapport du 31 octobre 2005 [1] décrit bien les niveaux piézométriques et les directions d'écoulement ainsi que les paramètres liés au transport de substances ; la note complémentaire du 3 mars 2006 [2] apporte des explications concernant la dispersivité hydraulique et la dispersion mathématique des résultats, importantes à connaître pour la modélisation du transport de substances. L'intégration des résultats de l'essai de pompage de février et mars 2006 dans la calibration du modèle mathématique (présente note) permet d'apporter des précisions quant aux débits qu'il est possible ou nécessaire de pomper en cas d'intervention hydraulique dans l'aquifère.

Les principaux éléments présentés dans ce rapport sont les suivants :

a) description de l'essai de pompage et des résultats,

b) résultats de la nouvelle calibration du modèle en tenant compte des résultats de cet essai de pompage multiple.

2 Essai de pompage multiple de février et mars 2006

2.1 Déroulement de l'essai

L'essai de pompage a débuté le 20 février 2006 pour se terminer 14 jours plus tard, le 6 mars 2006. Il s'est fait simultanément dans 5 forages, selon le scénario 2b décrit au chapitre 5 du rapport [1]. Un seul palier de pompage avec des débits plausibles, n'aboutissant pas à un assèchement des forages et permettant une mesure en continu des niveaux tout au long de l'essai a été effectué. On note quelques différences dans les débits effectivement pompés (Tableau 1) par rapport aux débits indiqués au tableau 7 du rapport [1]. Elles découlent de la difficulté de régler précisément le débit de pompage avec les vannes à disposition. Ces débits sont cependant restés constants au cours du temps. Par ailleurs, en SG19b, la pompe actuellement en fonction ne permet pas de pomper plus de 24.5 m^3/j, alors que la valeur préconisée était de 30 m^3/j.

Tableau 1: Données générales de l'essai de pompage.

Forage	SG13	SG16	SG19b	SG20	SG44
Début du pompage	20.02.2006 10:12	20.02.2006 10:51	20.02.2006 10:32	20.02.2006 11:32	20.02.2006 11:12
Fin du pompage	06.03.2006 11:47	06.03.2006 11:57	06.03.2006 12:16	06.03.2006 12:37	06.03.2006 12:27
Durée pompage [jours]	14.07	14.05	14.07	14.05	14.05
Débit moyen [l/min]	8	10	17	16	17
Débit moyen [m^3/jour]	11.5	14.4	24.5	23.0	24.5
Volume total pompé [m^3]	162	202	344	324	344
Rabattement final approx [cm]	190	100	40	60	170

Les rabattements observés ont fortement varié d'un forage à l'autre. Le plus faible rabattement observé (40 cm dans SG19b) apparaît logique étant donné qu'avant l'essai, 20 m^3/j étaient déjà pompés dans ce forage, en permanence depuis le 25 avril 2002. En SG20, le pompage de 23 m^3/j a occasionné un rabattement total de 60 cm alors qu'en SG13, il se montait à 190 cm pour un débit de 11.5 m^3/j. Ces différences reflètent la variabilité de la transmissivité hydraulique au sein de l'aquifère.

2.2 Monitoring et correction des niveaux piézométriques

Une mesure en continu des niveaux piézométriques a été réalisée dans les 5 forages servant aux pompages ainsi que dans 8 autres piézomètres, à savoir SG15, SG18b, SG19, SG46, SG48, SG49-1, SG53 et SG59.

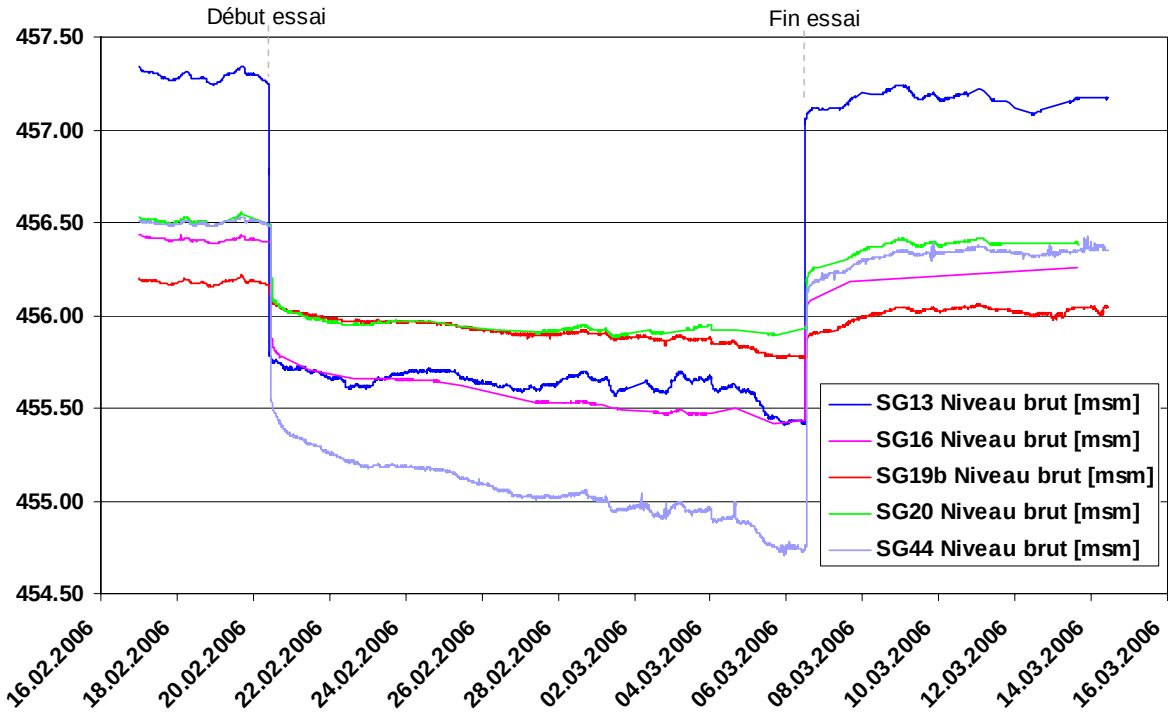


Figure 1: Cotes altimétriques brutes du niveau d'eau aux puits de pompage

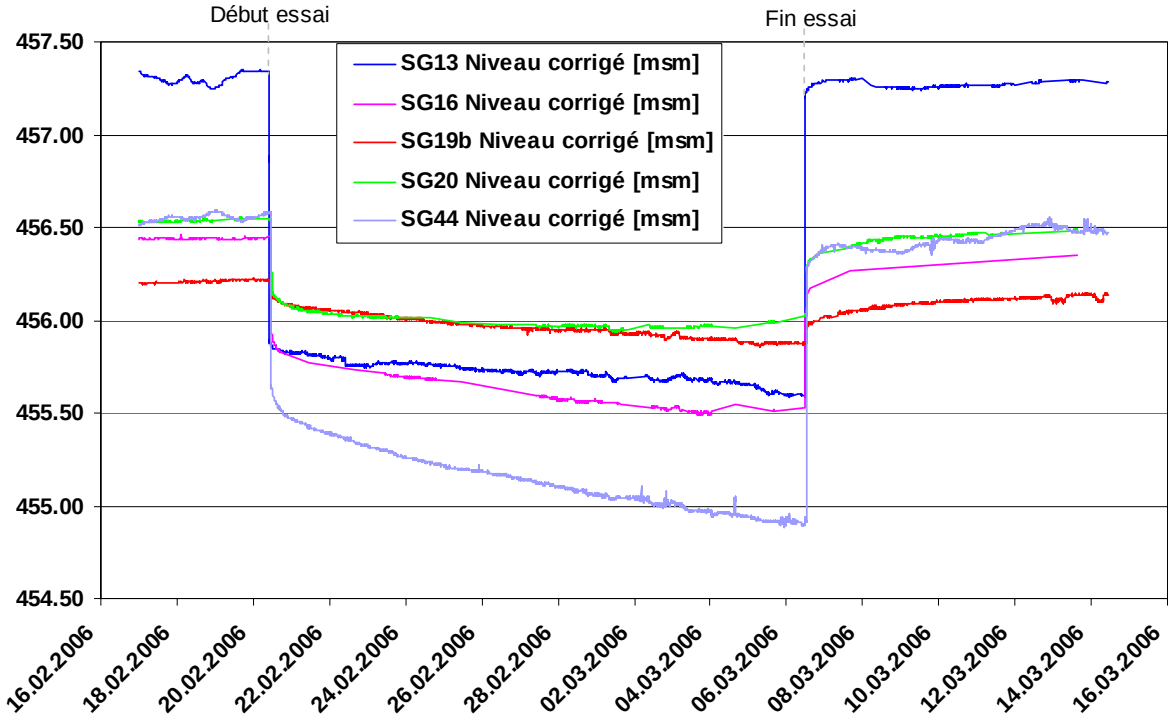


Figure 2: Cotes altimétriques corrigées du niveau d'eau aux puits de pompage

La mesure en continu dans SG46 n'a pas fourni de résultats interprétables du fait d'une défectuosité technique de l'appareil de mesure ; cependant, les mesures jour-

nalières à la sonde de niveau ont permis d'interpréter l'essai aussi à ce point. De même, dans le forage SG49-1, des apports d'eau rapides depuis la surface lors des pluies intenses et de la fonte des neiges, ont perturbé les valeurs mesurées, si bien que la série de mesures n'est pas interprétable dans le cadre de l'essai de pompage. Les autres mesures ont été influencées par les variations de pression atmosphériques, l'aquifère étant semi-confiné à confiné. De ce fait, une correction des mesures en fonction de l'effet de la pression sur un forage non influencé, s'est avérée nécessaire. Elle a été réalisée selon la méthode présentée au paragraphe 4.5.5 du rapport [3] de synthèse hydrogéologique 2002. Les variations piézométriques utilisées pour cette correction sont celles observées dans les forages SG36 (Figure 5) et SG50 (Figure 6).

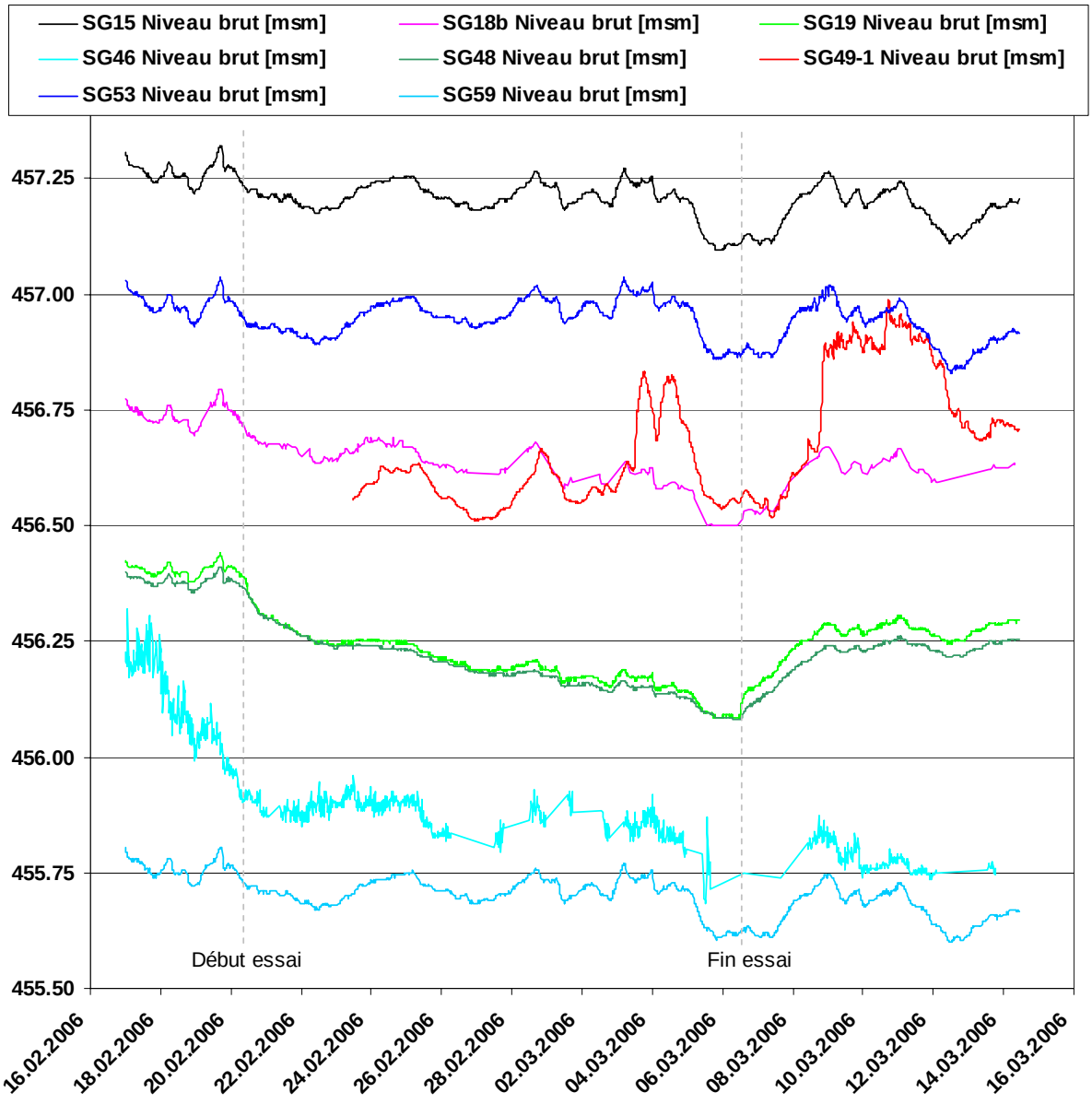


Figure 3: Cotes altimétriques brutes du niveau d'eau aux piézomètres d'observation

La Figure 1 et la Figure 3 présentent les mesures de cote altimétrique brutes dans les puits de pompage, respectivement aux piézomètres d'observation. La Figure 2 et la Figure 4 présentent les mesures corrigées à ces mêmes points d'eau.

La Figure 2 indique que les pompages se sont déroulés de manière continue, sans modification notable des débits de pompage. A la fin de l'essai, la plupart des niveaux n'étaient pas encore stabilisés et poursuivaient leur descente.

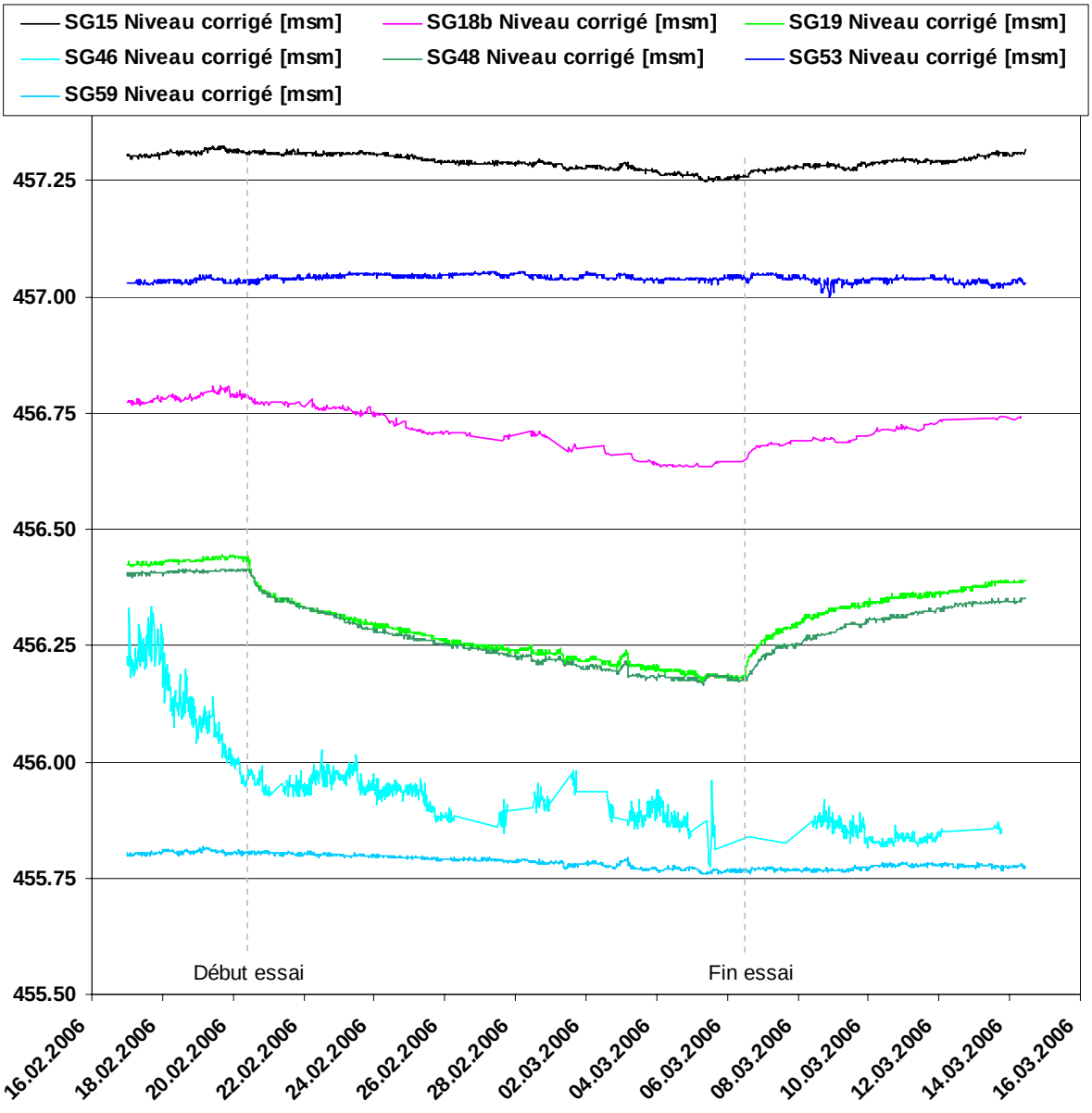


Figure 4: Cotes altimétriques corrigées du niveau d'eau aux piézomètres d'observation

Les fluctuations de niveaux brutes indiquées à la Figure 3 montrent qu'à l'exception de SG49-1, les niveaux ont uniquement réagi aux fluctuations de pression atmosphériques et non aux fortes précipitations qui ont eu lieu durant l'essai (70 mm de préci-

pitations tombés entre le 3 et le 5 mars sous forme de pluie au début, puis sous forme de neige avec un tapis neigeux de 60 cm d'épaisseur qui a entièrement fondu entre le 8 et le 10 mars, période durant laquelle 31 mm de pluie sont tombés).

La Figure 4 indique que les pompages ont eu un effet très net sur les niveaux aux piézomètres SG19 et SG48 situés près de SG19b ; ils ont également provoqué un faible rabattement aux forages SG15 (6 cm), SG18b (18 cm), SG46 (10 cm, mesures journalières à la sonde piézométrique) et SG59 (env. 6 cm avec un retard d'environ 3 jours). Sans correction de ces niveaux concernant les effets de la pression atmosphérique, il ne serait pas possible d'en interpréter les données (cf. Figure 3).

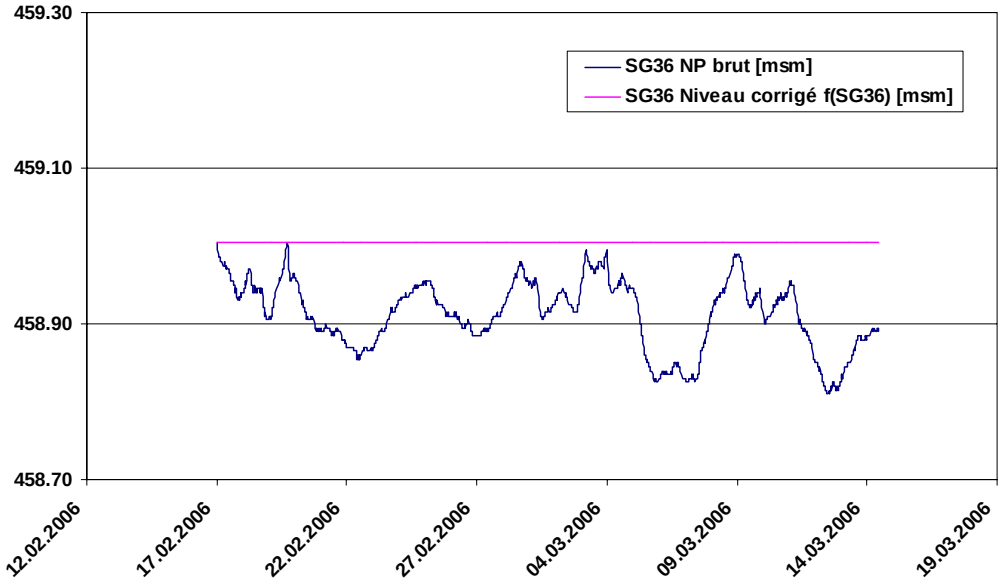


Figure 5: Cotes altimétriques brutes et corrigées du niveau d'eau au piézomètre SG36

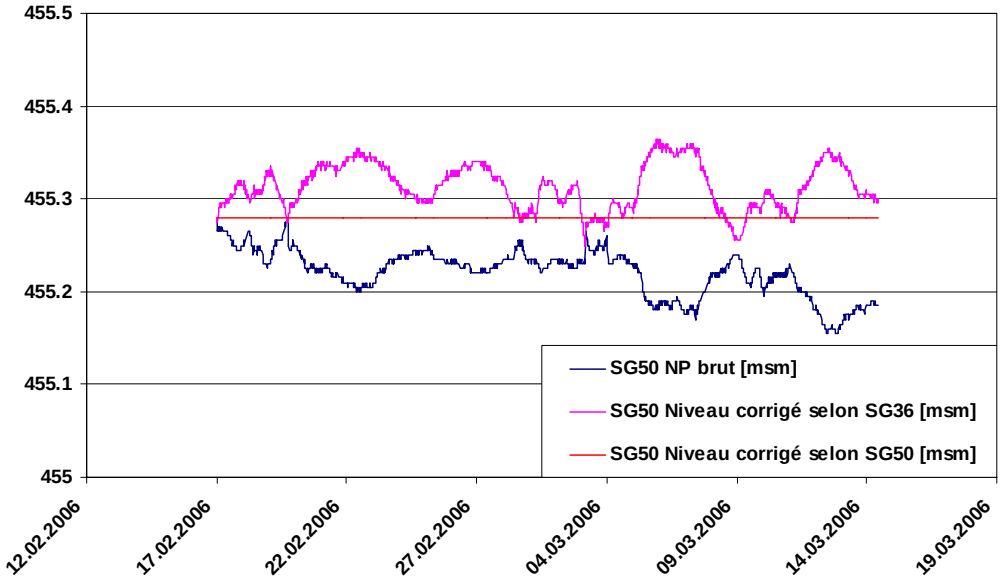


Figure 6: Cotes altimétriques brutes et corrigées du niveau d'eau au piézomètre SG50

On remarque sur la Figure 6 que la fluctuation à SG50 est plus faible que celle à SG36 durant l'essai. Pour les forages SG16, SG19, SG19b, SG20, SG46 et SG48, situés dans le secteur NW de la décharge, la correction a été faite sur la base du niveau au forage SG50. Par contre, pour les forages SG13 et SG53 situés au Sud et à l'Est du réseau d'observation, elle a été réalisée sur la base du niveau au forage SG36. Sur les forages SG18b, SG15, SG44 et SG59, la correction optimale a été trouvée à l'aide d'une proportion variable d'influence de type SG36 (Figure 5) et de type SG50 (Figure 6).

La Figure 5 et la Figure 6 montrent la manière de corriger les niveaux observés dans un forage en fonction de ceux de SG36, respectivement de SG50. Il se fait simplement en soustrayant toute fluctuation depuis le début des mesures. Si l'on corrige les niveaux d'un forage par lui-même, on obtient une ligne droite (Figure 5). Si par contre, les fluctuations de niveau engendrées par les variations de pression atmosphériques sont moins importantes dans le forage à corriger que dans le forage de référence, le niveau corrigé présente de nouvelles fluctuations inverses à celles observées dans les données brutes. C'est le cas si l'on corrige les niveaux de SG50 avec ceux de SG36 dont le niveau réagit avec une amplitude beaucoup plus élevée aux variations de pression atmosphérique (Figure 6). De ce fait, les niveaux de SG18b, SG15, SG44 et SG59 ont été corrigés en utilisant une courbe de correction intermédiaire entre celle de SG36 et celle de SG50.

2.3 Interprétation des données de l'essai

L'essai simultané a permis d'obtenir une nouvelle estimation de la perméabilité dans le secteur des forages par l'interprétation des données de rabattement sur les premiers jours de l'essai, avant que les pompages dans les autres forages n'aient une influence sur le forage considéré.

La Figure 7 montre l'évolution temporelle du niveau d'eau dans le forage SG48 (forage d'observation seulement), avec en abscisse logarithmique, le temps en secondes démarrant au moment où le pompage en SG19b a débuté. Ce forage se situe à 16 m de SG19b, à 39 m de SG16 et à 45 m de SG44. Le début de la baisse du niveau piézométrique a lieu après 4'800 secondes ou 1 heure et demie. La deuxième rupture de pente sur ce graphique, située après 210'000 secondes ou 2.4 jours, coïncide avec l'arrivée de l'influence piézométrique exercée par les pompages en SG16 et en SG44. Cette information renseigne que si une rupture de pente de la courbe de descente ou rabattement piézométrique survient après 2 à 3 jours dans le graphique analogue à celui de la Figure 7 mais dessiné pour l'un des 5 puits de pompage (cf.

exemples à la Figure 8 et à la Figure 9), on observe alors l'influence du rabattement causé par le pompage dans un forage voisin.

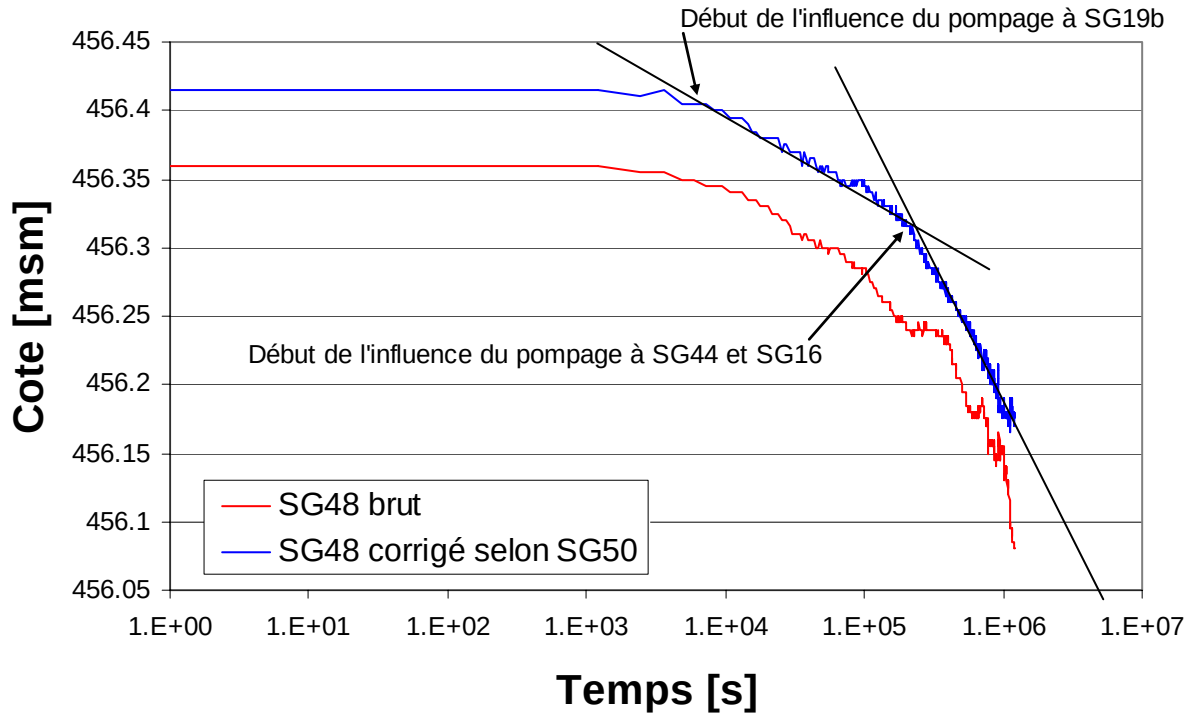


Figure 7: Niveau observé durant l'essai au forage d'observation SG48

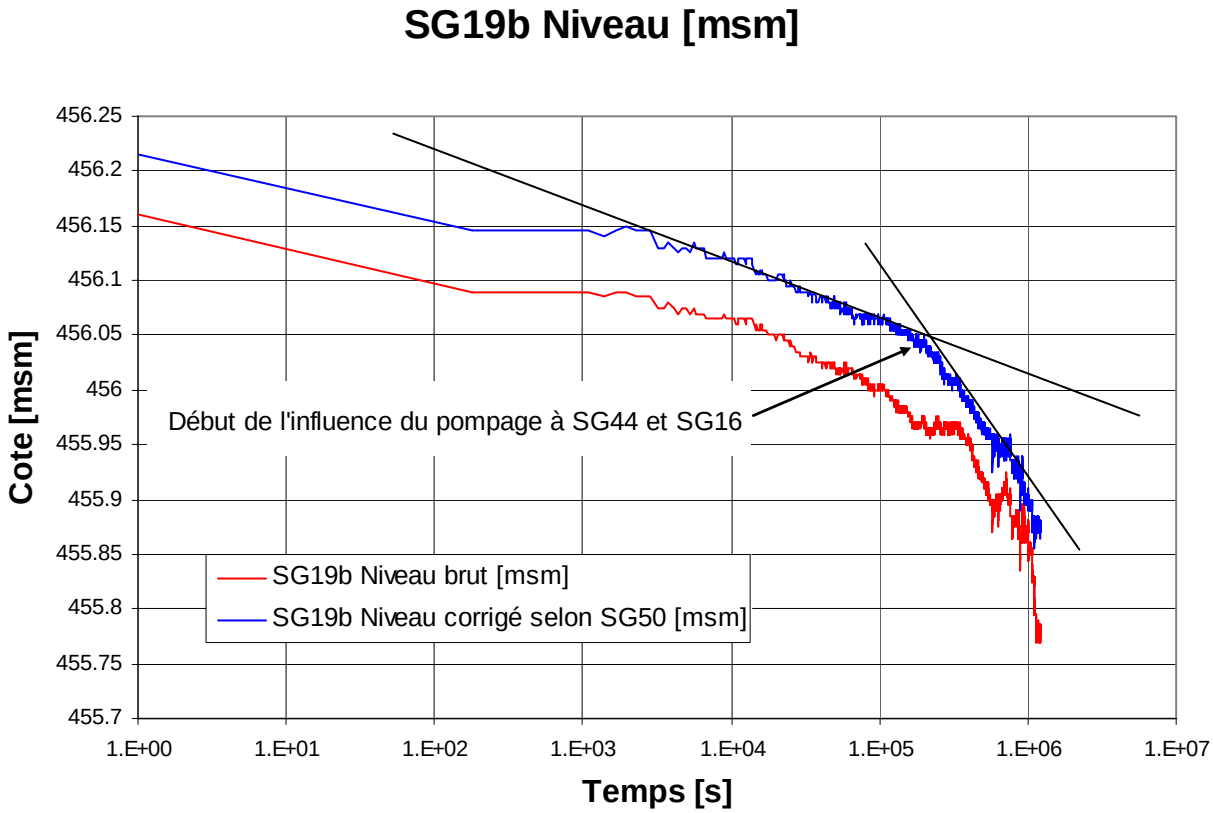


Figure 8: Niveau observé durant l'essai de pompage multiple au forage SG19b

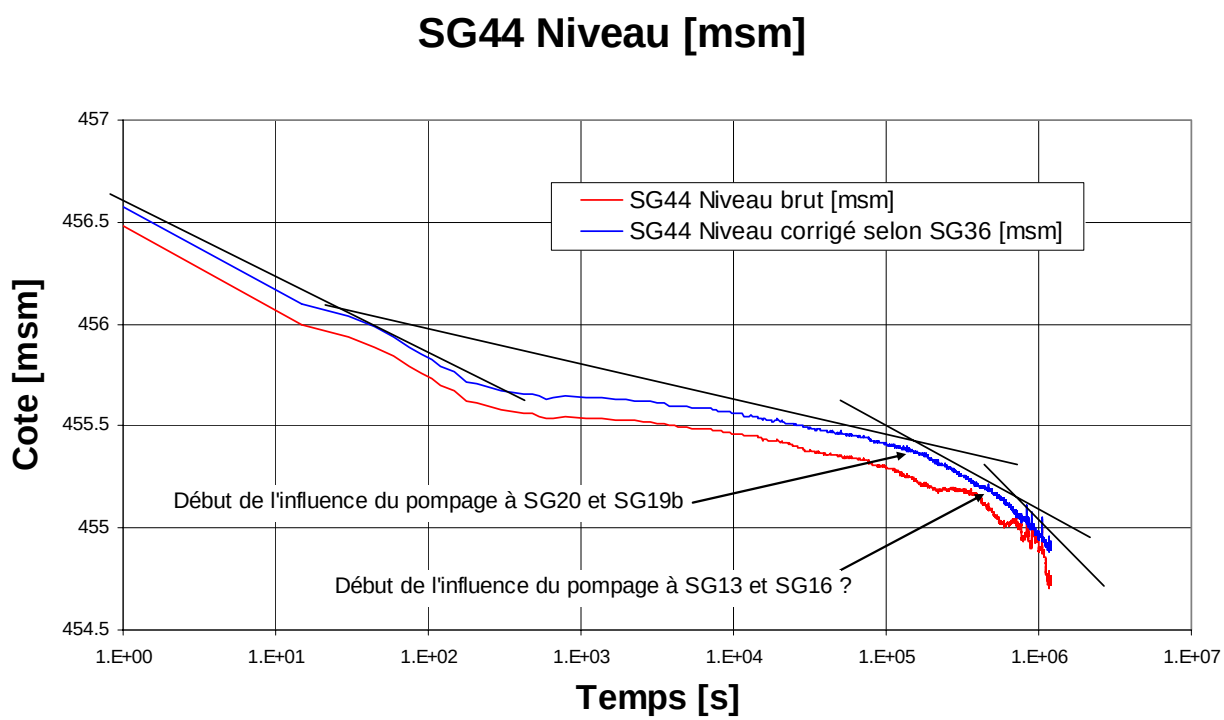


Figure 9: Niveau observé durant l'essai de pompage multiple au forage SG44

L'interprétation de la courbe de rabattement a donc eu lieu sur la partie de cette courbe encore non influencée par les pompages voisins.

Le Tableau 2 résume les résultats de cette interprétation faite à l'aide de la méthode de Jacob sur les 2 premiers jours de pompage durant lesquels, il n'y a probablement pas encore d'influence réciproque marquée des pompages sur les autres puits. Une certaine marge d'erreur est observée pour un même puits, qui dépend entre autres de la géologie autour du puits, d'effets divers dans le puits lui-même, de la stabilité des débits pompés et de l'influence barométrique sur les niveaux piézométriques. Du fait de ces causes d'erreur, une définition claire des coefficients d'emmagasinement par la méthode de Jacob présente trop d'incertitude. Les fourchettes de perméabilité définies (Tableau 2) correspondent aux valeurs définies après calibration du modèle (Tableau 3 et Tableau 4).

Tableau 2: Interprétation de l'essai sur les 4 premiers jours de pompage (méthode de Jacob).

Forage	Perméabilité [m/s]	Remarques
SG13	Valeur moyenne 1.2×10^{-5}, extrêmes 5×10^{-6} à 8×10^{-5}	Réaction variable du puits en fonction du temps ou variation du débit pompé
SG16	1.0×10^{-4}, puis 3.3×10^{-5}	
SG19b	1.4×10^{-4}	Interprétation sensible (pompage continu)
SG44	3.5×10^{-5} à 1.1×10^{-4}	Courbe de rabattement perturbée (Figure 9)
SG20	de 1.0×10^{-4} à 3.5×10^{-4}	Stabilisation du rabattement après 8 jours

2.4 Suivi analytique du pompage simultané

Le pompage simultané a fait l'objet d'un suivi analytique avec prélèvements d'eau aux 5 forages où avaient lieu les pompages, les 1er, 5ème, 9ème et 14ème jours de l'essai. Ont été analysés : les bromures, les éthers et les HHV. Mis à part le forage SG19b, où les concentrations habituelles en contaminants ont été mesurées (cf. Figure 13 du rapport [1]), les analyses effectuées tout au long du pompage simultané n'ont pas mis en évidence la présence de contaminants à des concentrations supérieures au seuil de quantification (voir résultats détaillés en Annexe 1).

3 Nouvelle calibration du modèle mathématique

Les données présentées au chapitre 2 ont permis une nouvelle calibration du modèle décrit en [1]. Pour cette calibration, seule la perméabilité du milieu a été modifiée, les conditions aux limites, l'alimentation, les autres paramètres de l'aquifère, ainsi que la géométrie restant identiques aux données décrites en [1]. La calibration sur la base de l'essai de pompage multiple s'est déroulée en mode hydraulique transitoire.

3.1 Calage par ajustement de la perméabilité

Étant donnée la difficulté de définir précisément les valeurs de coefficient d'emmagasinement (cf. chap. 2.3), des valeurs constantes pour l'ensemble du modèle, pour la porosité efficace = 15%, la porosité totale =30%, et les coefficients d'emmagasinement Ss (specific storage) = 1 x 10^{-5} [m^{-1}] en milieu saturé et Sy (specific yield) = 0.2 en milieu non saturé, ont été conservées. La calibration sur la base de l'essai de pompage multiple, a ainsi été réalisée uniquement par ajustement de la perméabilité.

Dans un premier temps, la valeur des classes de perméabilité initiales (Figure 7 du rapport [1], reproduite à la Figure 10) a été modifiée pour obtenir le meilleur calage possible avec les données de rabattement, tout en restant dans les fourchettes de perméabilité plausibles décrites en [3] et déduites des essais de pompages réalisés entre 2000 et 2004. Dans ce contexte, après plusieurs runs de calibration, les valeurs initiales ont été maintenues (Tableau 3).

Tableau 3: Classes de perméabilité du modèle mathématique après calage.

Classe de perméabilité	Couleur de la classe de perméabilité	Perméabilité dans le modèle du 31.10.2005 [m/s]	Perméabilité dans le modèle calibré sur l'essai de pompage de février et mars 2006 [m/s]
1	Gris clair	5.0 x 10^{-6}	5.0 x 10^{-6}
2	Rouge foncé	1.1 x 10^{-5}	1.1 x 10^{-5}
3	Lila	5.0 x 10^{-5}	5.0 x 10^{-5}
4	Bleu foncé	6.0 x 10^{-5}	6.0 x 10^{-5}
5	Gris foncé	8.0 x 10^{-5}	surface modifiée 8.0 x 10^{-5}
6	Bleu moyen	1.0 x 10^{-4}	1.0 x 10^{-4}
7	Bleu clair (chenal perméable)	2.2 x 10^{-4}	2.2 x 10^{-4}
8	Rouge clair	- - -	nouvelle classe 2.0 x 10^{-5}

Dans un deuxième temps, de manière à affiner le calage, une nouvelle classe de perméabilité (classe 8, Tableau 3) a été ajoutée dans le secteur du forage SG13 car

la perméabilité dans ce secteur a été revue à la baisse. Pour de mêmes raisons, la géométrie de la classe de perméabilité 5 a été modifiée près de SG16. Ces opérations ont eu pour effet d'affiner le diagnostic du modèle décrit dans le rapport [1].

Dans un troisième temps, aux forages où ostensiblement, lors de la simulation de l'essai de pompage multiple, les rabattements calculés en mode hydraulique transitoire étaient trop importants ou trop faibles par rapport aux valeurs mesurées, quand bien même les rabattements calculés aux piézomètres de contrôle ainsi que la surface piézométrique simulée coïncidaient avec les données mesurées, un ajustement local de la perméabilité sur le pourtour des forages a été effectué. Ceci provient du fait que l'interprétation d'un essai de pompage ne donne pas un résultat unique : Le rapport [3] indique pour chaque essai de pompage effectué entre 2000 et 2002, une fourchette de perméabilités déduites de diverses méthodes d'interprétation. Il indique aussi une perméabilité réaliste du milieu déduite des méthodes qui intègrent le rabattement dans d'autres forages d'observation et non pas des méthodes qui se basent uniquement sur le rabattement observé à l'intérieur du puits de pompage (comme par exemple la méthode de Jacob mentionnée plus haut). Ainsi, les classes de perméabilités indiquées au Tableau 3 ont été définies surtout sur la base de ces valeurs réalistes de perméabilité. Le rabattement dans le puits de pompage peut être influencé par divers effets locaux autour du puits (perméabilité perturbée dans et autour du massif filtrant et de la crépine, etc.) qu'on appelle effets de puits qui le plus souvent ont un effet négatif sur le rabattement pour un même débit pompé, mais qui peuvent également avoir un effet positif, par exemple s'il se crée une auréole de matériel délavé et perméable autour du puits. Afin de compenser ces effets de puits, la perméabilité locale sur une couronne de 20 cm autour de certains forages, a été adaptée de manière à simuler au mieux les rabattements observés lors de l'essai de pompage multiple. A SG19b et SG44, une nette diminution de la perméabilité locale a été nécessaire pour reproduire les rabattements importants observés au cours de l'essai, tandis qu'à SG20, la perméabilité locale a été augmentée (Tableau 4).

Tableau 4: Modifications de la perméabilité aux forages pour tenir compte des effets de puits.

Forage	**Classe de perméabilité dans le secteur du forage [m/s]**	**Perméabilité imposée à l'enveloppe du forage pour corriger l'effet de puits [m/s]**
SG13	2.0×10^{-5}	2.0×10^{-5}
SG16	8.0×10^{-5}	6.0×10^{-5}
SG19b	2.2×10^{-4}	6.0×10^{-5}
SG44	2.2×10^{-4}	1.5×10^{-5}
SG20	1.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}

La carte des perméabilités définitives est donnée à la Figure 11. Les classes de perméabilité du Tableau 3 ont été définies.

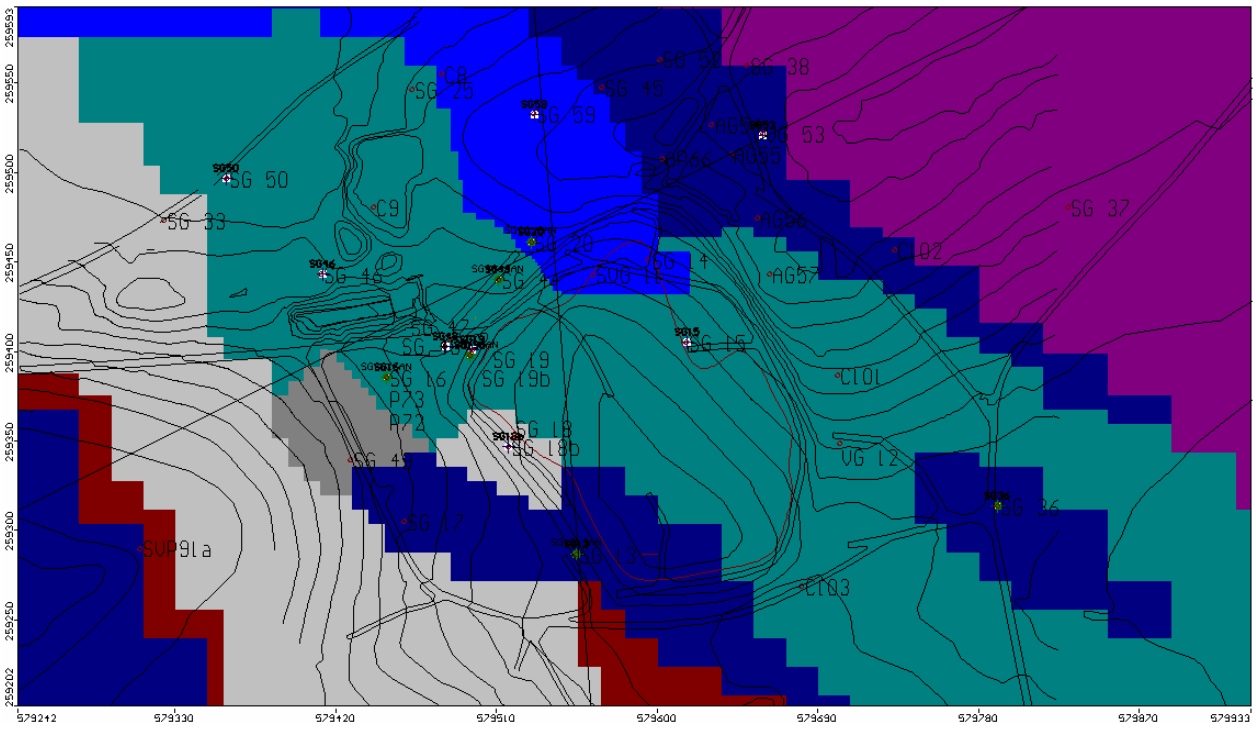


Figure 10: Classes de perméabilité du modèle du 31.10.2005 (Figure 7 de [1])

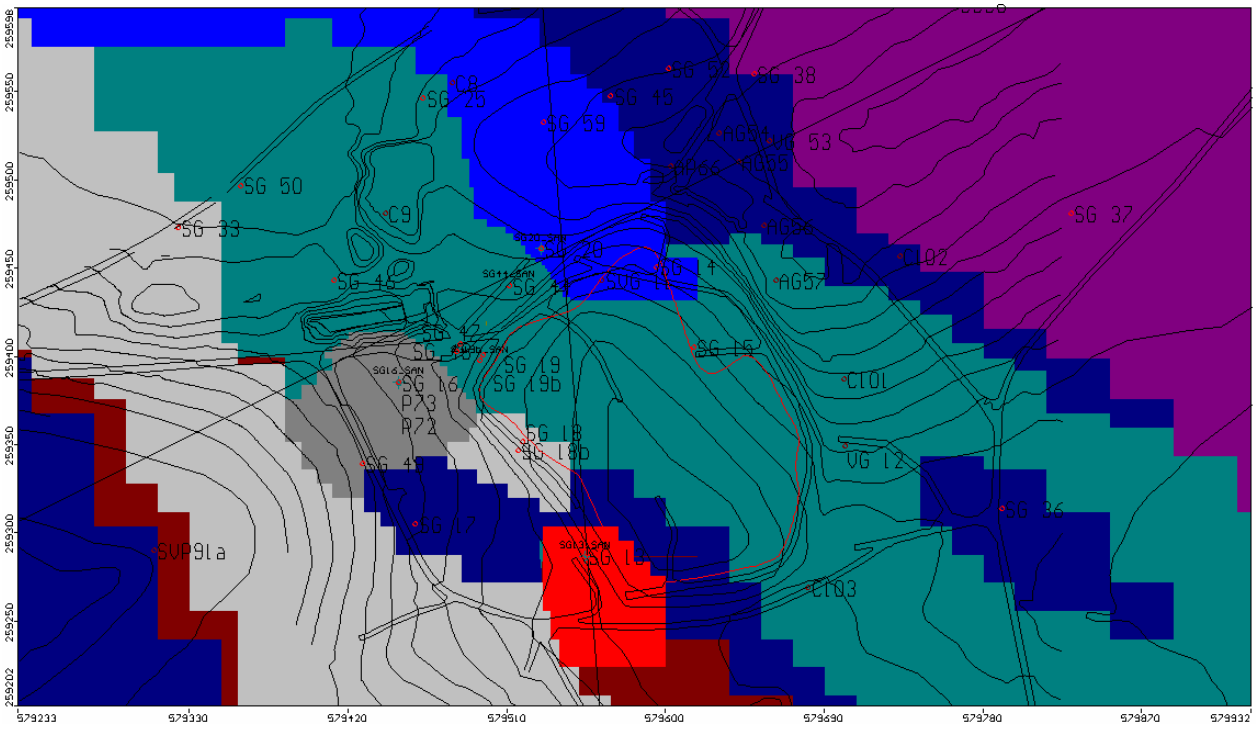


Figure 11: Classes de perméabilité du modèle calibré sur la base de l'essai de pompage de février et mars 2006 ; les valeurs de perméabilité sont listées au Tableau 3.

3.2 Résultats du calage

Sur la base des ajustements du modèle décrits au § 3.1, la Figure 12 donne les résultats de comparaison entre les niveaux calculés et les niveaux mesurés dans les forages où ont eu lieu les pompages. Les valeurs absolues des rabattements calculés et mesurés correspondent bien. On observe un petit décalage entre les niveaux calculés et les niveaux mesurés qui provient du calage global du modèle indiqué à la Figure 9 du rapport [1].

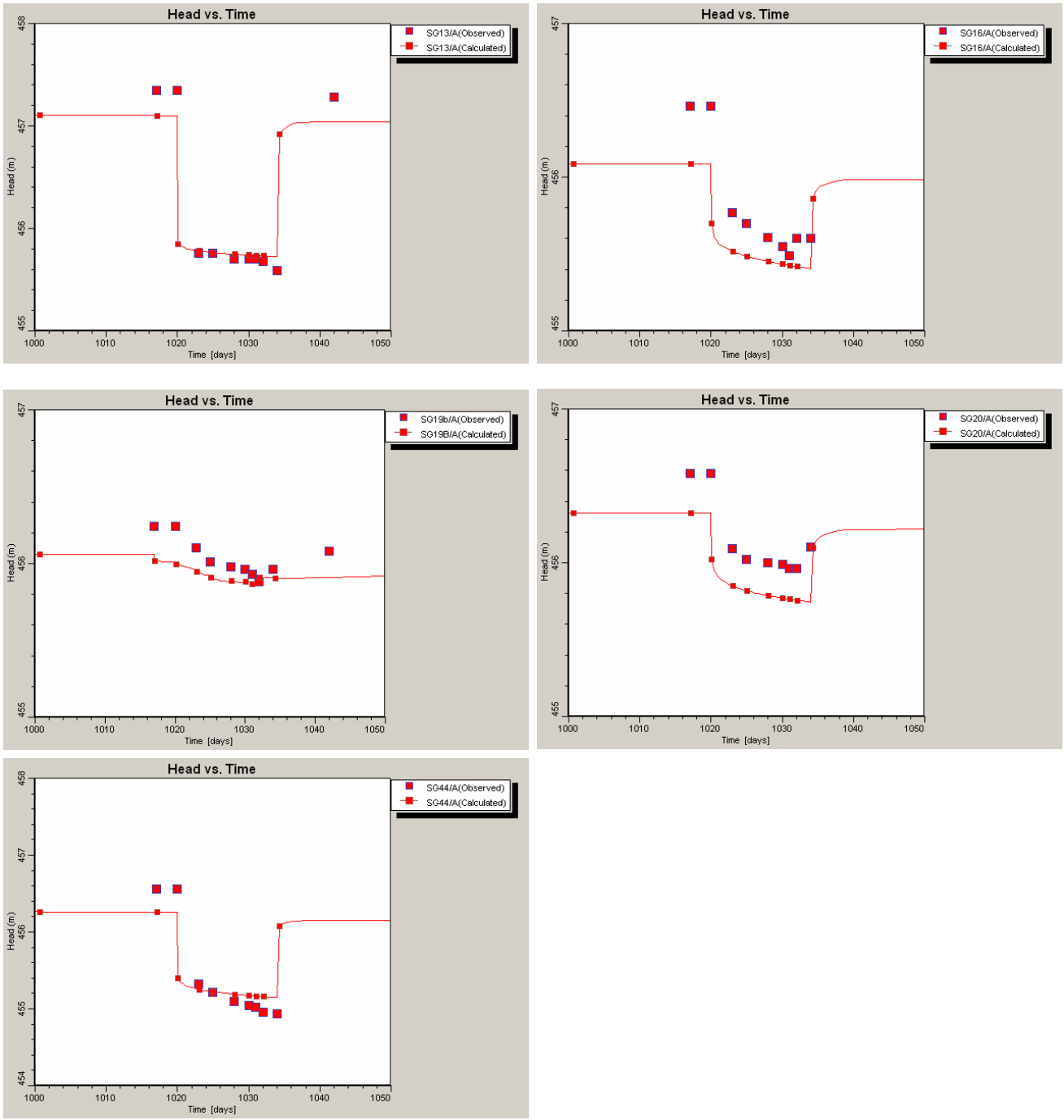


Figure 12: Résultats de la calibration du modèle sur la base des niveaux piézométriques, de gauche à droite et de haut en bas, les forages SG13, SG16, SG19b, SG20 et SG44.

Le Tableau 5 donne la différence entre le rabattement total mesuré in situ et le rabattement total calculé par le modèle à la fin de l'essai de pompage multiple de février – mars 2006, pour le modèle avant (modèle du 31.10.2005) et après calibration faite sur la base de cet essai. La moyenne de cette différence après calibration est de 22.5 cm pour un rabattement total observé variant d'un forage à l'autre, entre 35 et 172 cm. Cette différence positive a été gardée pour éviter que le modèle ne sous-estime les débits et flux lors des scénarios de pompage.

Tableau 5: Amélioration de la simulation de l'essai de pompage par le nouveau calage du modèle.

Forage pompé	Rabattement mesuré - rabattement calculé avant calage du modèle [cm]	Rabattement mesuré - rabattement calculé après calage du modèle [cm]
SG13	120 cm	26 cm
SG16	62 cm	24 cm
SG19b	23 cm	15 cm
SG44	133 cm	44 cm
SG20	14 cm	4 cm

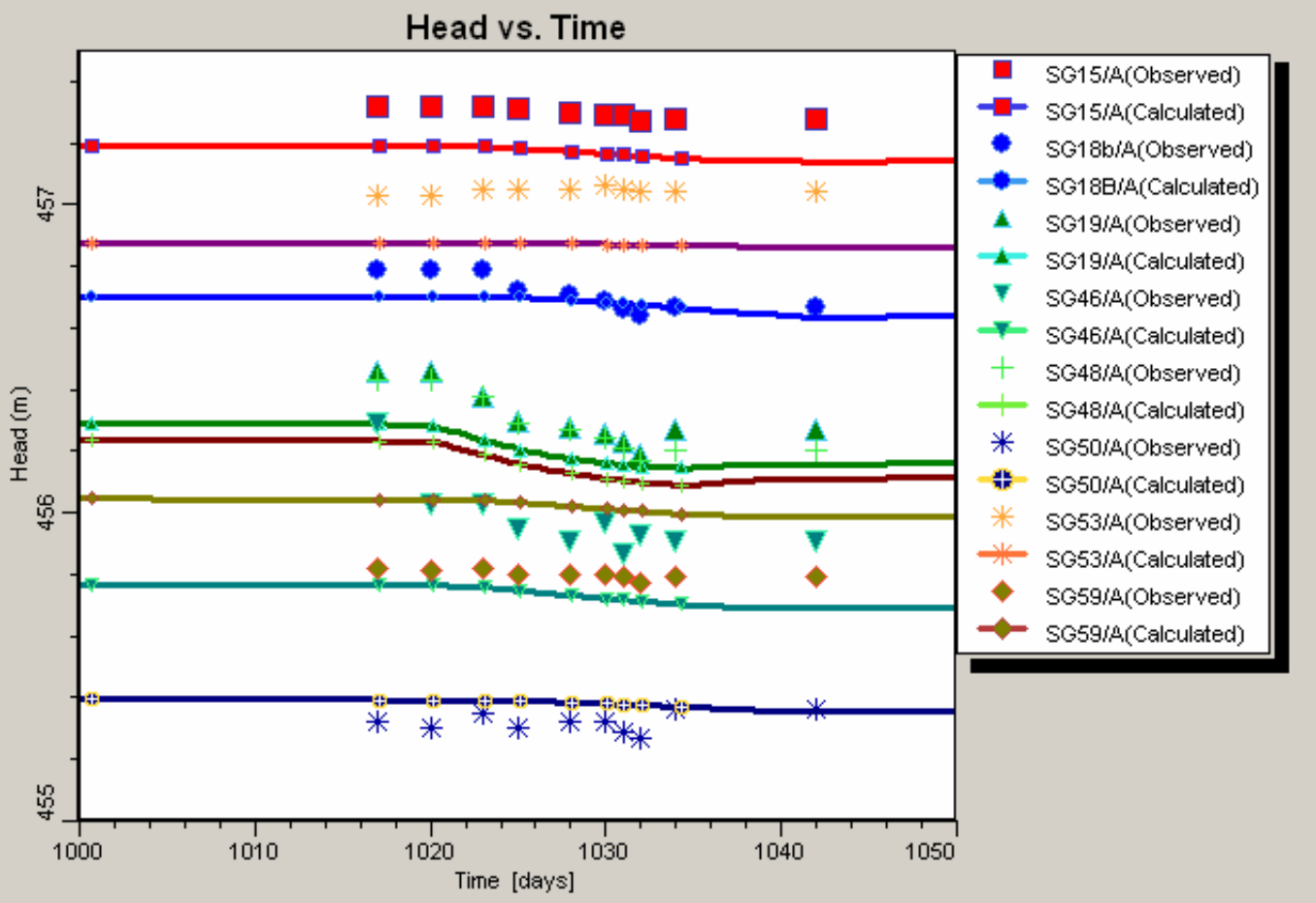


Figure 13: Résultats de la calibration du modèle sur la base des niveaux piézométriques aux forages SG15, SG18b, SG19, SG46, SG48, SG50, SG53 et SG59

La Figure 13 donne les valeurs de comparaison entre les niveaux mesurés et les niveaux calculés aux piézomètres d'observation durant l'essai de pompage. Mis à part le fait que les séries sont décalées de quelques cm ou dm les unes par rapport aux autres (effet de calage global du modèle décrit en [1]), on remarque que la réaction de l'aquifère avec un faible rabattement aux divers points d'observation durant l'essai de pompage, est très bien reproduite par le modèle.

3.3 Surface piézométrique

Le modèle calé a permis de calculer les surfaces piézométriques à divers moments au cours de l'essai de pompage. La Figure 14 représente l'état avant le début de l'essai de pompage et la Figure 15, l'état juste avant le déclenchement des pompes le 6 mars 2006. Elles montrent que le rabattement global provoqué par l'essai de pompage se situe entre 5 et 20 cm dans la région proche de la DIB, ce qui correspond aux valeurs de rabattement mesurées (Figure 4).

Les modifications globales au modèle suite au calage sur l'essai de pompage étant de faible importance, leur effet sur les directions d'écoulement globales calculées par le modèle, sont négligeables. De ce fait, les modifications induites au modèle suite au calage sur l'essai de pompage multiple ne remettent pas en question le diagnostic exposé dans le rapport [1].

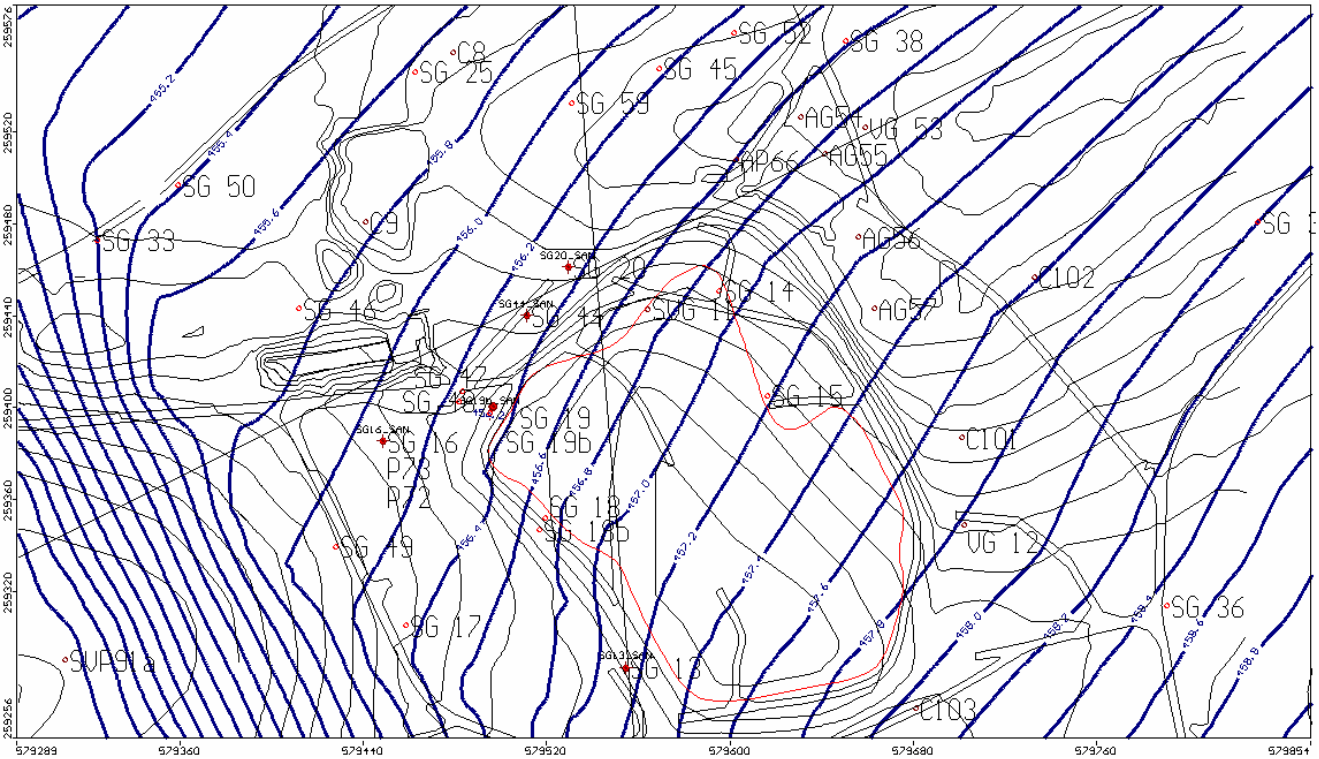


Figure 14: Surface piézométrique calculée avant le début de l'essai de pompage, le 17 février 2006.

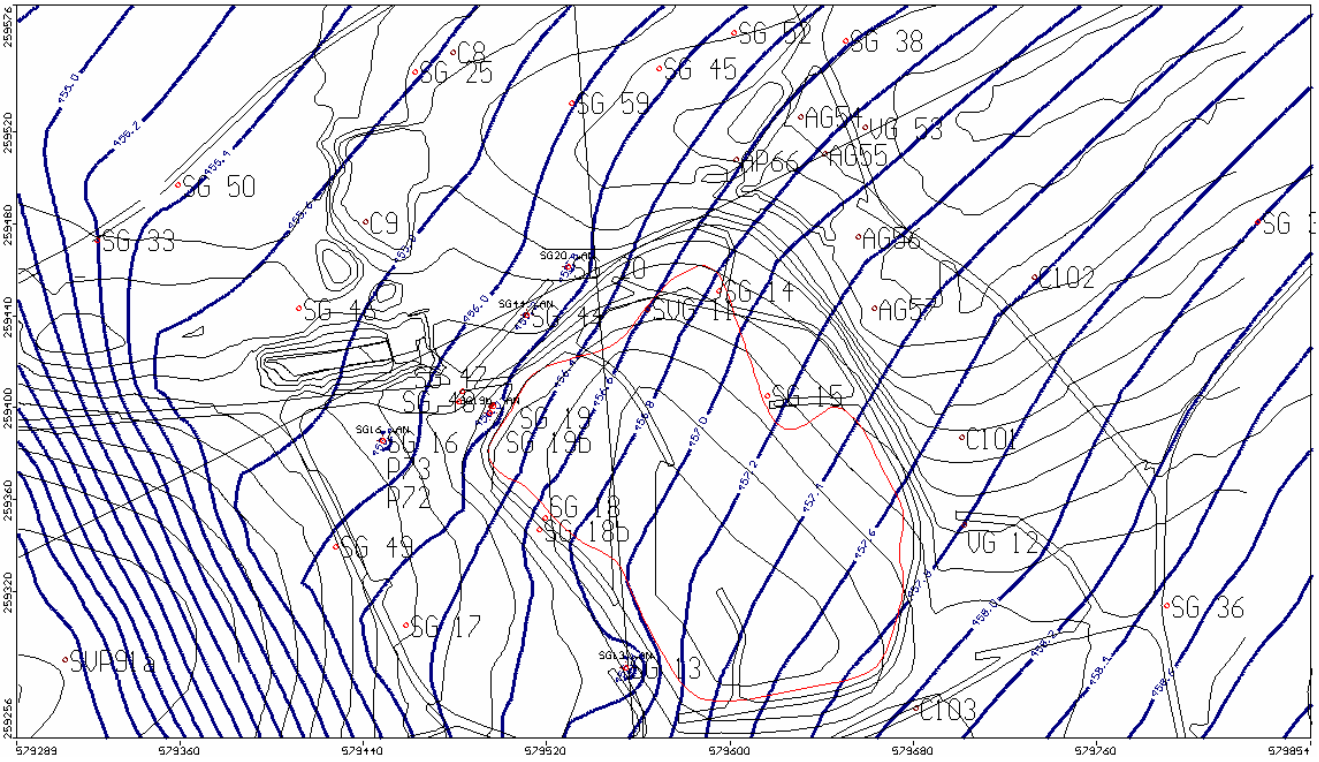


Figure 15: Surface piézométrique calculée avant la fin de l'essai de pompage, le 6 mars 2006.

4 Scénarios de pompage des eaux passant sous la DIB

La nouvelle calibration détaillée au chapitre 3 permet de préciser les scénarios de pompage présentés au chapitre 5 du rapport [1] étant donné que l'essai de pompage multiple a permis de définir les débits maximaux qu'il est possible de pomper à chaque puits. De ce fait, pour chaque constellation de puits activés en même temps, un seul scénario de pompage à débit maximal et réaliste subsiste. Il s'agit des scénarios 1 à 3, présentés au Tableau 6, pour un pompage maximal simultané dans 4, 5 et respectivement 6 forages SG situés à l'aval hydraulique de la décharge.

Tableau 6: Données principales des scénarios de pompage maximal simulés dans 4, 5, respectivement 6 forages au front de la décharge.

Puits activé N°	Débit essai 1 * [m^3/j]	Débit essai 2 ** [m^3/j]	Scénario de pompage simultané maximal		
			1 [m^3/j]	2 [m^3/j]	3 [m^3/j]
SG13 (15.4 m^3/j) *	15.4	11.5	15	15	15
SG19b (64.8 m^3/j) *	64.8	24.5	45	45	45
SG20 (46.1 m^3/j) *	46.1	23	35	35	35
SG44 (60.4 m^3/j) *	60.4	24.5	30	30	30
SG16 (37.4 m^3/j) *	37.4	14.4		10	10
SG15 (57.6 m^3/j) *	57.6	- - -			10
Nombre de puits en action			4	5	6
Débit pompé total [m^3/j] **			125	135	145
Nombre lignes d'écoulement			100	100	100
Lignes traversant le dispositif			10	2	1
Pourcentage de lignes captées			90	98	99

* : Essai 1 : Débit moyen pompé lors de l'essai de pompage de 10 jours à chaque puits entre 2000 et 2002.
** : Essai 2 : Essai de pompage multiple de février – mars 2006 : Débit de pompage à chaque puits

Tableau 7: Résultats du bilan des entrées et sorties après calibration pour chaque scénario.

Éléments du bilan	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Flux entrant			
Recharge (infiltration) [m³/j]	402	402	402
Limite de potentiel imposé [m³/j]	41	42	42
Flux sortant			
Puits [m³/j]	125	135	145
Limite de potentiel imposé [m³/j]	320	310	305
Bilan entrant - sortant [m³/j]	**- 2**	**- 1**	**- 6**

Les résultats sont donnés aux Figures 16 à 18 ci-dessous, qui représentent la distribution de 100 lignes d'écoulement à l'intérieur de l'aquifère des cailloutis du Sundgau

passant sous la décharge, captées par les divers forages activés pour la simulation des scénarios mentionnés. Ces lignes d'écoulement sont simulées à l'aide de la méthode de « particle tracking ». Les espaces entre les petites flèches échelonnées sur chaque ligne d'écoulement correspondent à une durée d'écoulement de 30 jours. De part et d'autre de la décharge, entre 5 et 6 lignes d'écoulement ainsi modélisées dépassent le périmètre de cette dernière, afin de tester largement l'ensemble des lignes d'écoulement passant sous la décharge.

Les débits totaux pompés pour les scénarios 1 à 3 s'échelonnent entre 125 et 145 m^3/j (Tableau 6). Ils restent dans le même ordre de grandeur de ce qui avait été énoncé dans le rapport [3] en 2002 mais leur marge d'erreur est maintenant beaucoup plus faible. Ils se situent entre les sous-scénarios b et c présentés au chapitre 5 du rapport [1].

Le bilan des entrées et sorties du modèle est bien équilibré (Tableau 7). Les entrées proviennent à environ 90 % de la recharge de l'aquifère (alimentation par les pluies) et à près de 10 % des limites de potentiels imposés. Les débits pompés diminuent proportionnellement les débits sortant du modèle par les limites de potentiels.

4.1 Scénario 1 : Pompage dans 4 forages existants

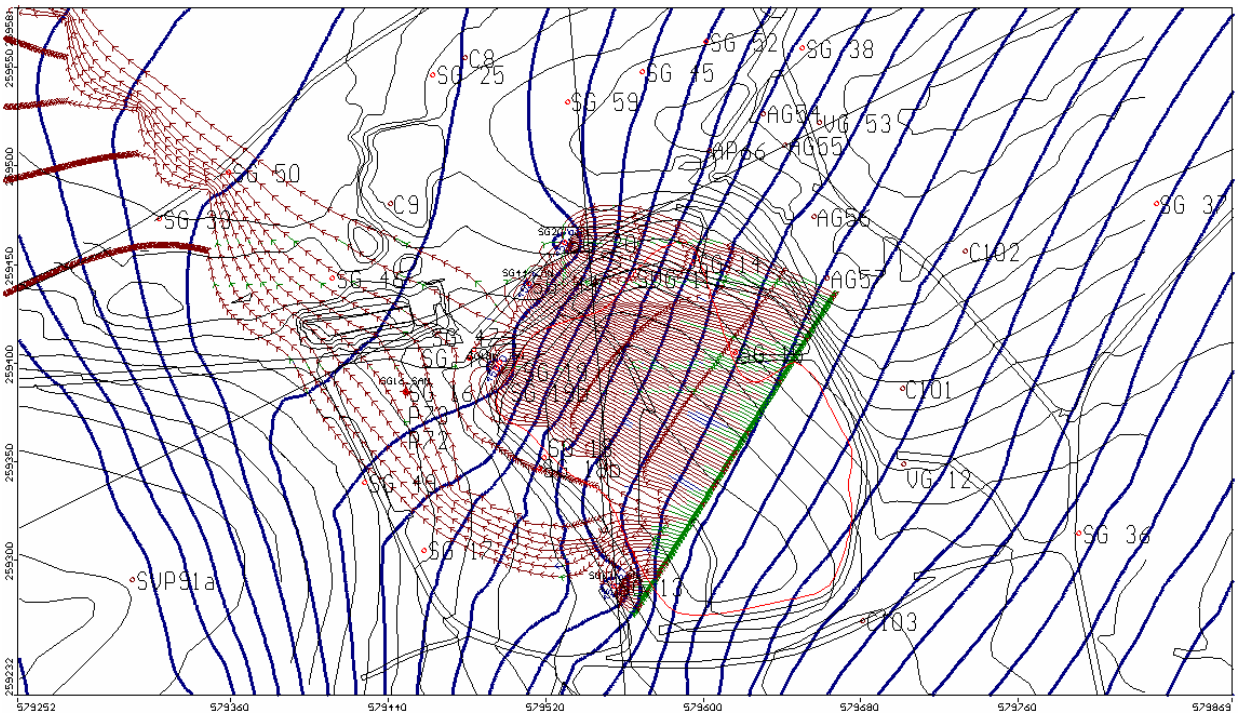


Figure 16: Scénario 1 de pompage simultané maximum aux forages SG13, SG19b, SG44 et SG20.

La Figure 16 montre que sur la base du modèle calibré (chapitre 3), en pompant dans les 4 forages SG13, SG19b, SG44 et SG20 (scénario 1) avec les débits de pompage maximaux modélisables en situation permanente et compte tenu des effets de puits (§ 3.1), 90 % des lignes de courant introduites dans le modèle peuvent être captées.

On constate que surtout entre les forages SG13 et SG19b, dans un secteur relativement peu perméable, des lignes d'écoulement peuvent passer au travers du dispositif de pompage. De même, entre les forages SG19b et SG44, secteur relativement perméable, deux lignes d'écoulement peuvent « échapper » au pompage. Les forages SG44 et SG20 captent l'ensemble des lignes d'écoulement au nord de la DIB.

Sur la base de ce résultat, on constate que le forage SG16 doit être activé pour améliorer le captage des eaux souterraines au NW de la décharge (cf. scénario 2).

4.2 Scénario 2 : Pompage dans 5 forages existants

La Figure 17 montre qu'en pompant dans les 5 forages SG13, SG16, SG19b, SG44 et SG20 (scénario 2) avec les débits de pompage maximaux modélisables en situation permanente et compte tenu des effets de puits mentionnés au § 3.1, 98 % des lignes de courant introduites dans le modèle peuvent être captées.

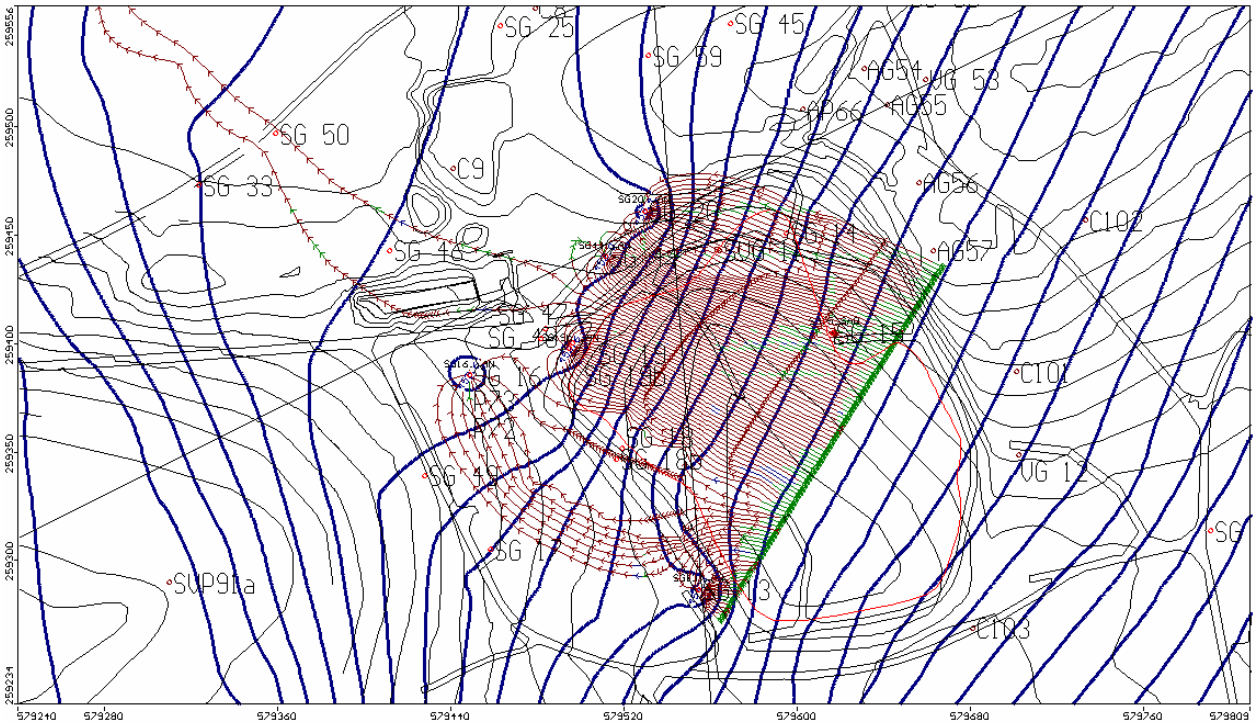


Figure 17: Scénario 2 de pompage simultané maximum aux forages SG13, SG16, SG19b, SG44 et SG20.

On constate que les deux seules lignes d'écoulement non captées par les pompages activés passent au travers du dispositif entre les forages SG19b et SG44, secteur relativement perméable.

4.3 Scénario 3 : Pompage dans 6 forages existants

En plus du pompage aux forages du scénario 2, le scénario 3 active également un pompage au forage SG15 situé partiellement à l'amont des écoulements. L'objectif est d'enlever à ce forage une eau potentiellement moins ou non polluée, en cas de contamination sous la décharge nécessitant une intervention hydraulique importante.

La Figure 18 montre qu'en pompant dans les 6 forages SG13, SG16, SG19b, SG44, SG20 et SG15 (scénario 3) avec les débits de pompage maximaux modélisables en situation permanente et compte tenu des effets de puits mentionnés au § 3.1, 99 % des lignes de courant introduites dans le modèle peuvent être captées.

On constate que la seule ligne d'écoulement non captée par les pompages activés passe au travers du dispositif entre les forages SG19b et SG44, secteur relativement perméable.

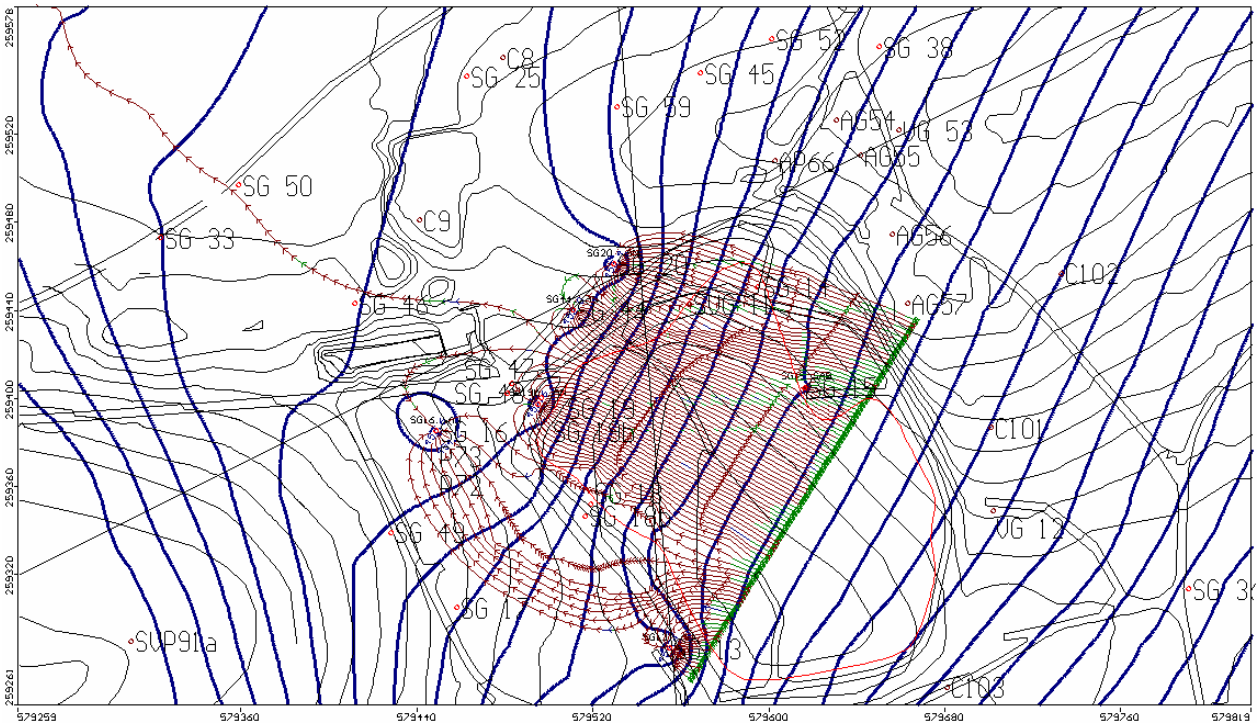


Figure 18: Scénario 3 de pompage simultané maximum aux forages SG13, SG16, SG19b, SG20, SG44 et SG15.

5 Conclusions et recommandations

L'essai de pompage multiple de février et mars 2006 a apporté les éléments suivants :

- **Les infrastructures actuelles** (pompes, matériel pour adductions électriques, etc.) mises en place pour la surveillance environnementale du site, permettent d'extraire 98 m^3/ jour (= débit pompé durant l'essai de pompage multiple) de l'aquifère des cailloutis du Sundgau. Une intervention hydraulique par pompage des eaux de l'aquifère peut donc être réalisée rapidement en cas de nécessité. Pour pomper plus de 24.5 m^3/j à SG19b, une pompe plus puissante pourrait être installée en l'espace de quelques heures. La pompe actuelle est par contre très bien adaptée au pompage en continu actuel du panache SG19b à raison de 20 m^3/j.

- **Débits de pompage** : Aux 5 puits actifs durant l'essai, le modèle montre qu'il est possible, dans le cas d'un pompage en continu, d'extraire 15 m^3/j à SG13, 10 m^3/j à SG16, 45 m^3/j à SG19b, 30 m^3/j à SG44 et 35 m^3/j à SG20, totalisant 135 m^3/j. Ce débit est inférieur d'environ 30 m^3/j au scénario 2c du chapitre 5 du rapport [1] étant donné que pour le forage SG44, les effets de puits diminuent sensiblement le débit qu'il est possible d'y pomper de manière permanente. Cette constellation de pompages ne constitue pas une solution unique. En effet, en pompant un peu moins en SG19b par exemple, il est possible d'augmenter proportionnellement les débits de pompage en SG16 et en SG44. La marge de variation reste cependant faible.

- **Diamètre des forages :** Les effets de puits constatés surtout à SG44 et SG19b proviennent du fait que les forages actuels sont surtout réalisés en vue de faire la surveillance environnementale avec des pompages de courte durée. Afin de disposer de puits de pompage moins dépendants des effets de puits, nous recommandons de forer les éventuels nouveaux puits avec un diamètre plus important (diamètre de foration de 50 cm au moins, diminuant d'un facteur 2.5, l'éventuel effet négatif d'une faible perméabilité locale autour du forage).

- **Marge d'erreur du diagnostic hydraulique** : La nouvelle calibration du modèle sur la base de l'essai de pompage multiple de février – mars 2006 a permis de diminuer considérablement la marge d'erreur ou d'incertitude sur les débits qui s'écoulent dans l'aquifère et sur ceux qu'il est possible de pomper

aux divers puits actuellement activables. Nous estimons cette erreur à moins de 10% de part et d'autre des chiffres donnés au Tableau 6.

Transport de substances :

Les modifications globales au modèle suite au calage sur l'essai de pompage étant de faible importance, leur effet sur les directions d'écoulement globales calculées par le modèle, sont négligeables. De ce fait, le diagnostic concernant le transport de substances, exposé dans le rapport [1] n'est pas remis en question.

Recommandations pour de nouveaux forages :

Compte tenu des conclusions des rapports [1] et [2] ainsi que de la présente étude, nous recommandons de mettre en place deux nouveaux forages de surveillance dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau :

- **Nouveau forage SG60**, environ 30 m à l'E-NE de SG20. Il améliorerait sensiblement l'efficacité du dispositif d'observation des eaux souterraines à l'aval immédiat de la décharge.
- **Nouveau forage SG61**, entre SG19b et SG44. Il réduirait l'espace important entre ces deux forages que le dispositif actuel ne permet pas de capter ni d'échantillonner de manière sûre.

A l'Ouest de la décharge, nous estimons que le dispositif actuel avec les forages SG13 et SG16 permet de capter les lignes d'écoulement passant sous la décharge. Dans le secteur situé entre ces forages, les perméabilités des terrains étant globalement plus faibles qu'à ces deux forages, la surveillance des eaux souterraines dans les forages existants (SG18b, SG17 et SG49) est suffisante.

6 Références

[1] CSD Ingénieurs et Géologues SA (2005) : Décharge industrielle de Bonfol (DIB). Modélisation mathématique des écoulements souterrains dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau (secteur de la DIB). Rapport du 31.10.05 pour bci Betriebs-AG, Bâle, 55 pp, 35 fig., 7 tab, 4 ann.

[2] CSD Ingénieurs et Géologues SA (2005) : Décharge industrielle de Bonfol (DIB). Modélisation mathématique des écoulements souterrains dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau (secteur de la DIB). Note complémentaire du 03.03.2006, pour bci Betriebs-AG, Bâle, 16 pp, 8 fig., 6 tab.

[3] CSD Ingénieurs et Géologues SA : Décharge industrielle de Bonfol – Rapport de synthèse hydrogéologique 2002. Porrentruy, le 24 mai 2002 – bci Basler Chemische Industrie, Bâle.

CSD Ingénieurs et Géologues SA

Joseph Thierrin Bernhard Matter

Collaborateurs chargés de l'étude :

Irina Przybylski

Joseph Thierrin

Porrentruy, le 19 mai 2006
Réf. JU5155-106

Annexe 1

Analyses effectuées au cours du pompage simultané de février – mars 2006 aux forages SG13, SG16, SG19b, SG20 et SG44

Rapports BMG Labors du 8 et du 10 mars 2006

BMG Labors Schlieren : ANALYSEN-BERICHT

bci Betriebs AG c/o Ciba Specialty Chemicals Inc.
Rémi Luttenbacher
K-24.2.06
Klybeckstr. 141
4002 Basel

Schlieren, den 8. März 2006

Projekt: Bonfol
BMG Auftragsnummer: 296-06
Datum Probeneingang: 28. Februar 2006
Datum Auftrag: 28. Februar 2006
Datum Analysen: 2. - 8. März 2006

Probenliste & Untersuchungsauftrag

Anzahl Proben: 10
Art der Proben: Grundwasser

Parameter	Anzahl	Bestimmungsmethode	BMG SAA-Nr
LCKW, THF, Dioxan	10	Headspace-Trap GC-MS	BMG-140*
Bromid	10	Ionenchromatographie	BMG-6

Bemerkungen: Die mit einem * markierten Prüfungen sind nicht im Geltungsbereich der Akkreditierung nach ISO/IEC 17025.

Resultate: siehe nächste Seite(n)

Probenaufbewahrung: 4°C
Ohne gegenteilige schriftliche Mitteilung werden die Proben **drei Monate** nach Zustellung des Berichtes entsorgt.

Dipl. Chem. H. Burkhard
Stellv. Leiterin Analytik

BMG Labors Schlieren : ANALYSEN-BERICHT

Auftraggeber:	bci Betriebs AG c/o Ciba Specialty Chemicals Inc.
Projekt:	Bonfol
Auftrag Nr.	296-06
Datum Bericht:	8. März 2006

Probenbezeichnung		AltlV Konzentr. Wert	**SG 13 20.02.06**	**SG 13 24.02.06**	**SG 19b 20.02.06**	**SG 19b 24.02.06**	**SG 20 20.02.06**	**SG 20 24.02.06**
interne Probenbezeichnung			2802060923	2802060925	2802060927	2802060929	2802060931	2802060933
Proben-Anlieferungszustand, Probenvorbereitung, Konservierung								
Anlieferungszustand			3*P&T-Vial	3*P&T-Vial	3*P&T-Vial	3*P&T-Vial	3*P&T-Vial	3*P&T-Vial
Konservierung			HCl für HS&T	HCl für HS&T	HCl für HS&T	HCl für HS&T	HCl für HS&T	HCl für HS&T
Filtration			keine	keine	keine	keine	keine	keine
Bemerkungen								
Ionen								
Bromid	mg Br^-/l		<0.1	<0.1	**0.32**	**0.34**	<0.1	<0.1
THF, Dioxan								
THF	µg/l		<1	<1	<1	<1	<1	<1
Dioxan	µg/l		<2	<2	<2	<2	<2	<2
LCKW								
Vinylchlorid	µg/l	0.1	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
1,1-Dichlorethen	µg/l	30	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Dichlormethan	µg/l	20	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
trans-1,2-Dichlorethen	µg/l	50	<0.5	<0.5	**1.0**	**1.1**	<0.5	<0.5
1,1-Dichlorethan	µg/l	3'000	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
cis-1,2-Dichlorethen	µg/l	50	<0.5	<0.5	**1.8**	**1.9**	<0.5	<0.5
Chloroform	µg/l	40	<0.5	<0.5	**25**	**26**	<0.5	<0.5
1,2-Dichlorethan	µg/l	3	<0.5	<0.5	**1.0**	**1.1**	<0.5	<0.5
1,1,1-Trichlorethan	µg/l	2'000	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
CCl4	µg/l	2	<0.5	<0.5	**3.9**	**4.1**	<0.5	<0.5
1,2-Dichlorpropan	µg/l	5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Trichlorethen	µg/l	70	<0.5	<0.5	**40**	**42**	<0.5	<0.5
1,1,2-Trichlorethan	µg/l		<0.5	<0.5	**1.0**	**1.1**	<0.5	<0.5
1,2-Dibromethan	µg/l	0.05	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Perchlorethen	µg/l	40	<0.5	<0.5	**25**	**27**	<0.5	<0.5
Chlorbenzol	µg/l	700	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Bromoform	µg/l		<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
1,1,2,2-Tetrachlorethan	µg/l	1	<0.5	<0.5	**40**	**43**	<0.5	<0.5
1,3-Dichlorbenzol	µg/l	3'000	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
1,4-Dichlorbenzol	µg/l	10	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
1,2-Dichlorbenzol	µg/l	3'000	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
1,3,5-Trichlorbenzol	µg/l		<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
1,2,4-Trichlorbenzol	µg/l	400	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
1,2,3-Trichlorbenzol	µg/l		<0.5	<0.5	**0.53**	**0.64**	<0.5	<0.5

BMG Labors Schlieren : ANALYSEN-BERICHT

Auftraggeber:	bci Betriebs AG c/o Ciba Specialty Chemicals Inc.
Projekt:	Bonfol
Auftrag Nr.	296-06
Datum Bericht:	8. März 2006

Probenbezeichnung		AltlV Konzentr. Wert	**SG 44 20.02.06**	**SG 44 24.02.06**	**SG 16 20.02.06**	**SG 16 24.02.06**		
interne Probenbezeichnung			2802060935	2802060937	2802060939	2802060941		
Proben-Anlieferungszustand, Probenvorbereitung, Konservierung								
Anlieferungszustand			3*P&T-Vial	3*P&T-Vial	3*P&T-Vial	3*P&T-Vial		
Konservierung			HCl für HS&T	HCl für HS&T	HCl für HS&T	HCl für HS&T		
Filtration			keine	keine	keine	keine		
Bemerkungen								
Ionen								
Bromid	mg Br^-/l		<0.1	<0.1	<0.1	<0.1		
THF, Dioxan								
THF	µg/l		<1	<1	<1	<1		
Dioxan	µg/l		<2	<2	<2	<2		
LCKW								
Vinylchlorid	µg/l	0.1	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
1,1-Dichlorethen	µg/l	30	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
Dichlormethan	µg/l	20	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
trans-1,2-Dichlorethen	µg/l	50	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
1,1-Dichlorethan	µg/l	3'000	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
cis-1,2-Dichlorethen	µg/l	50	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
Chloroform	µg/l	40	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
1,2-Dichlorethan	µg/l	3	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
1,1,1-Trichlorethan	µg/l	2'000	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
CCl4	µg/l	2	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
1,2-Dichlorpropan	µg/l	5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
Trichlorethen	µg/l	70	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
1,1,2-Trichlorethan	µg/l		<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
1,2-Dibromethan	µg/l	0.05	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
Perchlorethen	µg/l	40	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
Chlorbenzol	µg/l	700	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
Bromoform	µg/l		<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
1,1,2,2-Tetrachlorethan	µg/l	1	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
1,3-Dichlorbenzol	µg/l	3'000	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
1,4-Dichlorbenzol	µg/l	10	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
1,2-Dichlorbenzol	µg/l	3'000	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
1,3,5-Trichlorbenzol	µg/l		<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
1,2,4-Trichlorbenzol	µg/l	400	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
1,2,3-Trichlorbenzol	µg/l		<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		

Die angegebenen Messwerte beziehen sich ausschliesslich auf die bezeichneten Proben. Angaben zu den Prüfspezifikationen (Bestimmungsgrenze, Messunsicherheit) können auf Anfrage abgegeben werden. Der Bericht darf nicht auszugsweise ohne schriftliche Zustimmung des Labors vervielfältigt werden.

BMG Labors Schlieren : ANALYSEN-BERICHT

bci Betriebs AG c/o Ciba Specialty Chemicals Inc.
Rémi Luttenbacher
K-24.2.06
Klybeckstr. 141
4002 Basel

Schlieren, den 10. März 2006

Projekt: Bonfol
BMG Auftragsnummer: 331-06
Datum Probeneingang: 8. März 2006
Datum Auftrag: 8. März 2006
Datum Analysen: 8. - 10. März 2006

Probenliste & Untersuchungsauftrag

Anzahl Proben: 10
Art der Proben: Grundwasser

Parameter	Anzahl	Bestimmungsmethode	BMG SAA-Nr
LCKW, THF, Dioxan	10	Headspace-Trap GC-MS	BMG-140*
Bromid	10	Ionenchromatographie	BMG-6

Bemerkungen: Die mit einem * markierten Prüfungen sind nicht im Geltungsbereich der Akkreditierung nach ISO/IEC 17025.

Resultate: siehe nächste Seite(n)

Probenaufbewahrung: 4°C
Ohne gegenteilige schriftliche Mitteilung werden die Proben **drei Monate** nach Zustellung des Berichtes entsorgt.

Dipl. Chem. H. Burkhard
Stellv. Leiterin Analytik

BMG Labors Schlieren : ANALYSEN-BERICHT

Auftraggeber:	bci Betriebs AG c/o Ciba Specialty Chemicals Inc.
Projekt:	Bonfol
Auftrag Nr.	331-06
Datum Bericht:	10. März 2006

Probenbezeichnung		AltlV Konzentr. Wert	**SG 13 28.02.06**	**SG 13 04.03.06**	**SG 19b 28.02.06**	**SG 19b 04.03.06**	**SG 20 28.02.06**	**SG 20 04.03.06**
interne Probenbezeichnung			0803061176	0803061178	0803061180	0803061182	0803061184	0803061186
Proben-Anlieferungszustand, Probenvorbereitung, Konservierung								
Anlieferungszustand			3*P&T-Vial	3*P&T-Vial	3*P&T-Vial	3*P&T-Vial	3*P&T-Vial	3*P&T-Vial
Konservierung			HCl für HS&T	HCl für HS&T	HCl für HS&T	HCl für HS&T	HCl für HS&T	HCl für HS&T
Filtration			keine	keine	keine	keine	keine	keine
Bemerkungen								
Ionen								
Bromid	mg Br^-/l		<0.1	<0.1	**0.33**	**0.34**	<0.1	<0.1
THF, Dioxan								
THF	µg/l		<1	<1	<1	<1	<1	<1
Dioxan	µg/l		<2	<2	<2	<2	<2	<2
LCKW								
Vinylchlorid	µg/l	0.1	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
1,1-Dichlorethen	µg/l	30	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Dichlormethan	µg/l	20	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
trans-1,2-Dichlorethen	µg/l	50	<0.5	<0.5	**0.98**	**0.93**	<0.5	<0.5
1,1-Dichlorethan	µg/l	3'000	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
cis-1,2-Dichlorethen	µg/l	50	<0.5	<0.5	**1.7**	**1.6**	<0.5	<0.5
Chloroform	µg/l	40	<0.5	<0.5	**26**	**25**	<0.5	<0.5
1,2-Dichlorethan	µg/l	3	<0.5	<0.5	**1.2**	**1.1**	<0.5	<0.5
1,1,1-Trichlorethan	µg/l	2'000	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
CCl4	µg/l	2	<0.5	<0.5	**4.0**	**3.7**	<0.5	<0.5
1,2-Dichlorpropan	µg/l	5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Trichlorethen	µg/l	70	<0.5	<0.5	**39**	**40**	<0.5	<0.5
1,1,2-Trichlorethan	µg/l		<0.5	<0.5	**0.89**	**0.85**	<0.5	<0.5
1,2-Dibromethan	µg/l	0.05	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Perchlorethen	µg/l	40	<0.5	<0.5	**27**	**28**	<0.5	<0.5
Chlorbenzol	µg/l	700	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Bromoform	µg/l		<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
1,1,2,2-Tetrachlorethan	µg/l	1	<0.5	<0.5	**39**	**38**	<0.5	<0.5
1,3-Dichlorbenzol	µg/l	3'000	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
1,4-Dichlorbenzol	µg/l	10	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
1,2-Dichlorbenzol	µg/l	3'000	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
1,3,5-Trichlorbenzol	µg/l		<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
1,2,4-Trichlorbenzol	µg/l	400	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
1,2,3-Trichlorbenzol	µg/l		<0.5	<0.5	**0.53**	**0.50**	<0.5	<0.5

BMG Labors Schlieren : ANALYSEN-BERICHT

Auftraggeber:	bci Betriebs AG c/o Ciba Specialty Chemicals Inc.
Projekt:	Bonfol
Auftrag Nr.	331-06
Datum Bericht:	10. März 2006

Probenbezeichnung		AltlV Konzentr. Wert	**SG 44 28.02.06**	**SG 44 04.03.06**	**SG 16 28.02.06**	**SG 16 04.03.06**		
interne Probenbezeichnung			0803061188	0803061190	0803061192	0803061194		
Proben-Anlieferungszustand, Probenvorbereitung, Konservierung								
Anlieferungszustand			3*P&T-Vial	3*P&T-Vial	3*P&T-Vial	3*P&T-Vial		
Konservierung			HCl für HS&T	HCl für HS&T	HCl für HS&T	HCl für HS&T		
Filtration			keine	keine	keine	keine		
Bemerkungen								
Ionen								
Bromid	mg Br^-/l		<0.1	<0.1	<0.1	<0.1		
THF, Dioxan								
THF	µg/l		<1	<1	<1	<1		
Dioxan	µg/l		<2	<2	<2	<2		
LCKW								
Vinylchlorid	µg/l	0.1	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
1,1-Dichlorethen	µg/l	30	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
Dichlormethan	µg/l	20	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
trans-1,2-Dichlorethen	µg/l	50	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
1,1-Dichlorethan	µg/l	3'000	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
cis-1,2-Dichlorethen	µg/l	50	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
Chloroform	µg/l	40	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
1,2-Dichlorethan	µg/l	3	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
1,1,1-Trichlorethan	µg/l	2'000	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
CCl4	µg/l	2	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
1,2-Dichlorpropan	µg/l	5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
Trichlorethen	µg/l	70	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
1,1,2-Trichlorethan	µg/l		<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
1,2-Dibromethan	µg/l	0.05	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
Perchlorethen	µg/l	40	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
Chlorbenzol	µg/l	700	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
Bromoform	µg/l		<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
1,1,2,2-Tetrachlorethan	µg/l	1	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
1,3-Dichlorbenzol	µg/l	3'000	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
1,4-Dichlorbenzol	µg/l	10	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
1,2-Dichlorbenzol	µg/l	3'000	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
1,3,5-Trichlorbenzol	µg/l		<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
1,2,4-Trichlorbenzol	µg/l	400	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		
1,2,3-Trichlorbenzol	µg/l		<0.5	<0.5	<0.5	<0.5		

Die angegebenen Messwerte beziehen sich ausschliesslich auf die bezeichneten Proben. Angaben zu den Prüfspezifikationen (Bestimmungsgrenze, Messunsicherheit) können auf Anfrage abgegeben werden. Der Bericht darf nicht auszugsweise ohne schriftliche Zustimmung des Labors vervielfältigt werden.

Betriebs-AG

Assainissement définitif de la décharge industrielle de Bonfol

Compléments selon exigences de la prise de position OEPN du 08.09.04

2. Géologie et hydrogéologie

2.5 Modélisation des écoulements

Annexe 2.5.4

C'S'D' Ingénieurs et Géologues SA

Ingénieurs
Géologues
Spécialistes de l'environnement
Rue de la Chaumont 13, CP 134
2900 Porrentruy 2

Téléphone: +41 (0)32-466 58 58
Fax: +41 (0)32-466 57 21
E-mail: porrentruy@csd.ch
Internet: www.csd.ch

Scénarios de simulation des écoulements et du transport souterrain

Nouveaux forages

Sur la base des simulations antérieures, nous proposons d'ajouter les forages SG60 et SG61 aux coordonnées (cf. carte ci-dessous) :

- SG60 : 579556 / 259480
- SG61 : 579499 / 259422

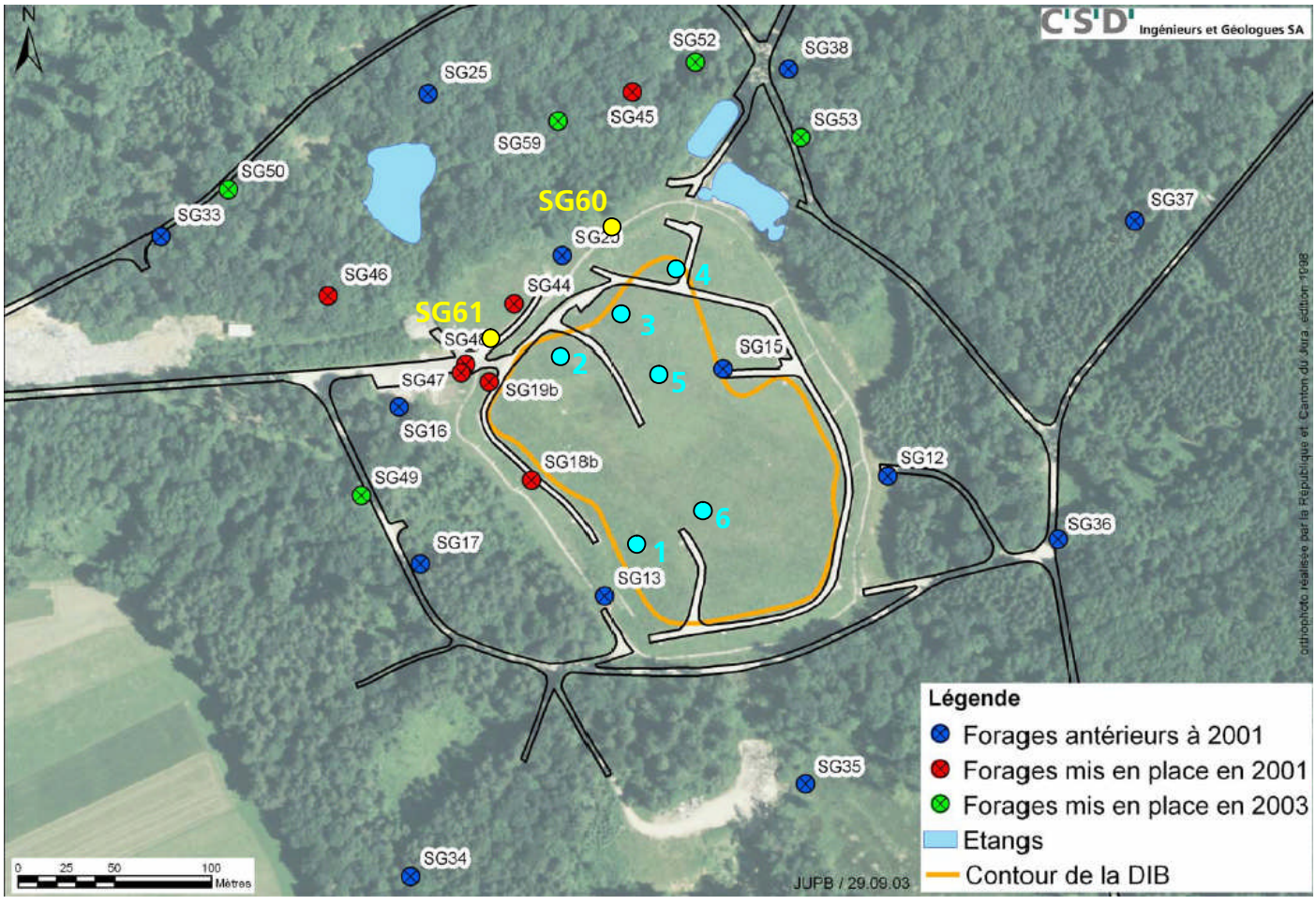
L'hypothèse posée est que ces 2 forages ont un diamètre de 20 cm et des caractéristiques hydrauliques analogues à SG44.

4 scénarios de simulations analogues au panache SG19b

Nouvelle simulation des 4 scénarios présentés dans le rapport du 31.10.2005, avec modèle recalibré selon note complémentaire du 19.05.2006 : Coordonnées des 4 points d'infiltration (situation cf. carte ci-dessous) :

- Point 1: 579576 / 259312
- Point 2: 579525 / 259410
- Point 3: 579557 / 259429
- Point 4: 579593 / 259457

Les emplacements de ces points ont été choisis proches du bord de la décharge et constituent de ce fait un cas limite en ce qui concerne la détection d'une fuite.



Objectifs :

- Vérifier qu'un tel scénario est détectable avec le réseau d'observation actuel additionné des 2 forages SG60 et SG61.
- Définir une fréquence de contrôle adéquate
- Définir des mesures d'intervention possibles permettant de capter un panache contaminé provoqué par une telle fuite

D'éventuelles mesures d'interventions suite à de tels scénarios devront être décidées d'un commun accord entre l'OEPN et la bci en fonction des risques et sur la base de l'article 15 de l'OSites.

Données de départ :

Source de pollution analogue à celle évaluée pour le panache SG19, modèle calibré suite aux modifications du printemps 2006 (Note complémentaire du 19.05.2006).

Simulation :

Pour chaque point de source de pollution simulé, on modélise les éléments suivants :

1.- Injection en continu de 92 g/m^3 dans 17 m^3 d'eau par année (contamination analogue à celle de la source de contamination du panache SG19).

2.- Définition du temps T où la pollution simulée est visible dans un piézomètre de la barrière proche d'observation

3.- Dès le temps T + 140 jours (« worst-case » : 140 jours = durée entre deux campagnes de prélèvement selon le CSS actuel en vigueur), pompage dans les 2 forages potentiellement les plus touchés par le panache simulé, afin de stopper la propagation du panache vers l'aval.

4.- Calcul de la quantité de polluant qui aurait pu se propager au-delà de l'écran de pompage avant et durant l'intervention par pompage.

Scénarios catastrophe d'une éventuelle fuite de lixiviats dans une fouille pratiquée dans les matériaux naturels sous le fond de la décharge

Simulation des scénarios catastrophe 5a à 5c et 6a à 6c, depuis les points 5 et 6 de la carte en page 1. Coordonnées de ces points :

- Point 5 : 579586 / 259401 (dans le compartiment 6 „Trou de Laufon").
- Point 6 : 579603 / 259334 (dans le compartiment 3).

Objectifs :

- Vérifier que de tels scénario sont détectables avec le réseau d'observation actuel additionné des 2 forages SG60 et SG61.
- Définir une fréquence de contrôle adéquate
- Définir des mesures d'intervention possibles permettant de capter un panache contaminé provoqué par une telle fuite

Données de départ :

Source de pollution analogue à la concentration des lixiviats actuels

Il s'agit de scénarios catastrophe définis avec le consortium Marti/Züblin chargé des travaux d'excavation :

Grandeur de la source de pollution	10 x 10 m
Flux à la source de pollution	200 mg HHV/l ou 200 g/m^3 pour 10 m^3/jour = 2.0 kg/jour.
Type de simulation	Hydraulique et chimie: transitoire

a) Scénarios catastrophe plausibles 5a et 5b, 6a et 6b

Durant 2 jours (par exemple pendant un week-end), un total de 20 m^3 de lixiviats s'infiltrent dans les cailloutis du Sundgau au travers de sables limoneux de la base de la série des argiles de Bonfol et du sommet des cailloutis, sur une surface de 100 m^2, dont la perméabilité se situe juste en dessus de 1E-6 m/s. L'infiltration se fait au point 5 de la figure en page 1 = scénario 5, respectivement au point 6 = scénario 6.

Lors des **simulations 5a et 6a**, on modélisera une intervention par pompage dans le premier écran de forages après X jours, juste avant que le front de contamination arrive à la ligne de forages. Il s'agit du cas (favorable) où la fuite aura été remarquée et où l'intervention, pouvant être planifiée, démarrera au plus tard dès que le front de contamination aura atteint le premier écran de forages.

Lors des **simulations 5b et 6b**, on modélisera une intervention par pompage dans le premier écran de forages qui débutera seulement après 140 jours. Il s'agit du « worst-case », cas où la pollution des eaux souterraines ne serait constatée que lors d'un contrôle périodique, c'est-à-dire, selon le CSS actuel en vigueur après maximum 140 jours.

Pour chacune de ces simulations, on modélise les éléments suivants :

1.- 1er et 2ème jour : Injection des polluants selon flux indiqué
2.- Dès le Xème jour, respectivement dès le 140ème jour, pompage continu dans les 3 forages potentiellement les plus touchés par le panache simulé, afin d'éliminer la propagation du panache vers l'aval.
3.- Calcul de la quantité de polluant sorti du système par pompage, ainsi que de la quantité de polluant qui pourrait se propager au-delà de l'écran de pompage, durant l'intervention.

b) Scénarios catastrophe improbables 5c et 6c

Il s'agit de scénarios analogues aux scénarios 5a et 6a, avec perte de lixiviats aux points 5, respectivement 6 de la figure en page 1. Cependant, au cours de ces scénarios, on simule une fuite de substance durant 100 jours (au lieu de 2), au cours desquels un total de 1000 m^3 de lixiviats (soit environ la quantité de lixiviats contenus dans la partie sud, respectivement nord de la décharge) s'infiltrent dans les cailloutis du Sundgau. La fuite est détectée mais ne peut être stoppée à la source.

On modélisera une intervention par pompage dans le premier écran de forages, qui débutera X jours après le début de la fuite, juste avant que le front de contamination arrive au premier écran de forages.

Pour chacune de ces simulations, on modélise les éléments suivants :

1.- durant les 100 premiers jours : Injection des polluants selon le flux de 200 g/m^3 pour 10 m^3/jour, indiqué ci-dessus
2.- Dès le Xème jour, pompage continu dans les 3 forages potentiellement les plus touchés par le panache simulé, afin d'éliminer la propagation du panache vers l'aval.
3.- Calcul de la quantité de polluant sorti du système par pompage, ainsi que de la quantité de polluant qui pourrait se propager au-delà de l'écran de pompage, durant l'intervention.

Procès-verbaux des séances

Procès-verbal

Projet : DIB	Séance : Groupe hydrogéologie	Séance no : 1
Date : 10.12.04, 9h00-13h15	Lieu : OEPN, St-Ursanne	

Participants :

OEPN : Markus Bill (MB), André Bapst (AB), Sylvie Boegli (SB) Excusés : -

Bci : Michaël Fischer (MF), Rémi Luttenbacher (RL)

CSD : Joseph Thierrin (JT), Bernhard Matter (BM)

BMG : Christophe Munz (CM), Cédric Arnold (CA)

CHYN : Daniel Hunkeler (DH), Pierre Perrochet (PP)

	No	Point discuté	Suivi
	1	**Introduction et objectifs de la séance** Règles de fonctionnement fixées avec le Ministre : ▪ Contact sous forme de séance entre les experts de l'OEPN et les mandataires bci. ▪ Avant chaque séance, bci fourni les documents de travail (1 semaine avant). ▪ Chaque participant reste dans son rôle. Les décisions sont protocolées lors de la séance et signées par chaque partie.	
	2.1	**Mise à jour des connaissances** La décharge se trouve dans un synclinal d'orientation SE-NW. Au niveau du forage SVKG 30 (en direction de Pfetterhouse), il n'y a plus d'eau dans la série des cailloutis du Sundgau. A ce niveau, contact avec les lentilles sableuses de la série des Vosges. Nouveaux forages réalisés en 2003: SG 49, SG 50, SG 59, SG 52, SG 53 Lors d'essais de pompage, des polluants ont été trouvés dans SG 19b, SG 46 et dans SG 50 en très faible quantité, ce qui prouve la plausibilité des lignes d'écoulement modélisées. Depuis 3 ans le ¼ des écoulements sous la décharge est capté (10 m^3, puis 20 m^3/jour). Très faible pollution restante dans SG 47 et SG 48.	

	No	Point discuté	Décisions	Actions			
				Quoi	Qui	Quand	Suivi
	2.2	Position de la bci concernant la nécessité et le but des compléments : cf annexe					
	3.1	**Discussion de l'exigence 2.1** Incertitude concernant la perméabilité des argiles de Bonfol : ▪ p.11 du rapport 4: perméabilité de 10^{-7} pour des sables triés paraît faible selon PP. ▪ Pourquoi la perméabilité verticale est plus élevée que la perméabilité horizontale (voir annexe 6 du rapport hydrogéologie). Confusion dans la désignation des échantillons selon BM. ▪ En ce qui concerne les niveaux piézométriques, il existe un dôme à l'est de la décharge plutôt inexplicable selon PP. Il faudrait savoir d'où vient cette eau. Selon JT, certainement que les argiles de Bonfol sont plus perméables à cet endroit. ▪ Contradiction entre différentes cartes piézométriques Le but est de mettre en place une barrière d'interception efficace (savoir si on a une inversion saisonnière des écoulements ou une possibilité d'assèchement de la nappe en cas de pompage).	Enlever le terme de bien trié pour les sables. Plutôt sables limoneux. Vérifier le rapport entre perméabilité horizontale et verticale dans l'annexe 6 du rapport 4. Présenter un scénario plausible de recharge de l'aquifère des Cailloutis du Sundgau. Vérifier la valeur des niveaux dans l'annexe 3.10 du rapport 6.1.	Note complémentaire Note complémentaire Note complémentaire Note complémentaire	Bci IGDIB Bci IGDIB Bci IGDIB Bci IGDIB	Fin janvier 05 Fin janvier 05 Fin janvier 05 Fin janvier 05	OEPN OEPN OEPN OEPN

	No	Point discuté	Décisions	Actions			
				Quoi	Qui	Quand	Suivi
	3.2	**Discussion de l'exigence 2.3** Un nouveau nivellemement a été effectué en 2004 sur la base de nouveaux points trigonométriques. Les niveaux sont en général 10 cm plus bas qu'auparavant. Toutefois, les équipotentielles restent équivalentes. Il n'y a pas de changements dans les directions d'écoulement. La carte des équipotentielles doit encore être complétée. La modélisation des écoulements des eaux dans les Cailloutis du Sungau va être mise à jour. Bci souhaite entrer en matière sur le réseau de forages après la mise à jour de la modélisation. Selon DH, c'est surtout dans le secteur SG 34 qu'il y a des lacunes dans la barrière. Selon JT, dans ce secteur, les Cailloutis du Sundgau ont une perméabilité plus faible et une épaisseur de l'ordre d'1 mètre. La topographie est également plus marquée. Ceci devrait permettre à l'eau de rester dans l'aquifère.	Elaborer la carte des équipotentielles mise à jour. Faire la mise à jour de la modélisation à l'aide des données provenant des essais de pompage actuellement à disposition. Effectuer ensuite un essai de pompage de longue durée et à grande échelle sur plusieurs forages des barrières hydrauliques en même temps afin de vérifier la modélisation et le scénario d'intervention. La nécessité de mettre en place des nouveaux forages pourra ensuite être examinée.	Carte Modèle réactualisé Essais de pompage	bci, IGDIB bci, IGDIB bci, IGDIB	Fin janvier 05 Juin 05 Fin 05	OEPN OEPN OEPN
	3.3	**Discussion de l'exigence 2.4**	A aborder lors de la prochaine séance.				

				Actions			
	No	**Point discuté**	**Décisions**	**Quoi**	**Qui**	**Quand**	**Suivi**
	3.4	**Discussion de l'exigence 2.5** La réactualisation du modèle va permettre d'étendre la surface étudiée (conditions limites étendues).	Intégrer la zone de dôme piézométrique à l'est de la décharge dans le modèle. JT prend contact avec le CHYN pour clarifier la problématique de la paramétrisation du modèle utilisé en nappe libre. Expliquer les paramètres qui ont été utilisés pour faire tourner le modèle (taux de saturation en particulier, battement de la nappe). Voir si le logiciel utilisé (Modflow 3.2) est suffisamment performant. Suite de la discussion à la prochaine séance.	Modèle à réactualiser Contact et information	Bci IGDIB CSD, CHYN	Juin 05 15.12.04 15.12.04	OEPN
	4	**Etapes suivantes et calendrier**		Prochaine séance du groupe hydrogéologie à l'OEPN		15.12.04 à 14h15	
		Signatures :	OEPN	Bci			
			Markus Bill	Michaël Fischer			

Procès-verbal

Projet : DIB	Séance : Groupe hydrogéologie	Séance no : 2
Date : 15.12.04, 14h15-17h00	Lieu : OEPN, St-Ursanne	

Participants :

OEPN : Markus Bill (MB), André Bapst (AB), Sylvie Boegli (SB) Excusés : -

Bci : Michaël Fischer (MF), Rémi Luttenbacher (RL)

CSD : Joseph Thierrin (JT), Bernhard Matter (BM)

BMG : Cédric Arnold (CA)

CHYN : Daniel Hunkeler (DH), Pierre Perrochet (PP)

				Actions			
	No	**Point discuté**	**Décisions**	**Quoi**	**Qui**	**Quand**	**Suivi**
	1	**Discussion de l'exigence 2.5** 1.L'utilisation d'un modèle performant est indispensable pour la génération de maillages et de conditions limites adéquates et pour retracer les aspects transitoires, tridimensionnels et variablement saturés des écoulements.	Suite aux précisions concernant le modèle utilisé (Modflow), apportées par JT (voir présentation PowerPoint en annexe) lors de la discussion de ce jour, les experts et les représentants du Canton arrivent à la conclusion que l'on peut se contenter de modéliser les écoulements horizontaux dans les Cailloutis du Sundgau avec comme avantage d'augmenter le niveau de détails. En effet, les zones perméables de la série des Vosges situées au nord et à l'ouest de la zone à modéliser, n'ont qu'une influence négligeable sur les écoulements dans les Cailloutis dans le secteur de la décharge. Etant donné l'utilisation d'un modèle local, les aspects tridimensionnels, génération des maillages et variablement saturés ne	Modèle à réactualiser	bci/IGDIB	Juin 2005	OEPN

			sont pas déterminants pour la modélisation envisagée. Le logiciel utilisé devra par contre permettre de modéliser les fluctuations de la nappe libre sous l'effet des pompages. En cas de nécessité, un autre logiciel de modélisation sera utilisé.				
		2. Les conditions limites, telles que les hypothèses, les données, la paramétrisation des variables utilisées, doivent être confirmées pour : a) la quantification des écoulements locaux et régionaux de la DIB b) le dimensionnement et la localisation des forages d'interception.	Faire la mise à jour de la modélisation à l'aide des données provenant des forages et des essais de pompage réalisés après la modélisation de 2002. Etendre la surface modélisée vers l'amont pour intégrer dans le modèle la zone de dôme piézométrique situé au sud-est de la décharge. Simuler l'alimentation du bassin versant plutôt qu'une limite de potentiel à l'amont du modèle. Déplacer la limite de potentiel aval, le plus en aval possible.	Modèle à réactualiser	bci/IGDIB	Juin 2005	OEPN
		3. La modélisation des sources de pollution sous la DIB sera faite afin d'apporter des connaissances : c) sur les effets de dilution et de dispersion des Cailloutis du Sundgau d) sur la taille du panache étendu en aval e) pour l'interprétation des concentrations mesurées sur le terrain	Les objectifs de la modélisation sont: • une simulation déterministe des écoulements et du transport dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau. • de tester des scénarios de contamination accidentelle lors des travaux d'assainissement. • d'évaluer l'étendue de la contamination éventuelle en fonction de divers scénarios, respectivement de définir quelle importance devrait avoir la contamination éventuelle pour tel ou tel impact sur les eaux souterraines. • de définir les mesures d'intervention (pompage) nécessaires pour éviter le	Modèle à réactualiser	bci/IGDIB	Juin 2005	OEPN

		4. exigence 2.5.4	transfert d'une éventuelle contamination au delà des écrans 1, respectivement 2 de forages mis en place. • de définir la localisation, la fréquence et la durée de pompage pour les échantillonnages. • vérifier si le nombre de forages est suffisant pour assurer la surveillance et l'intervention en cas d'accident. Le point 2.5.4 sera à discuter lors de la prochaine séance.			13.01.05	
	2	**Discussion de l'exigence 2.4**	Le point 2.4 sera à discuter lors de la prochaine séance, en même temps que le 2.5.4.			13.01.05	
	3	**Etapes suivantes et calendrier**		Prochaine séance du groupe hydrogéologie à l'OEPN		13.01.05 à 14h00	
		Signatures :	OEPN Markus Bill	bci Michaël Fischer			

Procès-verbal

Projet : DIB	Séance : Groupe de projet	Séance no : 3
Date : 3.02.05, 14h00 à 17h00	Lieu : OEPN, St-Ursanne	

Participants :

OEPN : Jean Fernex (JF), André Bapst (AB), Sandrine Choulot (SC) Excusés : Pierre Perrochet (PP)

bci : Michaël Fischer (MF), Rémi Luttenbacher (RL)

CSD : Joseph Thierrin (JT), Bernhard Matter (BM)

BMG : Christoph Munz (CM)

CHYN : Daniel Hunkeler (DH)

0	**Documents** Bci – DIB – Concept de surveillance et de sécurité (CSS) – version provisoire du 8.09.04 Bci – DIB – Surveillance actuelle de l'environnement / mesures d'intervention en cas de contamination – mai 2004 (*) Bci – DIB – Rapport annuel 2003 – 23 juillet 2004 Bci - DIB – Rapport de synthèse hydrogéologique 2002 – 24 mai 2002 BRGM – Etat des connaissances à fin 2003 – février 2004 Présentation de DH
1	**Introduction**

			Actions				
No	**Point discuté**	**Décisions**	**Quoi**	**Qui**	**Quand**	**Suivi**	**Fait**
2	**Discussion de l'exigence 2.4 et 2.5.4 : écoulements régionaux en relation avec l'implantation de nouveaux piézomètres**						
	Présentation de DH : Synthèse des connaissances sur la série des Vosges : **BUT** - Avoir une meilleure appréciation de la nature des écoulements dans la série des Vosges. Aquifère continu ?						

			Actions				
No	**Point discuté**	**Décisions**	**Quoi**	**Qui**	**Quand**	**Suivi**	**Fait**
	- Mieux connaître le transfert potentiel et l'atténuation des polluants des cailloutis du Sundgau vers le karst. **MOYEN DEMANDE** - Faire 3 forages supplémentaires dans la série des Vosges et d'en exploiter les informations						
	Commentaires bci : les connaissances de la série des Vosges sont suffisantes dans le secteur de la DIB, les corps sableux de cette série y sont totalement isolés des cailloutis du Sundgau, par des couches argileuses. Mais on a peu d'information sur la série des Vosges au niveau régional. Une contamination passerait exclusivement par les cailloutis du Sundgau ou par les eaux de surface. D'où la nécessité de surveiller plutôt ces points. La bci n'est pas convaincue que 3 forages supplémentaires suffiront à améliorer notablement les connaissances. Toutes informations supplémentaires dans la série des Vosges n'ont pas d'influence significative sur les concepts de surveillance, d'assainissement et d'intervention. **OEPN** : Le but est d'approfondir les connaissances hydrogéologiques régionales pour disposer d'un modèle conceptuel cohérent concernant le transfert des eaux à travers la série des Vosges. Ceci ne remet pas en cause le dispositif d'intervention local.	Une note complémentaire sera fournie et précisera les connaissances déjà acquises dans la série des Vosges et sur les systèmes d'écoulement régionaux : - Investigations géologiques, hydrogéologique, connaissances provenant des constructions effectuées, mesures géophysiques, topographie, piézométrie. - Modèle conceptuel de fonctionnement : illustré de cartes, de coupes géologiques. - Justification de la position de la bci. Avant la réalisation de cette note une rencontre CHYN / CSD aura lieu pour discuter des données à disposition.	Note Séance	Bci CHYN / CSD	24.02.05 9.2.05 à 13h30		
3	**Divers** bci a remis le 2.02.05. un complément répondant aux exigences 2.1 et 2.3 selon PV n°1 du 10.12.04. L'annexe (carte piézomètrique) sera transmise prochainement par e-mail	Ce document sera évalué par l'OEPN et discuté pour validation lors de la prochaine séance	Séance	tous	2.03.05		

			Actions				
No	**Point discuté**	**Décisions**	**Quoi**	**Qui**	**Quand**	**Suivi**	**Fait**
4	**Prochaines séances**						
			Séance groupe hydrogéologie	Groupe hydro	2.03.05 14h00, OEPN		

Signatures : OEPN bci

Jean Fernex Michaël Fischer

Date, visa : , SC/

Procès-verbal

Projet : DIB	Séance : Groupe hydrogéologique	Séance no : 4
Date : 8.03.05, 14h30 à 17h00	Lieu : OEPN, St-Ursanne	

Participants :

Excusés : Bernhard Matter (BM)

OEPN : Jean Fernex (JF), André Bapst (AB), Sandrine Choulot (SC)

bci : Michaël Fischer (MF), Rémi Luttenbacher (RL)

CSD : Joseph Thierrin (JT),

BMG : Christoph Munz (CM)

CHYN : Daniel Hunkeler (DH), Pierre Perrochet (PP)

0	**Documents** bci – Compléments demandés par le canton du Jura. (carte des équipotentielles sur la base des nouveaux nivellements effectués en 2004) – 2.02.05 bci – Hydrogéologie de la région de la DIB – Complément concernant la série des Vosges – 24.02.05

			Actions				
No	**Points discutés**	**Décisions**	**Quoi**	**Qui**	**Quand**	**Suivi**	**Fait**
1	**Prise de position OEPN sur les réponses bci aux exigences E2.1 et E2.3**						
	Réf. PV n° 1 du 10.12.04. <u>1. Points 1 et 2 de l'exigence E2.1</u> L'évaluation de l'OEPN, soutenue par les experts du CHYN, conclut que les réponses fournies par la bci sur les points 1 et 2 de l'exigence E2.1 sont correctes. Les explications et les correctifs apportés sont appropriés.						

			Actions				
No	**Points discutés**	**Décisions**	**Quoi**	**Qui**	**Quand**	**Suivi**	**Fait**
	2. Points 3 et 4 de l'exigence E2.1 Les points 3 et 4 de l'exigence E2.1 sont correctement traités. Les calculs de scénario et les modifications demandées ont été effectués et sont acceptés. Les conclusions du point 3 de l'exigence E2.1 sont particulièrement à relever. Elles soulèvent avec acuité toute la problématique de l'hétérogénéité des argiles des unités géologiques locales et de leurs implications sur les variations de la perméabilité. Tout en étant satisfait des réponses apportées jusqu'ici, l'OEPN tient à souligner que les calculs effectués sur l'alimentation des cailloutis du Sundgau n'enlèvent en rien la nécessité de poursuivre les travaux de modélisation, tels que prévus lors de la séance du 15 décembre 2004 (PV n° 2). Les remarques formulées au point 4.A seront également à vérifier dans le cadre de ce travail. 3. Point 1 de l'exigence E2.3 La version corrigée de la carte piézométrique de l'aquifère des cailloutis du Sundgau a été effectuée et est acceptée. Elle devra toutefois également être intégrée dans les discussions à venir relatives aux écoulements régionaux, ainsi qu'aux résultats de la nouvelle modélisation de l'aquifère du Sundgau et aux besoins de renforcement des données qui pourraient en être déduits pour assurer l'efficacité des barrières hydrauliques.	L'OEPN accepte les réponses fournies par bci pour les points 1, 2, 3, 4 de l'exigence E2.1 et du point 1 de l'exigence E2.3. Les éléments doivent être repris dans les éléments de modélisation en cours. Il est prévu une présentation intermédiaire de la modélisation.	Exigence E2.1 et E2.3. Modèle	OEPN bci	8.03.05 Juin 05		

			Actions				
No	**Points discutés**	**Décisions**	**Quoi**	**Qui**	**Quand**	**Suivi**	**Fait**
2	**Exigences 2.4 Ecoulements régionaux en relation avec l'implantation de nouveaux piézomètres dans la Série des Vosges**						
	bci a présenté la note du 24.02.05. L'OEPN a présenté également ses remarques à propos de cette note (elles seront transmises par mail). Il demande des investigations complémentaires dans la série des Vosges et une coordination avec le BRGM. bci prend connaissance du dossier présenté par les experts et fera part de sa position. La direction de la bci souhaite avoir un contact avec le sous-préfet coordinateur des partenaires français. Ce contact doit être préalable à la rencontre entre experts hydrogéologiques.	Une séance hydrogéologique sera organisée avec les experts de l'OEPN, de la bci et le BRGM. La date sera fixée le plus rapidement possible, suite à une rencontre entre la direction de la bci et le sous-préfet.	Séance	OEPN	A fixer		

Signatures : OEPN bci

Jean Fernex Michaël Fischer

Date, visa : 8.03.05 , SC/AB

Procès-Verbal

Projet DIB	Séance : Groupe hydrogéologie	Séance n° 5
Date : 27.06.05 – 14h00 à 17h00	Lieu : OEPN, St-Ursanne	

Participants :

OEPN : Jean Fernex (JF), André Bapst (AB), Sandrine Schmidt (SC)
bci : Michael Fischer (MF), Rémi Luttenbacher (RL), Anton Aeby (AA)
CSD : Joseph Thierrin (JT)
CHYN : Pierre Perrochet (PP)

Excusés :

CHYN : Daniel Hunkeler (DH)
BRGM : Philippe Elsass (PH)

	Documents / annexes
	• Nouvelle version du CSS remise par bci en version .pdf le 23.06.05
0	**Introduction** L'ordre du jour est accepté sans modifications

			Actions				
N°	**Points discutés**	**Décisions**	**Quoi**	**Qui**	**Quand**	**Suivi**	**Fait**
1	**Premiers résultats de la nouvelle modélisation hydrogéologique**						
	Présentation de JT : Modèle mathématique des écoulements dans les cailloutis du Sundgau – résultats intermédiaires. Les résultats provisoires sont les suivants : - la géométrie du modèle a été définie, - les conditions aux limites ont été fixées, - la calibration n'est pas terminée, mais les corrélations sont relativement bonnes.	Une séance de spécialistes entre les experts du canton (CHYN) et CSD est planifiée dans les bureaux CSD à Berne le 19 juillet 2005. Une séance de présentation des résultats de la modélisation (simulation de différents scénarii) est programmée pour le lundi 19 septembre 2005 à l'OEPN à 14h00.	Séance experts Séance de présentat. des résultats	JT/PP Bci/ OEPN	19.07.05 19.09.05		

			Actions				
N°	Points discutés	Décisions	Quoi	Qui	Quand	Suivi	Fait
	Les questions suivantes ont, entre autres, été discutées; elles seront reprises lors de la réunion du 19 juillet entre spécialistes: - Pourquoi les données piézométriques ont-elles été exploitées sur la durée (moyenne piézométrique sur plusieurs années) ? Pourquoi ne pas utiliser les données piézométriques actuelles en tenant compte du pompage à SG19b ? - Quelles sont les hypothèses de départ sur les conditions aux limites et les perméabilités ? - Comment ont été déterminées les limites du modèle (discontinuité Nord-Sud dans le secteur de la STEP,…..)? - Quelle est la surface d'alimentation des cailloutis du Sundgau en tenant compte du ruissellement de surface ? N'y a-t-il pas des secteurs préférentiels d'infiltrations (anciennes exploitations d'argile par ex.) ? - Pourquoi ne pas avoir étudié des scénarii avec des conditions aux limites différentes ? A la place d'une seule ligne de puits d'infiltration, ne pourrait t-on pas faire des simulations avec des zones d'infiltrations préférentielles, des secteurs de drainage…?						
2	**Essai de pompage à VG53**						
	Présentation par JT des résultats de l'essai de pompage. Le forage VG53 a été réalisé dans un secteur où la géophysique montrait beaucoup de cailloutis et de sable. Le piézomètre est crépiné dans une lentille sableuse, dans	Un rapport résumant ces résultats sera fourni à l'OEPN pour le 15 juillet 2005.	Rapport	bci	15.07.05		

			Actions				
N°	Points discutés	Décisions	Quoi	Qui	Quand	Suivi	Fait
	la partie supérieure de la Série des Vosges, isolée de l'aquifère des Cailloutis. L'essai de pompage a duré une quinzaine de jours à un débit de 5 l/min. Le rabattement maximum a été d'environ 1 m. Le niveau de l'eau dans le piézomètre s'est stabilisé au bout de 4 jours. La question de l'influence de la pression atmosphérique devra encore être éclaircie. Les quelques mesures effectuées dans certains piézomètres des cailloutis du Sundgau (SG53), la série des Vosges et le Karst (SVG31) montrent qu'ils n'ont pas été influencés par le pompage. D'après PP, la stabilisation de la courbe de rabattement est caractéristique d'une réalimentation constante de la nappe, ce qui semble montrer que cette lentille sableuse est assez étendue.						
3	**Mise à jour du CSS**						
	Une version corrigée provisoire du CSS à été remise à AB et JF, par mail le 24.06.05. Le CSS a été mis à jour selon les commentaires du PV de la séance du 4.04.05 et quelques adaptations dans la forme ont été faites. La fréquence d'échantillonnage a été fixée à 9 mois pour les grandes campagnes et 4.5 mois pour les campagnes intermédiaires, conformément au courrier de validation de l'OEPN du 8.06.05. Pour les grandes campagnes, 6 piézomètres ont été sélectionnés pour y effectuer des pompages sur une durée de 24h avant les prélèvements. RL a transmis les	La version du 23.06.05 du CSS sera examinée par l'OEPN et ses experts et une décision sera rendue pour les environs du 20 août 2005.	Approbat. rapport	OEPN	20.08.05		

			Actions				
N°	**Points discutés**	**Décisions**	**Quoi**	**Qui**	**Quand**	**Suivi**	**Fait**
	résultats des évaluations qui ont été faites pour fixer le choix de ces piézomètres (cf. courbes "temps/rayon d'influence" de chacun des piézomètres + commentaires). D'autres piézomètres ont été retenus pour prélever les HHV tous les 4.5 mois.						
4	**Canevas de remise des compléments E1**						
	bci propose de faire des fiches de 1 page/exigence sur lesquelles il y aurait un résumé de l'ensemble de l'information pour chacune des demandes (23 demandes E1). L'introduction et la conclusion du rapport de remise des compléments seraient à faire par le canton.	3-5 demandes seront préparées sur ce modèle et présentées à l'OEPN. Coordination par AA.	Première version du rapport de remise des complm	bci /AA	31.07.05		
5	**Prochaine Séance**						
		Groupe hydrogéologie : séance bci /OEPN/ experts à St Ursanne	Séance n°6	bci / OEPN / experts	19.09.05 à 14h00		

Visa OEPN : 30.06.05 / SC / AB
Visa bci : 4.07.05 / MF

Procès-Verbal

Projet DIB	Séance : Groupe hydrogéologie	Séance n° 6
Date : 19.09.05 – 14h00 à 17h00	Lieu : OEPN, St-Ursanne	

Participants :

OEPN : Jean Fernex (JF), André Bapst (AB), Sandrine Schmidt (SC)
bci : Michael Fischer (MF), Rémi Luttenbacher (RL), Anton Aeby (AA)
CSD : Joseph Thierrin (JT), Bernhard Matter (BM)
CHYN : Pierre Perrochet (PP), Daniel Hunkeler (DH)

Excusés :

	Documents / annexes
	• Rapport bci / CSD (version provisoire) Complément selon exigences de la prise de position du canton du 8.09.04 - 2- géologie et hydrogéologie 2-5 modélisation des écoulements - annexe 2-5-1 - Modélisation mathématique des écoulements souterrains dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau (secteur de la DIB).
0	**Introduction** L'ordre du jour est accepté sans modifications

			Actions				
N°	**Points discutés**	**Décisions**	**Quoi**	**Qui**	**Quand**	**Suivi**	**Fait**
1	**Présentation de la modélisation par JT de CSD : modèle mathématique des écoulements dans les cailloutis du Sundgau.** Pour répondre aux exigences. 2-3, 2-5						

N°	Points discutés	Décisions	Actions				
			Quoi	Qui	Quand	Suivi	Fait
2	**Exigences 2.3. Hydrodynamisme des cailloutis du Sundgau**						
	1. Le nivellement du réseau de piézomètres existant devra être effectué afin de contrôler les niveaux piézométriques. Les écoulements seront ensuite réévalués si nécessaire. 2. Le réseau de surveillance sera réévalué avec l'OEPN et, si nécessaire, complété, notamment à l'E et au SE. Avis OEPN : le nivellement a été fait. Pour la réévaluation du réseau de surveillance, il faudrait vérifier la fréquence d'échantillonnage qui dépend des vitesses d'écoulements. Est-ce que le modèle montre des changements pour les vitesses d'écoulements ? Réponse CSD : les vitesses d'écoulements restent dans l'ordre de grandeur de la première modélisation : 1m/jour dans le sillon perméable sous la décharge. La classe de perméabilité n'a pas changé 2.2 **.**10^{-4}m/s. Avis bci : le modèle n'a pas montré de différence, pour l'état actuel, il n'est pas nécessaire de compléter le réseau de surveillance.	Sous réserve de l'examen de la version définitive du rapport, l'exigence 2-3 est remplie. Si des nouveaux forages sont implantés dans le cadre de la suite des travaux, le CSS pourra être adapté.	Validation Adaptation du CSS	OEPN Bci / OEPN	19.09.05		
3	**Exigence 2.5. Modélisation des écoulements**						
	1. L'utilisation d'un modèle performant est indispensable pour la génération de maillages et de conditions limites adéquates et pour retracer les aspects transitoires, tridimensionnels et variablement saturés des écoulements. 2. Les conditions-limites, telles que les hypothèses, les données, la paramétrisation des variables utilisées, doivent être confirmées pour: a) la quantification des écoulements locaux et régionaux de la DIB, b) le dimensionnement et la localisation des forages d'interception.						

			Actions				
N°	Points discutés	Décisions	Quoi	Qui	Quand	Suivi	Fait
	3. La modélisation de sources de pollution sous la DIB sera faite afin d'apporter des connaissances: a) sur les effets de dilution et de dispersion des cailloutis du Sundgau, b) sur la taille du panache étendu en aval, c) pour l'interprétation des concentrations mesurées sur le terrain. 4. L'effet hydraulique des failles et des fractures sur les écoulements régionaux devra être pris en compte. Point 1 : Suite à la décision du 15 décembre, le choix du type de modèle et du logiciel ont déjà été validés. Point 2 : AVIS CHYN : par rapport au premier modèle, le modèle présenté ici est meilleur. Le modèle retenu et les hypothèses aux conditions limites sont mieux justifiées. Point 3 : AVIS OEPN : il manque la simulation avec un pompage avec SG19b pour valider le point 2-5 3c. Il faut confronter les mesures de terrain avec le modèle. AVIS CHYN : Point a) : la dispersion transversale est critique, faire la simulation avec une grille unique. Faire des scénarios avec des mailles identiques. Actuellement la grille est hétérogène. La dispersivité transverse effective dans le modèle est de l'ordre de la taille de la maille. Par la position des points, il peut déjà y avoir une dispersivité numérique. Point 4 : cf. fin du chapitre 1.2 du rapport.	Illustrer la calibration à SG 19b, ajouter un graphique de corrélation ou une carte pour montrer les différences entre les potentiels calculés et mesurés. Les hypothèses pour les débits de pompage doivent être précisées dans le rapport. Compléter le rapport avec la modélisation des transports présentée au cours de la séance. Evaluer la problématique de la dispersivité transversale par rapport au maillage. Compléter avec les résultats de la simulation du pompage en SG19b, comparés à l'évolution observée dans les piézomètres. Tous les points de l'exigence 2.5 sont admis sauf le point 2-5 3 qui devra être complété.	Rapport Validation partielle	Bci OEPN	30.10.05		

			Actions				
N°	**Points discutés**	**Décisions**	**Quoi**	**Qui**	**Quand**	**Suivi**	**Fait**
4	**Prochaine Séance**						
		Groupe hydrogéologie : séance bci /OEPN/ experts à St Ursanne	Séance si nécessaire n°7	bci / OEPN / experts	9.11.05		

Signatures : OEPN bci

Jean Fernex Michaël Fischer

Procès-Verbal

Projet DIB	Séance : Groupe hydrogéologie	Séance n° 7
Date : 9 novembre 2005 – 14h00 à 17h00	Lieu : OEPN, St-Ursanne	

Participants :

OEPN : Jean Fernex (JF), André Bapst (AB), Sandrine Schmidt (SC)
bci : Michael Fischer (MF), Rémi Luttenbacher (RL), Anton Aeby (AA)
CSD : Joseph Thierrin (JT)
CHYN : Pierre Perrochet (PP), Daniel Hunkeler (DH)

Excusés : P. Elsass (BRGM)

	Documents / annexes
	• Rapport bci / CSD (version du 31 octobre 2005) Annexe 2-5-1 - Modélisation mathématique des écoulements souterrains dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau (secteur de la DIB).
0	**Introduction** L'ordre du jour est accepté sans modification

			Actions				
N°	**Points discutés**	**Décisions**	**Quoi**	**Qui**	**Quand**	**Suivi**	**Fait**
1	**CSD présente les derniers résultats de la modélisation**						
2	**Exigence 2.5-3 : Modélisation des sources de pollution sous la DIB**						
	Les données sont correctes et permettent d'utiliser le modèle. L'OEPN admet que les éléments présentés répondent au besoin. La problématique de la dispersivité devra être précisée pour l'évaluation du réseau d'observation.						

			Actions				
N°	Points discutés	Décisions	Quoi	Qui	Quand	Suivi	Fait
	<u>Dispersivité transversale</u> : 1. Evaluer au moyen d'une solution analytique la dispersivité réelle du panache observé. 2. Connaître la dispersivité numérique contenue dans le modèle de simulation et la comparer avec les valeurs de la littérature.	Les exigences E1 2-5 3 et E1 2-3 sont validées L'évaluation de la problématique de la dispersivité transversale par rapport au maillage doit être effectuée dans le cadre des exigences E2. CSD transmettra une note concernant ce point.	Validation des exigences 2-3 et 2-5 Inclure dans E2-2.6 et E2-2.7	OEPN bci	9.11.05		

Signatures : OEPN bci

Jean Fernex Michaël Fischer

Procès-Verbal

Projet DIB	Séance : Groupe hydrogéologie	Séance n° 8
Date : 24 avril 2006– 14h00 à 17h00	Lieu : OEPN, St-Ursanne	

Participants :

OEPN : Jean Fernex (JF), André Bapst (AB), Sandrine Schmidt (SC)
bci : Michael Fischer (MF), Rémi Luttenbacher (RL)
CSD : Joseph Thierrin (JT)
CHYN : Pierre Perrochet (PP), Daniel Hunkeler (DH)

Excusés : P. Elsass (BRGM)

	Documents / annexes
	• Rapport bci / CSD (version du 3 mars 2006) - Modélisation mathématique des écoulements souterrains dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau (secteur de la DIB). Note complémentaire concernant la dispersivité. • Rapport bci / CSD (version du 13 avril 2006) - Modélisation mathématique des écoulements souterrains dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau (secteur de la DIB). Adaptation du modèle mathématique suite à l'essai de pompage multiple de février et mars 2.6.

			Actions		
N°	Points discutés	Décisions	Quoi	Qui	Quand
1	**Dispersivité :** Le logiciel utilisé par CSD est capable de modéliser les processus de transport.	La note complémentaire du 3 mars est acceptée.	**Note compl.**	**OEPN**	**24.04.06**
2	**Interprétation des essais de pompage :** (tableau 8 page 14)	Interpréter et analyser sommairement les mesures de rabattement en descente dans les puits (nouvelles données fournies par les essais de pompage 2). Ajouter un paragraphe d'explication sur les divers paramètres déduits des essais de pompage et préciser les démarches qui ont permis de calibrer le modèle (discussion des effets de puits)	Compl. interprét.essais de pompage	CSD	10.05.06

N°	Points discutés	Décisions	Actions		
			Quoi	Qui	Quand
3	**Calibration du modèle** :	Comparer les données brutes avec celles du modèle calibré et les interpréter (illustrer par des figures ; Faire une simulation sans les variations très locales d'effet de puits pour appréhender la sensibilité du modèle). Au terme de cette nouvelle version de rapport, une synthèse pour les compléments E1 hydrogéologie sera transmise à l'OEPN.	Calibration Synthèse E1	CSD bci	10.05.06 10.05.06
4	**Nouveaux forages :** Suite à cette modélisation deux nouveaux forages sont proposés. Le forage au NE est surtout fait pour améliorer les observations. Des forages destructifs avec des diamètres plus grands sont proposés (forage en 6 pouces ou plus avec compensation par un massif filtrant).	A affiner avec les scénarios.			
5	**Perspectives d'utilisation du modèle** : L'OEPN demande de simuler une variante "barrière étanche" et d'observer les variations piézométriques pour répondre aux questions des spécialistes des ONG (vérifier les problèmes de réalisation et de coûts). Bci ne souhaite pas entrer d'un point de vue technique dans cette discussion. Les arguments sont suffisants pour démontrer que cette variante n'est pas réaliste.	Pour le plan spécial, l'OEPN souhaite que l'efficacité de la barrière hydraulique soit illustrée sur la base de la modélisation de scénarios (événement, détection, intervention, traitement des eaux polluées). Bci proposera un argumentaire pour justifier la variante retenue (barrière hydraulique). Les scénarios devront être décrits dans la NIE (chapitre hydrogéologie): 6 scénarios sont prévus : - 4 scénarios avec des fuites similaires à SG19b (idem rapport du 31.10.05) - 2 scénarios catastrophes, l'un proche de la bordure N-W (trou de Laufon) et l'autre au S-E.	Scénario NIE	CSD	juin

Signatures :	OEPN	bci
	Jean Fernex	Michael Fischer

Procès-Verbal

Projet DIB	Séance : Rencontre OEPN / BRGM / bci	Séance n°1
Date : 25.05.05 - 14h30 à 17h30	Lieu : OEPN, St-Ursanne	

Participants: **OEPN** : André Bapst, (AB), Jean Fernex (JF), Sandrine Choulot (SC)
CHYN (experts de l'OEPN) : Daniel Hunkeler (DH), Pierre Perrochet (PP)
BRGM : P. Elsass (PE)
bci : Rolf Bentz (RB), Michaël Fischer (MF), Christoph Munz (CM), Joseph Thierrin (JT)

Excusés : -

	Documents / annexes
	• Exigences E1 de la prise de position de la République et Canton du Jura : 2.4 Hydrodynamisme de la série des Vosges. *« Des piézomètres devront être posés dans la série des Vosges dans le but d'augmenter les connaissances sur les écoulements »*.
0	**Introduction** AB rappelle par une présentation qu'elles sont les exigences du Canton concernant l'hydrogéologie et plus particulièrement l'exigences E1.2.4

N°	Points discutés	Décisions
1	**Présentation des points de vue de chaque partie**	
	AVIS OEPN : les experts et l'OEPN proposent 3 nouveaux piézomètres à mettre en place dans la série des Vosges : 1) à coté de SG 46, 2) entre VG53 et SVG 31, 3) entre la STEP et SP91 (cf. séance précédente). Pour vérifier les éléments de l'analyse de risque retenue, l'efficacité de la barrière d'intervention retenue… il est nécessaire d'avoir des éléments supplémentaires. AVIS BRGM : le BRGM est missionné par la DIREN Alsace pour le suivi hydrogéologique de la décharge de Bonfol. PE fait remarquer que tous les écoulements superficiels arrivent en France. Pour la surveillance des eaux souterraines seuls 3 piézomètres sont actuellement surveillés sur le territoire français. Il y a une lacune de connaissance à ce niveau. Quelle est la direction des écoulements de la nappe de la série des Vosges ? Quelle est l'origine des eaux souterraines qui alimentent le ruisseau du Rosersbach ? PE propose de mettre en place 3 piézomètres.	

N°	Points discutés	Décisions
	Avis bci : les investigations hydrogéologiques et la surveillance doivent être faites dans le but de la surveillance de l'assainissement. La surveillance doit se concentrer sur l'aquifère des cailloutis du Sundgau qui possède la meilleure perméabilité. Il n'est pas nécessaire de surveiller ailleurs les eaux souterraines. Les autres formations sont très peu perméables et très hétérogènes, avec quelques piézomètres, il n'est pas possible de définir le fonctionnement exact de la série des Vosges. Les lentilles sableuses sont séparées par des niveaux argileux. Il ne serait pas efficace de pomper dans la série des Vosges en cas de pollution. Si une pollution arrive dans la série des Vosges, l'impact sur les eaux superficielles et souterraines n'est pas significatif. Les deux écrans de forage ont été prévus pour surveiller et le cas échéant intervenir durant les travaux d'assainissement. Il n'est pas nécessaire d'évaluer d'autres scénarios. bci conseille d'améliorer l'efficacité des deux écrans plutôt que de faire de nouvelles investigations techniques qui ne serviront pas à l'assainissement en lui-même. Réponse CHYN : PP ne remet pas en cause le concept de sécurité proposé par bci qui est jugé bien conçu, mais il fait remarquer que des lentilles sableuses dans la SV peuvent avoir de bonnes perméabilités. La couche d'argile à la base des cailloutis n'est pas nécessairement continue (écoulements verticaux possibles). Les polluants pourront migrer éventuellement au moment de l'assainissement dans ces zones sableuses. Il sera alors nécessaire de contrôler la SV et éventuellement de pouvoir intervenir. L'objectif des nouveaux forages est de pouvoir se prononcer sur les écoulements régionaux et éventuellement d'intervenir en cas de problèmes au moment de l'assainissement. PP rappelle qu'au départ il s'agissait d'évaluer des rapports hydrogéologiques. PP et DH ont mis en évidence des incohérences et des contradictions du point de vue hydrogéologique dans ces rapports. Il mentionne que les suppléments demandés sont modestes et correspondent aux méthodes habituelles d'investigations hydrogéologiques.	

Nr	Notes diverses	Décisions
2	**Discussion**	
	RB se demande, vu l'état actuel du projet général, si cela a un sens de faire ces forages. JF constate que des éléments bloquent le projet à un autre niveau que les éléments techniques. Afin de débloquer la situation des propositions sont faites par les différentes parties : AVIS OEPN : JF s'engage au nom du Canton, qu'il ne sera pas demandé plus que 3 piézomètres dans la série des Vosges, dans la mesure où les résultats confirment les hypothèses actuelles. AVIS BRGM : est d'accord avec l'avis du canton Avis bci : RB mentionne un courrier envoyé au GVT (7.10.04 date avancée par RB). bci ne financera les forages que dans le cas où une contamination significative provenant de la DIB serait détectée. MF propose de faire des investigations dans le VG 53 (pompage continu et analyses chimique) pour vérifier l'hypothèse de bci que dans la série des Vosges il n'y a que des corps sableux confinés.	La demande qui a été faite, dans le cadre de la prise de position de l'OEPN, est maintenue. Si des investigations sont faites dans les limites demandées, le Canton du Jura ne demandera pas d'éléments complémentaires dans la série des Vosges. Des investigations seront réalisées par bci dans le VG 53, au cours du mois de juin 2005 (pompage continu pendant 10 jours et analyses chimiques) pour évaluer si le corps sableux de VG53 est confiné. bci informera l'OEPN du début des investigations. Les résultats seront présentés lors de la séance prévue fin juin pour les résultats de la modélisation dans les cailloutis du Sundgau.

Signatures : **OEPN** **bci**

Jean Fernex

Michaël Fischer

Courrier de validation

JURA CH RÉPUBLIQUE ET CANTON DU JURA
DÉPARTEMENT DE L'ENVIRONNEMENT ET DE L'ÉQUIPEMENT

OFFICE DES EAUX ET DE LA PROTECTION DE LA NATURE

Les Champs Fallat
CH-2882 Saint-Ursanne

t +41 32 420 48 00
f +41 32 420 48 11
oepn@jura.ch

Office des eaux et de la protection de la nature – Les Champs-Fallat, 2882 Saint-Ursanne

bci Betriebs-AG
c/o Ciba Spezialitätenchemie AG
M. Michael Fischer
K-24.2.27, Postfach
4002 Basel

St-Ursanne, le 16 octobre 2006

DIB / COUVA_2. Approbation des compléments hydrogéologiques au projet d'assainissement, selon les exigences E2.1, E2.3, E2.4 et E2.5 de la prise de position du 08.09.04.

Monsieur,

Sur la base des données fournies dans le rapport intitulé « Synthèse des réponses aux exigences E1 et E2» du 28 juin 2006, et dans l'annexe 2 qui lui est associée, mis ensemble en consultation durant l'été 2006, nous sommes à même de répondre favorablement à l'acceptation des réponses aux 4 exigences E1 citées en marge, soit:

2. Hydrogéologie
E2.1 Hydrodynamisme de la Formation des Argiles bigarrées de Bonfol
E2.3 Hydrodynamisme des cailloutis du Sundgau
E2.4 Hydrodynamisme de la Série des Vosges
E2.5 Modélisation des écoulements

L'annexe 2 précitée regroupe l'ensemble des documents remis au Canton pour répondre aux 4 exigences E1 du domaine hydrogéologique.

Ces réponses sont brièvement résumées dans le tableau joint en annexe. Elles ont été individuellement validées lors des séances bilatérales RCJU – bci, de la façon suivante :

- **E2.1 :** selon le PV du 08.03.05, l'OEPN accepte les réponses fournies pour l'intégralité de cette exigence, sur la base des notes présentées en annexes n° 2.1.1 (08.12.04) et n° 2.1.2 (02.02.05).
- **E2.3 :** selon le PV du 08.03.05, l'OEPN accepte la réponse fournie pour le premier point de cette exigence, à savoir le renouvellement du nivellement du réseau piézométrique, sur la base des notes présentées en annexes n° 2.1.1 (08.12.04) et n° 2.1.2 (02.02.05).

  Concernant plus particulièrement le deuxième point, à savoir la réévaluation et le complément du réseau de surveillance dans les Cailloutis du Sundgau, il a été accepté

dans le PV du 09.11.05, sur la base d'un rapport initial sur la modélisation des écoulements. Ce rapport figure actuellement dans sa version réactualisée en annexe 2.5.1 (28.06.06).

- **E2.4 :** des rapports complémentaires ont été produits par la bci pour apporter des précisions sur la géologie de la Série des Vosges (annexes n° 2.4.1 du 24.02.05 et 2.4.2 du 19.08.05). Cependant, sur l'insistance du Canton, ce n'est que sur la base de la lettre de bci du 17 mai 2006, stipulant son acceptation de réaliser 3 forages complémentaires dans la Série des Vosges, que l'OEPN a pu considérer que cette exigence était remplie.
- **E2.5 :** selon le PV du 24.04.06, l'OEPN accepte la réponse fournie pour cette exigence, à savoir la modélisation des écoulements, sur la base des notes présentées en annexes n° 2.5.1 à 2.5.4. Les scénarii de contamination ont pour leur part été acceptés par mail le 31.05.06, sur la base de la note du 19 mai 2006 (annexe 2.5.4).

Sur la base des éléments précités, l'OEPN accepte les réponses fournies et valide formellement les exigences E1 du domaine hydrogéologique.

Il va de soi que l'ensemble des interprétations hydrogéologiques et la modélisation des écoulements doivent être en permanence tenues à jour en fonction de l'avancement du projet et des nouvelles données de terrain.

Dans ce contexte, nous vous adressons, Monsieur, nos salutations les meilleures.

Jean-Pierre Meusy
Chef de l'OEPN

Annexe : - *Synthèse des positions OEPN sur la validation des 4 exigences hydrogéologiques*

Synthèse des positions OEPN sur les 4 exigences hydrogéologiques

N°	Position OEPN sur informations et réponses fournies	
E2.1	L'OEPN a accepté les éléments fournis pour les réponses aux divers points relatifs à la demande, tout en insistant sur le fait qu'ils devaient être repris dans les bases du modèle mathématique de simulation des écoulements et du transport dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau.	
E2.3	L'OEPN a accepté les éléments fournis pour les réponses aux deux points relatifs à la demande. Dans un courrier transmis à la bci le 16 août 2006, en réponse à une note bci du 4 août 2006 et au rapport de modélisation du 28 juin 2006 (annexe 2.5.1), il a validé les implantations de 4 nouveaux piézomètres dans les Cailloutis du Sundgau pour y assurer le contrôle des écoulements souterrains. A ce stade, il a été admis que la vérification du modèle mathématique de simulation des écoulements et du transport dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau devait encore être réalisée par des essais de pompage (exigence E2, n° 2.6)	
E2.4	L'OEPN a validé la présente exigence, avec l'accord du BRGM (lettre du 14 juin 2006). Sur la base de la note bci du 4 août 2006, l'OEPN a ensuite validé les implantions exactes des piézomètres, qui sont actuellement réalisés. L'OEPN demande que ces 3 points soient bien évidemment intégrés dans le programme CSS actuellement en vigueur.	
E2.5	L'OEPN a validé la présente exigence. A ce stade, il a été admis que la vérification du modèle mathématique de simulation des écoulements et du transport dans l'aquifère des cailloutis du Sundgau devait encore être réalisée par des essais de pompage (exigence E2, n° 2.6).	