

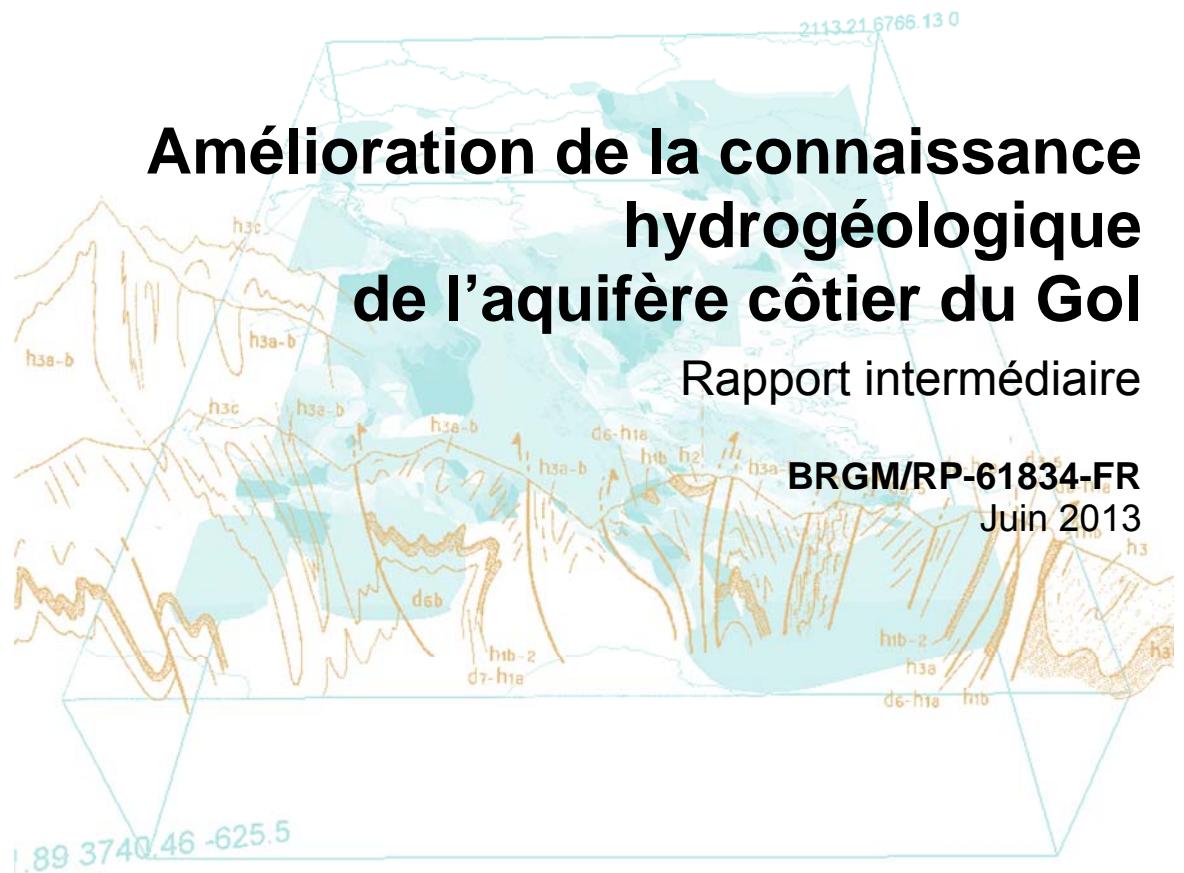


# Amélioration de la connaissance hydrogéologique de l'aquifère côtier du Gol

Rapport intermédiaire

BRGM/RP-61834-FR

Juin 2013





# Amélioration de la connaissance hydrogéologique de l'aquifère côtier du Gol

## Rapport intermédiaire

**BRGM/RP-61834-FR**  
Juin 2013

Étude réalisée dans le cadre des projets  
de Service public du BRGM 2011 PSP10REU47

Petit V., Dewandel B., Charlier J.-B., Ollivier P., Lucas C., Olivia Z.

**Vérificateur :**

Nom : JC Maréchal

Date : 08/04/2013

Signature :

**Approbateur :**

Nom : S. Bes de Berc

Date : 04/06/2013

Signature :

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

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

**Mots clés :** Hydrogéologie, aquifère côtier, intrusion saline, pompage d'essai, isotopes, majeurs, traitement du signal, La Réunion, Gol, Etang-Salé.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : Petit V., Dewandel B., Charlier J.-B., Ollivier P., Lucas C., Olivia Z. (2013) - Amélioration de la connaissance hydrogéologique de l'aquifère côtier du Gol. Rapport intermédiaire, BRGM/RP-61834-FR. 198 p., 68 f., 4 Ann.

## Synthèse

L'aquifère côtier du Gol, au SW de La Réunion, constitue une ressource en eau souterraine caractérisée par des propriétés hydrodynamiques remarquables permettant une importante exploitation des eaux souterraines depuis les années 80 (9.3 millions de m<sup>3</sup> prélevés en 2011). Les risques d'intrusions salines sont cependant réels.

Un programme d'étude a donc été lancé pour mieux connaître le fonctionnement de cet aquifère dans le but d'en pérenniser la ressource

En premier lieu, une étude bibliographique a été menée et montre que la plaine du Gol se situe sur la partie aval de la paléo-vallée des Makes remplie par une succession de coulées laviques avec intercalations de scories aux propriétés hydrogéologiques exceptionnelles.

Cependant, bien que l'aquifère soit très productif, la remontée de l'interface eau douce/eau salée semble être liée à une augmentation des prélèvements pour l'irrigation et l'usine sucrière du Gol. Une meilleure caractérisation des processus hydrogéologiques de cet aquifère volcanique hétérogène et l'identification des causes de l'augmentation de la salinisation des eaux souterraines apparaissent nécessaires. Cette amélioration des connaissances permettra – dans un second temps - l'élaboration d'un outil de gestion de la ressource. Dans ce but, des données ont été acquises. Elles concernent : la piézométrie, la conductivité électrique, des analyses chimiques et isotopiques des eaux souterraines. Ensuite, trois approches distinctes (hydrogéologique, traitement du signal et géochimique) ont été mises en œuvre pour interpréter ces données et proposer un modèle hydrogéologique de fonctionnement de l'aquifère.

La première approche fait appel aux pompages d'essai : 14 anciens pompages d'essai ont été réinterprétés avec la méthode des dérivées, plus adaptée à la détection de comportements hydrogéologiques spécifiques que les méthodes classiques et avec des modèles récents en partie créés pour être appliqués au Gol. Un pompage d'essai à interférences multiples a été réalisé en octobre 2011. La présence de deux compartiments hydrogéologiques est confirmée et leurs paramètres hydrauliques précisés : compartiment "Est" à l'aval de la paléo-vallée des Makes, caractérisé par une forte transmissivité de 0.8 m<sup>2</sup>/s et un coefficient d'emmaçasinement de 0.05 ; compartiment "Ouest", constitué de formations basaltiques anciennes (Beta II), milieu plus complexe et compartimenté : transmissivité de 0.07 à 0.2 m<sup>2</sup>/s et coefficient d'emmaçasinement de 1.3x10<sup>-4</sup>.

La seconde approche, hydrogéochimique, repose sur l'interprétation des analyses chimiques et isotopiques des eaux souterraines. Elle met aussi en évidence la présence de deux compartiments hydrogéologiques. Le compartiment "Ouest" semble relativement bien préservé de l'influence de l'océan, alors que la paléo-vallée est impactée à hauteur de 11.9 % en profondeur. L'étude des nitrates met également en évidence des phénomènes de drainance au droit des puits pompés, indiquant l'impact

des prélèvements sur la ressource bien que l'aquifère soit très productif. Les isotopes stables de l'eau montrent que l'altitude moyenne de la recharge dans la paléo-vallée augmente avec la profondeur du piézomètre ou du puits (d'environ 700 à 1700 m NGR), indiquant une alimentation en profondeur depuis le cirque des Makes. Par contre, le compartiment "Ouest" est faiblement impacté par l'intrusion saline, et possède une altitude moyenne de recharge située autour de 1 000 m NGR.

L'approche par traitement du signal confirme un fonctionnement différent de chacun des deux compartiments : une augmentation des pompages engendre une augmentation de la salinité à l'est alors qu'elle engendre une diminution au niveau du compartiment "Ouest". Au sein de la paléo-vallée, l'océan joue le rôle de limite à potentiel imposé pour l'ensemble des ouvrages. Il influence de manière notable les variations de piézométrie mais surtout celles de conductivité électrique des eaux souterraines. L'évolution de la salinité de l'aquifère dépend du niveau de la recharge et de l'intensification (ou intensité ?) des pompages. Ainsi, au vu des données disponibles, sans une augmentation des prélèvements, l'aquifère ne semble pas mis sous tension lors des années humides (à forte recharge). Par contre dans le cas d'une période sèche prolongée, la progression de l'interface eau douce / eau salée engendrée par l'intensification des pompages a été mise en évidence. Ainsi, l'évolution de l'impact des pompages engendre une augmentation de la salinité à moyen et long terme depuis les deux dernières années (2010-2011) (PIB4C).

Des capacités de pompages supplémentaires existent dans le compartiment "Ouest" (Ecumes). Par contre, les prélèvements dans la paléo-vallée doivent être limités.

L'ensemble de ces caractéristiques mises en évidence par cette étude sera valorisé, dans le cadre de ce projet, dans une phase suivante (2013) pour la construction d'un modèle de simulation par puits. Il aura pour but d'apporter aux exploitants des recommandations pour l'exploitation de cet aquifère en le préservant des risques d'intrusions salines.

Le besoin de préserver les ressources en eau de La Réunion, la gestion durable de cette ressource, le respect de la réglementation (Directive Cadre, SDAGE...) ont conduit le Conseil général de La Réunion, l'Office de l'eau Réunion, la DEAL et le BRGM à financer ensemble cette étude sur l'aquifère côtier du Gol. L'Office de l'eau Réunion ainsi que les acteurs locaux du Gol (Saphir, Usine sucrière, Centrale thermique du Gol, Véolia) ont également contribué par la mise à disposition de leurs données.

## Sommaire

<b>1. Introduction.....</b>	<b>11</b>
1.1. CONTEXTE .....	11
1.2. OBJECTIFS .....	11
1.3. MÉTHODOLOGIE .....	11
<b>2. Synthèse bibliographique.....</b>	<b>13</b>
2.1. ETUDES ANTÉRIEURES.....	13
2.2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE GÉNÉRAL.....	14
2.3. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE.....	19
2.3.1. Géométrie du système aquifère étudié.....	19
2.3.2. Caractéristiques hydrodynamiques .....	21
2.3.3. Flux.....	21
2.3.4. Qualité des eaux souterraines.....	26
2.3.5. Coupe hydrogéologique .....	27
2.3.6. Usages .....	28
2.4. CONDITIONS CLIMATIQUES 2011-2012.....	28
<b>3. Mise en place du suivi préliminaire .....</b>	<b>31</b>
<b>4. Interprétation des pompages d'essai .....</b>	<b>39</b>
4.1. RÉINTERPRÉTATION DES TESTS HYDRAULIQUES .....	39
4.1.1. Méthodologie utilisée pour l'interprétation des essais .....	39
4.1.2. Interprétation des pompages d'essai réalisés aux forages « Puits du Gol » (12287X0035) et « Puits du Bois de Nèfles » (12287X0038).....	42
4.1.3. Interprétation des pompages d'essai réalisés aux « Puits A » (12287X0061), « Puits B » (12287X0062) et « Puits C » (12287X0064).....	47
4.1.4. Interprétation des pompages d'essai réalisés au puits des Ecumes (12287X0034).....	53
4.1.5. Interprétation des pompages d'essai réalisés au forage Maniron (12287X0118) ..	59
4.1.6. Interprétation des pompages d'essai réalisés au forage PIB4 (12287X0056) .....	65
4.1.7. Interprétation des pompages d'essai réalisés au forage PIB5 (12287X0057) .....	70
4.1.8. Conclusion.....	75
4.2. ESSAI COMPLEMENTAIRE RÉALISÉ EN OCTOBRE 2011 SUR LA PLAINE DU GOL	76
4.2.1. Principe du test et données recueillies .....	76
4.2.2. Traitement préalable des données .....	81
4.2.3. Modélisation de l'essai en interférences multiples .....	82

4.3. SYNTHÈSE DES TESTS HYDRAULIQUES PAR POMPAGE .....	87
<b>5. Approche hydrogéochimique.....</b>	<b>89</b>
5.1. MÉTHODOLOGIE .....	89
5.2. CARACTÉRISATION GÉOCHIMIQUE DES EAUX DU PLATEAU DU GOL .....	93
5.2.1. Informations apportées par le diagramme Na vs. Cl .....	93
5.2.2. Informations sur les apports anthropiques .....	94
5.2.3. Informations sur les interactions eaux-roches .....	98
5.2.4. Altitude de recharge .....	101
5.2.5. Variabilité de la salinité de l'aquifère côtier du Gol.....	103
5.3. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS ISSUS DE L'APPROCHE HYDROGÉOCHIMIQUE ...	105
<b>6. Approche par traitement du signal .....</b>	<b>107</b>
6.1. MÉTHODOLOGIE .....	107
6.1.1. Analyses corrélatoire et spectrale (Fourier).....	107
6.1.2. Analyse en ondelette .....	110
6.1.3. Données .....	112
6.2. RÉSULTATS.....	113
6.2.1. Analyse des chroniques hydrogéologiques .....	113
6.2.2. Analyses corrélatoire et spectrale .....	118
6.2.3. Analyse en ondelettes continues.....	125
6.3. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS ISSUS DE L'APPROCHE DE TRAITEMENT DU SIGNAL.....	129
<b>7. Schéma conceptuel.....</b>	<b>131</b>
<b>8. Conclusion .....</b>	<b>135</b>
<b>9. Références bibliographiques .....</b>	<b>137</b>
9.1. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU SITE .....	137
9.2. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES DES POMPAGES D'ESSAI.....	138
9.3. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES (HYDROGÉOCHIMIE).....	139
9.4. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU TRAITEMENT DU SIGNAL .....	140

## Liste des illustrations

Figure 1 : Plan de situation général.....	13
Figure 2: Carte géologique de la zone d'étude au 1/50 000 <sup>ème</sup> .....	16

Figure 3: Coupe géologique schématique dans un axe Sud-Ouest / Nord-Est .....	17
Figure 4: Coupe géologique schématique dans un axe Nord-Ouest / Sud-Est .....	18
Figure 5 : Le bassin d'alimentation de la plaine du Gol.....	22
Figure 6: Carte piézométrique de la nappe du Gol en période d'étiage (ANTEA, 2002) .....	24
Figure 7 : Cumul des précipitation en 2011 et 2012. ....	29
Figure 8 : Extraction BSS des ouvrages situés dans le secteur de la plaine du Gol .....	32
Figure 9: Localisation des ouvrages suivis.....	32
Figure 10 : Ouvrages du suivi de la nappe du Gol.....	34
Figure 11 : Chronogramme des données disponibles .....	37
Figure 12 : Localisation des tests par pompage réinterprétés. ....	40
Figure 13 : Méthodologie mise en œuvre pour l'interprétation des pompages d'essai. Utilisation des dérivées des rabattements pour diagnostiquer l'essai. ....	41
Figure 14 : Diagnostic de l'essai par paliers de débit réalisé en juin 2006 sur le puits du Gol. Réalisé à partir des rabattements normalisés.....	43
Figure 15 : Modélisation de l'essai par paliers réalisé en juin 2006 au puits du Gol. Modèle : Theis.....	44
Figure 16 : Modélisation de l'essai par paliers réalisé en juillet 2006 au Puits du Bois de Nèfles. Modèle : Theis.....	44
Figure 17 : Diagnostic de l'essai réalisé en juin 2001 sur le puits B. Réalisé à partir des rabattements de la descente et de la remontée des niveaux ; comparaison aux mesures de conductivité électrique des eaux d'exhaure. ....	48
Figure 18 : Diagnostic de l'essai réalisé en août 2001 sur le puits C. Réalisé à partir des rabattements de la descente et de la remontée des niveaux ; comparaison aux mesures de conductivité électrique des eaux d'exhaure. ....	48
Figure 19 : Modélisation de l'essai par paliers réalisé en mai 2001 au puits A. Modèle : Theis. 49	49
Figure 20 : Modélisation de l'essai de longue durée réalisé en juin 2001 au puits B. Modèle : Theis.....	49
Figure 21 : Modélisation de l'essai de longue durée réalisé en août 2001 au puits C. Modèle : Theis.....	50
Figure 22 : Diagnostic de l'essai réalisé en juin 2001 sur le puits des Ecumes. Réalisé à partir des rabattements de la descente et de la remontée des niveaux ; comparaison aux mesures de conductivité électrique des eaux d'exhaure. ....	54
Figure 23 : Modélisation de l'essai de longue durée réalisé en 1971 au puits des Ecumes. Modèle : Aquifère compartimenté. ....	55
Figure 24 : Modélisation de l'essai de longue durée réalisé en 2001 au puits des Ecumes. Modèle : Aquifère compartimenté. ....	56
Figure 25 : Diagnostic de l'essai réalisé en 2003 sur le forage de Maniron. Réalisé à partir des rabattements de la descente et de la remontée des niveaux ; comparaison aux mesures de conductivité électrique des eaux d'exhaure. ....	60
Figure 26 : Modélisation de l'essai de longue durée réalisé en 2003 au Forage Maniron. Modèle : Aquifère compartimenté avec discontinuité.....	61
Figure 27 : Modélisation de l'essai de longue durée réalisé en 2003 au Forage Maniron. Modèle : Aquifère compartimenté avec discontinuité. Zoom sur la figure précédente. ....	62

Figure 28 : Schéma de la solution de Hantush. Puits captant partiellement un aquifère anisotrope suivant la verticale avec effet de drainance. Paramètres du semi-perméable : e', épaisseur, et K', perméabilité.....	66
Figure 29 : Modélisation de l'essai réalisé en 1985 sur la tranche 19-20 m du forage PiB4. Modèle : Hantush. ....	66
Figure 30 : Modélisation de l'essai réalisé en 1985 sur la tranche 19-50 m du forage PiB4. Modèle : Hantush. ....	67
Figure 31 : Modélisation de l'essai réalisé en 1985 sur la tranche 55-100 m du forage PiB4. Modèle : Hantush. Réponse de la zone pompée (PiB4_55-100m) et au piézomètre PiB4a. ....	68
Figure 32 : Modèle aquifère bicouche (Hunt et Scott, 2007).....	71
Figure 33 : Modélisation de l'essai réalisé en 1984 sur la tranche 32-46 m du forage PiB5. Modèle : aquifère bi-couche. Observations et modélisations au puits et sur le piézomètre de surface (PiB5a). ....	72
Figure 34 : Modélisation de l'essai réalisé en 1984 sur la tranche 32-42 m du forage PiB5. Modèle : aquifère bi-couche. Observations et modélisations au puits et sur le piézomètre de surface (PiB5a). ....	72
Figure 35 : Suivi des niveaux et des débits lors de l'essai du 15 au 17/10/2011.....	79
Figure 36 : Essai de différents filtres (technique des « ondelettes ») pour ôter l'effet lié à la marée. Exemple sur PiB5a.....	81
Figure 37 : Résultat après application du traitement du signal pour ôter l'effet de la marée ; PiB5a, b, c, & d et PiB4c. ....	82
Figure 38 : Schéma du modèle analytique hydrodynamique.....	84
Figure 39 : Vue en plan de l'ensemble du dispositif. Puits de référence (x=y=0) : puits B.....	84
Figure 40 : Modélisation des rabattements de l'essai multi-puits réalisé en octobre 2011. Les modèles correspondent aux courbes en pointillés. A) ensemble des puits, B) détail sur BdN, et C) détail sur les PiB. ....	85
Figure 41 : Situation des puits, des piézomètres et des limites de l'aquifère. ....	86
Figure 42 : Carte de localisation des points d'eau utilisés dans l'étude hydrogéochimique sur fond de carte géologique de La Réunion à 1/100 000 (2006) ; suite de la figure page suivante.....	91
Figure 43 : Diagramme Na vs. Cl des eaux du bassin d'alimentation du Gol.....	94
Figure 44 : Principaux fertilisants et amendements utilisés en agriculture à La Réunion (Source de la donnée : Chambre d'Agriculture de la Réunion, 2009) .....	95
Figure 45 : Diagramme NO <sub>3</sub> vs. K .....	97
Figure 46 : Evolution des teneurs en NO <sub>3</sub> dans trois puits d'exploitations du Plateau du Gol ; les rectangles grisés indiquent les périodes de fertilisation pour la canne à sucre.....	98
Figure 47 : Diagramme Na <sup>+</sup> vs. SiO <sub>2</sub> .....	100
Figure 48 : Diagramme <sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr vs. 1/Sr .....	101
Figure 49 : Evolution des rapports δ <sup>2</sup> H en fonction des rapports δ <sup>18</sup> O corrigés par la teneur en Sr de l'eau de mer .....	103
Figure 50 : Chroniques hydrogéologiques de l'étang et des ouvrages en mai et juin 2011....	104
Figure 51 : Contribution d'eau de mer pour chaque site calculée à partir des teneurs en Cl, K, SO <sub>4</sub> et Sr (Sr x <sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr). ....	105
Figure 52 : Signaux composés de deux fréquences principales se chevauchant sur tout l'intervalle (a), et non recouvertes (d) ; DSP semblable pour les deux signaux (b) et (e) ; Spectres	

en ondelettes de Morlet (c) et (f) qui affichent la localisation temps-fréquence (d'après Labat et al., 2000).....	111
Figure 53 : Chroniques hydrogéologiques journalières 2008-2012 des forages et piézomètres de la Plaine du Gol .....	113
Figure 54 : Chroniques hydrogéologiques horaires 2011 des forages et piézomètres (avril 2011 à janvier 2012).....	115
Figure 55 : Chroniques hydrogéologiques mai-juin 2011 des forages et piézomètres de la Plaine du Gol mettant en évidence l'influence de la marée sur l'évolution de la conductivité à PIB5D116	
Figure 56 : Chroniques hydrogéologiques sept.-oct. 2011 des forages et piézomètres de la Plaine du Gol mettant en évidence la progression de l'interface eau-douce/eau salée (dont les variations sont contrôlées par la marée) de PIB5D à PIB4C.....	117
Figure 57 : Evolution de la conductivité électrique depuis 1988 et 2006 pour respectivement PIB5D (échelle des ordonnées en bleu à gauche) et PIB4C (échelle des ordonnées en rouge à droite) à partir des données de logs (données ponctuelles) et des données continues.....	118
Figure 58 : Densité spectrale de puissance et fonction d'auto-corrélation sur les chroniques journalières de la pluie, des pompages et de la piézométrie .....	119
Figure 59 : Correction des séries piézométriques fortement bruitées par les pertes de charges quadratiques (C); sont représentées les données brutes (en noir), les données corrigées de C (en bleu) à partir des variations de débit, et les données filtrées (en rouge) pour éliminer plus finement toutes les variations hautes fréquences liées à C .....	120
Figure 60 : Correction des séries piézométriques influencées par les fluctuations du niveau marin ; sont représentées les données brutes (raw data), et les données filtrées de phénomènes périodiques inférieurs à 32 h (fil Hf). .....	121
Figure 61 : Chroniques hydrogéologiques journalières 2007-2012 des forages de la SAPHIR mettant en évidence l'influence des pompages sur l'évolution de la piézométrie et de la conductivité électrique.....	122
Figure 62 : FCC de la pluie (à gauche) et des pompages (à droite) en entrée, et de la piézométrie ou rabattement (en haut) et de la conductivité électrique (en bas) en sortie.....	123
Figure 63 : Chroniques piézométriques et du marégraphe de St-Pierre sur une période non perturbée par les pompages. .....	124
Figure 64 : Ondelette croisée XWT et cohérence WTC des pompages en entrée, et du rabattement en sortie sur Puits Ecumes ; les périodes sur l'axe des ordonnées sont en jour. 126	
Figure 65 : Ondelette croisée XWT et cohérence WTC des pompages en entrée, et de la conductivité électrique en sortie sur Puits Ecumes; les périodes sur l'axe des ordonnées sont en jour.....	127
Figure 66 : Ondelette croisée XWT et cohérence WTC des pompages en entrée, et du rabattement en sortie sur Puits A; les périodes sur l'axe des ordonnées sont en jour.....	127
Figure 67 : Ondelette croisée XWT et cohérence WTC des pompages en entrée, et de la conductivité électrique en sortie sur Puits A; les périodes sur l'axe des ordonnées sont en jour.....	128
Figure 68 : Modèle conceptuel du fonctionnement hydrogéologique de la Plaine du Gol.....	134

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Comparaison entre les flux d'exploitation des eaux souterraines en 1999 et les flux naturels souterrains pour la commune de Saint-Louis (BRGM, 2005) .....	26
--	----

Tableau 2: Volumes prélevés en 2010 et 2011 (OLE, 2012). Evolution des volumes produits au Bras de Cilaos (SAPHIR) .....	28
Tableau 3 : Répartition des ouvrages exploités par acteurs .....	33
Tableau 4 : Points de suivi de la nappe du Gol.....	36
Tableau 5: Synthèse des paramètres hydrodynamiques. Essais réalisés en 2006 sur les puits du Gol du Bois de Nèfles.....	45
Tableau 6 : Synthèse des paramètres hydrodynamiques. Essais réalisés en 2001 sur les puits A, B et C.....	51
Tableau 7 : Synthèse des paramètres hydrodynamiques. Essais réalisés en 1971 et 2001 au puits des Ecumes. ....	57
Tableau 8 : Synthèse des paramètres hydrodynamiques. Essai réalisé en 2003 au forage de Maniron.....	63
Tableau 9 : Synthèse des paramètres hydrodynamiques. Essai réalisé en 1985 sur le forage de reconnaissance PiB4.....	69
Tableau 10 : Synthèse des paramètres hydrodynamiques. Essai réalisé en 1984 sur le forage de reconnaissance PiB5.....	73
Tableau 11 : Tableau récapitulatif des essais réinterprétés sur la Plaine du Gol.....	75
Tableau 12 : Liste des données suivies par ouvrage durant l'essai du 15 au 17/10/2011. ....	77
Tableau 13 : Synthèse des paramètres hydrodynamiques déduits de la modélisation des rabattements de l'essai multi-puits réalisé en octobre 2011. Plaine du Gol. ....	86
Tableau 14: Calcul de la diffusivité $D_{24h}$ et $D_{12h}$ à partir du déphasage marée-piézométrie. Une seconde valeur à modulo 24 h et 12h est calculée et est comparée à la diffusivité $D_{pomp}$ calculée d'après la transmissivité T et l'emmagasinement S estimés suite aux essais de pompage.....	125

## Liste des annexes

Annexe 1 : Analyse bibliographique .....	141
Annexe 2 : Logs de conductivité .....	145
Annexe 3 : Logs géologiques et coupes techniques .....	167
Annexe 4 : Traitement du signal sur les chroniques marée-piézométrie.....	191

# 1. Introduction

## 1.1. CONTEXTE

L'aquifère du Gol constitue une ressource en eau souterraine caractérisée par des propriétés hydrodynamiques remarquables. En effet, bien que situés à moins de deux kilomètres du littoral, les différents puits d'exploitation de cet aquifère ont produit en 2011 environ 9.3 millions de m<sup>3</sup> (25 365 m<sup>3</sup>/j)<sup>1</sup>. Les usages de cette ressource sont variés (AEP, irrigation et industriels). Des interactions potentielles avec l'Océan sont fortement suspectées en raison d'augmentations ponctuelles de la conductivité électrique de l'eau.

Le risque de dégradation de la qualité de l'eau a conduit à initier un programme d'amélioration de la connaissance hydrogéologique de ce secteur afin de déterminer finement les modalités d'un partage raisonné de la ressource en contexte côtier.

## 1.2. OBJECTIFS

La finalité de l'étude vise à reproduire le fonctionnement hydrogéologique des ouvrages de prélèvement à l'aide d'un modèle. Il permettra de comprendre et de simuler les relations entre le fonctionnement naturel et l'exploitation anthropique. Le modèle sera présenté dans un rapport distinct ultérieur. Les étapes préalables d'acquisition de connaissance, d'interprétation de données synthétisées dans un modèle conceptuel font l'objet de ce rapport :

- > Synthèse des données existantes et bilan des modalités d'exploitation des différents acteurs prélevant sur la ressource d'eau souterraine du Gol (période d'irrigation, campagne sucrière, contrainte de qualité de l'eau) ;
- > Détermination de l'origine de la variation de la conductivité et de la salinité ;
- > Réalisation d'un suivi de la charge et de la conductivité du secteur d'étude afin d'acquérir les données complémentaires à la modélisation ;
- > Elaboration et réalisation d'un protocole d'essais in-situ ;
- > Détermination de l'état qualitatif et quantitatif de l'aquifère du Gol
- > Proposition d'un modèle conceptuel en vue d'une approche de modélisation dans une seconde phase de projet.

## 1.3. MÉTHODOLOGIE

Un certain nombre d'études ont été menées sur l'aquifère côtier du Gol. Bien que certaines études aient adopté un caractère global, aucune n'a permis d'expliquer les relations entre les variations de conductivité et les volumes prélevés. Cette difficulté peut être expliquée par la nécessité de spatialiser les informations et d'extrapoler avant toute modélisation. Ainsi, les

---

<sup>1</sup> D'après le fichier débit de l'Office de l'eau

paramètres de géométrie (notamment dans le domaine offshore), de structure, de transmissivité, de porosité et d'emmagasinement sont estimés et engendrent un cumul d'incertitudes sur la reproduction fine des variations de la conductivité électrique de l'eau. Il est donc proposé dans la présente étude de travailler à l'échelle de chacun des puits. Néanmoins, cette échelle ne travail ne permettra pas de s'affranchir complètement d'une approche plus globale à l'échelle de l'aquifère du Gol.

Dans le cas d'aquifères complexes, la combinaison de différentes approches (hydrogéologiques, géochimiques, hydrauliques, ...) permet de contraindre efficacement le modèle conceptuel d'un secteur d'étude. Ainsi, dans le cas de l'aquifère du Gol, la méthode composite suivante a été appliquée :

- > **Synthèse des données géologiques et hydrogéologiques existantes** et bilan de l'exploitation des différents acteurs prélevant sur la ressource d'eau souterraine du Gol.
- > Mise en place du **réseau de suivi préliminaire** sur les paramètres « charge hydraulique et conductivité » de certains points du secteur d'étude afin d'acquérir des données complémentaires à la compréhension de l'hydrosystème ;
- > **Interprétation des essais de pompage** historiques par une méthode innovante adaptée aux milieux hétérogènes de type volcanique fissuré (interprétation de la courbe de dérivée logarithmique des rabattements).
- > **Elaboration et réalisation d'un protocole d'essais hydrauliques *in-situ*** selon les normes en vigueur<sup>2</sup> en octobre 2011.
- > Détermination de la structure du système hydrogéologique et de l'**origine de la variation** de la salinité par analyses chimiques des majeurs et d'isotopes. Il s'agit ici de replacer l'aquifère du Gol dans le contexte hydrochimique de la Réunion afin de préciser l'origine des variations de conductivité. En effet, différentes causes peuvent être à l'origine des variations de conductivité : interactions avec l'Océan actuel ou avec l'étang du Gol, sédiments imbibés de sel (ancien étang asséché), salinité des eaux de surface (entrées d'eau salée dans les ravines Maniron, Gol et Papaye), pollutions anthropiques.
- > **Analyse fonctionnelle** de l'aquifère du Gol par traitement du signal : analyses corrélatoires et spectrales, et analyses en ondelette.

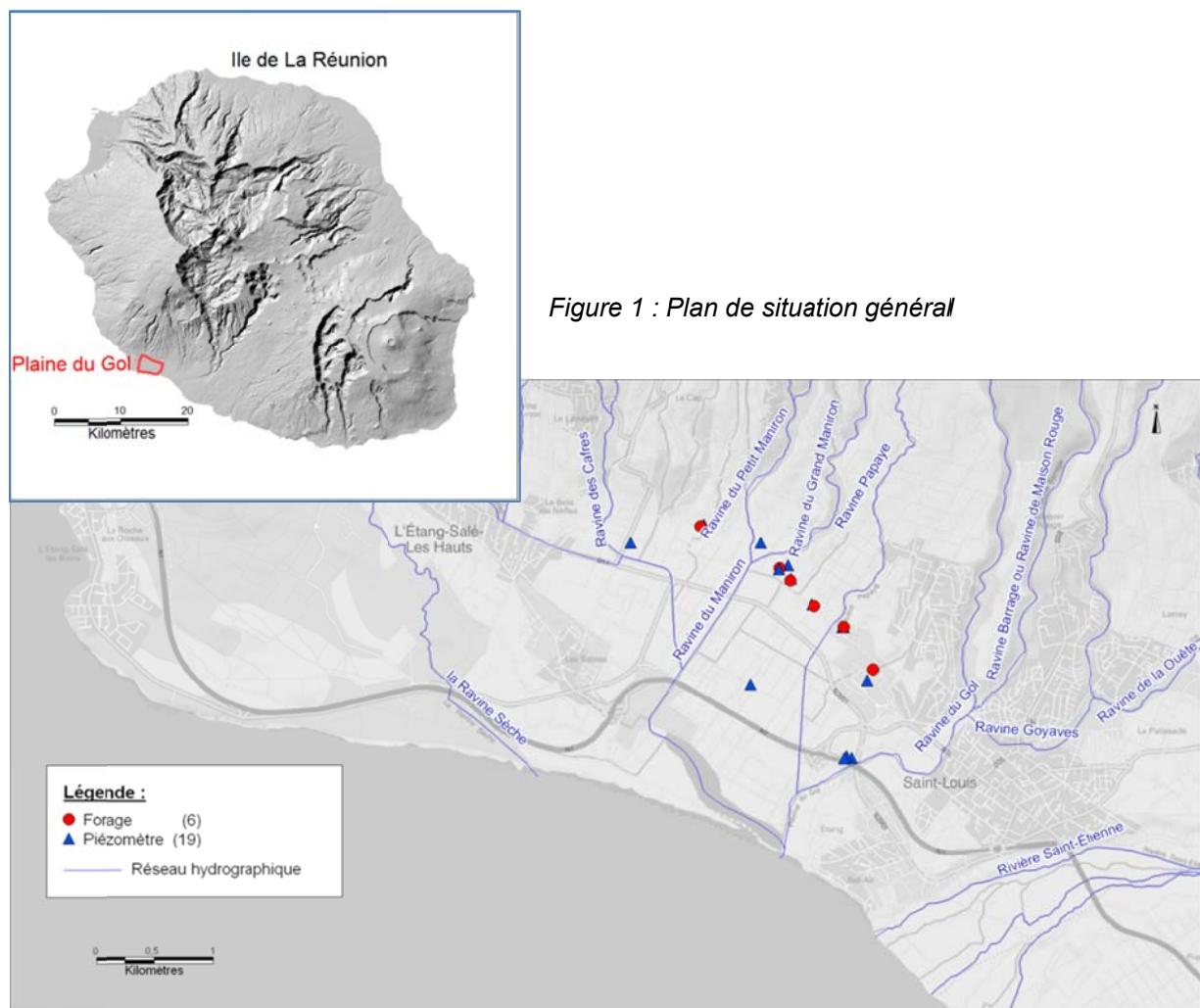
---

<sup>2</sup> La norme AFNOR NF X 10-999 « forage d'eau et géothermie », publiée le 23 avril 2007, décrit les bonnes pratiques de conception, de réalisation, de suivi et de fermeture des forages d'eau et de géothermie afin d'éviter toute contamination des nappes liée à des ouvrages mal réalisés ou mal entretenus.

## 2. Synthèse bibliographique

Les références bibliographiques sont présentées par thème (études historiques sur le site, pompage d'essai, chimie et traitement du signal) à la fin des chapitres concernés.

### 2.1. ETUDES ANTÉRIEURES



Les études réalisées dans le secteur (Figure 1), notamment dans le cadre des programmes départementaux d'étude des ressources en eaux avaient pour principal objectif l'identification des ressources en eau pour les besoins en eaux des périmètres irrigués et de l'usine. La compréhension des systèmes aquifères constituaient aussi un objectif pour améliorer la gestion des prélèvements. Le tableau présenté en annexe 1 récapitule les études géologiques, géophysiques et hydrogéologiques (principalement) menées dans le secteur de la plaine du Gol. L'ensemble des travaux existant est présenté dans l'actuelle étude, dans la mesure où les résultats obtenus sont fiables et représentatifs. Les précédentes études ont également montré un certain nombre d'obstacles dans ce milieu complexe :

- Les méthodes traditionnelles d'interprétation des pompages d'essai sont difficilement applicables au contexte local hétérogène et variable ;
- La géophysique ne donne pas non plus de résultats précis et concluants du fait de la variabilité des terrains et de l'alternance importante de niveaux aux conductivités éloignées ;
- Les résultats des modélisations mathématiques menées ne permettent pas non plus d'expliquer le fonctionnement de l'hydro système, dont les caractéristiques hydrodynamiques sont extrêmement variables pour un espace relativement réduit.

## 2.2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE GÉNÉRAL

Les connaissances relatives à la géologie de la Plaine du Gol et actuellement disponibles sont, en grande partie, issues de la carte géologique de Billard (1974) et des différentes études menées lors :

- de la mise en valeur hydro-agricole (années 1960),
- de la recherche de nouvelles ressources en eau (1972),
- du Programme Départemental d'Etude des Ressources (années 1980).

Située sur la bordure littorale au Nord-Ouest de l'embouchure de la Rivière Saint-Etienne, la Plaine du Gol est constituée de formations volcaniques appartenant aux phases II, III et IV, surmontées par des formations plus récentes de type sédimentaire. Ce milieu complexe et hétérogène induit des fortes variations latérales des faciès recoupés dans les sondages ou visibles dans les ravines.

Les pentes du secteur ont été édifiées par les coulées de lave issues des quatre phases du volcanisme de La Réunion. Les affleurements observés sur la planète et les coupes lithologiques des ouvrages à l'aval de cette dernière ont permis de mieux localiser les formations volcaniques appartenant aux phases II, III et IV.

Les formations de phase II se composent d'un empilement de coulées de basalte à olivines (bouclier ancien). Elles ont été entaillées lors d'importantes phases d'érosion, creusant de profondes ravines, dont celle de la paléo-vallée des Makes, qui ont pu être comblées par les séries plus récentes.

Les affleurements observés en amont de la zone d'étude (planète du Gol) et décrits dans la cartographie de Billard se composent essentiellement de coulées basaltiques de phases III et IV. Ces dernières se caractérisent par des coulées et projections pyroclastiques de basaltes alcalins et de séries différencierées du Piton des Neiges. La ravine du Maniron constitue la limite entre ces deux phases. On retrouve ainsi, à l'Ouest de celle-ci les séries les plus anciennes (phase III), et à l'Est les plus récentes (phase IV).

L'ensemble de ces formations se retrouvent à l'aplomb de la plaine du Gol sous un recouvrement plus récent de matériaux détritiques.

En effet, située à l'aval de la planète, entre la rupture de pente et le trait de côte, la frange littorale est composée en surface par différentes formations détritiques, issues de différentes dynamiques sédimentaires (dépôts fluvio-marins, éoliens...).

D'après la cartographie de Billard (1974), la zone littorale au niveau d'Etang-Salé et des Sables est constituée en surface de sables dunaires (*Bb*) (recouvrant les laves issues des différents pitons situés à proximité d'Etang-Salé-Les-Bains). Ces sables noirs basaltiques sont composés de grains fins de basalte, d'olivines, d'augites, de magnétites et de rares débris coralliens. Ils se caractérisent par une granulométrie homogène (de 0,2 à 0,5 mm).

Plus au sud, en rejoignant la plaine du Gol, ce sont des alluvions fluviomarines qui sont identifiées sur la carte géologique (Figure 2). Cet alluvionnement se serait produit suite à la déviation des courants marins provoquée par l'éruption de trois puy au Sud-Ouest d'Etang-Salé. Ces matériaux de comblement se composent d'argiles, de silts, de sables et de galets basaltiques.

En direction de Saint-Louis, les alluvions fluviatiles anciennes de la rivière Saint-Etienne sont présentes. Leur composition est comparable à celle des alluvions actuelles (mélange hétérogène de sables, graviers, galets et blocs basaltiques ou andésitiques).

En rive droite de la rivière Saint-Etienne, le secteur de l'usine du Gol est implanté sur différents tufs mis en place au cours de la phase IV. Affleurant sur toute la partie orientale de la zone d'étude, ces derniers sont imbriqués dans les coulées basaltiques et s'empoient sous les formations détritiques présentes sur la zone (alluvions limoneuses et alluvions grossières). Ces formations présentent un aspect homogène et constituent une roche cohérente qui se désagrège facilement.

Les données géophysiques des études BRGM de 1962 et 1972 ont permis de préciser la géométrie de certaines structures :

- Sous le remplissage alluvial de la Plaine du Gol, on observe un surcreusement des formations de phase IV au droit des ravines Maniron, Barrages et du Gol,
- En amont de la plaine, surcreusement au sein des basaltes III et IV.

On relève également localement, lors de la réalisation des forages dans le secteur de l'usine du Gol, un niveau d'alluvions sous la couche de tufs affleurants, et au toit des coulées basaltiques de phase IV (puits du Gol). Ce niveau n'est plus retrouvé dans le puits Bois de Nèfles qui traverse également d'abord les tufs.

Le rôle hydrogéologique de ces secteurs (formations alluviales sous-jacentes, surcreusements de certaines séries), même ponctuels est important car ils peuvent constituer des zones de drainage des eaux souterraines.

Les coupes géologiques présentées ci-après et réalisées au cours d'une étude antérieure (PDRE, 1982) permettent d'observer, de manière schématique, le contexte structural de la zone d'étude (Figure 3 et Figure 4).

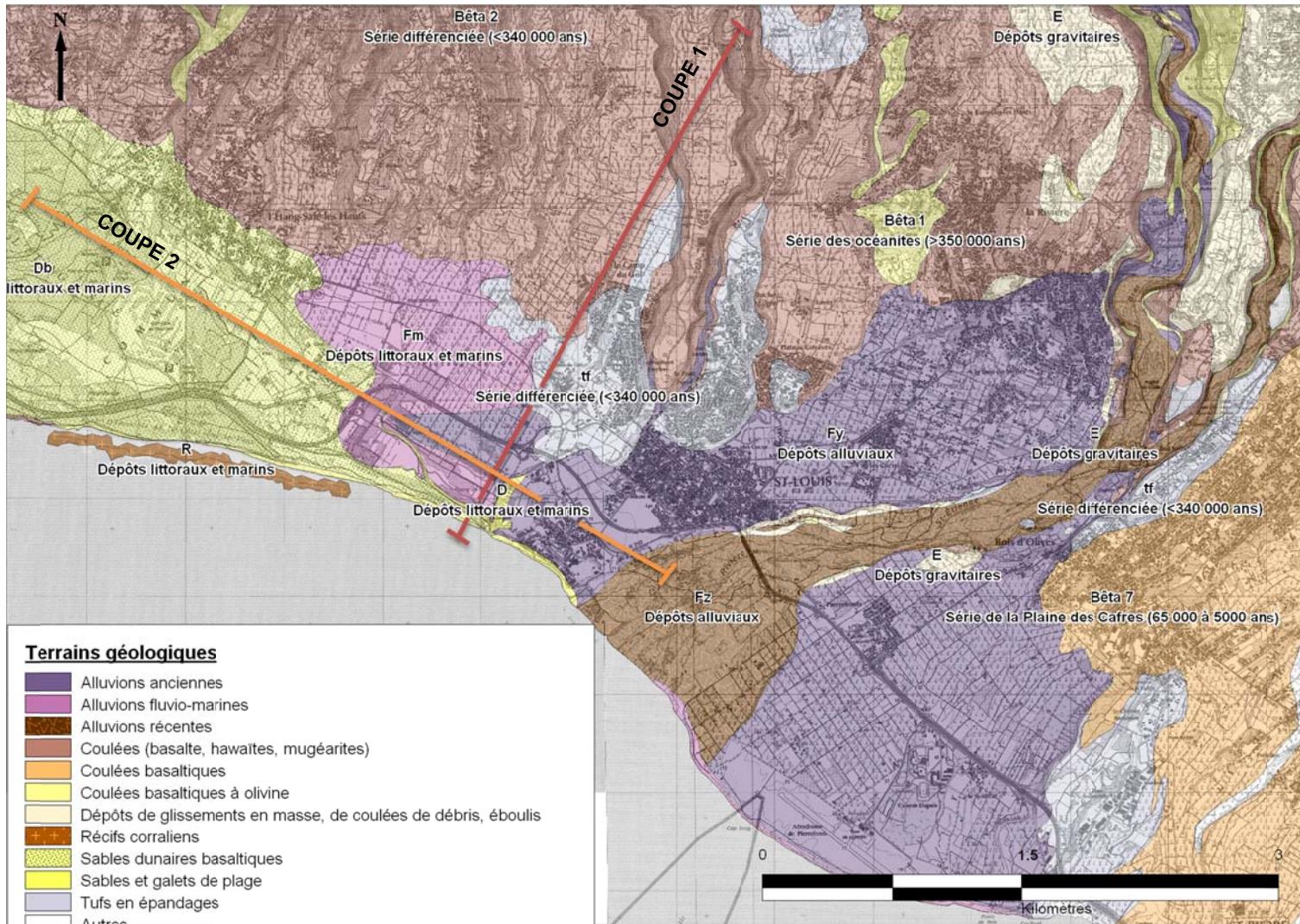


Figure 2: Carte géologique de la zone d'étude au 1/50 000<sup>ème</sup>

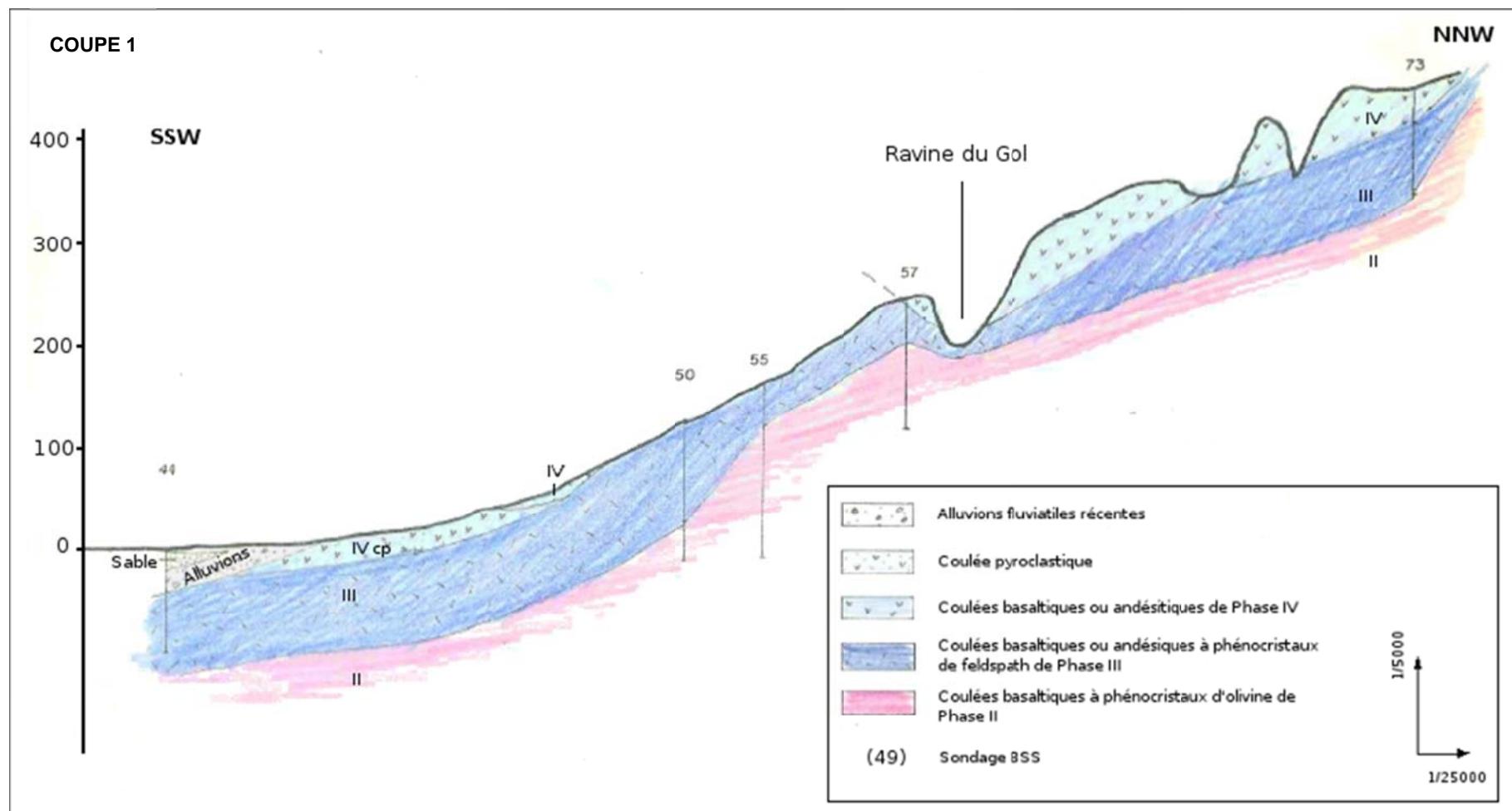


Figure 3: Coupe géologique schématique dans un axe Sud-Ouest / Nord-Est

(Lustrenant D., Steenhoudt M., 1982 - PDRE / Extension du périmètre irrigué du Bras de Cilaos. Rapport 82REU10)

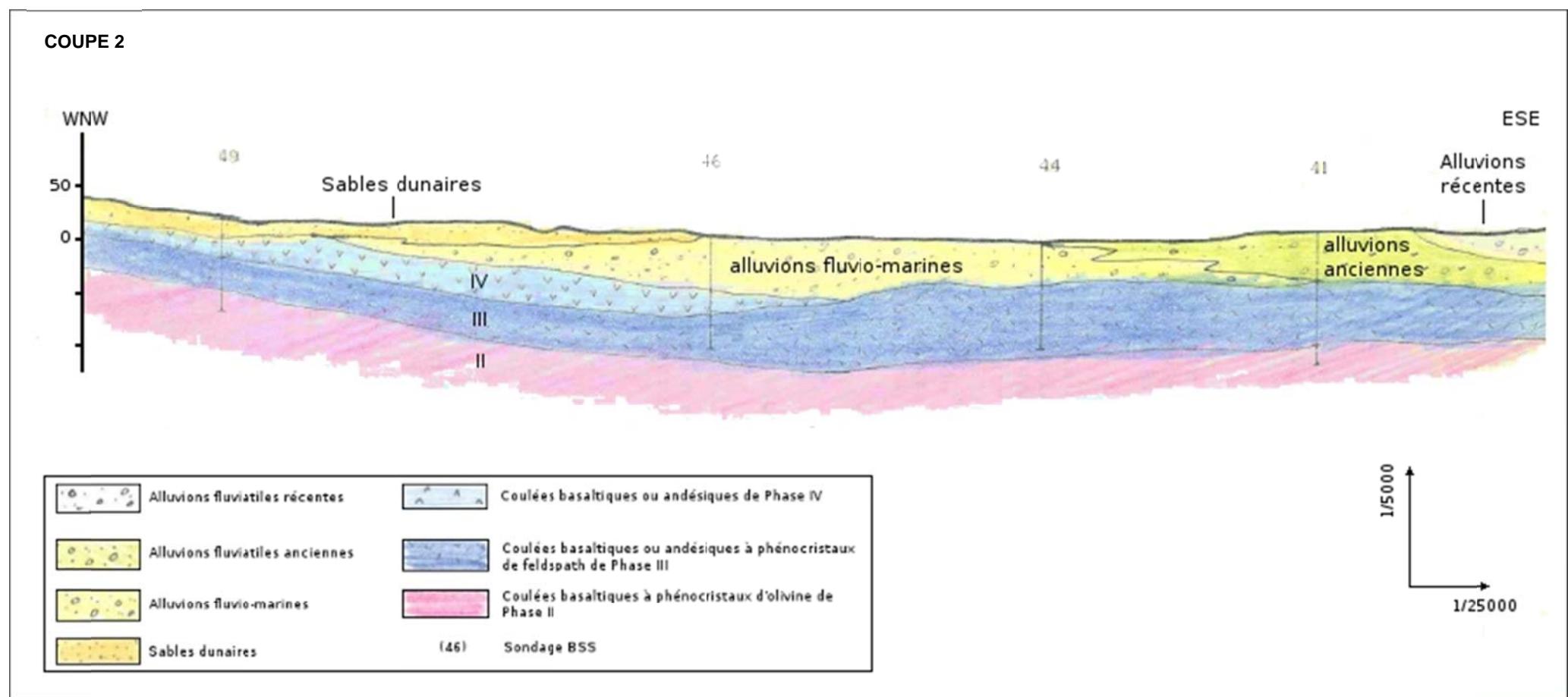


Figure 4: Coupe géologique schématique dans un axe Nord-Ouest / Sud-Est

(Lustrenant D., Steenhoudt M., 1982 - PDRE / Extension du périmètre irrigué du Bras de Cilaos. Rapport 82REU10)

## 2.3. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

### 2.3.1. Géométrie du système aquifère étudié

#### ***Nature de l'aquifère***

La zone se compose d'un ensemble aquifère mixte au sein duquel on peut distinguer deux niveaux aquifères principaux qui sont présentés dans la bibliographie de la façon suivante :

- Le complexe aquifère de base : il est composé des séries basaltiques des phases II, III et IV qui se caractérisent par une porosité de fissure hétérogène et anisotrope. Les formations géologiques basaltiques en place dans la Plaine du Gol ne constituent pas précisément un ou plusieurs aquifères. En effet, les perméabilités des coulées de laves, et celles des formations sédimentaires ne sont pas suffisamment contrastées pour classer ces formations en « aquifère » ou « aquiclude ». De même, la bibliographie ne permet pas de situer précisément les limites latérales de ce complexe aquifère.
- La nappe alluviale : elle s'écoule au sein des différentes séries détritiques et présente une porosité matricielle ; son fonctionnement est celui d'une nappe libre.

Entre ces deux entités, un horizon imperméable discontinu, se présentant sous la forme de scories et d'argiles et résultant probablement d'une altération des formations basaltiques sous-jacentes (paléosol argilisé) est présent par endroits sur la zone d'étude. Le rôle hydraulique de ce niveau semi-perméable reste peu caractérisé. Il a été cependant remarqué que l'écart entre niveaux piézométriques de la nappe alluviale et ceux du complexe de base sont plus élevés en période estivale.

En dehors de la différenciation entre les séries alluviales et les séries volcaniques, aucune subdivision sur le plan hydrogéologique n'a pu être précisément établie au sein des formations volcaniques.

En effet, la réalisation des ouvrages de reconnaissance lors du PDRE et l'ensemble des observations effectuées au cours de cette dernière n'ont pas permis d'identifier clairement des aquifères et des aquiclude contrastés. Des niveaux de scories ou d'argiles plus ou moins importants et peu perméables ont cependant été mis en évidence lors de la réalisation des ouvrages PIB (PIB3, PIB4 et PIB5). Certains de ces horizons altérés et argilisés constituent la limite entre les différentes phases d'activité du Piton des Neiges.

#### ***Limites du système***

La nappe du Gol s'intègre dans un complexe d'aquifères littoraux qui s'étend d'Etang-Salé à Saint-Pierre. Les études antérieures ont apporté des éléments qui permettent d'individualiser la nappe du Gol (présence du biseau salé moins marqué qu'au niveau d'Etang-Salé, caractéristiques hydrodynamiques particulières, axes d'écoulement...). Les limites de ce système sont les suivantes :

- La limite amont du bassin hydrogéologique se rapproche vraisemblablement de celle du bassin versant hydrologique. Le complexe aquifère du Gol serait principalement alimenté par les formations basaltiques situées au Nord (planète du Gol et paléo-cirque des Makes). Les eaux météoriques qui s'infiltrent au sein des formations volcaniques situées sur les flancs du massif (phases II, III et IV) s'écoulent au sein de ces dernières et alimentent directement la partie du complexe située au droit de la plaine du Gol.
- L'océan (et/ou l'Etang du Gol) constitue quant à lui la limite aval du système. Un contact direct existe entre le milieu marin et la nappe du Gol, sous la forme d'un équilibre densitaire conditionné par les caractéristiques intrinsèques de l'aquifère (géologie, fonctionnement hydrodynamiques...) et les pressions anthropiques (prélèvements).

L'exutoire de la nappe de base pourrait être constitué par des émergences sous-marines. Si ce type de flux sortant est largement pressenti, aucune étude existante ne l'a confirmé.

La partie aval du système est également marquée par la présence d'un cordon littoral composé de matériaux détritiques (galets, graviers, sables...), responsable de la présence de l'Etang du Gol. Ce dernier se caractérise par des relations directes avec les formations alluviales et pourrait constituer l'un des exutoires du système (Sogreah, 2000).

- Les limites latérales Nord-Ouest et Sud-Est de la nappe du Gol sont moins marquées.

La limite Nord-Ouest de la partie superficielle de la nappe du Gol se situe au niveau du contact avec la nappe des sables (commune d'Etang-Salé). Composée de dépôts marins et d'alluvions anciens, la partie superficielle de la nappe du Gol se distingue de la nappe des sables par une position différente de l'interface eau douce / eau salée. Une campagne de géophysique réalisée en 1972 sur la zone avait permis de mettre en évidence une profondeur importante de l'interface sur l'axe Saint-Louis / Etang-Salé-Les-Hauts alors que cette dernière se situait à une faible profondeur sur l'axe Etang-Salé-Les-Bains / Etang-Salé-Les-Hauts.

La limite Sud-Est de la partie superficielle de la nappe du Gol a été placée au niveau de la ravine du Gol. Au-delà de cette limite, on trouve un autre aquifère côtier situé au droit du lieu-dit Bel-Air, qui se distingue du Gol par :

- un recouvrement des formations volcaniques plus homogène, composé de tufs et d'alluvions anciennes fournis par la rivière Saint-Etienne
- des connexions hydrauliques avec la rivière Saint-Etienne

Les limites latérales de la nappe de base sont restées jusqu'à présent difficilement localisables. Le positionnement des formations volcaniques perméables au niveau de la paléovallée des Makes permet cependant de délimiter une zone.

- La nature et la profondeur du substratum de la nappe du Gol restent actuellement indéterminées. Les études géophysiques et les ouvrages de reconnaissance réalisés sur la zone n'ont pas permis d'identifier précisément ce substratum, malgré la profondeur relativement importante des ouvrages de reconnaissance PIB4 et PIB5 (environ 100m) (Figure 4).

### 2.3.2. Caractéristiques hydrodynamiques

#### *Paramètres hydrodynamiques*

Des essais de pompage ont été réalisés sur chaque forage de la zone afin de déterminer les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère du Gol. De façon générale, ce dernier présente des fonctions transmissives et capacitives exceptionnellement élevées (valeurs de  $T$  atteignant  $0.1 \text{ m}^2/\text{s}$ ). Les résultats des différents essais effectués ont permis d'observer une valeur moyenne de transmissivité  $T$  supérieure à  $10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ . La synthèse détaillée des pompages d'essai réalisés au cours des études antérieures est présentée avec le travail de ré-interprétation de ces essais présenté au §4.

#### *Fonctionnement hydrodynamique*

D'un point de vue hydrodynamique, cet aquifère peut être défini comme un milieu complexe et hétérogène. Les conditions de mise en place des différentes formations présentes sur la zone donnent lieu à des disparités de fonctionnement hydraulique plus ou moins importantes d'un point à un autre.

Ainsi, au sein des formations volcaniques, les conditions d'écoulement varient en fonction de leur nature et de leur âge. Pour exemple, les formations basaltiques récentes (phase IV) situées à l'Est de la Ravine du Maniron présentent une fissuration relativement homogène, contrairement aux formations plus anciennes (phase III) situées à l'Ouest de la ravine dont la fissuration est hétérogène. La réalisation de différents puits au cours des années 60 au sein des formations anciennes avait permis de mettre en évidence des circulations analogues à celles rencontrées au sein des aquifères karstiques. Des chenaux sub-circulaires plus ou moins importants (jusqu'à 0,5 m de diamètre) et pouvant présenter des débits d'environ  $30 \text{ m}^3/\text{h}$  avaient ainsi été découverts.

Les recouvrements sédimentaires de La Plaine sont constitués d'alluvions anciennes et de dépôts littoraux et marins. Ces formations sont composées d'un mélange hétérogène de sables, graviers, galets, blocs basaltiques présentant une large gamme de valeurs de perméabilité.

Les tufs ponceux présents dans la partie est de la plaine du Gol s'intercalent dans les alluvions. Ils sont décrits comme des formations imperméables et peuvent jouer le rôle de substratum imperméable ou de toit, selon leur position par rapport aux alluvions. L'aquifère du Gol peut alors acquérir un caractère captif dans certains secteurs situés à l'est de la zone (étude PDRE, 1983).

### 2.3.3. Flux

Différentes approches ont été menées depuis le début des études réalisées sur l'aquifère du Gol afin de décrire, sur le plan quantitatif, le fonctionnement de ce système.

## Principaux axes d'écoulement

Les études géophysiques réalisées en 1962 et 1972 et réinterprétées en 1982 (étude PDRE) ont esquissé les grands traits structuraux qui caractérisent la géologie locale et ont défini le comportement hydraulique des formations présentes sur la zone.

L'interprétation des sondages électriques effectués sur la zone d'étude ont mis en évidence différents contrastes de résistivité, distinguant trois horizons principaux :

- Un conducteur superficiel correspondant aux alluvions de la plaine du Gol, aux tufs de Saint-Louis ou à des formations basaltiques plus ou moins altérées ;
- Un résistant intermédiaire dont l'épaisseur maximale se situe sous la plaine du Gol ;
- Un conducteur profond correspondant à la présence du biseau salé au niveau du littoral et de la zone plate de la plaine. En altitude, la présence de ce dernier correspond probablement à une série volcanique plus altérée.

Les méthodes géophysiques n'ont pas pu mettre en évidence les limites du système alors que le comportement hydraulique dans les forages le supposait.

Les différents ouvrages de reconnaissance réalisés au cours des années 1980 améliorent les connaissances relatives au contexte hydrogéologique (structure hydrogéologique des réservoirs, paramètres hydrodynamiques...) et permettent de confirmer la bonne productivité de la nappe du Gol.

Les limites d'alimentation de la plaine du Gol remontent jusqu'au paléo-cirque des Makes (Figure 5) qui recueille des précipitations de l'ordre de 2 m par an. Les précipitations sont collectées dans ce cirque, s'infiltrent et sont drainées vers la côte et la plaine du Gol par une paléo-vallée constituée de formations géologiques perméables. L'infiltration a été estimé à 1 244 mm/an, soit un débit de 1 150 l/s (BCEOM, 1989). La planète du Maniron contribue également à l'alimentation du Gol, mais plus faiblement : 386 mm/an soit 272 l/s (Chemin, 1999). Ces zones sont drainées grâce à différentes paléo-structures d'érosion (situées généralement au toit altéré des différentes phases) qui constituent d'importants axes de drainage et conditionnent les écoulements souterrains.

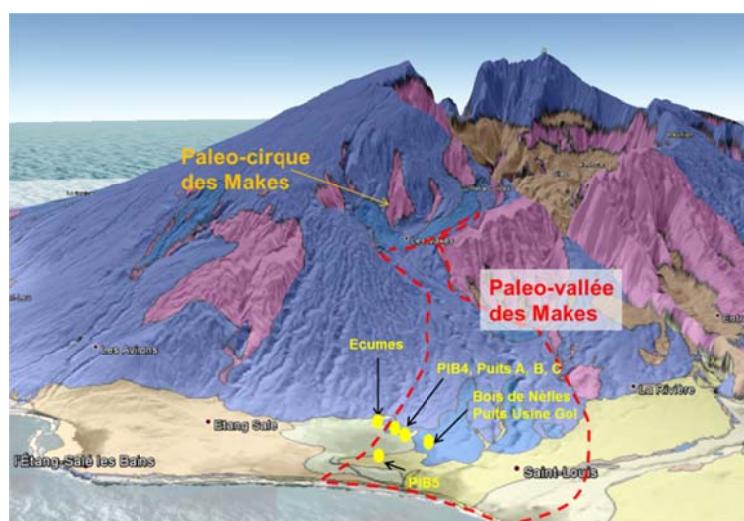


Figure 5 : Le bassin d'alimentation de la plaine du Gol

## Piézométrie

Des campagnes ponctuelles et des suivis piézométriques continus ont été réalisés au cours des dernières décennies sur la nappe du Gol.

Une première carte piézométrique de la nappe du Gol a été réalisée en 1985 dans le cadre du PDRE en prenant en compte les deux principales entités hydrogéologiques de la zone, à savoir :

- la nappe de base développée dans les formations volcaniques ;
- la nappe alluviale.

La nappe de base présente un écoulement d'orientation NE-SO, avec un gradient hydraulique élevé en altitude et faible au niveau de la plaine du Gol. La nappe des alluvions s'écoule d'est en ouest avec un drainage par la rivière Saint-Etienne.

Cette carte piézométrique est tracée cependant avec peu de points de mesure.

Un inventaire des données piézométriques réalisé dans le cadre de l'élaboration d'un modèle de gestion de la nappe alluviale de la rivière Saint-Etienne (Antéa, 2002) a montré le caractère disparate des données piézométriques alors disponibles.

Toutefois, l'analyse des données disponibles pour l'ouvrage PIB4 a mis en évidence des différences de charge en fonction de la profondeur, révélatrices de la présence de 3 nappes distinctes.

Les faibles différences de charge et les évolutions piézométriques ont ainsi permis de décrire localement le système comme un aquifère multi-strate séparé par des niveaux semi-perméables.

– Au niveau de PIB5, seules les nappes alluviales et de base se distinguent par une légère différence de charge en période de pluie qui tend à se réduire en période d'étiage. Situé au centre de la plaine du Gol, PIB5 présente des niveaux d'eau plus élevés que ceux des ouvrages situés au niveau de la rupture de pente (pied de planète). Cette hausse semble mettre en évidence un axe d'alimentation issu de la paléo-vallée des Makes (alimentation du système depuis l'Est). La Figure 6 présente la carte piézométrique réalisée lors de cette étude.

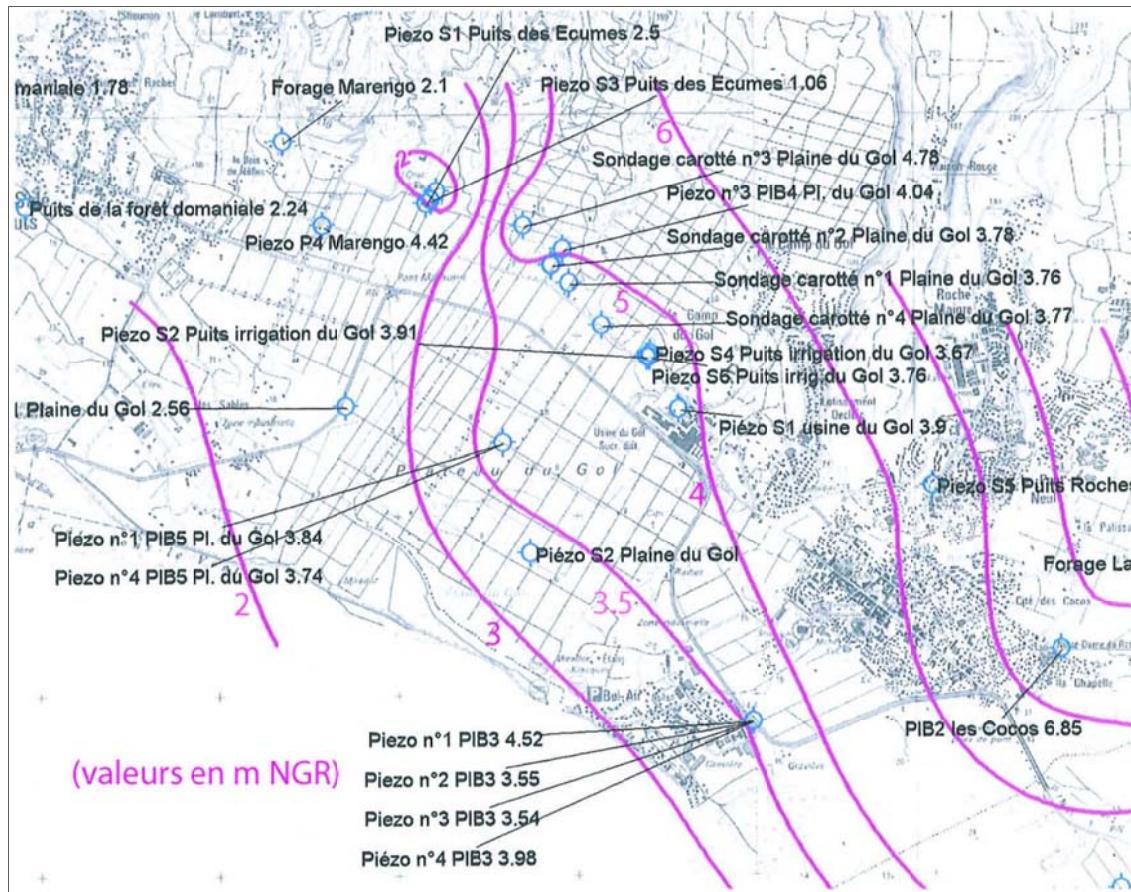


Figure 6: Carte piézométrique de la nappe du Gol en période d'étiage (ANTEA, 2002)

## **Modèles hydrogéologiques existants**

Plusieurs modèles ont été réalisés au cours des 20 dernières années. Ils avaient pour objectifs d'améliorer les connaissances sur le fonctionnement hydrogéologique de la nappe du Gol et de construire des outils de gestion des ressources en eau souterraine et de réduire les risques de contamination liés aux phénomènes d'intrusions marines.

L'extension géographique diffère selon les modèles. Certains intègrent les systèmes aquifères situés en rive droite de la rivière Saint-Étienne (nappe de Cocos) mais également en rive gauche (nappe de Pierrefonds).

Les modèles les plus récents ont été réalisés par Antéa en 2002 et par l'Office de l'Eau de La Réunion en 2008.

- Le modèle hydrogéologique du cône alluvial de la rivière Saint-Etienne (ANTEA, 2002) :

Réalisé à la demande du Conseil Général de La Réunion, ce modèle avait pour objectif d'apporter des réponses en termes de gestion et de mettre en évidence l'impact de différents scénarios d'exploitation sur le système aquifère représenté.

Ce modèle hydrodynamique s'étendait sur les secteurs de la plaine du Gol, de la plaine des Cocos et de Pierrefonds jusqu'à une altitude de 250 m NGR. Ce dernier était composé de 5 couches, représentant :

- les alluvions fluvio-marines de la plaine du Gol et les alluvions de la rivière Saint-Etienne (couche 1) ;
- les formations volcaniques des phases III et IV du Piton des Neiges et du Piton de la Fournaise (couche 2) ;
- des lentilles d'alluvions profondes présentes au droit de certains ouvrages (couche 3) ;
- l'horizon altéré (paléosol) situé au toit des terrains de phase 2 (couche 4) ;
- les formations volcaniques anciennes de phase 2 (couche 5).

La complexité du milieu et les connaissances fragmentaires du contexte hydrogéologique ont donné lieu à de nombreuses incertitudes. Les simulations effectuées ont néanmoins permis d'apporter des réponses relatives à l'évolution quantitative des ressources en eau en fonction des 3 scénarios.

Le premier scénario était un scénario de référence représentant l'exploitation théorique de l'aquifère en 2002 ; le second, un scénario représentant une hausse des besoins recourant prioritairement aux eaux souterraines et enfin le troisième représentant également une hausse des besoins mais avec un usage plus équilibré des ressources en eau superficielle et souterraine.

Deux approches avaient été utilisées afin d'observer les résultats de ces simulations : une observation des rabattement engendrés par l'augmentation des prélèvements sur chacun des ouvrages à un pas de temps mensuel et la réalisation de cartes piézométriques pour deux mois particuliers pour lesquels les pressions sur la ressource en eau sont contrastés (juin et décembre).

Les résultats des deux scénarios simulant une hausse des besoins en eau (installation de deux forages supplémentaires sur la Plaine du Gol) n'avaient pas montré une hausse significative des rabattements de la nappe du Gol. Cependant, des préconisations concernant la mise en exploitation des éventuels futurs ouvrages avaient été proposées compte-tenu de la sensibilité de ce système vis-à-vis des phénomènes d'intrusions marines, malgré l'absence d'évaluation de ces dernières.

- Le modèle hydrogéologique à densité variable (Office de l'eau Réunion, 2012) :

Le modèle de l'Office de l'eau Réunion s'étend sur la nappe du Gol et sur la nappe des Cocos. L'objectif était d'utiliser le modèle ANTEA comme base de travail et de modifier celui-ci afin de lui permettre de prendre en compte de façon explicite les phénomènes d'intrusions salines en intégrant dans les équations d'écoulement les variations de densité de l'eau en fonction du mélange eau douce/eau salée.

Le schéma conceptuel du modèle avait été repris et simplifié en ne conservant que 3 couches. Pour cela, les couches 1,2 et 3 ont été fusionnées et les couches 4 et 5 ont été conservées.

Après calage du modèle, des simulations avaient ainsi été réalisées sur 30 ans en prenant en compte les volumes d'exploitation réellement prélevés entre 1991 et 2005.

Malgré les incertitudes mises en évidence (choix du modèle conceptuel, initialisation du modèle de salinité et dispersion numérique), les résultats ont permis d'identifier le rôle significatif des puits A, B, C, Bois de Nèfle et usine du Gol sur l'équilibre eau douce/eau salé et sur la position du front de salinité. Une avancée continue de ce front d'environ 700 mètres vers l'intérieur des

terres était alors pressentie si la pression engendrée par les différents pompages était maintenue.

Ces résultats ont conduit à des préconisations portant sur la mise en place d'un réseau de surveillance et d'un plan de gestion de la ressource en eau souterraine.

### Bilan hydrologique

Les premiers bilans hydrologiques sur la plaine du Gol datent des années 1970. Les valeurs du bilan citées ci-après sont celles du rapport ANTEA de 2002 :

La moyenne interannuelle des précipitations (calculée sur une période non précisée dans le rapport mais comprise entre 20 à 30 ans) mesurée par Météo-France était de 765,3 mm. Les données relatives à l'évapotranspiration, beaucoup moins nombreuses, proviennent de quelques stations du CIRAD. Située dans « les hauts » du Gol à 365 m NGR, la station la plus proche de la zone d'étude permettait d'observer, entre 1997 et 1999, une moyenne interannuelle de 1140,9 mm.

Le modèle élaboré par Antéa regroupe les aquifères des Avirons, d'Etang-Salé et de Saint-Louis. Dans cette modélisation, Saint-Louis fait partie de trois unités hydrogéologiques (le Gol/Saint-Louis, les Makes et Planèze Saint-Louis). Les communes des Avirons, de l'Etang-Salé et de Saint-Louis exploitent les eaux souterraines de l'unité hydrologique du Gol/Saint-Louis (ANTEA, 2002). Les données disponibles permettent de comparer la production totale d'eau potable issue des eaux souterraines (OLE, 2003) au flux souterrain alimenté par les pluies et par les unités hydrologiques situées à l'amont (ANTEA, 2002).

Ainsi, le tableau ci-dessous met en évidence un déficit en eau souterraine pour une année sèche (1999) à l'échelle de l'unité hydrologique du Gol/Saint-Louis. En année humide (1993), les flux sont très supérieurs aux besoins pour l'alimentation en eau potable (BRGM/RP-55035-FR.).

Commune	Usage	Production en Mm <sup>3</sup> /an	Flux de l'unité hydrologique Le Gol/Saint-Louis
Les Avirons	AEP	0.19	
Étang-Salé	AEP	1.68	
Saint-Louis	AEP	6.31	44.5 Mm <sup>3</sup> en année humide (1993)
VOLUME TOTAL		8.18	6.3 Mm <sup>3</sup> en année sèche (1999)

Tableau 1 : Comparaison entre les flux d'exploitation des eaux souterraines en 1999 et les flux naturels souterrains pour la commune de Saint-Louis (BRGM, 2005)

#### 2.3.4. Qualité des eaux souterraines

Differentes analyses réalisées en 1986 lors de la réalisation des puits A, B et C avaient permis de mettre en évidence une minéralisation faible à moyenne des eaux de la nappe du Gol (230 à 270 mg/l de résidu sec) et des faciès chimiques de type *bicarbonaté sodique* ou *chloruré sodique*.

De plus, lors des essais de pompage réalisé à cette période, le suivi des résistivités des eaux prélevées avait mis en évidence, pour ces trois puits, une diminution des résistivités correspondant à une augmentation de la minéralisation liée à une augmentation de l'ion chlorures  $\text{Cl}^-$  et d'après quelques indices du cation  $\text{Ca}^{2+}$  (plutôt que de  $\text{Na}^+$ ) (BRGM, 1986).

Malgré quelques incohérences constatées d'une campagne de reconnaissance à l'autre, les résistivités mesurées par le BRGM montrent que la salinité de surface est importante sur une grande partie de la plaine avec des teneurs en NaCl comprises entre 100 mg/l et plus de 300 mg/l. Les maxima sont principalement localisés dans l'axe de la ravine Maniron et la ravine des Cafres.

Comme cela a été mentionné précédemment, l'hypothèse de diffusion/dispersion ayant un rôle important dans la dynamique de fonctionnement des intrusions salines est reprise. Le sel ne provient donc pas d'un biseau salé bien marqué mais de la présence d'eau saumâtre qui envahit la nappe et qui résulte d'un mélange variable entre l'eau douce et l'eau salée. En 1969, la nappe stratégique du Gol était donc naturellement salée en surface et ce avant la mise en place des principaux prélèvements par pompage. Ce constat est confirmé en 1972 puis en 1985 suite à l'implantation des piézomètres PIB3, PIB4 et PIB5. Sur le PIB5 localisé en plein centre de la Plaine du Gol, la conductivité évolue de 600  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en surface (de l'ordre de 100 mg/l de chlorure) à 3000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à 70 m de profondeur (soit plus de 600 mg/l de chlorure) (OLE, 2008).

### 2.3.5. Coupe hydrogéologique

Un schéma conceptuel de la nappe du Gol a été établi par le BRGM en 1985. Un aquifère de type multi-couche est représenté avec deux entités principales qui se distinguent (Figure 3 et Figure 4):

- une nappe présente dans les alluvions fluvio-marines de la Plaine du Gol ;
- la nappe de base, aquifère généralisé en équilibre de densité avec le biseau salé en zone littorale et se développant dans les formations volcaniques, son alimentation se faisant par déversement des aquifères d'altitude au droit des discontinuités ou en limite des imperméables. Par ailleurs, elle est en communication avec la nappe alluviale.

### 2.3.6. Usages

Différents acteurs exploitent la nappe du Gol pour des usages agricoles (SAPHIR), industriels (Usine sucrière du Gol et Central Thermique du Gol) ou domestiques (CISE). Les volumes prélevés<sup>3</sup> sont estimés respectivement à environ 6,3 et 9,4 millions de m<sup>3</sup>, en 2010 et en 2011, soit une augmentation de 50 % sur un an. Les prélèvements en eau se font en priorité dans les eaux de surface. Cependant, ceux-ci sont très variables (turbidité, débit variable...). Le tableau 2 présente les volumes prélevés par ouvrage et par type d'usage. Ce tableau est complété par l'évolution des pompages par la Saphir : on constate une augmentation importante à partir de la mi-2010 à cause des conditions climatiques (sécheresse)

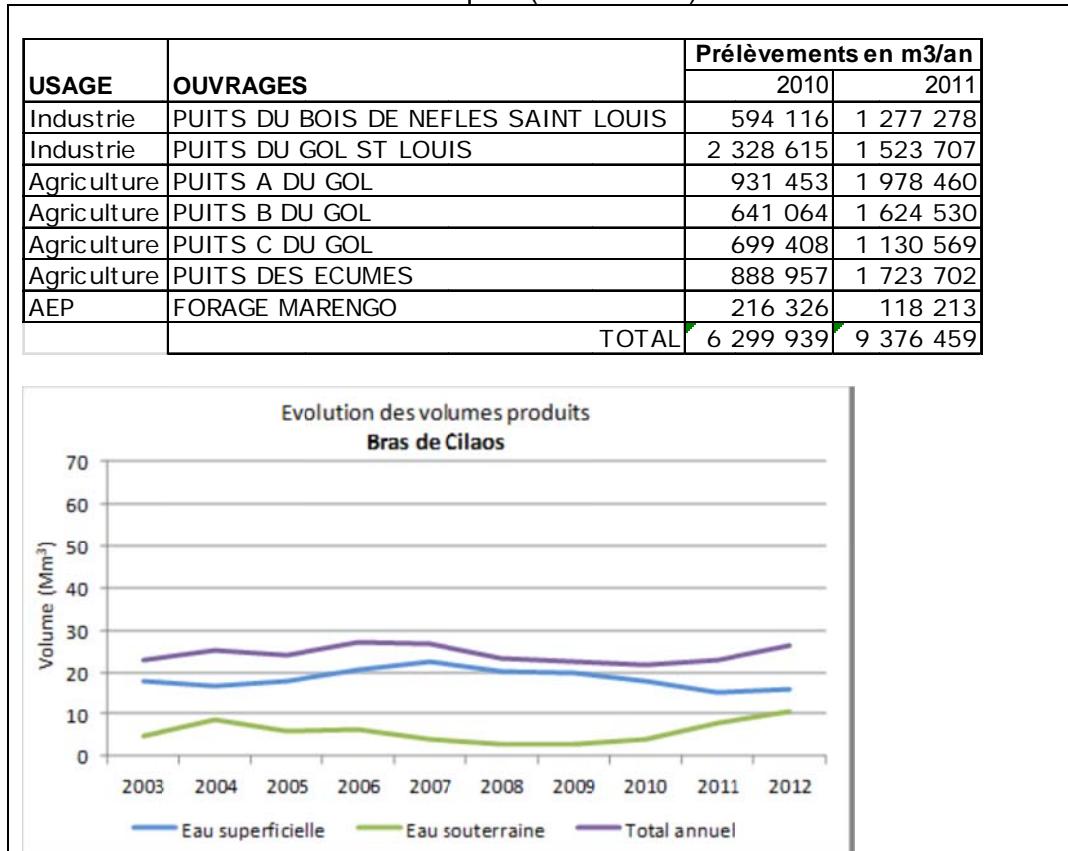


Tableau 2: Volumes prélevés en 2010 et 2011 (OLE, 2012). Evolution des volumes produits au Bras de Cilaos (SAPHIR)

### 2.4. CONDITIONS CLIMATIQUES 2011-2012

La pluviométrie en 2011 est marquée par un déficit important sur le cirque de Cilaos (- 50 % environ) entraînant une baisse des prélèvements dans les eaux superficielles qui a été compensé par une augmentation des prélèvements dans les eaux souterraines (Tableau 2). En 2012, une sécheresse exceptionnelle a eu lieu entre mai et octobre sur les communes allant de St-Leu à St-Joseph en passant par Cilaos et Le Tampon. Pendant ces six mois, la pluviométrie est restée très faible (- 45 % par rapport à la normale).

<sup>3</sup> D'après le fichier des prélèvements de l'Office de l'eau.

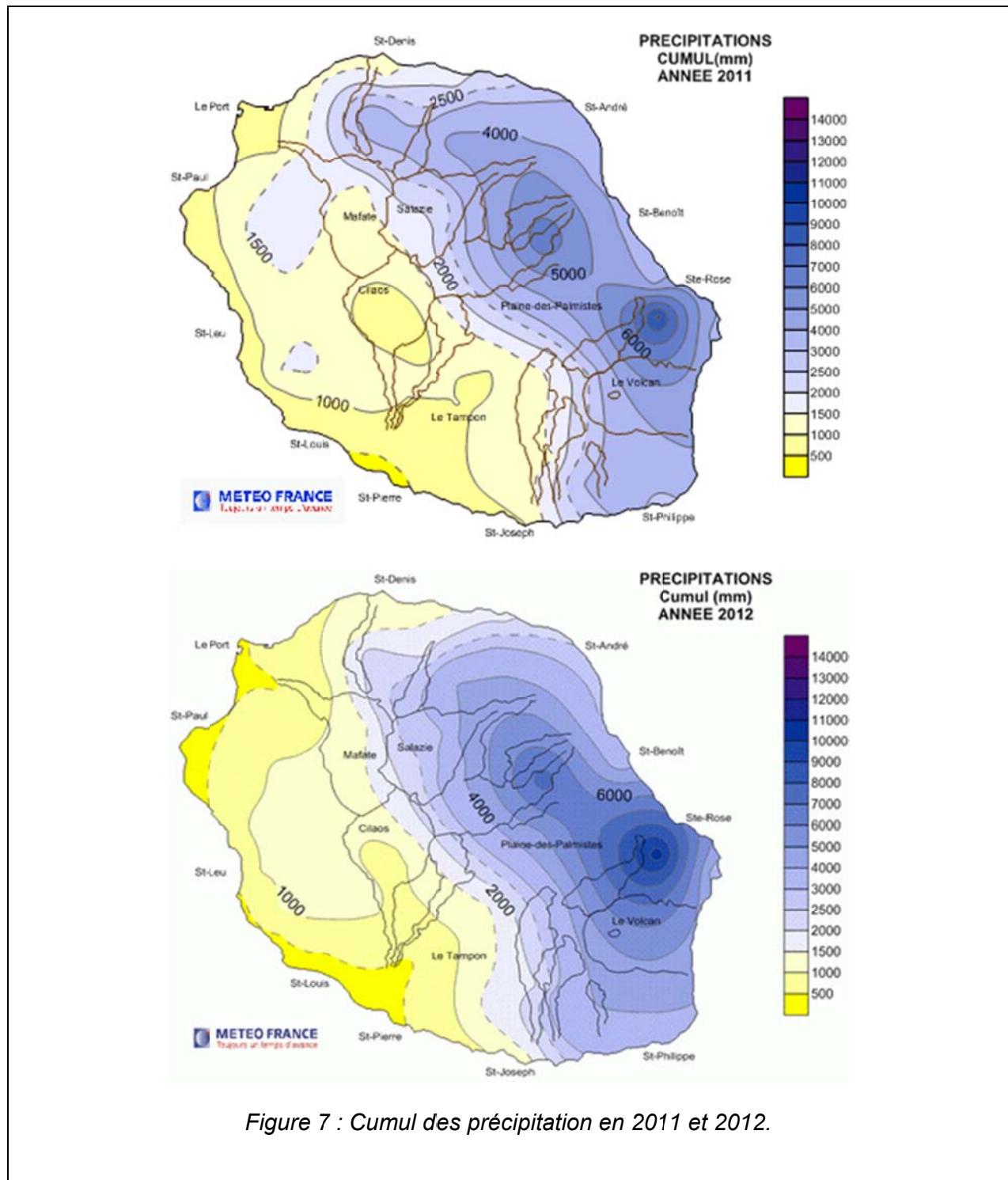


Figure 7 : Cumul des précipitation en 2011 et 2012.



### 3. Mise en place du suivi préliminaire

L'objectif du suivi est d'acquérir des données qui permettront de mieux caractériser le site sur le plan hydraulique : dynamique de chaque ouvrage, interactions entre ouvrages, relation de la conductivité avec les niveaux piézométriques.

La mise en place du suivi a fait l'objet des opérations suivantes :

- Repérage des ouvrages (puits, forages, piézomètres) implantés sur la zone et répertoriés dans la Base de Données du Sous-sol (BSS). 85 points concernant l'unité aquifère littorale de la plaine du Gol ont ainsi été identifiés (Figure 8).
- Reconnaissance de terrain qui a permis de sélectionner 24 points parmi l'ensemble des points identifiés précédemment. Composée de 18 piézomètres et de 6 ouvrages exploités (forages et puits), cette sélection a été établie sur la base de critères suivants :
  - Localisation des ouvrages et accessibilité.
  - Etat général actuel (actif, rebouché, détérioré, abandonné...).
  - Caractéristiques générales de chaque ouvrage (profondeur, diamètre, équipement...).
  - Usage actuel (ouvrage d'exploitation, point de suivi OLE...).
  - Mode d'exploitation (importance des volumes prélevés).
  - Représentativité de chaque ouvrage vis-à-vis du fonctionnement générale du système étudié.

La carte de la Figure 9 permet de situer l'ensemble des ouvrages sélectionnés sur la plaine du Gol pour la mise en place d'un suivi.

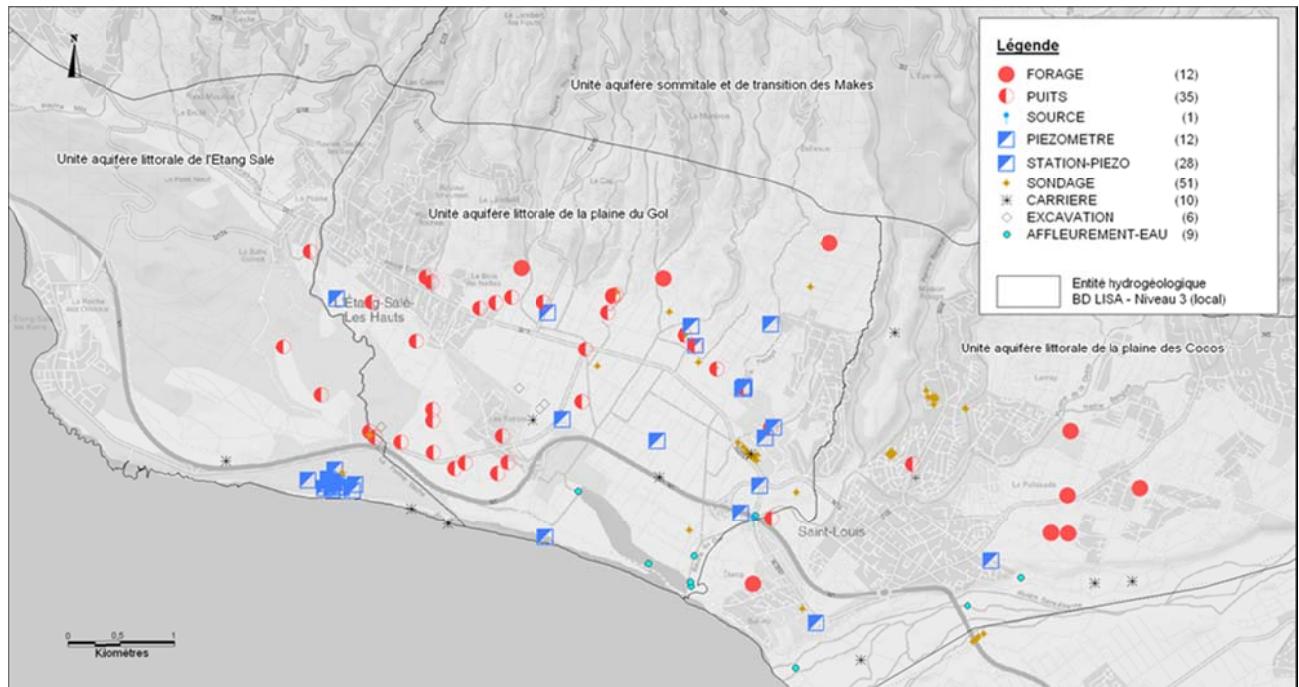


Figure 8 : Extraction BSS des ouvrages situés dans le secteur de la plaine du Gol

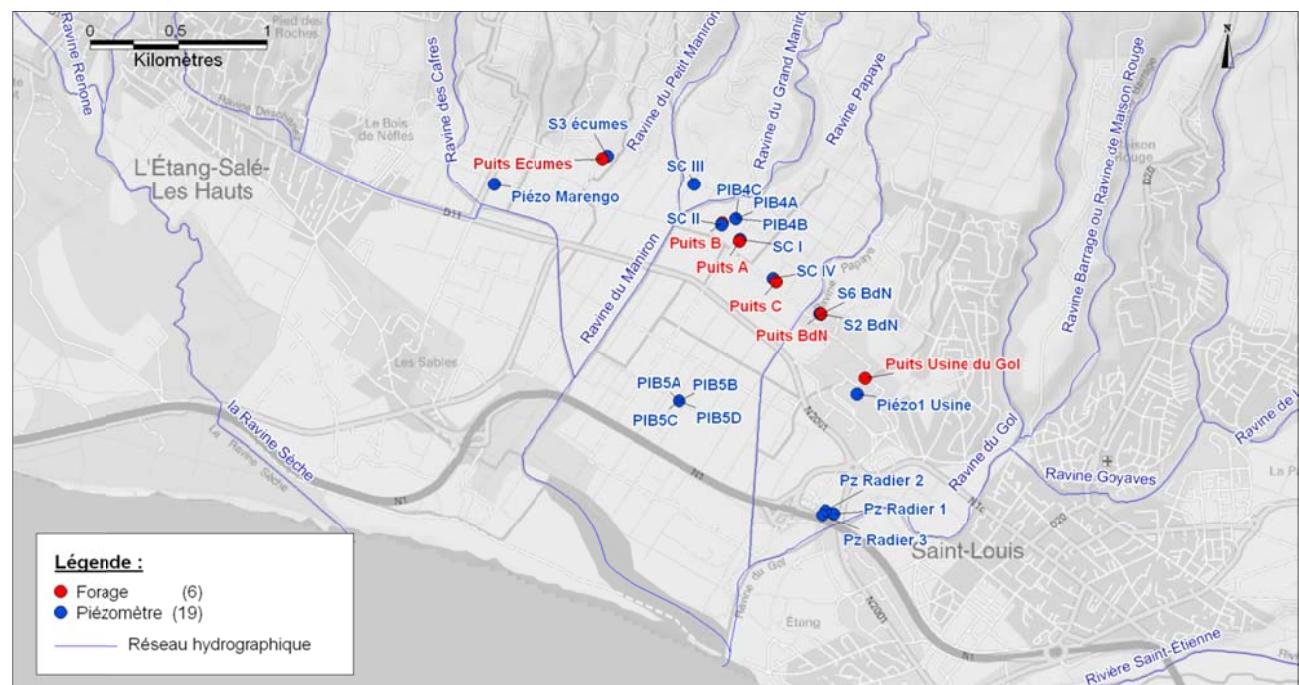


Figure 9: Localisation des ouvrages suivis

Les puits présents sur la zone sont exploités pour des usages agricoles et industriels. Le Tableau 3 présente les différents acteurs locaux qui réalisent ces prélèvements et les puits concernés par ces derniers :

		<b>SR (Industrie)</b>	<b>CTG (Industrie)</b>	<b>SAPHIR (Agriculture)</b>
<b>Puits Usine du Gol</b>	12287X0035	x		
<b>Puits BdN</b>	12287X0038	x	x	
<b>Puits A</b>	12287X0061			x
<b>Puits B</b>	12287X0062			x
<b>Puits C</b>	12287X0064			x
<b>Puits Ecumes</b>	12287X0034			x

**SR** = Usine sucrière du Gol ; **CTG** = Centrale Thermique du Gol ; **SAPHIR** = Société d'Aménagement des Périmètres Hydrauliques de l'Île de la Réunion

Tableau 3 : Répartition des ouvrages exploités par acteurs

- Nivellement d'une grande partie des ouvrages (14 piézomètres) afin de réaliser le suivi de la piézométrie et de la conductivité de la nappe du Gol.
- A partir de février 2011, équipement des points en sondes de pression et de conductivité, en fonction des suivis déjà réalisés par la Saphir, l'usine sucrière, CTG et la Cise. Le suivi réalisé au cours de cette étude sur la nappe du Gol est présenté page suivante sous forme de cartes (cf. Figure 10).

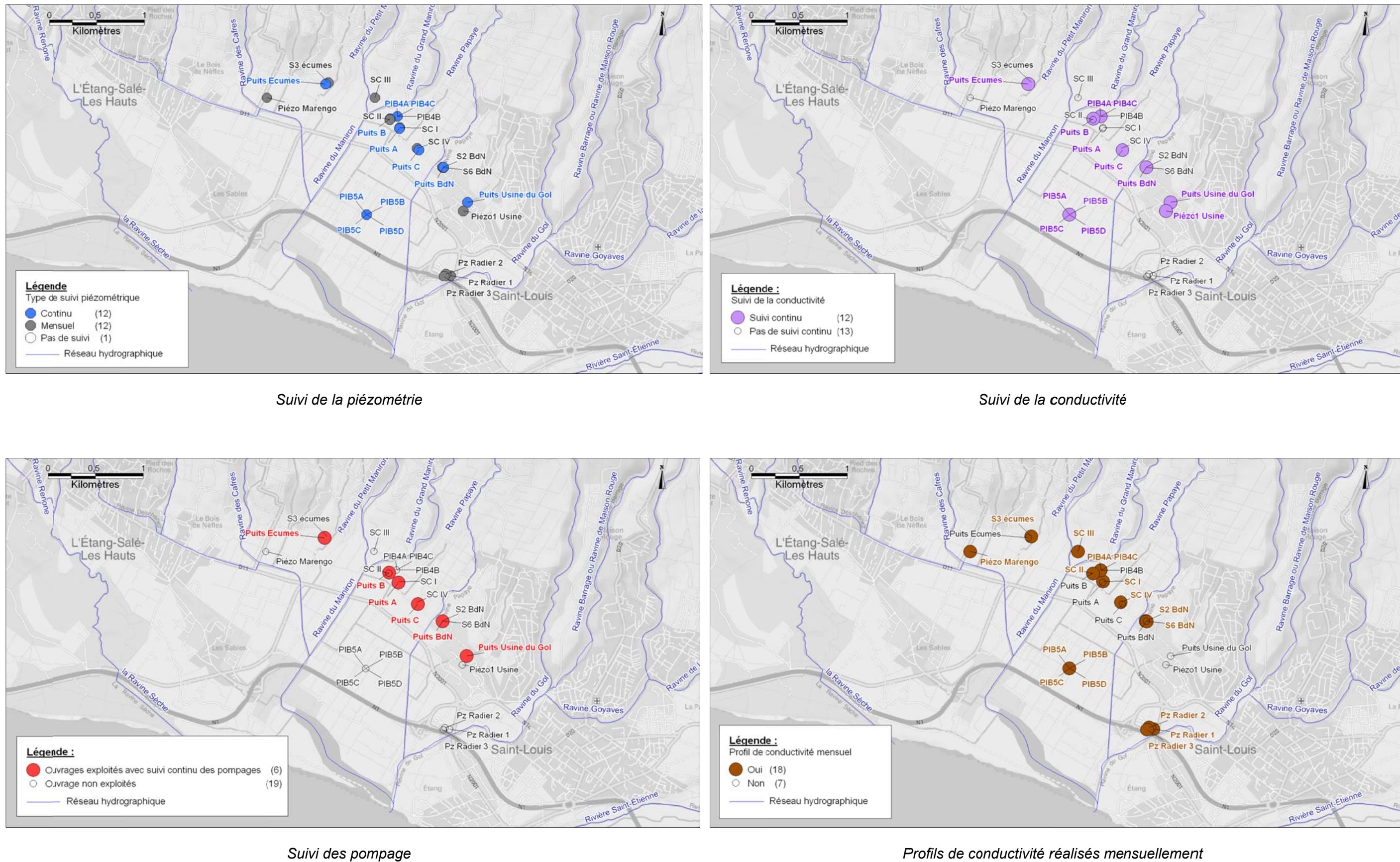


Figure 10 : Ouvrages du suivi de la nappe du Gol

Deux types de suivi ont été réalisés par le BRGM durant la période 2011-2012 :

- *Un suivi continu des paramètres température, piézométrie, conductivité* : réparti de manière homogène sur la zone d'étude, ce dernier concerne 12 ouvrages implantés à la fois dans les formations alluviales situées en surface et dans les séries basaltiques situées en profondeur.

Ce réseau de suivi comprend deux multi-piézomètres situés à l'amont et à l'aval hydraulique de la nappe du Gol et qui permettent d'observer le fonctionnement de la nappe à différentes profondeurs :

- **PIB4** : il est composé de 3 piézomètres. PIB4A et PIB4C sont équipés. Le tubage de PIB4B est cassé et n'a donc pas été équipé. Des mesures ont également été effectuées au niveau du tubage principal mais se sont révélées inutilisables en raison d'une mauvaise représentativité du système (origine des eaux inconnue).
  - **PIB5** : il est composé de 4 piézomètres. Tous sont équipés.
- *Un suivi ponctuel des paramètres piézométrie et conductivité* : réalisé chaque mois, ce dernier a permis de réaliser un total de 216 profils de conductivité sur 18 ouvrages entre avril 2011 et avril 2012 (Annexe 2). Des mesures piézométriques ont également été effectuées à chaque passage afin de compléter le jeu de données issu du suivi continu.

Ces données ont été complétées par :

- Les mesures réalisées par les différents acteurs locaux sur les ouvrages exploités pour les paramètres suivants :
  - Piézométrie mesurée par l'usine sucrière au niveau des puits du Gol et Bois de Nèfles
  - Conductivité mesurée par la SAPHIR au niveau des puits A, B, C et Ecumes; la conductivité n'a pas été récupérée comme prévu sur les puits du Gol et de Bois de Nèfles.
  - Débits mesurés par l'usine sucrière sur les puits du Gol et Bois de Nèfles et par la SAPHIR sur les puits A, B, C et Ecumes.
- Un jeu de données historiques récupéré auprès des services de la DEAL et de la CTG (Centrale Thermique du Gol) concernant des valeurs de débit au niveau des puits du Gol et Bois de Nèfles.

L'ensemble du suivi mené sur chaque ouvrage par les équipes du BRGM et par les acteurs locaux est présenté dans le tableau suivant (OE : Office de l'eau. SR :Usine sucrière).

N°	Désignation	Identifiant	Type d'ouvrage	Piézométrie		Conductivité température		Débit de pompage		Profil Conductivité		Profondeur (m/repère)	Diamètre (mm)	Position Crépine (en m/repère)	Niveau piézo/Repère (m) (24/08/2011)
				Producteur	pas de temps	Producteur	pas de temps	Producteur	pas de temps	Producteur	pas de temps				
1	<b>Puits Usine du Gol</b>	12287X0035/F	Forage	SR	2 MN			SR	2 MN	-	-	17.5	1700	[15-17.5]	13.63 (07/2012)
				BRGM	2 MN	BRGM	2 MN			-	-				
2	Piézo1 Usine	12287X0054/P1	Piézomètre			BRGM	2 MN			-	-	25.5	50	[12-25,5]	12.85 (07/2012)
3	<b>Puits BdN</b>	12287X0038/P2	Forage	SR	2 MN	NON		SR	2 MN	-	-	17	1700	[11.5-16,95]	15.48 (07/2012)
4	S2 BdN	12287X0039/S2	Piézomètre	BRGM	1 MOIS	-	-	-	-	BRGM	1 MOIS	17.9	50	-	15.97
5	S6 BdN	12287X0107/S6	Piézomètre	BRGM	1 MOIS	-	-	-	-	BRGM	1 MOIS	19.8	50	-	16.35
6	<b>Puits C</b>	12287X0064/P-C	Forage	SAPHIR	2	SAPHIR	2	SAPHIR	2	-	-	20.2	2000	[14-20.2]	13.35 (03/1986)
7	SC IV	12287X0063/SC-IV	Piézomètre	BRGM	1 MOIS	-	-	-	-	BRGM	1 MOIS	25	50	[14-25]	13.62
8	<b>Puits A</b>	12287X0061/P1	Forage	SAPHIR	2	SAPHIR	2	SAPHIR	2	-	-	16.5	2000	[13.5-16.5]	12.27 (07/1985)
9	SC I	12287X0058/SC-1	Piézomètre	BRGM	10 MN			-	-	BRGM	1 MOIS	20.5	50	[12.5-20.5]	12.43
10	<b>Puits B</b>	12287X0062/P2	Forage	SAPHIR	2	SAPHIR	2	SAPHIR	2	-	-	20.6	2000	[15.5-20.6]	10.82 (11/1985)
11	SC II	12287X0059/SC-2	Piézomètre	BRGM	1 MOIS					BRGM	1 MOIS	20	50	[12-20]	11.22 (09/2011)
12	PIB4A	12287X0056/PIB-4A	Piézomètre	BRGM	10 MN	BRGM	10 MN	-	-	BRGM	1 MOIS	41.2	26	[21.2-41.2]	16.56
13	PIB4C	12287X0114/PIB-4C	Piézomètre	BRGM	10 MN	BRGM	10 MN	-	-	BRGM	1 MOIS	99.2	50	[81.2-99.2]	16.57
14	PIB5A	12287X0057/PIB-5A	Piézomètre	BRGM	10 MN	BRGM	10 MN	-	-	BRGM	1 MOIS	17.9	26	[12.9-17.9]	1.87
15	PIB5B	12287X0115/PIB-5B	Piézomètre	BRGM	10 MN	BRGM	10 MN	-	-	BRGM	1 MOIS	37.3	50	[34.2-37.3]	1.96
16	PIB5C	12287X0116/PIB-5C	Piézomètre	BRGM	10 MN	BRGM	10 MN	-	-	BRGM	1 MOIS	45.2	50	[42.2-45.2]	1.96
17	PIB5D	12287X0117/PIB-5D	Piézomètre	BRGM	10 MN	BRGM	10 MN	-	-	BRGM	1 MOIS	74.8	50	[54.8-74.8]	1.96
18	SC III	12287X0060/SC-3	Piézomètre	-	-	-	-	-	-	BRGM	1 MOIS				
19	<b>Puits Ecumes</b>	12287X0034/P	Forage	SAPHIR	2	SAPHIR	2	SAPHIR	2	-	-	15	2000	[7.5-15]	7.69 (12/1971)
20	S3 écumes	12287X0105/S3	Piézomètre	-	-	-	-	-	-	BRGM	1 MOIS	22	30	-	9.48
21	Piézo Marengo	12287X0066/P4	Piézomètre	-	-	-	-	-	-	BRGM	1 MOIS	8.8	105	[6.2-80.2]	2.52
22	Pz Radier 1	12287X0133/PZ	Piézomètre	BRGM	1 MOIS	-	-	-	-	BRGM	1 MOIS	20.9	50	-	5.66
23	Pz Radier 2	12287X0134/PZ	Piézomètre	BRGM	1 MOIS	-	-	-	-	BRGM	1 MOIS	23.8	50	-	5.61
24	Pz Radier 3	12287X0135/PZ	Piézomètre	BRGM	1 MOIS	-	-	-	-	BRGM	1 MOIS	7.15	50	-	5.03

Tableau 4 : Points de suivi de la nappe du Gol

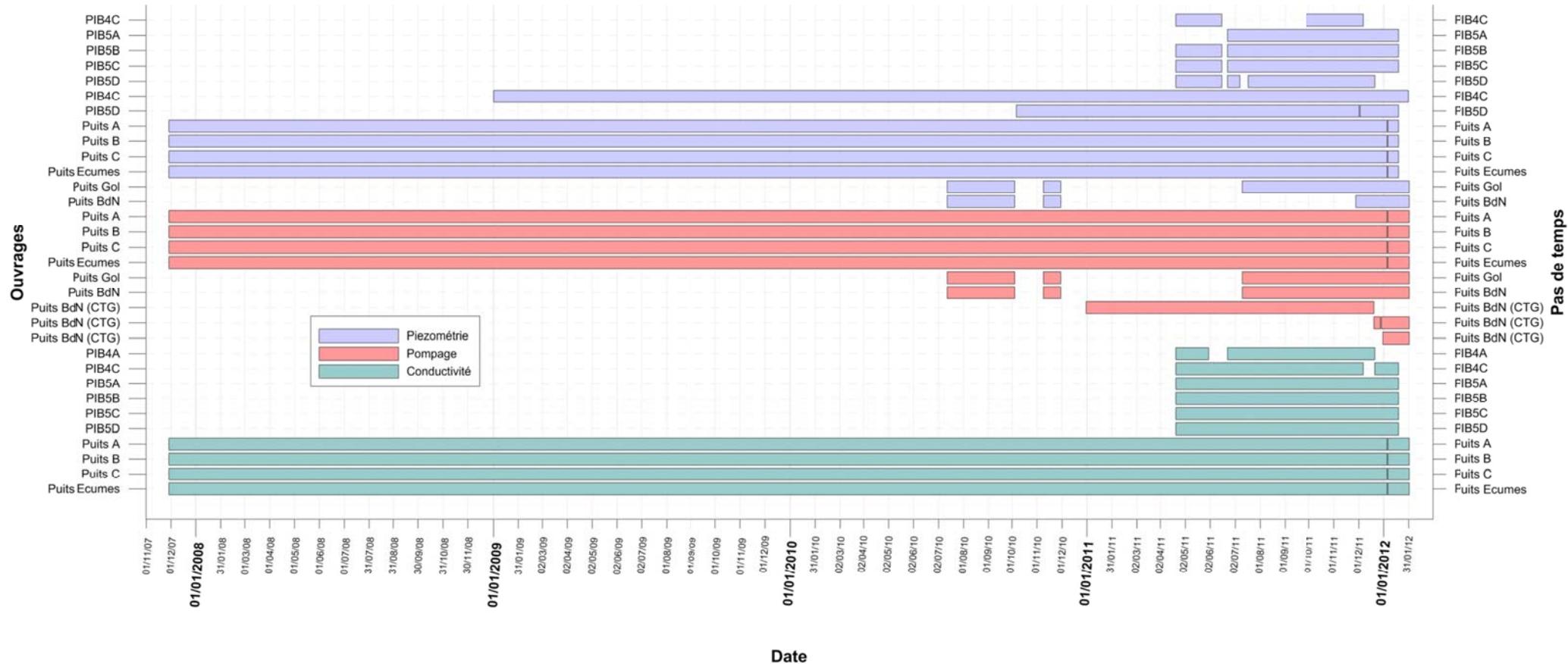


Figure 11 : Chronogramme des données disponibles



## 4. Interprétation des pompages d'essai

L'interprétation des pompages d'essai comprend deux parties :

- une réinterprétation des pompages d'essai anciens : quatorze pompages d'essai ont été réalisés entre 1971 et 2006 dans les puits, forages ou piézomètres de la Plaine du Gol. Ils ont été interprétés à l'époque de leur exécution par les méthodes classiques de Jacob ou de Theis. Ils font l'objet dans ce rapport d'une réinterprétation avec des méthodes plus performantes et plus adaptées au milieu complexe des formations volcaniques (§ 4.1).
- le pompage d'essai d'octobre 2011 : ce pompage a été organisé afin de mettre en évidence les connexions hydrauliques, ou leur absence, entre les différents ouvrages (§ 4.2).

### 4.1. RÉINTERPRÉTATION DES TESTS HYDRAULIQUES

Les essais par pompage réalisés sur les forages de la Plaine du Gol ont été réinterprétés : il s'agit des essais réalisés sur les ouvrages :

- de la sucrerie du Gol (« puits du Gol » et « Bois de Nèfles »),
- de la Saphir (« puits A, B, et C », « puits des Ecumes »),
- de « Maniron »,
- PIB 4 et 5.

La Figure 12 présente la localisation des différents ouvrages. La réinterprétation de ces essais a pour but d'estimer avec plus de précision les paramètres hydrodynamiques des aquifères testés, notamment la transmissivité et l'emmagasinement, et d'avoir une première idée de la géométrie de l'aquifère (effet de limites notamment). Les essais n'ont pas été interprétés en tenant compte d'un éventuel captage partiel des ouvrages dans l'aquifère, ce qui est probablement le cas pour la plupart des ouvrages. Néanmoins, ceci n'altère en rien ni les valeurs de transmissivité déduites, ni l'ordre de grandeur des valeurs d'emmagasinement, ni les informations sur la géométrie des aquifères.

Les informations déduites de ces essais ont servi de base à l'interprétation de l'essai multi-puits (interférences multiples) réalisés octobre 2011.

#### 4.1.1. Méthodologie utilisée pour l'interprétation des essais

La méthode mise en œuvre est décrite dans le schéma suivant (Figure 13). Elle nécessite une qualité de donnée adéquate, notamment en termes de densité des mesures. Elle sera utilisée autant que possible pour interpréter les essais réalisés sur les forages du secteur de la Plaine du Gol. Dans le cas contraire, les essais seront directement modélisés et donc les paramètres hydrodynamiques déduits des modélisations.

L'interprétation des essais de pompage dans les formations volcaniques est complexe, conséquence de l'empilement de séries à perméabilités différentes, voire de milieux perméables et semi-perméables, de la géométrie des coulées basaltiques, etc., mais aussi, éventuellement, des dépôts d'alluvions inter-coulées ou les surmontant.

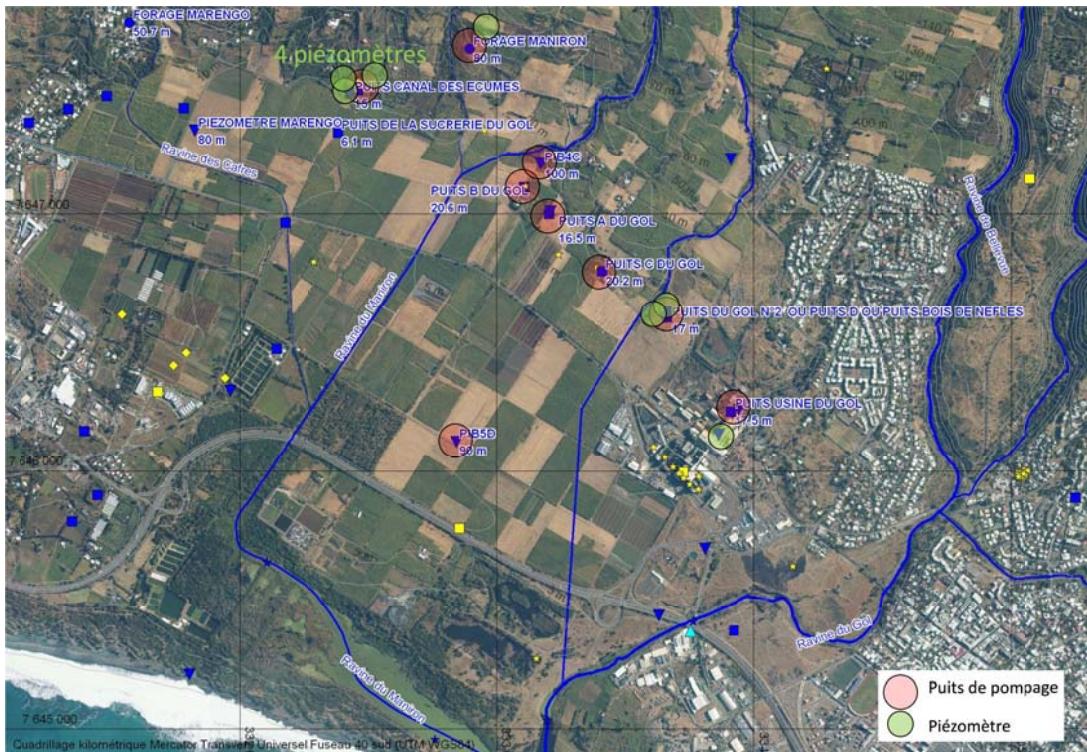


Figure 12 : Localisation des tests par pompage réinterprétés.

### Courbe des dérivées

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 de la courbe de dérivée logarithmique des rabattements ( $\partial s / \partial \ln t$  ; à la descente ou à la récupération), 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 Wurstner, 1993, etc.). L'avantage de cette méthode est que pour chaque type et/ou géométrie d'aquifère (et type de configuration forage-aquifère), il correspond un régime ou une succession de plusieurs régimes d'écoulement spécifique qu'il est en général possible d'identifier sur la courbe de dérivée (Deruyck; et al., 1992, Shlumberger, 2002 ; Renard et al., 2009).

Le calcul de la dérivée nécessite souvent un traitement par lissage afin d'augmenter le rapport signal sur bruit, bruit engendré soit 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. Par contre, 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 débits) ; on obtient ainsi une courbe type de l'essai qui est dérivée et interprétée suivant la méthode précédemment décrite.

## Diagnostic

Une fois la courbe des dérivées construite, la phase de diagnostic consiste à identifier les différents régimes d'écoulement puis 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 les aquifères de sub-surface (effet de drainance par exemple), et éventuellement à la mise en évidence d'écoulements fractionnalisés comme par exemple due à la forte perméabilité d'un drain volcanique. 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 atteint.

Le logiciel utilisé pour l'interprétation des tests est WinISAPE (logiciel BRGM). WinISAPE propose une dizaine de solutions analytiques pour modéliser les données des pompages d'essai : milieu homogène isotrope, anisotrope, double porosité, fracture verticale, effet de drainance verticale, limites étanches ou alimentées, etc. Par ailleurs le logiciel prend aussi en compte les effets de puits (capacité de puits, pertes de charges, skin). D'autres solutions non présentes dans le logiciel seront aussi utilisées (aquifères compartimentés, aquifères multicouches, etc.).

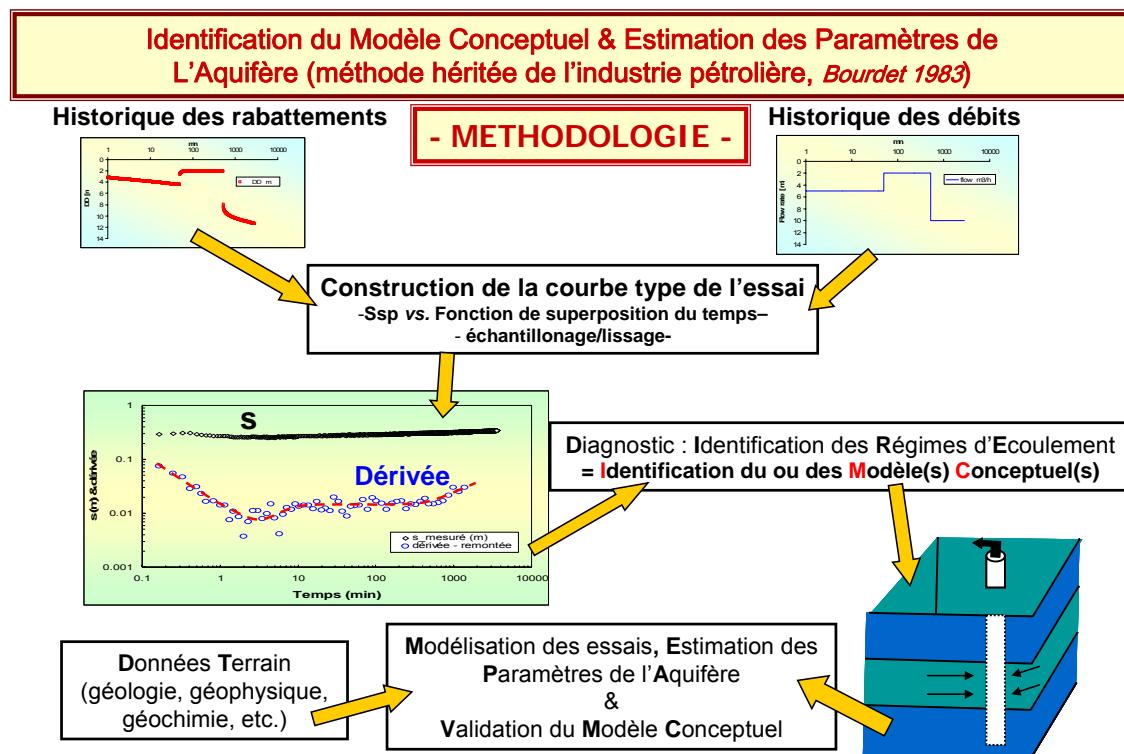


Figure 13 : Méthodologie mise en œuvre pour l'interprétation des pompages d'essai. Utilisation des dérivées des rabattements pour diagnostiquer l'essai.

#### **4.1.2. Interprétation des pompages d'essai réalisés aux forages « Puits du Gol » (12287X0035) et « Puits du Bois de Nèfles » (12287X0038)**

##### ***Description des ouvrages et des tests hydrauliques***

Ces deux ouvrages (Figure 12) sont exploités par la sucrerie du Gol pour les besoins en eau de l'usine et ceux de la centrale thermique du Gol. Ils captent la nappe supérieure des basaltes entre 15 et 20 m de profondeur. L'ouvrage « Puits du Gol » est profond de 17.50 m et celui du « Bois de Nèfles » de 16.95 m. Ils sont équipés de buses de gros diamètre (diam. : 1.60 m) ; les coupes géologiques et techniques des ouvrages figurent en annexe 3.

Les essais hydrauliques réinterprétés sont ceux réalisés par la SOGREAH (2006) en 2006, soit :

1. un essai de pompage par paliers de débit sur le puits du Gol, le 27 juin ;
2. un essai de pompage par paliers de débit sur le puits de Bois de Nèfles, le 17 juillet ;
3. des pompages simultanés sur les puits du Gol et du Bois de Nèfles, les 19 et 20 juillet.

Les suivis ont été réalisés sur les deux puits et 3 piézomètres : Piézo-Sucrerie, Piézo-SC2 et Piézo-SC6 (cf. carte de localisation en annexe 2). Les coupes techniques et géologiques de ces ouvrages ne sont pas connues. Par ailleurs, la conductivité électrique des eaux d'exhaure a aussi été suivie aux puits de pompage.

Seul l'essai par paliers de débit réalisé au puits du Gol a pu faire l'objet d'un diagnostic (Figure 14). Les autres du fait d'un bruit trop important sur la donnée piézométrie ont directement été modélisés (logiciel WinIsape BRGM).

Le diagnostic de l'essai par paliers de débit au puits du Gol montre :

1. de 0 à environ 10 min de pompage : effet de capacité de puits,
2. de 10 min à la fin de l'essai : écoulement radial (stabilisation de la dérivée) indiquant la réaction d'un aquifère homogène.

Cet essai, ainsi que les autres, a donc été interprété avec le modèle de Theis (aquifère homogène isotrope et infini). Les effets de puits -pertes de charges quadratiques et effets de capacité de puits- ont été intégrés aux modélisations (puits de pompage seulement). Les Figure 15 et Figure 16 présentent les modélisations des essais par paliers aux puits de pompage. Les autres modélisations figurent en annexe.

Lors de l'essai simultané sur les deux ouvrages, les niveaux sur le puits du Gol n'ont pas pu être interprétés du fait de pompages parasites occasionnés par un autre ouvrage (Sogreah, 2006). De plus, la modélisation sur le puits du Bois de Nèfles ne tient pas compte de l'interférence avec le puits du Gol, car supposé négligeable durant la durée de cet essai, de l'ordre de quelques cm (cf. figure en annexe). Il en a été de même pour les deux piézomètres d'observation situés à proximité de ce dernier (SC2 et SC6 distants de 10 m environ).

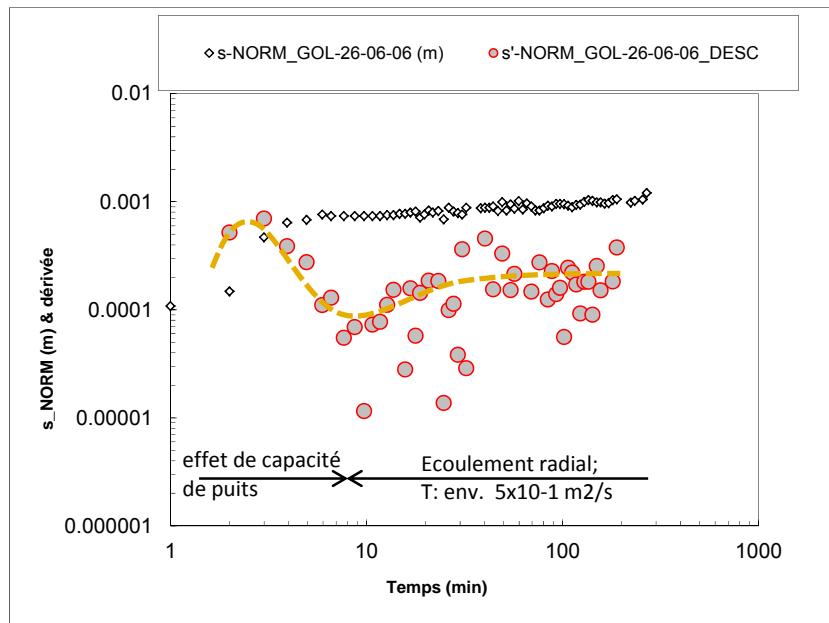


Figure 14 : Diagnostic de l'essai par paliers de débit réalisé en juin 2006 sur le puits du Gol.  
Réalisé à partir des rabattements normalisés.

Courbe en pointillée : tendance de la dérivée.

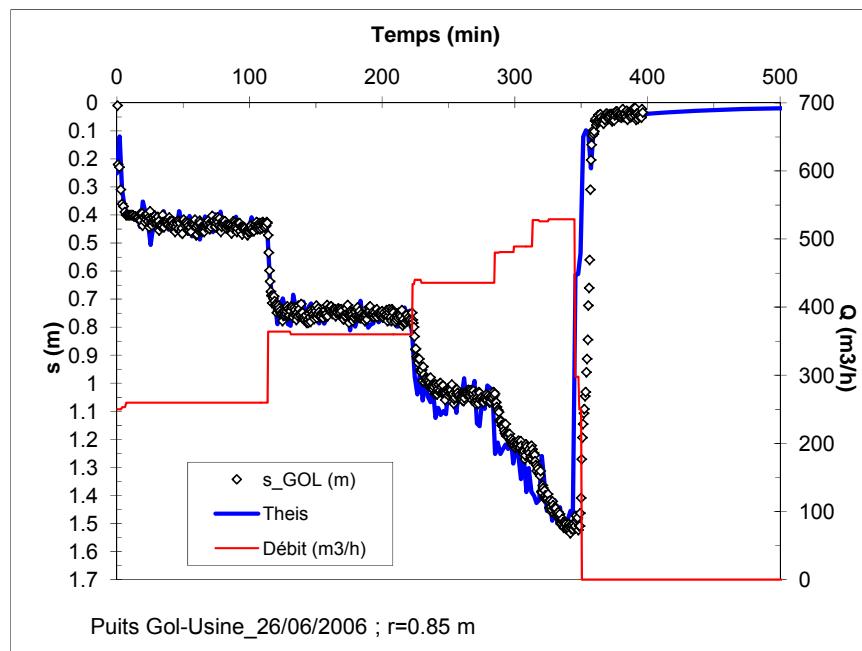


Figure 15 : Modélisation de l'essai par paliers réalisé en juin 2006 au puits du Gol. Modèle : Theis.

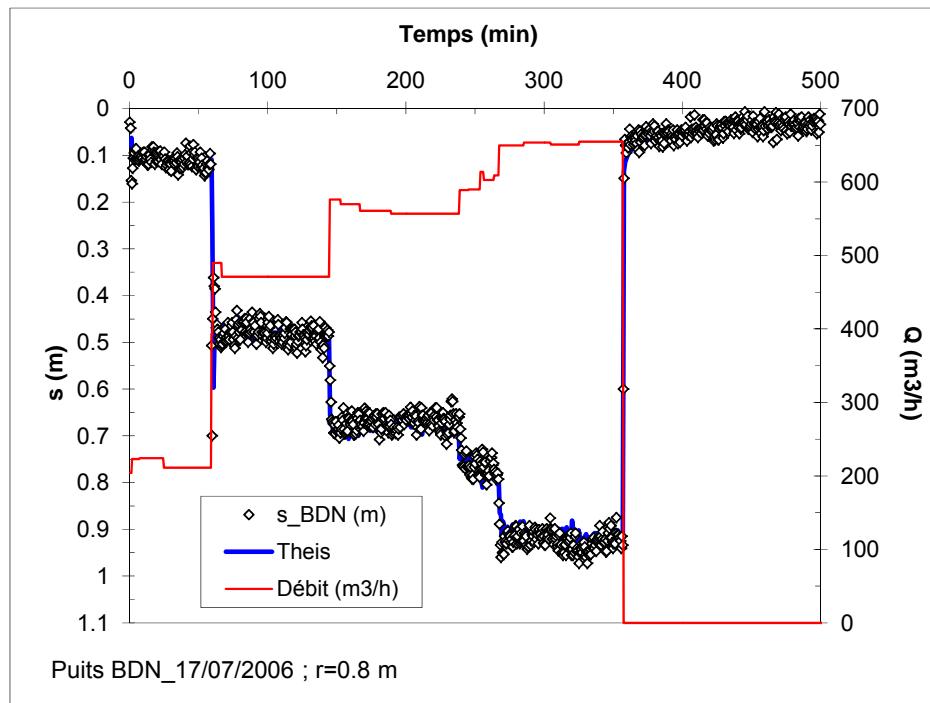


Figure 16 : Modélisation de l'essai par paliers réalisé en juillet 2006 au Puits du Bois de Nèfles. Modèle : Theis.

Le Tableau 5 synthétise les paramètres hydrodynamiques déduits de l'ensemble des modélisations.

Les modélisations sont de bonne qualité, la transmissivité de l'aquifère capté est de l'ordre de  $6.0 \times 10^{-1}$  m<sup>2</sup>/s et son emmagasinement de l'ordre de  $6.0 \times 10^{-2}$ . Les essais montrent qu'à l'échelle de l'essai, soit dans un rayon d'eau moins 400-450 m, l'aquifère capté est relativement homogène (faible écart type de la transmissivité). Cela n'exclut cependant pas qu'il puisse y avoir des limites (étanches ou d'alimentation) au-delà de cette distance.

moyenne. \*\*moyenne géométrique. Pdc : pertes de charge quadratiques, capa : effet de capacité des puits, e.t. : écart type.  
 \* les emmagasinements au puits de pompage sont des valeurs de charge et les valeurs en italique ne sont pas preses compte dans la moyenne.

Tableau 5: Synthèse des paramètres hydrodynamiques. Essais réalisés en 2006 sur les puits du Gol du Bois de Néfles.

ouvrage	type de test	date test	type ouvrage	r (m)	T (m <sup>2</sup> /s)	S (-)*	pdc (m-5s <sup>2</sup> )	capa (mm)
<i>Essai par palliers sur le Puits du Gol</i>								
<i>Puits-GOL Usine</i>								
BDN-obs.	palliers	26/06/2006	puits	0.85	4.46E-01	2.33E-01	52	2500
SC2-obs.	palliers	26/06/2006	piezô	435	5.00E-01	2.80E-02	-	-
BDN-obs.	palliers	26/06/2006	piezô	435	4.46E-01	4.30E-02	-	-
SC2-obs.	palliers	26/06/2006	piezô	430	4.46E-01	3.80E-02	-	-
SC6-obs.	palliers	26/06/2006	piezô	50	6.80E-01	4.00E-01	-	-
SUCREIE	palliers	26/06/2006	piezô	50	6.80E-01	4.00E-01	-	-
Gol-Usine-obs.	palliers	17/06/2006	puits	0.85	6.00E-01	1.53E+02	24	1600
<i>Essai par palliers sur le Puits du Bois des Nefles</i>								
Puits BDN	palliers	17/06/2006	piezô	435	6.00E-01	1.30E-02	-	-
SC2-obs.	palliers	17/06/2006	piezô	10.3	6.00E-01	9.00E-02	-	-
SC6-obs.	palliers	17/06/2006	piezô	10.4	6.00E-01	1.50E-01	-	-
SUCREIE obs.	palliers	17/06/2006	piezô	450	6.00E-01	1.00E-02	-	-
<i>Pompages simultanés sur les puits du Gol et du Bois de Nefles</i>								
Puits BDN	LD	19-20/07/06	puits	0.85	6.00E-01	6.72E+01	24	1600
SC2-obs.	LD	19-20/07/06	piezô	10.3	6.05E-01	1.50E-01	-	-
SC6-obs.	LD	19-20/07/06	piezô	10.4	6.00E-01	1.02E-01	-	-
<i>Moy. Geom.**</i>								
Moy. Geom.**								
et.								
7.64E-02								
1.17E-01								



#### 4.1.3. Interprétation des pompages d'essai réalisés aux « Puits A » (12287X0061), « Puits B » (12287X0062) et « Puits C » (12287X0064)

##### **Description des ouvrages et des tests hydrauliques**

La SAPHIR, Société d'Aménagement de Périmètres Hydroagricoles de l'Île de la Réunion, a son réseau de distribution d'eau essentiellement alimenté par des prises d'eau de surface, mais il mobilise aussi les eaux souterraines de différents puits et ouvrages, tels les puits A, B et C de la plaine du Gol (Figure 13).

Les puits A, B, C sont des ouvrages peu profonds qui captent la nappe supérieure des basaltes (niveaux fracturés et scoriacés) entre 15 et 20 m de profondeur. Le puits A est profond de 17.50 m, le puits B de 20.60 m avec une galerie drainante de 10 m vers 15 m de profondeur de 2 m de large environ et le puits C de 20.2 m. Les trois ouvrages sont équipés de buses en béton de 2 mètres de diamètre. Les coupes géologiques et techniques des ouvrages figurent en annexe 2.

Les essais hydrauliques réinterprétés sont ceux réalisés par la SAPHIR en 2001 (Leveneur ; 2001), soit :

1. un essai de pompage par paliers de débit sur le puits A, du 15 ou 16 mai 2001;
2. un essai de pompage de longue durée sur le puits B, du 27 au 28 juin 2001 ;
3. un essai de pompage de longue durée sur le puits C, du 26 au 27 août 2001.

Les suivis de niveau ont été réalisés sur les trois puits et sur le piézomètre PIB4-c. Par ailleurs, la conductivité électrique des eaux d'exhaure a aussi été suivie aux puits de pompage. On signale qu'une série d'essais a eu lieu sur ces ouvrages en 1985 (Daessle et al., 1986) ; ceux-ci n'ont pas été réinterprétés du fait d'une forte influence de la marée et aussi en raison de l'absence de données numériques (graphes peu lisibles).

Les diagnostics ont été réalisés sur les deux pompages de longue durée (Figure 17, Figure 18). De façon générale, ils montrent un écoulement radial après quelques dizaines de minutes de pompage (stabilisation de la dérivée) indiquant la réaction d'un aquifère homogène. Il est à noter que cela n'exclut pas un captage partiel de l'aquifère, c'est-à-dire que le fond du forage soit au-dessus du mur de l'aquifère. De façon générale, la conductivité des eaux pompées augmente durant les essais d'une quinzaine de micro-Siemens pour le puits C et d'une soixantaine dans le cas de B.

L'ensemble des essais ont été interprétés avec le modèle de Theis (aquifère homogène isotrope et infini). Les effets de puits -pertes de charges quadratiques et effets de capacité de puits- ont été intégrés aux modélisations (puits de pompage seulement). Les Figure 19 à Figure 21 présentent les modélisations des essais aux puits de pompage. Les autres modélisations figurent en annexe 3. Le Tableau 6 synthétise les paramètres hydrodynamiques déduits de l'ensemble des modélisations.

Les modélisations sont en général de bonne qualité. Seules quelques données piézométriques sont fortement influencées par le cycle des marées (cf. piézomètres lors de l'essai au puits B ; Tableau 6), ce qui n'a permis qu'une modélisation partielle du rabattement sur ces derniers et donc une estimation approximative des paramètres hydrodynamiques (en particulier de l'emmagasinement). La transmissivité de l'aquifère capté est de l'ordre de 1 m<sup>2</sup>/s et son emmagasinement de l'ordre de 6.0x10<sup>-2</sup>. Les essais montrent qu'à l'échelle de l'essai, soit dans

un rayon de 100 à 300 m, l'aquifère capté est relativement homogène (faible écart-type de la transmissivité). Cela n'exclut cependant pas qu'il puisse y avoir des limites (étanches ou d'alimentation) au-delà de cette distance.

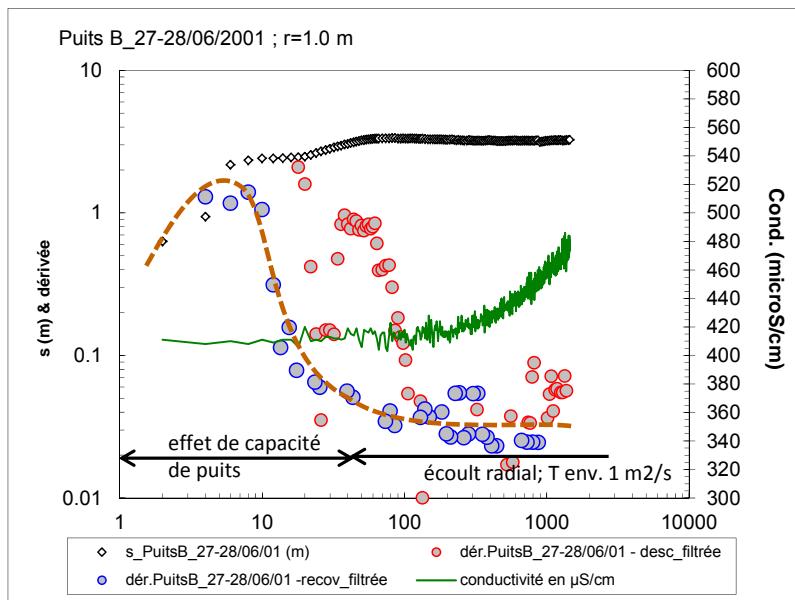


Figure 17 : Diagnostic de l'essai réalisé en juin 2001 sur le puits B. Réalisé à partir des rabattements de la descente et de la remontée des niveaux ; comparaison aux mesures de conductivité électrique des eaux d'exhaure.

Courbe en pointillée : tendance de la dérivée.

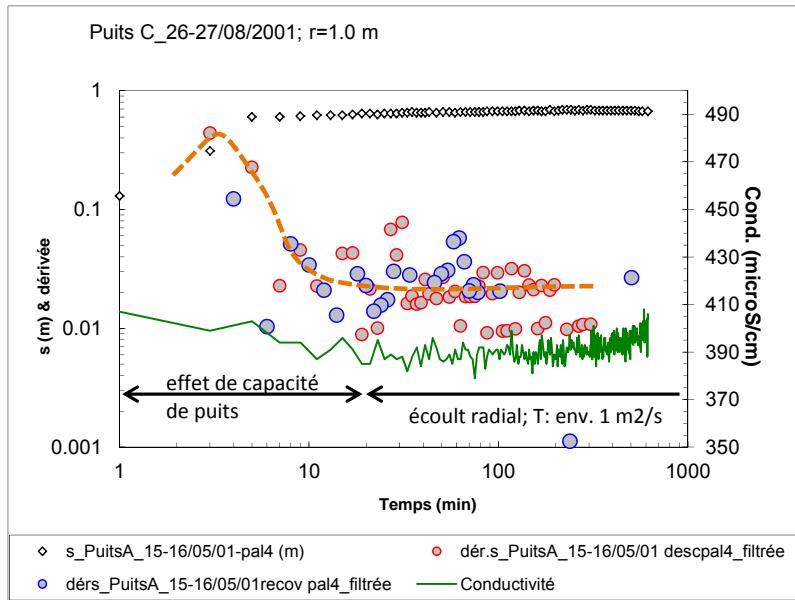


Figure 18 : Diagnostic de l'essai réalisé en août 2001 sur le puits C. Réalisé à partir des rabattements de la descente et de la remontée des niveaux ; comparaison aux mesures de conductivité électrique des eaux d'exhaure.

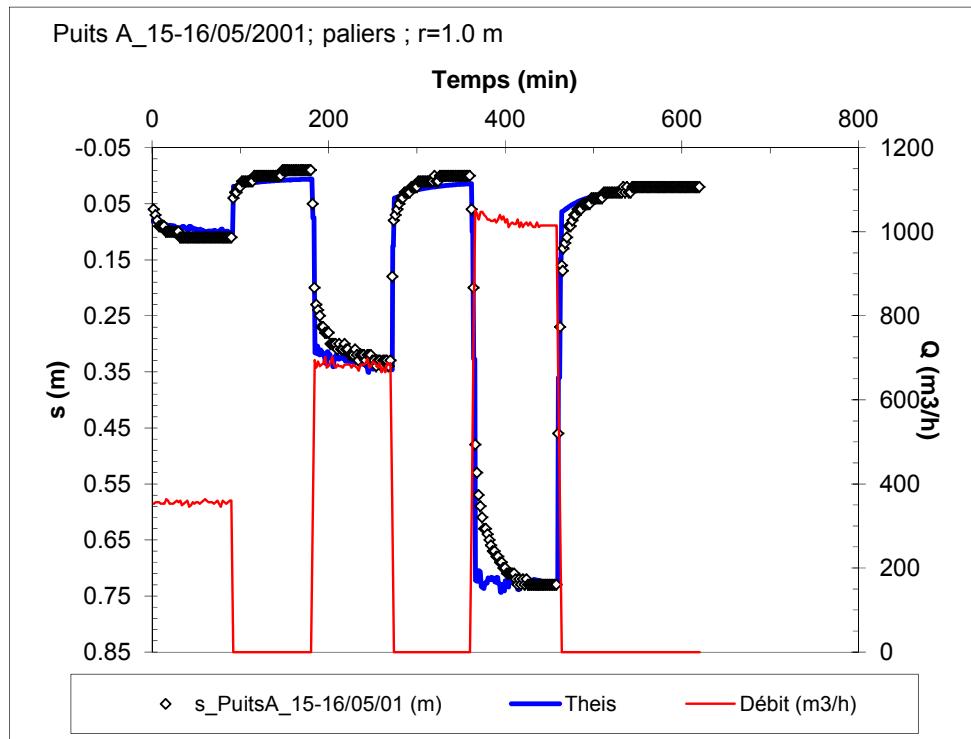


Figure 19 : Modélisation de l'essai par paliers réalisé en mai 2001 au puits A. Modèle : Theis.

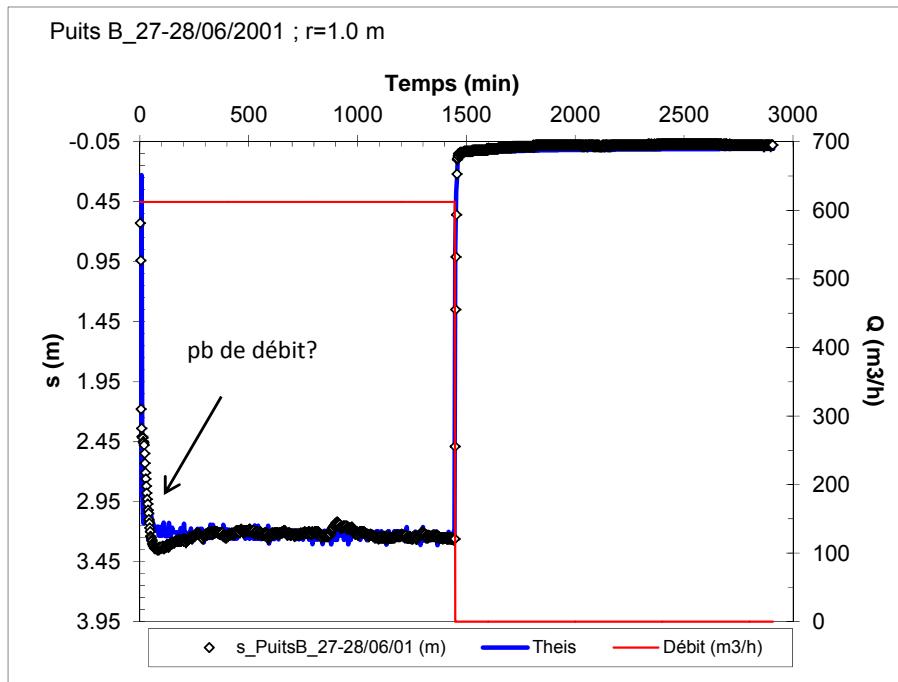


Figure 20 : Modélisation de l'essai de longue durée réalisé en juin 2001 au puits B. Modèle : Theis.

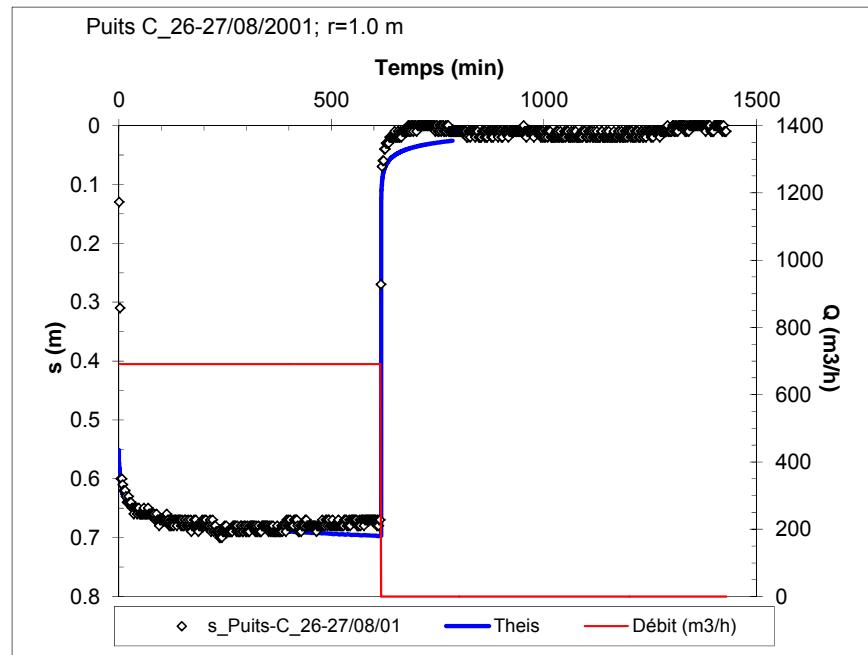


Figure 21 : Modélisation de l'essai de longue durée réalisé en août 2001 au puits C. Modèle : Theis.

*N.B. : pompage au puits B : pas de réaction visible au puits C ; pompage au puits C : pas de réaction visible au puits B.*  
*moyenne. \*\*moyenne géométrique. Pdc : pertes de charge quadratiques, capa : effet de capacité des puits, e.t. : écart type.*  
*\* les emmagasinements au puits de pompage sont des valeurs de calage et les valeurs en italique ne sont pas prises compte dans la moyenne.*

Tableau 6 : Synthèse des paramètres hydrodynamiques. Essais réalisés en 2001 sur les puits A, B et C.

Ouvrage	type de test	date test	type ouvrage	r (m)	T (m <sup>2</sup> /s)	S*(-)	pdc (m-5s <sup>2</sup> )	capa (mm)	Remarque
Puits A	paleir	15-16/05/01	puits	1	8.84E-01	1.39E+03	8.30E+00	1000	-
obs.Puits-B	paleir	15-16/05/01	pierre	134	8.84E-01	8.79E-02	-	-	-
obs.Puits-C	paleir	15-16/05/01	pierre	304	9.09E-01	6.86E-02	-	-	-
Puits B	LD	27-28/06/01	puits	1	9.11E-01	1.20E-05	1.00E+02	4000	-
obs.Puits-A	LD	27-28/06/01	pierre	142	9.32E-01	2.87E-01	-	-	effet influence des marées!!
obs.PIB4-C	LD	27-28/06/01	pierre	100	1.07E+00	2.12E+00	-	-	effet influence des marées!!
Puits C	LD	26-27/08/01	puits	1	9.14E-01	1.85E-02	1.20E+01	1000	-
obs.Puits-A	LD	26-27/08/01	pierre	304	9.13E-01	6.24E-02	-	-	calage valide pour 100-150
<b>Geométrie**</b>									
<b>e.t.</b>									
<b>6.19E-02</b>									
<b>1.33E-02</b>									



#### 4.1.4. Interprétation des pompages d'essai réalisés au puits des Ecumes (12287X0034)

##### Description des ouvrages et des tests hydrauliques

Cet ouvrage est exploité par la SAPHIR (Figure 13). Il est profond de 15.0 m et capte des basaltes vacuolaires et des niveaux scoriacés. L'ouvrage est équipé de buses en béton de 2 mètres de diamètre, et de deux galeries drainantes, la première entre 9 et 10 m et la seconde entre 14 et 15 m de profondeur. Une circulation de type karstique a été identifiée lors des travaux (X. Poul, 1969) : "On observe vers 10 m de profondeur un chenal sub-cylindrique dont le diamètre est de l'ordre de 0.5 m". Le débit est estimé à 30 m<sup>3</sup>/h dans ce conduit. Cependant, leurs localisations et dimensions exactes sont inconnues. Les coupes géologique et technique figurent en annexe 3.

Les essais hydrauliques réinterprétés sont ceux réalisés par la SAPHIR en 2001 (Leveneur ; 2001), et ceux réalisés le BRGM en 1971 (données BSS).

- Essai réalisé en 1971 : essai de pompage de longue durée avec 4 piézomètres d'observation (forages S1, S2, S3 et S4). La localisation des piézomètres est très imprécise (cf. plan en annexe). La conductivité électrique des eaux d'exhaure a aussi été suivie au puits de pompage.
- Essai réalisé en 2001 : essai de pompage de longue durée avec un piézomètre d'observation (forage S3). Pas de suivi de la conductivité.

Les coupes techniques et géologiques des piézomètres ne sont pas disponibles.

Le diagnostic a été réalisé sur l'essai de 2001 car il présente une densité de données beaucoup plus importante que celui de 1971. Ce dernier n'a notamment pas de mesure entre 600 et 1 200 minutes de pompage. Le diagnostic de la courbe de dérivée montre la succession des écoulements suivants (Figure 22) :

1. de 0 à 10 minutes : effet de capacité de puits,
2. de 10 à 20-25 minutes : stabilisation de la dérivée indiquant un écoulement radial ( $T : 1.8 \text{ à } 2.0 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$ )
3. de 25 à 200 minutes : la dérivée suit une pente de l'ordre de 0.5 suggérant l'atteinte de 2 limites parallèles étanches ou partiellement étanches,
4. de 200 à la fin de l'essai : deuxième stabilisation de la dérivée indiquant un second écoulement radial ( $T : 2 \text{ à } 3 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ ).

Cette succession d'écoulements suggère que le puits est implanté dans un aquifère très transmissif (écoulement n°2), mais encadré par un aquifère (ou deux) de moindre transmissivité (écoulement n°4). Il a donc été choisi d'interpréter l'ensemble des tests avec un modèle d'aquifère compartimenté (Dewandel et al, 2012). Ce modèle considère que les diffusivités de l'aquifère où est situé l'ouvrage et celles des compartiments extérieurs sont les mêmes ( $T/S = T_2/S_2$ ). Par contre, du fait de l'imprécision sur la position des piézomètres, ceux-ci sont considérés comme étant dans le même compartiment que le puits de pompage et situés au milieu de ce compartiment. Si les coordonnées des piézomètres avaient été connues de façon plus précise, les modélisations auraient permis de positionner les différents compartiments. Les Figure 23 et Figure 24 présentent les modélisations des essais de 1971 et 2001 aux puits des Ecumes ; les réponses aux piézomètres figurent en annexe 3. Le Tableau 7 synthétise les paramètres hydrodynamiques déduits de l'ensemble des modélisations.

Les modélisations simulent en général les rabattements mesurés de manière correcte. Les valeurs des paramètres hydrodynamiques pour la modélisation sont parfois très variables, en particuliers ceux concernant l'emmagasinement  $S$ , conséquence éventuelle d'un mauvais positionnement de l'ouvrage, voire situé en dehors du compartiment central. Quel que soit l'essai, la transmissivité de l'aquifère capté est de l'ordre de  $0.2 \text{ m}^2/\text{s}$ . L'estimation de son emmagasinement est plus difficile (cf. problème de localisation). On retiendra la valeur de l'ordre de  $6.0 \times 10^{-4}$ , déduite de l'essai de 2001, indiquant que l'aquifère est captif ou semi-captif. Les limites latérales du compartiment central apparaissent vers 4 minutes de pompage ; elles seraient distantes de 500 m environ du puits de pompage (cf. essai 2001 sur S3) ; l'aquifère du compartiment central serait alors large d'1 km, distance à vérifier par d'autres essais. Un suivi du puits et du piézomètre associé en avril 2012 confirme le fonctionnement hydraulique complexe de cet ouvrage (Petit, 2012).

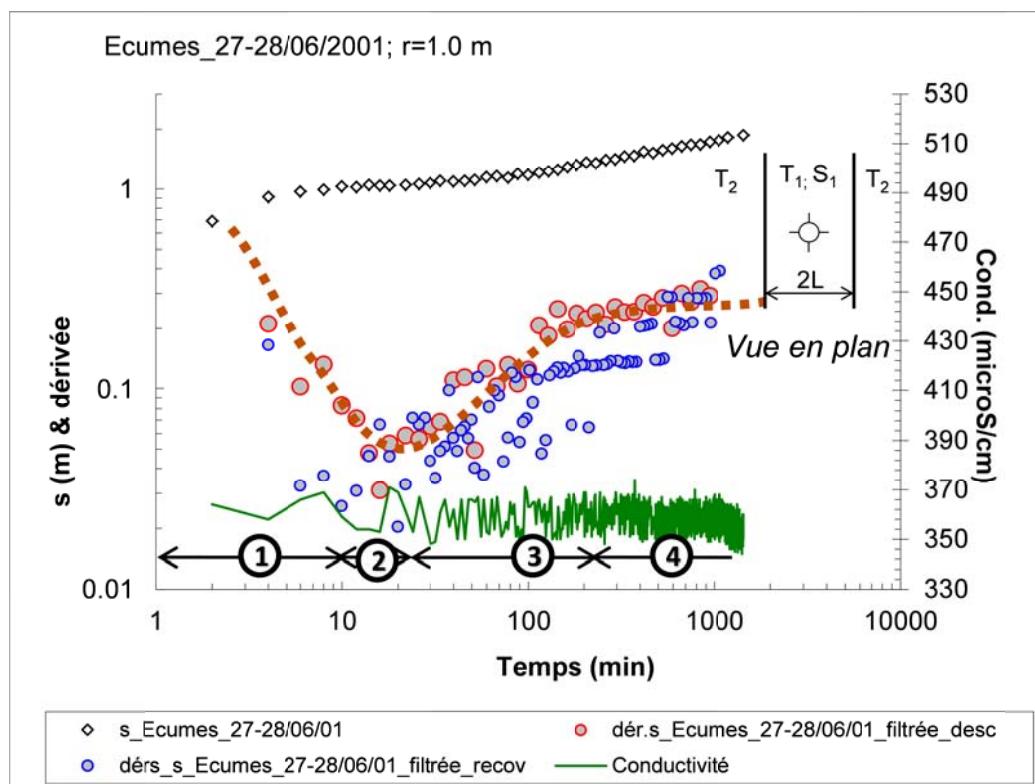


Figure 22 : Diagnostic de l'essai réalisé en juin 2001 sur le puits des Ecumes. Réalisé à partir des rabattements de la descente et de la remontée des niveaux ; comparaison aux mesures de conductivité électrique des eaux d'exhaure.

Courbe en pointillée : tendance de la dérivée.

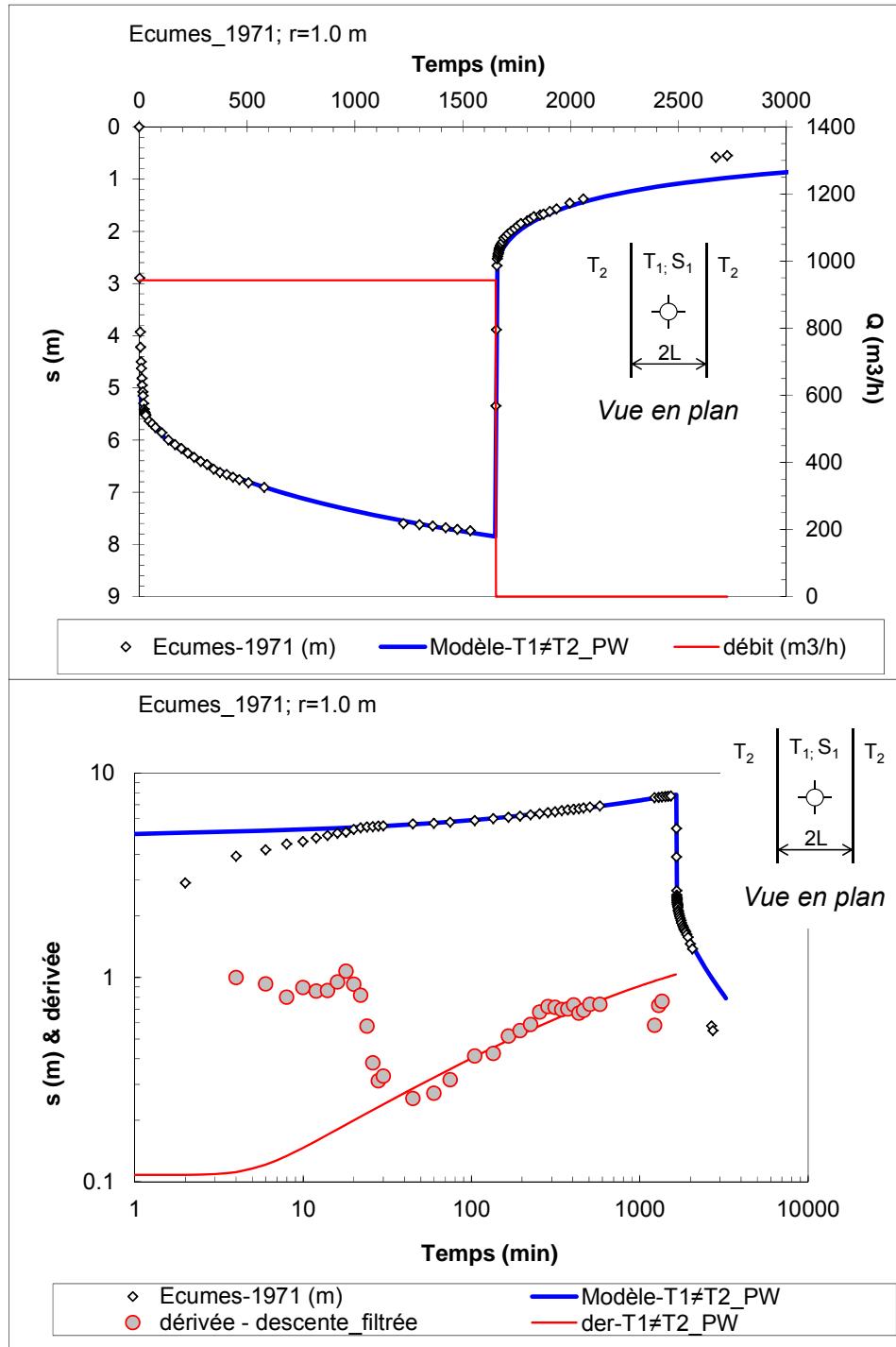


Figure 23 : Modélisation de l'essai de longue durée réalisé en 1971 au puits des Ecumes. Modèle : Aquifère compartimenté.

Graphe du haut : représentation en arithmétique du rabattement ; graphe du bas : représentation log-log du rabattement et de sa dérivée.

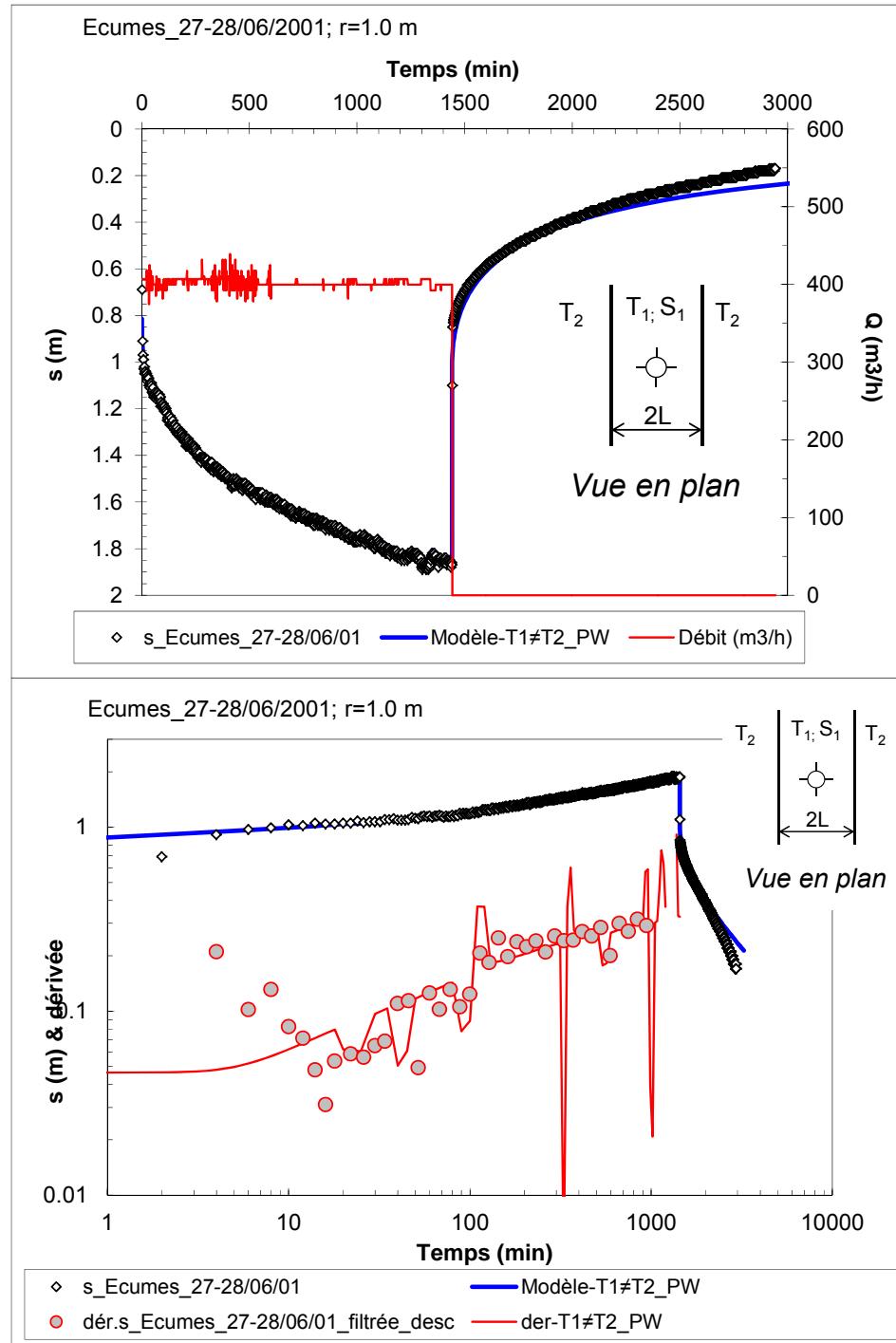


Figure 24 : Modélisation de l'essai de longue durée réalisé en 2001 au puits des Ecumes. Modèle : Aquifère compartimenté.

Graphe du haut : représentation en arithmétique du rabattement ; graphe du bas : représentation log-log du rabattement et de sa dérivée.

\* les emmagasinements au puits de pompage sont des valeurs de charge quadratiques, \*\*moyenne géométrique, les valeurs en italique ne sont pas prises compte dans les moyennes. Pdc : pertes de charge quadratiques, capa : effet de capacité des puits, Dist. L1 et L2 : distance aux ouvrages.

\*\* minutes en minutes de pompage et en mètres : e.t. : écart type.

Tableau 7 : Synthèse des paramètres hydrodynamiques. Essais réalisés en 1971 et 2001 au puits des Ecumes.

Ouvrage	Type de test	r (m)	T (m <sup>2</sup> /s)	S*(-)	T2 (m <sup>2</sup> /s)	Dist.L1 (min)	Dist.L1 (m)	Dist.L2 (min)	Dist.L2 (m)
Ecumes (puits)	LD	1971	1.0	1.93E-01	5.00E-03	1.30E-02	4.0	192.5	192.5
S1-obs.	LD	1971	36.0	1.98E-01	8.00E-02	1.90E-02	4.0	48.7	48.7
S2-obs.	LD	1971	10.5	1.93E-01	7.00E-05	1.99E-02	4.0	1626.9	1626.9
S3-obs.	LD	1971	5.5	1.98E-01	5.00E-09	1.90E-02	4.0	194976.9	194976.9
S4-obs.	LD	1971	12.0	1.93E-01	2.00E-03	1.99E-02	4.0	304.4	304.4
Ecumes (puits)	LD	27-28/06/01	1.0	1.93E-01	2.00E-01	2.00E-02	4.0	30.4	30.4
S3-obs.	LD	27-28/06/01	5.5	1.93E-01	6.00E-04	1.99E-02	4.0	555.7	555.7
Ecoumes (puits)	LD	27-28/06/01	1.0	1.94E-01	1.27E-04	1.85E-02	4.0	1212.0	1212.0
Ecumes (puits)	LD	27-28/06/01	5.5	1.94E-01	2.44E-03	3.55E-02	2.54E-03	0.0	86914.9
Geométrie et écart type.									



#### 4.1.5. Interprétation des pompages d'essai réalisés au forage Maniron (12287X0118)

##### Description de l'ouvrage et des tests hydrauliques

Cet ouvrage a été réalisé sous le contrôle d'Antéa de novembre 2002 à janvier 2003 (Figure 13). Il est profond de 80.0 m et capte des basaltes massifs plus ou moins altérés, un niveau de boue (paléosol ?), et un niveau scoriacé en fond de trou (à partir de 75.0 m). L'ouvrage est équipé d'un tubage plein (diam. 470 mm) jusqu'à 46.5 m de profondeur et entre 60.0 à 68.0 m de profondeur (niveau de boue). Le reste de l'ouvrage est équipé de crépines (diam. 470 mm et 340 mm). Les coupes géologique et technique figurent en annexe 3.

Les essais hydrauliques ont consisté en (Antéa, 2003) :

- du 28 au 30/01/2003 : un essai par paliers de débit, aux débits de 130.0, 180.0, 210.0 et 230.0  $\text{m}^3/\text{h}$  (2h de pompage suivi de 2h de remontée). Les pertes de charge quadratiques ont été estimées à environ  $1400 \text{ m}^{-5} \text{ s}^2$ .
- et du 03 au 04/02/2003, un pompage de longue durée (2280 min) au débit moyen de 201.0  $\text{m}^3/\text{h}$ .

Les niveaux ont été suivis dans l'ouvrage de pompage et dans un piézomètre (SC3, 12287X0060) situé à une centaine de mètres. Celui-ci n'a pas réagi aux pompages.

Le diagnostic a été réalisé sur l'essai de longue durée. Il montre la succession des écoulements suivants (Figure 22) :

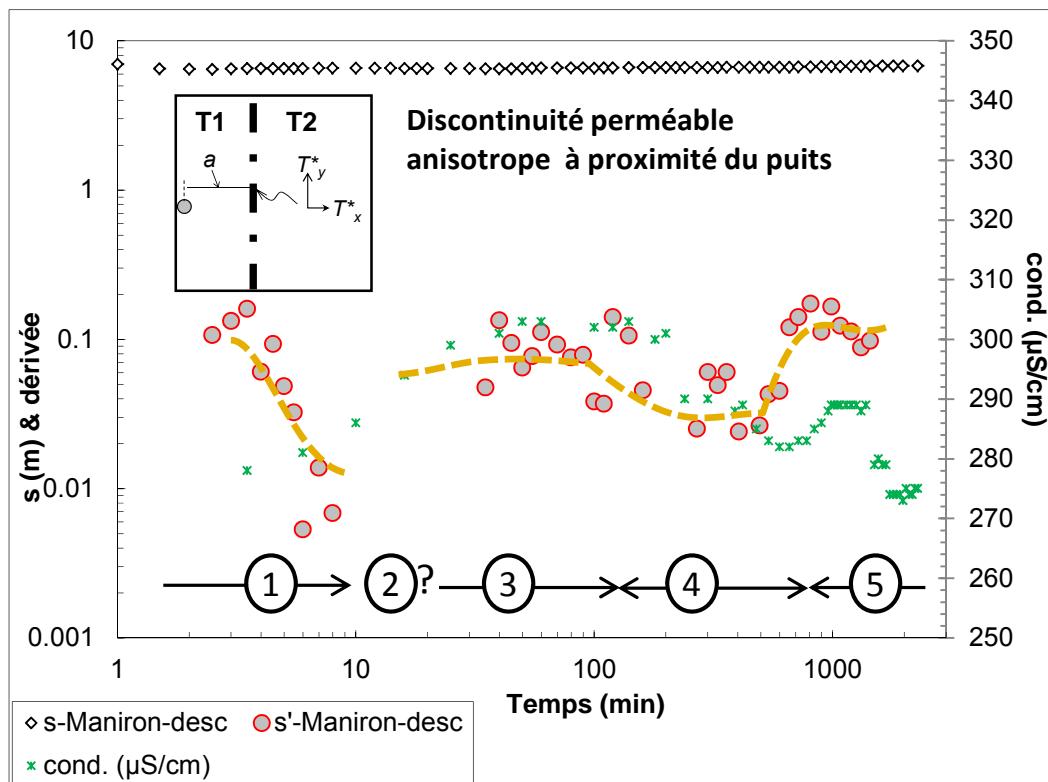
1. de 0 à 10 minutes : effet de capacité de puits,
2. de 10 à 40 minutes : la dérivée est trop bruitée pour être interprétée,
3. de 40 à 100 minutes : stabilisation de la dérivée indiquant un écoulement radial ( $T : 6.0 \text{ à } 7.0 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ )
4. de 100 à 700 minutes : la dérivée forme un « U », c'est-à-dire que dans un premier temps le rabattement tend à stabiliser puis reprend,
5. de 700 à la fin de l'essai : deuxième stabilisation de la dérivée à une valeur environ double de celle du plateau précédent. Ce doublement est caractéristique de l'atteinte d'une limite étanche (doublement de la pente de la droite de Jacob et donc de la dérivée).

Cette succession d'écoulements suggère que le puits est implanté dans un aquifère ayant une transmissivité voisine de  $6 \text{ à } 7 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$  (écoulement n°3) situé à proximité d'une discontinuité perméable (écoulement n°4) séparant cet aquifère d'un compartiment a priori étanche (écoulement n°5). Durant l'essai, la conductivité électrique de l'eau a évolué (Figure 25) : d'abord basse lors des premières minutes de pompage, elle augmente et se stabilise à environ  $300 \mu\text{S}/\text{cm}$  jusqu'à environ 200 min. En fin d'essai, elle diminue pour se stabiliser à  $275 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Ceci suggère que la discontinuité perméable est caractérisée par une eau moins minéralisée que celle de l'aquifère dans lequel le forage est implanté.

La modélisation de l'essai a été réalisée à l'aide d'un modèle compartimenté prenant en compte l'existence d'une discontinuité perméable située à une distance  $a$  du puits de pompage, caractérisée par une épaisseur  $w$  de transmissivité  $T^*$  et une anisotropie  $T^*y/T^*x$  ; voir schéma explicatif en Figure 25. Ce modèle mathématique est issu de travaux en régime permanent

d'Anderson (2006) pour lequel la solution en régime transitoire est calculée. La modélisation donne des résultats très satisfaisant (Figure 26, Figure 27) pour une discontinuité très perméable très anisotrope dans son axe ( $T^*y \gg T^*x$ ). Il est possible qu'il s'agisse d'une faille. La transmissivité dans lequel l'ouvrage est implanté est de l'ordre de  $6.5 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ ; son emmagasinement, ainsi que la distance réelle à la limite, n'a pas pu être estimé faute de réaction au piézomètre d'observation.

Le Tableau 8 synthétise les paramètres hydrodynamiques déduits de l'ensemble des modélisations.



*Figure 25 : Diagnostic de l'essai réalisé en 2003 sur le forage de Maniron. Réalisé à partir des rabattements de la descente et de la remontée des niveaux ; comparaison aux mesures de conductivité électrique des eaux d'exhaure.*

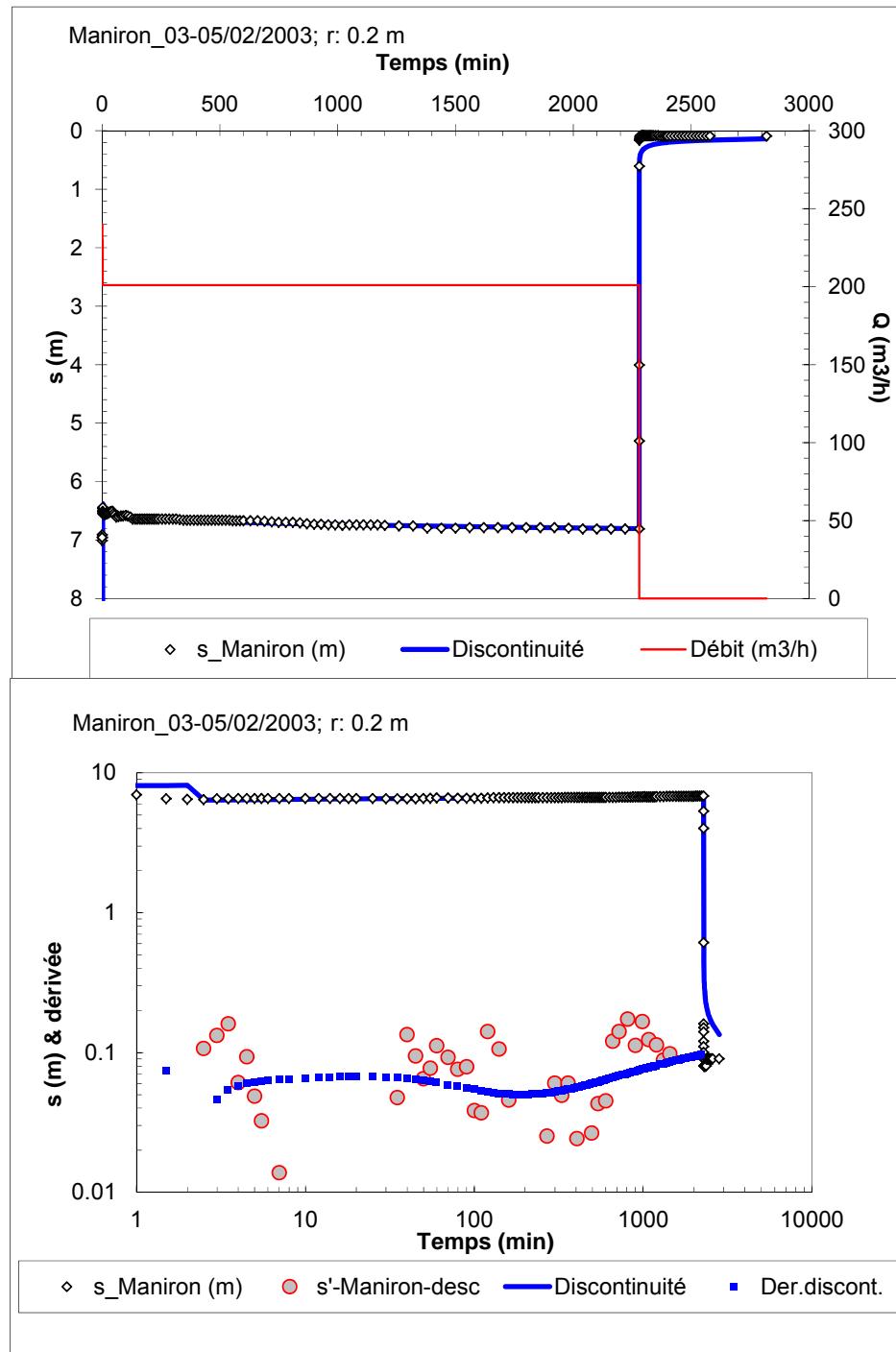


Figure 26 : Modélisation de l'essai de longue durée réalisé en 2003 au Forage Maniron. Modèle : Aquifère compartimenté avec discontinuité.

Graphe du haut : représentation en arithmétique du rabattement ; graphe du bas : représentation log-log du rabattement et de sa dérivée.

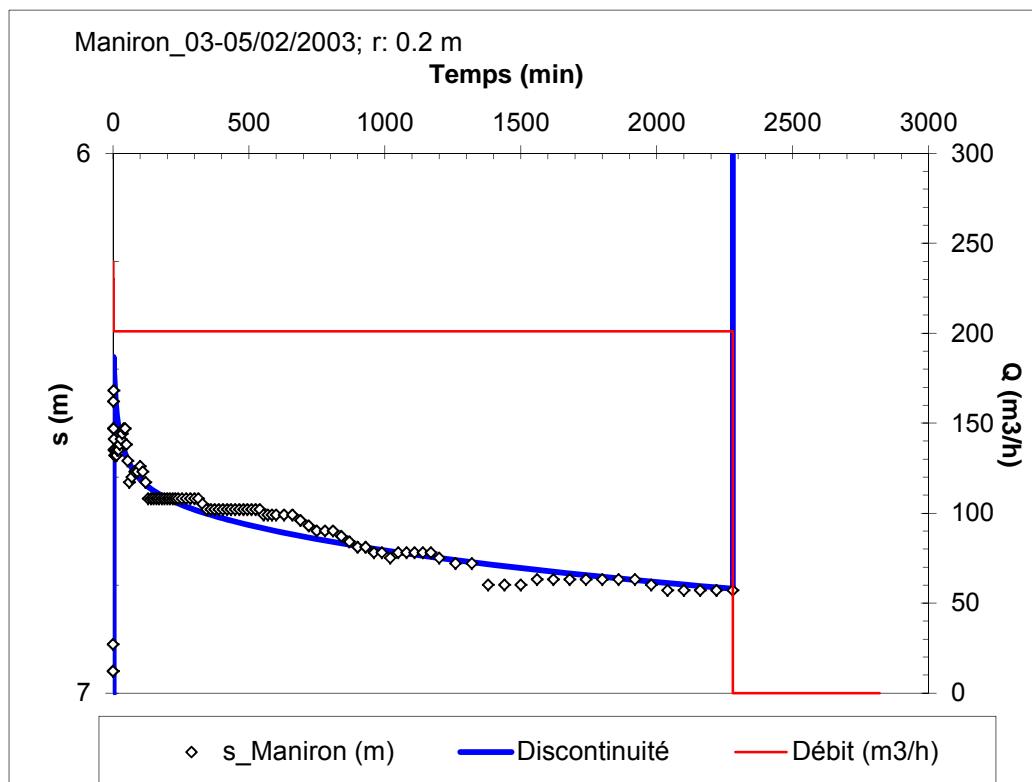


Figure 27 : Modélisation de l'essai de longue durée réalisé en 2003 au Forage Maniron. Modèle : Aquifère compartimenté avec discontinuité. Zoom sur la figure précédente.

Représentation en arithmétique du rabattement.

Paramètres de la discontinuité :  $T^*$  : transmission,  $T^*x/T^*y$  = contraste de transmission,  $w$  : épaisseur,  $T_2$  : transmission du compartiment annexe, dans ce cas imperméable. \*\* Lemmagasinement au puits de pompage est une valeur de calage ainsi que la distance à la limite en mètre.  $Pdc$  : pertes de charge quadratiques.

Tableau 8 : Synthèse des paramètres hydrodynamiques. Essai réalisé en 2003 au forage de Maniron.

Ouvrage	date	$r$ (m)	Modèle	$T$ ( $m^2/s$ )	$S^{**}$ (-)	$w$ (m)	$T^*$ (m $^2/s$ )	$T^*x/T^*y$	$T_2$ (m $^2/s$ )	$Pdc$ (m $^{-5}s^2$ )	Maniron (puits)	
	03-04/02/2003	2.00E-01	Aquifère compartimenté & discontinuité	6.50E-02	1.00E-04	30	2163.33	4.00	1.95E+00	4.0E+03	6.50E-07	1700



#### 4.1.6. Interprétation des pompages d'essai réalisés au forage PIB4 (12287X0056)

##### **Description de l'ouvrage et des tests hydrauliques**

Cet ouvrage a été réalisé sous le contrôle du BRGM d'octobre 1984 à mars 1985 (Figure 13 ; Daessle, 1983). La profondeur finale de l'ouvrage est de 100 m. D'un point de vue géologique, l'ouvrage a recoupé un ensemble de coulées et niveaux scoriacés. Seuls les 3 premiers mètres correspondent à des éboulis – colluvions. Il est équipé de trois piézomètres en dispositif « flûte de pan » (cf. coupe géologique et technique en annexe) :

- PIB4A capte la nappe entre 20.0 et 40.0 m de profondeur,
- PIB4B, entre 60.2 et 70.2 m,
- PIB4C, entre 80.0 et 98.0 m.

Les essais hydrauliques ont été réalisés sur différentes portions du forage pendant sa réalisation et non sur les piézomètres « flûte de pan ». Les zones testées sont :

- 19 - 20 m (57 m<sup>3</sup>/h ; 720 min ; le 10/01/1985),
- 19 - 50 m (175 m<sup>3</sup>/h ; 1500 min ; le 28/01/1985),
- 55.6 - 100 m (57 m<sup>3</sup>/h ; 1500min ; le 27/02/1985), après cimentation de la partie supérieure (de 0 à 55.6 m). Durant cet essai, un suivi piézométrique a aussi été réalisé sur l'aquifère de surface (PIB4A).

Aucun essai par paliers de débit n'a été réalisé durant ces tests.

Le diagnostic des essais n'a pas pu être réalisé du fait d'un nombre insuffisant de mesures du rabattement et du faible débit de pompage durant les essais qui a entraîné une stabilisation très rapide des niveaux. Le modèle choisi pour interpréter les essais, et notamment afin de prendre en compte le caractère incomplet des ouvrages (pénétration partielle de l'aquifère), est celui de Hantush (Figure 28).

Les modélisations des essais sont de bonne qualité (Figure 29 ; Figure 30 ; Figure 31). Les paramètres puits ( $l$  : distance toit de l'aquifère - base du forage, et  $d$  : distance toit de l'aquifère – haut des crêpines) et épaisseur de l'aquifère, sont des paramètres réels déduits des hauteurs du niveau piézométrique avant pompage et des profondeurs de l'ouvrage au cours des différents tests. L'aquifère situé entre 19 et 50 m est caractérisé par une valeur de transmissivité de l'ordre de  $2 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$  ; son emmagasinement n'a pas pu être estimé faute de réaction au piézomètre d'observation. Il est aussi, a priori, soumis à un effet de drainance de formations sus-jacentes ( $K'$  :  $2 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ) éventuellement dû aux cendres volcaniques situées entre 14.0 et 15.0 m de profondeur. L'aquifère situé entre 55 et 100 m de profondeur est plus transmissif (transmissivité totale  $4 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$ ) ; son emmagasinement est évalué à quelques pourcents sur la base du piézomètre d'observation. Cet aquifère profond est donc hydrauliquement connecté à la surface.

Le Tableau 9 synthétise les paramètres hydrodynamiques déduits de l'ensemble des modélisations.

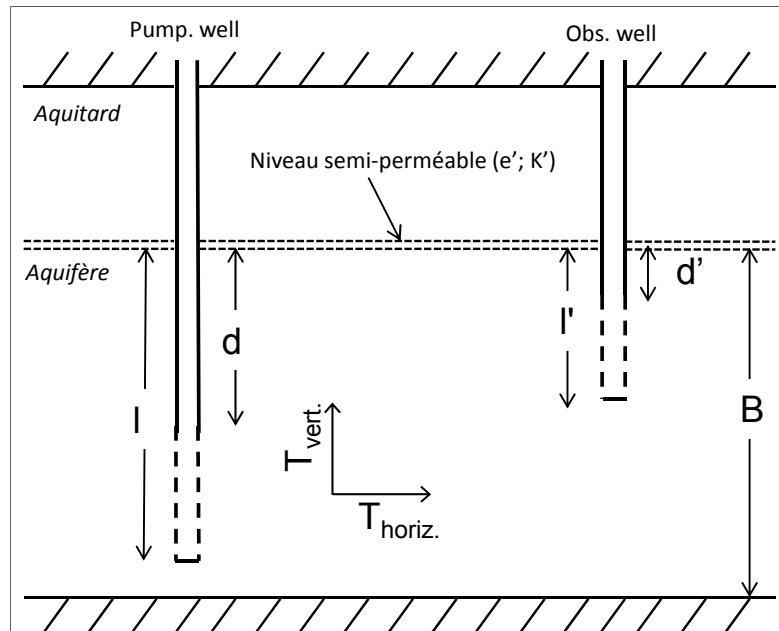


Figure 28 : Schéma de la solution de Hantush. Puits captant partiellement un aquifère anisotrope suivant la verticale avec effet de drainance. Paramètres du semi-perméable :  $e'$ , épaisseur, et  $K'$ , perméabilité.

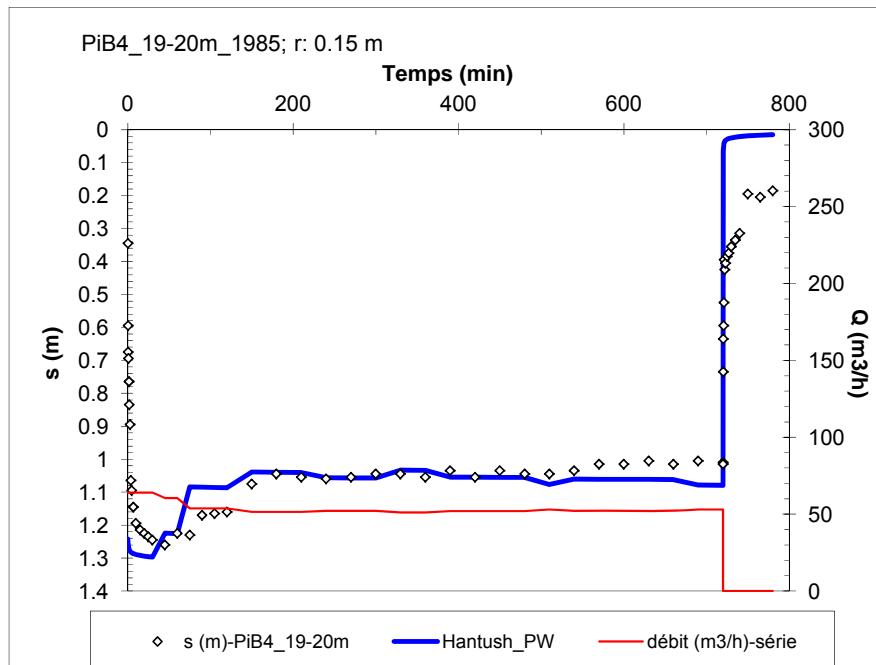


Figure 29 : Modélisation de l'essai réalisé en 1985 sur la tranche 19-20 m du forage PiB4. Modèle : Hantush.

Représentation arithmétique du rabattement.

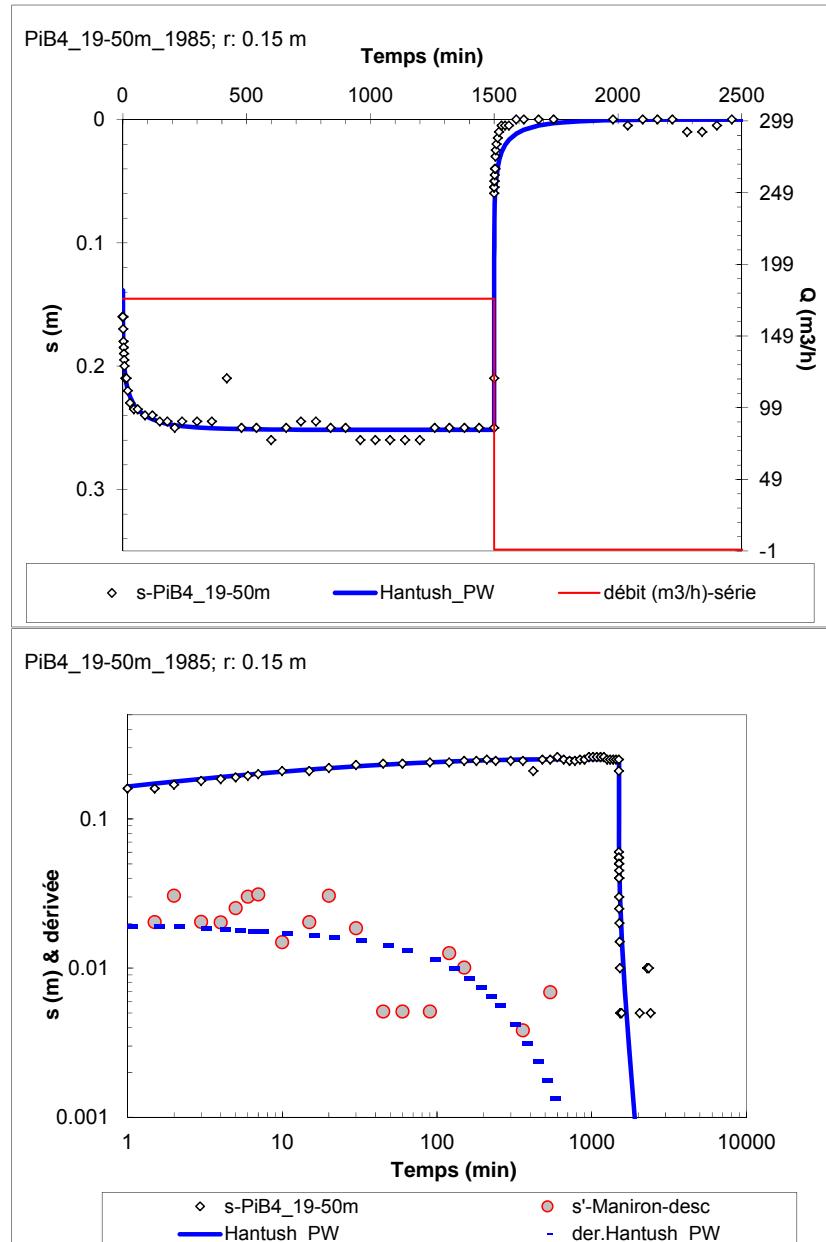


Figure 30 : Modélisation de l'essai réalisé en 1985 sur la tranche 19-50 m du forage PiB4. Modèle : Hantush.

Graphe du haut : représentation en arithmétique du rabattement ; graphe du bas : représentation log-log du rabattement et de sa dérivée.

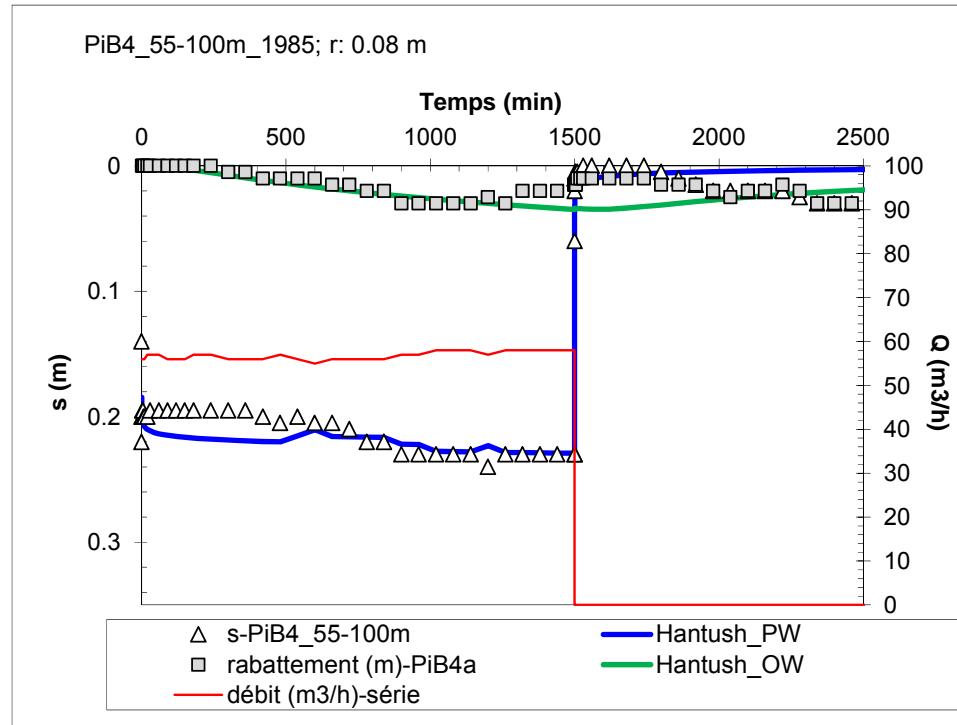


Figure 31 : Modélisation de l'essai réalisé en 1985 sur la tranche 55-100 m du forage PiB4. Modèle : Hantush. Réponse de la zone pompée (PiB4\_55-100m) et au piézomètre PiB4a.

Représentation arithmétique des rabattements.

\* L'émagasinement au puits de pompage est une valeur de calage.  $Pdc$  : perte de charge quadratiques, paramètres de calage dans les trois cas. Pour les autres paramètres, voir la figure de Hantush.

Tableau 9 : Synthèse des paramètres hydrodynamiques. Essai réalisé en 1985 sur le forage de reconnaissance PiB4.

PiB4 (épaisseur captee)	Date	$r$ (m)	modèle	$T$ ( $m^2/s$ )	$S^*$ (-)	$Pdc^*$ ( $m^{-5}s^2$ )	$B$ (m)	$I$ (m)	$d$ (m)	Thoriz./Tvert.	(m)	Ep.épontee	K-épontee (m/s)
55-100 m-pièzo	27/02/1985	0.08	Hantush	4.00E-01	3.00E-02	3.40E+02	85.0	55.0	-	5.0	-	-	-
55-100 m-puits	27/02/1985	0.15	Hantush	2.20E-01	2.50E-01	0.00E+00	34.0	34.0	3.0	5.0	1.0	2.0E-05	-
19-50 m-puits	28/01/1985	0.15	Hantush	2.00E-01	3.00E-02	3.00E+02	34.0	4.0	3.0	5.0	-	-	-
19-20 m-puits	10/01/1985	0.15	Hantush	2.00E-01	3.00E-02	3.00E+02	34.0	4.0	3.0	5.0	-	-	-
PiB4a	27/02/1985	0.2	Hantush	6.00E-02	3.00E-02	-	85.0	24.0	4.0	50.0	-	-	-

#### 4.1.7. Interprétation des pompages d'essai réalisés au forage PIB5 (12287X0057)

##### **Description de l'ouvrage et des tests hydrauliques**

- Cet ouvrage a été réalisé sous le contrôle du BRGM d'octobre 1984 à mars 1985 (Figure 13 ; Daessle, 1983). La profondeur finale de l'ouvrage est de 90 m. D'un point de vue géologique, l'ouvrage a recoupé 32.0 m d'alluvions sablo-graveleuses à tendance plus argileuse à partir d'une vingtaine de mètres (cf. diagraphe gamma-ray de la coupe géologique et technique en annexe), puis un ensemble de coulée et niveaux scoriacés. Il est équipé de trois piézomètres en dispositif « flûte de pan » :
  - PIB5A capte la nappe des alluvions entre 11.9 et 16.9 m de profondeur,
  - PIB5B des basaltes entre 32.2 et 36.3 m,
  - PIB5C des basaltes entre 41.2 et 44.2 m,
  - PIB5D, des basaltes entre 53.8 et 73.2 m de profondeur.

Les essais hydrauliques ont été réalisés sur deux portions du forage pendant sa réalisation (et non sur les piézomètres « flûte de pan »). Les zones testées sont :

- 32-46 m ( $411 \text{ m}^3/\text{h}$  ; test de 255 min ; le 21/01/1984),
- 32-42 m ( $195 \text{ à } 211 \text{ m}^3/\text{h}$  ; 1170 min ; du 27 au 28/01/1985), après cimentation de la partie supérieure à 42.0 m ; durant cet essai, un suivi piézométrique a aussi été réalisé sur l'aquifère de surface (PiB5a).

La zone profonde du forage (>46 m) n'a pas été testée et aucun essai par paliers de débit n'a été réalisé.

Le diagnostic des essais n'a pas pu être réalisé du fait d'un nombre insuffisant de mesures de rabattement et du faible débit de pompage lors des essais qui a entraîné une stabilisation très rapide des niveaux. Le modèle choisi pour interpréter les essais, et notamment afin de prendre en compte l'aquifère a priori libre de surface, est un modèle bi-couche (Hunt et Scott, 2007 ; Figure 32).

Les modélisations des essais sont de bonne qualité (Figure 33 ; Figure 34), exceptée la remontée au puits du deuxième essai (tranche 32-42 m) où le niveau d'eau se stabilise très rapidement à une valeur inférieure à celle du niveau initial (différence de 7-8 cm ; problème de mesure du niveau ?). Etant donné que durant l'essai précédent, le niveau est remonté très rapidement, tout porte à croire que les mesures de la remontée auraient été faites à partir d'un autre repère ; la Figure 34 présente ces niveaux corrigés (delta de 7.0 cm).

Que ce soit au puits (c.à.d. la zone captée) ou au piézomètre d'observation (PIB5A) et pour chacun des deux essais, les paramètres utilisés pour caler les modèles sont les mêmes (Tableau 10). Ainsi, on ne remarque pas de différence notable pour la valeur de la transmissivité de l'aquifère entre les tranches 32-46 et 32-42 m de profondeur.

L'aquifère des basaltes est caractérisé par une transmissivité de l'ordre de  $9 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$ . Son emmagasinement, estimé à partir des réponses au piézomètre PIB5A est de l'ordre de  $10^{-2}$  (-). L'aquifère sus-jacent, celui correspondant aux alluvions de surface (20 premiers mètres), est caractérisé par une transmissivité de l'ordre de  $10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$  et un emmagasinement - estimé à partir des réponses au PIB5A de l'ordre de  $1.5 \times 10^{-1}$  (-) caractéristique d'un aquifère libre. L'aquifère des basaltes et celui des alluvions de surface sont vraisemblablement séparés par un niveau moins perméable d'une dizaine de mètres (de 20 à 32 m de profondeur) correspondant à des alluvions a priori plus argileuses. Ces derniers ont une perméabilité estimée à  $10^{-4} \text{ m/s}$  et sont donc environ 10 fois moins perméables que ceux dans lequel PIB4A est implanté.

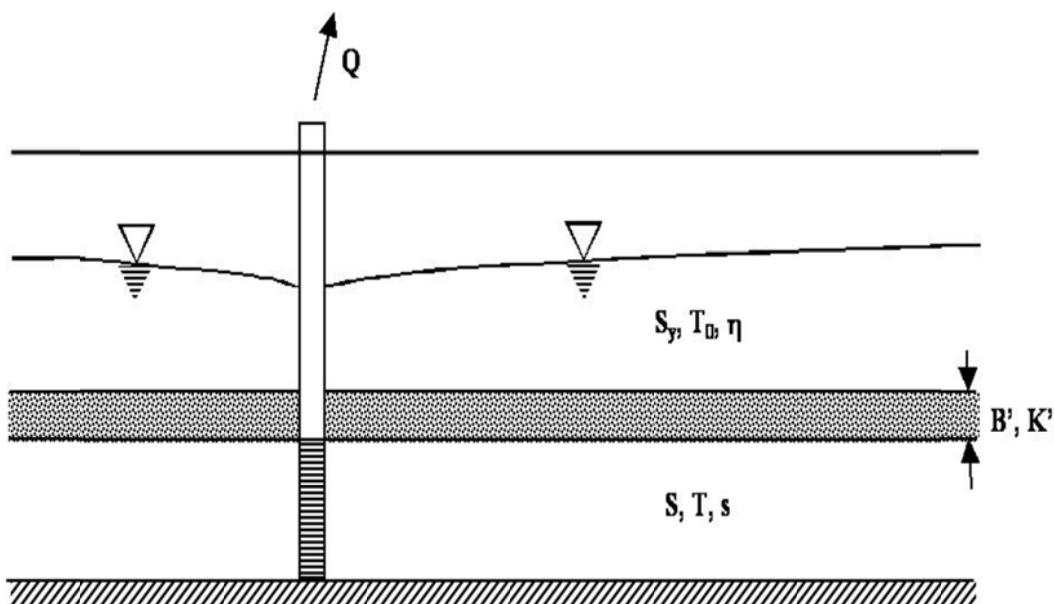


Figure 32 : Modèle aquifère bicouche (Hunt et Scott, 2007).

$T$  et  $S$  : transmissivité et emmagasinement de l'aquifère pompé ( $s$  : rabattement de l'aquifère pompé),  $T_0$  et  $S_y$  : transmissivité et emmagasinement de l'aquifère libre de surface ( $\eta$  : rabattement de l'aquifère de surface).

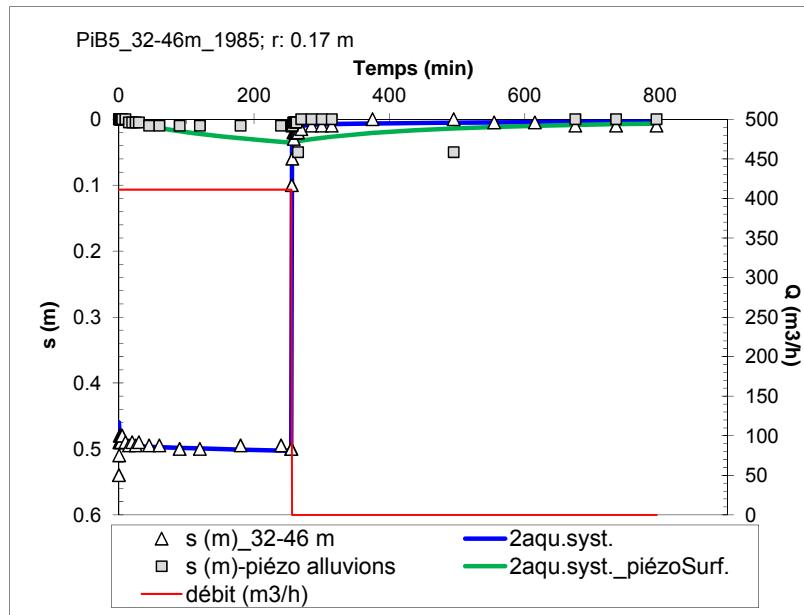


Figure 33 : Modélisation de l'essai réalisé en 1984 sur la tranche 32-46 m du forage PiB5.  
Modèle : aquifère bi-couche. Observations et modélisations au puits et sur le piézomètre de surface (PiB5a).

Représentation arithmétique du rabattement.

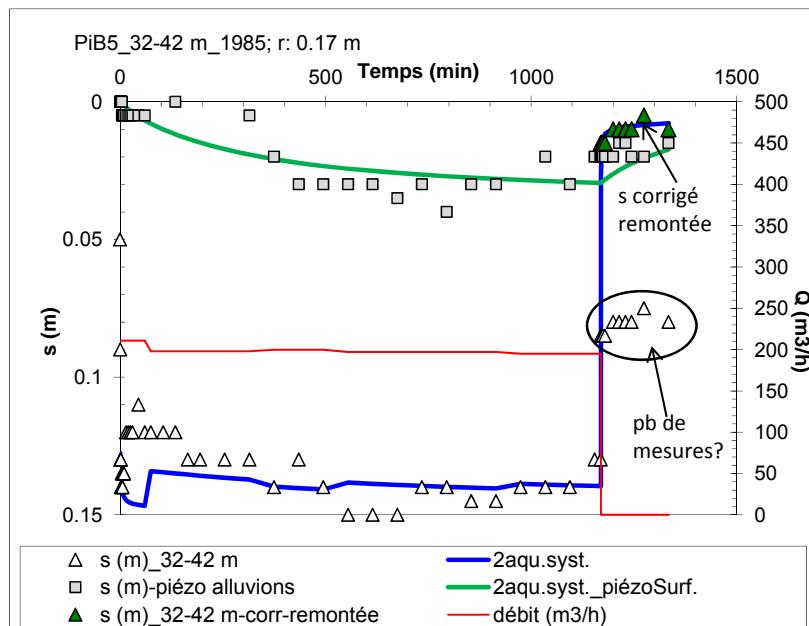


Figure 34 : Modélisation de l'essai réalisé en 1984 sur la tranche 32-42 m du forage PiB5.  
Modèle : aquifère bi-couche. Observations et modélisations au puits et sur le piézomètre de surface (PiB5a).

Représentation arithmétique des rabattements.

\* L'émagasinement au puits de pompage est une valeur de calage.  $Pdc$  : perte de charge quadratiques, paramètres de calage dans les deux cas. Pour les autres paramètres, voir la figure « aquifère bicouche ».

Tableau 10 : Synthèse des paramètres hydrodynamiques. Essai réalisé en 1984 sur le forage de reconnaissance PI25.

PIB5 (épaisseur captee)	Date	$r$ (m)	modèle	$T$ ( $m^2/s$ )	$S^*(-)$	$Pdc^{**}$ ( $m^{-5}s^2$ )	Exp.éponente (m)	k-expонente (m/s)	$T_0$ ( $m^2/s$ )	$Sy$ (-)
PIB5a	22-28/01/1984	0.2	Zadu.syst.	9.20E-01	1.00E-02	-		10.0	1.00E-04	1.00E-02
32-42 m-pièzo	22-28/01/1984	0.08	Zadu.syst.	9.20E-01	1.00E-02	2.00E+01	10.0	1.00E-04	1.00E-02	1.5E-01
32-42 m-puits	22-28/01/1984	0.15	Zadu.syst.	9.20E-01	1.00E-02	-		10.0	1.00E-04	1.00E-02
PIB5a	21/01/1984	0.15	Zadu.syst.	9.20E-01	1.00E-02	-		10.0	1.00E-04	1.00E-02
32-46 m-pièzo-	21/01/1984	0.15	Zadu.syst.	9.20E-01	1.00E-02	2.65E+01	10.0	1.00E-04	1.00E-02	1.5E-01
32-46 m-puits	21/01/1984	0.15	Zadu.syst.	9.20E-01	1.00E-02	2.65E+01	10.0	1.00E-04	1.00E-02	1.5E-01
PIB5a	22-28/01/1984	0.2	Zadu.syst.	9.20E-01	1.00E-02	-		10.0	1.00E-04	1.00E-02
32-42 m-pièzo-	22-28/01/1984	0.08	Zadu.syst.	9.20E-01	1.00E-02	2.00E+01	10.0	1.00E-04	1.00E-02	1.5E-01
32-42 m-puits	22-28/01/1984	0.15	Zadu.syst.	9.20E-01	1.00E-02	-		10.0	1.00E-04	1.00E-02
PIB5a	22-28/01/1984	0.2	Zadu.syst.	9.20E-01	1.00E-02	-		10.0	1.00E-04	1.00E-02



#### 4.1.8. Conclusion

La méthodologie employée -utilisation des dérivées pour diagnostiquer les essais, modèles mathématiques adhoc, etc.- plus performante que celle classiquement utilisée pour interpréter les essais (méthode de Jacob ou Theis) a permis d'une part de mieux caractériser les propriétés hydrodynamiques des aquifères captés et d'autre part, de saisir leurs géométries. La réinterprétation des quatorze essais par pompage, dont certains ont fait l'objet d'interférence avec des piézomètres de surface, a conduit à une caractérisation précise des propriétés hydrodynamiques des aquifères testés. Le Tableau 11 résume l'ensemble de ces interprétations. On remarque que le secteur Puits du Gol, Bois de Nèfles, Puits A, B, C et PiB4 et 5 est caractérisé par un aquifère relativement homogène d'une transmissivité assez élevée de l'ordre de 0.3- 0.9 m<sup>2</sup>/s et d'emmagasinement de l'ordre de 0.03 à 0.07. A contrario, le puits des Ecumes et le forage de Maniron sont situés dans des aquifères compartimentés et donc plus complexes.

Cependant, les essais, souvent de courte durée (essai par paliers de débit) et sans mesure sur l'ensemble des puits exploités voisins présentent quelques insuffisances : les connexions hydrauliques entre les différents ouvrages de la Plaine (c'est-à-dire puits du Gol, Bois de Nèfles, puits A, B et C), voire avec les niveaux aquifères profonds (ouvrages PiB), ainsi que les effets de drainance ne sont pas mis en évidence. De plus, le fait que ces ouvrages ne captent que partiellement l'aquifère n'est pas pris en compte. En effet, ils ne captent que les 15 à 20 premiers mètres de l'aquifère.

Afin de pallier ces insuffisances, des tests complémentaires ont été programmés en octobre 2011.

	Nombre de tests	Nombre de suivis sur piézomètre	T (m <sup>2</sup> /s)	S (-)	Type d'aquifère
Gol & BdN	3	10	5.6E-1	0.06	homogène
Puits A, B & C	3	5	9.3E-1	0.07	homogène
Ecumes	2	5	1.9E-1	1.3E-4	compartimenté. (limites à env. 500 m du puits)
Maniron	1	0	6.5E-2	-	compartimenté & discontinuité
PiB4	3	1	3.0E-1	0.03	homogène, captage partiel & drainance
PiB5	2	2	9.0E-1	0.01	bicouche & et drainance
<i>Total</i>	<i>14</i>	<i>23</i>			

Tableau 11 : Tableau récapitulatif des essais réinterprétés sur la Plaine du Gol.

## 4.2. ESSAI COMPLEMENTAIRE RÉALISÉ EN OCTOBRE 2011 SUR LA PLAINE DU GOL

Pour compléter les résultats obtenus par les précédents pompages d'essai, un nouveau test par pompage a été conçu. Il a été exécuté pendant trois jours en octobre 2011. Son but est de caractériser la connexion hydraulique entre les différents ouvrages superficiels exploités de la Plaine du Gol (puits du Gol, Bois de Nèfles, puits A, B, C), et avec des aquifères plus profonds (PiB4 et PiB5). La méthode d'interprétation prend en compte le fait que les ouvrages ne captent vraisemblablement qu'une partie de l'aquifère.

Ce pompage d'essai a été organisé en coopération avec les exploitants SAPHIR, l'Usine du Gol et Cise.

### 4.2.1. Principe du test et données recueillies

Ce test est un essai en interférences multiples à débits désynchronisés : le principe est d'appliquer des variations de débit désynchronisées sur les 5 puits de pompage durant quelques jours afin de qualifier dans les meilleures conditions possibles les interférences d'un ouvrage sur l'autre. Ceci ne peut pas être le cas en régime d'exploitation normal où les changements de débit se font en général simultanément sur plusieurs ouvrages. Dans cette situation, les rabattements dans un ouvrage résultent de plusieurs causes se produisant au même instant (marche ou arrêt de pompage dans deux ou plusieurs forages) qu'il n'est pas possible de distinguer.

De plus, il a été demandé un arrêt des pompes avant le démarrage du test afin de permettre au niveau d'eau de chaque ouvrage d'atteindre son niveau initial (niveau naturel sans influence de pompage). Ceci a été appliqué sur les puits A, B, C et Ecumes, mais pas sur les puits dépendant de l'usine du sucrière (puits du Gol et du Bois de Nèfles). Cependant les valeurs du débit de pompage sont disponibles. L'essai s'est déroulé du 15 au 17/11/2011. Le Tableau 12 récapitule l'ensemble des données de suivi disponibles ainsi que les principales caractéristiques des ouvrages.

La Figure 35 présente les données enregistrées durant l'essai : 5 suivis des pompages, 11 suivis des niveaux piézométriques et 12 suivis de la conductivité électrique des eaux d'exhaure. On remarquera tout particulièrement l'absence de réaction du piézomètre de Maniron à l'ensemble des puits pompés, et l'absence de réaction du puits des Ecumes aux pompages des autres puits exploités (puits A, B, C Gol et Bois de Nèfles) et vice-versa. Cette information confirme à nouveau que le système Ecumes-Maniron est déconnecté du système puits A, B, C, Gol –Bois de Nèfles. Il s'agit vraisemblablement de deux paléo-vallées différentes, limitées entre elles par un niveau peu ou pas perméable. Pour la modélisation hydrodynamique (c'est-à-dire des niveaux piézométriques en fonction des débits de pompages), il ne sera donc pris en compte que les ouvrages pompés : Puits A, B, C, puits du Gol et Bois de Nèfles, et les piézomètres PiB4C (pas de mesure de niveau sur PiB4A), PiB4A, B, C et D.

Un autre essai, conduit en décembre 2011, a aussi été réalisé, mais non modélisé : les changements de débit ayant été synchrones, c'est-à-dire en même temps sur la plupart des ouvrages, les interférences respectives ne peuvent donc pas être distinguées.

	Prof. (m)	Prof. captée (m)		Suivi du débit	Suivi du niveau d'eau	Suivi cond. & T°	Géologie
Puits A	17.5	9.8	17.5	oui	oui	oui	Basaltes
Puits B	20.6	9.6	20.6	estimé*	oui	oui	Basaltes
Puits C	20.2	12.2	20.2	oui	oui	oui	Basaltes
Gol	17.5	15.35	17.5	oui	Non, capteur HS	non	Basaltes
BdN	16.95	15.0	16.95	oui	oui	non	Basaltes
PiB4a	40.0	20.0	40.0	Non pompé	Non, capteur HS	oui	Basaltes
PiB4c	98.0	80.0	98.0	Non pompé	oui	oui	Basaltes
PiB5a	16.9	11.9	16.9	Non pompé	oui	oui	Alluvions
PiB5b	36.3	32.2	36.3	Non pompé	oui	oui	Basaltes
PiB5c	44.2	41.2	44.2	Non pompé	oui	oui	Basaltes
PiB5d	73.2	53.8	73.2	Non pompé	oui	oui	Basaltes
Ecumes	15.0	5.3	15.0	oui	oui	oui	Basaltes
Marengo- Piézo	?	?	?	Non pompé	oui	oui	Basaltes

Tableau 12 : Liste des données suivies par ouvrage durant l'essai du 15 au 17/10/2011.

\* débit estimé à partir des pompes en place.



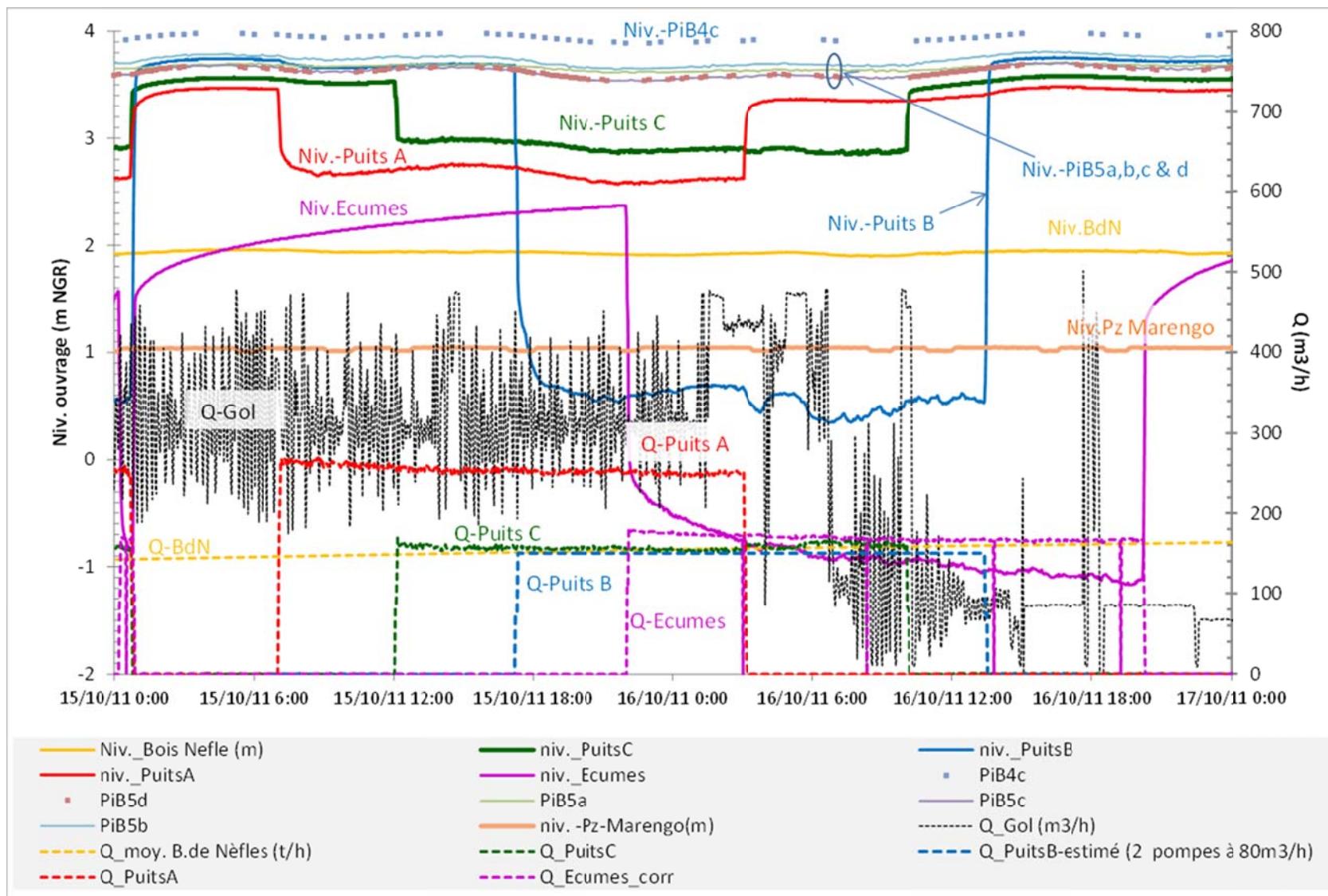


Figure 35 : Suivi des niveaux et des débits lors de l'essai du 15 au 17/10/2011.



#### 4.2.2. Traitement préalable des données

Comme on peut le remarquer sur la Figure 35, les niveaux d'eau dans les ouvrages sont influencés par la marée. Si cette influence est relativement faible pour les ouvrages pompés - Puits A, B, C, et Bois de Nèfles (il n'y a pas eu de mesures de niveau au puits du Gol durant l'essai) au regard de l'effet causé par les pompages, cet effet est très important au niveau des puits d'observation PIB4 et PIB5. Pour ces derniers, l'effet de la marée a été « enlevé » par filtrage des données suite à un traitement du signal (méthode des « ondelettes »; § 6.2.3). Cette opération a ainsi eu pour but d'isoler le « signal pompage » de la chronique de niveau, signal qui sera utilisé pour interpréter l'essai. La Figure 36 présente plusieurs essais de filtre sur la chronique de rabattement du PIB5A ; le rabattement est calculé par rapport au niveau initial avant le début de l'essai (c'est-à-dire. avant le pompage sur le puits A). On note que le fait d'ôter des longueurs d'onde inférieures ou égales à 2.67 heures ne modifie quasiment pas la chronique originelle, la chronique est juste « débarrassée » d'un bruit de fond probablement lié à la sensibilité de l'enregistrement. Par ailleurs, on note aussi qu'elle est toujours fortement impactée par la marée (cycles de 12 h et 24 h). Ainsi, il faut appliquer un filtre enlevant toutes les longueurs d'onde inférieures ou égales à 21.67 heures pour ôter au maximum l'effet de la marée, même si celle-ci n'est pas complètement enlevée (cycle de 24 h non enlevé). Le filtrage n'a pas été exagéré afin de ne pas trop altérer l'information liée au pompage qui se décrit en 3 cycles de pompage de l'ordre de 20 heures, soit une période de 60 heures. La Figure 37 présente les résultats sur l'ensemble des PiB, ce sont donc ces chroniques filtrées qui seront utilisées pour caler le modèle mathématique.

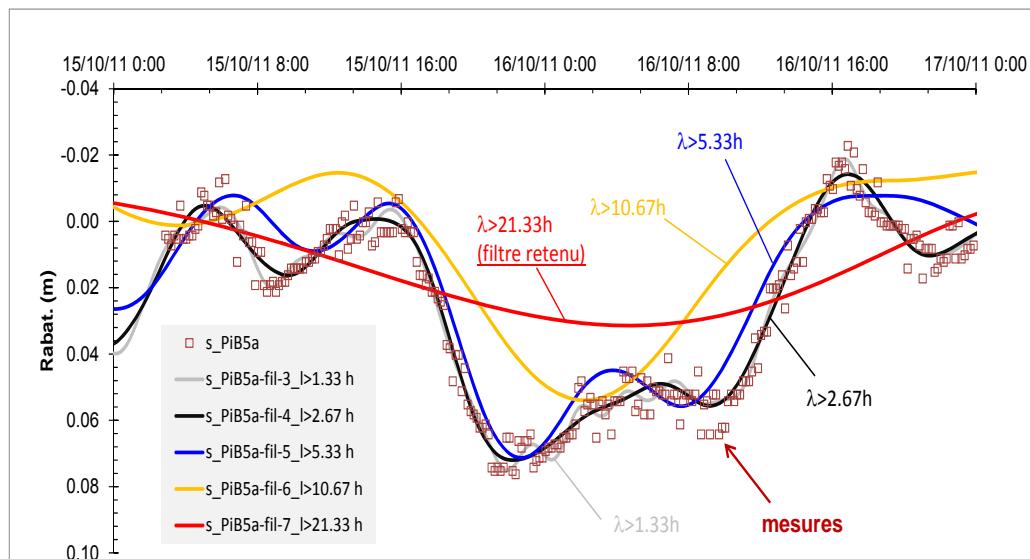


Figure 36 : Essai de différents filtres (technique des « ondelettes ») pour ôter l'effet lié à la marée.  
Exemple sur PiB5a.

$\lambda$  : longueur d'onde du filtre, toutes les longueurs d'onde inférieures ou égales à la donnée indiquée (par ex. 2.67 heures) ont été enlevées.

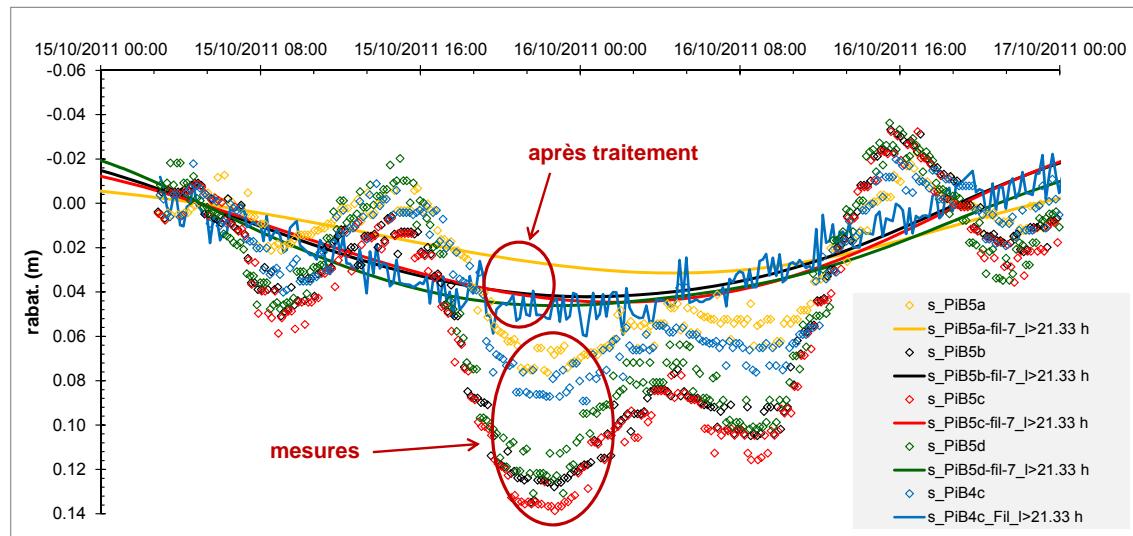


Figure 37 : Résultat après application du signal pour ôter l'effet de la marée ; PiB5a, b, c, & d et PiB4c.

#### 4.2.3. Modélisation de l'essai en interférences multiples

Afin d'interpréter l'ensemble des courbes de rabattement de cet essai multi-puits, un modèle analytique a été spécialement construit. Ce modèle relativement complet (Figure 38) est basé sur les solutions mathématiques de Hantush (1961), Buhkary et al. (1969), Vandenberg (1977) et Dewandel et al (2012). Il permet de calculer le rabattement en tout point de l'espace lié à des pompages dans le contexte suivant :

- un aquifère :
  - o de transmissivité  $T$ , anisotrope suivant la verticale ( $T_{\text{vert.}}$  et  $T_{\text{horiz.}}$ ),
  - o d'emmagasinement  $S$
  - o et d'épaisseur  $B$ .
- l'aquifère peut être :
  - o soumis à des effets de drainance via une éponte semi-perméable d'épaisseur,  $e'$ , et de perméabilité,  $K'$ , drainant un aquifère de surface (aquitard),
  - o limité dans l'espace par deux limites étanches parallèles distantes de  $L$  (a : distance de la limite la plus proche au puits de référence). L'une d'entre elles servira notamment à modéliser la limite entre les paléo-vallées du système Ecumes-Maniron et du système puits A, B, C, Gol –Bois de Nèfles.
- Le modèle intègre :
  - o la position des puits et piézomètres les uns par rapport aux autres,
  - o la position des horizons crépinés de chaque ouvrage au sein de l'aquifère (longueurs  $l$  et  $d$  pour les puits et,  $l'$  et  $d'$  pour les piézomètres),
  - o les variations de débit des ouvrages,
  - o et les pertes de charge quadratiques au puits.

La Figure 39 présente une vue en plan de l'ensemble du dispositif.

Comme il a été mentionné dans le paragraphe précédent, les pompes des ouvrages puits de Gol et Bois de Nèfles n'ont pas été arrêtées avant l'essai en interférence. Ainsi pour ces deux ouvrages, le niveau initial avant pompage n'est pas connu (absence de retour au niveau initial

avant pompage). Donc, pour la modélisation des niveaux de ces puits le calcul se fait en différence de niveau piézométrique par rapport au niveau d'eau juste avant le démarrage du test en tenant compte du débit durant les 3 jours précédents. C'est-à-dire qu'on fait l'hypothèse que sur ces puits les pompages ont démarré 3 jours avant les autres soit à partir du 12/10/2011 ( $Q_{BdN} : 154 \text{ m}^3/\text{h}$  ;  $Q_{Gol} : 322 \text{ m}^3/\text{h}$ ). Le chiffre de 3 j a été retenu, car étant donné les propriétés de l'aquifère – forte transmissivité et fort emmagasinement- le rabattement n'évolue quasiment pas (à débit constant) pendant les quelques jours suivants.

Pour les autres ouvrages, cette opération n'a pas été nécessaire, puisque les niveaux étaient stabilisés avant le démarrage du test (puits A, B et C ; Figure 35). En ce qui concerne, la profondeur de l'aquifère, qui est une variable inconnue, elle a été fixée à 100 m afin de tenir compte des observations de niveau sur le piézomètre le plus profond (PiB4c). Il est donc possible que son épaisseur réelle soit plus importante.

Le calage des paramètres hydrodynamiques du modèle a été effectué à partir de la modélisation des niveaux sur chacun des ouvrages en conservant autant que possible les mêmes paramètres pour l'ensemble des modélisations. La meilleure solution trouvée, c'est-à-dire satisfaisant au mieux l'ensemble des courbes de rabattement des 9 points d'observation (Figure 40, pas de mesure sur le puits du Gol) donne les résultats suivants (Tableau 13) :

- la transmissivité de l'aquifère,  $T$ , est de l'ordre de  **$0.8 \text{ m}^2/\text{s}$**  ; en cohérence avec les estimations du chapitre précédent,
- l' emmagasinement  $S$  est de l'ordre de  **$0.05$  (-)** ; c'est également cohérent avec les précédentes estimations. Cependant, l' emmagasinement est moindre pour les modélisations aux piézomètres du PIB5, en particulier pour les zones captées supérieures à 30 m de profondeur, ce qui peut s'interpréter par un aquifère plus captif dans ce secteur,
- le contraste vertical (anisotropie) de transmissivité de la formation aquifère, c'est-à-dire. un empilement de coulées volcaniques aquifères, est estimé à environ 7 ( $T_{\text{horiz.}}=7 \times T_{\text{vert.}}$ ). L'anisotropie a été ajustée à l'aide des piézomètres les plus profonds (PiB4c, PiB5c et d).
- deux limites étanches ont été nécessaires pour reproduire correctement les rabattements observés. Ce sont en particulier les puits les plus éloignés (puits B et BdN) qui ont permis l'optimisation de la position de ces deux limites. La Figure 41 présente le positionnement réel de ces limites. De direction environ N050-060, elles correspondent vraisemblablement à la limite de la paléo-vallée. La première limite est située à environ 400 m à l'est du puits B, et la seconde à environ 450 m à l'ouest du puits du Gol. La paléo-vallée aurait donc une largeur de l'ordre de deux kilomètres environ. Ces limites peuvent en réalité n'être pas strictement étanches, mais caractérisées par une transmissivité beaucoup plus faible que l'aquifère où sont implantés les ouvrages,
- de plus, un effet de drainance a été nécessaire pour expliquer les courbes. Il est cependant relativement faible :  $K'$  est de l'ordre de  $5 \times 10^{-7} \text{ m/s}$  pour une couche géologique d'une épaisseur d'un mètre. Cette drainance provient vraisemblablement des formations volcaniques de type tufs semi-perméables. Les différents ouvrages en ont recoupé une dizaine de mètres environ avant d'atteindre l'aquifère, voire des alluvions pour les ouvrages localisées le plus au sud-ouest (PIB5). Cependant, cette couche est sensiblement plus épaisse au puits Bois de Nèfles, ce qui pourrait traduire l'effet de suintement d'eau, de réservoirs de surface, et plus faible au droit du PIB5. Cet effet de drainance montre qu'il existe une relation entre l'aquifère et le système de surface, ce qui est cohérent avec les analyses géochimiques des eaux pompées, notamment vis-à-vis des teneurs en nitrates (origine anthropique).
- Les pertes de charge quadratiques, liées au puits ont aussi été prises en compte. Elles sont relativement proches des estimations précédentes dans le cas des puits A et C (40

et 195 au lieu de 8.3 et  $120 \text{ m}^{-5}\text{s}^2$ ; cf. Tableau 6), par contre elles sont nettement plus élevées dans le cas du puits B, de l'ordre 1 700 au lieu de  $100 \text{ m}^{-5}\text{s}^2$  ce qui pourrait traduire une détérioration du puits depuis sa réalisation. Des essais complémentaires sur ce puits –essais par paliers de débit- seraient nécessaires pour confirmer cette éventuelle détérioration. Les pertes de charges liées au puits n'ont pas pu être précisées sur les puits du Gol et Bois de Nèfles du fait pour le premier de l'absence de variations de débit et pour le second de l'absence de mesure de niveau piézométrique.

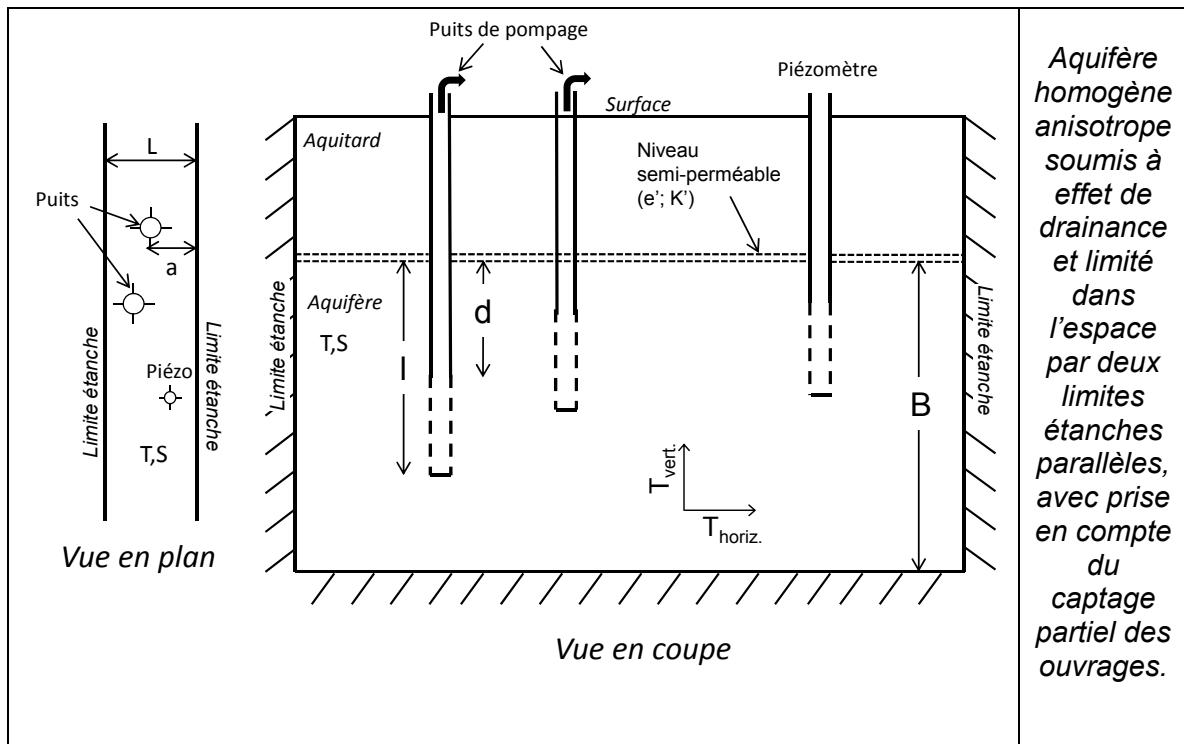


Figure 38 : Schéma du modèle analytique hydrodynamique.

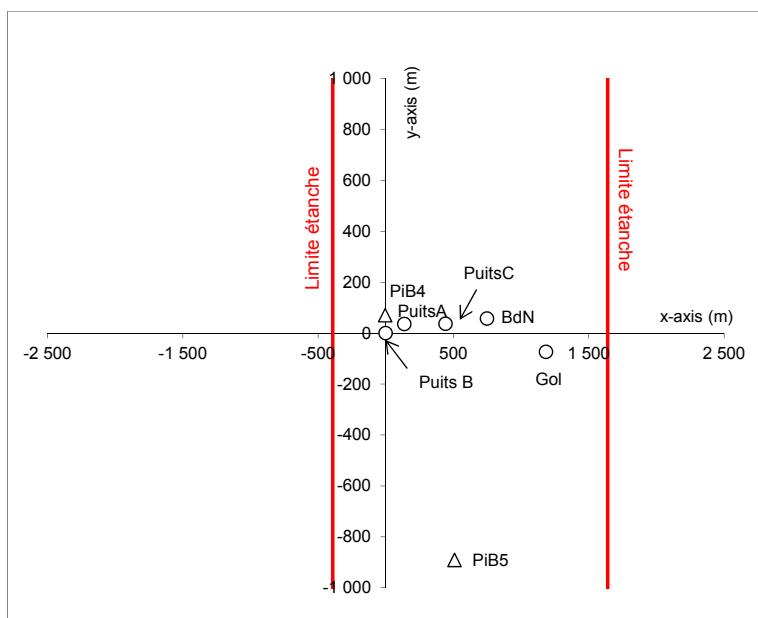


Figure 39 : Vue en plan de l'ensemble du dispositif. Puits de référence ( $x=y=0$ ) : puits B.

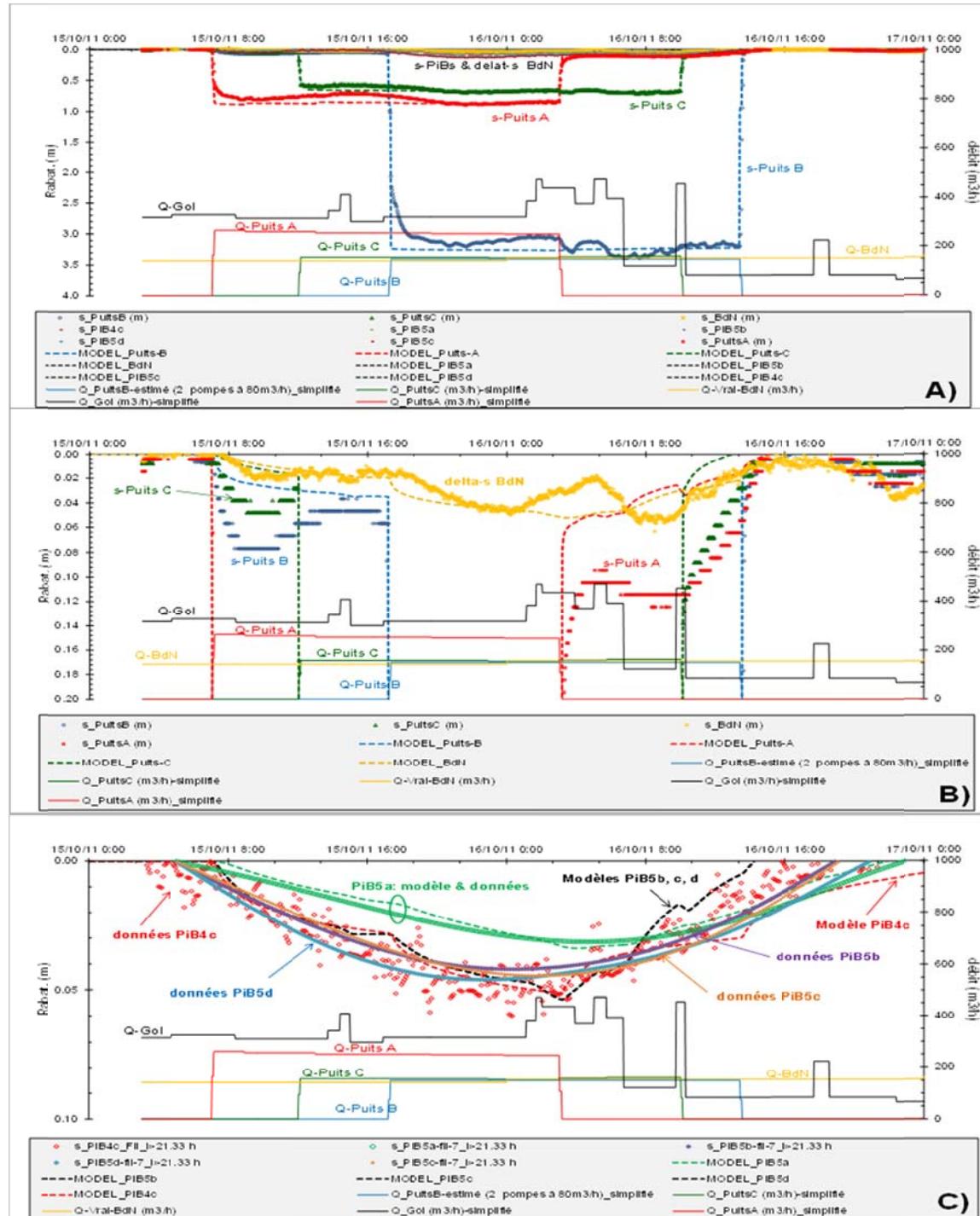


Figure 40 : Modélisation des rabattements de l'essai multi-puits réalisé en octobre 2011. Les modèles correspondent aux courbes en pointillés. A) ensemble des puits, B) détail sur BdN, et C) détail sur les PiB.

Ouvrage	Type	$l$ (m)	$d$ (m)	$T_{\text{horiz}}$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	$S$ (m)	$e'$ (m)	$K'$ (m/s)	$T_{\text{horiz}}/T_{\text{vert.}}$	$PdC$ ( $\text{m}^{-5}\text{s}^2$ )
<b>Puits A</b>	puits	7.7	0.0	8.0E-01	5.0E-02	1.0	5.0E-07	7.0	40.0
<b>Puits B</b>	puits	11.0	0.0	8.0E-01	5.0E-02	1.0	5.0E-07	7.0	1680.0
<b>Puits C</b>	puits	8.0	0.0	8.0E-01	5.0E-02	1.0	5.0E-07	7.0	195.0
<b>BdN</b>	puits	1.6	0.0	8.0E-01	5.0E-02	1.0	7.0E-07	7.0	-
<b>Gol</b>	puits	2.5	0.0	8.0E-01	5.0E-02	1.0	-	7.0	-
Pib4c	piézo	98.0	80.0	8.0E-01	5.0E-02	1.0	5.0E-07	7.0	-
Pib5a	piézo	17.0	12.0	8.0E-01	1.5E-02	1.0	1.7E-07	7.0	-
Pib5b	piézo	36.0	32.0	8.0E-01	4.0E-03	1.0	1.6E-07	7.0	-
Pib5c	piézo	44.0	41.0	8.0E-01	4.0E-03	1.0	1.6E-07	7.0	-
Pib5d	piézo	73.0	54.0	8.0E-01	4.0E-03	1.0	1.6E-07	7.0	-

Tableau 13 : Synthèse des paramètres hydrodynamiques déduits de la modélisation des rabattements de l'essai multi-puits réalisé en octobre 2011. Plaine du Gol.

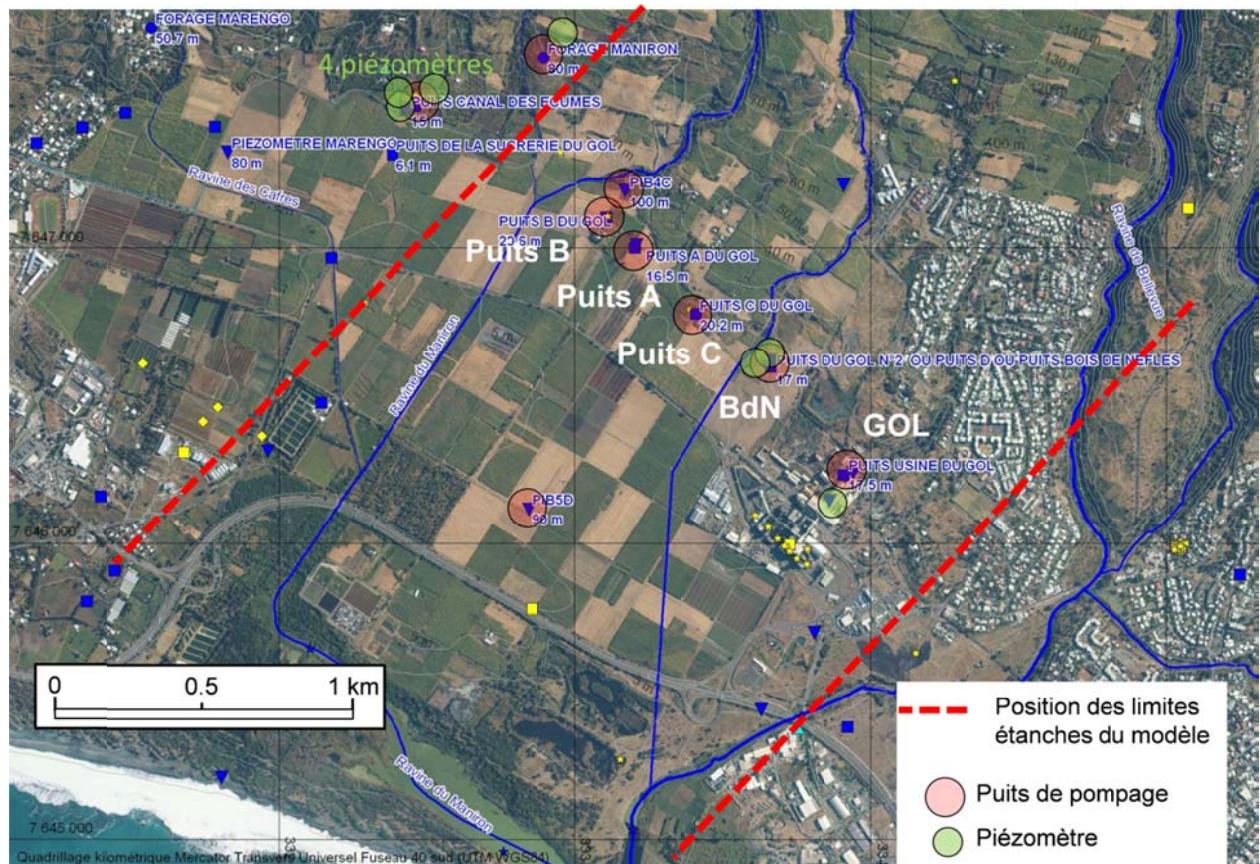


Figure 41 : Situation des puits, des piézomètres et des limites de l'aquifère.

### 4.3. SYNTHÈSE DES TESTS HYDRAULIQUES PAR POMPAGE

La réinterprétation des essais par pompage au moyen d'une méthodologie et de modèles mathématiques adaptés aux milieux complexes que sont les formations volcaniques ont permis de mieux caractériser les propriétés hydrodynamiques et la géométrie des aquifères de la plaine du Gol. Le modèle mathématique développé pour modéliser l'essai par pompage en interférences multiples d'octobre 2011 a permis d'une part de confirmer les propriétés hydrodynamiques de l'aquifère (notamment T et S), et d'autre part d'apporter des informations sur son anisotropie de transmissivité, sa drainance et sur ses limites. Les aquifères de la plaine du Gol sont d'un point de vue hydrodynamique divisés en deux unités principales :

- le secteur Puits du Gol, Bois de Nèfles, Puits A, B, C et PIB4 et 5, caractérisé par un aquifère relativement homogène d'une transmissivité élevée de l'ordre de  $0.8 \text{ m}^2/\text{s}$  et d'emmagasinement de l'ordre de 0.05. Le contraste vertical de transmissivité de l'aquifère est estimé à environ 7. L'aquifère est par ailleurs caractérisé par un léger effet de drainance provenant des formations superficielles peu perméables (tufs volcaniques et alluvions). Question géométrie, l'aquifère est limité à l'Ouest et à l'Est par deux limites étanches – ou peu perméables- de direction environ N050-060. Celles-ci correspondent vraisemblablement à la limite de la paléo-vallée couvrant, d'après les calculs, une largeur d'environ deux kilomètres,
- A contrario, le puits des Ecumes et le forage de Maniron sont situés dans un secteur où les aquifères sont plus complexes. La transmissivité des aquifères est plus faible, 0.07 à  $0.2 \text{ m}^2/\text{s}$ , et leur structure compartimentée (compartiments à transmissivité plus faible, discontinuité, etc.). Leur emmagasinement apparaît aussi plus faible ( $1.3 \times 10^{-4}$  ; valeur moyenne au puits des Ecumes).



## 5. Approche hydrogéochimique

L'objectif de l'approche hydrogéochimique est d'identifier le contexte géochimique des eaux souterraines sur la zone de recharge de la plaine du Gol, et de déterminer l'origine de la variation de la salinité des eaux souterraines.

### 5.1. MÉTHODOLOGIE

#### ***Contexte et description de l'approche hydrogéochimique***

De nombreux travaux se sont intéressés aux caractéristiques hydrochimiques des eaux de surface de La Réunion comme marqueurs de la lithologie des formations rencontrées à l'affleurement ou comme marqueur des circulations souterraines des aquifères de l'île, notamment dans le massif du Piton des Neiges (Grunberger, 1989 ; Join, 1991 ; Louvat, 1997 ; Join *et al.*, 1997 ; Louvat et Allègre, 1997 ; Hoareau, 2001). Ces travaux, qui serviront de référence pour caractériser les grands processus de minéralisation n'abordent pas ou peu l'aspect des mélanges, pollutions et intrusions salines qui peuvent modifier les signatures géochimiques des eaux souterraines de la frange littorale.

Dans cette étude, la caractérisation hydrogéochimique a été réalisée par (i) l'interprétation des diagrammes élémentaires binaires (qui permet la comparaison d'informations apportées par deux éléments ou des rapports entre éléments) et (ii) l'analyse de la signature isotopique des eaux. Cette approche repose sur l'identification et la caractérisation de la signature chimique et isotopique de l'eau de recharge qui contribue à alimenter les aquifères et sur l'étude de sa variabilité dans les eaux des forages et piézomètres du Plateau du Gol en fonction des influences suivantes :

- intrusions salines (eau de mer ou étangs salés du Gol),
- apports anthropiques (fertilisants, eaux usées),
- processus de minéralisation due à l'interaction eau-roche,
- processus éventuels de dilution par les eaux superficielles (eaux de surface des rivières).

Les informations apportées par chaque traceur sont ensuite confrontées les unes aux autres dans le but de conceptualiser le fonctionnement hydrogéochimique de l'hydrosystème étudié, et d'identifier les principaux processus chimiques qui contribuent à expliquer les minéralisations observées.

La synthèse des principaux phénomènes hydrogéochimiques mis en évidence permet d'apporter des éléments d'informations pour élaborer un schéma conceptuel du fonctionnement hydrogéologique du Plateau du Gol.

#### ***Données disponibles***

Les données disponibles proviennent principalement de l'analyse des éléments majeurs et de la composition isotopique ( $D/H$ ,  $^{18}O/^{16}O$  et  $^{87}Sr/^{86}Sr$ ) d'échantillons d'eau prélevés sur 10 sites sélectionnés lors d'une campagne en basses eaux (du 04 au 06 octobre 2011). Les eaux échantillonées sont :

- L'eau de mer,
- L'eau de l'étang du Gol,
- Les eaux souterraines des forages d'exploitation PUITS USINE GOL, PUITS MARENGO, PUITS ECUMES, PUITS A, PUITS B, PUITS C, et les eaux des piézomètres PIB4A, PIB4C, PIB5B et PIB5D.

Il était indispensable de prélever dans les multi-piézomètres PIB4 et PIB5 l'eau représentative de la nappe à différentes profondeurs. Les prélèvements ont donc été réalisés en face des crépines, à forte profondeur (jusqu'à une centaine de mètres) et dans des ouvrages de petit diamètre (12 cm). Dans ces conditions, un prélèvement classique par une pompe n'est pas possible. Un dispositif spécial par bitube, clapet anti-retour et gaz azote a été utilisé. Le gaz dont la pression est contrôlée par l'opérateur permet l'ouverture et la fermeture du clapet, la vidange du tuyau et la remontée de l'échantillon d'eau.

Les autres ouvrages ont été prélevés aux robinets prévus à cet effet.

Pour replacer ces analyses géochimiques dans le contexte du Plateau du Gol qui draine le versant sud du paléo-cirque des Makes (au sud-ouest du cirque de Cilaos), les données hydrochimiques préexistantes, collectées depuis les années 1980, ont également été utilisées. Il s'agit de données obtenues à partir de l'analyse des :

- eaux de pluie sur La Réunion,
- eaux de l'étang du Gol,
- eaux de surface : rivières Maniron et du Gol,,
- eaux souterraines : forages et piézomètres du plateau du Gol, sources d'altitudes sur le versant des Makes (au dessus de 200 m NGR),
- eaux des sources thermales du cirque de Cilaos.

Ces données sont extraites :

- de la banque ADES du réseau « 1000000003 RBESOURCESREU - Réseau de suivi de la qualité des eaux d'émergences de la Réunion »,
- de la banque de données de l'ARS (SISE-EAUX),
- de la banque de données de l'Office de l'Eau,
- d'études BRGM récentes sur La Réunion.

La localisation des points d'eau est reportée sur la Figure 42. Les données aberrantes (*i.e.* pour lesquelles des problèmes de mesures ont été avérés) ont été corrigées ou éliminées.

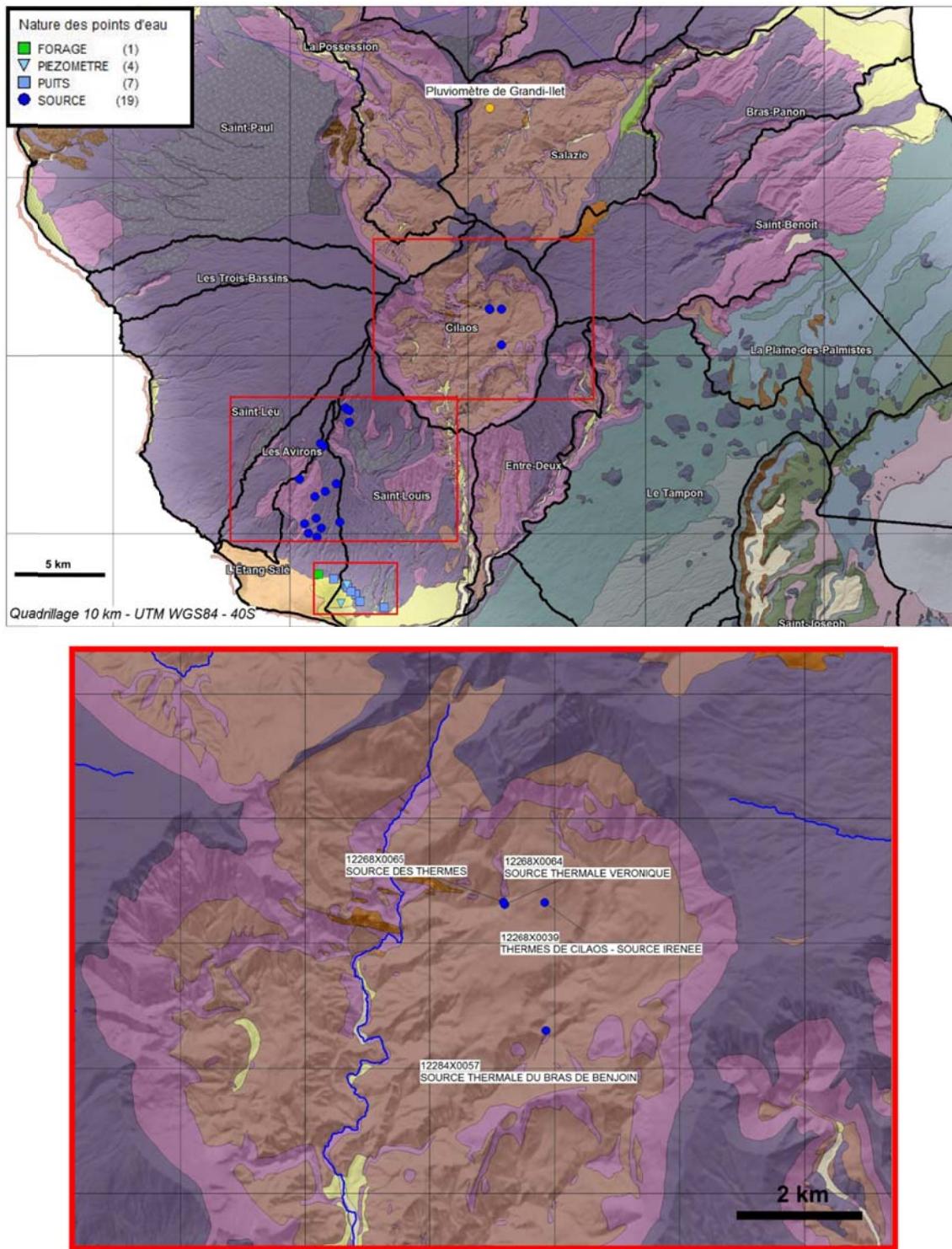


Figure 42 : Carte de localisation des points d'eau utilisés dans l'étude hydrogéochimique sur fond de carte géologique de La Réunion à 1/100 000 (2006) ; suite de la figure page suivante.

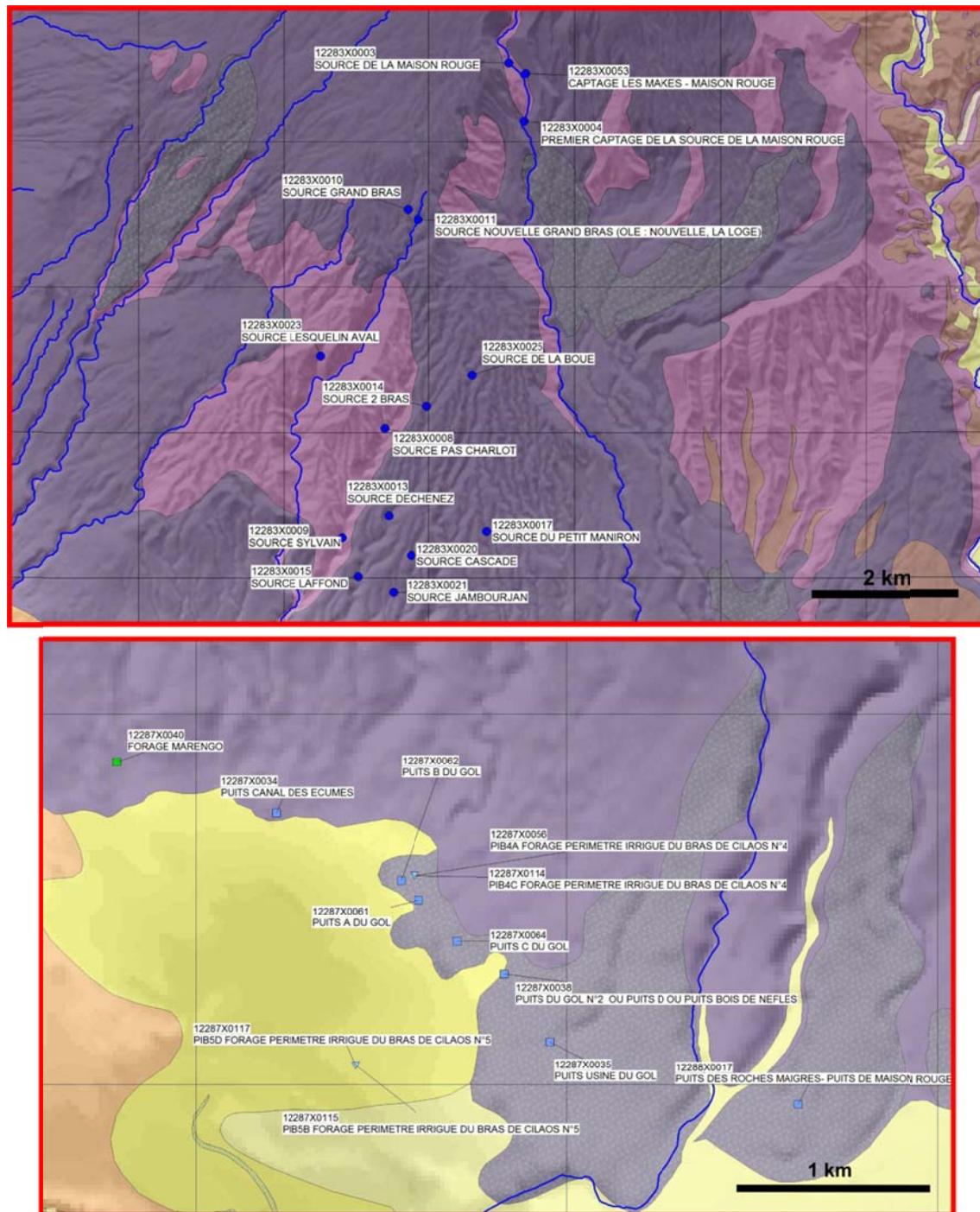


Figure 41 (suite)

## 5.2. CARACTÉRISATION GÉOCHIMIQUE DES EAUX DU PLATEAU DU GOL

### 5.2.1. Informations apportées par le diagramme Na vs. Cl

Le diagramme Na vs. Cl (Figure 43) permet de localiser les points d'eau par rapport à la droite de dilution de l'eau de mer sur laquelle s'alignent les eaux de pluie. Il permet de définir le signal des eaux de recharge qui sont enrichies en Cl du fait de l'évapotranspiration (ET) et d'identifier un excès de Cl qui témoigne d'un apport en Cl autre que celui des précipitations atmosphériques.

Sur la base d'un bilan annuel comprenant 1800 mm de pluie et 1000 mm d'ET, l'enrichissement est de l'ordre d'un facteur 1.8. En prenant la concentration moyenne en Cl de la pluie<sup>4</sup> (2.8 mg/l), la signature de l'eau de recharge  $\text{Cl}_{\text{recharge}}$  est estimée à 5.0 mg/l. Les valeurs en Cl supérieures à cette concentration ( $\text{Cl}_{\text{éch}} > \text{Cl}_{\text{recharge}}$ ) trouvent donc une autre origine que l'eau de pluie. Plusieurs sources peuvent expliquer cet enrichissement. Concernant l'aquifère côtier du Gol, les origines potentielles de ces fortes concentrations en Cl peuvent être naturelles (intrusion de l'eau de mer ( $\text{Cl}_{\text{ocean}} = 19\ 595 \text{ mg/l}$ ), apport d'eau depuis l'étang salé du Gol ( $\text{Cl}_{\text{étang}}$  de 30 à 8 890 mg/l), et altération eau-roche et/ou anthropiques (eaux usées et/ou agricoles)).

L'enrichissement en Na par rapport à la droite de dilution de l'eau de mer peut s'expliquer par intrusion d'eau de mer ou des eaux de l'étang mais surtout par les phénomènes d'interaction eau-roche. Pour les eaux thermales de Cilaos qui trouvent l'origine de leur minéralisation dans l'altération hydrothermale des formations volcaniques, on observe un fort enrichissement en Na ( $\text{Na}_{\text{eaux thermales}} \approx 350 \text{ mg/l}$ ) sans un enrichissement concomitant de Cl à partir du signal recharge.

A partir de cette première analyse, il devient possible sur la Figure 43 d'identifier les groupes d'eau suivants :

- (1) **Les sources d'altitude qui comportent un signal Cl et Na très proche du signal recharge.** Ceci est dû à la localisation de leurs bassins versants dans les forêts d'altitude qui limite l'enrichissement en Cl, et à la petite taille de leur zone d'alimentation qui limite le temps de résidence et donc les phénomènes d'interaction eau-roche,
- (2) **Les puits A et ECUMES** qui, par rapport aux eaux de recharge, présentent des concentrations en Na (35 mg/l) plus élevées et des teneurs en Cl (10 mg/l) légèrement plus élevées.
- (3) **L'ensemble des autres points d'eau** enrichis en Na et Cl tel qu'ils s'alignent sur la droite de dilution de l'eau de mer. Ceci indique une salinité d'origine marine et/ou de l'étang du Gol. La variabilité des teneurs en Cl montre une contribution croissante des eaux salées pour les groupes :
  - o Puits A, Puits B, Puits C, Puits Usine du Gol, PIB4A, Puits Marengo
  - o PIB4C, PIB5B
  - o PIB5D

La variabilité des teneurs en Cl de l'étang du Gol comprises entre 30 et 8 900 mg/l peut s'expliquer par la conjonction de 3 phénomènes : une alimentation par l'océan, une alimentation par les eaux de surface (ravines Maniron et du Gol), et l'évapotranspiration. L'absence de chronique valide sur l'étang ne permet pas de caractériser son fonctionnement à ce stade.

---

<sup>4</sup> Concentration en  $\text{Cl}^-$  dans les eaux de pluie durant la saison cyclonique 1985-1986 : 2.8 mg/l aux Makes, 3.4 mg/l à Etang-Salé, 2.7 mg/l à Trois-Bassins (Grunberger O., 1989)

Néanmoins la contribution de l'étang à la salinisation de l'aquifère est discutée en fin de ce chapitre.

Concernant les eaux de surface, on notera la différence de signature des deux rivières de Maniron et du Gol. La première draine des eaux plus enrichies en Na de même teneur que celles du PUITS ECUMES et du PUITS A, et la seconde semble plus influencée par une alimentation d'eaux salées, car elle s'aligne sur la droite de dilution de l'eau de mer.

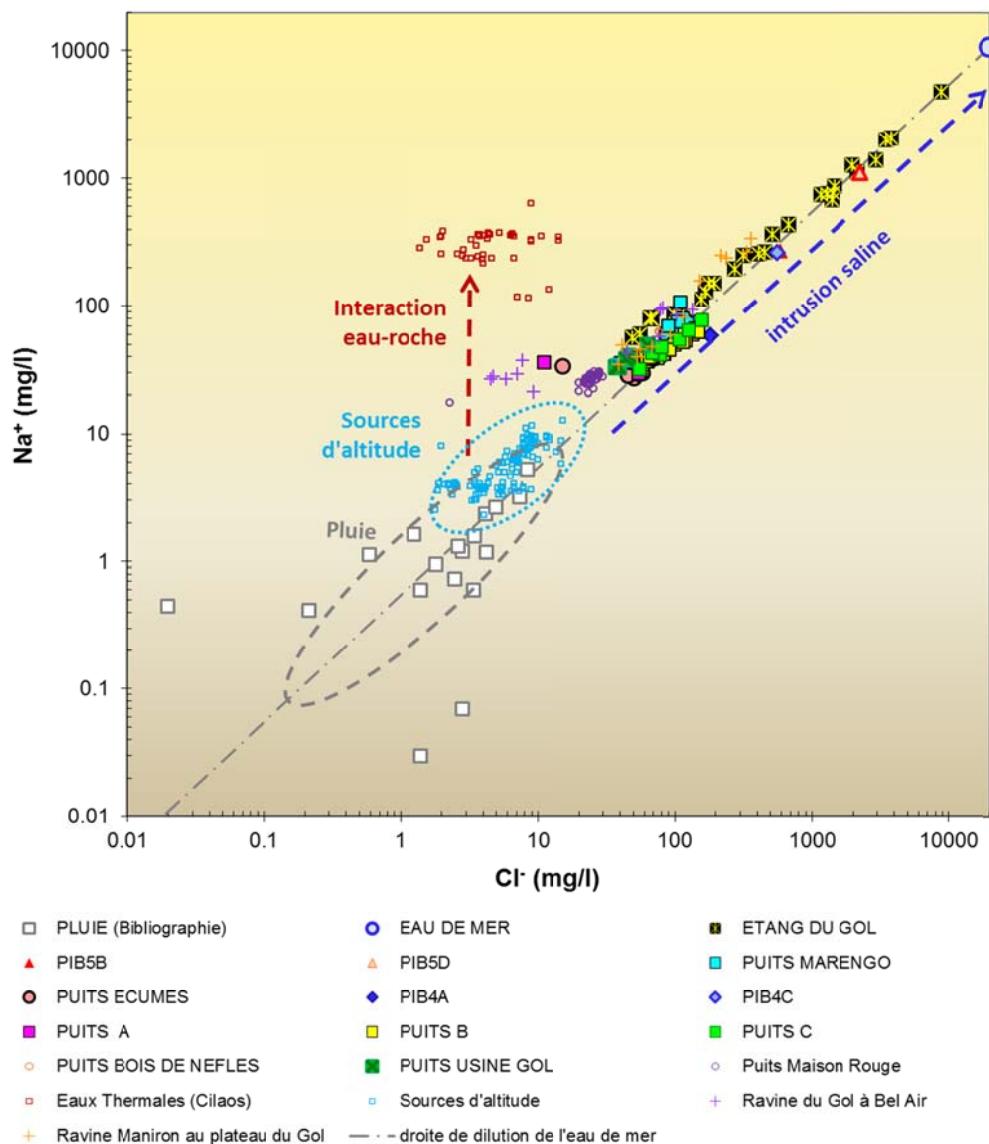


Figure 43 : Diagramme  $\text{Na}^+$  vs.  $\text{Cl}^-$  des eaux du bassin d'alimentation du Gol

### 5.2.2. Informations sur les apports anthropiques

Les teneurs en  $\text{NO}_3$ , K, Cl et B peuvent augmenter suite aux apports anthropiques qui sont de deux types sur la zone d'étude : les pratiques agricoles et les eaux usées.

Les pratiques agricoles sur la zone sont essentiellement tournées vers la production de canne à sucre. Elles sont à l'origine de l'utilisation de fertilisants organiques (écumes<sup>5</sup> et cendre de bagasse) ou minéraux de type NPK, sulfate d'ammonium, chlorure de potassium. Nous présentons sur la Figure 44 les principaux engrains et amendement utilisés en agriculture à La Réunion.

Les eaux usées peuvent contribuer à l'augmentation des teneurs en Cl, NO<sub>3</sub> et B dans les hydrosystèmes.

Productions agricoles	Fertilisants (engrais minéraux) (formule NPK)	Amendements calciques (*)	Amendements organiques
Canne à sucre	18.7.30	Physolith (36% CaO)	Ecumes (usines)
Arboriculture fruitière	15.5.30	Physolith (36% CaO)	
Cultures légumières	10.20.20	Physolith (36% CaO)	Fumiers (volailles et bovins)
Prairies	33.10.10 ou 10.20.20		Lisiers

(\*) : faible niveau d'utilisation

Figure 44 : Principaux fertilisants et amendements utilisés en agriculture à La Réunion (Source de la donnée : Chambre d'Agriculture de la Réunion, 2009)

La relation entre NO<sub>3</sub> vs. K (Figure 45) permet de qualifier les eaux des hydrosystèmes vis-à-vis des phénomènes de pollutions anthropiques. L'examen des informations apportées par le bore ne pourra pas être mené dans cette étude faute de données disponibles. Et étant donné que les teneurs en Cl des ouvrages sont fortement contrôlées par une salinité d'origine marine, il n'est pas possible dans notre cas d'utiliser le Cl de manière fiable pour caractériser ces apports anthropiques.

Une distinction géochimique peut être opérée selon l'importance relative des teneurs en nitrates. Les eaux présentant des teneurs comprises entre 1 et 3 mg/l seront considérées comme naturelles, ces teneurs en NO<sub>3</sub> correspondant au bruit de fond naturel lié à la minéralisation de la matière organique des sols (Fustec *et al.*, 1991 ; Sebilo *et al.*, 2005).

L'augmentation en potassium peut avoir deux origines possibles : la contribution d'eaux salées, et l'interaction eau-roche. Si le premier phénomène peut engendrer de fortes teneurs en K ( $K_{\text{ocean}} = 413 \text{ mg/l}$ ), le second reste limité comme le montre le signal des eaux thermales de Cilaos. Celles-ci sont caractérisées par des teneurs en K comprises entre 3 et 10 mg/l, et par de

---

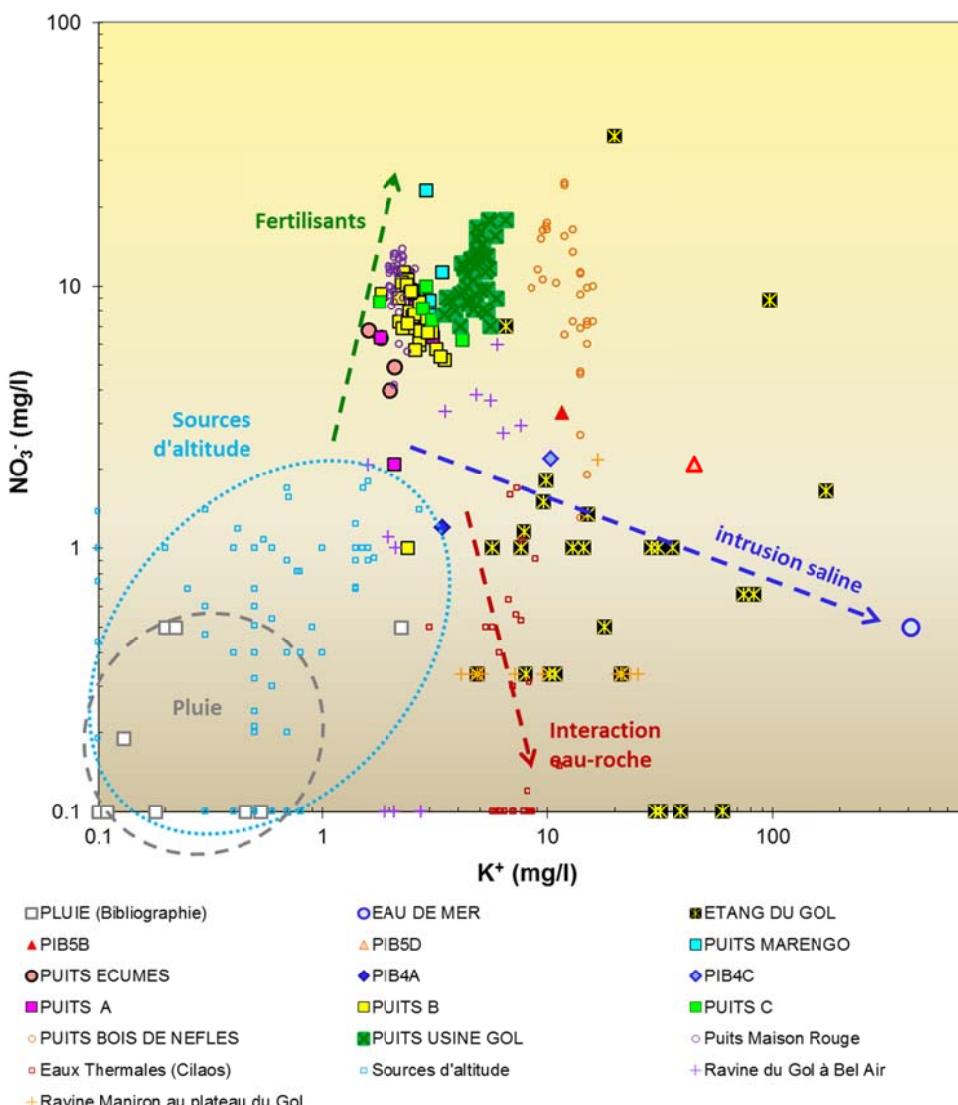
<sup>5</sup> Écumes : appellation des sous-produits de l'industrie de la canne. Les écumes de sucrerie sont issues de la clarification du jus (chauffage puis centrifugation), formant des tourteaux de filtration, qui sont séchés.

très faibles teneurs en  $\text{NO}_3$  ( $< 2 \text{ mg/l}$ ) en raison de processus de dénitrification en milieu réducteur.

Du fait que l'agriculture et les zones d'habitations sont très restreintes au-dessus de 200 m d'altitude, les eaux des sources des Hauts (que l'on peut assimiler au signal recharge d'aquifères superficiels) donnent la teneur en  $\text{NO}_3$  du fond géochimique naturel ( $\text{NO}_3 < 2 \text{ mg/l}$ ).

A partir de ce signal recharge, on peut distinguer deux groupes d'eau sur le secteur du Gol :

- (1) Les eaux des aquifères non impactés par les apports anthropiques avec des teneurs en  $\text{NO}_3$  proches du signal recharge (entre 1 et 3 mg/l). Ces eaux sont par contre impactées par des eaux salées avec des teneurs en K de 2 à 45 mg pour PIB4A, PIB4C, PIB5B, PIB5D.
- (2) Les eaux des aquifères impactés par les apports anthropiques avec des teneurs en  $\text{NO}_3$  supérieures à 3 mg/l. Les ouvrages BOIS DE NEFLES, PUITS USINE GOL, PUITS MARENGO, PUITS ECUMES, PUITS A, PUITS B, PUITS C présentent des teneurs en  $\text{NO}_3$  comprises entre 4.2 et 24.7 mg/l. Globalement, ces eaux ne sont pas enrichies en K, sauf pour PUITS USINE GOL et BOIS DE NEFLES où des eaux salées semblent impacter la ressource avec des teneurs de 4 à 16 mg/l.

Figure 45 : Diagramme  $\text{NO}_3$  vs.  $\text{K}$ 

Il est intéressant de remarquer que les eaux préservées des apports anthropiques sont celles des piézomètres, *i.e.* des ouvrages non exploités sur la zone. Comme les crêpines des piézomètres et des forages se situent dans les mêmes formations scoriacées et basaltiques, il est probable que les pompages sont à l'origine d'une contamination de l'aquifère, en entraînant une drainance plus importante des formations superficielles (alluvions essentiellement) impactées par les apports anthropiques. La drainance des alluvions vers les basaltes est vraisemblablement due aux pompages dans les basaltes ; elle resterait un processus mineur en régime naturel. La drainance identifiée par l'étude des tests hydrauliques est ainsi confirmée par le diagramme  $\text{NO}_3$  vs  $\text{K}$ .

On observe également une variation des teneurs en  $\text{NO}_3$  pour les ouvrages exploités. Pour les POUTIS B, BOIS DE NEFLES et POUTIS USINE DU GOL pour lesquels une chronique fiable est disponible, la Figure 46 présente l'évolution des teneurs en  $\text{NO}_3$  depuis fin 2006. Pour BOIS DE NEFLES et POUTIS USINE DU GOL, on observe des pics de  $\text{NO}_3$  en hiver austral. Ces fortes

concentrations peuvent être reliées aux périodes d'apport des engrains minéraux de juillet à janvier (après la coupe de la canne à sucre) et aux cumuls pluviométriques de la saison cyclonique. On remarque d'ailleurs une bonne correspondance entre le cumul pluviométrique entre janvier et mars et l'amplitude du pic de  $\text{NO}_3^-$  quelques mois après. On notera également que les pics de nitrates dans l'étang correspondent à cette tendance saisonnière mais avec une ampleur beaucoup plus faible (< 7 mg/l).

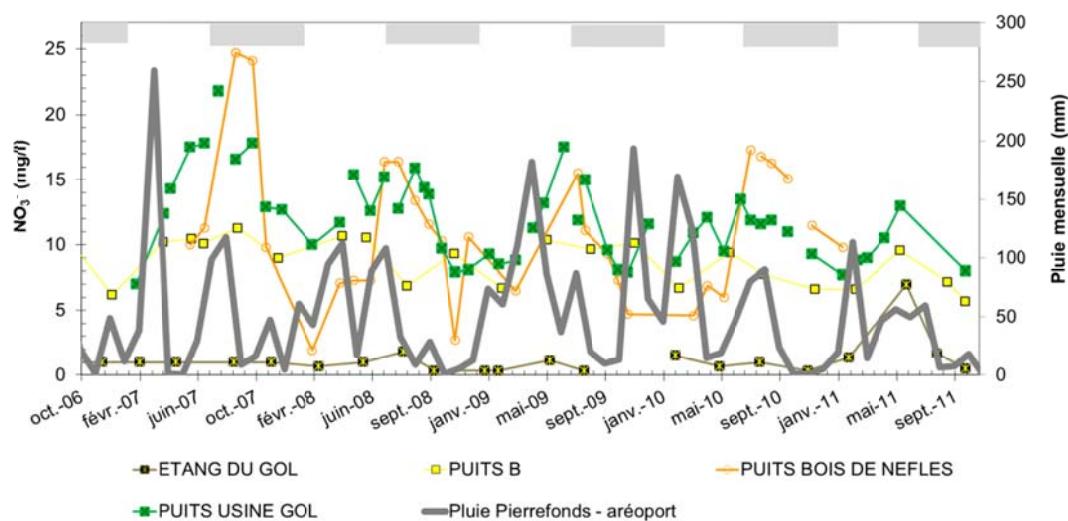


Figure 46 : Evolution des teneurs en  $\text{NO}_3^-$  dans trois puits d'exploitations du Plateau du Gol ; les rectangles grisés indiquent les périodes de fertilisation pour la canne à sucre.

### 5.2.3. Informations sur les interactions eaux-roches

- Informations apportées par la Silice

Les relations entre sodium et silice ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$  ou  $\text{SiO}_2$ ) permettent de qualifier les eaux vis-à-vis des interactions eaux-roches. D'une manière générale, plus les teneurs en Mg, Na et Si sont élevées, plus l'eau a été en contact de manière prolongée avec les formations géologiques. Ces traceurs apportent ainsi des informations qualitatives vis-à-vis du temps de résidence de l'eau dans l'hydrosystème. Les travaux de modélisation des interactions entrepris par Hoareau (2001) ont apporté un éclairage intéressant quant à l'évolution des teneurs en Si lors de la dissolution des laves. Il a été notamment montré que la concentration en Si augmente de manière exponentielle lors des dissolutions, puis tend asymptotiquement vers une valeur finie de concentration et ce quel que soit la teneur initiale de la roche en Si. Ce type d'évolution, validé dans l'étude d'Aunay et al. (2010) sur les aquifères nord de la Réunion, a également été considéré dans cette étude pour décrypter les informations apportées par le diagramme binaire Na vs. Si (Figure 47). Cependant, en contexte littoral, aux phénomènes d'interaction eau-roche et à l'enrichissement en Na et Si se superpose un mélange avec des eaux salées qui engendre une forte augmentation en Na et un appauvrissement en Si. Sur la base de ces deux phénomènes concomitants, il devient difficile de caractériser, même de manière relative, le temps de résidence de l'eau dans l'hydrosystème.

Trois pôles se distinguent sur le graphique (Figure 47):

1. Un pôle marin avec une concentration nulle en Si, et une concentration de 10 800 mg/l en Na.
2. Un pôle peu évolué vis-à-vis des interactions eaux-roches (eaux de recharge) avec des teneurs moyennes en Si et Na de respectivement 25 et 7 mg/l.
3. Un pôle évolué (eaux thermales) avec les teneurs en Si les plus élevées (entre 100 et 200 mg/l) et des teneurs en Na autour de 350 mg/l.

Trois groupes d'eau se distinguent sur le diagramme Na vs. Si :

- **Des eaux peu impactées par les eaux salées (Na compris entre 40 et 100 mg/l)** : Puits ECUMES, A, B, C, MARENGO, USINE DU GOL.
- **Des eaux impactées par le pôle eau marine (Na > 250 mg/l)** avec une contribution de plus en plus grande des eaux salées ; piézomètres PIB4C, PIB5B et PIB5D et la ravine Maniron pour certains prélèvements;
- **Des eaux faiblement impactées par les eaux salées, et comprenant des pertes en Si** ; piézomètre PIB4A (Si = 2.5 mg/l). L'appauvrissement en Si peut s'interpréter par le phénomène de précipitation secondaire de phyllosilicates et/ou de silice (silice amorphe, calcédoine, montmorillonite ?).

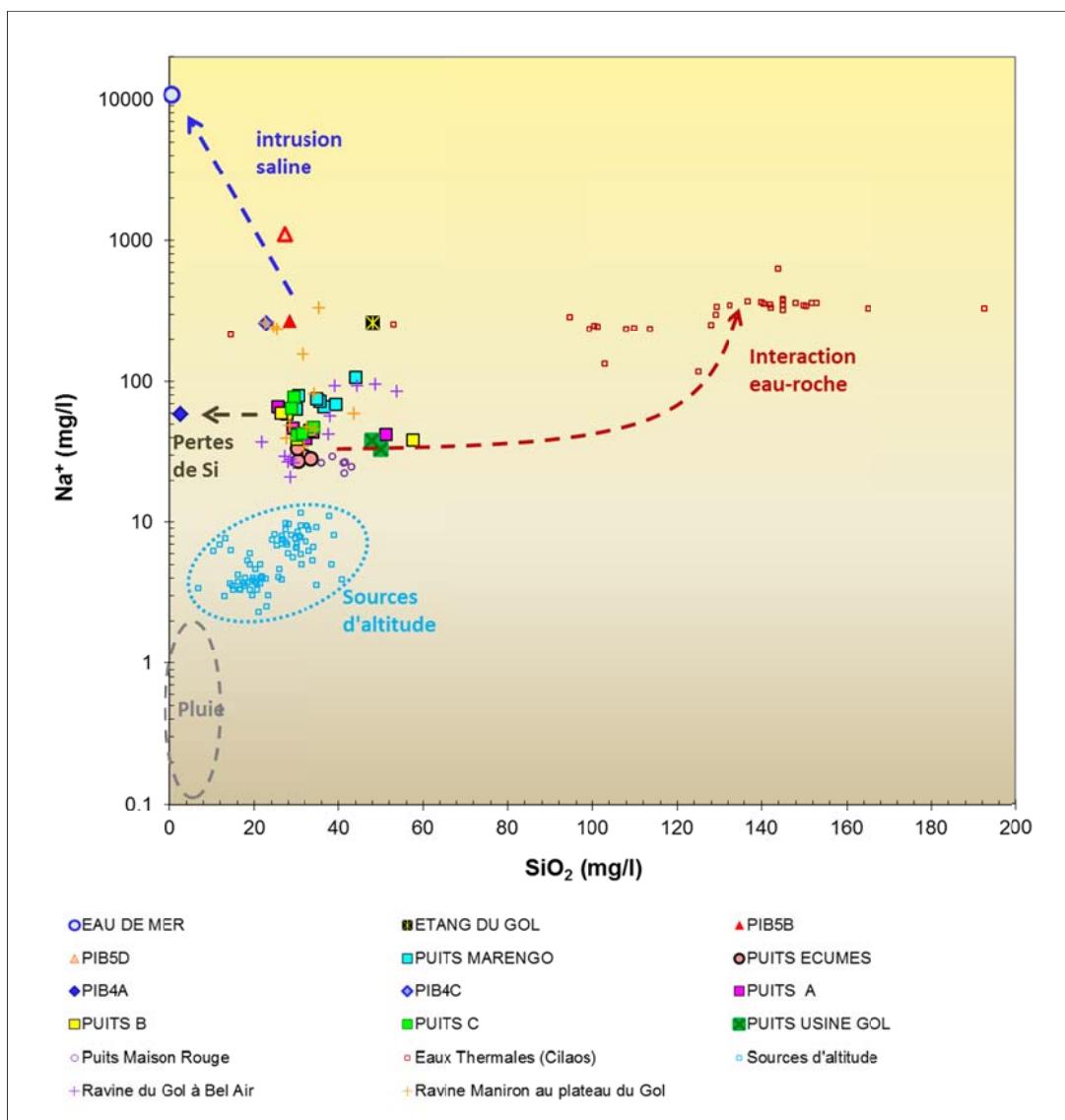


Figure 47 : Diagramme  $\text{Na}^+$  vs.  $\text{SiO}_2$

- **Informations apportées par l'isotope du strontium**

L'isotope du strontium (Sr) permet de préciser les modalités d'interaction de l'eau souterraine avec son environnement. La composition isotopique du Sr des roches basaltiques du Piton des Neiges à La Réunion ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) se situe autour de 0,70420 (+/- 0,00010) (Louvat et Allègre, 1997). Les eaux circulant dans ces formations acquièrent une signature proche de cette valeur si leur temps de résidence est suffisamment long. Cependant, plusieurs autres types d'apports peuvent considérablement modifier la signature de l'eau volcanique souterraine. Il existe un pôle atmosphérique avec une signature des pluies autour de 0,70689 (+/- 0,00001) en altitude (cirque de Salazie - plus basse que le pôle eau de mer à 0,70918 (+/- 0,00001) – ce qui est cohérent avec des phénomènes d'évaporation locale interne aux cirques mis en évidence sur les pluies d'altitude ; Grunberger, 1989).

En reportant, sur la Figure 48, les points des aquifères d'altitude (issus de la littérature : Louvat et Allègres, 1997) qui ne peuvent être influencés par l'eau de mer, il apparaît qu'ils entourent le pôle « interaction eau-roche » des roches basaltiques. Les rapports isotopiques des points de prélèvements du Gol révèlent un mélange entre ces eaux ayant circulé dans les basaltes et l'eau de mer.

Ainsi l'isotope du Sr ne nous permet pas de caractériser les interactions eau-roche en contexte côtier, mais s'avère être un bon indicateur de la variabilité de la contribution d'eau de mer.

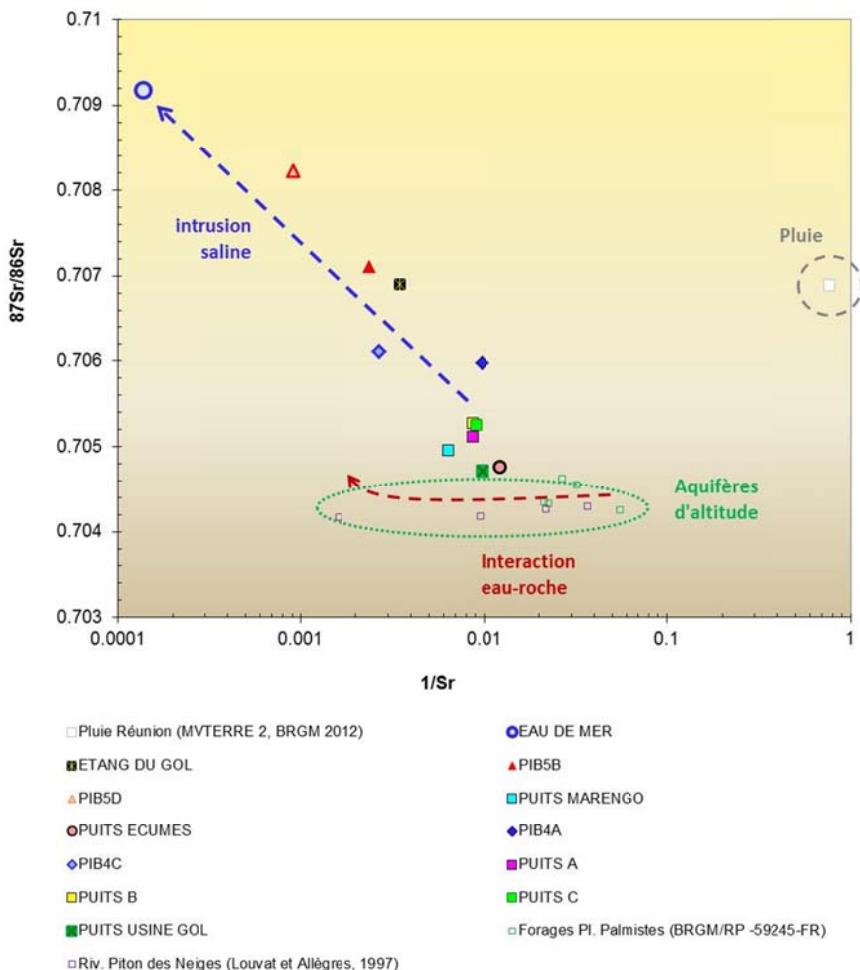


Figure 48 : Diagramme  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  vs.  $1/\text{Sr}$

#### **5.2.4. Altitude de recharge**

Les isotopes stables de la molécule d'eau ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$ ) peuvent être utilisés pour identifier les origines du signal d'entrée qui alimente les aquifères, en particulier estimer les altitudes d'alimentation et déterminer les relations entre les circulations souterraines et les eaux de surface. Pour l'étude, du fait de l'importance de la contribution des eaux marines qui masquent le signal recharge, nous avons corrigé les rapports isotopiques à partir de la teneur en Sr de l'eau de mer (Figure 49).

Comparé à la droite mondiale des pluies ( $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$ ), les eaux du secteur s'alignent sur une droite avec un excès en deutérium légèrement plus faible ( $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 8$ ) dû à une origine des masses d'air de l'océan indien qui serait autour de  $d=8$ , c'est-à-dire plus faible que celui de l'atlantique à 10 pour mille.

Sur l'île de La Réunion, le gradient altitudinal a été établi par Grunberger (1989) lors de deux campagnes de mesures en saison sèche et en saison cyclonique, mettant en évidence un fort effet saisonnier du signal pluie. Etant donné que le temps de résidence moyen de l'eau souterraine dans ces formations volcaniques réunionnaises est très supérieur à un an (jusqu'à plusieurs dizaines d'années (BRGM/RP-59245-FR), on suppose alors que le signal moyen de la

recharge des aquifères est un mélange entre des eaux précipitées tout au long de l'année. Même si l'essentiel des volumes précipités se produit en saison cyclonique, il est alors très difficile de privilégier une des deux saisons pour identifier le gradient d'altitude. Sans méthode de datation précise, il n'est pas possible de trancher sur ce point. Ainsi, nous avons choisi dans cette étude d'utiliser un gradient moyen qui va permettre de différencier les écarts d'altitude moyenne de recharge pour les différents groupes d'eau observés sur la Figure 49 :

- gradient altitudinal saison sèche (1986) :  $\delta^{18}\text{O} = -0.00125 * Z - 2.5$
- gradient altitudinal saison cyclonique (1985-86) :  $\delta^{18}\text{O} = -0.0009 * Z - 4.9$
- gradient altitudinal moyen :  $\delta^{18}\text{O} = -0.00105 * Z - 3.7$

avec Z = altitude en m NGR.

On distingue quatre groupes d'eau par leur altitude moyenne de recharge :

- **PIB5D à 1 740 m** : c'est le piézomètre le plus profond (75 m) et le plus proche de la mer. Son altitude moyenne de recharge est la plus élevée et elle correspond à l'altitude des remparts qui surplombent la plaine du Gol,
- **PUITS A, B, C, PIB4A, PIB4C, PIB5B à 1 486 m** : ce groupe de forages et piézomètres se situent dans le compartiment est à des profondeurs variant entre 16 et 100 m. Leur altitude moyenne de recharge correspond à l'altitude de la plaine des Makes au cœur de la paléo-vallée des Makes,
- **ECUMES et MARENGO à 1 050 m** : ce sont les piézomètres du compartiment ouest de l'encaissant de la paléo-vallée des Makes. Leur altitude moyenne de recharge correspond à la limite encaissant/paléovallée des Makes à l'aplomb de la plaine du Gol,
- **PUITS USINE DU GOL à 705 m** : ce piézomètre se situe en bordure est du compartiment est. Il se distingue – contrairement aux puits A, B, C – par des apports anthropiques depuis la surface. L'interprétation la plus plausible est que son altitude de recharge moyenne de près de 700 m est un mélange entre des eaux issues de la paléo-vallée des Makes à 1500 m et des eaux issues de la surface de la plaine du Gol.

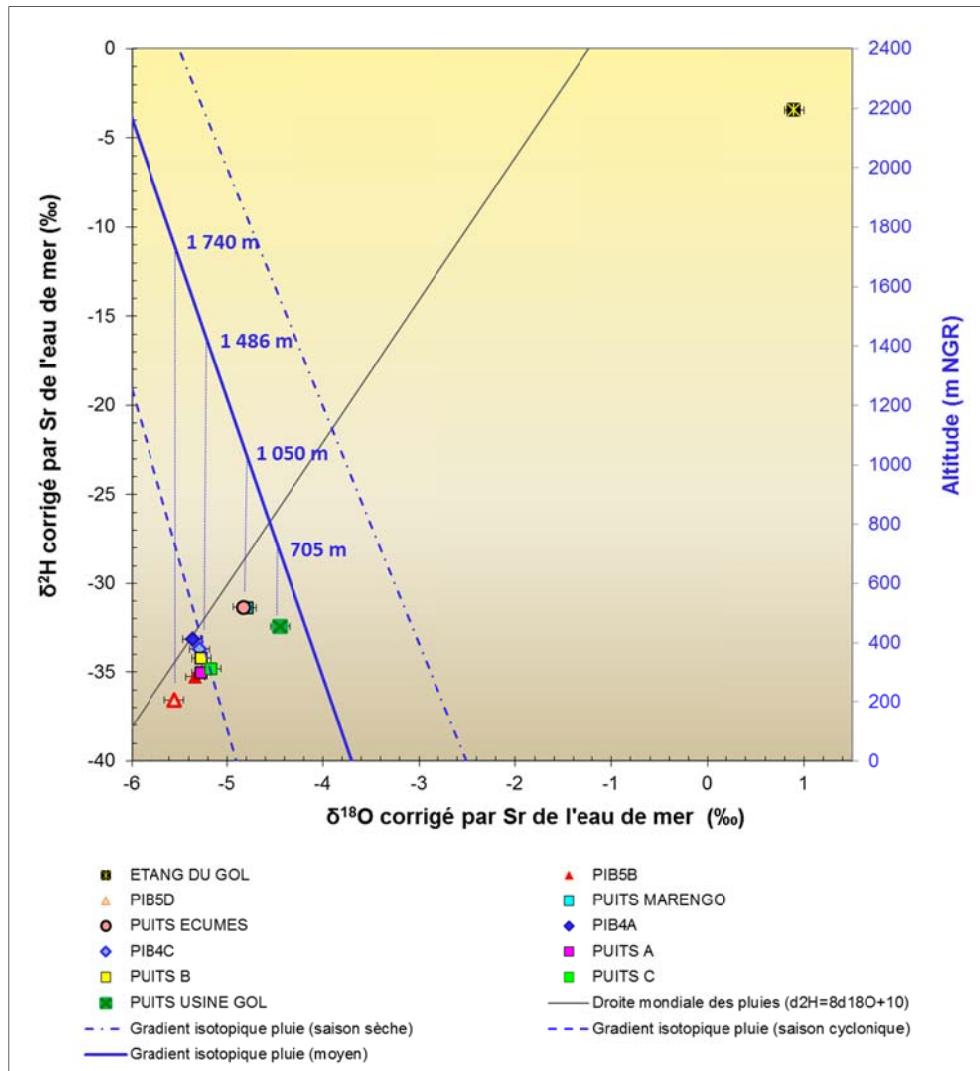


Figure 49 : Evolution des rapports  $\delta^2\text{H}$  en fonction des rapports  $\delta^{18}\text{O}$  corrigés par la teneur en Sr de l'eau de mer

### 5.2.5. Variabilité de la salinité de l'aquifère côtier du Gol

Pour mieux définir les rôles de l'étang et de l'océan dans la salinisation de l'aquifère, nous discutons dans cette section de leurs contributions potentielles sur la base des teneurs en Cl, SO<sub>4</sub>, K, et Sr.

Le calcul de la contribution d'eau de mer pour chaque piézomètre et forage est relativement simple du fait de la composition chimique stable dans le temps de l'océan. En revanche, l'exercice est plus difficile concernant le calcul de la contribution potentielle de l'étang dont la composition varie fortement au cours de l'année. On observe notamment sur les diagrammes Na vs. Cl et NO<sub>3</sub> vs. K une gamme de valeurs des teneurs en Cl comprises entre 49 et 8890 mg/l, et des teneurs en K comprises entre 5 et 175 mg/l. Pour illustrer la variabilité temporelle de la composition chimique de l'étang, la Figure 50 présente les chroniques de niveau d'eau et de conductivité de l'étang (en gris) et des piézomètres et forages (en couleur) en 2011. L'étude de l'évolution de la conductivité électrique montre que les fortes variations au niveau des piézomètres et forages sont indépendantes de celles observées dans l'étang (comprises entre

1000 et 11000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Ainsi, au vu de ces résultats, nous ne pouvons pas considérer que l'étang joue un rôle dominant dans l'origine de la salinité de l'aquifère du Gol.

Remarque : la dynamique de minéralisation/salinité des puits est réalisée et discutée dans la partie traitement du signal (§ 6.3).

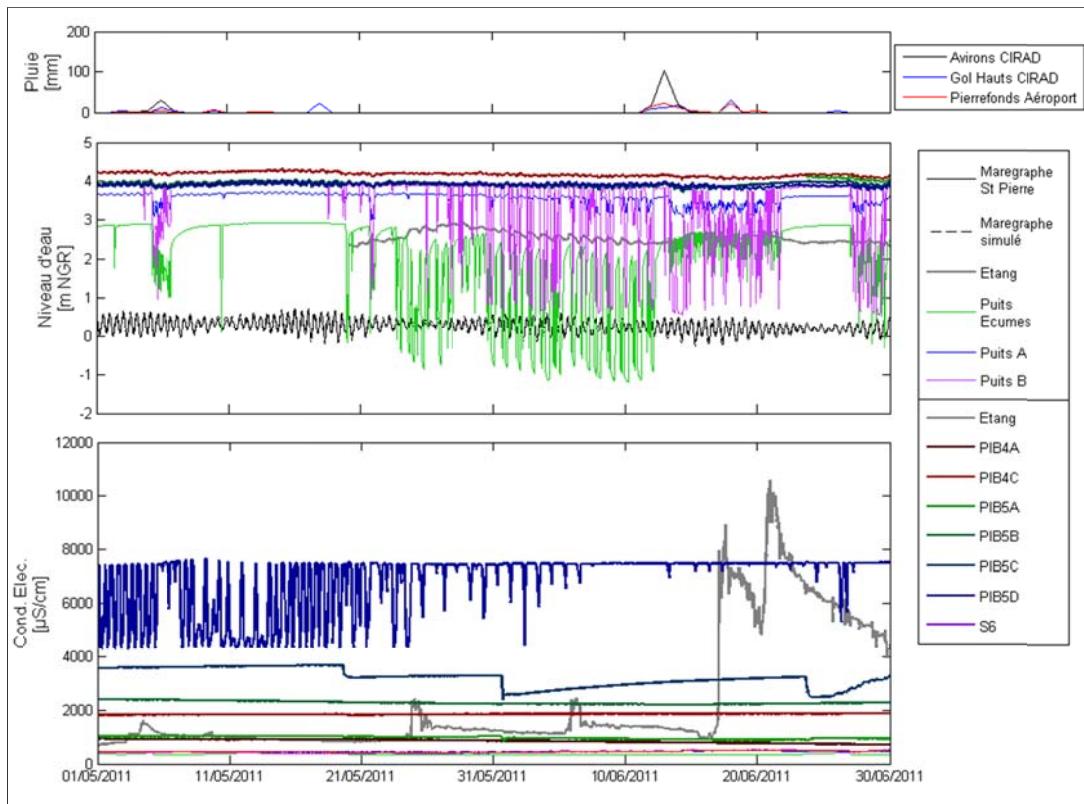


Figure 50 : Chroniques hydrogéologiques de l'étang et des ouvrages en mai et juin 2011.

La contribution d'eau de mer  $f_{\text{ocean}}$  pour chaque échantillon a été calculée à partir des signatures géochimiques de l'océan et de la recharge d'altitude non impactée par l'intrusion saline selon la formule suivante :

$$f_{\text{ocean}} = (m_{\text{él}, \text{échantillon}} - m_{\text{él}, \text{recharge}}) / (m_{\text{él}, \text{ocean}} - m_{\text{él}, \text{recharge}})$$

avec  $m_{\text{él}, \text{échantillon}}$  la teneur en élément de l'échantillon

$m_{\text{él}, \text{recharge}}$  la teneur en élément de la recharge (données des sources d'altitude)

$m_{\text{él}, \text{ocean}}$  la teneur en élément de l'océan

L'analyse par puits des contributions d'eau de mer  $f_{\text{ocean}}$  est réalisée sur la base des éléments Cl, SO<sub>4</sub>, K, ainsi que du Sr (*i.e.* Sr x <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr). Les résultats sont présentés sur la Figure 51.

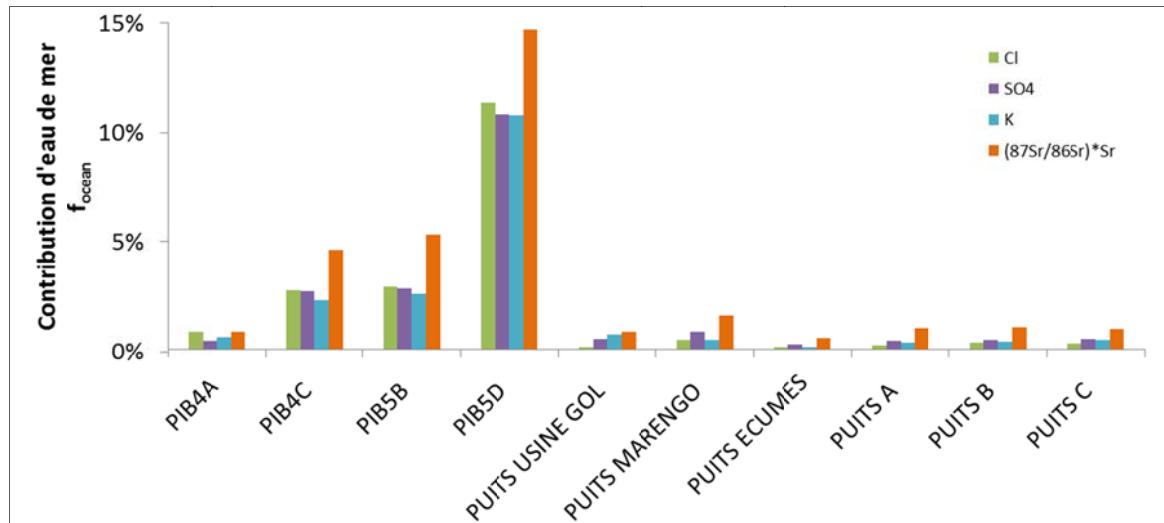


Figure 51 : Contribution d'eau de mer pour chaque site calculée à partir des teneurs en Cl, K, SO<sub>4</sub> et Sr ( $\text{Sr} \times {}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr}$ ).

On observe tout d'abord une très bonne cohérence des résultats selon les quatre éléments testés pour calculer la contribution d'eau de mer. Ces résultats étaient attendus pour les éléments Cl, K et SO<sub>4</sub> pour lesquels la teneur dans l'eau de mer est très élevée, mais ils montrent également que le rapport isotopique du Sr peut être un très bon marqueur de l'intrusion saline pour les aquifères côtiers.

Globalement la contribution d'eau de mer est faible car systématiquement inférieure à 15%. La contribution augmente avec la proximité au littoral (PIB5 comparé aux autres puits) et avec la profondeur (PIB5D comparé à PIB5B, et PIB AC comparé à PIB4A). En comparant  $f_{\text{ocean}}$  pour chaque ouvrage, on distingue les groupes suivants :

- Le PUITS ECUMES à 0.3%,
- Les PUITS A, B, C, PIB4A, et USINE DU GOL autour de 0.6%,
- Le puits MARENGO à 0.9%,
- PIB4C, PIB5B autour de 3.3%,
- PIB5D à 11.9%.

### 5.3. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS ISSUS DE L'APPROCHE HYDROGÉOCHIMIQUE

En confrontant les différents résultats de l'approche hydrogéochemique, plusieurs groupes d'eau se différencient, et permettent de dessiner un schéma de fonctionnement hydrogéochemique.

Ces groupes s'identifient très bien du point de vue de leur position géographique et de la profondeur des formations captées, et permettent de compartimenter des écoulements NNE-SSW selon des axes de drainage parallèles aux dépôts des coulées volcaniques. Deux grands compartiments se distinguent et confirment la compartimentation déduites de pompages d'essai :

**Compartiment Ouest** : encaissant de la paléo-vallée des Makes dans les formations anciennes des coulées basaltiques Beta II incluant MARENGO et ECUMES. Ce compartiment est faiblement impacté par l'intrusion saline, et possède une altitude moyenne de recharge située

autour de 1 050 m. La variabilité hydrogéochimique au sein de ce compartiment reste limitée mais pourrait tout de même être attribuée à une sous-compartimentation plus locale du PUITS ECUMES qui est plus préservé des apports superficiels et de l'intrusion saline que MARENGO.

**Compartiment Est** : compartiment dans les formations basaltiques plus récentes de la paléo-vallée des Makes incluant PUITS A, B, C, PIB4A, PIB4C, PIB5B, PIB5D, BOIS DE NEFLES, et PUITS USINE DU GOL. La variabilité de l'hydrogéochimie au sein de ce compartiment est liée :

- i) à la profondeur des formations captées,
- ii) à la localisation sur un axe NW-SE,
- iii) à la distance à la mer,
- iv) à l'exploitation (pompage ou non).

On observe une variabilité de l'altitude moyenne de recharge en fonction de la profondeur. PIB5D, l'ouvrage le plus profond près de la côte, possède l'altitude moyenne de recharge la plus élevée (1 740 m). Cela va dans le sens d'une stratification des écoulements au sein de la paléo-vallée avec un effet de versant (lignes de courant des plus hautes altitudes vers les plus grandes profondeurs en bas de versant). Ceci est cohérent avec un modèle hydrogéologique réunionnais impliquant une stratification avec la profondeur d'écoulements majoritairement sub-horaux (les plus profonds ayant les temps de résidence les plus anciens).

Les pompages sont à l'origine de la variabilité hydrochimique entre forages d'exploitation et piézomètres. Au contraire des ouvrages exploités pour l'irrigation (PUITS A, B, C, BOIS DE NEFLES, USINE DU GOL), les piézomètres PIB4A, PIB4C, PIB5B sont préservés de toute activité anthropique et présentent les plus fortes salinités. Les pompages semblent donc être à l'origine d'apports superficiels (peu salés et contaminés en NO<sub>3</sub>) liés à un accroissement de la drainance des formations quaternaires plus exposées à l'agriculture.

Sur le transect des forages d'exploitation PUITS B, A, C, BOIS DE NEFLES, et PUITS USINE DU GOL, on observe une augmentation des apports superficiels dans une direction W-E : l'altitude de recharge est plus basse pour USINE DU GOL et est associée à des pics de nitrates plus élevés. En l'état nous ne pouvons clairement définir si ces apports à l'Est sont liés à une plus grande pression anthropique (*return flow*, rejets d'usine, ou zone urbaine de Camp du Gol), mais ils sont également associés à un plus faible impact de l'intrusion saline et à des eaux avec un temps de résidence légèrement plus long.

La salinité est plus élevée vers le littoral et en profondeur, ce qui est cohérent avec une profondeur de l'interface eau douce/eau salée qui augmente lorsque l'on s'éloigne du littoral.

Des études complémentaires doivent être menées. Notamment, il serait intéressant d'analyser les isotopes du Bore qui permettrait de clairement discriminer les apports depuis la mer et l'étang du Gol. En effet, même si ce dernier paraît peu contribuer à la salinisation de l'aquifère du Gol, des apports ponctuels significatifs ne sont cependant pas à exclure.

Une étude saisonnière paraît également nécessaire pour bien contraindre l'évolution de la salinisation des eaux en vérifiant si l'étang contribue ponctuellement à la salinisation de l'aquifère lorsqu'il se met en charge. Deux types de suivi peuvent être envisagés : un suivi mensuel pendant un an pour enregistrer le bruit de fond et surtout un suivi lors de la montée des niveaux d'eau dans l'étang. Mais pour aller plus loin par rapport aux conclusions actuelles, un piézomètre supplémentaire, même superficiel, implanté entre les forages et l'étang, est à prévoir. Le suivi concernerait les éléments majeurs dans les forages et piézomètres, les eaux de l'étang et des ravines Maniron et du Gol. Le suivi doit être plus fin sur les ouvrages les plus proches de l'étang

## 6. Approche par traitement du signal

Le traitement du signal permet d'étudier le fonctionnement d'un aquifère à partir de l'analyse de séries de données, et de l'analyse de leurs relations.

Cette méthode est a priori bien adaptée au cas de la plaine du Gol pour les deux raisons principales suivantes :

- les paramètres et leurs influences mutuelles sont multiples : niveaux, conductivité, paramètres chimiques, pompages, marées, précipitations ;
- les chroniques de données sont nombreuses tant sur les paramètres que sur les points de mesure et à des pas de temps suffisamment courts pour permettre l'étude de divers processus aux cinétiques variées.

Les analyses corrélatoire, spectrale et en ondelette ont été appliquées. Les résultats sont synthétisés au paragraphe 6.3.

Les abréviations suivantes sont utilisées dans ce chapitre :

- ACF : Fonctions d'autocorrélation.
- CCF : Fonctions de corrélation croisées.
- PSD : Densité spectrale de puissance.
- TF : Transformée de Fourier.
- TO : Transformées en ondelettes.
- WT : scalogramme simple.
- XWT : scalogramme croisé.

### 6.1. MÉTHODOLOGIE

#### 6.1.1. Analyses corrélatoire et spectrale (Fourier)

##### ***Généralité sur l'étude fonctionnelle des aquifères par les analyses corrélatoire et spectrale***

Les analyses corrélatoire et spectrale s'inscrivent dans le cadre de l'approche dite fonctionnelle de l'étude des hydrosystèmes et se basent sur les techniques de l'analyse statistiques des séries chronologiques (Jenkins et Watts, 1968 ; Box and Jenkins, 1974 ; Mangin 1975).

Le principe de base de ces méthodes est d'assimiler le système aquifère à un filtre qui laisse plus ou moins passer l'information contenue dans un signal d'entrée. Dans cette approche, l'aquifère est assimilé à une « boîte noire » dont la pluie et la piézométrie, par exemple, représentent respectivement l'entrée et la sortie. Les chroniques des signaux d'entrée et de sortie peuvent être traitées séparément dans le domaine temporel (analyse corrélatoire), ou dans le domaine fréquentiel (analyse spectrale). **L'intérêt des méthodes corrélatoire et**

**spectrale est de mettre en évidence les phénomènes structurés influençant l'évolution temporelle des chroniques de mesure.**

### **Analyse corrélatoire**

**L'analyse corrélatoire simple (ou fonction d'auto-corrélation ACF)** traduit la dépendance dans le temps des événements affectant la chronique, selon des intervalles de temps de plus en plus grands. Elle permet de tester le caractère répétitif des séries temporelles et leurs éventuelles natures cycliques. Le degré de ressemblance d'une série avec la même série décalée dans le temps est déterminé à l'aide de la fonction d'autocorrélation définie comme la valeur de la corrélation linéaire entre les valeurs des deux séries. Sur les chroniques de piézométrie par exemple, cette analyse permet de caractériser « *l'effet mémoire* » de l'aquifère qui traduit la dépendance dans le temps des valeurs piézométriques en présentant une décroissance plus ou moins rapide de la corrélation. En d'autres termes, *l'effet mémoire* est directement lié à l'inertie du système ; *l'effet mémoire* étant d'autant plus grand que le filtrage introduit par le système est important.

**L'analyse corrélatoire croisée (ou fonction de corrélation croisée CCF)** permet l'étude de la relation entrée-sortie et fournit une image approchée de la réponse impulsionnelle du système par le corrélogramme croisé. Le *délai* (Lag) qui est égal au décalage obtenu pour le maximum de corrélation ( $r_{max}$ ) entre les deux séries détermine le temps de réponse du système.

### **Analyse spectrale**

**L'analyse spectrale simple (ou densité spectrale de puissance PSD)** permet d'identifier les différentes composantes de la variance totale en fonction de la fréquence. En d'autres termes, la densité spectrale de puissance permet de caractériser :

- les tendances du système à long terme,
- les phénomènes périodiques saisonniers,
- les phénomènes purement aléatoires assimilables au bruit de fond.

D'un point de vu mathématique, la densité spectrale de puissance est déterminée par la transformée de Fourier du corrélogramme simple (Box et Jenkins, 1974).

Les spectres traduisent le même phénomène que la fonction d'autocorrélation. Ils montrent que cet effet mémoire correspond à un filtrage des hautes fréquences au profit des basses fréquences. Dans le cas de la piézométrie, il est possible d'interpréter cette mémoire comme étant due au stockage d'un certain volume d'eau au moment des épisodes pluvieux, le déstockage apparaissant beaucoup plus tard (Mangin, 1984). Cet effet serait donc directement lié à l'importance des réserves. Les spectres permettent, en outre, dans le cas de systèmes ayant une relation entrée-sortie de type causal (pluie-piézométrie par ex.), de déterminer le temps de régulation qui exprime la durée d'influence de l'entrée du système.

**L'analyse spectrale croisée** de deux séries se définit comme la transformée de Fourier du corrélogramme croisé. Cette grandeur permet de définir les quatre fonctions d'amplitude, de cohérence, de phase, et de gain.

La **fondction d'amplitude** traduit, pour chaque fréquence, l'amplitude de la relation entrée-sortie. Cette fonction est très importante puisqu'elle guide l'interprétation. Il est en effet impératif

de n'interpréter les liaisons entre l'entrée et la sortie que pour les fréquences où l'amplitude de la covariance est élevée (matérialisée par des pics). Pour les autres fréquences, la faible covariance signifie qu'il n'y a pas de relation entrée-sortie.

La **cohérence** décrit le degré de liaison entre deux signaux de même période. Deux signaux périodiques sont d'autant plus cohérents que le carré de la cohérence ( $C^2$ ) est élevé. A une fréquence donnée, pour  $C^2=0$  les deux signaux ne présentent aucune relation de causalité. Par contre, pour  $C^2=1$  il existe une relation linéaire entre les deux signaux. La fonction de cohérence conduit l'interprétation car la relation entrée-sortie n'est valable que pour les fréquences où la cohérence est voisine de 1.

La **fonction de phase** indique, fréquence par fréquence, la valeur du déphasage entrée-sortie introduit dans le système. Ce déphasage représente le temps de circulation de l'information, ce temps étant proportionnel au stockage dans le système. Pour deux signaux périodiques cohérents à une fréquence donnée (ayant une relation causale du type entrée-sortie), le spectre de phase caractérise le retard de la sortie par rapport à l'entrée si le déphasage est positif, ou l'avance si le déphasage est négatif. La phase  $O$  exprimée en degrés permet de calculer le déphasage  $\tau$  (ou dans notre cas du temps de transfert au sein de l'aquifère) pour une période donnée  $t_0$  comme suit :

$$\tau = \frac{t_0 \times O}{360} \quad \text{avec } t_0 = 1/f_0$$

La **fonction de gain** quantifie la transformation, imputable au système, de l'information entre l'entrée et la sortie. Si, pour une fréquence donnée, l'amplitude du signal n'est pas modifiée, le gain est égal à 1. La modification de l'amplitude sera une atténuation ou une amplification suivant la valeur du gain. L'intégration de cette fonction gain sur toute la bande des fréquences est inférieure à 1 car tout système consomme nécessairement de l'énergie (le bilan est nécessairement déficitaire).

### **Calcul de la diffusivité du milieu**

La diffusivité  $D$  est le rapport de la transmissivité  $T$  de l'aquifère à l'emmagasinement  $S$ . Elle permet de caractériser la réactivité de la nappe suite à une perturbation : plus  $D$  est élevée, plus la nappe est dite « nerveuse ».

En général,  $T$  et  $S$  sont obtenus suite à l'interprétation d'un pompage d'essai. Mais il est possible d'obtenir ces mêmes paramètres par l'analyse des variations naturelles de la piézométrie. La condition est que les phénomènes responsables de ces variations soient simples, bien structurées et très reconnaissables. C'est notamment le cas de l'influence de la barométrie ou des marées qui possèdent des composantes périodiques aisément identifiables.

Elle peut être calculée à partir de la distance de l'ouvrage à l'océan  $x$  et du temps de transfert  $\tau$  (*ou déphasage*) obtenu pour une période  $t_0$  par l'équation suivante (Jacob, 1950) :

$$\tau = x \sqrt{\frac{t_0 S}{4\pi T}} \quad \text{soit} \quad D = \left( \frac{x}{\tau} \right)^2 \frac{t_0}{4\pi}$$

Les analyses corrélatoires et spectrales ont été réalisées à l'aide de fonctions MATLAB ©. Les calculs ont été réalisés au pas de temps journalier.

### 6.1.2. Analyse en ondelette

#### ***Généralité sur l'étude fonctionnelle des aquifères par les analyses en ondelette***

Pour étudier un signal qui a en général une allure irrégulière, il est intéressant de pouvoir mettre en évidence de manière simultanée les informations temporelles et fréquentielles (localisation temps-fréquence). En effet, la transformée de Fourier TF – décrite précédemment - reste incapable de décrire localement (en temps) le comportement fréquentiel des signaux. Par exemple, sur une fenêtre de données comprenant plusieurs cycles hydrologiques, les analyses corrélatoire et spectrale donnent un résultat moyen qui ne permet pas de caractériser la variabilité temporelle des phénomènes (occurrence de certains phénomènes uniquement pour les années sèches/humides, tendances à la hausse ou à la baisse, etc.).

La transformée en ondelettes TO est un outil mathématique qui décompose un signal en fréquences en conservant une localisation spatiale ou temporelle. Elle a la capacité de changer la taille de la fenêtre à différentes résolutions temps-fréquence, et permet donc une analyse multi-échelle. La TO est donc utilisée pour mettre en évidence la non-stationnarité des phénomènes périodiques quand ils existent.

#### ***La transformée en ondelettes continue***

La transformée en ondelettes TO continue utilise des translations et des dilatations de la fonction ondelette mère sur tout l'intervalle de temps de manière continue.

Ainsi par ses propriétés de dilatation-contraction et de translation, la TO est caractérisée dans le plan temps-échelle (ou temps-fréquence) par une fenêtre dont la largeur diminue lorsqu'on se focalise sur les structures de petite échelle (haute fréquence) ou s'élargit lorsqu'on s'intéresse au comportement à grande échelle (basse fréquence).

A titre de résumé et d'illustration, nous reprenons la présentation faite par Labat et al. (2000), qui proposent une comparaison des représentations temporelle, fréquentielle et temps-échelle par ondelettes de deux signaux synthétiques (Figure 52). Le premier signal (a) est la superposition de deux fréquences sur l'ensemble du domaine temporel étudié ; le second signal (d) comprend une unique haute fréquence sur la première moitié du domaine temporel et une unique basse fréquence sur la seconde moitié. La figure illustre l'incapacité de la Transformée de Fourier TF (Figure 52b et e) à caractériser des signaux évoluant dans l'espace. Bien que la TF nous informe qu'il y a deux fréquences majeures dans le signal, elle est incapable de faire une distinction entre ces deux signaux. Développant le signal sur une base dont les propriétés temps-fréquence sont adaptées à la structure locale du signal, les ondelettes sont capables d'évaluer le contenu fréquentiel du signal en fonction du temps (Figure 52c et f).

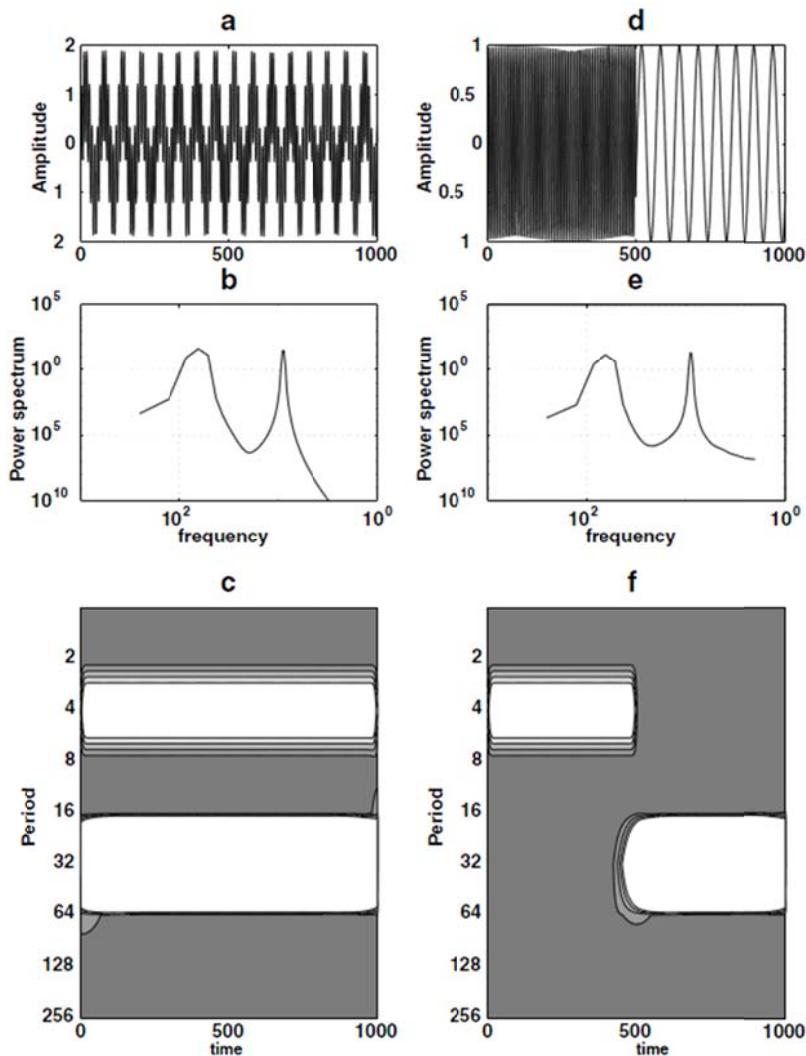


Figure 52 : Signaux composés de deux fréquences principales se chevauchant sur tout l'intervalle (a), et non recouvertes (d) ; DSP semblable pour les deux signaux (b) et (e) ; Spectres en ondelettes de Morlet (c) et (f) qui affichent la localisation temps-fréquence (d'après Labat et al., 2000).

**Le scalogramme simple (WT)** est un spectre en ondelettes continues, par analogie avec l'analyse spectrale simple. Il fournit une représentation des caractéristiques d'une série dans le plan temps-fréquence et met donc en évidence la variabilité temporelle des structures périodiques.

**Le scalogramme croisé (XWT)** est un spectre en ondelettes continues, par analogie avec l'analyse spectrale croisée. Il fournit une représentation des interactions entre deux séries qui est particulièrement utile pour caractériser les interactions entre deux signaux non stationnaires. Cependant, d'après Maraun et Kurths (2004), la cohérence entre deux signaux uniquement basée sur le scalogramme croisé est un artefact. Il est recommandé d'utiliser le spectre de cohérence en ondelettes pour interpréter les interrelations entre deux séries lorsque la cohérence est proche de 1.

Les analyses en ondelette continues ont été réalisées à l'aide de fonctions MATLAB © développées par Torrence et Compo (1998) et Grinsted et al. (2004). Les calculs ont été réalisés au pas de temps journalier.

### ***Filtrage par analyse multi-résolution***

L'analyse multi-résolution est un outil qui permet de décomposer un signal à plusieurs échelles (résolutions). La méthode permet d'isoler des phénomènes périodiques ou d'utiliser un filtre passe-bande pour retirer les fréquences recherchées : en ciblant les hautes fréquences (bruit sur la mesure, pertes de charges quadratiques dus aux pompages, influence de la marée, etc.), ou en gommant les basses fréquences (dérives, tendances à longs termes, etc.). Le filtrage multi-résolution a été réalisé à l'aide de fonctions MATLAB © développées par Torrence et Compo (1998) et WAVELET850 ([http://www-stat.stanford.edu/~wavelab/Wavelab\\_850/index\\_wavelab850.html](http://www-stat.stanford.edu/~wavelab/Wavelab_850/index_wavelab850.html)).

#### **6.1.3. Données**

Les informations sur les données propres à l'aquifère du Gol ont été présentées au § 3. Les données de précipitation et de marée sont présentées ci-après. Les séries chronologiques de données ont été traités sur la période du 30/11/2007 au 18/01/2012.

#### ***Pluie***

Les données de pluie (Météo France) utilisées sont issues de plusieurs stations afin de prendre en compte la variabilité des précipitations avec l'altitude. En effet, des études précédentes sur le secteur nord de l'île de La Réunion ont mis en évidence l'influence des pluies d'altitude sur la réponse piézométrique au niveau du littoral (Ladouche et al., 2006 ; Aunay et al., 2010). Trois stations Météo-France ont été choisies : LES AVIRONS – CIRAD, LE GOL LES HAUTS – CIRAD, et PIERREFONDS-AERO.

#### ***Marée***

Les données du marégraphe de St Pierre proviennent de l'Office de l'Eau de La Réunion. Elles comportent des lacunes. Pour combler le manque de données, une chronique simulée du marégraphe de St-Pierre a été réalisée à partir des données du marégraphe de la Pointe des Galets (données du portail des réseaux de référence des observations marégraphiques - REFMAR sur <http://refmar.shom.fr>).

## 6.2. RÉSULTATS

### 6.2.1. Analyse des chroniques hydrogéologiques

#### *Evolutions récentes (2007-2012)*

La Figure 53 présente 4 cycles hydrologiques de novembre 2007 à janvier 2012.

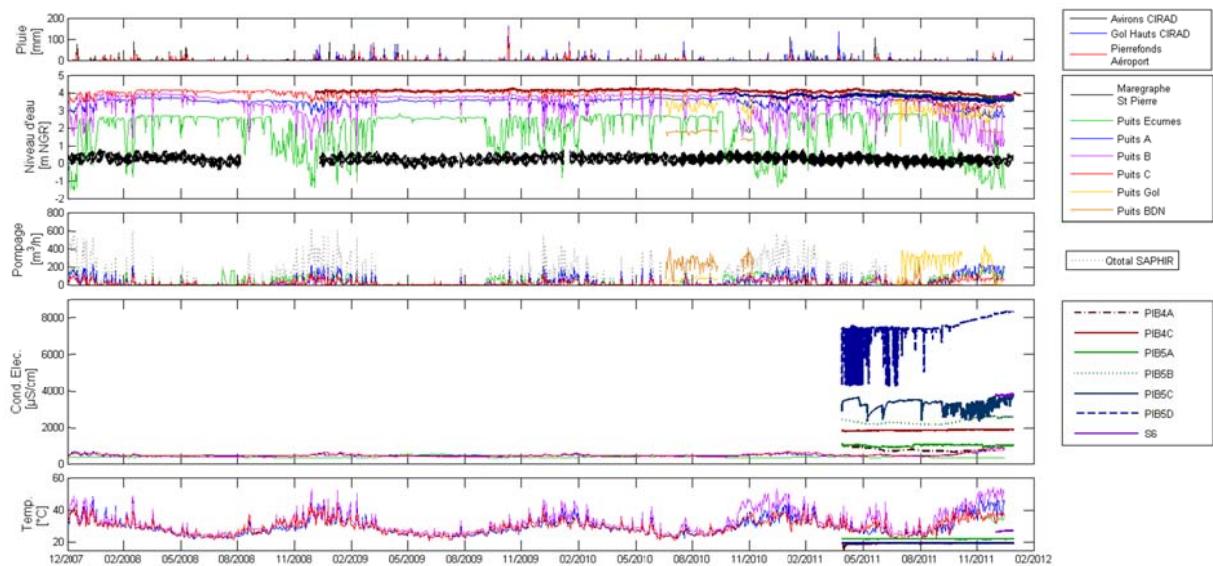


Figure 53 : Chroniques hydrogéologiques journalières 2008-2012 des forages et piézomètres de la Plaine du Gol

Les chroniques de pompage montrent globalement des variations synchrones et d'amplitude comparable pour les 4 puits de la SAPHIR (Ecumes, puits A, B, et C), avec un débit quasiment nul de mai à août et une période de pompage liée à l'irrigation de la canne à sucre entre septembre et avril. Le débit total des puits de la SAPHIR approche les 600 m<sup>3</sup>/h en pointe. Sur les chroniques disponibles des puits de l'usine sucrière (Puits du Gol et Bois de Nèfles), les débits sont de l'ordre de 300 à 400 m<sup>3</sup>/h chacun. Les données disponibles sur de courtes périodes ne permettent pas de caractériser leur variabilité.

Les variations des chroniques de niveau d'eau de chacun des forages de la SAPHIR sont fortement liées à celles des débits pompés au droit des ouvrages. De fortes variations de niveau d'eau de plusieurs mètres engendrées par les pertes de charges quadratiques et linéaires sont visibles lorsque les pompages s'arrêtent et se relancent.

Les variations de la conductivité électrique et de la température des puits de la SAPHIR sont fortement liées aux périodes de pompage. Celles des piézomètres PIB4 et PIB5 sont discutées dans la suite de l'étude, mais on peut observer une tendance à l'augmentation à partir d'août 2011, synchrone d'une tendance à la baisse pour les niveaux d'eau.

Sur la chronique d'avril 2011 à janvier 2012 (Figure 54), sont présentées les données horaires des chroniques hydrogéologiques, des pompages, ainsi que de la marée. Les données de conductivité électrique (CE) sont complètes sur tous les forages de la SAPHIR et des

piézomètres, mais manquent pour les deux forages de l'usine sucrière (Puits du Gol et Bois de Nèfles). Une évolution remarquable est observée au droit du PIB5 – multi-piézomètre qui permet de mesurer les paramètres hydrogéologiques à 4 profondeurs différentes sur la même verticale (respectivement PIB5A, PIB5B, PIB5C, et PIB5D aux profondeurs [12,9-17,9], [34,2-37,3], [42,2-45,2], et [54,8-74,8] m). Pour PIB5D, de très fortes variations de CE entre 4200 et 7500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  disparaissent progressivement pour plafonner à 7500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  puis augmenter à partir d'août 2011 à des valeurs de près de 8500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . La disparition de ces variations en PIB5D laisse place à l'apparition de variations de moindre importance en PIB5C.

Pour interpréter convenablement ces fluctuations, un zoom est réalisé sur la période *mai-juin 2010* (Figure 55) où on observe la succession d'une période de plusieurs dizaines de jours sans pompage avec une période de pompage quasiment continue à partir du 21/05/2011. On observe nettement que les fortes oscillations journalières de conductivité entre 4200 et 7500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  sont liées aux oscillations à 24h de la marée lors des périodes sans pompage. Les pompages et leur intensification fin mai – début juin (Q total de 400 à 600  $\text{m}^3/\text{h}$ ) engendre le maintien de la conductivité dans des valeurs hautes (plafonnement à 7 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) qui disparaît dès que les pompages s'arrêtent. Ceci montre l'influence des marées sur les fluctuations de la CE lorsque les mesures sont réalisées au niveau de la zone de transition eau douce/eau salée. Cette zone de transition est interprétée comme un fort gradient de salinité (de 4000 à 7500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) sur une verticale de quelques dizaines de cm. L'intensification des pompages serait à l'origine d'un déplacement de cette zone de transition.

Un second zoom est réalisé sur la période *septembre-octobre 2011* (Figure 56). On observe fin septembre l'apparition de fluctuations journalières de conductivité sur PIB5C lorsqu'elles ont complètement disparu en PIB5D. Ceci marque la montée de la zone de transition dans PIB5D qui montre une progression dans les terres de l'intrusion saline. La différence au niveau des valeurs de minéralisation comprises entre 2500 et 3500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  pour PIB5C peut être due à l'existence d'une compartimentation verticale de l'aquifère entre les crêtes de PIB5C et PIB5D qui engendre une hétérogénéité de l'intrusion saline par des phénomènes locaux de dilution .

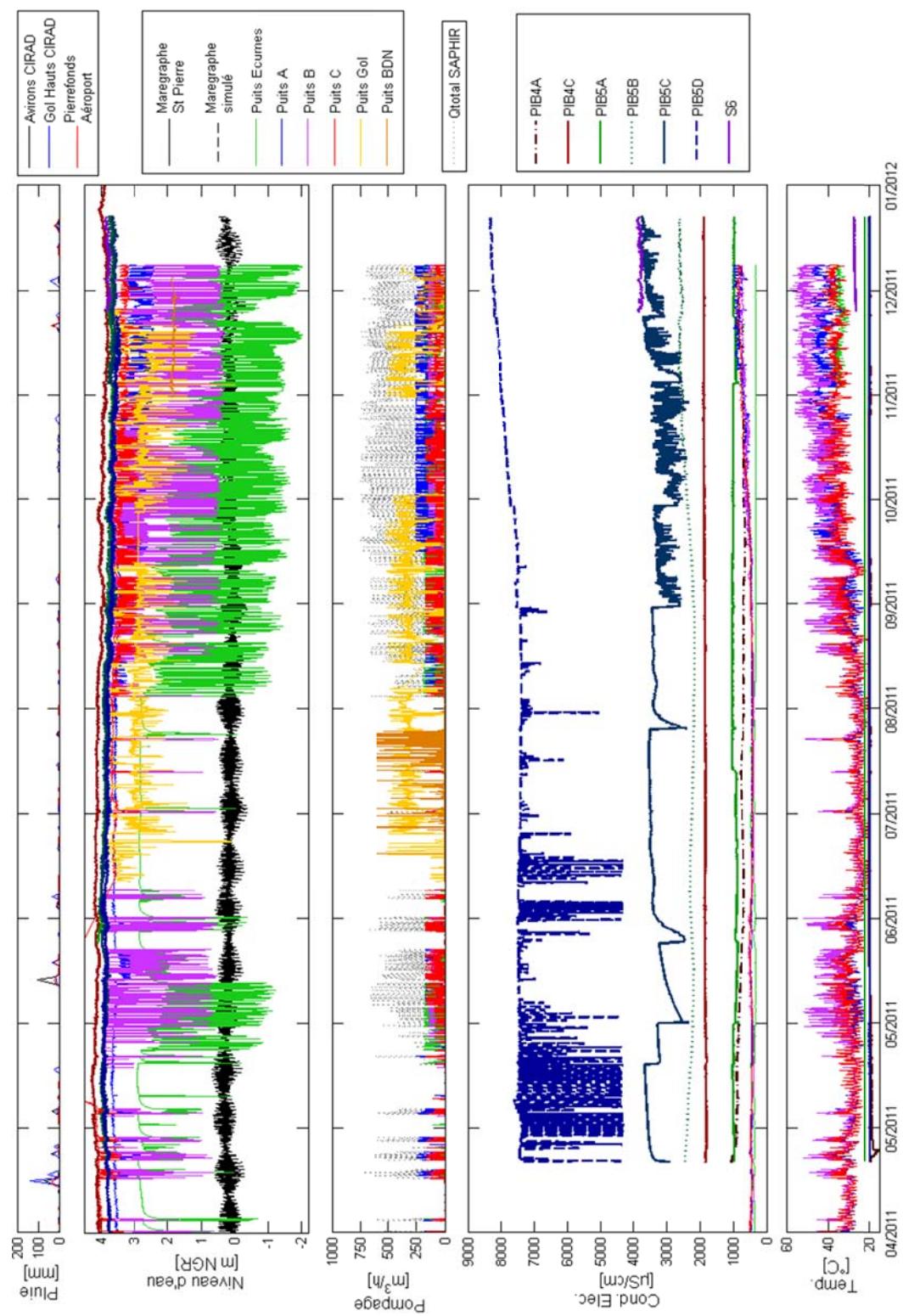


Figure 54 : Chroniques hydrogéologiques horaires 2011 des forages et piézomètres (avril 2011 à janvier 2012)

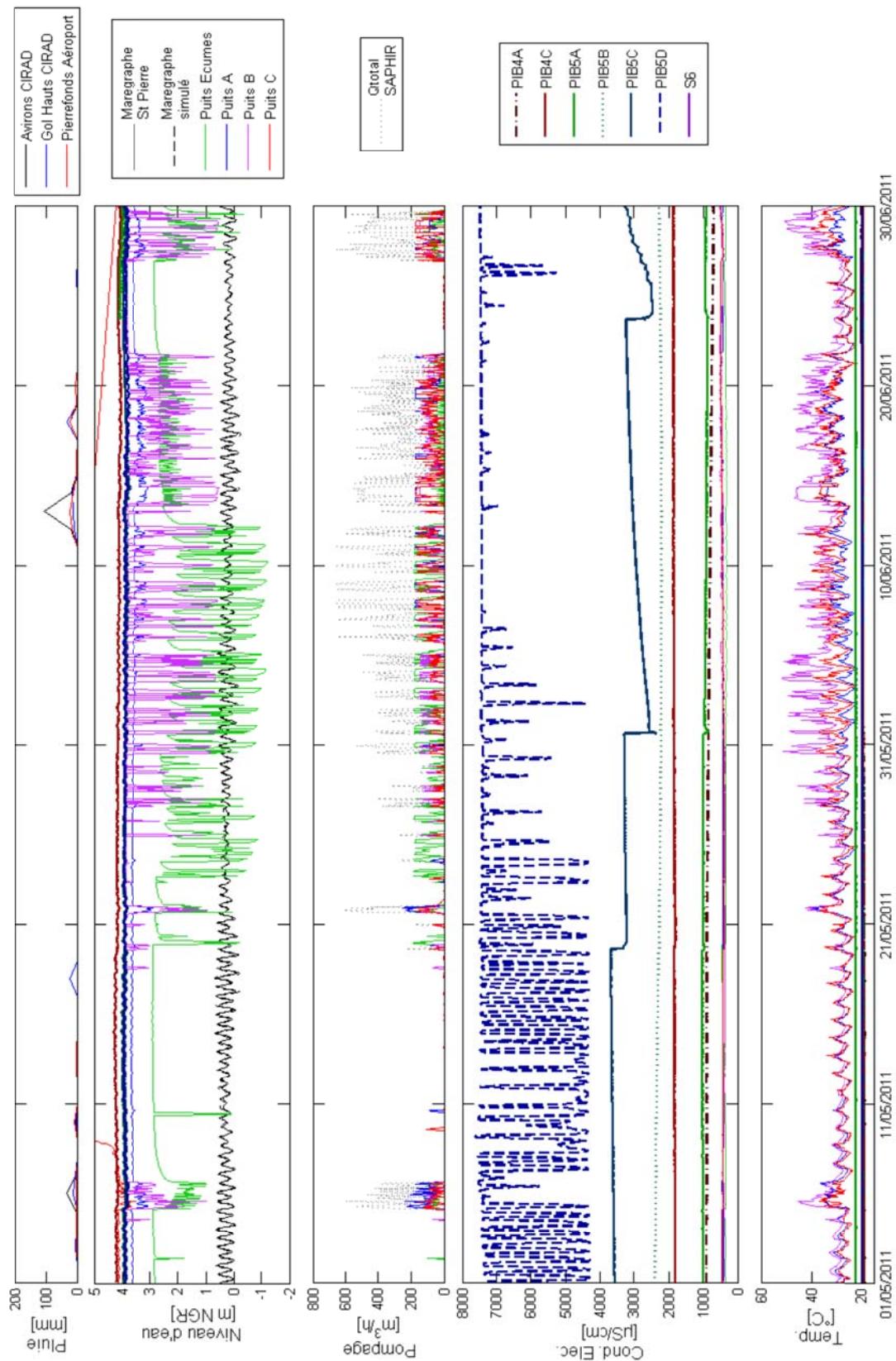
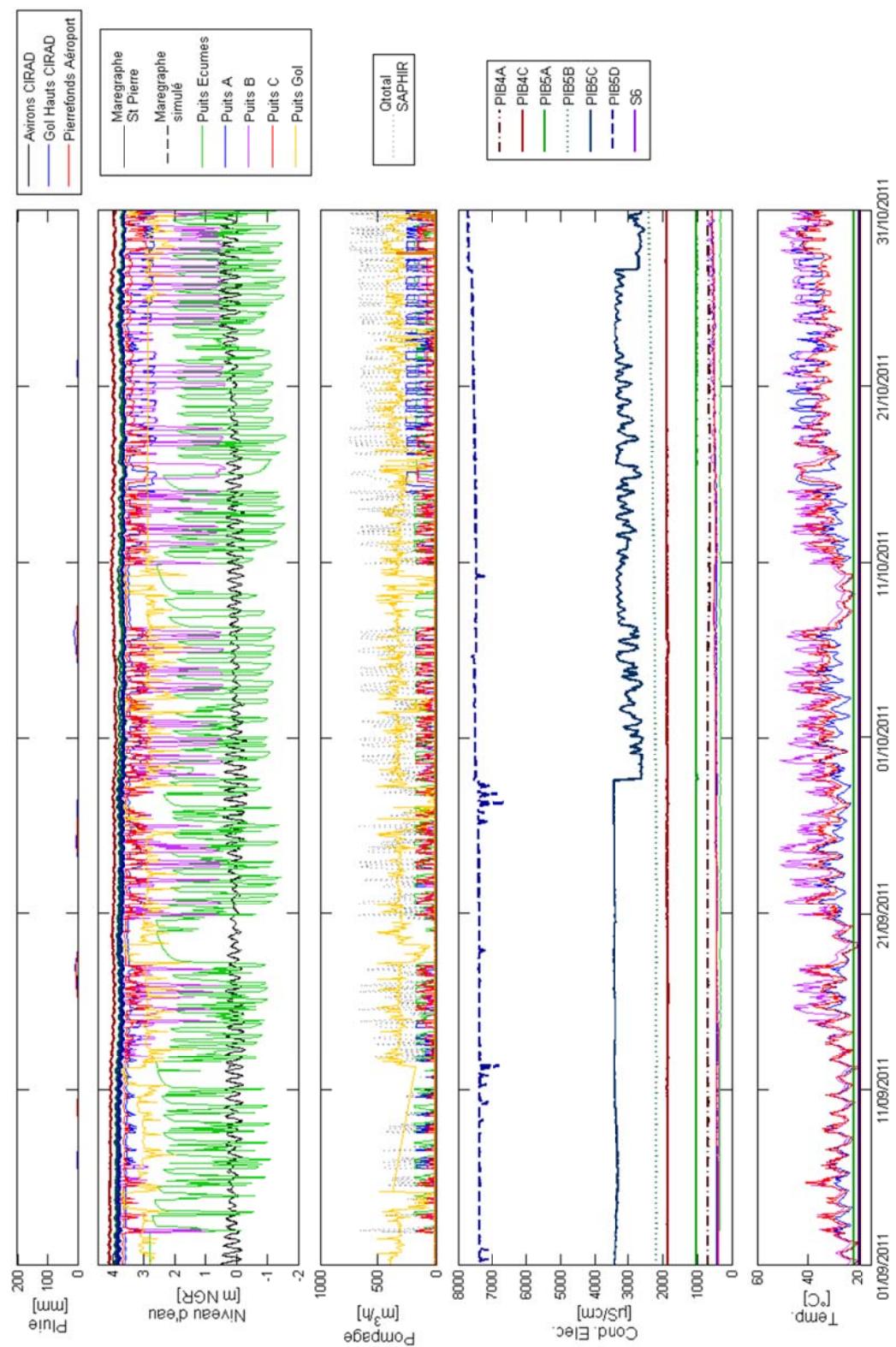


Figure 55 : Chroniques hydrogéologiques mai-juin 2011 des forages et piézomètres de la Plaine du Gol mettant en évidence l'influence de la marée sur l'évolution de la conductivité à PIB5D



*Figure 56 : Chroniques hydrogéologiques sept.-oct. 2011 des forages et piézomètres de la Plaine du Gol mettant en évidence la progression de l'interface eau-douce/eau salée (dont les variations sont contrôlées par la marée) de PIB5D à PIB4C*

## Evolutions historiques (1988-2012)

Un historique de mesures ponctuelles de conductivité (CE) existe pour PIB4C et PIB5D. Ces mesures ont été obtenues par la réalisation de logs de conductivité au niveau des crépines des ouvrages. A partir de ces logs, il est possible de représenter l'évolution de CE à une profondeur donnée. La Figure 57 présente l'évolution de CE depuis 1988 pour PIB5D à 96 m de profondeur et depuis 2006 pour PIB4C à 90 m de profondeur. L'essentiel des valeurs est borné entre 3800 et 8000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et ne montre pas de tendance à long terme. Sur PIB4C, nous n'avons pas le recul suffisant sur les données pour évaluer une tendance à long terme. A court terme, on observe une augmentation de la conductivité de 1600 à 1900  $\mu\text{S}/\text{cm}$  après une période de stagnation entre 2008 et 2011. Ces résultats sur la période 2006-2012 sont cohérents avec les observations de PIB5D et montrent qu'il existe une tendance à l'augmentation de la salinité ces dernières années pour les deux piézomètres.

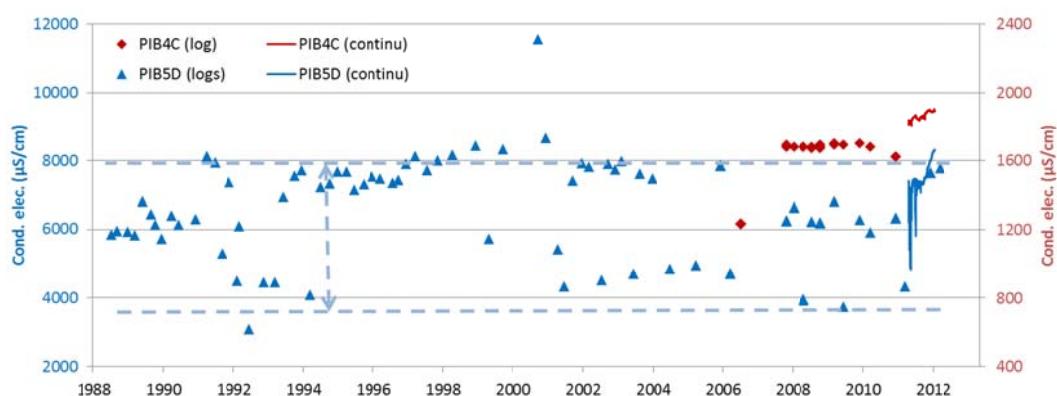


Figure 57 : Evolution de la conductivité électrique depuis 1988 et 2006 pour respectivement PIB5D (échelle des ordonnées en bleu à gauche) et PIB4C (échelle des ordonnées en rouge à droite) à partir des données de logs (données ponctuelles) et des données continues.

### 6.2.2. Analyses corrélatoire et spectrale

#### Analyse simple (univariée)

L'étude des corrélogrammes simples et spectres simples des chroniques hydrogéologiques permet de tester respectivement le caractère répétitif des séries temporelles et leurs éventuelles natures cycliques. La Figure 58 présente les fonctions de densité spectrale de puissance (PSD) et les fonctions d'auto-corrélation (ACF) pour les précipitations, les débits de pompage, et la piézométrie.

L'ACF des précipitations décroît très rapidement pour atteindre une valeur de 0, ce qui traduit des propriétés aléatoires du signal pluie. L'ACF des chroniques de pompage est très similaire pour les 4 forages de production de la SAPHIR et décroît lentement. Cela montre une stratégie de pompage similaire pour les différents ouvrages, et le caractère répétitif des périodes de pompage à court et moyen terme. Le pic à 365 j met en évidence la périodicité annuelle des pompages pour l'irrigation qui sont mis en route chaque année entre septembre et avril. Enfin, l'ACF des niveaux d'eau diffère selon les ouvrages et montre une décroissance plus lente pour

PIB5C, puits C, et PIB4C comparé aux autres ouvrages. Ceci traduit la nature plus inertielle de ces trois ouvrages.

Les pics des PSD des chroniques pluviométriques, de débit et de niveau d'eau mettent en évidence des phénomènes périodiques. Globalement, on observe des phénomènes annuels sur les chroniques de pompage et de la piézométrie qui ne sont pas visibles sur la chronique pluviométrique au pas de temps journalier (le phénomène annuel sur la pluie étant néanmoins visible à un pas de temps plus large). On observe peu de structures marquées de phénomènes saisonniers et/ou mensuels qui correspondent à des variations intra-annuelles contrastées et répétées.

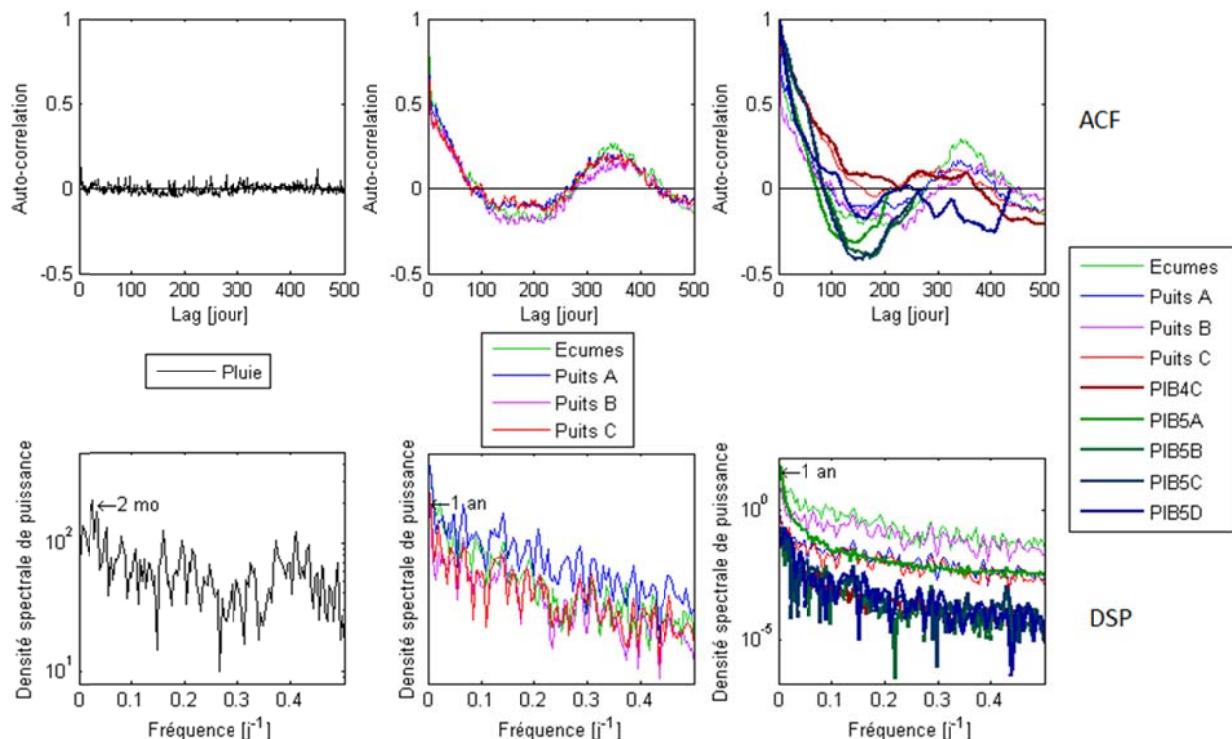


Figure 58 : Densité spectrale de puissance et fonction d'auto-corrélation sur les chroniques journalières de la pluie, des pompages et de la piézométrie.

### Analyse croisée (bivariée)

L'étude des corrélogrammes croisés (fonctions de corrélations croisées CCF) permet d'étudier la réponse des aquifères à la recharge par les précipitations, aux oscillations de la marée, et à la sollicitation par les pompages. Il permet en outre de qualifier la dynamique de transfert dans le système.

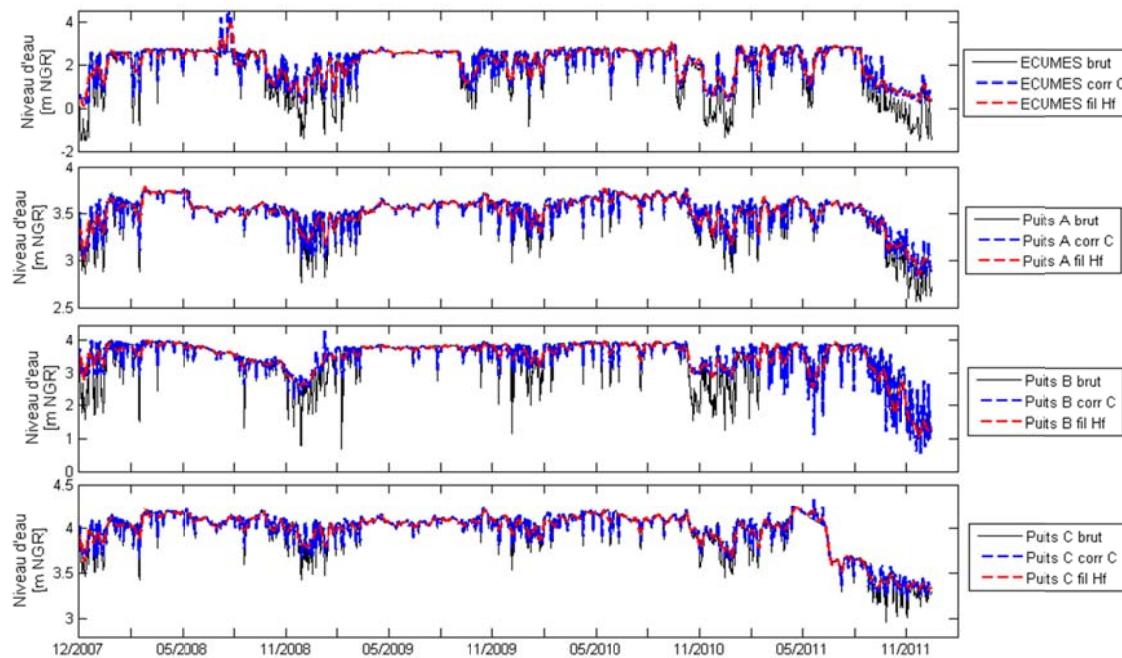
- **Correction et filtrage des chroniques piézométriques des forages bruités par les pertes de charges**

En préalable à l'analyse par traitement du signal, il convient de filtrer les données piézométriques fortement bruitées par les variations liées aux pertes de charges quadratiques et linéaires générées par les variations de débit de pompage.

Pour cela, une première correction du rabattement ( $s$ ) lié aux pertes de charges quadratiques ( $C$ ) a été réalisée à partir du débit pompé ( $Q$ ) suivant la formule suivante :

$$s = C \cdot Q^2$$

Les valeurs de  $C$  retenues sont celles calculées suite aux tests hydrauliques par paliers (§ 4).



*Figure 59 : Correction des séries piézométriques fortement bruitées par les pertes de charges quadratiques ( $C$ ); sont représentées les données brutes (en noir), les données corrigées de  $C$  (en bleu) à partir des variations de débit, et les données filtrées (en rouge) pour éliminer plus finement toutes les variations hautes fréquences liées à  $C$ .*

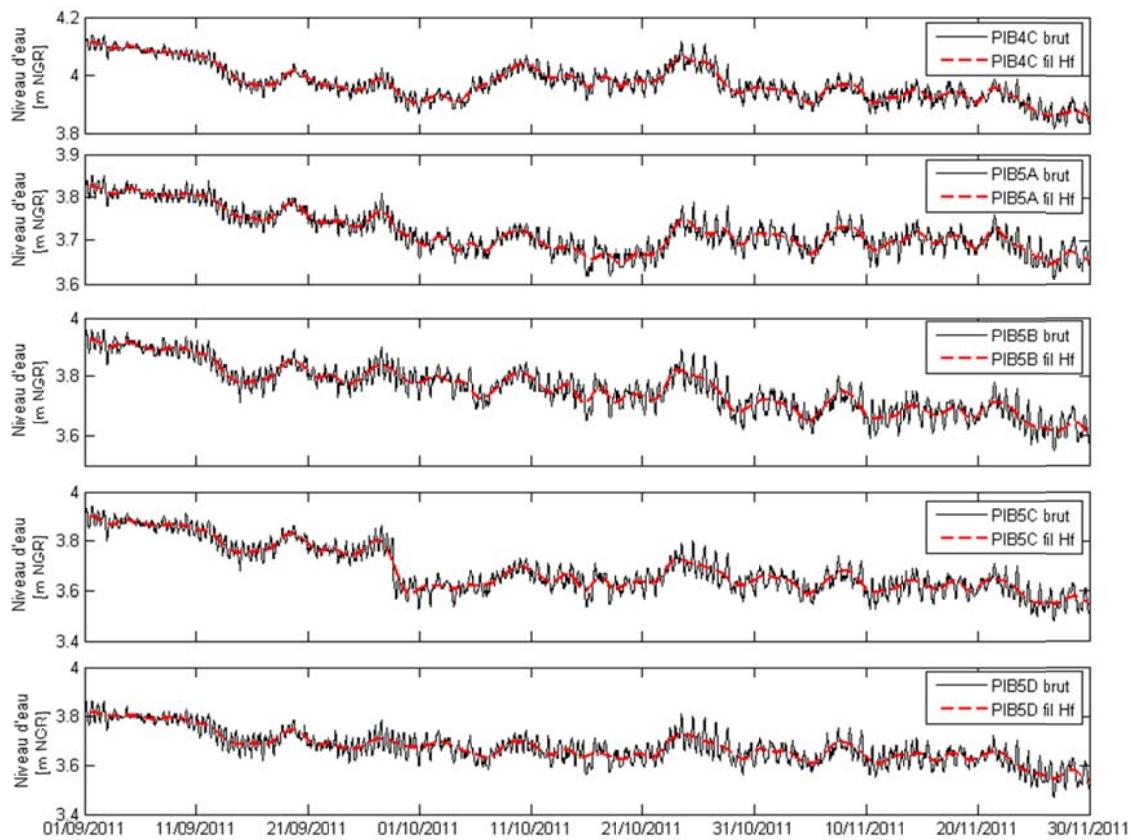
La première correction n'ayant pas totalement gommé les pertes de charges, une seconde correction du rabattement a été réalisée par filtrage des hautes fréquences à l'aide de l'analyse multirésolution (filtrage des phénomènes périodiques inférieurs à 6 jours pour s'affranchir des pertes de charge linéaires).

La Figure 59 présente le résultat de ce filtrage pour les 4 ouvrages puits Ecumes, A, B, et C, avec en noir les données brutes, en bleue les données corrigées des pertes de charges quadratiques ( $C$ ) et en rouge les données filtrées.

### Correction et filtrage des chroniques piézométriques influencées par la marée

Les données piézométriques sont fortement influencées par la marée. Pour les PIB4 et PIB5, un filtrage des phénomènes périodiques de 12 et 24h (phénomènes les plus importants en

amplitude) s'impose. Le filtrage a consisté à retirer les hautes fréquences supérieures à 32h ( $2^5$  h sur l'échelle dyadique) et est présenté Figure 60.



*Figure 60 : Correction des séries piézométriques influencées par les fluctuations du niveau marin ; sont représentées les données brutes (raw data), et les données filtrées de phénomènes périodiques inférieurs à 32 h (fil Hf).*

- **Influences de la recharge et des pompages**

Deux types de transfert se distinguent : le transfert de pression engendré par des variations de charge entre deux points connectés hydrauliquement, et le transfert de masse qui représente le transfert de la molécule d'eau entre deux points. Les processus impliqués dans le transfert de pression sont étudiés à l'aide de corrélogrammes croisés sur la base des chroniques piézométriques en sortie, et ceux impliqués dans le transfert de masse sont étudiés sur la base des chroniques de conductivité électrique (Figure 61).

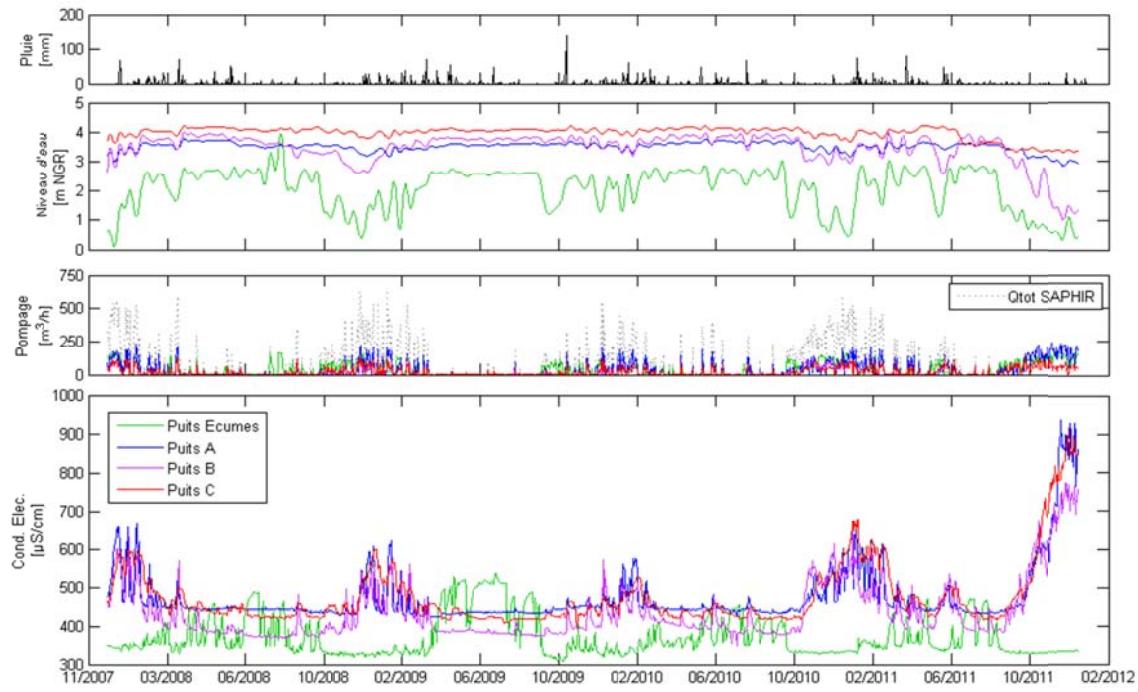


Figure 61 : Chroniques hydrogéologiques journalières 2007-2012 des forages de la SAPHIR mettant en évidence l'influence des pompages sur l'évolution de la piézométrie et de la conductivité électrique.

#### • Processus impliqué dans les transferts de pression

En se focalisant sur les fonctions de corrélation croisées CCF issues des données piézométriques filtrées (Figure 62, en haut), on observe tout d'abord pour les **CCF pompage-rabattement**<sup>6</sup> (Figure 62 en haut à droite) un maximum de corrélation entre 0.5 et 0.8 pour un lag à 0 jour. Cela montre une forte corrélation positive entre les deux signaux : une augmentation du rabattement (baisse de la piézométrie) est liée à l'intensification des pompages sur plusieurs jours (ce phénomène n'est donc plus lié aux pertes de charges quadratiques dont la cinétique est très rapide (qq minutes/heures)). La réponse instantanée pour un calcul au pas de temps journalier est due aux pertes de charges qui n'ont pas été totalement filtrées au préalable. Un second pic 2 fois plus faible entre 20 et 50 jours est observable notamment pour PIB4C. Il montre l'influence à moyen terme des pompages sur l'augmentation du rabattement. Concernant les 4 puits de la SAPHIR, un second pic entre 300 et 420 jours est observable et est lié à la cyclicité annuelle de pompages.

<sup>6</sup> Pour les FCC pompage-niveau d'eau, nous préférons utiliser le rabattement pour caractériser le niveau d'eau plutôt que la piézométrie (en altitude), car à la lecture du graphique, une augmentation du pompage sera liée à une augmentation du rabattement en donnant un coefficient de corrélation positif.

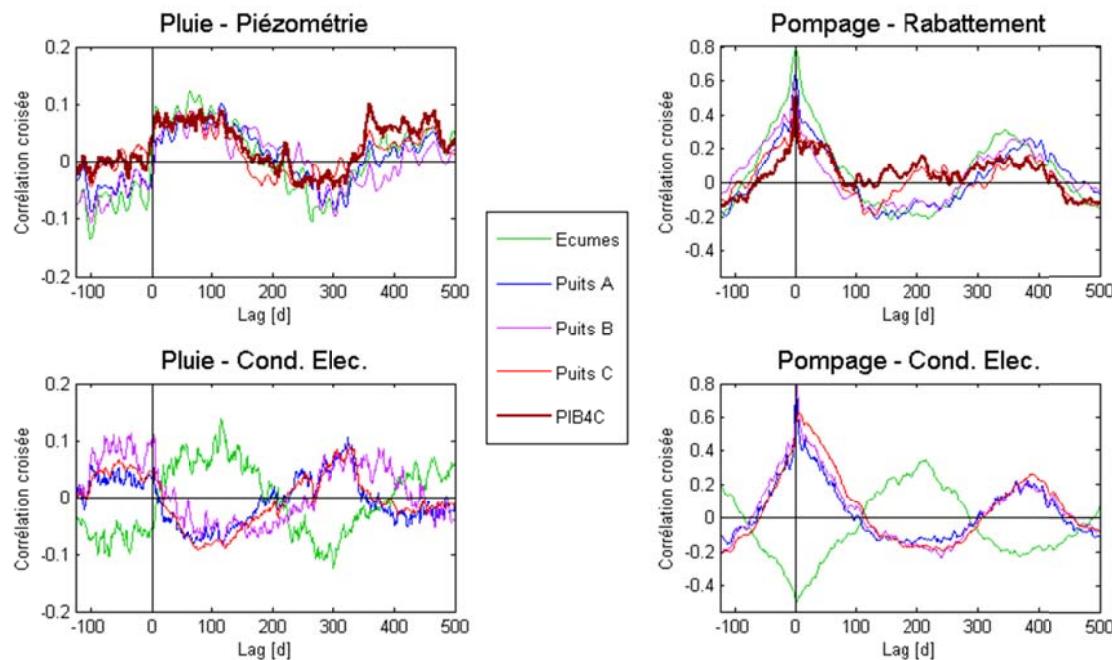


Figure 62 : FCC de la pluie (à gauche) et des pompages (à droite) en entrée, et de la piézométrie ou rabattement (en haut) et de la conductivité électrique (en bas) en sortie.

Les **CCF pluie-piézométrie** (Figure 62 en haut à gauche) sont difficilement interprétables, :les coefficients de corrélation sont inférieurs à 0.1. Pour ces graphes, l'allure des corrélogrammes montrant une covariance entre pluie et piézométrie pour un lag de 0 à 120 jours est un biais dû à une forte diminution des pompages (induisant une remontée de la piézométrie) en février-mars de chaque année, 3 à 4 mois après le début des pluies de la période cyclonique (novembre-décembre) (cf Figure 61). Ce résultat montre que les fluctuations piézométriques sont principalement contrôlées par les pompages qui peuvent masquer le signal de recharge. De plus, l'absence de variations piézométriques induites par la recharge est cohérent avec une aire de recharge éloignée en altitude comme le montre l'approche hydrogéochimique, ainsi qu'avec des propriétés très transmissives de ces aquifères comme le montre l'approche hydraulique.

- **Processus impliqués dans le transfert de masse**

Les CCF **Pompage-conductivité** (Figure 62 en bas à droite) montrent deux comportements différents des puits de la SAPHIR. LA CCF pour Ecumes montre une corrélation négative avec un pic (négatif) à 1 j. Les CCF pour les puits A, B, et C sont semblables et montrent à l'inverse du puits Ecumes une corrélation positive pour un Lag de respectivement 0 j, 2 j, et 5 j. Les coefficients sont supérieurs à 0.45 et montrent la forte influence des pompages sur la dynamique de conductivité à court et moyen terme : d'un côté une diminution de la minéralisation avec l'intensification des pompages à Ecumes, de l'autre une augmentation avec l'intensification des pompages aux puits A, B, et C.

Dans le cas du puits des Ecumes, ceci s'apparente à une dilution de l'aquifère depuis des valeurs de 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en période sans pompage à des valeurs proches de 300  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en période de pompage continu (Figure 61). Cette dilution engendrée par les pompages peut s'expliquer dans le cas d'un aquifère compartimenté par la vidange rapide de l'eau stockée

initialement (faible réserve) et l'alimentation conjointe d'eau moins minéralisée (inférieure à 300  $\mu\text{S/cm}$ ). Ce résultat est cohérent avec le modèle d'interprétation des tests hydrauliques du Puits Ecumes (§ 4.1.4) qui montre que le forage est situé dans un compartiment d'environ 1 km de large dans un encaissant moins transmissif. Cette hypothèse s'appuie aussi sur l'observation, pendant le creusement du puits, d'un conduit volcanique d'un diamètre de l'ordre de 0.5 m ; il débitait une trentaine de  $\text{m}^3/\text{h}$ .

A l'inverse, dans le cas des puits A, B, et C, les pompages font augmenter la minéralisation de 380  $\mu\text{S/cm}$  à plus de 600  $\mu\text{S/cm}$ . Ceci témoigne de la progression de l'intrusion saline lorsque les pompages sont mis en route, et de sa régression lorsqu'ils sont stoppés.

Il est intéressant de noter que le niveau initial de conductivité pour Ecumes est supérieur à celui des Puits A, B, et C, indiquant une plus forte salinité à l'équilibre. Mais dans le même temps la dynamique de CE suite aux pompages montre qu'une meilleure connexion existe avec l'océan pour les Puits A, B, et C.

Pour les mêmes raisons évoquées ci-dessus pour les corrélogrammes Pluie-Piézométrie (Figure 62 en haut à gauche), il n'est pas possible d'interpréter les corrélogrammes Pluie-conductivité (Figure 62 en bas à gauche).

- Variabilité des propriétés hydrauliques de l'aquifère**

La Figure 63 présente les chroniques sur 15 jours en absence de pompages de la SAPHIR. On voit nettement les variations piézométriques pour les périodes de 12 et 24h pour tous les ouvrages, excepté au puits Ecumes. L'amplitude des variations liées à la marée est comparable pour tous les piézomètres et ne semble donc pas être contrôlée par la distance à l'océan. On observe également de plus fortes amplitudes piézométriques lors des marées les plus fortes (10 premiers jours de la chronique) – phénomène de sysygie.

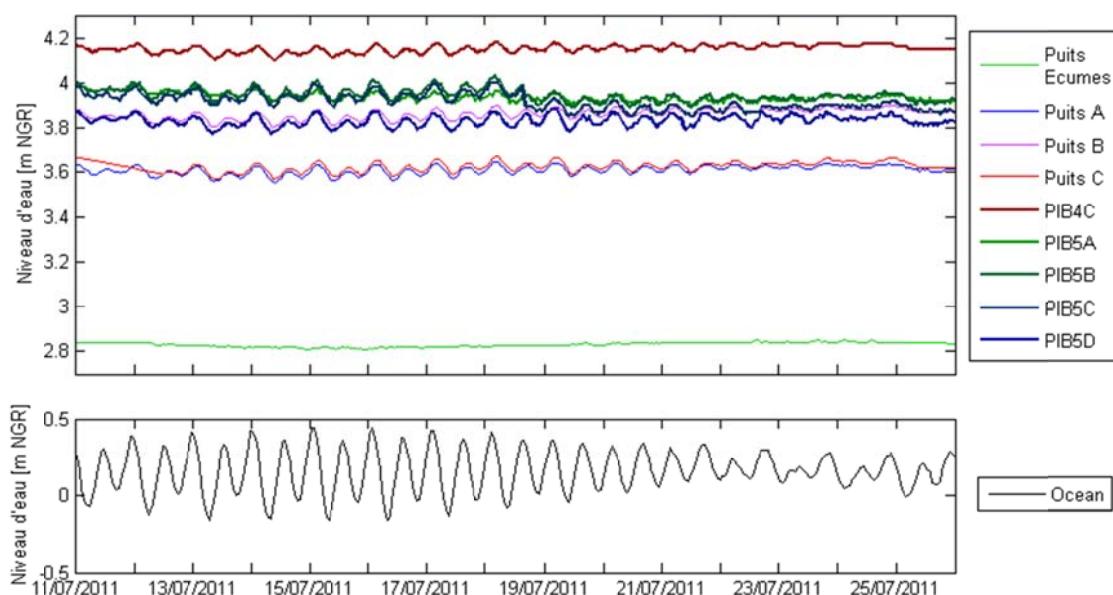


Figure 63 : Chroniques piézométriques et du marégraphe de St-Pierre sur une période non perturbée par les pompages.

La diffusivité (rapport de la transmissivité sur l'emmagasinement = T/S) a été calculée à partir du déphasage marée-piézométrie pour tous les ouvrages comportant une chronique

piézométrique influencée par l'océan. Les résultats des fonctions d'amplitude, de cohérence, de phase, et de gain sont présentés en Annexe 4.

Les résultats sont synthétisés dans le tableau ci-dessous (Tableau 14:). les diffusivités sont calculées à partir d'un déphasage à 24h ( $D_{24h}$ ) et à 12h ( $D_{12h}$ ), ainsi qu'à partir d'un décalage d'une période - modulo 24h ou 12h. Les données sont comparées à celles obtenues à partir des tests hydrauliques  $D_{pomp}$  (§4). Les résultats les plus proches (même ordre de grandeur) sont affichés en grisé dans le Tableau. Ils montrent que les puits les plus éloignés (Ecumes, puits A, B, C, PIB4C à plus de 2 km de l'océan) sont ceux pour lesquels un déphasage plus important (modulo 12h ou 24h sur respectivement  $D_{12h}$  ou  $D_{24h}$ ) permet de mieux se rapprocher de  $D_{pomp}$ .

Ouvrage	Distance à l'océan	Diffusivité	Diffusivité	Trans-missivité	Emmagasinement	Diffusivité
	X	$D_{24h}$	$D_{12h}$ modulo 12h	T	S	$D_{pomp}$ (=T/S)
	[m]	[m <sup>2</sup> /s]	[m <sup>2</sup> /s]	[m <sup>2</sup> /s]	[-]	[m <sup>2</sup> /s]
ECUMES	2 401		8.2	1.9E-01	2.4E-03	79.7
PUITS A	2 205	238.9	7.9	8.9E-01	7.8E-02	11.4
PUITS B	2 289	279.3	8.7	9.7E-01	7.0E-02	13.8
PUITS C	2 087	134.7	6.8	9.1E-01	6.2E-02	14.6
PIB4C	2 330	207.3	8.1	4.0E-01	3.0E-02	13.3
PIB5A	1 248	36.8	2.3			
PIB5B	1 248	58.4	2.5			
PIB5C	1 248	46.3	2.6	9.2E-01	1.0E-02	92.0
PIB5D	1 248	72.7	2.5			

Tableau 14: Calcul de la diffusivité  $D_{24h}$  et  $D_{12h}$  à partir du déphasage marée-piézométrie. Une seconde valeur à modulo 24 h et 12h est calculée et est comparée à la diffusivité  $D_{pomp}$  calculée d'après la transmissivité T et l'emmagasinement S estimés suite aux essais de pompage.

Ces résultats sur la diffusivité calculée à partir du traitement du signal montrent que les propriétés hydrodynamiques des ouvrages Puits A, B, C et PiB4C sont très comparables entre elles et qu'il est possible de les rattacher aux valeurs calculées à partir des tests hydrauliques. L'ouvrage PIB5C qui est plus près de l'océan semble ne pas appartenir au même groupe d'ouvrage comme le confirme les plus faibles valeurs d'emmagasinement.

### 6.2.3. Analyse en ondelettes continues

L'analyse en ondelettes continues met en évidence la non-stationnarité des phénomènes. Ainsi, dans le cadre de chroniques hydrogéologiques, il est possible de caractériser l'évolution temporelle des processus, et d'identifier les effets d'échelle, c'est-à-dire les phénomènes court terme qui ont un impact à plus long terme.

L'analyse est présentée sur les puits de la SAPHIR pour lesquels des chroniques continues sur plusieurs années sont disponibles. Nous présentons ici les résultats pour les deux puits Ecumes et Puits A qui ont un fonctionnement très différent, mis en évidence par les analyses corrélatoire et spectrale. Des résultats identiques au puits A sont obtenus pour les puits B et C.

Comme les analyses corrélatoire ont montré qu'un biais existait entre les signaux pluie et piézométrie, nous n'aborderons ici que les relations pompage-rabattement et pompage-conductivité pour caractériser l'influence des pompages sur respectivement le transfert de pression et le transfert de masse. Les données non filtrées de niveau d'eau sont utilisées.

## Puits Ecumes

- **Transfert de pression**

Le scalogramme croisé Pompage-Piézométrie sur Ecumes (XWT sur Figure 64) montre des structures hautes fréquences (de période < 20 jours) qui sont liées aux périodes de pompage (les deux séries covariant à l'échelle pluri-journalière quand les pompages s'intensifient). Une structure annuelle (entre les périodes 256 et 512 jours) est présente et s'étend à partir de 2010 sur des phénomènes plus saisonniers (128 à 256 jours). Ceci traduit le cycle annuel des pompages (périodes de septembre à mars) de 2007 à 2010, doublé de l'apparition d'une période de pompage intra-annuelle autour de mai-juin à partir de 2010.

Comme on observe une forte cohérence (> 0.85) sur l'ensemble de l'espace temps-fréquence (WTC sur Figure 64), on peut interpréter les relations Pompage-Piézométrie mises en évidence par les structures décrites ci-dessus comme des relations de cause à effet :

- Une influence de quelques jours à 2 semaines des pompages sur la piézométrie
- Une intensification des pompages dont l'effet annuel se double d'un effet saisonnier à partir de 2010.

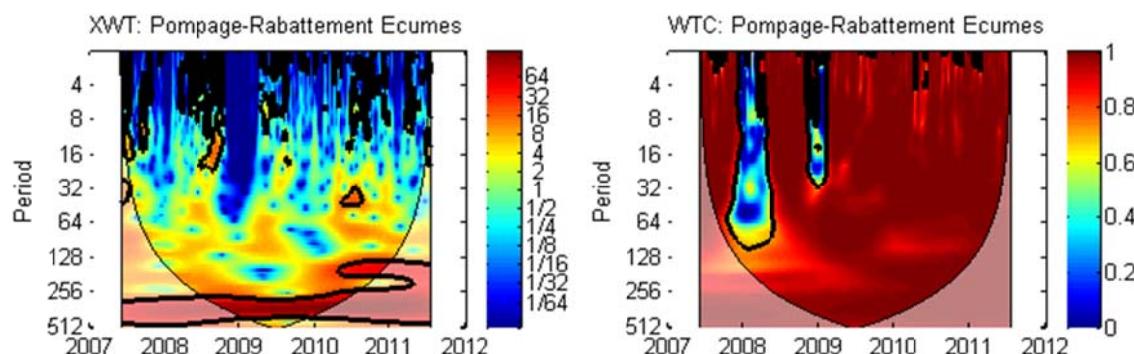


Figure 64 : Ondelette croisée XWT et cohérence WTC des pompages en entrée, et du rabattement en sortie sur Puits Ecumes ; les périodes sur l'axe des ordonnées sont en jour.

- **Transfert de masse**

Le scalogramme croisé Pompage-conductivité sur Ecumes (XWT sur Figure 65) montre des structures hautes fréquences (de période < 16 jours) qui sont hors des périodes de pompage intensif, et qui apparaissent moins marquées que dans le cas du XWT pompage-rabattement. En effet, lors des périodes de pompage intensives (septembre à mars), la conductivité diminue et se stabilise autour de 320 µS/cm (donc les deux séries ne covariant pas). C'est lors des périodes sans pompage d'avril à août que les plus fortes variations de conductivité sont observées lorsqu'un pompage « isolé » est démarré (cf chroniques hydrogéologiques sur la Figure 61). Une structure annuelle est présente sur toute la période de mesure montrant le cycle annuel régulier des pompages.

Comme on observe une forte cohérence sur l'ensemble des structures hautes fréquences et annuelles décrites ci-dessus (WTC sur Figure 65), celles-ci montrent alors :

- Une faible influence des pompages sur la minéralisation de l'eau à court terme qui engendre même une diminution de la minéralisation de l'eau
- Un impact annuel lié au régime d'exploitation annuel de la ressource

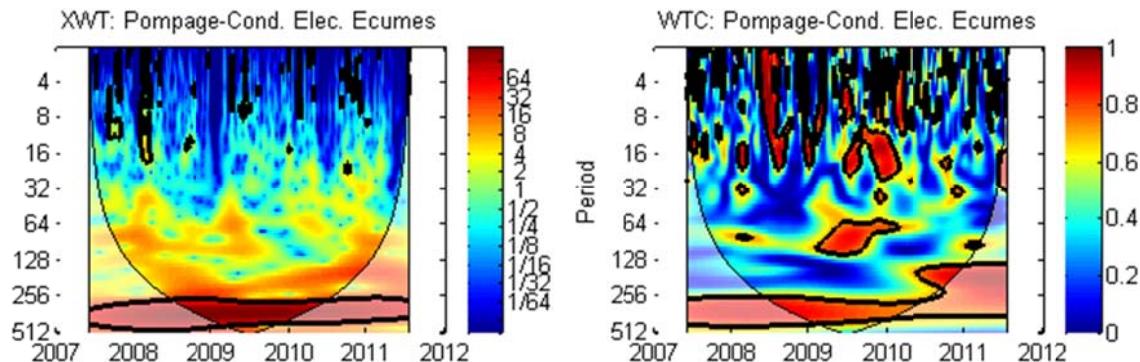


Figure 65 : Ondelette croisée XWT et cohérence WTC des pompages en entrée, et de la conductivité électrique en sortie sur Puits Ecumes; les périodes sur l'axe des ordonnées sont en jour.

## Puits A

### • Transfert de pression

Le scalogramme croisé Pompage-Piézométrie sur Puits A (XWT sur Figure 66) montre des structures hautes fréquences (de période < 20 jours) qui sont liées aux périodes de pompage entre septembre et avril. Une structure annuelle (entre les périodes 256 et 512 jours) est présente montrant le cycle annuel de la période de pompages intensifs. Une structure intra-annuelle (128 à 256 jours) isolée en 2008 s'étend à nouveau à partir de 2010 et s'amplifie.

Comme on observe une forte cohérence sur l'ensemble de l'espace temps-fréquence (WTC sur Figure 66), les structures observées montrent alors :

- Une influence des pompages sur la piézométrie de Puits A à court terme
- Un impact à l'échelle annuelle du régime de pompage sur la minéralisation de l'eau qui s'étend à l'échelle saisonnière lors de l'intensification des pompages.

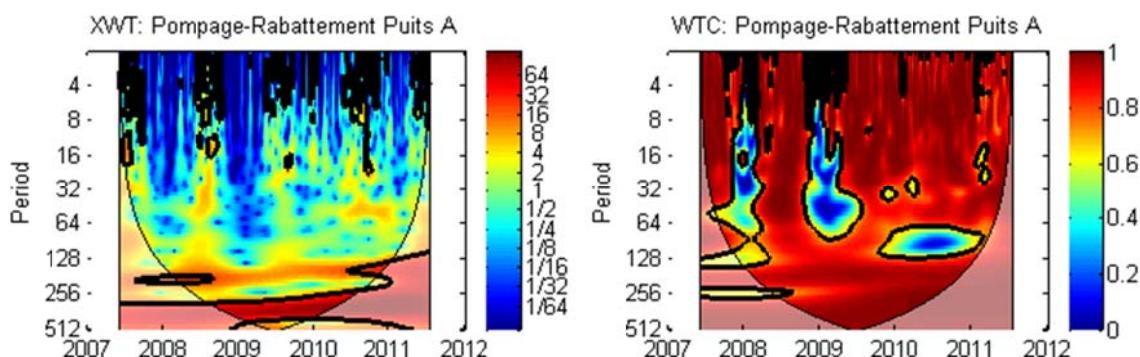


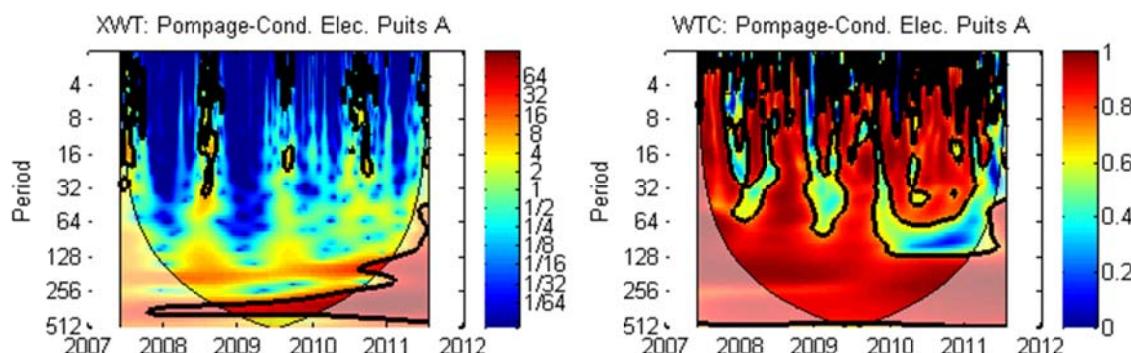
Figure 66 : Ondelette croisée XWT et cohérence WTC des pompages en entrée, et du rabattement en sortie sur Puits A; les périodes sur l'axe des ordonnées sont en jour.

- **Transfert de masse**

Le scalogramme croisé Pompage-conductivité sur le puits A (XWT sur Figure 67) montre des structures hautes fréquences (de période < 32 jours) pendant les périodes de pompage intensif. Contrairement à Ecumes, c'est pendant ces périodes de pompage que les plus fortes variations sont observées (cf chroniques hydrogéologiques sur la Figure 61). Une structure annuelle se dessine à partir de 2007 et s'étend à partir de 2010 sur des phénomènes plus saisonniers (128 à 256 jours) et même pluri-décadiques (64 jours). Ceci traduit clairement l'intensification des pompages à partir de 2010 avec un effet d'échelle avec l'extension du phénomène périodique annuel à des périodes plus basses.

Comme on observe une forte cohérence sur l'ensemble de l'espace temps-fréquence (WTC sur Figure 67), les structures observées montrent alors :

- Une influence des pompages sur la dynamique de minéralisation du puits A à court et moyen terme (jusqu'à 1 mois)
- Une intensification des pompages à partir de 2010 qui engendre une augmentation de la minéralisation à des échelles de temps plus fines que l'échelle annuelle. En d'autre terme, en 2011, les variations pluri-mensuelles de pompage influencent la minéralisation à des échelles plus longues. L'impact est donc plus fort.



*Figure 67 : Ondelette croisée XWT et cohérence WTC des pompages en entrée, et de la conductivité électrique en sortie sur Puits A; les périodes sur l'axe des ordonnées sont en jour.*

**Ces résultats montrent qu'en 2007, les pompages influencent la minéralisation uniquement à court terme (< 32 jours). Progressivement, ils impactent l'ensemble du domaine périodique, et en 2011, les variations de conductivité sont totalement contrôlées par les pompages.**

Ce résultat significatif est toutefois à replacer dans un contexte d'années récentes relativement sèches. Le manque de recul sur des années plus humides ne nous permet pas de conclure sur l'évolution de la minéralisation de l'aquifère dans le cas d'un retour à des pluies plus abondantes et donc à des périodes de pompage moins intensives concernant l'irrigation. Néanmoins, il permet de mettre en évidence la sensibilité de l'aquifère du Gol dans le cas d'une succession d'années moins pluvieuses durant lesquelles l'aquifère est fortement sollicité par les pompages.

### 6.3. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS ISSUS DE L'APPROCHE DE TRAITEMENT DU SIGNAL

En confrontant les différents résultats de l'approche par traitement du signal, deux groupes d'ouvrages se différencient (le puits Ecumes, et les puits A, B, et C), et permettent d'établir, en tenant compte du contexte géographique et géologique, un schéma de fonctionnement hydrogéologique.

- Les puits A, B, et C par leur fonctionnement très similaire et leur proximité géographique appartiennent au même compartiment hydrogéologique. Cet aquifère est très bien connecté à l'océan car la progression de l'interface eau douce/eau salée est très sensible aux pompages. L'intensification des pompages à partir de 2010 est à l'origine d'une augmentation de la minéralisation à des échelles de temps plus fines que l'échelle annuelle. Ceci montre clairement l'évolution de l'impact des pompages qui engendrent une augmentation de la salinité à moyen et long terme depuis les deux dernières années.
- Le puits Ecumes se situe dans un réservoir a priori peu connecté à l'océan, et bien connecté avec une masse d'eau amont peu minéralisée du fait d'une rapide vidange des eaux minéralisées lorsque les pompages sont lancés.

En l'absence de chroniques suffisamment longues pour les autres ouvrages, il n'a pas été possible de caractériser leur comportement par traitement du signal. Cependant l'analyse réalisée sur les ouvrages de la SAPHIR, ainsi que l'analyse des chroniques de conductivité sur les piézomètres PIB4 et PIB5 a permis de mettre en évidence les résultats suivants :

- L'essentiel des variations de conductivité électrique est contrôlée par les pompages
- Il est difficile de caractériser les processus de recharge du fait de très faibles variations de la piézométrie suite aux épisodes pluvieux.
- L'océan joue le rôle de limite à potentiel imposé pour l'ensemble des ouvrages (mis à part Ecumes). Il influence de manière notable les variations de piézométrie et influence très fortement celles de conductivité électrique lorsque l'ouvrage recoupe la zone de transition eau douce/eau salée
- L'évolution de la salinité de l'aquifère semble modérée dans le temps et très variable selon les années sèches ou humides. Néanmoins, dans le cas d'une période sèche prolongée, la progression de l'interface eau douce / eau salée engendrée par l'intensification des pompages a été mise en évidence.



## 7. Schéma conceptuel

Les études sur la plaine du GOL ont débuté en 1966 avec la mise en valeur hydro-agricole de l'Etang-Salé. On peut supposer qu'un schéma de fonctionnement hydraulique relativement proche de la réalité avait été conçu et que le potentiel hydraulique du secteur a été perçu rapidement. En effet, les caractéristiques du Gol pour l'exploitation et la valorisation des eaux souterraines sont les suivantes :

- aquifère fortement alimenté par les reliefs (cirque des Makes),
- valeurs de transmissivité de l'aquifère particulièrement élevées et exceptionnelles,
- aquifère côtier et risque d'intrusion saline.

Or, l'implantation et les caractéristiques des puits indiquent une bonne appréciation des caractéristiques du site. Les ouvrages sont peu profonds, sont nombreux, sont alignés perpendiculairement par rapport aux écoulements en provenance des Makes et sont éloignés le plus possible de la mer. Ainsi, les eaux sont plutôt prélevées dans la partie haute de la nappe moins minéralisée. Plusieurs ouvrages permettent de mieux capter les flux et de minimiser les rabattements ponctuels qui favorisent les avancées salines.

Ce potentiel hydrogéologique a été mis à profit pour l'alimentation en eau potable, l'irrigation et l'industrie.

Ensuite, au début des années 1980, les piézomètres de surveillance (PIB4 et PIB5) sont prévus pour observer la nappe à différentes profondeurs et en direction de la mer. Des ouvrages sophistiqués pour surveiller le risque des intrusions salines sont donc mis en place.

En 2011/2012, le programme d'acquisition de données (niveaux, conductivité, analyses chimiques et isotopiques, pompage d'essai en interférence) et la mise en œuvre de méthodes d'interprétation a conduit à une meilleure compréhension du fonctionnement et à quantifier des paramètres du système (altitude de recharge, mélange des eaux...). Ces résultats ont été jusqu'à présent présentés en fonction de la technique utilisée (pompage d'essai, hydrochimie...). Ils sont repris et synthétisés dans la description du modèle conceptuel (Figure 68).

### Les limites du modèle

Les limites d'alimentation de la plaine du Gol remontent jusqu'au paléo-cirque des Makes (figure 68b).

La limite aval de l'aquifère est constituée par l'océan.

Les limites latérales dans la plaine du Gol sont les limites de perméabilité mise en évidence par l'interprétation du pompage d'essai à interférences multiples d'octobre 2011. Elles se situent approximativement au niveau des ravines du Gol et du Maniron (en position et en orientation). Elles délimitent deux compartiments (figures 68a et 68d):

- Le compartiment "Est" à l'intérieur des limites latérales.
- Le compartiment "Ouest" formé de l'encaissant de la paléo-vallée.

L'approche géochimique et celle du traitement du signal concluent également à la présence de deux compartiments hydrogéologiques distincts.

### Compartiment "Est"

Les puits A, B et C de la Saphir, les puits "usine du Gol" et "Bois de Nèfles" et les piézomètres PIB4 et PIB5 appartiennent à ce compartiment (figure 68c).

Les formations géologiques aquifères concernées sont les formations basaltiques plus récentes de la paléo-vallée des Makes surmontées dans la plaine du Gol par des alluvions grossières. Sur le plan hydrogéologique, l'aquifère est relativement homogène avec une transmissivité élevée, de l'ordre de 0.8 m<sup>2</sup>/s, et est caractérisé par une anisotropie verticale de 7 ( $T_{\text{horiz.}}/T_{\text{vert.}}=7$ ).

La circulation générale de l'eau de la paléo-vallée des Makes vers l'océan a été confirmée par les analyses chimiques et isotopiques et plus précisément par les éléments suivants :

Les puits produisent une eau ayant une composante d'apports superficiels (peu salée et contaminés en NO<sub>3</sub>) qui augmente d'un puits à l'autre suivant une direction W-E. L'altitude de la recharge au puits du Gol est la plus basse (705 m) et est associée à des pics de nitrates plus élevés. Or les puits du Gol sont peu profonds : une vingtaine de mètres. Par ailleurs, les piézomètres profonds (une centaine de mètres) sont préservés de toutes influences résultant d'activités anthropiques. Le piézomètre le plus profond (PIB5D) possède l'altitude de recharge la plus élevée (1 740 m).

Les écoulements sont donc stratifiés avec un effet de versant, c'est-à-dire que les lignes de courant vont des plus hautes altitudes vers les plus grandes profondeurs en bas de versant (figure 68 d). Une faible drainance des alluvions vers les formations volcaniques a été identifiée par l'interprétation des pompages d'essai et par le diagramme chimique NO<sub>3</sub> vs K.

En aval, l'océan joue un rôle de potentiel imposé pour l'ensemble des ouvrages. Il influence de manière notable les variations de piézométrie, en particulier par un effet de marées très marqué. Cet aquifère est très bien connecté à l'océan car la progression de l'interface eau douce/eau salée est très sensible aux pompages.

A l'intérieur du compartiment "Est", l'influence des pompages sur les niveaux d'eau est immédiate et s'étend très rapidement sur l'ensemble des ouvrages. Elle s'étend relativement loin en direction de l'océan en induisant une augmentation de la conductivité électrique dans les niveaux les plus profonds de l'aquifère (PIB5D) liée à un déplacement dans les terres du biseau salé.

Sur le plan de la qualité des eaux, la salinité augmente en fonction de la profondeur et de la distance à l'océan. Les eaux les plus salées ont été mesurées à 2.3 km de distance de l'océan dans le PIB4D à 95 m de profondeur. Les variations de conductivité dans l'aquifère sont contrôlées par les pompages qui induisent une augmentation de la salinité. L'océan influence aussi de manière notable la conductivité électrique à proximité des interfaces eau douce – eau salée comme on peut l'observer sur PIB5C et PIB5D.

L'aquifère est peu impacté par les eaux salées au niveau des puits A, B et C et le puits usine du Gol. Les eaux sont impactées par le pôle eau marine aux piézomètres PIB4C, PIB5B et PIB5D. La contribution de l'eau de mer est relativement faible. L'exploitation des résultats des analyses de Cl, K et SO<sub>4</sub> fournit les valeurs de contribution suivantes :

- Les puits A, B, C, PIB4A, et usine du Gol autour de 0.6%,
- PIB4C, PIB5B autour de 3.3%,
- PIB5D à 11.9%.

### Compartiment "Ouest"

Les puits des Ecumes, Maniron et Marengo appartiennent à ce compartiment qui constitue l'encaissant du compartiment "Est".

Il est formé de coulées basaltiques anciennes (Beta II). Cet aquifère est plus complexe que celui du compartiment "Est" : la structure de l'aquifère est compartimentée : compartiments à transmissivité plus faibles, discontinuité, etc. Il présente une transmissivité toujours élevée, mais plus faible ( $0.07$  à  $0.2$  m $^2$ /s). Leur emmagasinement apparaît aussi plus faible (valeur moyenne au puits des Ecumes :  $1.3 \times 10^{-4}$ ).

Ce compartiment est faiblement impacté par l'intrusion saline, et possède une altitude moyenne de recharge située à 1 050 m.

La contribution de l'eau de mer au puits des Ecumes et au puits Marengo est faible : respectivement 0.3 et 0.9 % ; l'intrusion saline sur ces ouvrages n'a pas été identifiée. Lors des pompages, on observe une baisse de la conductivité (Rapport BRGM/RP-61811-FR).

Il n'a pas été mis en évidence de relation hydraulique entre les deux compartiments.

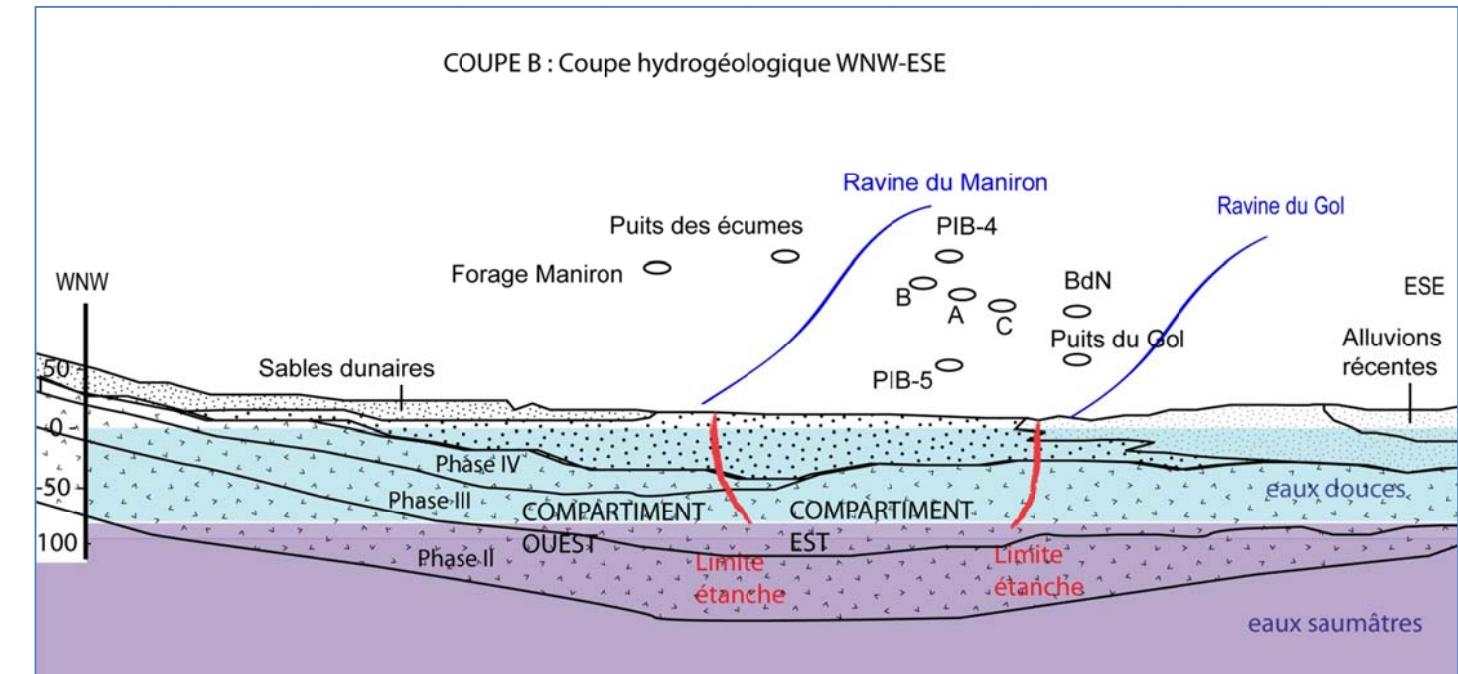
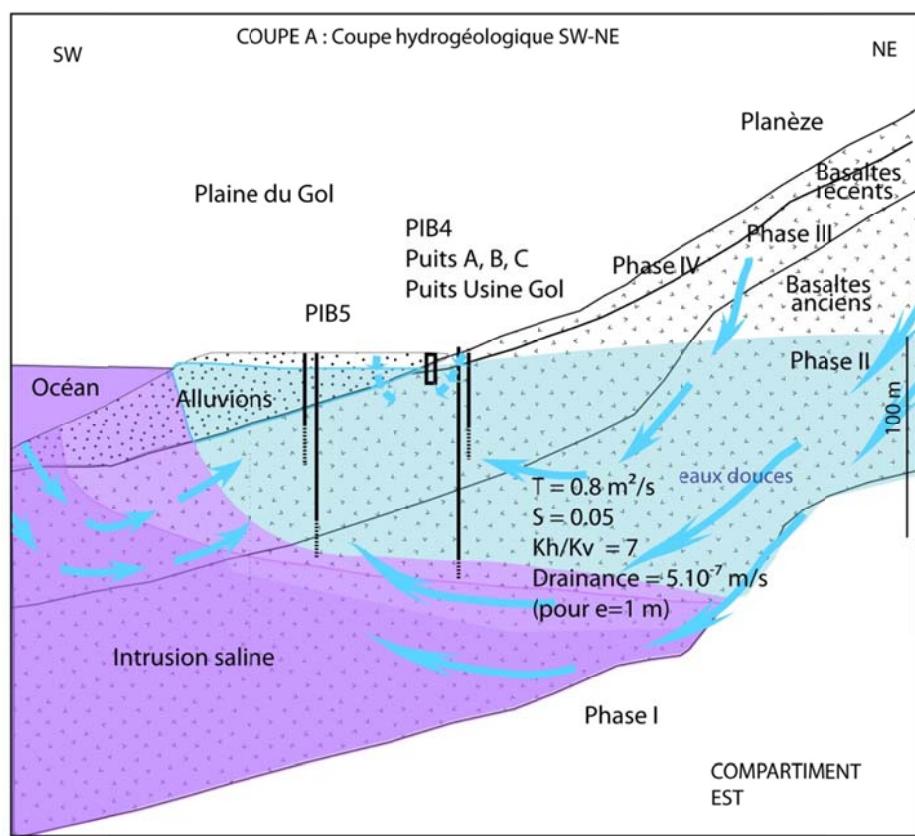
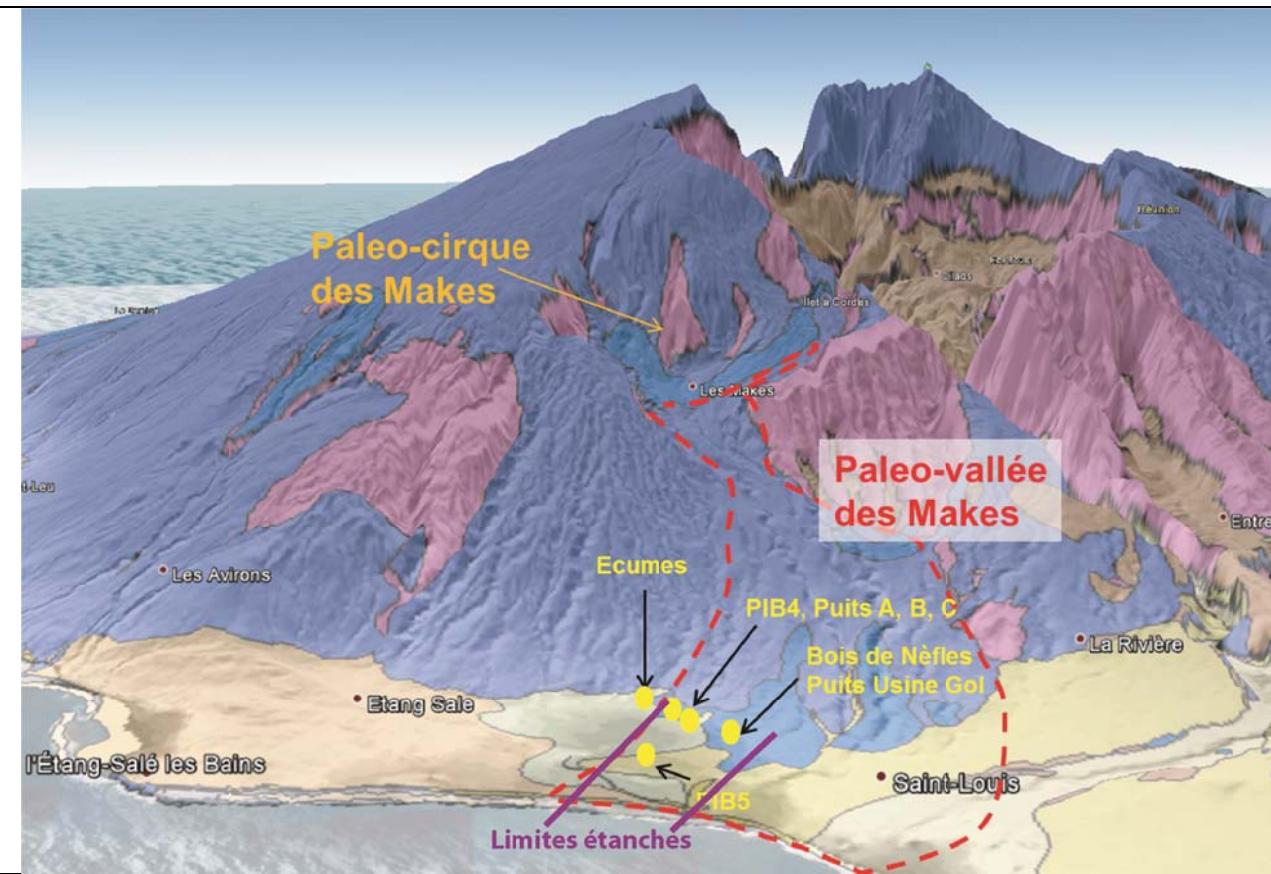
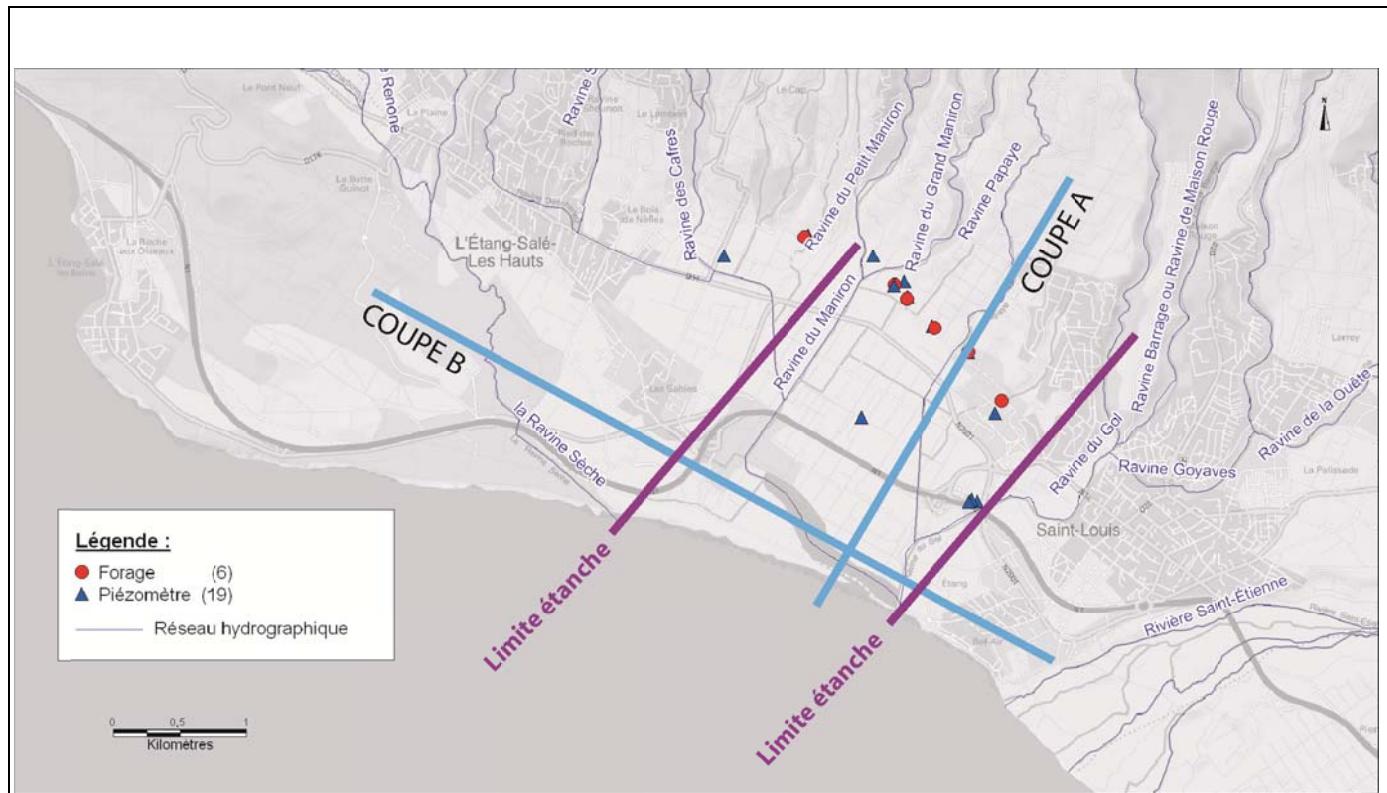
### Conclusion

Sur le plan hydrogéologique, le secteur du Gol présente des similitudes avec les autres aquifères de La Réunion : flux d'eau souterraine en provenance des reliefs amont, exploitation en bordure littorale, risque d'intrusion saline. Cependant, des différences notables apparaissent lorsque ces similitudes sont examinées plus en détail :

*Alimentation par les flux d'eau souterraine amont* : l'aquifère du Gol est orienté vers le SW, la zone la moins arrosée de La Réunion. Par rapport aux autres aquifères de cette façade, l'impluvium sur le plan géologique n'est pas une planète mais un paléo-cirque creusé dans le bouclier ancien (coulées de la phase II) peu perméable. Celui-ci est partiellement comblé par des épandages de tufs cendreux et par les coulées basaltiques de la phase IV. L'infiltration de la pluie est donc favorisée, puis ce flux est concentré vers l'exutoire du paléo-cirque puis évacué par la paléo-vallée des Makes vers les plaines du Gol et de St-Louis. Cette conjonction infiltration – concentration – drainage conduit à une alimentation en eau souterraine du Gol particulièrement maximisée.

*Exploitation en bordure littorale* : la plaine du Gol est plutôt large par rapport aux autres plaines de La Réunion : les reliefs ne débutent qu'à environ 2.5 km de la côte. Sur cette zone cotière, la zone non saturée à traverser pour atteindre l'aquifère est donc peu épaisse. Le schéma d'exploitation au Gol a la particularité d'être constitué par un groupe de puits d'une vingtaine de mètres de profondeur implantés rationnellement pour capter les flux amont et pour se protéger des intrusions salines. Cela s'apparente à un champ captant. Ailleurs, l'exploitation est généralement réalisée par des forages profonds. Globalement, les valeurs de transmissivité des aquifères de La Réunion sont élevées ; au Gol, elles sont d'un ordre de grandeur encore supérieur.

*Risque d'intrusion saline* : il n'y a pas à La Réunion un schéma homogène des intrusions salines. Celle de la Plaine du Gol évolue dans un aquifère très perméable, bien alimenté par les apports des Makes et exploité à un fort débit. L'intrusion saline est détectée dans les piézomètres les plus profonds. La marée influence nettement les niveaux piézométriques.



68a :Position des coupes.

68b : Représentation 3D.

68c : Coupe A.

68d : Coupe B.

Figure 68 : Modèle conceptuel du fonctionnement hydrogéologique de la Plaine du Gol.

## 8. Conclusion

Le besoin de préserver les ressources en eau de La Réunion, la gestion durable de cette ressource, le respect de la réglementation (Directive Cadre, SDAGE...) ont conduit le Conseil général de La Réunion, l'Office de l'eau Réunion, la DEAL et le BRGM à financer ensemble cette étude sur l'aquifère côtier du Gol. L'Office de l'eau Réunion ainsi que les acteurs locaux du Gol (Saphir, Usine sucrière, Centrale thermique du Gol, Véolia) ont également contribué par la mise à disposition de leurs données.

L'aquifère du Gol représente une ressource en eau souterraine exceptionnelle dans le SW de La Réunion : c'est un aquifère bien alimenté par la paléo-vallée des Makes et très transmissif. Ces caractéristiques sont connues depuis les années 1980 et la capacité d'exploitation des eaux souterraines s'élève à 4 000 m<sup>3</sup>/j à destination de l'AEP, des industries (sucrerie et thermique) et de l'irrigation.

Cependant, cet aquifère s'étend le long de l'océan où les risques d'intrusion saline sont réels si l'exploitation des eaux souterraines est mal gérée. Les acteurs de l'eau à La Réunion (Conseil général, DEAL, Office de l'eau) et ceux de la plaine du Gol (Saphir, Usine sucrière, Cise, CTG) en sont conscients. Un programme d'étude a donc été mené pour mieux connaître le fonctionnement de cet aquifère. A terme, l'objectif est de pérenniser la qualité de cette ressource et d'éviter une avancée des intrusions salines déjà naturellement en place par une gestion appropriée des prélèvements.

L'étude comporte trois approches employant des méthodes distinctes.

La première fait appel aux pompages d'essai et à leur interprétation. Les 14 pompages d'essai réalisés entre 1970 et 2006 ont été réinterprétés avec des méthodes plus performantes que celles classiquement utilisées. C'est notamment le cas pour une méthode créée pour analyser le pompage d'essai à interférences multiples réalisé en octobre 2011. Il en ressort la présence de deux compartiments hydrogéologiques distincts. Le premier entre les rivières Maniron et du Gol est homogène, transmissif (0.8 m<sup>2</sup>/s) et est exploité par la plupart des puits. Un léger effet de drainance a été mis en évidence. C'est un aquifère libre (coefficients d'emmagasinement de 0.05). Le second à l'ouest, est compartimenté, plus complexe et de transmissivité moindre. Il est exploité par les forages des Ecumes et de Maniron.

La seconde approche est géochimique et repose sur l'interprétation des analyses chimiques (majeurs) et isotopiques (D/H, <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O et <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr) réalisées sur les prélèvements sur 10 sites en septembre 2011. Elle met aussi en évidence la présence de deux compartiments hydrogéologiques et montre que la salinité augmente en fonction de la profondeur et de la distance à l'océan. Les variations de conductivité dans l'aquifère sont contrôlées par les pompages : augmentation de la salinité en fonction du pompage. L'océan influence aussi de manière notable la conductivité électrique à proximité des interfaces eau douce – eau salée : c'est observable sur PIB5C et PIB5D (entre 4200 et 7500 µS/cm observés lors d'une période sans pompage).

L'aquifère est peu impacté par les eaux salées au niveau des puits A, B et C et le puits usine du Gol. Les eaux sont impactées par le pôle eau marine aux piézomètres PIB4C, PIB5B et PIB5D. La contribution de l'eau de mer est relativement faible. L'exploitation des résultats des analyses de Cl, K et SO<sub>4</sub> fournit les valeurs de contribution suivantes :

- le puits Ecumes à 0.3 %,
- les PUITS A, B, C, PIB4A, et USINE DU GOL autour de 0.6%,
- le puits MARENGO à 0.9%,
- PIB4C, PIB5B autour de 3.3%,
- PIB5D à 11.9%.

Les écoulements sont stratifiés avec un effet de versant, c'est-à-dire que les lignes de courant vont des plus hautes altitudes vers les plus grandes profondeurs en bas de versant. Une drainance des alluvions vers les formations volcaniques a été identifiée.

Le compartiment Ouest est faiblement impacté par l'intrusion saline, et possède une altitude moyenne de recharge située à 1 050 m.

L'approche "traitement du signal" a montré que le compartiment "Est" est très bien connecté à l'océan car la progression de l'interface eau douce/eau salée est très sensible aux pompages. L'océan joue le rôle de limite à potentiel imposé pour l'ensemble des ouvrages (mis à part le puits des Ecumes). Il influence de manière notable les variations de piézométrie et aussi celles de conductivité électrique lorsque l'ouvrage recoupe la zone de transition eau douce/eau salée.

L'évolution de la salinité de l'aquifère semble modérée dans le temps et très variable selon les années sèches ou humides. Néanmoins, dans le cas d'une période sèche prolongée, la progression de l'interface eau douce / eau salée engendrée par l'intensification des pompages a été mise en évidence. L'évolution de l'impact des pompages engendre une augmentation de la salinité à moyen et long terme depuis les deux dernières années.

Ces derniers points montrent particulièrement la nécessité d'une gestion des prélèvements prenant en compte le risque d'avancée des intrusions salines. Sur la base de ce modèle conceptuel et d'un complément de données en cours d'acquisition sur les puits du Gol et du Bois de Nèfles, un modèle d'interaction inter-puits sera élaboré en 2013. Il aura pour but de proposer des règles de bonne gestion des prélèvements. Cette modélisation est possible grâce à la mise en évidence quantifiée de relations entre différents paramètres (charge, conductivité, débits) sur plusieurs ouvrages.

## 9. Références bibliographiques

### 9.1. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU SITE

**ANTEA** (2002) - Cône alluvial de la rivière Saint-Etienne. Actualisation des données hydrologiques et hydrogéologiques. Elaboration d'un modèle mathématique de gestion des ressources en eau souterraine. Rapport A27584. 177 p.

**BRGM.** (1966) - Mise en valeur hydro-agricole de la zone d'Etang Salé. Etude hydrogéologique. BRGM/TAN 66-A/32. 94 p.

**Combes P., Ledoux E.** (1985) - Actualisation du modèle de la plaine du Gol et de la rivière Saint-Etienne. Rapport ARMINES LHM/RD/90/26. 51 p.

**Daessle M.** (1985) - Programme départemental d'étude des ressources en eau (1982-83). Extension du périmètre irrigué du Bras de Cilaos. Compte-Rendu des travaux de forages de reconnaissance (PIB 3, 4 et 5). Synthèse des données hydrogéologiques pour l'élaboration d'un modèle de simulation mathématique. BRGM/85 REU 08. 58 p.

**Daessle M.** (1985) - Programme départemental des ressources en eau (1984). Périmètre irrigué du Bras de Cilaos. Mise en place d'ouvrages de captage en rive droite de la rivière Saint-Etienne. Rapport d'implantation. BRGM/85 REU 20. 11 p.

**Daessle M., Dubreuil G.** (1985) - Programme départemental des ressources en eau (1984). Extension du périmètre irrigué du Bras de Cilaos. Interprétation des travaux de géophysique complémentaires. BRGM/85 REU 23. 14 p.

**Daessle M., Fontaine F.** (1985) - Programme départemental d'étude des ressources en eau (1982-83). Extension du périmètre irrigué du Bras de Cilaos. Relevés piézométriques août 1982-avril 1985. Complément du rapport 85 REU 08. BRGM/85 REU 31.

**Daessle M., Fontaine F., Pomme J.B.** (1986) - Programme départemental d'études des ressources en eau (1984-85). Périmètre irrigué du Bras de Cilaos. Mise en place d'ouvrages de captage en rive droite de la rivière Saint-Etienne. BRGM/86 REU 23. 51 p.

**Ferrandes R.** (1972) - Résultats des études hydrogéologiques et géophysiques sur la partie Ouest de l'île de la Réunion en 1972. Résultats de l'étude géophysique par sondages électriques. BRGM/72 TAN 24. 21 p.

**FRISSANT.N., BARTHELEMY.L., PETIT.V.** (2006) - Synthèse des ressources en eau souterraine potentiellement mobilisables à La Réunion. Rapport BRGM/RP-55035-FR.

**Folio J.L.** (2008) - Exploitation de la ressource en eau souterraine sur le secteur du Gol et des Cocos. Modélisation mathématique en densité variable. Ouvrages du périmètre irrigué du Bras de Cilaos. Simulation de l'évolution de la salinité induite par l'exploitation des nappes du Gol et des Cocos. Rapport Office de l'Eau de La Réunion.

**Lustremant M., Steenhoudt M.** (1982) - Programme départemental d'étude des ressources en eau 1981. Extension du périmètre irrigué du Bras de Cilaos. Analyse et synthèse des données. BRGM/82 REU 10. 100 p.

**Petit V., Lucas C.** (2011) – Amélioration de la connaissance hydrogéologique de l'aquifère côtier du Gol. Rapport BRGM/RP-60560-FR.

**Poul X.** (1969) - Etude hydrogéologique de la plaine du Gol. BRGM/69 TAN 23. .

**Poul X.** (1969) - Mise en valeur hydro-agricole de la zone correspondant au lieu-dit "les Sables" (secteur d'Etang Salé). Ouvrages de captage creusés par le BRGM en aout et septembre 1968. BRGM/69 TAN 22. 23 p.

**Rousset Ph., Steenhoudt M.** (1983) - Programme départemental d'étude des ressources en eau 1981. Extension du périmètre irrigué du Bras de Cilaos. Compte-rendu des travaux de reconnaissance. Exploitation des résultats acquis. BRGM/83 REU 16. 41 p.

**SOGREAH consultants** (2006) - Essais de pompage - puits Bois de Nèfles et puits du Gol. Réalisation et interprétation. Rapport 4700361 R1. 27 p.

**SOGREAH consultants** (2006) - Etude hydrologique et hydrogéologique du secteur de l'étang du Gol. Rapport 554538 R1. 32 p.

## 9.2. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES DES POMPAGES D'ESSAI

**Anderson, E.I.** (2006) - Analytical solutions for flow to a well through a fault. Advances in Water Resources, 29, 1790-1803.

**Antéa** (2003) - Suivi d'exécution du forage de Maniron. Nov. 2003, Rap.31905-A, 21 p. + annexes.

**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.

**Buhkary, S. .A., Vandenberg, A., and Lennox D. H. Lennox** (1969) - Iterative analysis: bounded leaky artesian aquifer. J. Irr. Drain. Div. ASCE, Proc. Paper 6431, 95, 1-14.

**Daessle, M, Fontaine, F. et J.B. Pumme** (1986) - Mise en place de captage en rive droite de la rivière Saint Etienne. BRGM, 86 REU 23. 51p.

**Daessle, M** (1983) - Compte rendu des travaux de forages de reconnaissance (PiB3, 4 et 5). Synthèse des données hydrogéologiques pour l'élaboration d'un modèle de simulation mathématique. BRGM, 85 REU 08. 58 p. + annexes.

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

**Dewandel B., B., Aunay, J-C. Maréchal, C.Roque, O. Bour,B. Mougin, and T. Le Borgne** (2012) - New theoretical type curves for analysing pumping tests in compartmented media: the effect of anisotropy in hydraulic conductivity and partial well penetration. Submitted to J of Hydrology.

**Hantush, M.S.** (1961) - Aquifer tests on partially penetrating wells. Proc. of the Am. Soc. of Civil Engineers, 87, 171-195.

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

**Jacob, C.E.** (1947) - Drawdown test to determine effective radius of an artesian well, ASCE Trans., 112(232), 1047-1064.

**Leneneur, D.** (2001) - Synthèse des données hydrogéologiques actuelles du sud et de l'ouest de l'île de la Réunion. Suivi des captages d'eau souterraine gérés par la SAPHIR. Rap. de stage ESEM. Partie I, 80p. + annexes, partie II, 152p. + annexes.

**Petit V., C. Lucas, J. Martres** (2012) - Evaluation du bon état quantitatif des masses d'eau souterraines côtières. BRGM/RP-61811-FR. 70 p., 32 fig., 3 An.

**X. Pouli** (1969) – Etude hydrogéologique de la plaine du Gol. 69 TAN 23.

### 9.3. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES (HYDROGÉOCHIMIE)

**Aunay B., Genevier M., Ladouce B., Maréchal J.-C.** (2010) - Analyse fonctionnelle par traitement du signal et approche hydrochimique des aquifères du nord de la Réunion. BRGM RP-57955-FR. 190 p.

**Carte géologique de La Réunion à 1/100 000** (2006) - BRGM, Géosciences Réunion. Kit-Pédagogique Sciences de la Terre Région Réunion, Europe, BRGM.

**Fustec E., Mariotti, A. Grillo X., et Sajus J.** (1991) - Nitrate riveoval by denitrification un alluvial groundwater: Role of a former channel. J. of Hydrol., 123 (1991) 337-354

**Grunberger O.** (1989) - Etude géochimique et isotopique de l'infiltration sous climat tropical contrasté, massif du Piton des Neiges, île de la Réunion. In: *Thèse Doct.*, Université de Paris XI 1989, p. 197.

**Hoareau JL.** (2001) - Etude de la minéralisation des eaux naturelles au contact de la série magmatique différenciée de la Réunion. Approches expérimentale et numérique. Thèse de doctorat, Université de la Réunion. 215 p.

**Join JL.** (1991) - Caractérisation hydrogéologique du milieu volcanique insulaire. Le Piton des Neiges - Ile de la Réunion. Université de Montpellier II, Université de la Réunion. 187 p.

**Join JL., Coudray J., et Longworth K.** (1997) - Using principal components analysis and Na/Cl ratios to trace groundwater circulation in a volcanic island: the example of Reunion. *Jl. of Hydrology*, 190, pp 1-18.

**Louvat P.** (1997) - Étude géochimique de l'érosion fluviale d'îles volcaniques à l'aide des bilans d'éléments majeurs et traces. *Thèse de doctorat*, Université Paris 7, 322 p.]

**Louvat P., et Allegre J.C.** (1997) - Present denudation rates on the island of Reunion determined by river geochemistry: Basalt weathering and mass budget between chemical and mechanical erosions, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61, 17, pp. 3645-3669.

**Sebilo M., Mariotti A., Nicolardot B., Mayer B. et Billen G.** (2005) - Rôle de la matière organique des sols sur le lessivage des nitrates en sols de craie : Apport de la biogéochimie isotopique. Rapport 2004 Piren Seine. 18 pp.

#### 9.4. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU TRAITEMENT DU SIGNAL

**Aunay B., Genevier M., Ladouce B., et Maréchal J.-C.** (2010) - Analyse fonctionnelle par traitement du signal et approche hydrochimique des aquifères du nord de la Réunion. BRGM/RP-57955-FR. 190 p.

**Box, G.E.P. et Jenkins, G.M.** (1974) - Time Series Analysis: Forecasting and Control. Holden-Day, San Francisco, Calif., 575 pp.

**Grinsted A., Moore J., et Jevrejeva S.** (2004). Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Process. Geophys.*, 11(5-6): 561–566.

**Jacob, C. E.** (1950) - Flow of ground water. In "Engineering hydraulics." H. Rouse, Ed. 321-86. John Wiley, New York.

**Jenkins, G.M. et Watts, D.G.** (1968) - Spectral Analysis and Its Applications. Holden-Day, San Francisco, Calif., 525 pp.

**Labat, D., Ababou, R., et Mangin, A.** (2000) - Rainfall–runoff relations for karstic springs. Part II: Continuous wavelet and discrete orthogonal multiresolution analyses. *Journal of Hydrology* 238, 149–178.

**Ladouce B., Frissant, N., Mouvet, C., Feder, F., et Petit, V.** (2006) – Etude de la zone non saturée sur le site de La Mare, commune de Sainte-Marie (La Réunion). Phase 2 – BRGM/RP-54419-FR. 95 p.

**Mangin, A.** (1975) - Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse Doct., Université de Dijon, Dijon (Ann. Spéléol., 1974 29(3): 283--332; 1974 29(4): 495--601; 1975 30(1): 21--124).

**Maraun D. et Kurths, J.** (2004) - Cross wavelet analysis: significance testing and pitfalls, *Nonlinear Processes in Geophysics* 11, 505-514.

**Pinault, J.-L.** (2001) - Manuel utilisateur de TEMPO. Logiciel de traitement et de modélisation des séries temporelles en hydrogéologie et en hydrogéochimie. Rapport BRGM/RP-51459-FR, 233p.

**Torrence, C., et Compo, G.P.** (1998) - A practical guide to wavelet analysis. *Bull. Am. Met. Soc.* 79, 61–78.

## **Annexe 1 :**

### **Analyse bibliographique**



Année	Auteur	Référence	Titre	Objectifs de l'étude	Mot-Cle	Contenu général	Données/Investigations
1966	BRGM	TAN 66 - A/32	Mise en valeur hydro-agricole de la zone d'Etang Salé. Etude hydrogéologique.	Mise en valeur hydro-agricole des périmètres situés en rive droite de la Rivière Saint-Etienne jusqu'à la ravine des Aviron.	Ressource Sondages Réalisation d'ouvrages Géophysique	Etude morpho-pédologique du secteur, calcul des besoins en eau (climat et pertes par évapotranspiration), évaluation des ressources en eau superficielles et souterraines et de leur modalité de captage.	Précision des conditions géologiques générales du bassin hydrogéologique, inventaire et niveling des points d'eau, piézométrie, bilans hydriques, sondages tarière, reconnaissances par prospection électriques (CGG 1962), physico-chimie, creusement 5 puits.
1969	BRGM, X. Poul	69 TAN 22	Mise en valeur hydro-agricole de la zone correspondant au lieu-dit "les Sables" (secteur d'Etang Salé). Ouvrages de captage creusés par le BRGM en aout et septembre 1968.	Réalisation d'ouvrages de captage d'eaux souterraines.	Réalisation d'ouvrages Pompages d'essais	coupes géologiques et techniques des forages, physico-chimie, essais de pompage	coupes, physico-chimie, essais de pompage
1969	BRGM, X. Poul	69 TAN 23	Etude hydrogéologique de la plaine du Gol.	Etude du drainage de la plaine du Gol et de l'aménagement touristique de l'étang du Gol.	Piézométrie Sondages	Etude piézométrique, CR travaux de sondages et interprétations, étude drainage de la plaine.	84 sondages de reconnaissance à la tarière, niveling des sondages, limnigraphie étang du Gol, report sur plan cadastral des canaux d'irrigation, 60 échantillons d'eau pour physico-chimie, sondage de 22 m (pour l'usine).
1972	BRGM/DDA	72 TAN 24	Résultats des études hydrogéologiques et géophysiques sur la partie Ouest de l'île de la Réunion en 1972.	Recherche de nouvelles ressources en eau.	Géophysique	Etude géophysique par sondages électriques et sismique-réfraction dans la région d'Etang-salé	187 sondages électriques, 6000 m de profils par sismique réfraction, essai polarisation spontanée (pas concluant), cartes isobathes des différents niveaux, coupes d'interprétation des profils par sondages électriques
1982	BGRM, D. Lustremant, M. Steenhoudt	82 REU 10	Programme départemental d'étude des ressources en eau 1981. Extension du périmètre irrigué du Bras de Cilaos. Analyse et synthèse des données.	Extension du périmètre irrigué du Bras de Cilaos (PDRE 1981)	Ressource	Synthèse et exploitation des données disponibles du secteur d'extension du périmètre irrigué du Bras de Cilaos. Elaboration d'un schéma hydraulique à vérifier, confirmer ou modifier.	Niveaux piézos des points d'eau BSS, bilans climatologique, hydrographie, hydrologie, géologie, pédologie, géophysique, thermographie, hydrogéologie.
1983	BRGM, Ph. Rousset, M. Steenhoudt	83 REU 16	Programme départemental d'étude des ressources en eau 1981. Extension du périmètre irrigué du Bras de Cilaos. Compte-rendu des travaux de reconnaissance. Exploitation des résultats acquis.	Travaux de reconnaissance du PDRE 1981.	Réalisation d'ouvrages Diagraphies Pompages d'essais	Informations obtenues pendant les travaux de reconnaissance et synthèse des données disponibles du secteur (réalisation de 2 forages dans le secteur Cocos).	2 forages dans le secteur Cocos : Pib1 (150 m) et Pib2 (64 m). Diagraphies et thermographie sur les forages réalisés. Essais de pompage : PiB1 - 2 moyenne durée sur nappe supérieure, 1 longue durée toutes nappes confondues ;
1985	BRGM, M. Daessle	85 REU 08	Programme départemental d'étude des ressources en eau (1982-83). Extension du périmètre irrigué du Bras de Cilaos. Compte-Rendu des travaux de forages de reconnaissance (PiB 3, 4 et 5). Synthèse des données hydrogéologiques pour l'élaboration d'un modèle de simulation mathématique.	Travaux et études PDRE 1983.	Réalisation d'ouvrages Diagraphies Pompages d'essais Ressource Bilans	Exécution et résultats des travaux de forages (PiB4, 5 et 6), observations piézométriques, géophysique, synthèse des données pour modélisation.	3 piézomètres multiples : PiB3 (135 m, 4 piézos), PiB4 (100 m, 3 piézos), PiB5 (4 piézos). Essais sur les 3 piézos sur différents niveaux aquifères. Diagraphies conductivité.
1985	BRGM, M. Daessle, F. Fontaine	85 REU 31	Programme départemental d'étude des ressources en eau (1982-83). Extension du périmètre irrigué du Bras de Cilaos. Relevés piézométriques août 1982-avril 1985. Complément du rapport 85 REU 08.		Piezometrie		
1985	BRGM, M. Daessle	85 REU 20	Programme départemental des ressources en eau (1984). Périmètre irrigué du Bras de Cilaos. Mise en place d'ouvrages de captage en rive droite de la rivière Saint-Etienne. Rapport d'implantation.	Travaux et études PDRE 1984.	Geophysique Sondages	Résultats des investigations géophysiques et des travaux de sondages carottés et analyses en vue de l'implantation de puits à galerie drainantes.	27 sondages électriques. 3 sondages carottés de 20 m de profondeur (SC I, II et III).
1985	BRGM, M. Daessle, G. Dubreuil	85 REU 23	Programme départemental des ressources en eau (1984). Extension du périmètre irrigué du Bras de Cilaos. Interprétation des travaux de géophysique complémentaires.	Réalisation des travaux d'investigations préconisés dans le cadre du PDRE 1984.	Geophysique Sondages Diagraphies	Résultats des investigations géophysiques (sondages électriques) --> reconnaissance du biseau salé et préconisations sur l'implantation d'un nouveau forage.	2 sondages électriques à proximité de S4 et PiB5, logs de conductivité dans les 2 forages, 2 profils de 6 sondages pour la reconnaissance d'intrusions salines, 6 sondages secteur Cocos pour implantation d'un forage.
1986	BRGM, M. Daessle, F. Fontaine, J.B. Pomme	86 REU 23	Programme départemental d'études des ressources en eau (1984-85). Périmètre irrigué du Bras de Cilaos. Mise en place d'ouvrages de captage en rive droite de la rivière Saint-Etienne.	PDRE 1984-95 : réalisation de 3 puits dans la plaine du Gol.	Geophysique Sondages Réalisation d'ouvrages Pompages d'essais	Comptes-rendus des travaux de réalisation des 3 puits (localisations préconisées dans 85 REU 20)	reconnaissances complémentaires géophysiques (7 sondages électriques), 1 sondage carotté, 2 puits, suivis piézométriques, essais de pompage
1990	ARMINES, P. Combes, E. Ledoux	LHM/RD/90/26	Actualisation du modèle de la plaine du Gol et de la rivière Saint-Etienne.	Compréhension des systèmes et étude des conditions d'exploitations optimales.	Modélisation Bilans	Modélisation hydrologique et hydrogéologique des écoulements. Etude des conditions d'exploitation des eaux souterraines. Secteur de la rivière Saint-Etienne.	Modélisation hydrologique et hydrogéologique.
2000	Sogreah	554538 R1	Etude hydrologique et hydrogéologique du secteur de l'étang du Gol.	Modélisation de l'impact de gravières sur l'étang.	Modélisation Pompages d'essais	Contextes physiques, hydrologiques, hydrogéologiques, synthèse réseau d'assainissement et rejets, bilans hydriques, modèle mathématique	Physico-chimie de l'étang et des gravières, autres données = ORE, météo France.
2001	Didier Leveneur, SAPHIR - ESEM	Rapport de stage, 2 parties	Synthèse des données hydrogéologiques actuelles du sud et de l'ouest de l'île de la Réunion. Suivi des captages d'eau souterraine gérés par la SAPHIR.	Centralisation des données pour améliorer la gestion de l'exploitation des eaux.	Ressource Pompages d'essais	Partie I : Synthèse des données hydrogéologique globale par secteurs (Cocos, Gol, pierrefonds, rivière des Remparts, Saline/St-Leu). Partie II : Etude et suivi des puits et forages SAPHIR.	Essais de puits et de nappes: puits des écumes, puits A. Données DDASS, suivi LADE (laboratoire d'analyse des eaux de la SAPHIR)
2002	ANTEA	A 27584	Cône alluvial de la rivière Saint-Etienne. Actualisation des données hydrologiques et hydrogéologiques. Elaboration d'un modèle mathématique de gestion des ressources en eau souterraine.	Evaluation des ressources en eau du système aquifère du Cône alluvial de la Rivière Saint-Etienne.	Modélisation Bilans	Synthèse et interprétation des données disponibles. Réalisation de bilans hydrologiques et détermination des conditions aux limites. Modélisation hydrodynamique.	bilans hydrologiques (GARDENIA).
2006	Sogreah	4700361 R1	Essais de pompage - Puits Bois de Nèfles et Puits du Gol.	Impact d'une augmentation des volumes prélevés dans les puits de l'usine sur les ouvrages exploités par la SAPHIR (irrigation).	Pompages d'essais	Réalisation et traitement de pompage par paliers et longue durée en doublet sur les puits de l'usine.	Pompages d'essais par paliers (individuels) et longue durée (en doublet), suivi piézométrique, suivi conductivité.
2008	Office de l'Eau Réunion, J.L. Folio		Exploitation de la ressource en eau souterraine sur le secteur du Gol et des Cocos. Modélisation mathématique en densité variable. Ouvrages du périmètre irrigué du bras de Cilaos. Simulation de l'évolution de la salinité induite par l'exploitation des nappes du Gol et des Cocos.	Influence des prélèvements sur les nappes stratégiques du Gol et des Cocos.	Modélisation Bilans	Synthèse des données conductivité, prélèvements et analyse. Transposition du modèle ANTEA (2002), nouvelle modélisation mathématique, prévisions sur l'avancée du front salé et préconisations de gestion et de surveillance de la ressource.	Résistivités BRGM (1966-1969) converties en salinité pour carte. Modélisation mathématique SEAWAT (couplage MODFLOW - MT3DMS pour la partie transport hydrodispersif).

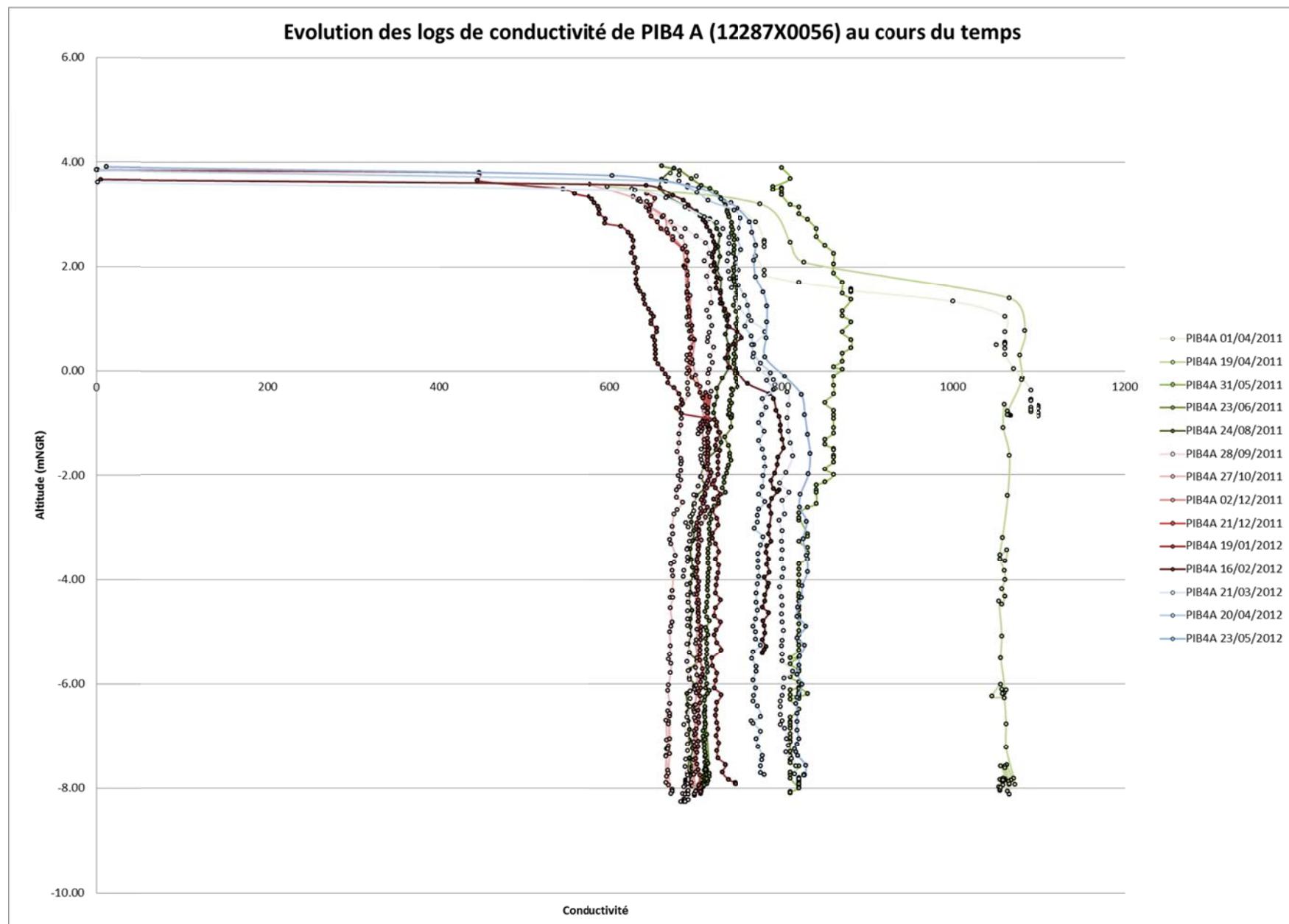


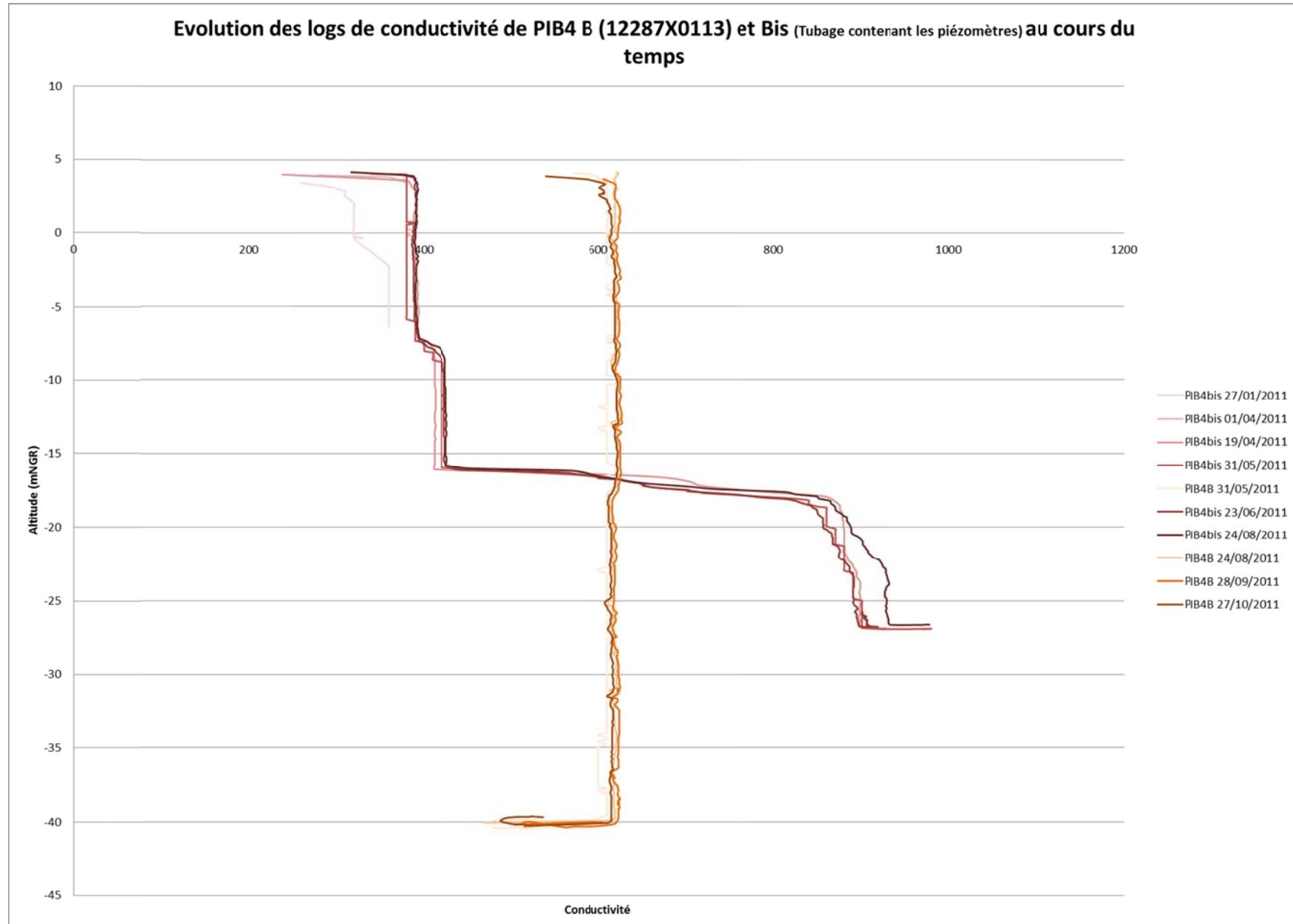
## Annexe 2 :

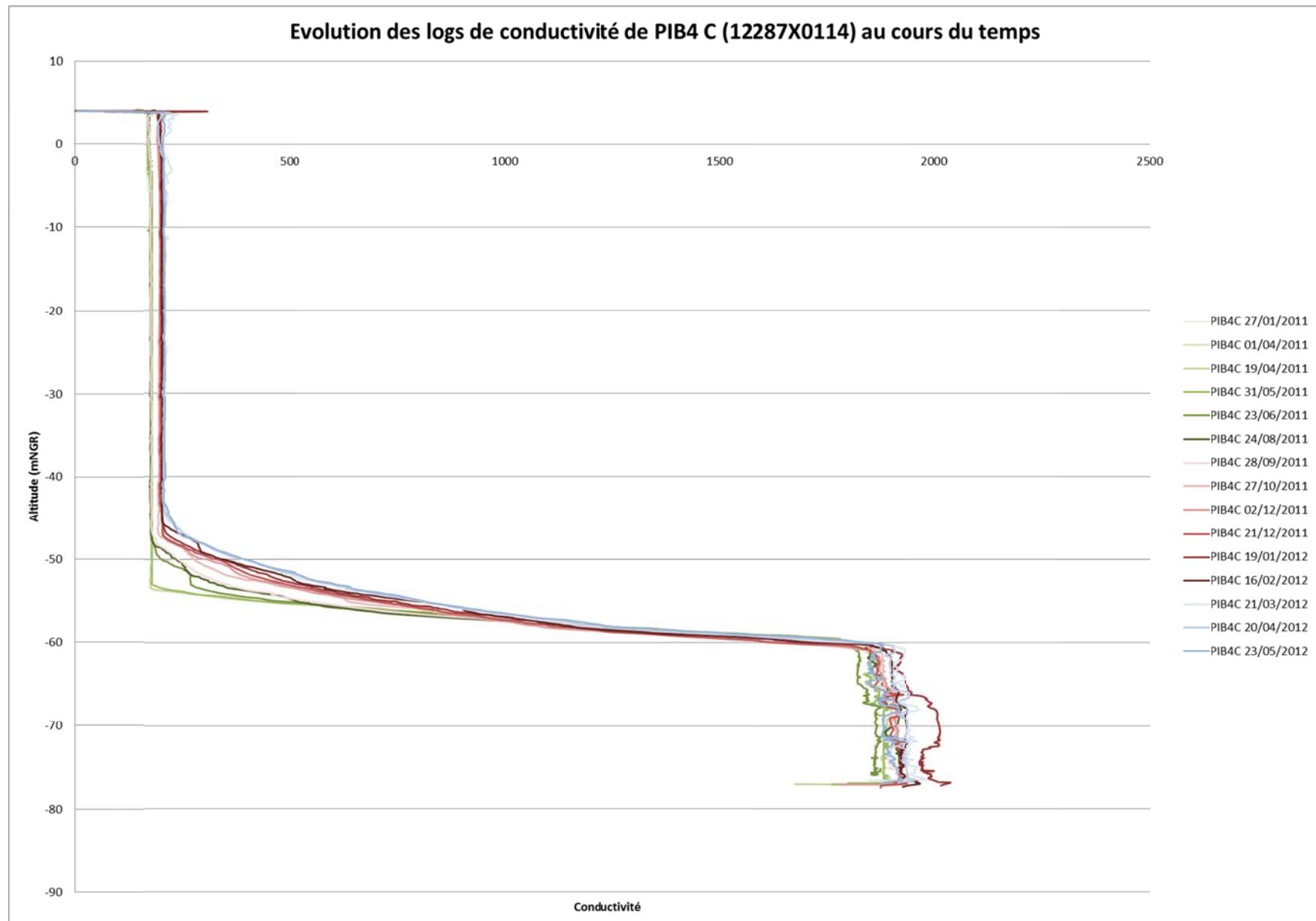
### Logs de conductivité

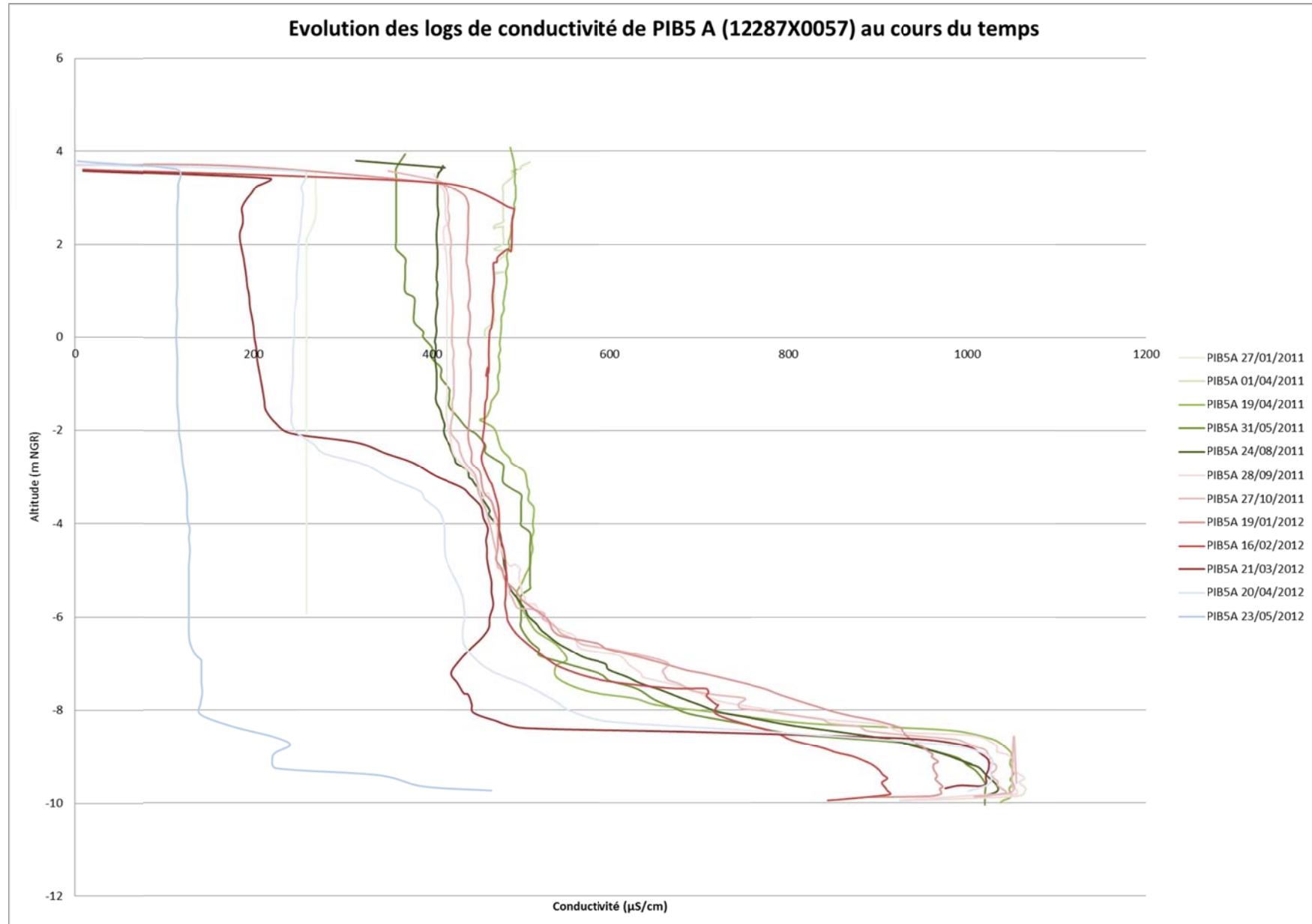
PIB4A	12287X0056/PIB-4A
PIB4B et PIB4 Bis	12287X0113/PIB-4B
PIB4C	12287X00114/PIB-4C
PIB5A	12287X057/PIB-5A
PIB5B	12287X0115/PIB-5B
PIB5C	12287X0116/PIB-5C
PIB5D	12287X0117/PIB-5D
S2 Bdn	12287X0039/S2
S6 Bdn	12287X0107/S6
SC I	12287X0058/SC-1
SC II	12287X0059/SC-2
SC III	12287X0060/SC-3
SC IV	12287X0063/SC-4
Piézo Marengo	12287X0066/P4
S3 Ecumes	12287X0105/S3
PZ Radier 1	12287X0133/PZ
PZ Radier 2	12287X0134/PZ

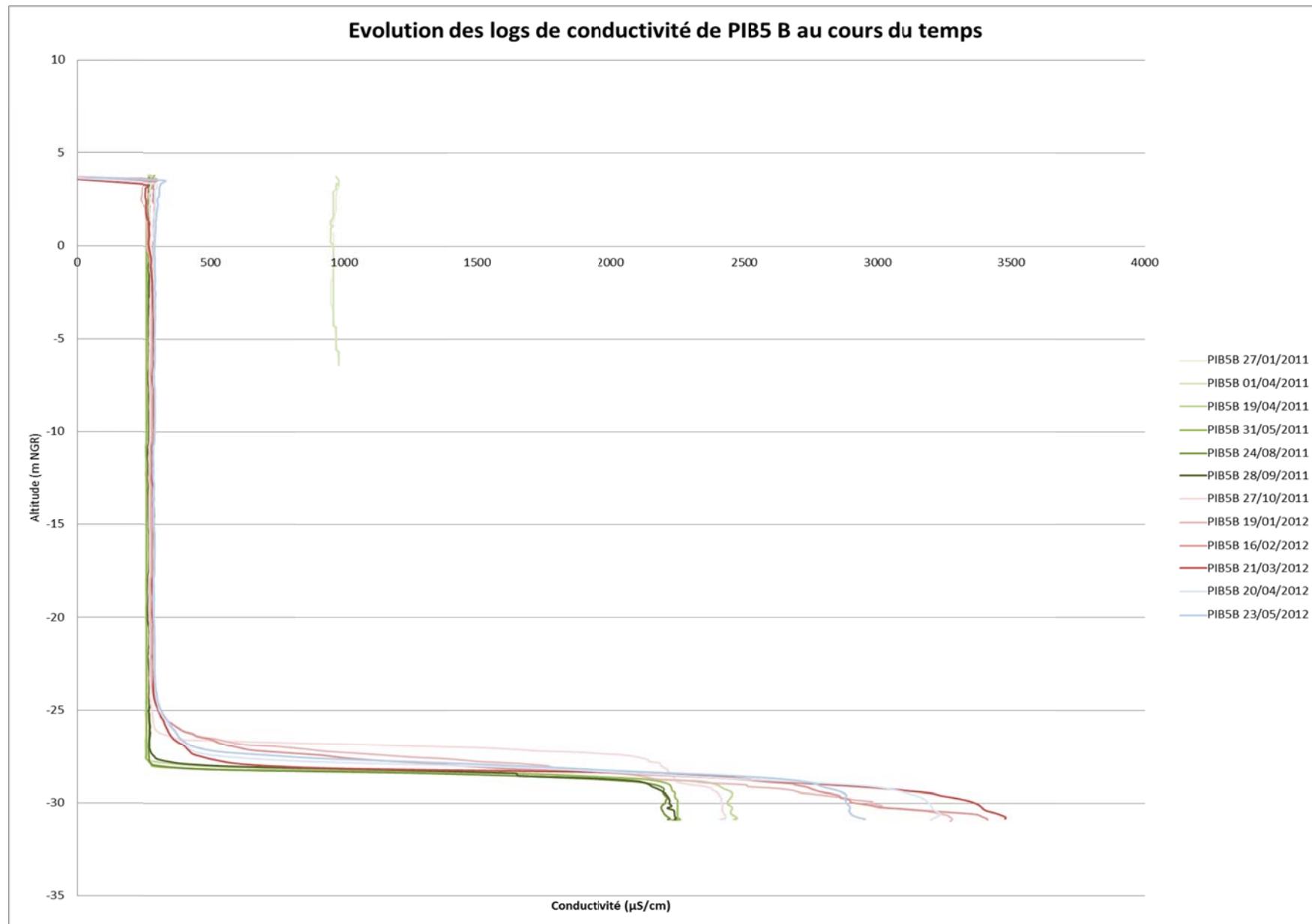


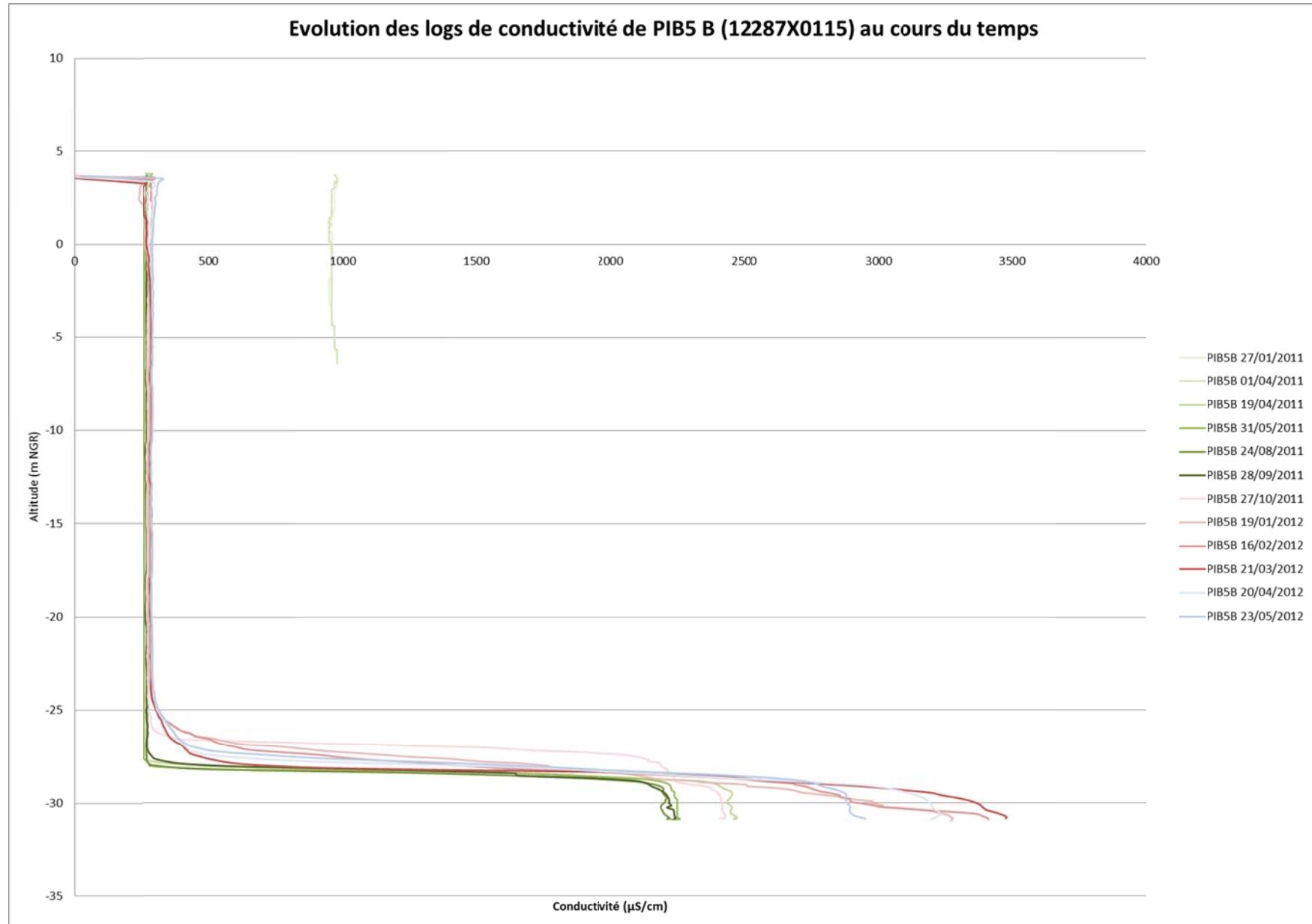


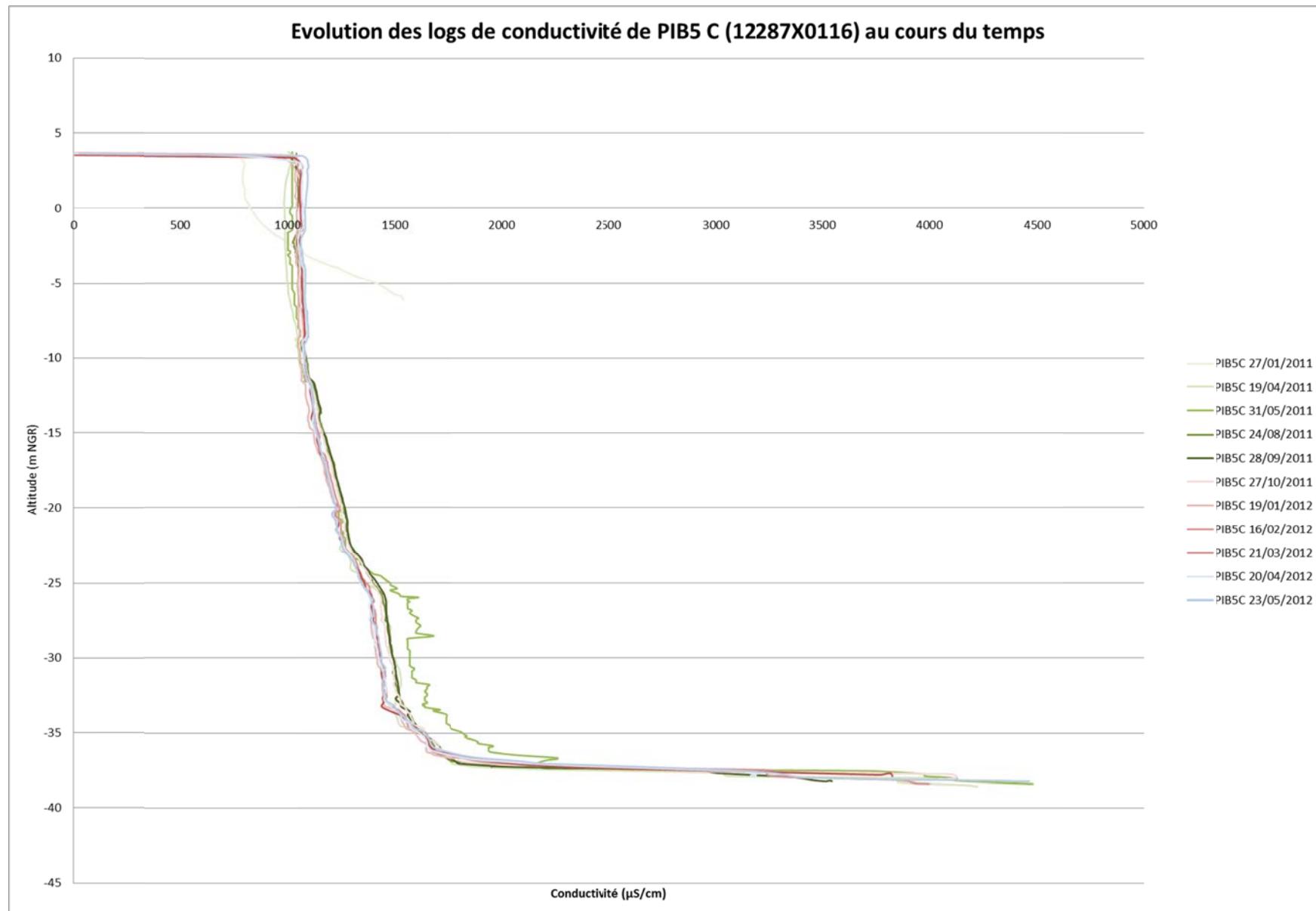


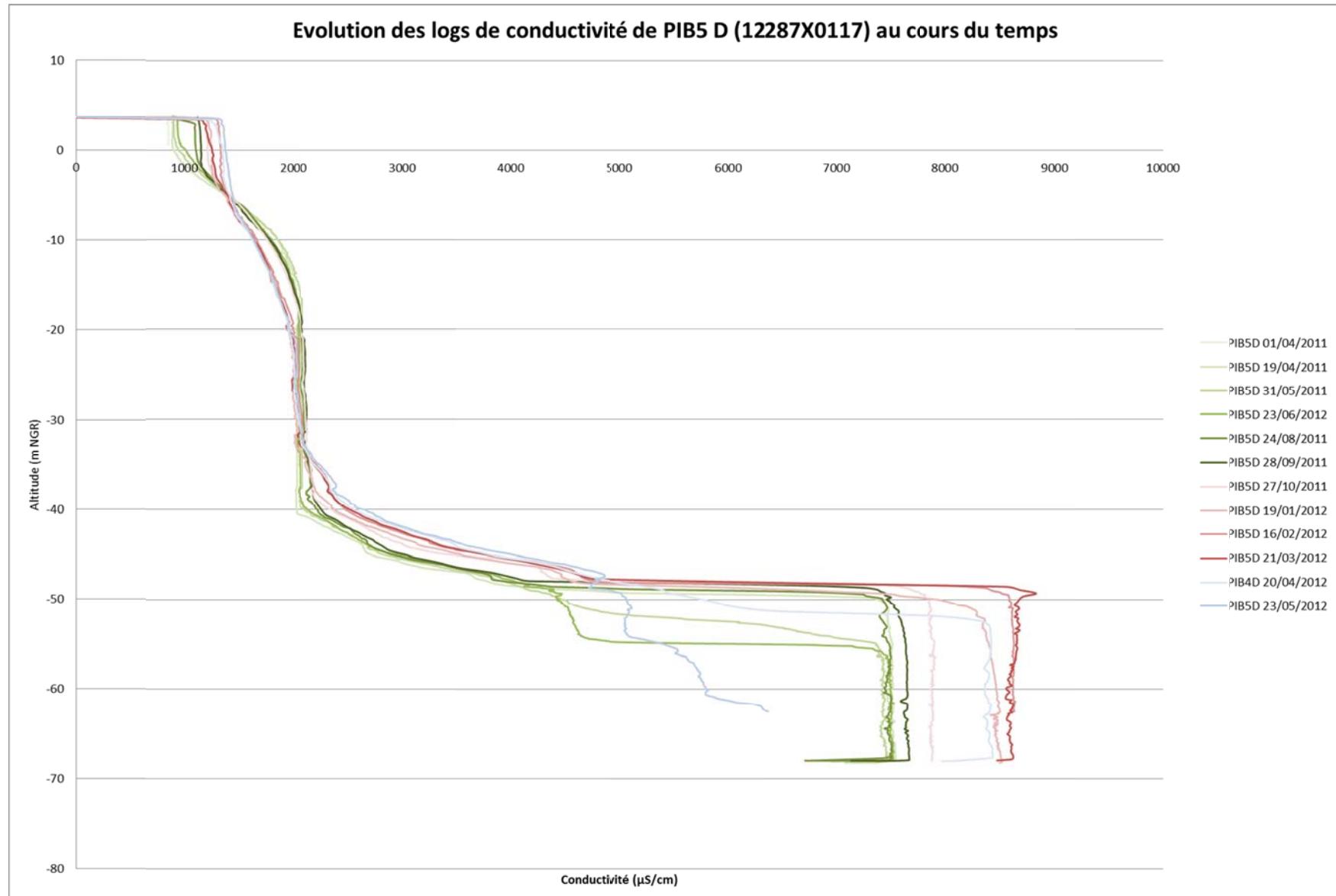


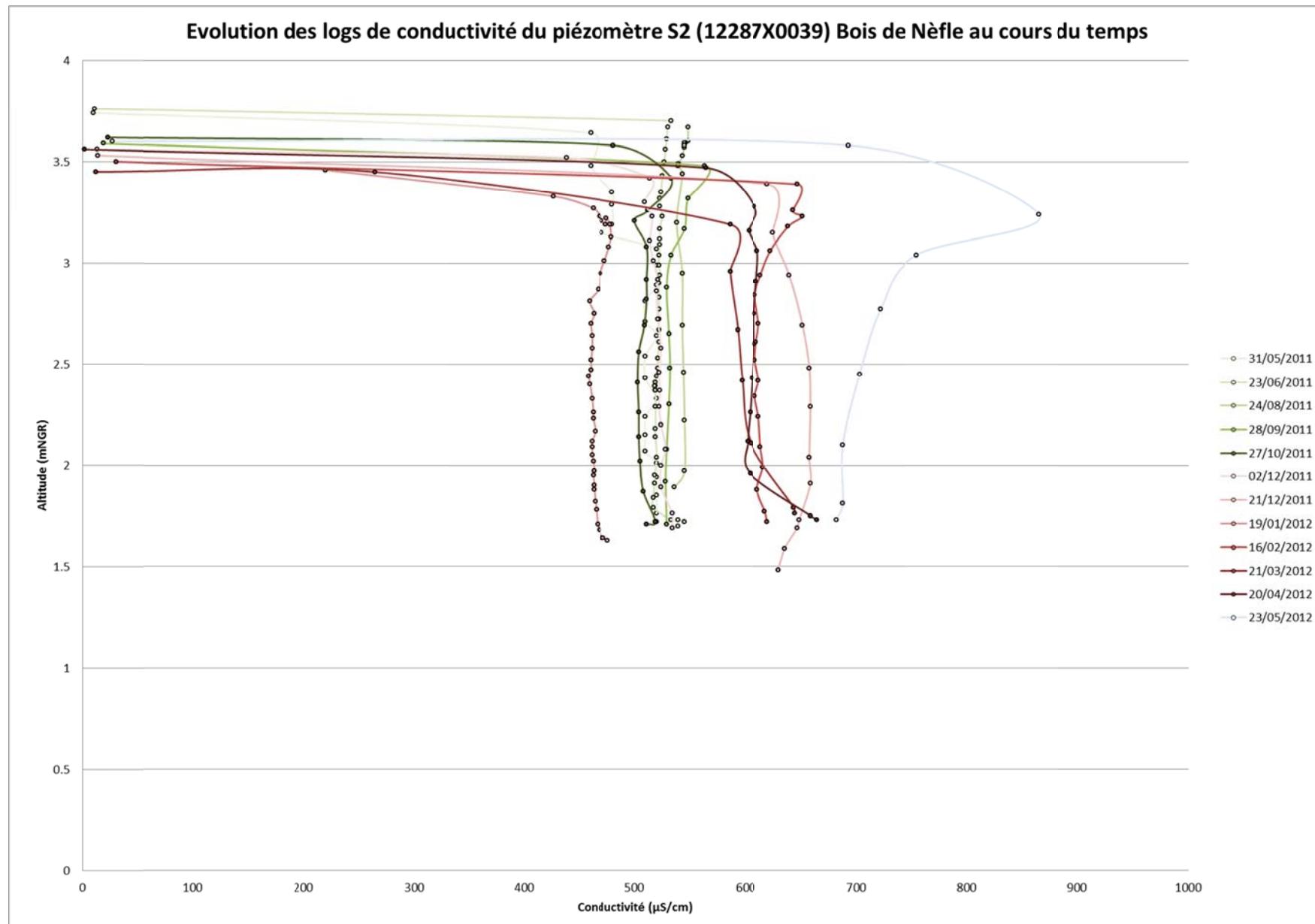


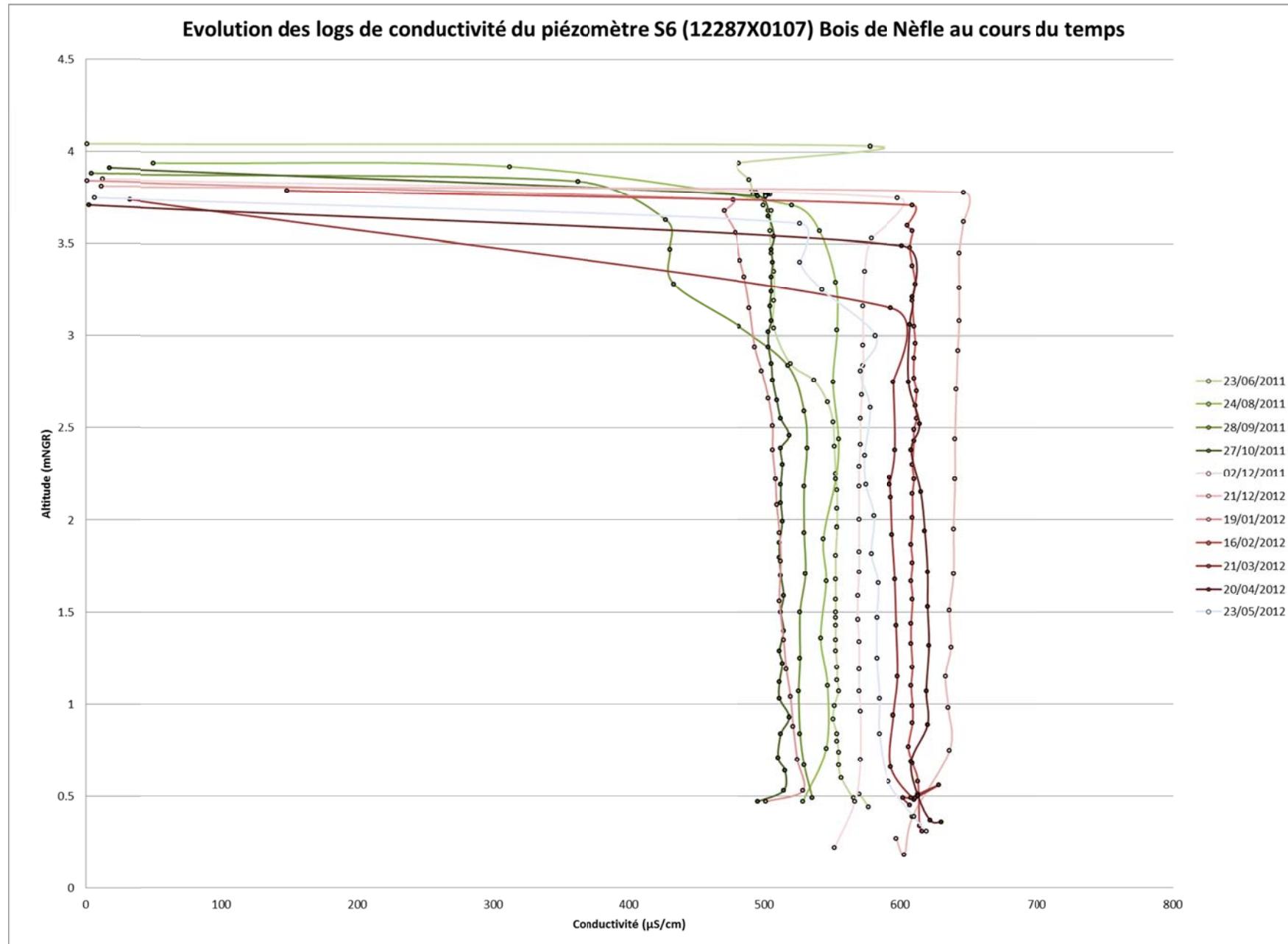


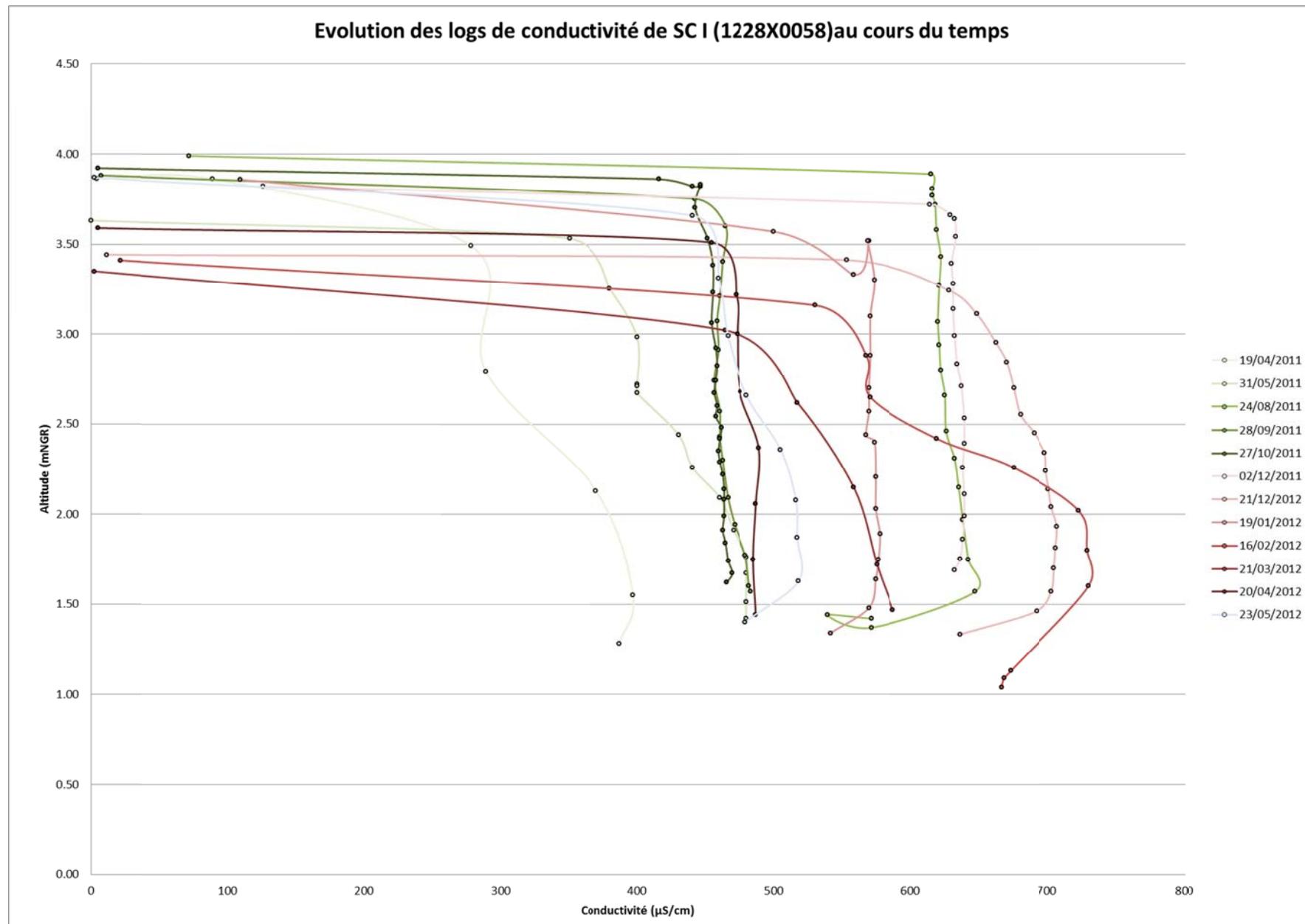


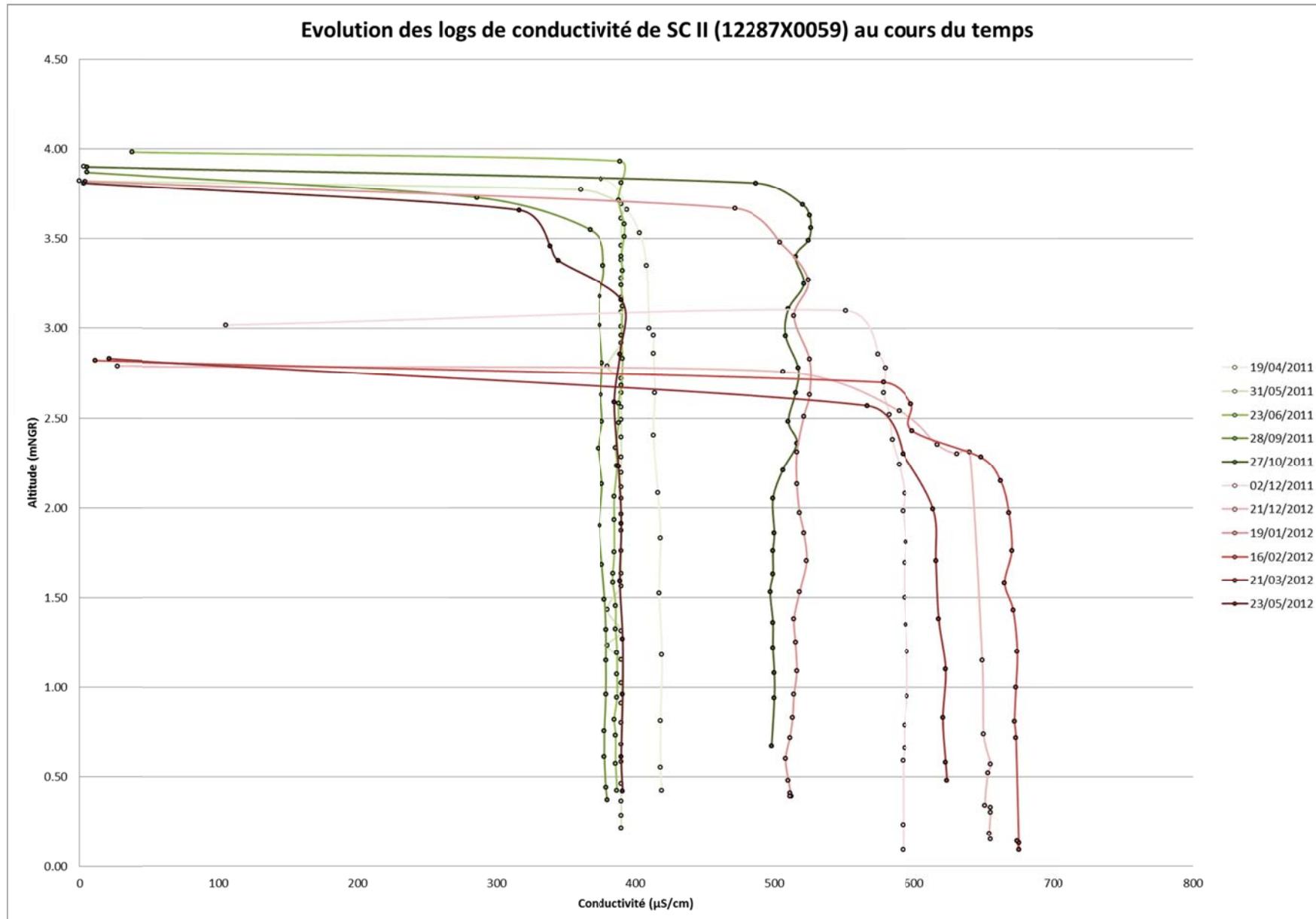


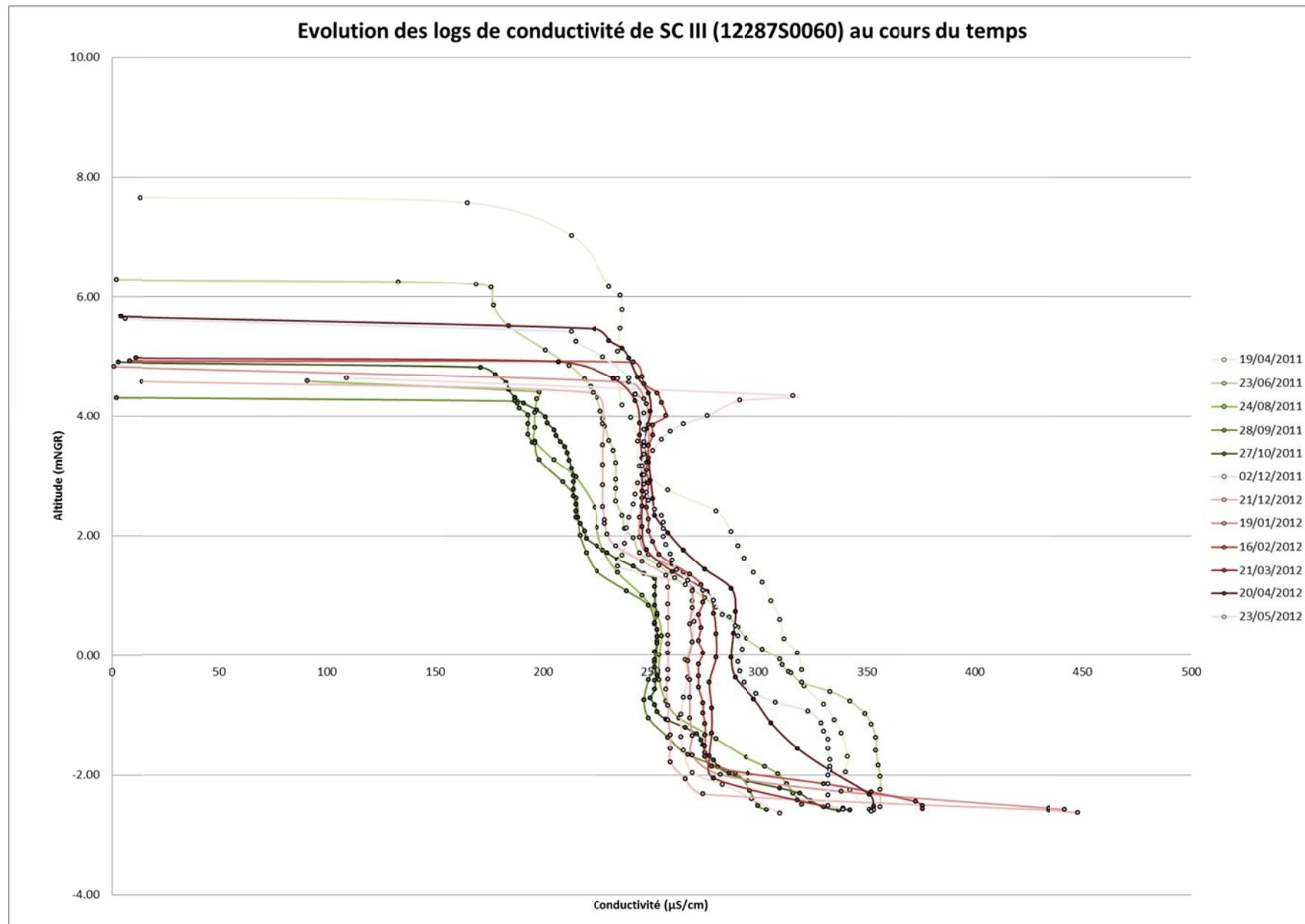


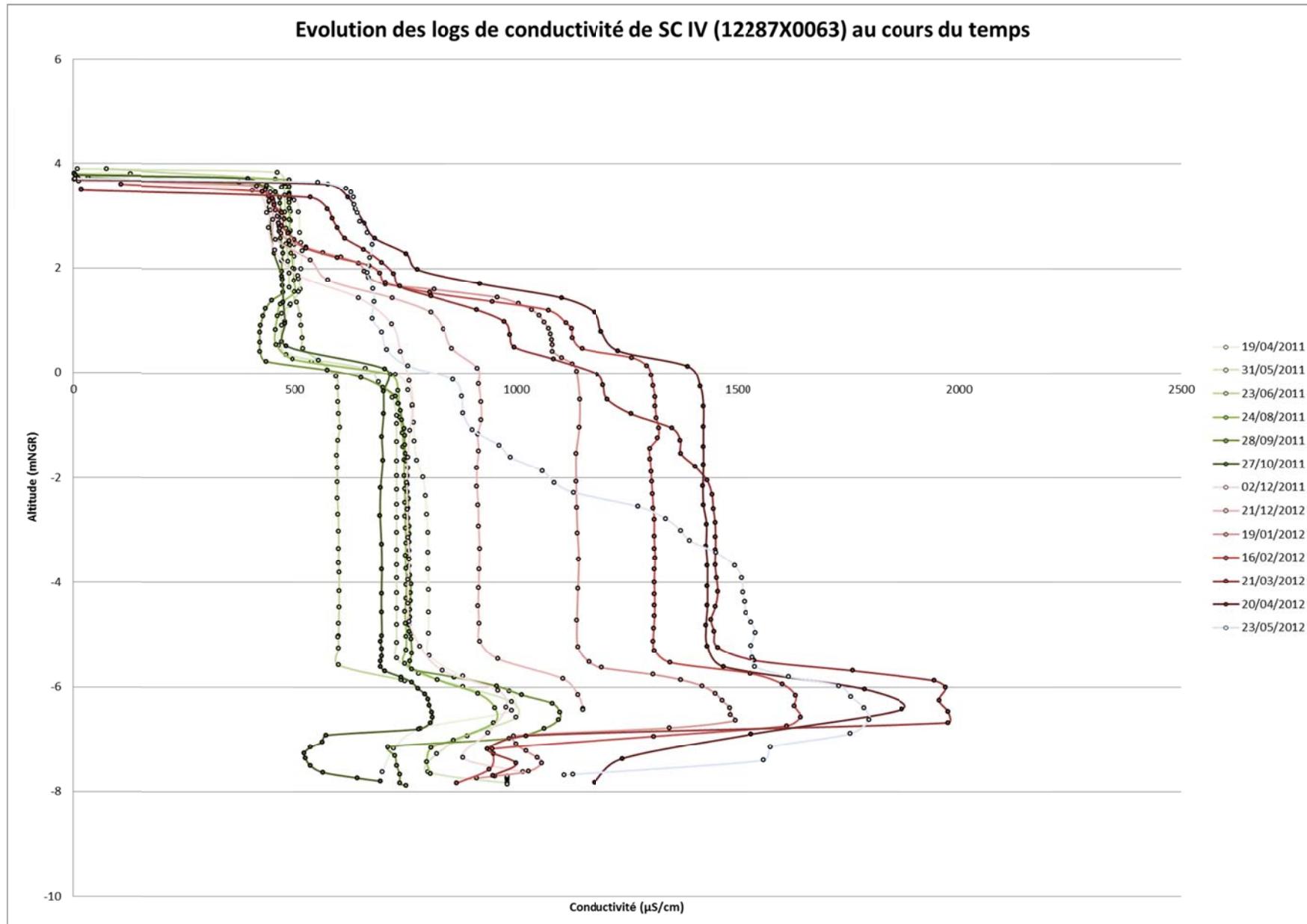


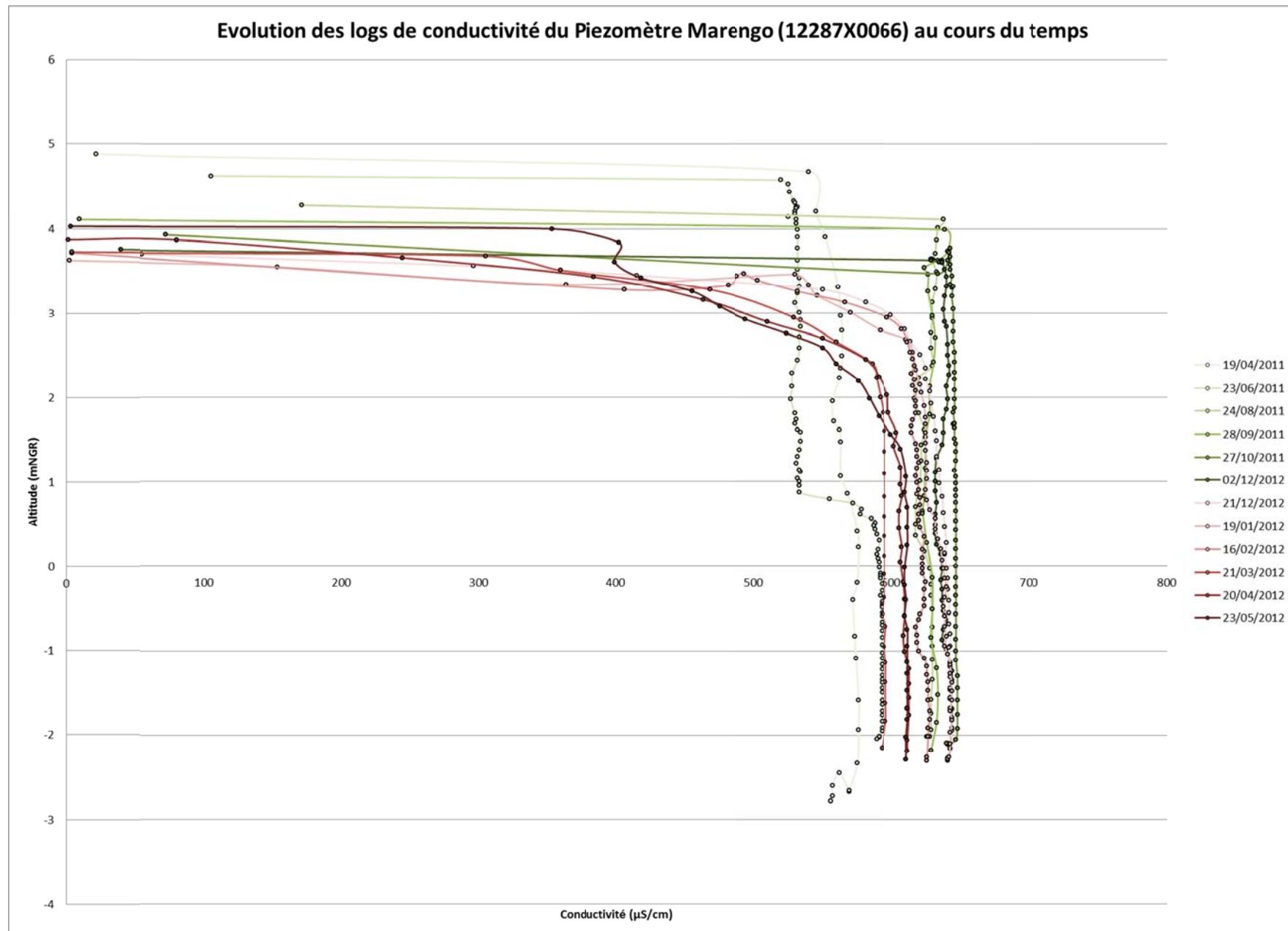


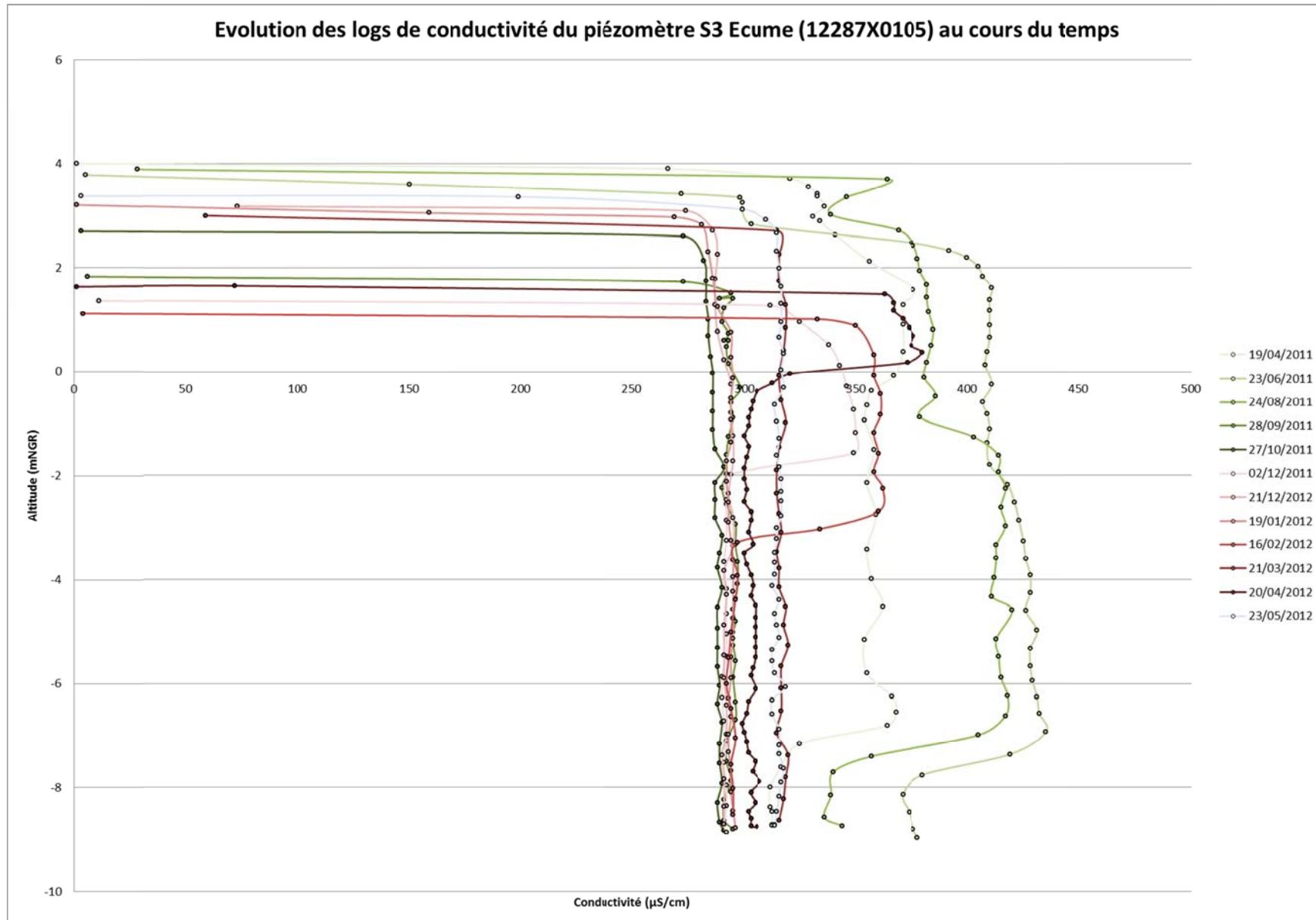


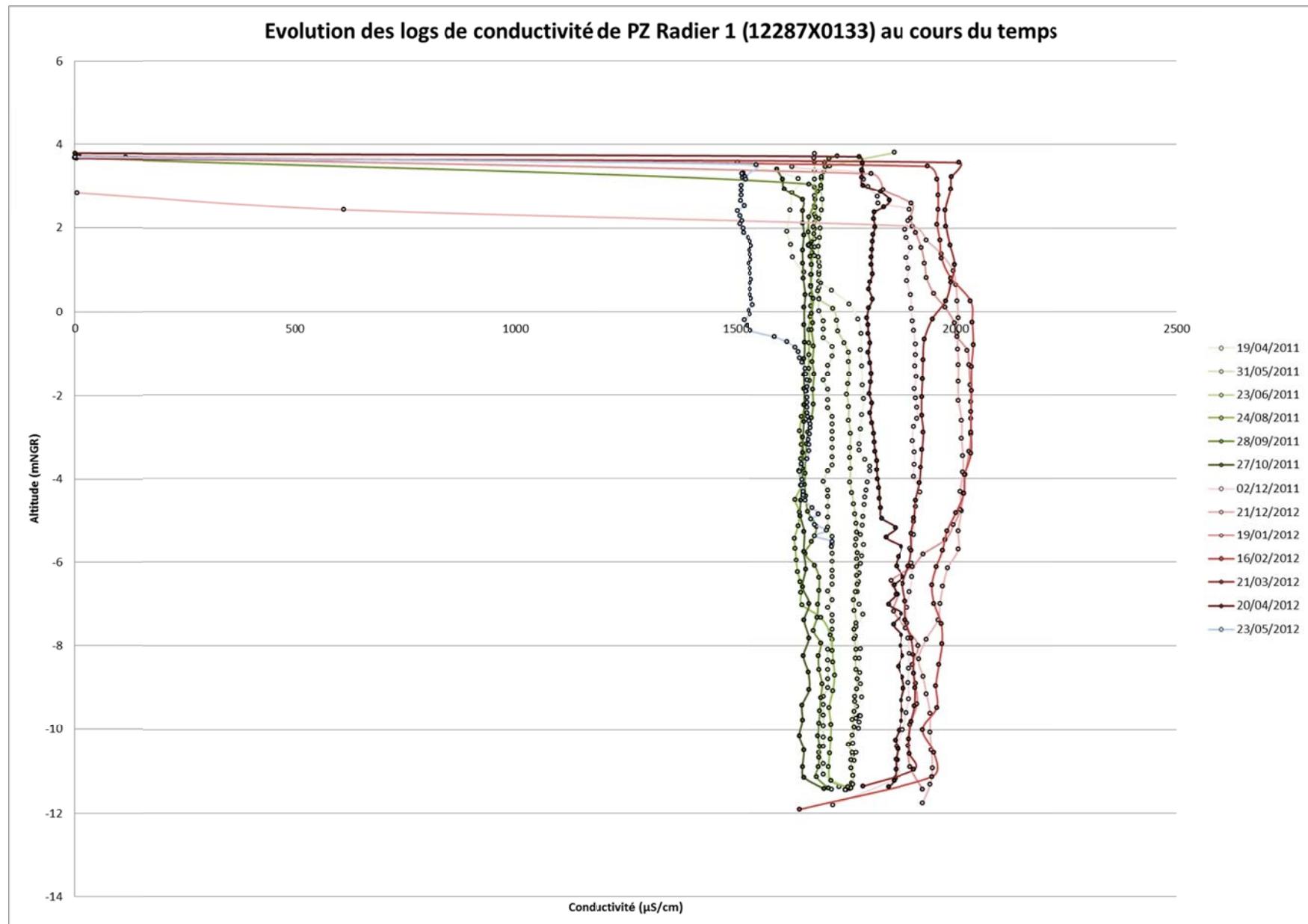


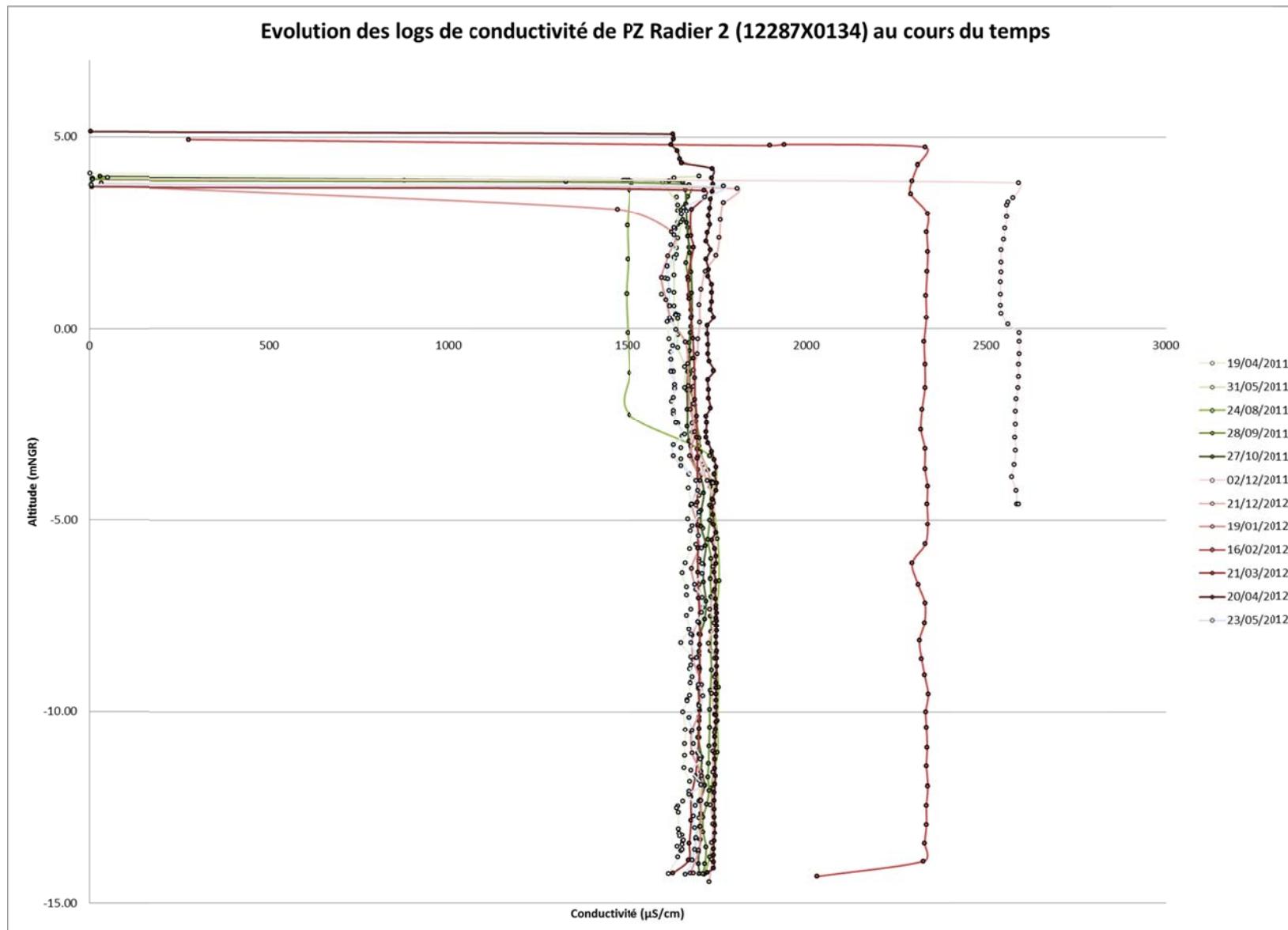










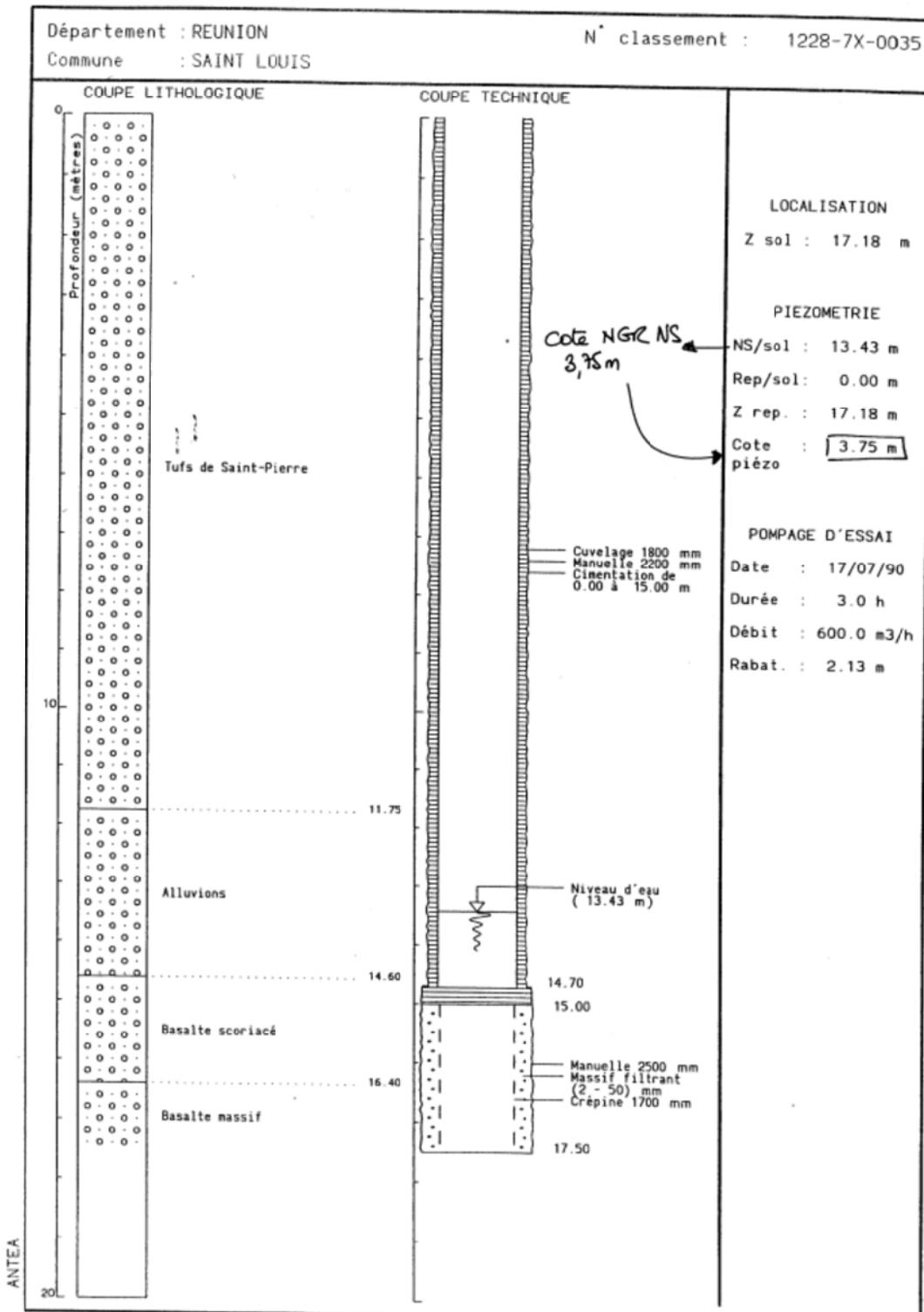


## **Annexe 3 :**

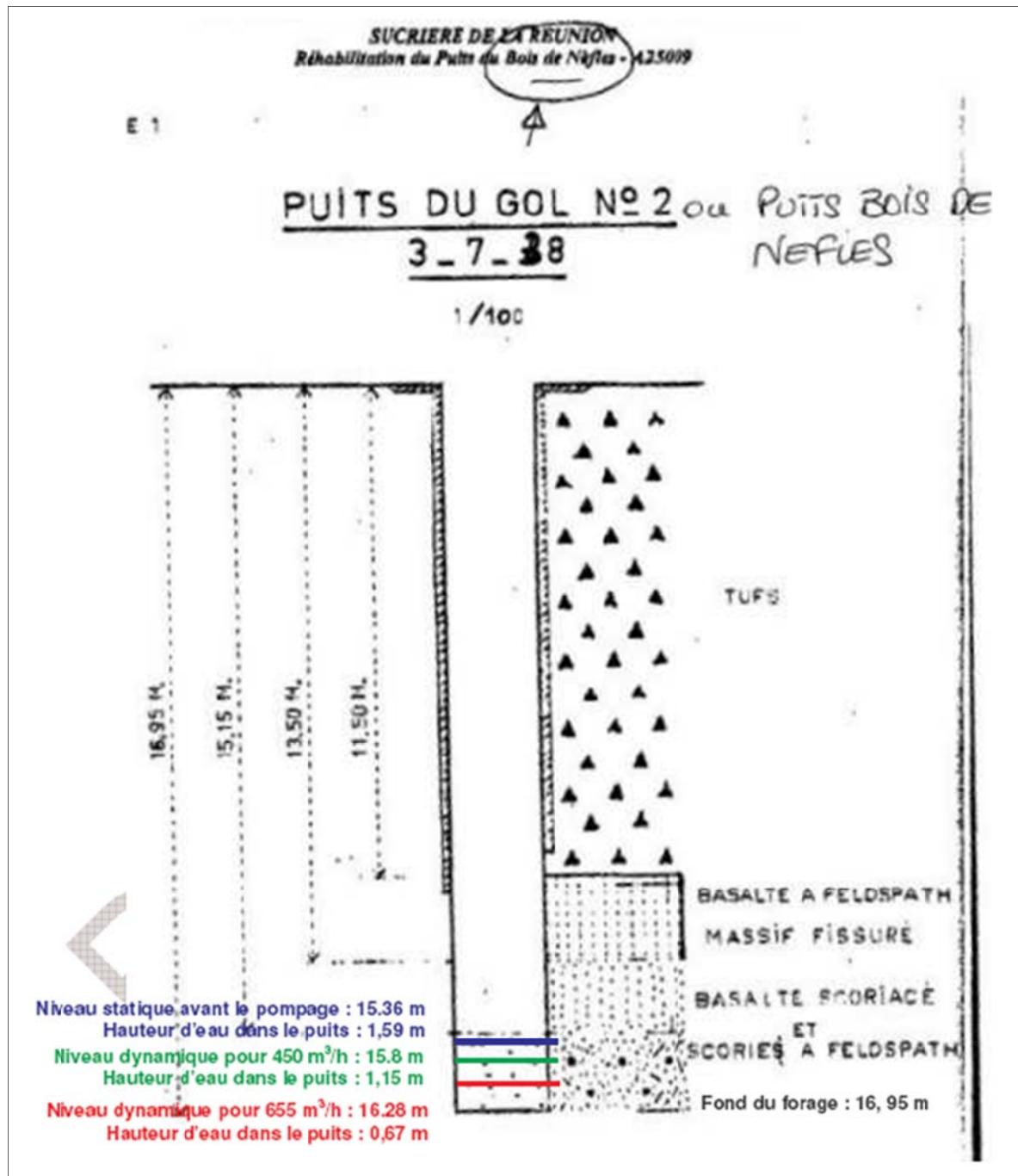
### **Logs géologiques et coupes techniques**



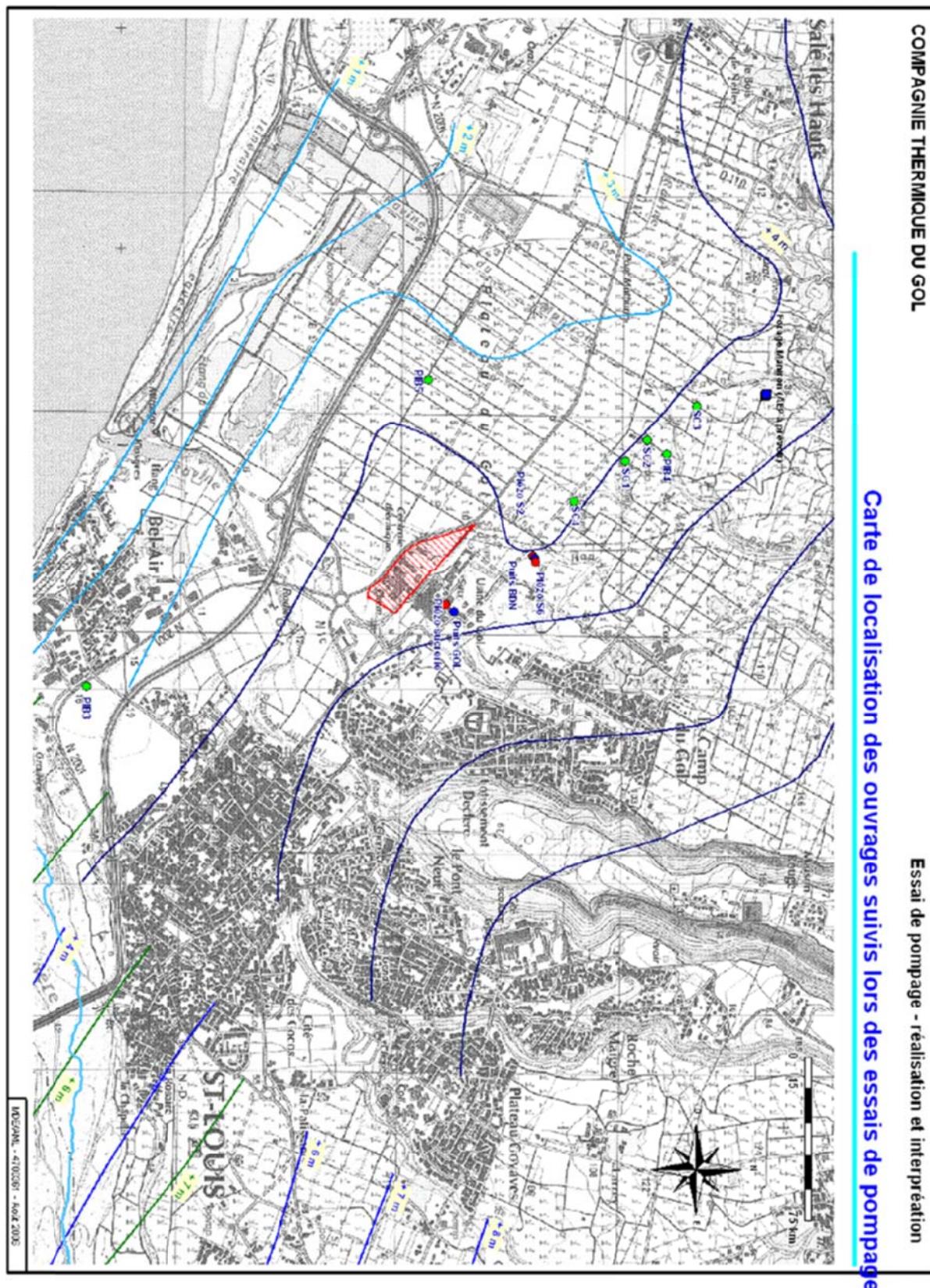
— Puits du Gol —



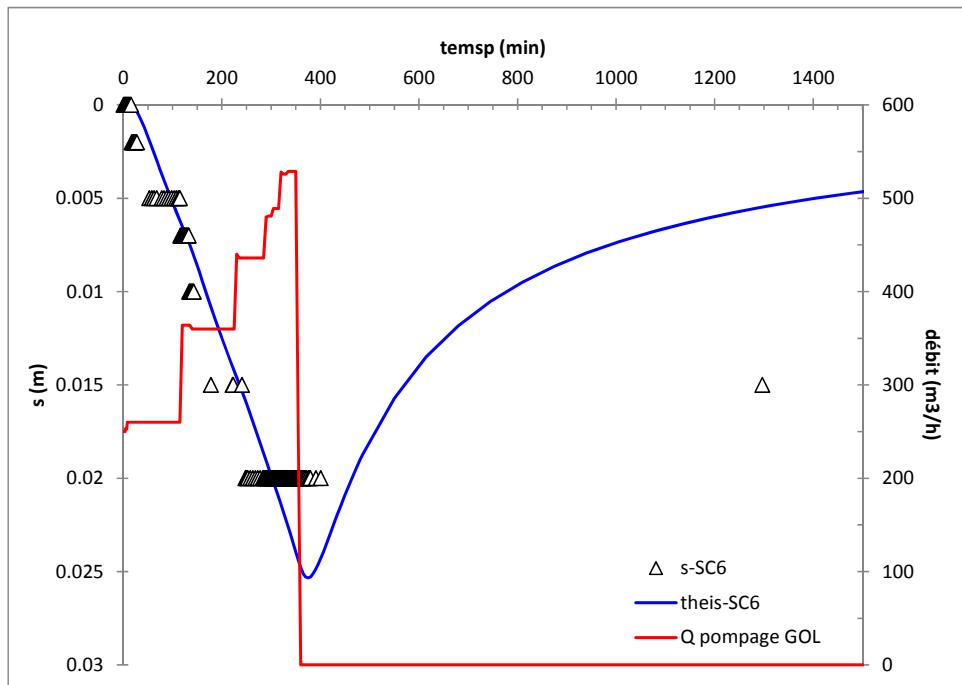
Coupe technique et géologique du puits du Gol (12287X0035).



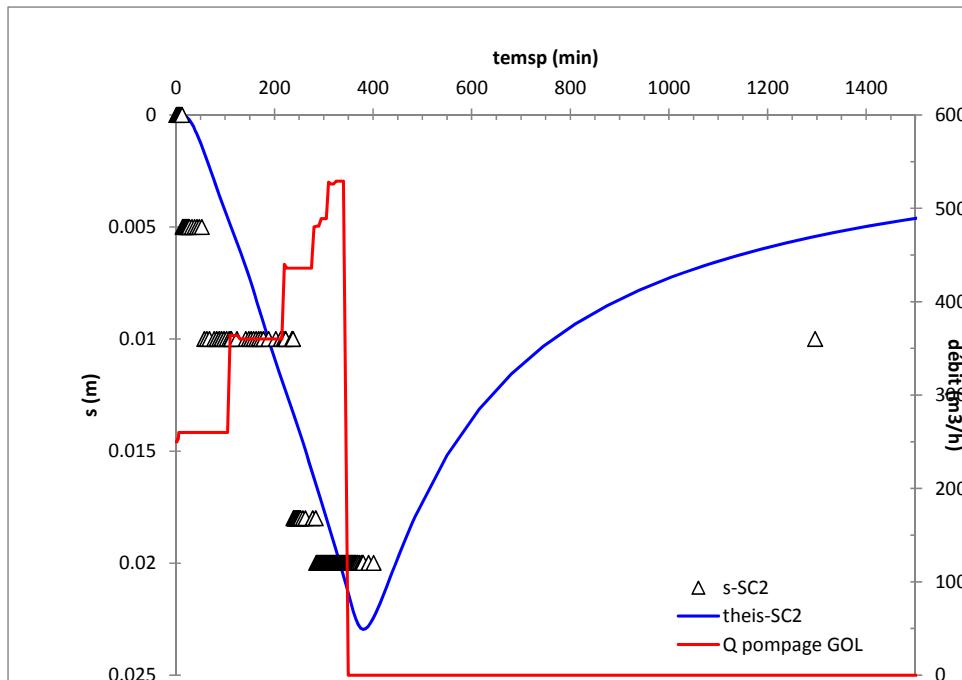
Coupe technique et géologique du puits du Bois des Nèfles (12287X0038).



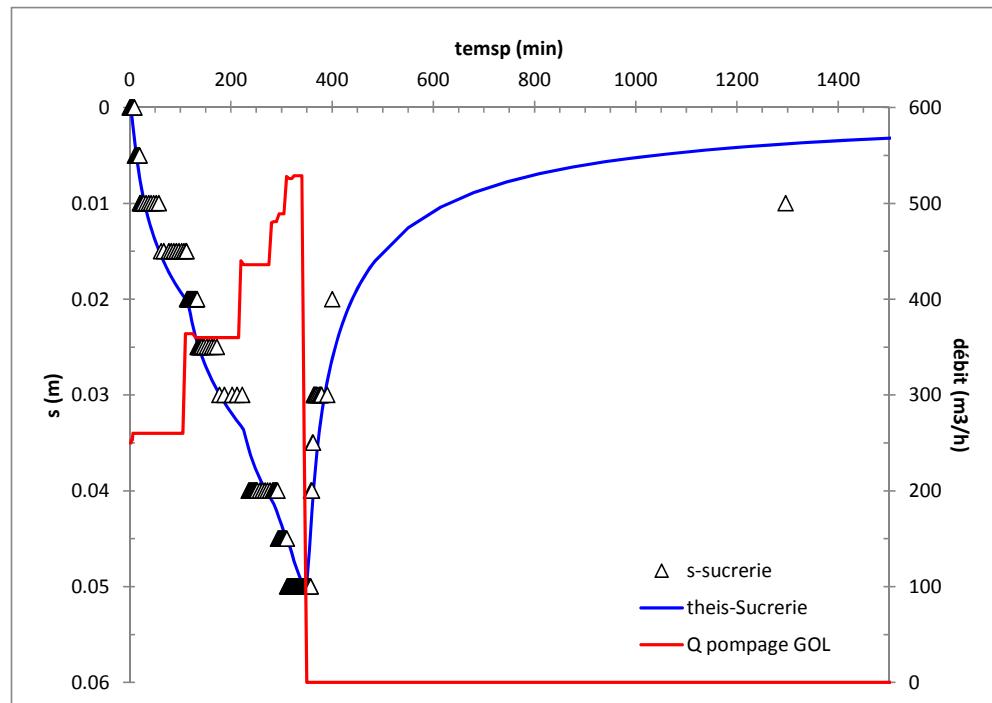
Carte de localisation du dispositif de pompage. (Sogreah, 2006).



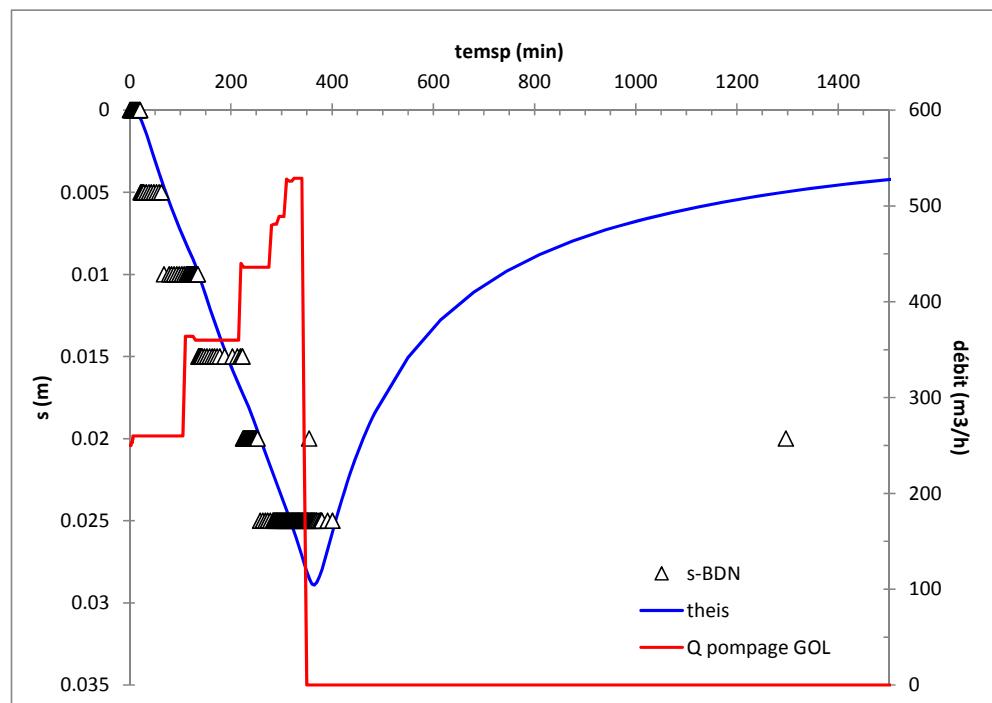
Pompage puits du Gol, observation sur SC6 ( $r = 430 \text{ m}$ ). Modèle Theis.



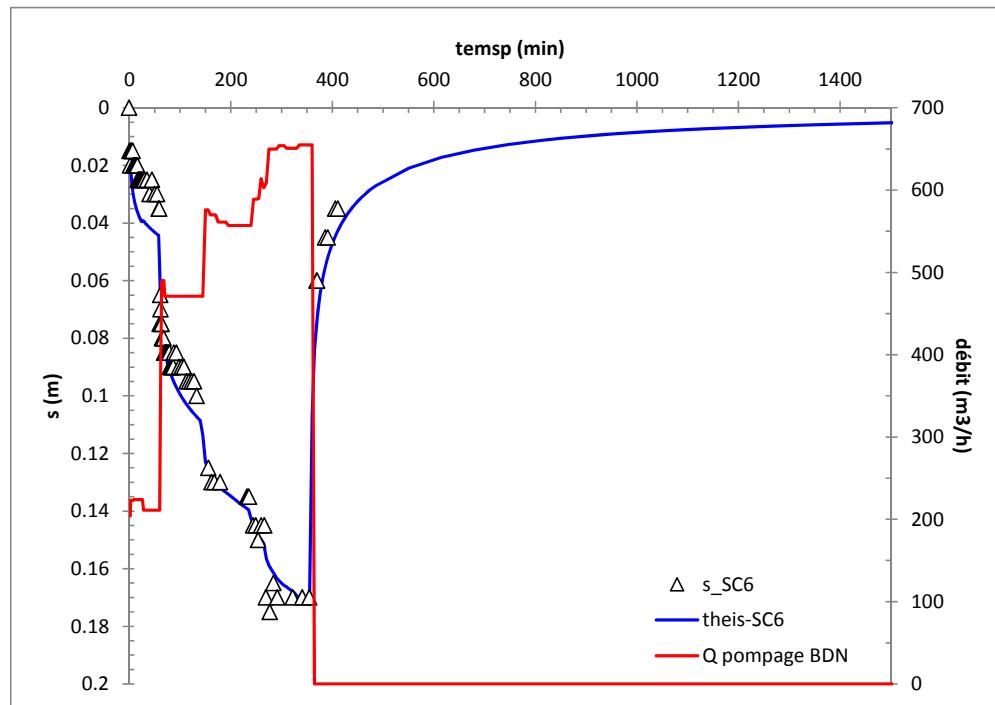
Pompage puits du Gol, observation sur SC2 ( $r = 435 \text{ m}$ ). Modèle Theis.



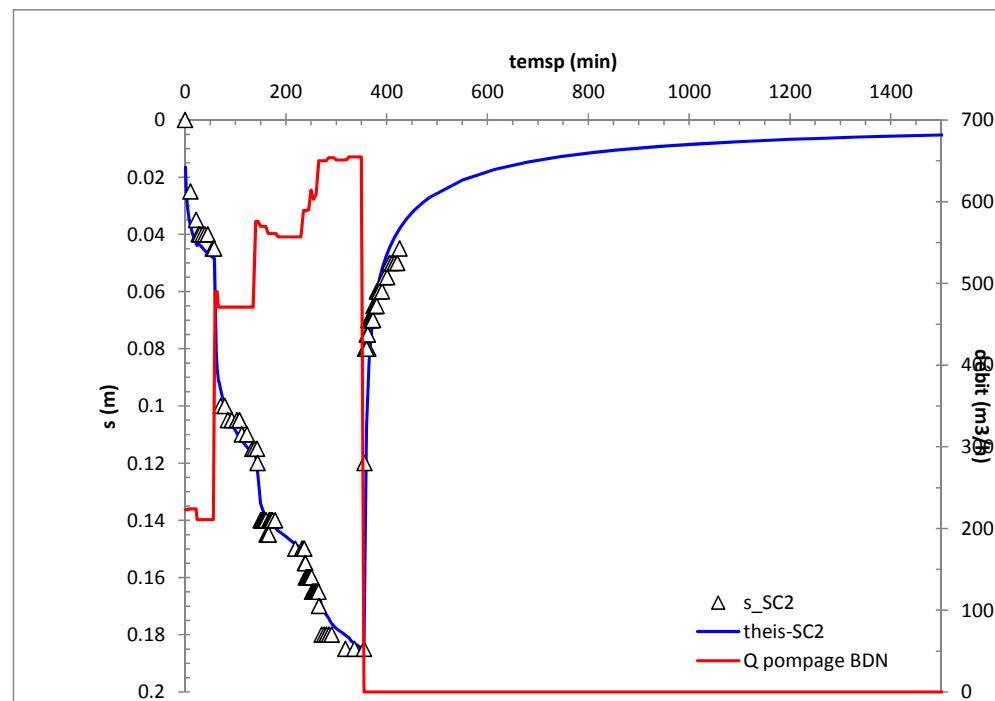
Pompage Puits du Gol, observation sur SUCRERIE ( $r = 50$  m). Modèle Theis.



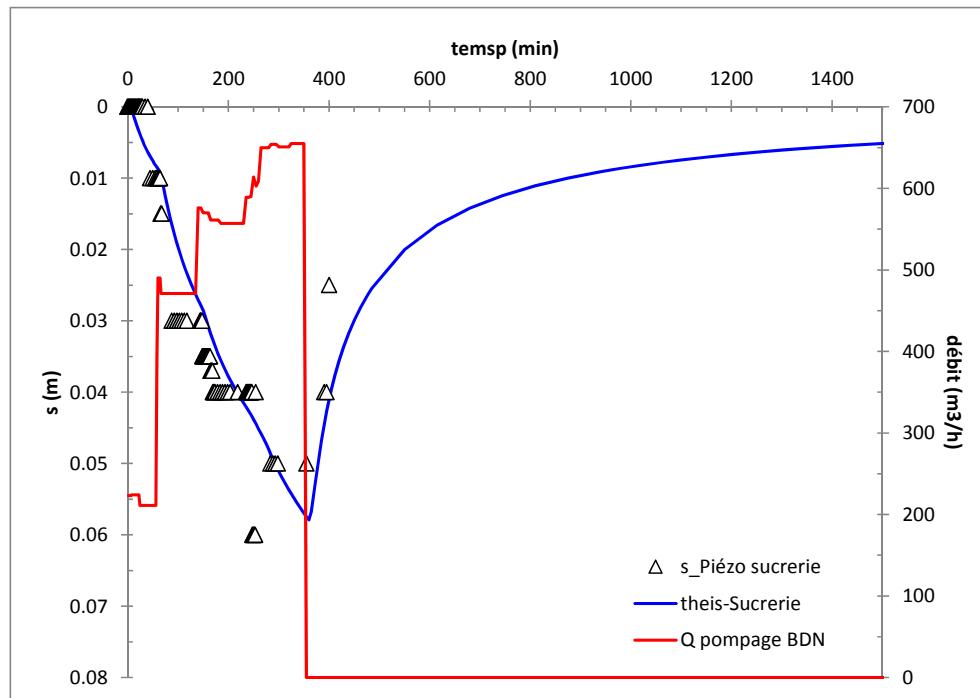
Pompage Puits du Gol, observation sur le puits du Bois des Nèfles ( $r = 435$  m). Modèle Theis.



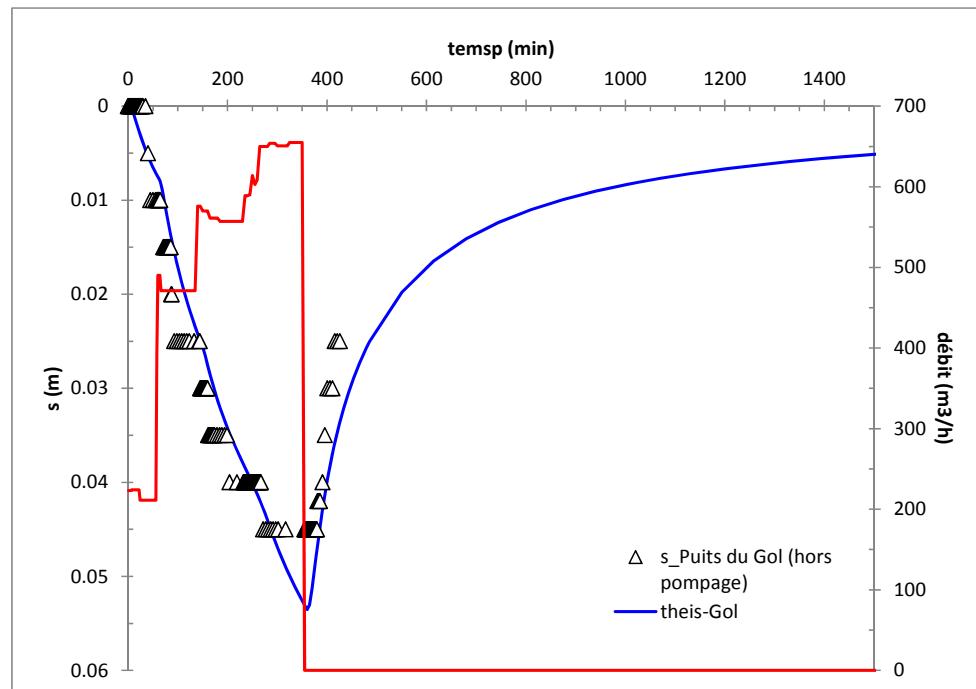
Pompage Puits du Bois des Nèfles, observation sur SC6 ( $r = 10.4 \text{ m}$ ). Modèle Theis.



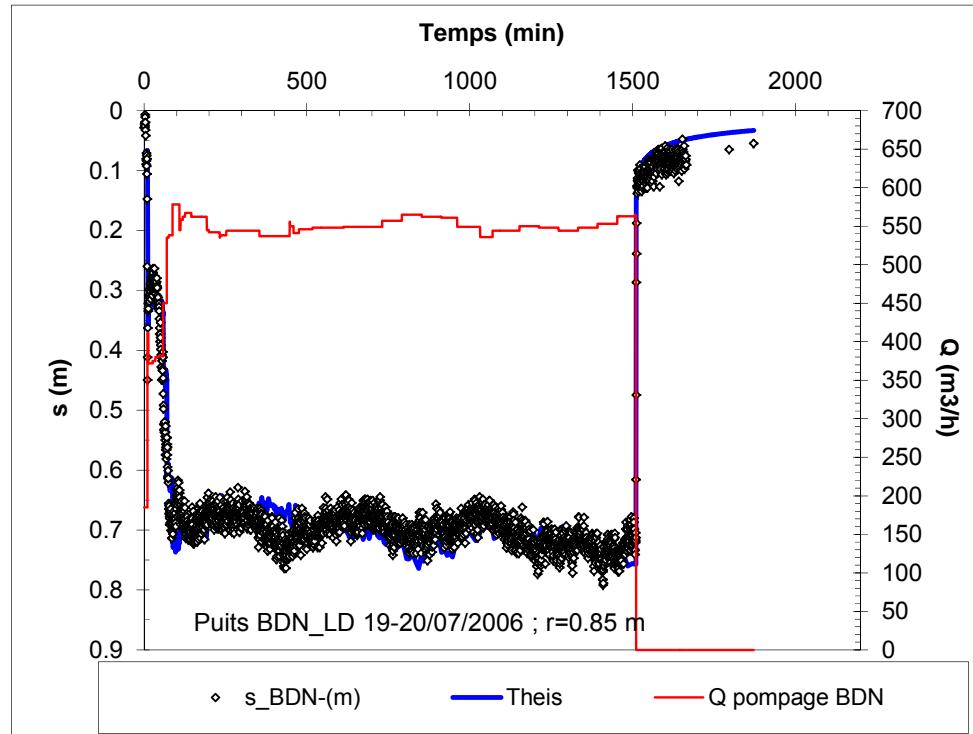
Pompage Puits du Bois des Nèfles, observation sur SC2 ( $r = 10.3 \text{ m}$ ). Modèle Theis.



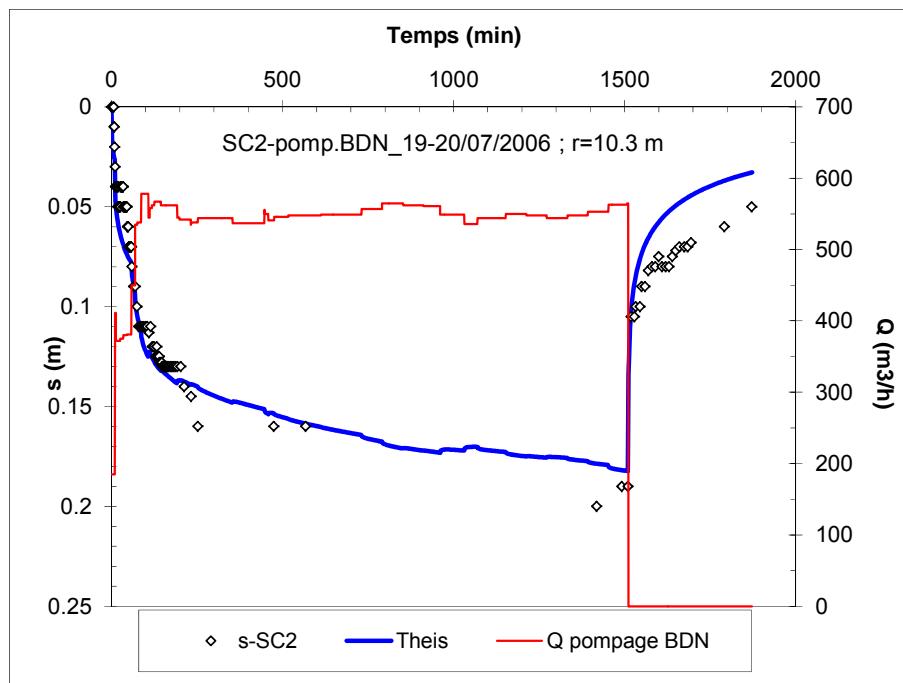
Pompage Puits du Bois des Nèfles, observation sur SUCRERIE ( $r = 450$  m). Modèle Theis.



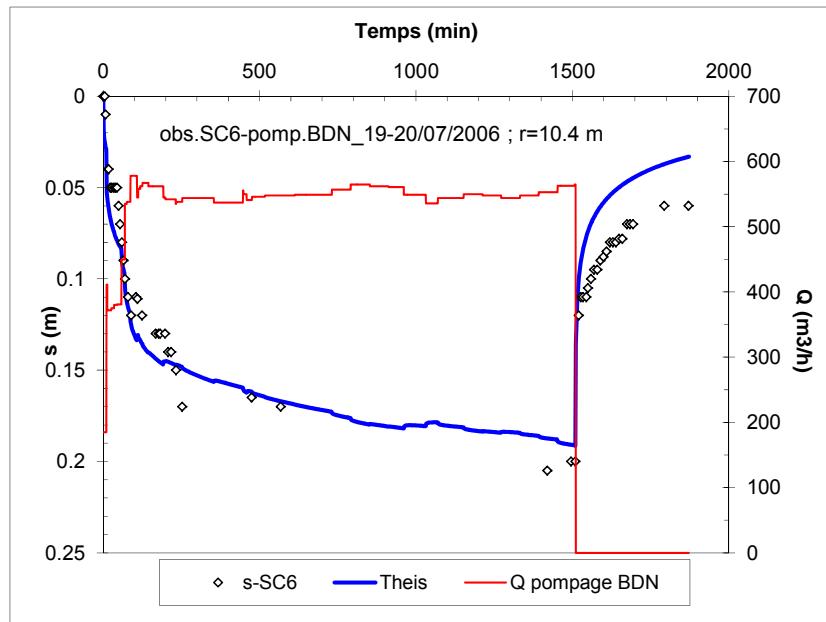
Pompage Puits du Bois des Nèfles, observation sur le puits du Gol ( $r = 435$  m). Modèle Theis.



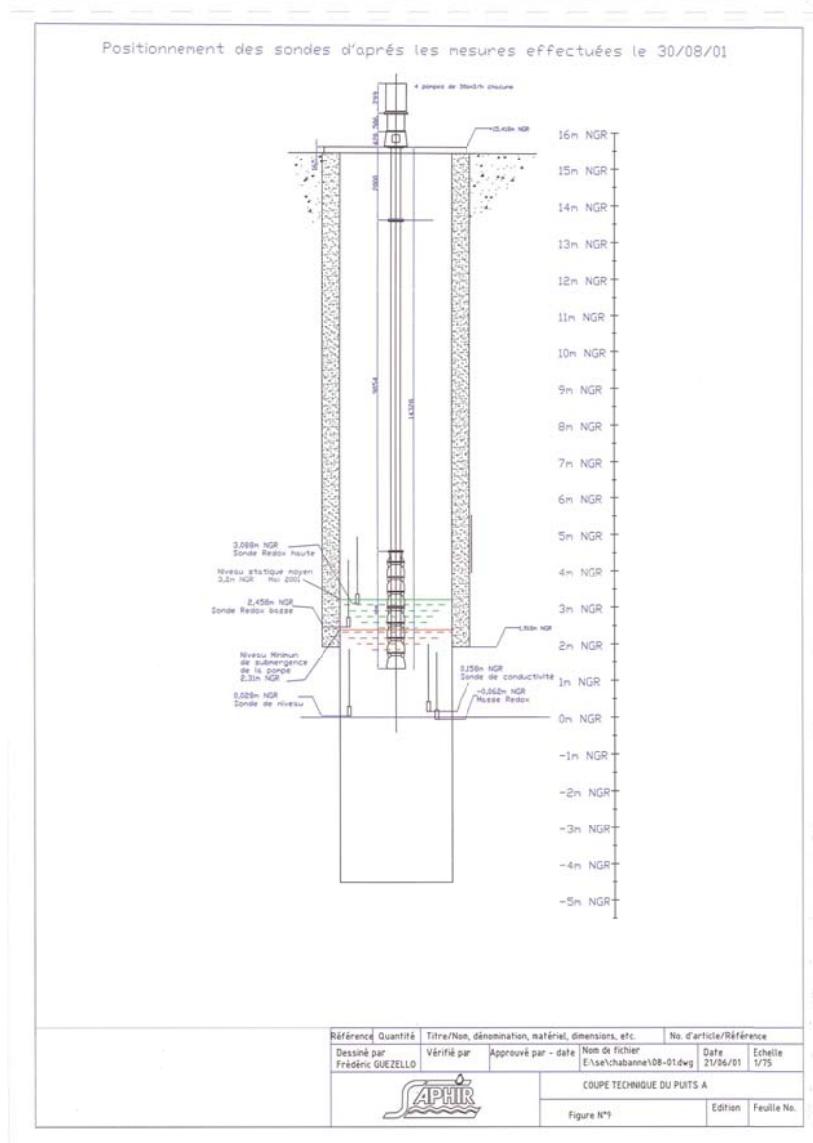
Pompages simultanés Puits du Bois des Nèfles- Puits du Gol, observation sur le puits du Bois des Nèfles ( $r = 0.85$  m). Modèle Theis, sans prise en compte des variations de débit sur le puits du Gol (interférence jugée négligeable ; cf. texte).



Pompages simultanés Puits du Bois des Nèfles- Puits du Gol, observation sur le piézomètre SC2 ( $r = 10.3$  m). Modèle Theis, sans prise en compte des variations de débit sur le puits du Gol (interférence jugée négligeable ; cf. texte).



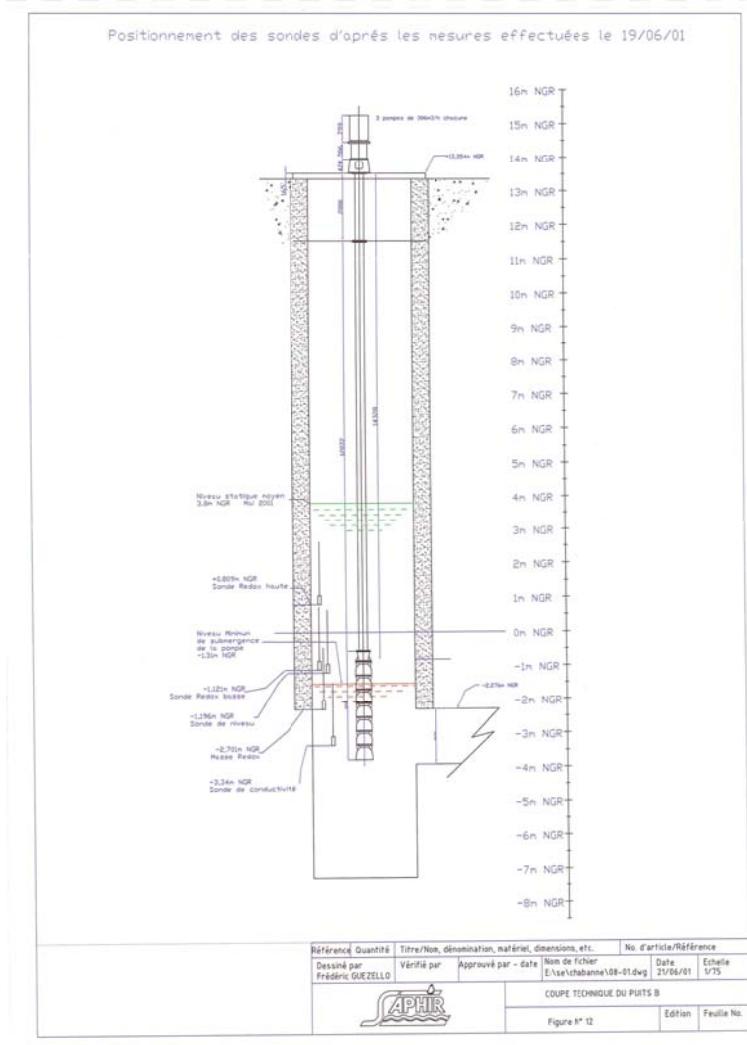
Pompages simultanés Puits du Bois des Nèfles- Puits du Gol, observation sur le piézomètre SC6 ( $r = 10.6$  m). Modèle Theis, sans prise en compte des variations de débit sur le puits du Gol (interférence jugée négligeable ; cf. texte).



Coupe technique du Puits A (12287X0061), Levener, 2001.

Profondeur en m NGR	Type de roche et Observations
De 16,88 à 9,58 m	Tufs cendreux à scories et brèches plus abondante
De 9,58 à 6,23 m	Scories argileuses avec quelques blocs de basaltes
De 6,23 à 2,38 m	Basalte massif, à larges fissures alternant avec parties et horizons scoriacées. On observe des venues d'eaux importantes dans 3 ou 4 fissures entre 12,8 et 14,5 m de profondeur
De 2,38 à 0,68 m	Basalte plus franc compact et peu fissuré
De 0,68 à 0,38 m	Basalte bréchique et scories rougeâtres avec importantes venues d'eau (latéralement et par le fond)

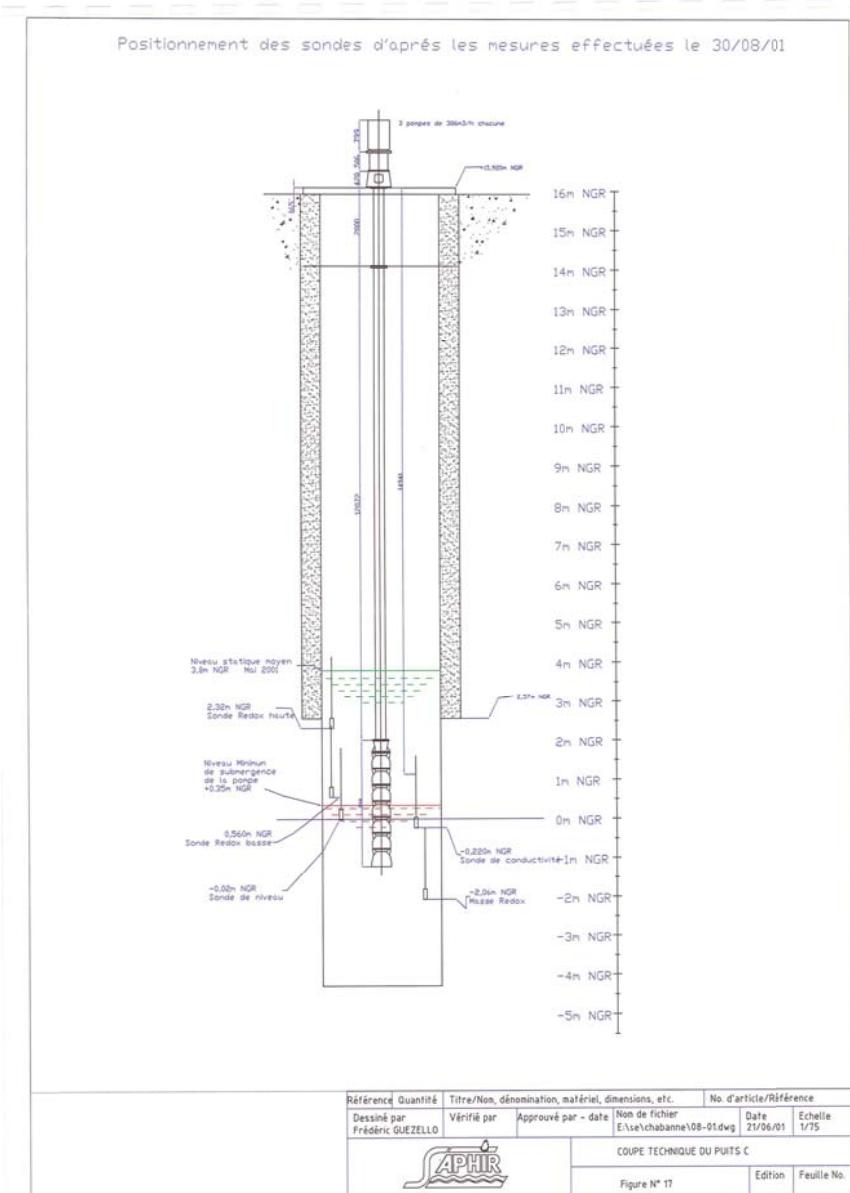
Coupe géologique du Puits A (12287X0061), Levener, 2001.



Coupe technique du Puits B (12287X0062), Leveneur, 2001.

Profondeur	Nature des terrains rencontrés
De 0 à 2 m	Tufs alternant avec des blocs de basaltes bréchiques.
2 à 12,6	Basaltes avec quelques passages de scories, et d'argiles vers 12m ; venue d'eau vers 12 m.
12,6 à 13,6	Basalte plus ou moins massif.
13,6 à 15,6	Basaltes bréchiques et scories.
15,6 à 17,25	Basalte avec scories, arrivée d'eau vers 16 m. Emplacement du creusement de la galerie de 10m de profondeur ; arrivées en tête et en pied de galerie au contact des scories et de basaltes fissurés.
17,25 à 20,6	Basalte plus ou moins massif, quelques niveaux de scories et fissures.

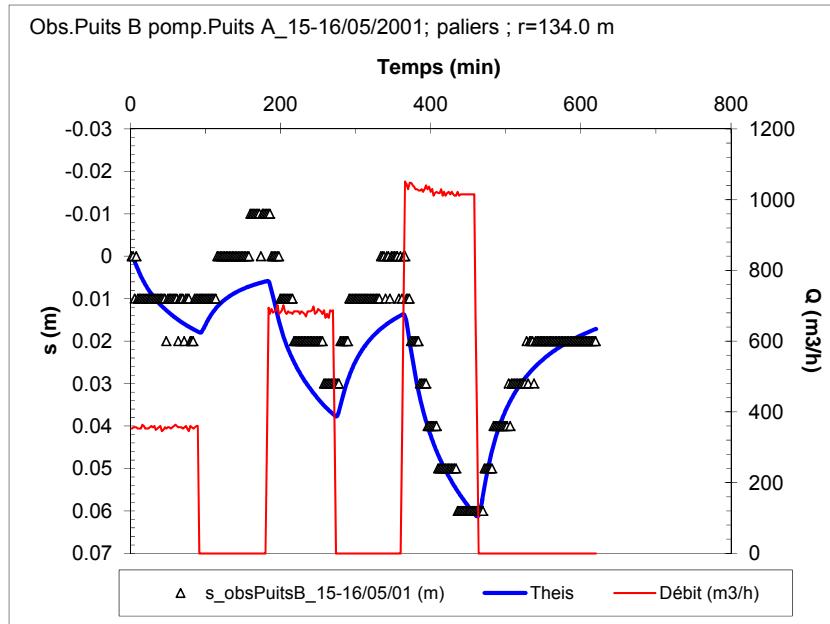
Coupe géologique du Puits B (12287X0062), Leveneur, 2001.



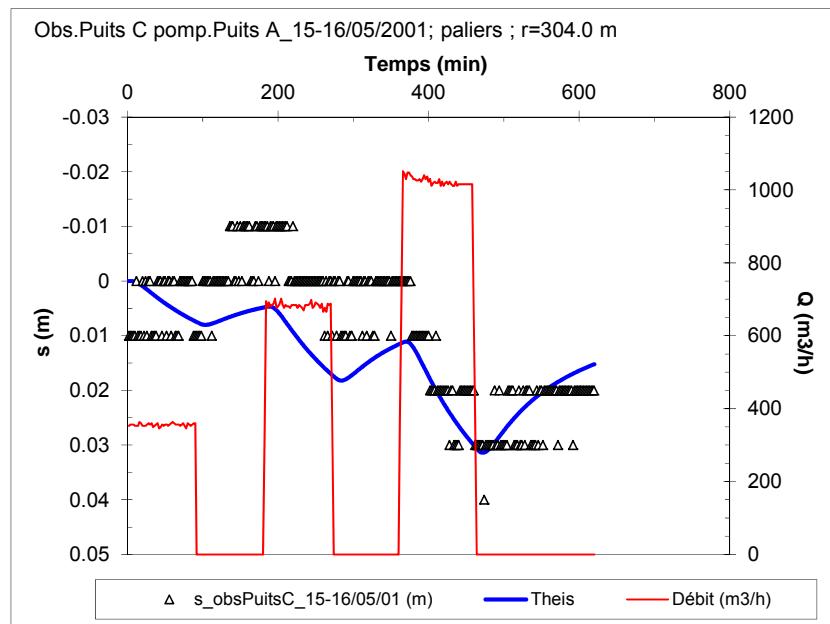
Coupe technique du Puits C (12287X0064), Levener, 2001.

Profondeur en m NGR	Type de roche et Observations
De 17,5 à 15,5 m	Tufs bréchiques
De 15,5 à 11,5 m	Basalte plus ou moins francs avec fissures
De 11,5 à -2,7 m	Basalte massif avec peu de fissures

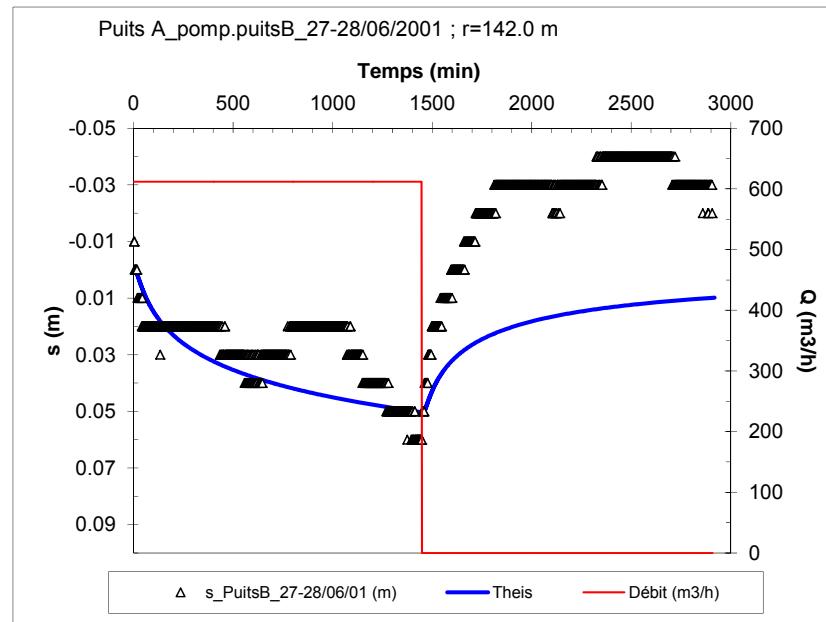
Coupe géologique du Puits C (12287X0064), Levener, 2001.



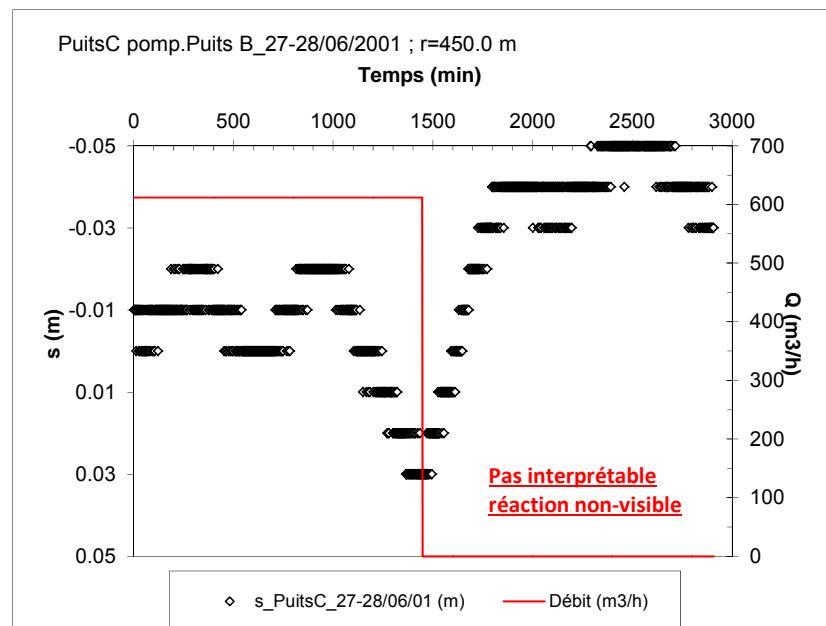
Pompage Puits A, observation sur puits B ( $r = 134$  m). Modèle Theis.



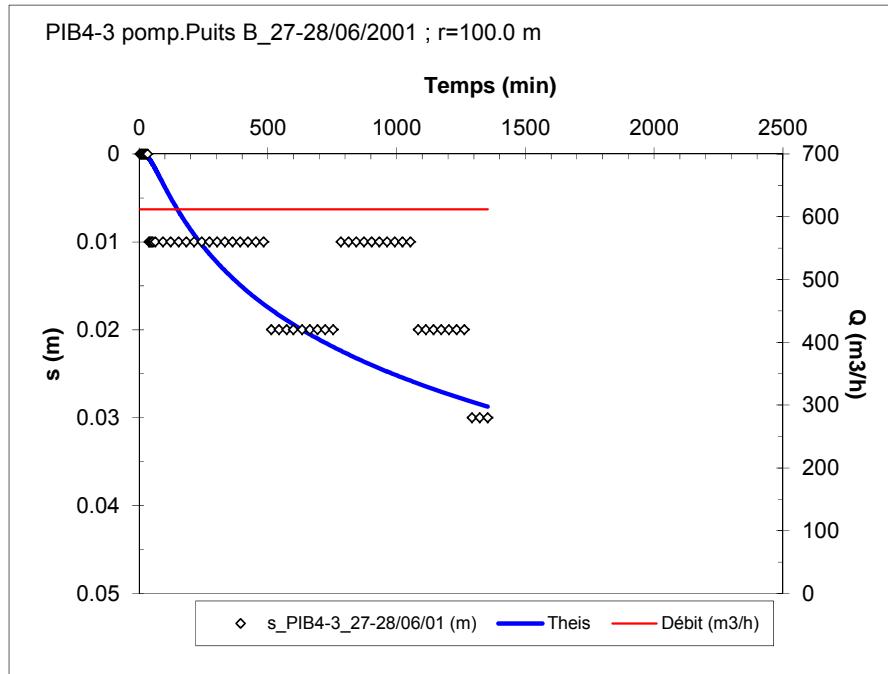
Pompage Puits A, observation sur puits C ( $r = 134$  m). Modèle Theis.



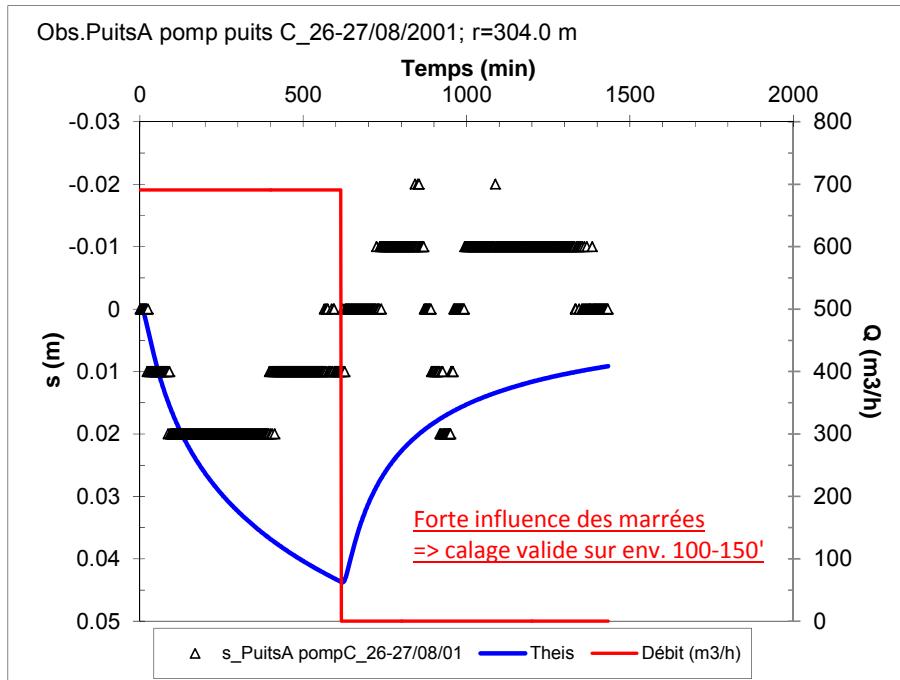
Pompage Puits B, observation sur puits A ( $r = 142$  m). Modèle Theis.



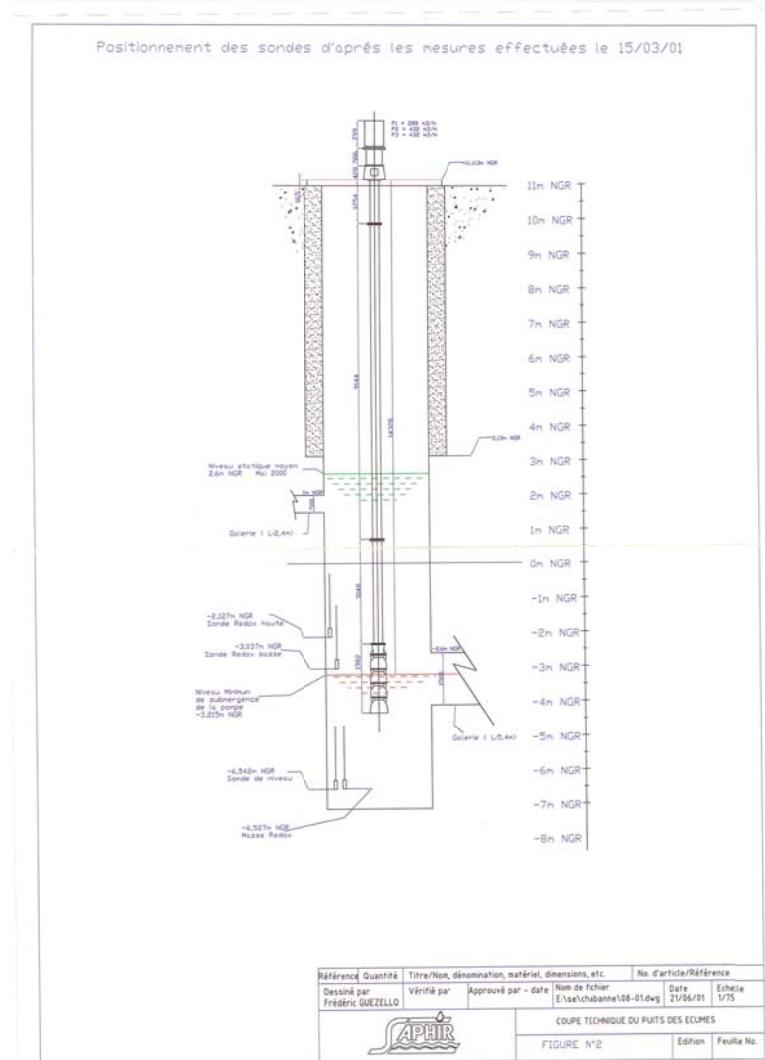
Pompage Puits B, observation sur puits C ( $r = 450$  m). Modèle : non interprétable.



Pompage Puits B, observation sur puits PiB4-3 ( $r = 100 \text{ m}$ ). Modèle Theis.



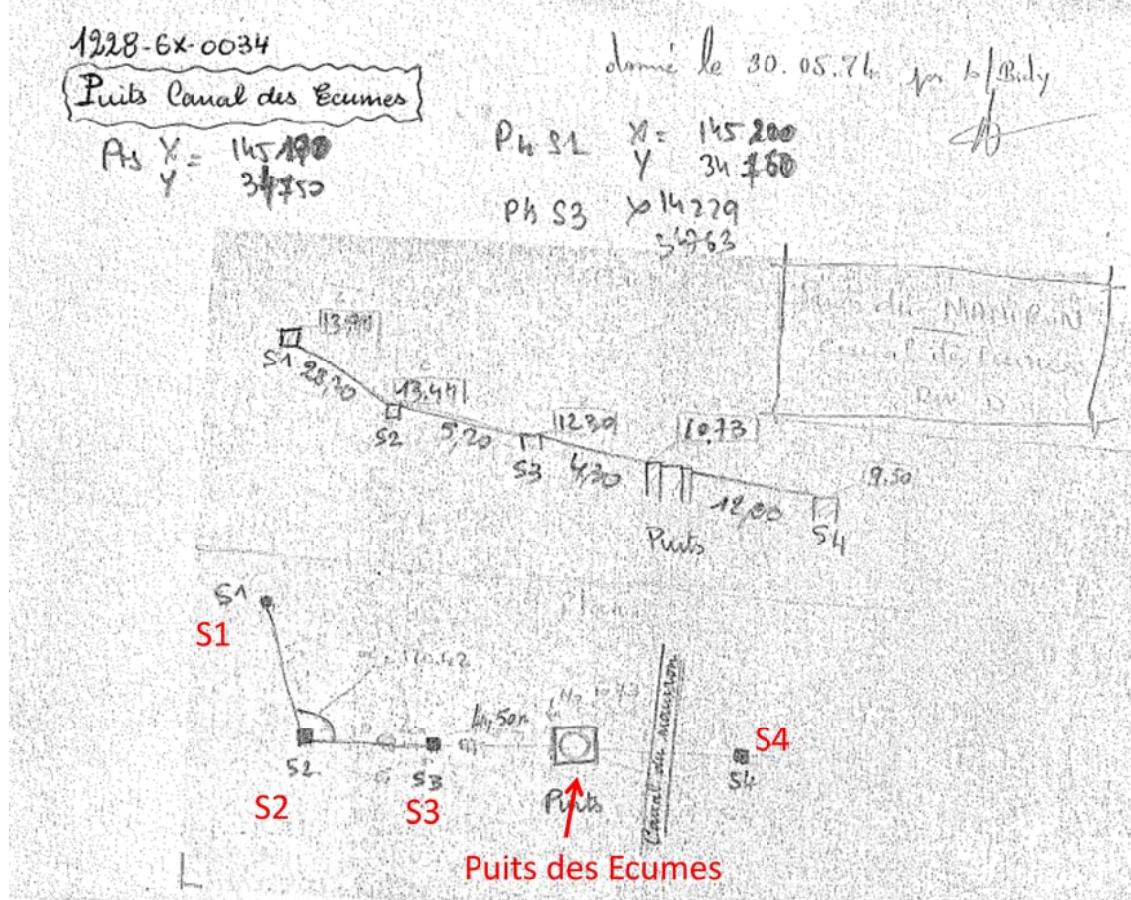
Pompage Puits C, observation sur puits A ( $r = 304 \text{ m}$ ). Modèle Theis.



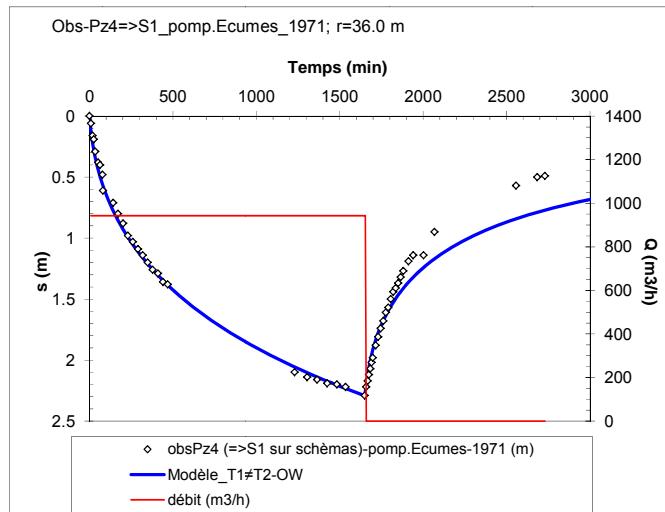
Coupe géologique et technique du puits des Ecumes (12287X0034).

Profondeur en m NGR	Type de roche	Observations
De 10,73 à 9,73 m	Basalte aphyrique altéré	Les basaltes aphyriques sont très durs, leur cassure est esquilleuse. La fissuration est homogène. Certains de ces couches de basalte sont imperméables.
De 9,73 à 4,23 m	Basalte aphyrique fissuré	Les scories résultent du refroidissement de la coulée de basalte aphyrique au contact du substratum
De 4,23 à 3,23 m	Scories	
De 3,23 à -5,73 m	Basalte vacuolaire grisâtre avec des niveaux scoriacés rougeâtres	Les basaltes vacuolaires sont plus tendres, que les basaltes les surplombant (2 à 3 fois plus). La fissuration est hétérogène.

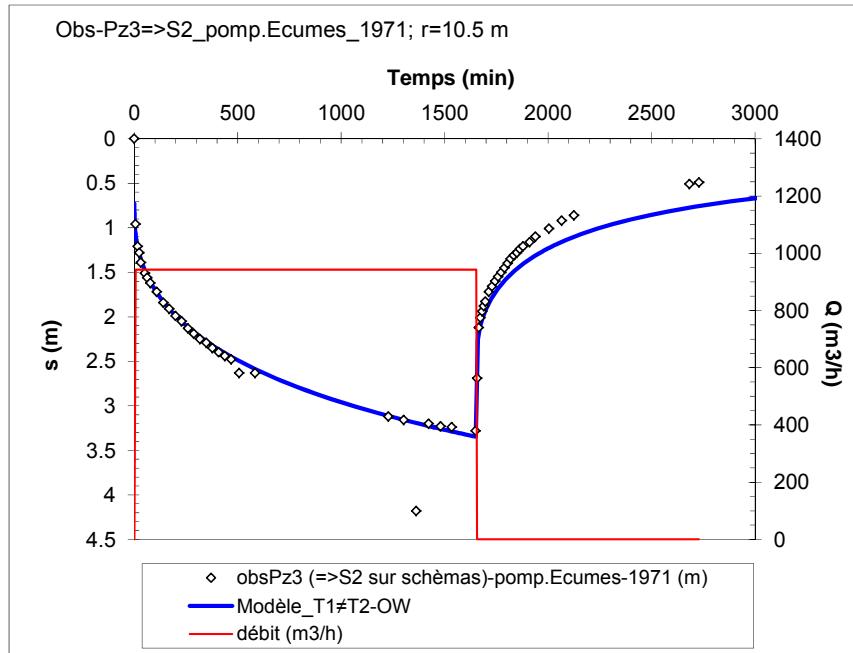
Coupe géologique du puits des Ecumes (12287X0034), Leveneur, 2001.



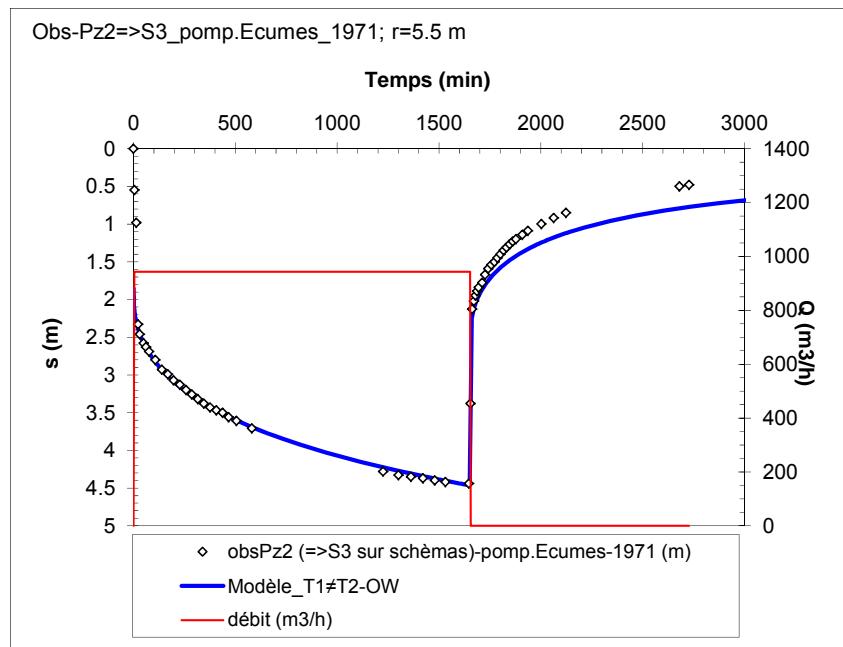
Plan de situation (source BSS), de l'essai de 1971 au puits des Ecumes.



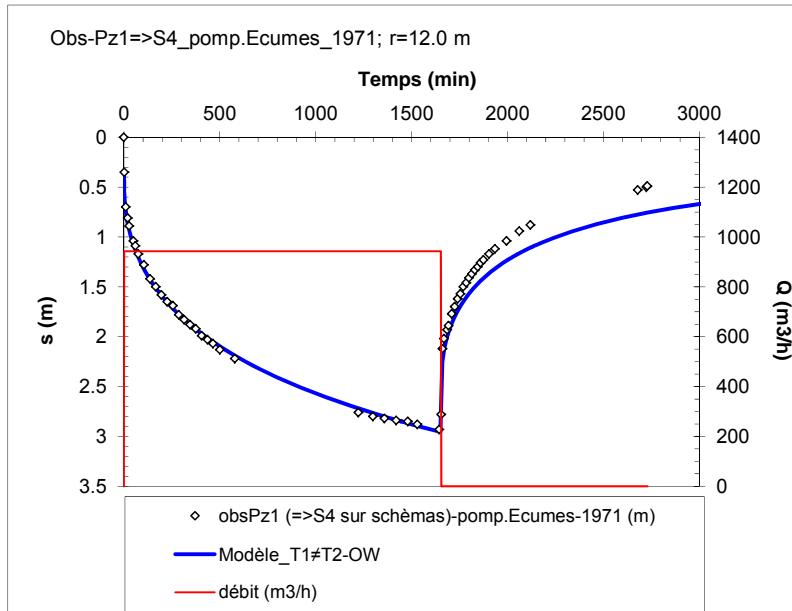
Modélisation de l'essai de longue durée réalisé en 1971 au puits des Ecumes, observation sur le forage S1 ( $r = 36.0$  m). Modèle : Aquifère compartimenté.



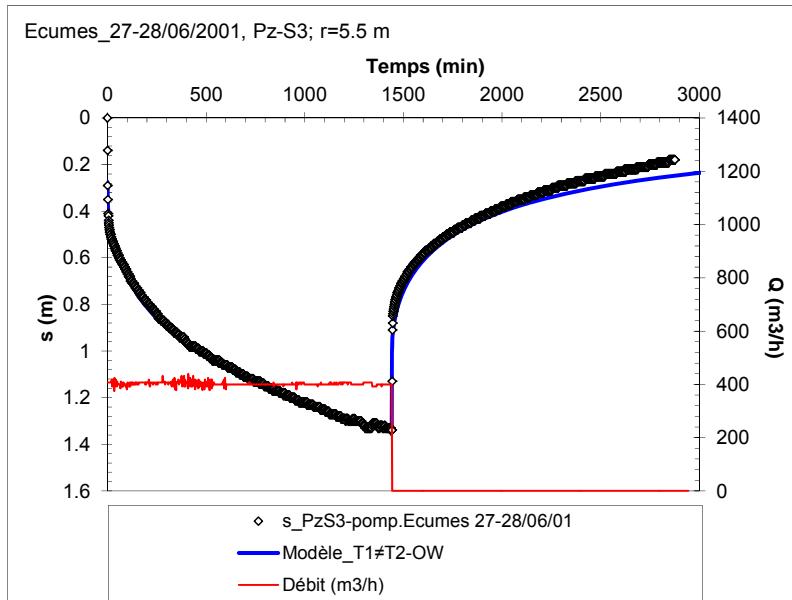
Modélisation de l'essai de longue durée réalisé en 1971 au puits des Ecumes, observation sur le forage S2 ( $r = 10.5$  m). Modèle : Aquifère compartimenté.



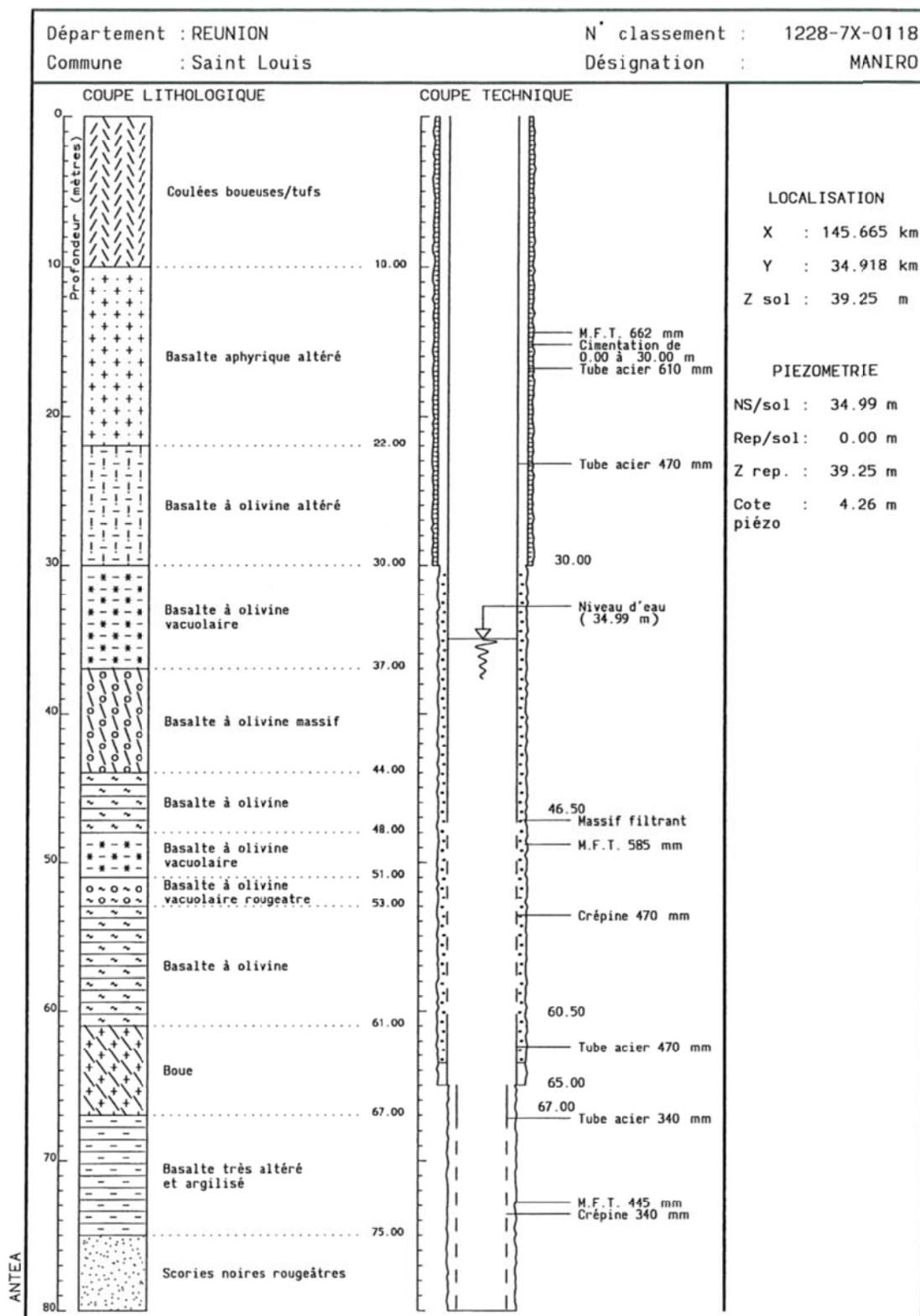
Modélisation de l'essai de longue durée réalisé en 1971 au puits des Ecumes, observation sur le forage S3 ( $r = 5.5$  m). Modèle : Aquifère compartimenté.



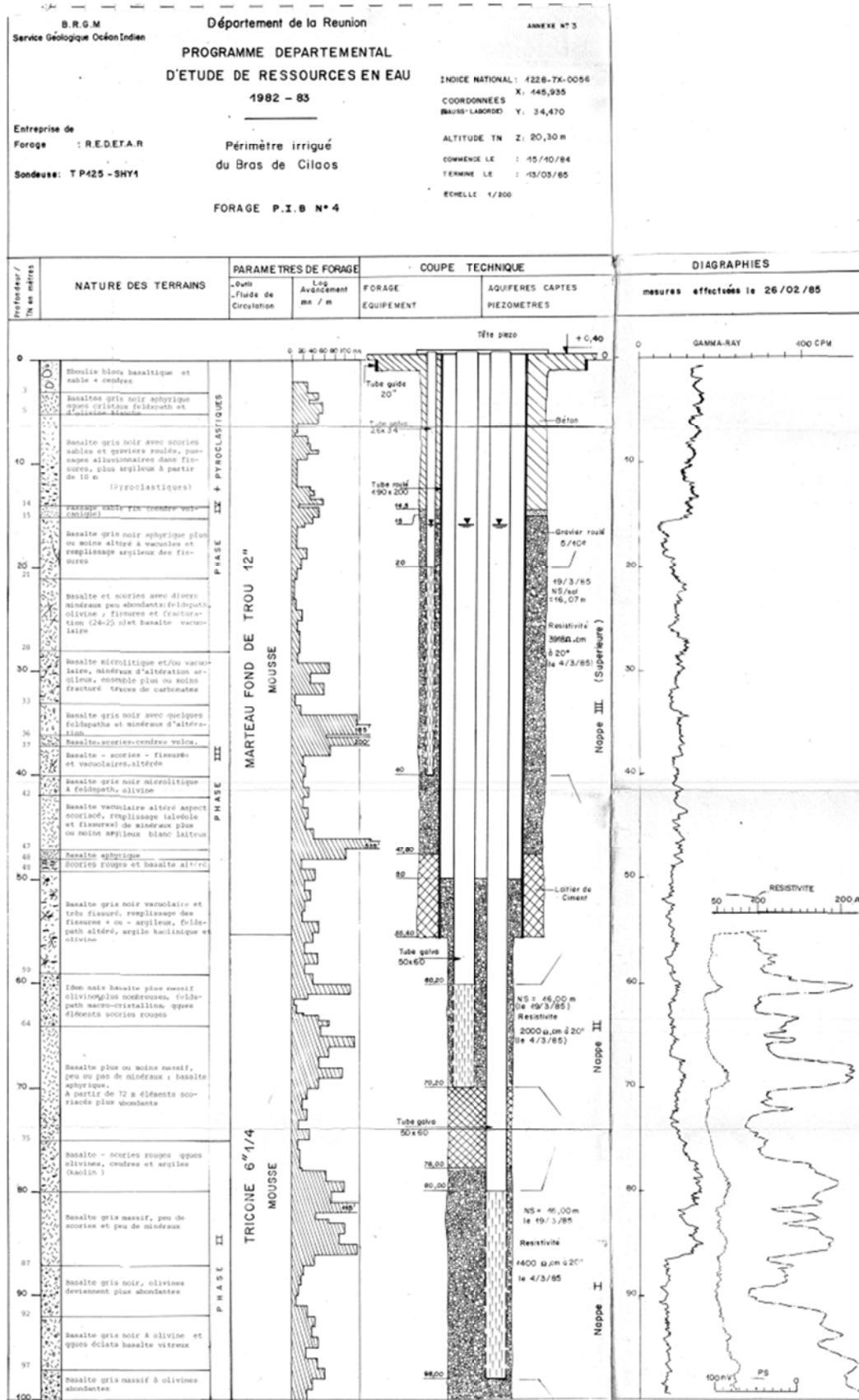
Modélisation de l'essai de longue durée réalisé en 1971 au puits des Ecumes, observation sur le forage S4 ( $r = 12.0$  m). Modèle : Aquifère compartimenté.



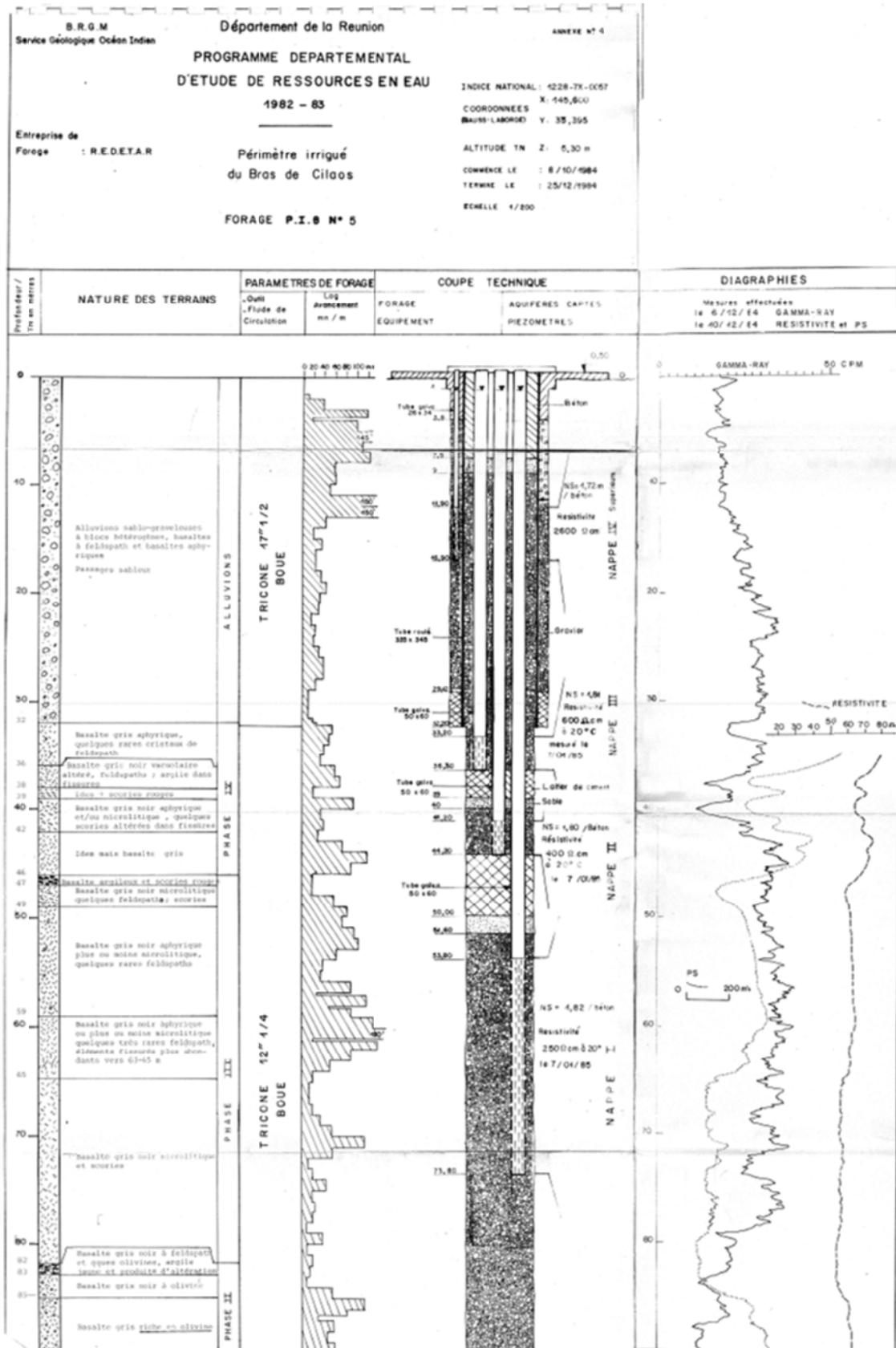
Modélisation de l'essai de longue durée réalisé en 2001 au puits des Ecumes, observation sur le forage S3 ( $r = 5.5$  m). Modèle : Aquifère compartimenté.



Coupe technique du forage de Maniron (12287X0118), Antéa, 2003.



Coupe technique du forage PiB4 (12287X0056), Daessle, 1983.

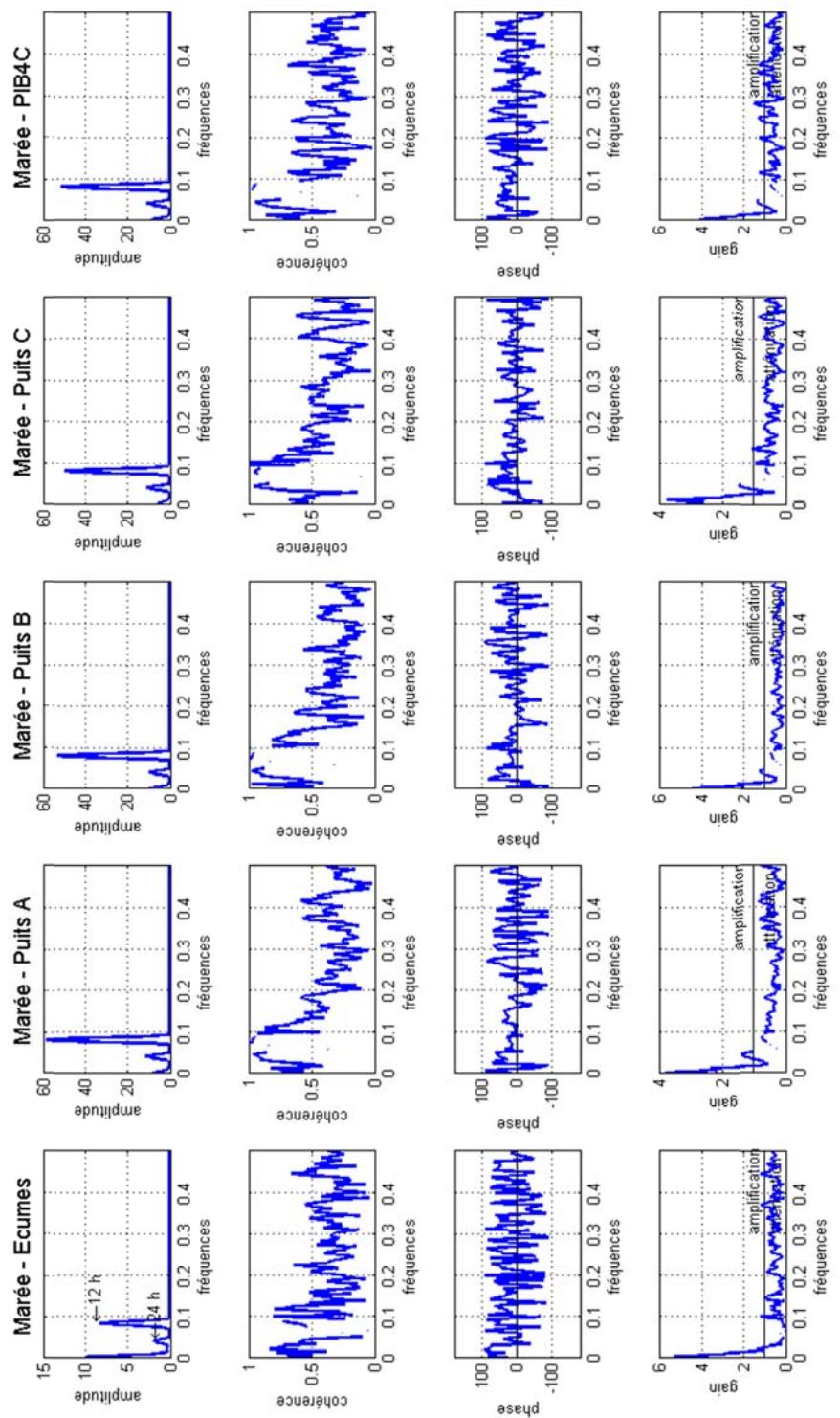


Coupe technique du forage PiB5 (12287X0057), Daessle, 1983.

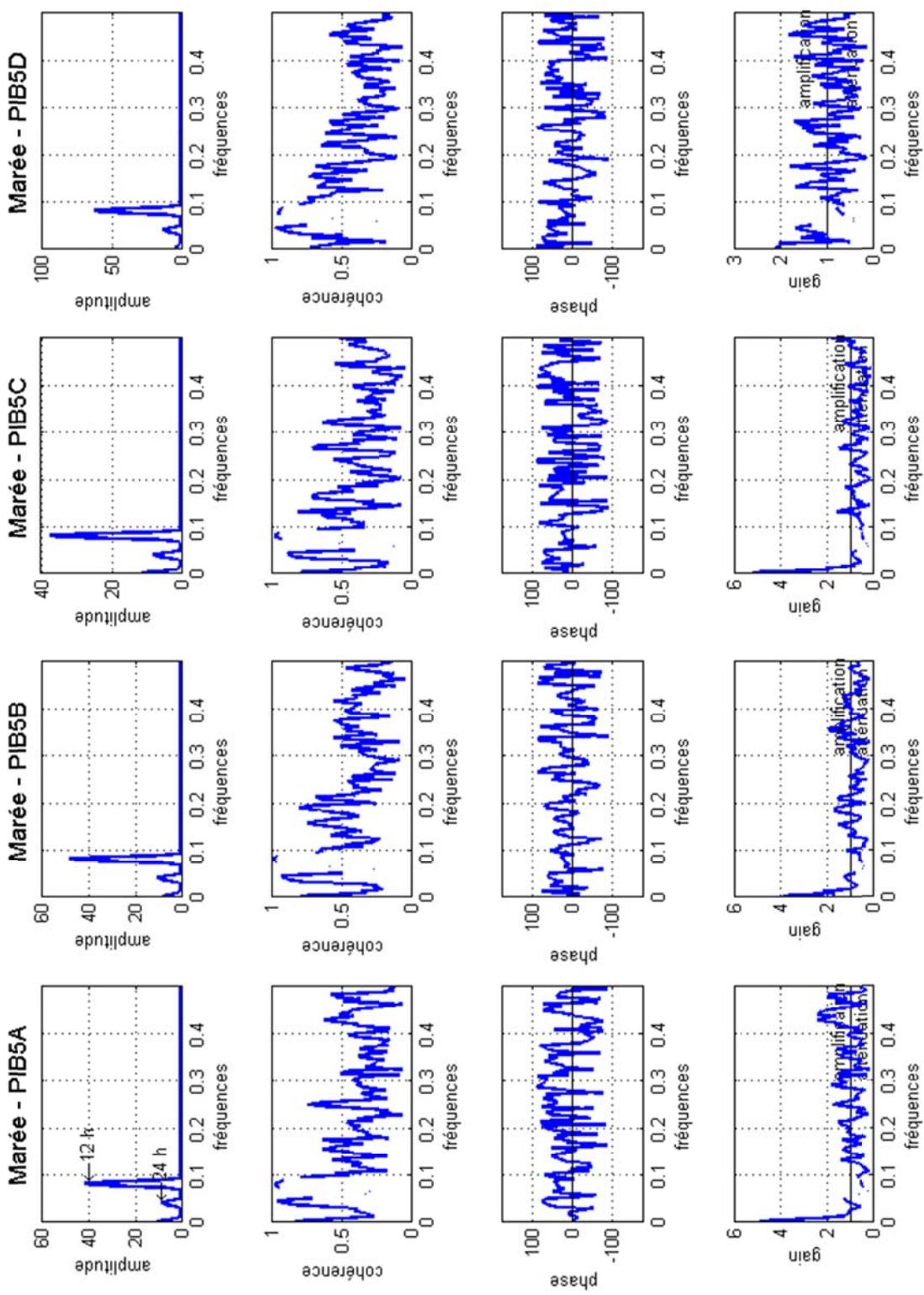
## **Annexe 4 :**

### **Traitement du signal sur les chroniques marée-piézométrie**





Fonctions d'amplitude, de cohérence, de phase, et de gain pour les signaux marée-piézométrie des forages



Fonctions d'amplitude, de cohérence, de phase, et de gain pour les signaux marée-piézométrie des piézomètres





**Centre scientifique et technique**  
3, avenue Claude-Guillemain  
BP 36009  
45060 – Orléans Cedex 2 – France  
Tél. : 02 38 64 34 34 - [www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)

**BRGM Réunion**  
5, rue Ste-Anne  
CS 51016  
97404 Saint Denis Cedex  
Tél. : 02 62 21 22 14