

Programme d'actions pour l'exploitation et la gestion des eaux souterraines de la Polynésie française : bilan des investigations menées à Rangiroa





Polynésie Française



Programme d'actions pour l'exploitation et la gestion des eaux souterraines de la Polynésie française : bilan des investigations menées à Rangiroa

Rapport final

BRGM/RP-68897-FR

Juin 2019

Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM AP16POL001

Corbier P., Pasquier S., Baltassat J.-M., Hakoun V., Maréchal J.-C. et Malcuit E.

Approbateur :
Nom : JM Mompelat
Fonction : Directeur adjoint DAT
Date : 20/08/2019
Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001. Contact : <u>gualite@brgm.fr</u>



Mots-clés : Bilan, Géologie, Géophysique, Hydrochimie, Hydrogéologie, Marées, Modèle, Polynésie française, Rangiroa, Tuamotu

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

Corbier P., Pasquier S., Baltassat J.-M., Hakoun V., Maréchal J.-C et Malcuit E. (2019). Programme d'actions pour l'exploitation et la gestion des eaux souterraines de la Polynésie française : bilan des investigations menées à Rangiroa. Rapport final. BRGM/RP-68897-FR, 182 p., 142 ill., 4 ann.

© BRGM, 2019, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Le programme d'actions pour l'exploitation et la gestion des eaux souterraines de la Polynésie française a été initié suite à la signature le 3 mars 2016 de la convention MCE n° 1366 entre le BRGM et le Ministère de la Culture et de l'Environnement polynésien.

Ce programme d'une durée initiale fixée à 36 mois puis étendue à 48 mois par le biais d'un avenant s'inscrit dans le cadre des « Opérations diverses venant en appui des axes AEP, déchets et assainissement » du volet « Environnement » du Contrat de Projets 2008-2013 et vise à doter la Polynésie française d'outils de gestion et d'exploitation des ressources en eaux souterraines performants.

Suite à une première phase d'inventaire ayant concerné 8 îles et conformément au contenu de la convention, des études hydrogéologiques détaillées ont été menées sur une île haute (Moorea), une île mixte (Ua Pou), un atoll (Rangiroa) et deux bassins versants de Tahiti (Papenoo et Punaruu).

À Rangiroa, des investigations géologiques, hydrogéologiques, géophysiques et hydrogéochimiques ont été mises en oeuvre sur une zone s'étendant du domaine viticole situé à l'ouest de la passe d'Avatoru jusqu'au village de Tiputa situé à l'est de la passe du même nom afin d'évaluer l'extension et le potentiel de la lentille d'eau douce qui est sollicitée par de nombreux puits particuliers.

Ces opérations se sont déroulées entre juillet 2017 et février 2019 dans un contexte où les besoins en eau devraient croître. L'atoll a en effet été identifié comme une des 2 futures capitales des Tuamotu/Gambier dans le Projet d'Aménagement et de Développement Durable (PADD) du Pays qui prévoit notamment l'agrandissement de la piste d'atterrissage et le développement de l'activé économique et touristique dans les 20 prochaines années.

Les éléments recueillis au travers des différentes approches ont permis d'élaborer un schéma hydrogéologique qui précise l'agencement des formations géologiques, la géométrie de la lentille ainsi que les composantes du bilan hydrique à l'échelle de l'atoll.

La limite entre les formations holocènes et les calcaires pléistocènes se situe entre 10 et 20 m de profondeur et présente un toit très irrégulier témoignant de phénomènes de karstification. La lentille d'eau douce présente, quant à elle, un caractère captif à semi-captif en raison de son confinement par la couche à conglomérats (ou couche à « papa ») sur laquelle les motu se sont développés. Son épaisseur s'avère très limitée notamment sur le motu d'Avatoru où de fortes augmentations de la conductivité ont été observées à très faible profondeur. Sur le motu de la vigne, l'épaisseur de la lentille est probablement plus importante mais l'absence de forages profonds n'a pas permis d'en reconnaître sa limite inférieure. Une épaisse couche de transition entre eau douce et eau salée semble également se développer dans les secteurs où les motu présentent une largeur supérieure à 800 m. Enfin, dans un contexte pluviométrique moyen, la recharge de l'aquifère a été évaluée à 135 mm/an.

Par rapport à d'autres îles du Pacifique et notamment celle de Bora-Bora où le motu Teivaroa est en passe d'être équipé d'un dispositif de pompage permettant l'exhaure maximale de 1 200 m³/j, il apparaît que l'atoll de Rangiroa se caractérise par de faibles ressources en eau douce. Dans ces conditions, il n'est donc pas recommandé d'envisager une exploitation plus importante que celle actuellement pratiquée sur l'atoll par le biais de puits particuliers. Une utilisation accrue de l'eau de pluie ou le recours à la désalinisation devront donc être envisagés pour faire face à une éventuelle augmentation des besoins.

Dans un contexte de changement climatique où les précipitations risquent d'être moins régulières et moins abondantes, la recharge artificielle de la nappe avec le surplus des précipitations recueillies sur les toitures pourrait également constituer une solution de gestion active et garantir sa pérennité. Dans l'idéal, la mise en œuvre de cette mesure devrait être accompagnée de la réalisation de quelques piézomètres de contrôle pour en mesurer son impact.

La réalisation d'un forage profond (50 m environ) pourrait également permettre d'une part, de mieux reconnaître la structure des aquifères holocène et pléistocène et leur interface et d'autre part, de mieux appréhender la géométrie de la lentille d'eau douce et sa dynamique.

Sur le plan de la qualité, le risque de fond géochimique élevé pour le sodium et les chlorures existe surtout à proximité des côtes mais également au centre des motu lorsque les pompages sont supérieurs aux capacités de la lentille d'eau douce. Pour les éléments traces, des concentrations non négligeables en bore (liées au phénomène d'intrusion marine) peuvent être reportées mais ces dernières n'atteignent pas des niveaux préoccupants.

Il est également apparu que l'environnement géologique n'était pas assez contrasté pour que différents types d'eau puissent être mis en évidence par les isotopes du strontium. L'origine des nitrates et des autres composés azotés dosés au droit de certains points d'eau reste enfin à préciser même si l'hypothèse d'une provenance anthropique reste la plus probable.

Dans ce domaine également, le monitoring sur une période minimale de 2 à 3 cycles hydrologiques constitue une approche à privilégier si l'on souhaite appréhender de façon plus fine les mécanismes qui affectent le sous-sol de l'atoll.

Sommaire

1.	Introduction	. 13
2.	Approche géologique	. 15
	2.1. FORMATION ET CARACTÉRISTIQUES DES ATOLLS DES TUAMOTU	. 15
	2.2. L'ATOLL DE RANGIROA	. 16
3.	Approche hydrogéologique	. 19
	 3.1. DONNÉES BIBLIOGRAPHIQUES 3.1.1. Généralités 3.1.2. Épaisseur de la lentille 3.1.3. Études menées en Polynésie française 	19 19 22 23
	 3.2. RECONNAISSANCES DE TERRAIN	. 31 . 31 . 35 . 42 . 46 . 58 . 63
	 3.3.ÉLÉMENTS DU BILAN HYDROLOGIQUE	74 75 76 80
	3.4. MODÉLISATION DE LA LENTILLE D'EAU DOUCE	. 82
	 3.5. ANALYSE ET MODÉLISATION DES EFFETS DE MARÉE SUR LA PIÉZOMÉTRIE 3.5.1. Méthodologie	. 85 . 85 . 85 . 87 . 90
	3.6. SYNTHÈSE	. 91
4.	Approche géophysique	. 93
	 4.1. SONDAGES ÉLECTRIQUES 4.1.1. Principe	94 94 95

4.1.3. Pseudos sections de résistivité apparente et inversion	
4.1.4. Mise en œuvre	
4.1.5. Interprétation des profils	103
4.2. SONDAGES RMP	106
4.2.1. Principe	106
4.2.2. Mise en œuvre	108
4.2.3. Interprétation des profils	108
4.3. SYNTHÈSE	110
5. Approche hydrogéochimique	113
5.1. PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES	114
5.2. ÉLÉMENTS MAJEURS ET MINEURS	115
5.2.1. Balance ionique	115
5.2.2. Composition de l'eau de mer	115
5.2.3. Conductivité électrique mesurée in situ et TDS	118
5.2.4. Faciès hydrogéochimiques des eaux souterraines	118
5.2.5. Evaluation de la potabilité pour les éléments majeurs et mineurs dissous	120
5.3. ÉLEMENTS TRACES	121
5.4. DIAGRAMMES BINAIRES	122
5.5. ISOTOPES DU STRONTIUM	125
5.5.1. Dosage des isotopes du strontium sur les eaux souterraines	125
5.6. SYNTHÈSE	127
6. Modèle hydrogéologique conceptuel	129
7. Conclusion et recommandations	133
8. Bibliographie	135

Liste des illustrations

Illustration 1:	Localisation de la zone d'étude (IGN, 1967)14
Illustration 2 :	Modèle d'évolution proposé pour l'atoll de Takapoto (Montaggioni et al., 2018)17
Illustration 3 :	Couche à « papa » observée dans un puits18
Illustration 4 :	Coupe de la dune corallienne côté océan, nord du motu de Tiputa18
Illustration 5 :	Stades d'évolution des atolls (Werner et al., 2017)19
Illustration 6 :	Effets eustatiques sur la structure des atolls (Werner at al., 2017)20
Illustration 7 :	Schéma conceptuel de l'hydrogéologie d'un atoll avec réfraction des lignes d'écoulement au travers de la HPU (Werner <i>et al.</i> , 2017)21
Illustration 8 :	Schéma de la lentille d'eau douce d'un atoll (Frissant et al., 2005)23
Illustration 9 :	Impact d'un pompage sur l'interface eau douce/eau salée (Frissant et Bodéré, 2009)23
Illustration 10 :	Résultats de l'essai de pompage sur la terre Vahavi (LTPP, 1973)24
Illustration 11 :	Informations sur les essais de pompage à Tiputa (les rabattements en rouge sont non stabilisés lors de l'essai)25
Illustration 12 :	Carte des isobathes (en m) du toit de l'eau saumâtre (d'après DAT 1988, modifié)26
Illustration 13 :	Caractéristiques des essais menés sur le puits du CES27
Illustration 14 :	Suivi de la conductivité électrique de l'eau effectué en 2006 sur les 16 puits du vignoble (données communiquées par Vin de Tahiti)27
Illustration 15 :	Valorisation des données de conductivités électriques de l'eau mesurées en 2006 au droit du vignoble (données communiquées par Vin de Tahiti)28
Illustration 16 :	Variations de la conductivité au droit des puits du vignoble en 200629
Illustration 17 :	Évolution de la pluviométrie et des conductivités au droit des puits du vignoble en 2006
Illustration 18 :	Ouvrages recensés et nivelés à Rangiroa
Illustration 19 :	Localisation des points d'eau géoréférencés sur le motu de la vigne31
Illustration 20 :	Localisation des points d'eau géoréférencés sur le motu d'Avatoru (partie ouest en haut, partie est en bas)
Illustration 21 :	Localisation des points d'eau géoréférencés sur le motu de Tiputa (partie ouest en haut, partie centrale en bas)
Illustration 22 :	Répartition des ouvrages en fonction de leur profondeur
Illustration 23 :	Répartition des ouvrages en fonction de leur distance à l'océan ou au lagon
Illustration 24 :	Mesures piézométriques (en m/sol) réalisées sur le motu de la vigne à Rangiroa
Illustration 25 :	Mesures piézométriques (en m/sol) réalisées sur le motu d'Avatoru à Rangiroa
Illustration 26 :	Mesures piézométriques (en m/sol) réalisées sur le motu de Tiputa à Rangiroa
Illustration 27 :	Intervention du cabinet GeoFenua à Rangiroa (vue vers le lagon)37
Illustration 28 :	Répartition des niveaux piézométriques sur le motu de la vigne en juillet 2017 (haut) et avril 2018 (centre) et différence (bas)
Illustration 29 :	Répartition des niveaux piézométriques sur le motu d'Avatoru en juillet 2017 (haut) et avril 2018 (centre) et différence (bas)40
Illustration 30 :	Répartition des niveaux piézométriques sur le motu de Tiputa en septembre 201741

Illustration 31 :	Niveaux piézométriques moyens (cm NGPF), différences moyennes de niveau observées entre avril 2018 et juillet 2017 et extremums de variation41
Illustration 32 :	Esquisse piézométrique obtenue pour le motu de Tiputa après interpolation de type IDW42
Illustration 33 :	Mesures de conductivité électriques effectuées sur le motu de la vigne à Rangiroa43
Illustration 34 :	Mesures de conductivité électrique effectuées sur le motu d'Avatoru à Rangiroa44
Illustration 35 :	Mesures de conductivité électrique effectuées sur le motu de Tiputa à Rangiroa44
Illustration 36 :	Répartition des valeurs de conductivité électrique en fonction des motu45
Illustration 37 :	Conductivité électrique de l'eau en fonction de la cote NGPF de la mesure45
Illustration 38 :	Conductivité électrique de l'eau en fonction de la distance à la côte la plus proche46
Illustration 39 :	Localisation des six ouvrages équipés de sondes PTEC entre mi-septembre 2018 et fin février 2019
Illustration 40 :	Suivi du niveau piézométrique (rouge) et de la conductivité électrique (jaune) sur le puits RGI_001 entre septembre 2018 et février 201948
Illustration 41 :	Effets de la marée et des pompages sur les niveaux et la conductivité de l'ouvrage RGI_001 (zoom sur la période du 5 au 8 octobre 2018)49
Illustration 42 :	Analyses corrélatoires et spectrales croisées marée/niveaux piézométriques menées sur l'ouvrage RGI_001 (1 unité en abscisse = 10 min)
Illustration 43 :	Analyses corrélatoires et spectrales croisées marée/conductivité électrique (période P1) menées sur l'ouvrage RGI_001 (1 unité en abscisse = 10 min)50
Illustration 44 :	Analyses corrélatoires et spectrales croisées marée/conductivité électrique (période P2) menées sur l'ouvrage RGI_001 (1 unité en absicsse = 10 min)50
Illustration 45 :	Suivi du niveau piézométrique (rouge) et de la conductivité électrique (jaune) sur le puits RGI_020 entre octobre 2018 et février 201951
Illustration 46 :	Suivi du niveau piézométrique (rouge) et de la conductivité électrique (jaune) sur le puits RGI_021 entre octobre et décembre 201852
Illustration 47 :	Suivi du niveau piézométrique (rouge) et de la conductivité électrique (jaune) sur le puits RGI_027 entre décembre 2018 et février 201953
Illustration 48 :	Suivi du niveau piézométrique (rouge) et de la conductivité électrique (jaune) sur le puits RGI_123 entre septembre et octobre 2018
Illustration 49 :	Effet de seuil sur les valeurs de conductivité électrique observées au puits RGI 12354
Illustration 50 :	Suivi du niveau piézométrique(rouge) et de la conductivité électrique (jaune) sur le puits RGI_204 entre septembre et octobre 201855
Illustration 51 :	Synthèse du suivi mené entre septembre 2018 et février 2019 sur 6 puits57
Illustration 52 :	Localisation des ouvrages ayant fait l'objet de logs de conductivité et conductivité maximum mesurée
Illustration 53 :	Exemple d'ouvrage présentant une conductivité faible et constante (type 1)59
Illustration 54 :	Exemple d'ouvrage présentant une augmentation brutale de la conductivité (type 2)59
Illustration 55 :	Exemple d'ouvrage présentant une augmentation régulière de la conductivité (type 3)59
Illustration 56 :	Représentation schématique de l'évolution du taux de salinité avec la profondeur (à gauche, la transition est progressive ; à droite, l'interface est franche) et types d'ouvrages mis en évidence à Rangiroa
Illustration 57 :	Synthèse des observations réalisées à l'occasion des logs de conductivité61
Illustration 58 :	Épaisseurs estimées de la tranche d'eau douce sur le motu d'Avatoru à Rangiroa62

Illustration 59 :	Épaisseur minimale de la tranche d'eau douce sur le motu de la vigne	.62
Illustration 60 :	Localisation des cinq ouvrages ayant fait l'objet d'un essai de pompage	.63
Illustration 61 :	Évolution du rabattement dans le puits RGI_204 avant (courbe bleue) et après correction de l'influence de la marée (courbe orange)	.65
Illustration 62 :	Interprétation de l'essai de pompage mené dans le puits RGI_204	.65
Illustration 63 :	Suivi de la piézométrie et de la conductivité sur le puits RGI_128 lors des tests de pompage	.67
Illustration 64 :	Suivi de la piézométrie (RGI_128 et RGI_129) et de la conductivité (RGI_129) lors des tests de pompage	.67
Illustration 65 :	Interprétation de l'essai de pompage mené dans le puits RGI_128	.68
Illustration 66 :	Évolution du niveau piézométrique et de la conductivité lors test de pompage mené sur l'ouvrage RGI_020	.69
Illustration 67 :	Interprétation de l'essai de pompage mené dans le puits RGI_020	.69
Illustration 68 :	Évolution du niveau piézométrique et de la conductivité électrique lors de l'essai de pompage mené dans le puits RGI_001	.71
Illustration 69 :	Interprétation de l'essai de pompage mené dans le puits RGI_001	.71
Illustration 70 :	Évolution du niveau piézométrique et de la conductivité électrique lors de l'essai de pompage mené sur le puits RGI_027	.72
Illustration 71 :	Interprétation de l'essai de pompage mené dans le puits RGI_027	.73
Illustration 72 :	Résultats des essais de pompage de courte durée menés à Rangiroa	.73
Illustration 73 :	Comparaison des transmissivités obtenues par le BRGM (jaune) et des données anciennes (bleu)	74
Illustration 74 :	Propriétés hydrodynamiques utilisées dans les modèles numériques sur les atolls (tiré de Werner et al. 2017) (H : Holocène ; P : Pléistocène)	.74
Illustration 75 :	Chronique d'ETP disponible pour la station Rangiroa aéroport	.75
Illustration 76 :	Chronique des pluies disponibles pour la station Rangiroa aéroport	.76
Illustration 77 :	Cumuls annuels de pluie mesurés sur la station Rangiroa aéroport (en bleu : années complètes, en vert : au moins 90 % de données, en orange : entre 50 et 90 % de données, en rouge : moins de 50 % de données)	.76
Illustration 78 :	Inondations à Rangiroa en février 2016 (https://www.tahiti-infos.com/)	.77
Illustration 79 :	Pluies efficaces mensuelles moyennes (= recharge) calculées au moyen de la formule de Thornwaithe en fonction de différentes hypothèses de RFU (période 1972-1987)	.78
Illustration 80 :	Évolution des niveaux piézométriques en fonction de la marée et de la pluviométrie sur l'ouvrage RGI_001	.78
Illustration 81 :	Pluies efficaces moyennes mensuelles calculées sur la période de référence 1972- 1987	.79
Illustration 82 :	Pluviométrie journalière sur la période septembre 2018-février 2019	.80
Illustration 83 :	Comparaison des ETP calculées à Rangiroa et Faa'a sur la période 1972-1987	.81
Illustration 84 :	Pluies efficaces mensuelles sur la période 2017/2018	.81
Illustration 85 :	Caractéristiques des puits sur lesquels la relation de Henry modifiée a été appliquée	.82
Illustration 86 :	Relation entre la recharge R et la perméabilité K selon la solution de Henry modifiée appliquées à trois puits	.83

Illustration 87 :	Calcul de la surface piézométrique de la nappe aquifère au moyen de la solution de Henry et de l'interface eau douce/eau salée au moyen de la solution de Ghyben- Hezberg sur les secteurs de Ohotu (a) et du vignoble (b)	.84
Illustration 88 :	Modèle de marée unimodal ajusté sur l'intervalle 25-29/09/2018 avec une période de 12.31h (les puits sont classés en fonction de la distance à la côte et la hauteur moyenne est arbitraire)	.86
Illustration 89 :	Caractéristiques des principales composantes des marées sur Terre	86
Illustration 90 :	Amplitudes et phases (entre parenthèse) des harmoniques de marées ajustées au marégraphe (données radar de la station SHOM) de Rangiroa et aux puits instrumentés	.86
Illustration 91 :	Diffusivités obtenues par analyse unimodale, transmissivités obtenues par essais de pompage et emmagasinements déduits	.87
Illustration 92 :	Mise en évidence des pics de fréquences des marées sur le spectre de densité du niveau océanique	.88
Illustration 93 :	Mise en évidence des pics de fréquences des marées sur le spectre de densité de la chronique relative au puits RGI_020	.88
Illustration 94 :	Comparaison entre variations du niveau océanique à Rangiroa (données radar SHOM en noir) et modèle de marée plurimodal (en bleu)	.89
Illustration 95 :	Comparaison entre variations du niveau piézométrique au puits RGI_020 (en noir) et modèle plurimodal (en bleu)	.89
Illustration 96 :	Résidus suite au filtrage des composantes de marée sur les niveaux piézométriques du puits RGI_020 (traits rouges verticaux = dates auxquelles les cumuls journaliers pluviométriques ont été supérieurs à 15 mm)	.90
Illustration 97 :	(a) Partie de l'atoll concernée (b) Implantation des profils (traits rouges)	.93
Illustration 98 :	Principe de la mesure en courant électrique continu (Bretaudeau et al., 2016)	.94
Illustration 99 :	Géométrie du dispositif de mesure (Bretaudeau et al., 2016)	.94
Illustration 100 :	Configuration dipôle-dipôle	.95
Illustration 101 :	Configuration Wenner-Schlumberger	.95
Illustration 102 :	Pseudo-section de résistivité apparente mesurée (haut), pseudo-section de résistivité calculée sur la base du modèle de résistivité (centre) et modèle de résistivité issu de l'inversion (bas).	.96
Illustration 103 :	Implantation des tomographies électriques sur le site d'Avatoru	.97
Illustration 104 :	Implantation des tomographies électriques sur le site de la plage publique	.97
Illustration 105 :	Implantation de la tomographie électrique P7 et des sondages RMP sur le site de Namaite	.98
Illustration 106 :	Caractéristiques des tomographies électriques réalisées à Rangiroa	.99
Illustration 107 :	Synthèse des paramètres qualité des tomographies électriques	.99
Illustration 108 :	Tomographie électrique P7 réalisée à Namaite (motu de la vigne)1	00
Illustration 109 :	Tomographies électriques P3, P1 et P2 réalisées au droit du village d'Avatoru1	01
Illustration 110 :	Tomographies électriques P4, P5 et P6 réalisées au droit de la plage communale1	02
Illustration 111 :	Configuration classique d'un atoll d'après Werner et al., 2017 (schéma de gauche) et Atlas de la Polynésie française, 1993 (schéma de droite)1	03
Illustration 112 :	Cartes représentant le comblement progressif de la lagune située à l'ouest du motu d'Avatoru (carte SAU 1967 en haut, Ikonos 2002 au milieu et Google Earth 2016 en bas)	05

Illustration 113 :	Principe de base de la RMP	107
Illustration 114 :	Mise en œuvre de sondages RMP à Rangiroa	107
Illustration 115 :	Caractéristiques des sondages RMP réalisés sur le site de Namaite (S/N = rapport signal sur bruit ; EN/IN = rapport bruit filtré sur bruit instrumental ; RMSE = coefficient d'ajustement sur les valeurs mesurées, de la réponse calculée, en amplitude)	108
Illustration 116 :	Résultats d'inversion 1D des sondages RMP présentés sur la tomographie de résistivité P7. Les logs verticaux représentent la teneur en eau RMP. La valeur pleine échelle de l'axe horizontal représente 37.5 % et les couleurs, le temps de décroissance, T ₂ *	109
Illustration 117 :	Résistivités électriques de la tomographie P7 comparées aux résultats RMP obtenus aux mêmes profondeurs	109
Illustration 118 :	Table de conversion entre les valeurs de résistivité mesurées et la conductivité supposée de l'eau interstitielle (porosité retenue = 25 %)	110
Illustration 119 :	Comparaison de profils électriques relatifs à des secteurs où la largeur du motu est différente (le trait épais noir sur l'illustration de gauche représente la limite inférieure de la zone de transition)	111
Illustration 120 :	Localisation des points prélevés à Rangiroa	113
Illustration 121 :	Pluviométrie journalière à Rangiroa en septembre 2018 (données Météo-France)	114
Illustration 122 :	Analyse statistique descriptive des paramètres physico-chimiques mesurés in situ	114
Illustration 123 :	Composition de l'eau de mer prélevée à Rangiroa	116
Illustration 124 :	Température et salinité de l'eau de mer, extrait de la planche « Physico-chimie de l'océan » de Rougerie et Wauthy (1993) dans l'Atlas de la Polynésie Française, ORSTOM (1993)	117
Illustration 125 :	Distribution de la salinité sur l'atoll de Tikehau selon un transect océan-récif barrière- lagon (Rougerie, 1994)	117
Illustration 126 :	: Conductivité vs TDS (g/l) pour l'ensemble des échantillons d'eau prélevés à Rangiroa en septembre 2018 (à droite, zoom sur l'échelle)	118
Illustration 127 :	Diagramme de Piper repésentant l'ensemble des prélèvements effectués à Rangiroa	119
Illustration 128 :	Faciès hydrogéochimiques des eaux prélevées à Rangiroa	119
Illustration 129 :	Analyse statistique descriptive des teneurs en éléments majeurs et mineurs	120
Illustration 130 :	Analyse statistique descriptive des teneurs en éléments traces	121
Illustration 131 :	: Diagrammes Cl vs Na (mmol/l)(à gauche, l'échelle est logarithmique)	122
Illustration 132 :	: Diagramme B vs SO₄ et B vs Cl	123
Illustration 133 :	: Diagramme Na/Cl vs Ca/Mg	123
Illustration 134 :	Diagramme Ca vs HCO ₃	124
Illustration 135 :	Diagramme Ca + Mg vs HCO₃	124
Illustration 136 :	Rapports isotopiques ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr pour les eaux souterraines de Rangiroa	125
Illustration 137 :	Sr vs SO4 (mmol.l) pour les 17 échantillons prélevés à Rangiroa	126
Illustration 138 :	^{: 87} Sr/ ⁸⁶ Sr vs 1/Sr (l/µmol) et ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr vs Cl (mmol/l) pour les 5 échantillons prélevés à Rangiroa	126
Illustration 139 :	Évolution du rapport ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr en fonction de la profondeur dans le puits CK2 (Jiang et al., 2019)	127
Illustration 140 :	Schéma conceptuel de l'hydrogéologie de l'atoll de Rangiroa	129

Illustration 142 : Schéma d'un dispositif de recharge artificielle directe par puits à partir d'eau de pluie .134

Liste des annexes

Annexe 1	Informations sur les ouvrages inventoriés à Rangiroa	139
Annexe 2	Résidus entre modèle de marée et variations des niveaux piézométriques	153
Annexe 3	Points de prélèvement	157
Annexe 4	Résultats des analyses chimiques	177

1. Introduction

Le programme d'actions pour l'exploitation et la gestion des eaux souterraines de la Polynésie française a été initié suite à la signature le 3 mars 2016 de la convention MCE n° 1366 entre le BRGM et le Ministère de la Culture et de l'Environnement polynésien. Ce programme d'une durée initiale fixée à 36 mois puis étendue à 48 mois par le biais d'un avenant s'inscrit dans le cadre des « Opérations diverses venant en appui des axes AEP, déchets et assainissement » du volet « Environnement » du Contrat de Projets 2008-2013.

D'un point de vue technique, le programme vise à doter la Polynésie française d'outils de gestion et d'exploitation des ressources en eaux souterraines performants de façon à faire face aux défis actuels (augmentation des besoins en lien avec le développement démographique et touristique, distribution d'une eau de qualité au plus grand nombre, sécurisation de l'approvisionnement en période de sécheresse, maîtrise des risques de pollution et d'intrusion du biseau salé,...) et futurs (possible évolution des conditions d'accès aux ressources en raison du changement climatique).

D'un point de vue réglementaire, le programme se déroule dans un contexte où les communes doivent mettre en œuvre des moyens pour assurer la distribution d'eau potable conformément à l'article L 2573-27 du Code Général des Collectivités Territoriales. Initialement fixé au 31 décembre 2015, le délai de mise en œuvre a été repoussé au 31 décembre 2024.

Le programme réalisé par le BRGM comporte quatre axes : un premier axe dédié à la synthèse des connaissances et à la typologie des aquifères polynésiens, un second dédié à l'élaboration d'outils de gestion de la ressource en eau, un troisième axe dédié à des missions d'assistance technique et règlementaire et un quatrième dédié à des études hydrogéologiques détaillées.

Suite à la phase d'inventaire des données qui a été menée dans le cadre de l'axe 1 et qui a porté sur les îles de Moorea, Maiao, Huahine, Raiatea, Taha'a, Ua Pou, Makatea et Rangiroa (cf. rapport BRGM/RP-67128-FR), le comité de suivi du projet a retenu les îles de Moorea, Ua Pou et Rangiroa pour faire l'objet d'études hydrogéologiques détaillées. Ces dernières ont en effet été jugées représentatives, respectivement d'une île haute, d'une île mixte et d'un atoll. Conformément à la convention MCE n° 1366, deux bassins versants de Tahiti (Papenoo et Punaruu) ont également fait l'objet d'études détaillées.

Sur le plan géographique, l'île de Rangiroa se situe à l'extrémité nord-ouest de l'Archipel des Tuamotu, à 305 km au nord-est de Tahiti, 13 km à l'est de Tikehau et 35 km à l'ouest de Arutua (15.05° S ; 147.75° W).

L'île mesure au maximum 80 kilomètres d'ouest en est et près de 32 km du nord au sud. La superficie des terres émergées représente 79 km² tandis que la surface totale de l'atoll (lagon compris) atteint 1 446 km².

La population de 2 709 habitants (recensement de 2017) se répartit principalement au nord de l'île, dans les villages d'Avatoru, d'Ohotu et de Tiputa, le chef-lieu.

Récemment, l'île de Rangiroa a été identifiée dans le Projet d'Aménagement et de Développement Durable (PADD) du Pays comme une des 2 futures capitales (avec Hao) des Tuamotu/Gambier. Le gouvernement prévoit notamment de réaménager l'aéroport afin de permettre aux avions gros porteurs de s'y poser au cas où l'aéroport de Tahiti-Faa'a devrait être temporairement fermé. Le développement de l'activité touristique et d'autres secteurs économiques devraient suivre et, entre autres, engendrer une augmentation des besoins en eau.

Actuellement, les besoins de la population sont satisfaits par la récupération d'eau de pluie à titre individuel et collectif (bâtiments de la mairie) ainsi que par les nombreux puits particuliers qui sollicitent la nappe superficielle plus ou moins saumâtre.

Afin de mieux cerner le potentiel de cette nappe, des investigations géologiques, hydrogéologiques, géophysiques et hydrogéochimiques ont été menées sur une zone s'étendant du domaine viticole situé à l'ouest de la passe d'Avatoru jusqu'au village de Tiputa situé à l'est de la passe du même nom (cf. Illustration 1).

Le présent document compile les résultats obtenus (chapitres 2 à 5), propose un modèle conceptuel de fonctionnement de l'aquifère (chapitre 6) et se termine par des recommandations (chapitre 7).



Illustration 1 : Localisation de la zone d'étude (IGN, 1967).

2. Approche géologique

2.1. FORMATION ET CARACTÉRISTIQUES DES ATOLLS DES TUAMOTU

Il est admis que la formation des 77 îles qui composent les Tuamotu est liée à la succession des évènements suivants (Rougerie, 1994) :

- apparition il y a 70 à 40 Ma, à partir du plancher océanique, d'une activité éruptive sousmarine de type point chaud dans le secteur sud-est des îles Gambier/Pitcairn et création d'île Chililes basaltiques pouvant émerger ;
- dérive de ces îles avec leur plaque tectonique vers l'ouest/nord-ouest à la vitesse de 11 cm/an et début du processus d'érosion ;
- installation de récifs frangeants de haute énergie à la périphérie des îles et début de l'enfoncement par subsidence et développement de récifs barrière enserrant les lagons ;
- disparition totale des parties basaltiques émergées.

Si l'on définit l'âge de ces atolls par la fin des émissions volcaniques, on obtient des âges croissant de l'est vers l'ouest de l'archipel avec 6 Ma pour les Gambier (Guille *et al.*, 1992), 10 Ma pour Mururoa et 50 Ma pour Rangiroa (Buigues *et al.*, 1993).

Ce modèle, basé sur le phénomène d'enfoncement isostatique (subsidence), doit être complété par une composante eustatique qui prend en compte les variations du niveau marin. La dernière transgression holocène s'est en effet traduite par une élévation de 125 m environ du niveau océanique entre – 18 000 et – 5 500 ans (Bard *et al.*, 1990).

La construction des édifices récifaux est essentiellement liée à l'activité des polypes hexacoralliaires aux squelettes constitués d'aragonite mais avec le temps, cet élément tend à se transformer en calcite, voire en dolomite, ce qui renforce la résistance des édifices.

La croissance des édifices doit par ailleurs être rapide pour compenser le phénomène de subsidence car même en eaux très limpides, les coraux disparaissent aux alentours de 50 à 70 m. Les atolls des Tuamotu sont représentatifs d'édifices qui ont traversé avec succès les différentes étapes du schéma de formation. Ils se caractérisent également par :

- une pente récifale externe de 30 à 60 % d'angle dont la partie haute est striée de sillons ;
- une couronne récifale affleurante de 50 à 1 000 m de largeur (moyenne = 100 m) prolongée par un platier d'arrière récif qui s'étire vers le lagon. Ce platier peut être surélevé (1 à 5 m) et recouvert d'une dune sédimentaire qui lui confère le statut de « motu ». La surface occupée par les motu est très variable en fonction des atolls : de l'ordre de 10 % pour Toau par exemple à 100 % pour l'atoll fermé de Taiaro ;
- un lagon de profondeur variable : de 60 m pour les plus profonds (ex : Fakarava) à moins de 10 m (ex : Mataiva), voire, de quelques mètres (Puka-Puka) ;
- la présence éventuelle de passes : sur les 77 atolls, 10 sont dotés de 2 passes et 22 d'une seule, les autres correspondant à des atolls fermés, comblés ou soulevés (Makatea).

La salinité des lagons fermés est également très variable. Elle peut être plus forte que celle de l'océan lorsque la tranche d'eau douce évaporée (0,5 à 1 m par an) est essentiellement remplacée par des eaux salées pénétrant par les hoa (chenaux) (ex : Takapoto, salinité = 41 g/l) ou plus faible lorsque les apports d'eau douce de la nappe phréatique sont importants (ex : Niau, salinité < 30 g/l).

La barrière récifale se caractérise par une porosité très élevée (de l'ordre de 30 à 60 %) et des perméabilités de l'ordre de 10^{-5} à 10^{-4} m/s (Guille *et al.*, 1993). L'eau de mer interstitielle qu'elle

contient réagit à tout forçage ou déséquilibre hydrodynamique comme la houle ou les marées par un déplacement qui peut atteindre le m/s (Buddemeir et Oberdorfer, 1986). Les sédiments lagonaires et sub-lagonaires constituent un ensemble carbonaté où la porosité et la perméabilité peuvent être plus faibles que dans le couronne récifale (Aissaoui *et al.*, 1986).

De façon plus globale, les atolls peuvent donc être considérés comme des cylindres poreux où le volume d'eau interstitielle représente 20 à 50 % du volume carbonaté. L'eau des lagons représente moins de 10 % du volume total, ce chiffre tombant à 0 pour les atolls comblés.

Sur les motu, une nappe d'eau douce flotte sur l'eau salée. Son épaisseur est maximale en fin de saison des pluies et minimale en saison sèche du fait d'un délestage aux interfaces avec l'océan et le lagon. Cette ressource est sollicitée par le biais de puits de faible profondeur creusés par les habitants (0,5 à 2 m) mais son utilisation reste délicate du fait de sa qualité (salinité élevée, présence de contaminants minéraux ou d'éléments pathogènes possible, ...).

2.2. L'ATOLL DE RANGIROA

Avec une superficie de 1 446 km² et un lagon renfermant près de 30 km³ d'eau, l'atoll de Rangiroa est le deuxième plus grand au monde après celui de Kwajalein aux îles Marshall. Il se caractérise par la présence de 2 passes situées de part et d'autre du motu d'Avatoru, par une profondeur moyenne d'environ 20 m et par une profondeur maximale de 38 m (Kumar *et al.* 2013).

L'atoll de Rangiroa est composé de plus de 400 motu qui représentent une superficie de terres émergées d'environ 170 km². Les motu les plus larges (300-650 m) sont situés dans les parties nord et nord-ouest de l'atoll.

Au droit de cet atoll, la mise en place des récifs coralliens aurait débuté au début de l'ère tertiaire, aux alentours de 60 Ma. Entre 1 et 2 Ma, l'atoll aurait également subi une surrection de 3 à 4 m en lien avec la flexure lithosphérique engendrée par la mise en place de Tahiti et Moorea.

L'évolution récente de l'atoll n'a pas été étudiée de façon spécifique mais de récents travaux universitaires (Montaggioni *et al.*, 2018) ont permis de proposer un modèle d'évolution pour l'atoll de Takapoto, distant de 275 km qui peut être présenté comme référence (cf. Illustration 2).

Ce modèle se focalise notamment sur les conséquences de l'élévation du niveau marin entre 3 000 et 2 000 ans BP. Le démantèlement des coraux puis leur cimentation entre 2 000 et 1 200 BP lorsque le niveau a rebaissé est à l'origine de la mise en place d'une couche dite « à conglomérats » sur laquelle les motu ont pu se développer. En Polynésie, cette couche est dénommée « couche à papa » (cf. Illustration 3).

À Rangiroa, cette couche de porosité et de perméabilité inférieures au reste de l'aquifère est traversée par de nombreux puits. Elle est généralement atteinte à des profondeurs allant de 1 à 2,5 m par rapport au sol et son épaisseur varie de quelques dizaines de centimètres à plus de 1,5 mètre. Plusieurs témoignages indiquant que les puits doivent être creusés au-delà de ce niveau pour accéder à la nappe d'eau douce ont été recueillis.

Comme indiqué précédemment, c'est sur l'horizon supérieur de cette couche conglomératique que se sont formés les motu par l'accumulation de sables, graviers, cailloux et blocs arrachés à la frange corallienne externe par les plus fortes houles (Bonvallot *et al.*, 1988). Côté océan, la morphologie de l'atoll se caractérise par la présence d'une dune pouvant atteindre plusieurs mètres de haut, constituée par un sable corallien plus ou moins grossier (cf. Illustration 4).



Illustration 2 : Modèle d'évolution proposé pour l'atoll de Takapoto (Montaggioni et al., 2018).



Illustration 3 : Couche à « papa » observée dans un puits.



Illustration 4 : Coupe de la dune corallienne côté océan, nord du motu de Tiputa.

3. Approche hydrogéologique

3.1. DONNÉES BIBLIOGRAPHIQUES

3.1.1. Généralités

En 2017, Werner *et al.* ont procédé à une revue complète des connaissances et des besoins de recherche sur l'hydrogéologie et la gestion des lentilles d'eau douce sur les atolls. Les éléments mentionnés ci-dessous sont issus de cet article.

D'un point de vue géologique, la structure des atolls résulte de l'évolution des fondations volcaniques et de la croissance des coraux selon le modèle décrit par Darwin (Illustration 5).



Illustration 5 : Stades d'évolution des atolls (Werner et al., 2017).

Les atolls se caractérisent généralement par la présence de deux formations aquifères superficielles superposées : les sédiments peu consolidés de l'Holocène au sommet et les formations récifales calcaires du Pléistocène à la base, séparés par la discontinuité de Thurber ou la HPU (Holocene Pléistocene Unconformity). Cette dernière se situe généralement entre 15 et 25 m sous le niveau marin.

Les formations récifales du Pléistocène ont subi des phénomènes de karstification en raison des variations eustatiques (cf. Illustration 6). La croissance des coraux a repris avec l'élévation du niveau marin au cours de l'Holocène avec un maximum de développement daté aux alentours de 8 000 ans.



Illustration 6 : Effets eustatiques sur la structure des atolls (Werner et al., 2017).

D'un point de vue hydrogéologique, les auteurs retiennent le modèle conceptuel représenté sur l'Illustration 7. Il apparaît que la forme et la taille des lentilles d'eau douce dépendent des propriétés physiques des deux aquifères, des mécanismes hydrodynamiques et dispersifs et des forces externes qui peuvent modifier les intrants, la décharge ou les conditions aux limites.

L'eau douce étant plus largement stockée dans les sédiments holocènes, ce sont néanmoins les propriétés de ces formations qui contrôlent le plus les caractéristiques de la lentille.

La conductivité hydraulique des formations pléistocènes étant généralement bien plus élevée que celle des formations holocènes, des phénomènes de réfraction des eaux météoriques peuvent exister au niveau de l'interface HPU. Les fortes valeurs de K qui caractérisent l'aquifère sousjacent contribuent, quant à elles, à limiter la propagation des marées vers les terres.

La présence éventuelle d'une couche « à conglomérats » ou à « papa » (reef-flat plate) décrite dans la partie précédente a des implications importantes en termes d'hydraulique. Elle peut en effet confiner l'aquifère holocène et le forcer à se décharger sous le plancher marin au travers des fractures du récif. La présence de cette couche peut également contribuer à faire augmenter l'épaisseur de la lentille. Elle peut enfin jouer le rôle de barrière vis-à-vis de l'évaporation ou de la propagation des racines.

Côté lagon, les sédiments holocènes sont généralement plus fins et moins perméables que ceux situés à proximité de l'océan. Il peut en résulter une dissymétrie de la lentille.

La zone de transition (2,5 à 95 % de salinité) entre eau douce et eau salée peut enfin représenter un volume beaucoup plus important que la lentille d'eau douce à proprement parler même si cette configuration n'est pas représentée sur l'Illustration 7. Certains auteurs (ex : White and Falkland, 2004) retiennent la valeur de C= 2 700 μ S/cm pour la limite entre eau douce/eau salée et la formule TDS = 0,74 x EC pour calculer la minéralisation totale (ce coefficient peut toutefois varier en fonction des zones d'étude et atteindre 0,54).



Illustration 7 : Schéma conceptuel de l'hydrogéologie d'un atoll avec réfraction des lignes d'écoulement au travers de la HPU (Werner et al., 2017).

En ce qui concerne la compréhension des mécanismes en jeu, l'impact des marées peut être quantifié au travers du calcul de l'efficience (ratio entre l'amplitude des variations piézométriques et celles des marées) et du décalage entre les pics respectifs. À noter que ces paramètres varient plus en fonction de la profondeur que de la distance à la côte.

Le suivi des niveaux piézométriques et de la salinité au moyen de capteurs en continu ainsi que les investigations géophysiques (méthodes électriques, électromagnétiques et sismiques) ou la télédétection constituent des méthodes qui peuvent être mises en œuvre pour collecter de la donnée.

Les formules empiriques qui permettent d'estimer la possibilité de solliciter une lentille d'eau douce en fonction de la recharge et de la largeur des îles ne donnent généralement pas de bons résultats car ils ne tiennent pas compte des contrastes de perméabilité ou du rôle de la végétation.

La mise en œuvre de pompages à des débits croissants jusqu'à obtenir une salinité non compatible avec les usages envisagés peut par contre constituer une méthode d'appréciation des débits d'exploitation.

Les modèles numériques représentent les méthodes les plus adaptées pour appréhender le fonctionnement de tels aquifères et SUTRA (2D) et SEAWAT (3D) constituent les outils les plus fréquemment utilisés.

L'évaluation de la recharge est une donnée critique lorsqu'on souhaite évaluer les ressources exploitables. Certains auteurs retiennent directement les valeurs d'ETP pour l'évaporation. Là où les données sont insuffisantes, il est également possible d'avoir recours à des courbes de référence établies pour la région du Pacifique.

Les épisodes de sécheresse ou au contraire d'inondations (notamment par submersion marine), la sur-sollicitation par pompage ainsi que la pollution constituent des évènements qui peuvent rendre les ressources impropres à la consommation.

En ce qui concerne l'exploitation de lentille, Underwood *et al.* (1992) ont estimé sur la base d'une série de courbes qu'il était possible de trouver de l'eau douce lorsque la recharge est d'au moins 2 000 mm/an et la largeur de l'île supérieure à 250 m et de l'exploiter (épaisseur minimale nécessaire de 2 à 3 m) lorsque la recharge est de 2 500 mm/an et la largeur de l'île de 750 m.

Les systèmes de pompage permettant « d'écrémer » la nappe d'eau douce sont à privilégier au profit des puits ou forages verticaux et seules une bonne gestion et une bonne planification peuvent garantir le succès de l'exploitation de telles ressources. La mise en œuvre de programmes de préservation est également un élément clé.

Une meilleure estimation de la recharge et des volumes exploitables, l'optimisation des infrastructures de pompage, l'évaluation de la décharge en mer et le développement de modèles numériques qui tiennent compte des contrastes de densité et des effets de marée constituent des pistes de progrès dans le domaine de la connaissance et de l'exploitation des lentilles d'eau douce. La mise en œuvre de techniques géophysiques aéroportées est également prometteuse.

3.1.2. Épaisseur de la lentille

Outre les paramètres évoqués précédemment, la géométrie de la lentille est régie par la différence de densité entre les eaux océaniques qui saturent le sous-sol en profondeur et les eaux pluviales qui s'infiltrent dans le sol.

La formule de Ghyben-Herzberg permet de calculer la profondeur de l'interface entre l'eau douce et l'eau salée (H) en un point donné de l'aquifère où le niveau piézométrique (h) est connu (cf. Illustration 8). La profondeur de l'interface est donnée par la relation suivante :

$$\mathsf{H} = \left(\frac{\rho(ed)}{\rho(es) - \rho(ed)}\right)h = 40 \ h$$

Avec :

- $\rho(ed)$: masse volumique de l'eau douce (1,000 g/cm³)
- $\rho(es)$: masse volumique de l'eau salée (1,025 g/cm³)
- H : profondeur de l'interface
- h : charge hydraulique de l'eau douce

Dans les faits, la lentille théorique n'est pas observée de manière aussi nette. En effet, les phénomènes de diffusivité et de dispersivité au sein de la nappe entraînent la formation d'une frange d'eau saumâtre plus ou moins épaisse au niveau de l'interface théorique entre l'eau douce et l'eau salée.

Lors de l'exploitation d'un forage sollicitant ce type d'aquifère, un cône de rabattement se forme au droit du forage et modifie l'interface entre l'eau douce et l'eau salée. Selon le principe de Ghyben-Herzberg exposé précédemment, un rabattement d'un mètre provoqué par un pompage entraîne une remontée de l'eau salée de quarante mètres (cf. Illustration 9).

En 1981, les auteurs Shorackt et Mercado ont observé que lorsque la remontée de l'interface atteignait une valeur critique, il y avait une accélération du phénomène qui provoquait la contamination du puits. Ils ont estimé cette remontée critique à 1/3 de la profondeur initiale de l'interface H. Dans ces conditions, ils recommandent de ne pas engendrer un rabattement supérieur à 1/3 du niveau piézométrique initial dans l'ouvrage de pompage.



Illustration 8 : Schéma de la lentille d'eau douce d'un atoll (Frissant et al., 2005).



Illustration 9 : Impact d'un pompage sur l'interface eau douce/eau salée (Frissant et Bodéré, 2009).

3.1.3. Études menées en Polynésie française

Les études hydrogéologiques relatives aux atolls de la Polynésie française sont peu nombreuses. Les paragraphes suivants font le bilan des explorations anciennes menées sur l'atoll de Rangiroa ou plus récentes menées sur le motu de Tevairoa à Bora-Bora.

Rangiroa

En 1973, le Laboratoire des Travaux Publics de Polynésie (LTPP) a réalisé une étude de la lentille d'eau douce au niveau de la Terre Vahavi (partie centrale du motu d'Avatoru). Au droit de cette zone, le motu fait entre 300 et 400 mètres de large.

Afin d'étudier le comportement de la nappe d'eau dans ce secteur, 3 puits et 18 piézomètres ont été creusés. 3 piézomètres profonds (15 m) ont atteint l'interface eau douce/ eau salée. La couche à conglomérats (ou couche à papa) a été atteinte à des profondeurs allant de 0,5 m à 2,75 pour une épaisseur comprise entre zéro (absence de dalle corallienne sur deux piézomètres) et 2,25 m.

Le suivi piézométrique indique une forte influence de la marée sur les fluctuations de la nappe. Les variations piézométriques sont sinusoïdales et de même période que la marée. Les amplitudes sont différentes sur des points situés à une même distance du lagon, ce qui traduit une hétérogénéité des diffusivités du milieu.

L'évolution de la minéralisation des eaux souterraines a été suivie le long d'un profil lagon-océan. Ce suivi a montré que l'intrusion saline dépendait principalement de la distance par rapport au lagon, la minéralisation la plus faible étant observée au centre des terres émergées. L'intrusion saline s'est également avérée plus marquée côté lagon que côté océan.

Un essai de pompage a été réalisé dans un puits et suivi dans 2 ouvrages voisins distants de 5 mètres. Un premier pompage a été effectué pendant 54 min au débit de 0,44 l/s. À la fin du pompage, le rabattement dans le puits était de 0,35 m sans amorce de stabilisation. Le rabattement dans les piézomètres était de 8 cm. Un second pompage a été réalisé à un débit de 0,32 l/s pendant plus de 7 heures. Le rabattement à l'équilibre était de 24 cm. L'Illustration 10 synthétise les résultats obtenus. Cet essai a permis de déterminer des transmissivités comprises entre 1 et 1,34.10⁻³ m²/s et des coefficients d'emmagasinement compris entre 3,1 et 5,5 %.

	Q (I/s)	Rabattement puits (m)	Rabattement piezo (m)	Durée (min)	Transmissivité (m²/s)	Transmissivité au piezo (m²/s)	Emmagasine ment (s)	Date
Phase 1	0,44	0,35	0,08	54 min	2,30E-04	1,00E-03	3,1%	07/09/1972
Phase 2	0,32	0,24		7h09min	1,42E-03	1,34E-03	5,5%	08/09/1972

Illustration 10 : Résultats	de l'essai de pompage sur	la terre Vahavi (LTPP,	1973).
-----------------------------	---------------------------	------------------------	--------

En 1981, le Laboratoire des Travaux Publics de Polynésie a réalisé une étude de la lentille d'eau de Rangiroa au niveau de la zone scolaire de Tiputa. Dans ce secteur, le motu fait entre 500 et 600 mètres de large.

Douze piézomètres ont été implantés, en plus de six puits déjà existants, afin de suivre l'évolution de la nappe sous l'effet des marées. Lors de la réalisation des ouvrages, la dalle corallienne constituée de calcaire induré a été rencontrée à une profondeur variant de 1 m à 2,5 m/sol. Il a été remarqué que cette dernière mettait généralement en charge la nappe phréatique avec une stabilisation de la charge statique au sommet de la dalle.

Le suivi de la marée dans le lagon a mis en évidence un régime de marée semi-diurne (2 pleines mers et 2 basses mers par jour) de période 12 h 30 avec des amplitudes de 12 et de 20 cm.

Les piézomètres ont présenté des oscillations de périodes analogues à celle de la marée mais des déphasages variables. Dix piézomètres se sont en effet caractérisés par des avances de phase d'1h environ et des amplitudes pouvant atteindre 40 cm et 7 piézomètres, par des retards de phase de 2h environ avec des amplitudes inférieures à 8 cm.

L'étude a également permis de mettre en évidence des charges hydrauliques plus élevées côté océan que côté lagon, la charge maximale moyenne étant de 50 cm à environ 200 mètres de l'océan. Les piézomètres les plus proches de l'océan ont enfin présenté les plus grandes variations de charge induites par la marée.

La salinité des eaux dans les puits a été mesurée lors de deux campagnes de mesure : une à marée basse et une autre à marée haute. Sur les 18 puits testés, les valeurs ont oscillé entre 470 et 2 250 μ S/cm et ont dépassé les 1 000 μ S/cm au droit de six ouvrages. Sur l'ensemble des puits, trois se sont caractérisés par une odeur nauséabonde typique de l'hydrogène sulfuré. Cette odeur provient de la décomposition de la matière vivante du corail en milieu peu aéré.

Quatre puits ont fait l'objet d'essais de pompage (cf. Illustration 11) mais une seule valeur de transmissivité a pu être calculée ($2,5.10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$).

	Q (m3/h)	Rabattement puits (m)	Durée (min)	Transmissivité (m ² /s)	Conductivité (µS/cm)	Date
P3-1	1,51	0,4	90		2500-3000	août-81
P3-2	0,47	?	20		> 5000	août-81
P3-3	0,58	> 0,2	60		> 5000	août-81
P2	0,58	0,2	340		1050> 3000	août-81
P1-1	0,9	0,16	315		450	août-81
P1-2	1,44	0,3	120		450	août-81
P4-1	1,26	0,41	405		550	août-81
P4-2	0,86	0,25	480	2,50E-04	550	août-81
P4-3	0,33	0,065	360		550	août-81

Illustration 11 : Informations sur les essais de pompage à Tiputa (les rabattements en rouge sont non stabilisés lors de l'essai).

En 1986, le Syndicat pour la Promotion des Communes de Polynésie Française (SPC-PF) a réalisé une étude visant à reconnaître la lentille d'eau douce par prospection électrique dans les secteurs d'Avatoru (à l'est immédiat du village) et de Namaite (à l'ouest de la passe d'Avatoru) afin de déterminer une zone d'exploitation pour l'AEP du village.

Les 8 sondages électriques réalisés à l'est du village d'Avatoru ont permis de repérer l'interface eau douce – eau salée. Elle a notamment été identifiée à la profondeur de 16,8 m au centre du motu. Dans ce secteur, il n'existerait pas de zone de transition. Les 7 sondages électriques réalisés à Namaite ont, quant à eux, permis d'identifier un aquifère qui présenterait une épaisseur maximale d'environ 24 mètres. Malgré l'intérêt de ces résultats, aucun projet de captage n'a vu le jour.

En 1988, la Direction de l'Assistance Technique a également mené une mission de prospection géophysique sur le motu de Namaite. Lors de cette étude, trois profils (deux nord-sud et un estouest) ont été réalisés au moyen d'un dispositif Schlumberger. L'interprétation de ces sondages a permis la réalisation d'une carte d'isobathes du toit du premier niveau d'eau saumâtre (cf. Illustration 12).

Cette étude a permis de conclure que la partie centrale du motu située à environ 1 km à l'ouest de la passe d'Avatoru renfermait une nappe suffisamment importante pour envisager son exploitation mais ces résultats sont restés sans suite.



Illustration 12 : Carte des isobathes (en m) du toit de l'eau saumâtre (d'après DAT 1988, modifié).

En 1990, le Laboratoire des Travaux Publics de Polynésie a réalisé une étude de la lentille d'eau au niveau du collège (motu d'Avatoru). Dans ce secteur, le motu fait 300 mètres de large (distance lagon-océan) et est délimité par deux hoa (chenaux intermittents reliant le lagon à l'océan) séparés d'environ 450 mètres.

Dans le cadre de cette étude, huit puits ont été réalisés. Ils ont atteint la dalle corallienne (dont l'horizon supérieur est constitué par un sable grossier contenant des éléments bioclastiques de 5 à 20 cm de diamètre et dont l'épaisseur serait comprise entre 0,6 et 1 m) à des profondeurs allant de 1,15 à 1,9 m par rapport au sol. Le niveau statique a été relevé au toit de cette dalle sur plusieurs ouvrages.

D'autres niveaux statiques relevés dans deux puits situés au milieu du motu (130 m du lagon et 170 m de l'océan) ont mis en évidence des charges très faibles (respectivement 9,9 et 9,2 cm) laissant supposer la présence de l'interface théorique eau douce/eau salée à 3,8 mètres sous le niveau zéro de référence. Les prospections électriques ont confirmé cette hypothèse en mettant en évidence une tranche d'eau saumâtre de 4 mètres d'épaisseur.

Des essais de pompage ont également été réalisés dans un puits qui a subi un dynamitage préalable. Cette opération n'a pas permis de fracturer totalement la dalle corallienne mais elle a induit une augmentation de la transmissivité du toit de la nappe par décompression des sols.

Trois essais ont été réalisés à des débits allant de 1,61 à 2,8 m³/h (cf. Illustration 13). Lors de ces essais, le rabattement dans le puits s'est rapidement stabilisé et les rabattements dans le piézomètre de suivi se sont avérés trop faibles pour être interprétés. Lors des pompages, la conductivité a peu évolué. L'eau a conservé un caractère saumâtre avec des valeurs comprises entre 1 355 et 1 605 µS/cm.

	Q (m3/h)	Rabattement puits (m)	Rabattement piezo (m)	Durée (min)	Transmissivité (m²/s)	Date
E1	1,61	0,018	0,005	14	3,70E-02	juil-90
E2	2,8	0,05	0,012	30	2,56E-02	juil-90
E3	2,16	0,028	0,005	9	4,57E-02	juil-90

Illustration 13 : Caractéristiques des essais menés sur le puits du CES.

En **2006**, un suivi de la conductivité électrique de l'eau des puits du vignoble (motu de Naimate) a été effectué. Les valeurs mesurées (cf. Illustration 14) ainsi que la carte représentée sur l'Illustration 15 ont été transmis au BRGM par l'œnologue du domaine.

Afin d'améliorer la lisibilité du tableau, les valeurs moyennes ont été classées avec un code couleur. Les valeurs supérieures à 1 000 μ S/cm ont été surlignées en rouge, celles comprises entre 750 et 1 000 μ S/cm en orange, celles comprises entre 500 et 750 en jaune et celles inférieures à 500 μ S/cm en vert.

Date	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
05/01/2006	870	690	1277	840	930	1060	1040	470	490	620	667	620	590	695	214	362
11/01/2006	872	712	1295	880	975	1051	1070	512	493	655	792	675	627	677	215	350
16/01/2006	848	1350	1240	997	930	1055	1061	550	485	715	378	767	782	704	214	662
23/01/2006	2416	1494	1232	1330	950	1068	1061	593	511	792	475	1590	812	708	236	668
30/01/2006	683	756	463	765	329	895	1028	291	300	426	345	585	582	642	177	288
07/02/2006	857	832	940	833	926	991	1015	379	385	655	814	923	782	681	303	667
16/02/2006	768	827	780	803	886	963	1027	401	308	524	669	1020	707	555	201	425
20/02/2006	1080	938	998	989	729	1043	1029	929	473	587	429	515	808	720	302	685
01/03/2006	943	907	927	882	963	948	930	525	522	781	709	714	718	747	348	244
10/03/2006	920	796	814	894	930	820	992	527	475	720	718	682	725	660	219	667
15/03/2006	926	830	894	711	637	820	1400	517	556	615	340	749	675	752	227	675
24/03/2006	862	878	876	912	992	841	970	513	530	593	763	670	840	432	436	634
30/03/2006	921	822	933	925	946	835	983	562	583	697	687	759	763	762	485	702
04/04/2006	938	709	877	894	936	961	983	523	546	693	670	741	886	750	526	696
09/05/2006	1090	663	1460	978	773	887	1042	597	627	870	735	813	863	740	782	700
20/07/2006	1409	733	1438	1024	988	936	1026	535	638	845	936	820	727	864	790	740
29/08/2006	1387	1717	993	1073	1002	980	990	503	652	754	939	814	857	805	763	371
11/09/2006	1108	902	1026	942	930	955	977	597	687	770	888	805	717	795	749	358
18/10/2006	1285	847	1063	1289	822	795	980	800	821	1011	396	768	730	735	808	793
Moyenne	1062	916	1028	945	872	942	1032	543	531	701	650	791	747	707	421	562

Illustration 14 : Suivi de la conductivité électrique de l'eau effectué en 2006 sur les 16 puits du vignoble (données communiquées par Vin de Tahiti).



Illustration 15 : Valorisation des données de conductivités électriques de l'eau mesurées en 2006 au droit du vignoble (données communiquées par Vin de Tahiti).

Avec seulement 3 valeurs moyennes légèrement supérieures à 1 000 μ S/cm, il apparaît que le domaine viticole est implanté au droit d'une zone où l'eau peut être considérée comme douce.

Afin d'aller plus loin dans l'interprétation des données, un graphique représentant les variations de la conductivité en fonction des puits a été réalisé (cf. Illustration 16). On distingue quatre types de puits :

- les ouvrages dont la conductivité est plutôt élevée et qui présentent des variations moyennes à importantes : P1, P2, P3, P4 et P12 ;
- les ouvrages dont la conductivité est plutôt élevée et qui présentent des variations peu importantes : P6 et P7 ;
- les ouvrages dont la conductivité est plutôt moyenne et qui présentent des variations moyennes à importantes : P5, P8, P9, P10, P11, P14, P15 et P16 et P7 ;
- les ouvrages dont la conductivité est plutôt moyenne et qui présentent des variations très faibles : P13.

L'Illustration 17 permet de visualiser l'évolution temporelle des conductivités sur un ouvrage de chaque type (P1, P6, P5 et P13) de même que les précipitations enregistrées sur le site de l'aéroport de Rangiroa. À noter que la chronique des précipitations disponible n'était pas complète pour l'année 2006 et que les valeurs manquantes ont été remplacées par la valeur arbitraire de - 5.

Il apparaît que le suivi n'a pas été mené à un pas de temps assez fin pour mettre en évidence de relation évidente entre la pluviométrie et les variations de la conductivité. L'absence de données pluviométriques lors des 20 premiers jours de janvier est également préjudiciable pour expliquer les fortes variations de conductivité observées sur l'ouvrage P1.



Illustration 16 : Variations de la conductivité au droit des puits du vignoble en 2006.



Illustration 17 : Évolution de la pluviométrie et des conductivités au droit des puits du vignoble en 2006.

Bora-Bora

Le motu Teivaroa situé à l'Ouest de Bora-Bora fait l'objet d'investigations depuis de nombreuses années pour la recherche de nouvelles ressources en eau. Ce motu de forme losangique (1 600 m de large sur 2 200 m de long) se caractérise par une topographie relativement plane (altitude maximum de 3,2 m au nord-est du motu). Il est principalement dédié à l'agriculture et au tourisme.

Les investigations géophysiques menées en 1980 et 1985 par le SPC-PF avaient mis en évidence la présence d'une lentille d'eau douce jusqu'à une profondeur de 25 à 35 m et plusieurs essais de pompage menés entre 1979 et 1989 avaient permis de caractériser la nappe (transmissivité comprise entre 1,4.10⁻³ et 1.10⁻² m²/s et coefficient d'emmagasinement compris entre 0,062 et 0,145).

En 1982 et 1988, deux dispositifs de captage respectivement constitués de 20 forages de 3 à 4 m de profondeur et d'un puits rayonnant ont été mis en place mais très vite abandonnés en raison de dégradations ou de problèmes qualitatifs.

En 2008, une nouvelle étude menée par la SPEED devait permettre d'apprécier les capacités de production de l'aquifère. Basée sur le suivi de 16 piézomètres, un bilan hydrique et une approche par modélisation, cette étude a permis de conclure en la possibilité de capter un débit de 1 000 m³/j au moyen d'une tranchée drainante de 2 450 ml implantée sur le pourtour du motu et en la nécessité de traiter l'eau compte tenu des fortes teneurs en matière organique et des turbidités élevées. Les incertitudes concernant le comportement du biseau salé et la cinétique des phénomènes de stockage et de vidange de l'aquifère ont toutefois nécessité de poursuivre les investigations avant de passer à la phase opérationnelle.

Pour ce faire, une nouvelle étude pilotée par la SPEED a été initiée en 2016 avec la réalisation de deux forages de 40 m et de nouvelles mesures piézométriques dans les ouvrages suivis en 2008. Les suivis de conductivité menés au droit des deux forages (sondes mises en place à 16 et 19 m de profondeur) ont mis en évidence de fortes variations en lien avec les fluctuations de la marée et les précipitations. Un essai de pompage de plus de 50 h mené durant la saison des pluies sur le puits rayonnant mis en place à la fin des années 1980 au débit de 32 m³/h n'a pas induit de rabattement notable de la nappe dans l'environnement du puits ni de variation de la conductivité électrique de l'eau dans les forages profonds. Il a permis de calculer une transmissivité de 1.6.10⁻² m²/s. conforme aux valeurs plus anciennes. Des travaux de modélisation ont également permis d'évaluer à 40 m³/h le débit de vidange de la nappe vers l'océan en conditions stabilisées et d'évaluer les possibilités de captage de différents systèmes (puits rayonnant au centre du motu ou drains en position plus périphérique côté océan). Le second système s'est révélé être le plus productif (notamment en conditions d'étiage) et moins risqué en termes d'intrusions salines. Pour la mise en œuvre opérationnelle, le bureau d'études propose un dispositif composé de 4 puits ravonnants et un débit nominal de 50 m³/h offrant une capacité de production maximale de 1 200 m³/j en cohérence avec la capacité de transfert des conduites installées entre le motu et l'île principale. Pour le traitement de l'eau, un pilote de type UCD® (coagulation/floculation, décantation lamellaire, filtration à sable et désinfection au chlore) permettant le traitement de 120 m³/j a été testé avec succès même si certaines opérations devront être optimisées. Suite à un inventaire des sources potentielles de pollution, des propositions quant à la mise en place de périmètres de protection ont également été formulées.

Les recherches menées démontrent donc qu'une exploitation de la lentille d'eau douce est envisageable lorsque les conditions sont favorables (largeur du motu suffisante, recharge importante...). Elles nécessitent toutefois de disposer d'un panel d'ouvrages de contrôle suffisant (dont quelques forages profonds) pour caractériser l'interface de transition eau douce/eau de mer, mener des simulations adéquates et estimer le débit d'exploitation le mieux adapté à une conservation de la qualité de l'eau.

3.2. RECONNAISSANCES DE TERRAIN

3.2.1. Déroulé des missions

Le BRGM a effectué de nombreuses missions à Rangiroa en vue d'investigations hydrogéologiques. Les deux premières qui se sont déroulées du 24 au 25 juillet 2017 et du 27 au 29 septembre 2017 ont consisté à localiser et caractériser les puits situés sur les motu d'Avatoru, de Tiputa et de la vigne. Une troisième mission dédiée au nivellement des ouvrages en vue de la valorisation des données piézométriques s'est déroulée du 24 au 27 avril 2018. Quatre missions respectivement dédiées aux prélèvements en vue d'analyses chimiques détaillées (11 au 14 septembre 2018), à des tests hydrauliques en présence de la DIREN (24 au 26 octobre 2018) puis à la relève des dispositifs d'enregistrement des niveaux, de la température et de conductivité (10 et 11 décembre 2018 puis 25 et 26 février 2019) se sont ensuite succédées.

3.2.2. Inventaire et caractéristiques des ouvrages

Au cours de ces différentes missions, 149 ouvrages (puits, forages, trou d'eau) répartis sur les trois motu (vigne, Avatoru et Tiputa) ont pu être identifiés et localisés (cf. Illustration 18, Illustration 19, Illustration 20 et Illustration 21). Parmi ces ouvrages, 126, soit 84 %, ont pu être nivelés selon des modalités qui seront exposés plus loin.

	Motu de la Vigne	Motu Avatoru	Motu Tiputa	Total
Nombre d'ouvrages	15	63	71	149
Ouvrages nivelés	13	50	63	126

Illustration 18 : Ouvrages recensés et nivelés à Rangiroa.



Illustration 19 : Localisation des points d'eau géoréférencés sur le motu de la vigne.

FOR_V_RGII042	w the second sec
FOR_V_RGI041 0 0 FOR_V_RGI039	
FOR V RGI002	
FOR V RGI038 FOR V RGI194 FOR V RGI04	
FOR V RGI127 FOR V RGI131 FOR V RGI045	
FOR V RGI129 FOR V RGI128 FOR V RGI143 FOR V RGI144 O FOR V RGI1049	
FOR V RGH93 FOR V RGH30 O FOR V RGH93 O FOR V RGH92	
FOR V RG1050	Pro la
O.FOR V.Rditor	
Legende	and American
Puits nivelés (29) For V_RG224	O FOR V RGI051
• Puits (34)	ALL PROVIDENCE
0 0,25 0,5 1 Km	FOR_V_RCI005 O



Illustration 20 : Localisation des points d'eau géoréférencés sur le motu d'Avatoru (partie ouest en haut, partie est en bas).





Illustration 21 : Localisation des points d'eau géoréférencés sur le motu de Tiputa (partie ouest en haut, partie centrale en bas).

La plupart des ouvrages inventoriés à Rangiroa correspondent à des puits non maçonnés qui permettent d'atteindre la nappe superficielle. Cette dernière est captée sur quelques dizaines de centimètres pour les usages domestiques non sensibles (sanitaires, douche, arrosage...).

L'Illustration 22 représente la répartition des profondeurs des 58 ouvrages dont cette caractéristique a pu être évaluée. Il apparaît que la majorité des ouvrages présente une profondeur comprise entre 1,5 et 2,5 m et qu'aucun d'entre eux ne présente une profondeur supérieure à 4 m (profondeur mesurée maximum = 3,85 m).

Outre leur faible profondeur, les puits de Rangiroa présentent la particularité d'être proches d'une source potentielle de contamination marine, à savoir, l'océan ou le lagon (cf. Illustration 23). La distance moyenne des ouvrages à l'eau salée s'élève en effet à 143 mètres et plus de 60 % des ouvrages se situent à moins de 150 m de la côte. La situation est toutefois différente d'un motu à l'autre. Ainsi sur le motu de la vigne qui est le plus large, les puits se situent en moyenne à plus de 200 m du rivage (139 m pour Avatoru et 129 m pour Tiputa).



Les données relatives à l'ensemble des ouvrages sont présentées dans l'Annexe 1.

Illustration 22 : Répartition des ouvrages en fonction de leur profondeur.



Illustration 23 : Répartition des ouvrages en fonction de leur distance à l'océan ou au lagon.
3.2.3. Mesures piézométriques et nivellement des ouvrages

Lors des trois premières missions de reconnaissances hydrogéologiques, 179 mesures piézométriques ont été réalisées dans 127 ouvrages différents. Les 44 mesures piézométriques réalisées les 24 et 25 juillet 2017, les 74 mesures réalisées entre le 27 et le 29 septembre 2017 ainsi que les 61 mesures effectuées entre les 25 et 27 avril 2018 indiquent la présence d'une nappe d'eau souterraine située à faible profondeur dont la surface piézométrique est comprise entre +0,50 m et +3,00 m/sol.

L'Illustration 24, l'Illustration 25 et l'Illustration 26 représentent la répartition spatiale de ces mesures (plutôt caractéristiques d'un état d'étiage) et la valeur piézométrique moyenne lorsque plusieurs mesures étaient disponibles pour un même ouvrage.

La géométrie de la surface piézométrique de la nappe est difficile à appréhender à partir de valeurs de profondeurs d'eau (/sol) mais les mesures effectuées semblent mettre en évidence un bombement de la nappe avec une piézométrie proche de la surface du sol au centre des motu et plus profonde en bordure du lagon et de l'océan.

Afin de mieux valoriser les données piézométriques acquises, une mission de nivellement des ouvrages a été menée du 24 au 27 avril 2018. Elle a été confiée au cabinet GEOFENUA et a concerné 126 puits et forages repartis sur les 3 motu (vigne, Avatoru et Tiputa) (cf. Illustration 27).



Illustration 24 : Mesures piézométriques (en m/sol) réalisées sur le motu de la vigne à Rangiroa.



Illustration 25 : Mesures piézométriques (en m/sol) réalisées sur le motu d'Avatoru à Rangiroa.



Illustration 26 : Mesures piézométriques (en m/sol) réalisées sur le motu de Tiputa à Rangiroa.

Le dispositif utilisé correspond à un récepteur satellitaire R7 GNSS de la marque Trimble (base) et d'une antenne mobile et les mesures ont été rattachées au point de référence situé au niveau du quai d'Avatoru (RGR11, LO = 147°42'36,6767" W, LA = 14°56'37,5987"S). Les résultats ont été fournis sous forme de fichier Excel précisant les coordonnées X, Y et Z (en m NGPF) des ouvrages et reportés dans l'annexe 1.



Illustration 27 : Intervention du cabinet GeoFenua à Rangiroa (vue vers le lagon).

Les niveaux piézométriques recalculés en m NGPF ont été représentés sur l'Illustration 28, l'Illustration 29 et l'Illustration 30 pour une à deux périodes différentes (juillet 2017 et/ou septembre 2017 et/ou avril 2018).

L'Illustration 31 synthétise les observations en ce qui concerne les niveaux moyens observés sur chaque motu ainsi que la charge moyenne globale. Elle précise également les différences moyennes de niveau observées entre avril 2018 et juillet 2017 de même que les extremums de variation.

Dans l'ensemble, il apparaît que les charges piézométriques sont relativement faibles. Ces dernières peuvent toutefois être localement supérieures à 50 cm (est du motu de la vigne et sud

du village d'Avatoru notamment). Par ailleurs, il semble que les différences de niveau observées entre avril 2018 et juillet 2017 ne soient pas liées aux conditions climatiques car des tendances inverses sont observées sur les motu de la vigne (niveaux observés en avril inférieurs à ceux observés en juillet) et d'Avatoru (niveaux observés en avril supérieurs à ceux observés en juillet) (cf. Illustration 28 et Illustration 29, cartes du bas).

Les mesures réalisées au droit d'un même puits peuvent également présenter de forts écarts entre 2 mesures consécutives (jusqu'à 57 cm). Ces variations peuvent être liées aux effets de la marée mais également à l'impact des pompages effectués dans le puits ou dans des ouvrages situés à proximité ou à une évolution des repères de mesure (cas des ouvrages aux abords non stabilisés par exemple).

Seules les données relatives au motu de Tiputa ont été jugées assez denses pour être interpolées. Elles l'ont été au moyen de la méthode IDW (inverse de la distance) mise en œuvre sous ArcGis (cf. Illustration 32).

L'esquisse obtenue met en évidence deux zones où les niveaux sont inférieurs au niveau de référence ainsi que deux légers bombements piézométriques où les charges varient entre 15 et 30 cm si l'on exclut deux points qui semblent anormaux (1,15 m NGPF pour le puits RGI_067 et 0,97 m NGPF pour le puits RGI_078).

Le caractère anormal de la mesure réalisée sur l'ouvrage RGI_078 semble confirmé par une mesure réalisée dans les mêmes conditions de marée sur l'ouvrage RGI_079 situé à moins de 15 m (0,08 m NGPF).

Au final, sur la base de la charge moyenne (20 cm) et de la formule de Ghyben-Herzberg présentée dans le paragraphe 3.1.1 (H = 40 h), il est possible d'imaginer la présence d'une lentille d'eau douce relativement développée au droit des motu. Cette hypothèse reste néanmoins à confirmer par des vérifications de terrain.



Illustration 28 : Répartition des niveaux piézométriques sur le motu de la vigne en juillet 2017 (haut) et avril 2018 (centre) et différence (bas).



Illustration 29 : Répartition des niveaux piézométriques sur le motu d'Avatoru en juillet 2017 (haut) et avril 2018 (centre) et différence (bas).



Illustration 30 : Répartition des niveaux piézométriques sur le motu de Tiputa en septembre 2017.

	Juillet	Septembre	Avril	Différence	Max	Min
	2017	2017	2018	moyenne	variation	variation
				entre avril		
				et juillet		
Motu vigne	15 cm		7 cm	-8 cm	-48 cm	+25 cm
Motu Avatoru	22 cm		25 cm	+3 cm	-57 cm	+32 cm
Motu Tiputa		15 cm				
Global		20 cm				

Illustration 31 : Niveaux piézométriques moyens (cm NGPF), différences moyennes de niveau observées entre avril 2018 et juillet 2017 et extremums de variation.



Illustration 32 : Esquisse piézométrique obtenue pour le motu de Tiputa après interpolation de type IDW.

3.2.4. Mesures physico-chimiques

À l'occasion des différentes missions de terrain, des mesures physico-chimiques ont pu être réalisées au droit de 144 ouvrages (15 sur le motu de la vigne, 62 sur le motu d'Avatoru et 67 à Tiputa) parmi les 149 identifiés sur le terrain. Les points d'eau semblant plus impactés par les effets de la marée et des pompages que par les conditions météorologiques (cf. chapitre précédent), il a été décidé de mener l'analyse sur le lot complet de données récoltées.

En ce qui concerne la conductivité électrique de l'eau, 217 mesures (effectuées en surface) ont été valorisées sous forme de cartes (cf. Illustration 33, Illustration 34 et Illustration 35). En retenant la valeur moyenne pour les ouvrages ayant fait l'objet de plusieurs mesures.

Il apparaît que les conductivités électriques observées sur le motu de la vigne sont toutes inférieures à 1 000 μ S/cm. Pour les deux autres motu, les valeurs les plus faibles s'observent généralement au centre des terres et dans les secteurs où les motu sont les plus larges. Les valeurs les plus fortes sont observées à proximité des passes et dans les zones où les motu sont étroits. Certains points, notamment à l'est du motu d'Avatoru, présentent toutefois des profils atypiques peu minéralisés à proximité du lagon.

L'Illustration 36, l'Illustration 37 et l'Illustration 38 complètent l'analyse.

L'Illustration 36 précise en effet les extrema, les valeurs moyennes et le pourcentage de valeurs comprises dans chaque classe fixée. Il apparaît que la plus faible valeur de conductivité mesurée sur le motu de Tiputa (488 μ S/cm) est plus de 2 fois plus importante que celles observées sur motu de la vigne (221 μ S/cm) et d'Avatoru (187 μ S/cm). On note aussi que les conductivités moyennes observées à Avatoru (2 102 μ S/cm) et Tiputa (1 857 μ S/cm) sont relativement similaires, de même que les pourcentages respectifs de valeurs inférieures à 2 000 μ S/cm (73 et 74 %).

L'Illustration 37 qui représente la répartition des valeurs de conductivité en fonction de la cote NGPF de la mesure semble, quant à elle, indiquer l'absence d'une nappe d'eau douce d'épaisseur conséquente sur le motu d'Avatoru (nombreuses valeurs de conductivité supérieures à 2 000 μ S/cm pour des altitudes inférieures à 0 m NGF).

Sur le motu de Tiputa, la situation est probablement identique mais le faible nombre de mesures réalisées à des altitudes inférieures à 0 m NGPF ne permet pas de le démontrer clairement. Sur le motu de la vigne, les mesures réalisées semblent traduire la présence d'un aquifère plus développé mais l'absence d'ouvrages profonds ne permet pas d'évaluer sa puissance.

Sur l'Illustration 38, les plus fortes valeurs de conductivité sont logiquement observées pour de faibles distances à la côte mais on retrouve les points anormaux (situés à moins de 50 m du lagon ou de l'océan et présentant de faibles conductivités) décrits plus tôt.

Parmi les ouvrages référencés, 130 ont également fait l'objet de mesures de la température, du pH, du potentiel d'oxydo-réduction et des teneurs en oxygène dissous qui ont été valorisées dans le rapport BRGM/RP-67128-FR.

À l'exception de 5 points d'eau, tous les puits ont présenté un pH compris entre 7 et 8, témoignant de l'environnement calcaire et/ou dolomitique sollicité.

La plupart des valeurs de potentiel d'oxydo-réduction (120 valeurs sur 130) se sont avérées comprises entre 200 et 400 mV.

Enfin, la variabilité des teneurs en oxygène (98 valeurs sur 130 comprises entre 25 et 75 %) a été attribuée au mode de prélèvement retenu (seau ou robinet), le déplacement de l'eau au sein de la colonne de pompage contribuant à l'oxygéner.



Illustration 33 : Mesures de conductivité électriques effectuées sur le motu de la vigne à Rangiroa



Illustration 34 : Mesures de conductivité électrique effectuées sur le motu d'Avatoru à Rangiroa.



Illustration 35 : Mesures de conductivité électrique effectuées sur le motu de Tiputa à Rangiroa.

Motu	Avatoru	Tiputa	Vigne	Total
Largeur motu (m)	250-900	250-600	730-960	
Nombre de mesures	119	62	36	217
CE Mini (μS/cm)	187	488	221	187
CE Maxi (µS/cm)	14070	10530	848	14070
CE Moyenne (μS/cm)	2102	1857	588	1781
% valeurs inférieures à 1000 μS/cm	45	32	100	51
% valeurs inférieures à 2000 μS/cm	73	74	100	78
% valeurs inférieures à 4000 μS/cm	84	92	100	89

Illustration 36 : Répartition des valeurs de conductivité électrique en fonction des motu.



Illustration 37 : Conductivité électrique de l'eau en fonction de la cote NGPF de la mesure.



Illustration 38 : Conductivité électrique de l'eau en fonction de la distance à la côte la plus proche.

3.2.5. Suivis temporels de la pression, de la température et de la conductivité électrique de l'eau

Mise en œuvre

Le suivi temporel des variables pression, température et conductivité électrique de l'eau constitue une approche à privilégier lorsqu'on souhaite étudier le fonctionnement des aquifères.

Dans cet objectif, six puits dont 5 nivelés situés sur les motu d'Avatoru et de la vigne ont été équipés de sondes PTEC (pression/température/conductivité électrique), de façon non continue, entre la mi-septembre 2018 et la fin février 2019 (cf. Illustration 39). Le pas de temps d'acquisition a été fixé à 10 minutes.

Les paragraphes suivants font état des résultats obtenus. À noter que les variations marégraphiques représentées sur les différentes illustrations correspondent à celles enregistrées à Rangiroa. Afin de faire apparaître la nature cyclique des variations, les valeurs brutes de pression disponibles sur le site <u>http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/station.php?code=rangi</u> ont été divisées par la moyenne calculée sur la période d'observation.



Illustration 39 : Localisation des six ouvrages équipés de sondes PTEC entre mi-septembre 2018 et fin février 2019.

Des informations relatives aux épisodes pluvieux les plus importants ont également été reportées sur les illustrations afin de mettre en évidence d'éventuelles corrélations entre ces évènements et les variations temporelles des paramètres mesurés.

En contexte côtier, les mesures de conductivité électrique sont dépendantes de la position du capteur par rapport à l'interface eau douce/salée. En outre, la conversion des mesures de pression en charge hydraulique dépend de la densité de l'eau mais dans le cas présent, aucune correction n'a été apportée en raison des faibles charges observées (< 1 m).

Les différentes chroniques ont fait l'objet d'un examen visuel. L'efficience des marées a également été calculée en divisant la variation moyenne du niveau piézométrique par rapport à la variation moyenne du niveau marin. Des analyses corrélatoires et spectrales ont également été mises en œuvre.

Ces dernières peuvent en effet être appliquées aux systèmes pour décrire leur structure chronologique. L'analyse corrélatoire est fondée sur l'emploi du corrélogramme, déterminé pour les différents coefficients d'autocorrélation r_k (avec k = 0, 1, 2...m) et sur celui du spectre de densité de variance correspondant à la transformée de Fourrier de ce dernier. Le premier met en évidence l'intensité de la dépendance d'une série d'observations par rapport à elles-mêmes, en fonction d'un délai de temps croissant. Le second fournit une décomposition de la variance totale de la série pour différentes fréquences. Des analyses similaires peuvent être menées entre plusieurs variables, on les qualifie dans ce cas d'analyses croisées.

Les résultats ont été compilés dans l'Illustration 51.

Puits RGI_001

Le puits RGI_001 est un ouvrage utilisé pour les besoins de la mairie. Le niveau piézométrique, situé en moyenne à 59 cm au-dessus du niveau moyen de l'océan sur la période, est clairement influencé par les pompages et la marée (Illustration 40). Il en va de même pour la conductivité de l'eau (Illustration 41).

La sonde a été placée à 5 cm en dessous du niveau moyen de l'océan lors de la première phase d'enregistrement puis à 20 cm en dessous de ce même niveau. Ces deux positions permettent de mettre en évidence une stratification de la colonne d'eau dans le puits. On observe en effet une eau moins dense en surface (moy. CE ~ 600 μ S/cm) qu'en profondeur (moy. CE ~ 2350

 μ S/cm) et la sonde PTEC a enregistré des valeurs de conductivité électrique pouvant aller jusqu'à 2539 μ S/cm.

Indépendamment de la profondeur de placement, la conductivité électrique augmente rapidement pendant les épisodes de pompage (ex le 6 octobre 2018 sur l'Illustration 41), ce qui démontre que des eaux plus salées sont mobilisées lors de chaque exhaure. Dans ces conditions, la présence d'une lentille d'eau douce dont l'épaisseur pourrait être évaluée à une vingtaine de mètres (~ 40 x 0,59 m) par la relation empirique de Ghyben-Herzberg¹ semble peu probable.

Au droit de cet ouvrage, le calcul d'efficience des marées aboutit à une valeur de 67 % qui est probablement surestimée du fait de l'impact des pompages.

Du point de vue de la recharge, les pluies anormalement faibles de l'été austral 2018/2019 (281 mm sur la période allant du 14 septembre 2018 au 25 février 2019) n'ont pas eu d'impact significatif sur les niveaux même si chaque épisode important s'est accompagné d'une réaction de l'aquifère.

Les analyses corrélatoires et spectrales croisées menées sur l'ensemble de la chronique au moyen du logiciel XLSTAT ont enfin permis de déterminer les décalages entre les extremums de marée, de piézométrie et de conductivité électrique, de même que les périodes d'influence des marées sur ces paramètres.



Illustration 40 : Suivi du niveau piézométrique (rouge) et de la conductivité électrique (jaune) sur le puits RGI_001 entre septembre 2018 et février 2019.

¹ z = 40 h où z représente la profondeur de la limite eau douce/eau salée et h la piézométrie de la nappe



Illustration 41 : Effets de la marée et des pompages sur les niveaux et la conductivité de l'ouvrage RGI_001 (zoom sur la période du 5 au 8 octobre 2018).

Les corrélogrammes croisés (cf. Illustration 42, Illustration 43 et Illustration 44) mettent en évidence :

- un maximum de corrélation pour des décalages de 110 à 120 minutes dans le cas de la marée et des niveaux piézométriques ;
- un maximum de corrélation pour des décalages de 40 à 70 minutes (en fonction de la période d'observation retenue et de la profondeur d'installation du capteur) dans le cas de la marée et de la conductivité. En l'état des connaissances, ce différentiel reste difficile à expliquer mais il pourrait s'expliquer par la présence d'un niveau plus transmissif aux environs de la cote -0,05 m (cote à laquelle le capteur a été positionné lors de la première phase d'enregistrement).

Les spectres croisés mettent quant à eux logiquement en évidence des périodes d'influence de la marée de 12 h et 24 h sur les niveaux piézométriques et la conductivité électrique.



Illustration 42 : Analyses corrélatoires et spectrales croisées marée/niveaux piézométriques menées sur l'ouvrage RGI_001 (1 unité en abscisse = 10 min).



Illustration 43 : Analyses corrélatoires et spectrales croisées marée/conductivité électrique (période P1) menées sur l'ouvrage RGI_001 (1 unité en abscisse = 10 min).



Illustration 44 : Analyses corrélatoires et spectrales croisées marée/conductivité électrique (période P2) menées sur l'ouvrage RGI_001 (1 unité en absicsse = 10 min).

Puits RGI_020

Le puits RGI_020 se situe à l'est du motu d'Avatoru au droit d'un terrain vague. Son niveau piézométrique, situé en moyenne à 20 cm au-dessus du niveau moyen de l'océan sur la période d'observation, est clairement influencé par la marée (Illustration 45). Il en va de même pour la conductivité électrique qui a également enregistré une baisse significative entre le 26/10 et le 25/11 suite à la réalisation d'un essai de pompage par le BRGM. Cet essai a démontré que la lentille d'eau douce n'était pas développée dans cette partie de l'atoll (mobilisation d'une eau plus minéralisée au bout de quelques dizaines de minutes de pompage).

Au droit de l'ouvrage, l'efficience des marées atteint 44 % et les corrélogrammes croisés mettent en évidence une influence très rapide de la marée sur les niveaux piézométriques (décalage de 10 minutes environ) et sur la conductivité (décalage de 30 minutes environ).

Comme sur le précédent point, l'aquifère réagit aux forts épisodes pluvieux et la légère augmentation de la conductivité électrique qui est observée de façon synchrone à l'augmentation des niveaux piézométriques (épisode du 17 au 19/02 notamment) pourrait trouver son origine dans le lessivage de terrains soumis à l'influence des embruns et/ou dans la hausse de l'interface eau douce/salée.



Illustration 45 : Suivi du niveau piézométrique (rouge) et de la conductivité électrique (jaune) sur le puits RGI_020 entre octobre 2018 et février 2019.

• RGI_021

Le puits RGI_021 se situe à proximité immédiate d'une habitation mais il ne semble pas avoir été sollicité sur la période d'observation (Illustration 46). Son niveau piézométrique, situé en moyenne à 19 cm au-dessus du niveau moyen de l'océan sur la période d'observation, subit l'influence de la marée, de même que la conductivité.

Au droit de l'ouvrage, l'efficience des marées atteint 51 % et l'impact de la marée se fait rapidement ressentir sur les niveaux piézométriques et la conductivité (décalage de 20 minutes environ). L'ouvrage semble par ailleurs peu réactif aux épisodes pluvieux.



Illustration 46 : Suivi du niveau piézométrique (rouge) et de la conductivité électrique (jaune) sur le puits RGI_021 entre octobre et décembre 2018.

• Puits RGI_027

Le puits RGI_027 se situe au droit du domaine viticole. Il n'est actuellement pas exploité. Son niveau piézométrique, situé en moyenne à 15 cm au-dessus du niveau de l'océan sur la période d'observation, subit clairement l'influence des marées (phénomènes quasi synchrones, cf. Illustration 47).

La conductivité a, quant à elle, enregistré une légère hausse entre la mi-décembre et la mi-février puis une hausse plus brutale à l'occasion du fort épisode pluvieux intervenu entre le 17 et le 19 février laissant supposer des phénomènes de lessivage identiques à ceux décrits pour l'ouvrage RGI_020. Par contre, la conductivité électrique ne semble pas influencée par le phénomène de marée.

La forte efficience des marées (57 %) et la réaction très rapide des niveaux piézométriques aux effets de marée pourraient traduire la présence de terrains particulièrement transmissifs (karstiques ?) entre l'ouvrage et les côtes situées à plus de 400 m ou le confinement de l'aquifère qui le rendrait captif.

Le décalage de -10 min indiqué dans l'Illustration 51 qui pourrait traduire une réaction piézométrique préalable à celle de la marée doit être considéré avec prudence. Il se peut en effet qu'il y ait un léger décalage entre le signal de marée enregistré au niveau de la marina d'Avatoru à 5 km de distance et celui qui se propage dans l'environnement immédiat de l'ouvrage.



Illustration 47 : Suivi du niveau piézométrique (rouge) et de la conductivité électrique (jaune) sur le puits RGI_027 entre décembre 2018 et février 2019.

Puits RGI_123

Le puits RGI_123 se situe au droit d'un terrain vague et n'est pas exploité. Les enregistrements effectués entre la mi-septembre et la fin octobre sur cet ouvrage ont mis en évidence une courbe d'évolution de la conductivité atypique (cf. Illustration 48). Les effets de la marée ne semblent en effet impacter la conductivité que lors des épisodes de haute mer et qu'à partir d'un seuil de niveau piézométrique proche de 0,10 m NGPF (Illustration 49).

La hausse des niveaux piézométriques observée à partir du 18/10 ne peut, quant à elle, s'expliquer que par les effets de la marée en l'absence de précipitations importantes.

Compte tenu de ces observations, de la forte efficience des marées au droit de ce puits (63 %) et de la réaction synchrone entre marée, niveaux piézométriques et conductivité mise en évidence par les analyses corrélatoires, il est possible d'imaginer un ouvrage connecté à des structures (chenaux karstiques ?) qui ne seraient actives (ou plus actives) que lors des fortes marées. Si cette hypothèse reste à valider, elle est confortée par l'observation de terrains localement effondrés en surface.



Illustration 48 : Suivi du niveau piézométrique (rouge) et de la conductivité électrique (jaune) sur le puits RGI_123 entre septembre et octobre 2018.



Illustration 49 : Effet de seuil sur les valeurs de conductivité électrique observées au puits RGI 123.

• Puits RGI_204

Le puits RGI_204 se situe dans l'enceinte de la gendarmerie d'Avatoru et sert à l'alimentation d'une maison lorsque les citernes d'eau de pluie sont vides. Sur la période d'observation, l'habitation n'a pas été occupée et le puits n'a, a priori, pas été sollicité.

Alors que le niveau piézométrique a montré une certaine stabilité, la conductivité a enregistré une nette augmentation à partir du 16/09. Après avoir atteint 5 000 μ S/cm, le 09/10, la conductivité a chuté pour connaître une nouvelle augmentation à partir du 12/10 sans que la pluviométrie puisse être mise en cause (cf. Illustration 50).

Cette dynamique ainsi que le phénomène d'hystérèse bien marqué sur le signal de conductivité à partir du 16/09 (montées brusques suivies de descentes en 2 temps) pourraient résulter de processus de transport spécifiques depuis le lagon qui restent à identifier et pour lesquels un suivi simultané de plusieurs puits proches du lagon pourrait être mis en œuvre.

Les analyses corrélatoires mettent en évidence des décalages respectifs de 10 à 30 min pour la conductivité et les niveaux piézométriques et l'efficience de la marée atteint 60 %, traduisant la présence de sédiments grossiers entre l'ouvrage et le lagon.



Illustration 50 : Suivi du niveau piézométrique(rouge) et de la conductivité électrique (jaune) sur le puits RGI_204 entre septembre et octobre 2018.

Synthèse

De façon générale, les enregistrements réalisés sur les six puits ont permis de mettre en évidence des différences notables de comportement synthétisées dans l'Illustration 50.

En ce qui concerne les ouvrages RGI_001 (mairie) et RGI_027 (P3 vigne) respectivement situés à 310 et 400 m de la côte la plus proche, il apparaît que le premier réagit avec un décalage d'environ 2 h sur la marée alors que le second réagit quasiment instantanément.

Les quatre autres ouvrages situés à plus faible distance de la côte présentent des temps de réaction assez semblables vis-à-vis de la marée (compris entre 0 et 30 minutes). Le puits RGI_204 présente également une hystérèse (dissymétrie) du signal de conductivité électrique dont l'origine reste à déterminer.

Des arrivées d'eaux légèrement plus minéralisées ont aussi pu être notées sur au moins deux des ouvrages suivis (RGI_020 et RGI_027) lors des fortes pluies qui ont affecté l'atoll entre le 17 et le 19 février 2019. Ce phénomène en lien avec le lessivage de sols soumis aux embruns est probablement général mais il est plus difficile à identifier sur les ouvrages dont la conductivité de base est élevée.

Les six phases d'enregistrement (mises en œuvre de façon non synchrone) ont enfin permis de calculer des valeurs d'efficience de la marée comprises entre 44 et 63 %. Ces valeurs qui ne sont pas corrélées à la distance à la côte la plus proche pourraient traduire l'hétérogénéité des formations qui constituent le sous-sol de l'atoll. La présence de chenaux karstiques est notamment soupçonnée entre le lagon et les ouvrages RGI_123 (Mr Tang) et RGI_027 (P3 vigne).

Au droit de l'ouvrage RGI_027, la nature captive de l'aquifère pourrait également expliquer la propagation rapide du signal de marée malgré la distance à la côte.

	RGI_001	RGI_020	RGI_021	RGI_027	RGI_123	RGI_204
Largeur motu (m)	840	360	375	860	320	280
Distance lagon (m)	310	165	50	400	125	55
Distance océan (m)	530	195	225	460	195	225
Pompages	OUI	NON sauf essai	NON sur période	NON	NON	NON
Altitude sonde (m NGPF)	P1 : -0,05 P2 : -0,2	-0,81	-0,09	-0,47	-0,69	Puits non nivelé
Niveau moyen (m NGPF)	0,59	0,20	0,19	0,15	0,04	-
Amplitude NP (m)	0,67	0,26	0,31	0,37	0,33	0,34
Gamme variation CE	510-2539	968-1969	3286-4658	335-480	1760-2520	1700-5000
CE moyenne (µS/cm)	P1 : 597 P2 : 2340	1099 du 25/11 au 25/02	3958	418	1840	3361
Influence marées sur NP	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
Influence marées sur CE	Nette sur P2, moins sur P1	OUI	OUI	NON	Quand le NP est haut et à marée haute	OUI, 1 sur 2 à partir du 16/09
Influence pomp. sur NP	OUI	OUI lors essai	-	-	-	-
Influence pomp. sur CE	OUI	OUI lors essai	-	-	-	-
Relation NP-CE	CE augmente quand NP baisse	CE augmente quand NP baisse, retour à la normale très long	?	?	CE augmente quand NP augmente	?
Variation moy. NP (m)	0,061	0,039	0,041	0,050	0,059	0,056
Variation moy. océan (m)	0,091	0,088	0,081	0,088	0,093	0,093
Efficience marées	67 %	44 %	51 %	57 %	63 %	60 %
Décalages moyens NP/marée (min)	+110 à 120	+10	+20	-10	0	+30
Décalages moyens CE/marée (min)	P1 : +40 P2 : +70	+30	+20	-	0	+10
Remarques	Niveau + perméable à la cote - 0,05 ?	CE augmente lors épisodes lessivage	Ouvrage peu réactif à la recharge	CE augmente lors des épisodes lessivage Chenaux karstiques ? Captivité ?	Ouvrage peu réactif à la recharge Chenaux karstiques à marée haute ?	Hystérèse CE

Illustration 51 : Synthèse du suivi mené entre septembre 2018 et février 2019 sur 6 puits.

3.2.6. Profils de conductivité électrique

En complément du suivi temporel de la pression/température/conductivité électrique de l'eau, des logs ont été mis en œuvre afin d'apprécier la variabilité spatiale de ce paramètre et d'estimer l'épaisseur de la lentille d'eau douce. La transition entre eau douce et eau salée (et donc l'évolution de la conductivité électrique) en profondeur dépend des propriétés hydrodispersives de l'aquifère et de leur distribution spatiale.

Pour évaluer l'influence de la marée sur les mesures effectuées, les logs ont également été reproduits dans des contextes de niveaux d'eau différents sur certains ouvrages.

Ces opérations ont été menées entre le 24 et le 26 octobre 2018 puis entre le 10 et le 11 décembre 2018. Elles ont concerné 27 ouvrages situés sur le motu d'Avatoru (cf. Illustration 52).



Illustration 52 : Localisation des ouvrages ayant fait l'objet de logs de conductivité et conductivité maximum mesurée.

Il apparaît que trois types d'ouvrages ont pu être identifiés :

- des ouvrages au droit desquels la conductivité reste relativement faible (<1000 µs/cm) et constante : RGI_012, RGI_048 et dans une moindre mesure RGI_194 (cf. Illustration 53). À noter que les deux premiers ouvrages ne sont respectivement qu'à 48 et 110 m du lagon et que les mesures les plus profondes ont été réalisées à la cote 0,5 m NGPF. Ce comportement est représentatif d'une situation où la sonde n'a pas atteint l'interface eau douce/salée ;
- des ouvrages au droit desquels la conductivité est quasi constante puis augmente brusquement : RGI_001, RGI_004, RGI_020, RGI_039, RGI_043, RGI_121, RGI_123, RGI_128, RGI_131 et RGI_191 (cf. Illustration 54). Pour l'ensemble de ces ouvrages, le point d'inflexion qui peut correspondre à la partie supérieure de la zone de transition (interface) entre eau douce/eau salée ne se situe jamais au-delà de la cote - 0,5 m NGPF, ce qui permet de supposer que la nappe d'eau douce n'est pas développée ;
- des ouvrages au droit desquels la conductivité augmente depuis le sommet de la nappe : RGI_002, RGI_011, RGI_16, RGI_021, RGI_022, RGI_044, RGI_129, RGI-190, RGI_197, RGI_198 et RGI_199, RGI_202, RGI_203 et RGI_204 (cf. Illustration 55). Dans ces puits, l'eau interceptée correspond probablement à un mélange entre eau douce et eau salée qui persiste du fait de pompages ou de l'hétérogénéité des propriétés hydrauliques de l'aquifère.



Illustration 53 : Exemple d'ouvrage présentant une conductivité faible et constante (type 1).



Illustration 54 : Exemple d'ouvrage présentant une augmentation brutale de la conductivité (type 2).



Illustration 55 : Exemple d'ouvrage présentant une augmentation régulière de la conductivité (type 3).

La coexistence de ces 3 types (et notamment des types 2 et 3) au sein d'une zone géographiquement restreinte et dans une gamme d'altitudes similaires témoigne de l'hétérogénéité du milieu. L'Illustration 56 qui représente les différents cas possibles d'évolution de la salinité au sein d'un ouvrage (progressive ou brutale) de même que les 3 types d'ouvrages précédemment identifiés met également en évidence la nécessité de disposer d'ouvrages assez profonds pour intercepter l'interface.

En complément de ces premières observations, l'Illustration 57 précise l'épaisseur de la tranche d'eau douce (en considérant que cette dernière se caractérise par une conductivité inférieure à 2 000 μ S/cm) et l'altitude à laquelle la rupture est observée pour les ouvrages de type 2. La distance minimale à la côte a également été mentionnée.

Il apparaît qu'une couche d'eau douce a pu être reconnue sur plus de ³/₄ des points d'eau étudiés (21 sur 27) mais l'épaisseur de cette tranche d'eau est souvent délicate à estimer en raison de la faible profondeur des ouvrages (le fond des puits se situant plus haut que la base de cet horizon).

Le centre du village d'Avatoru correspond à la zone où cet aquifère est le plus développé mais l'augmentation de la conductivité observée soit depuis la surface, soit depuis des altitudes supérieures ou égales à -0.65 m NGPF sur 24 des 27 points examinés ne plaident pas en la faveur de la présence d'un aquifère d'eau douce puissant (cf. Illustration 58).

Les observations menées sur quelques ouvrages permettent également de rejeter l'utilisation de la loi de Ghyben-Herzberg pour prédire la position de l'interface eau douce/eau salée au droit de l'atoll de Rangiroa. L'application de la formule $H = 40 \times h$ où H représente la profondeur de l'interface et h, la charge hydraulique de l'aquifère placerait en effet cette limite aux alentours de 24 m pour l'ouvrage RGI_001 (mairie d'Avatoru) qui se caractérise par une charge moyenne de 0,6 m. Bien que ce puits soit ponctuellement pompé, ce qui pourrait favoriser le phénomène d'upconing, les logs de conductivité électrique réalisés tendent à montrer que cette limite se situe à bien plus faible profondeur (valeurs supérieures à 2 000 μ S/cm observées à partir d'une altitude de - 0,2 m NGPF).

Aucun des puits du motu de Tiputa n'a fait l'objet de logs de conductivité mais la configuration du motu relativement similaire à celle du motu d'Avatoru laisse supposer que les hypothèses formulées plus haut sont également valables pour ce secteur.

Enfin pour le motu de la vigne, les mesures réalisées en surface et au fond des ouvrages lors de la mission d'avril 2018 (cf. Illustration 37) n'ont pas mis en évidence d'augmentation de la conductivité avec la profondeur. Comme indiqué plus haut, l'absence d'ouvrages d'observation profonds restreint la caractérisation de l'épaisseur de la nappe d'eau douce. Sa puissance minimale a toutefois été représentée sur l'Illustration 59. À noter que celle-ci est conditionnée par la profondeur des ouvrages.

De façon générale, les logs de conductivité apparaissent comme pourvoyeurs d'informations intéressantes sur la géométrie de la lentille d'eau douce.

Les premières hypothèses concernant l'absence d'un aquifère d'intérêt sur le motu d'Avatoru (et probablement sur celui de Tiputa) restent toutefois à être confortées par d'autres approches.

Sur le motu de la vigne où la conductivité a atteint une valeur maximale de 838 µS/cm sur l'ouvrage RGI_025, le potentiel semble plus intéressant mais reste à évaluer.



Illustration 56 : Représentation schématique de l'évolution du taux de salinité avec la profondeur (à gauche, la transition est progressive ; à droite, l'interface est franche) et types d'ouvrages mis en évidence à Rangiroa.

							Valeur moyenne de
	Ouvrage	Distance mini a			franche d'eau douce	Altitude rupture (m NGPF)	conductivité sur le profil
	(RGI)	la cote (m)	(µS/cm)	(µS/cm)	(CE<2000 μS/cm)		supérieur (µS/cm)
Type 1	12	110	975	994	au moins 70 cm	Pas de rupture	Pas de rupture
	48	48	976	981	au moins 75 cm	Pas de rupture	Pas de rupture
	194	277	1084	1105	au moins 15 cm	Pas de rupture	Pas de rupture
	1	312	528	2590	60 cm	-0,05	550
	4	193	1106	1837	au moins 120 cm	-0,2	1100
	20	168	679	940	au moins 120 cm	-0,65	700
	39	217	661	3120	70 cm	-0,35	680
Tuno 2	43	45	2500	5730	absente	0,25	2500
Type 2	121	145	590	1478	au moins 120 cm	-0,65	600
	123	126	1763	6220	70 cm	-0,4	1800
	128	45	1712	15000	30 cm	0,1	1800
	131	247	795	1162	au moins 60 cm	0,2	800
	191	90	1577	11890	45 cm	-0,2	1600
	2	295	499	624	au moins 70 cm	Pas de rupture	Pas de rupture
	11	111	587	667	au moins 25 cm	Pas de rupture	Pas de rupture
	16	146	1353	1456	au moins 30 cm	Pas de rupture	Pas de rupture
	21	65	3270	4640	absente	Pas de rupture	Pas de rupture
	22	48	2130	6660	absente	Pas de rupture	Pas de rupture
	44	53	8160	8830	absente	Pas de rupture	Pas de rupture
Type 2	129	59	1743	1940	au moins 15 cm	Pas de rupture	Pas de rupture
iype 3	190	274	817	1010	au moins 25 cm	Pas de rupture	Pas de rupture
	197	184	2200	6980	absente	Pas de rupture	Pas de rupture
	198	161	1930	6530	absente	Pas de rupture	Pas de rupture
	199	63	13880	18350	absente	Pas de rupture	Pas de rupture
	202	37	1267	1672	au moins 30 cm	Pas de rupture	Pas de rupture
	203	90	1348	1464	au moins 10 cm	Pas de rupture	Pas de rupture
	204	55	1019	2440	50 cm	Pas de rupture	Pas de rupture

Illustration 57 : Synthèse des observations réalisées à l'occasion des logs de conductivité.



Illustration 58 : Épaisseurs estimées de la tranche d'eau douce sur le motu d'Avatoru à Rangiroa.



Illustration 59 : Épaisseur minimale de la tranche d'eau douce sur le motu de la vigne.

3.2.7. Essais de pompage

Mise en œuvre

En complément des investigations décrites précédemment, cinq essais de pompage de courte durée ont été réalisés lors des missions du 24 au 26 octobre 2018 (RGI_204, RGI_128 et RGI_020), du 10 au 11 décembre 2018 (RGI_001) et du 25 au 26 février 2019 (RGI_027) afin de déterminer les caractéristiques hydrodynamiques de la nappe au droit de ces ouvrages (cf. Illustration 60).

Le choix de ces puits a été conditionné par leur localisation (dans différents secteurs du motu d'Avatoru et au droit du domaine viticole) et leurs caractéristiques (tranche d'eau la plus importante possible, accès facile au site, présence d'une pompe...).

Tout au long des essais, les débits ont été mesurés à l'aide d'un seau de 10 litres et d'un chronomètre. Les enregistrements des niveaux piézométriques et de la conductivité électrique ont, quant à eux, été menés à l'aide de sondes Dipper PTEC avec un pas de mesure de 15 secondes. Des contrôles ponctuels ont également été réalisés au moyen d'une sonde piézométrique manuelle et d'une sonde multi-paramètres.

Un slug test a également été réalisé le 25 octobre 2018 au droit du forage RGI_121, situé sur le terrain de la plage communale et se caractérisant par un diamètre de 15 cm en tête de forage. Le test, mené au moyen d'un cylindre métallique, n'a induit qu'une très faible variation du niveau d'eau (5 mm). Une descente très rapide des niveaux d'eau a également été observée. Ces phénomènes qui sont soit liés à une forte perméabilité du milieu, soit à l'augmentation du diamètre de l'ouvrage en profondeur sont de ce fait ininterprétables.



Illustration 60 : Localisation des cinq ouvrages ayant fait l'objet d'un essai de pompage.

• Essai de pompage sur le puits RGI_204

Le puits RGI_204 est situé dans l'enceinte de la gendarmerie d'Avatoru. Il est occasionnellement exploité pour l'alimentation en eau des habitations de la gendarmerie (uniquement lorsque les citernes d'eau de pluie sont vides). Les caractéristiques du puits avant le début de l'essai de pompage sont les suivantes :

- repère : dalle en béton (non nivelé lors de l'intervention des géomètres en avril 2018) ;
- profondeur de l'ouvrage : 2,05 m/repère (le fond n'est pas plat) ;
- piézométrie initiale : 1,47 m/repère ;
- tranche d'eau : 0,68 m ;
- dimensions du puits : puits rectangulaire de 1,25 X 1,30 m, non creusé dans les coins assimilable à un cercle de 0,65 m de rayon ;
- couche à « papa » : toit situé à environ 1,45 m/repère ; base située à environ 2,00 m/repère (soit une épaisseur d'environ 0,55 m) ;
- distance au lagon : 55 m.

L'essai a débuté le 25/10/2018 à 10h18 et a été réalisé au moyen d'une pompe solaire en place. Il s'est déroulé pendant 45 minutes à un débit moyen de 1,2 m³/h soit 0,33 l/s. Le passage de quelques nuages après 30 minutes puis 38,5 minutes de pompage a induit des variations de débit pendant plusieurs minutes. L'essai s'est interrompu 45 minutes après le début de pompage en raison d'un passage nuageux plus important (alimentation électrique de la pompe par panneau solaire). Le rabattement était alors de 11,5 cm alors qu'un début de stabilisation semblait s'être amorcé (cf. Illustration 61).

Après 2 h 45min de remontée, un niveau supérieur de 4,5 cm par rapport au niveau initial a été observé en raison des effets de la marée montante et a dû être corrigé par interpolation.

L'interprétation du test a été menée au moyen du logiciel BRGM OUAIP (solution de Theis en tenant compte d'un effet capacitif lié aux grandes dimensions du puits) et a permis de déterminer une transmissivité de 7,68.10⁻⁴ m²/s (l'emmagasinement déterminé par OUAIP n'est quant à lui pas fiable en l'absence de piézomètre) (cf. Illustration 62).

Au cours de l'essai, la température de l'eau est restée quasi-constante (entre 28,1 et 28,3 °C). La conductivité a, quant à elle, augmenté de 2 000 à 2 200 μ S/cm au droit du capteur installé à 2,05 m de profondeur/dalle. Ces valeurs sont conformes aux valeurs enregistrées sur la période précédente à la profondeur de 2,04 m/dalle (cf. Illustration 50).



Illustration 61 : Évolution du rabattement dans le puits RGI_204 avant (courbe bleue) et après correction de l'influence de la marée (courbe orange).



Illustration 62 : Interprétation de l'essai de pompage mené dans le puits RGI_204.

• Essai de pompage sur le puits RGI_128

Le puits RGI_128 se situe dans le village d'Avatoru, dans l'enceinte de l'église catholique. Il est exploité de manière temporaire afin d'alimenter les robinets extérieurs ainsi que les sanitaires.

L'essai a été mené au moyen d'une motopompe dans les conditions suivantes :

- repère : dalle en béton ;
- altitude du repère : 2,04 m ;
- piézométrie initiale : 1,60 m/repère ;
- profondeur de l'ouvrage : 2,45 m/repère ;
- tranche d'eau : 0,85 m ;
- dimensions du puits : assimilable à un cercle de 0,6 m de rayon ;
- couche à « papa » : toit à environ 1,10 m/repère ;
- distance au lagon : 45 m.

L'essai a débuté le 26 octobre 2018 à 8h38 et a comporté trois différentes phases de pompage en raison des difficultés à régler la motopompe sur un débit adapté (cf. Illustration 63).

La première phase n'a duré que 3 minutes. Mené à un débit très élevé (estimé à une trentaine de m³/h) lors des 2 premières minutes puis à un débit plus réduit, le pompage a été stoppé pour éviter le dénoyage de la pompe. Il a induit un rabattement de 61,5 cm sans amorce de stabilisation et la remontée a été suivie pendant 27 minutes avant de lancer une deuxième phase de pompage.

Cette dernière a démarré 30 min après le début du premier essai alors que le rabattement résiduel était de 3 cm. Le pompage a eu lieu pendant 6 minutes à un débit d'environ 14 m³/h. Il a induit un rabattement de 53,8 cm sans amorce de stabilisation et la remontée a été suivie pendant près de 40 minutes jusqu'à une stabilisation à 3,5 cm du niveau initial.

La troisième phase de pompage s'est enfin déroulée pendant 10 minutes à un débit maximal de 18 m³/h (variations notables en lien avec le mauvais fonctionnement de la pompe). Le rabattement a atteint 75,4 cm et la remontée a été suivie pendant 40 minutes jusqu'à atteindre un rabattement résiduel de 5 cm dans des conditions de marée descendante.

À noter que l'ensemble de l'essai a également été suivi grâce à une sonde Dipper PTEC (enregistrement toutes les 30 secondes) dans le puits RGI_129, situé à 14 mètres au nord-est du puits de pompage (cf. Illustration 64).

À la suite du premier essai, la conductivité a fortement augmenté après l'arrêt de la pompe passant de 975 μ S/cm à plus de 20 000 μ S/cm en fin de remontée. Lors du deuxième pompage la conductivité a de nouveau augmenté passant de 20 000 à 26 000 μ S/cm. Enfin, lors de la dernière phase de pompage, la conductivité a brusquement diminué en raison d'un dénoyage partiel de la sonde puis a atteint la valeur de 28 000 μ S/cm en fin de remontée. L'eau de mer se caractérisant par une conductivité d'environ 55 000 μ S/cm (58 750 μ S/cm mesurés le 12 septembre 2018 dans la passe d'Avatoru), il apparaît que les courts pompages menés dans l'ouvrage RGI_128 ont mobilisé une eau très saumâtre dès les premières minutes de l'essai.

L'interprétation du test au moyen du logiciel OUAIP a permis de calculer une transmissivité de 1,66.10⁻³ m²/s mais le rabattement observé au droit du puits RGI_129 (piézomètre d'observation) s'est avéré trop faible pour qu'un emmagasinement puisse être estimé (cf. Illustration 65). La

diminution notable de la conductivité observée sur cet ouvrage 7 minutes après le début de la seconde phase de pompage et 4 minutes après la troisième phase dans un contexte de marée descendante peut, quant à elle, être interprétée comme la mise en mouvement d'une eau moins minéralisée, donc a priori plus superficielle.



Illustration 63 : Suivi de la piézométrie et de la conductivité sur le puits RGI_128 lors des tests de pompage.



Illustration 64 : Suivi de la piézométrie (RGI_128 et RGI_129) et de la conductivité (RGI_129) lors des tests de pompage.



Illustration 65 : Interprétation de l'essai de pompage mené dans le puits RGI_128.

• Essai de pompage sur le puits RGI_020

Le puits RGI_020, situé dans le village d'Ohotu à l'Est du motu d'Avatoru, n'est pas exploité.

L'essai a été mené au moyen d'une motopompe (la même que celle utilisée pour le test mené sur l'ouvrage RGI_128) dans les conditions suivantes :

- repère : dalle en béton ;
- altitude repère : 2,90 m ;
- piézométrie initiale : 2 ,70 m/repère ;
- profondeur de l'ouvrage : 3,80 m/repère ;
- tranche d'eau : 1,10 m ;
- dimensions du puits : assimilable à un cercle de 0,6 m de rayon ;
- couche à « papa » : toit à environ 1,90 m/repère ;
- distance au lagon : 165 m.

L'essai a débuté le 26 octobre 2018 à 11 h 24 et a été effectué par paliers successifs avec une augmentation progressive du débit sans période d'arrêt compte tenu de contraintes logistiques (cf. Illustration 66).

Le premier palier a duré 17 minutes et a été réalisé au débit de 6 m³/h. À noter que le mauvais fonctionnement de la pompe lors des 5 premières minutes de pompage a engendré des variations notables de débit.

Le deuxième palier a duré 16 minutes et a été réalisé au débit de 12,9 m³/h. Lors de cette phase, la motopompe s'est également arrêtée pendant une trentaine de secondes. Les deux derniers paliers ont enfin duré 3 minutes chacun et ont été menés aux débits respectifs de 13,4 et 20,6 m³/h.

Dans l'ensemble, les pompages ont induit une nette augmentation de la conductivité qui est passée de 760 μ S/cm à 1 870 μ S/cm en moins de 40 minutes de pompage. Après l'arrêt du pompage, la conductivité a encore augmenté pour atteindre la valeur de 2 350 μ S/cm puis s'est stabilisée aux alentours de 2 100 μ S/cm. Le retour à la normale n'est intervenu qu'un mois après la fin des opérations (cf. Illustration 45).

Les données enregistrées au cours du test ont permis de calculer une transmissivité de 1,73.10⁻³ m²/s au moyen du logiciel OUAIP (cf. Illustration 67).



Illustration 66 : Évolution du niveau piézométrique et de la conductivité lors test de pompage mené sur l'ouvrage RGI_020.



Illustration 67 : Interprétation de l'essai de pompage mené dans le puits RGI_020.

• Essai de pompage sur le puits RGI_001

Le puits RGI_001 est utilisé pour les besoins de la mairie. Il a fait l'objet d'un essai de pompage au moyen de la pompe immergée installée dans l'ouvrage dans les conditions suivantes :

- repère : dalle en béton ;
- altitude repère : 2,05 m ;
- piézométrie initiale : 1,42 m/repère ;
- profondeur de l'ouvrage : 2,24 m/repère ;
- tranche d'eau : 0,68 m ;
- dimensions du puits : assimilable à un cercle de 0,9 m de rayon ;
- distance au lagon : 310 m.

L'essai a débuté le 10 décembre 2018 à 17 h 21 et a duré une heure au débit constant de $1,44 \text{ m}^3/\text{h}$ à l'exception d'une courte interruption liée à la fermeture du robinet d'exhaure par un passant.

Le pompage a induit une baisse de la conductivité qui s'est néanmoins rapidement stabilisée autour de 650 μ S/cm. Après l'arrêt du pompage, la conductivité a augmenté pendant 1 h environ pour atteindre une valeur supérieure à la conductivité initiale. Une nouvelle baisse a alors été observée dans un contexte de marée descendante (cf. Illustration 68).

La baisse de conductivité observée lors des premières minutes de pompage n'est pas conforme aux phénomènes mis en évidence par l'Illustration 40 (hausse brutale de la conductivité induite par un pompage en condition de marée montante) mais elle est difficile à expliquer en l'état des connaissances.

Les données enregistrées au cours du test ont permis de calculer une transmissivité de 3,19.10⁻⁴ m²/s au moyen du logiciel OUAIP (cf. Illustration 69).


Illustration 68 : Évolution du niveau piézométrique et de la conductivité électrique lors de l'essai de pompage mené dans le puits RGI_001.



Illustration 69 : Interprétation de l'essai de pompage mené dans le puits RGI_001.

• Essai de pompage sur le puits RGI_027

L'ouvrage RGI_027 est le seul ouvrage du motu de la vigne à avoir été testé.

Les pompiers de la commune n'ayant pu mettre une motopompe à la disposition du BRGM, l'essai a été réalisé le 26 février2019 à partir de 8 h 34 (marée montante) au moyen d'une pompe Tornado 12 V fonctionnant sur batterie. La phase de pompage a duré 2 h au débit de 0,36 m³/h dans les conditions suivantes :

- repère : dalle en béton ;
- altitude repère : 0,79 m ;
- piézométrie initiale : 0,63 m/repère ;;
- profondeur de l'ouvrage : 1,75 m/repère ;
- tranche d'eau : 1,12 m ;
- dimensions du puits : assimilable à un cercle de 0,7 m de rayon ;
- distance au lagon : 400 m.

Les mesures de conductivité préalablement réalisées sur le secteur de la vigne n'ayant pas permis de mettre en évidence une quelconque augmentation de la conductivité entre le sommet de la nappe et le fond des ouvrages, l'essai était destiné à évaluer le temps au bout duquel de l'eau saumâtre serait mobilisée. En fait, ce phénomène n'a jamais été observé, probablement en raison du trop faible débit de pompage (cf. Illustration 70). L'interprétation des données de pression a néanmoins permis de calculer une valeur de transmissivité de 2,08.10⁻³ m²/s (cf. Illustration 69).

Si l'exploitant en est d'accord, il conviendra de renouveler cette opération en utilisant une pompe plus puissante de façon à statuer sur la présence d'un aquifère d'intérêt au droit de cette zone.



Illustration 70 : Évolution du niveau piézométrique et de la conductivité électrique lors de l'essai de pompage mené sur le puits RGI_027.



Illustration 71 : Interprétation de l'essai de pompage mené dans le puits RGI_027.

Synthèse

Les résultats des cinq essais de pompage ont été synthétisés dans l'Illustration 72 puis comparés aux résultats des tests menés dans le passé à l'exception de ceux réalisés au droit du CES d'Avatoru (transmissivités comprises entre 2,56 et 4,57.10⁻² m²/s) (cf. Illustration 73).

Il apparaît que les résultats obtenus par le BRGM (représentés en jaune) sont similaires aux valeurs déterminées dans le passé et que les valeurs varient dans un rapport de 1 à 8 entre la valeur la plus faible et la valeur la plus forte.

Ces résultats sont également conformes aux résultats des analyses corrélatoires qui ont mis en évidence des décalages importants entre les signaux de marée et le niveau piézométrique au droit du puits de la mairie RGI_001 (transmissivité la plus faible) et des réactions quasi synchrones au droit du puits RGI_027 (transmissivité la plus élevée). La transmissivité élevée mesurée dans le passé au droit du site « Club Med » pourrait également expliquer les réactions synchrones observées sur l'ouvrage RGI_123 situé dans le même secteur.

Puits de pompage	Rayon du puits* (m)	Date du début de l'essai	Niveau d'eau initial (mNGPF)	Débit de pompage (m3/h)	Durée de pompage (min)	Piézomètre de suivi	Transmissivité (m²/s)
RGI_204	<mark>0,65</mark>	24/10/2018 à 10h14	1,47 m/rep	1,2	45	Non	7,68 E-4
RGI_128	0,60	26/10/2018 à 8h38	0,44	35/14/18	3/6/10	RGI_129	1,66 E-3
RGI_020	0,65	26/10/2018 à 11h24	0,20	6/13/16/ 21	39	Non	1,73 E-3
RGI_001	0,90	10/12/2018 à 17h15	0,63	1,4	60	Non	3,19 E-4
RGI_027	0,70	26/02/2019 à 8h34	0,16	0,4	120	Non	2,08 E-3

* : rayon du cercle inscrit dans les ouvrages de forme carrée

Illustration 72 : Résultats des essais de pompage de courte durée menés à Rangiroa.



Illustration 73 : Comparaison des transmissivités obtenues par le BRGM (jaune) et des données anciennes (bleu).

Si l'on considère que les valeurs de transmissivité déterminées sont représentatives des horizons les plus superficiels (âge Holocène), elles peuvent être comparées aux valeurs de perméabilité utilisées en modélisation et recensées par Werner *et al.* 2017 pour cet horizon hydrogéologique (cf. Illustration 74). Les trois premières colonnes du tableau mentionnent en effet les valeurs extrêmes et moyennes retenues pour les perméabilités horizontale (KHx) et verticale (KHz) de ces formations holocènes de même que le rapport entre les 2 valeurs.

Sur la base d'une transmissivité moyenne de $1,23 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (calculée à partir des valeurs représentées sur l'Illustration 72) et en considérant que l'épaisseur de l'aquifère holocène est de 10 m environ, il est possible de calculer une perméabilité de $1,23 \times 10^{-4}$ m/s pour caractériser les formations récifales de l'atoll de Rangiroa. Cette valeur s'inscrit parfaitement dans les gammes de valeurs retenues par Werner *et al.* (2017).

	<i>KH,x</i> [m/s]	<i>KH,z</i> [m/s]	KH,x/KH,z	<i>KP,x</i> [m/s]	<i>KP,z</i> [m/s]	KP,x/KP,z
Minimum	1,16 x 10⁻⁵	2,31 x 10 ⁻⁶	5,0	1,74 x 10 ⁻⁴	4,63 x 10 ⁻⁵	3,8
Moyenne	7,14 x 10 ⁻⁴	1,30 x 10 ⁻⁴	5,5	1,30 x 10 ⁻²	2,40 x 10 ⁻³	5,4
Maximum	3,13 x 10 ⁻³	7,99 x 10 ⁻⁴	3,9	5,79 x 10 ⁻²	1,16 x 10 ⁻²	5,0

Illustration 74 : Propriétés hydrodynamiques utilisées dans les modèles numériques sur les atolls (tiré de Werner et al. 2017) (H : Holocène ; P : Pléistocène).

3.3. ÉLÉMENTS DU BILAN HYDROLOGIQUE

Afin de compléter les investigations précédentes, deux approches visant à évaluer les modalités de recharge de l'aquifère ont été menées. La première a consisté à mener un bilan de Thornthwaite en utilisant le logiciel ESPERE (Lanini *et al.*, 2015) et la seconde, à estimer la recharge au moyen d'un suivi piézométrique spécifique mené pendant la période pluvieuse 2018/2019. Ces deux approches sont décrites après la description des données disponibles sur l'atoll.

3.3.1. Données disponibles

L'atoll de Rangiroa est équipé d'une seule station météorologique. Cette dernière, implantée au droit de l'aéroport, fonctionne depuis le 1^{er} septembre 1951 mais l'évapotranspiration potentielle (ETP, méthode de Monteith) n'y a été calculée qu'entre le 17 octobre 1971 et le 4 février 1988 (cf. Illustration 75).

Le site <u>https://donneespubliques.meteofrance.fr/</u> a permis de télécharger ces données de même que les données journalières de pluie à partir de la même date. À noter que la chronique présente une lacune principale d'environ 10 années (6 février 1988-31 décembre 1999) (cf. Illustration 76). D'autres lacunes de moindre durée sont également à signaler à partir du 1^{er} janvier 2000.

Les cumuls annuels ont été représentés sur l'Illustration 77 avec un code couleur permettant de repérer les années sans lacunes (en bleu) et les années où le taux d'acquisition des données est supérieur à 90 % (en vert), est compris entre 50 et 90 % (en orange) ou est inférieur à 50 % (en rouge).

Sur la période 1972-1987, la pluviométrie moyenne annuelle représente **1778 mm**. À titre de comparaison, la normale pluviométrique établie sur la période 1981-2010 pour le poste de Tahiti Faa'a atteint 1 688 mm.



Illustration 75 : Chronique d'ETP disponible pour la station Rangiroa aéroport.



Illustration 76 : Chronique des pluies disponibles pour la station Rangiroa aéroport.



Illustration 77 : Cumuls annuels de pluie mesurés sur la station Rangiroa aéroport (en bleu : années complètes, en vert : au moins 90 % de données, en orange : entre 50 et 90 % de données, en rouge : moins de 50 % de données).

3.3.2. Bilan de Thornthwaite

Au droit des atolls, les phénomènes de ruissellement sont généralement limités et négligeables en raison de la topographie très plate et de la très forte capacité d'infiltration des sols. Les phénomènes d'inondation comme ceux qui ont affecté l'atoll de Rangiroa après les très fortes pluies des 26 et 27 février 2016 (cumul de 488 mm) restent exceptionnels et liés au débordement de la nappe (cf. Illustration 78).



Illustration 78 : Inondations à Rangiroa en février 2016 (https://www.tahiti-infos.com/).

Dans ces conditions, sur une longue période, la recharge annuelle de la nappe peut être calculée par la formule :

$R=P-ETR-\Delta V$

où P représente la pluie, ETR l'évapotranspiration réelle (qui dépend de l'ETP et de la réserve en eau des sols ou « RFU ») et ΔV la fluctuation de stock sur l'atoll. Si l'on considère une période suffisamment longue (une année hydrologique par exemple), au début et à la fin de laquelle les stocks d'eau sont proches, ΔV peut être négligé.

Le logiciel ESPERE, développé par le BRGM (Lanini *et al.*, 2015) a permis de calculer l'ETR (à partir de la formule de Thornthwaite) et les valeurs de pluies efficaces moyennes pour différentes valeurs de Réserve en eau Facilement Utilisable des sols (RFU²) à partir des chroniques de pluie et d'ETP enregistrées sur la station de l'aéroport. Le logiciel nécessitant de disposer d'années complètes d'observation, le calcul n'a pu être mené que sur la période 1972-1987 (cf. Illustration 79). Comparés à la pluviométrie moyenne sur la période (1 778 mm), les cumuls annuels de pluies efficaces représenteraient 34 à 60 % des précipitations selon l'hypothèse de RFU qui est retenue.

Afin d'identifier le coefficient le plus proche de la réalité et la RFU correspondante, il convient de déterminer, dans un contexte de sous-saturation des sols (RFU vide), le seuil de précipitations à partir duquel le niveau piézométrique réagit.

L'analyse a été menée sur les enregistrements effectués au droit de l'ouvrage RGI_001 et particulièrement sur la période du 19 septembre au 4 octobre 2018 où deux évènements pluvieux importants bien individualisés ont pu être identifiés (cf. Illustration 80).

² RFU : quantité d'eau contenue dans le sol en dessous de laquelle une plante flétrit

	RFU 5 mm	RFU 10 mm	RFU 20 mm	RFU 50 mm
Janvier	146,2	134,8	120,5	91,9
Février	144,3	134,4	123,0	104,5
Mars	85,6	77,4	67,0	52,0
Avril	95,5	88,0	77,7	57,6
Mai	45,6	37,2	27,9	12,5
Juin	70,1	62,1	50,7	33,3
Juillet	35,8	29,4	21,0	11,5
Août	31,4	24,0	13,9	6,8
Septembre	52,7	45,2	35,1	20,4
Octobre	84,4	74,8	62,5	40,6
Novembre	140,5	127,8	111,8	86,9
Décembre	137,3	124,9	109,8	88,6
Somme	1069,2	959,9	820,9	606,8
% Pluie movenne	60%	54%	46%	34%

Illustration 79 : Pluies efficaces mensuelles moyennes (= recharge) calculées au moyen de la formule de Thornwaithe en fonction de différentes hypothèses de RFU (période 1972-1987).



Illustration 80 : Évolution des niveaux piézométriques en fonction de la marée et de la pluviométrie sur l'ouvrage RGI_001.

Il apparaît que l'épisode du 21/09 (30,2 mm) a eu pour conséquence de faire augmenter les niveaux piézométriques d'environ 10 cm dans un contexte de marées d'amplitudes quasi identiques. Il semble ensuite que les niveaux aient lentement diminué soit sous l'effet de marées de plus faibles amplitudes, soit sous l'effet d'une vidange de l'aquifère.

Compte tenu de la hausse des niveaux piézométriques observée les 30 septembre et 1^{er} octobre dans un contexte de mer plus haute et en l'absence de précipitations, la première hypothèse paraît plus plausible. La légère augmentation des niveaux piézométriques observée à partir du 3 octobre pourrait également être liée au même type de phénomène et non pas à l'épisode pluvieux du 2 octobre (15,5 mm).

Si l'on considère que l'aquifère ne réagit pas aux épisodes pluvieux de 15 mm mais à ceux de 30 mm, on peut imaginer que la RFU soit de l'ordre de 20 mm. On retient ainsi un taux de 46 % (Illustration 79) pour la part de pluies efficaces (Illustration 79). Dans ces conditions et sur la base d'une pluviométrie moyenne annuelle de 1 777,9 mm, il est alors possible de calculer une pluie efficace moyenne de 820 \pm 80 mm en considérant une erreur possible de 10 %.

Le logiciel ESPERE permet également d'accéder à la répartition mensuelle des cumuls. L'Illustration 81 établie à partir des données observées sur la période 1972-1987 et de l'hypothèse d'une RFU de 20 mm montre que la période privilégiée de recharge de la nappe correspond à la période novembre/février et que cette dernière est très limitée entre mai et août.





À partir de cette évaluation, l'enjeu consiste à savoir comment se répartissent les cumuls entre :

- alimentation réelle de la nappe ;
- fuites vers le lagon ou l'océan ;
- satisfaction supplémentaire des besoins d'une végétation spécifique (différente de la référence utilisée pour calculer l'ETP).

L'alimentation réelle de la nappe et les fuites vers l'océan ou le lagon vont être appréhendées par une analyse de la piézométrie lors de la période de recharge (§ 3.4) et une modélisation de la lentille d'eau douce (§ 3.4).

En 2017, Werner *et al.* ont, quant à eux, mentionné que les besoins d'une cocoteraie où les arbres sont espacés de 8 m pouvaient représenter de 400 à 700 mm par an, soit une moyenne de 45 mm par mois. En estimant que les cocoteraies représentent 30 % de la superficie des motu à Rangiroa, il est proposé de retenir en première approximation une évapotranspiration supplémentaire comprise entre 120 et 210 mm/an, soit 165 \pm 45 mm/an.

3.3.3. Analyse du comportement de l'aquifère lors de la période de recharge

En préambule à cette analyse, il convient de remarquer que l'année 2018 s'est caractérisée par un cumul pluviométrique nettement plus faible (1 095,6 mm avec 7 valeurs manquantes) que le cumul annuel moyen déterminé sur la période 1972-1987 (1 778 mm/an).

La période durant laquelle les sondes automatiques ont été installées dans les puits s'est également caractérisée par de faibles cumuls (281,5 mm entre le 14 septembre 2018 et le 25 février 2019 avec 3 valeurs manquantes) qui ne représentent que 16 % de la pluviométrie moyenne. Les précipitations se sont toutefois réparties de façon assez homogène sur la période (cf. Illustration 82).



Illustration 82 : Pluviométrie journalière sur la période septembre 2018-février 2019.

Bien que les conditions ne soient pas optimales pour étudier l'effet de la recharge sur les niveaux piézométriques, la mise en œuvre du modèle ESPERE avec les précipitations 2017 et 2018 enregistrées à l'aéroport (2017 est une année complète et 2018 se caractérise par 7 valeurs manquantes), les valeurs d'ETP enregistrées à Faa'a augmentées de 12 % (coefficient déterminé après une comparaison des séries respectives sur la période 1972-1987 : Illustration 83) et une RFU fixée à 20 mm a permis d'estimer les cumuls de pluies efficaces mensuelles pour les mois de septembre à décembre 2018 (cf. Illustration 84). Les valeurs relatives aux mois de janvier et février n'ont, quant à elles, pas pu être déterminées en raison du mode de calcul annuel du logiciel.

Ces valeurs sont bien inférieures aux valeurs moyennes de l'Illustration 81 et si l'on retire aux valeurs déterminées les 14 mm correspondant aux besoins mensuels de la cocoteraie, il apparaît que les pluies efficaces n'ont contribué à la recharge de la nappe qu'en janvier et février sur l'année 2018.

Dans ces conditions, il est normal de ne pas observer de tendance à la hausse des niveaux piézométriques sur la période septembre/décembre 2018.

Malgré les nombreux prélèvements domestiques et en l'absence de recharge, on remarque également que les niveaux ne présentent pas de tendance à la baisse sur la même période. Ceci semble indiquer que les prélèvements ne représentent qu'une infime partie de la masse d'eau douce et que le niveau de cette dernière est essentiellement contrôlé par les marées.

Les conditions particulièrement sèches observées en 2018 pourraient également être à l'origine des observations faites précédemment concernant la présence aléatoire d'une ressource douce sur le motu d'Avatoru. Elles ne sont en tout cas pas adaptées à l'étude des mécanismes de vidange de la nappe vers l'océan ou le lagon.

	ETP RANGIROA	ETP FAAA
1972	1933	1533,5
1973	1810,1	1603,7
1974	1867,1	1609
1975	1887,9	1653,4
1976	1762,7	1784,4
1977	1699,4	1681,4
1978	1734,1	1669,3
1979	1664,7	1487,3
1980	1756,9	1557,7
1981	1792,1	1511,6
1982	1766,9	1642,3
1983	1695,8	1639
1984	1868,2	1682
1985	1891,6	1550,6
1986	1948,2	1584,6
1987	1831,6	1651
Total	28910,3	25840,8

Illustration 83 : Comparaison des ETP calculées à Rangiroa et Faa'a sur la période 1972-1987.



Illustration 84 : Pluies efficaces mensuelles sur la période 2017/2018.

3.4. MODÉLISATION DE LA LENTILLE D'EAU DOUCE

Après l'examen des données bibliographiques, les reconnaissances de terrain et l'estimation des éléments du bilan hydrologique, la mise en œuvre de la solution analytique de Henry (1954) constitue le quatrième volet de l'approche hydrogéologique.

Elle est destinée d'une part, à évaluer la recharge naturelle vers l'aquifère supérieur de l'atoll (*K*) et d'autre part, à modéliser la géométrie de la lentille d'eau douce.

Cette relation permet en effet de calculer l'altitude de la surface piézométrique de la nappe d'un atoll de longueur infinie en fonction de la recharge naturelle de l'aquifère (R) et de la perméabilité (K), x, représentant la distance à la côte, L, la largeur de l'atoll (distance entre lagon et océan) et β , le rapport ($\rho_{seawater}$ - $\rho_{freshwater}$)/ $\rho_{freshwater}$.

$$h^2 = \frac{\beta R x}{K(1+\beta)} (L-x)$$

Une simple modification de cette relation permet d'établir une relation entre la perméabilité K et la recharge R (appelée ci-dessous solution de Henry modifiée) :

$$R = \frac{h^2(1+\beta)K}{\beta x(L-x)}$$

Cette relation permet donc d'estimer la recharge naturelle sur base du niveau piézométrique et de la perméabilité de l'aquifère. Elle a été appliquée aux trois puits sur lesquels une transmissivité a pu être estimée par essai de pompage et pour lesquels une chronique de niveaux d'eau était disponible entre mi-septembre 2018 et février 2019. Il s'agit des ouvrages RGI_001, RGI_020 et RGI_027 dont les caractéristiques sont décrites dans l'Illustration 85. À noter que les perméabilités mentionnées dans le tableau ont été calculées à partir de la transmissivité obtenue par essai de pompage et d'une épaisseur de 10 m pour l'aquifère supérieur.

		RGI_001	RGI_020	RGI_027
Longueur du tronçon	<i>L</i> (m)	840	360	860
Distance côte la plus proche	<i>x</i> (m)	310	165	400
Niveau piézométrique moyen*	H (mNGPF)	0,59	0,2	0,15
Transmissivité	<i>T</i> (m²/s)	3,20 x 10 ⁻⁴	1,70 x 10 ⁻ 3	2,10 x 10 ⁻³
Perméabilité	<i>K</i> (m/s)	3,20 x 10⁻⁵	1,70 x 10 ⁻ 4	2,10 x 10 ⁻⁴

Illustration 85 : Caractéristiques des puits sur lesquels la relation de Henry modifiée a été appliquée.

* : Niveau moyen observé sur la période d'observation (septembre 2018-février 2019)

L'application de la solution de Henry modifiée aux trois puits est présentée sous la forme de trois abaques (cf. Illustration 86). On observe que, pour ces trois puits, la recharge naturelle augmente de 0 et 500 mm/an pour des perméabilités comprises entre 10^{-5} et 3 x 10^{-3} m/s.



Illustration 86 : Relation entre la recharge R et la perméabilité K selon la solution de Henry modifiée appliquées à trois puits.

Le report des perméabilités obtenues par essais de pompage sur le graphique permet d'identifier, pour chaque puits, un taux de recharge naturelle aux environs de l'ouvrage : 35 mm/an aux environs du puits RGI_027, 90 mm/an aux environs de RGI_020 et 280 mm/an aux environs de RGI_001.

Ces valeurs, qui représentent une moyenne de 135 mm/an, sont faibles par rapport aux précipitations efficaces préalablement estimées (820 mm/an). Elles indiqueraient qu'une lame d'eau importante s'écoulerait sous forme d'écoulement hypodermique au-dessus de la couche à papa vers le lagon ou l'océan.

Sur la base des valeurs de *K* et de *R* obtenues ci-dessus, la solution classique de Henry a été appliquée de façon couplée à la solution de Ghyben-Herzberg pour estimer la profondeur de l'interface eau douce/eau salée au niveau de 2 tronçons qui ont fait l'objet d'un levé piézométrique en juillet 2017 et en avril 2018 (cf.

Illustration 87).

Il apparaît que l'interface eau douce/eau salée devrait se situer entre 6 et 8 mètres sous la surface des motu. L'observation d'une augmentation de la salinité à des profondeurs bien plus faibles témoigne :

- 1) du fait que les prévisions faites avec la loi de Ghyben-Herzberg peuvent être erronées ;
- 2) de l'existence d'une zone de transition sans doute liée aux mélanges créés par les marées (non prises en compte dans cette approche).

Afin de palier à ce manque, l'effet des marées est analysé dans le chapitre suivant.



Illustration 87 : Calcul de la surface piézométrique de la nappe aquifère au moyen de la solution de Henry et de l'interface eau douce/eau salée au moyen de la solution de Ghyben-Hezberg sur les secteurs de Ohotu (a) et du vignoble (b).

3.5. ANALYSE ET MODÉLISATION DES EFFETS DE MARÉE SUR LA PIÉZOMÉTRIE

La modélisation des effets de marée sur la piézométrie est destinée à déterminer les propriétés hydrodynamiques de l'aquifère côtier et constitue le dernier volet de l'approche hydrogéologique.

Elle permet notamment d'accéder à la diffusivité hydraulique D [L²/T] correspondant au rapport de la transmissivité T (T = Kb [L²/T], avec K = conductivité hydraulique et b = épaisseur de l'aquifère) sur l'emmagasinement S ($S = S_sb$ [-], avec S_s = emmagasinement spécifique [L]) dans un milieu poreux homogène.

L'approche repose sur l'interprétation quantitative du signal de marée et de sa propagation entre la côte et un point d'observation situé au sein de l'aquifère.

3.5.1. Méthodologie

Sur de courtes périodes de temps, *le signal de marée* peut être modélisé suivant la fonction sinusoïdale unimodale suivante :

$$h(t) = h_0 \sin \frac{2\pi t}{t_0} \tag{1}$$

où h_0 [L] correspond à l'amplitude de la marée et t_0 [T] à sa période (temps entre deux maxima ou deux minima). Le marnage correspond, quant à lui, à la différence de hauteur d'eau entre la pleine mer et la basse mer (amplitude crête à crête, soit $2h_0$).

Des signaux de marée plurimodaux peuvent aussi être considérés pour tenir compte de la superposition de forçages qui impactent la marée. Dans ce cas, le modèle avec i modes s'écrit :

$$h(t) = H + \sum_{i=1}^{n} h_i \sin\left(\frac{2\pi t}{t_i} + \phi_i\right)$$
(2)

où *H* [L] correspond à l'altitude moyenne du niveau marin, h_i [L] à l'amplitude, t_i [T] à la période et Φ_i [-] au déphasage du mode *i* de la marée.

Dans un aquifère confiné (ou pour un aquifère libre où la variation de charge est très inférieure à l'épaisseur de l'aquifère) en lien avec l'océan, l'amplitude de la fluctuation de la marée, h(x), est donnée par la formule (Jacob, 1950) :

$$h(x) = h_0 \exp\left(-x \sqrt{\frac{\pi S}{t_0 T}}\right)$$
(3)

Ces 3 équations constituent la base des analyses suivantes.

3.5.2. Analyse unimodale

Dans un premier temps, un modèle de marée unimodal a été ajusté sur un intervalle de 4 jours avec une période de 12,31 h (cf. Illustration 88). Il apparaît que sur cette courte période de temps, la marée est nettement influencée par l'harmonique principale semi-diurne de la lune M2 (cf. Illustration 89Illustration 89 et Illustration 90). Les niveaux piézométriques suivent cette dynamique avec un délai et une amplitude variables comme le montrent les séries temporelles également représentées.



Illustration 88 : Modèle de marée unimodal ajusté sur l'intervalle 25-29/09/2018 avec une période de 12.31h (les puits sont classés en fonction de la distance à la côte et la hauteur moyenne est arbitraire).

Symbole	Période (h)	Fréquence (cph)	Origine	Туре
M2	12,4206012	0,0805114	Lunaire principale	Semi-diurne
S2	12	0,08333333	Solaire principale	Semi-diurne
N2	12,6583475	0,07899925	Ellipse lunaire	Semi-diurne
K1	23,9344721	0,04178074	Lunaire	Diurne
01	25,8193387	0,03873066	Lunaire	Diurne

Illustration 89 : Caractéristiques des principales composantes des marées sur Terre

	Composante de marée				
Site	M2	S2	N2	К1	
océan	0.11	0.0342	0.0159	0.0133	
ocean	(65.9)	(31.8)	(63.8)	(292.8)	
rgi 204	0.055115	0.026718	0.00932	0.017517	
1g1204	(330.22)	(307.29)	(313.32)	(76.13)	
rgi021	0.0556	0.016	0.00801	0.00736	
rgiuzi	(161.4)	(99)	(153.8)	(126.7)	
rgi122	0.0747	0.0264	0.0119	0.00801	
Igi125	(137.8)	(89.1)	(118.6)	(141)	
rgi020	0.0518	0.0125	0.0087	0.00868	
rgiuzu	(151.77)	(108.49)	(148.08)	(147.57)	
rgi001	0.025654	0.013934	0.005366	0.010459	
IGIOOT	(206.3)	(167.9)	(203.8)	(51.9)	
rgi027	0.0731	0.0188	0.0136	0.0149	
rgi027	(140.78)	(105.38)	(132.63)	(134.57)	

Illustration 90 : Amplitudes et phases (entre parenthèse) des harmoniques de marées ajustées au marégraphe (données radar de la station SHOM) de Rangiroa et aux puits instrumentés

Les différences d'amplitude et de phase entre les chroniques piézométriques illustrent l'effet d'atténuation de la propagation du signal de marée dans l'aquifère et l'influence des propriétés hydrauliques de ce dernier. Il apparaît ainsi que l'amplitude du signal décroit et le délai augmente avec la distance.

Les diffusivités obtenues pour l'ensemble des ajustements ont été synthétisées dans l'Illustration 91. Étant particulièrement élevées (moyenne de 7,5 m²/s), elles suggèrent un comportement hydrodynamique de type captif pour l'aquifère.

Pour les ouvrages ayant fait l'objet d'un pompage d'essai et d'une détermination de la transmissivité, il a été possible de calculer la valeur de l'emmagasinement. Les valeurs obtenues oscillent entre 7 x 10^{-5} et 3,5 x 10^{-4} et sont représentatives d'un aquifère captif ou semi-captif. Dans ces conditions, il est possible que l'aquifère soit confiné sous la couche à conglomérats (ou à papa) décrite au début de ce rapport et interceptée par de nombreux puits.

Site	Z (m NGPF)	Distance océan/atoll (m)	Altitude du fond de puits (m NGPF)	D = T/S (m ² .s ⁻¹)	T (m²/s)*	S (-)
RGI_204	?	56	-0,64 (?)	2,2	7,7 x 10 ⁻⁴	3,5 x 10⁻⁴
RGI_123	1,78	126	-1,023	14,4	-	-
RGI_001	1,794	312	-0,188	4,9	3,2 x 10 ⁻⁴	7 x 10⁻⁵
RGI_020	2,899	168	-0,95	5,1	1,7 x10 ⁻³	3,3 x 10 ⁻⁴
RGI_027	0,792	400	-0,738	18,1	2,1 x 10 ⁻³	1,1 x 10 ⁻⁴
RGI_021	2,899	65	-0,073	0,9	-	-

Illustration 91 : Diffusivités obtenues par analyse unimodale, transmissivités obtenues par essais de pompage et emmagasinements déduits.

3.5.3. Analyse plurimodale

Sur une période de temps plus importante, l'amplitude des marées diffère. Il est donc nécessaire de considérer un modèle à plusieurs harmoniques.

L'identification des harmoniques est réalisée par décomposition des enregistrements des variations du niveau océanique et des niveaux piézométriques dans le domaine fréquentiel par une transformée de Fourier.

Pour le signal de marée, les harmoniques clairement identifiables sont M2, S2, N2 (semi-diurne) et K1 (diurne) (cf. Illustration 92). On les retrouve sur l'enregistrement relatif à l'ouvrage RGI_020 (cf. Illustration 93) ainsi que sur les autres puits.

La présence de ces harmoniques dans les fluctuations des niveaux piézométriques démontre la transmission des différentes harmoniques du signal de marée à l'aquifère et concorde avec les analyses corrélatoires et spectrales présentées dans le chapitre 3.2.5. Il est alors possible d'ajuster un nouveau modèle plurimodal tenant compte de ces composantes (cf. Illustration 94 et Illustration 95) et de filtrer le signal de marée des enregistrements de piézométrie afin d'identifier l'impact de la recharge sur la piézométrie.



Illustration 92 : Mise en évidence des pics de fréquences des marées sur le spectre de densité du niveau océanique.



Illustration 93 : Mise en évidence des pics de fréquences des marées sur le spectre de densité de la chronique relative au puits RGI_020.



Illustration 95 : Comparaison entre variations du niveau piézométrique au puits RGI_020 (en noir) et modèle plurimodal (en bleu).

Il apparaît que le modèle plurimodal permet de reproduire correctement le signal de marée enregistré au marégraphe à l'exception de quelques phénomènes de surcotes pouvant être liés à des changements de pression atmosphérique ou de la direction du vent.

Les fluctuations des niveaux piézométriques sont également bien reproduites sur la même période (25 jours). L'examen détaillé de l'Illustration 95 permet néanmoins de remarquer qu'à partir du 18 février et pendant 4,5 jours, les niveaux piézométriques sont supérieurs à ceux prédits par le modèle. Ce phénomène pourrait s'expliquer par les précipitations qui ont affecté l'atoll les 17 (12,3 mm), 18 (17,2 mm) et 19 (5,2 mm) février. Le retour à la normale est toutefois rapide et pourrait suggérer des phénomènes importants de fuites vers l'océan.

3.5.4. Filtrage des signaux de marée

Pour mettre en évidence l'influence de forçages externes comme les pompages ou la recharge sur les niveaux piézométriques, il est proposé d'examiner les résidus (la différence) entre les fluctuations piézométriques et celles déterminées par le modèle.

L'Illustration 96 représente les résidus calculés pour le puits RGI_020. Pour cet ouvrage, les valeurs négatives observées en début de chronique peuvent être liées à l'impact de l'essai de pompage mené par le BRGM le 26 octobre 2018 (cf. Illustration 45 et Illustration 66). Les évènements pluviométriques supérieurs à 15 mm semblent également engendrer des niveaux supérieurs aux valeurs prévisionnelles mais certains résidus (notamment ceux observés fin décembre, à la mi-janvier ou fin janvier) restent difficiles à expliquer.

Le calcul des résidus pour les autres ouvrages instrumentés (cf. Annexe 2) a montré que les puits RGI_001 et RGI_027 étaient les ouvrages qui répondaient le mieux à la recharge. Il s'agit également des puits situés le plus loin de la côte. La réaction des ouvrages RGI_020 et RGI_021 semble plus modérée et celle de l'ouvrage RGI_123, inexistante, ce qui est en accord avec les commentaires rédigés dans le paragraphe 3.2.5 (suivis temporels).

Pour les 3 derniers ouvrages (situés à plus faible distance de la côte), l'hypothèse d'un confinement plus marqué et/ou d'une influence prépondérante de la marée peut être formulée ; l'incertitude pouvant être levée en opérant un suivi des niveaux lors d'une période où les pluies sont plus intenses.



Illustration 96 : Résidus suite au filtrage des composantes de marée sur les niveaux piézométriques du puits RGI_020 (traits rouges verticaux = dates auxquelles les cumuls journaliers pluviométriques ont été supérieurs à 15 mm) ;

3.6. SYNTHÈSE

L'approche hydrogéologique décrite précédemment et basée sur huit volets a permis de mettre en évidence certaines caractéristiques de l'aquifère supérieur.

Ce dernier serait de manière générale confiné par la couche à conglomérats (ou couche à papa) sur laquelle se sont développés les motu. La couche indurée dont l'épaisseur peut atteindre 2 mètres se situe entre 1 et 2,5 m du sol mais peut également être absente.

Cet aquifère est sollicité par de très nombreux puits particuliers dont la profondeur n'excède pas 4 m. L'étroitesse des motu fait que la plupart d'entre eux se situent à moins de 150 m du lagon ou du lagon, ce qui accroît leur vulnérabilité par rapport à d'éventuelles intrusions salées.

De façon générale, les charges hydrauliques sont faibles (0,2 m NGPF en moyenne) mais plus élevées au centre des motu (quelques valeurs supérieures à 0,5 m NGPF). Les niveaux piézométriques sont également très impactés par les effets de marée.

Les nombreuses valeurs de conductivité supérieures à 2 000 μ S/cm observées à des altitudes proches de l'altitude 0 NGPF sur le motu d'Avatoru laissent supposer que la lentille d'eau douce n'est que très peu développée dans ce secteur, ce qui est contraire aux prévisions qui pourraient être faites avec la loi de Ghyben-Herzberg. Cette hypothèse a notamment été validée par les logs de conductivité (seuls 3 ouvrages sur les 27 testés ont présenté une tranche d'eau douce supérieure à 1 m). La situation est probablement identique sur le motu Tiputa qui présente une morphologie similaire.

Sur le motu de la vigne, la lentille d'eau douce est probablement plus développée car aucune des mesures de conductivité n'a dépassé la valeur de 1 000 µS/cm mais l'absence d'ouvrage profond n'a pas permis de mettre en évidence une tranche d'eau douce supérieure à 1,6 m.

En ce qui concerne les autres paramètres physico-chimiques, les eaux se caractérisent par des pH compris entre 7 et 8 et des potentiels d'oxydo-réduction moyens (compris entre 200 et 400 mV).

Les enregistrements des paramètres pression, température et conductivité au droit de 6 puits sur l'intervalle septembre 2018/février 2019 ont mis en évidence des différences de comportement notables vis-à-vis des forçages extérieurs (pluviométrie, marée, pompages...) avec notamment des temps de réaction vis-à-vis de la marée compris entre 0 et 120 min. L'efficience des marées (amplitude des variations piézométriques/amplitude de la marée) varie, quant à elle, entre 44 et 63 % au droit des différents ouvrages et traduit la présence de sédiments grossiers.

Les valeurs de transmissivités déduites des expériences de pompages s'étagent entre 3,2 x 10^{-4} et 2,1 x 10^{-3} m²/s. Elles sont en accord avec les données plus anciennes ainsi qu'avec les données bibliographiques relatives aux atolls. Sur la base de ces valeurs et d'un travail de modélisation des niveaux piézométriques tenant compte des effets de marée, des valeurs d'emmagasinement comprises entre 7 x 10^{-5} et 3,5 x 10^{-4} confirmant la nature captive ou semicaptive de l'aquifère ont également pu être calculées.

Sur la base d'une pluviométrie annuelle moyenne de 1778 mm et d'une RFU de 20 mm, les pluies efficaces moyennes ont pu être évaluées à 820 mm avec une période de recharge privilégiée s'étendant de novembre à février. L'année 2018 s'est avérée bien plus sèche avec un cumul de 1 095,6 mm et des pluies qui n'ont été efficaces qu'en janvier et février.

Malgré ces conditions défavorables, aucune tendance générale à la baisse des niveaux n'a été observée, ce qui pourrait indiquer que les prélèvements effectués par les particuliers ne représentent qu'une infime partie de la masse d'eau douce et que le niveau de cette dernière est essentiellement contrôlé par les marées.

4. Approche géophysique

Les reconnaissances géophysiques à Rangiroa ont eu lieu du 23 octobre au 3 novembre 2017. Elles ont consisté en la réalisation de 7 profils de type Dipôle/Dipôle et Wenner/Schlumberger et en la mise en œuvre de 4 boucles RMP (Résonance Magnétique Protonique). L'Illustration 97 permet de visualiser la partie de l'atoll concernée et l'implantation des profils au droit du motu de la vigne et du motu d'Avatoru.





Illustration 97 : (a) Partie de l'atoll concernée (b) Implantation des profils (traits rouges) ;

4.1. SONDAGES ÉLECTRIQUES

4.1.1. Principe

Les sondages électriques consistent à injecter dans le sol un courant électrique d'intensité l entre deux électrodes A et B et à mesurer la différence de potentiel ΔV induite entre une autre paire d'électrodes M et N (cf. Illustration 98).

Ils permettent d'obtenir une image de la distribution de la résistivité électrique des matériaux en profondeur (2D et 3D selon le dispositif d'acquisition mis en place et les procédés d'inversion/modélisation appliqués).

Les termes de « panneau électrique » ou de « tomographie électrique » (ERT pour Electrical Resistivity Tomography en anglais) sont utilisés pour qualifier une prospection électrique (initialement basée sur quatre électrodes) automatisée le long d'un profil multi-électrodes (2D) ou sur une surface (3D).



Illustration 98 : Principe de la mesure en courant électrique continu (Bretaudeau et al., 2016).

À partir de la valeur du courant injecté *I*, de la différence de potentiel ΔV et de l'écartement entre les différentes électrodes, on peut déterminer la **résistivité électrique apparente** du sous-sol sur la base de la loi d'Ohm :

$$\rho_{app} = K \times \frac{\Delta V}{I}$$

où K est un facteur dépendant de la géométrie du dispositif de mesure (cf. Illustration 99) :



Illustration 99 : Géométrie du dispositif de mesure (Bretaudeau et al., 2016) ;

4.1.2. Dispositifs d'électrodes/ Configurations d'acquisition

Il existe plusieurs configurations d'acquisition possibles, chacune présentant des avantages et des inconvénients. Les différences majeures concernent la distribution des lignes de courant électrique dans le sol et la forme des équipotentielles induites. La valeur du coefficient géométrique K conditionne également l'intensité minimale du courant l à injecter pour mesurer un potentiel électrique fiable. Certains dispositifs permettent enfin une acquisition plus rapide que d'autres grâce à des acquisitions multi-voies (plusieurs mesures de ΔV pour une injection de courant).

D'une manière générale, la mise en œuvre d'au moins deux configurations d'électrodes permet dans la plupart des contextes de bien appréhender la géométrie des différents corps en présence. À Rangiroa, le choix s'est porté sur la mise en œuvre de dispositifs dipôle-dipôle et Wenner-Schlumberger.

Le dispositif dipôle-dipôle découple l'injection et la mesure (cf. Illustration 100), ce qui a pour conséquence de limiter le bruit. Il est adapté à la reconnaissance des horizons sub-superficiels car le niveau de signal décroit rapidement lorsqu'on augmente la longueur de ligne.



Illustration 100 : Configuration dipôle-dipôle.

Le dispositif Wenner-Schlumberger est le plus employé des dispositifs car il permet d'accéder à de plus grandes profondeurs d'investigations mais sa sensibilité vis-à-vis des variations verticales et horizontales de résistivité est moins intéressante (cf. Illustration 101). Il s'agit en fait d'un compromis entre le dispositif Wenner sensible aux structures horizontales et le dipôle-dipôle sensible aux structures verticales. L'arrangement des électrodes permet toutefois d'effectuer un grand nombre de mesures et d'obtenir des modèles précis.





4.1.3. Pseudos sections de résistivité apparente et inversion

Après filtrage des données brutes de résistivité apparente mesurées sur le terrain, celles-ci sont agencées de manière à obtenir une coupe (pseudo-section) de résistivité apparente du sous-sol (cf. Illustration 102, schéma du haut). Cette dernière est construite (automatiquement) en reportant la valeur de la résistivité apparente mesurée au centre du dispositif à une pseudo-profondeur dépendant de l'écartement entre les électrodes.

Afin d'obtenir une image représentant les variations de résistivité réelle (et non apparente) en fonction de la vraie profondeur, il est nécessaire d'inverser la pseudo-section. Cette étape est réalisée à l'aide d'un logiciel (ex : Res2DInv). Cette inversion des données est réalisée suivant un processus itératif qui tente de minimiser l'écart entre la pseudo-section de résistivités apparentes mesurées et une pseudo-section recalculée à partir d'un modèle de résistivité électrique. Ce modèle est modifié à chaque itération jusqu'à ce que les données mesurées et calculées atteignent une concordance acceptable ou jusqu'à ce qu'aucune nouvelle amélioration ne soit possible (cf. Illustration 102, schéma du centre).

Les résultats de l'inversion sont présentés, pour les différentes configurations d'acquisition choisies, sous la forme de coupes semblables à celle de la résistivité apparente (cf. Illustration 102, schéma du bas).

À noter que les paramètres fournis par l'inversion ne sont pas définis de manière univoque (plusieurs solutions possibles pour le même jeu de données) et que l'interprétation des profils est d'autant plus aisée et fiable que l'on dispose de paramètres de calage (résistivités étalonnées, profondeur des interfaces connues...).



Illustration 102 : Pseudo-section de résistivité apparente mesurée (haut), pseudo-section de résistivité calculée sur la base du modèle de résistivité (centre) et modèle de résistivité issu de l'inversion (bas).

4.1.4. Mise en œuvre

Trois sites ont été investigués par tomographie électrique (cf. Illustration 103, Illustration 104 et Illustration 105) :

- le village d'Avatoru, dans son centre ;
- le site de la plage municipale (terrain destiné à un aménagement territorial) ;
- le site de Namaite aussi appelé Papiro.



Illustration 103 : Implantation des tomographies électriques sur le site d'Avatoru.



Illustration 104 : Implantation des tomographies électriques sur le site de la plage publique.



Illustration 105 : Implantation de la tomographie électrique P7 et des sondages RMP sur le site de Namaite.

Les caractéristiques des différentes tomographies électriques sont données dans l'Illustration 106. Les paramètres qui permettent de juger de la qualité des acquisitions ont également été mentionnés dans l'Illustration 107.

Profil	Longueur (m)	Électrodes et espacement (m)	Dispositif de quadripôle	Site	Remarques
P1	790	80/10	WSR+DD	Avatoru	
P2	950	96/10	WSR+DD	Avatoru	
P3	870	88/10	WSR+DD	Avatoru	
P4	310	32/10	WSR+DD	Plage municipale	Fort à-coup de prise au niveau de l'intersection avec P6
P5	310	32/10	WSR+DD	Plage municipale	
P6	470	48/10	WSR+DD	Plage municipale	Fort à-coup de prise au niveau de l'intersection avec P4
P7	870	88/10	WSR+DD	Namaite	

Illustration 106 : Caractéristiques des tomographies électriques réalisées à Rangiroa.

Profil	Taux de mesure conservée WS/PD	Coefficient d'ajustement WS/PD
P1	95 / 78	4.4 / 10.6
P2	89 / 54	7.5/9.7
Р3	89 / 59	7.3 / 14.7
P4	90 / 77	10.9 / 47.8
P5	97/97	2.0/5.3
P6	99 / 87	11.3 / 7.5
P7	93 / 69	4.6/9.0

Illustration 107 : Synthèse des paramètres qualité des tomographies électriques.

Il apparaît que les données sont globalement de bonne à très bonne qualité en WSR avec un taux de conservation des mesures après filtrage de 89 à 99 %. Le filtrage, beaucoup plus important en dipôle-dipôle (taux de conservation de 54 à 69 % pour P2, P3, P7) s'explique par des niveaux de signal limites à insuffisants pour la méthodologie utilisée. Les conditions géoélectriques du site sont en effet défavorables et expliquent les faibles niveaux de signal observé. Notamment côté lagon, les terrains très conducteurs (liés aux invasions salées) atténuent le signal et côté océan, des terrains très résistants (dune corallifère) limitent, par endroit, l'intensité du courant injecté. La qualité globale des résultats n'est toutefois pas significativement impactée en considérant que le dipôle-dipôle est de bonne qualité pour les 100 premiers mètres d'investigation et que le WSR apporte des informations fiables en profondeur jusqu'à près de 200 mètres.

Les coefficients d'ajustements WSR de 2,0 à 7,5 (sauf P4 et P6) indiquent également des données de bonne qualité. Les valeurs anormalement élevées de ce coefficient sur P4 et P6 reflètent les effets non parfaitement résolus d'une structure superficielle 3D proche de l'intersection des deux profils. Les valeurs de 5,3 à 147 (sauf P4) obtenues en DD correspondent à ce que l'on observe habituellement dans ce type de contexte et les variations notables de ce coefficient, d'une tomographie à l'autre, sont bien révélatrices d'effets latéraux marqués sur certains profils.

Les résultats d'inversion des tomographies dipôle-dipôle et Wenner-Schlumberger combinées sont représentées par secteur sur l'Illustration 108, l'



Illustration 109 et l'Illustration 110.

Illustration 108 : Tomographie électrique P7 réalisée à Namaite (motu de la vigne).

Bilan des investigations menées à Rangiroa



Illustration 109 : Tomographies électriques P3, P1 et P2 réalisées au droit du village d'Avatoru.



Illustration 110 : Tomographies électriques P4, P5 et P6 réalisées au droit de la plage communale.

Résistivité ERT (Ohm.m)

4.1.5. Interprétation des profils

En préalable à l'interprétation des profils, il convient de rappeler que la configuration classique d'un atoll correspond à un empilement de formations sédimentaires (calcaires pléistocènes puis formations holocènes) sur un substratum volcanique qui s'est effondré au cours du temps (cf. Illustration 111, gauche). En surface, la couronne récifale est constituée de formations coralliennes sur le côté externe et de sables plus ou moins grossiers vers l'intérieur des terres (cf. Illustration 111, droite). La couche à conglomérats sur laquelle se développent les motu est, quant à elle, liée au démantèlement des formations récifales à l'occasion des évènements cataclysmiques (cyclones, raz de marée...) qui se sont produits lors des derniers milliers d'années puis à leur cimentation. Dans l'Atlas de la Polynésie française de 1993, l'IRD (ex-ORSTOM) mentionne notamment le déplacement de « blocs cyclopéens » sur les côtes ouest, nord et nordest de Rangiroa mais ces blocs qui peuvent atteindre plusieurs mètres sont réputés pour être épars.



Illustration 111 : Configuration classique d'un atoll d'après Werner et al., 2017 (schéma de gauche) et Atlas de la Polynésie française, 1993 (schéma de droite).

Profils nord-sud P7, P3 et P1

Côté océan et en surface, on observe un résistant marqué R4 (120<p<800 Ohm.m) dont l'épaisseur est comprise entre 5 et 10 m. Sur P3 et P7, les plus fortes valeurs de résistivité sont observées à proximité de l'océan alors que sur P1, les plus fortes valeurs sont observées au centre de la couche. Compte tenu de sa position, ce résistant pourrait correspondre à un ensemble constitué de la couche à papa (ou couche à conglomérat) et des terrains sus-jacents non saturés qui forment notamment une dune visible dans la topographie côté océan.

Sous le résistant R4, on observe une structure complexe composée d'unités résistantes et conductrices intercalées. Les unités C3 se distinguent par leur conductivité marquée (0,3<p<5 Ohm.m), leur occurrence à relativement faible profondeur (moins de 20 m) et leur proximité vis à vis de l'océan (moins de 200 m du rivage). Elles peuvent être interprétées comme des zones d'invasion salée préférentielles et pourraient correspondre à des fractures au sein d'une zone déjà sous influence marine. Les unités C3' qui sont moins marquées (5<p<35 Ohm.m) se développent, quant à elles, à plus de 200 m du rivage.

Plus en profondeur, les résistants R3, R3' et R3" bien développés sur les profils P1 et P3 et qui semblent présenter une forme érodée en surface pourraient enfin correspondre au sommet des calcaires pléistocènes.

Côté lagon, un conducteur marqué C4 (0,3 Ohm.m) se développe vers l'intérieur du motuen s'approfondissant jusqu'à plus de 50 m sous la surface topographique. Cette unité correspondtrès probablement aux sédiments soumis à l'invasion salée. Latéralement et plus en profondeur,l'unité C4 semble passer plus ou moins progressivement et en continuité à des unités plusrésistantes C4' (<math>10 Ohm.m) puis C5 (<math>25 Ohm.m) qui constituent le substrat de toutela partie sud interne des motu.

Au cœur des motu, la limite entre les formations superficielles résistantes et les formations profondes plus conductrices semble présenter une forme convexe typique de la limite entre eau douce et eau salée (cf. Illustration 7). Cette configuration, bien visible sur les profils P7 et P1 ne peut toutefois pas être identifiée sur le profil P3. Ce dernier profil se caractérise par la présence de conducteurs intermédiaires C3' et C4'' marqueurs de l'invasion salée au même niveau altimétrique que les conducteurs C4 (côté lagon) et C3 (côté océan). La présence de tels corps pourrait traduire une pseudo continuité de l'intrusion. Il convient également de mentionner que la partie sud du profil correspond à une zone de lagune en partie remblayée (cf. Illustration 112).

Il convient enfin de noter la présence sur le profil P7 d'une anomalie conductrice C6 marquée (1<p<10 Ohm.m) et enracinée en profondeur à l'abscisse 570 m. cette dernière peut être interprétée comme une zone de faiblesse du massif récifal permettant, à la faveur d'une transmissivité élevée, une importante invasion salée profonde pouvant se propager vers C6' puis vers les anomalies verticales jumelles C3' observées à moins de 30 m de profondeur aux abscisses 565 et 605 m. Une interprétation alternative plus réaliste consiste à envisager un problème de résolution que seul un modèle 3D permettrait de contourner.

Profil ouest-est P2

Sur ce profil, la couche résistante superficielle apparaît sur quasiment sur toute la longueur et on retrouve l'invasion salée liée à la proximité de la passe. On retrouve également une pseudo limite convexe de même que plusieurs anomalies conductrices notées C4' dans les 50 premiers mètres de profondeur. La forme de ces anomalies laisse suggérer qu'elles pourraient correspondre à des structures orientées N-S de forte perméabilité (anciens chenaux dits « hoa » ?).

Plage communale (profils P4, P5 et P6)

Dans ce secteur où l'océan et le lagon ne sont distants que de 300 m, on retrouve sur P4 et P5 les corps conducteurs C4 et C3' témoignant de phénomènes d'intrusion marine. Le niveau résistant R4 est également bien présent sur les 3 profils.

La limite convexe évoquée plus haut n'apparaît pas de façon claire mais l'existence de terrains résistants (R3) à partir d'une vingtaine de mètres de profondeur semble confirmée. Très nette sur le profil P5, cette limite pourrait correspondre à la limite entre les calcaires pléistocènes et les formations holocènes (limite dite HPU).






Illustration 112 : Cartes représentant le comblement progressif de la lagune située à l'ouest du motu d'Avatoru (carte SAU 1967 en haut, Ikonos 2002 au milieu et Google Earth 2016 en bas).

4.2. SONDAGES RMP

4.2.1. Principe

Contrairement aux méthodes géophysiques traditionnelles qui se fondent sur l'analyse d'anomalies de structures ou de paramètres physiques non nécessairement liés à la présence ou à l'absence d'eau dans le milieu étudié, la résonance magnétique protonique (RMP) permet d'accéder à cette information et de la quantifier.

Schématiquement, le principe physique de la RMP repose sur le fait que les protons qui constituent les noyaux d'hydrogène des molécules d'eau, placés dans un champ magnétique *Bo* (tel que le champ magnétique terrestre), possèdent des moments magnétiques non nuls qui, à l'équilibre, sont alignés dans la direction de ce champ principal *Bo* (cf. Illustration 113). L'émission d'un champ magnétique perturbateur à une fréquence spécifique (dite fréquence de Larmor) modifie cet état d'équilibre et provoque une précession des moments magnétiques autour de la direction du champ magnétique initial. Après coupure du champ excitateur, au cours du retour à l'état d'équilibre, un champ magnétique de relaxation est émis par les protons, constituant ainsi la réponse RMP. L'amplitude de ce champ est d'autant plus intense que le nombre de protons entrés en résonance est grand, et donc que la teneur en eau est importante. La fréquence spécifique à laquelle les protons sont excités est caractéristique de l'atome d'hydrogène présents dans le proche sous-sol sont ceux des molécules d'eau. Ceci implique que la méthode RMP renseigne spécifiqueement et directement sur la présence ou l'absence d'eau dans le milieu étudié ainsi que sur les caractéristiques hydrodynamiques du milieu.

En pratique et sur le terrain, une boucle (câble électrique) est posée sur le sol et des ondes électromagnétiques sont envoyées dans le sous-sol au moyen du dispositif NUMIS alimenté par des batteries (cf. Illustration 114). Ces ondes traversent les terrains. Les molécules d'eau présentes dans les terrains absorbent l'énergie de la fréquence émise et renvoient un signal vers l'antenne. Les temps de relaxation du signal RMP sont proportionnels au rapport du volume de pores sur leurs surfaces (V/S).

En RMP, il y a trois constantes de temps de relaxation : T1, T2 et T2*

La constante de temps de relaxation longitudinale *T1* caractérise la relation entre les protons et leur environnement (spin-lattice relaxation time). Sa valeur reflète comment l'énergie magnétique des protons est échangée avec son environnement. Des valeurs élevées de *T1* correspondent à un faible couplage et un retour lent à l'équilibre. Des valeurs faibles de *T1* indiquent un couplage fort et un rapide retour à l'équilibre.

La constante de temps de relaxation transversale *T2* caractérise les échanges d'énergie entre les protons (spin-spin relaxation time) qui se manifestent dans un plan orthogonal à la direction du champ *Bo* alors que *T1* correspond à la relaxation longitudinale, le long du champ *Bo*.

Enfin, dans un champ magnétique non parfaitement homogène, les protons subissent un déphasage qui diminue le temps de relaxation transversale qui est alors défini par une constante $T2^*$. Ces phénomènes de relaxation sont liés à la taille moyenne des pores contenant les molécules d'eau.

Ainsi, l'amplitude su signal RMP mesurée en fonction de l'intensité du champ transmis renseigne sur la teneur en eau dans le sous-sol et sur la profondeur et l'épaisseur de la nappe et les temps de relaxation, sur la taille moyenne de pores dans la nappe.



Illustration 113 : Principe de base de la RMP.



Illustration 114 : Mise en œuvre de sondages RMP à Rangiroa.

4.2.2. Mise en œuvre

En raison de la présence d'un réseau électrique haute tension (15 kV) enterré sur le motu d'Avatoru, il n'a pas été possible de déployer la technique de la RMP au droit de cette zone. Seul le site de Namaite (motu de la vigne) a fait l'objet de telles investigations (5 profils sur 4 zones différentes).

Les principales caractéristiques des sondages ont été synthétisées dans l'Illustration 115.

Sondages RMP	Boucle	Côté (m)	Nombre de stack	S/N	EN/IN	RMSE FID1/FID2 (nV)	Bruit ambiant (nV)
RMP1b	carrée, 3 tours	50 m	25	n.e.	n.e.		
RMP1c	carrée, 2 tours	50 m	24	11,7	6,6	25,5/14,0	13-23 (64)
RMP2	carrée, 2 tours	50 m	25	12,4	6,7	26,0/66,0	15-36 (120)
RMP3	carrée, 2 tours	50 m	25	10,1	8,1	16,3/63,9	18-37
RMP4	carrée, 2 tours	50 m	34	10,2	7,2	42,4/38,9	16-40

Illustration 115 : Caractéristiques des sondages RMP réalisés sur le site de Namaite (S/N = rapport signal sur bruit ; EN/IN = rapport bruit filtré sur bruit instrumental ; RMSE = coefficient d'ajustement sur les valeurs mesurées, de la réponse calculée, en amplitude).

Il apparaît que les conditions de bruit électromagnétique enregistrées sur le site de Namaite sont parmi les plus favorables jamais observées (valeurs comprises entre 13 et 40 nV pour une boucle carrée de 50 m de côté, deux tours). Avec des signaux dépassant les 300 nV, le rapport signal sur bruit (supérieur à 10) s'est également avéré excellent. Les données ont ainsi été jugées de très bonne qualité et ont fait l'objet de processus d'inversion au moyen du logiciel Samovar.

4.2.3. Interprétation des profils

Les résultats de l'inversion ont été représentés en surimpression de la tomographie P7 sur l'Illustration 116 et les paramètres RMP tels que la teneur en eau (W_{RMP}) ou la constante de temps de relaxation(T_2^*) ont été comparées aux valeurs de résistivité (cf. Illustration 117).

On observe sur les sondages RMP1 à RMP3 des teneurs en eau (20-30 %) avec des constantes de relaxation T2* élevées (>600 ms) en corrélation avec des résistivités élevées (90<p<400 Ohm.m) dans la tranche -10 à -35 m d'altitude. Pour RMP4, les mêmes paramètres RMP sont observés pour des résistivités plus faibles (30-90 Ohm.m) mais la puissance du niveau est plus importante (-10 à -50 m).

L'absence de corrélation entre les résultats électriques et RMP ainsi que les teneurs en eau supérieures à 30 % témoignent d'effets latéraux 3D mal résolus mais les valeurs obtenues (porosités de l'ordre de 20 à 30 %) restent parfaitement compatibles avec les données de la

littérature. Werner *et al.* (2017) ont en effet recensé plus de 20 références dans lesquelles les auteurs ont caractérisé les formations pléistocènes et holocènes des atolls par des porosités comprises entre 20 et 42 %. En 1973, le LTPP a également déterminé par essai de pompage des porosités comprises entre 16 et 43 % pour le puits du Club Méditerranée.



Illustration 116 : Résultats d'inversion 1D des sondages RMP présentés sur la tomographie de résistivité P7. Les logs verticaux représentent la teneur en eau RMP. La valeur pleine échelle de l'axe horizontal représente 37.5 % et les couleurs, le temps de décroissance, T₂*.



Illustration 117 : Résistivités électriques de la tomographie P7 comparées aux résultats RMP obtenus aux mêmes profondeurs.

4.3. SYNTHÈSE

Les investigations par tomographies électriques et RMP réalisées sur deux des motu de Rangiroa permettent de retenir le modèle schématique suivant :

- côté océan, une couche résistante de 5 à 10 m d'épaisseur interprétée comme la couche à conglomérats surmontée de la dune côtière, l'ensemble surmontant des conducteurs discontinus pouvant correspondre à des zones de faiblesse du massif récifal (probablement les fractures en feston du platier récifal holocène) favorisant l'intrusion d'eau salée ;
- côté lagon, l'invasion salée se développe de façon plus continue dans des sédiments probablement plus meubles sur une épaisseur de 15 à 50 m. Elle serait également à l'origine des fortes conductivités observées plus en profondeur ;
- au centre mais de façon non systématique (la condition pouvant être que le motu présente une certaine largeur), la limite entre les formations résistantes superficielles et les formations conductrices plus profondes semble présenter une forme convexe pouvant correspondre à une limite entre eau douce et eau salée ;
- les corps résistants de grandes dimensions mis en évidence sur plusieurs profils à partir d'une dizaine de mètres de profondeur pourraient correspondre au sommet des calcaires pléistocènes (limite HPU);
- la porosité des formations récifales est probablement de l'ordre de 20 à 30 %.

En ce qui concerne la présence potentielle d'une lentille d'eau douce, un rapide calcul permettant de convertir les classes de résistivités apparaissant sur les profils et la résistivité ou la conductivité supposée de l'eau a été effectué. Il se base sur la loi d'Archie qui lie la résistivité d'une formation saturée à celle de l'eau renfermée dans les pores ($\rho = F \rho w$ avec $F = \theta^{-m}3$, F étant le facteur de formation, θ la porosité et m l'indice de cimentation) (cf. Illustration 118).

Résistivité formation	Résistivité eau	Conductivité eau	Conductivité eau	Remarque
ohm.m	ohm.m	mS/m	μS/cm	
0,68	0,057	17647	176471	
1,81	0,151	6630	66298	ordre de grandeur eau de mer
4,81	0,401	2495	24948	
12,8	1,067	938	9375	
34	2,833	353	3529	
90,5	7,542	133	1326	
241	20,083	50	498	
640	53,333	19	188	

Illustration 118 : Table de conversion entre les valeurs de résistivité mesurées et la conductivité supposée de l'eau interstitielle (porosité retenue = 25 %).

Dans ces conditions, les aplats jaunes superficiels qui présentent à leurs bases des limites convexes pourraient correspondre à des masses d'eau dont la conductivité est comprise entre 1 300 μ S/cm et 3 500 μ S/cm.

Ces masses pourraient être interprétées comme des zones de transition entre la lentille d'eau douce que les méthodes mises en œuvre ne permettent pas d'imager compte tenu de sa très faible épaisseur (mais dont l'existence a été reconnue par de nombreuses mesures) et les zones plus profondes et plus minéralisées.

³ F = 0,62. $\theta^{-2,15}$ pour les roches meubles

Sur le profil P7, la profondeur maximum de cette limite se trouve à 30/35 m, ce qui est en accord avec les données représentées sur l'Illustration 12 et acquises en 1988 par la DAT.

L'examen des autres profils conduit également à supposer que cette zone de transition est bien développée lorsque la largeur du motu est conséquente (motu de la vigne et secteur ouest d'Avatoru où la largeur est de l'ordre de 900 à 1 000 m) mais absente lorsque la largeur se réduit (zone de la plage communale où la largeur est de l'ordre de 350 m). Les 2 cas de figure sont exposés sur l'Illustration 119.



Illustration 119 : Comparaison de profils électriques relatifs à des secteurs où la largeur du motu est différente (le trait épais noir sur l'illustration de gauche représente la limite inférieure de la zone de transition).

Au final, il apparaît que les investigations géophysiques ont permis de mieux appréhender l'agencement des formations du sous-sol et les phénomènes qui les affectent (invasion salée notamment) même si l'interprétation des profils reste délicate en l'absence d'ouvrage profond de calage.

Le caractère captif de l'aquifère semble confirmé par la présence d'une couche résistante dans les premiers mètres du sous-sol qui paraît plus épaisse sur le motu d'Avatoru que sur celui de la vigne.

La présence d'une zone de transition entre la frange d'eau douce très superficielle qui peut localement exister et les eaux profondes très minéralisées semble, quant à elle, conditionnée par la largeur du motu.

5. Approche hydrogéochimique

La chimie des eaux peut apporter des indications quant aux temps de résidence des eaux dans le système (interactions eaux-roches) et aux modalités de circulation de l'eau dans les aquifères.

Conformément au programme prévisionnel, 15 points d'eau (puits ou forages) ont fait l'objet de prélèvements en vue d'une analyse des éléments majeurs, mineurs et traces. Deux prélèvements complémentaires correspondant à de l'eau s'écoulant au fond d'un effondrement karstique (RGI_5) et à de l'eau de mer (RGI_13) ont également été réalisés (cf. Illustration 120).

Les prélèvements ont eu lieu du 11 au 14 septembre 2018 et ont concerné les motu de la vigne (4 prélèvements), d'Avatoru (8 prélèvements) et celui de Tiputa (5 prélèvements). Il apparaît que ces derniers ont été menés après 2 jours pluvieux comme en atteste l'Illustration 121.

Les points prélevés ont fait l'objet de fiches compilées en Annexe 3 et les résultats obtenus sont détaillés dans les paragraphes suivants ainsi que dans l'Annexe 4.

Les investigations hydrogéochimiques ont également porté sur le suivi de la composition isotopique des pluies échantillonnées au niveau de la gendarmerie et sur le dosage des isotopes du strontium sur 5 ouvrages.



Illustration 120 : Localisation des points prélevés à Rangiroa.



Illustration 121 : Pluviométrie journalière à Rangiroa en septembre 2018 (données Météo-France).

En ce qui concerne la méthodologie d'échantillonnage des ouvrages dont la profondeur s'est avérée comprise entre 1,6 m et 3,2 m, le prélèvement a été effectué au robinet pour les puits équipés de dispositifs de pompage, au seau pour ceux qui ne l'étaient pas et au moyen d'une pompe de petit diamètre pour le seul forage sélectionné (RGI_16). Le prélèvement d'eau de mer, a quant à lui, été réalisé au seau, dans la passe d'Avatoru en condition de haute mer.

Les paramètres physico-chimiques non conservatifs ont été mesurés sur site : pH, température, conductivité électrique, potentiel d'oxydoréduction et oxygène dissous, à l'aide d'une sonde multiparamètres Aquaread.

Les échantillons d'eau prélevés en vue du dosage des éléments majeurs, mineurs et traces ont été conditionnés suivant le protocole défini par le laboratoire du BRGM Orléans puis envoyés en métropole via un service de transport express.

5.1. PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES

Une analyse statistique descriptive a été réalisée sur les résultats obtenus (cf. Illustration 122). À noter que les valeurs relatives à l'eau de mer n'ont pas été intégrées à ces calculs.

RANGIROA	Paramètres	Unité	Normes de potabilité JO Polynésie Française - 25/11/1999	Normes de potabilité RF	Nombre d'analyses	Minimum	Maximum	1 ^{er} Quartile	Médiane	3 ^{ième} Quartile	Moyenne	Ecart-type
Rangiroa-ESO	T (°C)	°C	30	25	16	25,7	29,4	27,9	28,5	28,9	28,1	1,1
Rangiroa-ESO	Conductivité à 25°C	μS/cm		2500 μS/cm à 20°C	16	557	12 890	690	959	1 796	2 159	3 227
Rangiroa-ESO	рН	-	≥6,5 et ≤9	≥4,5 et ≤9	16	6,9	7,6	7,2	7,3	7,4	7,3	0,2
Rangiroa-ESO	Eh NHE	mV			16	61	383	268	316	374	296	94
Rangiroa-ESO	O ₂ dissous	mg/L			16	0,7	6,4	2,0	3,2	4,5	3,4	1,8

Illustration 122 : Analyse statistique descriptive des paramètres physico-chimiques mesurés in situ.

La température de l'eau (comprise entre 25,7 et 29,4°C) et le pH (compris entre 6,9 et 7,6) sont des paramètres qui ont montré une faible variabilité lors de la campagne de juillet.

Il n'en va pas de même pour la conductivité dont la gamme de valeurs s'étend de 557 à 12 890 μ S/cm. 75 % des valeurs sont toutefois inférieures à 1 796 μ S/cm et un seul point d'eau RGI_9 s'est caractérisé par une très forte valeur (12 890 μ S/cm). Les prélèvements importants réalisés par le CETAD (collège) de Tiputa sont probablement à l'origine de la contamination saline supposée de ce puits qui est pourtant situé au centre du motu.

Le potentiel d'oxydoréduction (Eh NHE) a également varié de 61 à 383 mV ; la plus faible valeur ayant été mesurée sur le seul forage prélevé par pompage (RGI_16). Il s'agit également du point d'eau le plus profond (3,15 m/sol).

Au regard des normes de potabilité mentionnées dans l'Illustration 122 (références polynésiennes et métropolitaines), seule la valeur de conductivité du point d'eau RGI_9 dépasse les critères définis pour les eaux destinées à la consommation humaine.

5.2. ELÉMENTS MAJEURS ET MINEURS

Les analyses en ions majeurs et mineurs ont été réalisées selon des techniques normées. Les limites de quantification associées ont été mentionnées dans la première colonne des tableaux de l'Annexe 4.

5.2.1. Balance ionique

Il est possible d'évaluer la qualité d'une analyse physico-chimique réalisée en laboratoire en calculant sa balance ionique selon la formule :

$$Balance \ ionique \ = \ 100 \times \frac{\sum cations - \sum anions}{\sum cations + \sum anions}$$

où les sommes d'anions et de cations en réaction sont exprimées en meq/l.

La fiabilité de l'analyse est jugée excellente pour une balance comprise entre - 1 et + 1 % ; acceptable pour une balance comprise entre - 5 et + 5% ; mauvaise pour une balance comprise entre - 10 et + 10 % et médiocre pour une balance inférieure à - 10 ou supérieure à + 10 %.

Toutes les analyses effectuées sur des échantillons prélevés à Rangiroa ont présenté une balance ionique comprise entre -5 et + 5 % et ont de ce fait, été jugées fiables.

5.2.2. Composition de l'eau de mer

Préalablement à l'analyse des résultats obtenus sur les 16 échantillons d'eau souterraine, il est proposé de commenter les résultats obtenus pour l'échantillon d'eau de mer prélevé en condition de marée haute (cf. Illustration 123).

Avec une conductivité électrique de 58,7 S/cm et un TDS (Total Dissolved Solid ou somme des éléments dissous) calculé de 38,6 g/l, il apparaît que l'eau de mer prélevée à Rangiroa présente une charge minérale plus importante que la moyenne définie à l'échelle mondiale (35 g/l). Les éléments majeurs, notamment Cl, Na et SO₄, présentent également des concentrations un peu plus importantes que les concentrations connues en bibliographie.

Paramètres	Unités	Concentration		Paran
Température	°C	28,3		Ag (Argent)
Conductivité	μS/cm	58 750		Al (Aluminiu
рН	-	8,0		As (Arsenic)
Potentiel d'oxydo-réduction (Eh - NHE)	mV	290		B (Bore)
Oxygène dissous	mg/L	7,3		Ba (Baryum
Oxygène dissous (%)	%	111,1		Be (Bérylliu
HCO ₃	mg/L	141		Cd (Cadmiu
Ca	mg/L	385		Co (Cobalt)
Cl	mg/L	22 045		Cr (Chrome
F	mg/L	0,6		Cu (Cuivre)
К	mg/L	434,0		Fe (Fer)
Mg	mg/L	1 287,0		Li (Lithium)
NH ₄	mg/L	0,1		Mn (Manga
NO ₂	mg/L	< LQ		Ni (Nickel)
NO ₃	mg/L	< LQ		Pb (Plomb)
Na	mg/L	11 292		Sr (Strontiu
PO ₄	mg/L	< LQ		Zn (Zinc)
SO ₄	mg/L	3 010	1	
SiO ₂	mg/L	< LQ	1	

Paramètres	Unités	Concentration
Ag (Argent)	μg/L	0,04
Al (Aluminium)	μg/L	5,03
As (Arsenic)	μg/L	1,88
B (Bore)	μg/L	5528
Ba (Baryum)	μg/L	5,78
Be (Béryllium)	μg/L	< LQ
Cd (Cadmium)	μg/L	0,01
Co (Cobalt)	μg/L	< LQ
Cr (Chrome)	μg/L	0,39
Cu (Cuivre)	μg/L	0,33
Fe (Fer)	mg/L	< LQ
Li (Lithium)	μg/L	201
Mn (Manganèse)	μg/L	0,3
Ni (Nickel)	μg/L	0,28
Pb (Plomb)	μg/L	0,05
Sr (Strontium)	μg/L	7474
Zn (Zinc)	μg/L	0,6

Illustration 123 : Composition de l'eau de mer prélevée à Rangiroa.

Ce premier constat est conforme aux résultats présentés par de Rougerie et Wauthy (1993) dans l'Atlas de la Polynésie française qui indiquent que la salinité de l'eau de mer est supérieure à 36 g/l dans les Tuamotu (cf. Illustration 124).

Sur l'atoll voisin de Tikehau, Rougerie (1994) a également mis en évidence la présence d'une lentille d'eau douce (= nappe phréatique) ainsi que la distribution de la salinité selon une radiale océan-récif barrière-lagon (cf. Illustration 125). L'eau de l'océan et l'eau du lagon présentent des salinités respectives similaires de 36,1 et 36,0 g/l.

Ces mêmes travaux supposent l'existence d'un gradient de salinité sous les motu depuis la lentille d'eau douce superficielle plus ou moins étendue jusqu'à l'eau de mer qui envahit les formations géologiques plus profondes.



Illustration 124 : Température et salinité de l'eau de mer, extrait de la planche « Physico-chimie de l'océan » de Rougerie et Wauthy (1993) dans l'Atlas de la Polynésie Française, ORSTOM (1993).



a) Schéma de points de prélèvements et forages dans l'atoll de Tikehau selon une radiale océan-récif barrière-lagon. P_1, P_2, P_3 : Prélèvements par pompe péristaltique à partir des polytubes insérés dans ces forages (x, profondeurs de prélèvements); P et N.P. : Prélèvements par pompage péristaltique à partir de piques creuses enfoncées; E.S. : Prélèvements par aspiration avec seringue; L, S, O : Prélève-

lèvements par pompage péristaltique à partir de piques creuses enfoncées ; E.S. : Prélèvements par aspiration avec seringue ; L, S, O : Prélève ments en eau libre (lagon, sillon, océan).

b) Distribution de la salinité (----), de l'azote inorganique dissous $(NO_2 + NO_3 + NH_4)$ et du phosphate inorganique (PO_4) dans les compartiments échantillonnés selon la figure 5*a*. Les données complètes sont dans les tableaux 2 et 3.

Illustration 125 : Distribution de la salinité sur l'atoll de Tikehau selon un transect océan-récif barrière-lagon (Rougerie, 1994).

5.2.3. Conductivité électrique mesurée in situ et TDS

La somme des éléments dissous (TDS) a été calculée pour l'ensemble des analyses de Rangiroa puis comparée aux mesures de conductivité électrique (μ S/cm) réalisées sur le terrain.

La droite de régression présentée sur l'Illustration 126 confirme la bonne corrélation (R²=0,998) entre les paramètres TDS et conductivité, ce qui valide d'une autre manière le jeu de données à examiner.

Le point d'eau souterraine RGI_9, prélevé au robinet dans la partie centrale du motu de Tiputa et correspondant à l'échantillon le plus minéralisé s'écarte toutefois légèrement de la droite de régression. Une surestimation de la conductivité en lien avec un problème de calibrage de l'appareil de mesure ou une erreur de lecture pourrait être à l'origine de ce décalage.



Illustration 126 : Conductivité vs TDS (g/l) pour l'ensemble des échantillons d'eau prélevés à Rangiroa en septembre 2018 (à droite, zoom sur l'échelle).

5.2.4. Faciès hydrogéochimiques des eaux souterraines

Le report des teneurs en éléments majeurs des différents échantillons sur un diagramme de Piper montre d'une part, que le faciès des eaux souterraines varie entre un pôle « bicarbonaté calcique » et un pôle eau de mer « chloruré sodique » et d'autre part, que l'ensemble des points présente un bon alignement entre ces deux pôles (cf. Illustration 127).

Ces observations mettent en évidence deux processus géochimiques distincts dans l'acquisition de minéralisation des eaux souterraines :

- une interaction eau-roche avec les carbonates du massif corallien ;
- une influence plus ou moins marquée de l'intrusion saline.

Du point de vue géographique, l'Illustration 128 montre que la répartition des faciès ne répond pas forcément à une logique de distance à la côte.



Illustration 127 : Diagramme de Piper repésentant l'ensemble des prélèvements effectués à Rangiroa.



Illustration 128 : Faciès hydrogéochimiques des eaux prélevées à Rangiroa.

Les eaux souterraines prélevées dans la partie centrale des motu présentent de façon générale un faciès de type bicarbonaté-calcique mais les observations faites sur les ouvrages RGI_9 et RGI_10 montrent que le critère de localisation n'est pas celui qui est le plus discriminant.

Dans le cas de l'ouvrage RGI_9, l'hypothèse déjà avancée de forts pompages provoquant le phénomène d'upconing peut être formulée. Dans le cas de l'ouvrage RGI_10 qui ne fait pas l'objet de pompages, l'origine de la salinité est plus complexe à expliquer mais la présence de chenaux karstiques pouvant favoriser les connexions avec le lagon a été reportée dans ce secteur.

Inversement, les eaux souterraines prélevées à proximité du lagon présentent généralement un faciès de type chloruré sodique mais 4 points présentent un faciès bicarbonaté-calcique non conforme à leur situation géographique (RGI_6, RGI_12, RGI_14 et RGI_15).

Les 2 ouvrages présentant des faciès sulfaté-calcique se situent, quant à eux, à proximité du lagon.

5.2.5. Évaluation de la potabilité pour les éléments majeurs et mineurs dissous

De la même façon que pour les paramètres physico-chimiques, une analyse statistique a été menée sur les teneurs en ions majeurs et mineurs eu égard aux critères de potabilité polynésiens et métropolitains (cf. Illustration 129).

En ce qui concerne les éléments majeurs, les normes de potabilité appliquées en Polynésie française sont les mêmes qu'en Métropole, à l'exception de celles retenues pour le sodium (150 mg/l en PF contre 200 mg/l en Métropole) et les chlorures (200 mg/l en PF contre 250 mg/l en Métropole).

En ce qui concerne les éléments mineurs, une différence existe pour le fluor (limite de 0,7 mg/l fixée en PF contre 1,5 mg/l en Métropole).

Paramètres	Unité	Normes de potabilité JO Polynésie Française - 25/11/1999	Normes de potabilité RF	Nombre d'analyses	Minimum	Maximum	1 ^{er} Quartile	Médiane	3 ^{ième} Quartile	Moyenne	Ecart-type
Ca	mg/L			16	49,1	164,0	78,6	96,6	108,5	96,7	27,8
HCO ₃	mg/L			16	173,0	426,0	265,8	323,5	355,3	314,9	66,6
Cl	mg/L	200	250	16	18,0	3 604,2	29,3	75,4	296,3	483,5	987,2
F	mg/L	0,7 (pour T = 25°C à 30°C)	1,5	16	0,1	0,7	0,3	0,4	0,5	0,4	0,2
К	mg/L	12	12	16	0,3	73,6	1,3	2,5	7,5	10,7	19,6
Mg	mg/L	50	50	16	6,6	225,0	13,0	20,3	26,3	38,5	57,7
NH_4	mg/L	0,5	0,5	16	0,0	11,5	0,0	0,0	0,2	0,8	2,9
NO ₂	mg/L	0,1	0,1	16	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2
NO ₃	mg/L	50	50	16	0,3	26,9	0,3	2,0	8,2	6,0	8,2
Na	mg/L	150	200	16	13,3	1 891,0	20,3	51,5	151,0	253,8	512,5
PO ₄	mg/L		0,5	16	0,0	0,5	0,0	0,1	0,2	0,1	0,1
SO ₄	mg/L	250	250	16	4,7	498,3	9,3	22,7	35,7	68,2	132,6
SiO ₂	mg/L			16	0,3	10,4	0,9	3,0	4,9	3,5	3,1

Illustration 129 : Analyse statistique descriptive des teneurs en éléments majeurs et mineurs.

Si l'on s'intéresse aux valeurs maximales observées, il apparaît que des dépassements ont été observés pour 8 paramètres sur 13. Le nombre passe à 3 (Na, Cl et NH₄) si l'on ne retient que les valeurs moyennes et à 2 (Na et Cl) si l'on s'intéresse au 3° quartile.

Si les concentrations élevées en Na et Cl sont liées à l'intrusion saline, la présence d'ammonium, de nitrites et de nitrates pourrait, quant à elle, être liée aux rejets domestiques ou à un fond géochimique élevé. Les travaux de Rougerie (1994) montrent en effet que ces éléments pourraient être en partie ou en totalité d'origine naturelle.

Du point de vue des éléments majeurs, la principale problématique réside donc dans la possibilité d'observer des teneurs en chlorures et en sodium supérieures aux normes de potabilité avec un risque accru à proximité de la côte (lagon ou passe ou océan). Ce risque est également présent au centre des motu lorsque les débits de pompage ne sont pas adaptés au potentiel de la lentille d'eau douce.

5.3. ÉLÉMENTS TRACES

De la même façon que pour les éléments majeurs et mineurs, les tableaux de l'Annexe 4 précisent les limites de quantification des différents éléments traces.

L'analyse statistique des résultats menée par rapport aux critères de potabilité montre l'absence de dépassement à l'exception de la teneur maximale en arsenic observée sur l'ouvrage RGI_10 (13,3 μ g/l) (cf. Illustration 130). Cet ouvrage se caractérise également par la plus forte teneur en chrome dosée (1,71 μ g/l), ce qui pourrait témoigner d'une pollution spécifique.

Paramètres	Unité	Normes de potabilité JO Polynésie Française - 25/11/1999	Normes de potabilité RF	Nombre d'analyses	Minimum	Maximum	1 ^{er} Quartile	Médiane	3 ^{ième} Quartile	Moyenne	Ecart-type
Ag	μg/L	10		16	<lq< td=""><td><lq< td=""><td><lq< td=""><td><lq< td=""><td><lq< td=""><td><lq< td=""><td></td></lq<></td></lq<></td></lq<></td></lq<></td></lq<></td></lq<>	<lq< td=""><td><lq< td=""><td><lq< td=""><td><lq< td=""><td><lq< td=""><td></td></lq<></td></lq<></td></lq<></td></lq<></td></lq<>	<lq< td=""><td><lq< td=""><td><lq< td=""><td><lq< td=""><td></td></lq<></td></lq<></td></lq<></td></lq<>	<lq< td=""><td><lq< td=""><td><lq< td=""><td></td></lq<></td></lq<></td></lq<>	<lq< td=""><td><lq< td=""><td></td></lq<></td></lq<>	<lq< td=""><td></td></lq<>	
AI	μg/L	200	200	16	0,8	32,2	2,1	2,8	7,1	7,5	9,3
As	μg/L	10	10	16	0,1	13,3	0,5	1,0	1,8	2,0	3,2
В	μg/L		1000	16	25,6	855,0	59,1	86,3	107,0	151,6	211,9
Ba	μg/L	700	700	16	1,1	14,6	1,5	1,9	3,3	3,0	3,2
Be	μg/L			16	<lq< td=""><td><lq< td=""><td><lq< td=""><td><lq< td=""><td><lq< td=""><td><lq< td=""><td></td></lq<></td></lq<></td></lq<></td></lq<></td></lq<></td></lq<>	<lq< td=""><td><lq< td=""><td><lq< td=""><td><lq< td=""><td><lq< td=""><td></td></lq<></td></lq<></td></lq<></td></lq<></td></lq<>	<lq< td=""><td><lq< td=""><td><lq< td=""><td><lq< td=""><td></td></lq<></td></lq<></td></lq<></td></lq<>	<lq< td=""><td><lq< td=""><td><lq< td=""><td></td></lq<></td></lq<></td></lq<>	<lq< td=""><td><lq< td=""><td></td></lq<></td></lq<>	<lq< td=""><td></td></lq<>	
Cd	μg/L	3	5	16	0,005	0,030	0,005	0,005	0,006	0,008	0,007
Co	μg/L		20	16	0,003	0,060	0,003	0,003	0,003	0,010	0,020
Cr	μg/L	50	50	16	0,050	1,710	0,050	0,170	0,210	0,267	0,413
Cu	μg/L	1000	2000	16	0,050	11,500	0,318	0,470	1,733	2,108	3,372
Fe	mg/L	0,2	0,2	16	<lq< td=""><td><lq< td=""><td><lq< td=""><td><lq< td=""><td><lq< td=""><td><lq< td=""><td></td></lq<></td></lq<></td></lq<></td></lq<></td></lq<></td></lq<>	<lq< td=""><td><lq< td=""><td><lq< td=""><td><lq< td=""><td><lq< td=""><td></td></lq<></td></lq<></td></lq<></td></lq<></td></lq<>	<lq< td=""><td><lq< td=""><td><lq< td=""><td><lq< td=""><td></td></lq<></td></lq<></td></lq<></td></lq<>	<lq< td=""><td><lq< td=""><td><lq< td=""><td></td></lq<></td></lq<></td></lq<>	<lq< td=""><td><lq< td=""><td></td></lq<></td></lq<>	<lq< td=""><td></td></lq<>	
Li	μg/L			16	0,840	36,000	1,708	2,920	3,885	5,965	9,302
Mn	μg/L	50	50	16	0,110	6,280	0,228	0,790	1,248	1,268	1,594
Ni	μg/L	20	20	16	0,220	0,590	0,253	0,340	0,400	0,352	0,127
РЬ	μg/L	10	10	16	0,003	0,880	0,003	0,003	0,238	0,148	0,252
Sr	μg/L			16	525,0	2 851,0	1 064,3	1 484,5	1 745,8	1 520,1	611,2
Zn	μg/L	3000	5000	16	0,250	11,600	1,610	2,480	7,095	4,130	3,524

Illustration 130 : Analyse statistique descriptive des teneurs en éléments traces.

En dernier lieu, il convient de relever les concentrations assez élevées en bore bien que la teneur maximale (855 μ g/l pour le point d'eau RGI_9) ne dépasse pas la limite de potabilité fixée à 1 000 μ g/l en Métropole. Ces concentrations sont vraisemblablement liées à la problématique de l'intrusion saline.

5.4. DIAGRAMMES BINAIRES

Des diagrammes binaires ont été réalisés afin de mettre en évidence d'éventuelles relations entre les éléments chimiques et d'identifier les pôles qui influencent la chimie des eaux. Sur ces graphes, la droite de dilution théorique de l'eau de mer a été systématiquement ajoutée.

Le diagramme CI vs Na (cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) met en évidence un bon alignement des points sur la droite de dilution de l'eau de mer caractéristique de Rangiroa prouvant que ces 2 éléments ont la même origine pour l'ensemble des points prélevés.

Les points d'eau RGI_9 et RGI_8, situés dans la partie centrale du motu de Tiputa, apparaissent également comme les plus influencés par l'eau de mer.



Illustration 131 : Diagrammes CI vs Na (mmol/l)(à gauche, l'échelle est logarithmique).

Une analyse similaire a pu être réalisée pour le bore et le sulfate, deux éléments en concentrations importantes dans l'eau de mer (cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** à gauche). Pour les eaux faiblement minéralisées, on note que les points s'écartent de la droite de dilution de l'eau de mer et tendent à se rapprocher d'un pôle représentatif des pluies (représentées ici par les eaux de pluie de Mayotte à défaut de données locales disponibles). Une analyse similaire peut être faite en considérant les éléments bore et chlorures (cf. Illustration 132 à droite).

La réalisation d'un diagramme Na/Cl vs Ca/Mg permet aussi de mettre en évidence le pôle « recharge » et le pôle « eau de mer » (cf. Illustration 133). La droite de mélange tracée en pointillés rouges entre l'eau de mer (RGI_13) et une pluie tropicale (échantillonnée à Mayotte) permet de caractériser l'influence de l'intrusion saline pour chaque point. Certains points s'en écartent toutefois légèrement, avec un ratio Na/Cl un peu plus faible.



Illustration 132 : Diagramme B vs SO₄ et B vs Cl.



Illustration 133 : Diagramme Na/Cl vs Ca/Mg.

Les formations récifales étant a priori essentiellement formées de carbonates de calcium (CaCO3), les interactions eau-roche ont été appréhendées au moyen d'un diagramme Ca vs HCO3, éléments libérés lors de la dissolution.

L'obtention d'une pente proche de 0,4 (cf. Erreur ! Source du renvoi introuvable.) pour une valeur attendue de 0,5 semble indiquer que le massif corallien n'est pas donc uniquement

composé de calcite (CaCO₃). La position des points d'eau RGI_8 et RGI_9 (fortement impactés par l'intrusion saline donc plus riches en calcium) est par contre normale.



Illustration 134 : Diagramme Ca vs HCO3.

En complément, un second diagramme représentant la somme des concentrations en calcium et en magnésium en fonction des teneurs en bicarbonates a été réalisé (cf. Illustration 135).



Illustration 135 : Diagramme Ca + Mg vs HCO_{3.}

L'alignement obtenu sur la droite 1:2 qui correspond à la droite de dissolution de la dolomie (CaMg(CO₃)₂) tend à confirmer la présence de cette formation au sein de l'aquifère du massif corallien.

L'eau de mer étant également riche en magnésium et calcium, les points d'eau RGI_9 et RGI_8 s'écartent logiquement de la droite de régression.

5.5. ISOTOPES DU STRONTIUM

5.5.1. Dosage des isotopes du strontium sur les eaux souterraines

Le rapport isotopique ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr d'une eau est lié à celui du minéral ou des associations minéralogiques avec lequel l'eau a interagi. Les variations de ce rapport dans un hydrosystème peuvent donc donner des informations sur l'origine des eaux et les proportions de mélange lorsqu'il existe plusieurs composantes de même que sur l'intensité des processus d'interaction roche-eau.

Lors des phénomènes d'interaction eau-roche, le rapport ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr de la fraction de strontium libéré sera différent de celui de la roche totale et caractéristique du ou des minéraux altérés. Globalement, le strontium solubilisé et transporté vers l'extérieur du système est beaucoup moins radiogénique (rapport ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr plus bas) que le strontium de la roche non altérée. Le strontium des argiles résiduelles est quant à lui très radiogénique.

Les résultats obtenus sur les échantillons prélevés à Rangiroa sont synthétisés dans l'Illustration 136.

RGI_2 Puits 12/09/2018 2,05 Robinet 0,709192 0,00009 RGI_3 Puits 13/09/2018 2,00 Seau 0,709160 0,000005 RGI_9 Puits 12/09/2018 - Robinet 0,709160 0,000007 RGI_10 Puits 12/09/2018 3,06 Seau 0,709163 0,000008 RGI_11 Puits 11/09/2018 2,44 Seau 0,709130 0,000066	ID_Prélèvement	Nature	Date	Profondeur ouvrage (m/sol)	Moyen de prélèvement	Rapport ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr (±2σ)	2σ
RGI_3 Puits 13/09/2018 2,00 Seau 0,709160 0,000005 RGI_9 Puits 12/09/2018 - Robinet 0,709160 0,000007 RGI_10 Puits 12/09/2018 3,06 Seau 0,709163 0,000008 RGI_11 Puits 11/09/2018 2,44 Seau 0,709130 0,000066	RGI_2	Puits	12/09/2018	2,05	Robinet	0,709192	0,000009
RGI_9 Puits 12/09/2018 - Robinet 0,709160 0,000007 RGI_10 Puits 12/09/2018 3,06 Seau 0,709163 0,000008 RGI_11 Puits 11/09/2018 2,44 Seau 0,709130 0,000006	RGI_3	Puits	13/09/2018	2,00	Seau	0,709160	0,000005
RGI_10Puits12/09/20183,06Seau0,7091630,000008RGI_11Puits11/09/20182,44Seau0,7091300,000006	RGI_9	Puits	12/09/2018	-	Robinet	0,709160	0,000007
RGI_11 Puits 11/09/2018 2,44 Seau 0,709130 0,000006	RGI_10	Puits	12/09/2018	3,06	Seau	0,709163	0,00008
	RGI_11	Puits	11/09/2018	2,44	Seau	0,709130	0,000006

Illustration 136 : Rapports isotopiques ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr pour les eaux souterraines de Rangiroa.

Le strontium présent dans les eaux souterraines de Rangiroa est principalement d'origine marine. Il semble en effet exister une corrélation entre les fortes teneurs en cet élément (notamment observées sur RGI_9 et RGI_8) et le degré de salinisation des points d'eau traduit par la teneur en sulfates (cf. Illustration 137).

Compte tenu de cette observation, l'examen du rapport ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr des eaux souterraines s'est fait par rapport à l'élément Sr mais également par rapport aux chlorures (cf. Illustration 138).

Il apparaît que les valeurs du rapport ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr sont très proches pour les 5 échantillons analysés et cela indépendamment des teneurs en strontium et en chlorures, ce qui laisse supposer que les eaux souterraines ont subi des interactions assez similaires avec l'aquifère.



Illustration 137 : Sr vs SO4 (mmol.I) pour les 17 échantillons prélevés à Rangiroa.



Illustration 138 : ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr vs 1/Sr (l/µmol) et ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr vs Cl (mmol/l) pour les 5 échantillons prélevés à Rangiroa.

Il apparaît également que les rapports isotopiques mis en évidence à Rangiroa sont proches de ceux déterminés pour les formations coralliennes situées entre 21 et 81 m de profondeur et datées entre 1,228 et 0,162 Ma de l'île de Yongxing située en Mer de Chine (cf. Illustration 139).

Des rapports isotopiques du même ordre de grandeur ont enfin été déterminés pour d'autres atolls comme celui de Kitadaitō-jima en mer des Philippines (Ohde *et al.*, 1992).

Sample NO.	Depth down core (m)	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2s	Minimum age	Mean age	Maximum age
CK2-E21	21	0.709168	0.000011	0.162	0.212	0.268
CK2-E31	31	0.709166	0.00001	0.228	0.282	0.342
CK2-E51	51	0.709162	0.00001	0.366	0.427	0.52
CK2-E61	61	0.709149	0.00001	0.655	0.738	0.823
CK2-E81	81	0.709127	0.000012	1.139	1.181	1.228
CK2-E91	91	0.709115	0.000012	1.276	1.324	1.368
CK2-E101	101	0.709109	0.000013	1.35	1.396	1.448
CK2-E121	121	0.709107	0.000012	1.375	1.423	1.483
CK2-E126	126	0.709103	0.000012	1.425	1.485	1.565
CK2-E136	136	0.709096	0.000009	1.552	1.657	1.768
CK2-E141	141	0.709092	0.000011	1.671	1.776	1.886
CK2-E152	152	0.70909	0.000012	1.727	1.837	1.964
CK2-E201	201	0.709079	0.000012	2.1	2,21	2.32
CK2-E221	221	0.709074	0.000012	2.26	2.37	2.51
CK2-E251	251	0.709067	0.000011	2.52	2.73	3.38
CK2-E271	271	0.709063	0.000011	2.68	3.38	3.68
CK2-E316	316	0.709049	0.000009	4.15	4.45	4.68
CK2-E321	321	0.709048	0.000014	4.23	4.52	4.73
CK2-E331	331	0.709037	0.000012	4.89	5	5.09

Illustration 139 : Évolution du rapport ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr en fonction de la profondeur dans le puits CK2 (Jiang et al., 2019).

5.6. SYNTHÈSE

À Rangiroa, la chimie des eaux souterraines est conditionnée par la recharge météorique, par les interactions de ces dernières avec l'aquifère mais surtout par le degré d'intrusion saline.

Les pompages visant à satisfaire les besoins individuels réalisés dans des puits peu profonds peuvent également contribuer à perturber l'équilibre entre la fine lentille d'eau douce et les eaux saumâtres à salées sous-jacentes.

Les analyses en ions majeurs ont mis en évidence 3 types de faciès hydrogéochimiques différents (bicarbonaté calcique, sulfaté calcique et chloruré sodique) de même que des teneurs en sodium et chlorures pouvant largement dépasser les normes retenues pour l'eau potable.

Il existe donc un risque de *fond géochimique* élevé (associé à de fortes conductivités) pour ces éléments, surtout à proximité des côtes mais également au centre des motu lorsque les pompages sont supérieurs aux capacités de la lentille d'eau douce.

Pour les éléments traces, aucune zone à risque de *fond géochimique* élevé n'a été mise en évidence. Les teneurs dosées sont en effet bien en deçà des normes de potabilité même si des concentrations non négligeables en bore (liées au phénomène d'intrusion marine) peuvent être reportées.

En ce qui concerne l'environnement géologique, la présence de dolomie au sein des formations coralliennes a pu être mise en évidence mais les analyses isotopiques en strontium n'ont pas permis d'identifier plusieurs catégories d'eau.

La teneur moyenne de 6 mg/l de nitrates observée sur les 16 échantillons prélevés semble enfin traduire l'impact de l'activité anthropique sur les eaux souterraines au droit des 2 motu habités. Une origine naturelle reste néanmoins possible.

6. Modèle hydrogéologique conceptuel

Les éléments recueillis au travers des différentes approches ont permis d'élaborer le schéma hydrogéologique conceptuel suivant qui s'inspire du modèle proposé par Bailey *et al.* en 2011 (cf. Illustration 140).

L'atoll reçoit une quantité moyenne de pluie de 1 780 mm/an, dont l'essentiel durant la période comprise entre novembre et février. L'évapotranspiration réelle calculée pour une hypothèse de $RFU_{max} = 20$ mm (valeur peu élevée liée au type de sol plutôt grossier à fraction argileuse réduite) atteint, quant à elle, 960 mm/an +/- 80 mm. Cette évapotranspiration correspond à une évaluation faite pour une végétation classique or la forte densité de cocotiers sur l'atoll induit probablement un excédent d'évapotranspiration estimé à 165 mm/an +/- 45.

En-dehors des épisodes pluviométriques exceptionnels tels que celui de 2016, le ruissellement est probablement négligeable en raison de la faible pente et de la forte perméabilité du sol et sur la base d'un prélèvement de 100 l/j/personne, d'une population de 2 700 habitants et d'une superficie habitée de 5 km² (4 km² pour le motu d'Avatoru et 1 km² pour celui de Tiputa), les prélèvements domestiques représentent 20 mm/an.

La modélisation de la lentille d'eau douce a permis d'estimer la recharge naturelle à 135 mm/an. On en déduit qu'une forte quantité d'eau (de l'ordre de 500 mm/an) s'écoule à faible profondeur (écoulement hypodermique) latéralement au-dessus de la couche à papa vers l'océan et le lagon.



100 m



Le caractère poreux et perméable des sédiments de l'Holocène et des calcaires sous-jacents du Pléistocène induit la présence d'une lentille d'eau douce « flottant » sur l'eau de mer, alimentée par l'infiltration des précipitations.

Sur le motu d'Avatoru, les augmentations significatives de la salinité observées à très faible profondeur indiquent que cette lentille n'est pas développée (1 à 2 m tout au plus). Son épaisseur est en tout cas largement inférieure à celle attendue au vu de la piézométrie observée. Sur le motu de la vigne, l'épaisseur de la lentille d'eau douce semble plus importante mais sa limite inférieure n'a pas pu être reconnue en l'absence d'ouvrages profonds. De façon générale, l'épaisseur de la lentille est plus importante au centre des motu mais sa présence a également pu être ponctuellement reconnue à proximité du lagon.

L'épaisseur de la lentille d'eau douce d'un atoll est généralement positivement corrélée à la largeur de l'atoll. De même, la lentille est généralement plus épaisse dans la partie exposée aux vents dominants dite « côte au vent ». Si l'on examine l'**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**Illustration 141 qui représente l'épaisseur de la lentille au droit de différents atolls du Pacifique, il apparaît que les observations réalisées à Rangiroa (où l'épaisseur de la lentille n'excède probablement pas deux mètres et où la largeur des motu est inférieure à 1 000 m) placent cet atoll parmi les secteurs où la lentille est le moins développée, alors même que les investigations ont porté sur la côte au vent.



Illustration 141: Évolution de l'épaisseur maximale de la lentille d'eau douce en fonction de la largeur de l'atoll pour différents atolls du Pacifique d'après Bailey et al., 2009 et observations réalisées à Rangiroa (points bleus).

La littérature considère que l'épaisseur relative de la zone de transition comparée à la lentille d'eau douce croît lorsque la perméabilité et le taux de pompage augmentent ou lorsque la recharge et la largeur de l'île diminuent. Werner *et al.* (2017) ont également mentionné que les phénomènes de mélange comme ceux induits par les marées pouvaient quasiment conduire à la disparition de la lentille d'eau douce. Dans le cas de Rangiroa, c'est sans doute la faible recharge

naturelle couplée à la forte efficience des marées qui est à l'origine de l'épaisse zone de transition (mise en évidence par les tomographies électriques).

Il convient de noter que ces observations ne sont pas conformes à celles réalisées sur le motu Teivaroa à Bora-Bora où la présence d'une lentille épaisse de 25 à 35 m a pu être reconnue. Sur ce motu de 1 600 m de large et 2 200 m de longueur, les tests hydrauliques ont toutefois mis en évidence la présence de terrains plus transmissifs qu'à Rangiroa ainsi qu'un coefficient d'emmagasinement plus fort traduisant le caractère libre de la nappe. Cette dernière présente un potentiel de production de 1 200 m³/jour.

À Rangiroa, la présence d'une couche à conglomérats (localement appelée « couche à papa ») constituée de roche indurée, épaisse de plusieurs décimètres à quelques mètres et située entre 1 et 2 m de profondeur joue probablement un rôle très important dans l'hydraulique souterraine en conférant un statut d'aquifère captif aux formations holocènes, expliquant ainsi la forte diffusivité hydraulique du milieu, attestée par les fortes efficiences des marées.

La constance de son épaisseur et sa continuité ne sont pas bien connues mais elle pourrait favoriser les écoulements hypodermiques vers le lagon et l'océan, réduisant ainsi la recharge naturelle de la nappe. Elle pourrait également favoriser les écoulements latéraux jusqu'à des fractures du plateau. Ces dernières constitueraient alors des zones préférentielles d'infiltration et d'alimentation de l'aquifère sous-jacent (recharge localisée). Elle pourrait enfin protéger la lentille d'eau douce des éventuelles pollutions de surface et limiter l'extraction d'eau par les plantes dotées de racines profondes.

L'observation de teneurs en nitrates supérieures à 10 mg/l sur environ 1/5 des puits à l'occasion des investigations préliminaires de terrain de même que la teneur moyenne de 6 mg/l observée sur les 16 prélèvements effectués en 2018 semblent témoigner de l'impact de l'activité anthropique sur la nappe. Bien que non démontrée, une origine naturelle reste aussi possible.

Sur le plan des propriétés hydrodynamiques, l'aquifère supérieur, situé dans les sédiments holocènes, se caractérise par une transmissivité comprise entre 3,19 x 10^{-4} et 2,08 x 10^{-3} m²/s (valeurs déterminées par essais de pompage) et une valeur moyenne de 1,23 x 10^{-3} m²/s. Les valeurs d'emmagasinement s'étagent entre 7 x 10^{-5} et 3,5 x 10^{-4} pour une moyenne de 2,15 x 10^{-4} et la porosité efficace est de l'ordre de 20 à 30 % (valeurs obtenues par RMP).

En l'absence de forages suffisamment profonds, les propriétés de l'aquifère pléistocène sousjacent n'ont pas pu être déterminés mais la littérature considère que sa perméabilité est généralement un à deux ordres de grandeur supérieurs à celle de l'aquifère supérieur. Son toit (limite HPU), très irrégulier en raison des phénomènes de karstification qu'il a subis, a par contre pu être mis en évidence par les tomographies électriques entre 10 et 20 m de profondeur.

Côté océan, les fractures en feston du platier holocène constituent des axes de pénétration privilégiés de l'eau de mer alors que côté lagon, l'invasion salée intervient dans des sédiments probablement plus fins et plus homogènes.

En dernier lieu, il convient de noter que les investigations réalisées par le BRGM se sont déroulées dans un contexte climatique particulièrement atypique. L'année 2018 s'est en effet caractérisée par un cumul de 1 095,6 mm, inférieur de 38 % par rapport à la moyenne calculée sur la période 1972-1987 (1 778 mm).

La période d'enregistrement des niveaux piézométriques (du 14 septembre 2018 au 25 février 2019) s'est également caractérisée par un très faible cumul (281,5 mm, soit 16 % de la

pluviométrie moyenne) alors qu'elle est intervenue en plein été austral, réputé pour être la saison la plus pluvieuse.

Malgré ces conditions très défavorables, il n'a pas été observé de tendance générale à la baisse des niveaux piézométriques, ce qui tend à prouver que les charges hydrauliques sont essentiellement contrôlées par le phénomène de marée au droit de l'atoll. Il se pourrait par contre que la configuration de la lentille mise en évidence soit la plus défavorable possible et que son épaisseur puisse être plus importante dans un contexte climatique plus humide.

7. Conclusion et recommandations

Au terme des investigations menées sur la côte « au vent » de l'atoll de Rangiroa entre juillet 2017 et février 2019, il apparaît que la ressource en eau souterraine, présente sous la forme d'une lentille d'eau douce, se caractérise par une très faible épaisseur au droit de l'atoll.

Dans les secteurs où l'atoll présente une largeur supérieure à 800 m, la présence d'une zone de transition entre eau douce et eau salée à très faible profondeur (parfois à moins d'un mètre) ne permet pas d'envisager une exhaure importante sous peine de générer un phénomène d'upconing (arrivée d'eau saumâtre dans le puits). Dans les secteurs où l'atoll présente une largeur plus faible, la zone de transition ne semble pas exister et la fine tranche d'eau douce, lorsqu'elle existe, surmonte directement des niveaux très impactés par l'invasion marine.

Dans ces conditions, il n'est donc pas recommandé d'envisager une exploitation plus importante que celle actuellement pratiquée sur l'atoll par le biais de puits particuliers. Une incertitude demeure toutefois au droit du motu de la vigne où la faible profondeur des puits n'a pas permis de reconnaître la position de la limite inférieure de la lentille.

Compte tenu des projets de développement de l'île mentionnés en introduction et de la probable augmentation des besoins en eau qui en découlera, une utilisation accrue de l'eau de pluie ou le recours à la désalinisation devront être envisagés en l'absence d'une lentille d'eau douce souterraine exploitable en grand.

En l'état des connaissances, il n'est pas possible d'évaluer l'impact d'une réduction ou d'un développement de la cocoteraie sur la lentille d'eau douce. Une réduction au profit d'une végétation plus basse pourrait induire une diminution de l'évapotranspiration réelle au profit de l'infiltration mais une grande partie de l'infiltration est probablement déviée par la dalle récifale (« couche à papa ») vers l'océan ou le lagon sous la forme d'écoulements hypodermiques. Dans ces conditions, l'impact sur la recharge naturelle de la lentille d'eau douce est sans doute limité. Pour les mêmes raisons, l'impact potentiellement négatif du développement de la cocoteraie, à des fins de production d'huile vierge de coco par exemple, est également difficile à quantifier.

Dans un contexte de changement climatique où les précipitations risquent d'être moins régulières et moins abondantes, la recharge artificielle de la nappe avec le surplus des précipitations recueillies sur les toitures pourrait également constituer une solution de gestion active et garantir sa pérennité. Cette solution pourrait bénéficier des infrastructures existantes liées aux pratiques locales de prélèvement ; l'ensemble des puits traversant la dalle récifale constituant de potentiels points d'infiltration. Lors des épisodes pluvieux, le trop-plein des citernes individuelles pourrait en effet être redirigé vers les puits (cf. Illustration 142). Dans l'idéal, la mise en œuvre de cette mesure devrait être accompagnée de la réalisation de quelques piézomètres de contrôle pour en mesurer son impact.

La réalisation d'un forage profond (50 m environ) pourrait également permettre d'une part, de mieux reconnaître la structure des aquifères holocène et pléistocène et leur interface et d'autre part, de mieux appréhender la géométrie de la lentille d'eau douce et sa dynamique. Des profils de conductivité électrique pourraient notamment y être réalisés pour observer l'impact des marées sur la zone de transition.



Illustration 142 : Schéma d'un dispositif de recharge artificielle directe par puits à partir d'eau de pluie.

Une reconnaissance plus fine de l'extension et de l'épaisseur de la dalle récifale par le bais de sondages géophysiques complémentaires (techniques adaptées aux très faibles profondeurs) pourrait également être recommandée dans la mesure où ce niveau semble jouer un rôle primordial sur le cycle des eaux souterraines de l'atoll.

Sur le plan de la qualité, les reconnaissances préalables de même que les analyses plus détaillées n'ont pas mis en évidence de problème majeur à l'exception des teneurs en sodium et en chlorures qui peuvent largement dépasser les normes retenues pour l'eau potable.

Pour ces éléments, le risque de fond géochimique élevé existe surtout à proximité des côtes mais également au centre des motu lorsque les pompages sont supérieurs aux capacités de la lentille d'eau douce.

Pour les éléments traces, des concentrations non négligeables en bore (liées au phénomène d'intrusion marine) peuvent être reportées mais ces dernières n'atteignent pas des niveaux préoccupants (teneur maximale inférieure à la norme de potabilité retenue en Métropole).

En ce qui concerne l'environnement géologique, la présence de dolomie au sein des formations coralliennes a pu être mise en évidence. Au sein de l'aquifère, les contrastes ne sont toutefois pas assez importants pour être mis en évidence par les isotopes du strontium.

L'origine des nitrates et des autres composés azotés dosés au droit de certains points d'eau reste enfin à préciser même si l'hypothèse d'une provenance anthropique reste la plus probable.

Dans ce domaine également, le monitoring sur une période minimale de 2 à 3 cycles hydrologiques constitue une approche à privilégier si l'on souhaite appréhender de façon plus fine les mécanismes qui affectent le sous-sol de l'atoll.

8. Bibliographie

Aissaoui D., Buigues D. et Purser B. (1986) – Model of reef diagenesis: Mururoa atoll, French Polynesia. Reef diagenesis, J.H. Schroeder and B.H. Purser, eds. Springer-Verlag, p.112-131.

Bailey R.T., Jenson J.W. et Olsen A.E. (2009) - Numerical modeling of Atoll Island hydrogeology. Ground Water 47(2): 184–196.

Bailey R. T. et Jenson J.WW. (2011) – Groudwater resources analysis of atoll islands in the federated states of Micronesia using an algebraic model. WERI, technical report n°134.

Bard E., Hamelin B. et Faibanks R. (1990) – U-Th ages obtained by mass spectrometry in corals from Barbados : sea level during the last 130 000 years. Nature 346, p. 456-458.

Bonvallot J., Rougerie F. et Wauthy B. (1988) – Géomorphologie et fonctionnement d'un atoll, l'exemple de Tikehau, Tuamotu, Polynésie française. Second forum national du groupe français de géomorphologie, 4p.

Bouwer H. et Rice R.C. (1976) - A slug test method for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells, Water Resources Research, vol. 12, no. 3, pp. 423-428

Bretaudeau F., Mathieur F. et François B. (2016) – Investigations sismiques et électriques sur le Mont Baduel, Guyane Française. Rapport final. BRGM/RP-65823-FR, 99 p., 74 fig., 3 tabl., 3 ann.

Buddemeir R.W. et Oberdorfer J.A. (1986) – Internal hydrology and geochemistry of coral reefs ant atoll islands: key to diagenetic variations. Reef diagenesis, J.H. Schroeder and B.H. Purser, eds. Springer-Verlag Heildelberg, p.91-111.

Buigues D., Bablet J.P. et Gachon A. (1993) – Structure et géologie des atolls. Atlas de la Polynésie française, ORSTOM, Paris, p. 31-33.

Corbier P. et Pasquier S. (2017) – Programme d'actions pour l'exploitation et la gestion des eaux souterraines de la Polynésie française. Inventaire des données existantes sur les îles de Moorea, Maiao, Huahine, Raiatea, Taha'a, Ua Pou, Makatea et Rangiroa. Rapport final. BRGM/RP-67128-FR, 137 p., 95 ill., 3 ann.

Direction de l'assistance technique (1988) – Alimentation en eau potable – Atoll de Rangiroa. Prospection géophysique. Rapport 201/89/JUIN 1988.

Ferris, J. G. (1952) – Cyclic fluctuations of water level as a basis for determining aquifer transmissibility. Technical report, US Geological Survey.

Frissant N., Bodéré G. (2009) – Sensibilité des masses d'eau souterraine aux intrusions salines en corse. Inventaire des forages et puits publics destinés à l'AEP sensibles. Rapport BRGM/RP-56165-Fr, 249p

Frissant N., René-Corail C., coll. Bonnier J. et De la Torre Y. (2005) – Le phénomène d'intrusion saline à la Réunion : état des connaissances et synthèse des données disponibles. Rapport BRGM/RP-54330-FR, 64 p., 27 ill., 4 tabl.

Guille G., Maury R.C., Buigues D., Bellon H., Gachon A. et Caroff M. (1992) – L'atoll de Morurua (Polynésie française). 3- Conclusions générales. *Bull. Soc. Géol. France*, 1992, t. 163, n° 5, pp. 681-685.

Guille G., Goutière G. et Sornein J. F. (1993) – Les atolls du Mururoa et Fangataufa (Polynésie française). CEP/DIRCEN/CEA, 168 p.

Jacob, C. (1950) – Flow of groundwater. Engineering hydraulics, pages 321–386

Jiang W., Yu K., Fan T., Xu S., Wang R., Zhang Y., Yue Y., Zhao J., Feng Y., Wei C., Wang S., Wang Y., (2019) – Coral reef carbonate record of the Pliocene-Pleistocene climate transition from an atoll in the South China Sea, Marine Geology, 411, 2019, pp. 88-97.

Kumar, S., Kruger, J. et & Begg, Z. (2013) – Multibeam bathymetry survey of Rangiroa, French Poynesia. Supporting Disaster Risk Reduction in Pacific Overseas Countries and Territories, 9th european Development Fund–C envelope. SOPAC Division Technical Report (PR106).

Laboratoire des Travaux Publics de Polynésie (LTPP) (1990) – Étude hydrogéologique de la lentille d'eau saumâtre, essais de pompage. CES de Rangiroa, Terre Vaimate – Atimutimu. Procès-verbal provisoire d'essai n° 90/2069.

Laboratoire des Travaux Publics de Polynésie (LTPP) (1973) – Contribution à l'étude de la lentille d'eau douce, atoll de Rangiroa, « Terre Vahavi ». Rapport 4110/MB-SF, dossier n° 71619.

Lanini S. et Caballero Y. (2015) - Manuel utilisateur ESPERE version 1.5. Rapport BRGM/RP-65164-FR, 31 p., 14 fig.

Montaggioni L.F., Salvat B., Aubanel A., Eisenhauer A. et Martin-Garin B. (2018) – The mode and timing of windward reef-island accretion in relation with Holocene sea-level change: A case study from Takapoto Atoll, French Polynesia. Geomorphology 318 (2018), p. 320-335.

Nicolini E., Rogers K. et Rakowski D. (2015) – Baseline geochemical characterisation of a vulnerable tropical karstic aquifer; Lifou, New Caledonia. Journal of Hydrology : Regional Studies 5 (2016) 114-130

ORSTOM (1993) - Atlas de la Polynésie française

Rougerie et Wauth – **(1993)** - Planche 15311 « Physico-chimie de l'océan ». ORSTOM, 1993. Atlas de la Polynésie Française. Ed ORSTOM. 378 p. ISBN 2-7099-1147-7.

Rougerie F. (1994) – Nature et fonctionnement des atolls des Tuamotu (Polynésie française). Oceanologica acta – vol. $18 - N^{\circ}1$, p. 61-78.

Smith, A. J. et Hick, W. P. (2001) - Hydrogeology and aquifer tidal propagation in Cockburn sound, Western Australia. Technical report.

Speed (2008) – Étude hydrogéologique du motu de Teivaroa. Rapport 1030 07 EAU

Speed (2018) – Étude pour la mise en production en eau potable de la nappe du motu de Teivaroa. Rapport 1725 15 EAU

Shorackt et Mercado (1981) – Étude hydrogéologique de la lentille d'eau douce, zone scolaire de Tiputa. Rapport LTPP 8117, dossier n° 81044.

Stoddart D.R., Sachet M.H. (1969) – Atoll Research Bulletin 125: 1–32. https://doi.org/10.5479/si.00775630.125.1

Syndicat pour la promotion des communes de Polynésie française (SPCPF) (1986) – AEP du village d'Avatoru, reconnaissance géophysique par prospection électrique de la nappe d'eau douce. Dossier n° 499 du 4 août 1986.

Underwood M.R., Peterson F.L. et Floss C.I. (1992) – Groundwater dynamics of atoll islands. Water Resour. Res.28 (11), p. 2889-2902.

Werner A.D., Sharp H.K., Galvis S.C., Post V.E.A., Sinclair P. (2017) – Hydrogeology and management of freshwater lenses on atoll islands: Review of current knowledge and research needs. Journal of Hydrogeology (2017), http://dx.doi.org/10.1016/j.hydrol.2017.02.047

White I. and Falkland AC (2004) – Effects of pumping from infiltration galleries on crop health and production in low coral islands : Groundwater impacts. Report for ACIAR Project LWR1/2001/050, 37 p.

Annexe 1

Informations sur les ouvrages inventoriés à Rangiroa
ID Forage	Nom	x	Y	Z	Zrepère	Nature repère	Lieu	Profondeur puits/sol (m)	Distance à l'océan (m)	Mission
FOR_V_RGI001	Avatoru - 249/426	424112	8347909	1,794	2,052	Dalle	Avatoru	2,24	312	1, 2, 3, 4, 5
FOR_V_RGI002	Avatoru - 252	424383	8348056	2,009	2,143	Dalle	Avatoru	2,48	295	1, 3
FOR_V_RGI003	Avatoru - 253	424697	8347973	1,572	1,572	Dalle = Sol	Avatoru	2,50	246	1, 3
FOR_V_RGI004	Avatoru - 254	424847	8347956	1,271	1,271	Dalle	Avatoru	2,09	193	1, 3, 5
FOR_V_RGI005	Avatoru - 255	427108	8346985	1,728	1,728	Sol	Avatoru	2,00	53	1, 3
FOR_V_RGI006	Avatoru - 256	427161	8346960	1,881	1,881	Sol	Avatoru	2,70	45	1, 3
FOR_V_RGI007	Avatoru - 257	426183	8347384	2,475	2,475	Moellon	Avatoru	3,53	108	1, 3
FOR_V_RGI008	Avatoru - 258	428233	8346721	1,584	1,973	Dalle	Avatoru	2,90	145	1, 3
FOR_V_RGI009	Avatoru - 259	428518	8346604				Avatoru		137	1
FOR_V_RGI010	Avatoru - 260	428493	8346553	1,333	1,333	Dalle = Sol	Avatoru	1,60	86	1, 3
FOR_V_RGI011	Avatoru - 261	431981	8344787	1,989	1,989	Dalle	Avatoru	2,15	111	1, 3
FOR_V_RGI012	Avatoru - 262	431974	8344752	1,608	1,608	Sommet Tube	Avatoru	2,90	110	1, 3, 5
FOR_V_RGI013	Avatoru - 263	431935	8344740	2,074	2,074	Dalle	Avatoru	2,65	82	1, 3
FOR_V_RGI014	Avatoru - 264	432068	8345204				Avatoru		180	1
FOR_V_RGI015	Avatoru - 265	432109	8345139				Avatoru		195	1
FOR_V_RGI016	Avatoru - 266	432006	8345369	2,552	2,552	Dalle = Sol	Avatoru	2,50	146	1, 3
FOR_V_RGI017	Avatoru - 267	431805	8345467	2,596	2,596	Dalle = Sol	Avatoru	3,00	120	1, 3
FOR_V_RGI018	Avatoru - 268	431760	8345413				Avatoru		52	1
FOR_V_RGI019	Avatoru - 269	431860	8345549	2,908	2,954	Sommet Tube	Avatoru	3,31	137	1, 3
FOR_V_RGI020	Avatoru - 270	431805	8345520	2,618	2,899	Dalle	Avatoru	3,85	168	1, 3, 5
FOR_V_RGI021	Avatoru - 271	429989	8346162	2,027	2,027	Dalle = Sol	Avatoru	2,10	65	1, 3, 5
FOR_V_RGI022	Avatoru - 272/434	429977	8346178	1,881	1,881	Dalle = Sol	Avatoru	2,55	48	1, 2, 3, 5
FOR_V_RGI023	P7 - Vin de Tahiti - 273	419411	8348332	0,752	1,135	Tôle	Vigne	2,30	116	1, 3
FOR_V_RGI024	P6 - Vin de Tahiti - 274	419525	8348308	0,867	1,248	Armature	Vigne	2,30	143	1, 3
FOR_V_RGI025	P5 - Vin de Tahiti - 275	419499	8348449	0,710	0,859	Armature	Vigne	2,00	254	1, 3, 4
FOR_V_RGI026	P4 - Vin de Tahiti - 276	419650	8348570	0,658	0,887	Ciment	Vigne	1,50	431	1, 3
FOR_V_RGI027	P3 - Vin de Tahiti - 277	419426	8348625	0,633	0,792	Ciment	Vigne	1,53	400	1, 3
FOR_V_RGI028	P2 - Vin de Tahiti - 278	419225	8348739	1,259	1,726	Rebord Ciment	Vigne		315	1, 3
FOR_V_RGI029	P1 - Vin de Tahiti - 279	419035	8348826	1,085	1,311	Armature	Vigne	2,35	219	1, 3
FOR_V_RGI030	P11 - Vin de Tahiti - 280	418947	8348773	1,381	1,559	Regard Arrière	Vigne	2,00	278	1, 3
FOR V RGI031	P13 - Vin de Tahiti - 281	418828	8348529	0,548	0,727	Cailloux	Vigne	1,90	207	1, 3
FOR V RGI032	P12 - Vin de Tahiti - 282	418993	8348590	0,529	0,827	Tôle	Vigne	1,70	291	1, 3, 4
FOR V RGI033	P9 - Vin de Tahiti - 283	419060	8348482				Vigne		196	1
FOR V RGI034	284	419157	8348530				Vigne		248	1
FOR V RGI035	Eff. karstique - 285	421987	8348518	1,535	1,535	Sol	Vigne	2,20	380	1, 3, 4
FOR V RGI036	286	422824	8348192	2,009	2,009	Sol	Vigne	2,70	292	1, 3
FOR V RGI037	287	422992	8347843	2,103	2,232	Buse interne	Vigne	2,40	120	1, 3, 4
FOR V RGI038	Avatoru - 288	424171	8348004				Avatoru	-	380	1
FOR V RGI039	Avatoru - 289	424125	8348227	1,690	1,690	Dalle = Sol	Avatoru	2,20	217	1, 3
FOR V RGI040	Avatoru - 290	423690	8348066	0,819	0,819	Sol	Avatoru	,	58	1, 3
FOR V RGI041	Avatoru - 291	423740	8348219	1,779	1,779	Sol	Avatoru		129	1, 3
FOR V RGI042	Avatoru - 292	423727	8348341	,	,		Avatoru		105	1
FOR V RGI043	Avatoru - 293	423862	8347652	1.626	2.063	Dalle	Avatoru	1.60	45	1.3
FOR V RGI044	Avatoru - 295	424348	8347707	1,338	0,510	Sous-Sol	Avatoru	1,50	53	1, 3
FOR V RGI045	Avatoru - 296	424571	8347863	1.252	1.602	Moellon	Avatoru	1.48	208	1.3
FOR V RGI046	Avatoru - 297	424906	8347904	1.785	1.806	Dalle supérieure	Avatoru	1.96	231	1.3
FOR V RGI047	Avatoru - 298	424958	8348026	2.555	2.555	Sol	Avatoru	-,	103	1.3
FOR V RGI048	Avatoru - 300	425193	8347629	0.968	1.307	Moellon	Avatoru	1.42	48	1.3
FOR V RGI049	Avatoru - 301	425541	8347673	2.278	2.278	Sommet Tube	Avatoru		152	1.3
FOR V RGI050	Avatoru - 302	426069	8347488	_,_,0	_,_/0	50	Avatoru		160	, 5
FOR V RGI051	Avatoru - 303	426871	8347120	1.624	1.883	Dalle	Avatoru	1.79	72	1.3
*	///////////////////////////////////////	120071	5547120	1,027	1,000	Duic		1,,5	, 2	1,5

ID Forage	Nom	х	Y	Z	Zrepère	Nature repère	Lieu	Profondeur puits/sol (m)	Distance à l'océan (m)	Mission
FOR_V_RGI052	Tiputa - cantine - 350	432727	8344243	1,195	1,195	Sol	Tiputa		219	2, 3, 4
FOR_V_RGI053	Tiputa - 351	432533	8344484	0,698	1,142	Sol	Tiputa		34	2, 3
FOR_V_RGI054	Tiputa - 352	432537	8344420	1,059	1,308	Sol	Tiputa		41	2, 3
FOR_V_RGI055	Tiputa - 353	432587	8344413	0,706	0,977	Sol	Tiputa		89	2, 3
FOR_V_RGI056	Tiputa - 354	432618	8344346	1,315	1,619	Sol	Tiputa		119	2, 3
FOR_V_RGI057	Tiputa - 355	432576	8344360	1,146	1,483	Sol	Tiputa		80	2, 3
FOR_V_RGI058	Tiputa - 356	432699	8344515	1,060	1,413	Sol	Tiputa		197	2, 3
FOR_V_RGI059	Tiputa - 357	432690	8344500	1,024	1,179	Sol	Tiputa		189	2, 3
FOR_V_RGI060	Tiputa - 358	432662	8344434	0,755	0,777	Sol	Tiputa		166	2, 3
FOR_V_RGI061	Tiputa - 359	432673	8344422	1,080	1,080	Sol	Tiputa		175	2, 3
FOR_V_RGI062	Tiputa - 360	432631	8344470	0,942	1,237	Sol	Tiputa		132	2, 3
FOR_V_RGI063	Tiputa - église - 361	432687	8344468	0,998	0,998	Sol	Tiputa		189	2, 3
FOR_V_RGI064	Tiputa - 362	432602	8344595	0,984	1,257	Sol	Tiputa		68	2, 3
FOR_V_RGI065	Tiputa - 363	432611	8344578	1,001	1,001	Sol	Tiputa		83	2, 3
FOR_V_RGI066	Tiputa - 364	432674	8344665	2,686	1,448	Sol	Tiputa		70	2, 3
FOR_V_RGI067	Tiputa - 365	432870	8344483	2,159	2,380	Sol	Tiputa		121	2, 3
FOR_V_RGI068	Tiputa - 366	432804	8344451	2,223	2,223	Sol	Tiputa		194	2, 3
FOR_V_RGI069	Tiputa - 367	432805	8344350	1,364	1,566	Sol	Tiputa		245	2, 3, 4
FOR V RGI070	Tiputa - 368	432784	8344415	1,543	1,543	Sol	Tiputa		228	2, 3
FOR_V_RGI071	Tiputa - 369	432761	8344442	1,168	1,168	Sol	Tiputa		236	2, 3
FOR V RGI072	Tiputa - 370	432842	8344399	1,572	1,791	Sol	Tiputa		187	2, 3
FOR_V_RGI073	Tiputa - 371	432714	8344333	0,928	1,108	Sol	Tiputa		214	2, 3
FOR V RGI074	Tiputa - 372	432713	8344323	0,989	1,275	Sol	Tiputa		212	2, 3
FOR_V_RGI075	Tiputa - 373	432680	8344325	1,492	1,492	Sol	Tiputa		180	2, 3
FOR V RGI076	Tiputa - 374	432839	8344247	1,128	1,128	Sol	Tiputa		267	2, 3
FOR V RGI077	Tiputa - 375	432655	8344200	1,705	1,861	Sol	Tiputa		134	2, 3
FOR V RGI078	Tiputa - 376	432610	8344227	1,944	2,255	Sol	Tiputa		103	2, 3
FOR V RGI079	Tiputa - 377	432621	8344214	1,855	2,098	Sol	Tiputa		109	2, 3
FOR V RGI080	Tiputa - 378	432661	8344167	1,917	1,917	Sol	Tiputa		128	2, 3
FOR V RGI081	Tiputa - épicerie - 379	432656	8344103	1,809	1,809	Sol	Tiputa		78	2, 3, 4
FOR V RGI082	Tiputa - 380	432671	8344124				Tiputa	1,55	103	2
FOR V RGI083	Tiputa - 381	432732	8344149	1,364	1,569	Sol	Tiputa	-	161	2, 3
FOR_V_RGI084	Tiputa - 382	432681	8344072	1,607	2,140	Sol	Tiputa		69	2, 3
FOR V RGI085	Tiputa - 383	432698	8344051	1,660	2,364	Sol	Tiputa		64	2, 3
FOR_V_RGI086	Tiputa - 384	432744	8344061	2,153	2,153	Sol	Tiputa		105	2, 3
FOR V RGI087	Tiputa - 385	432768	8344125	1,173	1,384	Sol	Tiputa		165	2, 3
FOR_V_RGI088	Tiputa - église - 386	432709	8344037				Tiputa		62	2
FOR V RGI089	Tiputa - 387	432721	8344002	1,660	1,660	Sol	Tiputa		44	2, 3
FOR_V_RGI090	Tiputa - 388	432750	8343979				Tiputa		35	2
FOR_V_RGI091	Tiputa - 389	432771	8343969	1,869	1,869	Sol	Tiputa		39	2, 3
FOR_V_RGI092	Tiputa - 390	432793	8343960	1,343	1,741	Sol	Tiputa		37	2, 3
FOR V RGI093	Tiputa - 391	432842	8343980	1,316	1,627	Sol	Tiputa		74	2, 3
FOR_V_RGI094	Tiputa - 392	432829	8344030	1,603	1,603	Sol	Tiputa		115	2, 3
FOR_V_RGI095	Tiputa - Mairie - 393	432787	8344034	1,365	1,669	Sol	Tiputa		105	2, 3, 4
FOR_V_RGI096	Tiputa - 394	432815	8344106	1,133	1,282	Sol	Tiputa		182	2, 3
FOR_V_RGI097	Tiputa - 395	432919	8344042	1,348	1,536	Sol	Tiputa		153	2, 3
FOR_V_RGI098	Tiputa - 396	432946	8344073	1,028	1,028	Sol	Tiputa		189	2, 3
FOR_V_RGI099	Tiputa - 397	432901	8344160	1,140	1,140	Sol	Tiputa		261	2, 3
FOR_V_RGI100	Tiputa - 398	432887	8344219				Tiputa		240	2

FOR. V. Rol10.0 Tiputa - 209 434024 8484.44 V Tiputa V 74 2,3 FOR. V. Rol10.0 Tiputa - 402 43227 843992 1,448 1,996 Sol Tiputa 93 2,3 FOR. V. Rol10.0 Tiputa - 404 43296 843985 1,055 Sol Tiputa 668 2,3 FOR. V. Rol10.0 Tiputa - 406 433704 843496 1,015 Sol Tiputa 110 2 FOR. V. Rol10.0 Tiputa - 406 433704 843458 2,312 0,226 Sol Tiputa 1144 2,3 FOR. V. Rol10.0 Tiputa - 406 434498 84352 3,344 Sol< <td>Tiputa 1164 2,3 FOR. V. Rol11.0 Tiputa - 412 433458 1,345 2,36 Tiputa 1164 2,3 FOR. V. Rol11.1 Tiputa - 412 433478 843459 2,37 5,37 Tiputa 1164 2,3 FOR. V. Rol11.1 Tiputa - 414 43337 843439</td>	Tiputa 1164 2,3 FOR. V. Rol11.0 Tiputa - 412 433458 1,345 2,36 Tiputa 1164 2,3 FOR. V. Rol11.1 Tiputa - 412 433478 843459 2,37 5,37 Tiputa 1164 2,3 FOR. V. Rol11.1 Tiputa - 414 43337 843439	ID Forage	Nom	х	Y	Z	Zrepère	Nature repère	Lieu	Profondeur puits/sol (m)	Distance à l'océan (m)	Mission
FOR_V_R6102 Tiputa -001 834021 834992 1.448 1.996 Sol Tiputa P3 2.3 FOR_V_R61104 Tiputa -003 432974 834995 1.545 5.143 Sol Tiputa P6 7.6 7.23 FOR_V_R61106 Tiputa -005 432928 834958 1.055 Sol Tiputa E6 2.3 FOR_V_R61106 Tiputa -067 433702 834508 2.312 0.726 Sol Tiputa 1.140 2.3 FOR_V_R61100 Tiputa -040 434276 834257 2.376 Sol Tiputa 1.644 2.3 FOR_V_R61111 Tiputa -100 434478 834359 2.305 Sol Tiputa 1.02 2.3 FOR_V_R61113 Tiputa -112 433501 834359 2.305 Sol Tiputa 1.24 2.3 FOR_V_R61113 Tiputa -141 43353 834359 2.35 Sol Tiputa 1.12 2.3 FOR_V_R61113 Tiputa -10 <td>FOR_V_RGI101</td> <td>Tiputa - 399</td> <td>433004</td> <td>8344346</td> <td>1,856</td> <td>2,070</td> <td>Sol</td> <td>Tiputa</td> <td></td> <td>74</td> <td>2, 3</td>	FOR_V_RGI101	Tiputa - 399	433004	8344346	1,856	2,070	Sol	Tiputa		74	2, 3	
FOR_V_R61103 Tiputa - 402 432877 8343992 1.448 1.996 Sol Tiputa 93 2,3 FOR_V_R61105 Tiputa - 404 43206 8343958 1.545 Sol Tiputa 668 2,3 FOR_V_R61107 Tiputa - 400 433762 8343952 0.846 1,075 Sol Tiputa 699 2,3 FOR_V_R61106 Tiputa - 400 433704 8343502 2,312 0,726 Sol Tiputa 110 2,3 FOR_V_R61101 Tiputa - 400 434470 8343227 2,376 Sol Tiputa 1000 2,3 FOR_V_R61111 Tiputa - 400 434470 8343523 2,305 Sol Tiputa 1100 2,3 FOR_V_R61112 Tiputa - 414 433547 8343593 2,287 Sol Tiputa 112 2,3 FOR_V_R61114 Tiputa - 414 43327 8343593 2,207 2,33 Sol Tiputa 117 2,3 FOR_V_R61114 <td< td=""><td>FOR_V_RGI102</td><td>Tiputa - 401</td><td>433029</td><td>8344114</td><td></td><td></td><td></td><td>Tiputa</td><td></td><td>185</td><td>2</td></td<>	FOR_V_RGI102	Tiputa - 401	433029	8344114				Tiputa		185	2	
FOR_V_R61104 Tiputa - 403 432914 8343958 1.545 Sol Tiputa 76 2, 3 FOR_V_R61106 Tiputa - 406 432938 8343952 0.346 1,075 Sol Tiputa 668 2,3 FOR_V_R61106 Tiputa - 406 43276 834516 2,312 0,726 Sol Tiputa 110 2 FOR_V_R61108 Tiputa - 407 433704 8344508 2,427 2,487 Sol Tiputa 159 2,3 FOR_V_R61101 Tiputa - 400 434470 834257 2,376 Sol Tiputa 164 2,3 FOR_V_R61113 Tiputa - 114 433534 834359 1,066 1,933 Sol Tiputa 112 2,3 FOR_V_R61114 Tiputa - 414 433517 834359 1,066 1,333 Sol Tiputa 112 2,3 FOR_V_R61114 Tiputa - 414 433451 834358 1,736 Sol Tiputa 113 2 FOR_V_R61114 </td <td>FOR_V_RGI103</td> <td>Tiputa - 402</td> <td>432877</td> <td>8343992</td> <td>1,448</td> <td>1,996</td> <td>Sol</td> <td>Tiputa</td> <td></td> <td>93</td> <td>2, 3</td>	FOR_V_RGI103	Tiputa - 402	432877	8343992	1,448	1,996	Sol	Tiputa		93	2, 3	
FOR_V_R6105 Tiputa - 404 43206 8343952 0.835 1.131 Sol Tiputa 668 2,3 FOR_V_R61107 Tiputa - 406 433762 8343952 0.846 1.075 Sol Tiputa 100 2 FOR_V_R61109 Tiputa - 406 433762 834352 2.312 0.726 Sol Tiputa 159 2.3 FOR_V_R61101 Tiputa - 409 434470 8343527 2.376 Sol Tiputa 100 2.3 FOR_V_R61111 Tiputa - 412 434470 8343529 2.376 Sol Tiputa 112 2.3 FOR_V_R61113 Tiputa - 414 43357 8343593 2.375 Sol Tiputa 112 2.3 FOR_V_R61114 Tiputa - 414 43357 8343593 2.264 2.381 Sol Tiputa 112 2.3 FOR_V_R61114 Tiputa - 413 43318 834376 2.264 2.331 Tiputa 113 2 FOR_V_R61116 Tiputa	FOR_V_RGI104	Tiputa - 403	432914	8343963	1,545	1,545	Sol	Tiputa		76	2, 3	
FOR V, RG106 Tiputa - 405 432938 833436 Introl Tiputa (69 2, 3 FOR V, RG108 Tiputa - 407 433704 833436 2.312 O.726 Sol Tiputa 110 2 FOR V, RG1109 Tiputa - 409 434470 834325 2.376 Sol Tiputa 164 2,3 FOR V, RG1110 Tiputa - 409 434470 834325 2.376 Sol Tiputa 164 2,3 FOR V, RG1113 Tiputa - 410 434468 834325 2.375 Sol Tiputa 124 2,3 FOR V, RG1113 Tiputa - 413 43353 834395 1.777 T/57 Topta 778 2,3 FOR V, RG1114 Tiputa - 415 43347 834356 1.200 2,335 Sol Tiputa 117 2,3 FOR V, RG1117 Tiputa - 416 43345 834368 1.200 1.334 Sol Tiputa 118 2 2,3 FOR V, RG112 Tiputa - 417 <	FOR_V_RGI105	Tiputa - 404	432906	8343958	1,035	1,131	Sol	Tiputa		68	2, 3	
FOR V, RG107 Tiputa - 406 433762 834380 2.312 O/Z For V, RG109 Tiputa - 407 433764 834302 2.312 O/Z Sol Tiputa 1134 2.3 FOR V, RG1100 Tiputa - 409 434470 834327 2.376 2.376 Sol Tiputa 106 2.3 FOR V, RG1111 Tiputa - 410 434466 834322 3.053 3.444 Sol Tiputa 100 2.3 FOR V, RG1111 Tiputa - 412 433547 834359 1.757 Sol Tiputa 1124 2.3 FOR V, RG1115 Tiputa - 414 43327 834356 1.200 2.33 Sol Tiputa 117 2.3 FOR V, RG1115 Tiputa - 417 433326 83396 1.760 1.760 Tiputa 113 2 2.3 FOR V, RG1111 Tiputa - 419 43318 834386 1.760 1.736 Sol Tiputa 113 2 FOR V, RG1121 Avatoru - 422 430013	FOR_V_RGI106	Tiputa - 405	432938	8343952	0,846	1,075	Sol	Tiputa		69	2, 3	
FOR V_R61108 Tiputa - 407 433704 833208 2.312 O.726 Sol Tiputa 134 2.3 FOR V_R61110 Tiputa - 409 434470 8343282 2.376 Sol Tiputa 164 2.3 FOR V_R61111 Tiputa - 410 434486 8343222 2.376 2.376 Sol Tiputa 100 2.3 FOR V_R61111 Tiputa - 412 433847 8343609 2.305 Sol Tiputa 112 2.3 FOR V_R61114 Tiputa - 414 43352 834359 2.287 Sol Tiputa 74 2.3 FOR V_R61115 Tiputa - 415 433473 834396 1.060 1.933 Sol Tiputa 1117 2.3 FOR V_R61118 Tiputa - 417 433318 834376 2.240 2.33 Sol Tiputa 113 2 FOR V_R61120 Tiputa - 419 433181 834386 1.736 Sol Tiputa 113 2 FOR V_R61120 Tiputa -	FOR_V_RGI107	Tiputa - 406	433762	8343416				Tiputa		110	2	
FOR V, RG1109 Tiputa - 408 434459 B34268 2,487 Soil Tiputa 159 2,3 FOR V, RG1111 Tiputa - 400 34346 B33322 3,053 3,444 Soil Tiputa 100 2,3 FOR V, RG1112 Tiputa - 412 433547 8343603 2,305 2,305 Soil Tiputa 112 2,3 FOR V, RG1113 Tiputa - 412 433547 834359 2,87 2,87 Soil Tiputa 74 2,3 FOR V, RG1115 Tiputa - 414 433517 834359 1,757 1,757 Soil Tiputa 74 2,3 FOR V, RG1116 Tiputa - 416 433451 834368 1,066 1,935 Soil Tiputa 117 2,3 FOR V, RG1117 Tiputa - 419 43315 834376 1,736 Soil Tiputa 67 2,3 FOR V, RG1121 Avatoru - Hage -421 43001 834936 1,766 Sommet Tube Avatoru 1,50 2,3 3,5 <td>FOR_V_RGI108</td> <td>Tiputa - 407</td> <td>433704</td> <td>8343503</td> <td>2,312</td> <td>0,726</td> <td>Sol</td> <td>Tiputa</td> <td></td> <td>134</td> <td>2, 3</td>	FOR_V_RGI108	Tiputa - 407	433704	8343503	2,312	0,726	Sol	Tiputa		134	2, 3	
FOR_Y_RG1110 Tiputa - 409 434470 834327 2,376 Sol Tiputa 164 2,3 FOR_Y_RG1112 Tiputa - 412 43354 834399 2,305 Sol Tiputa 1124 2,3 FOR_Y_RG1113 Tiputa - 413 433524 8343599 2,287 Z,87 Sol Tiputa 112 2,3 FOR_Y_RG1113 Tiputa - 414 433527 834359 1,777 1,777 Sol Tiputa 112 2,3 FOR_Y_RG1115 Tiputa - 415 433476 1,202 2,202 2,33 Sol Tiputa 113 2 FOR_Y_RG1113 Tiputa - 418 433315 834376 - Tiputa 113 2 FOR_Y_RG1120 Tiputa - 420 433013 834395 0,783 Sol Tiputa 75 2,3 FOR_Y_RG1121 Tiputa - 421 43000 834590 1,786 Sommet Tube Avatoru 75 2,3,4,5 FOR_Y_RG1122 Avatoru - 422 43003	FOR_V_RGI109	Tiputa - 408	434459	8343268	2,487	2,487	Sol	Tiputa		159	2, 3	
FOR_Y_RGI111 Tiputa - 100 434486 B343322 3,053 3,444 Sol Tiputa 1000 2,3 FOR_Y_RGI113 Tiputa - 112 433534 B343599 2,287 2,287 Sol Tiputa 112 2,3 FOR_Y_RGI114 Tiputa - 414 433527 B343559 1,757 Sol Tiputa 74 2,3 FOR_Y_RGI115 Tiputa - 415 433471 B343681 2,020 2,335 Sol Tiputa 117 2,3 FOR_Y_RGI116 Tiputa - 416 433315 B34366 2,024 2,38 Sol Tiputa 117 2,3 FOR_Y_RGI117 Tiputa - 418 43315 B34366 1,766 1,736 Sol Tiputa 67 2,3 FOR_Y_RGI121 Avatoru - Plage - 421 431071 B34386 1,876 1,876 Sommet Tube Avatoru 3,155 1,455 2,3,4,5 FOR_Y_RGI122 Avatoru - 422 43050 1,780 2,047 Dale Avatoru 1	FOR_V_RGI110	Tiputa - 409	434470	8343257	2,376	2,376	Sol	Tiputa		164	2, 3	
FOR_Y_RGI112 Tiputa - 412 433547 8343603 2,305 Sol Tiputa 124 2,3 FOR_Y_RGI114 Tiputa - 414 433527 8343559 1,757 1,757 Sol Tiputa 74 2,3 FOR_Y_RGI115 Tiputa - 414 433477 8343556 1,696 1,933 Sol Tiputa 78 2,3 FOR_Y_RGI115 Tiputa - 416 433471 8343566 1,020 2,335 Sol Tiputa 78 2,3 FOR_Y_RGI119 Tiputa - 414 433326 8343766 2,238 Sol Tiputa 67 2,3 FOR_Y_RGI121 Avatoru - 420 433013 8343915 0,433 0,553 Sol Tiputa 75 2,3 4,5 FOR_Y_RGI121 Avatoru - 422 430017 8345984 - Avatoru 150 2,4 5 2 2 2 2,3 4,5 5 1,5 1,5 1,5 1,5 1,5 1,5 1,5 1,5 <td>FOR_V_RGI111</td> <td>Tiputa - 410</td> <td>434486</td> <td>8343322</td> <td>3<i>,</i>053</td> <td>3,444</td> <td>Sol</td> <td>Tiputa</td> <td></td> <td>100</td> <td>2, 3</td>	FOR_V_RGI111	Tiputa - 410	434486	8343322	3 <i>,</i> 053	3,444	Sol	Tiputa		100	2, 3	
FOR_Y_RGI113 Tiputa -413 433534 8343599 2,287 Sol Tiputa 112 2,3 FOR_Y_RGI115 Tiputa -414 433277 8343596 1,595 1,757 Sol Tiputa 74 2,3 FOR_Y_RGI115 Tiputa -415 433477 8343596 1,757 Sol Tiputa 117 2,3 FOR_Y_RGI117 Tiputa -417 43325 8343766 2,264 2,38 Sol Tiputa 113 2 FOR_Y_RGI120 Tiputa -419 433181 834386 1,736 Sol Tiputa 67 2,3 FOR_Y_RGI120 Tiputa -420 433018 8345894 1,876 Somet Tube Avatoru 150 2 FOR_Y_RGI123 Avatoru -Mrage -421 430044 8345900 1,780 2,047 Dalle Avatoru 73 2 FOR_Y_RGI127 Avatoru -4224 430048 8345992 Avatoru 73 2 FOR_Y_RGI126 Avatoru -4254 430518	FOR_V_RGI112	Tiputa - 412	433547	8343603	2,305	2,305	Sol	Tiputa		124	2, 3	
FOR_V_RGI14 Tiputa 43327 8343559 1,757 1,757 Sol Tiputa 774 2,3 FOR_V_RGI15 Tiputa - 415 433471 8343681 2,020 2,335 Sol Tiputa 1117 2,3 FOR_V_RGI11 Tiputa - 418 433151 8343766 - Tiputa 1113 2 FOR_V_RGI12 Tiputa - 418 433151 8343766 - Tiputa 667 2,3 FOR_V_RGI12 Tiputa - 419 431181 8434386 1,736 Sol Tiputa 677 2,3,4 FOR_V_RGI22 Avatoru - 418 433017 8434848 1,876 SomeTube Avatoru 3,15 1455 2,3,4 5,3,4,5 FOR_V_RGI22 Avatoru - 424 430900 8345941 . C Avatoru 3,07 126 2,3,4,5 FOR_V_RGI22 Avatoru - 427 430518 8345912 . Avatoru 3,07 126 2,3,4,5 FOR_V_RGI22 Avatoru - 427	FOR_V_RGI113	Tiputa - 413	433534	8343599	2,287	2,287	Sol	Tiputa		112	2, 3	
FOR_V_RGI15 Tiputa 43477 8343596 1,696 1,933 Sol Tiputa 778 2,3 FOR_V_RGI117 Tiputa -416 433326 8343796 2,264 2,335 Sol Tiputa 1117 2,3 FOR_V_RGI118 Tiputa -417 43325 8343766 2,264 2,335 Sol Tiputa 1128 2,3 FOR_V_RGI120 Tiputa -419 43318 8343836 1,736 Sol Tiputa 67 2,3 FOR_V_RGI22 Avatoru -19ge -421 43001 8345941 0,833 0,953 Sol Tiputa 755 2,3 FOR_V_RGI22 Avatoru -422 430908 8345941 - Avatoru 4307 1,56 2 - Avatoru 73 2	FOR_V_RGI114	Tiputa - 414	433527	8343559	1,757	1,757	Sol	Tiputa		74	2, 3	
FOR_V_RGI116 Tiputa - 416 433451 8343681 2,020 2,33 Sol Tiputa 117 2,3 FOR_V_RGI118 Tiputa - 417 433316 8343786	FOR_V_RGI115	Tiputa - 415	433477	8343596	1,696	1,933	Sol	Tiputa		78	2, 3	
FOR V_RGI117 Tiputa - 417 433326 834376 C Tiputa 128 2,3 FOR_V_RGI118 Tiputa - 418 43315 834376 - Tiputa 67 2,3 FOR_V_RGI120 Tiputa - 419 43316 8343836 1,736 Sol Tiputa 67 2,3 FOR_V_RGI121 Avatoru - 419 433101 8345863 . - Avatoru 150 2 FOR_V_RGI122 Avatoru - 422 43000 8345963 . Avatoru 3,07 126 2,3,4,5 FOR_V_RGI124 Avatoru - 423 430715 8345930 . Avatoru 2,5 2 FOR_V_RGI125 Avatoru - 425 430513 8345939 . Avatoru 2,5 2,2 2,3 4,5 FOR_V_RGI125 Avatoru - 425 430628 8345939 . Avatoru 1,52 1,26 7,3 2,2 2,3 5 5 7,4 4,33 2 2,3 5 5 7,3	FOR_V_RGI116	Tiputa - 416	433451	8343681	2,020	2,335	Sol	Tiputa		117	2, 3	
FOR_V_RGI18 Tiputa - 418 43315 8343786 Tiputa Tiputa 113 2 FOR_V_RGI120 Tiputa - 419 433101 8343915 0,833 0,953 Sol Tiputa C75 2,3 FOR_V_RGI120 Avatoru - Plage - 421 431011 8345843 1,786 Sommet Tube Avatoru 3,15 145 2,3,4,5 FOR_V_RGI123 Avatoru - 422 430004 8345903 I.780 2,047 Dalle Avatoru 3,07 126 2,3,4,5 FOR_V_RGI123 Avatoru - 422 430044 8345903 I.780 2,047 Dalle Avatoru 3,07 126 2,3,4,5 FOR_V_RGI126 Avatoru - 423 430518 8345939 I.780 2,047 Dalle Avatoru 73 2 FOR_V_RGI126 Avatoru - 425 430518 8345939 I.562 1,057 Sous-Sol Avatoru 1,52 2,3 4 FOR_V_RGI120 Avatoru - 429 423737 834769 1,908 1,	FOR_V_RGI117	Tiputa - 417	433326	8343796	2,264	2,383	Sol	Tiputa		128	2, 3	
FOR_V_RGI19 Tiputa - 419 433181 8343836 1,736 J,736 Sol Tiputa 67 2,3 FOR_V_RGI121 Avatoru - Plage - 421 431011 8345884 1,876 1,876 Sommet Tube Avatoru 3,15 145 2,3,4,5 FOR_V_RGI122 Avatoru - 422 430094 8345963 - Avatoru 3,07 126 2,3,4,5 FOR_V_RGI124 Avatoru - 424 430715 8345941 - Avatoru 3,07 126 2,3,4,5 FOR_V_RGI124 Avatoru - 424 430715 8345939 - - Avatoru 73 2 FOR_V_RGI126 Avatoru - 425 430628 8345939 - - Avatoru 1,52 82 2,3 FOR_V_RGI127 Avatoru - 427 423732 834763 1,562 1,057 Sous-Sol Avatoru 1,60 59 2,3,5 FOR_V_RGI128 Avatoru - 428 423728 8347631 1,425 1,51 Dalle Avatoru <t< td=""><td>FOR_V_RGI118</td><td>Tiputa - 418</td><td>433315</td><td>8343786</td><td></td><td></td><td></td><td>Tiputa</td><td></td><td>113</td><td>2</td></t<>	FOR_V_RGI118	Tiputa - 418	433315	8343786				Tiputa		113	2	
FOR_V_RGI120 Tiputa - 420 433013 8343915 0,833 0,953 Sol Tiputa 75 2,3 FOR_V_RGI121 Avatoru - Plage - 421 431071 8345884 1,876 Sommet Tube Avatoru 3,15 1445 2,3,4,5 FOR_V_RGI122 Avatoru - 422 430904 8345963 Avatoru 3,07 126 2,3,4,5 FOR_V_RGI123 Avatoru - 424 430715 8345941 Avatoru Avatoru 73 2 FOR_V_RGI126 Avatoru - 424 430518 8345939 Avatoru Avatoru 73 2 FOR_V_RGI127 Avatoru - 427 423728 8347689 1,057 Sous-Sol Avatoru 1,52 82 2,3,4 FOR_V_RGI128 Avatoru - 429 42373 8347701 1,908 Moele Avatoru 1,60 59 2,3,5 FOR_V_RGI132 Avatoru - 430 423421 8347920 I Avatoru 1,60 59 2,3,5 FOR_V_RGI132 Avatoru - 430	FOR_V_RGI119	Tiputa - 419	433181	8343836	1,736	1,736	Sol	Tiputa		67	2, 3	
FOR_V_RGI121 Avatoru - Plage - 421 431071 8345884 1,876 J,876 Sommet Tube Avatoru 3,15 145 2,3,4,5 FOR_V_RGI122 Avatoru - 422 430900 8345963 Avatoru Avatoru 3,07 126 2,3,4,5 FOR_V_RGI123 Avatoru - 424 430715 8345940 1,780 2,047 Dalle Avatoru 3,07 126 2,3,4,5 FOR_V_RGI124 Avatoru - 424 430715 8345939 Avatoru Avatoru 73 2 FOR_V_RGI126 Avatoru - 425 430513 8345972 Avatoru Avatoru 73 2 FOR_V_RGI126 Avatoru - 427 42373 8347763 1,552 1,057 Sous-Sol Avatoru 1,50 2,3,5 FOR_V_RGI130 Avatoru - 429 423737 8347701 1,908 1,908 Moellon Avatoru 1,50 2,3,5 FOR_V_RGI131 Avatoru - 430 423912 8347897 1,513 Dalle Avatoru 1,50 2	FOR_V_RGI120	Tiputa - 420	433013	8343915	0,833	0,953	Sol	Tiputa		75	2, 3	
FOR_V_RGI122 Avatoru - 422 430900 8345963 Matter Avatoru 150 2 FOR_V_RGI123 Avatoru - Mr Tang - 423 430944 8345900 1,780 2,047 Dalle Avatoru 3,07 126 2, 3, 4, 5 FOR_V_RGI124 Avatoru - 424 430715 8345939 Matter Avatoru 73 2 FOR_V_RGI127 Avatoru - 425 430628 8345972 Avatoru Avatoru 1,52 82 2,3 FOR_V_RGI128 Avatoru - 427 423732 8347768 1,907 2,036 Dalle Avatoru 1,60 59 2,3,5 FOR_V_RGI132 Avatoru - 429 423737 8347701 1,908 Moellon Avatoru 1,60 59 2,3,5 FOR_V_RGI131 Avatoru - 430 423912 8347831 1,425 1,513 Dalle Avatoru 1,60 52 2,3 5 FOR_V_RGI133 Avatoru - 433 42448 8347892 1,513 Dalle Avatoru 1,	FOR_V_RGI121	Avatoru - Plage - 421	431071	8345884	1,876	1,876	Sommet Tube	Avatoru	3,15	145	2, 3, 4, 5	
FOR_V_RGI123 Avatoru - Mr Tang - 423 A39944 8345900 1,780 2,047 Dalle Avatoru 3,07 126 2,3,4,5 FOR_V_RGI124 Avatoru - 424 430715 8345931 - - Avatoru 25 2 FOR_V_RGI125 Avatoru - 425 430513 8345932 - - Avatoru 73 2 FOR_V_RGI126 Avatoru - 427 42373 834763 1,562 1,057 Sous-Sol Avatoru 1,52 82 2,3 5 FOR_V_RGI128 Avatoru - 427 42373 834763 1,907 2,036 Dalle Avatoru 1,50 59 2,3,5 FOR_V_RGI130 Avatoru - 430 423912 8347631 1,425 1,511 Dalle Avatoru 1,50 247 2,3 5 FOR_V_RGI131 Avatoru - 431 424421 8347897 1,396 1,513 Dalle Avatoru 1,50 247 2,3 2,3 5 FOR_V_RGI133 Avatoru - 431 424421 8347897 1,396 1,513 Dalle Avatoru	FOR_V_RGI122	Avatoru - 422	430900	8345963				Avatoru		150	2	
FOR_V_RGI124 Avatoru 7.3 2 FOR_V_RGI125 Avatoru 430513 8345393 Avatoru Avatoru 7.3 2 FOR_V_RGI125 Avatoru 430528 8345939 Avatoru Avatoru 7.3 2 FOR_V_RGI126 Avatoru 42253 834763 1,562 1,057 Sous-Sol Avatoru 1,52 82 2,3 FOR_V_RGI127 Avatoru - 429 423737 8347631 1,908 Jone Avatoru 1,44 45 2,3,4,5 FOR_V_RGI130 Avatoru - 429 423737 8347631 1,425 1,541 Dalle Avatoru 1,50 2,47 2,3 FOR_V_RGI131 Avatoru - 431 424421 8347897 1,396 1,513 Dalle Avatoru 1,50 247 2,3 FOR_V_RGI132 Avatoru - 431 424428 8347897 1,198 Dalle Avatoru 1,50 247 2,3 FOR_V_RGI132 Avatoru 431873 834783	FOR_V_RGI123	Avatoru - Mr Tang - 423	430944	8345900	1,780	2,047	Dalle	Avatoru	3,07	126	2, 3, 4, 5	
FOR_V_RGI125 Avatoru Avatoru Z25 Z2 FOR_V_RGI125 Avatoru 733 Z FOR_V_RGI127 Avatoru-425b 430628 8345972 Avatoru Avatoru 733 Z FOR_V_RGI127 Avatoru-427 423732 8347763 1,562 1,057 Sous-Sol Avatoru 2,44 45 2,3,4,5 FOR_V_RGI128 Avatoru-429 423737 8347701 1,908 Moellon Avatoru 1,60 59 2,3,5 FOR_V_RGI132 Avatoru-430 423912 8347631 1,425 1,511 Dalle Avatoru 1,60 59 2,3,5 FOR_V_RGI132 Avatoru-430 424428 8347920 Avatoru 1,50 247 2,3 FOR_V_RGI133 Avatoru-433 424428 834787 1,188 Dalle Avatoru 1,74 274 3 FOR_V_RGI190 Ohotu 431871 834731 1,301 Dalle Avatoru 1,74 274<	FOR_V_RGI124	Avatoru - 424	430715	8345941				Avatoru		73	2	
HOR_RG1126 Avatoru - 425b 430628 8349372 Image: Constraint of the state of the stat	FOR_V_RGI125	Avatoru - 425	430513	8345939				Avatoru		25	2	
HOR_RG112/ Avatoru 423732 8347/63 1,562 1,057 Souts-Sol Avatoru 1,52 82 2,3 FOR_V_RG1128 Avatoru - église - 428 423728 8347689 1,907 2,036 Dalle Avatoru 2,44 45 2,3,5 FOR_V_RG1129 Avatoru - 420 423712 8347631 1,425 1,511 Dalle Avatoru 1,60 59 2,3,5 FOR_V_RG1131 Avatoru - 430 423912 8347631 1,425 1,511 Dalle Avatoru 1,50 247 2,3 FOR_V_RG1131 Avatoru - 431 424421 8347897 1,396 1,513 Dalle Avatoru 1,50 247 2,3 FOR_V_RG1132 Avatoru - 432 424428 8347887 1,198 Dalle Avatoru 1,74 274 3 FOR_V_RG1191 Avatoru 42595 834741 1,301 1,301 Dalle Avatoru 1,74 274 3 FOR_V_RG1192 Avatoru	FOR_V_RGI126	Avatoru - 425b	430628	8345972		1 057		Avatoru	1 50	/3	2	
FOR_V_RGI128 Avatoru egise - 428 423728 8347689 1,907 2,036 Dalle Avatoru 2,24 45 2,3,4,5 FOR_V_RGI128 Avatoru - 429 423737 8347701 1,908 1,908 Moellon Avatoru 1,60 59 2,3,5 FOR_V_RGI130 Avatoru - 430 423912 8347631 1,425 1,541 Dalle Avatoru 1,60 59 2,3 FOR_V_RGI131 Avatoru - 431 424421 8347897 1,396 1,513 Dalle Avatoru 1,50 247 2,3 FOR_V_RGI132 Avatoru - 433 424428 8347887 1,198 1,198 Dalle Avatoru 1,74 247 3 FOR_V_RGI191 Ohotu 431871 834732 1,818 2,010 Dalle Avatoru 1,74 274 3 FOR_V_RGI191 Ohotu 431871 834732 1,818 2,010 Dalle Avatoru 1,74 244 3 FOR_V_RGI192 Avatoru 42598 8347464 1,522 1,52 Sol Ava	FOR_V_RGI127	Avatoru - 427	423732	8347763	1,562	1,057	Sous-Sol	Avatoru	1,52	82	2, 3	
FOR_V_RG1129 Avatoru 423737 8347701 1,908 Molellon Avatoru 1,60 59 2,3,5 FOR_V_RG1130 Avatoru - 430 423912 8347631 1,425 1,541 Dalle Avatoru 1,34 25 2,3 FOR_V_RG1131 Avatoru - 431 424421 8347637 1,396 1,513 Dalle Avatoru 1,50 247 2,3 FOR_V_RG1132 Avatoru - 432 424428 834787 1,198 Dalle Avatoru 1,50 247 2,3 FOR_V_RG1190 Ohotu 431871 834732 1,818 2,010 Dalle Avatoru 1,74 274 3 FOR_V_RG1191 Avatoru 425985 834711 1,301 1,301 Dalle Avatoru 2,85 122 3 FOR_V_RG1192 Avatoru 426501 834754 3,043 Dalle Avatoru 2,85 122 3 FOR_V_RG1194 Avatoru 42650 8347972 2,065	FOR_V_RGI128	Avatoru - eglise - 428	423728	8347689	1,907	2,036	Dalle	Avatoru	2,44	45	2, 3, 4, 5	
FOR_V_RG130 AVatoru - 430 423912 8347631 1,425 1,541 Dalle AVatoru 1,34 25 2,3 FOR_V_RG131 Avatoru - 431 42421 8347897 1,396 1,513 Dalle Avatoru 1,50 2,3 FOR_V_RG132 Avatoru - 432 424405 8347897 1,198 1,198 Dalle Avatoru 269 2 FOR_V_RG130 Avatoru - 433 42428 8347877 1,198 1,198 Dalle Avatoru 1,74 274 3 FOR_V_RG190 Ohotu 431871 8347545 3,043 3,043 Dalle Avatoru 1,74 274 3 FOR_V_RG192 Avatoru 426031 8347545 3,043 3,043 Dalle Avatoru 2,85 122 3 FOR_V_RG193 Avatoru 42650 834797 2,065 2,665 Dalle Avatoru 1,95 27.7 3 FOR_V_RG194 Avatoru 42450 834787 <	FOR_V_RGI129	Avatoru - 429	423/3/	8347701	1,908	1,908	Noelion	Avatoru	1,60	59	2, 3, 5	
Prof. V_rR61131 Avatoru 424421 8347897 1,356 1,513 Daile Avatoru 1,50 247 2,3 FOR_V_rR61132 Avatoru - 432 424405 8347897 1,198 1,198 Daile Avatoru 269 2 FOR_V_R61133 Avatoru - 433 424428 8347887 1,198 Daile Avatoru 1,74 274 3 FOR_V_R61190 Ohotu 431871 834787 1,198 1,010 Daile Avatoru 1,74 274 3 FOR_V_R61191 Avatoru 425985 8347411 1,301 1,301 Daile Avatoru 1,74 274 3 FOR_V_R61191 Avatoru 425985 8347411 1,301 1,301 Daile Avatoru 2,85 122 3 FOR_V_R61192 Avatoru 426331 8347545 3,043 3,043 Daile Avatoru 1,95 277 3 FOR_V_R61193 Avatoru 424530 8347545	FOR_V_RGI130	Avatoru - 430	423912	8347631	1,425	1,541	Dalle	Avatoru	1,34	25	2, 3	
FOR_V_RG1132 AVatoru - 432 424405 8347920 FOR Avatoru Avatoru 269 2 FOR_V_RG1133 Avatoru - 433 424428 8347887 1,198 1,198 Dalle Avatoru 237 2,3 FOR_V_RG1190 Ohotu 431871 8344732 1,818 2,010 Dalle Avatoru 1,74 274 3 FOR_V_RG1191 Avatoru 425985 8347411 1,301 1,301 Dalle Avatoru 1,74 274 3 FOR_V_RG1192 Avatoru 425031 8347545 3,043 3,043 Dalle Avatoru 2,85 122 3 FOR_V_RG1193 Avatoru 424508 8347972 2,065 2,065 Dalle = Sol Avatoru 1,95 277 3 FOR_V_RG1195 Avatoru 424508 834787 1,879 1,879 Moellon Avatoru 1,55 221 3 FOR_V_RG1195 Avatoru 424508 834754 2,435	FUR_V_RGI131	Avatoru - 431	424421	8347897	1,396	1,513	Dalle	Avatoru	1,50	247	2, 3	
POR_V_RGI133 AVatoru 424428 8347887 1,198 1,198 Dalle Avatoru 227 2,3 FOR_V_RGI190 Ohotu 431871 8344732 1,818 2,010 Dalle Avatoru 1,74 274 3 FOR_V_RGI191 Avatoru 425985 8347411 1,301 1,301 Dalle Avatoru 1,74 274 3 FOR_V_RGI192 Avatoru 426031 8347545 3,043 Joalle Avatoru 2,85 122 3 FOR_V_RGI193 Avatoru 42450 8347745 1,522 1,522 Sol Avatoru 411 3 FOR_V_RGI194 Avatoru 42450 8347750 2,065 2,065 Dalle = Sol Avatoru 1,95 221 3 FOR_V_RGI195 Avatoru 424522 8347878 1,879 1,879 Moellon Avatoru 1,95 221 3 FOR_V_RGI195 Avatoru 42452 834750 1,482 2,110 Sommet Tube Avatoru 3,00 184 3,5 FOR_V_RGI	FOR_V_RGI132	Avatoru - 432	424405	8347920	1 100	1 1 0 0	Delle	Avatoru		269	2	
POR_V_RGI190 Onotu 431871 834732 1,818 2,010 Dalle Avatoru 1,74 274 3 FOR_V_RGI191 Avatoru 425985 834711 1,301 1,301 Dalle Avatoru 90 3 FOR_V_RGI192 Avatoru 426031 8347545 3,043 Dalle Avatoru 2,85 122 3 FOR_V_RGI193 Avatoru 426303 8347546 1,522 1,522 Sol Avatoru 2,85 122 3 FOR_V_RGI194 Avatoru 424550 8347972 2,065 2,065 Dalle Sol Avatoru 1,95 2777 3 FOR_V_RGI195 Avatoru 424532 8347878 1,879 1,879 Moellon Avatoru 1,55 221 3 FOR_V_RGI196 Tiputa 433070 8343942 2,145 2,382 ??? Tiputa 1337 3 FOR_V_RGI198 Ohotu - Boule jaune 431480 8345764 2,435 2,438 Sommet Tube Avatoru 3,20 161 3,5 <tr< td=""><td>FUR_V_RGI133</td><td>Avatoru - 433</td><td>424428</td><td>834/88/</td><td>1,198</td><td>1,198</td><td>Dalle</td><td>Avatoru</td><td>1 74</td><td>237</td><td>2, 3</td></tr<>	FUR_V_RGI133	Avatoru - 433	424428	834/88/	1,198	1,198	Dalle	Avatoru	1 74	237	2, 3	
FOR_V_RGI191 Avatoru 42395 6347411 1,301 1,301 Daile Avatoru 500 3 FOR_V_RGI192 Avatoru 426031 8347545 3,043 3,043 Daile Avatoru 2,85 122 3 FOR_V_RGI193 Avatoru 426831 8347545 3,043 3,043 Daile Avatoru 2,85 122 3 FOR_V_RGI193 Avatoru 422884 8347646 1,522 1,522 Sol Avatoru 1,95 277 3 FOR_V_RGI194 Avatoru 424532 8347878 1,879 Moellon Avatoru 1,55 221 3 FOR_V_RGI196 Tiputa 433070 8343942 2,145 2,382 ??? Tiputa 1377 3 FOR_V_RGI197 Ohotu - Boule jaune 431480 8345750 1,482 2,110 Sommet Tube Avatoru 3,000 184 3,5 FOR_V_RGI198 Ohotu 431408 8345764 2,435 2,438 Sommet Tube Avatoru 3,200 161 3,5	FOR V PGI101	Avatoru	4310/1	0344/32	1,010	2,010	Dalle	Avatoru	1,74	274	3	
FOR_V_RGI192 Avatoru 420031 6347343 3,043 3,043 Daile Avatoru 2,03 122 3 FOR_V_RGI193 Avatoru 42384 8347646 1,522 1,522 Sol Avatoru 41 3 FOR_V_RGI194 Avatoru 424650 8347972 2,065 2,065 Dalle = Sol Avatoru 1,95 27.7 3 FOR_V_RGI195 Avatoru 424532 8347878 1,879 Moellon Avatoru 1,55 22.1 3 FOR_V_RGI195 Avatoru 424532 8347878 1,879 Moellon Avatoru 1,55 22.1 3 FOR_V_RGI196 Tiputa 433070 8343942 2,145 2,382 ??? Tiputa 137 3 FOR_V_RGI197 Ohotu - Boule jaune 431480 8345750 1,482 2,110 Sommet Tube Avatoru 3,00 184 3,5 FOR_V_RGI198 Ohotu 431408 8345764 2,435 2,438 Sommet Tube Avatoru 3,20 161 3,5 FOR_V_RGI1	FOR V PGI102	Avatoru	425965	0347411	2 042	2 042	Dalle	Avatoru	2 0 5	122	3	
FOR_V_RGI193 Avatoru 423634 6347040 1,222 1,222 501 Avatoru 441 3 FOR_V_RGI194 Avatoru 424650 8347972 2,065 2,065 Dalle = Sol Avatoru 1,95 277 3 FOR_V_RGI195 Avatoru 424532 8347878 1,879 Moellon Avatoru 1,55 221 3 FOR_V_RGI196 Tiputa 433070 8343942 2,145 2,382 ??? Tiputa 137 3 FOR_V_RGI197 Ohotu - Boule jaune 431408 8345750 1,482 2,110 Sommet Tube Avatoru 3,00 184 3,5 FOR_V_RGI197 Ohotu - Boule jaune 431408 8345750 1,482 2,110 Sommet Tube Avatoru 3,00 184 3,5 FOR_V_RGI198 Ohotu 431408 8345764 2,435 2,438 Sommet Tube Avatoru 3,20 161 3,5 FOR_V_RGI199 Ohotu 43108 8345646 0,931 1,381 Margelle Avatoru 1,90 182 3	FOR V PGI192	Avatoru	420031	8347545	3,043	3,043	Sol	Avatoru	2,65	122	3	
FOR_V_RGI194 Avatoru 424530 6347372 2,003 2,003 Date = 501 Avatoru 1,53 277 3 FOR_V_RGI195 Avatoru 424532 8347878 1,879 1,879 Moellon Avatoru 1,55 221 3 FOR_V_RGI196 Tiputa 433070 8343942 2,145 2,382 ??? Tiputa 137 3 FOR_V_RGI197 Ohotu - Boule jaune 431480 8345750 1,482 2,110 Sommet Tube Avatoru 3,00 184 3,5 FOR_V_RGI198 Ohotu 431508 8345764 2,435 2,438 Sommet Tube Avatoru 3,20 161 3,5 FOR_V_RGI199 Ohotu 431408 8345764 2,435 2,438 Sommet Tube Avatoru 2,20 63 3,5 FOR_V_RGI199 Ohotu 431408 8345764 2,435 2,438 Sommet Tube Avatoru 2,20 63 3,5 FOR_V_RGI200 Ohotu 431069 8345209 1,381 Margelle Avatoru 1,90 182	FOR V PGI104	Avatoru	423004	82/7072	2.065	2.065	Dalla - Sol	Avatoru	1 05	277	3	
FOR_V_RGI195 Tiputa 433070 8343942 2,145 2,382 ??? Tiputa 137 3 FOR_V_RGI196 Tiputa 433070 8343942 2,145 2,382 ??? Tiputa 137 3 FOR_V_RGI197 Ohotu - Boule jaune 431480 8345750 1,482 2,110 Sommet Tube Avatoru 3,000 184 3,5 FOR_V_RGI198 Ohotu - Boule jaune 431408 8345764 2,435 2,438 Sommet Tube Avatoru 3,200 161 3,5 FOR_V_RGI199 Ohotu 431408 8345764 2,435 2,438 Sommet Tube Avatoru 3,200 161 3,5 FOR_V_RGI199 Ohotu 431408 8345764 2,435 2,438 Sommet Tube Avatoru 3,200 161 3,5 FOR_V_RGI200 Ohotu 431069 8345209 1,632 1,632 Tôle = Sol Avatoru 1,90 182 3 FOR_V_RGI201 Ohotu 431957 8345158 2,004 2,004 Dalle Avatoru 2,16 60 <td>FOR V PGI105</td> <td>Avatoru</td> <td>424030</td> <td>9347972</td> <td>1 870</td> <td>1 870</td> <td>Moellon</td> <td>Avatoru</td> <td>1,95</td> <td>277</td> <td>3</td>	FOR V PGI105	Avatoru	424030	9347972	1 870	1 870	Moellon	Avatoru	1,95	277	3	
FOR_V_RGI190 Ohotu - Boule jaune 431480 8345750 1,482 2,100 Sommet Tube Avatoru 3,00 184 3,5 FOR_V_RGI197 Ohotu - Boule jaune 431480 8345750 1,482 2,110 Sommet Tube Avatoru 3,200 184 3,5 FOR_V_RGI198 Ohotu 431508 8345764 2,435 2,438 Sommet Tube Avatoru 3,20 161 3,5 FOR_V_RGI199 Ohotu 431408 8345646 0,931 1,381 Margelle Avatoru 2,200 63 3,5 FOR_V_RGI200 Ohotu 432069 8345209 1,632 1,632 Tôle = Sol Avatoru 1,90 182 3 FOR_V_RGI201 Ohotu 431957 8345158 2,004 2,004 Dalle Avatoru 2,16 600 3 FOR_V_RGI202 Ohotu 431957 8345158 2,004 2,004 Dalle Avatoru 2,16 600 3 FOR_V_RGI202 Ohotu 431952 834504 1,489 Sol Avatoru 2,05	FOR V PGI195	Tiputa	424552	82/20/2	2 1/15	2,075	222	Tiputa	1,55	127	3	
FOR_V_RGI199 Ohotu 431508 8345764 2,435 2,438 Sommet Tube Avatoru 3,20 161 3,5 FOR_V_RGI198 Ohotu 431508 8345764 2,435 2,438 Sommet Tube Avatoru 3,20 161 3,5 FOR_V_RGI199 Ohotu 431408 8345646 0,931 1,381 Margelle Avatoru 2,20 63 3,5 FOR_V_RGI200 Ohotu 432069 8345209 1,632 1,632 Tôle = Sol Avatoru 1,90 182 3 FOR_V_RGI201 Ohotu 431957 8345158 2,004 2,004 Dalle Avatoru 2,16 60 3 FOR_V_RGI202 Ohotu 431962 834504 1,489 1,489 Sol Avatoru 1,70 37 3,4 FOR_V_RGI202 Ohotu 43192 834538 2,010 Margelle = Sol Avatoru 2,005 90 3,4 FOR_V_RGI203 Ohotu 432197 8344838 2,010 Margelle = Sol Avatoru 2,000 55 4,5	FOR V RGI197	Obotu - Boule iaune	433070	8345750	1 /182	2,302	sommet Tube	Avatoru	3.00	18/	35	
FOR_V_RGI199 Ohotu 431408 8345646 0,931 1,381 Margelle Avatoru 2,20 63 3,5 FOR_V_RGI200 Ohotu 432069 8345209 1,632 1,632 Tôle = Sol Avatoru 1,90 182 3 FOR_V_RGI201 Ohotu 431957 8345158 2,004 2,004 Dalle Avatoru 2,16 600 3 FOR_V_RGI202 Ohotu 431957 8345158 2,004 2,004 Dalle Avatoru 2,16 600 3 FOR_V_RGI202 Ohotu 431962 834504 1,489 1,489 Sol Avatoru 1,70 37 3,4 FOR_V_RGI203 Ohotu 432197 8344838 2,010 2,010 Margelle = Sol Avatoru 2,005 90 3,4 FOR_V_RGI204 Avatoru-Gendarmerie 426641 834712 Dalle Avatoru 2,000 55 4,5 FOR V_RGI205 Tiputa 432583 8344518 Dalle Tiputa 1.60 83 4	FOR V RGI198	Ohotu Obotu	431508	8345764	2/135	2,110	Sommet Tube	Avatoru	3,00	161	3,5	
FOR_V_RGI200 Ohotu 432069 8345209 1,632 1,632 Tôle = Sol Avatoru 1,90 182 3 FOR_V_RGI201 Ohotu 431957 8345158 2,004 2,004 Dalle Avatoru 1,90 182 3 FOR_V_RGI201 Ohotu 431957 8345158 2,004 2,004 Dalle Avatoru 2,16 60 3 FOR_V_RGI202 Ohotu 431962 834504 1,489 Sol Avatoru 1,70 37 3,4 FOR_V_RGI203 Ohotu 432197 8344838 2,010 2,010 Margelle = Sol Avatoru 2,05 90 3,4 FOR_V_RGI204 Avatoru-Gendarmerie 426641 834712 Dalle Avatoru 2,000 55 4,5 FOR V_RGI205 Tiputa 432583 8344518 Dalle Tiputa 1.60 83 4	FOR V RGI100	Ohotu	431/08	83456/6	0 931	1 3 8 1	Margelle	Avatoru	2 20	63	3,5	
FOR_V_RGI201 Ohotu 431957 8345158 2,004 2,004 Dalle Avatoru 2,16 60 3 FOR_V_RGI202 Ohotu 431957 8345158 2,004 2,004 Dalle Avatoru 2,16 60 3 FOR_V_RGI202 Ohotu 431962 8345064 1,489 1,489 Sol Avatoru 1,70 37 3,4 FOR_V_RGI203 Ohotu 432197 8344838 2,010 2,010 Margelle = Sol Avatoru 2,05 90 3,4 FOR_V_RGI204 Avatoru-Gendarmerie 426641 8347172 Dalle Avatoru 2,00 55 4,5 FOR V_RGI205 Tiputa 432583 8344518 Dalle Tiputa 1.60 83 4	FOR V RGI200	Ohotu	432069	8345209	1.632	1,501	Tôle = Sol	Avatoru	1 90	182	3, 5	
FOR_V_RGI202 Ohotu 431962 8345064 1,489 1,489 Sol Avatoru 1,70 37 3,4 FOR_V_RGI203 Ohotu 432197 8344838 2,010 2,010 Margelle = Sol Avatoru 1,70 37 3,4 FOR_V_RGI203 Ohotu 432197 8344838 2,010 Margelle = Sol Avatoru 2,05 90 3,4 FOR_V_RGI204 Avatoru - Gendarmerie 426641 8347172 Dalle Avatoru 2,00 55 4,5 FOR V_RGI205 Tiputa 432583 8344518 Dalle Tiputa 1.60 83 4	FOR V RGI200	Ohotu	431957	8345158	2,004	2 004	Dalle	Avatoru	2.16	60	3	
FOR_V_RGI203 Ohotu 432197 8344838 2,010 2,010 Margelle = Sol Avatoru 2,05 90 3,4 FOR_V_RGI204 Avatoru - Gendarmerie 426641 8347172 Dalle Avatoru 2,000 55 4,5 FOR_V_RGI205 Tiputa 432583 8344518 Dalle Tiputa 1.60 83 4	FOR V RGI202	Ohotu	431962	8345064	1.489	1.489	Sol	Avatoru	1.70	37	3.4	
FOR_V_RGI204 Avatoru Gendarmerie 426641 8347172 Dalle Avatoru 2,00 55 4,5 FOR_V_RGI205 Tiputa 432583 8344518 Dalle Tiputa 1.60 83 4	FOR V RGI202	Ohotu	432197	8344838	2,010	2.010	Margelle = Sol	Avatoru	2.05	90	3.4	
FOR V RGI205 Tiputa 432583 8344518 Dalle Tiputa 1.60 83 4	FOR V RGI204	Avatoru - Gendarmerie	426641	8347172	2,010	2,010	Dalle	Avatoru	2.00	55	4.5	
	FOR V RGI205	Tiputa	432583	8344518			Dalle	Tiputa	1,60	83	4	

ID Forage	Mission1 07/2017	Niveau Stat1 (m/sol)	Z1 piezo (mNGPF)	T (°C)	рН	Cond (µS/cm)	O2 (mg/L)	eH (mV)	Mission2 09/2017	Niveau Stat2 (m/sol)	Z2 piezo (mNGPF)	T (°C)	рН	Cond (µS/cm)	O2 (mg/L)	eH (mV)
FOR_V_RGI001	24/07/2017	1,25	0,54	29,0	7,31	444	3,76	377,7	29/09/2017	1,27	0,52	29,4	7,76	559	4,23	296,2
FOR_V_RGI002	24/07/2017	1,65	0,36	29,3	7,09	659	4,13	399,4								
FOR_V_RGI003	24/07/2017	1,32	0,25	28,5	7,19	726	3,56	393,5								
FOR_V_RGI004	24/07/2017	0,99	0,28	28,8	7,14	1127	2,12	394,2								
FOR_V_RGI005	24/07/2017	1,47	0,26	27,6	7,30	752	5,26	390,3								
FOR_V_RGI006	24/07/2017	1,73	0,15	27,0	7,45	899	5,51	399,3								
FOR_V_RGI007	24/07/2017	2,36	0,12	27,9	7,35	2448	2,91	389,9								
FOR_V_RGI008	24/07/2017	1,51	0,07	29,5	7,65	1157	6,29	362,2								
FOR_V_RGI009																
FOR_V_RGI010	24/07/2017	1,08	0,25	31,3	7,62	641	6,41	260,4								
FOR_V_RGI011	24/07/2017	2,05	-0,06	30,0	7,40	559	6,21	253,2								
FOR_V_RGI012	24/07/2017	1,58	0,03	29,6	7,26	842	5,00	321,9								
FOR_V_RGI013	24/07/2017	1,73	0,34	31,0	7,36	746	4,67	337,7								
FOR_V_RGI014	24/07/2017			30,6	7,50	1675	5,10	369,2								
FOR_V_RGI015	24/07/2017			30,6	7,19	559	2,58	393,3								
FOR_V_RGI016	24/07/2017	2,31	0,24	28,1	7,44	1511	2,03	192,4								
FOR_V_RGI017	24/07/2017	2,22	0,38	30,6	7,29	2778	5,47	354,3								
FOR_V_RGI018	24/07/2017			29,5	7,00	2143	5,17	170,6								
FOR_V_RGI019	24/07/2017	2,54	0,37	32,2	9,25	187	6,33	272,3								
FOR_V_RGI020	24/07/2017	2,43	0,19	29,2	7,39	647	3,12	353,2								
FOR V RGI021	24/07/2017	1,70	0,33	29,1	7,30	1124	4,23	351,5								
FOR_V_RGI022	24/07/2017	1,58	0,30	28,3	7,62	923	4,74	335,9	29/09/2017	1,71	0,17	27,7	7,77	1261	4,43	312,2
FOR V RGI023	25/07/2017	0,64	0,11	26,4	7,27	730	2,72	398,5								
FOR V RGI024	25/07/2017	0,73	0,14	26,3	7,57	457	2,58	360,4								
FOR V RGI025	25/07/2017	0,52	0,19	26,1	7,53	618	2,60	335,9								
FOR V RGI026	25/07/2017	0,58	0,08	26,5	7,55	655	6,34	331,8								
FOR V RGI027	25/07/2017	0,54	0,09	26,5	7,68	400	2,27	320,4								
FOR V RGI028	25/07/2017	1,13	0,13	28,0	7,46	789	4,64	331,9								
FOR V RGI029	25/07/2017	1,11	-0,02	26,6	7,49	561	1,33	278,7								
FOR V RGI030	25/07/2017	1,23	0,15	27,5	7,23	750	3,68	307,7								
FOR V RGI031	25/07/2017	0,50	0,05	26,2	7,58	553	3,20	309,2								
FOR V RGI032	25/07/2017	0,70	-0,17	26,9	7,41	471	3,46	328,9								
FOR V RGI033	25/07/2017	0,50		26,0	7,27	530	2,53	306,7								
FOR V RGI034	25/07/2017			26,2	7,50	842	5,21	291,9								
FOR V RGI035	25/07/2017	1,00	0,54	27,2	7,34	585	4,97	349,9								
FOR V RGI036	25/07/2017	1,60	0,41	27,0	7,40	448	4,87	347,9								
FOR V RGI037	25/07/2017	1,82	0,28	29,2	7,22	799	2,62	288,3								
FOR V RGI038	25/07/2017			30,6	7,22	621	4,05	333,0								
FOR_V_RGI039	25/07/2017	1,39	0,30	29,2	7,19	790	2,53	337,8								
FOR V RGI040	25/07/2017	0,80	0,02	28,5	7,25	4459	3,38	321,0								
FOR V RGI041	25/07/2017	1,70	0,08	26,9	7,53	923	5,79	334,6								
FOR V RGI042	25/07/2017			29,1	7,24	2274	4,64	367,6								
FOR_V_RGI043	25/07/2017	1,23	0,40	26,9	7,26	2723	1,83	310,5								
FOR V RGI044	25/07/2017	1,32	0,02	29,0	7,25	9934	3,44	373,0		i			İ		1	
FOR V RGI045	25/07/2017	1,10	0,15	27,6	7,41	1717	5,09	363,5								
FOR V RGI046	25/07/2017	1,54	0,25	28,8	7,63	486	5,32	365,8								
FOR V RGI047	25/07/2017	2,20	0,36	29,0	8,05	1051	6,91	315,7		l			İ			
FOR V RGI048	25/07/2017	0,78	0,19	30,6	7,47	960	7,54	397,0					İ			
FOR V RGI049	25/07/2017	2,07	0,21	31,0	, 7,46	849	6,66	389,7								
FOR V RGI050	25/07/2017	2,09		31,7	7,54	1057	5,05	392,5		İ			İ			
FOR V RGI051	25/07/2017	1,62	0,00	29,5	7,57	1939	6,96	394,5					l			
						•			•		•			•	•	,

	h dia si s a d	Niveau	74			Const			Missis 2	Niveau	70			Const		
ID Forage	IVIISSION1	Stat1	ZI piezo	T (°C)	pН	Cond	O2 (mg/L)	eH (mV)	IVIISSION2	Stat2	ZZ piezo	T (°C)	pН	Cond	O2 (mg/L)	eH (mV)
	07/2017	(m/sol)	(MINGPF)			(µs/cm)			09/2017	(m/sol)	(MINGPF)			(µs/cm)		
FOR_V_RGI052									27/09/2017	0,96	0,24	28,9	7,61	488	5,58	394,8
FOR_V_RGI053									27/09/2017	0,76	-0,06	27,8	7,14	3642	3,48	311,0
FOR_V_RGI054									27/09/2017	1,20	-0,14	26,5	7,66	10530	3,92	316,5
FOR_V_RGI055									27/09/2017	0,78	-0,07	34,3	7,40	3151	4,31	305,3
FOR_V_RGI056									27/09/2017	1,18	0,14	29,1	7,36	1198	2,41	299,7
FOR_V_RGI057									27/09/2017	1,22	-0,07	28,3	7,48	1824	5,44	298,4
FOR_V_RGI058									27/09/2017	0,96	0,10	30,0	7,51	718	4,33	286,3
FOR_V_RGI059									27/09/2017	0,85	0,17	27,7	7,29	1379	3,75	14,0
FOR_V_RGI060									27/09/2017	0,69	0,07	28,4	7,19	1461	3,50	78,5
FOR_V_RGI061									27/09/2017	1,05	0,03	31,5	7,11	2013	4,15	211,6
FOR_V_RGI062									27/09/2017	0,93	0,01	28,3	7,29	1627	2,88	247,0
FOR_V_RGI063									27/09/2017	0,88	0,12	28,2	7,24	716	1,71	256,2
FOR_V_RGI064									27/09/2017	0,84	0,14	28,7	7,29	2401	1,60	283,8
FOR_V_RGI065									27/09/2017	0,97	0,03	27,8	7,59	4423	4,00	251,1
FOR V RGI066									27/09/2017	3,00	-0,31	26,5	7,76	2046	2,74	251,1
FOR V RGI067									27/09/2017	1,01	1,15	27,8	8,19	3587	7,41	278,2
FOR V RGI068									27/09/2017	1,98	0,24	28,9	7,44	1151	5,11	289,1
FOR V RGI069									27/09/2017	1,30	0,06	29,1	7,66	6130	5,25	316,1
FOR V RGI070									27/09/2017	1,32	0,22	27,9	7,47	806	1,74	301,5
FOR V RGI071									27/09/2017	0,75	0,42	28,4	7,37	1407	3,25	286,5
FOR V RGI072									27/09/2017	1,57	0,00	27,6	7,83	800	3,73	272,9
FOR V RGI073									27/09/2017	0,90	0,03	28,4	7,35	2743	4,82	263,0
FOR V RGI074									27/09/2017	1,11	-0,12	28,1	7,44	650	3,05	275,4
FOR V RGI075									27/09/2017	1,47	0,02	28,4	7,29	1033	2,08	284,3
FOR V RGI076									27/09/2017	0.97	0.16	31.5	7.31	2355	3.38	149.8
FOR V RGI077									27/09/2017	1,48	0,23	29,2	7,37	1219	1,40	- / -
FOR V RGI078									27/09/2017	0.97	0.97	28.6	7.40	985	5.68	249.7
FOR V RGI079									27/09/2017	1.78	0.08	28.9	7.38	953	3.43	251.2
FOR V RGI080									27/09/2017	1,74	0,18	27,9	7,20	1048	4,30	278,6
FOR V RGI081									27/09/2017	1,57	0,24	28,8	7,33	913	3,48	284,6
FOR V RGI082																
FOR V RGI083									27/09/2017	1,18	0,18	28,2	7,21	983	2,75	285,3
FOR V RGI084									28/09/2017	1,51	0,10	27,2	7,50	953	2,50	361,5
FOR V RGI085									28/09/2017	1,81	-0,15	27,8	7,38	1229	3,62	246,5
FOR V RGI086									28/09/2017	1,73	0,42	28,4	7,25	1461	2,14	193,0
FOR V RGI087									28/09/2017	1,16	0,01	26,3	7,53	916	4,68	272,0
FOR V RGI088									28/09/2017			27,2	7,49	1334	5,69	316,0
FOR V RGI089									28/09/2017	1,55	0,11	28,8	7,64	719	3,44	302,3
FOR V RGI090									28/09/2017		,	31,8	7,37	3281	3,41	309,0
FOR V RGI091									28/09/2017	1,75	0,12	27,5	7,32	4804	2,10	237,0
FOR V RGI092									28/09/2017	1,33	0,01	28,1	7,81	1100	3,12	248,6
FOR V RGI093									28/09/2017	1,18	0,14	26,9	7,58	926	1,38	264,6
FOR V RGI094		1							28/09/2017	1,35	0,25	27,8	7,24	1336	3,69	372,1
FOR V RGI095		l							28/09/2017	1,23	0,14	29,2	7,48	684	3,09	348,2
FOR V RGI096									28/09/2017	0,95	0,18	25,9	7,70	774	6,18	339,2
FOR V RGI097		1							28/09/2017	1,10	0,25	28,0	7,47	849	1,63	331,7
FOR V RGI098									28/09/2017	0,84	0,19	26,5	7,46	1287	4,27	338,0
FOR V RGI099									28/09/2017	0,98	0,16	29,3	7,16	1231	3,63	332,1
FOR_V_RGI100									28/09/2017			28,2	7,38	1054	6,68	334,5

Bilan des investigations menées à Rangiroa

ID Forage	Mission1 07/2017	Niveau Stat1 (m/sol)	Z1 piezo (mNGPF)	T (°C)	рН	Cond (µS/cm)	O2 (mg/L)	eH (mV)	Mission2 09/2017	Niveau Stat2 (m/sol)	Z2 piezo (mNGPF)	T (°C)	рН	Cond (µS/cm)	O2 (mg/L)	eH (mV)
FOR_V_RGI101									28/09/2017	1,87	-0,01	28,2	7,88	3577	6,55	321,7
FOR_V_RGI102																
FOR_V_RGI103									28/09/2017	1,11	0,34	28,3	7,58	818	5,71	328,9
FOR_V_RGI104									28/09/2017	1,03	0,52	28,5	7,42	1445	4,68	336,2
FOR_V_RGI105									28/09/2017	0,75	0,29	28,5	7,34	1099	3,86	327,3
FOR_V_RGI106									28/09/2017	0,79	0,06	28,3	7,29	1148	3,82	327,6
FOR_V_RGI107																
FOR_V_RGI108									28/09/2017	2,38	-0,07	27,3	7,31	1279	1,52	339,8
FOR_V_RGI109									28/09/2017	1,92	0,57	28,3	6,97	1158	3,50	360,6
FOR_V_RGI110									28/09/2017	2,80	-0,42	29,6	7,58	824	6,05	332,4
FOR_V_RGI111									28/09/2017	2,98	0,07	29,2	7,57	1159	4,84	328,5
FOR_V_RGI112									28/09/2017	1,95	0,36	28,5	7,60	695	6,60	327,3
FOR_V_RGI113									28/09/2017	2,10	0,19	28,8	7,47	2634	5,58	337,0
FOR_V_RGI114									28/09/2017	1,55	0,21	28,3	7,27	1637	1,79	320,7
FOR_V_RGI115									28/09/2017	1,67	0,03	27,6	7,81	2283	6,32	302,8
FOR_V_RGI116									28/09/2017	2,04	-0,02	27,6	7,92	1501	6,13	307,2
FOR_V_RGI117									28/09/2017	2,04	0,22	28,5	7,57	1966	6,28	317,5
FOR_V_RGI118									28/09/2017	1,90		29,0	7,57	2159	6,32	313,9
FOR_V_RGI119									28/09/2017	1,57	0,17	26,9	7,49	8247	4,00	326,3
FOR_V_RGI120									28/09/2017	0,50	0,33	28,7	7,56	1045	4,51	290,8
FOR_V_RGI121									29/09/2017	1,74	0,14	29,1	7,75	752	6,35	395,2
FOR_V_RGI122									29/09/2017			32,0	7,73	671	8,10	370,9
FOR_V_RGI123									29/09/2017	1,83	-0,05	28,7	7,67	1476	3,05	344,0
FOR_V_RGI124									29/09/2017			31,5	7,49	2484	2,52	147,4
FOR_V_RGI125									29/09/2017	1,17		30,1	7,43	3470	2,75	265,0
FOR_V_RGI126																
FOR_V_RGI127									29/09/2017	1,09	0,47	28,6	7,29	5833	0,84	-32,5
FOR_V_RGI128									29/09/2017	1,53	0,38	30,2	7,52	4007	5,20	266,5
FOR_V_RGI129									29/09/2017	1,36	0,55	26,5	7,70	3030	3,59	262,0
FOR_V_RGI130									29/09/2017	1,03	0,40	27,9	7,74	2183	5,05	247,3
FOR_V_RGI131									29/09/2017	1,14	0,26	28,5	7,02	1072	1,09	269,4
FOR_V_RGI132									29/09/2017			32,7	7,20	834	5,01	290,9
FOR_V_RGI133									29/09/2017	0,84	0,36	28,6	7,04	957	2,99	468,4
FOR_V_RGI190																
FOR_V_RGI191																
FOR_V_RGI192																
FOR_V_RGI193																
FOR_V_RGI194																
FOR_V_RGI195																
FOR_V_RGI196																
FOR_V_RGI197																
FOR_V_RGI198																
FOR_V_RGI199																
FOR_V_RGI200																
FOR_V_RGI201																
FOR_V_RGI202																
FOR_V_RGI203																
FOR_V_RGI204																
FOR_V_RGI205																

ID Forage	Mission3 04/2018	Niveau Stat3 (m/sol)	Z3 piezo (mNGPF)	Cond (µS/cm)	T (°C)	Cond fond (uS/cm)	T fond (°C)	Mission4 09/2018	Niveau Stat4 (m/rep)	T (°C)	рН	Cond (µS/cm)	O2 (mg/L)	eH (mV)	Mission5 10/2018	Heure	Niveau Stat5 (m/rep)	Cond (µS/cm)	Cond Fond (uS/cm)
FOR V RGI001	25/04/2018	1.25	0.54	452	29.3	593	29.2	12/09/2018	1.40	28.6	7.38	590	4.05	148.2	24/10/2018	14h40	1.41	528	2240
FOR V RGI002	26/04/2018	1.53	0.48	489	29.3	500	29.3												
FOR V RGI003	26/04/2018	1.2	0.37	729	29.8	729	29.8												
FOR V RGI004	26/04/2018	0.82	0.45	1106	28.9	1342	28.7								25/10/2018	14h11	0.86	1112	1837
FOR V RGI005	25/04/2018	1.5	0.23	838	27.3		-1												
FOR V RGI006	25/04/2018	1.7	0.18	1547	27.1														
FOR V RGI007	25/04/2018	2.93	-0.46	4930	28,4	8950	28.6												
FOR V RGI008	25/04/2018	1.45	0.13	1805	28.2	5270	28.9												
FOR V RGI009	25/04/2018	-/		571	29	575	28.7												
FOR V RGI010	27/04/2018	1.15	0.18	436	28.3	436	28.3												
FOR V RGI011	25/04/2018	1.73	0.26	802	29.3	802	29.3												
FOR V RGI012	25/04/2018	1.4	0.21	762	29.7		- /-								24/10/2018	17h19	2.2	975	994
FOR V RGI013	25/04/2018	1,75	0,32														,		
FOR V RGI014																			
FOR V RGI015																			
FOR V RGI016	25/04/2018	2.3	0.25	1150	28.9														
FOR V RGI017	25/04/2018	2,3	0,30	850	28,4	875	28,4												
FOR V RGI018																			
FOR V RGI019	25/04/2018	2.8	0.11	267	28.3	267	28.3												
FOR V RGI020	25/04/2018	2.49	0.13	620	28.9	692	28.7								25/10/2018	14h37	2.6	685	813
FOR V RGI021	25/04/2018	1,88	0,15	1427	29,2		-1								25/10/2018	16h06	1,73	3270	4640
FOR V RGI022	25/04/2018	1.8	0.08	978	27.7	2690	28								25/10/2018	15h50	1.65	2130	6660
FOR V RGI023	26/04/2018	0,78	-0,03	595	26,9	595	26,9										1		
FOR V RGI024	26/04/2018	0.73	0.14	422	27.7	422	27.7												
FOR V RGI025	26/04/2018	0.62	0.09	838	27.7	838	27.7	13/09/2018		25.7	7.37	750	1.53	72.0					
FOR V RGI026	26/04/2018	0.66	0.00	532	27.1	532	27.1				1-								
FOR V RGI027	26/04/2018	0,53	0,10	470	27,2	470	27,2												
FOR V RGI028	26/04/2018	1.2	0.06	848	28.6		,												
FOR V RGI029	26/04/2018	1,23	-0,15	561	26,8	561	26,8												
FOR V RGI030	26/04/2018	1,3	0,08	626	27,1	626	27,1												
FOR V RGI031	26/04/2018	0,25	0,30	590	26,7														
FOR V RGI032	26/04/2018	0,7	-0,17	753	27,6	753	27,6	13/09/2018	0,95	26,2	7,28	708	2,99	168,1					
FOR V RGI033																			
FOR V RGI034																			
FOR V RGI035	26/04/2018	1,2	0,34	554	27,6	554	27,6	14/09/2018	0,80	26,4	7,51	635	5,85	176,1					
FOR_V_RGI036	26/04/2018	1,6	0,41	406	28,6	221	27,6												
FOR V RGI037	26/04/2018	2,3	-0,20	570	29,3			14/09/2018	0,85	29,3	7,19	564	3,34	179,3					
FOR_V_RGI038																			
FOR V RGI039	26/04/2018	1,4	0,29	638	28,8	664	28,7												
FOR V RGI040	26/04/2018	0,6	0,22	5630	28														
FOR V RGI041	26/04/2018	1,6	0,18	1408	28,4														
FOR V RGI042																			
FOR V RGI043	25/04/2018	1,25	0,38	4580	29,8	6560	29												
FOR_V_RGI044	26/04/2018	1,1	0,24	10000	30														
FOR V RGI045	26/04/2018	0,83	0,42	1942	27	8460	27,4												(
FOR_V_RGI046	26/04/2018	1,41	0,38	509	29,5	528	29,4												(
FOR V RGI047	26/04/2018																		(
FOR_V_RGI048	25/04/2018	0,87	0,10	947	28,2	951	27,9												
FOR_V_RGI049	25/04/2018	1,92	0,36	848	30,7														
FOR_V_RGI050	25/04/2018																		
FOR_V_RGI051	25/04/2018	1,39	0,23	2420	28,8	2850	28,8												

Bilan des investigations menées à Rangiroa

ID Forage	Mission3 04/2018	Niveau Stat3 (m/sol)	Z3 piezo (mNGPF)	Cond (µS/cm)	T (°C)	Cond fond (µS/cm)	T fond (°C)	Mission4 09/2018	Niveau Stat4 (m/rep)	T (°C)	рН	Cond (µS/cm)	O2 (mg/L)	eH (mV)	Mission5 10/2018	Heure	Niveau Stat5 (m/rep)	Cond (µS/cm)	Cond Fond (µS/cm)
FOR_V_RGI052								12/09/2018	1,85	28,1	7,43	557	2,11	140,8					
FOR_V_RGI053																			
FOR_V_RGI054																			
FOR_V_RGI055																			
FOR_V_RGI056																			
FOR_V_RGI057																			
FOR_V_RGI058																			
FOR_V_RGI059																			
FOR_V_RGI060																			
FOR_V_RGI061																			
FOR_V_RGI062																			
FOR_V_RGI063																			
FOR_V_RGI064																			
FOR_V_RGI065																			
FOR_V_RGI066																			
FOR_V_RGI067																			
FOR_V_RGI068																			
FOR_V_RGI069								12/09/2018		28,9	7,31	12890	6,36	69,6					
FOR_V_RGI070																			
FOR_V_RGI071																			
FOR_V_RGI072																			
FOR_V_RGI073																			
FOR_V_RGI074																			
FOR_V_RGI075																			
FOR_V_RGI076																			
FOR_V_RGI077																			
FOR_V_RGI078																			
FOR_V_RGI079																			
FOR_V_RGI080								42/00/2040	4.20	20.2	7.00	4460	2.45	435.0					
FOR_V_RGI081								12/09/2018	1,30	29,3	7,23	1168	3,15	125,0					
FOR_V_RGI082																			
FOR V RGI085															-				
FOR V RGI084																			
FOR V RGI085																			
FOR V RGI080																			
FOR V RGI088																			
FOR V RGI089																			
FOR V RGI090																			
FOR V RGI091																			
FOR V RGI092																			
FOR V RGI093																			
FOR V RGI094	1						1					1							
FOR V RGI095								12/09/2018		28.0	7.34	766	4.28	174.6					
FOR V RGI096								.,,		,-	.,		.,===						
FOR V RGI097																			
FOR_V_RGI098																			
FOR V RGI099				l															
FOR_V_RGI100	1	l		l		l	1					1					l		

ID Forage	Mission3 04/2018	Niveau Stat3 (m/sol)	Z3 piezo (mNGPF)	Cond (µS/cm)	T (°C)	Cond fond (uS/cm)	T fond (°C)	Mission4 09/2018	Niveau Stat4 (m/ren)	T (°C)	рН	Cond (µS/cm)	02 (mg/L)	eH (mV)	Mission5 10/2018	Heure	Niveau Stat5 (m/ren)	Cond (µS/cm)	Cond Fond (uS/cm)
FOR V RGI101		(11) 501)				(µ0) cm)			(m/rep/								(m/rep/		(µ0) cm)
FOR V RGI102																			
FOR V RGI102																			
FOR V RGI104																			
FOR V RGI105																			
FOR V RGI105																			
FOR V RGI107																			
FOR V RGI108																			
FOR V RGI109																			
FOR V RGI110																			
FOR V RGI111																			
FOR V RGI112																			
FOR V RGI113																			
FOR V RGI114																			
FOR V RGI115																			
FOR V RGI116																			
FOR V RGI117																			
FOR V RGI118																			
FOR V RGI119																			
FOR V RGI120																			
FOR_V_RGI121	25/04/2018	2,3	-0,42	573	29,6			12/09/2018	2,10	29,4	7,23	817	0,83	-143,0	24/10/2018	16h53	1,92	590	1478
FOR V RGI122																			
FOR_V_RGI123	25/04/2018	2,083	-0,30	976	28,6	2420	28,7	12/09/2018	1,65	28,5	7,54	1783	4,24	48,5	24/10/2018	16h28	1,85	1763	4950
FOR_V_RGI124																			
FOR_V_RGI125	25/04/2018																		
FOR_V_RGI126																			
FOR_V_RGI127	25/04/2018	1,07	0,49	5600	27,3	5610	27,3												
FOR_V_RGI128	25/04/2018	1,4	0,51	1104	28,7	6520	28,7	11/09/2018		27,6	7,61	2020	6,20	170,3	25/10/2018	11h46	1,61	1743	15000
FOR_V_RGI129	25/04/2018	1,32	0,59	1943	27	1968	27								25/10/2018	12h00	1,45	2520	2970
FOR_V_RGI130	25/04/2018	1,04	0,39	3160	28	4350	28,3												
FOR_V_RGI131	26/04/2018	0,9	0,50	785	28,7	905	28,6												
FOR_V_RGI132																			
FOR_V_RGI133	26/04/2018	0,98	0,22	851	28,5														
FOR_V_RGI190	25/04/2018	1,64	0,18	1319	29														
FOR_V_RGI191	25/04/2018	0,9	0,40	903	29														
FOR_V_RGI192	25/04/2018	2,55	0,49	1516	28	2920	28												
FOR_V_RGI193	25/04/2018	0,9	0,62	1933	29														
FOR_V_RGI194	27/04/2018	1,7	0,37	1031	28	1121	28												
FOR_V_RGI195	27/04/2018	0,9	0,98	1143	28	6480	28												
FOR_V_RGI196																			
FOR_V_RGI197	27/04/2018			1993	29										25/10/2018	15h15	1,75	2200	6980
FOR_V_RGI198	27/04/2018	2,56	-0,13	1396	29	2150	29								25/10/2018	15h30	2,58	1930	6550
FOR_V_RGI199	27/04/2018	0,67	0,26	11810	29	14070	29								25/10/2018	14h59	1,15	13880	18350
FOR_V_RGI200	27/04/2018	1,45	0,18	1153	27	2470	28												
FOR_V_RGI201	27/04/2018	1,86	0,14	1120	28	1144	28												
FOR_V_RGI202	27/04/2018	1,5	-0,01	640	28	640	28	12/09/2018		28,9	6,93	1646	1,69	36,3					
FUR_V_RGI203	2//04/2018	1,95	0,06	1025	29	1025	29	12/09/2018		28,7	7,23	1835	5,19	74,0	a . / . a /a a : -				
FUR_V_RGI204								13/09/2018	2,40	28,4	7,11	1100	2,56	98,3	24/10/2018	15h44	1,31	1019	2440
FOR_V_RGI205	1							12/09/2018	1,50	28,3	7,10	6710	0,70	-81,0	1		1		

Annexe 2

Résidus entre modèle de marée et variations des niveaux piézométriques pour les ouvrages ayant été instrumentés

Résidus entre modèle de marée et variations des niveaux piézométriques aux ouvrages instrumentés



Résidus entre signal de marée et niveaux piézométriques au puits RGI_001



Résidus entre signal de marée et niveaux piézométriques au puits RGI_027



Résidus entre signal de marée et niveaux piézométriques au puits RGI_021



Résidus entre signal de marée et niveaux piézométriques au puits RGI_123

Annexe 3

Points de prélèvements

ID :	FOR_V_RGI001
Lieu-dit :	Service Technique
X :	424113
Y :	8347905
Z :	1,79



Paramètres mesurés in-situ :

Moyen	de	prélèvement :	Seau
-------	----	---------------	------

T eau (°C) :	28,6	O2 dissous (%) :	51,8	Nature :	Puits
C (µS/cm) :	590	O2 dissous (mg/L) :	4,05	Date :	12/09/2018
pH :	7,38	eH mesuré (mV) :	148,2	Heure	11h30
Couleur :	Incolore				



ID :	FOR_V_RGI203
Lieu-dit :	Ohuto, proximité passe
X :	432196
Y :	8344855
Z :	2,01



Paramètres mesurés in-situ :

Moyen de prélèvement : Robinet

T eau (°C) :	28,7	O2 dissous (%) :	67,2	Nature :	Puits
C (µS/cm) :	1835	O2 dissous (mg/L) :	5,19	Date :	12/09/2018
pH :	7,23	eH mesuré (mV) :	74,0	Heure :	14h15
Couleur :	Incolore				





- ID : FOR_V_RGI025
- Lieu-dit : Vigne (P5)
- X: 419498
- Y: 8348450
- Z: 0,71



Paramètres mesurés in-situ :

Moyen de prélèvement : Seau

T eau (°C) :	25,7	O2 dissous (%) :	18,4	Nature :	Puits
C (µS/cm) :	750	O2 dissous (mg/L) :	1,53	Date :	13/09/2018
pH :	7,37	eH mesuré (mV) :	72,0	Heure	7h15
Couleur :	Jaunâtre				



ID : FOR_V_RGI032

Lieu-dit : Vigne (P12)

- X: 418990
- Y: 8348585
- Z: 0,53



Paramètres mesurés in-situ :

Moyen de prélèvement : Seau

T eau (°C) :	26,2	O2 dissous (%) :	37,0	Nature :	Puits
C (µS/cm) :	708	O2 dissous (mg/L) :	2,99	Date :	13/09/2018
рН :	7,28	eH mesuré (mV) :	168,1	Heure	7h00
Couleur :	Incolore				



ID :	FOR_V_RGI035
Lieu-dit :	Motu Vigne - Karst
X :	421985
Y :	8348517
Z :	1,54



Paramètres mesurés in-situ :

Moyen de prélèvement : Seau

T eau (°C) :	26,4	O2 dissous (%) :	72,1
C (µS/cm) :	635	O2 dissous (mg/L) :	5,85
pH :	7,51	eH mesuré (mV) :	176,1
Couleur :	Incolore		
Odeur :	Inodore		

Nature :	Trou
Date :	13/09/2018
Heure	9h10



- ID : FOR_V_RGI037
- Lieu-dit : Lagon Vert
- X : 422992
- Y: 8347839
- Z: 2,10



Paramètres mesurés in-situ :

Moyen de prélèvement : Seau

T eau (°C) :	29,3	O2 dissous (%) :	43,3	Nature :	Puits
C (µS/cm) :	564	O2 dissous (mg/L) :	3,34	Date :	14/09/2018
рН :	7,19	eH mesuré (mV) :	179,3	Heure :	9h45
Couleur :	Légèrement jaunâtre				



Inodore

Odeur :



ID :	FOR_V_RGI052
Lieu-dit :	Tiputa cantine scolaire
X :	432726
Y :	8344242
Z :	1,20



Paramètres mesurés in-situ :

Moyen de prélèvement : Robinet

T eau (°C) :	28,1	O2 dissous (%) :	26,9	Nature :	Puits
C (µS/cm) :	557	O2 dissous (mg/L) :	2,11	Date :	12/09/2018
pH :	7,43	eH mesuré (mV) :	140,8	Heure	8h30
Couleur :	Légèrement jaunâtre				
Odeur :	Inodore				



ID :	FOR_V_RGI205
Lieu-dit :	Tiputa
X :	432583
Y :	8344518

Z :



Paramètres mesurés in-situ :

Moyen de prélèvement : Robinet

T eau (°C) :	28,3	O2 dissous (%) :	9,1	Nature :	Puits
C (µS/cm) :	6710	O2 dissous (mg/L) :	0,70	Date :	12/09/2018
pH :	7,10	eH mesuré (mV) :	-81,0	Heure	9h50
Couleur :	Jaunâtre				

Odeur : Marine



- ID : FOR_V_RGI069
- Lieu-dit : Tiputa CETAD
- X : 432805
- Y: 8344346
- Z: 1,36



Paramètres mesurés in-situ :

Moyen de prélèvement : Robinet

T eau (°C) :	28,9	O2 dissous (%) :	85,0	Nature :	Puits
C (µS/cm) :	12890	O2 dissous (mg/L) :	6,36	Date :	12/09/2018
pH :	7,31	eH mesuré (mV) :	69,6	Heure	8h45
Couleur :	Incolore				



- ID : FOR_V_RGI123
- Lieu-dit : Avatoru Mr Tang
- X: 430938
- Y: 8345898
- Z: 1,78



Paramètres mesurés in-situ :

Moyen de prélèvement : Seau

T eau (°C) :	28,5	O2 dissous (%) :	54,0	Nature :	Puits
C (µS/cm) :	1783	O2 dissous (mg/L) :	4,24	Date :	12/09/2018
pH :	7,54	eH mesuré (mV) :	48,5	Heure	13h15
Couleur :	Légèrement jaunâtre				



- ID : FOR_V_RGI128
- Lieu-dit : Avatoru Eglise
- X : 423727
- Y: 8347690
- Z: 1,91



Paramètres mesurés in-situ :

T eau (°C) :	27,6	O2 dissous (%) :	79, 1	Nature :	Puits
C (µS/cm) :	2020	O2 dissous (mg/L) :	6,20	Date :	11/09/2018
pH :	7,61	eH mesuré (mV) :	170,3	Heure	15h45
Couleur :	Incolore				





- ID :
 FOR_V_RGI202

 Lieu-dit :
 Ohotu

 X :
 431962

 Y :
 8345064
- Z: 1,49



Paramètres mesurés in-situ :

Moyen de prélèvement : Robinet

T eau (°C) :	28,9	O2 dissous (%) :	21,9	Nature :	Puits
C (µS/cm) :	1646	O2 dissous (mg/L) :	1,69	Date :	12/09/2018
pH :	6,93	eH mesuré (mV) :	36,3	Heure	14h00
Couleur :	Incolore				



- ID : Eau de Mer Lieu-dit : Passe Avatoru
- X: 423671
- Y: 8347681
- Z: 0



Paramètres mesurés in-situ :

Moyen de prélèvement : Seau

T eau (°C) :	28,3	O2 dissous (%) :	111,1	Nature :	Mer
C (µS/cm) :	58750	O2 dissous (mg/L) :	7,29	Date :	12/09/2018
pH :	8,02	eH mesuré (mV) :	85,8	Heure	15h00
Couleur :	Légèrement jaunâtre				



- ID : FOR_V_RGI095
- Lieu-dit : Tiputa Mairie
- X : 432783
- Y : 8344037
- Z: 1,37



Paramètres mesurés in-situ :

Moyen de prélèvement : Robinet

T eau (°C) :	28,0	O2 dissous (%) :	54,3	Nature :	Puits
C (µS/cm) :	766	O2 dissous (mg/L) :	4,28	Date :	12/09/2018
рН :	7,34	eH mesuré (mV) :	174,6	Heure :	9h10
Couleur :	Incolore				



ID :	FOR_V_RGI081
Lieu-dit :	Tiputa Epicerie Nova
X :	432661
Y :	8344108
Z :	1,81



Paramètres mesurés in-situ :

Moyen de prélèvement : Robinet

T eau (°C) :	29,3	O2 dissous (%) :	40,8	Nature :	Puits
C (µS/cm) :	1168	O2 dissous (mg/L) :	3, 15	Date :	12/09/2018
рН :	7,23	eH mesuré (mV) :	125,0	Heure	9h30
Couleur :	Incolore				



- ID : FOR_V_RGI121
- Lieu-dit : Avatoru Plage
- X: 431071
- Y: 8345881
- Z: 1,88



Paramètres mesurés in-situ :

Moyen de prélèvement : Seau

T eau (°C) :	29,4	O2 dissous (%) :	11,3	Nature :	Forage
C (µS/cm) :	817	O2 dissous (mg/L) :	0,83	Date :	12/09/2018
рН :	7,23	eH mesuré (mV) :	-143,0	Heure	12h50
Couleur :	Légèrement jaunâtre				

Odeur : H2S



ID :	FOR_V_RGI204
Lieu-dit :	Avatoru Gendarmerie
X :	426641
Y :	8347172
Z :	



Paramètres mesurés in-situ :

Moyen de prélèvement : Seau

T eau (°C) :	28,4	O2 dissous (%) :	32,7	Nature :	Puits
C (µS/cm) :	1100	O2 dissous (mg/L) :	2,56	Date :	13/09/2018
pH :	7,11	eH mesuré (mV) :	98,3	Heure	10h00
Couleur :	Légèrement jaunâtre				
Odeur :	Inodore				



Annexe 4

Résultats des analyses chimiques
	RGI_1	RGI_2	RGI_3	RGI_4	RGI_5	RGI_6
	12/09/2018	12/09/2018	13/09/2018	13/09/2018	14/09/2018	14/09/2018
Température (°C)	28,6	28,7	25,7	26,2	26,4	29,3
Conductivité (µS/cm)	590	1835	750	708	635	564
рН	7,38	7,23	7,37	7,28	7,51	7,19
Eh (mV)	148,2	74,0	72,0	168,1	176,1	179,3
O2 (mg/L)	4,05	5,19	1,53	2,99	5,85	3,34
O2 (%)	51,8	67,2	18,4	37,0	72,1	43,3
Ag (Argent) - 0,01 μg/l	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Al (Aluminium) - 0,5 μg/l	4,98	1,68	2,11	11,8	0,81	1,96
As (Arsenic) - 0,05 μg/l	0,82	1	0,21	2,25	0,41	0,52
B (Bore) - 0,5 μg/l	46,2	86,9	71,4	66,9	45,8	61,3
Ba (Baryum) - 0,05 μg/l	1,51	1,74	1,12	1,34	1,5	1,31
Be (Béryllium) - 0,01 μg/l	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
CO3 (Carbonates) - 10 mg/l	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Ca (Calcium) - 0,5 mg/l	68,1	113	107	98,1	76,6	86,7
Cd (Cadmium) - 0,01 µg/l	< LQ	< LQ	< LQ	0,01	< LQ	< LQ
Cl (Chlorures) - 0,5 mg/l	28,9	263,2	29,4	43,3	65,8	22,1
Co (Cobalt) - 0,05 µg/l	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Cr (Chrome) - 0,1 μg/l	0,15	0,11	0,2	0,19	0,1	< LQ

	RGI_7	RGI_8	RGI_9	RGI_10	RGI_11	RGI_12
	12/09/2018	12/09/2018	12/09/2018	12/09/2018	11/09/2018	12/09/2018
Température (°C)	28,1	28,3	28,9	28,5	27,6	28,9
Conductivité (µS/cm)	557	6710	12890	1783	2020	1646
рН	7,43	7,10	7,31	7,54	7,61	6,93
Eh (mV)	140,8	-81,0	69,6	48,5	170,3	36,3
O2 (mg/L)	2,11	0,70	6,36	4,24	6,20	1,69
O2 (%)	26,9	9,1	85,0	54,0	79,1	21,9
Ag (Argent) - 0,01 μg/l	< LQ	0,01	0,01	< LQ	< LQ	< LQ
Al (Aluminium) - 0,5 μg/l	32,2	2,97	5,56	5,24	2,68	1,51
As (Arsenic) - 0,05 μg/l	1,42	1,78	1,73	13,3	1,81	0,9
B (Bore) - 0,5 μg/l	25,6	453	855	122	157	102
Ba (Baryum) - 0,05 μg/l	14,6	3,14	4,04	2,08	2,47	2,28
Be (Béryllium) - 0,01 μg/l	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
CO3 (Carbonates) - 10 mg/l	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Ca (Calcium) - 0,5 mg/l	49,1	164	133	105	71,7	120
Cd (Cadmium) - 0,01 µg/l	0,01	0,02	0,03	< LQ	< LQ	< LQ
Cl (Chlorures) - 0,5 mg/l	21,6	2188,9	3604,2	395,5	493,8	161,9
Co (Cobalt) - 0,05 μg/l	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0,06	0,06
Cr (Chrome) - 0,1 μg/l	0,21	0,21	0,66	1,71	0,21	< LQ

	RGI_13	RGI_14	RGI_15	RGI_16	RGI_17
	12/09/2018	12/09/2018	12/09/2018	12/09/2018	13/09/2018
Température (°C)	28,3	28,0	29,3	29,4	28,4
Conductivité (µS/cm)	58750	766	1168	817	1100
рН	8,02	7,34	7,23	7,23	7,11
Eh (mV)	85,8	174,6	125,0	-143,0	98,3
O2 (mg/L)	7,29	4,28	3,15	0,83	2,56
O2 (%)	111,1	54,3	40,8	11,3	32,7
Ag (Argent) - 0,01 μg/l	0,04	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Al (Aluminium) - 0,5 μg/l	5,03	23,3	2,31	18,9	2,22
As (Arsenic) - 0,05 μg/l	1,88	0,87	4,95	0,11	0,33
B (Bore) - 0,5 μg/l	5528	52,4	85,7	97,8	95,8
Ba (Baryum) - 0,05 μg/l	5,78	4,21	1,66	3,58	1,7
Be (Béryllium) - 0,01 μg/l	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
CO3 (Carbonates) - 10 mg/l	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Ca (Calcium) - 0,5 mg/l	385	81	95	79,3	100
Cd (Cadmium) - 0,01 μg/l	0,01	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Cl (Chlorures) - 0,5 mg/l	22045,4	18	73,8	76,9	248
Co (Cobalt) - 0,05 µg/l	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ
Cr (Chrome) - 0,1 μg/l	0,39	0,27	< LQ	< LQ	< LQ

	RGI_1	RGI_2	RGI_3	RGI_4	RGI_5	RGI_6
	12/09/2018	12/09/2018	13/09/2018	13/09/2018	14/09/2018	14/09/2018
Cu (Cuivre) - 0,1 μg/l	0,33	0,34	< LQ	0,49	0,16	0,28
F (Fluorures) - 0,1 mg/l	0,6	0,5	0,6	0,5	0,2	0,4
Fe (Fer) - 0,02 mg/l	< LQ					
HCO3 (Bicarbonates) - 10 mg/l	243	352	426	365	267	312
K (Potassium) - 0,5 mg/l	2,2	5,4	1,3	< LQ	< LQ	1
Li (Lithium) - 0,1 μg/l	2,96	2,88	1,4	1,81	1,1	0,84
Mg (Magnésium) - 0,5 mg/l	10,3	21,6	22	18,6	12,3	13,2
Mn (Manganèse) - 0,1 μg/l	0,89	0,22	3,06	0,16	1,1	0,54
NH4 (Ammonium exprimé en NH4) - 0,05 mg/l	0,23	< LQ	0,47	< LQ	< LQ	< LQ
NO2 (Nitrites exprimés en NO2) - 0,01 mg/l	0,02	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0,23
NO3 (Nitrates exprimés en NO3) - 0,5 mg/l	6,6	2,5	< LQ	< LQ	< LQ	3,8
Na (Sodium) - 0,5 mg/l	18,2	134	21	26,4	34,6	13,3
Ni (Nickel) - 0,1 µg/l	0,22	0,39	0,34	0,26	0,22	0,38
PO4 (OrthoPhosphates en PO4) - 0,05 mg/l	0,07	0,14	0,05	0,07	< LQ	0,05
Pb (Plomb) - 0,05 μg/l	< LQ					
SO4 (Sulfates) - 0,5 mg/l	9	28,1	10,6	15,8	9,4	7,1
SiO2 (Silice) - 0,5 mg/l	5,2	1	< LQ	0,7	< LQ	< LQ
Sr (Strontium) - 0,1 μg/l	859	2201	1072	1027	1041	1572
Zn (Zinc) - 0,5 μg/l	1,13	1,66	1,11	10,5	2,6	2,36
Isotope 87Sr / 86Sr	NR	0,709192	0,709160	NR	NR	NR

	RGI_7	RGI_8	RGI_9	RGI_10	RGI_11	RGI_12
	12/09/2018	12/09/2018	12/09/2018	12/09/2018	11/09/2018	12/09/2018
Cu (Cuivre) - 0,1 μg/l	0,95	0,27	8,26	1,7	0,45	1,83
F (Fluorures) - 0,1 mg/l	0,4	0,5	0,7	0,3	0,3	0,2
Fe (Fer) - 0,02 mg/l	< LQ					
HCO3 (Bicarbonates) - 10 mg/l	173	366	242	329	262	415
K (Potassium) - 0,5 mg/l	1,5	40,3	73,6	9,5	17,5	6,8
Li (Lithium) - 0,1 μg/l	1,3	20,8	36	4,02	6,7	3,63
Mg (Magnésium) - 0,5 mg/l	6,6	132	225	31,7	32,3	18,9
Mn (Manganèse) - 0,1 μg/l	0,75	1,6	0,83	0,47	1,13	2,69
NH4 (Ammonium exprimé en NH4) - 0,05 mg/l	< LQ	< LQ	0,2	< LQ	< LQ	11,51
NO2 (Nitrites exprimés en NO2) - 0,01 mg/l	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0,69
NO3 (Nitrates exprimés en NO3) - 0,5 mg/l	1,3	< LQ	12,9	1,4	2,7	26,9
Na (Sodium) - 0,5 mg/l	13,3	1110	1891	202	269	89,2
Ni (Nickel) - 0,1 μg/l	0,34	0,43	0,59	0,23	0,35	0,54
PO4 (OrthoPhosphates en PO4) - 0,05 mg/l	0,14	0,51	0,24	0,43	< LQ	< LQ
Pb (Plomb) - 0,05 μg/l	0,32	< LQ	0,88	< LQ	< LQ	0,41
SO4 (Sulfates) - 0,5 mg/l	4,7	281,8	498,3	44,2	63,2	32,8
SiO2 (Silice) - 0,5 mg/l	3,9	2,3	4,6	1	7,5	3,1
Sr (Strontium) - 0,1 μg/l	525	2851	2417	1515	1098	2018
Zn (Zinc) - 0,5 μg/l	11,6	3,5	7,04	2,3	1,46	3,89
Isotope 87Sr / 86Sr	NR	NR	0,709160	0,709163	0,709130	NR

	RGI_13	RGI_14	RGI_15	RGI_16	RGI_17
	12/09/2018	12/09/2018	12/09/2018	12/09/2018	13/09/2018
Cu (Cuivre) - 0,1 μg/l	0,33	11,5	5,64	0,33	1,15
F (Fluorures) - 0,1 mg/l	0,6	< LQ	0,2	0,6	0,4
Fe (Fer) - 0,02 mg/l	< LQ				
HCO3 (Bicarbonates) - 10 mg/l	141	290	341	338	318
K (Potassium) - 0,5 mg/l	434	1,9	2,7	1,1	6,1
Li (Lithium) - 0,1 μg/l	201	3,84	2,15	2,27	3,74
Mg (Magnésium) - 0,5 mg/l	1287	8,7	14,2	24,5	23,3
Mn (Manganèse) - 0,1 μg/l	0,3	0,11	0,22	6,28	0,23
NH4 (Ammonium exprimé en NH4) - 0,05 mg/l	0,14	< LQ	< LQ	0,67	< LQ
NO2 (Nitrites exprimés en NO2) - 0,01 mg/l	< LQ	< LQ	0,08	< LQ	0,04
NO3 (Nitrates exprimés en NO3) - 0,5 mg/l	< LQ	1,1	18,1	< LQ	17,3
Na (Sodium) - 0,5 mg/l	11292	15,5	53,6	49,4	120
Ni (Nickel) - 0,1 μg/l	0,28	0,26	0,58	0,23	0,27
PO4 (OrthoPhosphates en PO4) - 0,05 mg/l	< LQ	0,19	0,19	0,17	< LQ
Pb (Plomb) - 0,05 μg/l	0,05	0,46	0,21	0,06	< LQ
SO4 (Sulfates) - 0,5 mg/l	3010,1	8,9	30,4	17,3	30,3
SiO2 (Silice) - 0,5 mg/l	< LQ	10,4	4,8	2,9	8,5
Sr (Strontium) - 0,1 µg/l	7474	1430	1586	1454	1655
Zn (Zinc) - 0,5 μg/l	0,6	7,26	7,47	< LQ	1,95
lsotope 87Sr / 86Sr	NR	NR	NR	NR	NR



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

BRGM Polynésie Immeuble Le Bihan, local L1, Pirae BP 141 227 98701 – Arue – Tahiti Tél. : 87 33 56 50