



Etudes complémentaires sur les forages de la vallée de l’Aff : réinterprétation des essais de pompage, analyses physico-chimiques et isotopiques

Rapport final

BRGM/RP-64225-FR

Mars 2015



Etudes complémentaires sur les forages de la vallée de l’Aff : réinterprétation des essais de pompage, analyses physico-chimiques et isotopiques

Rapport final

BRGM/RP-64225-FR

Mars 2015


B. Dewandel, E. Petelet-Giraud, F. Lucassou
Avec la collaboration de
F. Koch, V. Vergnaud

Vérificateur :

Nom : O. DOUEZ

Date : 16/03/2015

Signature :



Approbateur :

Nom : E. PALVADEAU

Directeur du BRGM Bretagne

Date : 17/03/2015

Signature :



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



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots-clés : eau souterraine, relation nappe-rivière, pompage longue durée, isotopes, datation des eaux, Bretagne, Beignon, Paimpont, Aff

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

Dewandel B., Petelet-Giraud E., Lucassou F. avec la collaboration de Koch F., Vergnaud V. (2015) – Etudes complémentaires sur les forages de la vallée de l’Aff : réinterprétation des essais de pompage, analyses physico-chimiques et isotopiques. Rapport final. BRGM/RP-64225-FR, 71 p., 35 ill., 13 tabl., 3 ann.

Synthèse

Les Directions Départementales des Territoires et de la Mer d’Ille-et-Vilaine et du Morbihan (DDTM 35 et 56) ainsi que le syndicat départemental Eau du Morbihan ont sollicité le BRGM Bretagne pour les assister dans l’évaluation de l’incidence sur le débit de l’Aff de l’exploitation de 3 forages exploités par Eau du Morbihan pour l’Alimentation en Eau Potable (AEP), sur les communes de Beignon (56) et Paimpont (35).

Le BRGM a réalisé les études complémentaires suivantes afin d’étudier les relations éventuelles entre l’Aff et les forages exploités :

- réinterprétation des essais de pompage réalisés sur les ouvrages FE3, FE4 et FE7 en 2007 et en 2010, dans le but de mettre en évidence ou non un potentiel lien entre l’aquifère capté et le cours d’eau de l’Aff ; les pompages étant suspectés d’assécher une partie du cours d’eau.
- analyses physico-chimiques, isotopiques et datation des eaux sur les 3 forages (AEP), sur l’Aff et sur un autre forage captant le même aquifère (schistes briovériens) mais à distance de l’Aff.

Ces études ont confirmé la complexité de ce site : signature atypique en strontium pour un aquifère briovérien, pertes du cours d’eau inhabituelles en zone de socle, débits souterrains exceptionnellement élevés en zone de socle, aquifère très compartimenté.

Les deux approches utilisées dans cette étude, hydrodynamique et géochimique, montrent une dualité mais fournissent néanmoins des résultats tangibles.

La réinterprétation des essais de pompage a mis en évidence un comportement hydrodynamique différent des forages en pompage en période de hautes et basses eaux du cours d’eau (respectivement en 2007 et en 2010) et des effets de drainance des formations géologiques superficielles, montrant l’influence des systèmes de surface sur les eaux souterraines. De plus, des pertes importantes au sein du cours d’eau et à proximité des forages ont été constatées (AQUASCOP, 2013).

Du point de vue géochimique, aucun impact quantifiable d’eau récente dans les eaux souterraine n’a été mis en évidence, notamment sur le forage FE7, sur lequel on a constaté une absence de tritium et de CFCs-SF6 et une faible température de recharge suggérant une eau ancienne (rechargée avant les années 1950). Cependant, les pertes, mesurées par AQUASCOP en 2013 dans le cours d’eau et susceptibles d’atteindre les eaux souterraines, sont très probablement négligeables en termes de volume par rapport au volume d’eau présent dans l’aquifère capté par les forages. Il est donc possible que cet effet de dilution par des eaux plus superficielles et donc récentes, ajouté à la très faible minéralisation de l’eau de la rivière, masque l’infiltration d’eau récente de la surface vers la profondeur. L’eau souterraine étant captée en profondeur par les forages (à plus de 45 m), il est aussi possible que les infiltrations d’eau de surface restent trop superficielles pour être captées par les forages, ou suivent un chemin différent qui ne serait pas capté par les forages.

On peut donc supposer qu’il s’agit d’un aquifère stratifié verticalement, sans mélange homogène de l’eau sur son épaisseur, mais aussi compartimenté latéralement par les nombreuses fractures (comportement hydrodynamique et signature chimique différents pour chaque forage). Des effets de drainance, plus ou moins forts, ont été constatés au niveau des

3 forages, montrant une connexion hydraulique avec la surface, bien qu'elle ne soit pas visible sur les analyses géochimiques. Il est cependant difficile d'estimer réellement l'impact des pompages sur le cours d'eau, faute d'état initial avant la mise en service des ouvrages.

Ce site mériterait des investigations complémentaires afin de mieux comprendre son comportement hydrogéologique et les relations entre l'aquifère et la surface. La mise en place de stations de jaugeage sur le cours d'eau en amont et en aval des forages, la réalisation de traçage au niveau des pertes ainsi qu'un suivi temporel de la chimie des eaux souterraines de sub-surface et profondes permettraient de répondre à ces questionnements.

Sommaire

1 Introduction.....	9
1.1 CONTEXTE DE L’ETUDE.....	9
1.2 OBJECTIFS DE L’ETUDE.....	10
2 Contexte géologique	11
3 Réinterprétation des essais de pompage	13
3.1 SUIVI DES ESSAIS DE POMPAGE.....	14
3.2 ESSAIS DE POMPAGE DE LONGUE DUREE	16
3.2.1 Méthodologie utilisée pour interpréter un pompage de longue durée	16
3.2.2 Diagnostic et modélisation de l’essai réalisé en 2007-2008 sur FE7	18
3.2.3 Diagnostic et modélisations des essais réalisés en 2010 sur FE3, FE4 et FE7	22
3.3 IMPACT DES POMPAGES SUR LE DEBIT DU COURS D’EAU	28
3.4 CONCLUSION SUR LA REINTERPRETATION DES ESSAIS DE POMPAGE	41
4 Analyses physico-chimiques et isotopiques	43
4.1 PRELEVEMENTS.....	43
4.2 ANALYSES.....	44
4.3 INTERPRETATION.....	45
4.3.1 Paramètres physico-chimiques	45
4.3.2 Chimie des eaux.....	45
4.3.3 Les isotopes du strontium	48
4.3.4 Temps de résidence des eaux	50
5 Conclusion	55
6 Bibliographie.....	57

Liste des illustrations

Illustration 1 : Localisation des 3 forages d’eau potable dans la vallée de l’Aff (en rouge).....	10
Illustration 2 : Extrait des cartes géologiques de Ploërmel (n°351) et Guer (n°352) au 1/50 000 (source : Infoterre, BRGM).....	11
Illustration 3 : Localisation, sur fond IGN, des forages exploités (FE3, FE4 et FE7) et des piézomètres (Pz) suivis pendant les essais de pompage (source : rapport Terre et Habitat – Eau & Industrie, mai 2008) – chiffres annotés en rouge : fin du code BSS (03514X00..)	13
Illustration 4 : Essai de pompage réalisé sur FE7 en 2007-2008 avec suivis des interférences sur Pz1, Pz2, Pz3, Pz4, SR1, SR2, SR3 et SR4. Les valeurs des rabattements sur Pz1, Pz2, Pz3, SR2 et SR3, sont des valeurs minimales (pas de mesures des niveaux initiaux avant pompage).....	15
Illustration 5 : Essais réalisés en 2010 sur FE3, FE4 et FE7 en pompage simultané. Les ouvrages Pz1, Pz2, Pz3 et Pz4 ont servi de piézomètres d’observation.	15
Illustration 6 : Méthodologie mise en œuvre pour l’interprétation de pompages d’essai. Utilisation des dérivées des rabattements pour diagnostiquer les essais.	16
Illustration 7 : Exemple de succession des régimes d’écoulement lors d’un pompage dans un aquifère rectangulaire clos. t_D : temps adimensionnel, s_D (courbe pleine) et s_D' (courbe tiretée) : rabattement et dérivée du rabattement (adimensionnel).	17
Illustration 8 : Diagnostic de l’essai réalisé en 2007-2008 au forage FE7.	19
Illustration 9 : Modélisation du rabattement au forage FE7 ; essai 2007-2008. Modèle : Hunt et Scott modifié.....	20
Illustration 10 : Comparaison des diagnostics des essais réalisés en 2007-2008 et 2010 sur le forage FE7.	23
Illustration 11 : Modélisation du rabattement au forage FE7 ; essai 2010. Modèle : Hunt et Scott modifié.....	24
Illustration 12 : Débit de l’Aff durant les essais 2007-2008 et 2010.	25
Illustration 13 : Comparaison des diagnostics des essais réalisés sur les forages FE3 et FE7 (essai 2010)	26
Illustration 14 : Comparaison des diagnostics des essais réalisés sur les forages FE4 et FE7 (essai 2010)	27
Illustration 15 : Modèle de Hunt (2003)	28
Illustration 16 : Modèle de Hunt (2003) modifié avec prise en compte de limites étanches	29
Illustration 17 : Modélisation du rabattement au forage FE7 ; essai 2007-2008. Modèle : Hunt (2003).	31
Illustration 18 : Modélisation du rabattement au forage FE7 ; essai 2010. Modèle : Hunt (2003).32	
Illustration 19 : Impact des essais par pompage réalisés en FE7 sur l’Aff. Graphe du haut : essai 2007-2008 ; graphe du bas : essai 2010. Modèle : Hunt (2003).	33
Illustration 20 : Effet de la variation de profondeur d’incision du cours d’eau sur la baisse de débit du cours d’eau (impact sur le cours d’eau). FE7 2007-2008. Graphe du bas : zoom sur le graphe du haut.	35
Illustration 21 : Effet de de la variation de profondeur d’incision du cours d’eau sur la baisse de débit du cours d’eau (impact sur le cours d’eau). FE7 2010. Graphe du bas : zoom sur le graphe du haut.	36

Illustration 22 : Configuration des limites par rapport au cours d’eau. Modèle : Hunt modifié....	37
Illustration 23 : Modélisation du rabattement au forage FE7 ; essai 2007-2008. Modèle : Hunt modifié.	38
Illustration 24 : Modélisation du rabattement au forage FE7 ; essai 2010. Modèle : Hunt modifié.	39
Illustration 25 : Impact des essais par pompage réalisés en FE7 sur l’Aff. Graphe du haut essai 2007-2008 ; graphe du bas ; essai 2010. Modèle Hunt modifié.....	40
Illustration 26 : Mesures de débit de le long de l’Aff au niveau des captages ; mise en évidence de zones de pertes au sein du cours d’eau ; Rapport Aquascop, 2013.....	42
Illustration 27 : Localisation des points de prélèvements (forages et Aff).....	44
Illustration 28 : Diagramme de Piper des eaux de la rivière Affet des forages de cette étude ...	46
Illustration 29 : Relation entre sodium et chlorure dans les eaux du site d’étude. Comparaison avec la droite de dilution de l’eau de mer et les deux sites d’études dans les schistes briovériens (Coët Dan ; Négreel et Pauwels, 2004 ; Vau-Reuzé : Ayraud et al., 2006).	47
Illustration 30 : Relation entre calcium et chlorure dans les eaux du site d’étude. Comparaison avec la droite de dilution de l’eau de mer et les deux sites d’études dans les schistes briovériens (Coët Dan ; Négreel and Pauwels, 2004 ; Vau-Reuzé : Ayraud et al., 2006).	48
Illustration 31: Représentations graphiques d’un mélange binaire avec des isotopes du Sr.....	49
Illustration 32 : $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en fonction de la teneur en Sr et de l’inverse de la teneur en Sr pour les échantillon du secteur d’étude.	50
Illustration 33 : Teneurs en tritium des eaux du secteur d’étude. Activité à fin novembre 2014, période du trium 12.32 ans.	51
Illustration 34 : Evolution de la concentration en CFC dans l’atmosphère de l’hémisphère nord (données NOAA-USGS)	52
Illustration 35 : Graphique représentant les concentrations en argon et néon des points analysés et permettant de « lire » la température de recharge	53

Liste des tableaux

Tableau 1 : Essais par pompage disponibles sur les forages situés dans la vallée de l’Aff.....	14
Tableau 2 : Paramètres hydrodynamiques utilisés pour la modélisation de l’essai sur le forage FE7 réalisé en 2007-2008. Cf. Annexe 1 et Tableau 3 pour l’explication des paramètres (modèle Hunt et Scott modifié).	21
Tableau 3 : Paramètres du modèle à effet de drainance (modèle modifié de Hunt et Scott, 2007)	21
Tableau 4 : Comparaison des paramètres hydrodynamiques utilisés pour la modélisation des essais sur le forage FE7 en 2007-2008 et 2010. Cf. Annexe 2 pour l’explication des paramètres (modèle Hunt et Scott modifié).	25
Tableau 5 : Comparaison des paramètres hydrodynamiques déduits de l’ensemble des tests sur FE3, FE4 et FE7. Cf. Annexe 2 pour l’explication des paramètres (modèle Hunt et Scott modifié).	27
Tableau 6 : Paramètres des modèles avec prise en compte d’un cours d’eau : modèle de Hunt (2003) et modèle modifié de Hunt. Seul le deuxième modèle prend en compte les effets de limites.	29
Tableau 7 : Paramètres hydrodynamiques utilisés pour la modélisation des essais sur le forage FE7 réalisés en 2007-2008 et en 2010. Modèle : Hunt (2003).	34

Tableau 8 : Statistiques des débit de l’Aff (en l/s) au moment des essais de pompage réalisés en 2007-2008 et en 2010.....	36
Tableau 9 : Paramètres hydrodynamiques utilisés pour la modélisation des essais sur le forage FE7 réalisés en 2007-2008 et 2010. Modèle Hunt modifié.....	41
Tableau 10 : Détail des analyses réalisées sur les forages EAP, l’Aff et le forage ANETT	44
Tableau 11 : Résultats d’analyse de gaz dissous	52
Tableau 12 : Résultats bruts des analyses de datation par CFC et SF6 (pptv : parties par billion (10 ¹²) en volume)	53
Tableau 13 : Calcul de pourcentage d’eau récente (2013) indiqué par chaque traceur pour FE3 et FE4.....	54

Liste des annexes

Annexe 1 Coupes géologiques et techniques des 4 forages étudiés	59
Annexe 2 Modèle modifié de Hunt et Scott (2007).....	65
Annexe 3 Paramètres physico-chimiques et résultats des analyses chimiques	69

1 Introduction

1.1 CONTEXTE DE L’ETUDE

Les prélèvements destinés à l’Alimentation en Eau potable (AEP) du secteur de Beignon étaient effectués au niveau d’une prise d’eau de surface dans l’Aff jusqu’à fin 2011. En substitution de ce prélèvement sur l’Aff (ressource non protégée), des recherches d’eau souterraine ont été entreprises entre 2006 et 2008 : 3 forages (FE3, FE4 et FE7) ont été réalisés sur le site du Pont de la Lande (Illustration 1), dans la vallée de l’Aff sur les communes de Beignon (56) et Paimpont (35), en amont de l’ancien prélèvement d’eau de surface. Il s’agit de la seule ressource AEP du secteur, gérée par Eau du Morbihan. Ce site est localisé à l’extrémité ouest des synclinaux paléozoïques du sud de Rennes, sur les Schistes rouges de Pont Réan, d’âge paléozoïque. Ces schistes sont surmontés par les Grès armoricains et recouvrent les Schistes briovériens, qui affleurent plus au sud. Les trois forages ont une productivité très élevée en comparaison des résultats habituels dans les aquifères de socle (70 à 100 m³/h au soufflage).

L’Aff, cours d’eau qui marque la frontière entre les départements d’Ille-et-Vilaine et du Morbihan, est connu pour avoir des étiages sévères (pas d’écoulement mais persistance de flaques). Cependant, depuis la mise en service des forages en mai 2012, il semblerait que le débit de l’Aff à l’étiage ait fortement diminué (assec total sur plusieurs kilomètres).

En octobre 2013, les Directions Départementales des Territoires et de la Mer d’Ille-et-Vilaine et du Morbihan (DDTM 35 et 56) ont sollicité le BRGM Bretagne pour les assister dans l’évaluation de l’incidence de l’exploitation des 3 forages exploités pour l’AEP sur le débit de l’Aff, sur les communes de Beignon (56) et Paimpont (35).

En janvier 2014, le BRGM a remis aux 2 DDTM une note intitulée « Besoin d’évaluation de l’incidence de l’exploitation de 3 forages d’eau souterraine (communes de Beignon et Paimpont) sur le débit de l’Aff – Détermination des modalités d’appui du BRGM » en préconisant des études complémentaires afin de mieux évaluer l’incidence possible des forages sur le débit de la rivière (réinterprétation des essais de pompage et la réalisation d’analyses physico-chimiques et isotopiques).

Ce rapport présente les résultats de ces études complémentaires, financées par les 2 DDTM, Eau du Morbihan et le BRGM.

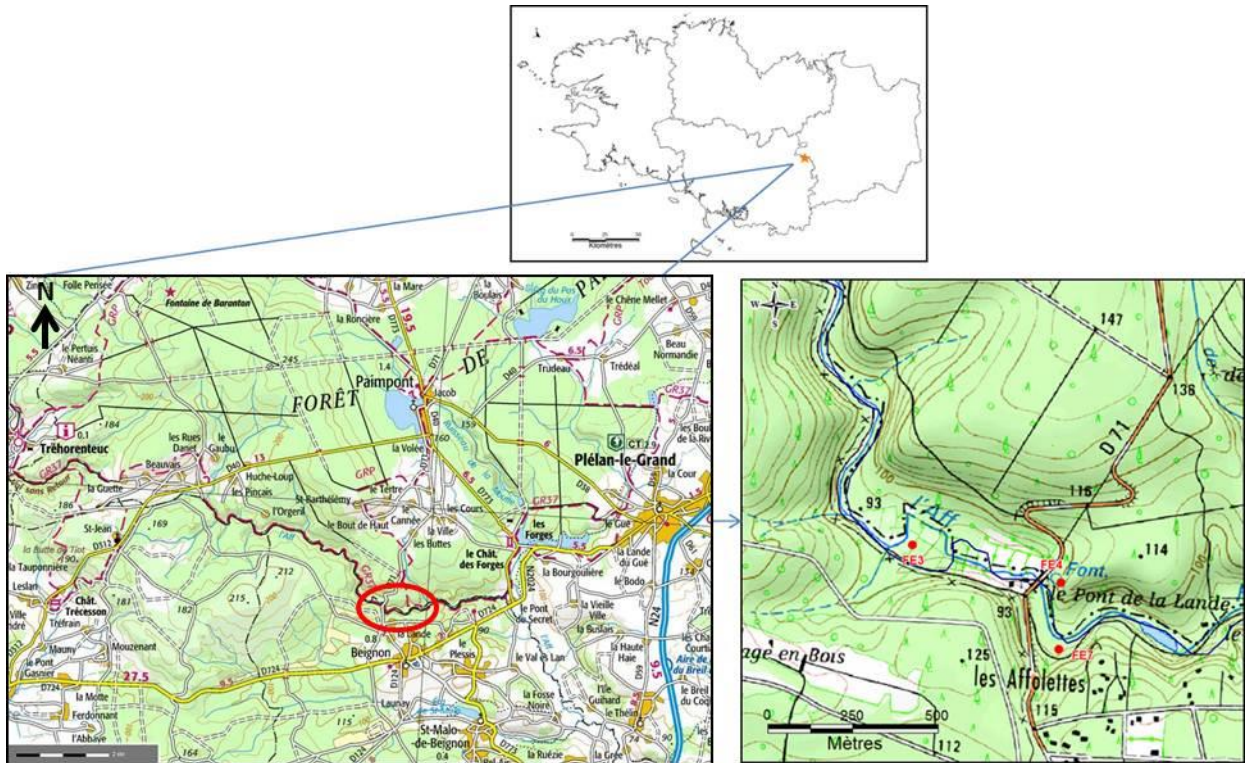


Illustration 1 : Localisation des 3 forages d'eau potable dans la vallée de l'Aff (en rouge)

1.2 OBJECTIFS DE L'ETUDE

A la demande des 2 DDTM et d'Eau du Morbihan, le BRGM a réalisé les études complémentaires suivantes afin d'étudier les relations éventuelles entre l'Aff et les forages exploités :

- Réinterprétation des essais de pompage réalisés sur les ouvrages FE3, FE4 et FE7 en 2007 et en 2010. Cette réinterprétation concerne les données aux puits de pompage uniquement, dans le but de mettre en évidence ou non un potentiel lien entre l'aquifère capté et le cours d'eau de l'Aff.
- Analyses physico-chimiques, isotopiques et datation des eaux.

2 Contexte géologique

Le site du Pont de la Lande est implanté à l’extrémité ouest des synclinaux paléozoïques du sud de Rennes, sur les Schistes rouges de Pont Réan (notation O2B - Illustration 2), d’âge paléozoïque. Ces schistes recouvrent les Schistes briovériens, qui affleurent plus au sud (notations b2S et b3S). Les schistes rouges sont surmontés par les Grès armoricains (buttes en vert clair, notation O2).

L’Aff a un cours sinueux, avec des virages à l’équerre, liés aux nombreuses failles du secteur (orientation principale N150).

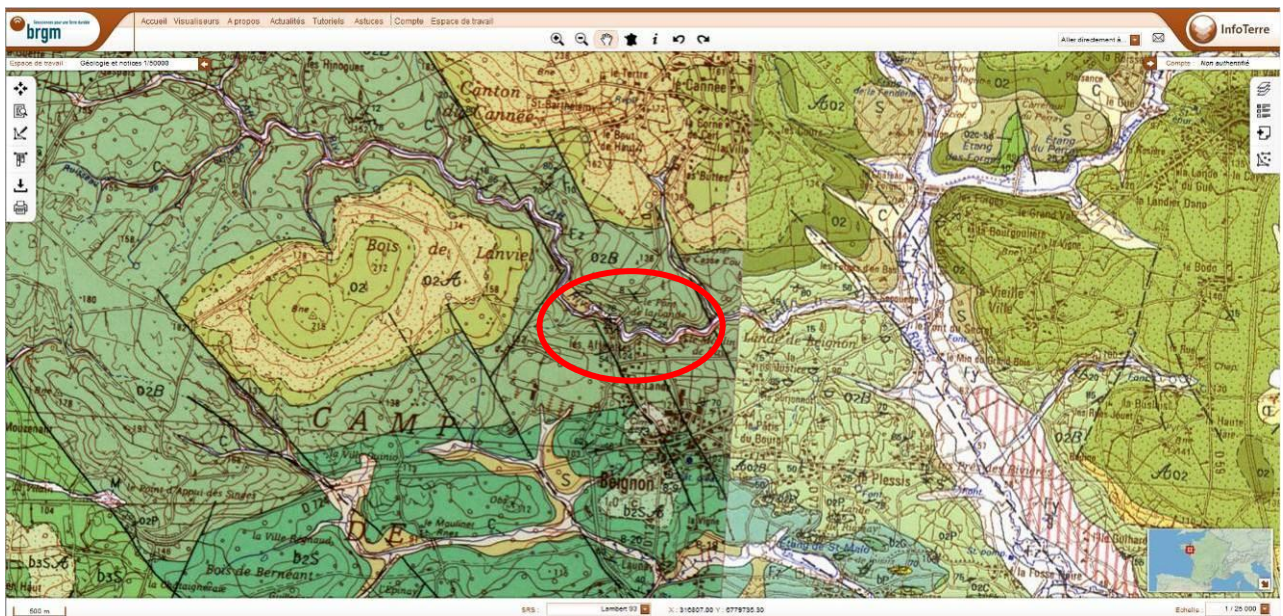


Illustration 2 : Extrait des cartes géologiques de Ploërmel (n°351) et Guer (n°352) au 1/50 000 (source : Infoterre, BRGM)

Les 3 forages AEP (03514X0088/FE3, 03514X0089/FE4 et 03514X0090/FE7 - Illustration 1) ont été réalisés en 2007 puis ré-alésés et équipés en 2008. Ils captent en profondeur l’aquifère des Schistes briovériens fracturés, sous recouvrement des Schistes rouges de Pont Réan (zone cimentée, non crépinée). Le forage FE3 est profond de 102 m, cimenté sur les 45 premiers mètres, puis crépiné. Le forage FE4 est profond de 150 m, cimenté sur les 44 premiers mètres et il est crépiné de 48 à 135 m ; le reste de l’ouvrage a été rebouché. Le forage FE7 est profond de 97 m, cimenté sur les 49 premiers mètres et il est crépiné à partir de 62 m.

Les coupes géologiques et techniques des ouvrages sont disponibles en Annexe 1.

3 Réinterprétation des essais de pompage

Plusieurs essais de pompage ont été réalisés par Terre & Habitat sur le champ captant :

- un essai longue durée (62 jours) sur le forage FE7 en 2007, avec suivi de 4 piézomètres,
- un essai longue durée (57 jrs) avec pompage simultané sur les 3 forages en 2008 et suivi de 7 piézomètres,
- un essai longue durée (106 jrs) avec pompage simultané sur les 3 forages en 2010 et suivi de 4 piézomètres.

Sur la base des données numériques mesurées en continu par Terre & Habitat lors des essais de pompages réalisés en 2007 et en 2010 (temps de pompage, variations des débits pompés et niveaux piézométriques suivis dans tous les ouvrages), une réinterprétation de ces essais a été réalisée.

Figure 1 – Localisation des ouvrages de la vallée de l’Aff – commune de Belgnon

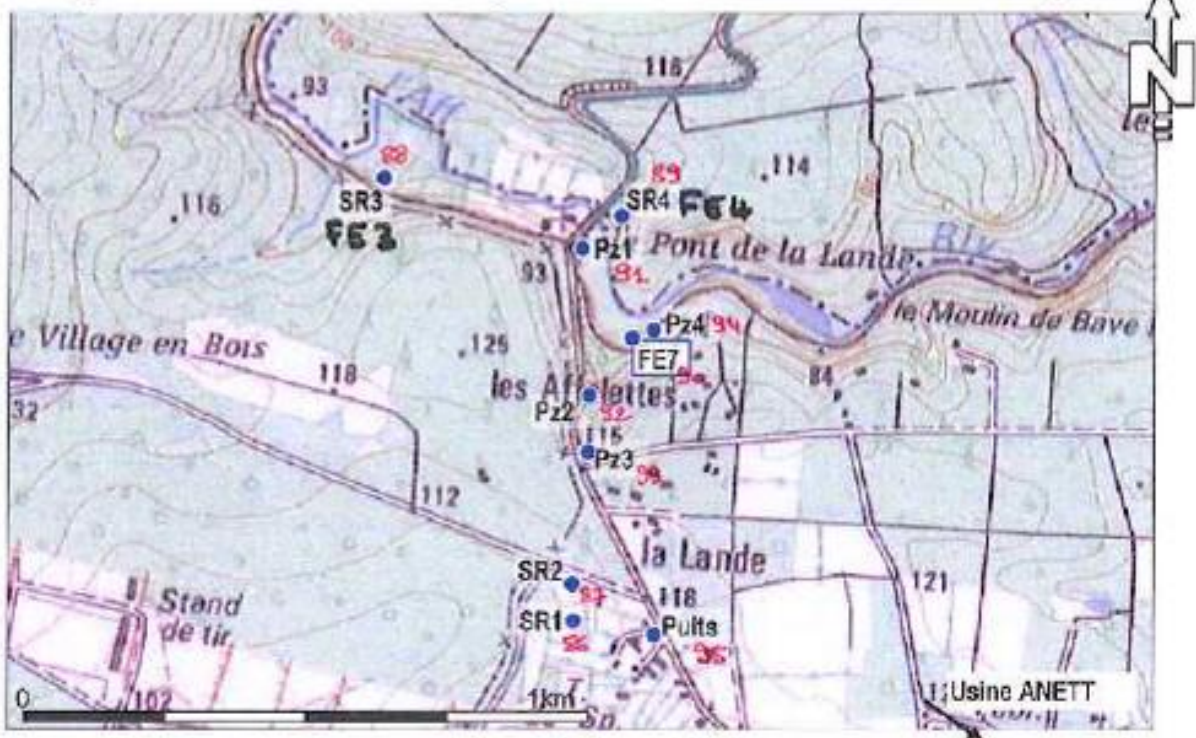


Illustration 3 : Localisation, sur fond IGN, des forages exploités (FE3, FE4 et FE7) et des piézomètres (Pz) suivis pendant les essais de pompage (source : rapport Terre et Habitat – Eau & Industrie, mai 2008) – chiffres annotés en rouge : fin du code BSS (03514X00..)

NB : au moment des pompages de 2007, les ouvrages FE3 et FE7 n’avaient pas encore été transformés en forage d’exploitation, d’où la notation SR sur l’Illustration 3 (Sondages de Reconnaissance).

3.1 SUIVI DES ESSAIS DE POMPAGE

Le tableau suivant présente l’ensemble des données disponibles :

	FE7_2007	FE3_2010	FE4_2010	FE7_2010
Période du pompage	06/12/2007-06/02/2008	06/09/2010-06/01/2011	06/09/2010-06/01/2011	06/09/2010-06/01/2011
Durée du pompage de longue durée (j)	63	122	122	122
Débit moyen du pompage de longue durée (m³/h)	45à 50	37 à 43,5	31 à 34	43 à 48
Source	SIAEP Guer Beignon Terre et Habitat, 2008)	SIAEP Guer Beignon Terre et Habitat, 2011)	SIAEP Guer Beignon Terre et Habitat, 2011)	SIAEP Guer Beignon Terre et Habitat, 2011)

Tableau 1 : Essais par pompage disponibles sur les forages situés dans la vallée de l’Aff

L’essai réalisé en 2007-2008 a été suivi, en plus du forage FE7, sur les ouvrages Pz1, Pz2, Pz3, Pz4, SR1, SR2, SR3 (FE3) et SR4 (FE4) (Illustration 4). Ils ont tous montré une réaction au pompage. Cependant, les valeurs des rabattements sur Pz1, Pz2, Pz3, SR2 et SR3, sont des valeurs minimales car on ne dispose pas des niveaux initiaux avant pompage ; ils sont sous-estimés.

Les essais réalisés en 2010 sur FE3, FE4 et FE7 ont été réalisés en interférence multiple, c’est-à-dire que les trois ouvrages étaient en pompage simultanément (Illustration 5). Les ouvrages Pz1, Pz2, Pz3 et Pz4 ont servi de piézomètres d’observation. On note qu’il y a peu d’interférences entre les ouvrages pompés et que ce sont surtout les piézomètres qui montrent des interférences, en général causées par le puits de pompage le plus proche.

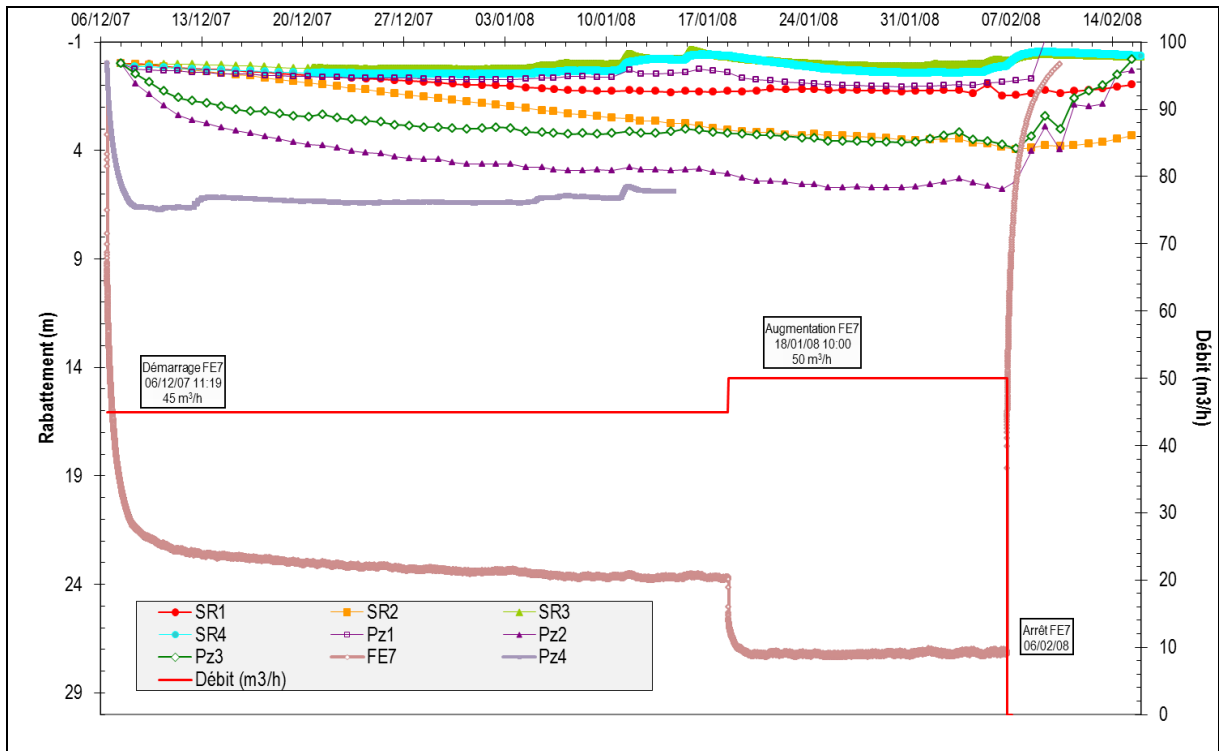


Illustration 4 : Essai de pompage réalisé sur FE7 en 2007-2008 avec suivis des interférences sur Pz1, Pz2, Pz3, Pz4, SR1, SR2, SR3 et SR4. Les valeurs des rabattements sur Pz1, Pz2, Pz3, SR2 et SR3, sont des valeurs minimales (pas de mesures des niveaux initiaux avant pompage).

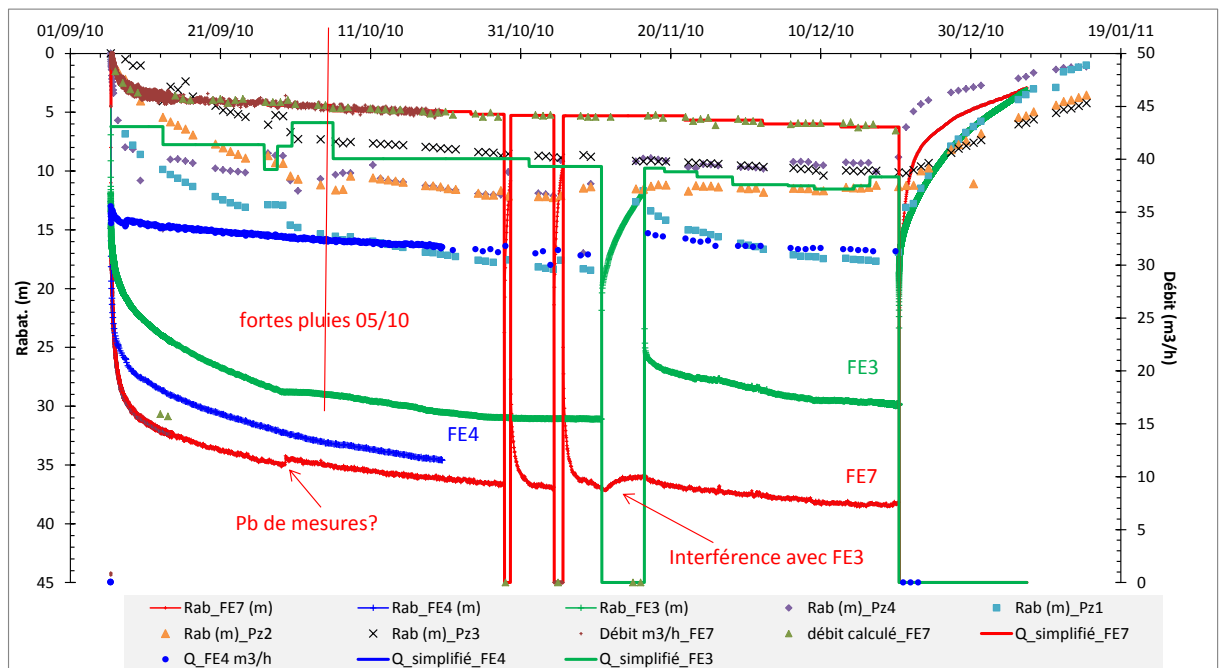


Illustration 5 : Essais réalisés en 2010 sur FE3, FE4 et FE7 en pompage simultané. Les ouvrages Pz1, Pz2, Pz3 et Pz4 ont servi de piézomètres d'observation.

3.2 ESSAIS DE POMPAGE DE LONGUE DUREE

3.2.1 Méthodologie utilisée pour interpréter un pompage de longue durée

La méthode mise en œuvre est décrite dans le schéma suivant (Illustration 6). Elle sera utilisée pour interpréter les essais réalisés sur les forages de l’Aff (FE3, FE4 et FE7).

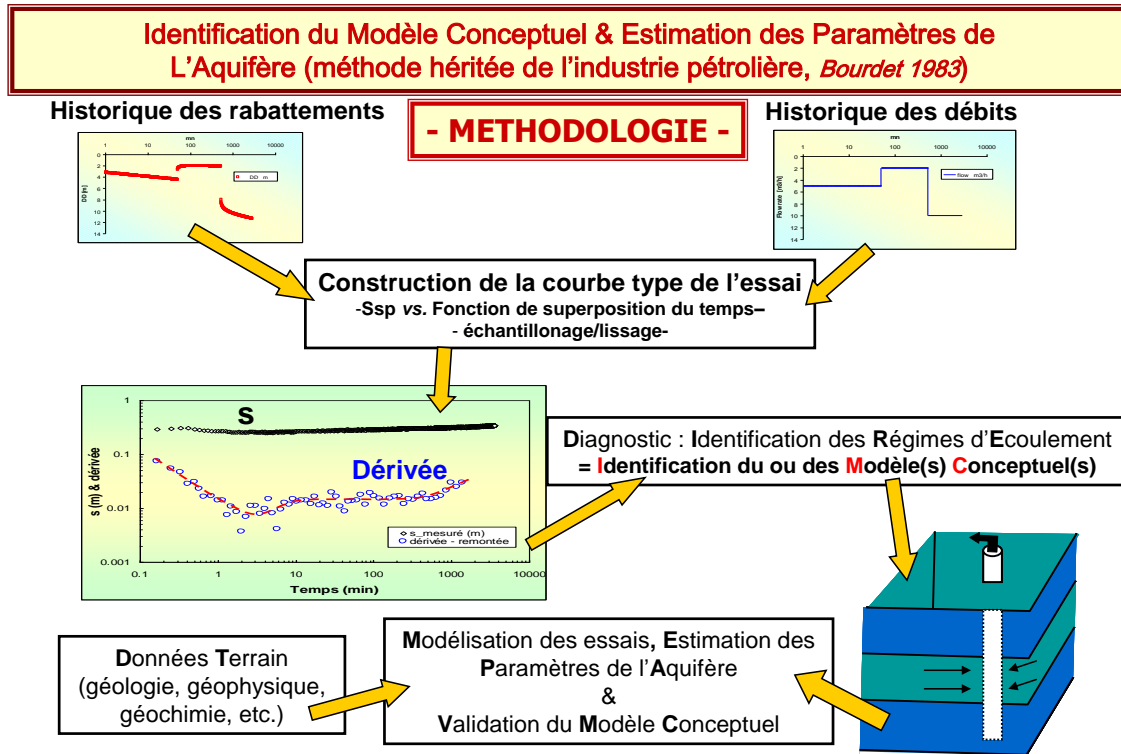


Illustration 6 : Méthodologie mise en œuvre pour l’interprétation de pompages d’essai. Utilisation des dérivées des rabattements pour diagnostiquer les essais.

L’interprétation des essais de pompage dans les formations de socle fracturées ou dans les formations sédimentaires hétérogènes est souvent complexe, conséquence de la géométrie des réseaux de fractures, des relations fracture-matrice, de la connexion de ces réseaux avec des aquifères de surface, de l’empilement et de la géométrie de séries à perméabilités différentes lorsqu’il s’agit de formations sédimentaires, etc.

Afin de déterminer les différentes composantes d’écoulement associées aux propriétés hydrauliques de tels aquifères, il est nécessaire de porter une attention particulière aux essais de pompage et de poser un diagnostic aussi fin que possible sur les essais avant toute modélisation. Le diagnostic repose sur l’interprétation des pentes de la courbe de dérivée logarithmique des rabattements s en fonction sur temps t ($\partial s / \partial \ln t$; à la descente ou à la remontée des niveaux) qui a l’avantage de représenter tous les régimes d’écoulement sur un seul et même graphique bi-logarithmique (Bourdet *et al.*, 1983, 1989 ; Spane and Wurster, 1993 ; etc.). L’avantage de cette méthode est que pour chaque type et/ou géométrie d’aquifère mais aussi pour chaque type de configuration forage-aquifère (captage partiel de l’aquifère par exemple), il correspond un certain régime ou à une succession de certains régimes d’écoulement qu’il est en général possible d’identifier sur la courbe de dérivée (Deruyck *et al.*, 1992, Schlumberger, 2002 ; Renard *et al.*, 2009). Par exemple, un écoulement radial sera caractérisé par une dérivée formant un plateau (pente nulle) ; l’atteinte de deux limites étanches

parallèles par une pente de $\frac{1}{2}$; 4 limites étanches orthogonales (ou un autre type de réservoir fermé) par une pente de 1 ; un captage partiel de l'aquifère par une pente de $-\frac{1}{2}$; un effet de drainance par une pente négative infinie, etc. L'illustration 7 présente comme exemple les différents types d'écoulement que l'on observe lors d'un pompage dans un aquifère rectangulaire où, tour à tour, les limites étanches (orthogonales entre elles) sont perçues par l'essai. L'effet capacitif du puits est aussi pris en compte.

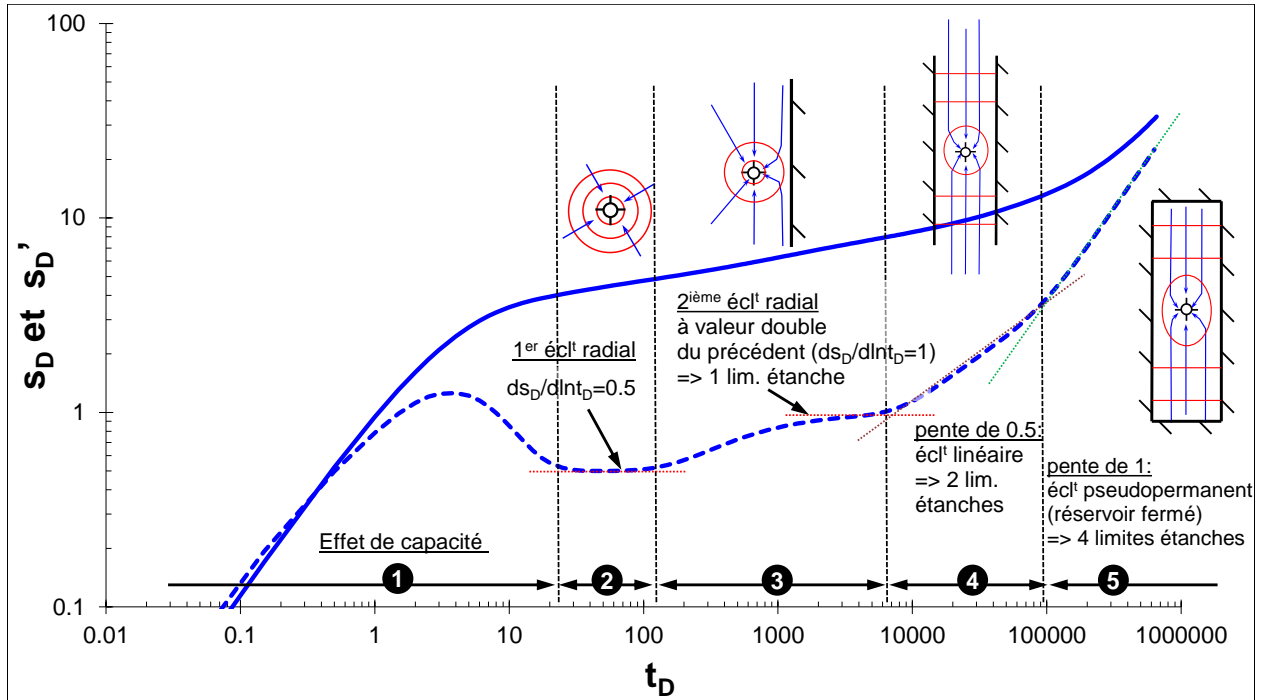


Illustration 7 : Exemple de succession des régimes d'écoulement lors d'un pompage dans un aquifère rectangulaire clos. t_D : temps adimensionnel, s_D (courbe pleine) et s_D' (courbe tiretée) : rabattement et dérivée du rabattement (adimensionnel).

Le calcul de la dérivée nécessite souvent un traitement par lissage afin d'augmenter le rapport signal sur bruit, le bruit étant engendré par des micro-variations du débit et/ou par la sensibilité de l'outil de mesure des niveaux d'eau (sonde manuelle, sonde automatique). Ce traitement n'altère en rien la qualité des données originelles. De plus, lorsque le débit varie de façon significative durant l'essai, il est nécessaire de prendre en compte ces variations dans le calcul. Le calcul de la dérivée sera donc réalisé à partir des rabattements spécifiques (normalisation par rapport aux variations de débit) et du temps de superposition (fonction aussi des variations de débit) ; on obtient ainsi une courbe type de l'essai –c'est-à-dire pour un débit unitaire– qui est dérivée et interprétée suivant la méthode précédemment décrite.

Une fois la courbe des dérivées construite, le diagnostic consiste à identifier les différents régimes d'écoulement et à en déduire les propriétés du forage (effet de capacité, effet de skin, ...), de l'aquifère (isotrope, anisotrope, fracture verticale, double porosité, etc.), de sa géométrie (effets de limites), des éventuelles relations entre l'aquifère capté et d'autres aquifères (effet de drainance par exemple) et éventuellement la mise en évidence d'écoulements fractionnaires comme par exemple dus à la forte perméabilité d'un drain karstique. Enfin, une fois le diagnostic posé, l'estimation des paramètres de l'aquifère est réalisée à partir du modèle mathématique le plus approprié. Puis, le modèle conceptuel de l'aquifère est validé en jugeant de la pertinence de la modélisation et des informations géologiques disponibles sur la formation testée.

A partir de la courbe des dérivées, il est déjà possible d’estimer les paramètres hydrodynamiques, en particulier la transmissivité et la perméabilité de la formation captée, lorsqu’un écoulement radial cylindrique est identifié.

3.2.2 Diagnostic et modélisation de l’essai réalisé en 2007-2008 sur FE7

Un pompage longue durée (62 jours) a été réalisé sur l’ouvrage FE7, à un débit de 45 m³/h du 06/12/2007 au 18/07/2008 puis à 50 m³/h jusqu’au 06/02/2008. Le rabattement maximum dans l’ouvrage FE7 est de 27,2 m. La transmissivité déterminée (Theis) pendant cet essai est de 1,65.10⁻³ m²/s. 4 piézomètres ont été suivis pendant ce pompage.

La courbe de dérivée de cet essai est basée sur les courbes de descente et de remontée du rabattement au niveau du forage FE7. Les dérivées (s’-NORM) ont été calculées à partir des rabattements normalisés (s-NORM) et montrent des écoulements distincts (Illustration 8) :

- 1- du début de l’essai à environ 10 minutes de pompage : un effet capacitif lié à l’équipement du puits ;
- 2- de 10 à 30’ : un écoulement radial à partir duquel la transmissivité de l’aquifère peut être déduite (T : 10⁻³ m²/s environ) ;
- 3- de 30 à 700 minutes environ, un écoulement linéaire (pente de la dérivée proche de 0,5), traduisant l’atteinte de deux limites étanches parallèles ;
- 4- de 700 à 13 000 minutes environ : une chute de la dérivée indiquant que de l’eau « entre » dans le système via probablement un effet de drainance ;
- 5- et de 13 000 minutes à la fin de l’essai, un deuxième écoulement linéaire montrant la réaction complète du système, multicouche a priori.

Ce diagnostic montre la réaction typique d’un aquifère multicouche limité dans l’espace par deux limites étanches parallèles. L’aquifère limité correspond certainement à une zone de fracture qui draine des systèmes de surface (effet de drainance).

Les courbes de dérivée des piézomètres d’observation Pz1, Pz2, Pz4 et SR2 sont aussi reportées sur l’Illustration 8. Elles montrent des réactions différentes, excepté en Pz1, traduisant probablement le fait que ces piézomètres sont implantés dans d’autres compartiments perméables ou peu perméables, mais différents de celui de FE7. Ceci sous-entend que les limites étanches identifiées lors du diagnostic en FE7 correspondent vraisemblablement à des compartiments peu perméables situés à proximité de FE7. Par contre, le comportement similaire de la dérivée de Pz1 (donnée disponible uniquement pour les temps longs du pompage) suggère que l’axe de la fracture se situe dans la direction FE7-Pz1. Les autres piézomètres, même proches comme Pz4, semblent situés dans des compartiments adjacents aux propriétés différentes (Pz2, Pz3, Pz4, SR3).

Le diagnostic de cet essai met en évidence une succession d’écoulements typique d’un aquifère très transmissif (10⁻³ m²/s) limité dans l’espace et assujéti à un effet de drainance, a priori en provenance d’un aquifère supérieur – les schistes rouges probablement – qui peut éventuellement être en connexion avec le cours d’eau de l’Aff. Cet essai a été modélisé avec le modèle modifié de Hunt et Scott (2007) : aquifère multicouche et limité dans l’espace ; le modèle prend aussi en compte les effets de puits (cf. Annexe 2 pour les paramètres du modèle). Les courbes bleues de l’Illustration 8 présentent les résultats de ce modèle (rabattement normalisé). L’Illustration 9 représente les rabattements en fonction des variations de débits du puits de pompage.

Le Tableau 2 présente les paramètres du modèle. La transmissivité de l’aquifère capté est estimée à $1,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, son emmagasinement (S) reste indéterminé puisqu’estimé au puits de pompage. Cet aquifère est rapidement limité dans l’espace sans pour autant que l’on puisse estimer la largeur de la zone fracturée perméable. L’atteinte des limites en temps de pompage est correcte mais le calcul des distances en mètres – zone fracturée évaluée ici d’une largeur de quasi 200 m – rend leurs estimations très aléatoires puisqu’impliquant dans le calcul l’emmagasinement. Cet aquifère est surmonté d’un aquitard de transmissivité anormalement importante, proche de $8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (T_0), compte tenu de la faible perméabilité attendue pour les schistes rouges. Cette forte valeur pourrait traduire un impact du pompage sur le cours d’eau. Son emmagasinement est aussi important de l’ordre de $7 \cdot 10^{-2}$ (S_y), typique d’un aquifère libre, ce qui semble cohérent vis-à-vis de l’information géologique dont nous disposons (ces schistes sont à l’affleurement). Ces deux niveaux aquifères sont séparés d’un niveau relativement peu perméable, estimé à $4,5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ pour une épaisseur d’un mètre. Ce niveau pourrait correspondre à des formations très altérées au sein des schistes rouges et/ou des schistes briovériens.

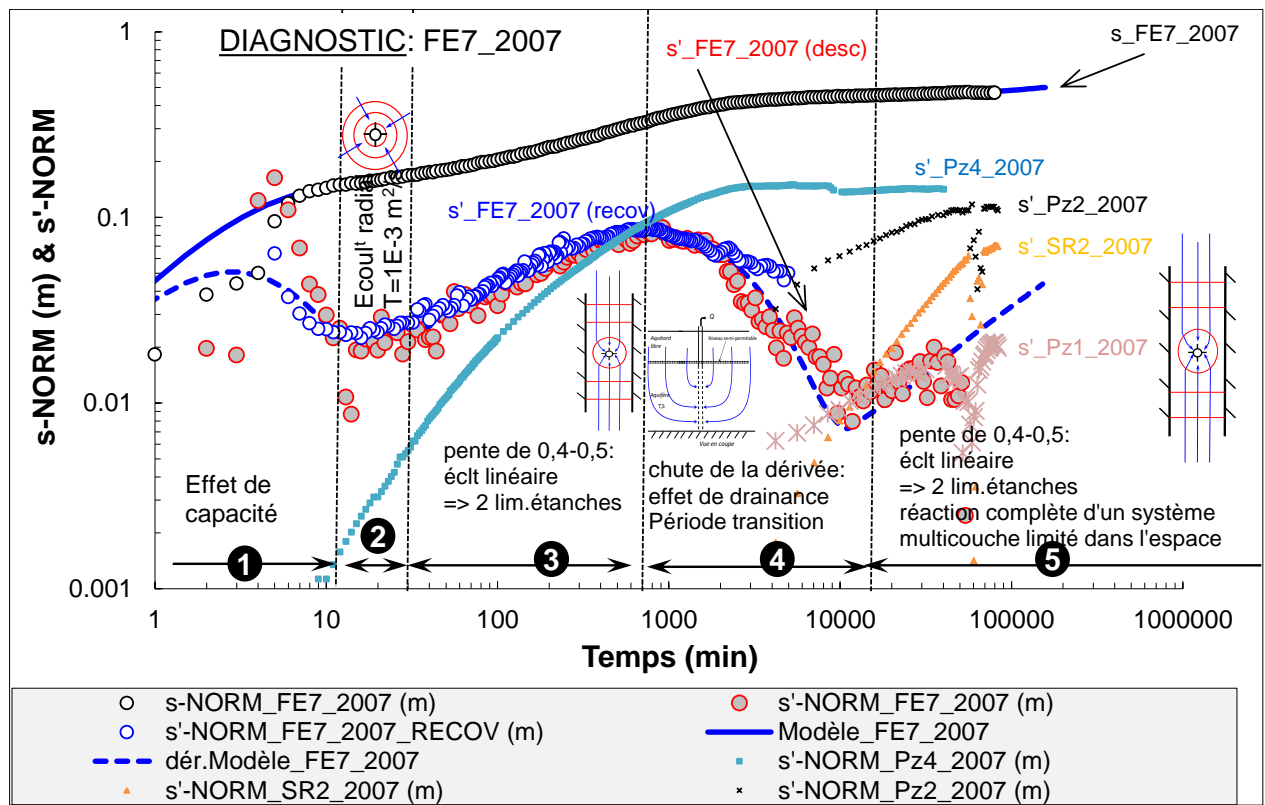


Illustration 8 : Diagnostic de l’essai réalisé en 2007-2008 au forage FE7.

s-NORM : rabattement normalisé ; s'-NORM : dérivée du rabattement normalisé à la descente et recov : à la remontée du niveau. En bleu : modèle (trait plein : rabattement ; pointillés : dérivée).

En bleu : modèle (trait plein : rabattement ; pointillés : dérivée).

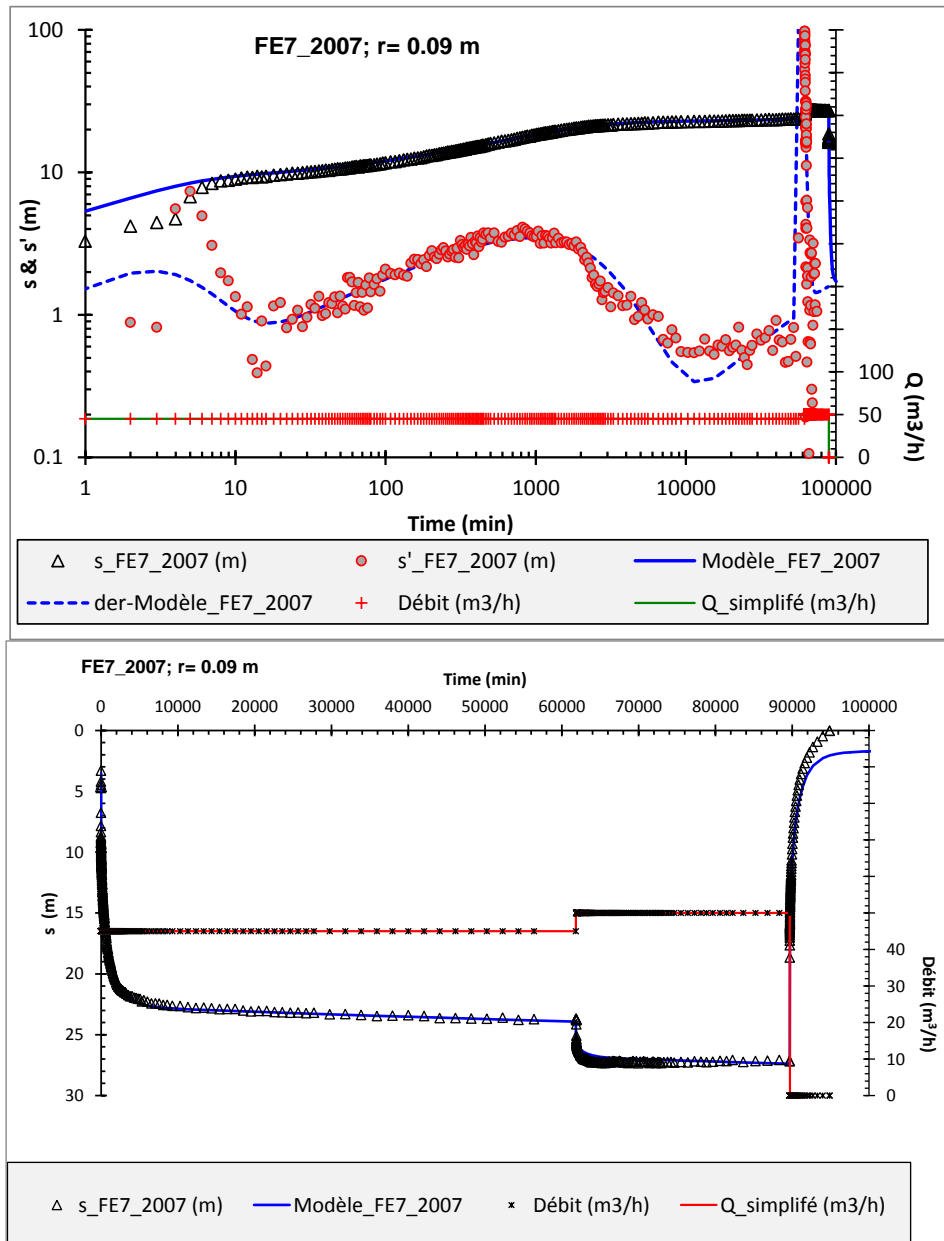


Illustration 9 : Modélisation du rabattement au forage FE7 ; essai 2007-2008. Modèle : Hunt et Scott modifié.

En haut : représentation dans un graphique Log-log des rabattements observés et modélisés, en bas : représentation en arithmétique.

	FE7_2007
r (m)	0.09
T (m ² /s)	1.30E-03
S (-)	5.00E-04
T0 (m ² /s)	8.00E-03
Sy (-)	7.00E-02
Perm. Eponte (m/s)	4.5E-09
Ep. Eponte (m)	1
Dist.lim. 1 (min)	13.0
Dist.lim. 2 (min)	13.0
Dist.lim. 1 (m)	90.1
Dist.lim. 2 (m)	90.1
Well skin (-)	-2.5
PDC (m-5s ²)	21500
Capacité de puits (m)	0.3

Tableau 2 : Paramètres hydrodynamiques utilisés pour la modélisation de l'essai sur le forage FE7 réalisé en 2007-2008. Cf. Annexe 1 et Tableau 3 pour l'explication des paramètres (modèle Hunt et Scott modifié).

Nota : la valeur indiquée pour l'emménagement correspond à un paramètre de calage qui n'a pas forcément de signification physique lorsqu'estimée au puits de pompage. Il en est de même pour l'évaluation des distances aux limites en mètres.

Avec :

Paramètres du modèle modifié de Hunt et Scott, 2007	
Distance	r (m)
Transmissivité de l'aquifère capté	T (m ² /s)
Emmagasinement de l'aquifère capté	S (-)
Perméabilité de l'éponte	k' (m/s)
Epaisseur de l'éponte	e' (m)
Transmissivité de l'aquitard	T ₀ (m ² /s)
Emmagasinement de l'aquitard	Sy (-)
Distance à la 1 ^{ère} limite (a)	Dist.lim. 1 (min et m)
Distance à la 2 ^{ème} limite (L-a)	Dist.lim. 2 (min et m)
Distance à la 3 ^{ème} limite (b)	Dist.lim. 3 (min et m)
Distance à la 4 ^{ème} limite (K-b)	Dist.lim. 4 (min et m)
Skin de puits	Sk (-)
Capacité du puits	Rc (m)
Pertes de charge quadratiques	C (m ⁻⁵ s ²)
Capacité du puits	Rc (m)

Tableau 3 : Paramètres du modèle à effet de drainance (modèle modifié de Hunt et Scott, 2007)

3.2.3 Diagnostic et modélisations des essais réalisés en 2010 sur FE3, FE4 et FE7

Un pompage simultané des 3 forages a été réalisé du 6 septembre au 20 décembre 2010, avec suivi des niveaux sur ces 3 ouvrages et sur les 4 piézomètres voisins, pour un débit total d'environ 116 m³/h.

Comme il a été précédemment discuté (Illustration 5), ces essais ont montré peu d'interférence d'un ouvrage sur l'autre, ceci implique qu'on ne fera pas trop d'erreur en diagnostiquant les puits indépendamment des uns des autres sans prendre en compte l'effet d'un ouvrage sur l'autre. Ceci permettra a minima de comparer les essais sur les forages, de voir s'il y a un comportement différent entre les ouvrages et si le comportement hydrodynamique de FE7 en 2007-2008 est le même en 2010.

En théorie, la non-prise en compte d'autres ouvrages pompés lorsque l'on interprète les pompages sur un puits tend à sous-estimer la transmissivité de l'aquifère et les effets de drainance. Par contre, elle tend à surestimer les effets de limites étanches.

3.2.3.1 Essai sur FE7

L'illustration 10 compare les courbes types et dérivées des essais réalisés en 2007-2008 et en 2010 sur le forage FE7. La courbe de dérivée de l'essai réalisé en 2010 est comparable de par sa forme à l'essai de 2007-2008, ce qui montre le même comportement de l'aquifère (aquifère multicouche limité dans l'espace). La courbe de dérivée de cet essai se positionne légèrement au-dessus de celle de l'essai réalisé en 2007-2008, ce qui est vraisemblablement attribuable aux pompages en FE3 et FE4 (légère baisse de la transmissivité du système comme expliqué plus haut). Par contre, on note que l'effet de drainance est beaucoup moins important en 2010. L'essai de 2010 a donc été modélisé avec le même modèle mathématique que celui précédemment exposé (Illustration 11 et Tableau 4). Les paramètres de l'aquifère sont identiques, sauf que les paramètres de l'aquitard sont moindres, moins transmissif (transmissivité $T_0 : 6.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) et moins capacitif ($S_y : 1,2.10^{-2}$).

Ce comportement peut être expliqué par un niveau piézométrique dans l'aquitard de surface moins élevé – cela veut dire que l'aquitard a moins de stock d'eau à fournir, ou alors que l'apport d'eau issu de l'Aff est moindre. En effet, le débit de l'Aff était beaucoup moins important lors du pompage de 2010 (0,6 m³/s en 2007-2008 et 0,2 m³/s en 2010 ; Illustration 12) et pourrait expliquer ce moindre effet de drainance en 2010. Ainsi, il est possible que l'aquifère capté par FE7 soit, pour partie, alimenté par l'Aff. Cette information suggère que la ou les zones de fractures captées par FE7 au sein du cours d'eau alimentent par perte l'aquifère capté. Il y a donc une forte suspicion de connexion hydraulique entre le forage FE7 et le cours d'eau.

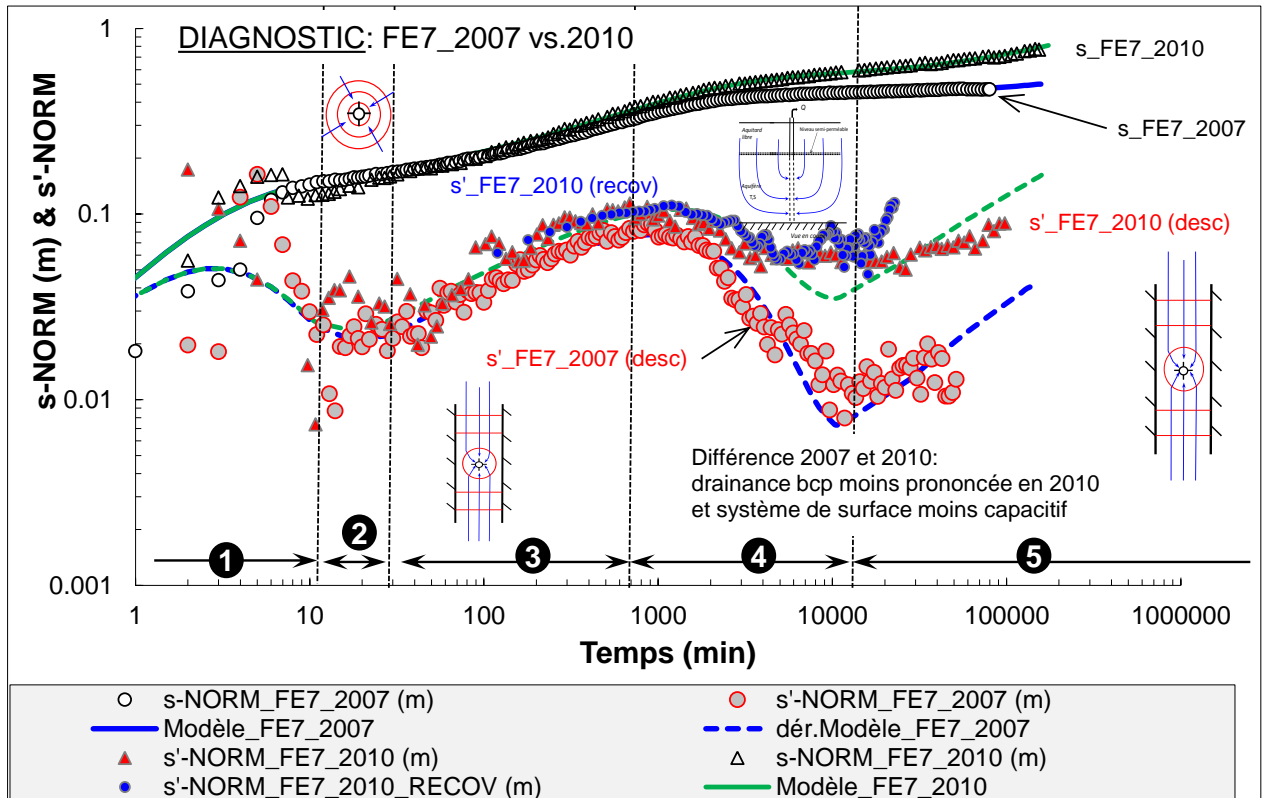


Illustration 10 : Comparaison des diagnostics des essais réalisés en 2007-2008 et 2010 sur le forage FE7.

$s\text{-NORM}$: rabattement normalisé ; $s'\text{-NORM}$: dérivée du rabattement normalisé à la descente et recov : à la remontée du niveau. En bleu et en vert : modèle (trait plein : rabattement ; pointillés : dérivée).

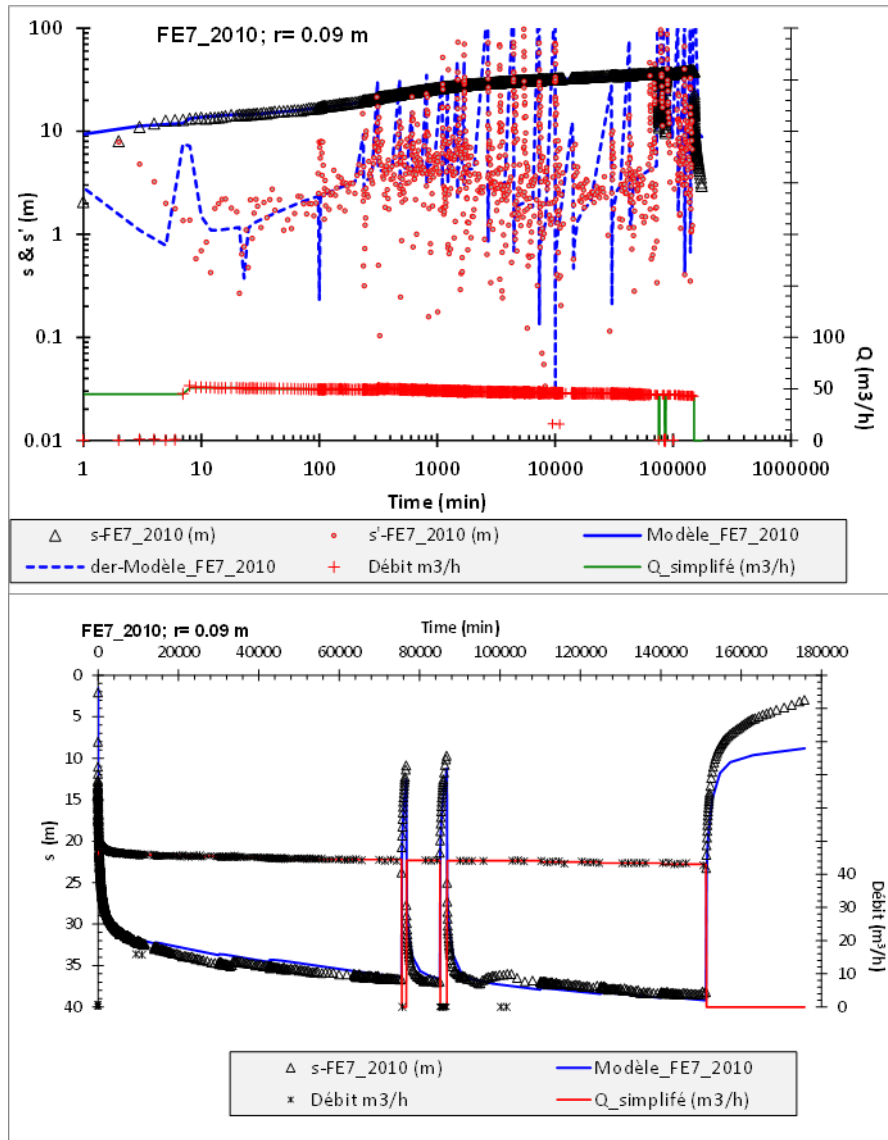


Illustration 11 : Modélisation du rabattement au forage FE7 ; essai 2010. Modèle : Hunt et Scott modifié.

En haut : représentation dans un graphique Log-log des rabattements observés et modélisés, en bas : représentation en arithmétique.

	FE7_2007	FE7_2010
r (m)	0.09	0.09
T (m ² /s)	1.30E-03	1.30E-03
S (-)	5.00E-04	5.00E-04
T0 (m ² /s)	8.00E-03	6.00E-03
Sy (-)	7.00E-02	1.20E-02
Perm. Eponte (m/s)	4.5E-09	3.5E-09
Ep. Eponte (m)	1	1
Dist.lim. 1 (min)	13.0	9.0
Dist.lim. 2 (min)	13.0	9.0
Dist.lim. 1 (m)	90.1	74.9
Dist.lim. 2 (m)	90.1	74.9
Well skin (-)	-2.5	1.5
PDC (m-5s ²)	21500	0
Capacité de puits (m)	0.3	0.1

Tableau 4 : Comparaison des paramètres hydrodynamiques utilisés pour la modélisation des essais sur le forage FE7 en 2007-2008 et 2010. Cf. Annexe 2 pour l’explication des paramètres (modèle Hunt et Scott modifié).

Nota : la valeur indiquée pour l’emmagasinement correspond à un paramètre de calage qui n’a pas forcément de signification physique lorsqu’estimée au puits de pompage. Il en est de même pour l’évaluation des distances aux limites en mètres.

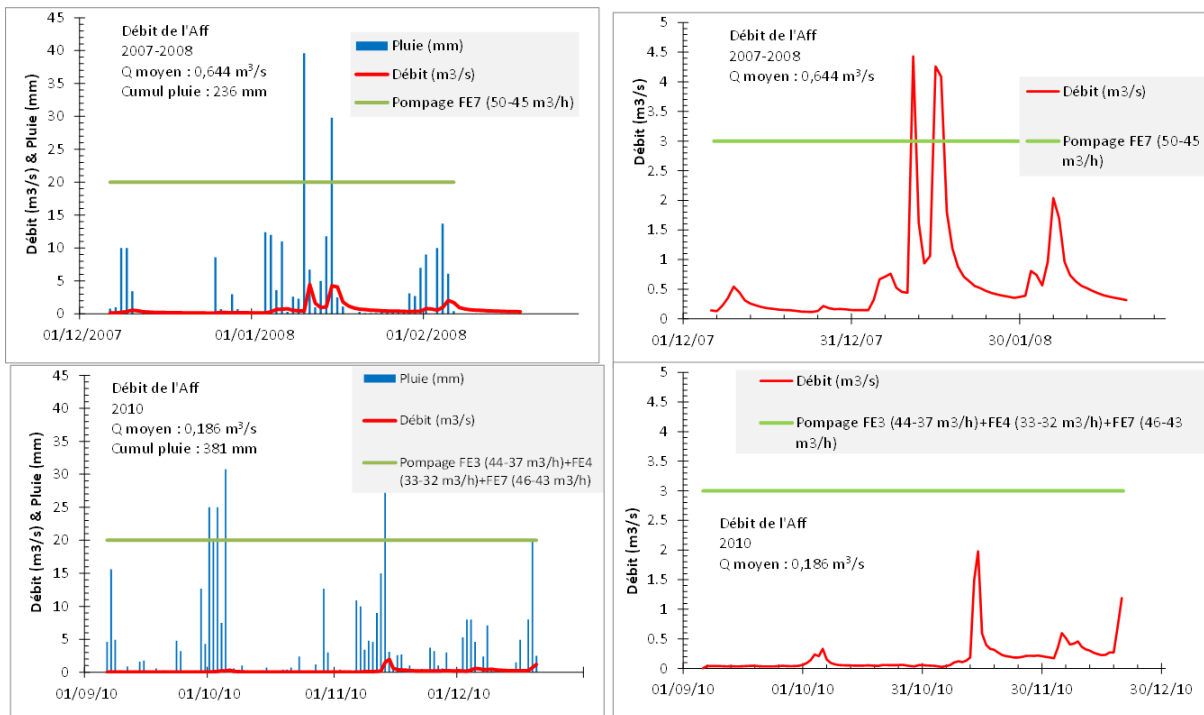


Illustration 12 : Débit de l’Aff durant les essais 2007-2008 et 2010.

3.2.3.2 Essais sur FE3 et FE4

Les illustrations suivantes (Illustration 13 et Illustration 14) présentent les diagnostics et modélisations (modélisation des courbes des types seulement) des pompages réalisés sur FE3

et FE4 en 2010. Ils sont tous deux comparés au diagnostic et à la modélisation faite sur FE7 à la même période.

Les diagnostics sur FE3 et FE4 montrent des comportements similaires à FE7, dans le sens où ils montrent eux aussi la réaction d’aquifères multicouches limités dans l’espace (deux limites), mais pas directement connectés entre eux. S’ils l’étaient, les courbes de dérivées seraient très proches les unes des autres. Ces diagnostics montrent que FE3 est implanté dans un compartiment de transmissivité similaire à FE7, mais vraisemblablement de dimension plus grande. FE4 est, par contre, implanté dans un compartiment de transmissivité beaucoup plus faible que FE7 (de l’ordre de $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$), a priori de taille encore plus importante. Le Tableau 5 présente le résultat des modélisations (modèle Hunt et Scott modifié).

Les effets de drainance sont beaucoup plus faibles sur FE3 et FE4, montrant qu’FE7 est en connexion (?) directe avec un aquitard beaucoup plus capacitif ou plutôt – car la couverture de schistes rouges (aquitard potentiel) est peu différente d’un forage à l’autre – avec un autre système de surface, pouvant lui fournir de l’eau durant le pompage. Il est très probable que l’ensemble des ouvrages soit connecté au réseau hydrographique de surface via les formations de surface, cependant FE7 s’en détache nettement et la zone perméable qu’il capte est probablement en forte connexion, sinon connectée au système hydrographique : l’Aff. En tout cas, c’est cet ouvrage qui semble avoir le plus de relation avec le cours d’eau. Cependant, à ce stade on ne peut pas déterminer la quantité d’eau dérivée, a priori elle est inférieure au débit de pompage puisque les niveaux dans FE7 n’arrivent pas à se stabiliser.

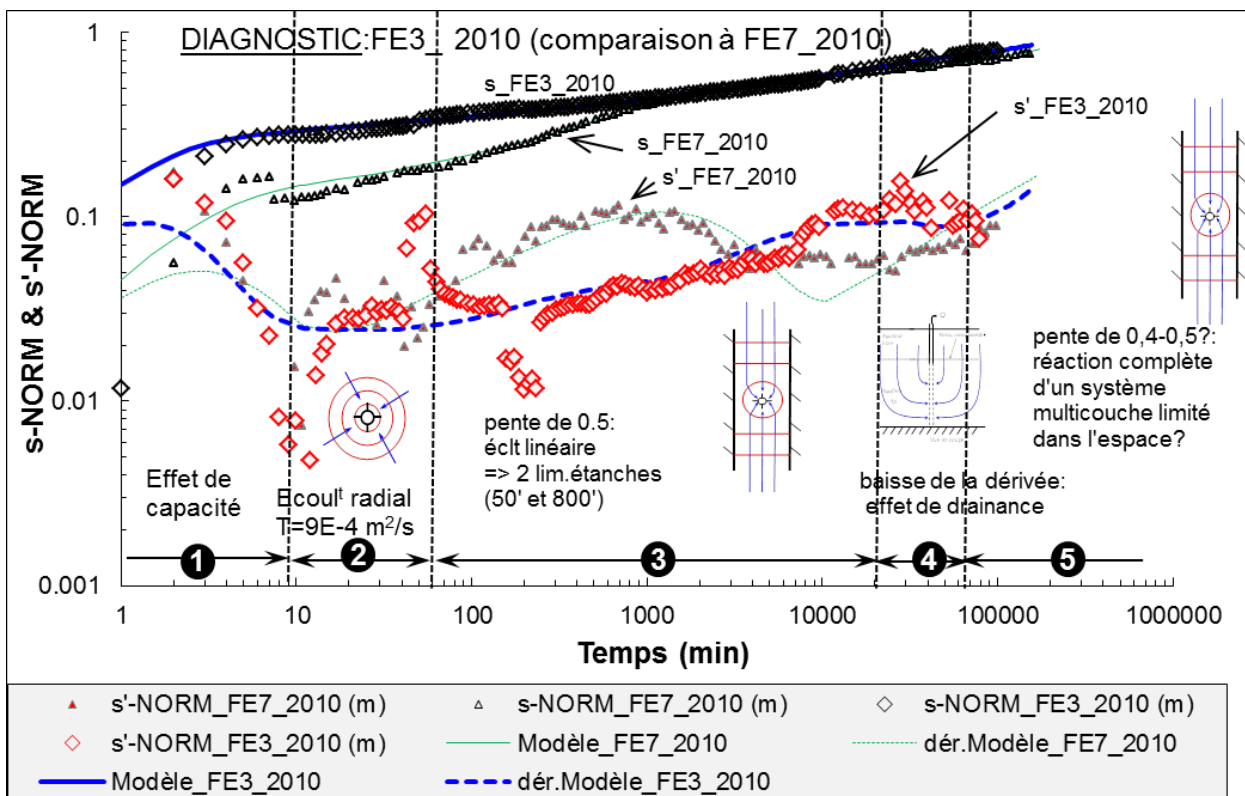


Illustration 13 : Comparaison des diagnostics des essais réalisés sur les forages FE3 et FE7 (essai 2010)

s-NORM : rabattement normalisé ; s'-NORM : dérivée du rabattement normalisé à la descente. En bleu (FE3) et en vert (FE7) : modèle (trait plein : rabattement ; pointillés : dérivée).

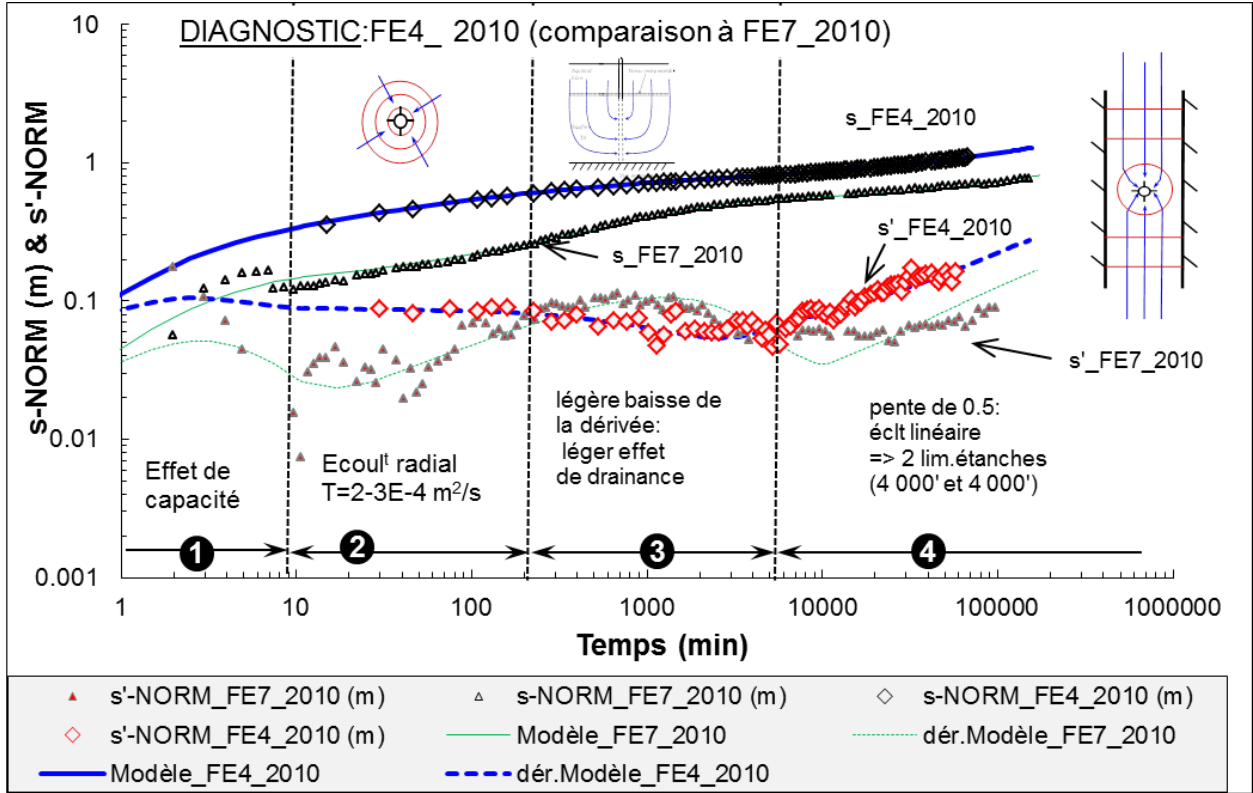


Illustration 14 : Comparaison des diagnostics des essais réalisés sur les forages FE4 et FE7 (essai 2010)

s-NORM : rabattement normalisé ; s'-NORM : dérivée du rabattement normalisé à la descente. En bleu (FE4) et en vert (FE7) : modèle (trait plein : rabattement ; pointillés : dérivée).

	FE7_2007	FE7_2010	FE3_2010	FE4_2010
r (m)	0.09	0.09	0.09	0.09
T (m2/s)	1.30E-03	1.30E-03	9.00E-04	2.50E-04
S (-)	5.00E-04	5.00E-04	1.00E-03	1.00E-03
T0 (m2/s)	8.00E-03	6.00E-03	8.00E-05	1.00E-06
Sy (-)	7.00E-02	1.20E-02	5.00E-03	2.00E-03
Perm. Eponte (m/s)	4.5E-09	3.5E-09	5.5E-10	7E-09
Ep. Eponte (m)	1	1	1	1
Dist.lim. 1 (min)	13.0	9.0	50.0	4000.0
Dist.lim. 2 (min)	13.0	9.0	800.0	4000.0
Dist.lim. 1 (m)	90.1	74.9	103.9	489.9
Dist.lim. 2 (m)	90.1	74.9	415.7	489.9
Well skin (-)	-2.5	1.5	0	-3.4
PDC (m-5s2)	21500	0	-	-
Capacité de puits (m)	0.3	0.1	0.15	0.15

Tableau 5 : Comparaison des paramètres hydrodynamiques déduits de l’ensemble des tests sur FE3, FE4 et FE7. Cf. Annexe 2 pour l’explication des paramètres (modèle Hunt et Scott modifié).

Pour mémoire, l’emmagasinement, S, estimé au puits de pompage est une valeur de calage en raison de l’indétermination sur les effets de puits (skin, pertes de charge). Il peut être sur- ou sous-estimé. De la même façon, les distances aux limites en mètres sont aussi des valeurs de calage, car fonction de S.

3.3 IMPACT DES POMPAGES SUR LE DEBIT DU COURS D'EAU

Les diagnostics des essais de pompage réalisés sur le forage FE7 montrent clairement que cet ouvrage est en connexion beaucoup plus forte avec le système de surface, a fortiori l'Aff, que les ouvrages FE3 et FE4. Cette section a pour but, via des modèles permettant de calculer l'impact sur le cours d'eau en termes de débit, de tester cette hypothèse.

Deux modèles sont utilisés :

- le modèle de Hunt (2003), aquifère multicouche où l'aquitard de surface est en lien avec le cours d'eau (Illustration 15),
- le modèle de Hunt modifié qui prend en compte des effets de limites étanches et a été développé pour les besoins de l'étude (Illustration 16), afin de répondre aux caractéristiques hydrodynamiques déduites des diagnostics des essais.

Les deux modèles prennent en compte les effets liés au puits : pertes de charge, skin, effet de capacité de puits. Les paramètres des modèles sont définis dans le Tableau 6.

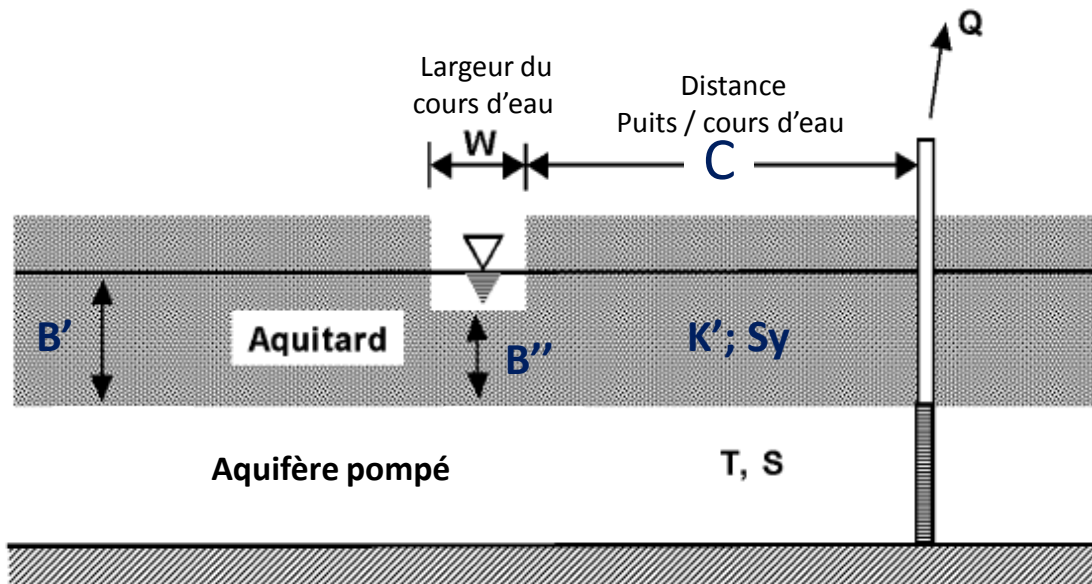


Illustration 15 : Modèle de Hunt (2003)

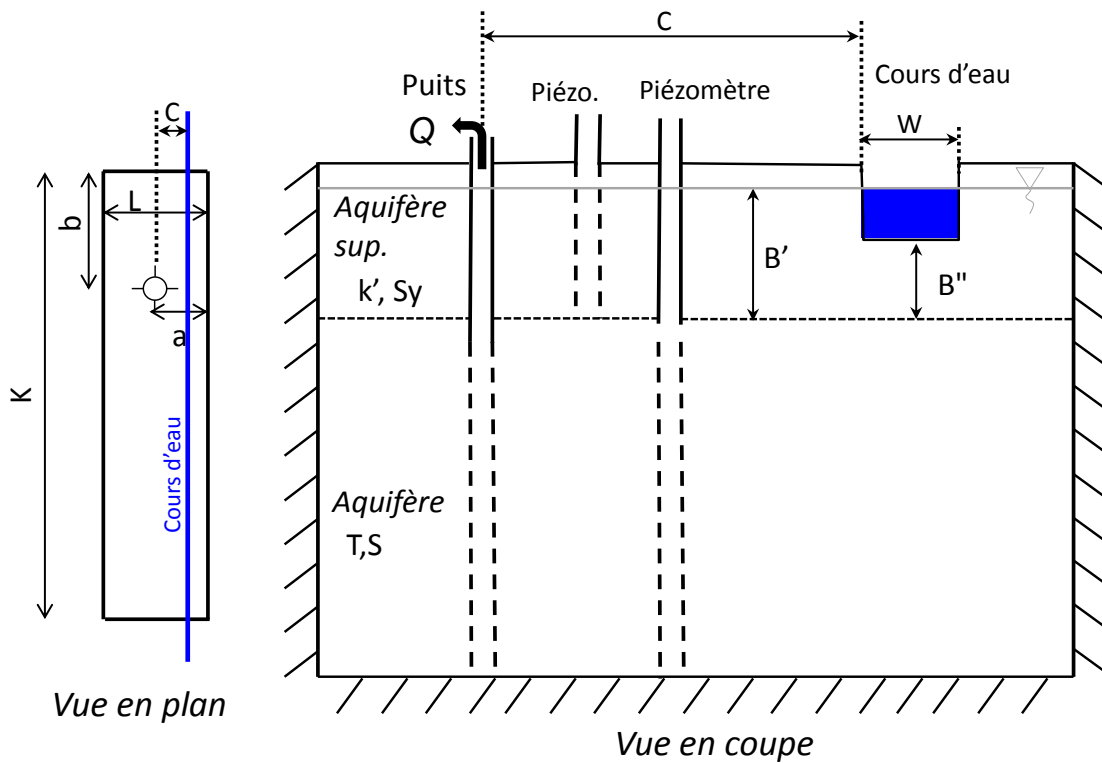


Illustration 16 : Modèle de Hunt (2003) modifié avec prise en compte de limites étanches

Paramètres du modèle modifié de Hunt, 2003	
Distance puits / piézomètre ou rayon du puits	r (m)
Transmissivité de l'aquifère capté	T (m^2/s)
Emmagasinement de l'aquifère capté	S (-)
Perméabilité de l'éponte	k' (m/s)
Epaisseur de l'aquitard	B' (m)
Epaisseur de l'aquitard sous le cours d'eau	B'' (m)
Emmagasinement de l'aquitard	S_y (-)
Distance cours d'eau / puits	C (m)
Largeur du cours d'eau	W (m)
Dist. à la 1 ^{ère} limite (a)	Dist.lim. 1 (min et m)
Dist. à la 2 ^{ième} limite (L-a)	Dist.lim. 2 (min et m)
Dist. à la 3 ^{ième} limite (b)	Dist.lim. 3 (min et m)
Dist. à la 4 ^{ième} limite (K-b)	Dist.lim. 4 (min et m)
Skin de puits	Sk (-)
Capacité du puits	Rc (m)
Pertes de charge quadratiques	PDC ($m^{-5}s^2$)
Capacité du puits	Rc (m)

Tableau 6 : Paramètres des modèles avec prise en compte d'un cours d'eau : modèle de Hunt (2003) et modèle modifié de Hunt. Seul le deuxième modèle prend en compte les effets de limites.

3.3.1.1 *Modèle sans effet de limite*

L’Illustration 17 et l’Illustration 18 présentent les résultats des modélisations pour les deux essais de pompage réalisés sur FE7 (en 2007-2008 et en 2010). Le Tableau 7 consigne les paramètres hydrodynamiques déduits des modélisations. Ces modélisations sont à peu près correctes pour les temps longs mais tendent à surestimer (2007-2008) ou sous-estimer (2010) les rabattements pour les temps courts (voir les graphes en log-log). La transmissivité est sous-estimée par rapport à ce qui a été déduit des diagnostics précédents, ce qui revient en quelques sortes à prendre une transmissivité équivalente pour un système aquifère limité dans l’espace. Par contre, la transmissivité de l’aquitard semble cette fois plus cohérente pour des formations peu perméables telles que les schistes rouges du secteur ($K'=4.10^{-7}$ m/s). Dans ces modèles on suppose que l’épaisseur d’aquitard est de 50 m (B') – ce qui est conforme à l’épaisseur de schistes rouges au forage FE7 – et que l’incision du cours d’eau dans l’aquitard est de 1 m ($B'-B''=1$ m). Cette valeur pour l’incision du cours d’eau est réaliste compte tenu de la géométrie de l’Aff (profond d’un mètre environ). Dans le modèle, le cours d’eau est situé à 30 m de FE7, soit la distance réelle entre le cours d’eau et le forage, et la largeur du cours à 5 m ; ce dernier facteur est par contre peu important compte tenu de la faible incision du cours d’eau.

Ces modélisations, mêmes si ne respectant pas tout à fait le comportement hydrodynamique défini lors des diagnostics, permettent néanmoins d’avoir une idée de l’ordre de grandeur de l’impact sur l’Aff. L’Illustration 19 présente l’impact sur le cours d’eau déduit des modélisations sur les deux essais. Il est de l’ordre de 0,2 l/s en 2007-2008 et de l’ordre de 0,4 l/s en 2010.

Cependant, l’impact sur le cours d’eau est très lié (et très variable) à la valeur que l’on donne à l’incision du cours d’eau. C’est effectivement ce que montrent l’Illustration 20 et l’Illustration 21 pour les deux essais réalisés sur FE7, où le débit d’impact varie entre 3 et 6 m³/h (0,8 à 1,6 l/s) lorsque le cours d’eau incise la quasi-totalité de l’aquitard et entre à 0,5 et 1,5 m³/h (0,14 à 0,42 l/s) lorsque l’incision est faible, entre 1 et 10 m. Néanmoins, sachant que le cours d’eau n’incise qu’une faible épaisseur de schistes rouges, l’impact sur le cours d’eau le plus réaliste se situe vraisemblablement entre 0,14 et 0,42 l/s (cf. cercles rouges sur les figures). On notera que d’après ce modèle, l’impact du pompage en FE7 sur l’Aff devrait être faible mais perceptible, notamment lorsque celui-ci est en condition d’étiage prononcé (4,3 l/s en 2010 ; Tableau 8).

En revanche, la modification du degré d’incision du cours d’eau n’a que peu d’impact sur la valeur des rabattements, pour une même gamme d’incision (entre 0 et 20 m dans les exemples considérés).

Cependant, le modèle utilisé est approximatif compte tenu de la complexité du milieu et n’est destiné, qu’au mieux, à évaluer un ordre grandeur de l’impact sur l’Aff. Le modèle suivant, plus adapté à la réponse hydrodynamique du système va permettre de fournir d’autres estimations.

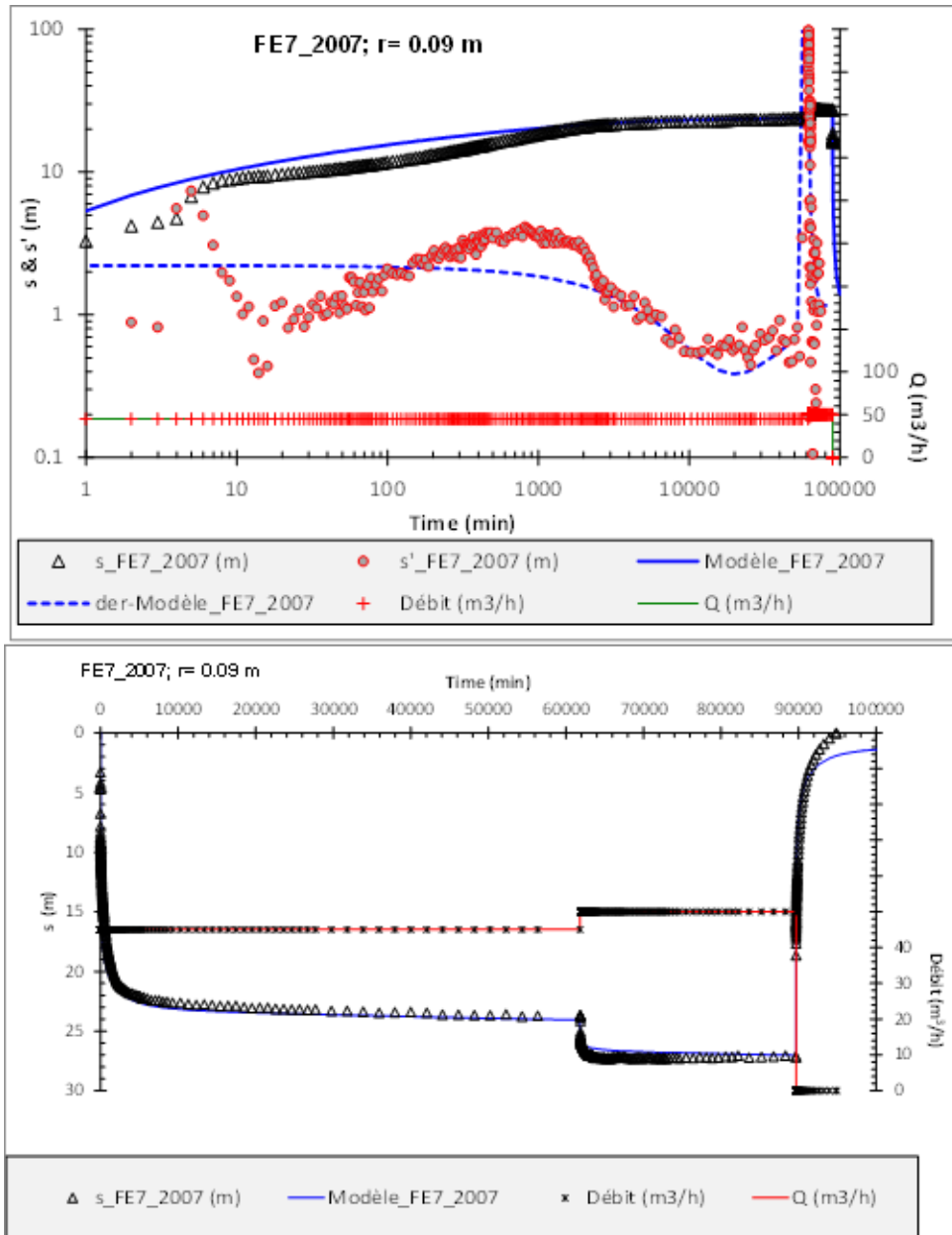


Illustration 17 : Modélisation du rabattement au forage FE7 ; essai 2007-2008. Modèle : Hunt (2003).

En haut : représentation dans un graphique Log-log des rabattements observés et modélisés, en bas : représentation en arithmétique.

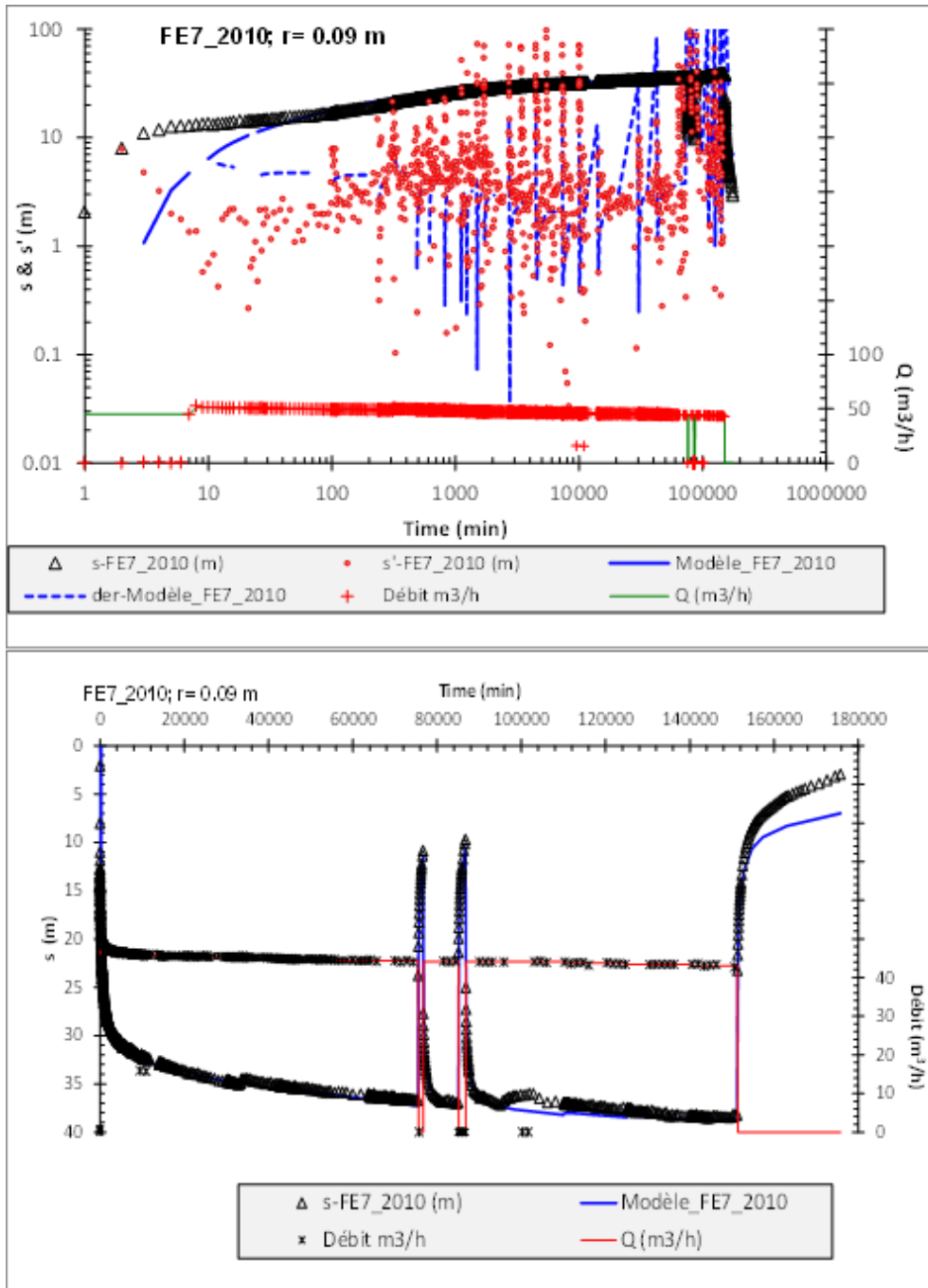


Illustration 18 : Modélisation du rabattement au forage FE7 ; essai 2010. Modèle : Hunt (2003).

En haut : représentation dans un graphique Log-log des rabattements observés et modélisés, en bas : représentation en arithmétique.

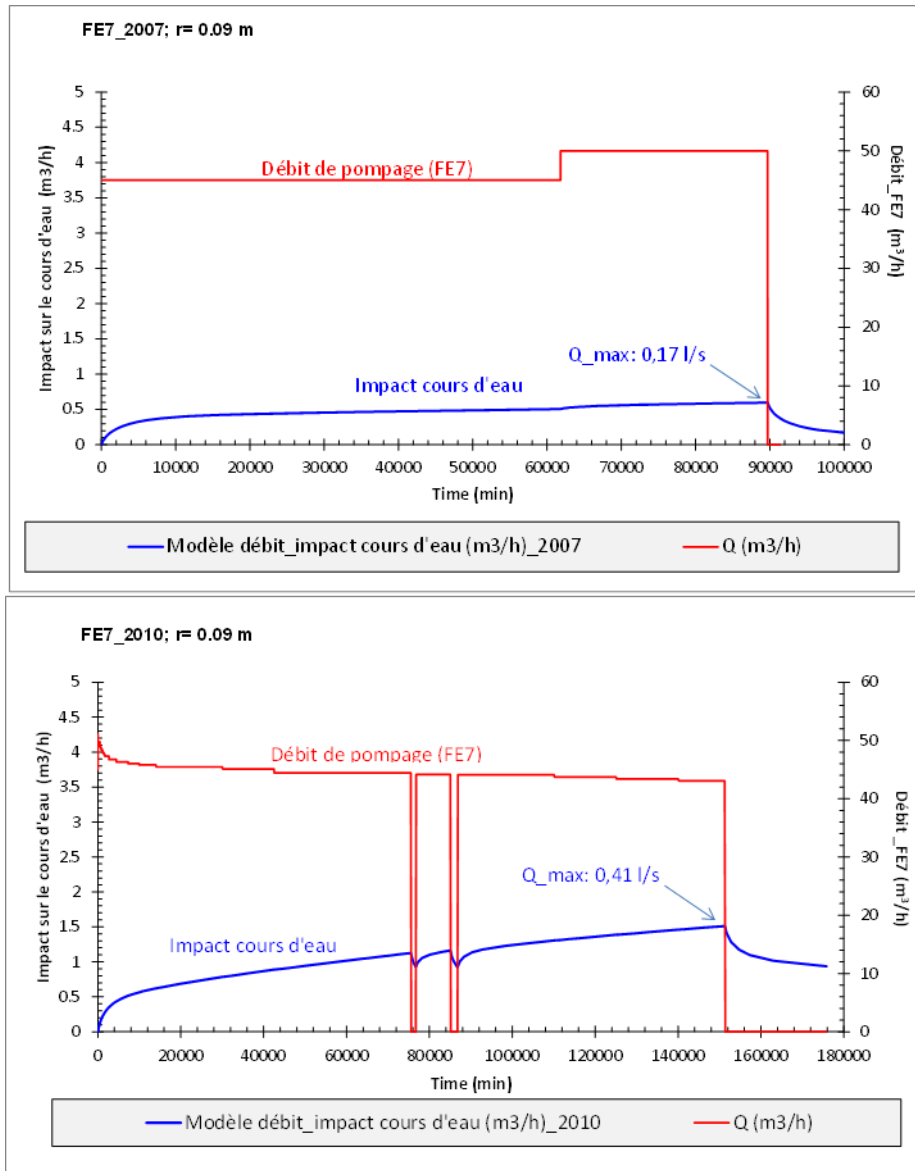


Illustration 19 : Impact des essais par pompage réalisés en FE7 sur l’Aff. Graphe du haut : essai 2007-2008 ; graphe du bas : essai 2010. Modèle : Hunt (2003).

	FE7_2007	FE7_2010
r (m)	0.09	0.09
T (m ² /s)	4.50E-04	2.30E-04
S (-)	3.00E-03	3.00E-03
Sy (-)	6.50E-02	1.20E-02
Perm. Eponte (m/s)	4.00E-07	4.00E-07
Ep. Eponte_B' (m)	50.0	50.0
Dist.cours d'eau (m)	30.0	30.0
Larg. Cours d'eau	5.0	5.0
B'' (m)	49.0	49.0
Well skin (-)	-2.7	-4.0
PDC (m-5s ²)	0.0	0.0
Capacité de puits (m)	0.0	0.0

Tableau 7 : Paramètres hydrodynamiques utilisés pour la modélisation des essais sur le forage FE7 réalisés en 2007-2008 et en 2010. Modèle : Hunt (2003).

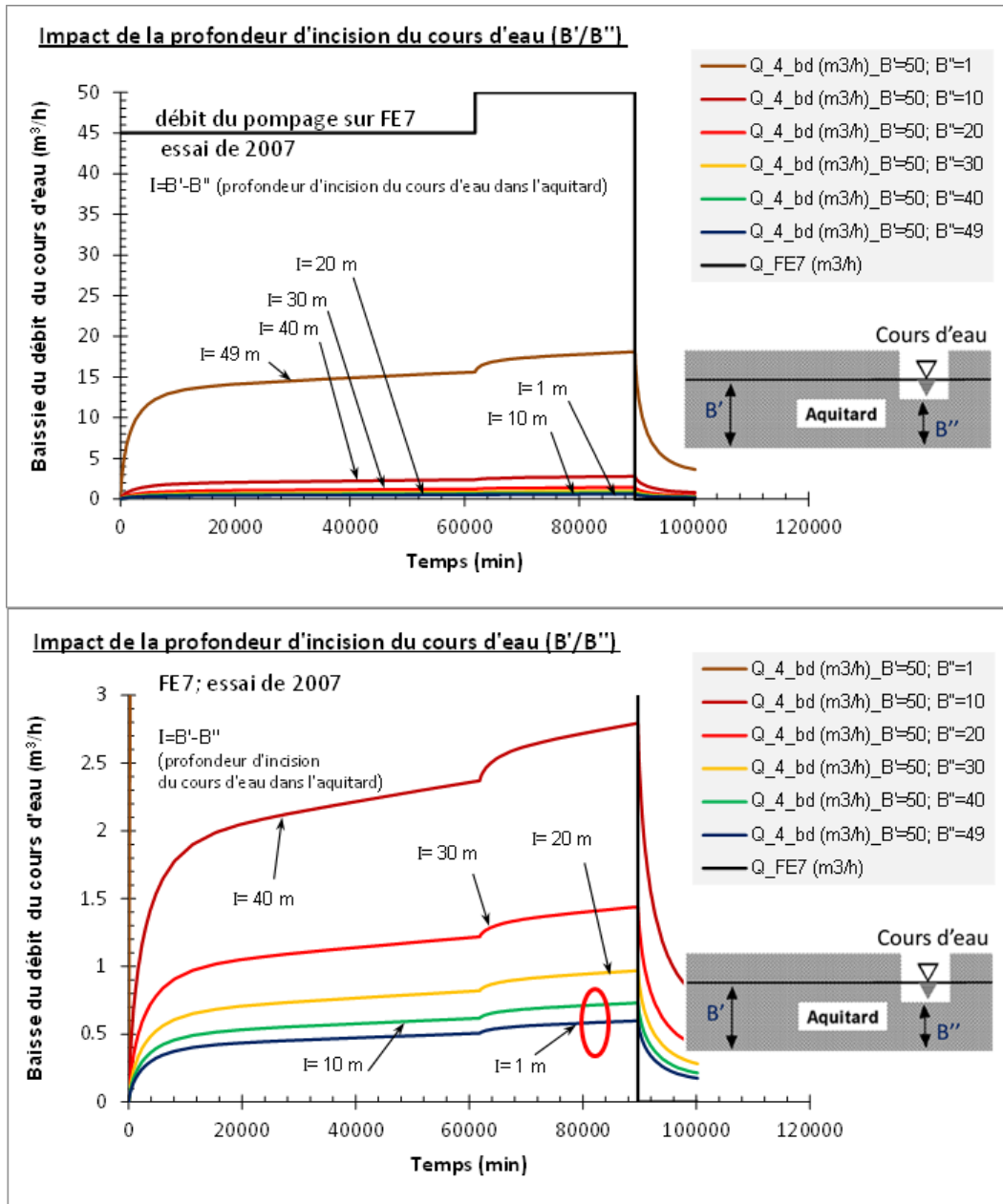


Illustration 20 : Effet de la variation de profondeur d'incision du cours d'eau sur la baisse de débit du cours d'eau (impact sur le cours d'eau). FE7 2007-2008. Graphe du bas : zoom sur le graphe du haut.

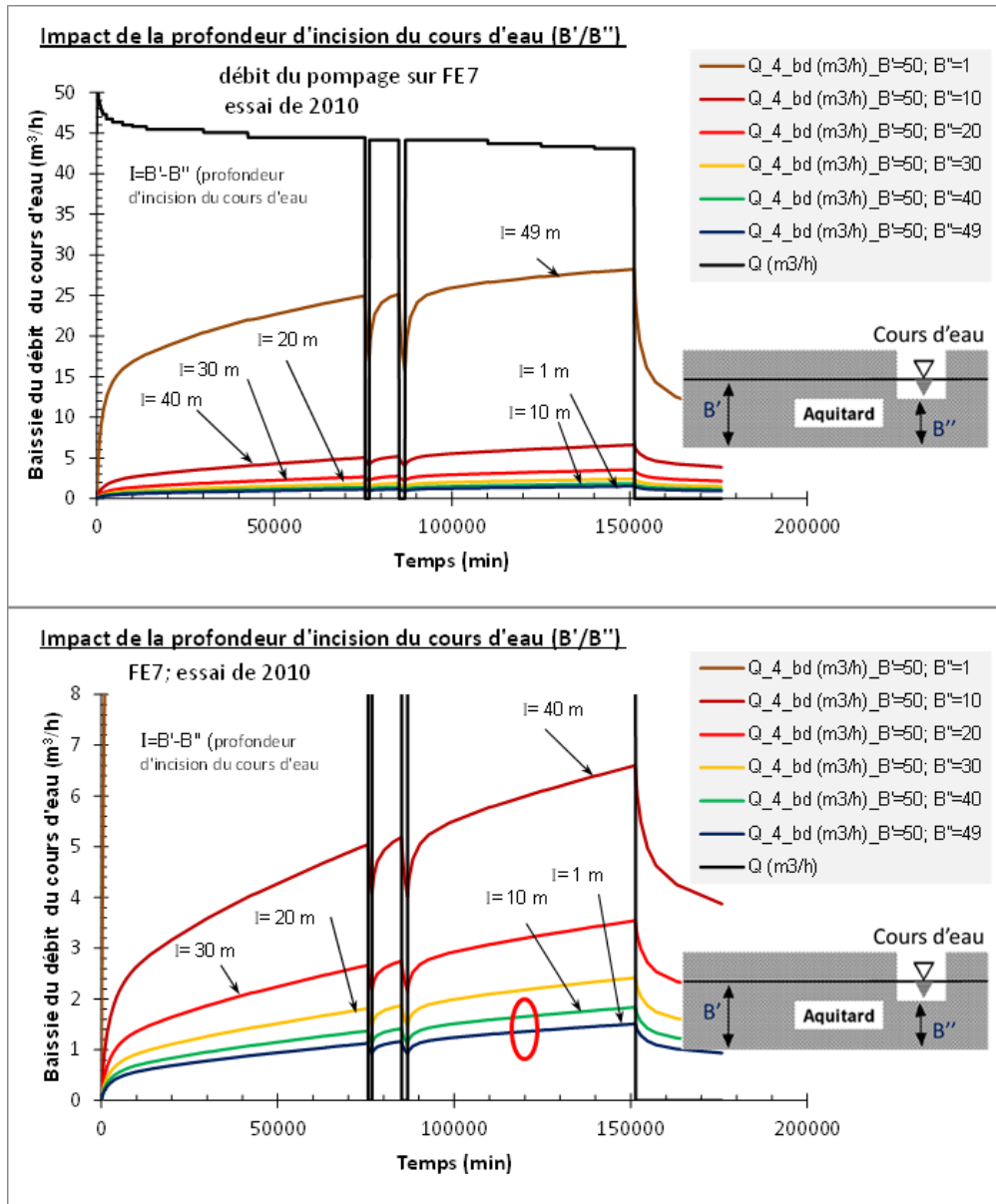


Illustration 21 : Effet de la variation de profondeur d'incision du cours d'eau sur la baisse de débit du cours d'eau (impact sur le cours d'eau). FE7 2010. Graphe du bas : zoom sur le graphe du haut.

I/s	2007	2010
Q_Aff_max	4430.0	1980.0
Q_Aff_moy	644.5	186.4
Q_Aff_min	115.0	4.3

Tableau 8 : Statistiques des débit de l’Aff (en l/s) au moment des essais de pompage réalisés en 2007-2008 et en 2010.

3.3.1.2 Modèle avec effets de limites

Les résultats de ce modèle sont présentés de l’Illustration 23 à l’Illustration 24 ; le Tableau 9 synthétise les paramètres hydrodynamiques des modélisations. La configuration du cours d’eau par rapport aux limites est celle décrite dans l’Illustration 22 soit une configuration pour une zone de faille d’orientation environ nord-sud (selon la direction FE7-Pz1 comme suggérée au § 3.2.2) et un cours d’eau, l’Aff, sécant à cette zone. Comme dans le cas précédent, le cours d’eau est situé à 30 m du puits de pompage (FE7) ; la largeur de cours est fixée à 10 m. Dans les deux modèles, on suppose que l’épaisseur d’aquitard est de 50 m (B’) – ce qui est conforme à l’épaisseur de schistes rouges au droit du forage FE7 – et que l’incision du cours d’eau dans l’aquitard est de 1 m (B’-B’’= 1 m) ; cette valeur est réaliste compte tenu de l’incision de l’Aff.

Ce modèle donne des résultats, en termes de rabattements modélisés, beaucoup plus réalistes que le modèle précédent. La transmissivité de l’aquifère, de l’ordre de 10^{-3} m²/s, est conforme aux diagnostics (Illustration 8, Illustration 10). L’aquitard a une perméabilité de l’ordre $2 \cdot 10^{-7}$ m/s (K’), ce qui semble cohérent pour les schistes rouges du secteur. L’emménagement de l’aquitard est de l’ordre 2,5 à $7,0 \cdot 10^{-2}$ (Sy), typique d’un aquifère libre.

L’impact sur le cours d’eau suggéré par ces modélisations, de l’ordre de 4 à 7 l/s, est cette fois non négligeable, et peut correspondre à la totalité du débit du cours d’eau en condition de très basses eaux (4,3 l/s en 2010 ; Tableau 8). Cependant, le modèle utilisé, bien que plus évolué que le précédent, ne tient pas compte que les limites étanches ne le sont pas complètement, ce qui conduit a priori à une surestimation, par le modèle, de l’impact sur le cours d’eau. Néanmoins, ce modèle permet d’évaluer l’ordre grandeur de l’impact sur l’Aff, c’est-à-dire de l’ordre de quelques l/s.

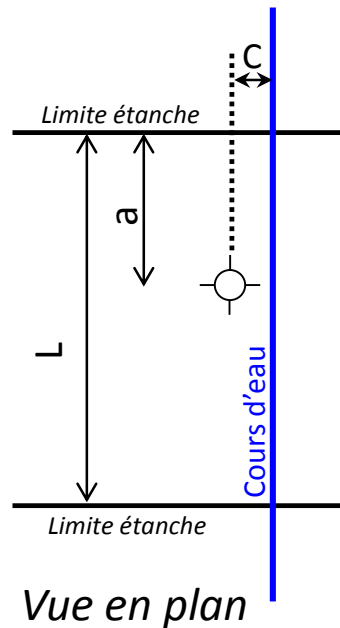


Illustration 22 : Configuration des limites par rapport au cours d’eau. Modèle : Hunt modifié.

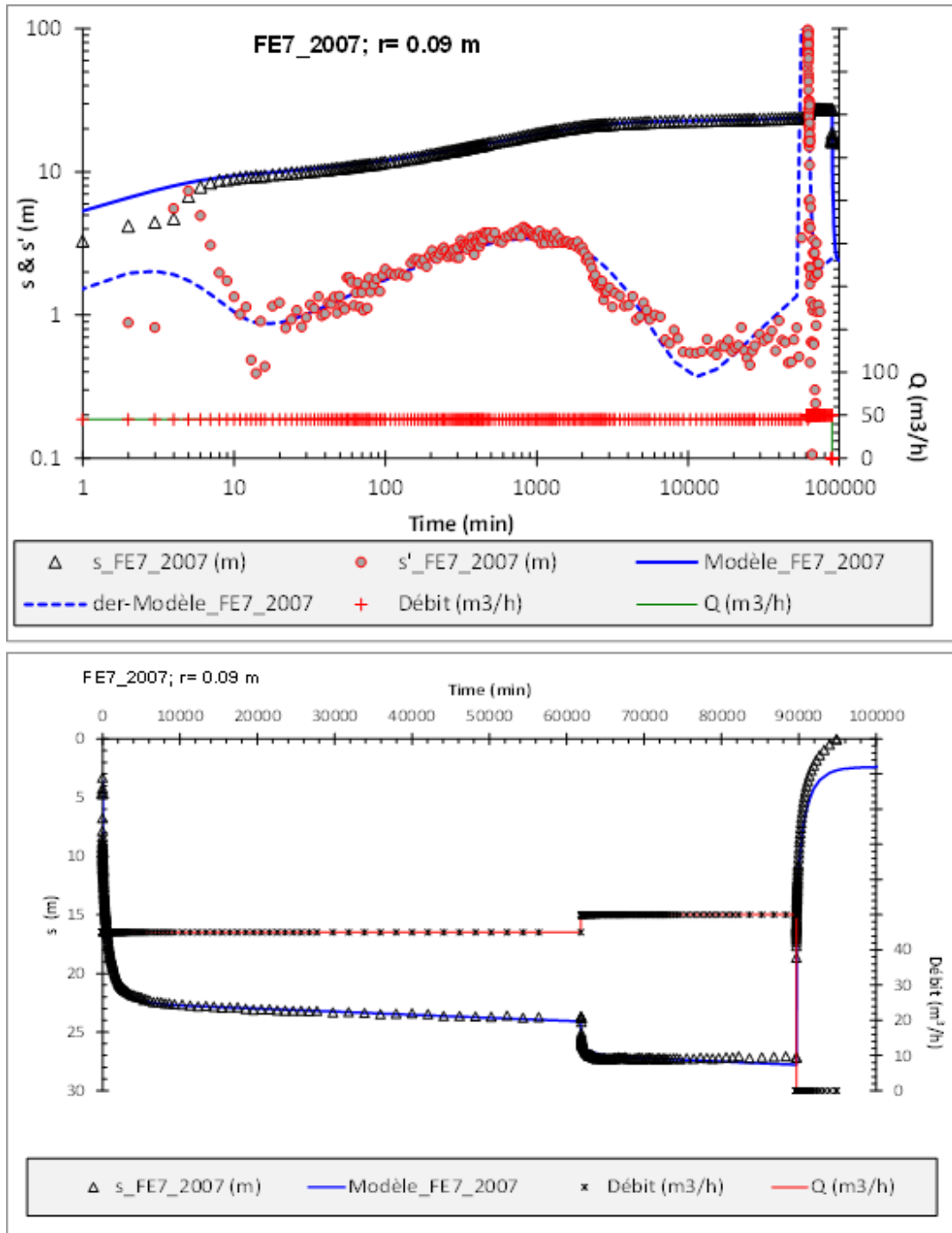


Illustration 23 : Modélisation du rabattement au forage FE7 ; essai 2007-2008. Modèle : Hunt modifié.

En haut : représentation dans un graphique Log-log des rabattements observés et modélisés, en bas : représentation en arithmétique.

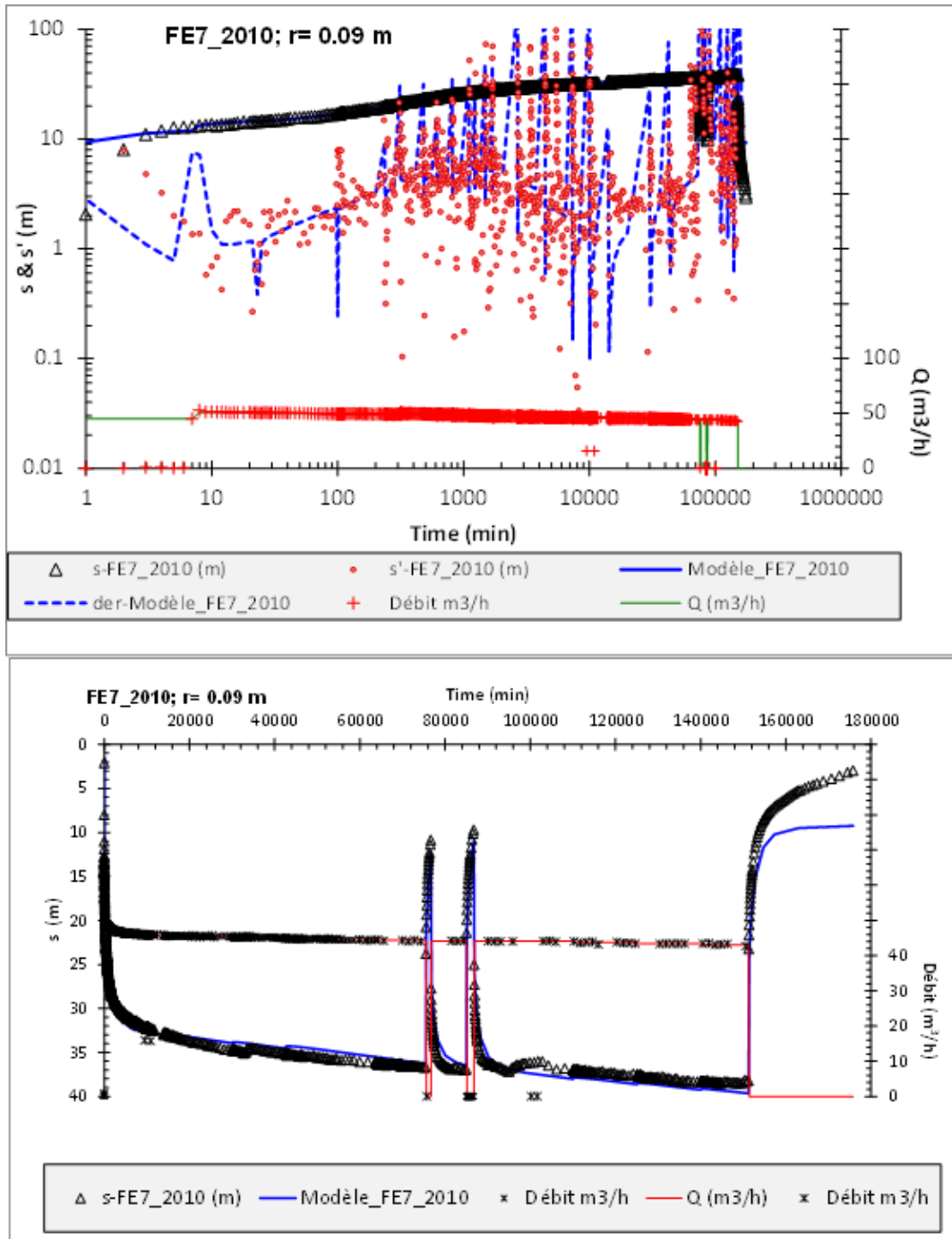


Illustration 24 : Modélisation du rabattement au forage FE7 ; essai 2010. Modèle : Hunt modifié.

En haut : représentation dans un graphique Log-log des rabattements observés et modélisés, en bas : représentation en arithmétique.

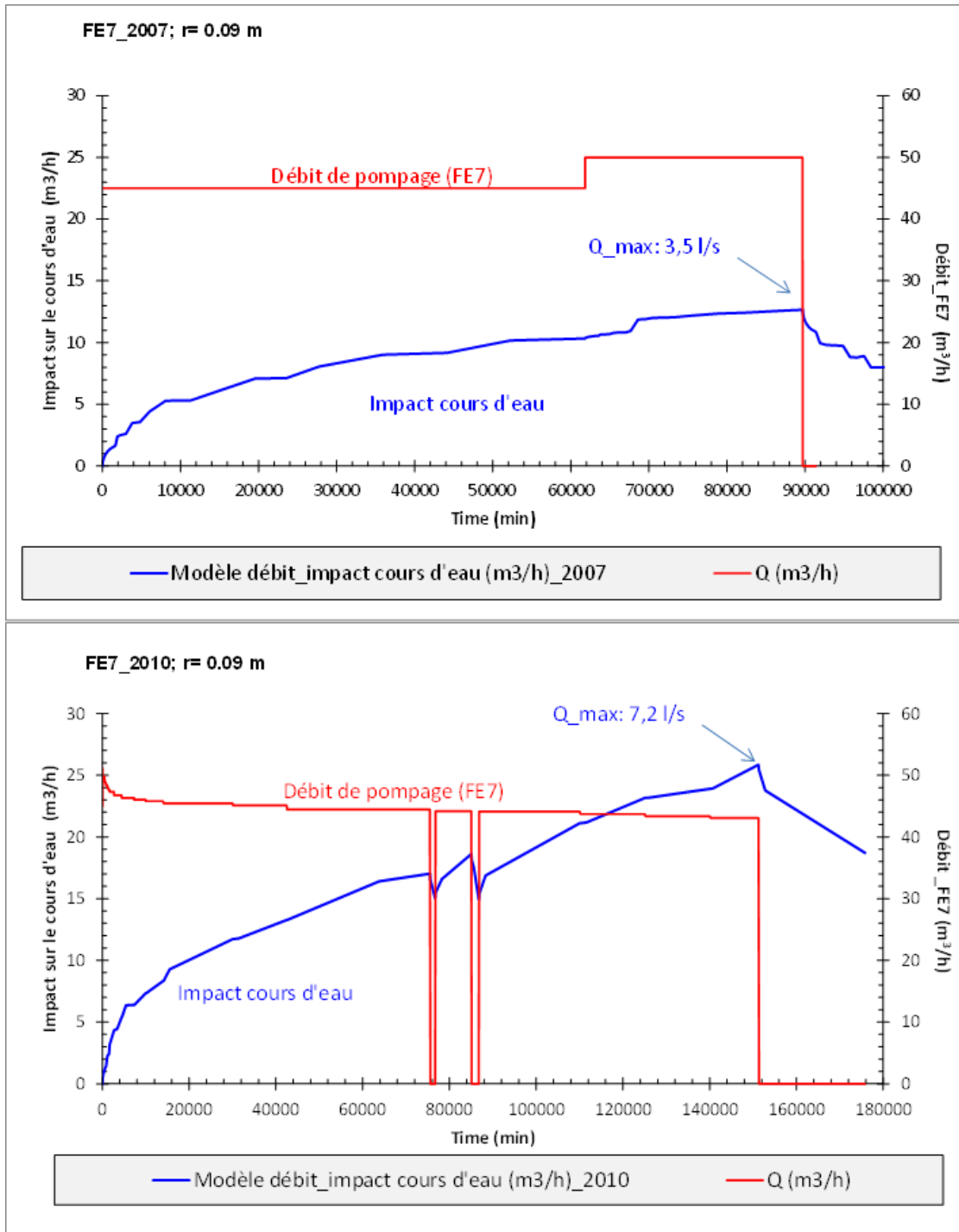


Illustration 25 : Impact des essais par pompage réalisés en FE7 sur l’Aff. Graphe du haut essai 2007-2008 ; graphe du bas ; essai 2010. Modèle Hunt modifié.

	FE7_2007	FE7_2010
r (m)	0.09	0.09
T (m ² /s)	1.30E-03	1.30E-03
S (-)	5.00E-04	5.00E-04
Sy (-)	7.00E-02	2.50E-02
Perm. Eponte (m/s)	2.25E-07	1.50E-07
Ep. Eponte_B' (m)	50.0	50.0
Dist.cours d'eau (m)	30.0	30.0
Larg. Cours d'eau	10.0	10.0
B'' (m)	49.0	49.0
Dist.Lim.1 (min)	13.0	9.0
Dist.Lim.2 (min)	13.0	9.0
Dist.Lim.1 (m)	90.1	74.9
Dist.Lim.2 (m)	90.1	74.9
Well skin (-)	-2.5	1.5
PDC (m-5s ²)	21500	0
Capacité de puits (m)	0.3	0.1

Tableau 9 : Paramètres hydrodynamiques utilisés pour la modélisation des essais sur le forage FE7 réalisés en 2007-2008 et 2010. Modèle Hunt modifié.

3.4 CONCLUSION SUR LA REINTERPRETATION DES ESSAIS DE POMPAGE

Les essais de pompage réalisés sur FE7 montrent la réaction typique d’un aquifère multicouche limité dans l’espace par deux limites étanches parallèles. L’aquifère limité correspond certainement à une zone de fractures dont l’orientation est environ N170 (direction FE3-Pz1) qui draine des systèmes de surface (effet de drainance), eux-mêmes reliés au cours d’eau.

Les réactions différentes entre les essais 2007 (hautes eaux de l’Aff) et 2010 (basses eaux) mettent en évidence les connexions entre FE7 et un système capacitif, a priori le cours d’eau, cohérentes avec ces conditions hydrologiques.

Cependant, les piézomètres Pz2, Pz4 et SR2 (essai 2007) montrent des réactions hydrodynamiques différentes de celles du puits de pompage (FE7), traduisant probablement le fait que ces piézomètres sont implantés dans d’autres compartiments perméables ou peu perméables. Ceci sous-entend aussi que les limites étanches diagnostiquées sur les essais correspondent vraisemblablement à des compartiments peu perméables situés à proximité de FE7.

Les diagnostics des essais réalisés en 2010 sur FE3 et FE4 montrent des comportements similaires à FE7, dans le sens où ils montrent eux aussi la réaction d’aquifères multicouches limités dans l’espace (deux limites étanches), mais pas directement connectés entre eux. Les aquifères qu’ils captent sont situés dans des compartiments connectés entre eux mais aux propriétés différentes : FE3 est implanté dans un compartiment de transmissivité similaire, mais vraisemblablement plus grand que celui de FE7, et FE4 est implanté dans un compartiment de transmissivité beaucoup plus faible, a priori de taille encore plus importante.

Cependant, les effets de drainance sont beaucoup plus faibles sur FE3 et FE4, montrant que FE7 est en connexion avec un aquitard beaucoup plus capacitif ou un plutôt un autre système, de surface, pouvant fournir de l’eau durant le pompage, visiblement l’Aff.

Les différentes modélisations réalisées sur FE7, notamment avec prise en compte d’un cours d’eau suggèrent un impact sur l’Aff de l’ordre de quelques l/s, cohérent avec les pertes estimées sur le cours d’eau au niveau des captages (cumul des pertes : 3,5 à 4,9 l/s en juillet 2013 ; Illustration 26).

Néanmoins, l’Aff était déjà connu, avant la réalisation des forages, pour être au cours de son étiage partiellement à sec, au moins au niveau des captages. Il est donc difficile d’estimer réellement l’impact des pompages sur le cours d’eau. Les études précédentes et celle-ci montrent (i) qu’il existe des pertes naturelles au niveau des captages, et que l’eau du cours d’eau s’y infiltre – vraisemblablement – déjà avant la réalisation des ouvrages et (ii) que le forage FE7 est fortement connecté au cours d’eau via un aquifère de surface, par contre les forages FE3 et FE4, s’ils le sont, le sont beaucoup moins. Ceci suggère que l’impact sur le cours d’eau doit avoir pour conséquence de prolonger son étiage, voire sa durée d’à sec, sans pourtant que celle-ci puisse être quantifiée (impact de l’ordre de quelques l/s).

L’équipement d’une station de mesure du débit en amont des forages (par exemple au niveau de la station 1 de l’étude AQUASCOP 2013) et une deuxième en aval (station 4), permettrait d’une part de qualifier et quantifier la dynamique des pertes, et d’autre part de mieux appréhender l’impact réel des pompages sur cette dynamique (par exemple, augmentation notoire ou pas des périodes d’à sec en lien avec les pompages).

De plus, rejeter l’eau pompée en FE3 entre les forages FE3 et FE7 n’est pas conseillé, à cause des zones de pertes importantes situées au sein du cours entre ces ouvrages (3,5 à 5 l/s en 2013 ; étude AQUASCOP, 2013).



Illustration 26 : Mesures de débit de le long de l’Aff au niveau des captages ; mise en évidence de zones de pertes au sein du cours d’eau ; Rapport Aquascop, 2013.

4 Analyses physico-chimiques et isotopiques

Des analyses chimiques (éléments majeurs et traces) et isotopiques (isotopes du strontium $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) de l’eau des 3 forages et de l’Aff en amont des ouvrages ont été réalisées afin de tenter d’identifier l’origine de l’eau captée par les forages (discrimination eau de surface/eau souterraine). En complément, des analyses du tritium et des gaz dissous CFC-SF6 ont été réalisées sur les 3 forages AEP afin d’appréhender le temps de résidence moyen des eaux souterraines. Les paramètres physico-chimiques suivants ont été mesurés sur site au moment des prélèvements : température, pH, potentiel redox, oxygène dissous et conductivité électrique.

Des informations sur les temps de résidence des eaux peuvent être obtenues grâce à la mesure du tritium (activité ^3H) dans les eaux, à condition que les eaux aient un âge inférieur à 50 ans. La recherche de CFC (chlorofluorocarbones) et du SF6 (hexafluorure de soufre) dans les eaux des forages permettra de mettre en évidence, si elle existe, une contribution d’eau récente aux eaux souterraines profondes des schistes briovériens. Les CFC et le SF6 sont des gaz produits par l’Homme à partir de la seconde moitié du XX^{ème} siècle. Les concentrations de ces gaz dans l’atmosphère ont augmenté tout au long du XX^{ème} siècle. La présence de ces deux gaz dissous dans l’eau souterraine implique donc la présence d’eau infiltrée depuis 1960 en proportion variable.

4.1 PRELEVEMENTS

Les prélèvements des échantillons destinés aux analyses ont été réalisés par le BRGM le 05/09/2014 (Illustration 27) :

- Prélèvement dans l’Aff en amont des captages AEP
- Prélèvement d’eau brute au niveau des 3 forages AEP du Pont de la Lande (robinets eau brute de la station du Pont de la Lande),
- Prélèvement d’eau brute sur le forage de la Blanchisserie ANETT à Beignon (03514X0079/S1-F3), captant les schistes briovériens (Annexe 1).



Illustration 27 : Localisation des points de prélèvements (forages et Aff)

4.2 ANALYSES

Les analyses chimiques et isotopiques (Tableau 10) ont été réalisées par le laboratoire du BRGM et le laboratoire OSUR de Géosciences Rennes pour les datations CFC-SF6.

Nombre d'échantillons	Analyses	Détail
5	Majeurs	Ca, Mg, Na, K, (CO ₃ , HCO ₃ -), Cl-, SO ₄ =, NO ₃ -, NO ₂ -, NH ₄ , SiO ₂
5	Mineurs /traces	Al, As, B, Ba, Br, Cd, Co, Cr, Cu, F, Li, Mn, Fe, Ni, Pb, Sr, Rb
5	Isotopes	Strontium (⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr)
5	Tritium (³ H)	
3 (forages AEP)	Gaz	CFC, SF ₆ , gaz nobles

Tableau 10 : Détail des analyses réalisées sur les forages EAP, l’Aff et le forage ANETT

4.3 INTERPRETATION

4.3.1 Paramètres physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques suivants ont été mesurés sur le terrain au moment du prélèvement des échantillons : Température, pH, potentiel d’oxydo-réduction (En), teneur en oxygène dissous et conductivité (cf. Annexe 3).

La température de l’eau est comprise entre 13.5 et 15.4°C, la valeur la plus élevée est mesurée dans le forage ANETT. Les 3 forages AEP présentent des températures très similaires (13.5-13.9°C). La rivière Aff a une température légèrement plus élevée que celle des forages et est certainement représentative de la température extérieure au moment du prélèvement.

Le pH est compris entre 6.37 et 7.67, la valeur la plus faible étant mesurée dans la rivière Aff. Cette valeur est cohérente avec les valeurs mesurées dans les rivières drainant des schistes et grès (Meybeck, 1986).

La teneur en oxygène dissous est 8.57 mg.L⁻¹ dans l’Aff, elle est très inférieure dans les forages (1.57-2.3 mg.L⁻¹) à l’exception de du forage FE4 avec 7.57 mg.L⁻¹. Le potentiel rédox est de 420 mV dans la rivière, et environ deux fois plus faible dans les eaux souterraines, traduisant un milieu faiblement oxydant. Le forage FE7 présente le potentiel rédox et la teneur en oxygène dissous les plus faibles, avec présence de Fe et Mn dans ces eaux à des teneurs supérieures aux autres ouvrages.

La conductivité électrique (EC), traduisant la minéralisation de l’eau, est très variable entre les eaux de surface et les eaux souterraines. La conductivité est de 93 µS.cm⁻¹ dans la rivière Aff ce qui est cohérent avec les données bibliographiques pour les cours d’eau drainant schistes et grès (Meybeck, 1986). Dans les eaux souterraines, EC varie entre 300 et 400 µS.cm⁻¹ la valeur la plus élevée étant mesurée dans le forage FE4, la plus faible dans le forage FE7.

4.3.2 Chimie des eaux

Le TDS (Total Dissolved Solids, exprimé en mg.L⁻¹) est la somme des concentrations (exprimées en mg.L⁻¹) des cations et des anions mesurés en laboratoire, et représente donc la minéralisation de l’eau. Il existe généralement une bonne relation entre la conductivité électrique (mesurée sur le terrain) et le TDS calculé à partir des analyses chimiques de laboratoire. Ces deux paramètres sont corrélés avec un R²=0.99, aucun problème majeur lors du déroulement des analyses chimiques ou des mesures de conductivité ne semble donc devoir être suspecté.

La balance électrique peut être évaluée à partir de l’indice NICB (Normalized Inorganic Charge Balance) qui correspond au pourcentage de charges positives excédentaires ou manquantes pour avoir un bilan des charges nul. Il est calculé suivant la formule :

$$NICB (\%) = \frac{\sum^+ - \sum^-}{\sum^+ + \sum^-} \times 100$$

Une eau ayant toujours un bilan de charges nul à l’équilibre, un excès de cations ou d’anions dénote d’une analyse chimique incomplète ou de mauvaise qualité. On considère que les analyses sont correctes pour un NICB compris entre -5% et +5%. Toutes les analyses de cette étude présentent un NICB largement inférieur à 5%.

Les données des éléments majeurs sont reportés dans un diagramme de Piper qui permet de représenter la proposition relative des anions (triangle de droite) et des cations (triangle de gauche), les deux résultats étant ensuite projetés dans le losange. Dans cette représentation la taille du point est proportionnelle à la minéralisation de l’échantillon (conductivité électrique), Illustration 28.

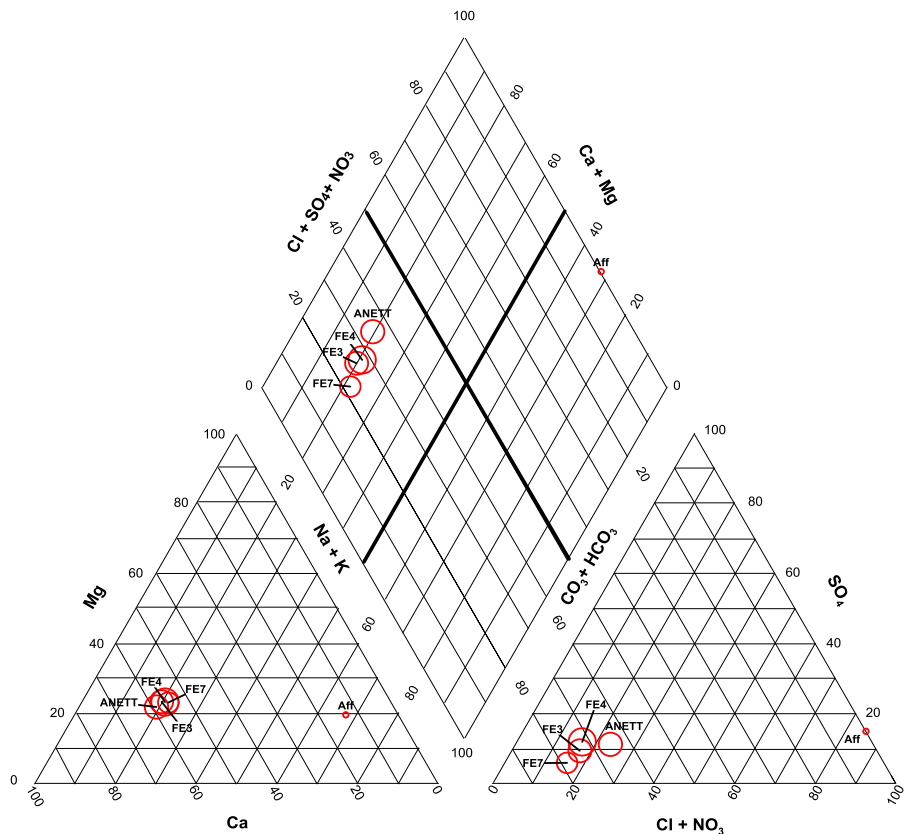


Illustration 28 : Diagramme de Piper des eaux de la rivière Aff et des forages de cette étude

Les eaux souterraines ont des proportions de cations très similaires et très distinctes de l’eau de surface (Aff) très pauvre en Ca et Mg. Les proportions d’anions sont un peu plus variables dans les eaux souterraines mais surtout sont très distinctes de la rivière Aff dont le Cl est l’anion ultra majoritaire. On notera que les eaux souterraines sont totalement exemptes de nitrates et que l’Aff n’en contient qu’une infime quantité (0.6 mg.L^{-1}) juste au-dessus de la limite de quantification.

Les eaux souterraines, au fur et à mesure de leur cheminement, acquièrent leur composition chimique qui dépend de la composition locale des eaux de pluie (recharge), des roches avec lesquelles elles interagissent (origine naturelle de la minéralisation) et des pollutions qu’elles intègrent (origine anthropique de la minéralisation). De plus, la composition chimique d’une eau souterraine peut aussi être modifiée par des mélanges potentiels avec d’autres réservoirs d’eau, que ce soit d’autres niveaux aquifères, des eaux de surface ou eaux lacustres. Enfin, des processus bio-géochimiques peuvent éventuellement modifier/contrôler la composition chimique d’une eau souterraine.

En l’absence de dépôts évaporitiques dans les niveaux lithologiques drainés, et en milieu naturel, les chlorures dissous dans les eaux souterraines proviennent uniquement de l’eau de pluie qui les alimente. Ainsi les chlorures sont souvent utilisés comme élément de référence (Meybeck, 1983 et 1986, Berner et Berner, 1987). L’apport via les précipitations a été calculé

dans la région (Ayraud *et al.*, 2008 et références incluses) en se basant sur des analyses de pluies sur deux années. La moyenne, pondérée des hauteurs de pluie, des teneurs en Cl des précipitations est de 10 ± 2 mg.L⁻¹. L'évapo-transpiration locale a été estimée à 50-60% des précipitations, ce qui conduit à une teneur moyenne en Cl de la recharge de 30 ± 10 mg.L⁻¹. Ayraud *et al.* (2008) considèrent ainsi que toutes les eaux souterraines présentant des teneurs en Cl supérieures à 40-45 mg.L⁻¹ contiennent une part de Cl qui n'est pas d'origine atmosphérique.

Si des études ont montré que le socle armoricain pouvait contenir une composante saline ancienne pouvant conduire à des teneurs en Cl de plusieurs centaines de mg.L⁻¹ (Ayraud *et al.*, 2008 ; Aquilina *et al.*, 2013), ce n'est clairement pas le cas ici où les teneurs en Cl mesurées aussi bien dans la rivière Aff que dans les eaux souterraines sont compatibles avec la recharge via les pluies. L'illustration 29 montre que les teneurs en Cl et Na (cf. résultats des analyses en Annexe 3) sont du même ordre de grandeur que celles mesurées dans les forages profonds du bassin du Coët Dan (Négreel et Pauwels, 2004). Une analyse ARS du 27/08/2013 de l'exhaure de la Lande (mélangeant les 3 ouvrages FE3, FE4 et FE7) présente des caractéristiques très similaires à FE3.

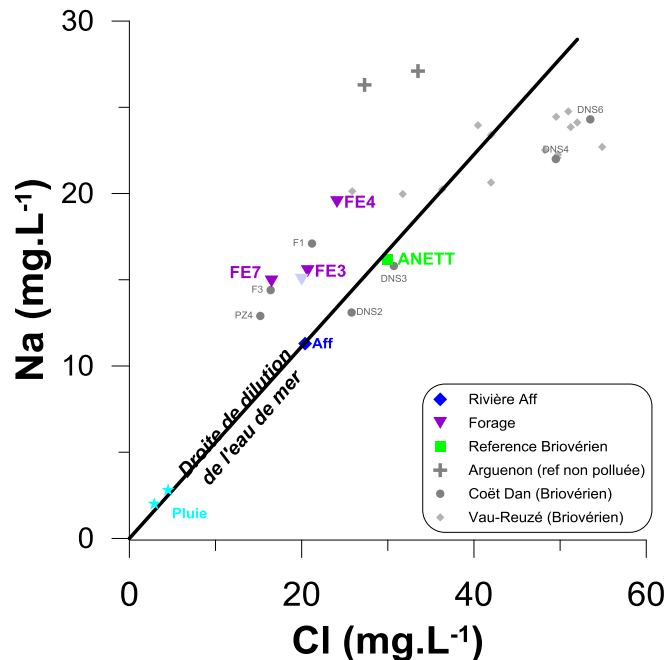


Illustration 29 : Relation entre sodium et chlorure dans les eaux du site d'étude. Comparaison avec la droite de dilution de l'eau de mer et les deux sites d'études dans les schistes briovériens (Coët Dan ; Négreel et Pauwels, 2004 ; Vau-Reuzé : Ayraud *et al.*, 2006).

Dans une représentation des teneurs en calcium en fonction des chlorures (Illustration 30), on note que les eaux de l’Aff sont très pauvres en Ca ce qui les distingue très nettement des eaux souterraines locales qui ont toutes des teneurs supérieures à 30 mg.L⁻¹. De plus, les eaux souterraines présentent des teneurs en Ca très supérieures à celles mesurées dans les schistes du Briovérien du bassin du Coët Dan (~ facteur 3).

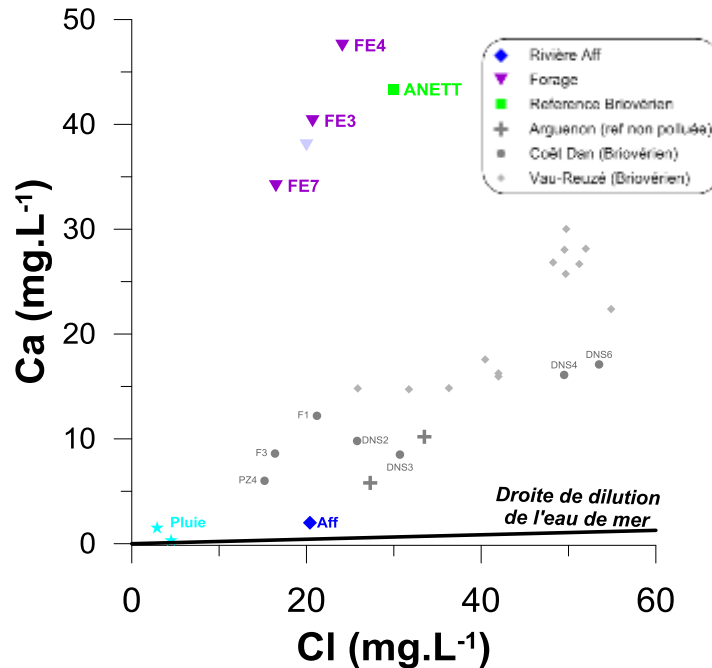


Illustration 30 : Relation entre calcium et chlorure dans les eaux du site d'étude. Comparaison avec la droite de dilution de l'eau de mer et les deux sites d'études dans les schistes briovériens (Coët Dan ; Négrel and Pauwels, 2004 ; Vau-Reuzé : Ayraud et al., 2006).

De même, le strontium (Sr), élément trace analogue du Ca auquel il se substitue aisément dans les réseaux cristallins, présente des teneurs très fortes dans les eaux souterraines des forages (200-300 µg.L⁻¹) contre une dizaine de µg.L⁻¹ dans la rivière Aff. Comme pour le calcium, les teneurs en Sr des eaux souterraines du site de l’Aff sont bien plus riches en Sr que les eaux des schistes du Briovériens du Coët Dan.

4.3.3 Les isotopes du strontium

Les variations du rapport isotopique du strontium (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr) dans un hydrosystème donnent des informations sur (1) la nature et l'intensité des processus d'interactions roche-eau, à la condition que les compartiments drainés présentent des signatures distinctes, (2) l'origine et, dans des conditions optimales, les proportions de mélange des différents composants fluides. Dans le cadre de cette étude, on cherche à distinguer (1) la signature de la rivière Aff drainant les schistes rouges; (2) la signature des eaux des schistes briovériens à distance de l’Aff; (3) à comparer avec les signatures des 3 forages captant les schistes briovériens à proximité de l’Aff.

La rivière Aff présente un rapport isotopique ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0.71315 avec une teneur faible en Sr = 12 µg.L⁻¹. Les eaux souterraines du secteur sont très nettement distinctes avec des rapports isotopiques en Sr beaucoup moins radiogéniques (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0.70958 à 0.71015) associées à des teneurs en Sr plus importantes (~200 à 300 µg.L⁻¹) marquant des interactions eau-roches différentes. La rivière Aff draine les schistes rouges et grès armoricains alors que les eaux souterraines sont issues des schistes briovériens sous-jacents.

Le forage Anett situé au sud de la zone d'étude capte les schistes briovériens en dehors de toute influence supposée de la rivière, il présente une signature ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0.71015, très faible pour ce type de formation si on se réfère aux eaux du bassin versant du Coët Dan, elles aussi issues des schistes briovériens, et qui sont nettement plus radiogéniques (Pauwels et Negrel, 2004).

Les 3 forages AEP issus des schistes briovériens, sous influence possible de la rivière Aff, présentent des signatures $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ assez similaires allant de 0.70958 à 0.709735. On notera que ces valeurs sont très faibles par rapport aux valeurs attendues dans ce type d’encaissant.

Connaissant la signature chimique des eaux de deux réservoirs et les proportions de mélange, il est possible de calculer la signature des eaux résultant du mélange. A l’inverse, il est donc possible de calculer des taux de mélange connaissant les signatures des deux termes du mélange et de la résultante.

Ces calculs sont possibles à partir des teneurs seules ou avec des signatures isotopiques.

Ainsi, un mélange dont on connaît les concentrations des deux termes et la proportion de mélange s’exprimera :

$$[X]_{\text{mél}} = f[X]_1 + (1-f)[X]_2$$

avec $[X]_{\text{mél}, 1 \text{ et } 2}$: concentration de l’élément X dans le mélange et les deux termes initiaux 1 et 2,

f : proportion du terme 1 dans le mélange

Pour un mélange impliquant des rapports isotopiques d’un élément dissous (le strontium dans cet exemple), le mélange binaire s’exprimera :

$$\left(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \right)_{\text{mél}} = \frac{f * \left(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \right)_1 * [\text{Sr}]_1 + ((1-f) * \left(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \right)_2 * [\text{Sr}]_2}{[\text{Sr}]_{\text{mél}}}$$

avec :

$\left(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \right)_{\text{mél}, 1 \text{ et } 2}$: composition isotopique du Sr du mélange et des deux termes initiaux 1 et 2,
 $[X]_{\text{mél}, 1 \text{ et } 2}$: concentration de l’élément X dans le mélange et les deux termes initiaux, f : proportion du terme 1 dans le mélange.

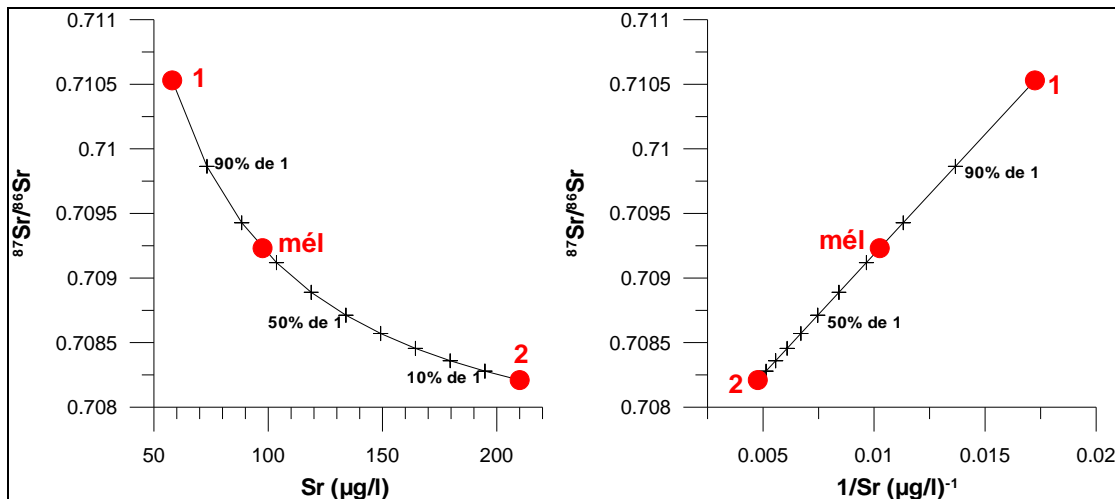


Illustration 31: Représentations graphiques d’un mélange binaire avec des isotopes du Sr

L’Illustration 31 met en évidence que les mélanges sont beaucoup plus simples à visualiser graphiquement en utilisant l'inverse de la concentration de l'élément dissous dont on utilise le rapport isotopique (graphique de droite).

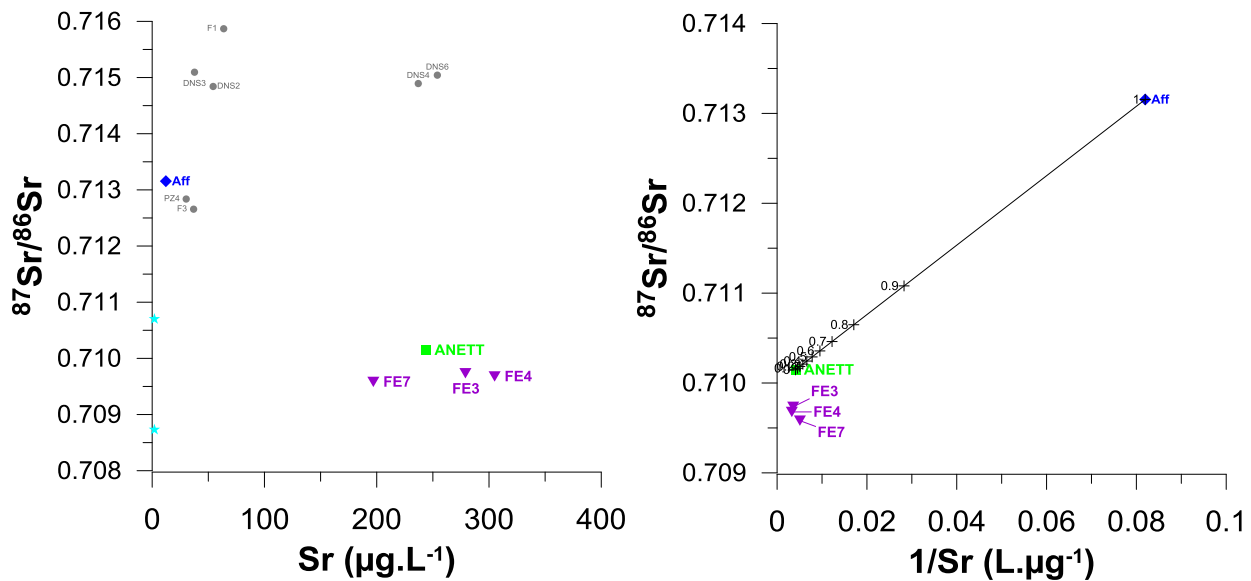


Illustration 32 : $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en fonction de la teneur en Sr et de l'inverse de la teneur en Sr pour les échantillon du secteur d'étude.

L’Illustration 32 met nettement en évidence que les signatures des forages FE 3, FE4 et FE7 ne résultent pas d'un mélange binaire entre les eaux de référence de l'aquifère briovérien (forage Anett) et les eaux de la rivière Aff. En effet, un tel mélange se matérialiserait par un positionnement des points FE 3, FE4 et FE7 sur la droite de mélange entre les deux pôles. Il semble donc que les eaux du forage ANETT ne soient pas forcément représentatives du briovérien au niveau des 3 ouvrages investigués, ce qui peut traduire une hétérogénéité et/ou compartimentation de l'aquifère briovérien.

4.3.4 Temps de résidence des eaux

4.3.4.1 Le tritium (^3H)

Le tritium ^3H est un traceur intime de la molécule d'eau. La production naturelle du tritium est liée à l'impact neutronique du rayonnement cosmique sur les noyaux d'azote de l'air. Cette production conduit à une teneur dans la haute atmosphère de 1 atome de ^3H pour 10^{18} atomes de ^1H . La période radioactive (ou temps de demi-vie) du tritium est de 12.32 ans, cela signifie qu'au bout de 12.32 ans le nombre de désintégrations β par unité de temps a diminué de moitié.

A cette production naturelle s'ajoute une injection de tritium en grande quantité produite dans la stratosphère lors des essais thermonucléaires et nucléaires aériens. La fréquence de ces essais a atteint un maximum pendant les années 1962-1963. Depuis l'arrêt des essais en 1963, les teneurs en ^3H montrent une décroissance progressive pour tendre de nouveau vers les teneurs naturelles. Cette production artificielle permet de différencier les eaux résultant de précipitations sans tritium nucléaire (avant 1952) des eaux de précipitations formées dans une

atmosphère contenant du tritium nucléaire (après 1952). Les teneurs en tritium s'expriment en unités tritium, 1 UT correspond à 1 atome de ^3H pour 10^{18} atomes de ^1H .

Les dernières précipitations qui ne contenaient que du tritium naturel ont donc eu lieu en 1951, et à l'origine leurs teneurs étaient de l'ordre de 5 UT (production naturelle) et donc actuellement les teneurs en tritium de ces pluies infiltrées ne dépassent pas 0.15 UT.

ECHANTILLON	DATE de Prélèvement	TRITIUM UT
AFF	05/09/2014	3.2 ± 0.8
Forage FE 3	05/09/2014	1.8 ± 0.5
Forage FE 4	05/09/2014	1.6 ± 0.7
Forage FE 7	05/09/2014	< 0.6
ANETT	05/09/2014	1.7 ± 0.6

Illustration 33 : Teneurs en tritium des eaux du secteur d'étude. Activité à fin novembre 2014, période du tritium 12.32 ans.

Les eaux de la rivière Aff présentent une teneur en tritium de 3.2 ± 0.8 UT, et est représentative de la signature des pluies actuelles (Illustration 33).

Le Forage FE7 présente des teneurs en tritium inférieures à la limite de détection de 0.6 UT, traduisant des eaux anciennes sans composante de recharge postérieure au début des essais nucléaires aériens (1952) détectable.

Les eaux des forages FE3, FE4 et ANETT présentent des teneurs très similaires entre elles allant de 1.6 ± 0.7 à 1.8 ± 0.5 UT. Ces valeurs traduisent la présence d'une composante moderne (post-1952) dans ces eaux souterraines. Cependant, compte tenu de ces faibles valeurs et de l'incertitude analytique associée, il n'est pas possible de déterminer la période ni la quantité de recharge moderne. On notera que le forage ANETT, hors influence de la rivière Aff, présente des teneurs similaires aux forages FE3 et FE4, ainsi, pour ces deux ouvrages, la composante moderne identifiée dans le réservoir peut résulter de la recharge naturelle de l'aquifère.

4.3.4.2 Les gaz dissous naturels et anthropiques : datation CFC et SF6

Les CFC et le SF6 sont des gaz anthropiques qui s'accumulent dans l'atmosphère (Illustration 34) depuis les années 1960 et dont la présence dans les eaux souterraines indique la présence d'eau de moins de 60 ans (Ayraud, 2006 et 2008).

L'analyse de l'oxygène dissous (O_2), du N_2O et du CH_4 permet de savoir si les eaux sont réductrices (peu d'oxygène) ou oxydantes. L'absence d'oxygène pouvant être un facteur favorisant la dégradation de certains CFCs. Les concentrations en néon et argon sont indicatrices de la température de recharge c'est-à-dire de la température à laquelle l'eau s'est infiltrée dans le sol (en Bretagne à l'époque actuelle environ 12°C).

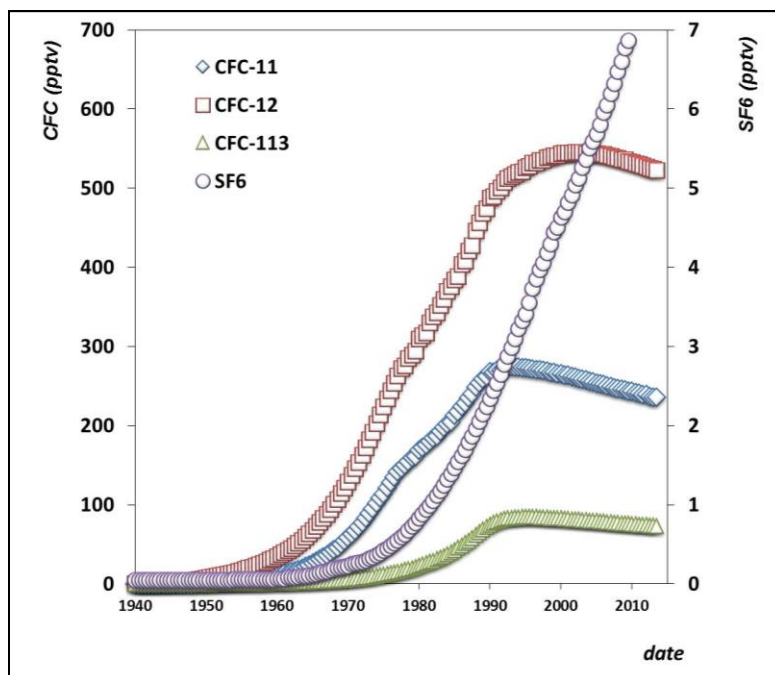


Illustration 34 : Evolution de la concentration en CFC dans l’atmosphère de l’hémisphère nord (données NOAA-USGS)

Certains gaz dissous ont été analysés dans les forages FE4, FE3 et dans l’Aff dans le but de vérifier les températures de recharge et les conditions oxydo-réductrices (Tableau 11). FE3 et FE4 présentent des concentrations en oxygène faible et du méthane est présent, pouvant indiquer un environnement favorable à la dégradation des CFCs.

mg/L	O ₂	%	CO ₂	N ₂	N ₂ O	Ne	Ar	CH ₄
FE4	0.25	2	3.67	29.5	<ld	0.00048	0.758	0.0113
FE3	0.89	8	3.27	33.6	<ld	0.00059	0.823	0.0084
AFF	4.76	44	2.88	20.4	<ld	0.00037	0.528	0.0021

Tableau 11 : Résultats d’analyse de gaz dissous

L’interprétation des concentrations en néon et argon (Illustration 35) indique pour l’Aff une température d’un peu plus de 15°C cohérente avec les valeurs attendues dans un ruisseau au mois de Septembre et avec celle relevée sur le terrain (14.7°C). Par contre les concentrations en néon et argon de FE3 et FE4 indiquent des températures de recharges basses, inférieures à 5°C. Ces températures ont déjà été observées en Bretagne sur des points où on suppose la contribution d’eau à très long temps de résidence (Aquilina, 2013).

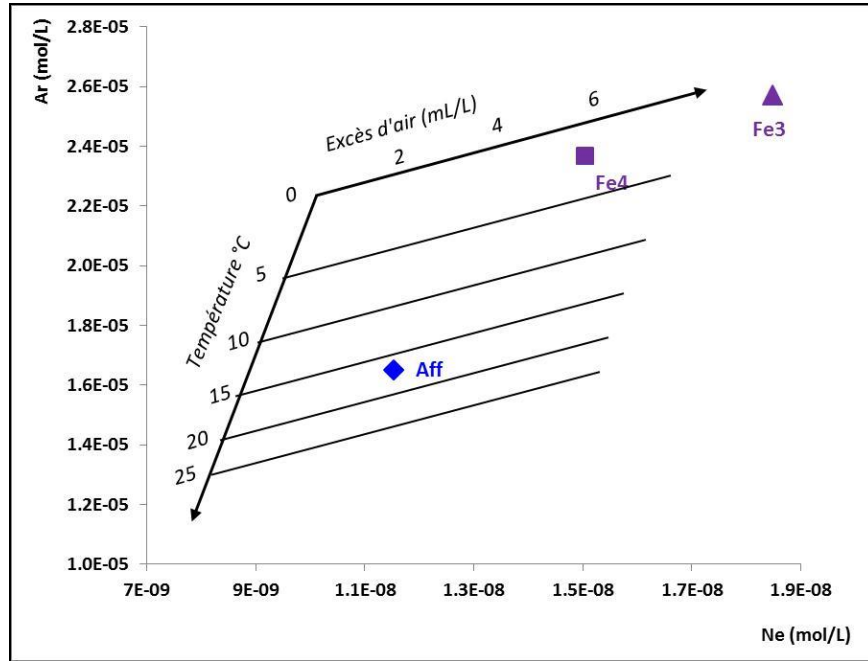


Illustration 35 : Graphique représentant les concentrations en argon et néon des points analysés et permettant de « lire » la température de recharge

Trois ouvrages ont été analysés en datation par analyse des CFC et du SF6 dans le cadre de cette étude : FE7, FE4 et FE3. Les résultats sont reportés dans le Tableau 12.

	FE3		FE4		FE7		valeur 2013
	pptv	âge apparent	pptv	âge apparent	pptv	âge apparent	pptv
CFC-12	263.4	1977	174.1	1972	43.2	1961	524.2
CFC-11	20.5	1963	8.8	1959	<ld	<1970	236.2
CFC-113	9.3	1973	8.9	1973	<ld	<1960	73.7
SF6	5.4	2003	2.1	1988	<ld	<1960	7.94

Tableau 12 : Résultats bruts des analyses de datation par CFC et SF6 (pptv : parties par billion (10^{12}) en volume)

FE7 montre des concentrations inférieures aux limites de détections analytiques pour tous les composés sauf le CFC-12 où la concentration reste faible. Ceci indique une eau ancienne avec un temps de résidence supérieur à 60 ans, en cohérence avec les données de tritium (§ 4.3.4.1). La valeur en CFC-12 serait également compatible avec une participation d’eau récente (âge apparent de 2013, eau de surface) mais dont la proportion ne dépasserait pas 5 à 10%. Dans ce cas les concentrations en CFC-11, CFC-113 et SF6 devraient respectivement être de 11.8 à 23.6 pptv en CFC-11, 3.65 à 7.37 pptv en CFC-113 et 0.4 à 0.8 pptv en SF6 soit au-delà des limites de détection analytiques en CFCs et proche de la limite de détection en SF6. Il est donc plus probable que cette concentration en CFC-12 soit le marqueur d’une légère contamination du système de prélèvement ou d’analyse. Néanmoins même si des eaux récentes participent au fonctionnement de l’ouvrage elles ne peuvent dépasser 10% de la masse d’eau.

FE3 et FE4 présentent des valeurs assez similaires en CFC-113 et CFC-11. Les valeurs en CFC-12 et SF6 sont légèrement plus élevées sur FE3 que FE4 (comme pour le tritium).

Sur FE4 les valeurs en CFC-12 et CFC-113 indiquent une eau avec un temps de résidence d’une quarantaine d’années. Le CFC-11 indique un âge un peu plus ancien mais ce composé peut être soumis à dégradation dans certains environnements pauvres en oxygène (ce qui est le cas ici avec des concentrations en oxygène dissous d’environ 8% -Tableau 11 : Résultats d’analyse de gaz dissous). Le SF6 lui montre des concentrations hautes, relativement à l’âge apparent en CFC, ce qui est souvent le signe d’une production terrigène.

Sur FE3 la valeur en CFC-12 est légèrement plus élevée mais toujours en cohérence avec le CFC-113 pour un temps de résidence autour de 40 ans. Le CFC-11 malgré des concentrations en oxygène plus basses semble moins influencé par une dégradation. Par contre la concentration en SF6 est un peu plus importante que sur FE4.

Dans l’hypothèse d’un mélange avec une eau récente (2013) sur ces deux points les traceurs donnent des résultats discordants : autour de 10% pour le CFC-11 et CFC-113 et entre 30% pour FE4 et 50-70% pour FE3 d’eau de 2013 (Tableau 13). Mais les températures de recharge observées ne sont pas cohérentes avec une forte proportion d’eau récente et les concentrations en CFC-12 et SF6 seraient à rapprocher de contaminations anthropiques (CFC-12) ou naturelles (SF6 production terrigène).

	% d'eau de 2013	
	FE3	FE4
CFC-12	50%	33%
CFC-11	9%	4%
CFC-113	13%	12%
SF6	68%	26%

Tableau 13 : Calcul de pourcentage d’eau récente (2013) indiqué par chaque traceur pour FE3 et FE4

5 Conclusion

Les deux approches utilisées dans cette étude, hydrodynamique et géochimique, montrent une dualité mais fournissent néanmoins des résultats tangibles : la réinterprétation des essais de pompage montre une connexion entre la surface et les eaux souterraines (notamment au niveau du forage FE7) alors que les analyses chimiques indiquent à première vue l’absence de contribution d’eau récente dans les eaux souterraines.

La réinterprétation des essais de pompage a mis en évidence un comportement hydrodynamique différent des forages en pompage en période de hautes et basses eaux du cours d’eau (respectivement en 2007 et en 2010) et des effets de drainance des formations géologiques superficielles, montrant l’influence des systèmes de surface sur les eaux souterraines. De plus, des pertes importantes au sein du cours d’eau et à proximité des forages ont été constatées (AQUASCOP, 2013).

Du point de vue géochimique, aucun impact quantifiable d’eau récente dans les eaux souterraine n’a été mis en évidence, notamment sur le forage FE7, sur lequel on a constaté une absence de tritium et de CFCs-SF6 et une faible température de recharge suggérant une eau ancienne (rechargée avant les années 1950). Cependant, les pertes, mesurées par AQUASCOP en 2013 dans le cours d’eau et susceptibles d’atteindre les eaux souterraines, sont très probablement négligeables en termes de volume par rapport au volume d’eau présent dans l’aquifère capté par les forages. Il est donc possible que cet effet de dilution par des eaux plus superficielles et donc récentes, ajouté à la très faible minéralisation de l’eau de la rivière, masque l’infiltration d’eau récente de la surface vers la profondeur. L’eau souterraine étant captée en profondeur par les forages (à plus de 45 m), il est aussi possible que les infiltrations d’eau de surface restent trop superficielles pour être captées par les forages, ou suivent un chemin différent qui ne serait pas capté par les forages.

On peut donc supposer qu’il s’agit d’un aquifère stratifié verticalement, sans mélange homogène de l’eau sur son épaisseur, mais aussi compartimenté latéralement par les nombreuses fractures (comportement hydrodynamique et signature chimique différents pour chaque forage). Des effets de drainance, plus ou moins forts, ont été constatés au niveau des 3 forages, montrant une connexion hydraulique avec la surface, bien qu’elle ne soit pas visible sur les analyses géochimiques. Cependant, l’impact réel des pompages sur le cours d’eau reste difficile à évaluer, faute d’état initial avant la mise en service des ouvrages et compte-tenu des conditions naturelles défavorables (pertes dans le cours d’eau, milieu très fracturé).

Ce site, dont la complexité a été confirmée par cette étude (signature atypique en Sr pour un aquifère briovérien, pertes du cours d’eau inhabituelles en zone de socle, débits souterrains exceptionnellement élevés en zone de socle, aquifère très compartimenté), mériterait des investigations complémentaires afin de mieux comprendre son comportement hydrogéologique et les relations entre l’aquifère et la surface. La mise en place de stations de jaugeage, la réalisation de traçage au niveau des pertes, un suivi temporel de la chimie des eaux souterraines de sub-surface et profondes permettraient de répondre à ces questionnements.

6 Bibliographie

Aquascop, 2013. Mesures de débit sur l’Aff. Etude n°8722 ; septembre. 2013, 7 p.

Aquilina, L., Armandine-Les Landes, A., Ayraud-Vergnaud, V., Labasque, T., Roques, C., Davya, P., Pauwels, H., Petelet-Giraud, E. (2013). Evidence for a saline component at shallow depth in the crystalline Armorican basement (W France). *Procedia Earth and Planetary Science*, 7, 19-22.

Ayraud, V., Aquilina, L., Pauwels, H., Labasque, T., Pierson-Wickmann, A.-C., Aquilina, A.-M., Gallat, G., 2006. Physical, biogeochemical and isotopic processes related to heterogeneity of a shallow crystalline rock aquifer. *Biogeochem.*, 81, 331-347

Ayraud V., Aquilina L., Labasque T., Pauwels H., Molenat J., Pierson-Wickmann A.C, Durand V., Bour O., Tarits C., Le Corre P., Fourre E., Merot P. and Davy P., 2008. Compartmentalization of physical and chemical properties in hard rock aquifers deduced from chemical and groundwater age analyses. *Applied Geochemistry* 23, 9 2686-2707.

Berner, K.B. and Berner, R.A., 1987. *The Global Water Cycle: Geochemistry and Environment*. Prentice-Hall, New Jersey, 397pp.

Bourdet, Whittle T.M., Dougals, A.A., Pirard V.M., 1983. A new set of type curves simplifies well test analysis, *World Oil*.

Bourdet D., Ayoud J.A. and Prirard Y.M., 1989. Use of pressure derivative in well-test interpretation. *SPE*, 293-302.

Deruyck B., Ehlig-Economides C. and Joseph J., 1992. Testing design and analysis. *Oilfield and analysis*. 28-45.

Hunt, B. 2003. Unsteady stream depletion when pumping from semi-confined aquifer. *ASCE Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 8, No.1, 12-19.

Hunt, B. and Scott D., 2007. Flow to well in a two-aquifer system. *J. of Hydrologic Engineering*, 146-155.

Meybeck, M., 1983. Atmospheric inputs and river transport of dissolved substances. In, *Dissolved loads of rivers and surface water quantity/quality relationships*. Proc. IASH Symp. Hamburg, August 1983, Int. Assoc. Hydrol. Sci. Publ. 141, 173-192

Meybeck, M., 1986. Composition des ruisseaux non pollués de France. *Sci. Geol. Bull.* 39, 3–77.

Négrel, P., Pauwels, H., 2004. Interaction between Different Groundwaters in Brittany Catchments (France): Characterizing Multiple Sources through Strontium- and Sulphur Isotope Tracing. *Water Air Soil Pollut.* 151, 261-285.

Renard Ph., Glenz D. and M. Mejias. 2009. Understanding diagnostic plots for well-test interpretation. *Hydrogeology Journal*. 17: 589–600.

Spane F.A. and Wurstner S.K., 1993. DERIV: a computer program for calculating pressures derivatives for use in hydraulic test analysis.

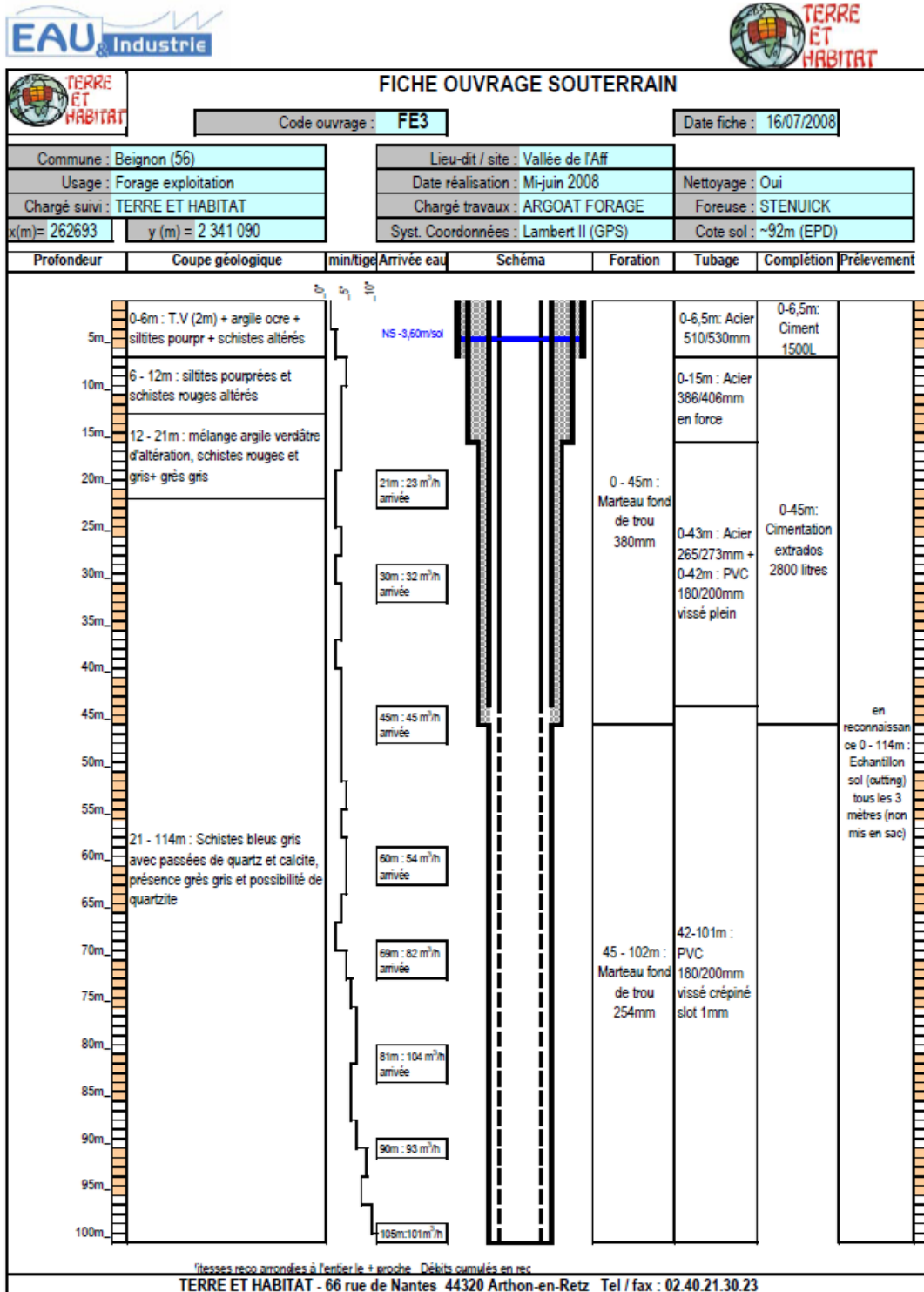
Schlumberger. 2002. Well test interpretation. SCHLUMBERGER. Rap., 122 p.

Terre et Habitat – Eau & Industrie, 2008 – Syndicat Intercommunal d’Alimentation en Eau Potable de Guer-Beignon – Mission de maîtrise d’œuvre pour la réalisation d’une campagne de recherche d’eaux souterraines – Rapport de phase n°3 : réalisation des ouvrages d’exploitation et réalisation des pompages d’essai. 49 p.

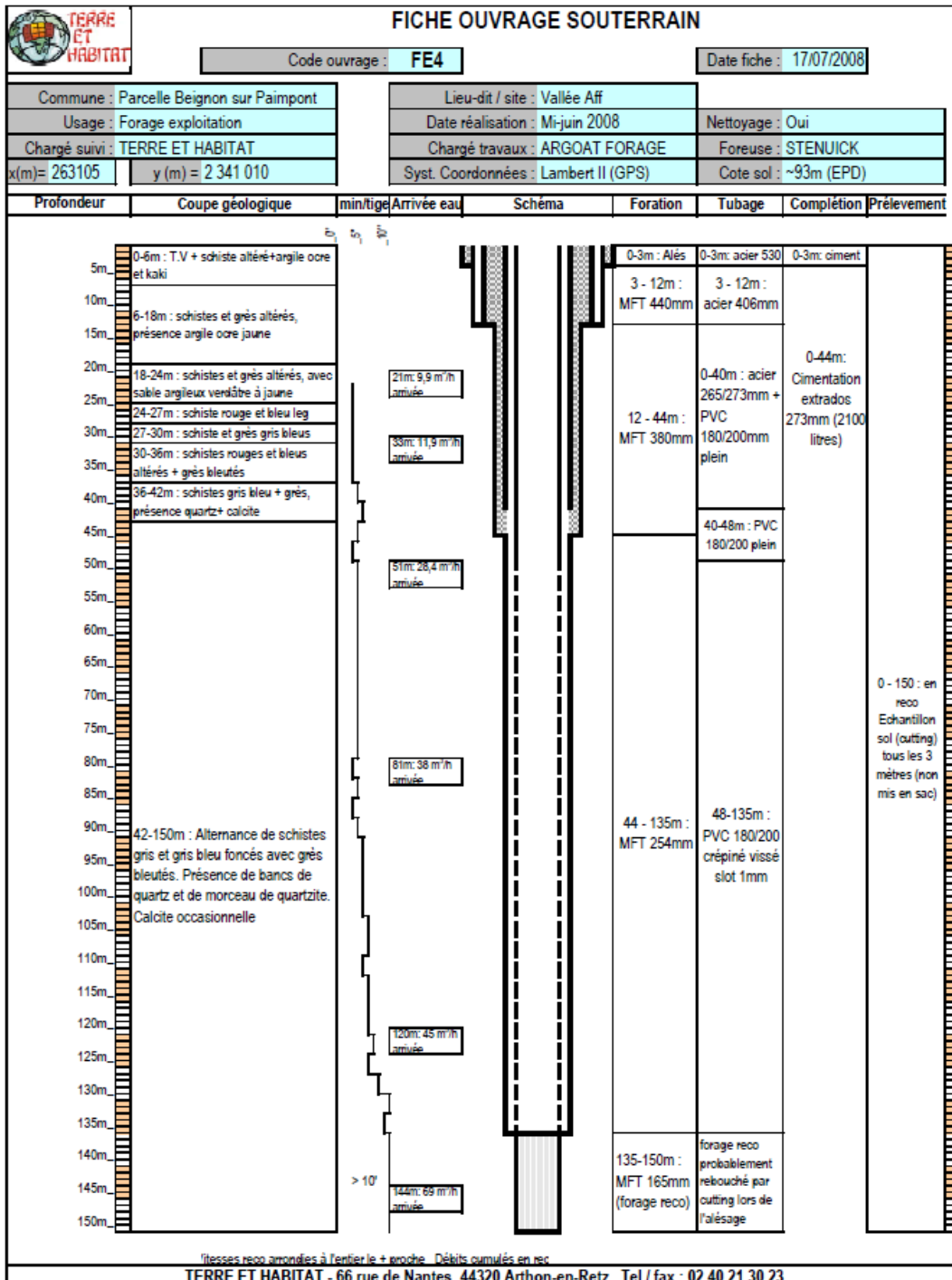
Terre et Habitat, 2011 - SIAEP du Pays de Guer à Beignon - Site de la vallée de l’Aff - Interprétation des essais de pompage réalisés à la fin de l’année 2010. Rapport R-981. 26 p.

Annexe 1

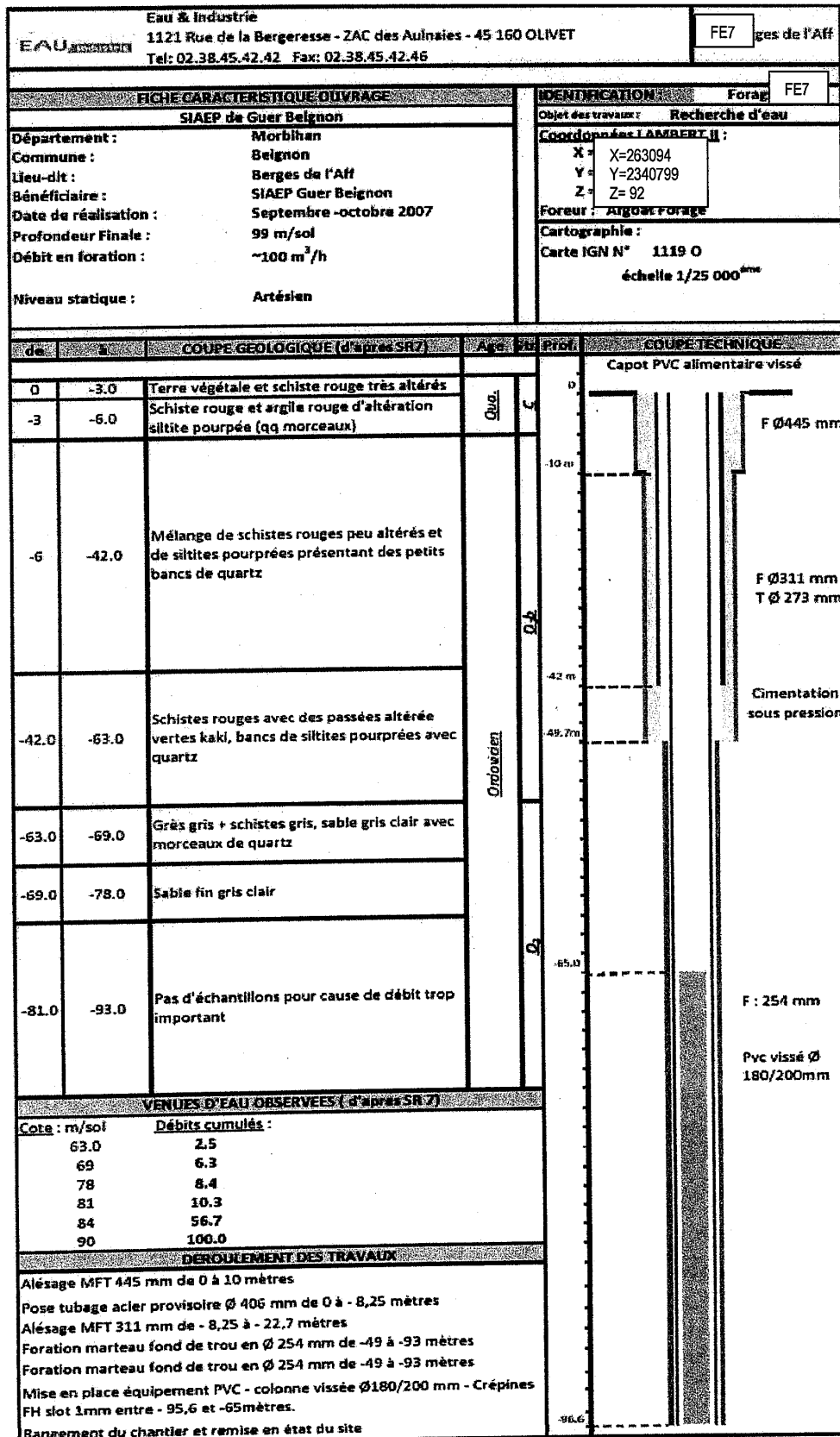
Coupes géologiques et techniques des 4 forages étudiés



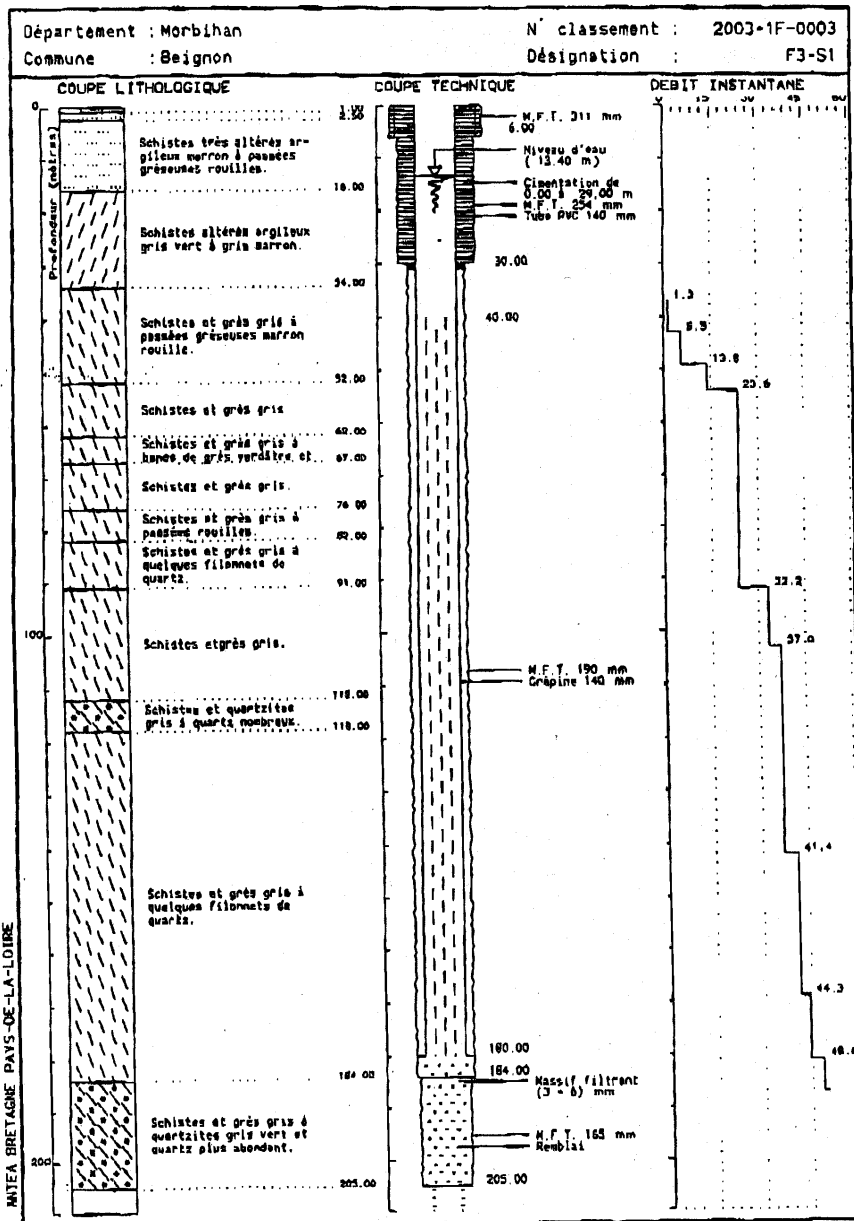
Coupe géologique et technique du forage FE3 (Terre et Habitat)



Coupe géologique et technique du forage FE4 (Terre et Habitat)



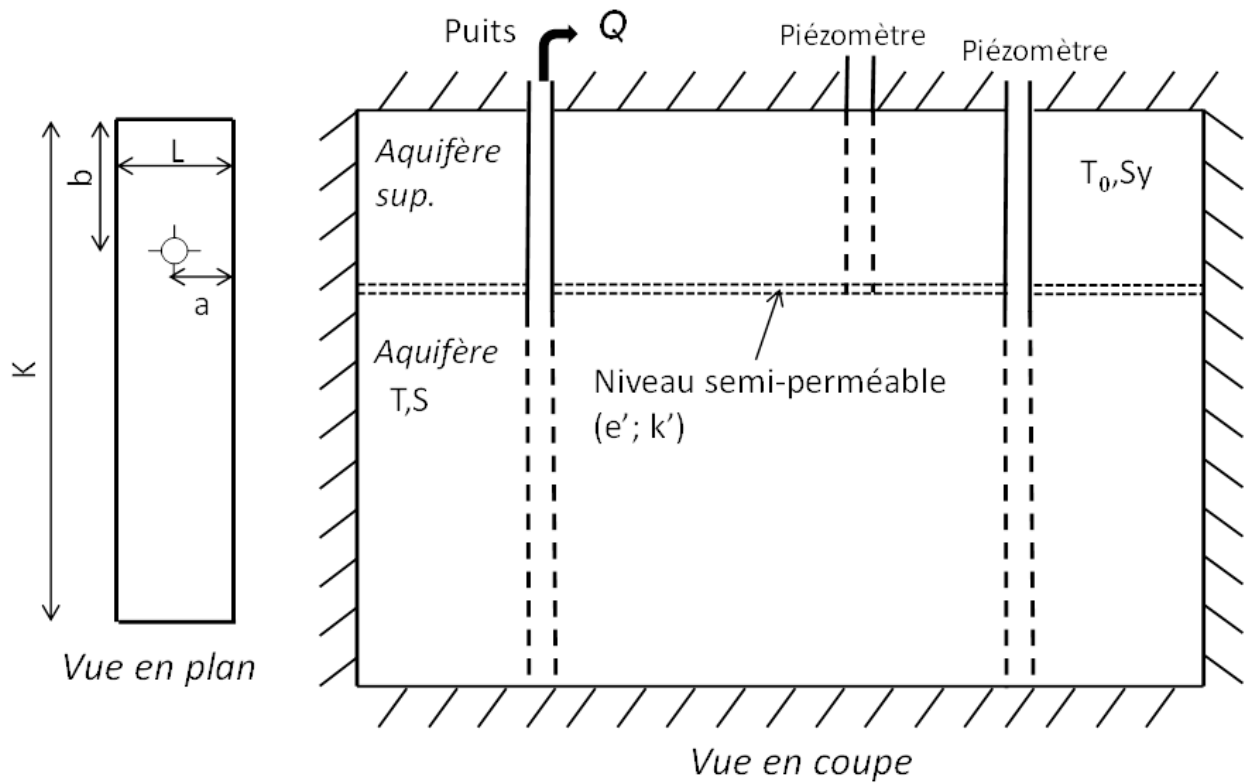
Coupe géologique et technique du forage FE7 (Terre et Habitat)



Coupe du forage ANETT 03514X0079/S1-F3 (Banque de données du Sous-Sol)

Annexe 2

Modèle modifié de Hunt et Scott (2007)



Paramètres du modèle modifié de Hunt et Scott, 2007	
Distance	r (m)
Transmissivité de l'aquifère capté	T (m^2/s)
Emmagasinement de l'aquifère capté	S (-)
Perméabilité de l'éponte	k' (m/s)
Epaisseur de l'éponte	e' (m)
Transmissivité de l'aquitard	T_0 (m^2/s)
Emmagasinement de l'aquitard	S_y (-)
Distance à la 1 ^{ère} limite (a)	Dist.lim. 1 (min et m)
Distance à la 2 ^{ème} limite (L-a)	Dist.lim. 2 (min et m)
Distance à la 3 ^{ème} limite (b)	Dist.lim. 3 (min et m)
Distance à la 4 ^{ème} limite (K-b)	Dist.lim. 4 (min et m)
Skin de puits	Sk (-)
Capacité du puits	Rc (m)
Pertes de charge quadratiques	C ($m^{-5}s^2$)
Capacité du puits	Rc (m)

Paramètres du modèle à effet de drainance (modèle modifié de Hunt et Scott, 2007)

Annexe 3

Paramètres physico-chimiques et résultats des analyses chimiques

Nom	Date	Temp. Ph	Cond. à 25°	Eh Corrigé	O2 dissous	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	CO3	NH4	NO2	NO3	SiO2	Rb	Sr	87Sr/86Sr	
		°C	µS/Cm	mV	mg/L	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l	
Aff	05/09/2014	14.7	93.2	419	8.57	84.2	2	1.8	11.3	0.7	20.4	4.9	<LQ	<LQ	<LQ	0.6	4.6	0.82	12.2	0.713155	
FE3	05/09/2014	13.6	346	210	1.57	15.2	40.3	10	15.5	0.9	20.7	15.3	154	<LQ	<LQ	<LQ	13.5	1.73	279	0.709735	
FE4	05/09/2014	13.5	406	271	7.67	74.5	47.5	11.9	19.5	0.9	24.1	23.6	182	<LQ	<LQ	<LQ	13.8	2.02	305	0.709678	
FE7	05/09/2014	13.9	303	171	1.98	18.9	34.1	8.6	14.9	0.5	16.5	8.4	143	<LQ	<LQ	<LQ	11	1.15	197	0.709581	
ANETT	05/09/2014	15.4	371	232	2.3	21.2	43.3	9.7	16.2	<LQ	30	19.1	142	<LQ	<LQ	<LQ	17.4	0.87	244	0.710147	
Nom	Date	Al	As	Ba	B	Cd	Co	Cu	Cr	F	Li	Mn	Ni	Pb	Fe						
		µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l					
Aff	05/09/2014	49.8	0.19	9.8	11.7	0.02	0.21	0.2	0.49	<LQ	1.07	10.2	1.56	0.08	0.15						
FE3	05/09/2014	1.04	0.38	12.9	52.2	<LQ	<LQ	0.34	0.1	13.2	122	<LQ	<LQ	<LQ	0.12						
FE4	05/09/2014	1.09	0.23	16.5	20.7	<LQ	<LQ	<LQ	0.1	15	114	<LQ	<LQ	<LQ	0.1						
FE7	05/09/2014	0.57	0.57	8.7	9.42	<LQ	1.71	<LQ	<LQ	0.2	246	2.31	<LQ	<LQ	1.73						
ANETT	05/09/2014	1	0.26	9.5	30.9	0.01	0.3	<LQ	<LQ	0.1	12.5	211	0.53	0.11	0.11						



Géosciences pour une Terre durable

brgm

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

Direction régionale Bretagne
Rennes Atalante Beaulieu
2 rue de Jouanet
35700 Rennes
Tél. : 02 99 84 26 70