



Modélisation numérique de la masse d'eau de Pierrefonds

Rapport final

Anli Bourhane, Julien Bonnier, Pierre Belle, Soulaymana Fadhula

Etude réalisée avec la collaboration du BRGM :
Bertrand Aunay, Jean-Michel Baltassat, Jean-Christophe Maréchal,
Sandra Lanini, Marc Dumont et Pierre-Alexandre Reninger

Octobre 2015

Sommaire

1	Introduction.....	9
1.1	Contexte de l'étude	9
1.2	Objectifs	10
2	Présentation de la zone d'étude.....	11
2.1	Contexte géographique	11
2.2	Contexte climatique.....	12
2.3	Contexte géologique	13
2.4	Contexte hydrogéologique	18
3	Analyse des données disponibles	19
3.1	Caractérisation géologique	19
3.2	Investigations géophysiques	23
3.2.1	Géophysique électrique dans la plaine du Bras de Cilaos, 1984	23
3.2.2	Reconnaissance du biseau salé par géophysique électrique, 1987.....	24
3.2.3	Géophysique complémentaire en rive gauche de la Rivière Saint-Etienne, 1988	25
3.2.4	Interprétation d'une campagne de géophysique électrique en rive droite de la Rivière Saint-Etienne, 1988	25
3.2.5	Reconnaissances de la ressource en eau souterraine de la région de Saint-Pierre : approches géologique et géophysique électrique, 1988	26
3.2.6	Investigation par sondages audio-magnétotelluriques (AMT), Saint-Pierre, 1989	26
3.2.7	Méthodologie d'imagerie électrique haute résolution des aquifères côtiers en milieu volcanique à La Réunion, 2008.....	27
3.2.1.1	Augmentation de la résolution des mesures géophysiques.....	30
3.2.1.2	Augmentation de la profondeur d'investigation.....	32
3.2.8	Synthèse générale et discussion des données géophysiques	33

3.3	Approches hydrodynamiques	36
3.3.1	Analyse préliminaire des chroniques piézométriques, pluviométriques et marégraphiques.....	36
3.3.2	Décomposition des signaux piézométriques	49
3.4.	Approches physico-chimiques	61
3.4.1.	Evolution spatiale de la qualité de la nappe côtière	61
3.4.2.	Evolution temporelle de la qualité de la nappe côtière	64
4.	Modélisation de la masse d'eau de Pierrefonds	67
4.1.	Modélisation numérique : aspects théoriques	67
4.2.	Estimation des flux d'entrée	69
4.3.	Discrétisation du domaine modélisé.....	72
4.4.	Paramétrage du modèle	74
4.4.1.	Les conditions aux limites.....	74
4.4.2.	Les perméabilités	75
4.4.3.	Autres paramètres.....	76
5.	Calage du modèle en régime permanent	77
5.1.	Calage de la piézométrie	77
5.2.	Calage des salinités	79
6.	Résultats et discussions	82
7.	Conclusions et perspectives	84
8.	Références bibliographiques	86
9.	Annexes	90
	Annexe 1 : Logs géologiques des forages de Pierrefonds.....	90
	Annexe 2 : Résumé de la communication AQUA2015.....	106

Liste des figures

Figure 2.1: Présentation du contexte géographique de l'île de La Réunion.....	11
Figure 2.2 : Pluviométrie enregistrée à La Réunion en 2014 (d'après Météo France)	12
Figure 2.3: Les deux massifs volcaniques de l'île de La Réunion	13
Figure 2.4: Localisation du site d'étude de Pierrefonds et du domaine modélisé.....	13
Figure 2.5: Géologie du secteur de Pierrefonds, extrait de la carte géologique de La Réunion à l'échelle 1/100 000 (Bachelery et al. 2006).....	14
Figure 2.6: Formations superficielles observées sur le secteur de Pierrefonds.....	15
Figure 2.7: Structure des formations géologiques profondes.	16
Figure 2.8: Mise en évidence de la paléo-vallée de Pierrefonds (Saint-Ange et al. 2011).	16
Figure 2.9: Extension de la paléo-vallée de Pierrefonds sous forme de canyon sous-marin (d'après Sisavath et al. 2011).	17
Figure 2.10: Répartition spatiale des perméabilités [$m.s^{-1}$] dans la plaine de Pierrefonds.	18
Figure 3.1 : Localisation des forages et piézomètres de la plaine de Pierrefonds.	19
Figure 3.2 : Localisation des coupes géologiques dans la plaine de Pierrefonds.....	21
Figure 3.3 : Coupe géologique N°1 parallèle à la côte dans la plaine de Pierrefonds.	21
Figure 3.4 : Coupe géologique N°2 parallèle à la côte dans la plaine de Pierrefonds.	22
Figure 3.5 : Coupe géologique perpendiculaire à la côte dans la plaine de Pierrefonds...	22
Figure 3.6 : Schéma conceptuel hydrogéologique de l'aquifère de Pierrefonds.....	22
Figure 3.7 : Localisation du profil (a) et interprétation (b) du panneau électrique de Girard et al. 2008, ré-inversé par Chaput et al. (2015).....	27
Figure 3.8 : Visualisation en 3D de l'interface eau douce / eau salée-saumâtre : surface iso-valeurs 50, 100 et 500 ohm.m dans le modèle obtenu après inversion 3D (Girard et al. 2008).	28
Figure 3.9 : Localisation des points de mesures géophysiques sur les secteurs de Pierrefonds et de Saint-Pierre.	29
Figure 3.10 : Localisation des points de mesures géophysiques électromagnétiques sur le secteur de Pierrefonds (BRGM).....	30
Figure 3.11 : Visualisation des résistivités électriques sous forme de coupes (a) et de cartes (b) sur le secteur de Pierrefonds (BRGM).	31
Figure 3.12 : Localisation des profils électriques à Pierrefonds (Chaput et al. 2015).	32
Figure 3.13 : Représentation tridimensionnelle des profils électriques réalisés sur le secteur de Pierrefonds (Chaput et al. 2015).	33
Figure 3.14 : Localisation des points de mesures sur le secteur de Pierrefonds.	36
Figure 3.15 : Chroniques piézométriques enregistrées sur le secteur de Pierrefonds	37

Figure 3.16 : Discrimination des comportements piézométriques observés dans les piézomètres de Pierrefonds.....	38
Figure 3.17 : Description du comportement piézométrique observé sur 38063	39
Figure 3.18 : Description du comportement piézométrique observé sur 38071	40
Figure 3.19 : Description du comportement piézométrique observé sur 38077	41
Figure 3.20 : Description du comportement piézométrique observé sur 38089	42
Figure 3.21 : Description du comportement piézométrique observé sur 38087	43
Figure 3.22 : Description du comportement piézométrique observé sur 38217	44
Figure 3.23 : Description du comportement piézométrique observé sur 38070	45
Figure 3.24 : Description du comportement piézométrique observé sur 38078	46
Figure 3.25 : Description du comportement piézométrique observé sur 38065	47
Figure 3.26 : Description du comportement piézométrique observé sur 38067	48
Figure 3.27 : Description simplifiée de l'approche méthodologique employée	49
Figure 3.28 : Filtration du signal marégraphique au port de Saint-Pierre.....	50
Figure 3.29 : Comparaison entre l'impact du signal marin théorique et les coefficients d'emmagasinement mesurés sur les ouvrages de Pierrefonds.....	52
Figure 3.30 : Composantes marégraphiques dominantes dans les signaux piézométriques des ouvrages de Pierrefonds	53
Figure 3.31 : Diffusivités hydrauliques pour les composantes semi-diurnes M2 et N2	55
Figure 3.32 : Diffusivités hydrauliques pour la composante semi-diurne M2. Les pointillés rouges délimitent le secteur supposé moins diffusif.....	56
Figure 3.33 : Analyse des signaux piézométriques résiduels.....	58
Figure 3.34 : Evolution pluriannuelle des signaux piézométriques sur les ouvrages 38078 P11 Syndicat et 38089 Ravine Blanche.....	59
Figure 3.35 : Carte piézométrique de la plaine de Pierrefonds en étiage.	60
Figure 3.36 : Répartition des conductivités électriques moyennes de la nappe de Pierrefonds. Les valeurs excédant le seuil des 500 μ S/cm sont notées en rouge.	61
Figure 3.37 : Répartition des salinités moyennes dans la nappe de Pierrefonds. Les valeurs supérieures à 350 mg/L sont notées en rouge.....	62
Figure 3.38 : Répartition des teneurs moyennes en chlorures dans la nappe de Pierrefonds. Les valeurs supérieures à 100 mg/L sont notées en rouge.	63
Figure 3.39 : Localisation des forages AEP suivis par l'ARS sur les nappes des Cocos et de Pierrefonds. Ces ouvrages sont étiquetés en bleu.	64
Figure 3.40 : Evolution temporelle des teneurs en nitrates dans les nappes des Cocos et de Pierrefonds.....	65
Figure 3.41 : Evolution temporelle des teneurs en chlorures dans les nappes des Cocos et de Pierrefonds.....	66

Figure 3.42 : Evolution temporelle des teneurs en sulfates dans les nappes des Cocos et de Pierrefonds.....	66
Figure 4.1 : Délimitation des unités hydrologiques du bassin versant superficiel de Pierrefonds et localisation des apports estimés.....	70
Figure 4.2 : Evolution pluriannuelle de la pluviométrie sur 4 stations de la zone d'étude.	71
Figure 4.3 : Discrétisation tridimensionnelle du modèle de Pierrefonds	72
Figure 4.4 : Discrétisation verticale du modèle de Pierrefonds	72
Figure 4.5 : Conditions de charge et de flux appliquées au modèle Pierrefonds.....	74
Figure 5.1 : Carte piézométrique calculée par le modèle de Pierrefonds.....	77
Figure 5.2 : Résultats du calage de la piézométrie sur le modèle de Pierrefonds	78
Figure 5.3 : Carte des résistivités électriques de Pierrefonds à -25 m NGR et coupe géo-électrique perpendiculaire à la côte.....	79
Figure 5.4 : Carte des salinités calculées par le modèle de Pierrefonds à la base des alluvions récentes [Couche 1] à environ -25 m NGR.....	80
Figure 5.5 : Résultats du calage des salinités sur le modèle de Pierrefonds	80
Figure 6.1 : Visualisation de la géométrie du biseau salé dans la nappe côtière de Pierrefonds	82
Figure 6.2 : Localisation des secteurs où le calage reste à améliorer	83

Liste des tableaux

Tableau 3.1 : Caractéristiques générales des ouvrages de la plaine côtière de Pierrefonds	20
Tableau 3.2 : Synthèse des études géophysiques sur le secteur de Pierrefonds.	34
Tableau 3.3 : les ouvrages sélectionnés pour le traitement du signal piézométrique.....	36
Tableau 3.4 : Les composantes significatives de la marée au port de Saint-Pierre.....	51
Tableau 3.5 : Comparaison des résultats de l'analyse harmonique sur les piézomètres de Pierrefonds	52
Tableau 3.6 : Comparaison des valeurs de diffusivités hydrauliques obtenues avec la marée théorique M2 et celle calculées en considérant l'amortissement de la marée au port de Saint-Pierre.	57
Tableau 4.1 : Paramètres hydrodynamiques de l'aquifère de Pierrefonds.	75
Tableau 4.2 : Perméabilités appliquées aux mailles du modèle.	76
Tableau 5.1 : Ecartés calculés entre la piézométrie observée et modélisée	78
Tableau 5.2 : Rapports calculés entre les salinités observées et modélisées	81

1 Introduction

1.1 Contexte de l'étude

La Réunion connaît au cours des dernières décennies un développement démographique accéléré. Depuis 2007, la population réunionnaise augmente de 1% par an [INSEE 2015]¹. Cette démographie croissante s'accompagne d'une hausse de l'exploitation des ressources en eau à la fois pour l'alimentation en eau potable [AEP] et pour l'irrigation agricole. Sur la commune de Saint-Pierre, concernée par le périmètre d'étude, les volumes totaux prélevés en eau souterraine et eau de surface pour l'AEP ont augmenté de 46% entre 1993 et 2004. Les nappes littorales exploitées à La Réunion restent fortement vulnérables face aux intrusions marines. En 2005, 27% de l'ensemble des forages exploités sur l'île présentaient des teneurs en chlorures révélant d'une contamination par des eaux marines à des degrés divers (Furet et al. 2012). Dans ce contexte, la mise en place d'une politique de gestion des ressources en eaux suivant les différents besoins s'avère indispensable. Elle doit pouvoir s'appuyer sur les éléments d'aide à la décision les plus fins possibles.

Afin de répondre à ces enjeux, le SDAGE² 2010-2015 établi pour le Département de La Réunion sert de document de référence. Dans ce document, les nappes de la plaine des Cocos et de Pierrefonds sont inscrites en tant que nappes stratégiques. Ce document intègre le contexte réglementaire sur l'eau au niveau européen et national. Il décline la gestion de l'eau au niveau du bassin Réunion selon sept orientations fondamentales [OF]. La première orientation fondamentale consiste à « gérer durablement la ressource en eau dans le respect des milieux aquatiques et des usages ». L'une des dispositions prévues par cette orientation stipule que « les acteurs de l'eau mettront en place les outils de modélisation nécessaires à l'implantation de nouveaux prélèvements souterrains afin de garantir l'équilibre quantitatif global des masses d'eau (prélèvements/recharge) ».

D'autres objectifs sont également retenus par le SDAGE, notamment :

- l'amélioration de la connaissance de la ressource via des outils de caractérisation et de suivis,
- la sécurisation de l'approvisionnement quantitatif et qualitatif en eau potable en maîtrisant au mieux les conséquences des pollutions accidentelles (comme les intrusions salines),
- la facilitation de l'accès à l'information dans le domaine de l'eau (amélioration de la gestion et de l'accès à la donnée).

A l'instar des observations réalisées à l'échelle de l'île, les besoins en eau du secteur sud de La Réunion sont croissants depuis plusieurs décennies. Cependant, les aquifères littoraux exploités actuellement sont soumis aux phénomènes d'intrusion marine. Parallèlement, la part de l'alimentation en eau potable assurée par les prises d'eau en rivière n'assure pas un approvisionnement sûr et permanent, en raison de sa vulnérabilité face aux épisodes pluvieux intenses (exemple des problèmes de turbidité à la prise d'eau du Bras de la Plaine).

Parmi les ressources exploitées actuellement, l'aquifère de Pierrefonds apparaît relativement protégé vis-à-vis des intrusions salines d'une part et de la contamination par les nitrates d'autre part. Cette situation est à mettre en lien avec un contexte géologique et hydrogéologique particulier.

¹ http://www.insee.fr/fr/themes/document.asp?reg_id=24&ref_id=22011

² Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux

Cet aquifère constitue un enjeu majeur pour l'alimentation en eau potable du secteur sud. L'augmentation des volumes prélevés est envisagée par les gestionnaires sur cette masse d'eau. Par conséquent, il paraît nécessaire d'évaluer la possibilité d'y augmenter les prélèvements et de définir des modalités de gestion adaptées aux contraintes physiques du milieu.

1.2 Objectifs

Dans ce contexte, l'Office de l'eau et le Conseil Général ont identifié, dans le cadre du contrat d'objectifs 2012-2016, la masse d'eau de Pierrefonds comme prioritaire pour la définition d'un plan de gestion basé sur des indicateurs pertinents. La modélisation de cette nappe stratégique répond parfaitement à l'ensemble des objectifs fixés. Le développement d'un modèle maillé sur le secteur de Pierrefonds est envisagé pour tester de nouveaux scénarii d'exploitation. La réalisation de ce type de modèle requiert, parmi d'autres éléments, une connaissance approfondie (i) de la structure du milieu géologique constituant l'aquifère, et (ii) de la géométrie de l'interface eau douce / eau salée.

Afin d'améliorer ces connaissances en amont de la réalisation du modèle, des mesures géophysiques complémentaires se sont avérées nécessaires afin d'imager avec précision la structure profonde de l'aquifère. L'acquisition de l'imagerie géophysique est réalisée grâce à deux méthodes d'investigation ;

- une campagne de mesures électromagnétiques hélicoptérée [AEM]³ fournissant une cartographie des résistivités électriques à une très haute résolution jusqu'à 200 m de profondeur,
- une tomographie de résistivité électrique [ERT]⁴, combinant deux dispositifs complémentaires : le dispositif Wenner alpha fournissant une bonne résolution des structures superficielles (jusqu'à 200 m) et le dispositif Pôle-Dipôle permettant d'imager les structures profondes (jusqu'à 400 m).

Cette information issue de la géophysique est complétée par ;

- une analyse géologique détaillée par le biais d'observations de terrain et d'interprétation des logs géologiques issus des forages ;
- un calcul du bilan hydrologique permettant d'estimer les flux transitant dans la nappe côtière ;
- une analyse des données géochimiques permettant une caractérisation qualitative de la ressource ;
- une analyse détaillée des signaux piézométriques disponibles permettant une caractérisation hydrodynamique de l'aquifère et une évaluation de la vulnérabilité de la nappe côtière vis-à-vis des fluctuations marégraphiques.

La contribution de l'ensemble de ces outils d'investigation a permis l'implémentation d'un modèle numérique tridimensionnel à densité variable permettant de simuler l'écoulement et le transport de solutés dans la nappe côtière de Pierrefonds. Ce rapport présente les étapes de construction de cet outil de simulation.

³ Airborne ElectroMagnetics

⁴ Electrical Resistivity Tomography

2 Présentation de la zone d'étude

2.1 Contexte géographique

L'île de La Réunion se trouve dans l'Océan Indien. Elle est située sur la longitude Est $55^{\circ}29'$ et la latitude Sud $21^{\circ}05'$, au sud-ouest de l'Océan Indien, à 800 km de la côte Est de Madagascar et 210 km de la côte Sud de l'île Maurice (Figure 2.1).

Elle fait partie avec l'île Maurice et Rodrigues de l'archipel des Mascareignes. La Réunion apparaît à l'extrémité méridionale d'un plateau sous-marin, la crête des Mascareignes. La partie immergée de l'île touche le plateau océanique à -4000 m de profondeur, sur un diamètre de 250 km. L'île comporte une forme elliptique et présente un allongement suivant la direction Nord-ouest et Sud-est. Son périmètre avoisine 210 km et sa superficie est de 2512 km². Le secteur de Pierrefonds est localisé au sud-ouest de l'île.



Figure 2.1: Présentation du contexte géographique de l'île de La Réunion

2.2 Contexte climatique

La Réunion est située sous un climat tropical et humide avec deux saisons : la saison des pluies (de Janvier à Mars) et la saison sèche (de Mai à Novembre). Avril et Décembre sont des mois de transition, pluvieux ou secs. Le relief de l'île influence la répartition de la pluviométrie (Figure 2.2). Bien que situé sur la côte sous le vent, le secteur de Pierrefonds reçoit une lame d'eau annuelle d'environ 1 m en année humide et d'environ 0,45 m en année sèche, avec des moyennes mensuelles qui marquent bien le contraste saisonnier entre la saison cyclonique et le reste de l'année (Pecci et al. 2002). Les pluies sont très irrégulières, mais des épisodes pluvieux très importants sont possibles.

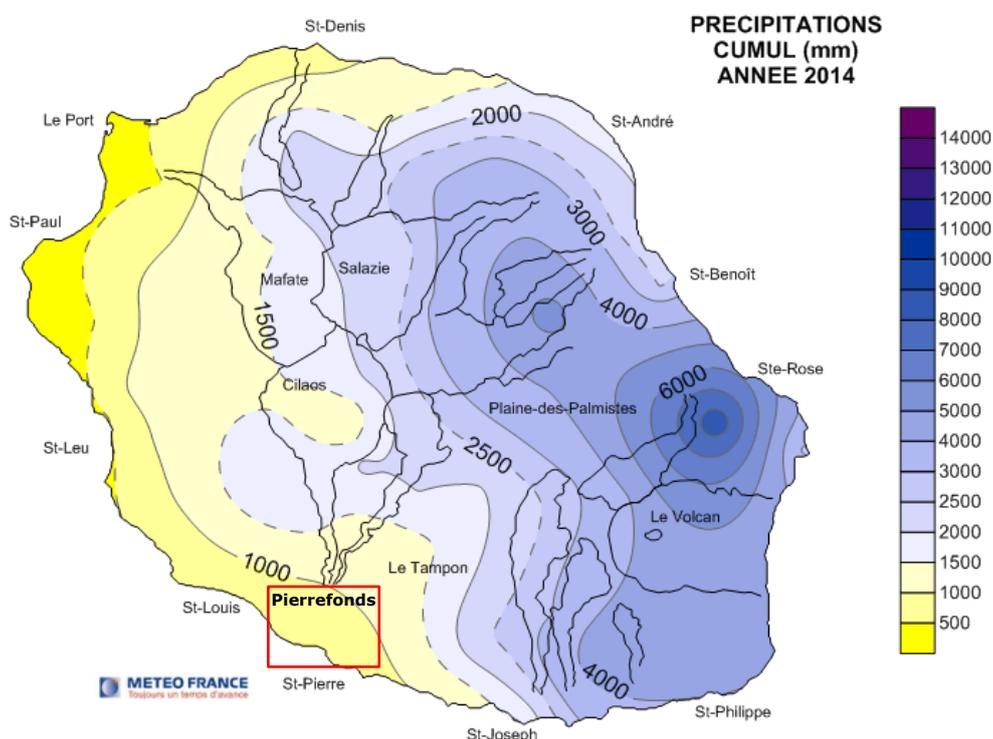


Figure 2.2 : Pluviométrie enregistrée à La Réunion en 2014 (d'après Météo France)

Sur l'ensemble des mesures collectées dans le bassin versant superficiel de Pierrefonds, la pluviométrie moyenne varie entre 700 mm/an sur la côte à 1900 mm/an en amont.

La température moyenne annuelle de l'île varie entre 26°C au niveau du littoral et 10°C au sommet. Dans la zone d'étude de Pierrefonds, la température moyenne annuelle varie entre 26°C au littoral et 22°C en amont.

Enfin, l'évapotranspiration moyenne annuelle mesurée varie entre 2000 mm/an au niveau du littoral à 700 mm/an en amont.

2.3 Contexte géologique

L'île de La Réunion est issue d'un volcanisme intra-plaque de type point chaud. Le volcan bouclier émerge il y a seulement 2,1 Ma (McDougall 1971). L'île est constituée de coulées de laves associées à l'activité de deux massifs volcaniques principaux : le Piton des Neiges (2,1 Ma), occupant la partie nord-ouest de l'île et le Piton de La Fournaise (0,45 Ma), situé dans la partie sud-est de l'île. Le Piton des Neiges culmine à 3069 m, tandis que le Piton de la Fournaise, encore en activité, atteint 2631 m (Figure 2.3).

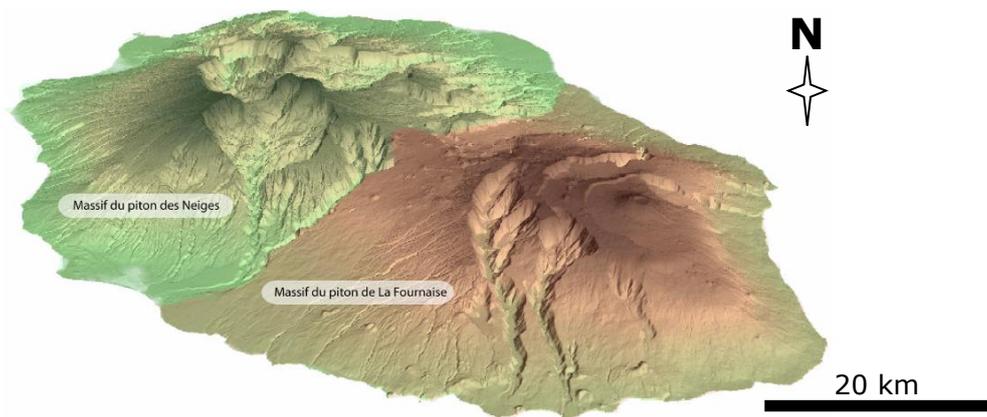


Figure 2.3: Les deux massifs volcaniques de l'île de La Réunion

Le site d'étude se situe au Sud-ouest de l'île au niveau du secteur de Pierrefonds sur une zone de jonction des deux massifs volcaniques. Elle se délimite au Nord par la Rivière Saint-Etienne, à l'Est par la limite amont de la masse d'eau de Pierrefonds correspondant à la courbe topographique d'altitude 200 m, au Sud par la Ravine Blanche et à l'Ouest par la mer. Cette zone couvre une surface de 35 km². L'emprise du domaine modélisé est délimitée par un trait noir épais sur la figure 2.4.

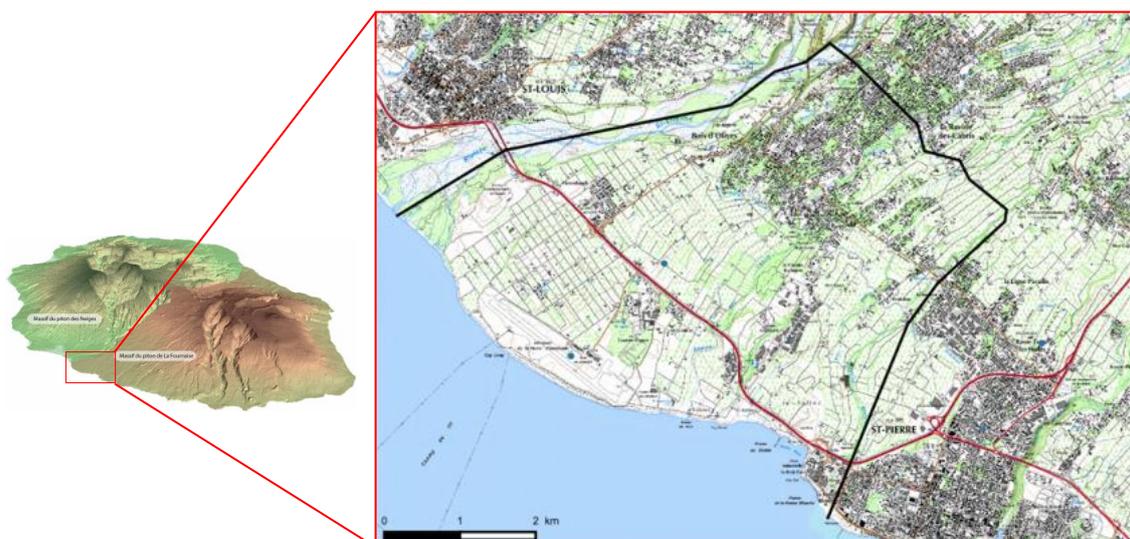


Figure 2.4: Localisation du site d'étude de Pierrefonds et du domaine modélisé

L'aquifère côtier de Pierrefonds se trouve dans les formations du Piton des Neiges. Cependant, les formations du Piton de la Fournaise sont observables à l'affleurement (Figure 2.5). La géologie superficielle du secteur d'étude est largement dominée par les affleurements des coulées de lave issues du Piton de la Fournaise, de type $\beta 7$ et $\beta 4$.

L'activité du Piton de La Fournaise commence il y a 0,45 Ma. Ce dernier est caractérisé par un dynamisme éruptif essentiellement effusif et fait partie actuellement des volcans boucliers les plus actifs dans le monde. Les laves émises sont composées pour la plupart de basaltes aphyriques, de basaltes à olivine et d'océanites.

Les rares épisodes explosifs des deux massifs volcaniques ont produit d'importants niveaux de cendres et de tufs pyroclastiques recouvrant l'ensemble du massif.

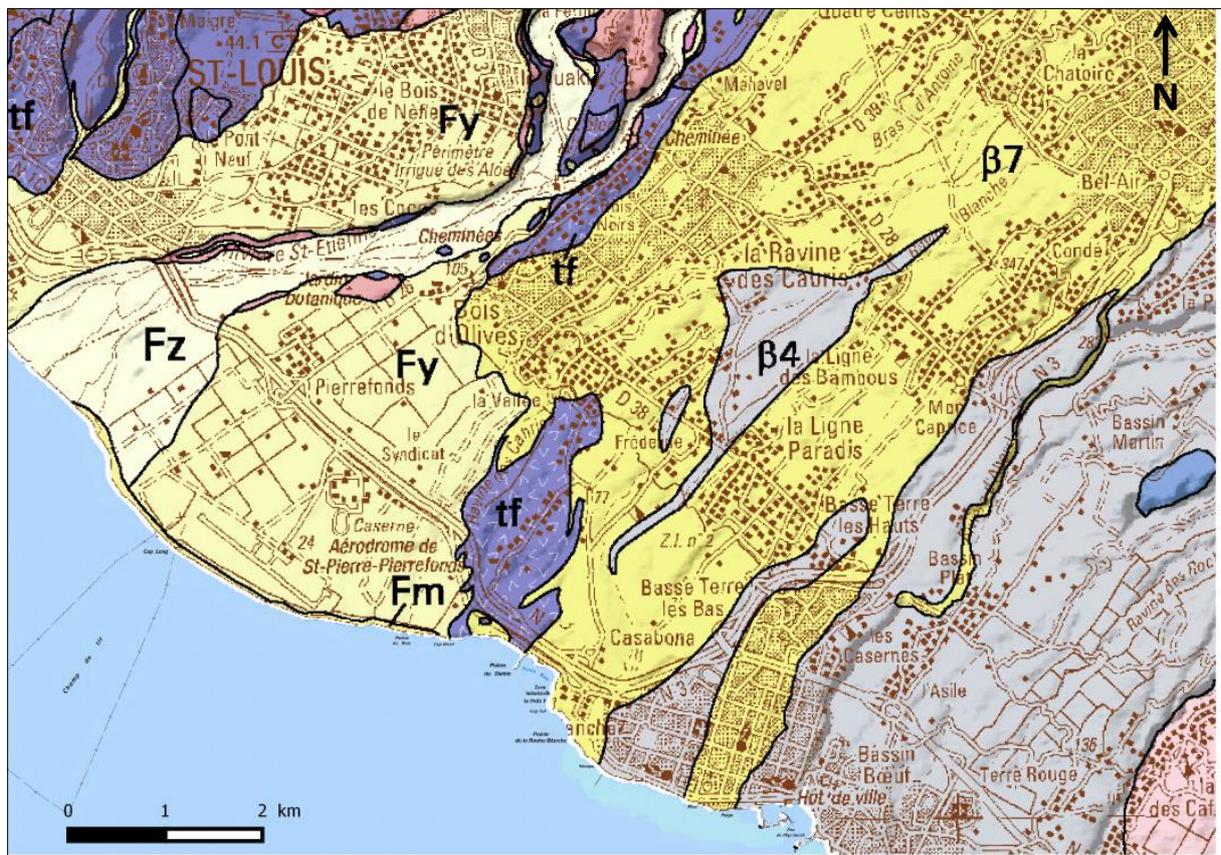


Figure 2.5: Géologie du secteur de Pierrefonds, extrait de la carte géologique de La Réunion à l'échelle 1/100 000 (Bachelery et al. 2006).

Les formations superficielles interceptées par les forages de Pierrefonds sont constituées d'alluvions récentes (Fz et Fy), et d'accumulations fluviomarines (Fm). L'épaisseur du recouvrement alluvionnaire atteint 50 m à certains endroits, comme sur le forage 38077 de l'Aérogare.

Des niveaux de tufs pyroclastiques (tf) sont observés également en amont de la localité de Bois d'Oliviers et au niveau de la pointe du Diable. Sur les logs de forages, ces retombées volcaniques sont souvent interceptées à la base des alluvions récentes. Ces niveaux de tufs correspondent à des séries différenciées (<340 000 ans) du Piton des Neiges (Bachelery et al. 2006).

Des coulées boueuses et des dépôts gravitaires (dépôts de glissements en masse, des coulées de débris, des éboulis) sont également recoupés à la base des alluvions récentes et au toit des alluvions anciennes. Cet agencement est observable notamment au niveau du log géologique du forage 38207 Amouny. L'extension latérale de ces coulées boueuses reste très mal connue. Cependant, ces formations souvent imperméables jouent un rôle important directement sur la répartition des charges hydrauliques à l'échelle de la nappe côtière, et indirectement sur l'emprise de l'intrusion marine.

Les différents faciès géologiques caractéristiques des formations superficielles décrites plus haut sont illustrés sur la figure ci-dessous.



Figure 2.6: Formations superficielles observées sur le secteur de Pierrefonds.

Sous ces formations superficielles se retrouvent les coulées basaltiques différenciées (<340 000 ans) du massif du Piton des Neiges (phases III et IV). Les formations associées sont constituées de hawaïites, de benmoréites et de basaltes à phénocristaux de pyroxène et feldspaths plagioclases (localement appelés 'roches pintades'). La série différenciée (entre 0,35 et 0,25 Ma) débute par les coulées de la phase III et se termine par les coulées de la phase IV. Les dernières coulées du Piton des Neiges contiennent des termes fortement différenciés, notamment des mugéarites et des trachytes.

A la lumière de l'information issue des logs de forages, la structure de ces formations profondes peut être décrite comme une alternance de coulées fissurées, intercalées par des niveaux scoriacés et parfois pyroclastiques pouvant atteindre jusqu'à 3 mètres d'épaisseur (Figure 2.7).



Figure 2.7: Structure des formations géologiques profondes.

Sous ces coulées différenciées, les ouvrages les plus profonds (comme le forage 38087 Dupuis 3) recoupent des alluvions anciennes bien conservées. Ces formations tapissent une paléo-vallée dans laquelle l'ancien lit du Bras de Cilaos se serait mis en place. Les formations basaltiques récentes ont comblé ce paléo-chenal et redirigé l'écoulement du Bras de Cilaos vers le lit actuel de la Rivière Saint-Etienne (Saint-Ange et al. 2011).

La présence de cette paléo-vallée a été mise en évidence par les études antérieures portant sur l'évolution sédimentaire de la plaine de Pierrefonds (Figure 2.8).

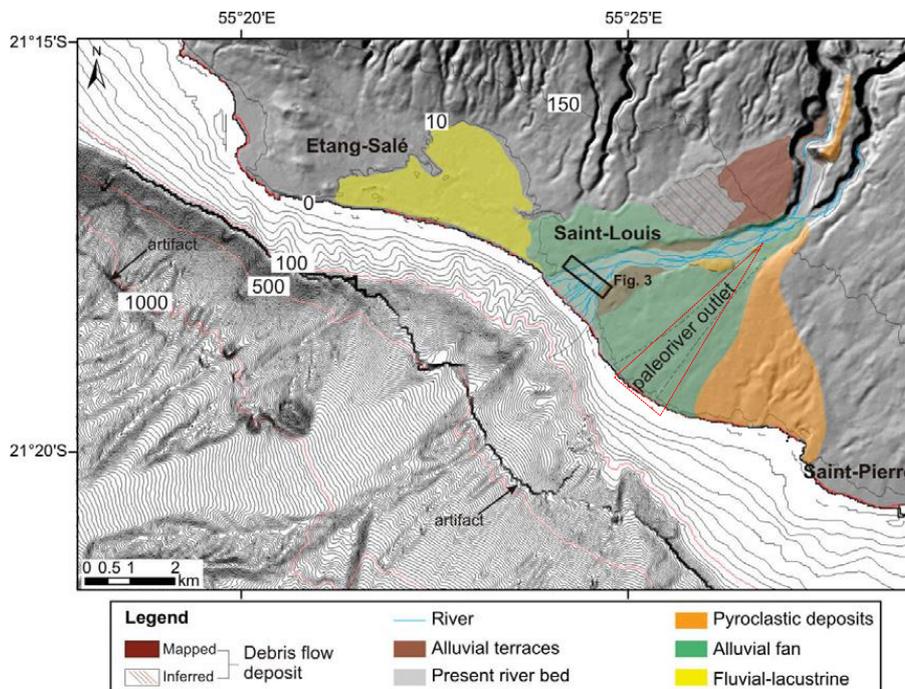


Figure 2.8: Mise en évidence de la paléo-vallée de Pierrefonds (Saint-Ange et al. 2011).

Le fonctionnement de ce paléo-chenal a produit d'importants volumes d'alluvions qui sont observés par investigation bathymétrique au large de Pierrefonds (Sisavath et al. 2011). L'étude bathymétrique révèle une extension off-shore de la paléo-vallée qui forme un canyon sous-marin peu incisé appelé « canyon de Pierrefonds » (Figure 2.9).

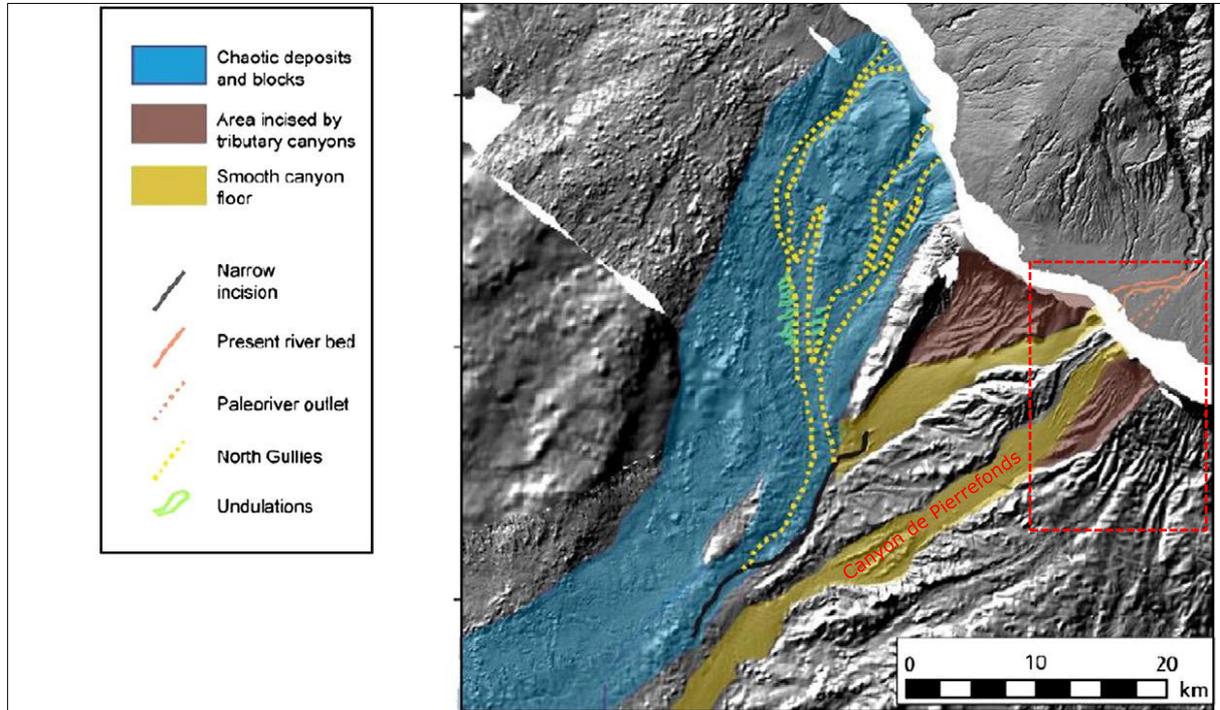


Figure 2.9: Extension de la paléo-vallée de Pierrefonds sous forme de canyon sous-marin (d'après Sisavath et al. 2011).

De 0,43 à 0,35 Ma, le bouclier du Piton des Neiges a connu une longue période d'érosion, caractérisée par une absence de dépôts. Cette période d'inactivité aurait permis une altération suffisamment importante pour initier le développement d'un paléosol. Cette limite géologique hypothétique quoique très probable, n'a pas été clairement observée sur les logs des forages.

Enfin, sous les basaltes différenciés des phases III et IV se trouvent les basaltes anciennes de la phase II de l'activité du Piton des Neiges (entre 2,1 et 0,43 Ma). Ces basaltes indifférenciés constituent le substratum de l'aquifère. Ces formations anciennes et relativement altérées sont composées de basaltes à olivines et d'océanites. Cette phase correspond au stade terminal de la série indifférenciée. Certains auteurs font référence à cette période en parlant de "la série basaltique" (McDougall 1971), «la série océanitique» (Rocher 1988) ou encore de "la phase des océanites" (Kluska 1997).

2.4 Contexte hydrogéologique

L'hydrogéologie du secteur d'étude est bien connue grâce aux logs géologiques des forages, aux mesures géophysiques et aux observations des signaux piézométriques. Les données géophysiques ont été acquises essentiellement ;

- par la tomographie électrique (Dubreuil 1984 ; Daesslé and Gandolfi 1987)
- par la méthode électromagnétique aéroportée (Campagne du BRGM, 2014).

L'aquifère de Pierrefonds est bordé à l'Ouest par la Rivière Saint-Etienne qui est formée par la confluence du Bras de Cilaos et du Bras de la Plaine. Ce cours d'eau permanent joue un rôle prépondérant sur la recharge de la nappe côtière et sur la géométrie de l'interface saline. En raison de l'hétérogénéité géologique, d'importants contrastes de perméabilités et de transmissivités sont constatés par le biais d'essais par pompage. Les perméabilités les plus faibles sont mesurées en rive gauche de la Rivière Saint-Etienne dans les basaltes anciens (phase II) et les coulées boueuses, tandis que les zones les plus perméables coïncident avec la paléo-vallée comblée par les coulées plus récentes des phases III et IV (Figure 2.10).

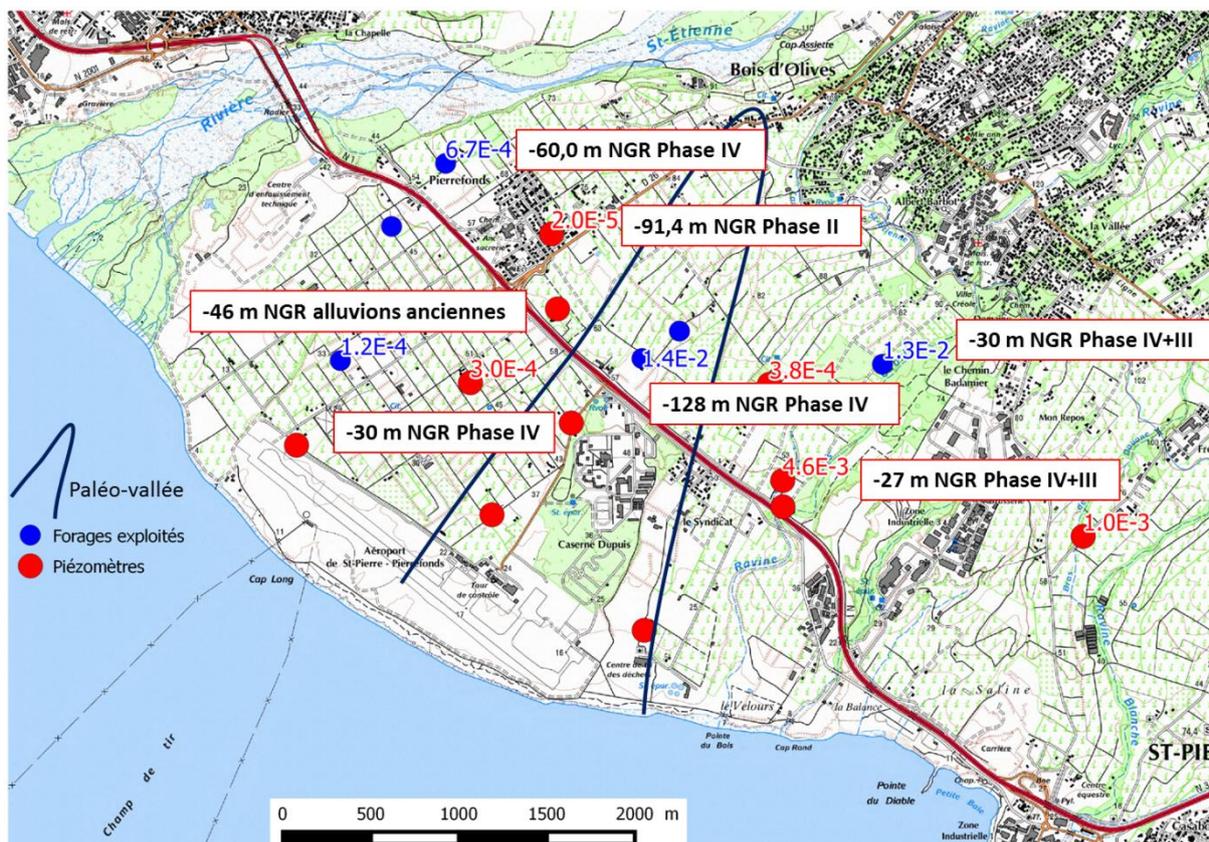


Figure 2.10: Répartition spatiale des perméabilités [m.s⁻¹] dans la plaine de Pierrefonds.

La présence de cette structure comblée par des coulées récentes et probablement plus perméables est susceptible de favoriser la dynamique de l'intrusion saline. En effet, la présence d'un milieu plus perméable induit des charges hydrauliques plus faibles et donc une remontée de l'interface saline. L'impact des structures tridimensionnelles à fortes perméabilités sur la géométrie de l'intrusion marine peut être mis en évidence par investigation géophysique et par modélisation numérique (Bourhane et al. 2014).

Les caractéristiques de ces ouvrages sont reportées sur le tableau suivant :

Tableau 3.1 : Caractéristiques générales des ouvrages de la plaine côtière de Pierrefonds

Code OLE	Nom de l'ouvrage	Distance à la côte [m]	Altitude [m NGR]	Profondeur [m/sol]	Usage
38063	PIB7 Pierrefonds village	2400	67,10	160	RIS
38065	F15 La Vallée Pierrefonds	1340	34,45	120	RIS
38066	Forage La Vallée	2400	68,56	100	AEP
38067	F12 Aérodrome Pierrefonds	490	19,73	80	RIS
38068	Pierrefonds Aval	1000	33,67	100	Irrigation
38070	F10 La Vallée Ravine des Cabris	1490	47,84	80	RIS
38071	F7 Pierrefonds	1500	45,28	80	RIS
38072	F9 Pierrefonds	2160	64,79	120	RIS
38073	Forage Rive Gauche RSE Amont	2040	59,98	120	AEP
38077	P12 Aérogare Ch. des Pêcheurs	900	31,31	110	RIS
38078	P11 Syndicat (aval) / Pierrefonds	520	22,14	120	RIS
38080	Rivière Saint-Etienne Aval	1600	47,21	170	Irrigation
38081	Forage Dupuis 2	2160	61,63	190	AEP
38087	Dupuis 3	2150	62,10	200	RIS
38088	Forage Frédeline	2700	115,10	200	AEP
38089	Ravine Blanche	1570	60,91	200	RIS
38207	Forage Pierrefonds 1 Amouny	2400	68,00	150	AEP
38217	S2 Caserne Pierrefonds	1650	46,30	200	RIS

Les logs géologiques associés à ces ouvrages sont disponibles en Annexe 1.

L'exploitation de l'information lithologique issue des logs géologiques de ces ouvrages a permis l'établissement de trois coupes géologiques suivantes :

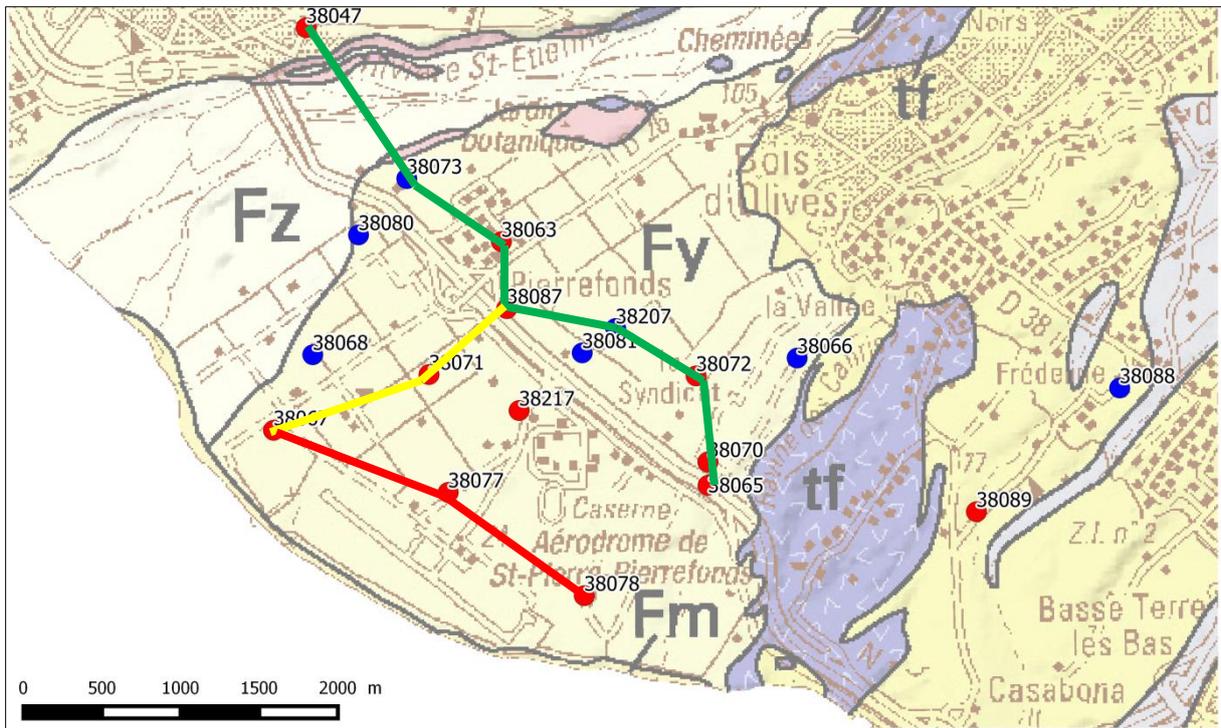


Figure 3.2 : Localisation des coupes géologiques dans la plaine de Pierrefonds.

La première coupe géologique parallèle à la côte (trait vert) recoupe les ouvrages 38047 (nappe des Cocos), 38073, 38063, 38087, 38207, 38072, 38070 et 38065 (Figure 3.3). La deuxième coupe parallèle à la côte (trait rouge) recoupe les ouvrages 38067, 38077 et 38078. Enfin, la troisième coupe est perpendiculaire à la côte (trait jaune) et recoupe les ouvrages 38063, 38087, 38071 et 38067.

La première coupe géologique (Figure 3.3) révèle notamment;

- une variation latérale des épaisseurs des formations géologiques
- une discontinuité des formations de coulées boueuses et de tufs pyroclastiques
- une présence d'alluvions anciennes sur l'axe de la paléo-vallée identifiée plus haut
- une présence de plusieurs niveaux d'altération et de paléosols

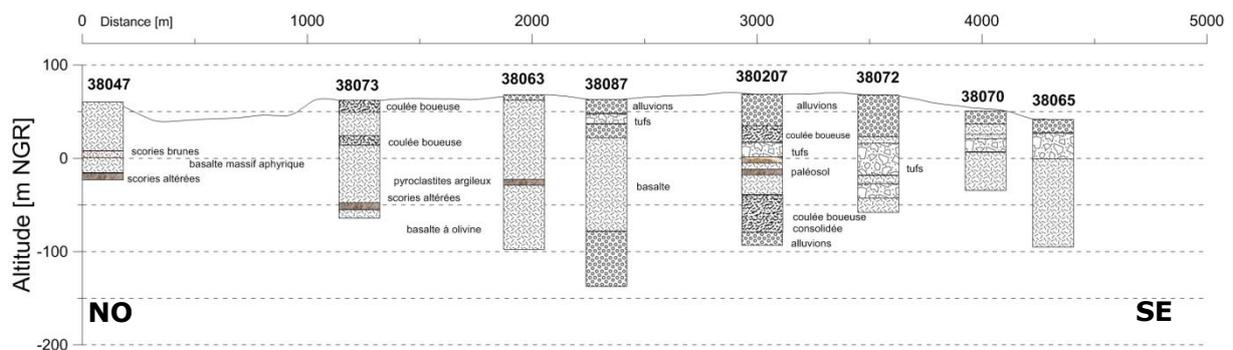


Figure 3.3 : Coupe géologique N°1 parallèle à la côte dans la plaine de Pierrefonds.

La deuxième coupe (Figure 3.4) révèle un épaississement des alluvions récentes vers la côte, où ces formations peuvent atteindre jusqu'à 50 m d'épaisseur.

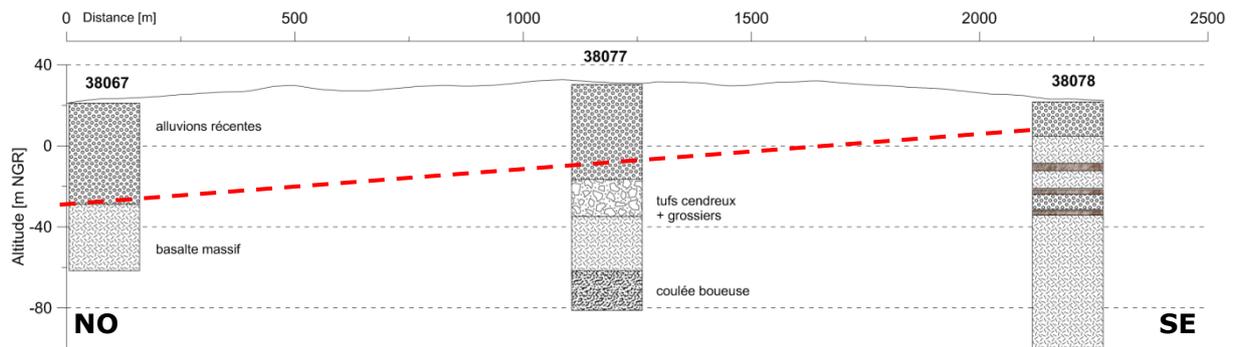


Figure 3.4 : Coupe géologique N°2 parallèle à la côte dans la plaine de Pierrefonds.

Cet épaississement progressif du recouvrement alluvionnaire est visible également sur la dernière coupe géologique perpendiculaire à la côte (Figure 3.5).

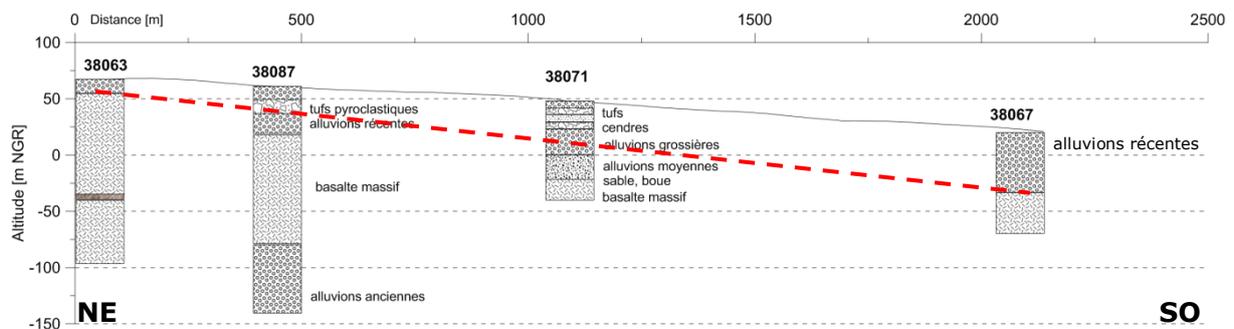


Figure 3.5 : Coupe géologique perpendiculaire à la côte dans la plaine de Pierrefonds.

Une synthèse des informations géologiques recueillies permet l'élaboration d'un modèle conceptuel hydrogéologique simplifié pour l'aquifère côtier de Pierrefonds (Figure 3.6).

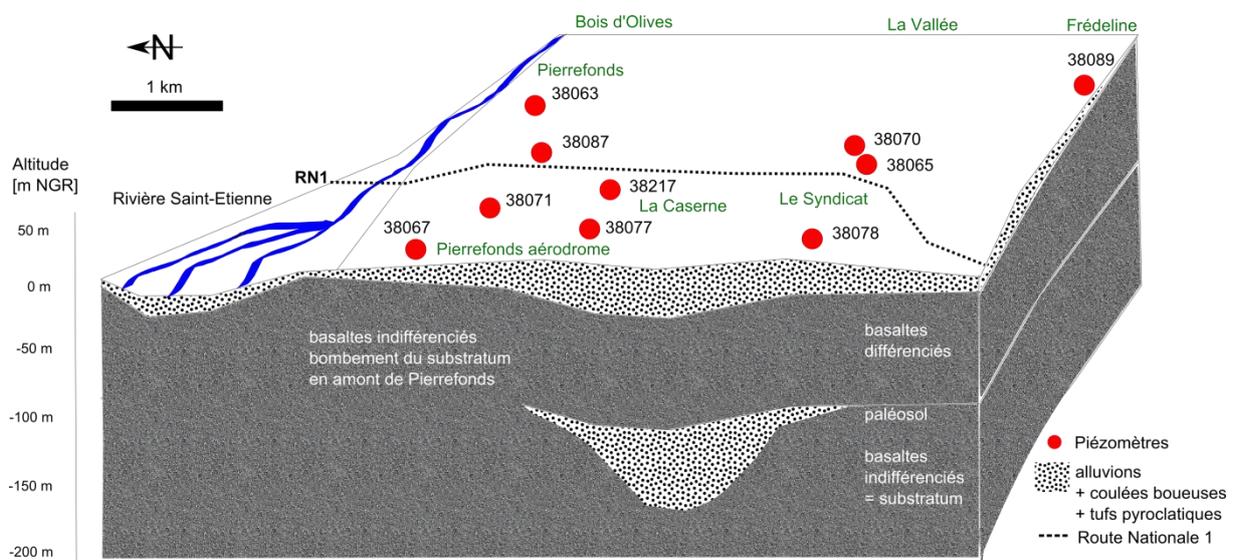


Figure 3.6 : Schéma conceptuel hydrogéologique de l'aquifère de Pierrefonds.

3.2 Investigations géophysiques

La réalisation d'un modèle tridimensionnel requiert, entre autre, une connaissance approfondie (i) de la structure du milieu géologique constituant l'aquifère, et (ii) de la géométrie de l'interface eau douce / eau salée. Par ailleurs, les mesures géophysiques sont un moyen performant pour enrichir cette connaissance.

Plusieurs campagnes géophysiques électriques ont été réalisées sur Pierrefonds et de Saint-Pierre au cours des dernières décennies :

- **1984**, zone Pierrefonds – Saint Louis. 87 sondages électriques ont été réalisés pour reconnaître l'extension du biseau salé et la géométrie des alluvions du Bras de Cilaos (50 sondages sur le secteur de Pierrefonds) (Dubreuil, 1984) ;
- **1985**, zone saint Louis – Pierrefonds. 20 sondages électriques ont été réalisés, dont 6 sondages au niveau de la caserne Dupuis ;
- **1987**, zone Pierrefonds. 10 sondages électriques ont été réalisés au niveau de Pierrefonds village ;
- **1988**, zone Pierrefonds. 11 sondages électriques ont été réalisés en rive gauche de la rivière Saint-Etienne ;
- **1988**, zone de Saint-Pierre. 70 sondages électriques sont réalisés sur Saint-Pierre et ses environs.
- **1989**, zone de Saint-Pierre. 21 sondages AMT sont effectués.
- **2008**, zone Pierrefonds. La méthode électrique a été testée par l'intermédiaire de 3 méthodes (panneau électrique pôle-dipôle, dispositif rectangle, dispositif 3D).
- **2014**, La Réunion entière. Campagne héliportée (AEM⁵) pour l'acquisition de données géophysiques électromagnétiques (menée par le BRGM⁶)
- **2015**, zone de Pierrefonds. 8 profils de tomographie de résistivité électrique selon deux dispositifs d'acquisition : Wenner alpha et pôle-dipôle (par l'Office de l'eau Réunion).

L'apport de ces différentes campagnes géophysiques sur la caractérisation géologique et hydrogéologique de l'aquifère de Pierrefonds est synthétisé ci-dessous :

3.2.1 Géophysique électrique dans la plaine du Bras de Cilaos, 1984

L'étude géophysique de 1984 sur le secteur de la plaine alluviale du Bras de Cilaos (Dubreuil 1984b) a été réalisée dans le cadre du Programme Départemental de Recherche en Eau souterraine (PDRE).

Les objectifs de ces prospections étaient :

- « d'identifier d'éventuels horizons conducteurs pouvant perturber la nappe aquifère » ;
- « de reconnaître l'extension du biseau salé sur la zone littorale » ;
- « de reconnaître et d'étudier la géométrie des alluvions de la plaine ».

Les résultats des 87 sondages électriques réalisés mettent en évidence un substratum conducteur (80 à 100 ohm.m) sous des horizons plus résistants superficiels. Ce substratum pourrait correspondre au mur des formations alluviales et volcaniques qui le recouvrent. Une morphologie particulière du toit du substratum est caractérisée, avec des zones hautes et des zones de surcreusement.

⁵ Airborne electromagnetics

⁶ Bureau des Recherches Géologiques et Minières

Les formations de recouvrement plus résistantes sont présentes sur des épaisseurs variant entre 75 m et plus de 150 m. Les plus fortes épaisseurs sont mises en évidence au niveau des zones de surcreusement du substratum. Au sein de ces formations, les faibles contrastes de résistivité existant ne permettent pas de distinguer les formations alluviales des alternances coulées / scories. Localement, des couches très conductrices (30-60 ohm.m) sont identifiées dans la couverture résistante. Ces fortes conductivités sont attribuées à la présence de coulées boueuses, identifiées de part et d'autre de la rivière Saint-Etienne.

En terme de fonctionnement hydrogéologique, le substratum conducteur pourrait être interprété comme une formation peu perméable. Les formations de recouvrement (dépôts alluviaux et alternances coulées / scories) plus conductrices constitueraient le réservoir aquifère, avec des perméabilités plus élevées que celles du substratum. Au sein de l'aquifère développé dans les formations de recouvrement, les axes de surcreusement du substratum pourraient permettre la formation d'axes de drainage.

Les faibles résistivités de la zone littorale seraient rattachées aux eaux salées et saumâtres du biseau salé. Par ailleurs, le gradient du biseau salé apparaît nettement plus élevé au nord, en bordure de la Rivière Saint-Etienne, qu'au sud du site. Pour Dubreuil (1984b), cette dissymétrie serait expliquée par des apports d'eau douce importants en lien avec la proximité de la Rivière Saint-Etienne, associés à la concentration d'une partie des flux par les axes de drainage (zones de surcreusement).

3.2.2 Reconnaissance du biseau salé par géophysique électrique, 1987

Le Programme Départemental de Recherche en eau (PDRE) de 1986 comportait une opération de géophysique électrique confiée au BRGM, afin de situer le niveau d'intrusion saline dans le secteur de Pierrefonds. En terme d'application, ces prospections géophysiques avait pour but de confirmer l'implantation du forage « Pierrefonds Littoral », suite aux investigations géophysiques réalisées en rive gauche de la rivière Saint-Etienne (Dubreuil 1984b).

En analysant de manière conjointe les résultats des campagnes géophysiques 1984 et 1987, une coupe interprétative allant du trait de côte jusqu'à Pierrefonds Village a été construite. Les données géophysiques acquises montrent que le niveau relativement résistant (150-250 ohm.m) est continu le long du profil investigué. Ce milieu pourrait correspondre à une nappe libre contenue dans un aquifère alluvial et/ou pyroclastique (Daesslé and Gandolfi 1987b).

Sous ce niveau, un horizon plus résistant (300-600 ohm.m) est identifié, pouvant correspondre à des basaltes non altérés fissurés. Ce niveau correspondrait probablement à l'aquifère principal. Enfin, un substratum conducteur (60-100 ohm.m) est identifié, pouvant être associé (i) à une zone de diffusion d'un front salé, ou (ii) à un milieu basaltique plus altéré ou scoriacé. Le biseau salé est mis en évidence par de très faibles résistivités (< 20 ohm.m) en base de profil, jusqu'à des profondeurs de l'ordre de 200 mètres à environ 1 km de la côte (Daesslé and Gandolfi 1987b).

Il est souligné dans cette étude que les résistivités de 60-100 ohm.m, initialement interprétées comme le substratum des formations de recouvrement (Dubreuil 1984b), pourrait être expliqué près de la côte par un domaine de dispersion des eaux salées. En revanche, elles seraient expliquées plus en amont par des formations volcaniques plus argileuses ou scoriacées.

Cette étude a permis de répondre au besoin de connaissance pour l'implantation du forage de reconnaissance Pierrefonds Littoral, avec une amélioration de la géométrie des zones de surcreusement du substratum conducteur.

Par ailleurs, le biseau salé est imagé jusqu'à une profondeur de 250 m à environ 1 km de la côte. Cette configuration souligne la nécessité de réaliser des investigations profondes (> 250 m) pour évaluer son extension à l'intérieur des terres.

3.2.3 Géophysique complémentaire en rive gauche de la Rivière Saint-Etienne, 1988

Dans le cadre du PDRE, l'implantation d'un forage en rive gauche du Bras de la Plaine a été décidée. Cette implantation fait suite à la réalisation de 4 forages de reconnaissances, convertissable en forage d'exploitation, réalisés à partir des études géophysiques de 1984 (Dubreuil 1984b).

Malgré les données disponibles sur le secteur d'étude, le site de ce forage n'a pas pu être implanté avec suffisamment de certitude. De fait, le BRGM a été chargé de réaliser des reconnaissances géophysiques complémentaires.

Les sondages complémentaires réalisés ont permis de préciser les contours des coulées boueuses, ainsi que la profondeur du substratum conducteur. Les principaux horizons conducteurs mis en évidence sont :

- un horizon résistant (500 ohm.m) d'épaisseur décimétrique (5 à 10 m), interprété comme des alluvions ;
- un horizon faiblement résistant (30 à 60 ohm.m), de 15 à 30 m d'épaisseur, interprété comme une coulée boueuse ;
- un horizon résistant (350 à 500 ohm.m), relativement épais (60 à 150 m), interprété comme des basaltes plus ou moins sains et scoriacés ;
- un horizon conducteur (100 à 130 ohm.m), interprété comme le substratum conducteur. Le toit du substratum montre une morphologie accidentée, avec des surcreusements locaux.

Les acquisitions géophysiques réalisées dans le cadre de cette étude ont permis de préciser les données antérieures sur le secteur du village de Pierrefonds. Le substratum conducteur est à nouveau imagé, avec la localisation de surcreusements locaux pouvant jouer un rôle majeur dans l'hydrodynamique de l'aquifère des basaltes.

3.2.4 Interprétation d'une campagne de géophysique électrique en rive droite de la Rivière Saint-Etienne, 1988

Dans le cadre du PDRE, la réalisation de 2 forages complémentaires en rive droite de la Rivière Saint-Etienne a été demandée. Afin d'optimiser l'implantation de ces ouvrages, le BRGM a été chargé de réinterpréter les sondages électriques existants au nord de Pierrefonds.

Les principaux objectifs visés étaient de préciser :

- les limites des coulées boueuses ;
- l'épaisseur et l'extension des empilements de coulées / scories, situées entre les formations peu perméables qui sont les coulées boueuses et le substratum conducteur ;
- le niveau du toit du substratum conducteur (coulées basaltiques de phase II), en raison de sa très faible perméabilité supposée.

A partir des données réinterprétées, une carte et des coupes géo-électriques ont été réalisées. Elles confirment l'extension des surcreusements du substratum en rive droite de la Rivière Saint-Etienne, dans lesquels les flux d'eau souterraine pourraient potentiellement être concentrés.

Les terrains de surface apparaissent généralement résistant (200 à 600 ohm.m), à l'exception des dépôts de coulées boueuses intercalées, ou sub-affleurantes dans certains secteurs. Pour les auteurs, ces dépôts constituent probablement des niveaux très peu perméables.

3.2.5 Reconnaissances de la ressource en eau souterraine de la région de Saint-Pierre : approches géologique et géophysique électrique, 1988

Dans le cadre du PDRE, le BRGM s'est vu confier une mission de reconnaissance géologique et géophysique des ressources en eaux souterraines dans la région de Saint-Pierre. L'objectif de ces investigations est de proposer des implantations de forages complémentaires afin de renforcer le réseau d'irrigation du Bras de la Plaine et l'alimentation en eau potable de la ville de Saint Pierre.

Au total, 70 sondages ont été réalisés selon un maillage relativement large (> 500 m x 500 m). Le secteur géographique couvert s'étend de l'ouest de la Pointe du Diable jusqu'à la Pointe de la Ravine des Cafres. Dans les hauts, les profils ont été étendus jusqu'au niveau de la ligne des Bambous (alt. 300 m NGR).

En bordure Est du secteur de Pierrefonds, une augmentation progressive des résistivités entre 80 et 200 ohm.m est observée depuis la côte vers l'intérieur des terres. Cette observation caractérise l'influence du biseau salé sur les paramètres géo-électriques des terrains (Join et al. 1988). Ces résultats confirment qualitativement le faible gradient du biseau salé à l'est de l'aéroport de Pierrefonds en comparaison au fort gradient identifié sur le reste du littoral, ainsi que sa plus faible profondeur.

3.2.6 Investigation par sondages audio-magnétotelluriques (AMT), Saint-Pierre, 1989

Dans l'objectif de poursuivre le programme de reconnaissance de la ressource en eau du secteur de Saint-Pierre, le BRGM réalise en 1989 une prospection électromagnétique de type audio-magnétotellurique (Duchamps and Daesslé 1989).

Les sondages AMT permettent d'individualiser dans le sous-sol des horizons caractérisés par leur résistivité et leur profondeur. En revanche, le pouvoir de pénétration de cette méthode est largement supérieur à celui des sondages électriques. Par conséquent, l'emploi de cette méthode a été privilégié afin (i) de rechercher des terrains « conducteurs » en profondeur, et (ii) de préciser la position du biseau salé en bordure littorale.

Les mesures ont été réalisées sur un secteur géographique allant de la Caserne Dupuis (secteur de Pierrefonds) à la pointe de la Ravine des Cafres. Au total, 21 sondages AMT ont été effectués. En termes de résultats, il a été montré la présence d'un corps conducteur (10 à 40 ohm.m) sur l'ensemble du secteur d'étude. Ce conducteur est généralement situé sous un corps résistant, assimilé par les auteurs aux formations aquifères (Duchamps and Daesslé 1989).

L'interface entre ces deux ensembles montre une morphologie particulière, avec des zones de surcreusement (côte < -200 m) et des zones hautes (-200 < côte < -30 m). Les zones de surcreusement apparaissent généralement parallèles à la côte.

Les pollutions électromagnétiques sur le secteur de mesure limitent la validité de ces acquisitions (Girard et al. 2008). Dans cette étude, la profondeur du toit du substratum conducteur apparaît en effet deux fois plus importante que lors des études précédentes (sondages électriques).

3.2.7 Méthodologie d'imagerie électrique haute résolution des aquifères côtiers en milieu volcanique à La Réunion, 2008

Cette étude a été menée par le BRGM, pour le compte de l'Office de l'Eau, dans le but de proposer une méthodologie d'imagerie électrique haute résolution des aquifères côtiers en milieu volcanique (Girard et al. 2008). Les deux objectifs principaux étaient de :

- démontrer les capacités des méthodes d'imagerie électrique pour caractériser les aquifères côtiers dans une frange située entre 300 m et 3000 m du trait de côte, et sur une tranche verticale pouvant atteindre 300 m de profondeur en milieu volcanique complexe (Figure 3.7);
- définir une méthodologie reproductible d'imagerie haute résolution de l'interface eau douce / eau salée et des aquifères côtiers basée sur la méthode des panneaux électriques.

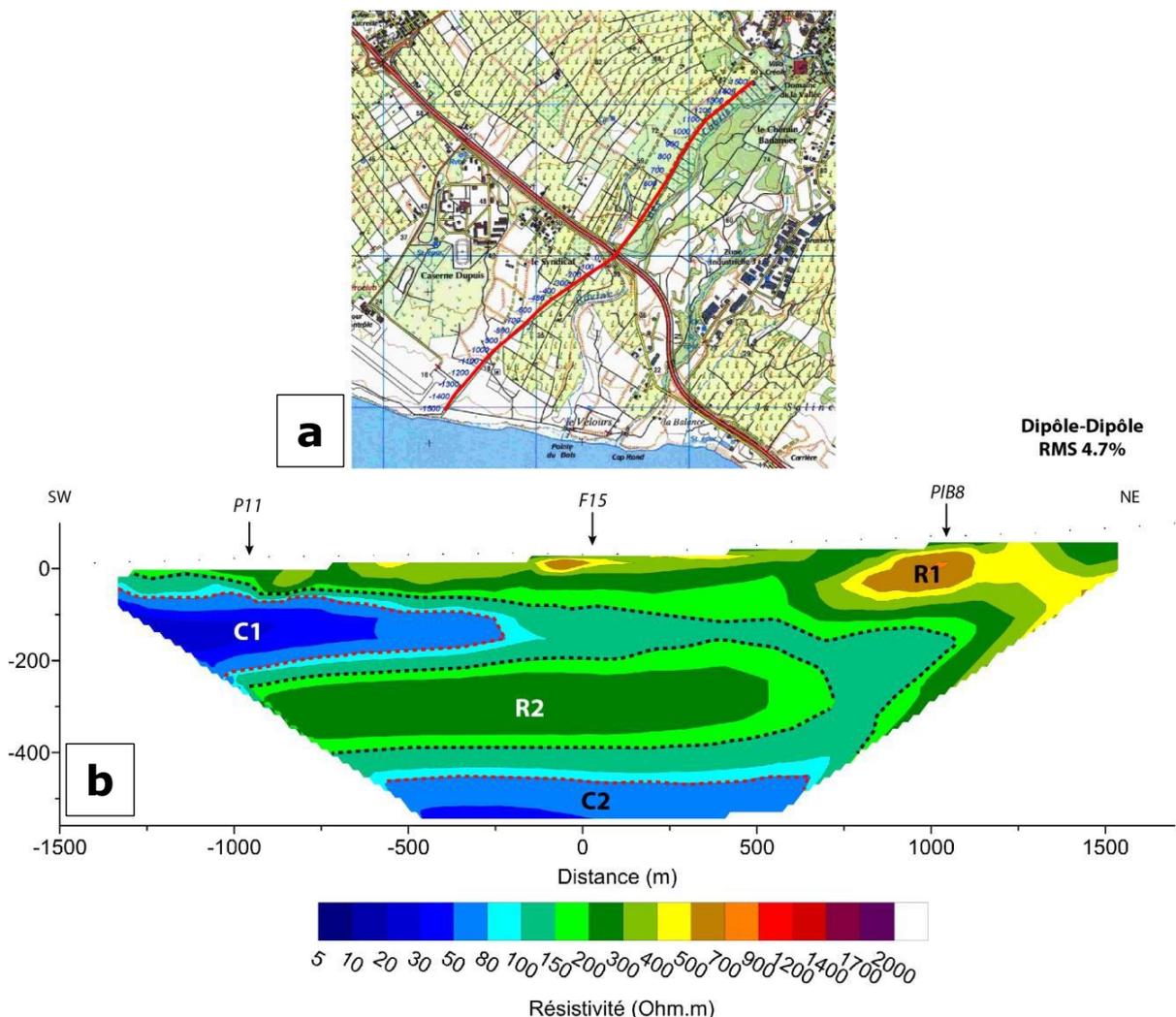


Figure 3.7 : Localisation du profil (a) et interprétation (b) du panneau électrique de Girard et al. 2008, ré-inversé par Chaput et al. (2015).

Trois dispositifs différents ont été testés, afin d'en éprouver les capacités :

- Le panneau dipôle-dipôle ;
- Le dispositif rectangle ;
- Le dispositif 3D.

Les mesures ont été réalisées entre l'aérodrome de Pierrefonds et le sud-est du secteur de Bois d'Olivés, à proximité du piézomètre P11 (1228-8X-0078). Le profil électrique met en évidence un conducteur en base de coupe au sud-ouest (Figure 3.7).

Ce conducteur (C2) montre un plongement à faible pendage vers l'intérieur des terres, avec une résistivité qui diminue progressivement en s'éloignant de la côte. Sur la base des données de diagraphies en forage (P11), ce conducteur est interprété comme étant l'intrusion saline. L'interface peut être pointée pour l'iso-valeur 100 ohm.m. Elle est particulièrement bien imagée grâce à l'inversion 3D des données acquises par le dispositif multinode (Figure 3.8).

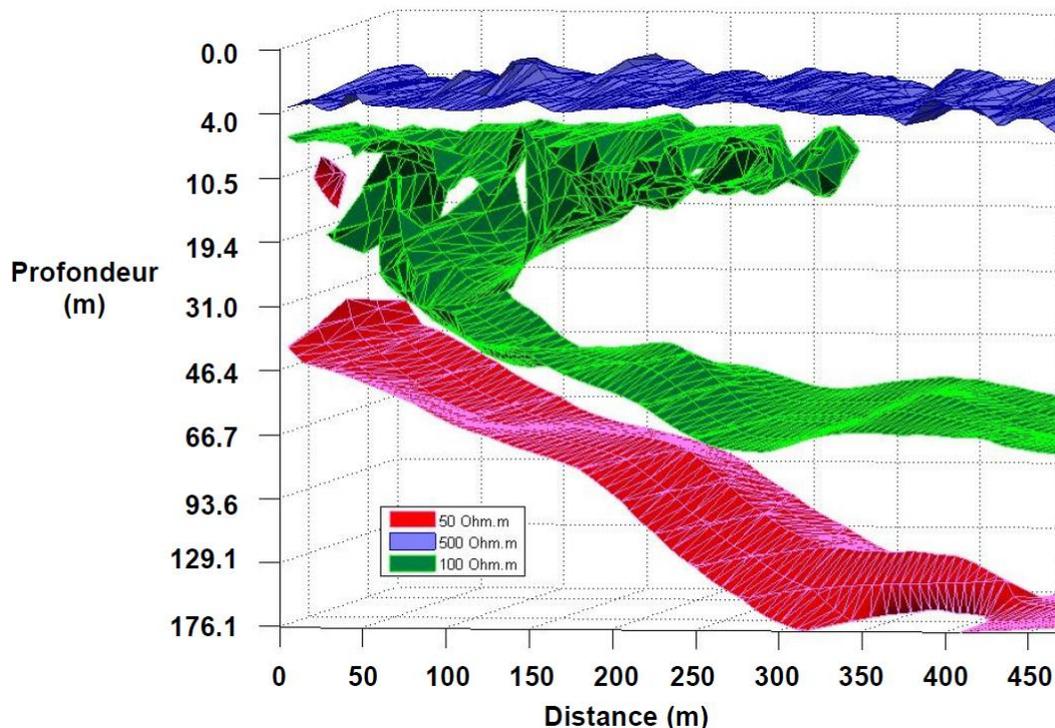


Figure 3.8 : Visualisation en 3D de l'interface eau douce / eau salée-saumâtre : surface iso-valeurs 50, 100 et 500 ohm.m dans le modèle obtenu après inversion 3D (Girard et al. 2008).

Au sein des formations plus résistantes (R1), l'augmentation brutale de la profondeur de la base des formations résistantes (> 300 ohm.m) pourrait être interprétée comme une bordure de paléo-vallée (Girard et al. 2008).

En profondeur, la présence d'un niveau relativement résistant (R2) sous les terrains conducteurs (attribués à l'intrusion saline) sont interprétés soit (i) comme des laves altérées saturées d'eau douce soit (ii) comme des laves saines saturées d'eau légèrement saumâtre (Girard et al. 2008). En l'absence d'observation directe par forage, aucun élément ne permet de trancher entre ces deux hypothèses.

D'une manière plus générale, les auteurs soulignent la cohérence des données acquises avec celle des travaux géophysiques antérieurs. En revanche, l'importante indentation de l'intrusion saline modélisée dans ce secteur (Folio 2006) n'est pas clairement imagée à l'intérieur des terres (Girard et al. 2008).

Cette étude a permis de caractériser la géométrie de l'interface eau douce / eau salée sur le secteur du forage P11. D'un point de vue méthodologique, elle souligne l'intérêt des grands panneaux électriques (tomographie 2D) pour l'étude des interfaces eau douce / eau salée.

La figure ci-dessous illustre la densité des données géophysiques existantes sur le secteur de Pierrefonds et Saint-Pierre.

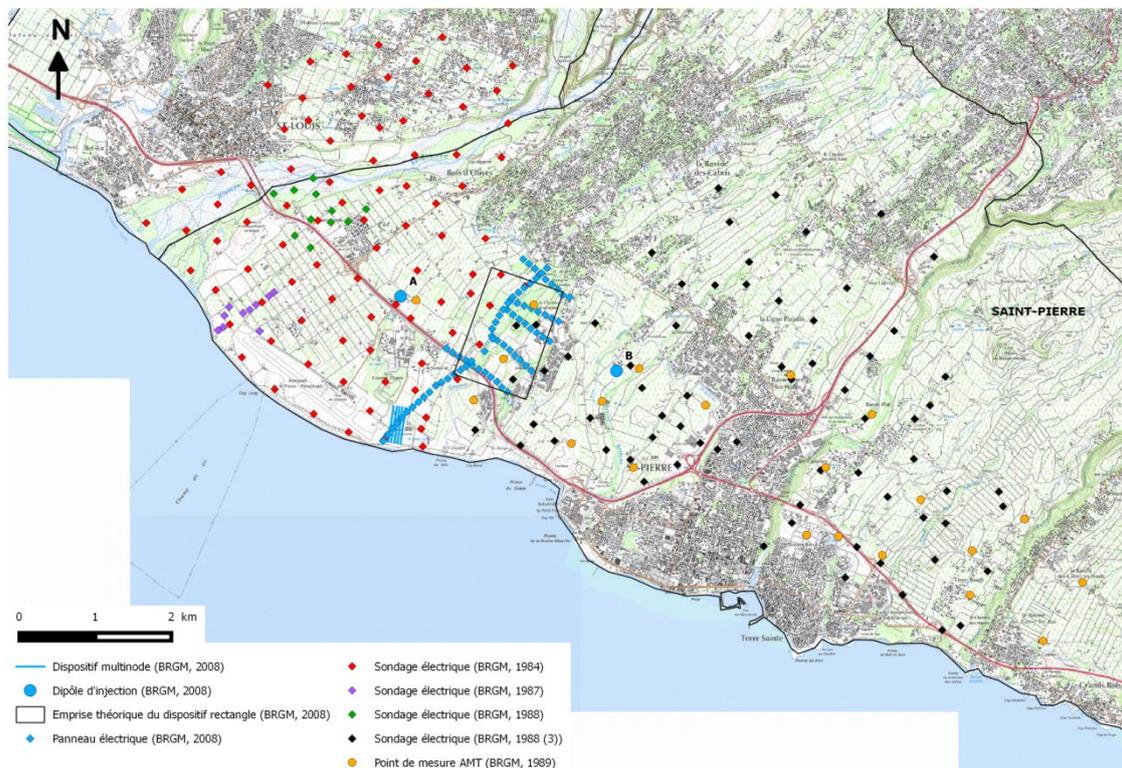


Figure 3.9 : Localisation des points de mesures géophysiques sur les secteurs de Pierrefonds et de Saint-Pierre.

Au regard de cet état de l'art, il est possible d'identifier clairement deux types de besoins en vue de la mise en œuvre d'un modèle hydrogéologique sur le secteur de Pierrefonds :

- 1- une augmentation de la résolution des points de mesures géophysiques
- 2- une augmentation de la profondeur d'investigation

Dans cette optique, l'acquisition de données géophysiques complémentaires s'est avérée nécessaire. D'une part, pour améliorer la résolution des connaissances géophysiques du secteur, il est envisagé d'exploiter les données géophysiques électromagnétiques issues de la campagne hélicoptérée menée par le BRGM en 2014. D'autre part, pour acquérir une imagerie profonde des structures géologiques, une campagne de tomographie électrique par un dispositif pôle-dipôle a été mise en œuvre par l'Office de l'eau Réunion.

3.2.1. Augmentation de la résolution des mesures géophysiques

L'utilisation de données mieux résolues apparaît nécessaire afin d'améliorer (i) le modèle géologique à l'intérieur des terres, en caractérisant plus précisément la morphologie du toit de l'aquifère, et (ii) la connaissance sur l'évolution spatiale de la géométrie du biseau salé entre l'embouchure de la rivière Saint-Etienne et le sud-est de Pierrefonds.

En termes d'application, l'utilisation de la géophysique électrique n'est pas envisageable pour augmenter la résolution des acquisitions sur le secteur.

En revanche, les acquisitions TDEM⁷ héliportées déjà existantes sur le secteur de Pierrefonds sont exceptionnellement denses (Figure 3.10). L'exploitation de ces données apparaît comme un moyen pertinent de palier au besoin d'une information de haute résolution.

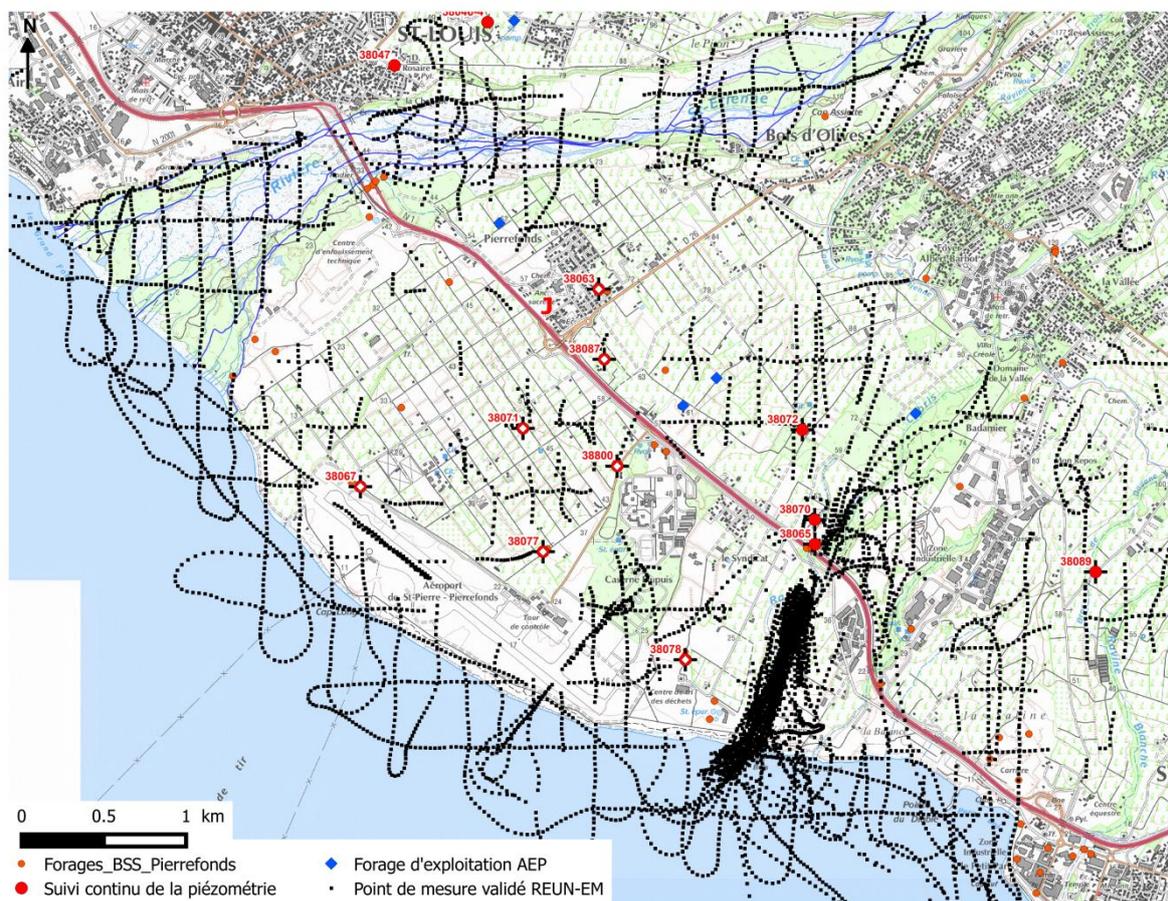
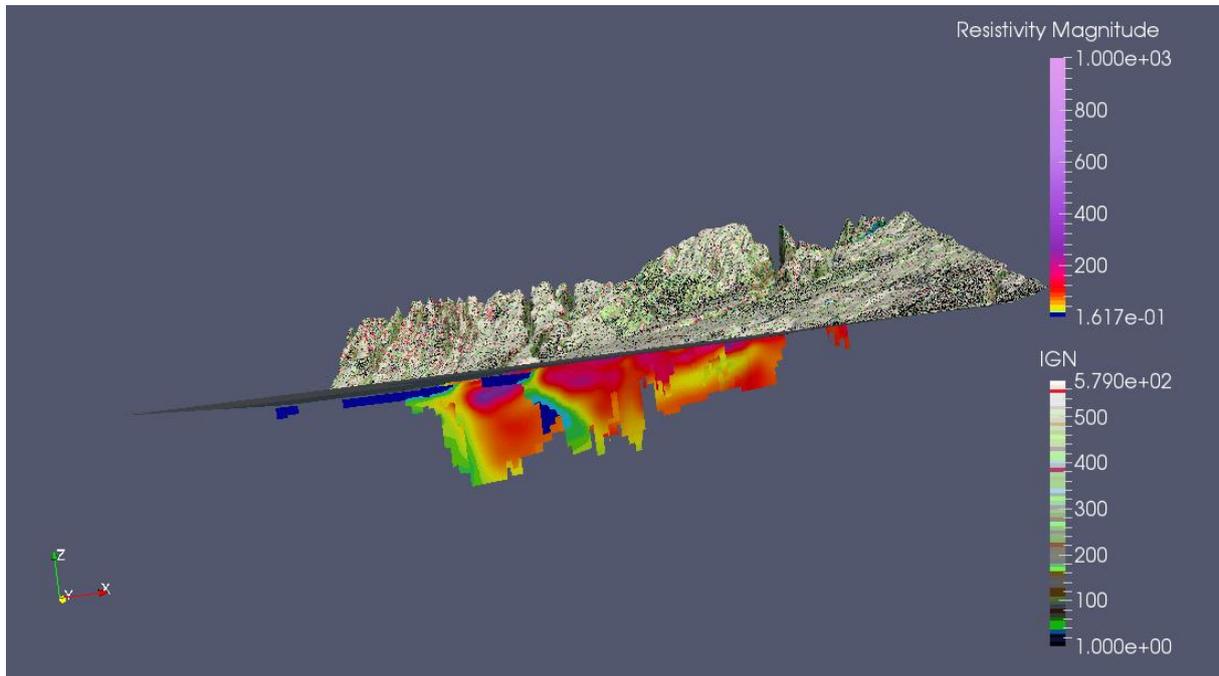


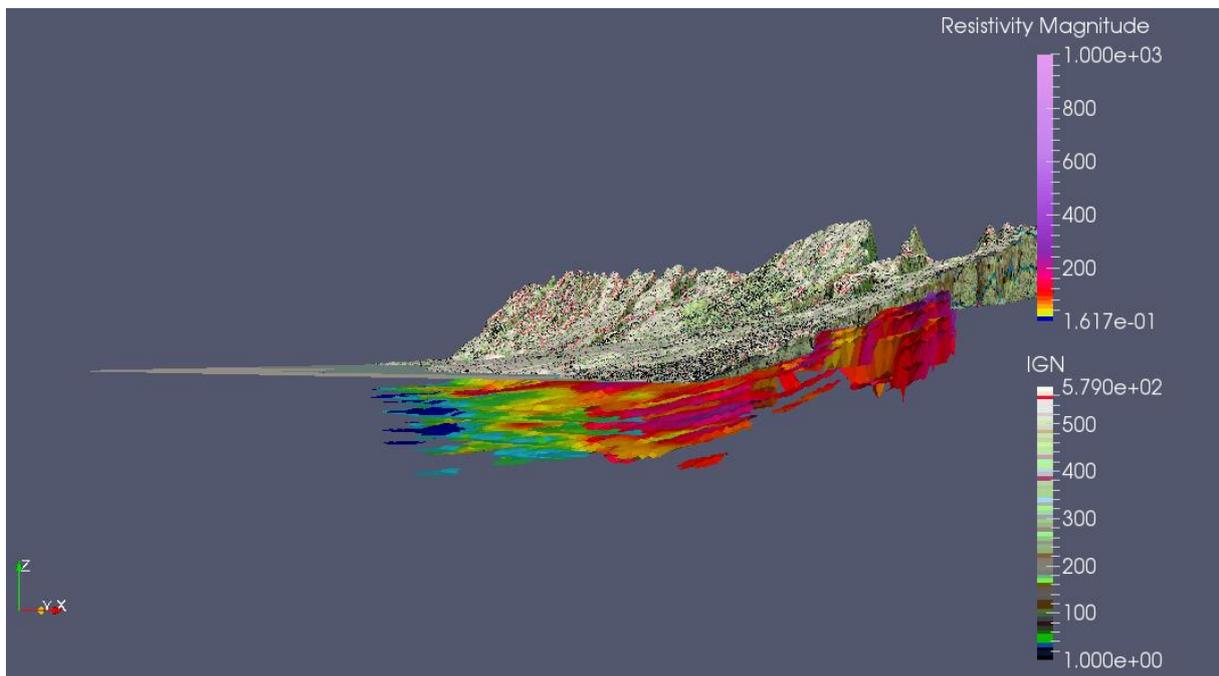
Figure 3.10 : Localisation des points de mesures géophysiques électromagnétiques sur le secteur de Pierrefonds (BRGM).

L'extraction des données mesurées sur Pierrefonds fournit une imagerie des résistivités électriques sous forme de coupes verticales ou de cartes de résistivités jusqu'à une profondeur de 200 m suivant une résolution verticale de 5 m.

⁷ Time Domain Electromagnetics



a)



b)

Figure 3.11 : Visualisation des résistivités électriques sous forme de coupes (a) et de cartes (b) sur le secteur de Pierrefonds (BRGM).

L'apport de ces données de résistivités permet d'améliorer considérablement le calage des salinités du modèle en zone côtière.

3.2.2. Augmentation de la profondeur d'investigation

Pour améliorer la connaissance sur le biseau salé en profondeur, 8 profils électriques ont été implémentés dans la zone centrale de Pierrefonds (Figure 3.12). Cette investigation plus profonde vise à acquérir des données permettant de mieux contraindre la géométrie du biseau salé à l'intérieur des terres, en particulier dans les secteurs stratégiques pour l'exploitation de la ressource en eau souterraine.

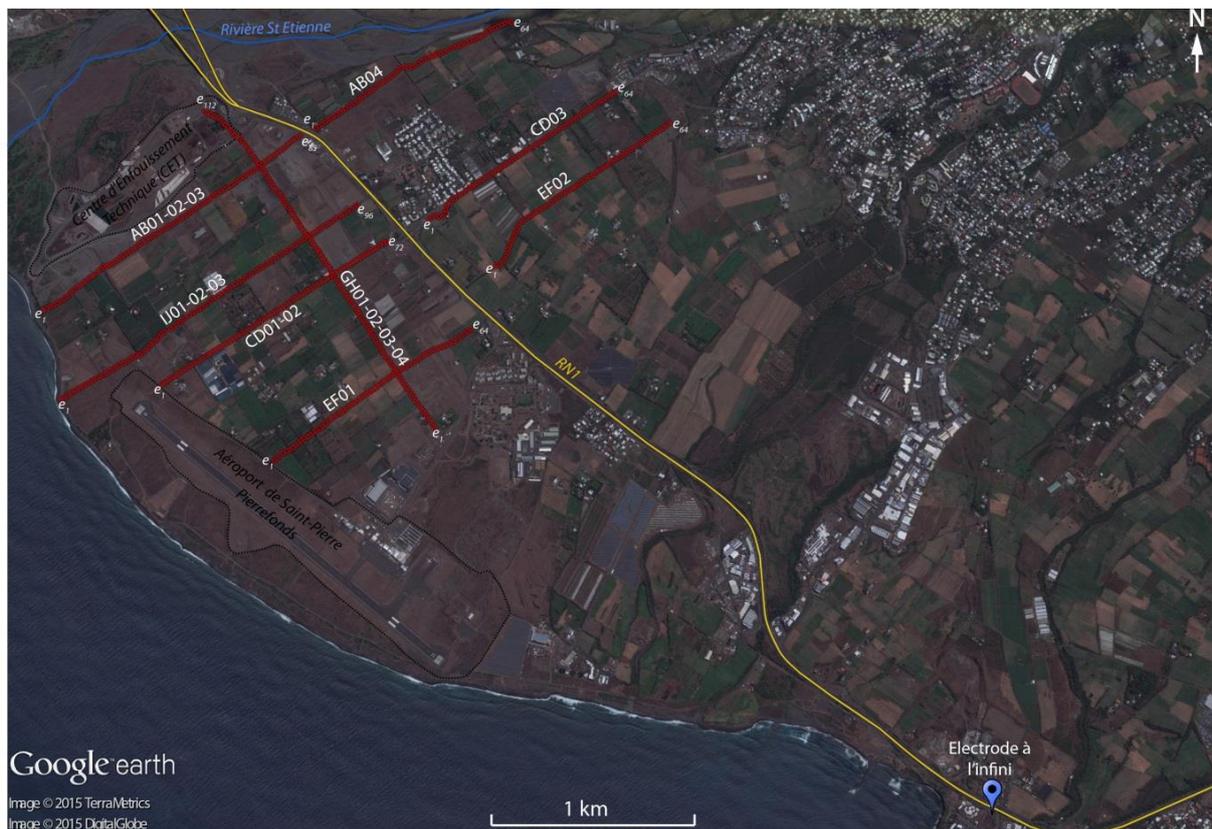


Figure 3.12 : Localisation des profils électriques à Pierrefonds (Chaput et al. 2015).

Parmi ces profils, 7 sont perpendiculaires au trait de côte. Deux dispositifs d'acquisition sont mis en œuvre : le Wenner alpha et le pôle-dipôle. Le dispositif pôle-dipôle a permis d'atteindre une profondeur d'investigation de 400 m, soit 200 m de plus que pour la méthode hélicoptérée.

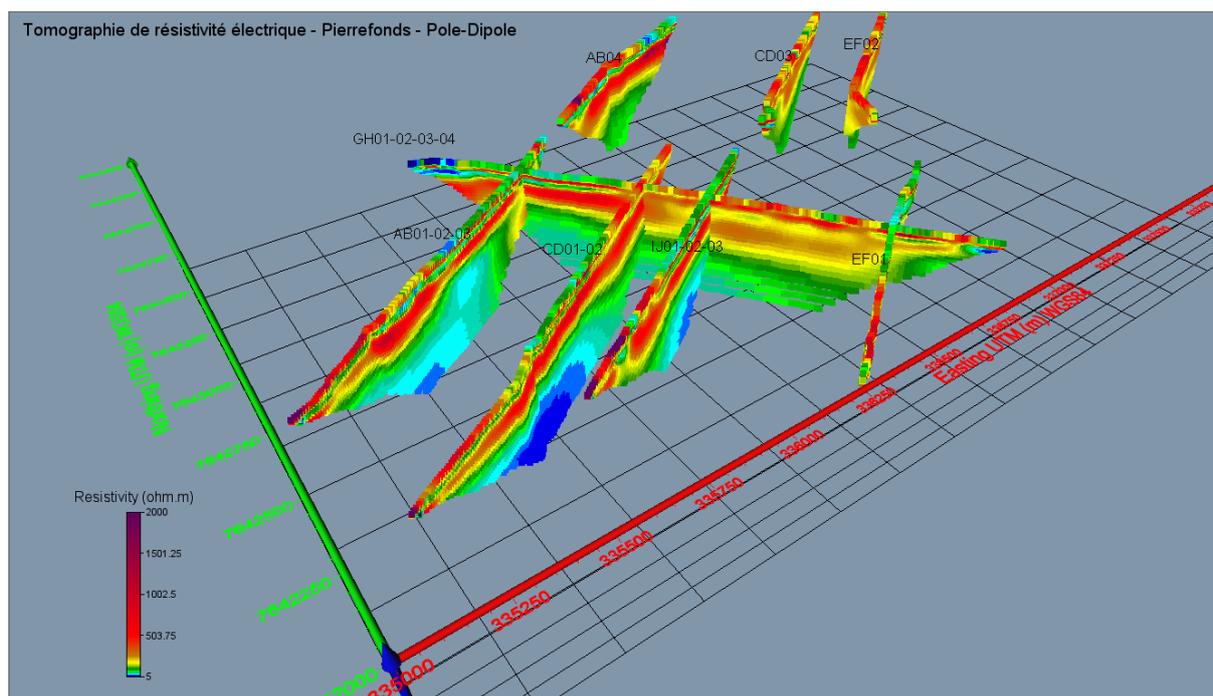


Figure 3.13 : Représentation tridimensionnelle des profils électriques réalisés sur le secteur de Pierrefonds (Chaput et al. 2015).

Ces nouvelles données sont fondamentales pour la phase de modélisation, afin d’avoir des informations de calage de l’interface eau douce / eau salée. En effet, hormis le piézomètre P11 Syndicat, aucun forage ne recoupe le biseau salé sur ce secteur.

3.2.8 Synthèse générale et discussion des données géophysiques

Le secteur de Pierrefonds et ses alentours ont fait l’objet de 9 études géophysiques de plus ou moins grande ampleur. Les méthodes employées sont :

- Le sondage électrique unidimensionnel
- Le sondage audio-magnétotellurique (AMT)
- La tomographie de résistivité électrique (ERT)
- L’acquisition électromagnétique héliportée (AEM)

Les résultats obtenus lors des différentes campagnes géophysiques démontrent les performances des méthodes électriques pour l’imagerie du sous-sol sur le secteur de Pierrefonds. Elles permettent de caractériser (i) la géométrie du biseau salé en bordure littorale, et (ii) la morphologie du mur de l’aquifère sur le secteur d’étude.

Les données historiques couvrent l’ensemble du secteur de Pierrefonds. Les profondeurs d’investigation auparavant inférieures à 250 mètres sont ramenées à 400 m grâce à la tomographie électrique en dispositif pôle-dipôle. Enfin, la densité des points de mesure sur l’ensemble du secteur d’étude a été considérablement améliorée grâce aux acquisitions héliportées. Ces données sont indispensables au regard de la résolution nécessaire pour la construction d’un modèle hydrogéologique.

Le Tableau ci-dessous synthétise l'ensemble des études réalisées.

Date	Secteur	Méthode	Type de dispositif	Nombre points de mesure	Profondeur moyenne d'investigation (m)	Référence
1984	Pierrefonds	Sondage électrique (SE)	Schlumberger	87	250	(Dubreuil 1984b)
1987	Pierrefonds	SE	Schlumberger	10	250	(Daesslé and Gandolfi 1987b)
1988	Pierrefonds	SE	Schlumberger	11	250	(Daesslé and Verdier 1988)
1988	Nord de Pierrefonds	Réinterprétation de l'existant				(Verdier and Stieltjes 1988)
1988	Saint-Pierre	SE	Schlumberger	70	250	(Join et al. 1988)
1989	Saint-Pierre	AMT	-	21	> 600	(Duchamps and Daesslé 1989)
2008	Pierrefonds	Tomographie 2D / 3D	Dipôle-Dipôle	78	400	(Girard et al. 2008)
2014	La Réunion entière	Acquisition TDEM hélicoptée	-	-	200	BRGM, 2014
2015	Pierrefonds	Tomographie électrique 2D	Wenner alpha et pôle-dipôle	8 profils	400	Chaput et al. 2015

Tableau 3.2 : Synthèse des études géophysiques sur le secteur de Pierrefonds.

En termes de résultats, un horizon conducteur (80-100 ohm.m) est fréquemment mis en évidence en base de profil, entre 100 et 200 mètres de profondeur sous 0 m NGR. Il est interprété comme des formations peu perméables, correspondant à des coulées altérées.

Il est surmonté par des horizons plus résistants (150-600 ohm.m) dont l'épaisseur varie en fonction des secteurs, pouvant atteindre localement plus de 200 m. Ces formations sont assimilées au réservoir aquifère, constitué de coulées peu altérées et d'alluvions.

Plusieurs cartes de profondeur du toit du substratum conducteur ont été construites, montrant des zones de surcreusement marquées, interprétées comme des paléo-vallées incisant les coulées altérées. Plusieurs forages ont permis de valider ces interprétations. Les différents auteurs attribuent un rôle majeur à ces paléo-vallées dans le fonctionnement hydrogéologique du secteur de Pierrefonds, avec des écoulements préférentiels selon les axes de surcreusement.

Les compléments d'investigations réalisés en 1987 (Daesslé and Gandolfi 1987b) ont permis d'identifier la profondeur de l'interface eau douce / eau salée à 200 mètres de profondeur à environ 1000 mètres de la côte (secteur de Pierrefonds Littoral).

Les cartes de résistivités électriques fournies par la méthode hélicoptée montrent une présence d'eau douce au nord-ouest de Pierrefonds et une présence d'eau saumâtre au sud-est. Cette observation s'explique par l'effet combiné d'une recharge d'eau douce en provenance de la rive gauche de la Rivière Saint-Etienne et d'un milieu moins perméable favorisant des charges hydrauliques plus importantes dans le secteur nord-ouest. La présence de formations plus perméables au sud-est explique l'extension de l'intrusion saline. En zone côtière, la tomographie électrique profonde confirme la dissymétrie de

l'intrusion saline révélée par la géophysique héliportée, avec un impact plus marqué dans la zone sud-est de Pierrefonds.

En somme, l'interface eau douce /eau salée est clairement mise en évidence par investigation géophysique avec des résistivités comprises en 10 et 100 ohm.m.

Par ailleurs, les acquisitions géophysiques montrent que cette interface est plus avancée dans les terres au sud-est qu'au nord-ouest.

Enfin, il est important de souligner que les résistivités des terrains saturés d'eau saumâtre sont très proches de celles du toit du substratum conducteur. De cette façon, il est parfois complexe d'estimer la continuité de ces deux interfaces dans les zones où celles-ci convergent.

3.3 Approches hydrodynamiques

3.3.1 Analyse préliminaire des chroniques piézométriques, pluviométriques et marégraphiques

a. Origine des séries temporelles

Les données piézométriques utilisées pour cette analyse proviennent de 10 piézomètres côtiers de la nappe de Pierrefonds, situés à une distance comprise entre 400 et 2400 m de la côte. Les mesures sont réalisées à l'aide de sondes immergées suivant un pas de temps de 12 mn (30 mn pour le piézomètre de la Ravine Blanche).

code OLE	nom du site	Distance à la côte [m]	Fréquence [mn]	Début	Longueur
38063	PIB7 Pierrefonds village	2400	12	24/07/2013	2 ans
38065	F15 La Vallée Pierrefonds	1340	12	09/07/2013	2 ans
38067	F12 Aéroport Pierrefonds	490	12	10/07/2013	2 ans
38070	F10 La Vallée Ravine des Cabris	1490	12	09/07/2013	2 ans
38071	F7 Pierrefonds 3	1500	12	09/07/2013	2 ans
38077	P12 Aéroport Ch. des Pêcheurs	900	12	10/07/2013	2 ans
38078	P11 Syndicat (aval) / Pierrefonds	520	12	24/10/2001	14 ans
38087	Dupuis N°3	2150	12	10/07/2013	2 ans
38089	Ravine Blanche	1570	30	19/09/2001	14 ans
38217	S2 Caserne Pierrefonds	1650	12	24/07/2013	2 ans

Tableau 3.3 : les ouvrages sélectionnés pour le traitement du signal piézométrique

Les données marégraphiques proviennent de la station marégraphique installée au port de Saint-Pierre. Les données pluviométriques sont fournies par 7 stations météorologiques situées au droit et en amont de la zone d'étude (Figure 3.14).

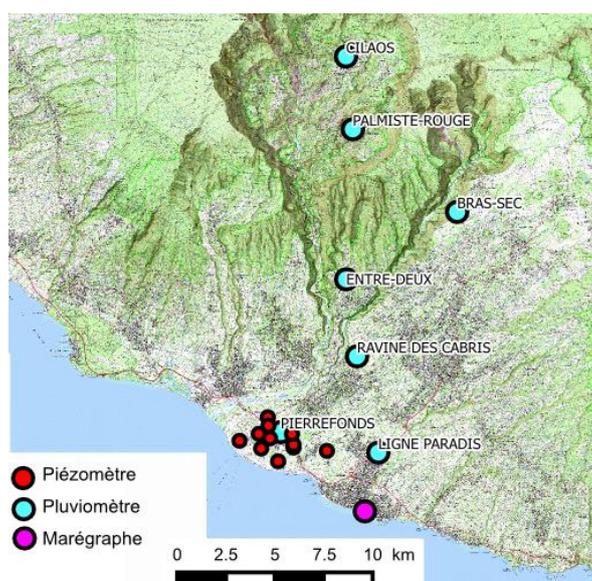


Figure 3.14 : Localisation des points de mesures sur le secteur de Pierrefonds.

b. Observation des chroniques piézométriques

Cette analyse concerne une comparaison entre les données issues des piézomètres de la nappe de Pierrefonds cités plus haut et celles enregistrées au niveau de deux piézomètres (38046 PIB1 et 38047 PIB2) de la nappe des Cocos, située en rive droite de la Rivière Saint-Etienne (Figure 3.15). L'ensemble de ces ouvrages appartient au réseau de suivi des intrusions salines [RIS] déployé à l'échelle de l'île par l'Office de l'eau.

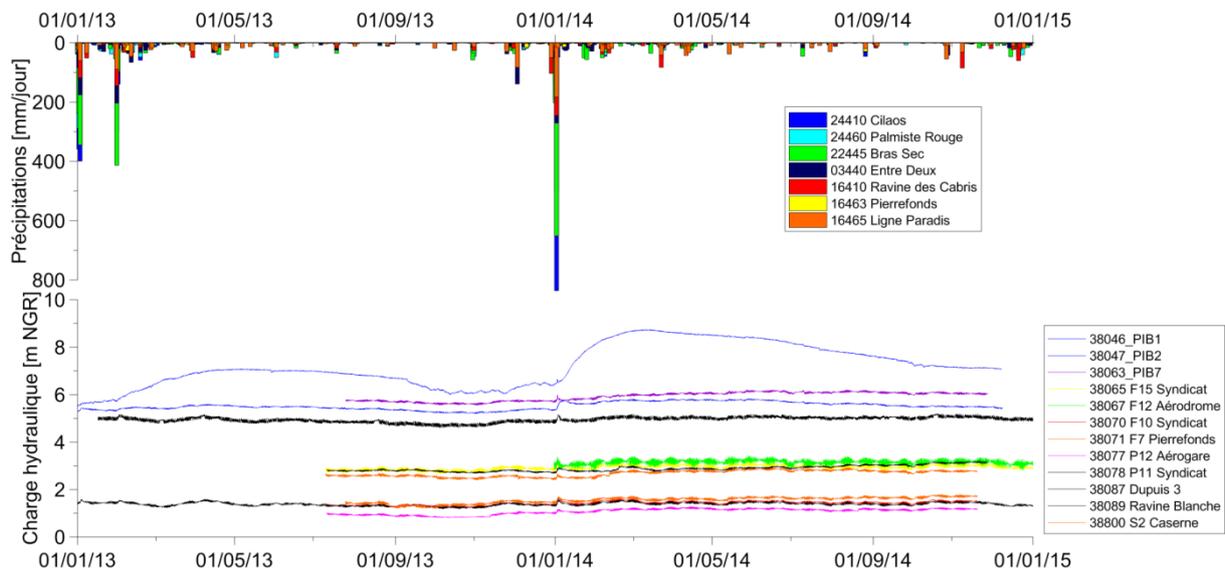


Figure 3.15 : Chroniques piézométriques enregistrées sur le secteur de Pierrefonds

Une observation préalable des chroniques recueillies a permis de distinguer les comportements piézométriques de la nappe des Cocos de ceux de la nappe de Pierrefonds. La première affiche une forte réactivité vis-à-vis des périodes de recharge. Ce comportement visible surtout sur l'ouvrage 38046 PIB1 peut être expliqué par la présence de la paléo-vallée des Makes qui constitue un chenal d'écoulement souterrain privilégié dans ce secteur. A l'inverse, les ouvrages de la nappe de Pierrefonds montrent un impact moins marqué des épisodes de recharge, les variations observées étant de l'ordre du décimètre. D'un point de vue piézométrique, la nappe des Cocos semble avoir un comportement très différent de celle de Pierrefonds, avec des montées en charge plus marquées. La suite de l'analyse se focalise donc sur les piézomètres de la nappe de Pierrefonds qui est concernée par le travail de modélisation.

c. Description détaillée des signaux piézométriques et comparaison avec le signal marégraphique

La comparaison entre les signaux piézométriques et le signal pluviométrique d'une part et le signal marégraphique d'autre part permet de distinguer grossièrement deux types de comportements piézométriques : les forages notablement influencés par la recharge et les forages majoritairement contrôlés par le signal marégraphique.

Un comportement hybride recharge/marée peut aussi être observé, notamment sur les ouvrages 38065, 38070 et 38078 (Figure 3.16).

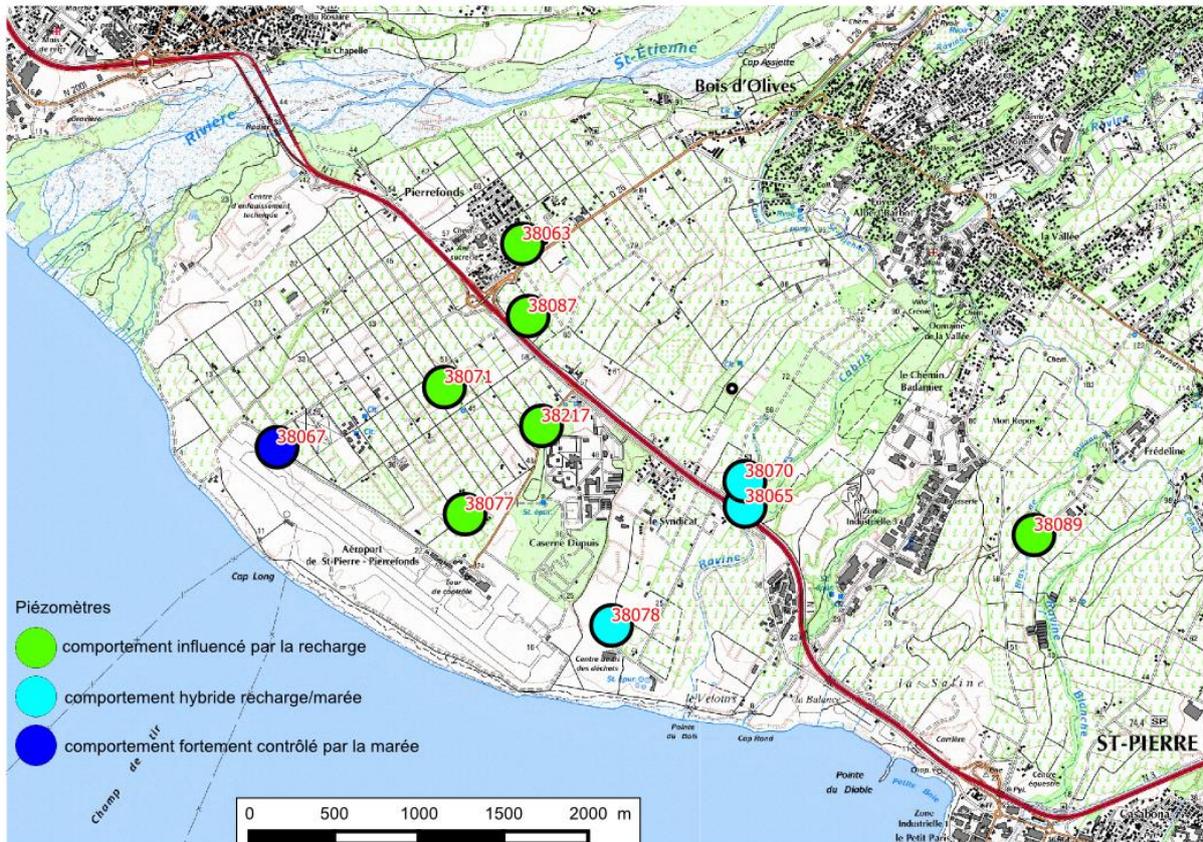


Figure 3.16 : Discrimination des comportements piézométriques observés dans les piézomètres de Pierrefonds

i. Les forages influencés par la recharge

Ce premier groupe de forages se caractérise par des pics de piézométrie (de 20 à 30 cm) liés à une infiltration rapide, suivi d'une remontée lente associée à une recharge retardée de 5 à 6 mois. L'impact de la marée reste cependant observable avec des fluctuations piézométriques décimétriques (10 à 20 cm) en période de vives eaux (VE)⁸.

L'impact de la marée sur la piézométrie est observé sur trois échelles temporelles :

- des variations journalières en relation avec le cycle diurne de la marée (24h)
- des variations mensuelles en relation avec le cycle lunaire (28 jours)
- et enfin, dans une moindre mesure, une variation annuelle en relation notamment avec l'évolution du niveau moyen de la mer. Cette variation est masquée sur les ouvrages fortement influencés par le signal de recharge.

Les ouvrages appartenant à ce premier groupe se trouvent dans la zone centrale de la plaine de Pierrefonds et dans la Ravine Blanche. Il s'agit des forages 38063, 38087, 38071, 38077, 38217 et 38089. Les figures suivantes illustrent les observations faites sur les chroniques enregistrées au droit de ces différents ouvrages.

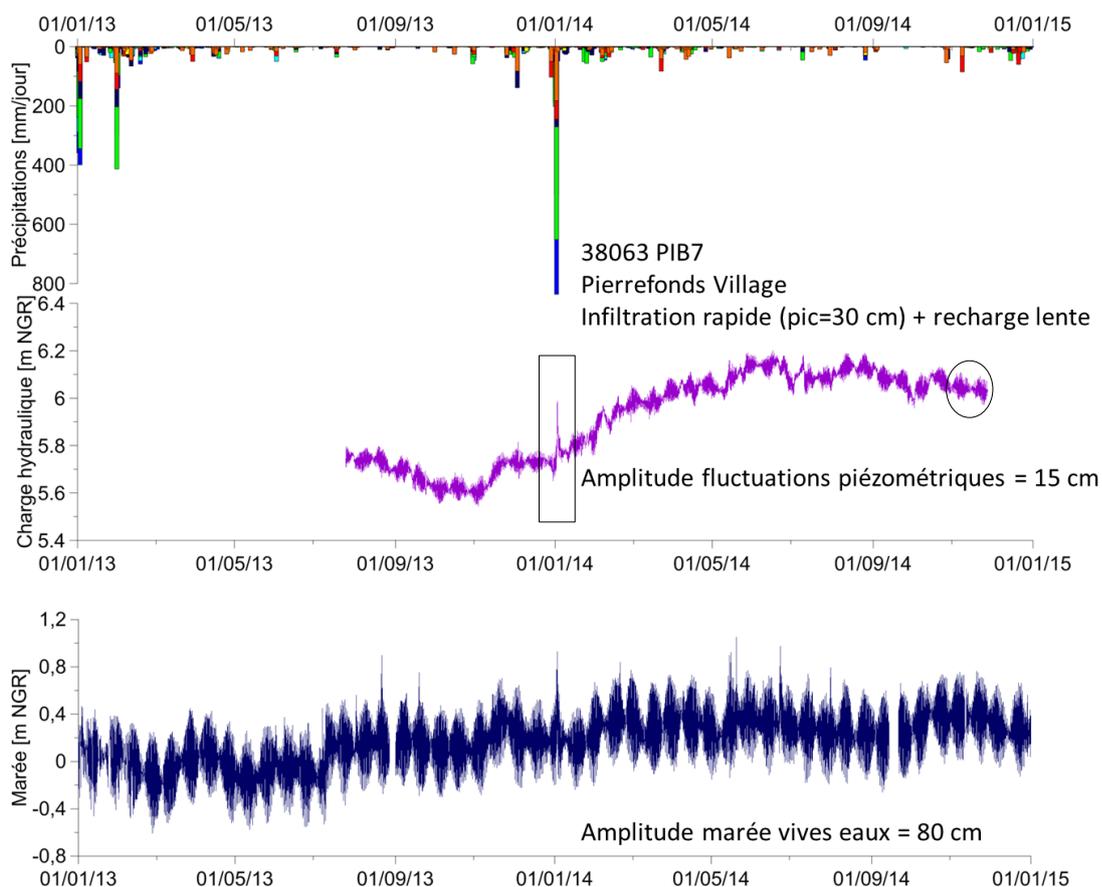


Figure 3.17 : Description du comportement piézométrique observé sur 38063

⁸ La marée est dite de vives eaux (VE) lorsque le marnage passe à un maximum. Les plus fortes amplitudes marégraphiques sont observées pendant cette période. Cette période correspond aux phases de nouvelle lune et de pleine lune appelées **syzygies**. Elle s'explique par les effets conjugués de la Lune et du Soleil.

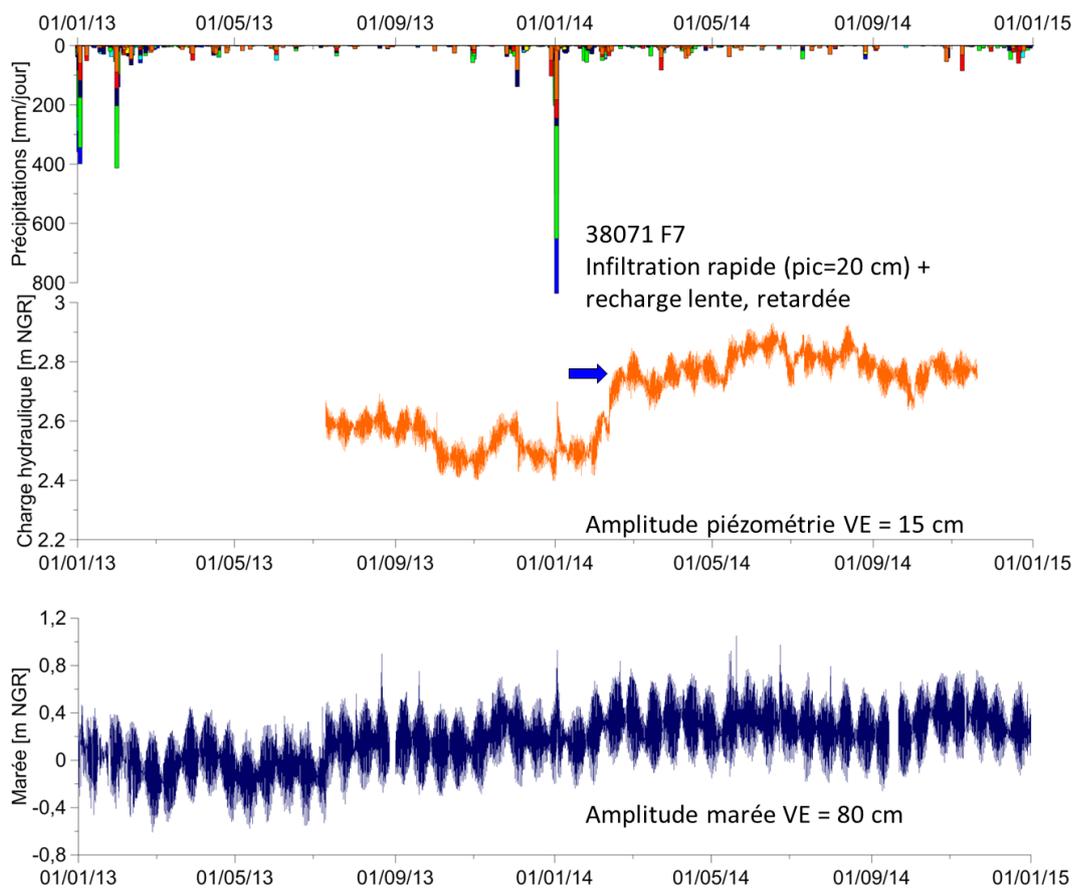


Figure 3.18 : Description du comportement piézométrique observé sur 38071

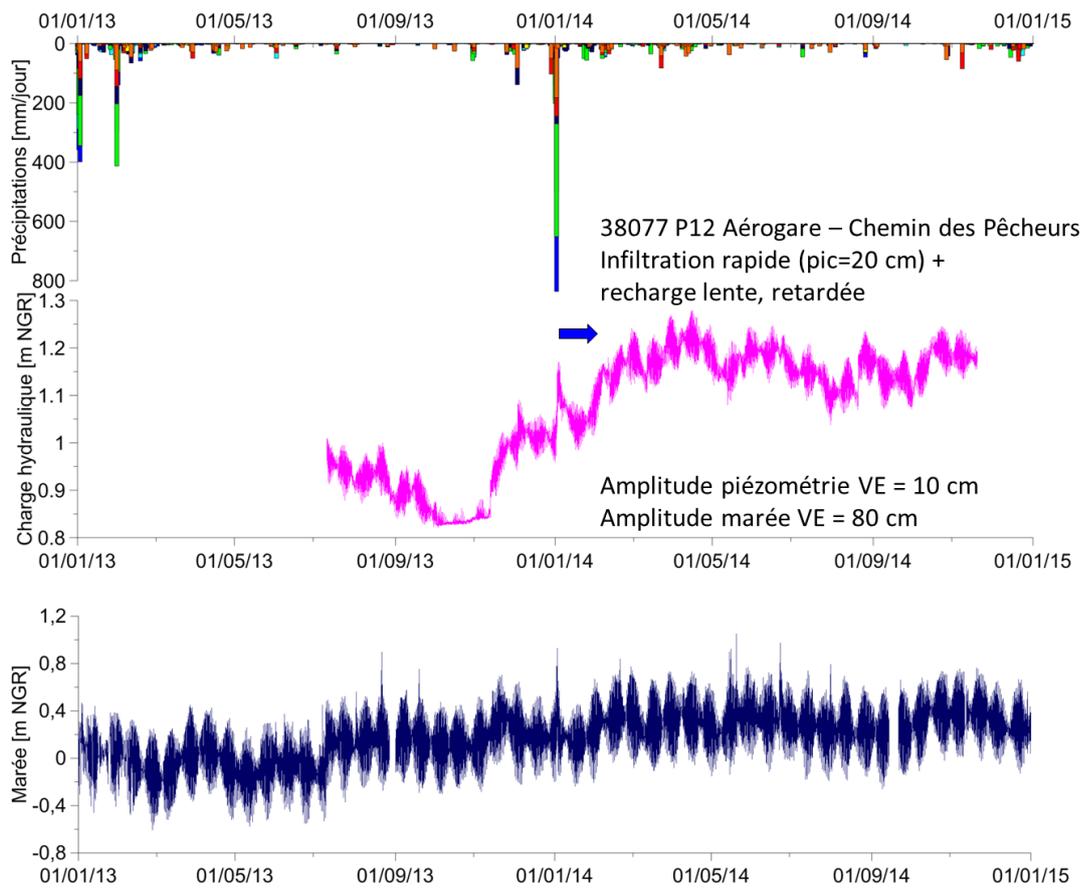


Figure 3.19 : Description du comportement piézométrique observé sur 38077

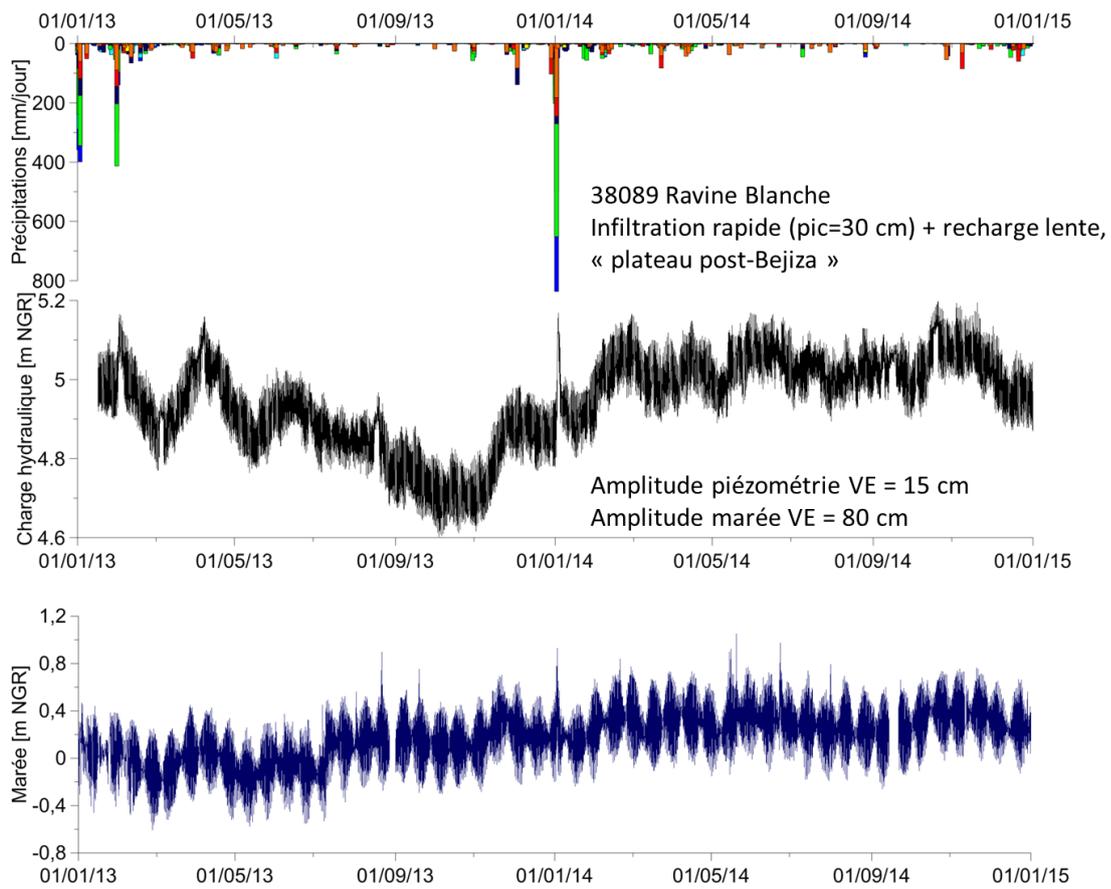


Figure 3.20 : Description du comportement piézométrique observé sur 38089

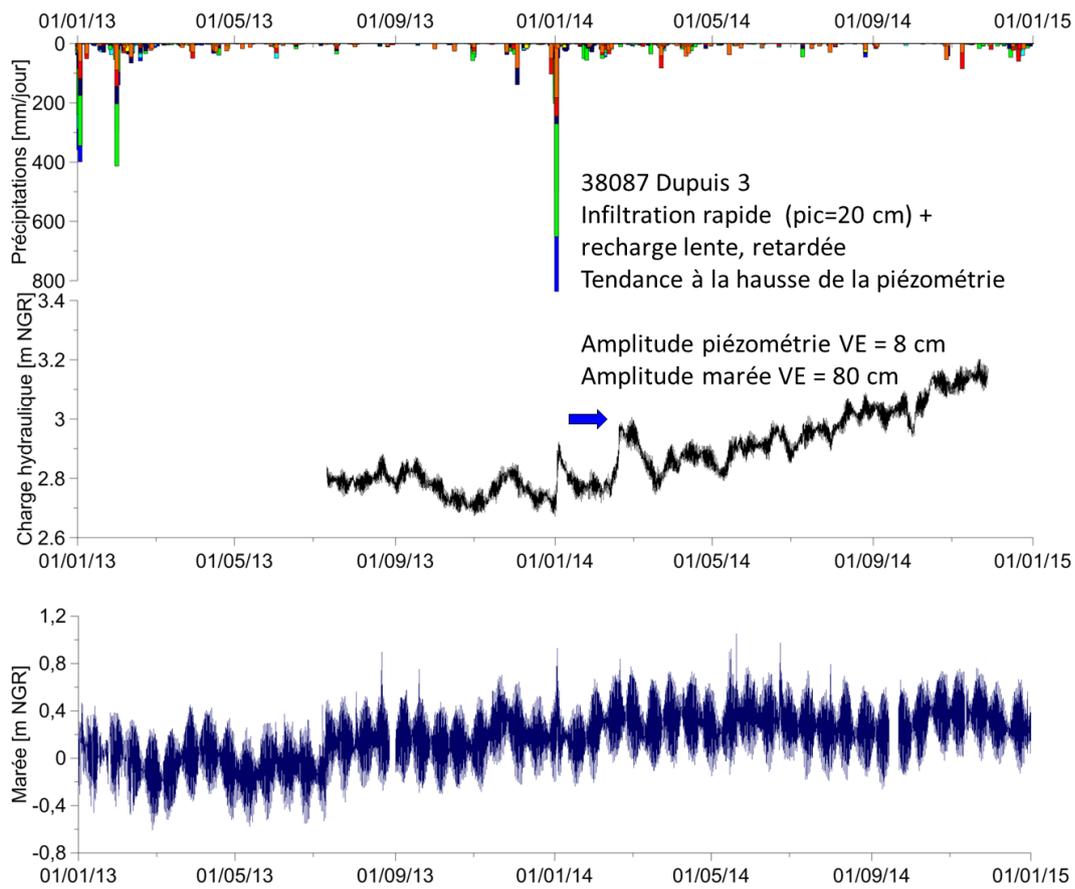


Figure 3.21 : Description du comportement piézométrique observé sur 38087

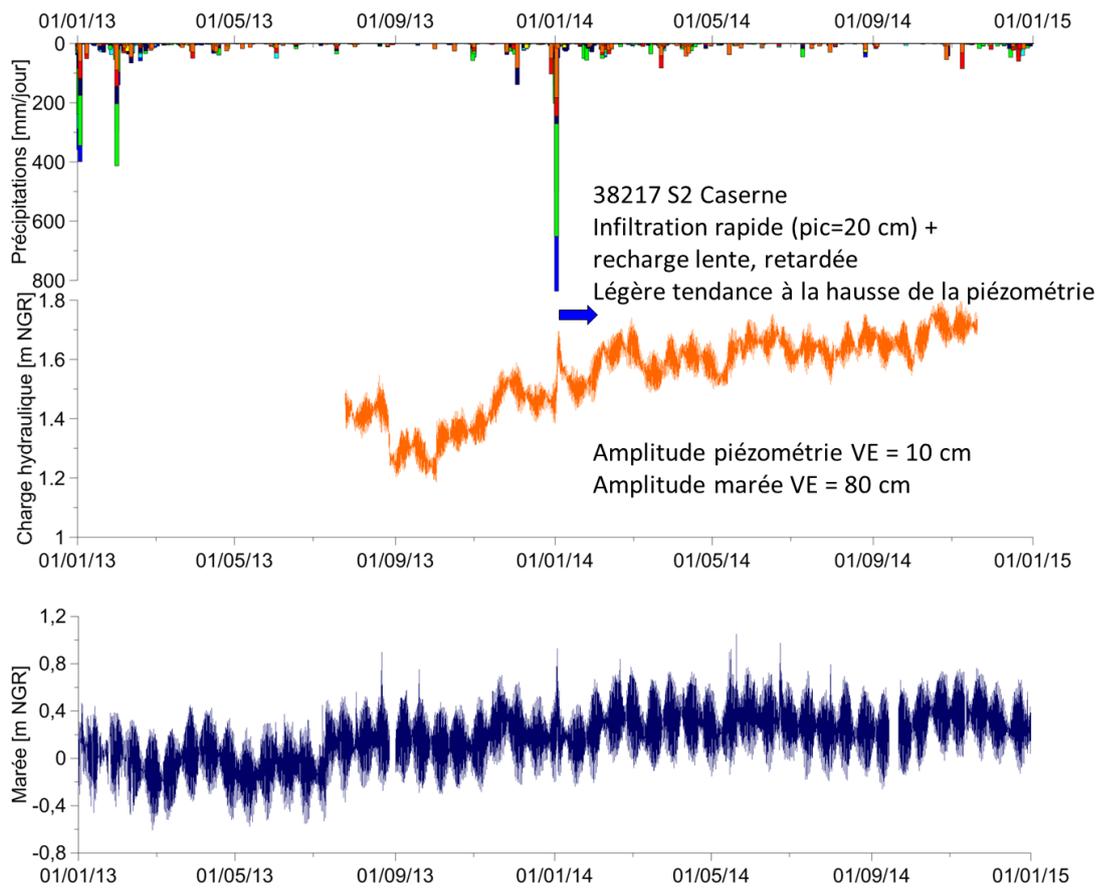


Figure 3.22 : Description du comportement piézométrique observé sur 38217

ii. Les forages à comportement hybride recharge/marée

Les forages appartenant à ce deuxième groupe semblent moins impactés par les épisodes de recharge mais affichent une influence plus évidente du signal marin. Sur ces ouvrages, la courbe de recharge lente caractéristique des forages présentés plus haut n'est pas observée. Leur comportement piézométrique est davantage soumis aux fluctuations marégraphiques, à une fréquence journalière (24h) et mensuelle (28 jours).

L'amplitude des fluctuations piézométriques varie d'une dizaine à une trentaine de centimètres en période de vives eaux. Ce groupe est constitué par les ouvrages 38065, 38070, 38078 et 38067. Les figures ci-dessous illustrent les observations réalisées sur les chroniques piézométriques associées.

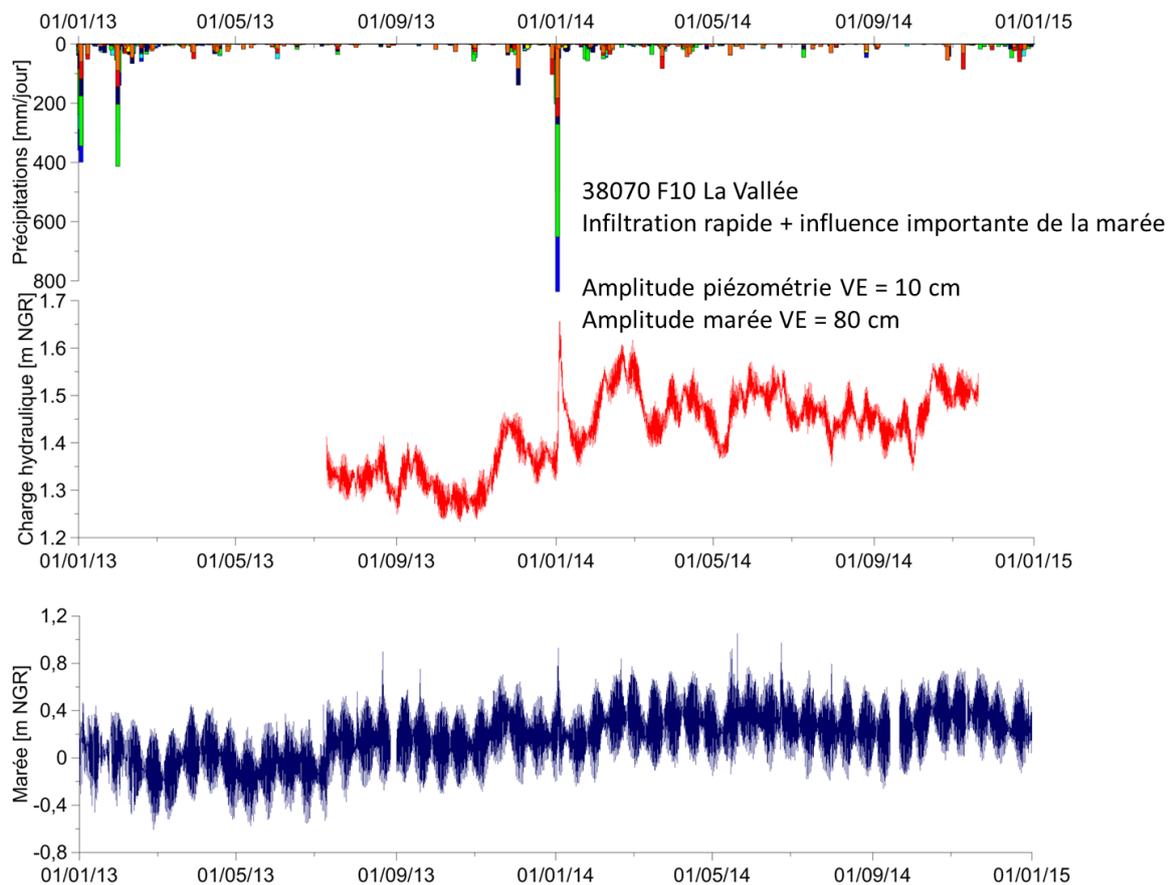


Figure 3.23 : Description du comportement piézométrique observé sur 38070

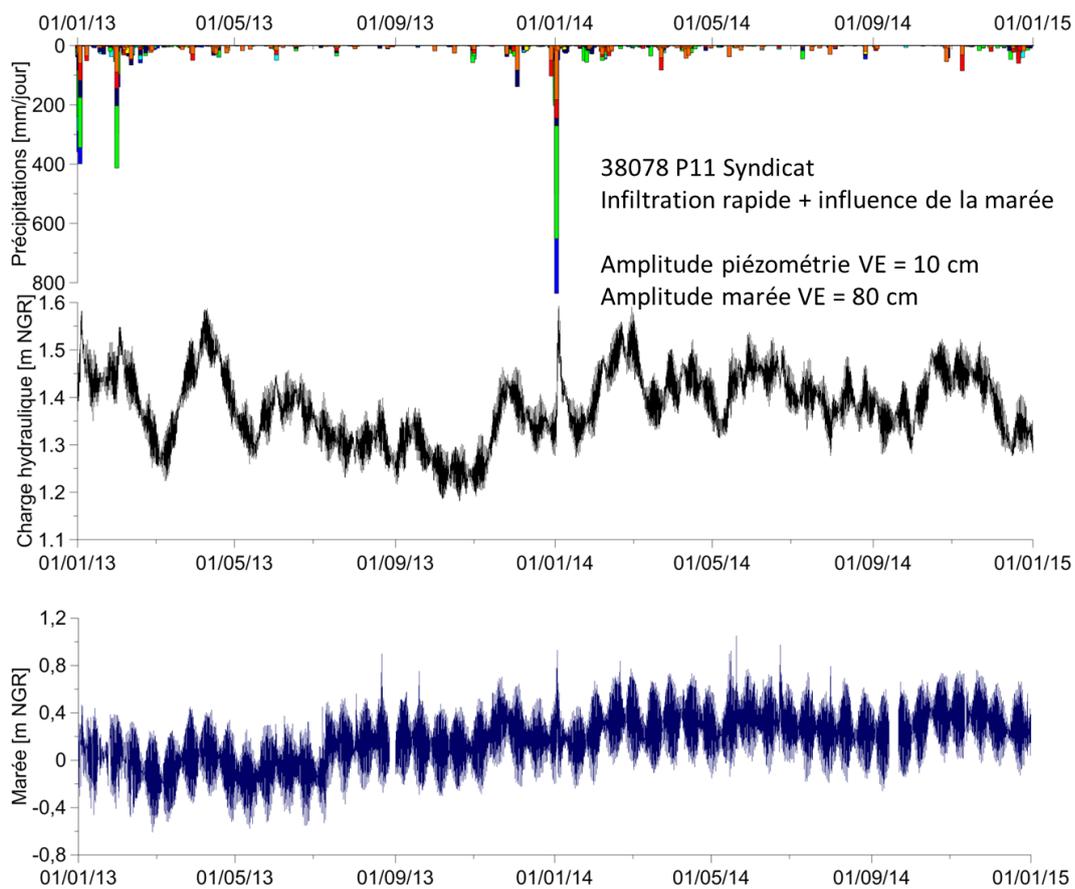


Figure 3.24 : Description du comportement piézométrique observé sur 38078

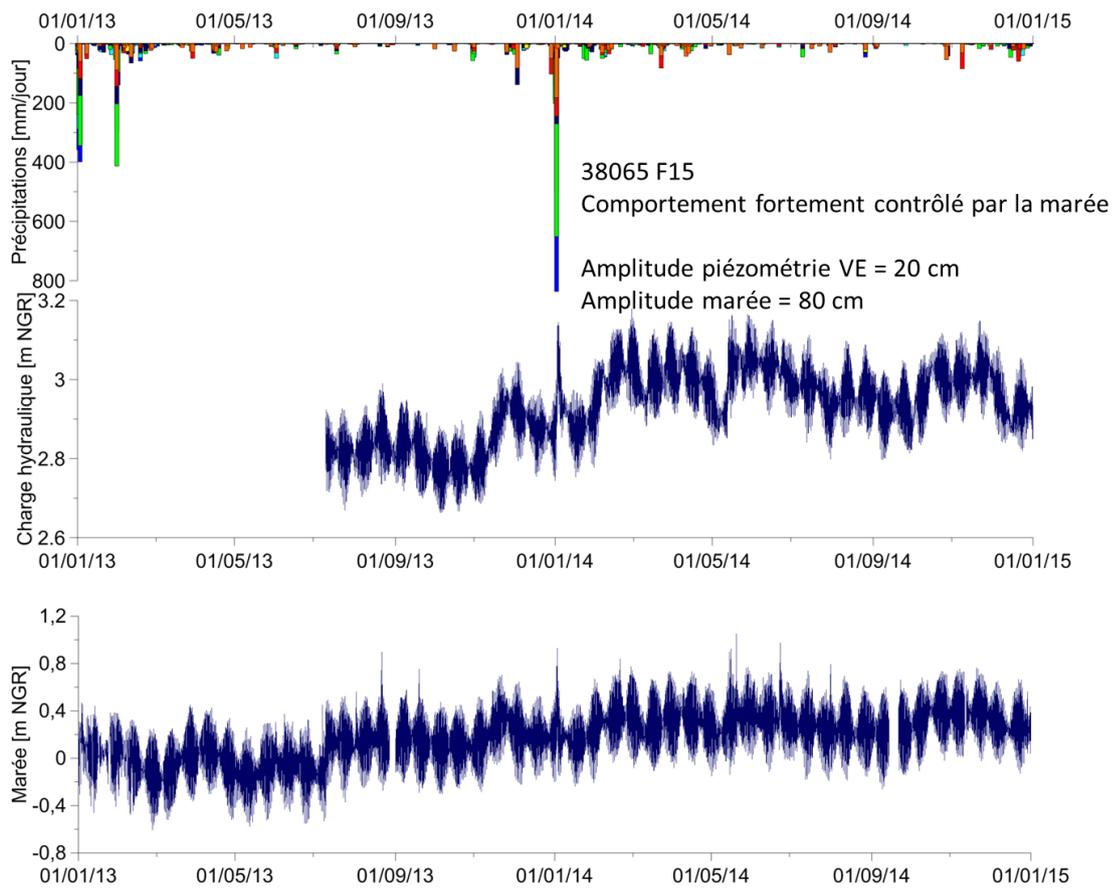


Figure 3.25 : Description du comportement piézométrique observé sur 38065

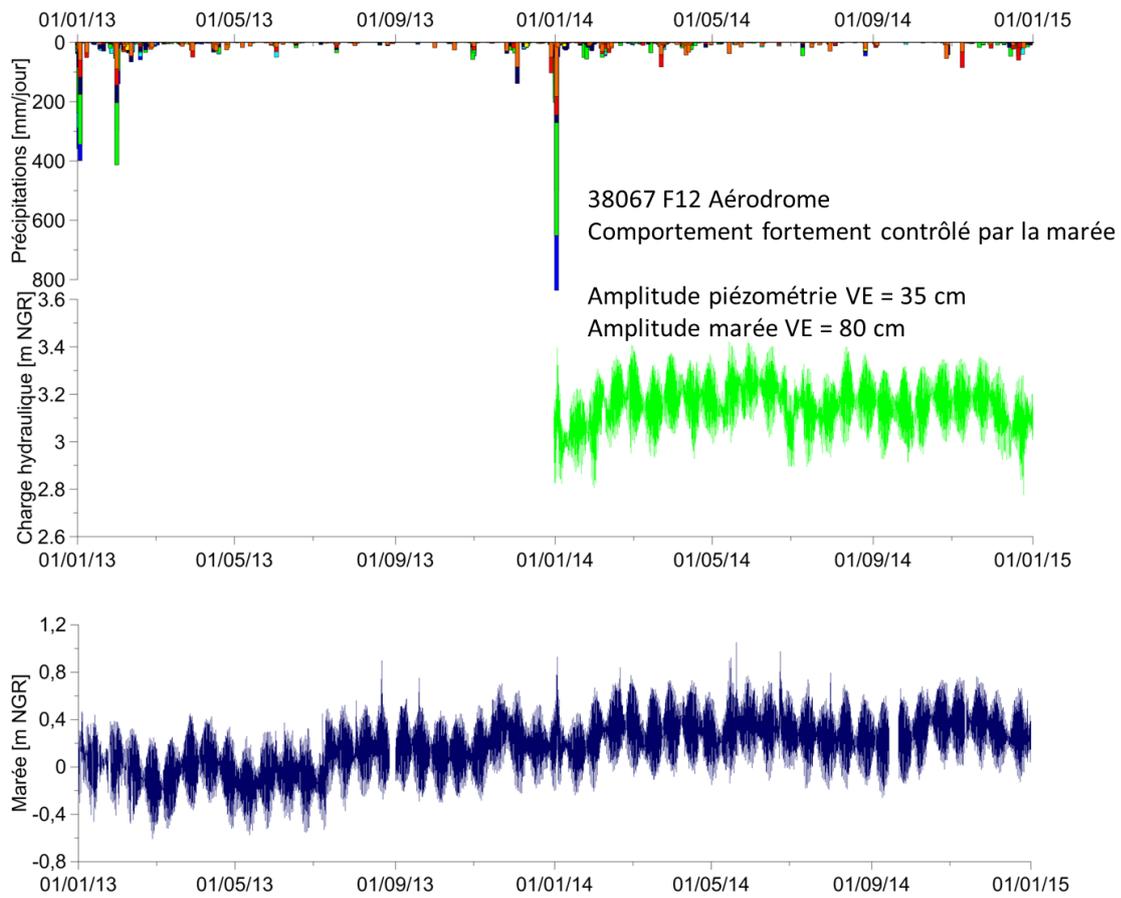


Figure 3.26 : Description du comportement piézométrique observé sur 38067

3.3.2 Décomposition des signaux piézométriques

Afin de caractériser l'influence relative des facteurs externes contrôlant le comportement piézométrique des forages de la nappe côtière de Pierrefonds, une analyse harmonique des signaux enregistrés a été envisagée. Le principe de l'analyse harmonique d'une série temporelle consiste à décomposer le signal piézométrique brut en plusieurs « harmoniques », qui sont des sinusoïdes simples. Les harmoniques identifiées ici correspondent aux composantes théoriques de la marée. Ces composantes sont uniquement expliquées par l'influence des paramètres astronomiques liés notamment à la rotation de la Lune autour de la Terre et de la Terre autour du Soleil. Dans la pratique, ce type d'analyse est fréquemment appliqué à des chroniques marégraphiques. Plus récemment, l'analyse harmonique a été souvent sollicitée pour le traitement des signaux hydrogéologiques périodiques (Cordier et al. 2013; Sanchez-Ubeda et al. 2014).

Ce travail peut être réalisé de façon routinière grâce à l'exécution d'un script d'analyse fréquentielle du signal appelé T-Tide (Pawlowicz et al. 2002). Le code numérique est implémenté dans le logiciel MatLab (Mathworks). Le script est constitué d'une suite de commandes Matlab qui font appel à un package contenant tous les fichiers nécessaires à l'analyse harmonique, notamment les fréquences des composantes théoriques de la marée globale essentiellement liées aux paramètres astronomiques.

Comme données d'entrée, le script appelle les chroniques observées suivant un pas de temps régulier, la date de la première mesure et les coordonnées géographiques du point d'observation. En sortie, T-Tide fournit une liste des composantes théoriques de la marée identifiées sur le signal brut en les classant selon leurs fréquences (h^{-1}), leurs amplitudes (m), leurs phases ($^{\circ}$) et le rapport signal/bruit associé. Enfin, le script permet de générer un graphique montrant le signal brut utilisé pour l'analyse et le signal théorique modélisé constitué uniquement des composantes marégraphiques reconnues dans le signal brut. La différence entre ces deux signaux permet d'afficher le signal résiduel qui serait alors expliquée par d'autres phénomènes externes à la marée tels que la houle ou certains effets liés à la présence d'un récif, d'une baie, d'un aménagement portuaire ou d'une morphologie particulière du littoral. Dans le cas d'une chronique piézométrique, ce signal résiduel correspond souvent à la recharge et aux prélèvements (Figure 3.27).

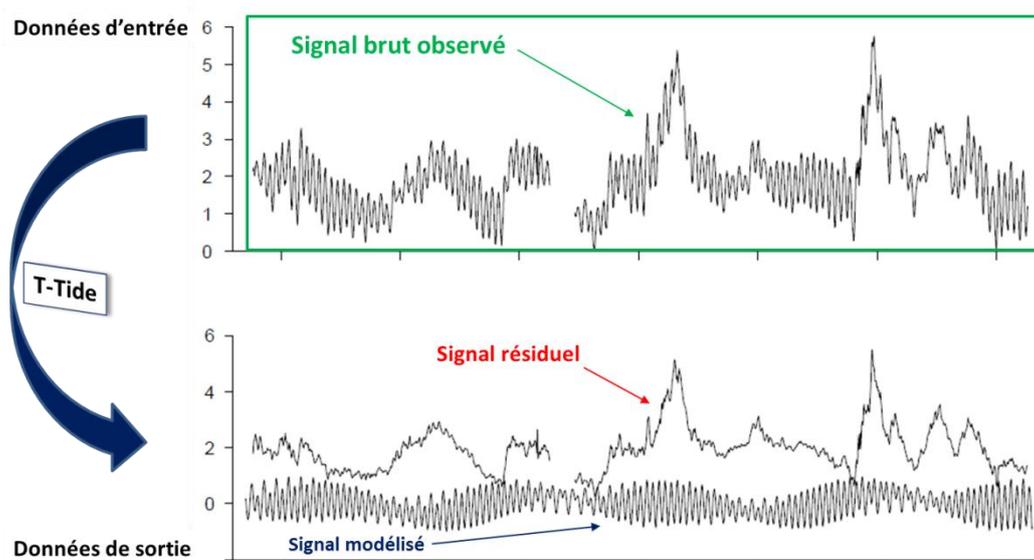


Figure 3.27 : Description simplifiée de l'approche méthodologique employée

a. Corrélation entre le signal théorique et le signal observé

L'application d'une analyse harmonique sur les signaux piézométriques de la nappe de Pierrefonds permet de rechercher dans le signal brut enregistré au niveau du forage les différentes composantes théoriques de la marée, chaque composante étant caractérisée par une fréquence. Une chronique supérieure à l'année est indispensable pour identifier les 68 composantes de période infra-annuelle. L'analyse fournit alors un coefficient de corrélation qui exprime la part des variations observées à l'échelle du forage pouvant être expliquée uniquement par les variations marégraphiques théoriques.

Un premier test est d'abord réalisé sur le signal marégraphique enregistré au port de Saint-Pierre. Un coefficient de corrélation de 83% est obtenu entre le signal observé et le signal modélisé (Figure 3.28). A titre de comparaison, le signal enregistré au Port Ouest, à la Pointe des Galets comporte un coefficient de corrélation de 89% avec les composantes théoriques de la marée (Lézé 2012).

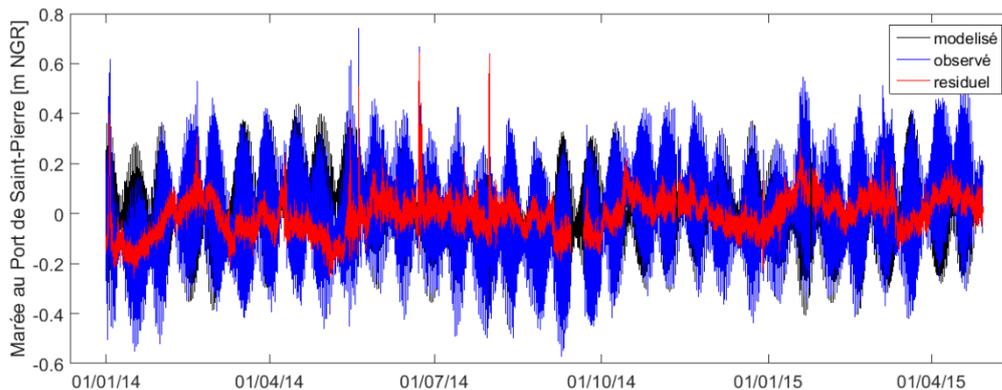


Figure 3.28 : Filtration du signal marégraphique au port de Saint-Pierre

Le signal résiduel obtenu ici reste relativement faible (17%) et ne peut être expliqué que par des phénomènes océaniques complexes qui ne sont pas directement contrôlés par les paramètres astronomiques. Ces phénomènes ne sont pas modélisés (houle, vent...).

Le script génère également une liste des composantes théoriques de la marée identifiées dans le signal marégraphique brut. Les informations relatives à la fréquence des composantes, leur amplitude et leur phase. L'influence relative de chaque composante sur la marée globale observée est quantifiée grâce aux rapports signal/bruit associés.

Les composantes théoriques comportant un rapport signal/bruit supérieur à 100 seront arbitrairement considérées comme significatives. Ce seuil permet de retenir uniquement les composantes qui impactent le plus le signal marégraphique pour la suite du traitement.

Il apparaît que les constituants qui impactent le plus le signal marégraphique au port de Saint-Pierre sont les composantes semi-diurnes M2 et S2, la composante diurne K1 et la composante annuelle SA.

Le tableau suivant présente les caractéristiques des composantes significatives retenues pour le signal marégraphique du port de Saint-Pierre.

Tableau 3.4 : Les composantes significatives de la marée au port de Saint-Pierre

Composante	Fréquence [h ⁻¹]	Amplitude [m]	Erreur sur l'amplitude [m]	Phase [°]	Erreur sur la Phase [°]	Rapport signal/bruit	Période [h]
*M2	0,08	0,1505	0,001	244	0,35	2,80E+04	12,42
*S2	0,08	0,1076	0,001	265	0,44	1,50E+04	12,00
*K1	0,04	0,0519	0,001	91	1,04	3,80E+03	23,93
*SA	0,00	0,0387	0,001	352	1,39	1,80E+03	8764,24
*K2	0,08	0,0391	0,001	240	1,3	1,60E+03	11,97
*N2	0,08	0,0334	0,001	257	1,43	1,50E+03	12,66
*GAM2	0,08	0,0291	0,001	360	1,65	1,50E+03	12,45
*H1	0,08	0,0329	0,001	342	1,47	1,20E+03	12,44
*O1	0,04	0,0291	0,001	55	1,81	1,10E+03	25,82
*H2	0,08	0,0242	0,001	8,83	2,07	9,10E+02	12,40
*P1	0,04	0,0189	0,001	68,58	2,86	5,10E+02	24,07
*T2	0,08	0,0209	0,001	225,29	2,34	4,90E+02	12,02
*MKS2	0,08	0,02	0,001	147,36	2,7	4,70E+02	12,39
*R2	0,08	0,0143	0,001	228,87	2,6	4,30E+02	11,98
*MF	0,00	0,0117	0,001	343,05	4,89	1,80E+02	327,86
*SSA	0,00	0,0106	0,001	54,82	4,4	1,60E+02	4382,12
*MM	0,00	0,0092	0,001	34,32	5,07	1,40E+02	661,29

Le rapport de 83% obtenu entre le signal modélisé et le signal observé reste satisfaisant. Le signal résiduel de 17% est expliqué par d'autres phénomènes qui ne sont pas pris en compte par l'outil d'analyse T-Tide. La présence de ce signal résiduel peut expliquer en partie les mauvaises corrélations calculées sur les piézomètres de Pierrefonds, étant donné que c'est le signal enregistré au port de Saint-Pierre qui contrôle en grande partie les signaux piézométriques observés.

Une analyse identique est alors appliquée aux signaux piézométriques enregistrés sur les piézomètres de Pierrefonds. La qualité du rapport entre le signal modélisé et le signal observé va dépendre i) de la diffusivité hydraulique [D] de l'aquifère, ii) de son degré de confinement pouvant être exprimé par son coefficient d'emmagasinement [S] et enfin ii) de la présence ou non d'un bruit de fonds créé par d'autres phénomènes plus ou moins périodiques, naturels ou anthropiques, susceptibles de contrôler les fluctuations piézométriques, notamment la houle, la recharge lente, les infiltrations rapides, le retour de l'eau d'irrigation ou même les pompes.

L'impact des composantes marégraphiques théoriques observé sur les ouvrages de Pierrefonds reste assez limité. Mis à part le piézomètre 38067 F12 Aéroport qui affiche une très bonne corrélation (75%), la grande majorité des forages indique un coefficient de corrélation inférieur à 50%. Ce résultat sur le piézomètre 38067 peut s'expliquer par un coefficient d'emmagasinement plus faible ($2 \cdot 10^{-4}$ mesuré sur le forage AEP 38068 Pierrefonds Aval) et accessoirement par la proximité de la côte (490 m). En effet, la caractérisation hydrodynamique du secteur d'étude révèle que la rive gauche de la Rivière Saint-Etienne comporte les plus faibles perméabilités, les plus faibles transmissivités et les plus faibles coefficients d'emmagasinement.

Tableau 3.5 : Comparaison des résultats de l'analyse harmonique sur les piézomètres de Pierrefonds

Piézomètre	Coefficient Corrélation [%]	Nombre de composantes identifiées	Distance par rapport à la côte [m]	T [m ² /s]	Coefficient emmagasinement S [-]
38063	34	68	2435	2.0 ^E -3	2.0 ^E -5
38065	49	68	1340		
38067	75	68	490		
38070	30	68	1490	1.3 ^E -1	2.0 ^E -2
38071	47	68	1500	1.0 ^E -2	1.0 ^E -3
38077	35	68	900		
38078	30	68	520		
38087	22	59	2150	4.0 ^E -2	
38089	16	68	1570		
38217	18	68	1650		

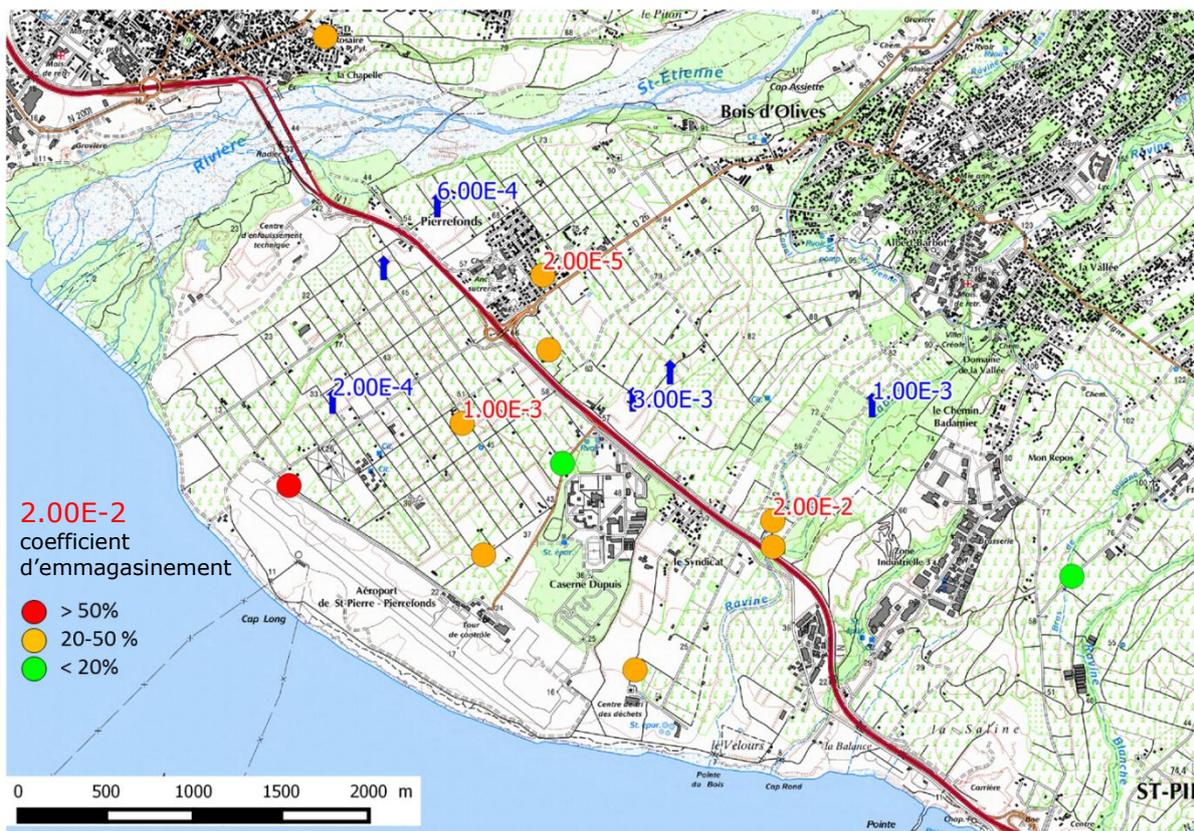


Figure 3.29 : Comparaison entre l'impact du signal marin théorique et les coefficients d'emmagasinement mesurés sur les ouvrages de Pierrefonds

L'impact du signal marégraphique est très hétérogène, à l'image du site de Pierrefonds. Toutefois, il semble augmenter avec le degré de confinement de l'aquifère, estimé à travers les coefficients d'emmagasinement (valeurs affichées sur la carte).

c. Diffusivités hydrauliques apparentes

La diffusivité hydraulique d'un aquifère désigne sa capacité à transmettre une onde de pression. Cette propriété dépend ainsi de la structure libre ou captive de l'aquifère.

Selon le modèle de Boussinesq (1877) et les travaux de Ferris (1951) considérant un aquifère captif semi-infini, d'épaisseur constante en communication avec un plan d'eau libre (ici, la mer) sur toute sa hauteur, la hauteur piézométrique est définie par la fonction $h = h(x,t)$ qui est la solution de l'équation générale de la diffusivité hydraulique notée ;

$$\frac{\delta^2 h(x,t)}{\delta x^2} = \frac{S}{T} \frac{\delta h(x,t)}{\delta t}$$

avec S , le coefficient d'emmagasinement, T , la transmissivité et h , la charge hydraulique.

La résolution de cette équation fondamentale est obtenue par deux approches différentes, selon la forme de l'évolution temporelle du plan d'eau libre. Si la forme du signal temporel (ici, la marée) peut être assimilée à une sinusoïde, alors les conditions aux limites s'expriment ;

$$h(0, t) = h_0 \sin\left(\frac{2\pi t}{t_0}\right)$$

$$h(\infty, t) = 0$$

avec h_0 désignant l'amplitude de la marée et h correspondant à l'amplitude des fluctuations piézométriques de la nappe observées dans le forage.

La solution de l'équation de diffusivité est de la forme ;

$$h(x, t) = h_0 e^{-x} \sin(\tau - x)$$

$$\text{avec } \tau = \frac{2\pi t}{t_0}$$

x désignant la distance à la mer et τ , le temps réduit.

La diffusivité hydraulique peut être évaluée notamment à partir de l'amortissement de l'amplitude. Selon l'équation de Boussinesq (Boussinesq 1877), la diffusivité hydraulique calculée en considérant l'amortissement du signal marin s'écrit :

$$D = \frac{T}{S} = \frac{x^2}{\left[\ln \frac{h_0}{h}\right]^2} \frac{\pi}{t_0}$$

En considérant uniquement l'atténuation dans les piézomètres des composantes théoriques dominantes de la marée au port de Saint-Pierre, il est possible de calculer les diffusivités hydrauliques apparentes (pour chaque composante). Il convient de préciser que le calcul est réalisé deux fois : une première fois en tenant compte de la marée théorique, et une seconde fois en considérant la marée réelle du port de Saint-Pierre.

Les diffusivités hydrauliques $[D]$ sont alors calculées à partir de l'équation ci-dessus. La période de fluctuation t_0 est fixée ($t_0 = 12\text{h}25$ pour M2 et $12\text{h}40$ pour N2), h_0 et h sont les amplitudes moyennes calculées par T-Tide dans le signal marégraphique du port de Saint-Pierre et dans les signaux piézométriques pour les composantes M2 et N2.

Les diffusivités hydrauliques obtenues pour les composantes semi-diurnes M2 ($t = 12\text{h}25$) et N2 ($t = 12\text{h}40$) sont présentées sur la figure suivante.

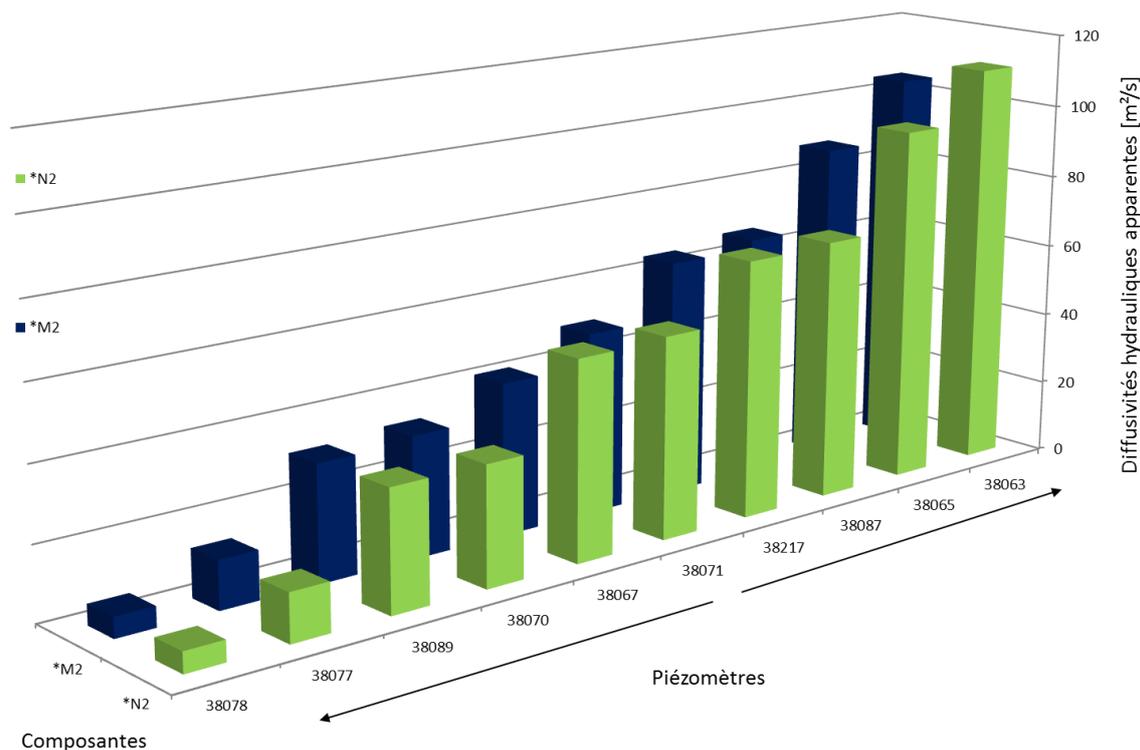


Figure 3.31 : Diffusivités hydrauliques pour les composantes semi-diurnes M2 et N2

Les résultats obtenus confirment la forte hétérogénéité du milieu souterrain étudié. Les diffusivités hydrauliques permettent d'observer un large spectre de contextes hydrodynamiques (Figure 3.32):

- un milieu faiblement diffusif caractérisé par des diffusivités inférieures à $20 \text{ m}^2/\text{s}$ est mis en évidence dans le secteur sud de Pierrefonds au niveau des piézomètres 38077 Aérogare et 38078 P11 Syndicat. Les valeurs calculées indiquent la présence d'un contexte hydrogéologique très peu captif. Ce secteur est a priori plus vulnérable en raison des faibles charges hydrauliques associées aux milieux non confinés.
- un milieu relativement diffusif avec des valeurs supérieures à $40 \text{ m}^2/\text{s}$ est mis en évidence sur la rive gauche de la Rivière Saint-Etienne. Ce secteur est ainsi associé à un degré de confinement plus important, probablement en raison de la présence de coulées boueuses peu perméables. Ce confinement est susceptible d'engendrer des pressions hydrauliques plus importantes dans cette zone, favorisant ainsi l'approfondissement de l'interface saline.

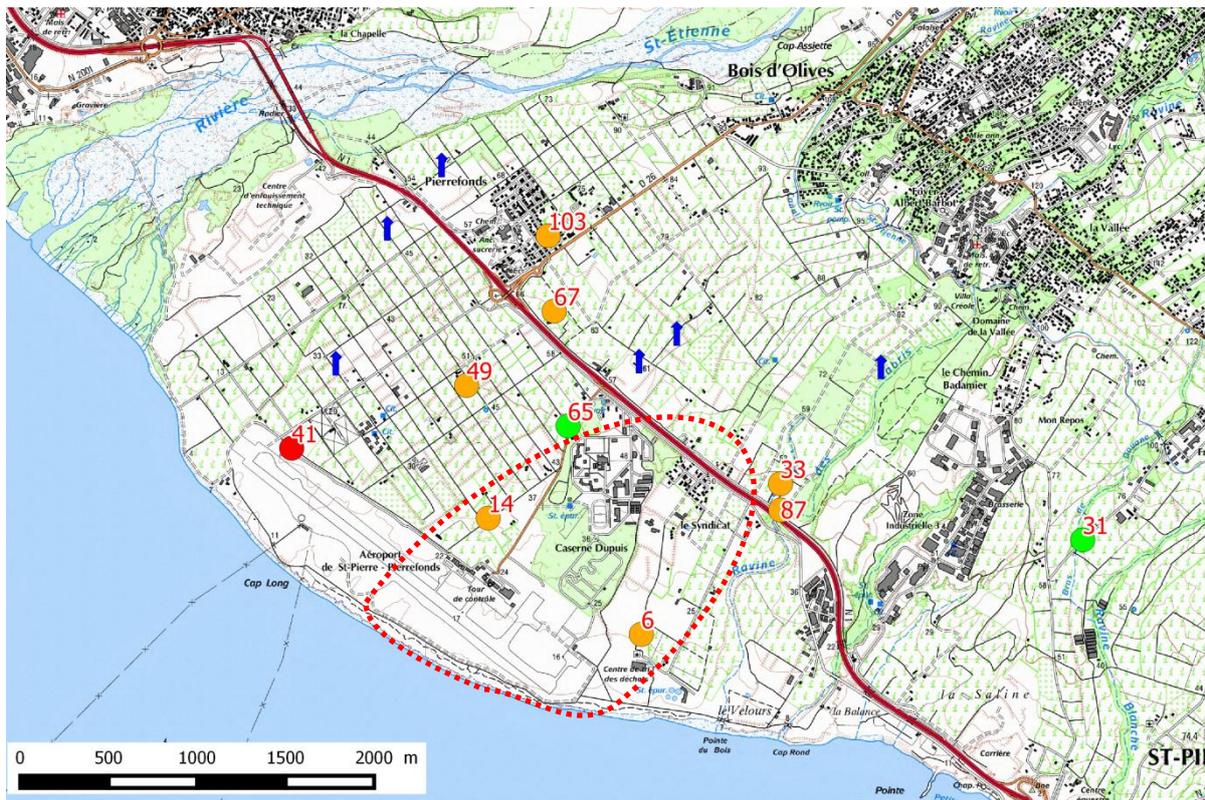


Figure 3.32 : Diffusivités hydrauliques pour la composante semi-diurne M2. Les pointillés rouges délimitent le secteur supposé moins diffusif.

Les valeurs de diffusivité hydraulique obtenues pour la composante semi-diurne M2 ($t=12h25$) sont comparées à celles calculées en prenant en compte l'atténuation de la marée observée au port de Saint-Pierre. Dans le premier cas de figure, les amplitudes h_0 et h sont fournies par l'outil d'analyse T-Tide, tandis que dans le deuxième cas, celles-ci sont mesurées directement sur les chroniques enregistrées.

Etant donné la variabilité d'amplitude du signal marin observé, le calcul est effectué en période de vives eaux. La période de fluctuation considérée est de 12h25 [M2].

En chaque piézomètre, les diffusivités calculées à partir de la marée théorique et à partir de la marée mesurée au port de Saint Pierre sont du même ordre de grandeur. La valeur obtenue avec l'amortissement de la composante de la marée théorique M2 est considérée comme étant plus intégratrice et plus objective.

D'une part, cette dernière méthode ne considère que la propagation de la composante la plus significative de la marée [M2]. Ses amplitudes mesurées au niveau de la marée au port de Saint-Pierre et au niveau des forages sont moyennées à l'échelle des chroniques enregistrées.

D'autre part, l'estimation des amplitudes n'est pas entachée par les erreurs liées aux variations d'amplitude de la marée observée [h_0] et l'approximation de la mesure d'amplitude réalisée sur le forage [h].

Tableau 3.6 : Comparaison des valeurs de diffusivités hydrauliques obtenues avec la marée théorique M2 et celle calculées en considérant l'amortissement de la marée au port de Saint-Pierre.

OUVRAGE	Distance mer [m]	h_0 [m]	h [m]	amortissement	TE [%]	D [m ² /s]
38063 PIB7	2435	0,8	0,15	5,33	19	149
38063 PIB7 M2	2435	0,15	0,02	7,50	13	103
38071 PIERREFONDS	1500	0,8	0,15	5,33	19	56
38071 PIERREFONDS M2	1500	0,15	0,025	6,00	17	49
38077 AEROGARE	900	0,8	0,1	8,00	13	13
38077 AEROGARE M2	900	0,15	0,02	7,50	13	14
38089 RAVINE BLANCHE	1570	0,8	0,15	5,33	19	62
38089 RAVINE BLANCHE M2	1570	0,15	0,014	10,71	09	31
38087 DUPUIS 3	2150	0,8	0,08	10,00	10	61
38087 DUPUIS 3 M2	2150	0,15	0,017	9,09	11	67
38217 S2 CASERNE	1650	0,8	0,1	8,00	13	44
38217 S2 CASERNE M2	1650	0,15	0,027	5,56	18	65
38070 F10 LA VALLEE	1490	0,8	0,1	8,00	13	36
38070 F10 LA VALLEE M2	1490	0,15	0,017	8,82	11	33
38078 P11 SYNDICAT	520	0,8	0,1	8,00	13	4
38078 P11 SYNDICAT M2	520	0,15	0,024	6,25	16	6
38065 F15 LA VALLEE	1340	0,8	0,2	4,00	25	66
38065 F15 LA VALLEE M2	1340	0,15	0,045	3,33	30	87
38067 AERODROME	490	0,8	0,35	2,29	44	25
38067 AERODROME M2	490	0,15	0,079	1,90	53	41

L'amortissement du signal marin varie de 2 à 10 fois entre la côte et les forages. Les plus faibles amortissements sont calculés sur les piézomètres 38065 F15 La Vallée (Syndicat) et 38067 F12 Aéroport.

L'inverse de l'amortissement (noté ici TE pour Tidal Efficiency) exprime l'efficacité du transfert du signal marin entre la côte et les piézomètres. Ce paramètre reste inférieur à 20% sur la grande majorité des ouvrages. Seuls les piézomètres 38065 F15 et 38067 F12 Aéroport affichent des valeurs supérieures à 25%.

d. Analyse des signaux piézométriques résiduels

L'outil d'analyse T-Tide permet de calculer un signal théorique modélisé constitué uniquement des composantes marégraphiques théoriques retrouvées dans le signal observé. Ce signal modélisé est souvent très différent du signal réellement observé lorsque celui-ci est bruité ou lorsque plusieurs fréquences de la marée sont très atténuées par l'aquifère, notamment en contexte de nappe libre.

La différence entre le signal observé et le signal théorique modélisé permet d'obtenir un signal résiduel. Cette étape vise à filtrer les signaux piézométriques de l'influence de la marée océanique.

La décomposition du signal piézométrique a permis un premier filtrage des composantes théoriques du signal marégraphique.

L'observation des signaux résiduels permet de distinguer deux groupes de piézomètres :

- Les piézomètres affichant un signal résiduel très faible et qui reste relativement constant sur toute la chronique (courbes rouge, orange, jaune et verte). Ces piézomètres correspondent à des ouvrages faiblement influencés par la recharge.
- Les piézomètres qui montrent un signal résiduel en augmentation sur toute la chronique (courbe bleue, violette, mauve et noire). Les ouvrages appartenant à ce second groupe coïncident avec ceux qui indiquent une influence marquée de la recharge lente, qui semble ici très retardée (Figure 3.33). La recharge directe sur l'aquifère a une influence sur la piézométrie pendant quelques mois. Cette influence est estimée à 3 mois sur la nappe du Gol (Petit et al. 2013). L'augmentation continue de la piézométrie pendant une période plus longue indique un autre processus d'alimentation comme la recharge indirecte (recharge lente en provenance de la planèze) ou les échanges inter-aquifères.

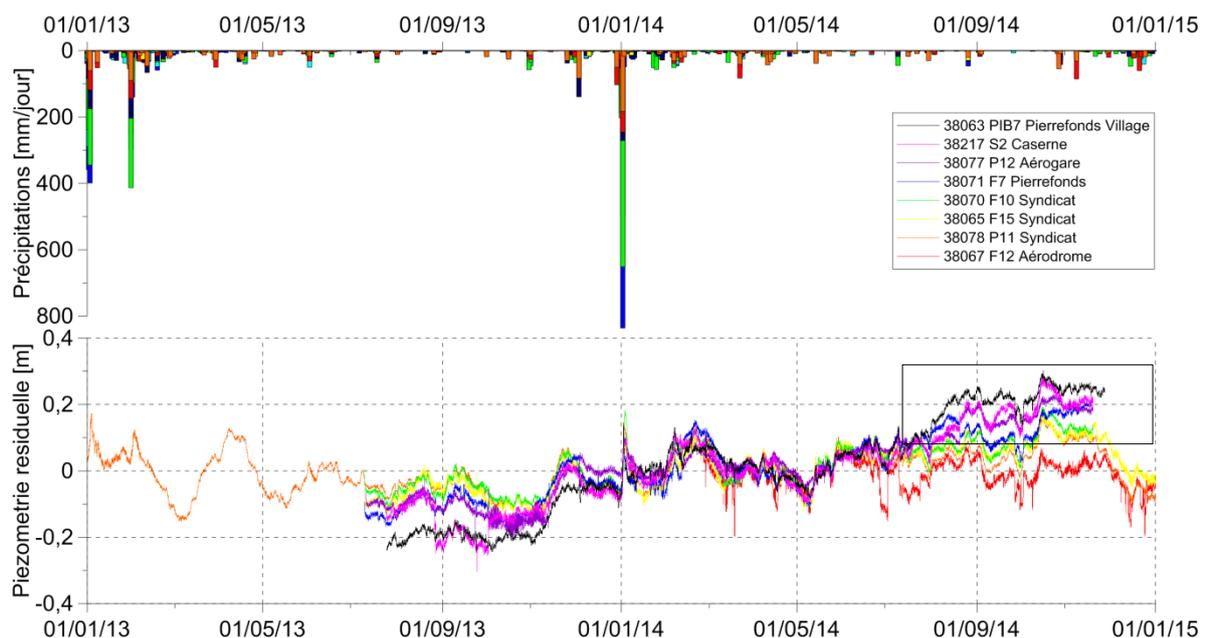


Figure 3.33 : Analyse des signaux piézométriques résiduels

L'existence de ces deux types de comportements hydrodynamiques est visible sur les chroniques pluriannuelles disponibles (Figure 3.34).

La chronique piézométrique de l'ouvrage P11 Syndicat est caractéristique d'un comportement très faiblement influencé par la recharge. A l'inverse, la piézométrie enregistrée sur l'ouvrage de la Ravine Blanche montre une influence significative des périodes de forte pluviométrie favorisant la recharge. Cet impact est observable notamment après les épisodes pluvieux de 2006 et 2007.

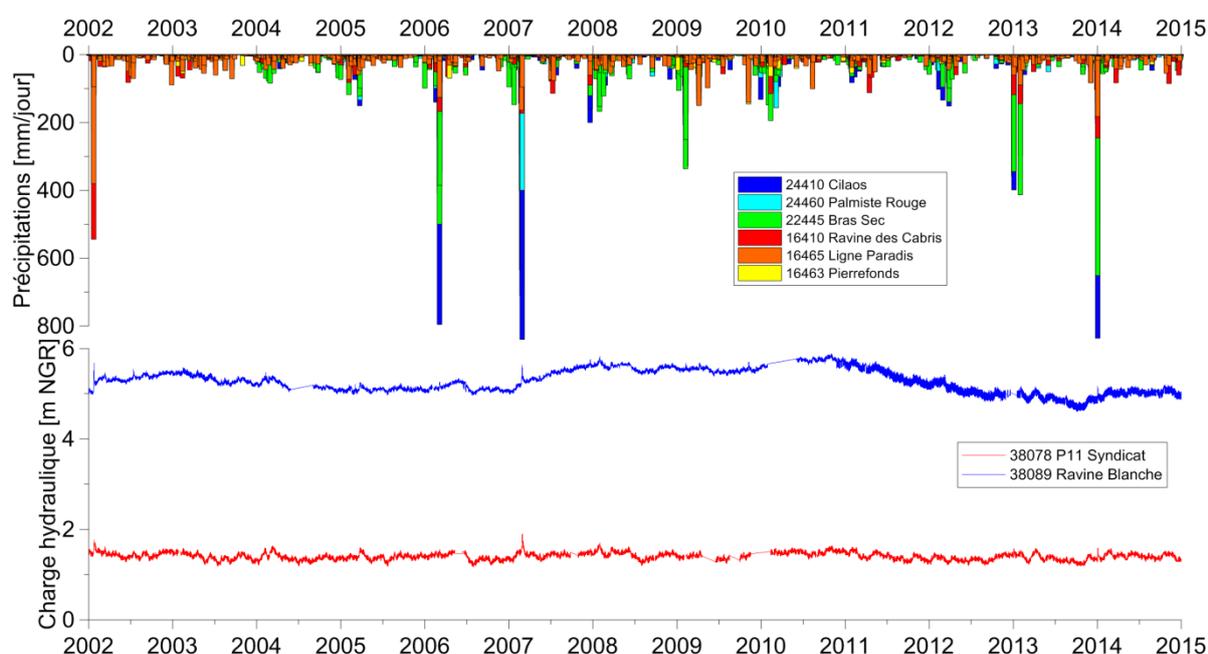


Figure 3.34 : Evolution pluriannuelle des signaux piézométriques sur les ouvrages 38078 P11 Syndicat et 38089 Ravine Blanche.

e. Conclusions en termes de caractérisation hydrodynamique et de gestion

Les résultats de cette première phase de traitement du signal renseignent sur l'hétérogénéité du milieu étudié et permettent d'esquisser un regroupement des forages en fonction de leurs comportements hydrodynamiques.

- Les forages situés en rive gauche de la Rivière Saint-Etienne interceptent un milieu moins perméable, et préférentiellement alimenté par les infiltrations de la Rivière Saint-Etienne. La présence de coulées boueuses crée des compartiments affichant un degré de confinement plus marqué, mis en évidence par l'analyse des coefficients d'emmagasinement et des diffusivités hydrauliques. Globalement, ce secteur paraît plus favorable à une mise en exploitation de la ressource en eau souterraine.
- Les forages situés sur l'axe de la paléo-vallée, dans le secteur sud de Pierrefonds interceptent un milieu beaucoup plus perméable. Les diffusivités hydrauliques calculées révèlent un contexte hydrogéologique non confiné. Ce secteur paraît plus vulnérable vis-à-vis de l'impact du milieu marin en raison du gradient hydraulique plus faible associé aux fortes perméabilités. Le risque de salinisation par intrusion marine est donc plus élevé dans cette zone.

Les résultats de cette analyse supportent la répartition des charges hydrauliques observée sur les cartes piézométriques établies en période de hautes eaux et d'été. Ces cartes révèlent la présence d'une dépression piézométrique dans la zone centrale de Pierrefonds qui est caractérisée par les fortes perméabilités.

A l'inverse, un bombement piézométrique apparaît en rive gauche de la Rivière Saint-Etienne en faveur des arrivées d'eaux régulières provenant du cours d'eau et des faibles perméabilités constatées (Figure 3.35).

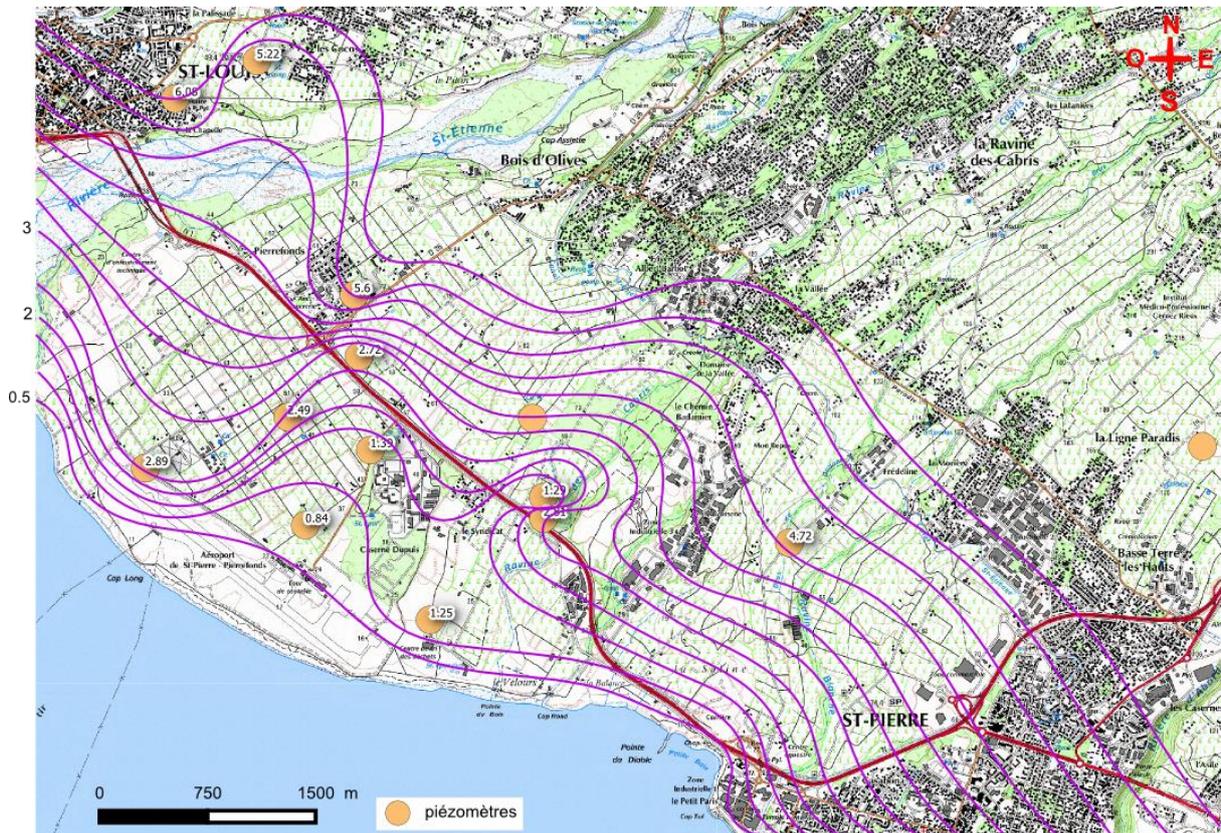


Figure 3.35 : Carte piézométrique de la plaine de Pierrefonds en été.

Sur la partie nord-ouest de cette carte, l'allure des isopièzes reste très impactée par les pompages des forages de la nappe des Cocos. Cependant les tendances générales décrites plus haut restent bien visibles en rive gauche de la Rivière Saint-Etienne et dans la zone centrale de Pierrefonds.

3.4. Approches physico-chimiques

En amont du travail de modélisation, une caractérisation physico-chimique de la nappe côtière est indispensable. Cette étape se traduit par une analyse de la répartition spatiale des conductivités électriques et indirectement des teneurs en chlorures.

3.4.1. Evolution spatiale de la qualité de la nappe côtière

La directive-cadre sur l'eau (2000/60/CE) du 23 octobre 2000 vise à atteindre ou à restaurer le bon état chimique et quantitatif des masses d'eau à l'horizon 2015.

Plusieurs éléments dissous en quantité excessive dans les nappes peuvent compromettre la qualité de la ressource en eau souterraine. Pour les sulfates, les chlorures et la conductivité électrique, des valeurs seuils ont été définies localement pour les nappes sous influence marine, conformément à l'arrêté du 17 décembre 2008, annexe II.B (Cary et al. 2012). Ainsi, pour les nappes sous influence marine comme celle Pierrefonds, les valeurs seuils au-delà desquelles une intrusion marine est très probable sont :

- 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour la conductivité électrique ;
- 100 mg/L pour les chlorures $[\text{Cl}^-]$;
- 60 mg/L pour les sulfates $[\text{SO}_4^{2-}]$.

Les cartes des conductivités électriques moyennes mesurées à différentes profondeurs au niveau des piézomètres de la nappe de Pierrefonds permettent d'établir un état des lieux de la qualité de cette ressource en eau (Figure 3.36).

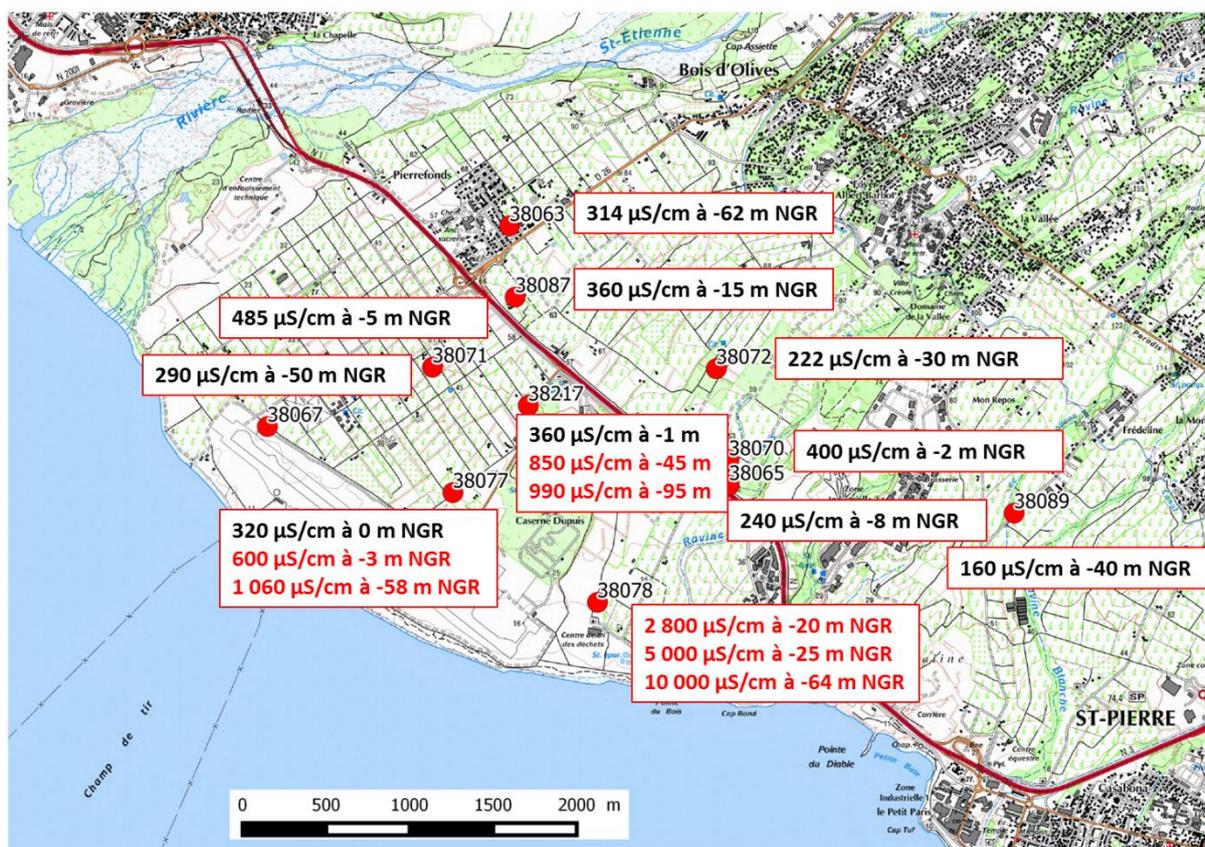


Figure 3.36 : Répartition des conductivités électriques moyennes de la nappe de Pierrefonds. Les valeurs excédant le seuil des 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sont notées en rouge.

Cette cartographie confirme les conclusions tirées précédemment en relation avec les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère et l'évaluation de la vulnérabilité de la nappe côtière vis-à-vis de l'intrusion saline. Les valeurs dépassant le seuil de 500 µS/cm défini précédemment sont notées en rouge sur la carte.

Il apparaît que le secteur le plus impacté par l'intrusion marine correspond à la zone caractérisée par la dépression piézométrique liée aux fortes perméabilités. Les logs de conductivités électriques indiquent que les forages recoupant l'intrusion saline sont :

- 38078 P11 Syndicat (vers -2 m NGR pour une distance à la côte de 520 m),
- 38077 P12 Aérogare (vers -3 m NGR pour une distance à la côte de 900 m),
- 38217 S2 Caserne (vers -45 m NGR pour une distance à la côte de 1600 m).

D'après la littérature, il existe une relation entre la teneur en sels dissous (salinité totale) et la conductivité électrique. Selon Rodier (1984), la relation entre la salinité totale et la conductivité électrique s'écrit :

$$\text{Salinité (mg/l)} = 0,688 * \text{Conductivité } (\mu\text{S/cm}) \text{ à } 20^\circ\text{C}$$

L'application de cette relation permet d'estimer la répartition des salinités dans la nappe de Pierrefonds. Comme sur la carte précédente, les valeurs supérieures au seuil associé à l'intrusion marine (350 mg/L) sont notées en rouge (Figure 3.37).

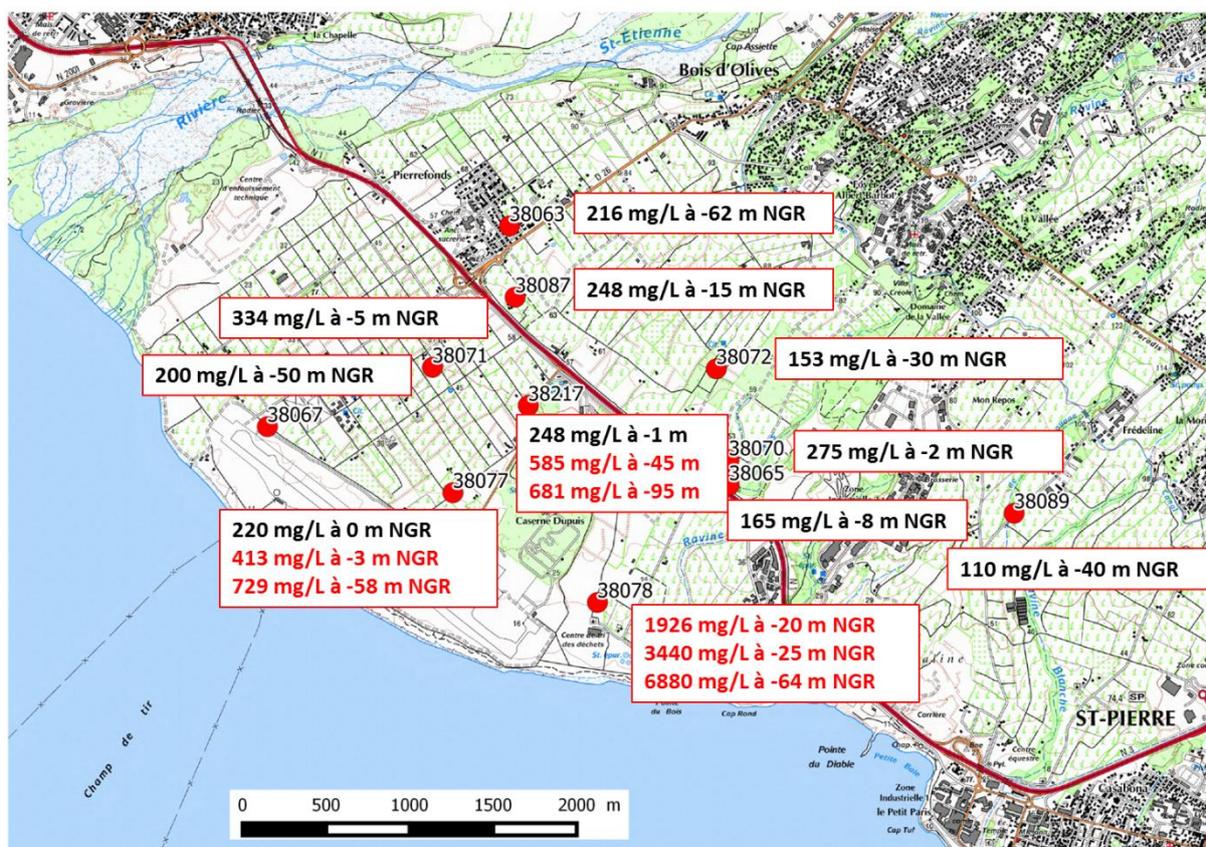


Figure 3.37 : Répartition des salinités moyennes dans la nappe de Pierrefonds. Les valeurs supérieures à 350 mg/L sont notées en rouge.

Du point de vue des gestionnaires de la ressource, l'indicateur « teneur en chlorures » paraît plus pertinent pour évaluer la qualité de l'eau souterraine et l'impact du milieu marin. D'après le calcul sur les analyses d'eau souterraine de La Réunion, une relation a été établie entre la teneur en chlorures et la conductivité électrique.

Selon Cary et al. (2012), la relation entre la concentration en chlorures et la conductivité électrique peut s'écrire :

$$[Cl^-] \text{ (mg/L)} = 0,3 * \text{conductivité électrique } (\mu\text{S/cm}) - 50.$$

L'application de cette relation permet alors d'évaluer de manière indirecte la répartition des chlorures dans la nappe de Pierrefonds (Figure 3.38). Les valeurs excédant le seuil des 100 mg/L sont notées en rouge.

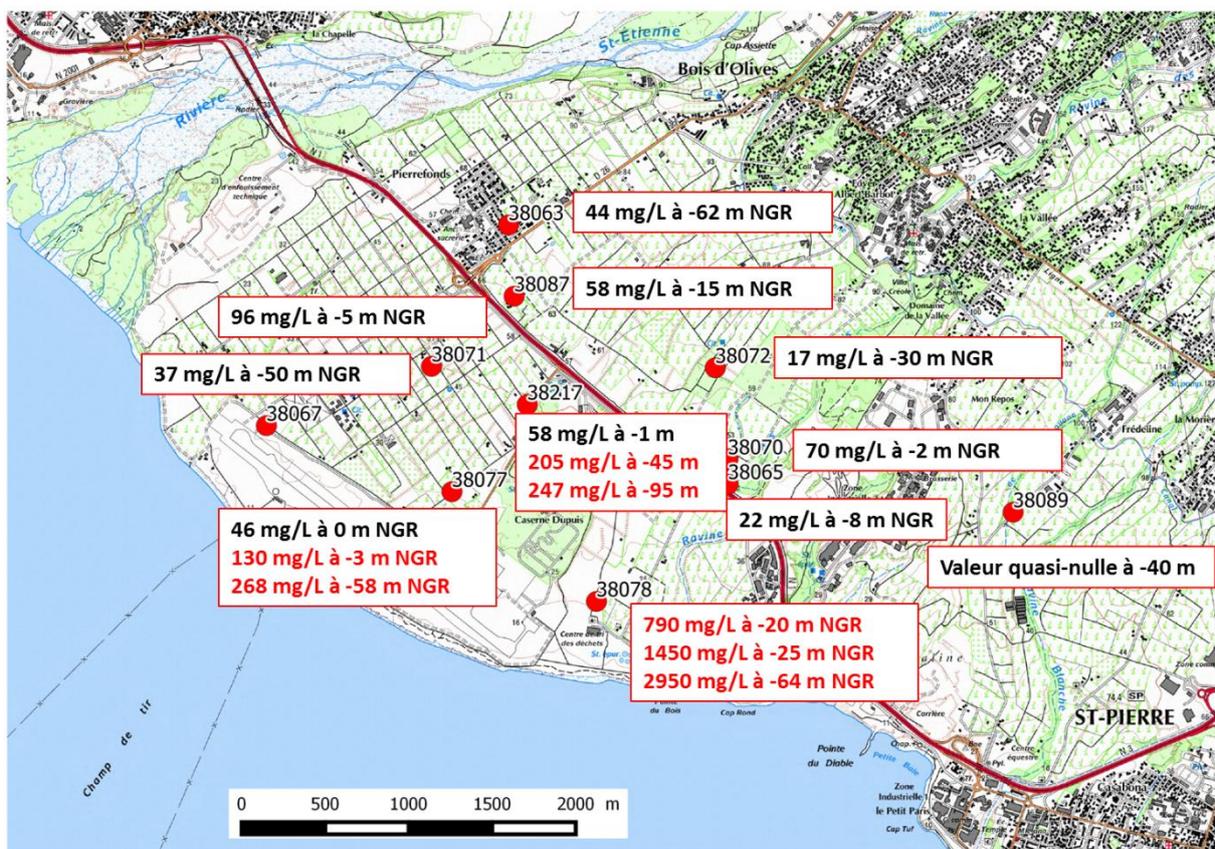


Figure 3.38 : Répartition des teneurs moyennes en chlorures dans la nappe de Pierrefonds. Les valeurs supérieures à 100 mg/L sont notées en rouge.

Les différents indicateurs qualitatifs confirment la présence d'une ressource de meilleure qualité en rive gauche de la Rivière Saint-Etienne et à l'Est de Pierrefonds. Cette concordance s'explique par le fait que les concentrations sont calculées à partir des conductivités électriques par le biais d'une relation linéaire.

Le secteur impacté par les fortes salinités est localisé au centre de Pierrefonds, sur l'axe d'une paléo-vallée comblée par des formations plus perméables.

3.4.2. Evolution temporelle de la qualité de la nappe côtière

L'Agence Régionale de la Santé [ARS] effectue des analyses de contrôle de l'évolution des paramètres nitrates, chlorures et sulfates sur les forages exploités pour l'alimentation en eau potable [AEP]. Les ouvrages AEP concernés par ces analyses comprennent deux forages de la nappe des Cocos (au Nord de Pierrefonds) et quatre forages exploitant la nappe de Pierrefonds (Figure 3.39).

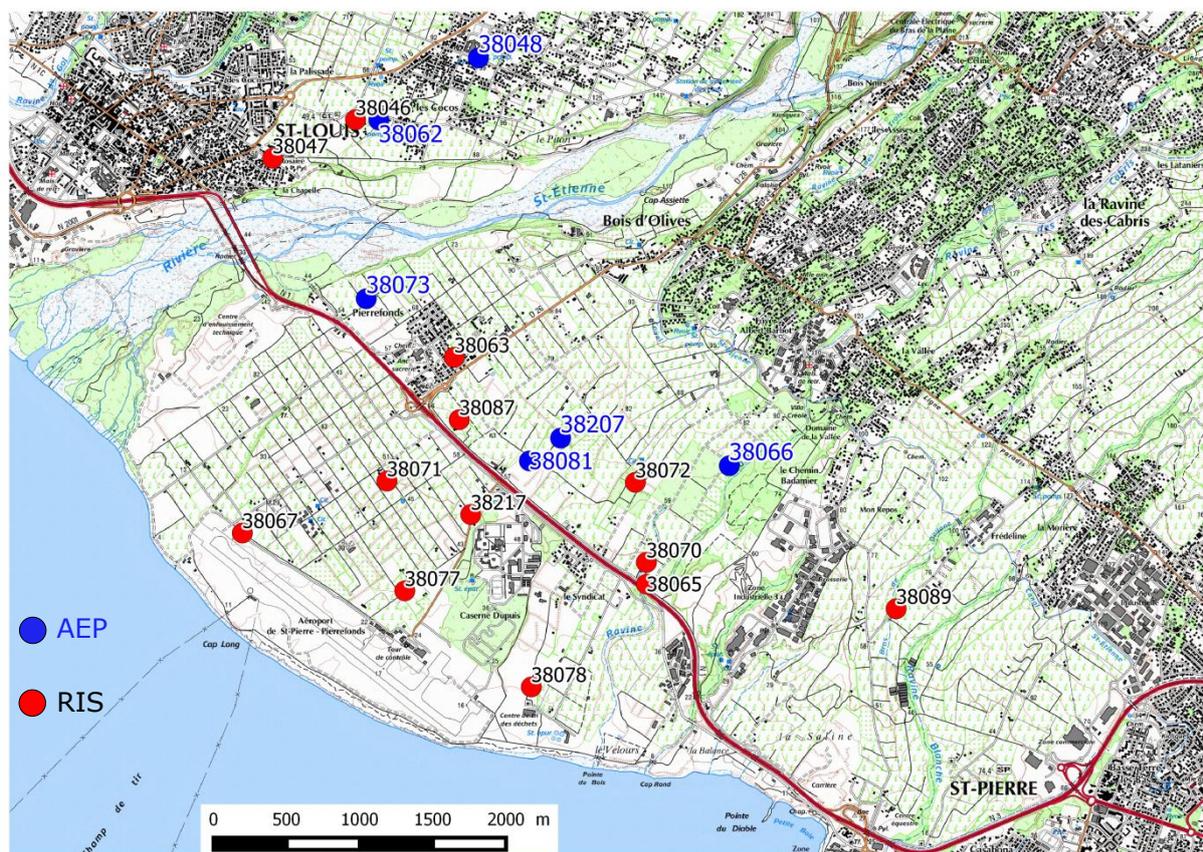


Figure 3.39 : Localisation des forages AEP suivis par l'ARS sur les nappes des Cocos et de Pierrefonds. Ces ouvrages sont étiquetés en bleu.

L'observation de l'évolution des teneurs en nitrates, chlorures et sulfates depuis 2005 montre une contamination plus marquée dans les forages exploitant la nappe des Cocos. Ce constat suggère une origine anthropique des éléments en solution. Dans ce contexte, les sources de contamination les plus probables restent les rejets des eaux usées domestiques et le retour de l'eau d'irrigation (Kloppmann et al. 2013).

La relation entre les pics de concentrations et l'intensité des précipitations reste difficile à établir. Selon le forage et en fonction de l'évènement pluvieux, l'arrivée d'eaux météoriques n'entraîne pas systématiquement une dilution des concentrations. Certains évènements intenses (comme ceux de janvier 2014) sont même associés à des pics de concentrations en nitrates dans les forages de la nappe des Cocos. Cette observation suggère un lessivage des sols entraînant une percolation d'intrants agricoles vers la nappe des Cocos. La nappe de Pierrefonds semble relativement protégée vis-à-vis de ces phénomènes de lessivage des nitrates associés aux précipitations intenses (Figure 3.40).

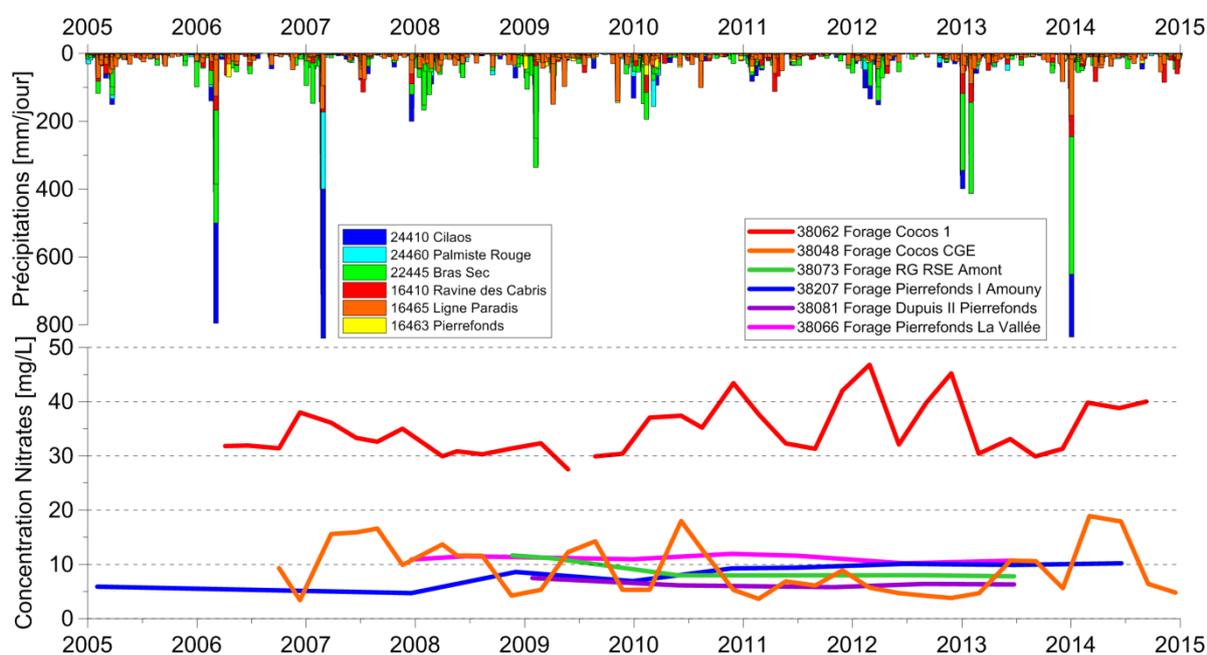


Figure 3.40 : Evolution temporelle des teneurs en nitrates dans les nappes des Cocos et de Pierrefonds.

L'analyse de l'évolution des teneurs en chlorures sur les six ouvrages précédents permet de noter deux observations :

- Les niveaux de chlorures dans la nappe de Pierrefonds restent faibles (inférieures à 20 mg/L) et relativement constants, tandis que les teneurs observées dans la nappe des Cocos affichent des variations contrôlées par les précipitations.
- Les teneurs mesurées dans les ouvrages exploitant la nappe des Cocos ne varient pas dans le même sens pour un même évènement pluvieux. Les précipitations de l'année hydrologique 2014 entraînent une dilution des chlorures sur l'ouvrage 38062 et, à l'inverse, un pic sur l'ouvrage 38048 (Figure 3.41).

L'analyse de l'évolution des teneurs en sulfates permet de noter deux observations :

- Les forages 38073 (situé en rive gauche de la Rivière Saint-Etienne) et 38062 (situé en rive droite de la Rivière Saint-Etienne) affichent les concentrations en sulfates les plus importantes (entre 20 et 40 mg/L).
- Les niveaux de sulfates dans la nappe de Pierrefonds (en dehors du forage 38073 décrit précédemment) restent inférieures à 20 mg/L et relativement constants, tandis que les teneurs observées dans la nappe des Cocos affichent des variations contrôlées par les cycles hydrologiques.
- Les teneurs en sulfates mesurées dans les ouvrages exploitant la nappe des Cocos affichent des tendances similaires sur toute la chronique (Figure 3.42).

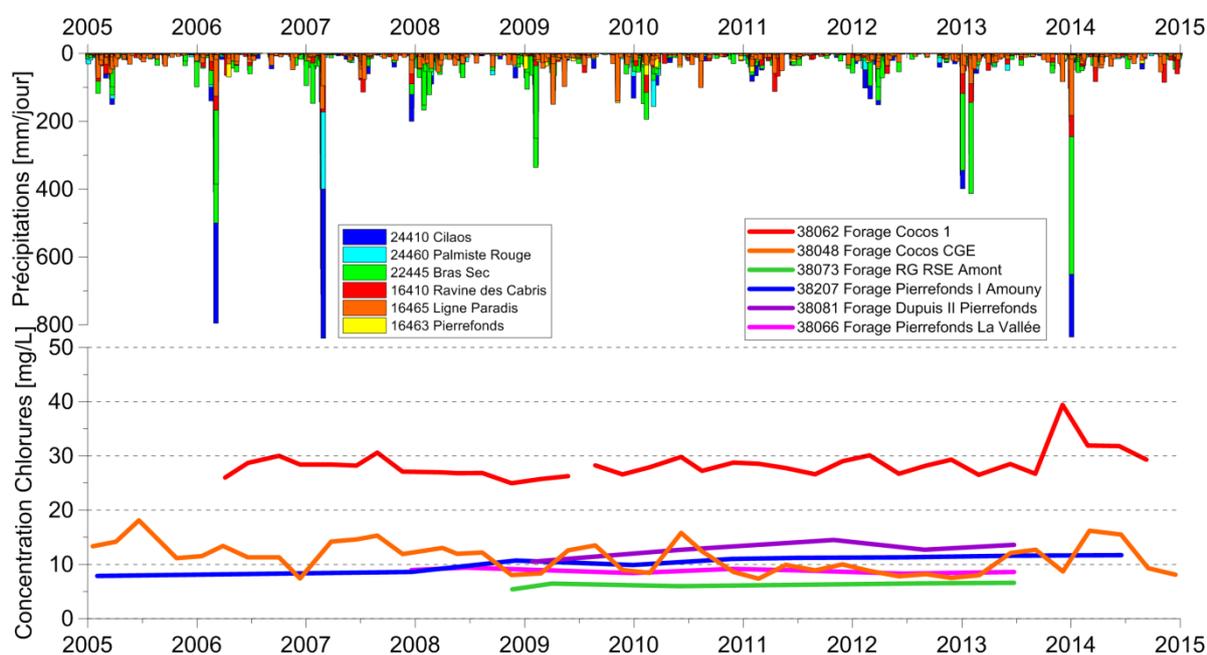


Figure 3.41 : Evolution temporelle des teneurs en chlorures dans les nappes des Cocos et de Pierrefonds.

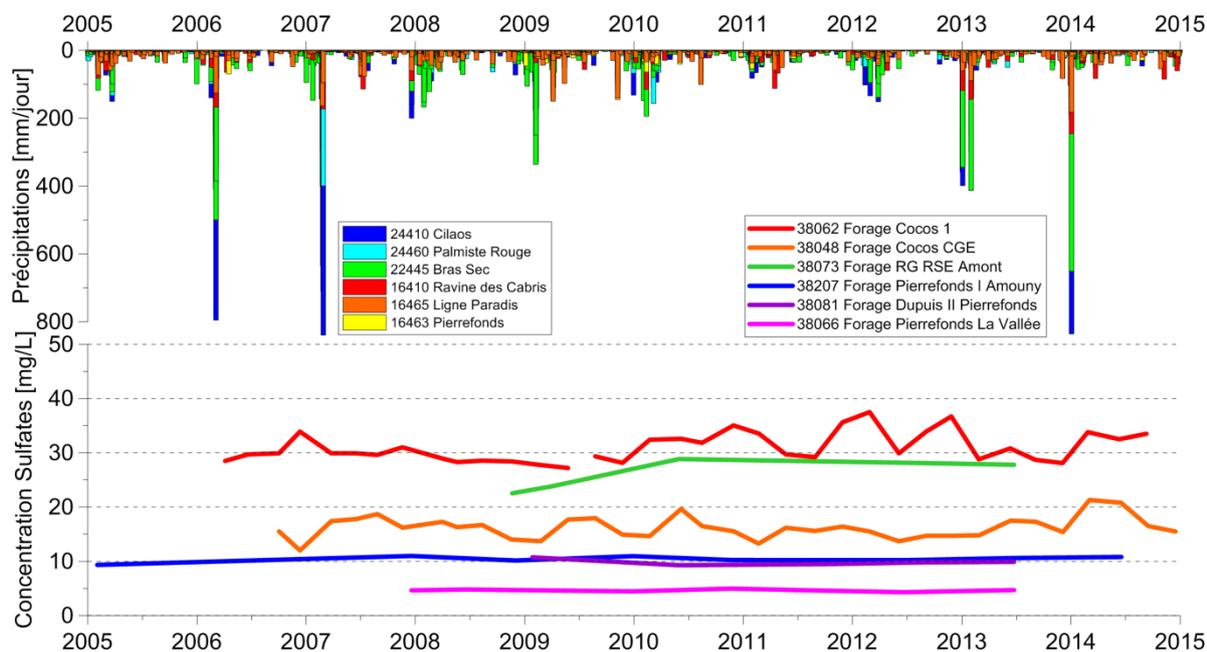


Figure 3.42 : Evolution temporelle des teneurs en sulfates dans les nappes des Cocos et de Pierrefonds.

En somme, il apparait que les teneurs des trois éléments majeurs mesurés restent relativement constantes dans la nappe de Pierrefonds qui semble moins impactée par une contamination d'origine anthropique.

Le secteur mis en exploitation s'avère relativement protégé vis-à-vis de l'impact du milieu marin à la faveur du contexte hydrogéologique particulier décrit précédemment.

4. Modélisation de la masse d'eau de Pierrefonds

Le modèle 3D est construit à l'aide du logiciel Feflow®. Cet outil de modélisation permet la simulation numérique simultanée de l'écoulement des fluides et du transport des solutés (Diersch and Kolditz 2002). L'outil numérique est utilisé ici pour tester la cohérence physique des hypothèses émises au sujet du rôle de certaines structures géologiques ou des fluctuations de la limite océanique sur la dynamique des intrusions marines.

4.1. Modélisation numérique : aspects théoriques

La théorie des fluides miscibles considère que les écoulements souterrains en milieu côtier impliquent deux fluides de densités différentes et complètement solubles. Dans les nappes côtières, le fluide résultant du mélange est donc caractérisé par sa composition issue des deux « fluides purs » ; l'eau douce de concentration zéro (C_0), l'eau de mer de concentration maximale (C_{max}) et la zone de transition comportant une eau saumâtre de concentration intermédiaire (C_i) et variable.

De cette façon, la résolution mathématique considère donc un seul fluide représenté par un front dispersif de densités variables. Un transport de solutés est donc associé au transport de flux (Bobba 1993). Ainsi, la formulation mathématique prend en compte quatre variables ; i) les flux transitant dans le modèle, ii) la charge hydraulique sur tout le domaine modélisé, iii) la concentration en sels dissous et iv) la masse volumique ρ du fluide. Ces quatre variables sont nécessaires à la résolution en parallèle des quatre équations suivantes (Frind 1982) ;

- la loi de l'écoulement de Darcy généralisée et appliquée à un fluide de densité variable ;

$$q = -k_i \times \frac{\rho g}{\mu} \times \frac{\delta H}{\delta l}$$

$$\rho = \rho_0 + \frac{\delta \rho}{\delta C} (C - C_0)$$

- l'équation de diffusivité ou équation de Laplace (principe de continuité) ;

$$S \frac{\delta(H)}{\delta t} = \text{div}(K * \overrightarrow{\text{grad}}(H))$$

- la loi de Fick ;

$$J = -D \frac{\delta C}{\delta x}$$

- l'équation de diffusion moléculaire (principe de continuité) ;

$$\frac{\delta C}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x_i} \left(D \frac{\delta C}{\delta x_j} \right)$$

avec ;

q : vitesse de Darcy ($m \cdot s^{-1}$),

J : flux massique ($kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$),

K : conductivité hydraulique ($m \cdot s^{-1}$),

k_i : perméabilité intrinsèque (m^2),

g : gravité ($m \cdot s^{-2}$),

ρ : masse volumique ($kg \cdot m^{-3}$),

ρ_0 : masse volumique du fluide prise à la concentration de référence (C0),

μ : viscosité ($kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$),

S : coefficient d'emmagasinement,

C : concentration en éléments dissous ($kg \cdot m^{-3}$),

t : temps (s),

D : dispersion ($m^2 \cdot s^{-1}$),

H : hauteur piézométrique (m),

l : longueur (m),

x, x_i et x_j : coordonnées spatiales.

Le phénomène de dispersion des solutés observé dans la réalité est pris en compte dans la formule de Fick grâce à un terme générique noté D. Dans le milieu aquifère, ce terme correspond à deux phénomènes physiques :

i) la diffusion moléculaire (D_m) ou mouvement brownien, qui dépend du fluide considéré,

ii) la dispersion hydrodynamique due aux vitesses d'écoulement.

La dispersion hydrodynamique est définie par un coefficient de dispersivité lié à la vitesse du fluide.

$$D_h = \alpha \vec{v}$$

avec ;

D_h : dispersion hydrodynamique ($m^2 \cdot s^{-1}$)

α : coefficient de dispersivité (m)

v : vitesse de pores ($m \cdot s^{-1}$)

Le coefficient de dispersivité (α) a dans l'espace une composante longitudinale (α_L) et une composante transversale (α_T). La composante longitudinale est parallèle au sens d'écoulement et généralement dix fois plus importante que la composante transversale (Banton and Bangoy 1997).

De nombreux codes numériques permettent de résoudre les problèmes de modélisation des fluides miscibles à densités variables. Les plus couramment utilisés sont : SUTRA (Voss 1999), SEAWAT (Guo and Langevin 2002, Mulligan et al. 2011), FEFLOW (Diersch 2009), Diersch and Kolditz 2002), TVDT3D (Ackerer et al. 1999), MOCDENSE3D (Oude Essink 2001).

Les codes de calcul de ces différents logiciels résolvent en parallèle les quatre équations aux dérivées partielles présentées plus haut, selon deux méthodes de discrétisation numérique :

- i) la méthode des différences finies (comme dans le code SEAWAT),
- ii) la méthode des éléments finis (comme dans le code FEFLOW).

Dans ces deux méthodes de discrétisation, le domaine considéré est subdivisé sous forme de maillage. La solution numérique est obtenue par une technique de résolution itérative en remplaçant les variables continues par des variables discrètes définies aux niveaux des mailles.

Ces méthodes d'approximation de la solution peuvent entraîner des erreurs numériques importantes. La fiabilité des codes de calcul est vérifiée à l'aide de benchmarks ou banc d'essais (Ackerer and Younes 2008 ; Oltean and Bues 2002 ; Huyakorn et al. 1987).

Les benchmarks les plus utilisés, pour les problèmes de simulation de flux à densités variables dans un milieu poreux, sont le problème d'Elder (Elder 1967) qui simule les problèmes de convection thermodynamique et le problème d'Henry (Henry 1964) qui simule les intrusions d'eau salée. Ils permettent d'éprouver la capacité d'un logiciel à reproduire la solution mais également de faire des tests de sensibilité sur les paramètres liés à la conception du modèle, à savoir :

- i) la discrétisation du maillage,
- ii) les types de conditions aux limites,
- iii) les valeurs attribuées aux variables hydrodynamiques.

4.2. Estimation des flux d'entrée

L'évaluation du bilan hydrologique en milieu volcanique reste un exercice très compliqué en raison de la non-concordance entre les limites des bassins versants superficiels et souterrains. Sur la base des limites géomorphologiques des bassins versants superficiels, six unités hydrologiques ont été définies pour l'étude. Ces unités constituent une zone de collecte qui est ainsi délimitée en amont de la masse d'eau de Pierrefonds (Figure 4.1).

Cette zone de collecte est composée des 6 unités hydrologiques suivantes :

- L'unité du cirque de Cilaos
- L'unité du Bras de Cilaos
- L'unité du Bras de la Plaine
- L'unité de la planèze du Tampon
- L'unité de la Rivière Saint-Etienne
- L'unité de Pierrefonds

L'unité de la planèze du Tampon est divisée en deux sous-unités : l'unité amont de la Plaine des Cafres et l'unité aval du Tampon.

L'analyse des débits des sources pérennes du Bras de la Plaine permet d'estimer à 43 % les infiltrations de l'unité amont de la Plaine des Cafres qui alimentent ces sources du Bras de la Plaine. La part restante, notée I1, se rajoute aux infiltrations de l'unité aval du Tampon, notées I2 pour alimenter la masse d'eau de Pierrefonds. Un flux souterrain entrant est donc appliqué à la limite Nord-Est du domaine modélisé. Ce flux correspond à la somme I1 + I2.

Les unités du Cirque de Cilaos, Bras de Cilaos et Bras de la Plaine contribuent à l'alimentation de l'unité de la Rivière Saint-Etienne. Cette dernière unité alimente la masse d'eau de Pierrefonds par infiltration sur la limite Nord-Ouest du domaine modélisé. Ce flux en provenance du cours d'eau est notée I3 (Figure 4.1).

Enfin, des infiltrations directes, notées I4, peuvent également se produire au droit du domaine modélisé (Figure 4.1).

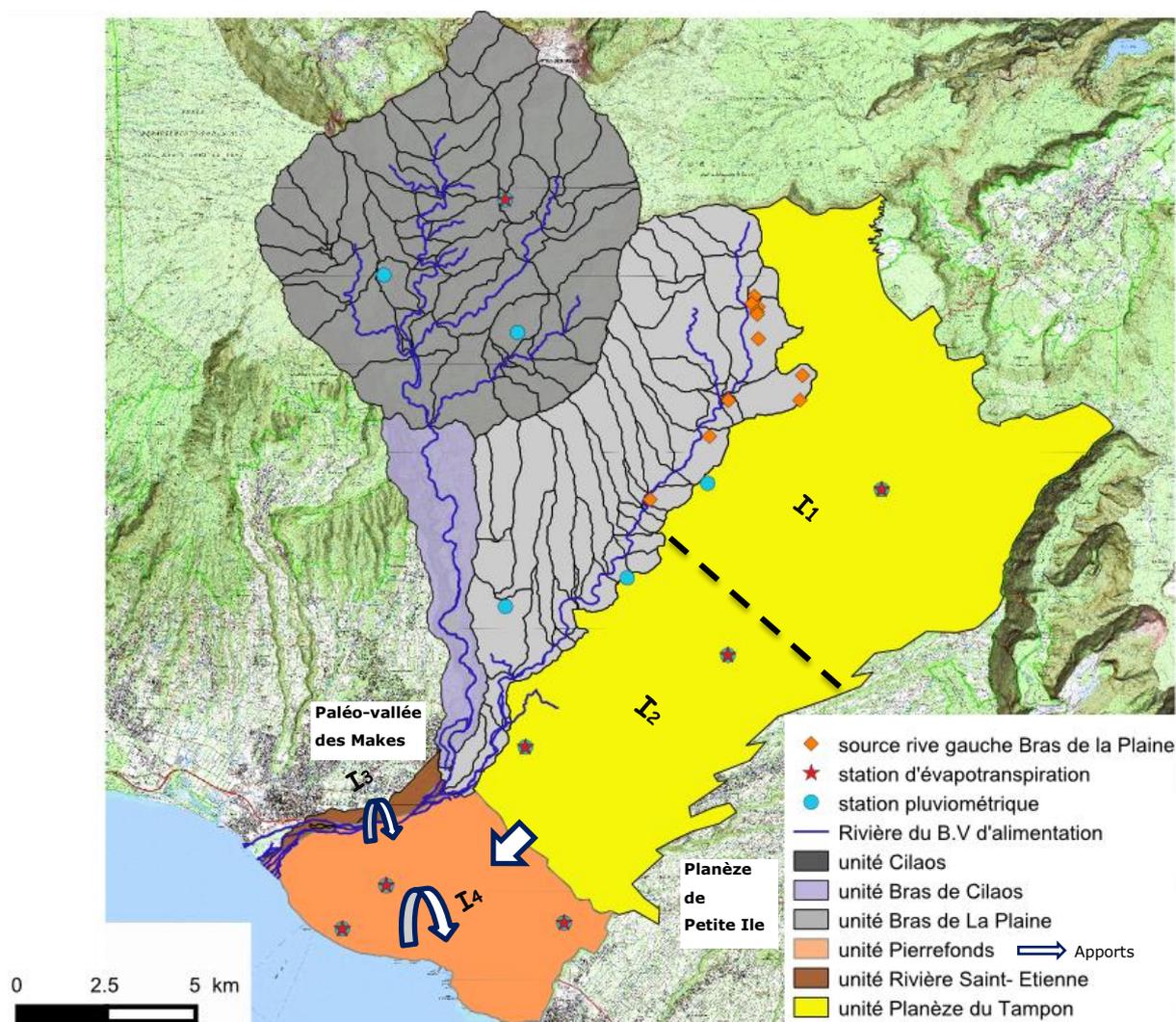


Figure 4.1 : Délimitation des unités hydrologiques du bassin versant superficiel de Pierrefonds et localisation des apports estimés.

Le calcul de ces différents flux est réalisé pour une année hydrologique moyenne choisie sur les 5 ans de chroniques complètes disponibles pour les données de pluviométrie et d'évapotranspiration (2011-2015). L'année hydrologique moyenne choisie correspond à 2014 (Figure 4.2). Le cumul pluviométrique en 2014 est de 1667 mm sur la planèze du Tampon.

L'estimation des flux a fait l'objet d'un rapport d'étude qui détaille la démarche et les hypothèses de travail qui ont été appliquées.

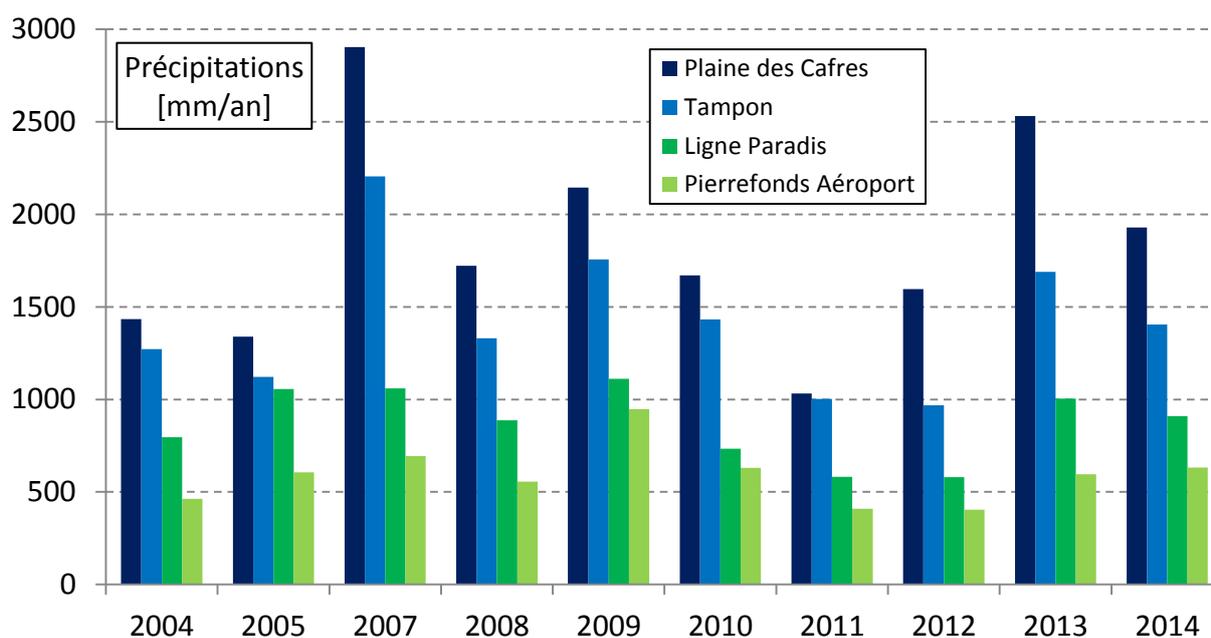


Figure 4.2 : Evolution pluriannuelle de la pluviométrie sur 4 stations de la zone d'étude.

Une valeur seuil de 60 mm/jour a été arbitrairement fixée pour limiter les infiltrations : ce seuil sous-entend que les précipitations excédant 60 mm/jour ne participent pas de façon significative à la recharge et sont alors transformées en ruissellement. Il s'agit de la valeur initialement proposée par ANTEA en 2002 pour son modèle du cône alluvial de la rivière Saint-Etienne (Pecci et al. 2002).

Sur la base d'une étude récente portant sur l'estimation des coefficients de ruissellement dans le secteur de la Ravine des Cabris et la Ravine Blanche (Martel 2014), un coefficient de ruissellement homogène de 15% a été appliqué dans les calculs sur tout le domaine modélisé et sur la zone amont. Ce paramètre est activé uniquement lorsque la lame d'eau précipitée dépasse 60 mm/jour.

Les flux en provenance de la Rivière Saint-Etienne n'ont pas pu être estimés en raison d'un manque de données. La valeur prise en compte est issue des résultats d'une étude antérieure (Pecci et al. 2002), convertie en mm/an. La superficie utilisée pour cette conversion correspond à la surface de l'unité de Pierrefonds (35 km²).

Le bilan hydrologique fournit alors les résultats suivants pour une année moyenne :

- Flux provenant de la plaine du Tampon : 1500 mm/an
- Flux provenant de la Rivière Saint-Etienne : 700 mm/an
- Flux provenant des infiltrations directes à Pierrefonds (35 km²): 500 mm/an

4.3. Discrétisation du domaine modélisé

Le modèle 3D est construit à l'aide du logiciel Feflow. Cet outil permet l'intégration de la topographie et de la bathymétrie pour épouser au mieux la géométrie tridimensionnelle du domaine modélisé. Le domaine 3D créé est ensuite discrétisé horizontalement à l'aide d'un maillage triangulaire, et verticalement à l'aide d'un découpage en tranches (slices).

Le modèle de Pierrefonds intègre donc la topographie de la plaine de Pierrefonds jusqu'à 200 m d'altitude et la bathymétrie jusqu'à -120 m de profondeur (Figure 4.3).

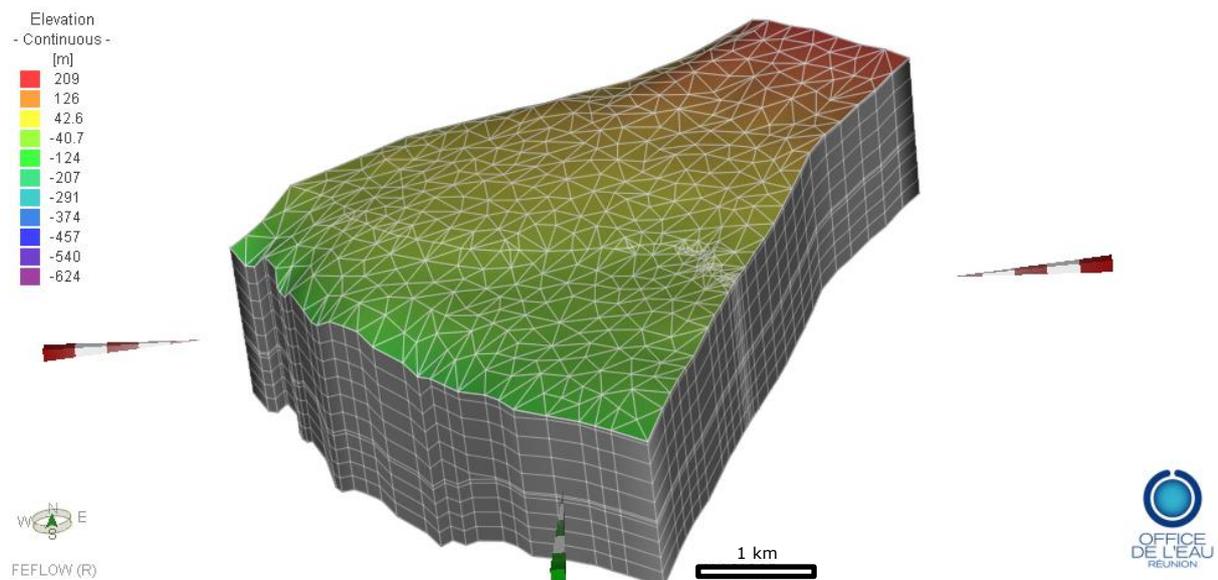


Figure 4.3 : Discrétisation tridimensionnelle du modèle de Pierrefonds

Le redécoupage vertical du domaine en tranches est basé sur les limites des différentes formations géologiques interceptées par les forages (Figure 4.4).

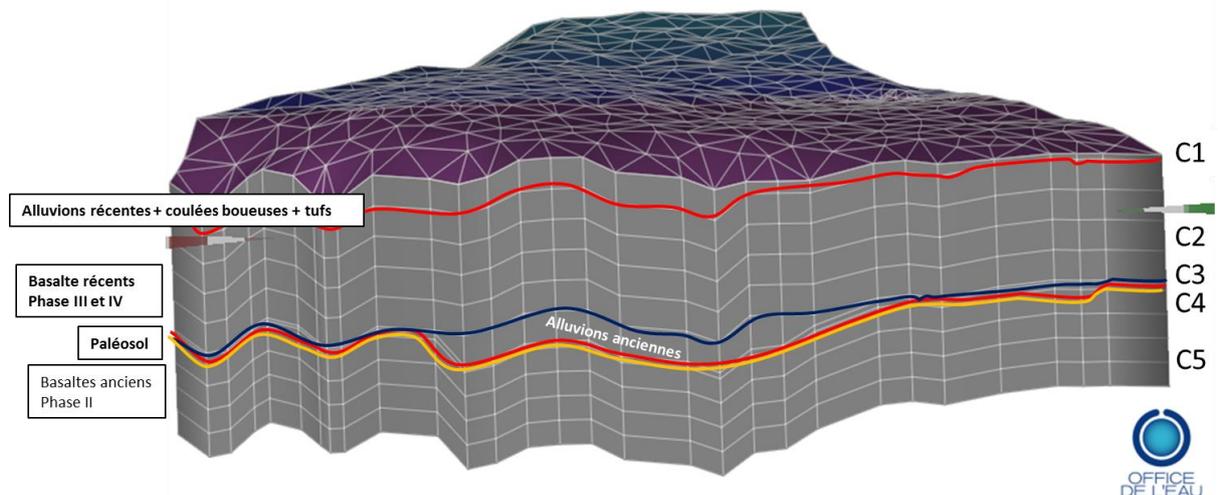


Figure 4.4 : Discrétisation verticale du modèle de Pierrefonds

Les compartiments géologiques pris en compte sont les suivants :

- **Couche 1 [C1]:** cette première couche est constituée essentiellement par les alluvions récentes de la rivière Saint-Etienne. Des lentilles de coulées boueuses et de tufs pyroclastiques sont recoupées à la base des alluvions.
La topographie du mur de ce premier compartiment est calculée par interpolation des altitudes des limites inférieures des formations géologiques associées. L'épaisseur de ces dépôts superficiels diminue donc du Nord vers le Sud.
Les alluvions récentes atteignent 50 m d'épaisseur près du littoral, notamment au niveau des forages 38067 et 38077.
- **Couche 2 [C2]:** cette deuxième couche est constituées par les basaltes récents de la phase III et IV. Ces formations ont comblé une paléo-vallée identifiée au niveau de la zone centrale de Pierrefonds. Elles présentent des perméabilités plus importantes sur l'axe de ce paléo-chenal.
Ce deuxième compartiment est discrétisé en 4 tranches de 50 m chacune afin de pouvoir renseigner de façon plus précise les paramètres hydrodynamiques issus des forages. L'épaisseur maximale de ce compartiment est de 200 m.
- **Couche 3 [C3]:** cette couche est constituée par les alluvions anciennes profondes fréquemment rencontrées entre le mur des basaltes récents de la phase III et le toit des basaltes anciens de la phase II. L'extension latérale de cette formation est limitée à la largeur de la paléo-vallée. Ces alluvions anciennes ne sont recoupées que par les forages les plus profonds comme 38087 Dupuis 3, 38207 Amouny et 38089 Ravine Blanche. L'épaisseur de cette formation atteint 60 m sur l'axe de la paléo-vallée.
- **Couche 4 [C4]:** cette couche matérialise un paléosol altéré au toit de la phase II. Son épaisseur est limitée à 5 m.
- **Couche 5 [C5]:** cette dernière couche est constituée par les basaltes de la phase II du Piton des Neiges. Ce compartiment est discrétisé en 4 tranches de 40 m chacune. Il atteint donc une épaisseur totale de 160 m.

4.4. Paramétrage du modèle

Les informations relatives aux flux issues du bilan hydrologique et les paramètres hydrodynamiques issus des essais par pompages réalisés sur les forages de Pierrefonds sont implémentées dans le modèle numérique.

4.4.1. Les conditions aux limites

Une limite à charge hydraulique imposée à 0 m (condition de Dirichlet) est appliquée sur le trait de côte ainsi que sur toute la partie sous-marine du modèle. Une concentration d'eau de mer (35200 mg/L) est appliquée sur toute la partie sous-marine du modèle. Cette valeur est représentative des analyses effectuées sur les échantillons d'eau de mer de La Réunion (Cuet 1989; Lézé 2012).

Les limites à flux imposés (conditions de Neumann) sont les suivantes (Figure 4.5):

- Un flux souterrain constant provenant de la planèze du Tampon sur la limite Est du modèle (1500 mm/an)
- Un flux provenant des infiltrations de la Rivière Saint-Etienne sur la limite Nord (700 mm/an)
- Un flux provenant des infiltrations directes de Pierrefonds sur toute la surface (500 mm/an)

Au vu des salinités les plus faibles constatées dans les forages (110 mg/L sur 38089 Ravine Blanche), les concentrations des flux entrants sont fixées à 100 mg/L.

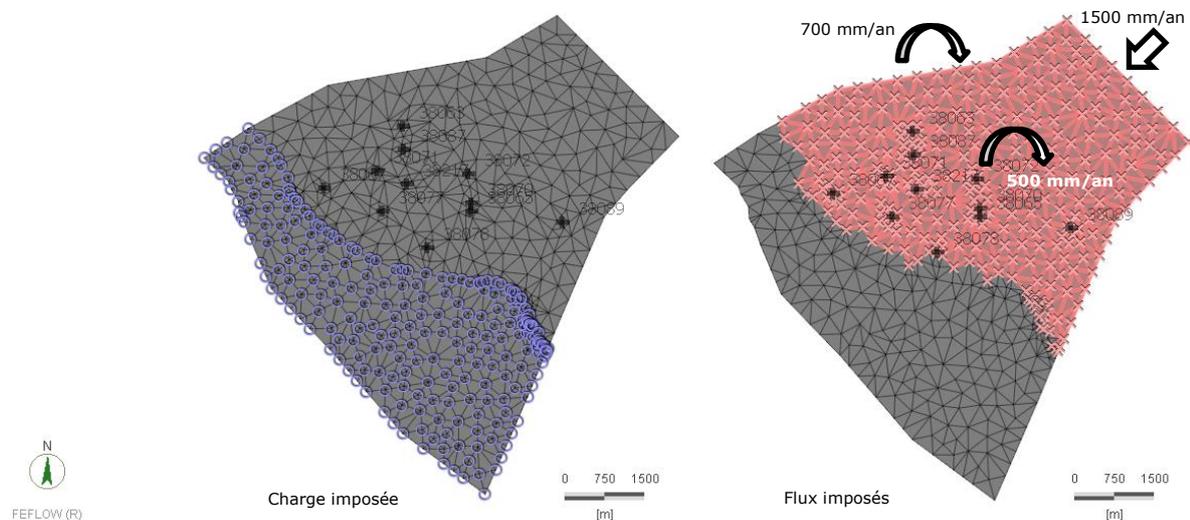


Figure 4.5 : Conditions de charge et de flux appliquées au modèle Pierrefonds

4.4.2. Les perméabilités

Les valeurs de perméabilités assignées aux mailles du modèle proviennent de nombreux essais par pompage réalisés sur l'aquifère de Pierrefonds. Les perméabilités [k] sont calculées en considérant les transmissivités [T] mesurées et l'épaisseur [b] de l'horizon aquifère capté, selon la relation $k=T/b$ (Tableau 4.1).

Tableau 4.1 : Paramètres hydrodynamiques de l'aquifère de Pierrefonds.

Ouvrages		Hydrogéologie			Perméabilités				
code office	Position	Alt (m)	Prof (m)	Hauteur crépines (m)	Formation géologique au niveau des crépines	T (m ² /s)	S ()	k [m/s]	Prof [m NGR]
38088	X : 341152 m Y : 7642698 m	115,1	190	73,5	Alluvions anciennes (116.5-190m)	1,40E-01	1,90E-03	1,90E-03	-74,9
38070	X : 338533 m Y : 7642201 m	47,84	75	28	Phase III et IV (47-75 m)	1,30E-01	2,00E-02	4,64E-03	-27,16
38066	X : 339101 m Y : 7642870 m	70,15	99,7	30,41	Phase III et IV (69.59-100 m)	4,00E-01	1,00E-03	1,32E-02	-29,55
38072	X : 338453 m Y : 7642725 m	64,79	119	52,63	Phase III et IV (60.7-112.7 m)	2,00E-02	3,00E-03	3,80E-04	-54,21
38081	X : 337733 m Y : 7642901 m	61,8	190	109	Phase IV (81-190 m)	1,50E+0	3,00E-03	1,38E-02	-128,2
38063	X : 337243 m Y : 7643559 m	67,1	158,5	100	Phase IV PN (7-97m) Phase II (97-158m)	2,00E-03	2,00E-05	2,00E-05	-91,4
38071	X : 336727 m Y : 7642759 m	45,28	75	33	Phase IV PN	1,00E-02	1,00E-03	3,03E-04	-29,72
38073	X : 336591 m Y : 7643982 m	59,98	120	30	Phase IV PF	2,00E-02	6,00E-04	6,67E-04	-60,02
38068	X : 336126 m Y : 7642928 m	33,67	80	44,89	Alluvions (35-41m) Phase III et IV Alluvions (60-62m)	5,30E-03	2,00E-04	1,18E-04	-46,33

La répartition spatiale des perméabilités calculées rend compte de l'hétérogénéité exceptionnelle de l'aquifère de Pierrefonds. Il apparaît que les formations géologiques de même nature présentent souvent des faciès différents (degré de fissuration, degré d'altération...) faisant évoluer leurs propriétés hydrodynamiques : les basaltes récents en l'occurrence s'avèrent plus perméables sur l'axe de la paléo-vallée que dans les autres secteurs. D'autre part, les perméabilités des alluvions paraissent contrôlées non seulement par le degré d'altération lié à leur durée d'exposition atmosphérique, mais également par leur granulométrie.

Enfin, la répartition spatiale des coulées boueuses (faciès lahars parfois) et des tufs pyroclastiques (faciès pouzzolanes ou dépôts cendreaux) n'est pas connue de façon précise. Globalement, les coulées boueuses sont essentiellement interceptées en rive gauche de La Rivière Saint-Etienne, tandis que les tufs pyroclastiques sont recoupés fréquemment dans le secteur sud du domaine modélisé. De manière générale, ces formations sont considérées comme très peu perméables.

Le tableau suivant présente les valeurs de perméabilités assignées aux différentes formations géologiques (Tableau 4.2). Une valeur d'anisotropie verticale d'une puissance de 10 est appliquée pour isoler les compartiments géologiques identifiés ; ainsi, $k_x = k_y$ et $k_z = 0.1 \cdot k_x$.

Tableau 4.2 : Perméabilités appliquées aux mailles du modèle.

couches	lices	formation géologique	k_x [m/s]	remarques
1	1	Coulées boueuses	2,5E-05	Rive gauche de la Rivière Saint-Etienne
		Alluvions Rivière Saint-Etienne	5,0E-04	Epaisseur variable
2	2 et 5	Coulées boueuses	2,5E-05	Rive gauche de la Rivière Saint-Etienne
		Basaltes de phase III et IV	3,0E-04	8,0E-04 sur l'axe de la paléo-vallée
	3	Basaltes de phase III et IV	3,0E-04	1,4E-02 sur l'axe de la paléo-vallée
	4	Basaltes de phase III et IV	3,0E-04	4,6E-03 en rive gauche de paléo-vallée
	6	Basaltes de phase III et IV	1,0E-04	1,4E-02 sur l'axe de la paléo-vallée
	3	7	Alluvions anciennes	1,0E-04
4	8	Paléosol très altéré	1,0E-06	Limite supposée continue
5	9 à 12	Basaltes anciens de phase II	1,0E-05	Unités probablement très altérées

Au vu de la complexité du milieu modélisé, il est important de noter que malgré les efforts d'intégration des données de terrains disponibles, le modèle demeure une représentation simplifiée de la réalité.

4.4.3. Autres paramètres

Les autres paramètres appliqués aux mailles du modèle sont généralement issus de la bibliographie sur les écoulements densitaires :

- Le rapport des densités entre l'eau douce et l'eau de mer est de 0.025.
- La porosité cinématique pour le transfert de masse est fixée à 20%. Ce paramètre est appliqué de manière homogène sur tout le modèle.
- La diffusion moléculaire est maintenue à $1 \cdot 10^{-9}$ m²/s (Diersch 2009).
- Les dispersivités longitudinales et transversales sont respectivement fixées à 500 et 50 m. La littérature préconise de maintenir un rapport de 10 entre ces deux valeurs (Guyonnet and Neville 2004; Werner and Gallagher 2006).

5. Calage du modèle en régime permanent

Dans le cas complexe des écoulements en densité variable, les calages de la piézométrie et des salinités se font de façon simultanée. Le travail de calage consiste à paramétrer le modèle pour qu'il reproduise de la façon la plus fidèle les observations de terrain.

5.1. Calage de la piézométrie

Le calage est réalisé en tenant compte des données observées et mesurées sur le terrain, notamment les flux et les perméabilités. Cette concordance entre les valeurs observées et les valeurs mesurées peut être améliorée en réitérant les simulations et en intégrant les nouvelles données de terrain issues notamment de la géophysique hélicoptérée.

La carte piézométrique modélisée en période d'étiage restitue assez fidèlement l'intumescence piézométrique observée en rive gauche de la Rivière Saint-Etienne et la dépression piézométrique observée sur l'axe de la paléo-vallée (Figure 5.1). Cependant, le gradient hydraulique modélisé près du littoral reste trop élevé par rapport aux observations sur l'axe de ce chenal perméable.

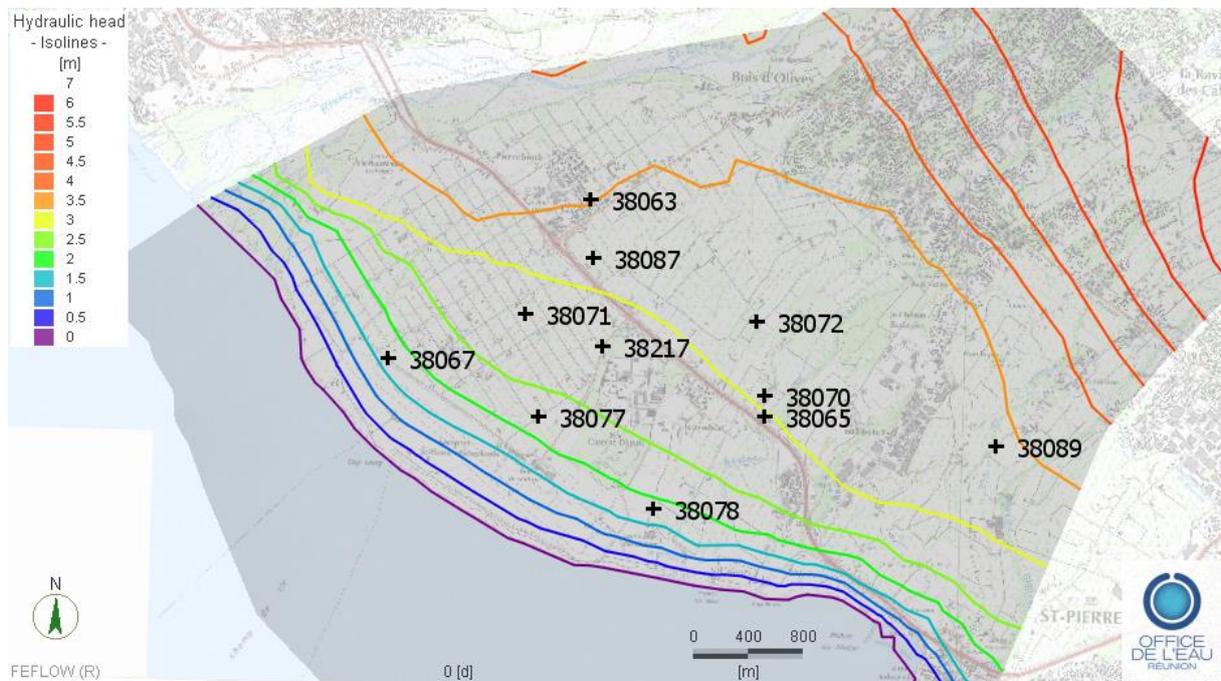


Figure 5.1 : Carte piézométrique calculée par le modèle de Pierrefonds

Globalement, il apparaît que les piézométries calculées dans la zone amont du domaine modélisé sont sous-estimées par rapport aux observations. C'est le cas des piézomètres 38063 Pierrefonds Village et 38089 Ravine Blanche. L'erreur importante constatée sur le piézomètre 38063 Pierrefonds Village peut s'expliquer par le bombement du substratum observé au droit de ce forage (Pecci et al. 2002) et une influence des coulées boueuses décrites en amont de l'ouvrage.

A l'inverse, les piézométries calculées dans la zone littorale semblent surestimées en raison du gradient trop élevé observé précédemment. L'erreur importante observée sur le piézomètre 38070 peut s'expliquer par un contexte hydrodynamique très particulier ou probablement un défaut de nivellement. L'écart calculé entre les valeurs observées et les valeurs modélisées reste inférieur à 40% (Tableau 5.1).

Tableau 5.1 : Ecart calculés entre la piézométrie observée et modélisée

Piézomètre	charge observée [m NGR]	Charge modélisée [m NGR]	Ecart [%]	Remarque
38063	5,6	3,5	38	Substratum peu perméable
38065	2,81	2,9	2	
38067	2,89	2	16	
38070	1,29	2,9	29	défaut de nivellement
38071	2,49	2,85	6	
38077	0,84	1,9	19	
38078	1,25	1,83	10	
38087	2,72	3	5	
38089	4,72	3,44	23	
38217	1,39	2,79	25	

Mise à part les ouvrages 38063 et 38070 qui présentent des écarts assez importants, l'erreur observée sur les autres piézomètres reste inférieure à 25%. Les meilleures concordances sont observées sur les piézomètres situés dans la zone intermédiaire, avec des écarts inférieurs à 10% sur certains points d'observation (Figure 5.2).

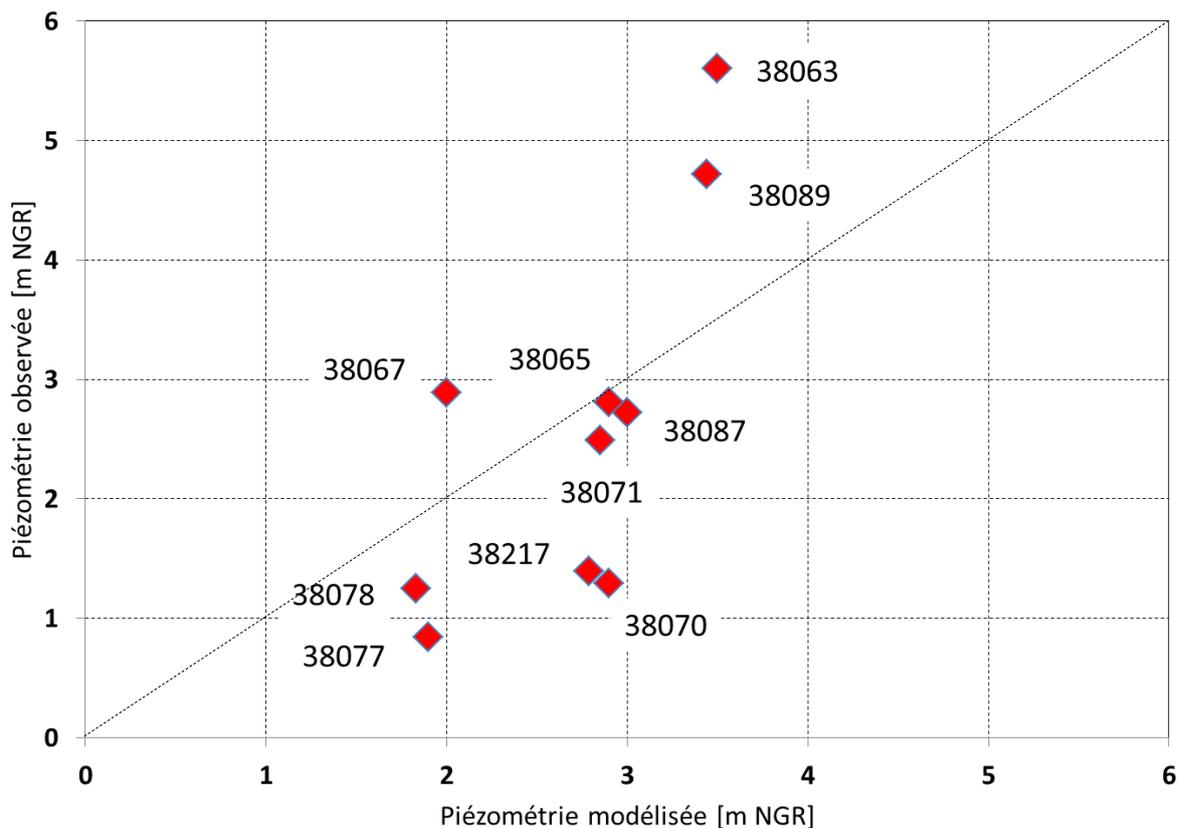


Figure 5.2 : Résultats du calage de la piézométrie sur le modèle de Pierrefonds

Une amélioration de ce calage peut être envisagée en ajustant la répartition spatiale des perméabilités sans pour autant modifier les valeurs de ce paramètre. Cet ajustement permettra d'approcher notamment l'extension latérale des coulées boueuses.

5.2. Calage des salinités

Le calage des salinités est effectué en considérant les conductivités électriques mesurées dans les piézomètres de Pierrefonds, les coupes géophysiques obtenues par tomographie de résistivité électrique en pôle-dipôle et les cartes de résistivités électriques obtenues par géophysique héliportée. Ces données mettent en évidence ;

- i) un épaissement de la nappe d'eau douce en rive gauche de Rivière Saint-Etienne jusqu'à -150 m NGR à 500 m du trait de côte et
- ii) une intrusion marine canalisée dans l'axe de la paléo-vallée, s'étendant jusqu'à 1000 m de la ligne de côte au-delà de -25 m NGR.

L'extension de cette intrusion saline est matérialisée par une ligne discontinue épaisse sur la figure suivante (Figure 5.3).

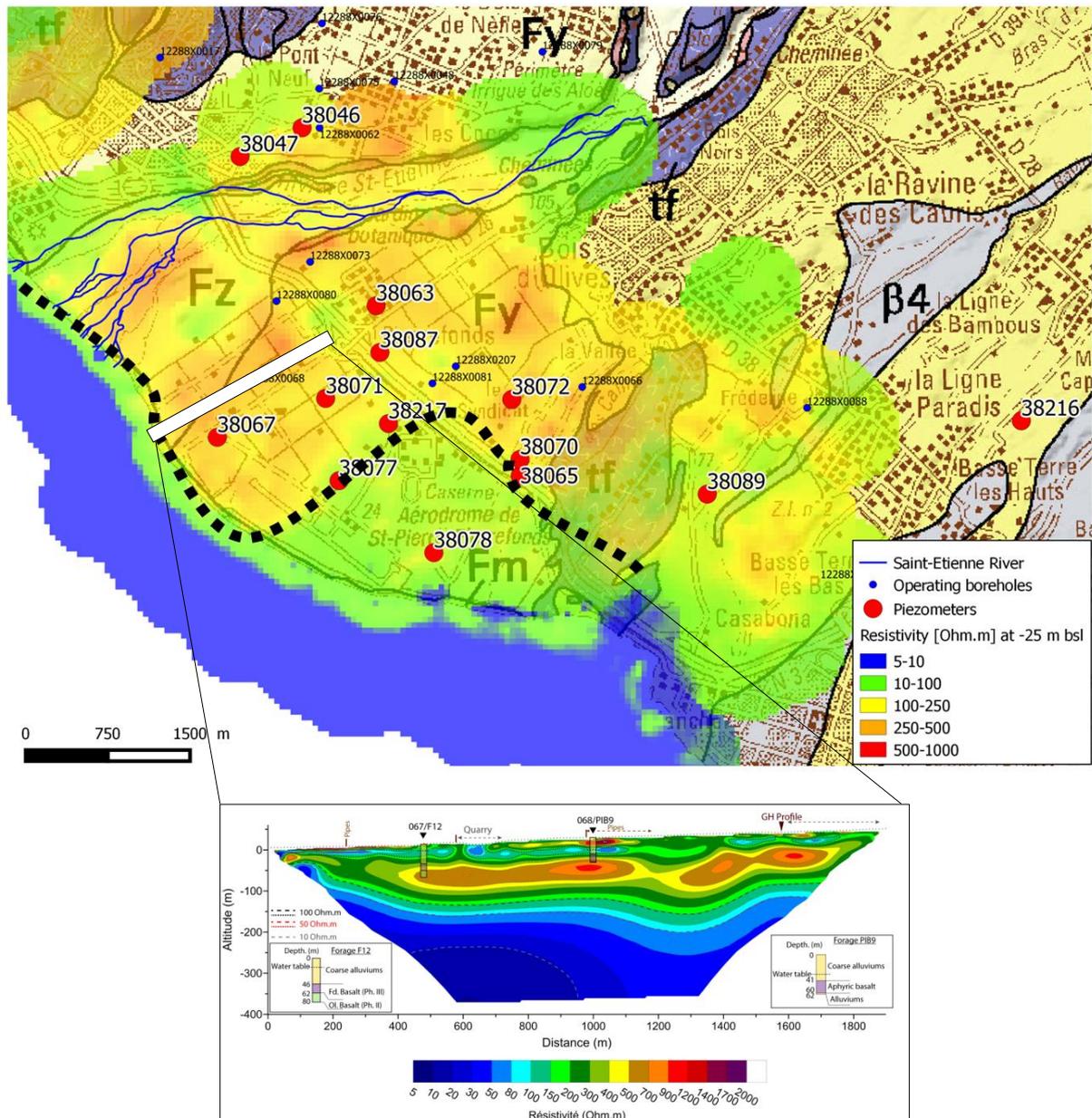


Figure 5.3 : Carte des résistivités électriques de Pierrefonds à -25 m NGR et coupe géo-électrique perpendiculaire à la côte.

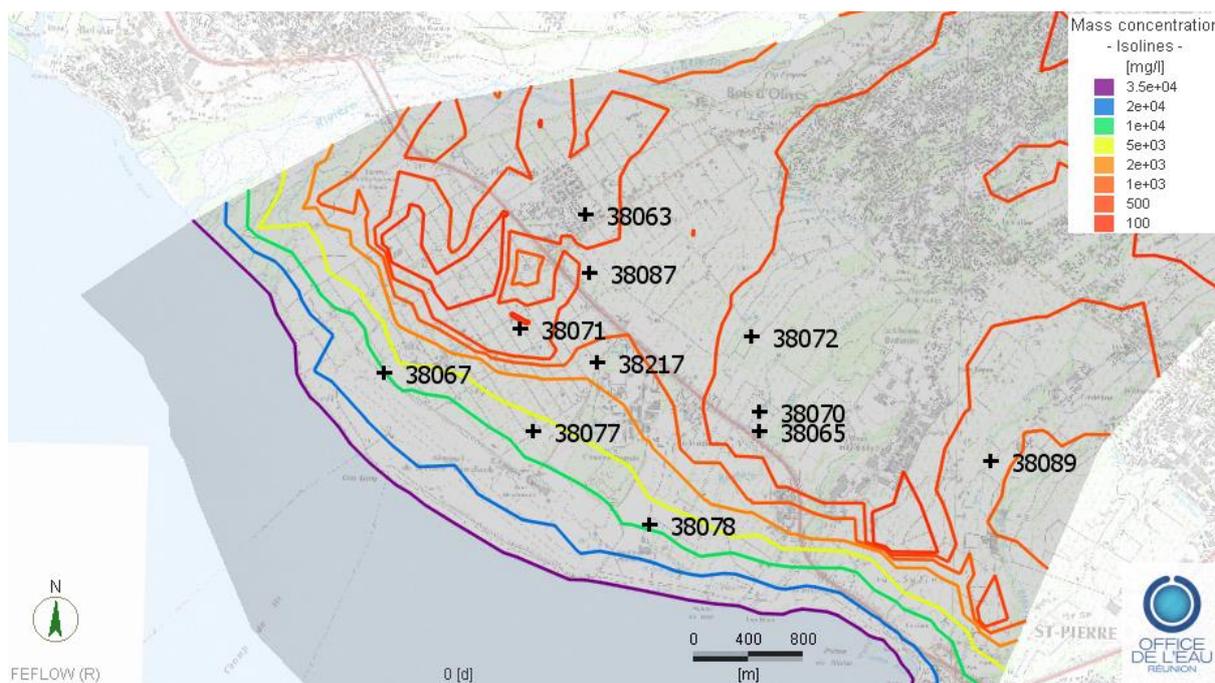


Figure 5.4 : Carte des salinités calculées par le modèle de Pierrefonds à la base des alluvions récentes [Couche 1] à environ -25 m NGR.

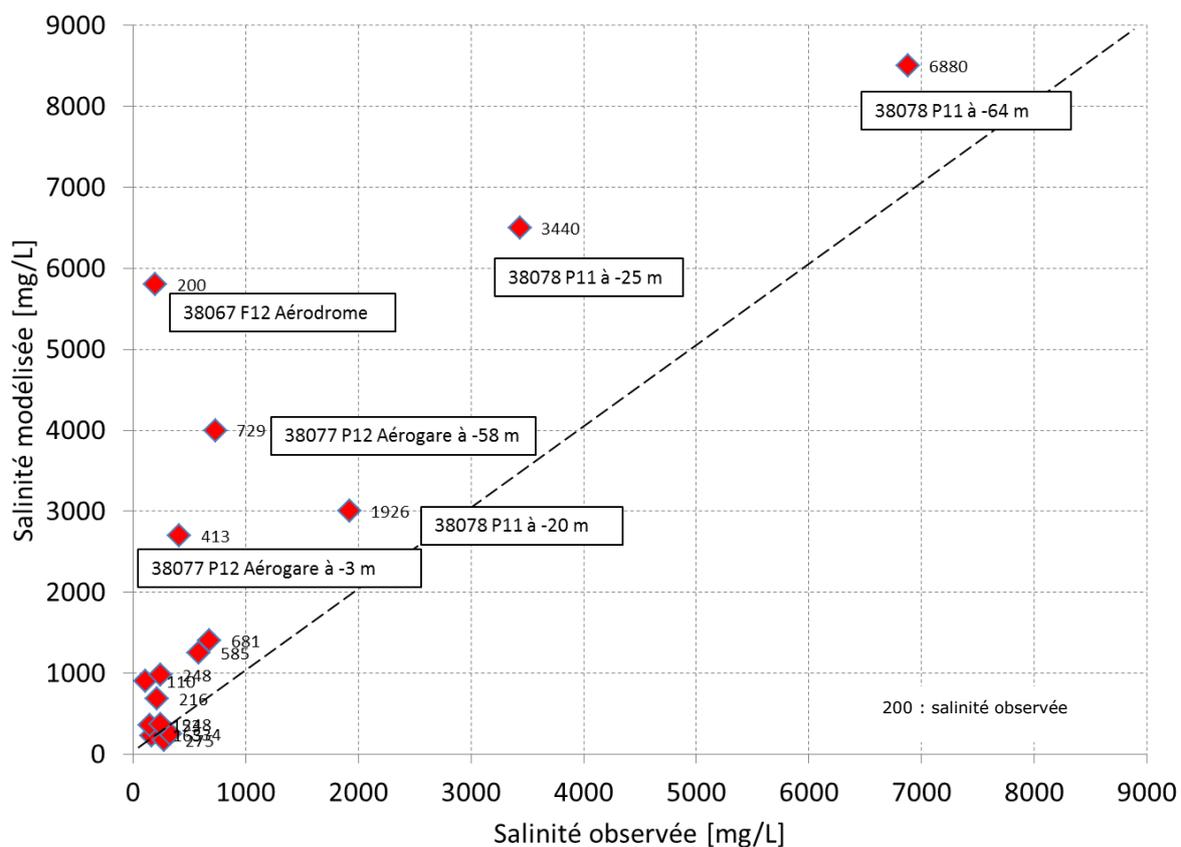


Figure 5.5 : Résultats du calage des salinités sur le modèle de Pierrefonds

Le modèle restitue correctement l'allure générale de l'intrusion marine imagée par les méthodes directes de mesures en forages et les méthodes géophysiques indirectes. A l'instar des méthodes d'investigations mises en œuvre, le modèle reproduit une intrusion marine à géométrie latérale asymétrique.

Le secteur situé en rive gauche de la Rivière Saint-Etienne affiche des salinités d'eau douce jusqu'à -150 m NGR. A l'inverse, l'intrusion saline se dessine clairement sur l'axe de la paléo-vallée et s'étend dans cette zone, jusqu'à 1000 m de la ligne de côte dans les basaltes récents et les alluvions anciennes (Figure 5.4).

Le modèle a tendance à surestimer les salinités observées dans les piézomètres sur différentes profondeurs. Les erreurs importantes observées peuvent être expliquées par :

- les décalages parfois constatés entre la profondeur du capteur dans le forage et la profondeur de la 'slice' correspondante dans le modèle
- L'erreur liée à la formule de conversion utilisée pour transformer les conductivités électriques mesurées en salinités
- L'erreur associée à la répartition des charges hydrauliques dans le modèle

Le piézomètre 38067 Aérodrome présente l'écart le plus important entre la salinité observée et la salinité modélisée, avec un rapport de 29 entre ces deux valeurs. Ce résultat s'explique par sa proximité au trait de côte et par sa charge hydraulique qui est largement sous-estimée par le modèle.

Mis à part ce piézomètre nécessitant un effort de calage particulier, les autres points d'observation présentent des rapports modèle/observation compris entre 0,6 et 8,2. Les points sur lesquels une intrusion marine a été observée (salinité > 344 mg/L) affichent des salinités modélisées supérieures à 1000 mg/L (Tableau 5.2).

Tableau 5.2 : Rapports calculés entre les salinités observées et modélisées

Code station	Prof [m NGR]	Conductivité électrique minimum [μ S/cm]	Conductivité électrique maximum [μ S/cm]	Salinité moyenne observée* [mg/L]	Salinité modélisée [mg/L]	rapport modèle/observation	slice
38063	-62	310	330	216	685	3,2	5
38065	-8	225	300	165	232	1,4	3
38067	-50	286	290	200	5800	29,1	3
38070	-2	300	1200	275	176	0,6	3
38071	-5	470	500	334	250	0,7	3
38072	-30	220	240	153	353	2,3	4
38077	-3	550	1700	413	2700	6,5	2
	-58	600	1800	729	4000	5,5	3
38078	-20	1000	6700	1926	3000	1,6	2
	-25	1000	8700	3440	6500	1,9	3
	-64	4000	11200	6880	8500	1,2	4
38087	-15	358	376	248	372	1,5	3
38089	-40	142	158	110	900	8,2	4
38217	-1	350	370	248	974	3,9	3
	-45	750	950	585	1250	2,1	4
	-95	900	1000	681	1400	2,1	5

*valeur calculée à partir de la conductivité électrique moyenne observée sur une année hydrologique

L'amélioration du calage de la piézométrie devra permettre de réajuster en conséquence les salinités modélisées, qui restent encore largement pessimistes par rapport aux mesures effectuées dans les différents points d'observation (Figure 5.5).

6. Résultats et discussions

Les résultats préliminaires de ce travail de modélisation révèlent la complexité du milieu modélisé et mettent en avant l'importance des données de terrains pour améliorer la représentativité du modèle numérique. L'approche intégrée mise en œuvre a permis de prendre en compte plusieurs caractéristiques hydrogéologiques pertinentes dans la phase d'implémentation de l'outil de simulation. Cette démarche méthodologique a fait l'objet d'une communication orale au congrès scientifique annuel de l'Association Internationale des Hydrogéologues (Annexe 2).

Au stade actuel, le modèle permet de reproduire la géométrie générale du biseau salé sur la nappe côtière de Pierrefonds et restitue une intrusion marine plus marquée observée dans la zone centrale de Pierrefonds sur l'axe d'une paléo-vallée comblée par des coulées plus perméables.

L'interface saline présente une forme tentaculaire caractérisée par des indentations au niveau des zones les plus perméables associées à la présence de basaltes plus récents (Figure 6.1). La géométrie de l'intrusion marine peut être visualisée en considérant comme limite de salinité pour l'eau potable l'iso-surface 1000 mg/L (WHO 2003).

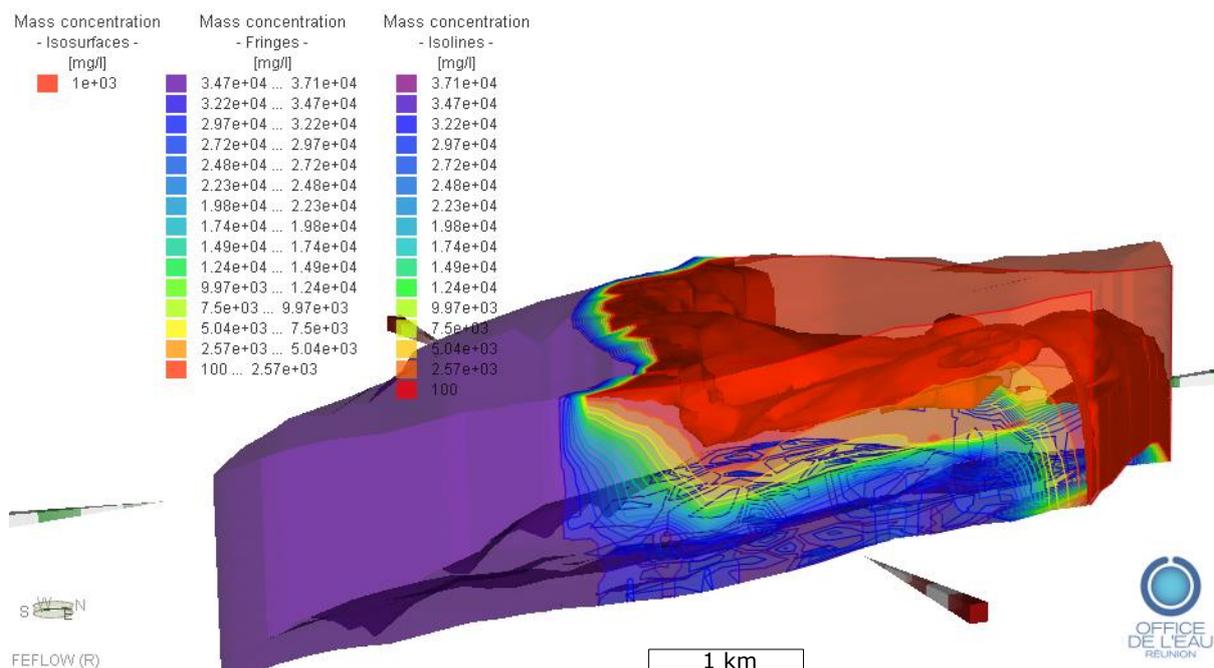


Figure 6.1 : Visualisation de la géométrie du biseau salé dans la nappe côtière de Pierrefonds

Le bilan total du modèle est équilibré. Les flux entrants et sortants sont respectivement de $-2,52982 \cdot 10^7$ et $+2,52968 \cdot 10^7$, avec un écart limité à $-490 \text{ m}^3/\text{jour}$.

Cependant, des erreurs de calculs liées à des distorsions numériques subsistent encore, notamment dans les horizons les plus profonds qui sont également les moins perméables. Par ailleurs, le calage effectué n'est pas considéré satisfaisant en l'état pour initier une simulation en régime transitoire. Les résultats préliminaires suggèrent qu'une amélioration du calage est encore nécessaire pour approcher davantage les observations de terrain effectuées notamment par les méthodes géophysiques.

Ce travail de perfectionnement concerne surtout les points et secteurs suivants:

- Une répartition des perméabilités dans le secteur amont du domaine modélisé où le modèle sous-estime la piézométrie. Une extension des coulées boueuses dont les limites restent méconnues peut expliquer le décalage observé.
- Un ajustement des perméabilités en zone littorale où le modèle surestime la piézométrie et la salinité. L'intégration des données électromagnétiques permettra d'affiner le calage des salinités en zone côtière.

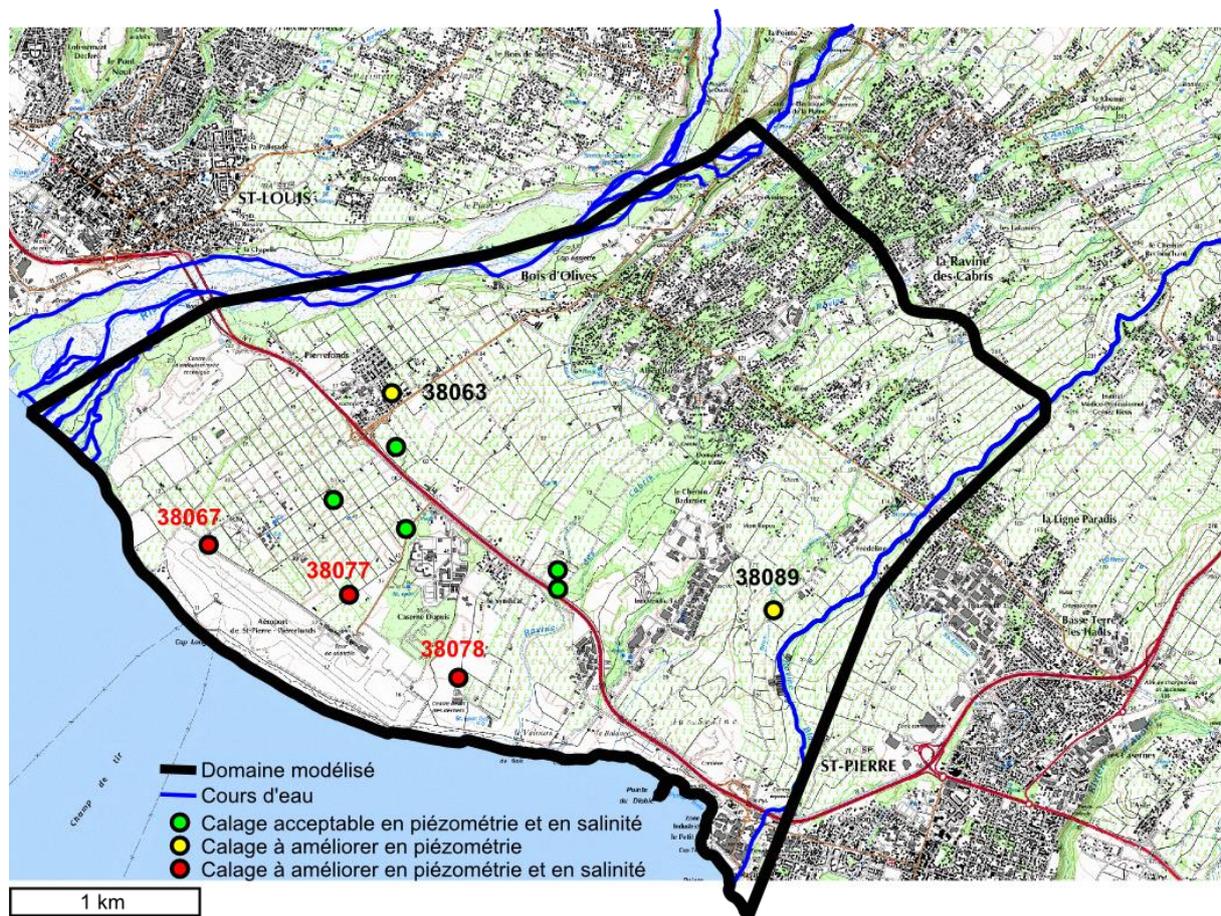


Figure 6.2 : Localisation des secteurs où le calage reste à améliorer

Enfin, la zone centrale ciblée par les projets de mise en exploitation et d'augmentation des prélèvements affiche des résultats de calage assez satisfaisants. Les simulations des différents scénarii d'exploitation peuvent ainsi être envisagées.

7. Conclusions et perspectives

Le modèle numérique obtenu à ce stade est suffisamment robuste pour envisager, après amélioration du calage, des simulations en régime transitoire. En effet, les écarts constatés entre les résultats des dernières simulations restent très faibles et les temps de calcul nécessaires à l'obtention d'une solution numérique réaliste selon les critères de convergence définis sont désormais acceptables.

La version du modèle en régime permanent reproduit les tendances générales observées sur le terrain aussi bien en termes de piézométrie que de salinité.

En perspective, une amélioration du zonage des perméabilités sera apportée pour parfaire la représentativité du modèle. Cette condition est indispensable pour optimiser et justifier l'exploitation de l'outil de gestion. Les simulations prévues en régime transitoire consisteront à tester plusieurs de scénarii d'exploitation visant à répondre à l'augmentation des prélèvements. Il s'agira ainsi de simuler les effets liés à une augmentation du débit de pompage sur les ouvrages existants ou une mise en exploitation de nouveaux forages.

Cette phase de la modélisation sera menée en considérant les prévisions pluriannuelles des gestionnaires de la ressource en eau et des différentes entités impliquées dans l'exploitation de la nappe côtière. A terme, l'outil numérique devra permettre la mise en place d'un plan de gestion durable de la ressource qui sera basé sur la conservation du bon état qualitatif de la masse d'eau et le maintien de l'équilibre entre les flux entrants et les prélèvements. Une fois opérationnel, cet outil sera mis à disposition des gestionnaires qui pourront évaluer l'impact de l'exploitation sur l'évolution quantitative et qualitative de la ressource et proposer des pistes d'améliorations visant à répondre à des attentes plus spécifiques.

Remerciements

Les auteurs du présent rapport tiennent à remercier en premier lieu Bertrand Aunay, Jean-Michel Baltassat, Jean-Christophe Maréchal, Sandra Lanini, Pierre-Alexandre Reninger et Marc Dumont du BRGM pour leur implication dans ce projet et pour leurs remarques très constructives durant la phase d'interprétation des données géophysiques, les étapes d'élaboration du modèle numérique et la relecture du rapport d'étude.

Nous remercions également Éric Delcher, Marie Chaput et Florient Durand du bureau d'études Stratagem974 pour leur collaboration et leur expertise dans l'acquisition des données géophysiques électriques.

Nous remercions Isabelle Rochet de la Cellule de Veille Hydrologique de la DEAL Réunion pour la transmission du rapport d'études sur l'estimation du coefficient de ruissellement dans le secteur de la Ravine des Cabris et de la Ravine Blanche.

Nous remercions Frédéric Mirand et Éric Chabanne de la SAPHIR, David Brunel et Claude Le Guidec de VEOLIA ainsi que Cécile Aguilard et Rachel Mussard de l'Agence Régionale de la Santé [ARS] pour la transmission des analyses chimiques effectuées sur les forages de Pierrefonds.

Nous remercions Jean-Lambert Join, Laurent Michon, Guillem Barruol, Anthony Finizola et Vincent Famin du Laboratoire des Géosciences de l'Université de La Réunion pour leur analyse et leurs commentaires au cours du séminaire de présentation de l'approche mise en œuvre afin d'optimiser l'intégration de l'information géologique.

Enfin, nous remercions Emmanuel Cordier de l'Observatoire des Sciences de l'Univers [OSU Réunion] pour son support technique sur l'utilisation de T-Tide pour l'analyse du signal piézométrique et Jean-Christophe Comte de l'Université d'Aberdeen [Ecosse] pour ses conseils et son expertise sur la modélisation des écoulements en densité variable.

8. Références bibliographiques

- Ackerer P, Younes A (2008) Efficient approximations for the simulation of density driven flow in porous media. *Adv Water Resour* 31:15–27.
- Ackerer P, Younes A, Mose R (1999) Modeling variable density flow and solute transport in porous medium: 1. Numerical model and verification. *Transp Porous Media* 35:345–373.
- Bachelery P, Nehlig P, Mairine P, et al (2006) Carte géologique de La Réunion à l'échelle 1/100 000.
- Banton O, Bangoy LM (eds) (1997) *Hydrogéologie: multiscience environnementale des eaux souterraines*. AUPELF-UREF, Montréal
- Bobba AG (1993) *Mathematical Models for Saltwater Intrusion in Coastal Aquifers*.
- Bourhane A, Comte J-C, Join J-L, Mara T (2014) The role of 3D volcanic structures on seawater intrusion in Grande Comore Island inferred from geophysical investigations and groundwater modelling. In: *Proceedings of the 23rd Salt Water Intrusion Meeting*. Helga Wiederhold, Johannes Michaelsen, Klaus Hinsby, Broder Nommensen, Germany,
- Boussinesq J (1877) *Essai sur la théorie des eaux courantes*. Mém. Acad. Sci. Paris, Imprimerie Nationale, Paris, 252 pp. 252.
- Cary L, Petit V, Lucas C, Lions J (2012) Détermination des valeurs seuils de quatre polluants spécifiques pour la définition de l'état des eaux souterraines de La Réunion. BRGM, La Réunion
- Chaput M, Durand F, Delcher E (2015) *Etude d'imagerie géophysique du sous-sol sur le secteur de Pierrefonds Commune de Saint-Pierre - La Réunion*. STRATAGEM974, La Réunion
- Cordier E, Lézé J, Join J-L (2013) Natural tidal processes modified by the existence of fringing reef on La Reunion Island (Western Indian Ocean): Impact on the relative sea level variations. *Cont Shelf Res* 55:119–128. doi: 10.1016/j.csr.2013.01.016
- Cuet P (1989) *Influence des résurgences d'eaux douces sur les caractéristiques physicochimiques et métaboliques de l'écosystème récifal à La Réunion (océan Indien)*. Thèse 3^o Cycle, Aix-Marseille-III
- Daesslé M, Gandolfi JM (1987a) *Reconnaissance du biseau salé par géophysique électrique. Optimisation de l'implantation du forage de Pierrefonds-littoral (commune de Saint Pierre)*. BRGM
- Daesslé M, Gandolfi JM (1987b) *Reconnaissance du biseau salé par géophysique électrique. Optimisation de l'implantation du forage de Pierrefonds-littoral (commune de Saint Pierre)*. BRGM
- Daesslé M, Verdier P (1988) *Implantation de forages. Géophysique complémentaire en rive gauche de la Rivière Saint-Etienne*. BRGM

- Diersch HJG (2009) Reference manual for FEFLOW – finite element subsurface flow and transport simulation system. DHI-WASY, Berlin
- Diersch HJG, Kolditz O (2002) Variable-density flow and transport in porous media: approaches and challenges. *Adv Water Resour* 25:899–944.
- Dubreuil G (1984a) Etude géophysique par sondages électriques dans la plaine du Bras de Cilaos. BRGM
- Dubreuil G (1984b) Etude géophysique par sondages électriques dans la plaine du Bras de Cilaos. BRGM
- Duchamps JM, Daesslé M (1989) Reconnaissance de la ressource en eau souterraine de la région de Saint-Pierre : complément d’investigation par sondages audio-magnétotelluriques. BRGM
- Elder JW (1967) Transient convection in a porous medium. *J Fluid Mech* 27:609. doi: 10.1017/S0022112067000576
- Ferris J (1951) Cyclic fluctuations of water level as a basis for determining aquifer transmissibility: Bruxelles, Assoc. Int. Hydrol. Sci., Assem. Gen., v. 2, 148 p. Bruxelles, p 148p
- Folio J-L (2006) Modélisation de la ressource en eau souterraine sur le secteur de Pierrefonds - Simulation d’impacts de pompages par modélisation mathématique. Office de l’Eau
- Frind EO (1982) Seawater intrusion in continuous coastal aquifer-aquitard systems. *Adv Water Resour* 5:89–97.
- Furet M, Cordonnier T, Bonnier J (2012) Modélisation numérique en densité variable du système aquifère “Gol-Coco-Pierrefonds” au sud-ouest de La Réunion. Office de l’eau Réunion, La Réunion
- Girard JF, Miehé JM, Coppo N, Aunay B (2008) Méthodologie d’imagerie électrique haute résolution des aquifères côtiers en milieu volcanique à La Réunion. BRGM
- Guo W, Langevin CD (2002) A Computer Program for Simulation of Three-Dimensional Variable-Density Ground-Water Flow. In: *Techniques of Water-Resources Investigations Book 6, Chapter A7*, 77 p.
- Guyonnet D, Neville C (2004) Dimensionless analysis of two analytical solutions for 3-D solute transport in groundwater. *J Contam Hydrol* 75:141–153. doi: 10.1016/j.jconhyd.2004.06.004
- Henry HR (1964) Effects of dispersion on salt encroachment in coastal aquifers. *Water Supply Pap* 1613:70–84.
- Huyakorn PS, Andersen PF, Mercer JW, White HO (1987) Saltwater intrusion in aquifers: Development and testing of a three-dimensional finite element model. *Water Resour Res* 23:293–312. doi: 10.1029/WR023i002p00293
- Join JL, Daesslé M, Stieltjes L (1988) Reconnaissances de la ressource en eau souterraine de la région de Saint-Pierre : approches géologique et géophysique électrique. BRGM

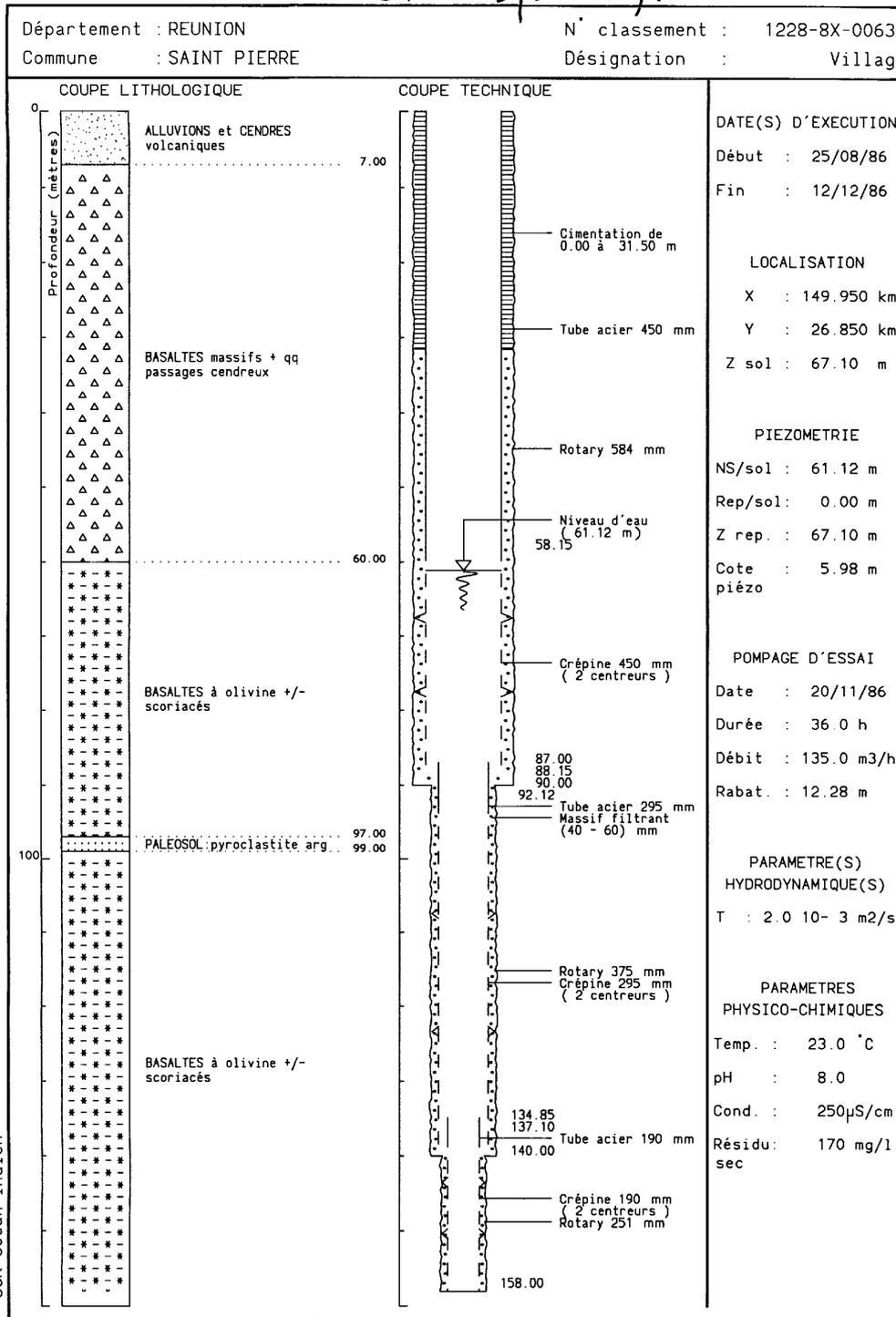
- Kloppmann W, Bourhane A, Schomburgk S (2013) Groundwater Salinization in France. *Procedia Earth Planet Sci* 7:440–443. doi: 10.1016/j.proeps.2013.03.225
- Kluska JM (1997) Évolution magmatique et morpho-structurale du Piton des Neiges au cours des derniers 500 000 ans. Thèse Univ. Paris XI, 125 p.
- Lézé J (2012) Impact des forçages océaniques sur les nappes côtières : cas de l'Ermitage, île de La Réunion. Thèse doctorat, Université de la Réunion
- Martel S (2014) Estimation du coefficient de ruissellement de la Planète du Tampon – Etude la ravine des Cabris et la ravine Blanche. DEAL - Service SPRINR/CVH, La Réunion
- McDougall (1971) The geochronology and evolution of the young volcanic island of Réunion, Indian Ocean. *Geochim Cosmochim Acta* p. 261–288.
- Mulligan AE, Langevin C, Post VEA (2011) Tidal Boundary Conditions in SEAWAT. *Ground Water* 49:866–879. doi: 10.1111/j.1745-6584.2010.00788.x
- Oltean C, Bues MA (2002) Infiltration of salt solute in homogeneous and saturated porous media - An analytical solution evaluated by numerical simulations. *Transp Porous Media* 48:61–78.
- Oude Essink GHP (2001) Salt Water Intrusion in a Three-dimensional Groundwater System in The Netherlands: A Numerical Study. *Transp Porous Media* 43:137–158. doi: 10.1023/A:1010625913251
- Pawlowicz R, Beardsley B, Lentz S (2002) Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. *Comput Geosci* 28:929–937. doi: 10.1016/S0098-3004(02)00013-4
- Pecci R, Antémi E, Vidart B (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. ANTEA
- Petit V, Dewandel B, Charlier J-B, et al (2013) Amélioration de la connaissance hydrogéologique de l'aquifère côtier du Gol Rapport intermédiaire. BRGM, La Réunion
- Rocher P (1988) Contexte volcanique et structural de l'hydrothermalisme récent dans le massif du Piton des neiges (île de La Réunion): étude détaillée du cirque de Salazie. s.n.
- Rodier J (1984) L'analyse de l'eau: eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer : chimie, physico-chimie, bactériologie, biologie. Dunod, Montrouge
- Saint-Ange F, Savoye B, Michon L, et al (2011) A volcanoclastic deep-sea fan off La Réunion Island (Indian Ocean): Gradualism versus catastrophism. *Geology* 39:271–274. doi: 10.1130/G31478.1
- Sanchez-Ubeda JP, Calvache ML, Lopez-Chicano M, Duque C (2014) Tide cleaning of heads in unconfined coastal aquifers via processing of signal wave components. In: *Proceedings of the 23rd Salt Water Intrusion Meeting*. Helga Wiederhold, Johannes Michaelsen, Klaus Hinsby, Broder Nommensen, Germany,

- Sisavath E, Babonneau N, Saint-Ange F, et al (2011) Morphology and sedimentary architecture of a modern volcanoclastic turbidite system: The Cilaos fan, offshore La Réunion Island. *Mar Geol* 288:1–17. doi: 10.1016/j.margeo.2011.06.011
- Verdier P, Stieltjes L (1988) Implantation de forages en rive droite de la Rivière Saint-Etienne : interprétation d'une campagne de géophysique électrique. BRGM
- Voss CI (1999) USGS SUTRA Code — History, Practical Use, and Application in Hawaii. In: Bear PJ, Cheng PAH-D, Sorek PS, et al. (eds) *Seawater Intrusion in Coastal Aquifers — Concepts, Methods and Practices*. Springer Netherlands, pp 249–313
- Werner AD, Gallagher MR (2006) Characterisation of sea-water intrusion in the Pioneer Valley, Australia using hydrochemistry and three-dimensional numerical modelling. *Hydrogeol J* 14:1452–1469. doi: 10.1007/s10040-006-0059-7
- WHO (2003) Total dissolved solids in drinking-water. Background document for preparation of WHO Guidelines for drinking-water quality. (WHO/SDE/WSH/03.04/16). World Health Organization, Geneva

9. Annexes

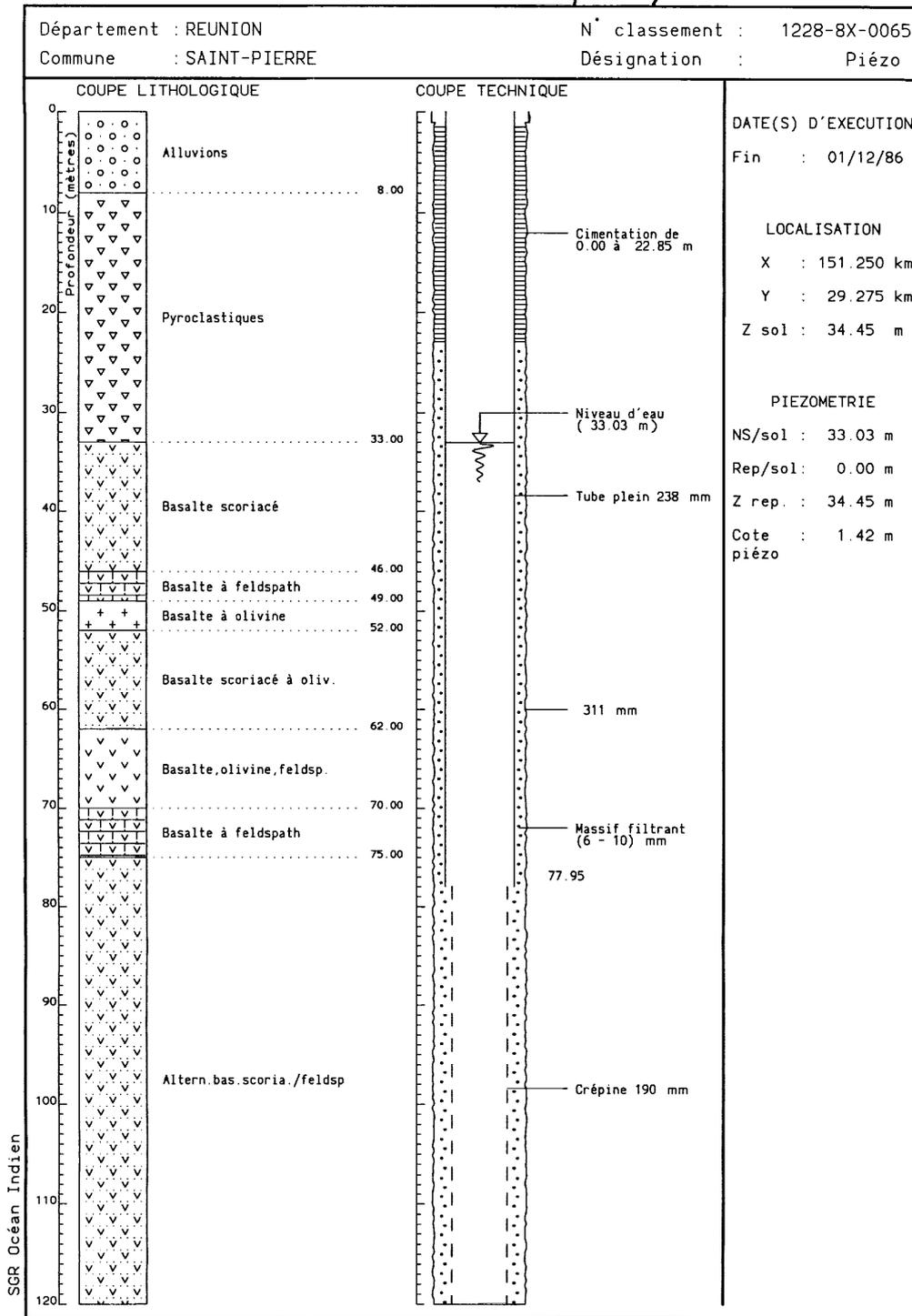
Annexe 1 : Logs géologiques des forages de Pierrefonds

12288X0063/PIB-7/RC



SGR Océan Indien

12288X0065 / F15 / RC



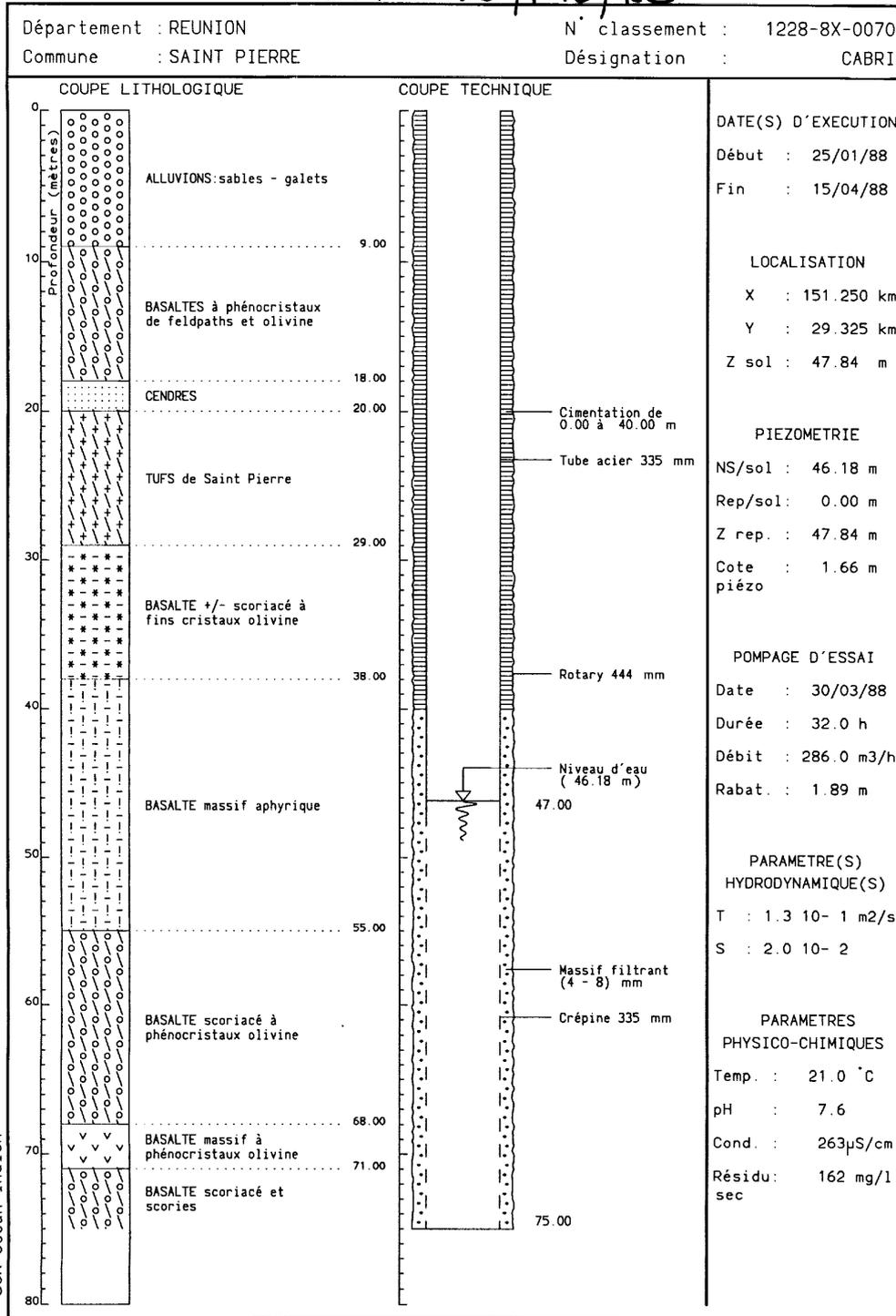
1288X0067

SAINT-PIERRE - PIERREFONDS

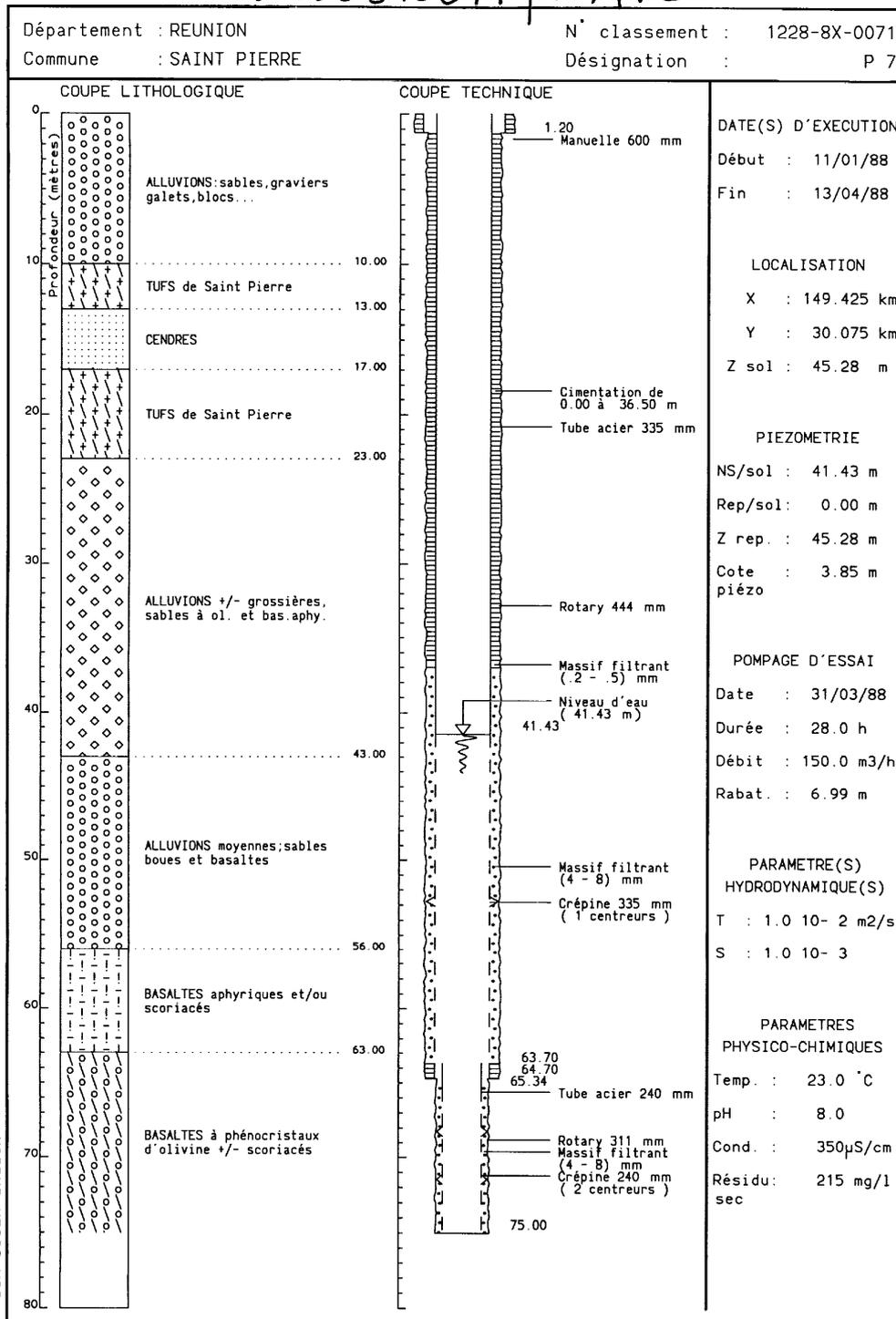
REF. 3 - 8 F12

Outil	Prof. en mètres	Log	Nature des terrains	Puissance en m.	
Tricone 12"1/4	0		Alluvions hétérogènes avec passée sableuse entre 36,00 et 46,00	46	
	34,40				
Carottage 8"					
	36,00				
Tricone 7"5/8	46		Basalte. à feldspath microlites	9	
	55		Basalte à feldspath et Basalte scoriacé	4	
	59			3	
	62			7	
	69			Basalte à olivine	7
	80			Basalte à olivine et Basalte scoriacé	11

12288X0070 / F10 / RC

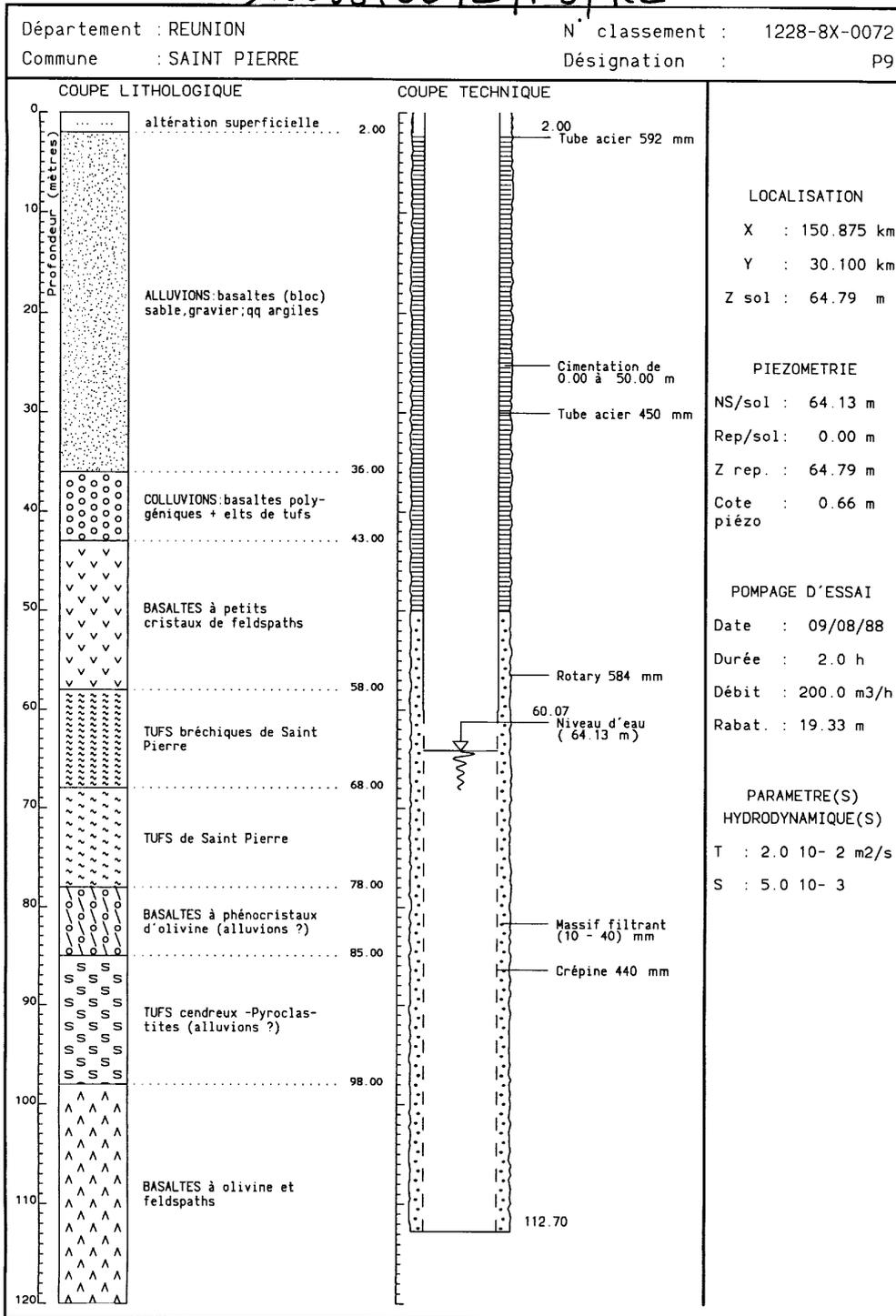


12288X0071 / F71RC



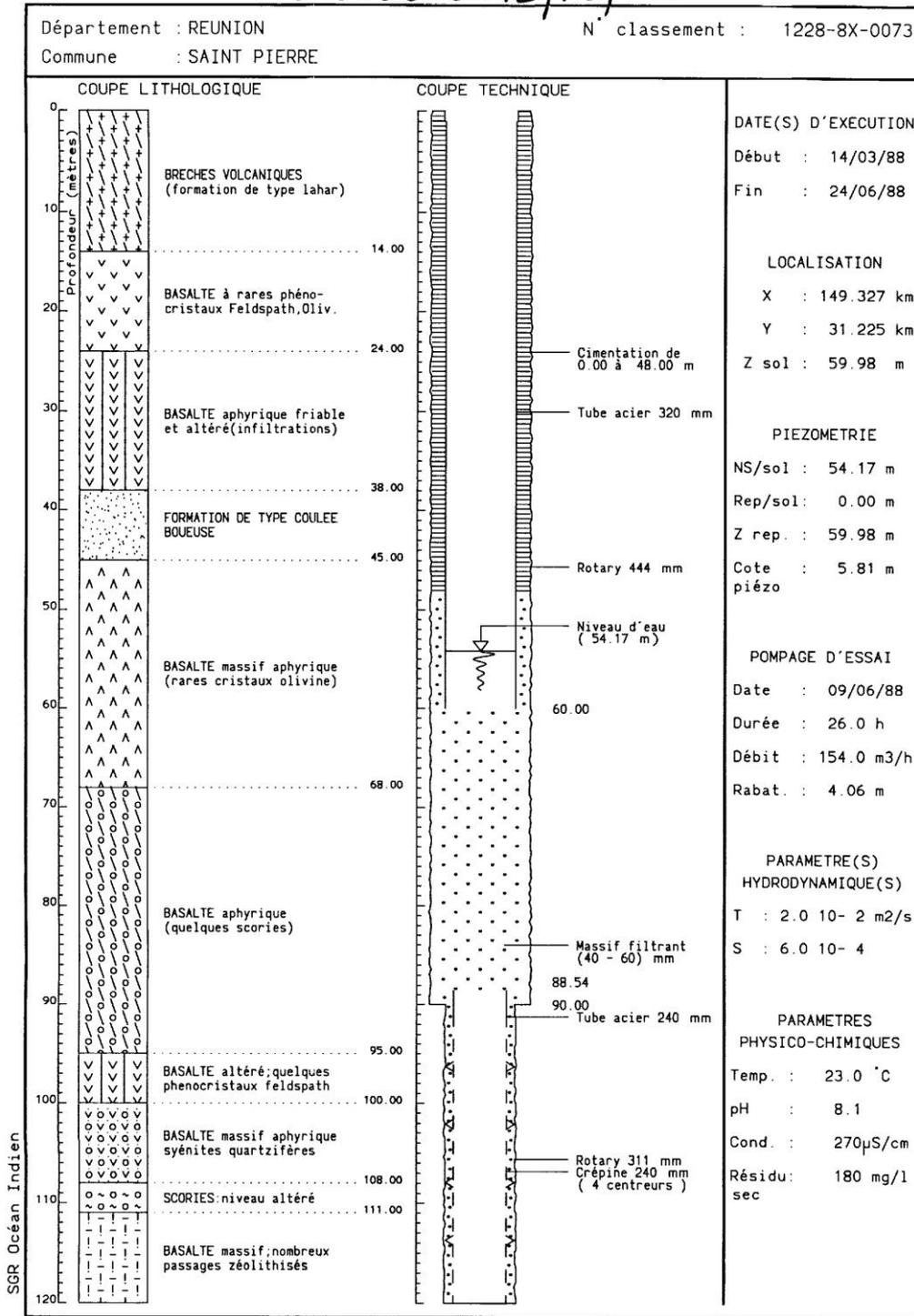
SGR Océan Indien

12288X0072 / F9 / Re

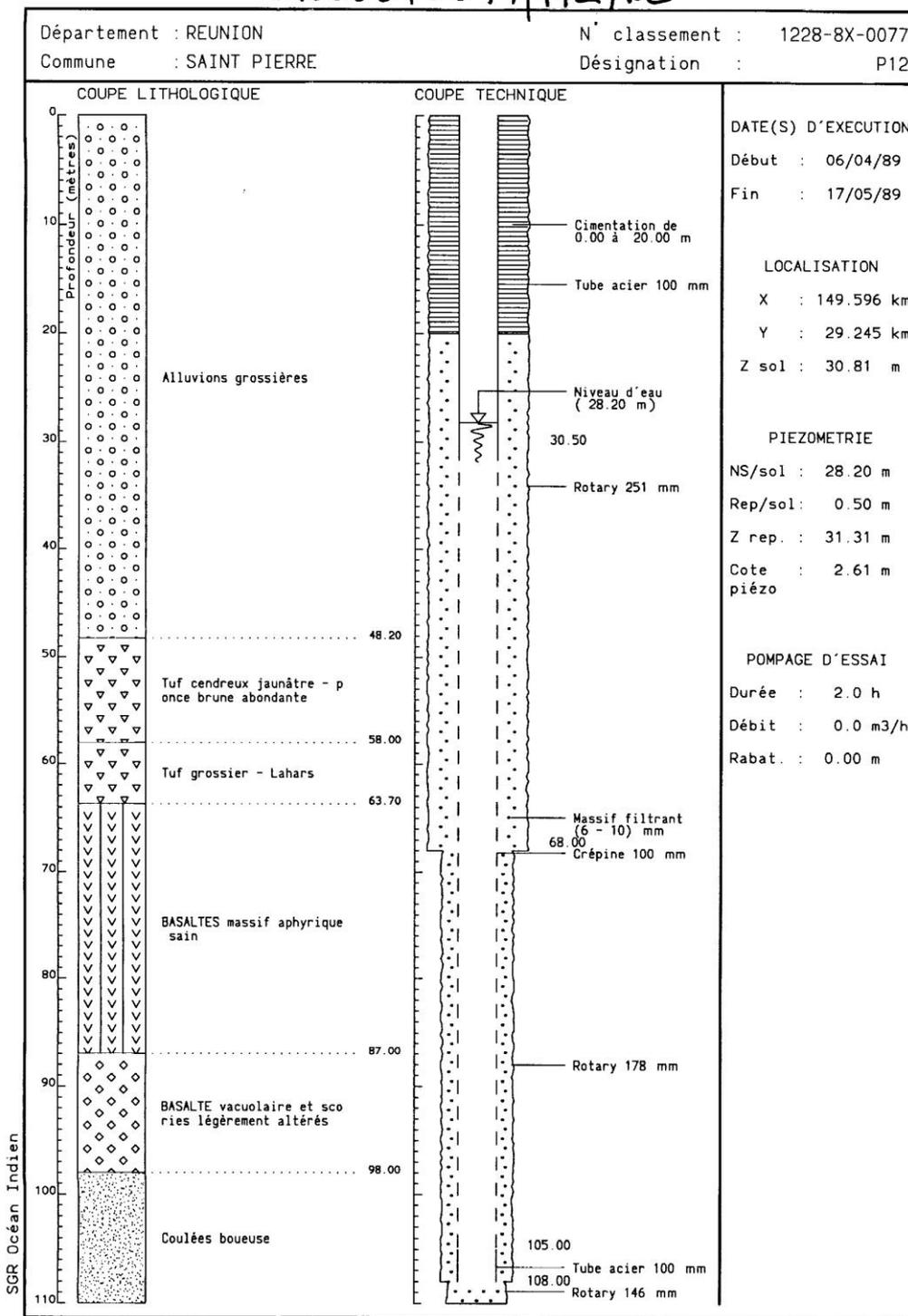


SGR Océan Indien

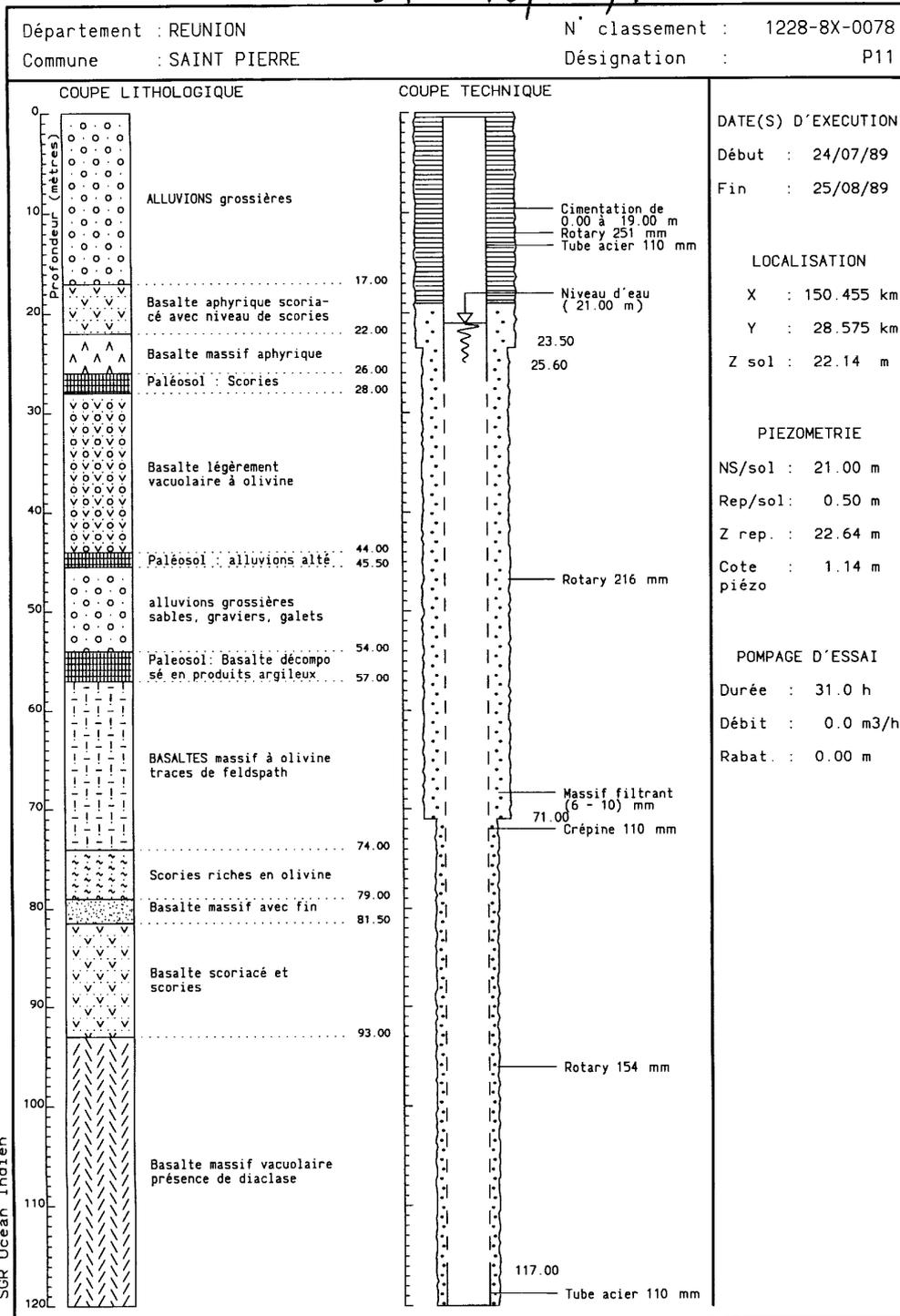
12288X0073/F5/RC



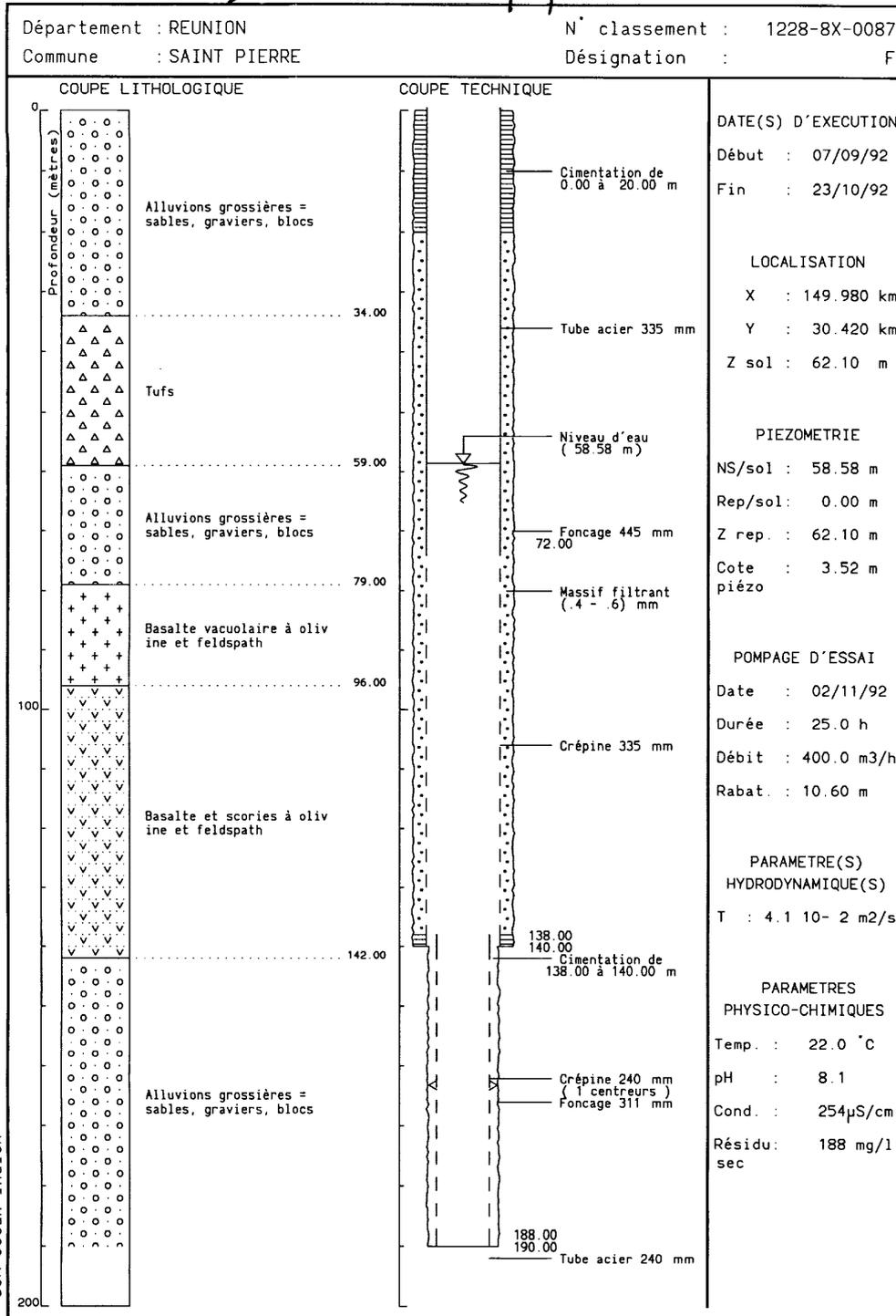
12288x0077/A2/RC



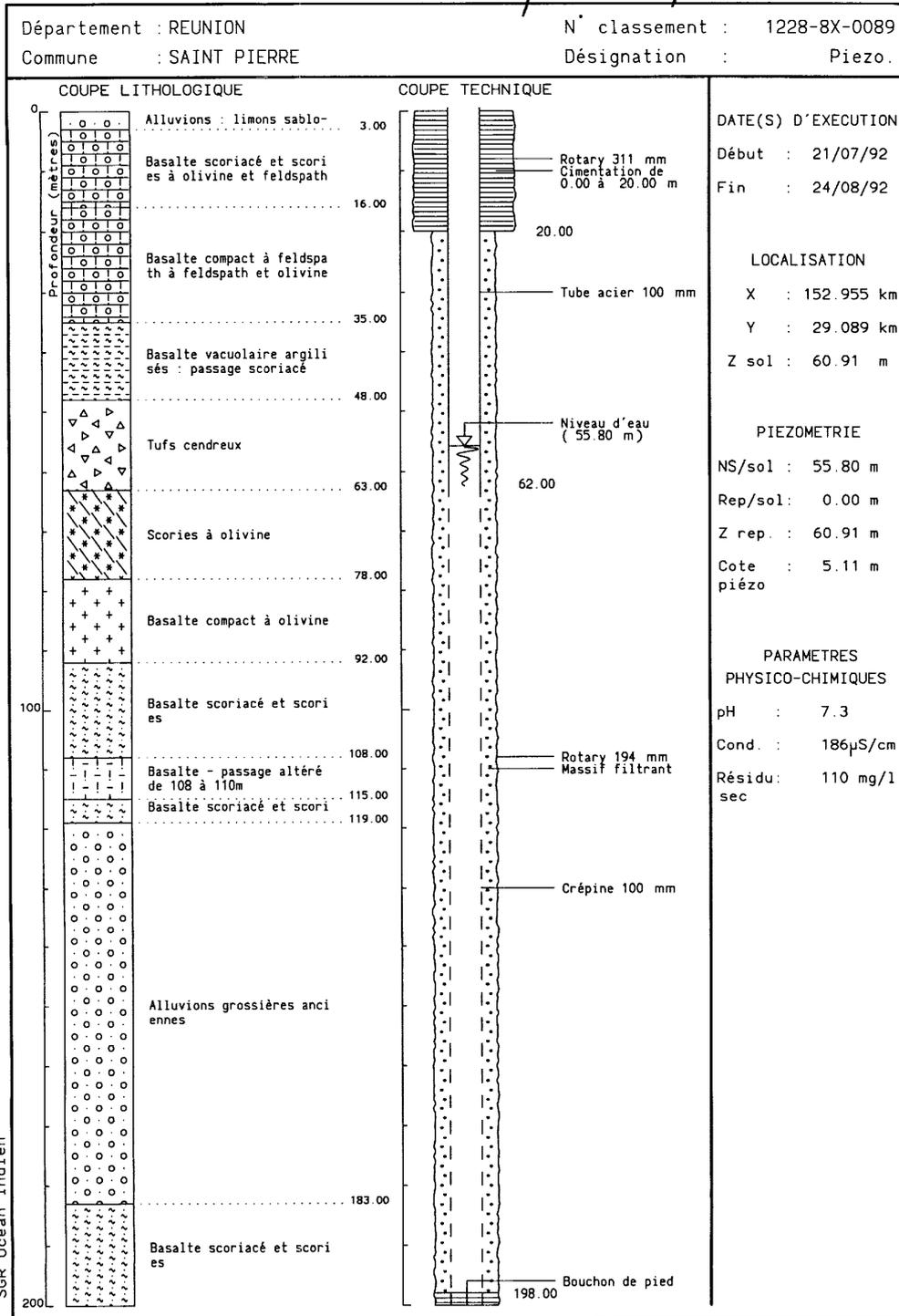
12288X0078/P11/RC



12288X0087/F/RC



12288X0089 / PIEZO- / RC



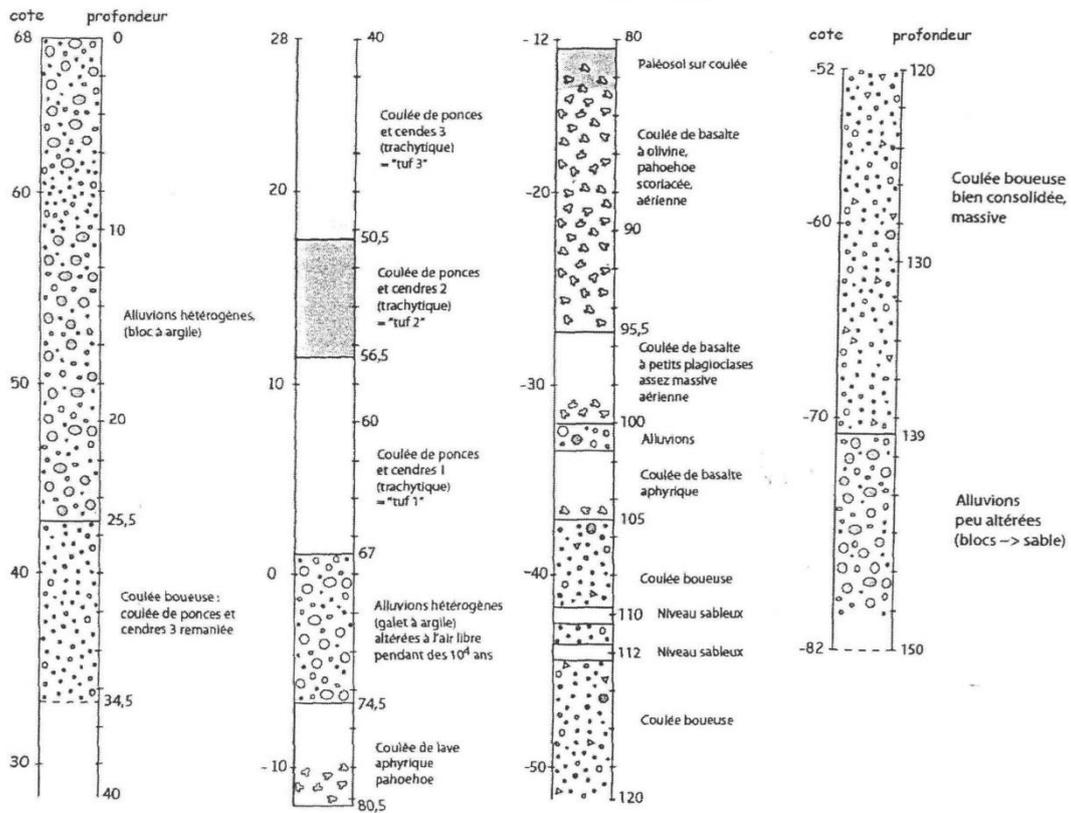
coordonnée / 7

Figure 4 : Coupe géologique du forage Pierrefonds 1
(source : BRL / DAESSE Materne, 2005)

*⇒ 150 661
30 298 714
2 67.61*

FORAGE "PIERREFOND 2004"
cote approximative 68 m
(log réalisé à partir des cuttings prélevés tous les mètres)

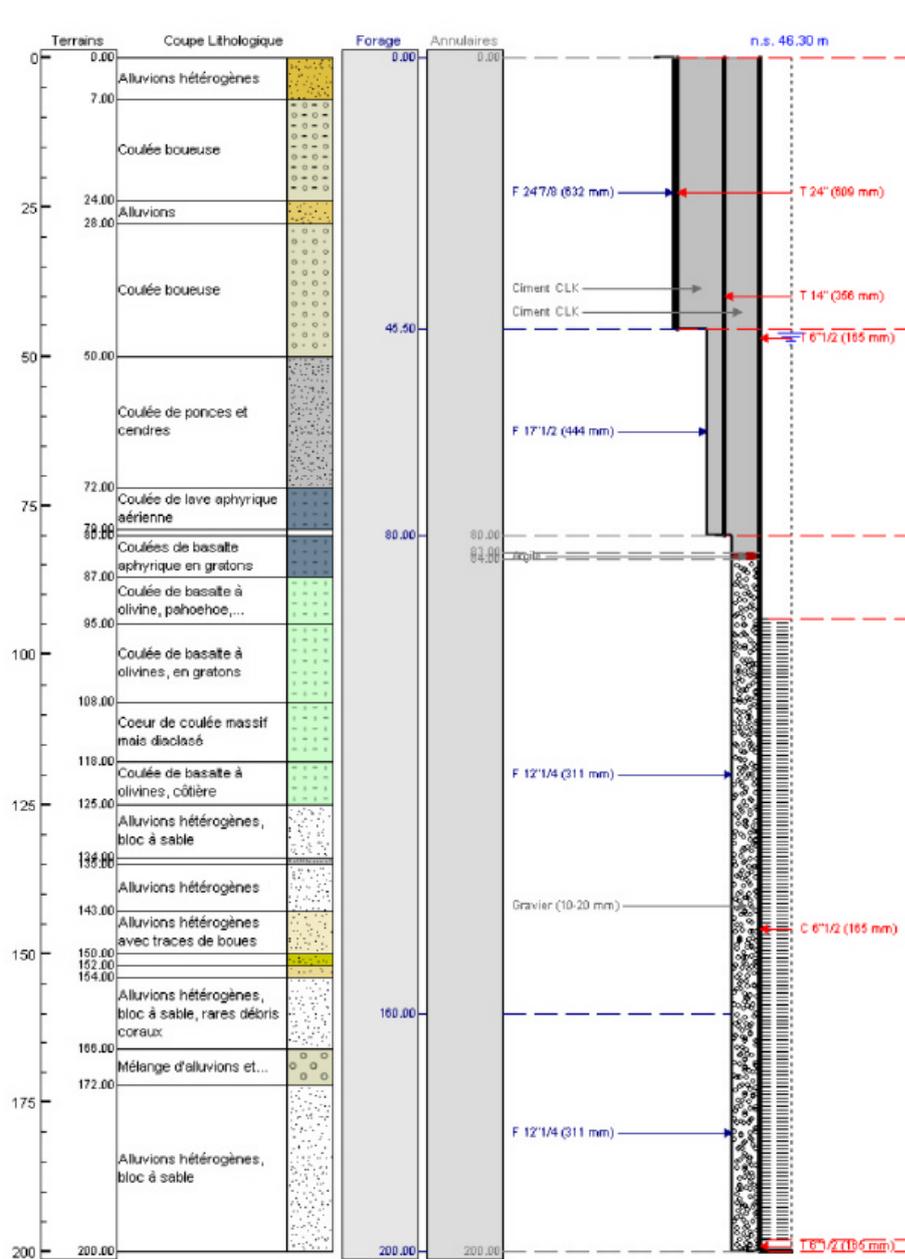
Ph. Malrine 1 / 12 / 2004



12288 x 0 207

12288 x 0 207

Forage 38217 Pierrefonds S2 Caserne



Annexe 2 : Résumé de la communication AQUA2015

42nd IAH Congress - AQUA 2015 – 13/18 September 2015 – Rome, Italy

Session S7.8: "Groundwater quality issues in coastal aquifers: Improving our understanding through measurements and modelling"

Hydrogeological study in the coastal aquifer of Pierrefonds using an integrated approach: geophysical investigations, time-series analysis and numerical modelling.

Bourhane A.,¹ Bonnier J.,¹ Belle P.,¹ Aunay B.,² Dumont M.,^{2,4} Reninger P-A.³ and Chaput M.,^{4,5}

¹ Office de l'eau Reunion, 49 rue Mazagran, 97400 Saint Denis, France

² BRGM Reunion, 5 rue Sainte Anne - CS 51016, 97404 Saint Denis Cedex, France

³ BRGM Centre, 3 avenue Claude Guillemin, BP 36009, 45060 – Orléans Cedex 2 – France

⁴ Laboratory Geosciences Reunion, UMR 7154 - IPGP, University of La Reunion, Saint Denis, France

⁵ Stratagem974, 62 Boulevard du Chaudron, 97490 Sainte Clotilde, La Reunion, France

The coastal aquifer of Pierrefonds is situated in the south coast of Reunion Island (Indian Ocean). The geological setting is characterized by fissured basalt lava flows under a thick alluvial deposit that can reach 50 m. Several pyroclastic levels and lahars or mudslides products were intercepted by the existing boreholes. In this region, groundwater constitutes a strategic water resource for both drinkable water supply and irrigation. However, groundwater quality remains vulnerable towards the marine intrusion phenomena. Thus, a hydrogeological study was carried out by the Reunion Water Office and the French Geological Survey throughout an integrated approach in the aim to understand the marine intrusion process, simulate different pumping scenarios and recommend future drilling sites locations. This approach includes 1) a geological study aiming at describe in details the different formations, 2) an airborne electromagnetics survey for imaging the underground geological structures, 3) deep investigations by Electrical Resistivity Tomography, 4) Hydrogeological time-series analysis and finally, 5) the implementing of a 3D density-dependent flow and transport modelling using a finite elements code.

Geophysical investigations have allowed the geological geometry refinement. Time-series analysis has provided useful information concerning the groundwater sensitivity towards 1) the freshwater recharge, 2) the marine fluctuations influence and 3) the pumping rates impact. Results of these works have led to a better understanding of the marine intrusion mechanisms in these complex contexts, especially the role of impermeable mudslide levels on the marine intrusion dynamics. Currently, numerical simulations allow testing different configurations of pumping scenarios. The 3D model obtained remains a crucial tool for a sustainable management of this coastal groundwater resource.