

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





Polynésie Française



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

Rapport final

BRGM/RP-69099-FR

Juillet 2019

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

Corbier P., Pasquier S., Bourdon E., François B., Pinson S., Dewandel B., Gourcy L. et Malcuit E.

Vérificateur :	Approbateur :
Nom : C. Auterives	Nom : JM Mompelat
Fonction : Hydrogéologue	Fonction : Directeur Adjoint DAT
Date : 01/08/2019	Date : 30/08/2019
Signature : Wullbar	Signature :
Dues.	

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>qualite@brgm.fr</u>



Mots-clés : Bilan, Géologie, Géophysique, Hydrochimie, Hydrogéologie, Hydrodynamique, Pompages d'essai, Polynésie française, Sources, Tahiti

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

Corbier P., Pasquier S., Bourdon E., François B., Pinson S., Dewandel B., Gourcy L. 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 Tahiti. Rapport final. BRGM/RP-69099-FR, 230 p., 157 ill., 6 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 initialement 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, 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.

Sur l'île de Tahiti, des investigations géologiques, hydrogéologiques, géophysiques et hydrogéochimiques ont été mises en œuvre pour mieux cerner le potentiel aquifère des formations volcaniques des bassins versants de la Papenoo et de la Punaruu et identifier l'origine des plus grosses sources littorales de Tahiti. Ces opérations se sont déroulées entre février 2018 et mars 2019.

Le bassin versant de la Papenoo fournit une grande partie de l'hydroélectricité produite sur l'île de Tahiti et pourrait à court terme faire l'objet de nouveaux aménagements récréatifs qui nécessiteront de disposer de ressources de qualité. La commune de Papenoo a également réservé, dans la partie médiane de la vallée, une zone qui pourrait être destinée au captage de nouvelles ressources en eau potable. La commune de Punaauia projette, quant à elle, d'étendre la zone industrielle de la Punaruu vers l'amont de la vallée et devra dans ce cas disposer de nouvelles ressources pour son alimentation.

Les éléments recueillis au travers des différentes approches ont permis d'élaborer des schémas hydrogéologiques conceptuels qui précisent l'agencement des formations géologiques et les éléments du bilan hydrologique. Ils permettent également d'illustrer les modalités d'écoulement supposées et de tenir compte d'éléments qualitatifs.

Dans la haute vallée de la Papenoo, la zone andésitique recoupée par de nombreux filons semble correspondre à la zone la plus favorable pour la recherche nouvelles ressources en eau mais cette zone présente un risque de fond hydrogéochimique élevé (conductivité, pH, fer, manganèse et nickel) et les nombreux filons présents dans la zone pourraient contribuer à compartimenter l'aquifère. Le toit des andésites saines pourrait être intercepté à une profondeur comprise entre 30 et 65 m.

Dans le cas où le Pays souhaiterait passer à une phase de recherche opérationnelle, le BRGM recommande d'implanter le forage dans la zone andésitique mais à distance du culot magmatique.

Dans secteur de la Vaiputoa (moyenne vallée), la présence de coulées de débris à faible profondeur rend la présence de ressources en eau souterraine profondes peu probable. Dans ces conditions, l'aquifère alluvial dont l'épaisseur atteint 10 à 15 m peut représenter une cible pour la recherche de nouvelles ressources mais sa vulnérabilité sera importante en raison de son caractère superficiel.

Dans le cas où le Pays souhaiterait également passer à une phase de recherche opérationnelle dans ce secteur, le BRGM recommande de réaliser le forage en rive droite de la rivière où les alluvions semblent un peu plus épaisses et de ne pas dépasser la profondeur de 20 à 25 m.

Dans la vallée de la Punaruu, les formations basaltiques saines du bouclier représentent la cible la plus intéressante. En amont de la zone industrielle, le toit de cette formation a pu être reconnu entre 60 et 100 m. Dans ces conditions, la création d'un ouvrage destiné à alimenter l'extension de la zone industrielle pourrait être envisagée. À noter toutefois que la réalisation d'un tel ouvrage pourrait impacter la productivité des forages F2 et F3 de la Brasserie de Tahiti. Les prélèvements prévisionnels devront être comparés au volume annuel infiltré sur le bassin versant (estimé à 11 M m³).

Sur le plan de la qualité, à l'exception de la zone andésitique située dans la haute vallée de la Papenoo, il n'existe pas d'autre zone à risque de fond hydrogéochimique élevé au droit des 2 bassins versants étudiés, ce qui valide l'hypothèse d'une bonne qualité chimique générale (pour les paramètres analysés) des eaux superficielles et souterraines sur l'île de Tahiti.

Le faible nombre de stations de mesures et de prélèvements, l'impossibilité d'associer des cumuls pluviométriques fiables à certains prélèvements ainsi que le net effet de masse (appauvrissement isotopique plus marqué des précipitations les plus abondantes) ont rendu le calcul d'un gradient d'altitude moyen impossible. Des hypothèses concernant la circulation des eaux ont néanmoins pu être avancées.

Dans la Papenoo, les teneurs isotopiques observées suggèrent une participation croissante des eaux souterraines de l'amont vers l'aval. Dans la Punaruu, les teneurs isotopiques suggèrent une infiltration de l'eau à haute altitude, un temps de transfert assez important pour permettre une homogénéisation du signal et une contribution importante des eaux souterraines au débit de la rivière.

La signature isotopique des forages de la Fautaua et des sources de la Reine (Papeete) et de Vaitupa (Faa'a) s'est avérée proche de celle des points d'eau prélevés dans la Punaruu. Une contribution d'eaux infiltrées à plus basse altitude et de plus en plus importante de l'amont vers l'aval est toutefois soupçonnée dans la Fautaua. Les autres sources littorales ont présenté soit des teneurs isotopiques proches de celles observées dans la Papenoo (cas des grottes de Maraa et de la source Vaima), soit des teneurs intermédiaires (source Ahavini à Mahina).

Le recours aux CFC et du SF₆ a permis de calculer quelques temps moyens de résidence (TMR) sur la base d'un modèle de type exponentiel mais la technique s'est avérée inutilisable dans la vallée de la Punaruu en raison de phénomènes de contamination anthropique.

Au-delà de ces résultats, il apparaît que l'approche pluridisciplinaire mise en œuvre s'est avérée adaptée pour juger de la pertinence de réaliser des forages dans les secteurs d'intérêt préalablement identifiés et préciser certains mécanismes hydrogéologiques.

Elle a par contre montré des limites en ce qui concerne la détermination de l'origine géographique et de l'âge des eaux prélevées. Compte tenu de ces observations, il est recommandé que le suivi isotopique des pluies puisse être mené sur au moins 2 cycles hydrologiques à partir de dispositifs permettant de récupérer l'ensemble des précipitations si de nouveaux bassins versants devaient faire l'objet d'une approche similaire. Le recours à des méthodes de datation complémentaires ainsi que l'instrumentation de 1 à 2 forages en vue d'un suivi des niveaux piézométriques et de paramètres physiques tels que la température et la conductivité pourraient également constituer une amélioration méthodologique.

Sommaire

1. Introduction	13
2. Généralités sur l'île de Tahiti	15
2.1. GÉOGRAPHIE	15
2.2. CLIMATOLOGIE	16
2.3. HYDROLOGIE	17
2.4. GÉOLOGIE 2.4.1.Formation et caractéristiques de l'archipel de la Société 2.4.2.L'île de Tahiti	19 19 20
 2.5. HYDROGÉOLOGIE 2.5.1. Données bibliographiques 2.5.2. Inventaire mené en 2011-2012 2.5.3. Indice de Persistance et de Développement des Réseaux 2.5.4. Qualité de l'eau 	25 25 28 29 35
2.6. SYNTHÈSE	38
3. Bassin versant de la Papenoo	39
 3.1. APPROCHE GÉOLOGIQUE 3.1.1. Données issues de la bibliographie	41 41 46 50
 3.2. APPROCHE HYDROGÉOLOGIQUE 3.2.1. Données issues de la bibliographie 3.2.2. Reconnaissances de terrain 3.2.3. Éléments de bilan 	51 51 52 57
 3.3. APPROCHE GÉOPHYSIQUE 3.3.1. Sondages électriques 3.3.2. Sondages réalisés dans la Papenoo	63 63 66 72
4. Bassin versant de la Punaruu	75
4.1. APPROCHE GÉOLOGIQUE 4.1.1. Données issues de la bibliographique 4.1.2. Reconnaissances de terrain 4.1.3. Synthèse géologique	76 76 77 78

4.2. APPROCHE HYDROGÉOLOGIQUE	79
4.2.1. Données issues de la bibliographie	79
4.2.2. Reconnaissances de terrain	84
4.2.3. Eléments de bilan	
4.2.4. Réinterprétation de pompages d'essai	92
4.3. APPROCHE GÉOPHYSIQUE	
4.3.1. Implantation des profils	107
4.3.2. Résultats obtenus	108
4.3.3. Synthèse	109
5. Approche hydrogéochimique	111
5.1. PRÉAMBULE	111
5.2. PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES MESURES IN SITU	113
5.3. ÉLÉMENTS MAJEURS, MINEURS ET TRACES	117
5.3.1. Vérification des balances ioniques	
5.3.2. Conductivité électrique in situ et éléments dissous totaux	117
5.3.3. Faciès hydrochimiques des eaux	118
5.3.4. Fond hydrogéochimique et normes de potabilité	120
5.3.5. Diagrammes binaires	123
5.4. ANALYSES ISOTOPIQUES	127
5.4.1.Rappels	127
5.4.2. Définition de la droite météorique locale	128
5.4.3. Évolution spatio-temporelle des teneurs isotopiques dans les pluies	131
5.4.4.Zoom sur Tahiti	133
5.5. ESTIMATION DES TEMPS MOYENS DE TRANSFERT DES EAUX	
SOUTERRAINES.	135
5.5.1. Preambule	135
5.5.2. Methode de prelevement	137
5.5.3. Estimation des temps moyens de transfert	138
5.5.4.200m sur Tahiu	139
5.6. SYNTHESE	140
6. Modèles conceptuels	143
7. Conclusion	147
8. Bibliographie	149

Liste des illustrations

Illustration 1 :	Localisation de Tahiti dans l'archipel de la Société (Maury et Le Dez, 2000)15
Illustration 2 :	Températures et précipitations mensuelles moyennes à la station météorologique de Faa'a sur la période 1981-2010 (Données Météo-France)16
Illustration 3 :	Stations pluviométriques et isohyètes de Tahiti-Nui (Orstom, 1993 modifié)17
Illustration 4 :	Informations sur les débits de quelques rivières de Tahiti (ORSTOM, 1993)18
Illustration 5 :	Réseau limnimétrique du GEGDP et principaux bassins versants de l'île de Tahiti18
Illustration 6 :	Carte de la bathymétrie et de l'âge des îles de la Société (Clouard et Bonneville, 2004).20
Illustration 7 :	Carte géologique de l'île de Tahiti (Deneufbourd, 1965)22
Illustration 8 :	Description schématique de l'évolution volcanique de l'île de Tahiti (Hildenbrand et al., 2004)
Illustration 9 :	Carte géologique synthétique et coupe montrant les principales unités volcano- structurales (Hildenbrand et al., 2004)24
Illustration 10 :	Schéma hydrogéologique de l'île de Tahiti (SAFEGE, 1988)27
Illustration 11 :	Schématisation du modèle hawaiien (Join et al, 2005)27
Illustration 12 :	Forages et sources inventoriés par le BRGM en 2012 (Ozog et Vernoux, 2012)28
Illustration 13 :	Réseau hyrographique naturel, réseau de talwegs calculés et IDPR correspondant29
Illustration 14 :	Modèle numérique de terrain de Tahiti au pas de 5 m
Illustration 15 :	Réseau de talwegs calculé
Illustration 16 :	Exemples de modifications appliquées à la couche SIG du réseau hydrographique naturel
Illustration 17 :	Réseau hydrographique modifié utilisé pour le calcul de l'IDPR32
Illustration 18 :	IDPR pour l'île de Tahiti et grille de lecture
Illustration 19 :	Agrégation de l'IDPR aux contours de la carte géologique de Tahiti au 1/40 00034
Illustration 20 :	Agrégation de l'IDPR aux unités fonctionnelles
Illustration 21 :	Conductivités mesurées en août 2017 sur les ouvrages du réseau qualité (Abou Akar et al., 2019)
Illustration 22 :	Paramètres physico-chimiques mesurés in-situ et au laboratoire sur les ouvrages du réseau qualité (Abou Akar et al., 2019)35
Illustration 23 :	Teneurs en nitrates dans les ouvrages du réseau qualité (Abou Akar et al., 2019)36
Illustration 24 :	Pesticides présents dans les ouvrages du réseau qualité (Abou Akar et al., 2019)37
Illustration 25 :	Métaux présents dans les ouvrages du réseau qualité (Abou Akar et al., 2019)37
Illustration 26 :	Localisation du bassin versant de la Papenoo et des zones d'intérêts
Illustration 27 :	Photo du barrage Tahinu, sur la rivière Vaituoru40
Illustration 28 :	Carte géologique du bassin versant de la Papenoo (Deneufbourg, 1965)42
Illustration 29 :	Représentation schématique des différentes phases de creusement-remblaiement de la vallée de la Papenoo (Becker et al., 1974)43
Illustration 30 :	Croquis géologique du massif d'Ahititera au sein de la caldeira de Tahiti-Nui (Bonin et Bardintzeff, 1989) et diagramme de Streckeisen44
Illustration 31 :	Coupe interprétée le long d'un transect WSW-ENE (Bardintzeff et al., 1988)44

Illustration 32 :	Ages des diverses formations d'après Hildenbrand et al. (2004)	45
Illustration 33 :	Points d'intérêt identifiés dans le secteur aval de la Vaiputoa	47
Illustration 34 :	Points d'intérêt identifiés dans la haute vallée de la Papenoo	47
Illustration 35 :	Falaises constituées de laves basaltiques prismées à l'entrée de la vallée de la Vaiputoa	48
Illustration 36 :	Lithologies rencontrées dans le secteur de la Maroto (à gauche = andésite; au centre = Ignimbrite; à droite = Injection de sills et dykes successifs)	49
Illustration 37 :	Coupe schématique au débouché de la Vaiputoa	50
Illustration 38 :	Coupe schématique de la haute vallée	51
Illustration 39 :	Localisation et nature des sites étudiés dans le secteur de la Vaiputoa	53
Illustration 40 :	Localisation et nature des sites étudiés dans la haute vallée de la Papenoo	53
Illustration 41 :	Conductivités mesurées dans le secteur de la Vaiputoa	54
Illustration 42 :	Conductivités mesurées dans le secteur de la haute vallée	54
Illustration 43 :	pH mesurés dans le secteur de la Vaiputoa	55
Illustration 44 :	pH mesurés dans le secteur de la haute vallée	55
Illustration 45 :	Venues d'eau observées lors des reconnaissances de terrain, à gauche : source provenant d'une fracture dans la Vaiputoa, à droite : source située au pied du barrage Tahinu	56
Illustration 46 :	Venue d'eau sur les flancs de l'Aramaoro	57
Illustration 47 :	Localisation des stations pluviométriques au droit du bassin versant de la Papenoo	58
Illustration 48 :	Cumuls mensuels moyens sur différentes stations pluviométriques du bassin versant d la Papenoo	e 59
Illustration 49 :	Débits caractéristiques de la vallée de la Papenoo pour la période 1971-1986 (ORSTOM, 1993)	59
Illustration 50 :	Chroniques des hauteurs d'eau et des débits de la station Papenoo L3	60
Illustration 51 :	Pluies efficaces mensuelles moyennes calculées au moyen de la formule de Thornwaithe en fonction de différentes RFU (période 2010-2017)	61
Illustration 52 :	Evolution de la pluviométrie sur P2 et P9 et du débit sur L3 en juin/juillet 2014	61
Illustration 53 :	Pluies efficaces moyennes mensuelles calculées sur la période 2010-2017	62
Illustration 54 :	Variation du débit lors de l'épisode pluvieux du 27/06/2014	63
Illustration 55 :	Principe de la mesure en courant électrique continu (Bretaudeau et al., 2016)	64
Illustration 56 :	Géométrie du dispositif de mesure (Bretaudeau et al., 2016)	64
Illustration 57:	Configuration dipôle-dipôle	65
Illustration 58 :	Configuration Wenner-Schlumberger	65
Illustration 59 :	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)	66
Illustration 60 :	Mise en place des flûtes et des électrodes (en haut), profil topographique et dispositif SISCAL (en bas)	67
Illustration 61 :	Implantation des sondages géophysiques dans la vallée de la Papenoo	68
Illustration 62 :	Implantation du profil PAP1	69
Illustration 63 :	Coupe de résistivité vraie obtenue au droit du profil PAP1	70

Illustration 64 :	Implantation des profils PAP2 et PAP3	.70
Illustration 65 :	Coupe de résistivité vraie obtenue au droit du profil PAP2	.71
Illustration 66 :	Coupe de résistivité vraie obtenue au droit du profil PAP3	.72
Illustration 67 :	Localisation du bassin versant de la Punaruu sur l'île de Tahiti	.75
Illustration 68 :	Géologie du bassin versant de la Punaruu d'après Deneufbourg (1965)	.76
Illustration 69 :	Unités volcano-structurales d'après Hildenbrand et al. (2004)	.76
Illustration 70 :	Localisation et lithologie des points d'intérêt identifiés dans la vallée de la Punaruu	.77
Illustration 71 :	Exemples de lithologies rencontrées sur le terrain. Gauche = empilement de coulées de laves scoriacées; Milieu = coulée de débris de plusieurs dizaines de mètres de haut ; Droite = dyke recoupant les laves scoriacées	.78
Illustration 72 :	Coupe schématique de la vallée de la Punaruu	.79
Illustration 73 :	Localisation des forages présents dans la vallée de la Punaruu	79
Illustration 74 :	Informations sur les forages de la Punaruu	.80
Illustration 75 :	Coupe interprétative établie à partie des informations disponibles sur les forages de la Brasserie de Tahiti, d'EDT et de Tahiti Agrégats (les valeurs mentionnées en brun et en bleu correspondent respectivement aux profondeurs des formations géologiques et des niveaux aquifères exprimées en mètres)	.80
Illustration 76 :	Schéma hydrogéologique de la basse vallée de la Punaruu (Aureau, 2014)	.82
Illustration 77 :	Suivi des niveaux piézométriques sur plusieurs forages de la vallée de la Punaruu entre octobre et décembre 2011(Aureau, 2014)	.83
Illustration 78 :	Estimation de l'étendue de la couche argileuse séparant les nappes NAI et NISC (Aureau, 2014)	.83
Illustration 79 :	Vue de la Punaruu (vers l'amont) à la limite entre la haute et la moyenne vallée	.84
Illustration 80 :	Points d'intérêt inventoriés sur le bassin versant de la Punaruu	.85
Illustration 81 :	Conductivités mesurées dans la Punaruu	.85
Illustration 82 :	Valeurs de pH mesurées dans la Punaruu	.85
Illustration 83 :	Localisation des stations pluviométriques et limnimétrique au droit du bassin versant de la Punaruu	.87
Illustration 84 :	Cumuls mensuels moyens sur différentes stations pluviométriques du bassin versant de la Punaruu	.87
Illustration 85 :	Hauteurs d'eau et débits journaliers à la station Punaruu L2 depuis 1988	.88
Illustration 86 :	Débits moyens mensuels de la Punaruu à la station L2 pour la période 2012, 2014- 2018	.88
Illustration 87 :	Débits caractéristiques de la vallée de la Punaruu pour la période 1973-1983 (ORSTOM, 1993)	.88
Illustration 88 :	Analyse de sensibilité de la pluie efficace (= recharge) à la RFU max, calculée au moyen de la formule de Thornwaithe	.89
Illustration 89 :	Évolution de la pluviométrie sur P0 et du débit sur L2 sur la période juillet/août 2016	.90
Illustration 90 :	Pluies efficaces moyennes mensuelles calculées sur la période 2014-2017	.90
Illustration 91 :	Variation du débit de la Punaruu entre fin octobre et début novembre 2016	.91
Illustration 92 :	Localisation des forages ayant fait l'objet d'une réinterprétation	.92
Illustration 93 :	Méthodologie mise en œuvre pour réinterpréter les pompages d'essai (méthode des dérivées) et exemple de succession de régimes d'écoulement lors d'un pompage dans	S

	un aquifère rectangulaire clos (t _D : temps adimensionnel, s _D (courbe pleine) et s _D ' (courbe tiretée) : rabattement et dérivée du rabattement (adimensionnel))	1
Illustration 94 :	Modélisation de l'essai par paliers réalisé en septembre 2006 sur l'ouvrage FOR_V049	3
Illustration 95 :	Modélisation de l'essai longue durée réalisé en septembre 2006 sur l'ouvrage FOR_V049	3
Illustration 96 :	Schéma du modèle utilisé pour la détermination des paramètres hydrodynamiques de l'ouvrage FOR_V049 (dans ce cas, α =90°)97	7
Illustration 97 :	Paramètres caractérisant l'aquifère obtenus après réinterprétation des essais de pompage	7
Illustration 98 :	Modélisation de l'essai longue durée réalisé sur le forage EDT F2 en juillet 2006 98	3
Illustration 99 :	Schéma du modèle utilisé pour la détermination des paramètres hydrodynamiques 99	9
Illustration 100	Paramètres caractérisant l'aquifère obtenus après modélisation et réinterprétation des essais de pompage au puits EDT F2 et au piézomètre EDT F1	9
Illustration 101	: Géométrie de l'aquifère capté par le forage FOR_V047 (EDT F2) ; ObsWell_IN représente le forage EDT F1	9
Illustration 102	Schéma récapitulatif du sous-sol de la Brasserie de Tahiti)
Illustration 103	Représentation des courbes de rabattement et de leurs dérivées relatives aux essais de pompages menés dans les forages F1, F2 et F3 de la Brasserie de Tahiti 107	1
Illustration 104	Modélisation de l'essai longue durée réalisé sur le forage Brasserie F1	2
Illustration 105	Schéma du modèle utilisé pour la réinterprétation102	2
Illustration 106	Paramètres obtenus après réinterprétation de l'essai de pompage mené sur le forage Brasserie F1 en 2003102	2
Illustration 107	Modélisation de l'essai longue durée réalisé sur le forage Brasserie F2 103	3
Illustration 108	Schéma du modèle utilisé pour la réinterprétation103	3
Illustration 109	Paramètres obtenus après réinterprétation de l'essai de pompage mené sur le forage Brasserie F2 en 2003103	3
Illustration 110	Modélisation de l'essai longue durée réalisé sur le forage Brasserie F3 104	1
Illustration 111	Schéma du modèle utilisé pour la réinterprétation104	1
Illustration 112	Paramètres obtenus après réinterprétation de l'essai de pompage mené sur le forage Brasserie F3 en 2003104	1
Illustration 113	Paramètres obtenus après modélisation et réinterprétation des essais de pompage sur le site de la Brasserie de Tahiti105	5
Illustration 114	: Valeurs de transmissivité et de coefficient d'emmagasinement issues de la réinterprétation des pompages d'essai dans la vallée de la Punaruu	3
Illustration 115	Implantation des profils PUP1 et PUP 2 dans la vallée de la Punaruu 107	7
Illustration 116	Implantation des investigations géophysiques dans la vallée de la Punaruu	7
Illustration 117	Coupe de résistivité vraie obtenue en résultat d'inversion de la tomographie du profil PUP1 avec la combinaison des dispositifs Wenner-Schlumberger réciproque et dipôle-dipôle	3
Illustration 118	Coupe de résistivité vraie obtenue en résultat d'inversion de la tomographie du profil PUP2 avec le dispositif Wenner-Schlumberger réciproque	9
Illustration 119	Localisation des points d'eau prélevés à Tahiti112	2
Illustration 120	Répartition des rélèvements effectués à Tahiti112	2

Illustration 121 :	Répartition des valeurs de conductivité mesurées in-situ lors des prélèvements effectués à Tahiti	113
Illustration 122 :	Répartition des valeurs de pH mesurées in-situ lors des prélèvements effectués à Tahiti	114
Illustration 123 :	Répartition des valeurs d'oxygène dissous mesurées in-situ lors des prélèvements effectués à Tahiti	114
Illustration 124 :	Répartition des valeurs de conductivité dans la Papenoo (juillet 2018)	115
Illustration 125 :	Répartition des valeurs de pH et des teneurs en oxygène dissous dans la Papenoo (juillet 2018)	115
Illustration 126 :	Conductivités mesurées in situ lors des prélèvements dans la Punaruu (juillet 2018)	116
Illustration 127 :	Valeurs de pH mesurées in situ lors des prélèvements dans la Punaruu (juillet 2018).	116
Illustration 128 :	Teneurs en d'oxygène dissous mesurées in situ lors des prélèvements dans la Punaruu (juillet 2018)	117
Illustration 129 :	TDS (g/l) vs Conductivité pour l'ensemble des échantillons d'eau prélevés à Tahiti en juillet 2018	118
Illustration 130 :	Diagramme de Piper repésentant l'ensemble des prélèvements effectués à Tahiti en juillet 2018	119
Illustration 131 :	Faciès hydrochimique des points d'eau prélévés à Tahiti en juillet 2018	119
Illustration 132 :	Analyse statistique descriptive des concentrations en éléments majeurs pour les eaux souterraines (ESO) et les eaux superficielles (ESU) prélevées en juillet 2018 à Tahithi	121
Illustration 133 :	Analyse statistique descriptive des concentrations en éléments traces pour les eaux souterraines (ESO) et les eaux superficielles (ESU) prélevées en juillet 2018 à Tahithi	122
Illustration 134 :	Diagramme CI vs Na (mmol/I) repésentant l'ensemble des prélèvements effectués à Tahiti en juillet 2018	123
Illustration 135 :	Diagramme B vs SO ₄ (mmol/l) représentant l'ensemble des prélèvements effectués à Tahiti en juillet 2018	124
Illustration 136 :	Diagramme Ca vs HCO ₃ (mmol/l) représentant l'ensemble des prélèvements effectués à Tahiti en juillet 2018	125
Illustration 137 :	Diagramme Ca + Mg vs HCO ₃ (mmol/l) représentant l'ensemble des prélèvements effectués à Tahiti en juillet 2018	125
Illustration 138 :	Diagramme Na + K vs SiO ₂ (mmol/l) représentant l'ensemble des prélèvements effectués à Tahiti en juillet 2018	126
Illustration 139 :	Diagramme de TAS (Total Alkalis-Silica) établi pour les roches volcaniques et plutoniques de Tahiti (Hildenbrand et Guillot, 2004)	126
Illustration 140 :	Fractionnement isotopique au cours du cycle de l'eau et variations de $\delta^2 H$ et $\delta^{18}O$	127
Illustration 141 :	Informations sur les stations de prélèvement des pluies et les modalités d'échantillonnage	128
Illustration 142 :	Diagramme $\delta^2 H$ vs $\delta^{18} O$ pour les précipitations collectées au droit des 4 îles	129
Illustration 143 :	Diagramme $\delta^2 H$ vs $\delta^{18} O$ pour les eaux de surface et les eaux souterraines prélevées au droit des 4 îles	129
Illustration 144 :	Diagramme δ^2 H vs δ^{18} O établi pour l'ensemble des prélèvements effectués au droit des 4 îles et droites de référence	130

Illustration 145 : Relation entre le deutérium et la hauteur totale des pluies collectées sur les 10 collecteurs	131
Illustration 146 : Relation entre l'altitude de la station de mesure et le δ^{18} O pour les 8 collecteurs de pluie	132
Illustration 147 : Gradients d'altitude calculés sur le bassin versant de la Papenoo	132
Illustration 148 : Relation δ²H-δ¹ ⁸ O pour les prélèvements d'eaux de surface et d'eaux souterraines réalisés à Tahiti	133
Illustration 149 : Diagramme δ ² H vs δ ¹⁸ O pour les pluies, les eaux de surface et les eaux souterraines du bassin versant de la Papenoo	134
Illustration 150 : δ^2 H vs δ^{18} O pour les eaux du bassin versant de la Punaruu	135
Illustration 151 : Méthodes de datation basées sur les traceurs radioactifs et gazeux (Newmann et al., 2010)	135
Illustration 152 : Chroniques des concentrations dans l'air des CFC et SF6 (Tituila, Samoa)	136
Illustration 153 : Système de prélèvement utilisé en vue du dosage des CFC et SF6	137
Illustration 154 : Modèles d'écoulement type piston, exponentiel et mélange binaire	138
Illustration 155 : CFC-113 vs CFC-11 et SF ₆ vs CFC-12 (en pptv) pour les échantillons d'eau collectés à Tahiti et modèles théoriques (pointillés = mélange binaire ; trait rouge = modèle exponentiel, trait bleu = modèle piston)	139
Illustration 156 : Modèle conceptuel hydrogéologique défini pour le bassin versant de la Papenoo	143
Illustration 157 : Modèle conceptuel hydrogéologique défini pour le bassin versant de la Punaruu	145

Liste des annexes

Annexe 1 - Données des reconnaissances géologiques	155
Annexe 2 - Coupes techniques et géologiques des forages	161
Annexe 3 - Données des reconnaissances hydrogéologiques	175
Annexe 4 - Données relatives aux essais de pompage menés sur les forages de la Punaruu	179
Annexe 5 - Fiches des points de prélèvement	187
Annexe 6 - Résultats des analyses chimiques	217

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 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 4 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 (Corbier et Pasquier, 2018), le comité de suivi du projet a retenu les îles de Moorea, Ua Pou et Rangiroa pour faire l'objet d'études détaillées. Ces dernières ont en effet été jugées représentatives d'une île haute, d'une île mixte et d'un atoll. Conformément à la convention MCE n°1366, 2 bassins versants de Tahiti (Papenoo et Punaruu) ont également fait l'objet d'études détaillées.

Ces bassins versants, avec ceux de la Fautaua et de la Taharuu, concentrent d'importants enjeux pour le développement de l'île et seront dotés à court terme d'un schéma directeur de rivières.

Le bassin versant de la Papenoo fournit en effet une grande partie de l'hydroélectricité produite sur l'île de Tahiti et pourrait à court terme faire l'objet de nouveaux aménagements récréatifs qui nécessiteront de disposer de ressources de qualité. La commune de Papenoo a également réservé, dans la partie médiane de la vallée, une zone qui pourrait être destinée au captage de nouvelles ressources en eau potable.

La commune de Punaauia projette, quant à elle, d'étendre la zone industrielle de la Punaruu vers l'amont de la vallée et souhaite connaître le potentiel aquifère des formations au droit de cette zone.

Après une présentation de l'île de Tahiti (chapitre 2), le rapport fait état des résultats des investigations géologiques, hydrogéologiques et géophysiques réalisées sur le bassin versant de la Papenoo (chapitre 3) et sur celui de la Punaruu (chapitre 4). Le chapitre 5 est, quant à lui, consacré aux résultats des investigations hydrogéochimiques réalisées sur les 2 bassins versants étudiés de même que sur des points d'eau se situant en dehors de ces entités. Le rapport se termine par un chapitre relatif aux modèles hydrogéologiques conceptuels définis (chapitre 6) et par une conclusion (chapitre 7).

2. Généralités sur l'île de Tahiti

2.1. GÉOGRAPHIE

L'île de Tahiti (17,3° S – 149,3° W) appartient au groupe des îles du Vent dans l'archipel de la Société (Illustration 1). Avec une superficie de 1 042 km², elle correspond à la plus grande île de la Polynésie française et représente près du quart des surfaces émergées du territoire (4 167 km²).

L'île est formée par la juxtaposition de deux systèmes volcaniques à géométrie sphérique de 30 et 15 km de diamètre. Elle est fortement entaillée par un réseau de vallées rayonnantes qui se caractérisent par de hautes crêtes abruptes mais localement, ses pentes externes originelles peuvent être conservées sous forme de planèzes (plateaux volcaniques faiblement pentés).

L'île principale de Tahiti Nui culmine à 2 241 m au Mont Orohena et celle de Tahiti Iti (également appelée presqu'île) à 1 330 m au mont Ronui.

L'ensemble concentre plus des deux tiers des habitants de la Polynésie française avec près de 190 000 habitants répartis dans 12 communes. La grande majorité de la population vit sur la frange littorale, plus particulièrement dans la zone urbaine située au nord-ouest de l'île entre Punaauia et Mahina. L'intérieur des terres est, quant à lui, quasi-inoccupé, à l'exception des planèzes situées dans la zone urbaine.



Illustration 1 : Localisation de Tahiti dans l'archipel de la Société (Maury et Le Dez, 2000).

2.2. CLIMATOLOGIE

L'île de Tahiti se caractérise par un climat de type tropical océanique humide dominé par les alizés de nord-est et deux saisons bien distinctes : la saison sèche, de mai à octobre (hiver austral) et la saison humide, de novembre à avril (été austral) (Illustration 2).

Il existe également une forte disparité pluviométrique entre la côte est de l'île, plus humide, qui est exposée aux alizés et la côte ouest, plus sèche, située sous le vent. La pluviométrie annuelle observée sur la commune de Papenoo (3 550 mm) est en effet plus de 2 fois plus élevée que celle observée à Faa'a (1 700 mm). Les précipitations augmentent enfin avec l'altitude avec des cumuls annuels estimés à plus de 8 500 mm sur les sommets de l'île (Illustration 3).

À Faa'a, la température moyenne annuelle est de 26,7 °C. On observe également de faibles écarts (moins de 3°C) entre les saisons.



	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Température (°C)	27,6	27,7	27,9	27,7	26,8	25,9	25,3	25,2	25,7	26,2	26,8	27,2
Précipitations (mm)	253,7	209,9	195,2	111,4	117,4	72,7	62,9	52,1	58,8	101,5	125,4	327,7

Illustration 2 : Températures et précipitations mensuelles moyennes à la station météorologique de Faa'a sur la période 1981-2010 (Données Météo-France) ;



Illustration 3 : Stations pluviométriques et isohyètes de Tahiti-Nui (Orstom, 1993 modifié).

2.3. HYDROLOGIE

L'île de Tahiti se caractérise par un réseau hydrographique principal composé de 72 cours d'eau, dont 46 se situent sur Tahiti-Nui et 26 sur Tahiti-Iti. Les bassins versants associés sont de tailles variées. Neuf présentent une superficie de plus de 20 km² et le plus vaste correspond à celui de la Papenoo avec 90 km².

D'un point de vue morphologique, les rivières de Tahiti peuvent être classées en trois groupes (ORSTOM, 1993) :

- les rivières drainant les parties centrales de Tahiti-Nui et de Tahiti-Iti, la Papenoo et la Vaitepiha, qui se caractérisent par un important réseau d'affluents convergeant radialement,
- les rivières dont l'origine se trouve sur les rebords externes de la caldeira. Elles forment des vallées étroites avec des versants très raides. On peut citer la Tuauru, la Taharuu, la Punaruu ou la Vaiiha,
- les rivières entaillant les planèzes qui sont allongées et extrêmement rectilignes. La Mahateaho, entaillant la planèze d'Hitiaa et l'Aoma sur le plateau de Taravao en sont deux exemples.

Les rivières de Tahiti se caractérisent par une très forte réactivité aux précipitations en raison de l'important ruissellement lors des épisodes pluvieux. Ce dernier est fonction, d'une part, de l'intensité des précipitations et, d'autre part, de la pente (Petit, 1969). Le climat tropical humide décrit plus haut se caractérise par des épisodes pluviométriques intenses et les pentes peuvent être extrêmement importantes. Il en résulte donc une grande variabilité saisonnière des débits. Le rapport entre les débits de crue et d'étiage peut notamment être supérieur à 250 (Illustration 4).

Les rivières de la côte est, en raison de leur exposition aux vents dominants, présentent des écoulements plus importants que les rivières de la côte ouest. Le débit spécifique moyen des premières est supérieur à 150 l/s/km² (Papenoo, Vaitepiha, Vaiiha) alors que celui des secondes peut être inférieur à 70 l/s/km² (Punaruu, Fautaua) (Illustration 4).

Il apparaît donc que les 2 bassins versants retenus présentent des régimes hydrologiques contrastés. Dans la mesure du possible, la part de ces écoulements de même que celle de l'infiltration profonde devront être évaluées à partir des données disponibles.

À noter que le suivi actuel des cours d'eau est opéré par le GEGDP (Groupement d'Études pour la Gestion du Domaine Public) et se base sur 15 stations limnimétriques réparties sur l'ensemble de l'île (Illustration 5).

Rivière	Débit moyen (m3/s)	Débit spécifique moyen (l/s/km²)	Débit de crue médian (m3/s)	Débit spécifique de crue médian (l/s/km²)	Plus fort débit connu (m3/s) (Cyclone 04/1983)	Débit d'étiage (m3/s)	Débit spécifique d'étiage (l/s/km²)
Vaiiha	6,31	206	258	8430	880	1,11	36,3
Vaitepiha	3,25	187	248	7430	676	1,05	31,3
Papenoo	11,7	147	467	5860	2170	1,99	25
Taharuu	3,02	115	149	5570	560	0,85	32,4
Tuauru	2,16	81	158	5960	283	0,36	13,6
Fautaua	1,34	67	116	5830	244	0,4	20,1
Punaruu	2,48	63	133	3390	383	0,47	11,9



Illustration 4 : Informations sur les débits de quelques rivières de Tahiti (ORSTOM, 1993).

Illustration 5 : Réseau limnimétrique du GEGDP et principaux bassins versants de l'île de Tahiti.

2.4. GÉOLOGIE

2.4.1. Formation et caractéristiques de l'archipel de la Société

L'archipel de la Société se situe entre 15 et 18° de latitude sud et 147 et 157° de longitude ouest. Il s'étend sur près de 750 km suivant une direction N 115°E, direction correspondant au déplacement de la plaque Pacifique. L'archipel repose sur un plancher océanique datant de 65 Ma au sud-est et de 90 Ma au nord-ouest qui se situe à une profondeur de l'ordre de 4 000 mètres.

L'archipel est constitué de quatorze îles, 9 îles hautes ou mixtes et 5 atolls qui se répartissent en 2 groupes : les îles du Vent au sud-est (Mehetia, Tahiti, Moorea, Maiao et l'atoll de Tetiaora) et les îles Sous le Vent au nord-ouest (Huahine, Raiatea, Taha'a, Bora Bora, Maupiti et les atolls de Tupai, Mopelia, Manuae et Motu One).

Les îles de la Société présentent les caractéristiques majeures d'une chaîne volcanique de point chaud. On trouve ainsi d'est en ouest :

- l'île de Mehetia qui correspond au point chaud proprement dit. Il s'agit d'une île qui culmine à 435 m d'altitude et qui correspond à la partie immergée d'un giganstesque édifice volcanique dont la base se trouve à 4 200 m de profondeur. La jeunesse du volcan est attestée par la faible érosion des pentes et du cratère, le fait que la végétation n'ait pas encore colonisé la totalité des pentes de l'île ainsi que par l'absence de récif corallien continu à sa périphérie. Les émissions de fumerolles, l'épanchement de laves fluides (laves en coussinet) en profondeur ainsi que les nombreux séismes de faible magnitude qui sont enregistrés constituent d'autres témoignages de l'activité de ce volcan,
- 3 édifices sous-marins majeurs entre Mehetia et Tahiti : le Te ahi ti'a dont le sommet se trouve à 1 600 m de profondeur, le Rocard dont le sommet se trouve à 2 000 m de profondeur et le Mou'a piha'a dont le sommet se trouve à 160 m de profondeur seulement,
- les deux volcans boucliers peu érodés de Tahiti culminant respectivement à 2 241 mètres (Mont Orohena, Tahiti-Nui) et 1 332 mètres (Mont Ronui, Tahiti-Iti). L'île est entourée d'un lagon et d'un récif barrière peu éloigné du rivage (1 km au maximum),
- les îles de Moorea, Huahine, Raiatea, Taha'a qui ont subi une forte érosion. La forme des volcans boucliers n'est que peu reconnaissable et la barrière récifale peut se trouver jusqu'à 2 km de la côte,
- les îles de Bora-Bora et de Maupiti qui correspondent à des édifices volcaniques résiduels entourés de vastes lagons (jusqu'à 3 km de largeur),
- des atolls culminant à quelques mètres au-dessus de l'océan et ne présentant plus de traces des édifices volcaniques sous-jacents (Mopelia, Manuae, Motu One).

L'âge des édifices volcaniques varie entre l'actuel pour Mehetia et 4,2 millions d'années pour Maupiti, ce qui permet de calculer un taux de migration de la plaque Pacifique de 110 km/Ma (Illustration 6).



Illustration 6 : Carte de la bathymétrie et de l'âge des îles de la Société (Clouard et Bonneville, 2004).

2.4.2. L'île de Tahiti

En 1965, Deneufbourg a établi la première carte géologique de Tahiti à l'échelle 1/40 000 (Illustration 7). Celle-ci fait notamment apparaître :

- l'unité volcanique principale en vert clair ;
- les formations volcaniques de remplissage des vallées en bleu ;
- le massif de roches grenues au cœur de l'île en rouge foncé ;
- les formations andésitiques en jaune ;
- les formations sédimentaires littorales et alluviales en orange.

L'auteur a interprété la présence de roches grenues et la morphologie des bassins amont de la Papenoo et de la Vaitepiha comme résultant d'effondrements caldeiriques centraux.

En 1993, Brousse a repris le concept de volcan bouclier effondré en identifiant 3 phases :

- le stade anté-caldeira (1,35 à 1 millions d'années) : mise en place de la structure volcanique de base (empilement de coulées de viscosité et d'épaisseur variables) selon 4 périodes d'activités :
 - o coulées massives porphyriques,
 - o coulées fluides,
 - o coulées différenciées,
 - o coulées peu épaisses de basaltes porphyriques ;
- le stade syn-caldeira (1 à 0,65 millions d'années) : effondrement et remplissage de la caldeira (coulées secondaires remontant le long des zones d'effondrement (failles) et formations de roches grenues);

- le stade post-caldeira (0,6 à 0,3 millions d'années) : érosion et coulées récentes (empilement de coulées de lave de vallée et de lahars).

Un nouveau modèle d'évolution de l'île de Tahiti introduisant une zone de rifting a été proposé dès 1993 (Gillot *et al.*, 1993 ; Le Roy *et al.*, 1993) puis amélioré par Hildenbrand *et al.* (2004). Il considère les stades d'évolution suivants (Illustration 8) :

- la construction d'un bouclier principal (dont les pentes externes sont conservées dans le NW, le NE, le SW et le SE de l'île) pendant une période de 0,5 millions d'années ;
- il y a environ 0,87 Ma, des intrusions le long d'une zone principale de rifting est-ouest provoquant d'énormes glissements de terrain sur les flancs nord et sud du bouclier et générant de grands dépôts de coulées de débris sur les pentes sous-marines ;
- une activité post-effondrement dans la partie nord de l'île avec la construction d'un second volcan bouclier ;
- il y a environ 500 000 ans des coulées ultérieures débordent de la dépression nord et recouvrent une partie des pentes préservées du bouclier principal ou comblent des vallées existantes jusqu'au remplissage total de la dépression sud ;
- la fin de la construction de Tahiti-Nui est marquée par une violente éruption ignimbritique, dans la partie supérieure du massif de l'Orohena ;
- après un hiatus de 250 000 ans, un remplissage tardif de lave volcanique.

L'examen de l'Illustration 9 montre que les zones devant faire l'objet d'études détaillées se trouvent dans des contextes géologiques différents : le bassin versant de la Punaruu sur le flanc ouest du bouclier d'origine et le bassin versant de la Papenoo, au droit du flanc nord effondré.

Dans la mesure du possible, il conviendra d'étudier si ces différences impactent la chimie de l'eau. En 2005, Hildenbrand *et al.* avaient notamment pu montrer des différences de signature isotopique entre les eaux issues du bouclier principal et celles issues des formations plus tardives.



Illustration 7 : Carte géologique de l'île de Tahiti (Deneufbourd, 1965).



Illustration 8 : Description schématique de l'évolution volcanique de l'île de Tahiti (Hildenbrand et al., 2004).



Illustration 9 : Carte géologique synthétique et coupe montrant les principales unités volcano-structurales (Hildenbrand et al., 2004).

2.5. HYDROGÉOLOGIE

2.5.1. Données bibliographiques

En Polynésie, les études hydrogéologiques à portée générale sont très peu nombreuses.

En 1969, Petit a réalisé la première étude hydrogéologique d'ampleur en Polynésie. Il a notamment mis en évidence 3 types de nappes exploitables (les nappes littorales ou basales, les nappes péri-alluviales et les nappes de dykes) et recensé de très nombreux points d'eau sur Tahiti.

En 1988, un travail mené par SAFEGE a quant à lui permis d'identifier 5 types d'aquifères sur le territoire. :

- les aquifères contenus dans les formations fluviatiles ;
- les aquifères contenus dans les formations littorales mixtes ;
- les aquifères perchés liés aux produits d'altération des formations basaltiques ;
- les aquifères perchés situés au sein de coulées basaltiques ;
- l'aquifère basal contenu dans les formations basaltiques.

> Aquifères contenus dans les formations fluviatiles

On retrouve ce type d'aquifère dans les grandes vallées de Tahiti (Papenoo, Fautaua, Punaruu...) et principalement en partie basse proche de l'embouchure des rivières.

Les alluvions peuvent présenter une épaisseur de plusieurs dizaines de mètres mais du fait de la présence de sédiments argileux ou encore de lahars, seuls certains niveaux présentent des propriétés hydrodynamiques intéressantes.

Selon SAFEGE, le cours d'eau est généralement perché par rapport à la nappe des alluvions fluviatiles. Celle-ci peut également présenter un caractère captif comme c'est le cas dans la vallée de la Punaruu.

L'aquifère alluvial (dont les dimensions sont très restreintes de par l'extension limitée des formations qui le constituent) est souvent en lien avec un ou plusieurs aquifères d'extension plus importante.

Aquifères contenus dans les formations littorales mixtes

Les formations littorales sont peu développées, voire inexistantes sur la côte est alors que sur la côte ouest, leur largeur peut atteindre 4 km. Ces formations sont constituées par des sédiments fluviatiles repris par les courants marins côtiers, par des formations marines (corail, sable corallien) et par les produits d'altération des coulées basaltiques, l'ensemble pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur et formant une alternance de niveaux perméables et imperméables.

La plupart des forages étant implantés en pied de versant montagneux, ils ne traversent les formations littorales que sur de faibles épaisseurs. Par ailleurs, la sollicitation de ces formations ne présente que peu d'intérêt compte tenu de la vulnérabilité de la nappe vis-à-vis des pollutions urbaines.

De même que pour les aquifères alluviaux, ce type d'aquifère de dimension restreinte est probablement en lien avec des aquifères d'extension plus importante.

> Aquifères perchés liés aux produits d'altération des formations basaltiques

Ces aquifères superficiels à porosité d'interstice sont constitués par des produits d'altération. L'aquifère correspond généralement à une zone remaniée puisque les produits d'altération non remaniés sont très peu perméables. Le mur est formé soit par des produits d'altération plus compacts ou argileux soit par une coulée basaltique saine non fissurée. En général, ces formations hétérogènes sont considérées comme semi-perméables.

> Aquifères perchés situés au sein de coulées basaltiques

L'écoulement de l'eau se fait au sein d'un niveau perméable reposant sur un niveau très peu perméable. L'aquifère peut par ailleurs être compartimenté latéralement par la présence d'écrans également très peu perméables de type dyke ou des formations alluvionnaires. Ce type d'aquifères a été reconnu par une cinquantaine de forages, principalement dans la vallée de la Fautaua. Ils fournissent une grande partie de l'eau distribuée sur la commune de Papeete.

> Aquifère basal contenu dans les formations basaltiques

Il s'agit du principal aquifère de l'île et de loin, le plus exploité. Il a été reconnu par près d'une centaine de forages et alimente également de nombreuses sources situées en pied de versant montagneux, au niveau de la zone de contact entre les formations basaltiques et les alluvions littorales moins perméables.

Cet aquifère est constitué par une alternance de niveaux aquifères (coulées saines fracturées, scories non altérées...) et de niveaux peu à très peu perméables (coulées saines, scories altérées...). Il est également soumis à des phénomènes d'intrusion saline pouvant compromettre son utilisation pour l'alimentation en eau potable.

Au final, le schéma de fonctionnement proposé par SAFEGE (Illustration 10) se rapproche du fonctionnement de type « Hawaiien » décrit par Join *et al.* (2005) (Illustration 11) qui suppose l'existence d'une nappe de base en équilibre avec les eaux marines relayée à l'intérieur des terres par un système de nappes perchées et de nappes compartimentées par des dykes.

La nappe de base se caractérise par des niveaux piézométriques peu élevés et de faibles gradients hydrauliques même à une distance relativement importante du littoral. Les sources qui en sont issues sont généralement pérennes et présentent de forts débits. Les nappes perchées ou liées aux dykes situées dans la partie centrale de l'île sont, quant à elles, déconnectées de la nappe de base et se caractérisent par des volumes nettement plus faibles. Elles donnent naissance à des sources temporaires aux débits très variables.

En 2005, Hildenbrand *et al.* ont émis une hypothèse un peu différente en considérant qu'une partie importante des eaux souterraines pourrait circuler au niveau du contact entre les deux boucliers imbriqués, des parties intérieures de l'île vers l'océan. Le principal déversement aurait lieu au large, entre 1 000 et 1 500 m sous le niveau de la mer, au-delà de la barrière de corail.

Les mécanismes hydrogéologiques en jeu sont enfin supposés être relativement similaires sur Tahiti Nui et Tahiti Iti, exception faite du plateau de Taravao, situé au droit du deuxième secteur. Le plateau de Taravao correspondrait en effet, selon certaines hypothèses, à un troisième volcan, beaucoup plus jeune, édifié sur les pentes du volcan de Taiarapu. Ceci impliquerait une géologie plus complexe et le plateau constituerait, de ce fait, une entité hydrogéologique à part entière dont le fonctionnement reste mal connu.



Illustration 10 : Schéma hydrogéologique de l'île de Tahiti (SAFEGE, 1988)



Illustration 11 : Schématisation du modèle hawaiien (Join et al., 2005).

2.5.2. Inventaire mené en 2011-2012

En 2011, le Groupement d'Études et de Gestion du Domaine Public (GEGDP) a missionné le BRGM afin de réaliser un inventaire le plus exhaustif possible des données relatives aux eaux souterraines disponibles sur l'île de Tahiti et de les capitaliser dans une base de données spécifique (Ozog et Vernoux, 2012).

Cet inventaire a permis d'identifier 189 forages et plus de 350 sources, principalement situées en bordure littorale (Illustration 12). De plus, 78 coupes géologiques, 47 pompages d'essais, 90 niveaux piézométriques et plus de 700 analyses d'eau ont été recensés et bancarisés.

Une première exploitation des données disponibles confirme l'importance de l'aquifère basal, assez homogène sur le plan chimique, souvent captif (y compris en bordure du littoral), avec un exutoire principal en mer. Cet aquifère apparait, au moins localement, comme extrêmement productif avec des transmissivités comprises entre 10⁻³ et 10⁻¹ m²/s.



Illustration 12 : Forages et sources inventoriés par le BRGM en 2012 (Ozog et Vernoux, 2012).

2.5.3. Indice de Persistance et de Développement des Réseaux

Généralités

L'indice de développement et de persistance des réseaux (IDPR) a été créé par le BRGM (Mardhel et Gravier, 2005) pour qualifier un territoire en termes de « chemins empruntés » par les eaux météoritiques. L'eau qui n'est ni absorbée par les plantes ni soumise à une évaporation directe peut quitter son bassin versant de deux manières distinctes :

- en ruisselant à la surface puis en se concentrant dans les ruisseaux et les rivières avant de quitter le bassin à la faveur d'un exutoire de surface ;
- en s'infiltrant dans le sous-sol puis en transitant dans un aquifère avant de quitter ce dernier par un exutoire souvent distinct de celui du réseau des rivières.

Le calcul de l'IDPR est basé sur la comparaison entre un réseau hydrographique fictif qui considère la présence d'une rivière dans chaque thalweg (Indice de Développement) et le réseau hydrographique naturel (Persistance des Réseaux). Cela permet de faire ressortir les zones à faible réseau hydrographique (zones d'infiltration forte) et celles où le ruissellement est important (réseau hydrographique dense). L'IDPR correspond à l'écart constaté entre le réseau naturel et le réseau de talwegs calculés à partir du MNT (Illustration 13).



Illustration 13 : Réseau hyrographique naturel, réseau de talwegs calculés et IDPR correspondant.

La distribution des valeurs de l'indice IDPR varie selon une gamme de 0 à 2 000, les valeurs inférieures à 1 000 caractérisant les zones où l'infiltration est majoritaire et les valeurs supérieures à ce même seuil, caractérisant les zones où le ruissellement est majoritaire.

En 2007, une première évaluation de l'IDPR a été réalisée sur l'ensemble du territoire métropolitain au pas de 50 m mais les résultats obtenus en domaine de socle étaient peu discriminants. En 2017, une nouvelle cartographie se basant sur des données topographiques de meilleure qualité et surtout sur une nouvelle méthode pour traiter les zones de socle (principe de continuité/discontinuité des réseaux hydrographiques détectées grâce au calcul du TPI (Topographic Position Index, Gallant and Wilson, 2000) a été mise en œuvre.

> Tahiti

MNT et réseau de talwegs

Les valeurs d'altitude du MNT (pas de 5 m) de Tahiti s'étendent du niveau de la mer (niveau 0) au point culminant de l'île (mont Orohena à 2 241 mètres) (Illustration 14).



Illustration 14 : Modèle numérique de terrain de Tahiti au pas de 5 m.

Le réseau de talwegs calculé est composé de 11 802 arcs distincts. Le bassin versant élémentaire ayant permis d'initier le calcul est de 1 600 cellules soit 4 hectares (1 600 * 25 m²). La contrainte limite à 1 600 cellules a été retenue à dire d'expert après analyse du réseau naturel des rivières. Le réseau de talwegs produit de cette manière présente une distribution similaire à celle du réseau naturel (Illustration 15).



Illustration 15 : Réseau de talwegs calculé.

Le réseau hydrographique

La couche relative aux cours d'eau a été fournie par le Service de l'Aménagement et de l'Urbanisme (SAU) polynésien. Elle s'est avérée très discontinue, ce qui a nécessité de nombreuses corrections, notamment au niveau des embouchures (Illustration 16).



Illustration 16 : Exemples de modifications appliquées à la couche SIG du réseau hydrographique naturel.

Au droit des zones volcaniques, le réseau hydrographique a également été redécoupé selon la méthode du TPI décrite plus haut. Le réseau hydrographique ainsi modifié est présenté sur l'Illustration 17.



Illustration 17 : Réseau hydrographique modifié utilisé pour le calcul de l'IDPR.

Les résultats

L'Illustration 18 qui représente la valeur de l'IDPR pour l'ensemble de Tahiti met évidence une différence de réponse entre Tahiti Nui au nord et Tahiti Iti au sud. La partie nord semble en effet beaucoup plus infiltrante avec des zones très contrastées. La partie sud semble, quant à elle, bénéficier d'un réseau hydrographique beaucoup plus dense expliquant la prépondérance du ruissellement.

L'agrégation de l'IDPR aux contours géologiques de la carte au 1/40 000 n'étant pas discriminante (Illustration 19), il a été décidé de représenter la valeur de l'IDPR médian au droit d'unités fonctionnelles (Illustration 20) ; ces dernières correspondant à des petits bassins de 4 hectares présentant une géologie homogène.

Si cette approche permet d'apporter un peu de discrimination entre les zones infiltrantes et les zones de ruissellement, elle n'explique pas les différences décrites plus haut qui seraient en fait liées à la qualité de la couche représentant le réseau hydrographique. Malgré les corrections apportées, il apparaît en effet que dans certains secteurs, les cours d'eau sont tronqués à partir d'une certaine altitude (phénomène particulièrement visible entre Faa'a et Mahina sur l'Illustration 17). Dans d'autres secteurs (ex : bassin versant de la Papenoo), seuls les cours d'eau principaux semblent avoir été cartographiés.

Dans le cas de Tahiti, il serait donc important d'améliorer le tracé du réseau hydrographique naturel à partir des scans IGN existants ainsi qu'à partir de véritables relevés de terrain. Le traitement des images satellites à très haute résolution spatiale (THRS) pourrait également être considéré dans la mesure où il permet d'identifier de manière semi-automatique certains réseaux de drainage (talwegs, fossés agricoles et routiers...) mais la présence d'une végétation très dense risque néanmoins de constituer un obstacle à l'identification des plus petits cours d'eau.



IDPR	Interprétation	
<1000	Infiltration majoritaire Par rapport au Ruissellement superficiel	Il y a non-conformité entre la disponibilité des axes de drainage liés aux talwegs et les axes hydrologiques observés. L'eau ruisselant sur les terrains naturels rejoint un axe de drainage défini par l'analyse des talwegs sans que celuici ne se concrétise par l'apparition d'un axe hydrologique naturel. Développement d'un réseau de talweg de densité supérieure à l'expression du réseau de drainage naturel.
=1000	I Infiltration et Ruissellement superficiel de même importance	Il y a conformité entre la disponibilité des axes de drainage liés au talweg et les axes hydrologiques en place
>1000	Ruissellement superficiel Par rapport à l'infiltration vers le milieu souterrain	L'eau ruisselant sur les terrains naturels rejoint très rapidement un axe hydrologique naturel sans que la présence de celui-ci soit directement justifiée par un talweg. Le réseau de drainage naturel est de densité supérieure à cehi du réseau des talwegs.
> 2000	Majoritairement assimilable à des milieux humides	Un IDPR supérieur ou égal à 2000 traduit une stagnation permanente ou transitoire des eaux, menant à deux interprétations différentes. Quand la ZNS est faible, par exemple au niveau des cours d'eau et des zones humides, l'eau ne s'infiltre pas car le terrain est saturé. Dans le cas d'une ZNS plus importante, le refus d'infiltration semble montrer une imperméabilité des terrains naturels. On pose l'hypothèse que des valeurs d'IPR supérieures à 2000 sont majoritairement assimilables à des milieux humides induisant la possibilité d'inondation par effet de barrière hydraulique.

Illustration 18 : IDPR pour l'île de Tahiti et grille de lecture.



Illustration 19 : Agrégation de l'IDPR aux contours de la carte géologique de Tahiti au 1/40 000.



Illustration 20 : Agrégation de l'IDPR aux unités fonctionnelles.
2.5.4. Qualité de l'eau

En l'absence de référentiel compilant les résultats d'analyses effectuées dans le cadre du contrôle sanitaire, les dosages réalisés sur les points identifiés pour constituer un réseau qualité sur l'île de Tahiti (Abou Akar *et al., 2019*) ont servi de référence.

Les valeurs de conductivité mesurées en août 2017 ont été reportées sur l'Illustration 21. L'Illustration 22 précise également les autres paramètres mesurés in-situ et au laboratoire (température, pH, oxygène dissous et potentiel d'oxydo-réduction).



Illustration 21 : Conductivités mesurées en août 2017 sur les ouvrages du réseau qualité (Abou Akar et al., 2019).

Physico-chimie	Mesure in-situ						Analyse CAIRAP		
	Température (°C)	pН	Conductivité (µS/cm)	O2 dissous (mg/l)	ORP (mV)	pН	Conductivité (µS/cm)	O2 disso us (mg/l)	
STA202 // Reine	25,5	6,6	352	6,37	224,1	7,00	320	6,3	
STA216 // Vaitupa	24	6,89	388	8,08	171	7,00	287	8,1	
STA240 // Punaauia	23,8	6,97	169	8,45	170	7,10	121	8,3	
FOR_V046 // EDT	25,1	7	249	6,56	168,8	7,10	196	6,5	
STA414 // Maraa	21,8	7,59	175	8,79	177,1	7,80	160	8,7	
STB442 // Golf	23,8	7,15	183	7,64	168,1	7,60	130	7,5	
STC419b // Vaima	23,8	7,5	217	7,85	192	7,80	160	7,6	
STD215 // Papehue	24,3	7,11	1063	5,81	65	7,20	1053	6,0	
FOR_V088 // Stade Pater	24,7	7,14	117			7,20	141	7,1	
STB102 // Ahavini	24,6	7,15	259	7,71	194,1	7,40	191	7,7	
STE406 // Nuutae	25,4	7,09	112	8,33	182,1	7,40	100	8,3	
STD449 // Vairao Orohiti	23,5	7,26	252	8,75	175,3	7,50	150	8,7	

Illustration 22 : Paramètres physico-chimiques mesurés in-situ et au laboratoire sur les ouvrages du réseau qualité (Abou Akar et al., 2019).

En fait, seule la source de Papehue située sur la côte est s'est démarquée par une conductivité supérieure à 1 000 μ S/cm (1 053 μ S/cm). Reliée à l'océan par un canal, elle subit probablement une influence marine. Le rapport entre les teneurs en sodium (139,8 mg/l) et en chlorures (285,7 mg/l) qui atteint 0,48 est en effet proche de la valeur qui caractérise le sel marin (0,55).

Les sources de la Reine et de Vaitupa qui semblent émerger dans des conditions similaires ont également présenté des conductivités plus élevées (respectivement 320 et 287 µS/cm) que les autres points de contrôle. L'environnement urbain mais également des temps de résidence importants pourraient expliquer ces valeurs.

En ce qui concerne les teneurs en nitrates et en pesticides des eaux souterraines, l'Illustration 23 et l'Illustration 24 montrent que le taux de contamination est faible. En effet, seules les sources de la Reine (14,4 mg/l) et de Vaitupa (8,05 mg/l) présentent des teneurs en nitrates supérieures à 5 mg/l. La source de la Reine est par ailleurs la seule émergence sur laquelle des pesticides (dieldrine, 0,009 μ g/l) ont été retrouvés parmi les 44 molécules dosées.

Ces teneurs pourront être confirmées par des analyses ultérieures, de même que les teneurs significatives en hydrocarbures polycycliques aromatiques dosées sur le forage du stade Pater (somme des HAP = $0,202 \mu g/I$) dont l'origine reste à déterminer.

Au niveau des métaux, aucune trace de cadmium, de chrome, de cuivre, de manganèse, de mercure, de plomb, de sélénium ou de zinc n'a été détectée dans les prélèvements effectués. Seuls l'aluminium, l'arsenic, le baryum, le bore et le fer ont été dosés à de faibles teneurs (Illustration 25).

Les analyses microbiologiques réalisées sur les échantillons ont enfin mis en évidence la présence de bactéries sur la quasi-totalité des points d'eau à l'exception des sources Ahavini à Mahina et Orohiti à Vairao. La source Vaima est également peu contaminée bien que très fréquentée pour la baignade.



Illustration 23 : Teneurs en nitrates dans les ouvrages du réseau qualité (Abou Akar et al., 2019).



Illustration 24 : Pesticides présents dans les ouvrages du réseau qualité (Abou Akar et al., 2019).



Illustration 25 : Métaux présents dans les ouvrages du réseau qualité (Abou Akar et al., 2019).

2.6. SYNTHÈSE

Préalablement à l'étude détaillée de 2 bassins versants, il convient de rappeler que l'île de Tahiti culmine à 2 241 m au droit de Tahiti Nui (île principale) et à 1 330 m au droit de Tahiti Iti (presqu'île).

Sur le plan climatique, la côte est, exposée aux vents dominants, reçoit un cumul annuel pluviométrique équivalent au double des précipitations enregistrées à Faa'a (1 700 mm). Ce contraste induit des régimes d'écoulement des rivières très différents. Le débit spécifique de la Papenoo (147 l/s/km²) est par exemple 2 fois plus important que celui de la Punaruu (63 l/s/km²).

Sur le plan de la géologie, la mise en place du bouclier principal est daté de 1,2 Ma. Un évènement majeur (daté de 0,87 Ma) aurait par la suite entraîné d'énormes glissements de terrain sur les flancs nord et sud du bouclier et généré de grands dépôts de coulées de débris sur les pentes sous-marines. Le bassin versant de la Papenoo se situe au droit du flanc nord effondré alors que celui de la Punaruu se situe sur le flanc ouest du bouclier d'origine.

Plusieurs types d'aquifères sont recensés mais la nappe basale est l'aquifère qui est de loin le plus exploité. Il a été reconnu par une centaine de forages et alimente également de nombreuses sources situées en pied de versant montagneux, au niveau de la zone de contact entre les formations basaltiques et les alluvions littorales moins perméables.

En ce qui concerne la qualité des ressources, les analyses réalisées sur 12 points répartis sur le pourtour de l'île n'ont pas mis en évidence de problème particulier. Il n'existerait donc pas de risque de fond géochimique élevé sur l'île de Tahiti.

L'IDPR calculé sur la base du réseau hydrographique disponible constitue un dernier élément de référence. Les résultats obtenus semblent mettre en évidence un caractère plus infiltrant pour les formations de Tahiti Nui que pour celle de Tahiti Iti mais ils pourraient être biaisés par la qualité de la cartographie initiale.

3. Bassin versant de la Papenoo

Avec une superficie de 90 km², le bassin versant de la Papenoo est le plus important de l'île. Il présente une orientation nord-sud et se trouve délimité dans sa partie méridionale par les plus hauts sommets de l'île (Orohena, PitoHiti, Tetufera, Pihaiateta, Teamaa, Aramaoro, Urufaa) (Illustration 26).



Illustration 26 : Localisation du bassin versant de la Papenoo et des zones d'intérêts.

La vallée de la Papenoo, par sa géomorphologie, peut se diviser en 3 ensembles. La haute vallée, située à l'intérieur de la caldeira correspond à une zone de plus de 60 km² drainée par la Maroto, la Vaituoru, la Vainavenave, la Vaitopaa et la Vaitamanu. La moyenne vallée se caractérise par la présence de 2 grands affluents situés en rive gauche (Tefaaiti et Vaiputoa) et par une rive droite peu développée. La basse vallée est, quant à elle, très étroite. Elle n'est parcourue que par de courts affluents.

Au droit du bassin versant, la société Marama-Nui exploite 3 stations hydroélectriques qui permettent à EDT (Électricité de Tahiti) de satisfaire 30 % des besoins. La centrale Papenoo 0, située au pK 5, est alimentée par le barrage de Vaiohiro situé 4 km à l'amont. La centrale Papenoo 1, située au pK 11, est alimentée par 11 captages en rivière (SEDEP, 1988). La quasi-totalité des cours d'eau de la haute vallée sont enfin captés que ce soit par le biais de prises directes en rivière ou de barrages pour la production d'hydroélectricité à la centrale Papenoo 2 (Illustration 27). L'acheminement de l'eau jusqu'à la centrale électrique se fait via des conduites forcées enterrées sous les pistes.



Illustration 27 : Photo du barrage Tahinu, sur la rivière Vaituoru

Comme indiqué en introduction du rapport, les investigations menées par le BRGM ont porté sur 2 zones :

- une première située à environ 7 km de l'embouchure et correspondant à l'aval du bassin versant de la Vaiputoa, affluent de rive gauche de la Papenoo. L'ensemble du bassin versant de cette rivière a été classée en zone réservée à l'AEP dans le PGA (Plan Général d'Aménagement) de la commune. À l'heure actuelle, cette zone ne fait l'objet d'aucune exploitation des ressources en eau mais représente une zone d'intérêt pour le futur dans la mesure où elle est naturellement protégée par des versants à très fortes pentes et où il n'y a pas de chemin d'accès à l'exception de quelques sentiers de chasseurs ;
- une seconde située au cœur de la haute vallée à environ 18 km de l'embouchure et centrée sur la zone touristique et culturelle de Fare Hape et du relais de la Maroto. Cette zone qui présente un grand intérêt patrimonial fait l'objet de projets de développement touristique. C'est dans ce contexte et dans l'objectif de satisfaire les futurs besoins que l'évaluation du potentiel aquifère des formations a été réalisée.

Ces 2 zones ont fait l'objet d'une approche comportant 4 volets (géologie, hydrogéologie, géophysique et hydrogéochimie) qui va être présentée dans les paragraphes suivants.

3.1. APPROCHE GÉOLOGIQUE

3.1.1. Données issues de la bibliographie

En complément des informations d'ordre général présentées dans le paragraphe 2.4., il est possible d'apporter des précisions sur la géologie du bassin versant de la Papenoo.

La carte géologique établie en 1965 par Deneufbourg (Illustration 28) indique que le lit de la rivière est constitué par des formations alluvio-torrentielles détritiques (en orange), les contreforts de la vallée, par des laves basaltiques de l'épanchement principal (en vert clair) et le cœur de la haute vallée par des roches grenues de culot (en bordeaux) et des formations andésitiques (en jaune). La présence de formations de remplissage (en bleu) est également reportée.

Sur la base de cette carte, il apparaît que les 2 zones retenues pour faire l'objet d'investigations détaillées présentent une configuration géologique différente, la zone amont étant constituée de roches grenues et d'andésites (roches plus riches en silice que les basaltes) à l'affleurement et la zone aval, de formations basaltiques issues du bouclier principal ou de remplissages ultérieurs.

En 1974, en prévision de l'implantation d'une retenue hydroélectrique sur la Papenoo, Becker *et al.* ont reconstitué l'histoire géologique (notamment les phases successives de creusement et de remblaiement) de la vallée de Papenoo à 7 km de l'embouchure au niveau, soit au niveau de la première zone étudiée par le BRGM (Illustration 29). Ils ont retenu l'enchaînement suivant :

- une première phase de creusement aux dépens de l'empilement basaltique constituant le bouclier principal (a),
- une première phase de comblement par un agglomérat bréchique à blocs hétérogènes comprenant l'ensemble des laves du volcan bouclier (laves basaltiques, roches grenues) (b),
- une deuxième phase de creusement au sein de cet agglomérat bréchique donnant naissance à une seconde vallée qui atteint les formations sous-jacentes (c),
- des épanchements tardifs de laves basaltiques venant combler cette vallée (d). Ces formations apparaissent actuellement sous la forme de plateaux basaltiques de part et d'autres de la Vaiputoa. Il semblerait qu'il s'agisse des formations basaltiques les plus récentes de l'île de Tahiti-Nui (datées à 0,44 Ma par Becker *et al.*, 1974),
- une nouvelle phase de creusement en rive droite de ces coulées basaltiques prismées. entaillant plus profondément la vallée que les précédentes phases de creusement (e),
- des phases de creusement et de comblement de nature sédimentaire permettant d'aboutir à la morphologie actuelle de la vallée (f à i).

En ce qui concerne la haute vallée, Bardintzeff *et al.* (1988) et Bonin et Bardintzeff. (1989) ont étudié de façon détaillée le massif plutonique de roches grenues. Le croquis de l'Illustration 30 met en évidence sept types de roches ; chaque type étant associé à une composition chimique particulière comme l'indique le diagramme de Streckeisen associé. L'Illustration 31 représente, quant à elle, l'agencement complexe des formations en profondeur.

Les travaux plus récents de Hildenbrand *et al.* (2004) qui retiennent une déstabilisation du flanc nord de l'île ayant entraîné un comblement de la vallée par des coulées de débris il y a environ 0,87 Ma puis un remplissage basaltique tardif ayant formé les plateaux de la moyenne vallée de la Papenoo en rive gauche sont en accord avec les modèles plus anciens à l'exception des âges. Les datations les plus récentes indiquent en effet un âge d'environ 0,227 Ma pour les plateaux, soit deux fois moins que les âges proposés par Becker *et al.* (0,44 Ma) (Illustration 32).



Illustration 28 : Carte géologique du bassin versant de la Papenoo (Deneufbourg, 1965).



Illustration 29 : Représentation schématique des différentes phases de creusement-remblaiement de la vallée de la Papenoo (Becker et al., 1974).



Illustration 30 : Croquis géologique du massif d'Ahititera au sein de la caldeira de Tahiti-Nui (Bonin et Bardintzeff, 1989) et diagramme de Streckeisen.



Illustration 31 : Coupe interprétée le long d'un transect WSW-ENE (Bardintzeff et al., 1988).



Illustration 32 : Âges des diverses formations d'après Hildenbrand et al. (2004).

3.1.2. Reconnaissances de terrain

Les deux zones d'intérêt décrites plus haut ont fait l'objet de reconnaissances géologiques entre le 19 et le 23 février 2018.

En raison de la morphologie du terrain, l'accès à la partie amont de la Vaiputoa n'a pas été possible. La vallée est en effet encaissée entre deux falaises imposantes et des cascades infranchissables bloquent rapidement la remontée de la rivière. Au final, seule la zone aval proche de la confluence avec la Papenoo, a donc été investiguée.

Dans la haute vallée, les investigations ont été menées en remontant les nombreuses pistes qui permettent d'accéder aux prises d'eau. Compte tenu de la superficie de la haute vallée et du temps imparti, tous les cours d'eau n'ont toutefois pas pu être remontés jusqu'à leur source.

Les itinéraires parcourus de même que les points d'intérêt (120 au total) ont été reportés sur l'Illustration 33 et l'Illustration 34. Chaque affleurement a fait l'objet d'une description en Annexe 1.

Dans la zone aval de la Vaiputoa, seuls 4 types de formations ont été observés.

<u>Les laves basaltiques tardives :</u> elles constituent l'essentiel des immenses falaises (plusieurs dizaines de mètres de haut) qui bordent la vallée de la Papenoo à cet endroit. Liées aux épanchements volcaniques tardifs de lave lors de l'édification de l'île de Tahiti, elles sont caractérisées par un développement de colonnades ou de prismations spectaculaires (liées au refroidissement de la lave) (Illustration 35). Ces basaltes sont généralement faiblement vacuolaires et légèrement scoriacés à certains endroits. On y trouve quelques pyroxènes de petites tailles et des feldspaths généralement très altérés.

<u>Les coulées de débris :</u> en rive gauche, les coulées de débris forment une marche très bien visible dans la topographie, sur laquelle reposent les coulées de lave massives décrites plus haut. Elles sont constituées de blocs généralement altérés, souvent anguleux dans une matrice argileuse fortement indurée. Ces coulées n'ont pas été repérées en rive droite.

Les alluvions : elles sont fortement développées dans cette zone de la Papenoo et recouvrent la majorité de l'espace situé entre les falaises situées en rives gauche et droite (y compris le soubassement de la route). Elles sont constituées de blocs de tailles variées pouvant dépasser plusieurs mètres. Leur épaisseur est incertaine et probablement variable entre le lit de la rivière et le pied des falaises.

Les altérites : peu présentes dans la zone, on les retrouve néanmoins au sommet des coulées de débris et en recouvrement des basaltes.



Illustration 33 : Points d'intérêt identifiés dans le secteur aval de la Vaiputoa.



Illustration 34 : Points d'intérêt identifiés dans la haute vallée de la Papenoo.



Illustration 35 : Falaises constituées de laves basaltiques prismées à l'entrée de la vallée de la Vaiputoa.

La zone de la haute vallée correspond à une zone géologique complexe où coexistent des formations magmatiques de type intrusif (liées à la mise en place d'une chambre magmatique aujourd'hui partiellement décapée) et de type extrusif (laves basaltiques mises en place à différentes époques). Les investigations qui y ont été menées ont permis d'identifier.

<u>Les laves basaltiques anciennes :</u> contrairement à la zone d'étude située plus en aval, les laves basaltiques rencontrées dans la zone de la Maroto semblent anciennes et pourraient correspondre aux laves du bouclier initial (1^{ère} phase d'édification de l'île). Les coulées sont généralement moins épaisses, nettement plus scoriacées et plus altérées qu'en aval. Les roches sont souvent aphyriques (absence de cristaux visibles à l'œil nu) mais peuvent également présenter de petits cristaux de pyroxènes ou de feldspaths la plupart du temps altérés. Elles présentent fréquemment des bandes d'altération hydrothermale.

<u>Les laves basaltiques récentes :</u> on peut localement trouver quelques coulées de lave massives récentes (2^{ème} phase d'édification de l'île). Elles occupent généralement le fond de certains talwegs mais on les retrouve également en hauteur, au niveau des cols d'accès entre les vallées. Elles sont généralement plus fraîches, beaucoup plus épaisses (cœur massif), plus riches en cristaux (pyroxènes et feldspaths) et moins scoriacées que les laves basaltiques anciennes.

Les coulées de débris : elles sont omniprésentes dans la zone malgré leur absence sur les cartes géologiques proposées par Deneufbourg (1965) et Hildenbrand *et al.* (2004). Elles peuvent contenir des blocs de plusieurs mètres, souvent anguleux dans une matrice argileuse indurée. Leur extension peut être très importante mais également réduite à de simples placages sur les laves basaltiques lorsqu'elles ont subi une érosion importante. Typiquement, les quelques coulées de laves basaltiques récentes identifiées dans la zone ont tendance à reposer sur ces coulées de débris. Au droit de certains affleurements, il est possible de compter jusqu'à 3 unités de coulées de débris correspondant à autant d'évènements de déstabilisation des flancs du volcan.

<u>Les andésites :</u> ces laves gris-clair à blanches plus acides que les basaltes sont fréquentes sont dans la zone prospectée (Illustration 36). Elles se présentent généralement sous la forme de coulées massives très peu scoriacées mais parfois très altérées (souvent très friables sous le

marteau) et riches en cristaux (pyroxènes notamment). Elles présentent des minéraux altérés rouges correspondant à d'anciennes pyrites. Elles sont traversées par de nombreux dykes.

Les ignimbrites : non cartographiées dans ce secteur, ces roches qui sont formées de débris de laves acides soudés avant leur refroidissement, n'affleurent que dans la partie basse de la Vaituoru (Illustration 36). Extrêmement résistante et de couleur claire, la roche contient des clastes extrêmement variés (anguleux ou arrondis) centimétriques à décimétriques de différentes natures (parfois aphyriques, parfois vacuolaires). Elle est largement recoupée par des dykes et des sills de textures et de couleurs variables (noirs aphyriques ou gris clair porphyriques). Vers l'aval, la densité d'intrusions augmente à tel point qu'il devient difficile de différencier l'encaissant du magma intrusif. Dans cette zone, les dykes présentent des directions N45/N60 et l'encaissant peut parfois prendre une teinte verdâtre.

Les alluvions : bien développées dans la zone de la Maroto en raison de la faible déclivité de la rivière, elles sont constituées de blocs d'origines variées (roches volcaniques, roches grenues riches en olivine, méga-cristaux, etc.) dont la taille peut dépasser plusieurs mètres. Leur épaisseur est incertaine et probablement variable entre le lit de la rivière et le pied des talwegs.

<u>Les dykes et les sills :</u> ils sont extrêmement nombreux dans la zone de la Maroto et leur densité augmente à mesure que l'on s'approche du cœur du volcan décapé (Illustration 36). Du fait de l'histoire volcanique complexe de cette partie de l'île, ils sont aussi bien constitués de laves basaltiques récentes que de laves plus évoluées issues de la chambre magmatique. Comme indiqué précédemment, leur densité est si grande dans certaines zones qu'il est difficile de différencier la lave encaissante de celle venant intruder le matériel en place.

Les altérites : elles sont très développées dans cette partie de l'île qui subit un climat particulièrement humide tout au long de l'année.



Illustration 36 : Lithologies rencontrées dans le secteur de la Maroto (à gauche = andésite ; au centre = Ignimbrite ; à droite = Injection de sills et dykes successifs).

3.1.3. Synthèse géologique

Bien qu'il ne soit pas visible à l'affleurement, le soubassement de la zone d'intérêt de la Vaiputoa est probablement constitué par les laves basaltiques précoces de la première phase d'édification de l'île de Tahiti (1,5 à 0,87 Ma). Ces dernières ont été partiellement remaniées par des avalanches de débris (0,87 à 0,85 Ma) dont des traces demeurent. Au-dessus de ces coulées de débris, les épanchements basaltiques de la phase magmatique tardive de Tahiti (0,227 Ma) sont venus se mettre en place. Il est probable qu'au niveau de la rivière (et du lit majeur de la Papenoo), les alluvions récentes reposent directement sur les coulées de débris, elles-mêmes recouvrant les laves massives anciennes mais ce contact n'a pas pu être observé sur le terrain.

Dans ces conditions, il est possible d'établir la coupe schématique suivante (Illustration 37) qui reprend les couleurs de la carte géologique de 1965 pour en faciliter la lecture. Une telle configuration suppose que les formations volcaniques du bouclier secondaire (« second shield ») décrites par Hildenbrand *et al.* (2004) sont absentes. Les coulées tardives représentées de part et d'autre du cours peuvent, quant à elles, être assimilées aux coulées tardives de remplissage (« late valley filling flows ») cartographiées par ces auteurs.



Illustration 37 : Coupe schématique au débouché de la Vaiputoa.

La haute vallée correspond à une zone complexe où coexistent des roches de type intrusif liées à l'ancienne chambre magmatique et des roches de type extrusif (andésites et basaltes précoces et tardifs).

Le « culot magmatique » n'a pas été retrouvé à l'affleurement, même si la présence de nombreux blocs grenus dans la rivière, riches en pyroxène et en olivine, permettent de ne pas douter de son existence.

Le soubassement de la zone paraît, quant à lui, constitué par 2 séries principales : les andésites anciennes que l'on retrouve principalement au cœur du massif et les basaltes précoces constitués d'un empilement de laves scoriacées relativement altérées. Ces deux ensembles ont subi d'importantes déstabilisations gravitaires après leur mise en place dont les dépôts de coulées de débris sont les témoins. Postérieurement à ces déstabilisations, les laves basaltiques tardives se sont mises en place mais restent peu nombreuses au droit de cette zone.

Dans ce contexte, il est difficile de situer l'origine de l'ignimbrite soudée rencontrée localement. Compte-tenu des intrusions nombreuses qui la parcourent, il est toutefois probable qu'elle soit relativement ancienne et qu'elle corresponde à un événement précoce dans l'édification de l'île, probablement en lien avec la mise en place de la série andésitique. L'Illustration 38 propose une coupe schématique de la zone. Dans la mesure où les laves anciennes présentent un caractère scoriacé et altéré et où le culot est a priori constitué de roches grenues très denses, la zone andésitique recoupée par de nombreux filons constituera une zone d'intérêt préférentielle pour la recherche de nouvelles ressources en eau.



Illustration 38 : Coupe schématique de la haute vallée.

3.2. APPROCHE HYDROGÉOLOGIQUE

3.2.1. Données issues de la bibliographie

De nombreuses études à portée hydrologique ont été effectuées dans la vallée da façon préalable à la réalisation des captages et la mise en œuvre des centrales électriques (SEDEP, 1988 et 1992). Sur le plan de l'hydrogéologie, les références sont très peu nombreuses mais les travaux menés par Hildenbrand *et al.* (2005) et concernant toute la partie nord de l'île de Tahiti ont permis de faire des hypothèses sur les circulations souterraines. Les auteurs ont notamment pu mettre en évidence des différences de composition chimique et isotopique des eaux issues du bouclier principal et du bouclier secondaire. Par ailleurs, les discontinuités géologiques situées entre l'épaisse base imperméable du deuxième bouclier et les niveaux fracturés sus-jacents et celles situées entre le bouclier principal et l'édifice post-effondrement (dont la principale résurgence se situerait en mer) constitueraient des zones préférentielles d'infiltration (Illustration 9). Le rôle des dykes périphériques a également été précisé. Ils seraient finalement peu actifs en termes d'infiltration et de stockage d'eau mais favoriseraient la circulation des eaux souterraines.

La commune de Papenoo est actuellement alimentée par des ouvrages situés en dehors du bassin versant (dont le forage vertical de Faaripo qui permet d'exploiter près de 2 millions de m³ par an). À l'exception d'un petit forage alluvial (4 m de profondeur) situé à proximité de l'embouchure dans la zone industrielle et d'un sondage réalisé sur le site de Fare Hape dans les années 60 pour lequel aucune donnée n'est disponible, aucun autre ouvrage n'est recensé sur la zone étudiée.

La commune dispose également d'un forage situé au lieu-dit Puhi, à 700 m à l'est de la limite du bassin versant dans la basse vallée et à 830 m de la mer ; X=243625 ; Y=8060966) qui pourrait être prochainement équipé. Ce dernier, dont la coupe géologique est présentée en Annexe 2, sollicite une nappe basaltique scoriacée captive à 37 mètres sous le niveau marin. Un essai de pompage réalisé en 1998 a permis de calculer une transmissivité de 9,2 10⁻⁵ m²/s.

3.2.2. Reconnaissances de terrain

En l'absence de données hydrogéologiques de référence sur le bassin versant de la Papenoo, des prospections hydrogéologiques ont été menées du 19 au 23 février 2018 en complément des observations géologiques décrites précédemment et menées d'une part, à l'embouchure de la Vaiputoa et d'autre part, autour des complexes de la Maroto et de Fare Hape (Illustration 39 et Illustration 40).

Elles ont consisté à identifier des zones d'émergence des eaux souterraines et à les caractériser d'un point de vue physico-chimique. De nombreuses mesures ont également été réalisées en rivière de façon à pouvoir établir des comparaisons (Illustration 41 à Illustration 44). L'ensemble des données récoltées a été compilé en Annexe 3.

Dans le secteur de la Vaiputoa, une seule source s'écoulant d'un empilement de coulées basaltiques peu altérées a pu être identifiée (Illustration 45). Un passage ultérieur au droit de cette source, dont le fonctionnement est probablement lié aux infiltrations d'eau sur le plateau d'Umauma sus-jacent, a montré que cette émergence n'était pas pérenne. Des mesures in-situ dans les rivières Vaiputoa et Papenoo ont également été réalisées, de même qu'au droit d'un petit affluent de rive droite (point n° 573).

Les mesures de conductivité ont mis en évidence une faible minéralisation des eaux. La Vaiputoa et la source située en rive droite présentent en effet une conductivité inférieure à 100 μ S/cm et la Papenoo, une minéralisation légèrement plus élevée (valeurs comprises entre 100 et 200 μ S/cm). Des pH légèrement basiques (compris entre 7 et 8) ont également été observés sur l'ensemble des points.

Dans la haute vallée, plusieurs rivières ont été remontées et 9 sources ont pu être recensées. Parmi ces dernières, plusieurs (points n° 611b et 618) ont été observées au contact entre les formations alluviales et les coulées de débris qui se caractérisent donc probablement par une faible perméabilité. D'autres ont été observées au droit de zones affectées par des dykes ou des sills (points n° 595 et 629) ou au pied du barrage Tahinu, à proximité de la rivière Vaituoru (points n° 624, 625 et 626).

Les eaux sont également peu minéralisées dans ce secteur (52 points de mesures sur 60 ont présenté une conductivité inférieure à 200 μ S/cm) mais certaines sources (notamment celles repérées au pied du barrage Tahinu), ont présenté une conductivité élevée (> 300 μ S/cm) et un pH acide (entre 5 et 5,5).

La présence de remontées gazeuses ainsi que de dépôts oranges ont pu être notés au droit de ces sources (Illustration 45) de même que dans le secteur des rivières Maroto et Vaituoru, au nord de la zone indiquant la présence de roches grenues.

De façon globale, il apparaît que les eaux issues du domaine volcanique basaltique présentent un pH légèrement plus élevé (souvent supérieur à 7,5) que celui qui caractérise les eaux issues du domaine andésitique. Les andésites étant des roches plus acides que les basaltes, il semblerait donc que la nature des roches contrôle la qualité des eaux dans ce secteur. Le caractère basique des eaux observé sur les points 630 à 637 pourrait, quant à lui, s'expliquer par une cartographie approximative de la zone andésitique dans la mesure où ces formations n'ont pas été reconnues lors des investigations de terrain.

À proximité du culot magmatique, la présence de nombreux filons semble également permettre la remontée de CO₂. L'acidité qui en résulte (du fait de la formation d'acide carbonique) et le pouvoir agressif associé pourraient être à l'origine des minéralisations légèrement plus élevées que celles qui sont observées au droit de la zone basaltique.



Illustration 39 : Localisation et nature des sites étudiés dans le secteur de la Vaiputoa.



Illustration 40 : Localisation et nature des sites étudiés dans la haute vallée de la Papenoo.



Illustration 41 : Conductivités mesurées dans le secteur de la Vaiputoa.



Illustration 42 : Conductivités mesurées dans le secteur de la haute vallée.



Illustration 43 : pH mesurés dans le secteur de la Vaiputoa.



Illustration 44 : pH mesurés dans le secteur de la haute vallée.



Illustration 45 : Venues d'eau observées lors des reconnaissances de terrain, à gauche : source provenant d'une fracture dans la Vaiputoa, à droite : source située au pied du barrage Tahinu.

Hypothèses sur les écoulements

Dans le secteur de la Vaiputoa, les rivières s'écoulent à la base des formations basaltiques prismées récentes, au contact des coulées de débris moins perméables.

Dans la haute vallée, le patchwork géologique décrit précédemment, pourrait être à l'origine d'un compartimentage hydrogéologique. Chaque événement magmatique s'est toutefois accompagné de la mise en place de nombreux dykes et de sills traversant les formations plus anciennes, suggérant ainsi que la perméabilité générale de la zone de la Maroto est plutôt bonne. La présence de nombreuses venues de gaz (CO₂) notamment à mesure que l'on s'approche du cœur de l'île renforce l'hypothèse d'une perméabilité importante même si la présence de coulées de débris imperméables peut localement engendrer des discontinuités de l'aquifère.

À l'occasion de reconnaissances terrestres ou héliportées menées avant février 2018, plusieurs venues d'eau donnant naissance à des rivières ont également été observées sur les flancs abrupts de l'Urufaa, de l'Orohena, du PitoHiti et de l'Aramaoro (Illustration 46).

Ces venues correspondent à des eaux infiltrées sur les sommets qui resurgissent à la faveur de niveaux imperméables notables. La pérennité de certaines de ces venues d'eau témoigne de l'importance des volumes stockés au sein des nappes perchées.



Illustration 46 : Venue d'eau sur les flancs de l'Aramaoro.

3.2.3. Éléments de bilan

En complément des investigations précédentes, des approches visant à évaluer les modalités de recharge de l'aquifère ont été menées. La première a consisté à calculer les pluies efficaces en utilisant le logiciel ESPERE (Lanini et Caballero, 2015) et la seconde, à estimer le taux d'infiltration à l'aide des données pluviométriques et limnimétriques disponibles. Ces deux approches sont décrites après une description des données disponibles.

> Données disponibles

Depuis 1988, Météo France gère une station météorologique (PAPENOO_1) située à l'aval de la vallée, à une altitude de 41 m (Illustration 47). Les données relatives à cette station ont été téléchargées depuis le site <u>https://donneespubliques.meteofrance.fr/</u>. À noter que la chronique présente deux mois de lacune sur l'ensemble de la période (juin 1999 et mars 2005).

Le GEGDP gère, quant à lui, deux pluviomètres (P2 et P9) et 9 totalisateurs. Les deux pluviomètres du GEGDP situés à 210 et 354 mètres d'altitude fonctionnent respectivement depuis 1989 et 1994 mais ont présenté de nombreux disfonctionnements depuis lors. Les totalisateurs sont quant à eux relevés de 2 à 6 fois par an avec des périodes de relève variables. Les données mesurées sur l'ouvrage T12 entre février 2017 et octobre 2018 ont notamment mis en évidence un cumul annuel moyen de 9 500 mm.

La comparaison des cumuls mensuels associés aux postes PAPENOO_1, P2 et P9 (avec la part d'incertitude qu'ils comportent pour les 2 derniers) met logiquement en évidence une augmentation des précipitations avec l'altitude (Illustration 48).

On retiendra au final que les plus hauts sommets du bassin versant sont soumis à des précipitations de l'ordre de 10 000 mm (T12), la zone centrale à des précipitations de l'ordre de 5 500 mm (P9) et la zone côtière à des précipitations de l'ordre de 3 500 mm par an.



Illustration 47 : Localisation des stations pluviométriques au droit du bassin versant de la Papenoo.



Illustration 48 : Cumuls mensuels moyens sur différentes stations pluviométriques du bassin versant de la Papenoo.

D'un point de vue des débits, l'Illustration 49 résume les valeurs retenues par Lafforgue dans l'atlas de la Polynésie française (1993) et établies par le Service de l'Équipement entre 1971 et 1986 pour une station installée à la côte 45 et un bassin versant de 79,7 km².

Débit moyen (m3/s)	Débit spécifique moyen (I/s/km ²)	Débit de crue médian (m3/s)	Débit spécifique de crue médian (l/s/km²)	Plus fort débit connu (m3/s) (Cyclone 04/1983)	Débit d'étiage (m3/s)	Débit spécifique d'étiage (I/s/km²)
11,7	147	467	5860	2170	1,99	25

Illustration 49 : Débits caractéristiques de la vallée de la Papenoo pour la période 1971-1986 (ORSTOM, 1993).

À l'heure actuelle, cette station ne fonctionne plus mais le GEGDP assure un suivi hydrologique de la vallée depuis 1999.

Entre 1999 et 2010, des hauteurs d'eau ont été enregistrées sur la station L2 (taux d'acquisition de 88 %) mais en l'absence de courbe de tarage, les données ne sont pas exploitables.

Entre mai 2011 et mars 2016, des hauteurs d'eau ont également été enregistrées sur la station L3 mais 10 % des données sont manquantes, de même que 36 % des valeurs de débits. Par ailleurs, 2 courbes de tarage différentes ont été utilisées sur la période et les débits caractéristiques déterminés ne correspondent pas à ceux déterminés dans le passé. Par exemple, le débit journalier ne dépasse jamais 6,5 m³/s (Illustration 50) alors que le débit moyen atteignait quasiment le double (11,7 m³/s) entre 1971 et 1986. Dans ces conditions, la fiabilité des données peut être remise en question.

Depuis le mois de juillet 2018, une nouvelle station limnimétrique (L4) a été mise en place au niveau du pont en fer de la vallée de la Papenoo. Cette station étant récente, il n'y a pas encore de valeurs de débits disponibles. Sa position à l'aval de la prise d'eau alimentant la station hydroélectrique Papenoo 0 soulève également la question de la représentativité des débits qui seront évalués au droit de cette installation.



Illustration 50 : Chroniques des hauteurs d'eau et des débits de la station Papenoo L3.

> Pluies efficaces

Les pluies efficaces correspondent aux précipitations totales (P) diminuées de l'évapotranspiration réelle (ETR) et des éventuels phénomènes de fluctuations de stock dans les nappes (ΔV) :

Peff = P- ETR- ΔV

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 et l'ETR ne dépend, comme dans la première formule, que de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et de la RFU (Réserve en eau des sols Facilement Utilisable). Il en résulte la formule :

À Tahiti, l'ETP n'est calculée qu'au droit de la station météorologique de référence de Faa'a. Ce sont donc ces valeurs qui ont été retenues pour calculer les pluies efficaces même si Petit (1969) les a jugées non représentatives des phénomènes d'évaporation qui affectent le centre de l'île.

Les calculs ont été menés à partir des précipitations enregistrées sur le poste P9 avec le logiciel BRGM ESPERE (Lanini et Caballero, 2015) pour différentes valeurs de RFU et ont permis d'établir le tableau de l'Illustration 51.

Le logiciel nécessitant de disposer d'années complètes d'observation, le calcul n'a pu être mené que sur la période 2010-2017 (Illustration 51). Comparés à la pluviométrie moyenne sur la période (5 761,2 mm), les cumuls annuels représentent 70 à 80 % des précipitations pour une RFU comprise entre 5 et 100 mm.

	RFU 5mm	RFU 10mm	RFU 20 mm	RFU 50 mm	RFU 100 mm
Janvier	636,5	625,8	613,0	603,2	600,1
Février	702,3	692,6	682,8	675,6	669,4
Mars	598,6	585,7	569,7	557,1	556,4
Avril	344,2	331,5	319,2	300,1	297,3
Mai	299,0	288,3	274,0	264,9	263,0
Juin	253,0	244,1	235,4	221,5	214,3
Juillet	182,6	174,0	160,4	144,2	140,3
Août	109,7	99,0	82,7	64,9	61,4
Septembre	272,0	262,4	250,5	229,2	214,2
Octobre	366,0	354,9	338,8	313,8	299,5
Novembre	459,5	448,8	435,8	412,6	399,2
Décembre	377,3	365,2	351,7	339,5	336,4
Total	4600,5	4472,4	4313,8	4126,7	4051,3
% Pluie moyenne	0,80	0,78	0,75	0,72	0,70

Illustration 51 : Pluies efficaces mensuelles moyennes calculées au moyen de la formule de Thornwaithe en fonction de différentes RFU (période 2010-2017).

Afin d'estimer le coefficient le plus proche de la réalité et d'en déduire la RFU associée, une analyse du comportement du débit a été menée dans un contexte de sous-saturation des sols (RFU vide). Elle a porté sur les données enregistrées au droit du limnimètre L3 en juin/juillet 2014 (Illustration 52). Il apparaît que de très faibles épisodes pluvieux comme ceux du 10/7 (4,5 mm sur P2) ou du 18/07 (3,5 mm sur P2) ont suffi à provoquer des augmentations de débit.

Dans ces conditions, il est proposé de retenir une valeur de 5 mm pour la RFU ainsi qu'un coefficient de 80 % pour la part des précipitations efficaces par rapport aux précipitations totales (Illustration 53). À l'échelle du bassin versant de 90 km², le volume moyen susceptible de ruisseler ou de s'infiltrer représenterait donc 414 M m³ par an.

À partir de cette évaluation, l'enjeu consiste désormais à savoir comment ce volume se répartit entre ruissellement et infiltration.



Illustration 52 : Évolution de la pluviométrie sur P2 et P9 et du débit sur L3 en juin/juillet 2014.



Illustration 53 : Pluies efficaces moyennes mensuelles calculées sur la période 2010-2017.

> Ruissellement et infiltration

Le coefficient de ruissellement dépend de nombreux facteurs tels que la pente, la nature des formations géologiques ou le couvert végétal ainsi que de l'intensité de la pluie.

Il peut être approché en étudiant la variation de débit induite par un évènement pluviométrique isolé. Dans ce type de contexte, l'augmentation immédiate de débit qui fait suite à un épisode pluvieux peut en effet être assimilée à la part d'eau ruisselée.

En pratique, l'opération consiste à comparer la lame d'eau écoulée au niveau d'une station limnimétrique à la lame d'eau précipitée sur le bassin versant correspondant en considérant que l'évènement pluvieux est uniforme sur l'ensemble du bassin versant.

À titre d'exemple, l'examen de l'Illustration 54 montre que la pluie du 27 juin 2014 enregistrée sur P2 (107,5 mm) a induit une nette augmentation du débit moyen journalier au niveau de la station L3. Celui-ci est en effet passé de 0,43 m³/s à 1,38 m³/s, ce qui représente une augmentation de 0,95 m³/s. Rapportée à la superficie du bassin versant (80 km²), cette augmentation représente une lame d'eau ruisselée de 1 mm sur l'ensemble du bassin versant, soit environ 1 % du total des précipitations.

Mise en œuvre sur plusieurs évènements pluvieux, ce type d'approche n'a permis de calculer que des taux de ruissellement compris entre 1 et 10 % du volume d'eau précipité.

Ces valeurs paraissent incohérentes par rapport aux observations de terrain et sont également nettement inférieures aux valeurs disponibles en bibliographie. L'Atlas de la Polynésie française (ORSTOM, 1993) fait en effet référence à un taux de ruissellement (lame d'eau écoulée/lame d'eau précipitée) de 69 % pour le bassin versant de la Papenoo.

L'origine de ces différences est à mettre en relation avec la qualité des données enregistrées à la station L3 et notamment la sous-estimation des débits mentionnée précédemment.



Illustration 54 : Variation du débit lors de l'épisode pluvieux du 27/06/2014.

3.3. APPROCHE GÉOPHYSIQUE

En complément des reconnaissances géologiques et hydrogéologiques, 3 sondages électriques ont été mis en œuvre dans la moyenne et la haute vallée de la Papenoo afin :

- de déterminer les propriétés électriques et les épaisseurs des formations géologiques présentes au droit des 2 secteurs d'étude ;
- de définir leur extension latérale ;
- de définir, si possible, le modèle géologique et hydrogéologique des sites ;
- de proposer d'éventuels sites pour l'implantation des forages de reconnaissance.

3.3.1. Sondages électriques

> Principe

Les sondages électriques consistent à injecter dans le sol un courant électrique d'intensité I entre deux électrodes A et B et à mesurer la différence de potentiel ΔV induite entre une autre paire d'électrodes M et N (Illustration 55).

Ils permettent d'obtenir une image de la distribution de la résistivité électrique des matériaux (roches ou structures) 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 55 : Principe de la mesure en courant électrique continu (Bretaudeau et al., 2016).

À partir de la valeur du courant injecté *I*, de la mesure 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 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 (Illustration 56) :



Illustration 56 : Géométrie du dispositif de mesure (Bretaudeau et al., 2016).

> 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 I 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 Tahiti, 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 (Illustration 57), 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 57 : 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 (Illustration 58). 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.



Illustration 58 : Configuration Wenner-Schlumberger.

> Pseudo-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 (Illustration 59, 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 (Illustration 59, 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 (Illustration 59, 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 59 : 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).

3.3.2. Sondages réalisés dans la Papenoo

> Travaux préalables et matériel utilisé

Préalablement à la réalisation des sondages, un layonnage sur environ 1 m de large a été réalisé par la société Moana Services au droit des 3 profils envisagés (Illustration 60).

Un profil altimétrique au pas de 10 m a également été réalisé au droit de chaque profil au moyen d'un télémètre laser muni d'une fonction inclinométrique (TruPulse) (Illustration 60). Ce dispositif permet de s'affranchir de fastidieux calages de bases en zones isolées et d'obtenir une précision (quelques cm en relatif) compatible avec les besoins de l'étude.

L'acquisition des panneaux électriques a enfin été réalisée à l'aide d'un dispositif de type Syscal-Pro fabriqué par Iris Instruments connecté à 12 flûtes de 8 électrodes, soit 96 électrodes métalliques régulièrement espacées de 10 mètres sur 950 mètres (Illustration 60). Cet espacement a été choisi afin de permettre une reconnaissance des terrains de surface de même que des terrains situés jusqu'à 150 m de profondeur pour les dispositifs les plus longs. L'énergie électrique a été fournie par une batterie de voiture de 70 Ah (Illustration 60).



Illustration 60 : Mise en place des flûtes et des électrodes (en haut), profil topographique et dispositif SISCAL (en bas).

> Implantation des panneaux électriques et résultats obtenus

La vallée de la Papenoo a fait l'objet de 3 sondages électriques. Le premier a été réalisé au niveau de la confluence entre la Vaiputoa et la Papenoo et les 2 autres, à proximité de la centrale Papenoo 2 et du site culturel de Fare Hape (Illustration 61).

À noter que la présence de conduites forcées enterrées a engendré des artefacts de mesures. Au droit des secteurs concernés, les résultats ont été masqués car jugés non représentatifs de l'environnement géologique.



Illustration 61 : Implantation des sondages géophysiques dans la vallée de la Papenoo.

D'après la carte géologique (Deneufbourg, 1965), le profil **PAP1** est implanté au droit des formations alluvio-torrentielles de fond de vallée qui se situent après la confluence entre la Vaiputoa et la Papenoo (Illustration 62). La notice de la carte indique que ces formations présentent deux faciès distincts : un agglomérat bréchique composé de roches grenues dans un ciment argilo-volcanique cohérent d'une part et des coulées massives de lave basaltique sub-compacte d'autre part. L'hypothèse reste à confirmer mais ces faciès pourraient présenter des signatures géoélectriques différentes.

Les observations réalisées par les géologues au cours de la mission de février 2018 ont par ailleurs mis en évidence la présence de coulées de débris liées à l'effondrement de l'édifice volcanique qui n'ont pas été décrites dans la notice de la carte géologique de Tahiti en 1965. Ces coulées se situeraient entre les laves basaltiques anciennes β 1 et celles liées à l'épanchement terminal β 2.



Illustration 62 : Implantation du profil PAP1.

Les résultats de la tomographie électrique obtenue au droit du profil **PAP1** mettent en évidence (Illustration 63) :

- un horizon conducteur C1 (ρ < 150 Ω .m) dont le toit se situe entre 40 et 70 m de profondeur et dont l'épaisseur dépasse les 140 m. Il s'agit vraisemblablement de la frange supérieure, relativement altérée, des coulées basaltiques issues de l'épanchement principal β 1 ;
- un horizon résistant R1 (200 < ρ < 500 Ω.m) d'une épaisseur de 30 à 45 m qui recouvre C1 sur l'ensemble du profil. Celui-ci pourrait correspondre à une coulée de débris ou à une coulée basaltique plus récente que celle composant C1 ;
- un horizon conducteur C2 (ρ < 150 Ω.m) de faible épaisseur (inférieure à 10 m) et dont le toit se trouve à moins de 15 m de profondeur surmontant R1 sur l'ensemble du profil. La moins bonne détection de cet horizon dans la partie nord-est du profil pourrait s'expliquer par une plus faible épaisseur au regard de la résolution du dispositif de mesure. Il pourrait s'agir d'une frange altérée des coulées sous-jacentes (R1) ou d'une coulée de nature différente que celle associée à R1. Dans ce cas, la plus faible résistivité pourrait être liée à une argilosité plus importante ;
- en surface, un horizon résistant affleurant sur toute la longueur du profil pouvant être décomposé de la manière suivante : R2 (300 < ρ < 600 Ω.m) dont l'épaisseur est inférieure à 15 m à l'extrémité sud-ouest du profil (abscisse 0 à 80 m) et sur la moitié nord-est (abscisse 410 à 950 m) ; R2' (ρ > 800 Ω.m) d'épaisseur comparable à celle de R2, observé entre les abscisses 80 et 410 m. Ces deux ensembles résistants sont probablement associés aux dépôts alluvionnaires. La résistivité plus importante de R2' pourrait être liée aux apports de la rivière Vaiputoa qui rejoint celle de la Papenoo au niveau de la moitié sud-ouest du profil PAP1. Il pourrait également s'agir d'une coulée de débris plus tardive ;
- le passage d'une conduite forcée à proximité des électrodes 84 à 96 (abscisses 830 à 950 m) qui a dégradé les mesures et mené à l'apparition d'un artefact à l'extrémité NNE du profil.
 Dans ces conditions, la partie correspondante de la coupe a été masquée.



Illustration 63 : Coupe de résistivité vraie obtenue au droit du profil PAP1.

D'après la carte géologique, les profils **PAP2 et PAP3** sont implantés au droit des formations « andésitiques » de Papenoo-Vaitepiha (α g) (Illustration 64). Ces dernières se présentent sous la forme d'un empilement de coulées de laves compactes peu épaisses et peu scoriacées au sein desquelles s'intercalent des sills (Deneufbourg, 1965).



Illustration 64 : Implantation des profils PAP2 et PAP3.

Le profil **PAP2** a été implanté juste en amont de la centrale hydroélectrique « Papenoo 2 ». Du fait de la présence de conduites forcées dans ce secteur, les mesures ont été fortement perturbées, notamment au centre du profil (partie masquée de la coupe). Le reste de la coupe géoélectrique permet néanmoins d'identifier (Illustration 65) :
- un substratum résistant R1 (120 < ρ < 200 Ω.m) dont le toit se trouve à une profondeur de 40 à 50 m et dont l'épaisseur est supérieure à 70 m. Cet horizon est interprété comme correspondant aux formations « andésitiques » de Papenoo-Vaitepiha αg ;
- un horizon plus conducteur C1 surmontant R1 dont l'épaisseur varie de 20 à 50 m et correspondant vraisemblablement à la frange altérée des formations andésitiques sousjacentes;
- les formations alluvio-détritiques de la vallée de la Papenoo entre les abscisses 190 m et 440 m qui constituent un résistant R2 (ρ > 250 Ω.m) dont l'épaisseur atteint 10 m environ ;
- à l'extrémité sud-est du profil (abscisses 540 à 620 m), un horizon résistant comparable R2' qui est probablement lié aux dépôts alluvionnaires de la rivière Vainavenave.

Plus en amont dans la vallée, le profil **PAP3** a été implanté au niveau du village de Fare Hape où il recoupe 2 fois la rivière Maroto dans l'un de ces méandres. D'après la carte géologique, le profil ne recoupe que les formations andésitiques αg mais la présence de formations de remplissage R est signalée non loin du tracé, sur les reliefs environnants.

Dans ce cas aussi, les mesures ont été fortement perturbées par la présence d'une canalisation et/ou d'une ligne électrique passant le long de la piste principale au niveau de l'abscisse 400 m. Elles ont toutefois permis d'identifier (Illustration 66) :

- un substratum résistant R1 (120 < ρ < 250 Ω.m) dont l'épaisseur n'est pas mise en évidence mais dont le toit se trouve à une profondeur d'environ 15-30 m. Cet horizon correspond probablement aux formations « andésitiques » de Papenoo-Vaitepiha αg ;
- un horizon conducteur C1 surmontant R1 dont l'épaisseur ne dépasse pas 20 m et dont la résistivité est comprise entre 20 et 80 Ω.m. Il s'agit vraisemblablement de la partie plus altérée des andésites αg ;
- un ensemble de résistants dont l'épaisseur est de l'ordre de 10-15 m dans la partie superficielle de la coupe. R2 et R2' (200 < ρ < 300 Ω.m) peuvent respectivement être associés aux dépôts alluvionnaires des rivières Maroto et Vaitopaa, tandis que R3 et R3' (ρ > 450 Ω.m) semble correspondre à des colluvions provenant des pentes environnantes.



Illustration 65 : Coupe de résistivité vraie obtenue au droit du profil PAP2.



Illustration 66 : Coupe de résistivité vraie obtenue au droit du profil PAP3.

3.3.3. Synthèse

Les investigations par tomographies électriques réalisées dans la vallée de la Papenoo ont permis de préciser l'agencement des formations géologiques au droit de 3 secteurs.

Elles ont notamment permis de montrer que les dépôts alluvionnaires à la confluence entre la Vaiputoa et la Papenoo semblaient être homogènes sur une puissance d'environ 10 à 15 mètres. Ces derniers reposent sur des coulées de débris d'environ 40 mètres d'épaisseur dont le sommet est altéré et dont le substratum est constitué par la partie supérieure, également altérée, des coulées basaltiques issues de l'épanchement principal du premier volcan bouclier.

Dans ce secteur, la présence de ressources en eaux souterraines profondes est peu probable. Les coulées de débris et les coulées basaltiques altérées ne représentant pas, a priori, de bons réservoirs. Dans ces conditions, seul l'aquifère alluvial dont la vulnérabilité peut être considérée comme forte du fait de son caractère superficiel et de sa faible épaisseur pourrait constituer une cible pour la recherche de ressources.

Dans la haute vallée, les profils géoélectriques ont permis d'imager des formations détritiques alluviales et colluviales présentant une dizaine de mètres d'épaisseur. Ces dernières reposent directement sur les formations andésitiques de la Papenoo, d'abord sur un horizon altéré dont l'épaisseur peut atteindre 50 m mais qui est généralement plus réduite, puis sur les coulées andésitiques plus saines.

Les reconnaissances géologiques menées dans ce secteur ont permis d'identifier des circulations d'eau dans les formations andésitiques. Ces dernières sont entrecoupées par de nombreux dykes qui peuvent contribuer à connecter ou inversement, à compartimenter les réserves en eau.

Si d'un point de vue quantitatif les andésites peuvent constituer une cible intéressante, les remontées gazeuses observées au cœur de l'île sont localement à l'origine de très faibles pH qui sont incompatibles avec la production d'eau potable. Dans ces conditions, la recherche de ressources exploitables par forage peut se révéler très aléatoire.

Au final, il apparaît que les secteurs investigués peuvent receler des ressources en eau intéressantes mais leur qualité reste incertaine soit en raison du caractère superficiel de l'aquifère (cas de la moyenne vallée) soit en raison des remontées gazeuses qui peuvent conférer un caractère acide aux eaux (cas de la haute vallée).

4. Bassin versant de la Punaruu

Le bassin versant de la Punaruu est le 2^{ème} plus grand de l'île de Tahiti avec 44 km². Il s'étend sur une longueur de 14,5 km et présente une orientation est-ouest. Le bassin versant est délimité par certains des plus hauts sommets de l'île : Mont Tuhi (1 401 m), Mont Marau (1 493 m), Aorai (2 066 m), Orohena (2 241 m), Teamaa (1 529 m) et Mahutaa(1 502 m) (Illustration 67).

La haute vallée, d'une longueur de 8,5 km et d'une largeur comprise entre 4 et 5 km, représente près de 80% de la superficie du bassin versant. Elle se caractérise par d'imposants plateaux dont le plus important est celui de Tamanu. Dans ce secteur, le lit de la rivière est très encaissé et se caractérise par de nombreux méandres.

Plus en aval, la moyenne vallée s'étend sur environ 3 km entre la limite ouest du plateau de Tamanu et les premiers bâtiments industriels. La basse vallée correspond à la zone située entre cette limite et l'embouchure. Il s'agit d'une zone très industrialisée qui rassemble entre autres la centrale thermique de EDT, les installations de production de la Brasserie de Tahiti ainsi que plusieurs entreprises de production de granulats.

Au droit de cette zone, la morphologie de la rivière a été profondément modifiée en raison d'une exploitation intensive des alluvions lors des dernières décennies.

La vallée de la Punaruu présente également un intérêt stratégique pour l'alimentation en eau potable de plusieurs communes de la côte ouest. En effet, à la limite entre la moyenne et la haute vallée, le captage intercommunal de Te Oropaa, capte près de 500 l/s et contribue à l'alimentation en eau des communes de Paea, Punaauia et Faa'a (Illustration 67).

Compte tenu des difficultés d'accès à la partie amont du bassin versant et des projets de développement de la zone industrielle, l'étude menée par le BRGM s'est focalisée sur la zone comprise entre le captage et l'embouchure de la rivière.



Illustration 67 : Localisation du bassin versant de la Punaruu sur l'île de Tahiti.

4.1. APPROCHE GÉOLOGIQUE

4.1.1. Données issues de la bibliographique

En 1965, Deneufbourg a attribué les contreforts du bassin versant aux laves basaltiques issues de l'épanchement principal (représentées en vert) et les plateaux de la haute vallée aux formations de remplissage des vallées (représentées en bleu) (Illustration 68).

Des formations alluvio-torrentielles détritiques de fond de vallée (représentées en orange) ont quant à elles été cartographiées dans la basse et la moyenne vallée ainsi qu'au pied des remparts de la zone amont.

En 2004, compte tenu des datations réalisées, Hildenbrand *et al.* a considéré que la vallée de la Punaruu était constituée par les épanchements du bouclier principal et que le plateau de Tamanu était issu d'un remplissage de lave fluide porphyrique provenant de la formation du deuxième bouclier (Illustration 69).



Illustration 68 : Géologie du bassin versant de la Punaruu d'après Deneufbourg (1965).



Illustration 69 : Unités volcano-structurales d'après Hildenbrand et al. (2004).

Reconnu par quelques forages, le remplissage alluvionnaire semble par ailleurs très hétérogène. Sur les premières dizaines de mètres, les alluvions présentent une granulométrie variable et une alternance de passages colmatés et de couches perméables. Ce niveau surmonte un horizon argilo-limoneux imperméable de quelques mètres d'épaisseur contenant des galets de petites tailles. Plus en profondeur (vers 40 m), une incertitude demeure sur la nature des horizons fissurés rencontrés (alluvions compactées ou lahars). L'ensemble repose sur les coulées basaltiques de l'épanchement principal.

4.1.2. Reconnaissances de terrain

Les investigations géologiques ont été menées du 26 février au 1^{er} mars 2018 et ont concerné, comme indiqué plus haut, la basse et la moyenne vallée de la Punaruu. Le cours de la Vaiopu, affluent de rive droite rejoignant le cours d'eau principal peu avant l'embouchure, a également été remonté.

Au total, 45 points d'intérêt ont pu être recensés au droit des itinéraires parcourus. Ils ont été représentés sur l'Illustration 70 et leurs caractéristiques (type d'affleurement, pétrologie, degré de fracturation et d'altération...) ont été précisées en Annexe 1.



Illustration 70 : Localisation et lithologie des points d'intérêt identifiés dans la vallée de la Punaruu.

Au final, 5 types de formations ont pu être reconnus.

<u>Les laves basaltiques :</u> elles constituent la principale formation géologique de la zone étudiée (24 affleurements recensés). Elles se présentent sous la forme d'empilements de coulées de lave scoriacées d'épaisseurs très variables (Illustration 71). Elles constituent notamment l'essentiel du flanc nord de la vallée jusqu'à son sommet où l'on trouve des couches de cendres en alternance. La lave est généralement très vacuolaire et présente souvent des phénocristaux d'olivine altérée, ainsi que des pyroxènes et des feldspaths.

Les coulées de débris : non cartographiées par Deneufbourg (1965), on retrouve néanmoins ces formations (18 affleurements recensés) en rive gauche près de l'embouchure, dans le fond de la rivière ou sous forme de grands plaquages contre les falaises de laves basaltiques scoriacés côté nord et sous forme de falaises de plusieurs dizaines de mètres de haut au pied du plateau de Tamanu (Illustration 71). Il s'agit de formations constituées de blocs anguleux (parfois de

dimensions métriques) pris dans une matrice argileuse indurée dont la mise en place est probablement liée aux avalanches de débris qui ont affecté le volcan primaire aux alentours de 0,85 Ma.

Les altérites : peu présentes dans la zone, on les retrouve néanmoins au sommet des coulées de débris et en recouvrement des basaltes.

<u>Les alluvions :</u> des dépôts alluvionnaires anciens peuvent être identifiés à plusieurs mètres, voire dizaines de mètres de haut par rapport au cours d'eau actuel, notamment dans la basse vallée. Ces dépôts grano-classés peuvent former des reliefs reliques et sont généralement au contact direct des laves scoriacées. Ils témoignent de l'encaissement de la rivière. Les alluvions récentes sont quant à elles bien développées mais sont exploitées de façon importante pour la production de matériaux de construction, ce qui engendre un enfoncement du lit.

Les éboulis : on les retrouve dans les secteurs escarpés en pied de plateau.

À noter que quelques dykes ont également été recensés au droit de la zone étudiée (Illustration 71). Ils sont généralement constitués par une lave aphyrique (sans cristaux) de teinte gris clair. Ils ne présentent pas d'orientation préférentielle et recoupent aussi bien les coulées de laves anciennes que les coulées de débris.



Illustration 71 : Exemples de lithologies rencontrées sur le terrain. Gauche = empilement de coulées de laves scoriacées ; Milieu = coulée de débris de plusieurs dizaines de mètres de haut ; Droite = dyke recoupant les laves scoriacées.

4.1.3. Synthèse géologique

De nombreux affleurements de laves basaltiques scoriacées ont été identifiés dans la vallée. Après leur mise en place aux alentours de 1,2 Ma, ces empilements semblent avoir connu un ou plusieurs effondrements sectoriels comme en témoignent les coulées de débris, très présentes en rive gauche de la Punaruu.

Dans ces conditions, le soubassement de la vallée de la Punaruu pourrait potentiellement être fortement compartimenté par les coulées de laves scoriacées perméables, les coulées de débris imperméables et les dépôts alluvionnaires très épais.

Compte tenu de ces observations, il est possible d'imaginer la coupe schématique suivante (Illustration 72). À noter que les basaltes tardifs cartographiés par Deneufbourg (en bleu) et rencontrés dans la Papenoo n'ont pas été identifiés au droit de la zone d'étude.



Illustration 72 : Coupe schématique de la vallée de la Punaruu.

4.2. APPROCHE HYDROGÉOLOGIQUE

4.2.1. Données issues de la bibliographie

Lors de l'inventaire réalisé par Ozog et Vernoux (2012), 12 forages ont été recensés au droit de la zone industrielle de la Punaruu (Illustration 73). Les informations relatives à ces forages (Annexe 2) sont relativement disparates mais ont pu être synthétisées dans l'Illustration 74.

Leurs profondeurs varient entre 35 et 161 m et la plupart captent les formations alluviales. Les pompages d'essai menés sur les forages FOR_V047 (EDT F2) et FOR_V049 (Tahiti Agrégats) ont mis en évidence des valeurs de transmissivité et d'emmagasinement relativement importantes.



Illustration 73 : Localisation des forages présents dans la vallée de la Punaruu.

ID Forage	Nom Forage	Statut	Z (m)	Profondeur (m)	Distance à la côte	Aquifère capté	Année réalisation	Etat	Usage	T (m2/s)	s
FOR_V043	Brasserie F1	Privé	18	76,8	1202	Alluvial	1984	Exploité	Industriel		
FOR_V044	Brasserie F2	Privé	18	127	1212	Alluvial	1988	Exploité	Industriel		
FOR_V045	Brasserie F3	Privé	17,5	161	1174	Basal?	2000	Exploité	Industriel		
FOR_V046	EDT F1	Privé	22	37	1356	Alluvial	1986	Exploité	Industriel		
FOR_V047	EDT F2	Privé	20	35	1298	Alluvial	1988	Exploité	Industriel	1,23.10-2	2,88.10-1
FOR_V048	Salaisons	Privé	19	?	1170	?	?	Non exploité	Industriel		
FOR_V049	SA Tahiti Agrégats	Privé	75	90	2202	Basal	2004	Exploité	Industriel	1,52.10-3	
FOR_V050	SOTAP	Privé	23	?	1454	Alluvial	?	Exploité	Industriel		
FOR_V084	BTP	Privé	42,37	50	2444	Alluvial	2009	Exploité	Industriel		
FOR_V093	Rive Gauche Punaruu	Communal	15	90	772	Aucun	1988	Non Exploité	Reconnaissance		
FOR_V042	Vaiopu	Communal	48,5	90	958	Basal	1990	Exploité	AEP		
FOR_V091	Vaiopu (reconaissance)	Communal	49	90	953	Basal	1989	Non exploité	Reconaissance		

Illustration 74 : Informations sur les forages de la Punaruu.

La prise en compte des éléments mentionnés sur les coupes géologiques et techniques disponibles a permis d'établir l'Illustration 75. À noter que la qualité des informations varie d'un ouvrage à l'autre. Aucune information relative à la position des crépines n'a par exemple été retrouvée pour l'ouvrage F1 de la Brasserie de Tahiti.



Illustration 75 : Coupe interprétative établie à partie des informations disponibles sur les forages de la Brasserie de Tahiti, d'EDT et de Tahiti Agrégats (les valeurs mentionnées en brun et en bleu correspondent respectivement aux profondeurs des formations géologiques et des niveaux aquifères exprimées en mètres).

Ce schéma est en accord avec les conclusions de la SPEED (2006) qui avait recensé 3 niveaux aquifères au niveau de la basse vallée de la Punaruu :

- une première nappe libre contenue dans une passée sableuse de faible épaisseur à moins de 10 m de profondeur. Son intérêt avait été jugé faible compte tenu de sa vulnérabilité aux pollutions de surface ;
- une seconde nappe comprise entre 25 et 33 m de profondeur qui est exploitée par les forages de EDT et de la SOTAP. Cet aquifère qui présente une largeur de 300 mètres pour environ 2 km de long pourrait être connecté aux nappes périphériques circulant dans le massif basaltique environnant. Les essais de pompages réalisés dans cette nappe ont mis en évidence une transmissivité moyenne de 2,2.10⁻² m²/s et un coefficient d'emmagasinement de 2,9.10⁻¹;
- une troisième nappe captive de bonne qualité chimique située sous les niveaux argileux repérés entre 33 et 39 m de profondeur sur F1 et entre 40 et 47 m sur F3 au droit de la Brasserie de Tahiti.

À l'occasion de travaux de thèse sur la modélisation des écoulements de surface et souterrains de la vallée de la Punaruu, Aureau (2014) a proposé un schéma un peu plus complexe où coexistent 4 entités (Illustration 76) :

- une nappe supérieure libre et périodique (NSLP). Il s'agit de la nappe alluviale située entre 0 et 15 m de profondeur. Aureau (2014) émet l'hypothèse d'une alimentation de cette dernière par la rivière et d'une nature périodique compte tenu des nombreux assecs de la rivière ;
- une nappe alluviale intermédiaire (NAI) composée d'une couche d'alluvions de granulométrie moyenne se situant sous l'aquifère précédent. Il s'agit de la nappe sollicitée par les forages d'EDT;
- une nappe inférieure semi-captive (NISC), d'une puissance comprise entre 10 et 25 m, s'écoulant dans une structure alluvionnaire de granulométrie moyenne à grande, entre un niveau argileux et les coulées basaltiques sous-jacentes. Il s'agit de la nappe sollicitée par le forage F1 de la Brasserie de Tahiti ;
- une nappe basaltique fracturée (NBF), située à environ 40 m sous le niveau de la mer. Il s'agit de la nappe sollicitée par les forages F2 et F3 de la Brasserie de Tahiti. Cette dernière pourrait être alimentée par l'infiltration des eaux météoriques au droit des sommets qui forment les crêtes du bassin versant.



Illustration 76 : Schéma hydrogéologique de la basse vallée de la Punaruu (Aureau, 2014).

Si la piézométrie observée au droit de l'ouvrage BdT F1 (plus élevée que celles observées sur EDT F1 et F2 alors que l'ouvrage se situe à plus basse altitude) suggère que la nappe NISC est bien en charge au droit de cet ouvrage, la similitude des variations piézométriques observées pour ces 3 ouvrages sur l'Illustration 77 laisse supposer d'étroites connexions entre la NAI et la NISC en amont de la zone de captage.

Sur la base d'une différence de 22 m entre le sommet de la couche argileuse et le niveau piézométrique (observations réalisées au droit de l'ouvrage BdT F1) et d'un gradient hydraulique supposé équivalent à la pente topographique, il a été possible d'évaluer à 1 170 m, la distance au-delà de laquelle les 2 nappes seraient en connexion (Illustration 78).

Il conviendra, dans la mesure du possible, de vérifier cette hypothèse par le biais des prospections géophysiques qui se dérouleront notamment en limite de la zone industrielle.



Illustration 77 : Suivi des niveaux piézométriques sur plusieurs forages de la vallée de la Punaruu entre octobre et décembre 2011(Aureau, 2014).



Illustration 78 : Estimation de l'étendue de la couche argileuse séparant les nappes NAI et NISC (Aureau, 2014).

4.2.2. Reconnaissances de terrain

Les reconnaissances hydrogéologiques se sont déroulées du 26 février au 1^{er} mars 2018, de façon synchrone aux investigations géologiques. Elles ont essentiellement concerné le cours d'eau de la Punaruu en aval du captage de Te Oropa (Illustration 79) et le cours de la Vaiopu (affluent de rive droite dont la confluence se situe un peu avant l'embouchure).

Lors de ces investigations, tous les points d'intérêt identifiés (sources, suintements, pertes...) ont été répertoriés et caractérisés du point de vue de leur débit et de leur qualité lorsque cela a été possible (Illustration 80 et Annexe 3). Des mesures physico-chimiques ont également été réalisées directement dans les cours d'eau.

Du point de vue des débits, aucune émergence majeure n'a été repérée.

Du point de vue de la qualité, une augmentation de la conductivité électrique de l'eau de la rivière a été observée d'amont en aval de la Vaiopu entre les points 655 (128 μ S/cm), 657 (131 μ S/cm), 653 (236 μ S/cm) et 658 (364 μ S/cm) (Illustration 81). Ces valeurs sont inférieures à la conductivité mesurée sur le point 654 (355 μ S/cm) qui correspond à une source autour de laquelle des dépôts de couleur orange ont été observés. Des valeurs de pH également différentes entre eaux souterraines (6,4 sur le point 654) et superficielles (valeurs supérieures à 7 et augmentant d'amont en aval) ont aussi été observées (Illustration 82). Dans ce secteur, un contraste physicochimique semble donc exister en fonction de l'origine de l'eau.

Dans la vallée de la Punaruu proprement dite, les mesures effectuées ont mis en évidence des conductivités généralement comprises entre 200 et 300 μ S/cm et des pH supérieurs à 7,5 sans évolution spatiale particulière.

Les conductivités des eaux superficielles légèrement plus élevées que dans la Papenoo pourraient s'expliquer par des phénomènes de contamination anthropique liés à la présence de quelques habitations entre le fond de la zone industrielle et le début de la moyenne vallée mais également par des temps de contact eau/roche plus importants et des formations lithologiques différentes.



Illustration 79 : Vue de la Punaruu (vers l'amont) à la limite entre la haute et la moyenne vallée.



Illustration 80 : Points d'intérêt inventoriés sur le bassin versant de la Punaruu.



Illustration 81 : Conductivités mesurées dans la Punaruu.



Illustration 82 : Valeurs de pH mesurées dans la Punaruu.

4.2.3. Éléments de bilan

Comme pour le bassin versant de la Papenoo, une approche visant à évaluer les modalités de recharge de l'aquifère a été menée. Elle a consisté dans un premier temps à calculer les pluies efficaces en utilisant le logiciel ESPERE (Lanini et Caballero, 2015) puis dans un second temps, à estimer le taux d'infiltration à l'aide des données pluviométriques et limnimétriques disponibles. Ces deux volets sont décrits après une description des données disponibles.

> Données disponibles

Le bassin versant de la Punaruu est équipé de 3 pluviomètres et d'une station limnimétrique. Météo France gère la station météorologique P6 située à l'aval de la vallée, à une altitude de 41 m. Les données pluviométriques y sont enregistrées depuis janvier 1988. Le GEGDP gère, quant à lui, deux autres pluviomètres respectivement situés à des altitudes de 1 410 m (P0 mis en place en 1987) et 580 m (P1 mis en place en 1991) et la station limnimétrique L2 (Illustration 83).

Les chroniques disponibles présentent des lacunes. Si ces dernières peuvent être bien identifiées pour le poste de Météo France (avril 1999, août et novembre 2015), il n'en va pas de même pour les postes du GEGDP où les données manquantes ont été remplacées par des 0. Dans ces conditions, on ne sait pas si la donnée est réellement manquante ou s'il n'y a simplement pas eu de précipitation.

Malgré ces incertitudes, les précipitations mensuelles moyennes ont été calculées sur les 3 postes. L'Illustration 84 met logiquement en évidence une augmentation des précipitations avec l'altitude. Le cumul moyen annuel atteint 2 795 mm à 1 410 m d'altitude, 2 100 mm à 580 m d'altitude et 1 705 mm à 10 m d'altitude avec les deux dernières valeurs qui sont probablement minorées en raison des lacunes évoquées plus haut (25 % de valeurs égales à 0 sur P0 et 49 % sur P1). Ces données permettent de calculer un gradient pluviométrique de 125 mm/100 m.

L'ETP n'étant calculée que sur la station météorologique de référence de Faa'a, ce sont les données relatives à cette station qui seront utilisées par la suite. Les valeurs journalières oscillent entre 0,4 et 8,9 mm pour une moyenne de 4,6 mm sur la période 1971-2018.

D'après Petit (1969), ces valeurs ne sont pas totalement représentatives des conditions d'évaporation réelle sur le terrain, la station de Faa'a étant située dans une des zones les plus ensoleillées de l'île. Compte tenu de sa proximité par rapport au bassin versant étudié, il n'a toutefois pas été appliqué de coefficient de minoration sur les valeurs disponibles.

Le suivi des débits est assuré par le biais d'une seule station limnimétrique (L2) située au niveau du captage de Te Oropa, à la limite entre la moyenne et la haute vallée.



Les hauteurs d'eau y sont enregistrées janvier 1988 mais la chronique disponible met en

Illustration 85). Sur la base des années complètes disponibles (2012 puis 2014 à 2018), les débits moyens mensuels ont été calculés et représentés sur l'Illustration 86. Il apparaît que les valeurs varient dans un rapport de 1 à 4 entre les plus bas débits observés en juillet, août et septembre (Qmoyen< 2 m³/s) et les plus forts observés en janvier, février et mars (Qmoyen >8 m³/s). Sur la période considérée, le débit moyen journalier atteint 4,21 m³/s.

Les valeurs caractéristiques du débit mentionnées par Lafforgue (1993) dans l'Atlas de la Polynésie française ont également été présentées (Illustration 87). Elles font référence à une station de mesure située légèrement en aval par rapport à la station actuelle et à un bassin versant jaugé de 39,2 km².

Il apparaît que le débit moyen annuel estimé sur la période 1973-1983 (2,48 m³/s) est nettement inférieur à celui établi à partir des données relatives à L2. Les prélèvements effectués sur le captage de Te Oropa (environ 175 l/s en 2017 pour un volume total annuel de 5,6 Mm³) ne suffisent pas à expliquer la différence même s'ils ont été plus importants dans le passé.



Illustration 83 : Localisation des stations pluviométriques et limnimétrique au droit du bassin versant de la Punaruu.



Illustration 84 : Cumuls mensuels moyens sur différentes stations pluviométriques du bassin versant de la Punaruu.



Illustration 85 : Hauteurs d'eau et débits journaliers à la station Punaruu L2 depuis 1988.



Illustration 86 : Débits moyens mensuels de la Punaruu à la station L2 pour la période 2012, 2014-2018.

Débit moyen (m3/s)	Débit spécifique moyen (I/s/km²)	Débit de crue médian (m3/s)	Débit spécifique de crue médian (l/s/km ²)	Plus fort débit connu (m3/s) (Cyclone 04/1983)	Débit d'étiage (m3/s)	Débit spécifique d'étiage (l/s/km²)
2,48	63	133	3390	383	0,47	11,9

Illustration 87 : Débits caractéristiques de la vallée de la Punaruu pour la période 1973-1983 (ORSTOM, 1993).

> Pluies efficaces

De la même façon que pour le bassin versant de la Papenoo, le logiciel BRGM ESPERE (Lanini et Caballero 2015) a permis d'estimer l'ETR et les pluies efficaces pour différentes valeurs de RFU (Illustration 88).

Les calculs ont été menés à partir des données enregistrées sur P0 (jugées plus fiables que celles de l'ouvrage P1) sur la période 2014-2017. Comparés à la pluviométrie moyenne observée sur la période (3 472,9 mm), les pluies efficaces représentent 54 à 72 % des précipitations totales pour une RFU comprise entre 5 et 100 mm.

	RFU 5mm	RFU 10mm	RFU 20 mm	RFU 50 mm	RFU 100 mm
Janvier	547,4	533 <i>,</i> 8	518,2	499,7	494,7
Février	582,5	570,8	555,6	535,1	532,6
Mars	403,3	387,7	367,0	349,6	349,1
Avril	133,5	120,9	109,6	102,7	102,7
Mai	62,6	52,4	36,8	16,8	9,7
Juin	117,2	105,2	88,6	64,6	46,9
Juillet	25,9	22,1	14,3	0,7	0,0
Août	39,6	31,0	18,5	1,9	0,0
Septembre	42,6	33,3	24,4	5,6	0,0
Octobre	108,0	95,3	82,5	61,9	46,3
Novembre	127,9	116,1	96,9	64,2	44,9
Décembre	319,7	305,0	286,3	264,6	239,9
Total	2510,0	2373,4	2198,5	1967,3	1866,6
% Pluie moyenne	0,72	0,68	0,63	0,57	0,54

Illustration 88 : Analyse de sensibilité de la pluie efficace (= recharge) à la RFU max, calculée au moyen de la formule de Thornwaithe.

Afin d'estimer le coefficient le plus proche de la réalité et d'en déduire la RFU associée, une analyse du comportement du débit a été menée dans un contexte de sous-saturation des sols (RFU vide).

Elle a porté sur les données enregistrées au droit du limnimètre L2 sur la période juillet/août 2016 (Illustration 89). Il apparaît que de très faibles épisodes pluvieux comme ceux du 1^{er} ou du 14 août (cumuls inférieurs à 5 mm) ont suffi à provoquer des augmentations de débit.

Dans ces conditions, il est proposé de retenir une valeur de 5 mm pour la RFU ainsi qu'un coefficient de 72 % pour la part des précipitations efficaces par rapport aux précipitations totales (Illustration 90).

Sur la base d'une pluviométrie de 3 472,9 mm et à l'échelle d'un bassin versant de 44 km², le volume susceptible de ruisseler ou de s'infiltrer représenterait donc 110 M m³ par an. Ce volume ayant été approché avec les données du pluviomètre situé à la plus haute altitude et sur une période plus pluvieuse qu'en moyenne, il est proposé de mener un nouveau calcul en retenant une pluviométrie de 2 100 mm (caractéristique de l'altitude 580 m). Il permet d'aboutir à un volume de 66 M m³ par an. À partir de cette évaluation, l'enjeu consiste désormais à savoir comment ce volume se répartit entre ruissellement et infiltration.



Illustration 89 : Évolution de la pluviométrie sur P0 et du débit sur L2 sur la période juillet/août 2016.



Illustration 90 : Pluies efficaces moyennes mensuelles calculées sur la période 2014-2017.

> Ruissellement et infiltration

Une analyse similaire à celle menée sur le bassin de la Papenoo a été mise en oeuvre pour tenter d'approcher le coefficient de ruissellement qui caractérise le bassin versant de la Punaruu.

La comparaison de la lame d'eau écoulée au niveau de la station limnimétrique à la lame d'eau précipitée a été opérée sur la période allant du 25 octobre au 4 novembre 2016.

Sur cet intervalle de temps, la pluie du 26 octobre 2016 (66,5 mm sur P0) a induit une nette augmentation du débit moyen journalier au niveau de la station L2 (Illustration 91). Celui-ci est en effet passé de 0,8 m³/s à 12,3 m³/s. L'impact de cet épisode pluvieux important s'est poursuivi jusqu'au 4 novembre 2016, date à laquelle le débit a quasiment retrouvé sa valeur de base (0,87 m³/s). Du 26 octobre 2016 au 4 novembre 2016, le volume excédentaire écoulé a pu être évalué à 1,65 millions de m³. Rapportée à la superficie du bassin versant jaugé (37 km²), cette augmentation représente une lame d'eau ruisselée de près de 45 mm, soit environ 65 % du total des précipitations.

Cette valeur paraît cohérente par rapport aux observations de terrain. Elle est également du même ordre de grandeur que la valeur mentionnée pour le bassin versant étudié (56 %) dans l'Atlas de la Polynésie française (Laforgue, 1993).



Illustration 91 : Variation du débit de la Punaruu entre fin octobre et début novembre 2016.

4.2.4. Réinterprétation de pompages d'essai

Il apparaît que 5 forages de la basse vallée de la Punaruu ont fait l'objet d'essais de pompage dans le passé. Ces tests ont été menés sur les forages F1, F2 et F3 de la Brasserie de Tahiti, le forage F2 d'EDT ainsi que sur le forage de Tahiti Agrégats (Illustration 92).

Les données relatives aux essais ont été compilées en Annexe 4 en vue d'une réinterprétation par des techniques novatrices adaptées à la complexité des aquifères volcaniques ; l'objectif étant de réestimer les paramètres hydrodynamiques (transmissivité et emmagasinement) et de préciser la géométrie de l'aquifère (conditions limites).



Illustration 92 : Localisation des forages ayant fait l'objet d'une réinterprétation.

> Méthodologie utilisée pour la réinterprétation des essais de pompage

En domaine volcanique, l'interprétation des essais de pompage peut être complexe en raison de l'hétérogénéité des formations (empilement de séries de perméabilités différentes, géométrie variable des coulées basaltiques et des dépôts alluvionnaires...).

La méthodologie à laquelle le BRGM a eu recours pour réinterpréter les essais existants repose sur l'interprétation de la courbe de dérivée logarithmique des rabattements (δ (s) / δ ln(t) ; à la descente ou à la récupération). Cette dernière présente en effet l'avantage de représenter tous les régimes d'écoulement sur un seul et même graphique bi-logarithmique (Bourdet *et al.*, 1983, 1989 ; Spane et Wurstner, 1993) (Illustration 93).

En fait, pour chaque type et/ou géométrie d'aquifère mais aussi pour chaque type de configuration forage-aquifère, il correspond un certain régime ou une succession de certains régimes d'écoulement qu'il est en général possible d'identifier sur la courbe de dérivée (Deruyck *et al.*, 1992 ; Schlumberger, 2002 ; Renard *et al.*, 2009).

Par exemple, un écoulement radial sera caractérisé par une dérivée formant un plateau (pente nulle), l'atteinte de deux limites étanches parallèles par une pente de ½, quatre limites étanches orthogonales (ou tout autre type de réservoir fermé) par une pente unitaire, un captage partiel de l'aquifère par une pente de -½, un effet de drainance par une pente négative infinie, etc.

Le calcul de la dérivée nécessite souvent un traitement par lissage afin d'augmenter le rapport signal sur bruit, bruit engendré soit par des micro-variations du débit et/ou par la sensibilité de l'outil de mesure des niveaux d'eau (sonde manuelle, sonde automatique) mais ce traitement n'altère en rien la qualité des données originelles.

Par contre, si le débit varie de façon significative durant l'essai il est nécessaire de prendre en compte ces variations. La dérivée sera alors calculée à partir des rabattements spécifiques (normalisation par rapport aux variations de débit) et du temps de superposition (fonction aussi des variations de débits).

Une fois la courbe des dérivées construite, le diagnostic consiste à identifier les différents régimes d'écoulement et à en déduire les propriétés du forage (effet de capacité, effet de skin, …) et de l'aquifère (isotropie, anisotropie, limites, présence de fractures verticales, double porosité…). Des relations entre l'aquifère capté et les aquifères sus et sous-jacents (effets de drainance) peuvent également être mises en évidence.

Une fois le diagnostic posé, les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère sont estimés à partir du modèle mathématique le plus approprié. Le modèle conceptuel de l'aquifère est alors validé en jugeant de la pertinence de la modélisation par rapport aux informations géologiques disponibles.



Illustration 93 : Méthodologie mise en œuvre pour réinterpréter les pompages d'essai (méthode des dérivées) et exemple de succession de régimes d'écoulement lors d'un pompage dans un aquifère rectangulaire clos (t_D : temps adimensionnel, s_D (courbe pleine) et s_D' (courbe tiretée) : rabattement et dérivée du rabattement (adimensionnel)).

Résultats obtenus

Forage FOR_V049, Tahiti Agrégats

Le forage FOR_V049 appartenant à la Société Anonyme Tahiti Agrégats est utilisé pour les besoins en eau de la société. Cet ouvrage foré en 2004 capte, d'après la coupe géologique disponible, un horizon aquifère basaltique plus ou moins scoriacé entre 70 et 90 m.

Un essai de pompage par paliers de débit ainsi qu'un essai de pompage de longue durée (24 h) ont été menés sur cet ouvrage en septembre 2006 (Boyer, 2007) (Annexe 4). Ce dernier a permis de calculer une valeur de transmissivité (T) de 1,52.10⁻³ m²/s.

La modélisation des 2 essais est présentée est présentée sur l'Illustration 94 et l'Illustration 95.

La forme des courbes de dérivée des rabattements et les modélisations obtenues montrent qu'il n'existe pas de phénomènes de drainance avec les horizons supérieurs, du moins à l'échelle du temps des pompages.

Elles ont également conduit à retenir un modèle d'aquifère sans limite avec une fracture horizontale pour la détermination des paramètres hydrodynamiques (Illustration 96). Dans le cas présent, cette dernière pourrait représenter une interface très perméable entre deux coulées de type niveau scoriacé.

La transmissivité de l'aquifère capté ainsi déterminée est de l'ordre de 6,0.10⁻³ m²/s (soit 4 fois plus que la valeur initialement déterminée) et son coefficient d'emmagasinement, de l'ordre de 8,0.10⁻⁴ (Illustration 97). Cette dernière valeur est à prendre avec précaution car elle a été estimée au puits de pompage mais elle semble suggérer que l'aquifère est captif dans ce secteur de la basse vallée.



Illustration 94 : Modélisation de l'essai par paliers réalisé en septembre 2006 sur l'ouvrage FOR_V049.



Illustration 95 : Modélisation de l'essai longue durée réalisé en septembre 2006 sur l'ouvrage FOR_V049.



Illustration 96 : Schéma du modèle utilisé pour la détermination des paramètres hydrodynamiques de l'ouvrage FOR_V049 (dans ce cas, α =90°).

	Modèle à fracture horizontale	FOR_V049 (sept.2006)	FOR_V049 (sept.2006)_paliers
	Rayon de l'ouvrage (m)	0.2	0.2
Aquifère pompé	T; Transmissivité (m2/s)	6.00E-03	6.00E-03
Aquifère pompé	S; Emmagasinement (-)	8.00E-04	8.00E-04
Aquifère pompé	B; épaisseur de l'aquifère (m)	21.0	21.0
Aquifère pompé	kh/kv; anis. verticale de perméabilité (-)	1.0	1.0
Fracture	L/2=I/2; demi-long. fracture horizontale (m)	40.0	40.0
Fracture	zf; position de la fracture en prof. (m)	9.5	9.5
Semi-perm.	k'; Perm. éponte (m/s)	-	-
Semi-perm.	e'; épaisseur éponte (m)	-	-
Aqui. de surface	T0; Transmissivité (m2/s)	-	-
Aqui. de surface	Sy; Emmagasinement (-)	-	-
Effet de puits	Pertes de charge quadratiques (m-5s2)	19000	20000
Effet de puits	Effet capacité (m)	0.6	0.0

Illustration 97 : Paramètres caractérisant l'aquifère obtenus après réinterprétation des essais de pompage.

• Forage FOR_V047, EDT F2

Le forage FOR_V047 appartenant à la société Électricité de Tahiti (EDT) est utilisé pour les besoins en eau liés au refroidissement de la centrale thermique. Foré en 1988, cet ouvrage d'une profondeur de 35 mètres capte deux horizons aquifères situés dans les alluvions de la Punaruu.

Un essai de pompage par paliers de débit ainsi qu'un essai de pompage de longue durée (136 h) ont été menés sur cet ouvrage en juillet 2006 (SPEED, 2006) (Annexe 4). Ce dernier a permis de déterminer une valeur de transmissivité (T) de 1,23.10⁻² m²/s et un emmagasinement (S) de 2,9.10⁻¹.

La modélisation de l'essai est présentée sur l'Illustration 98.

La forme de la courbe de dérivée du rabattement obtenue et la modélisation montrent qu'il existe un phénomène de drainance avec les horizons supérieurs. Dans ces conditions et compte tenu de l'extension limitée de la nappe alluviale, le modèle d'aquifère retenu correspond à un système multicouche limité dans l'espace (Illustration 99). Les rabattements ont été modélisés au puits de pompage (Forage EDT F2) et sur un piézomètre d'observation situé à 106 m (EDT F1), ce dernier a notamment permis de qualifier avec plus de précision l'emmagasinement de l'aquifère ainsi que sa géométrie.

L'aquifère inférieur capté sur 8 mètres est caractérisé par des propriétés hydrauliques très intéressantes (transmissivité de l'ordre de 3,0.10⁻¹ m²/s et emmagasinent de l'ordre de 2,5.10⁻²) (Illustration 100).

L'aquifère de surface, a priori libre, se caractérise, quant à lui, par une transmissivité de l'ordre de 10^{-3} m²/s et un emmagasinement de 0,16 (Illustration 100).

Le modèle suppose également la présence d'une éponte semi-perméable de faible perméabilité (K = $6,0.10^{-5}$ m/s pour une épaisseur unitaire) entre les 2 horizons (Illustration 100).

Le modèle permet enfin d'estimer l'extension de l'aquifère à 33,6 ha à partir d'une largeur d'environ 280 mètres et d'une longueur de 1,2 km (Illustration 101).



Illustration 98 : Modélisation de l'essai longue durée réalisé sur le forage EDT F2 en juillet 2006.



Illustration 99 : Schéma du modèle utilisé pour la détermination des paramètres hydrodynamiques.

		FOR_V047 - EDT F2 (22-	FOR_V046 - EDT F1
		28/07/2006)	situé 106m
distance	r (m)	0.20	106.00
Transmissivité de l'aquifère capté	T (m ² /s)	3.0E-01	3.0E-01
Emmagasinement de l'aquifère capté	S (-)	2.5E-02	2.5E-02
Epaisseur de l'aquifère	B (m)	19	19
Perméabilité de l'éponte (aquitard)	k' (m/s)	6.0E-05	6.0E-05
Epaisseur de l'éponte	e' (m)	1	. 1
Transmissivité de l'aquifère de surface	$T_o (m^2/s)$	1.0E-03	1.0E-03
Emmagasinement de l'aquifère de surface	Sy (-)	1.6E-01	1.6E-01
Longueur du puits	/ (m)	8.0	8.0
Dist. haut de la partie captée – toit de l'aquifère pour le puits	d (m)	5.0	5.0
Longueur du piézomètre	/' (m)	-	8.0
Dist. haut de la partie captée – toit de l'aquifère du piézomètre	<i>d'</i> (m)	-	0.0
Anisotropie de transmissivité verticale	Th/Tv (-)	1.0	1.0
Anisotropie de transmissivité dans le plan x,y	Tyy/Txx (-)	1.0	1.0
Distance à la 1 ^{ère} limite (a)*	Dist.lim. 1 (min)	0.8	0.8
Distance à la 2 ^{lème} limite (L-a)*	Dist.lim. 2 (min)	19.0	19.0
Distance à la 3 ^{lème} limite (b)*	Dist.lim. 3 (min)	70.0	70.0
Distance à la 4 ^{lème} limite (K-b)*	Dist.lim. 4 (min)	180.0	180.0
Distance à la 1 ^{ère} limite (a)*	Dist.lim. 1 (m)	48.0	48.0
Distance à la 2 ^{lème} limite (L-a)*	Dist.lim. 2 (m)	233.9	233.9
Distance à la 3 ^{lème} limite (b)*	Dist.lim. 3 (m)	449.0	449.0
Distance à la 4 ^{lème} limite (K-b)*	Dist.lim. 4 (m)	720.0	720.0
Capacité du puits	<i>Rc</i> (m)	0.16	-
Pertes de charge quadratiques	C (m ⁻⁵ s ²)	102.0	-

Illustration 100 : Paramètres caractérisant l'aquifère obtenus après modélisation et réinterprétation des essais de pompage au puits EDT F2 et au piézomètre EDT F1.



Illustration 101 : Géométrie de l'aquifère capté par le forage FOR_V047 (EDT F2) ; ObsWell_IN représente le forage EDT F1.

• FOR_V043, FOR_V044 et FOR_V045, Brasserie de Tahiti

Les forages de la société Brasserie de Tahiti, F1 (FOR_V043), F2 (FOR_V044) et F3 (FOR_V045), respectivement forés en 1984, 1988 et 2000, sont utilisés pour les besoins en eau liés aux activités agroalimentaires de la Brasserie (eau de boisson, bière, sodas, jus de fruit...).

Le forage F1, d'une profondeur de 77 mètres capte un principal horizon aquifère entre 39 et 61 mètres de profondeur. La coupe géologique décrit la présence possible de lahars entre 39 et 55 m puis un dernier niveau d'alluvions entre 55 et 61 m mais cet horizon correspond probablement plus à des éléments d'une coulée de débris. Les formations sous-jacentes se sont avérées imperméables jusqu' à 77 m.

Les informations géologiques du forage F2 ne sont pas disponibles mais la coupe technique de l'ouvrage indique la présence de crépines entre 37 et 122 m de profondeur.

Le forage F3, d'une profondeur de 161 mètres, est crépiné de 42 à 105 mètres. La coupe géologique indique la présence de formations basaltiques au moins entre 80 et 161 mètres de profondeur mais aucune information sur les venues d'eau ni sur l'état du forage au-delà de 105 m ne sont disponibles.

Les informations concernant les trois ouvrages ont été récapitulées dans l'Illustration 102.



Illustration 102 : Schéma récapitulatif du sous-sol de la Brasserie de Tahiti.

Plusieurs essais hydrauliques ont été réalisés par la société SPEED (2003) :

- un pompage longue durée sur le forage F1, avec un suivi piézométrique sur les forages F2 et F3, respectivement distants de 18 et 38 mètres ;
- un pompage longue durée sur le forage F2, avec un suivi piézométrique sur les forages F1 et F3, respectivement distants de 18 et 39 mètres ;
- un pompage longue durée sur le forage F3, avec un suivi piézométrique sur les forages F1 et F2, respectivement distants de 38 et 39 mètres ;

cependant, aucune valeur de T ou de S n'a été retrouvée.

L'objectif de la réinterprétation est de déterminer un modèle qui satisfasse les 3 essais, y compris les suivis sur les ouvrages lorsqu'ils servent de piézomètre. Le détail des modélisations est reporté en Annexe 4.

L'analyse des rabattements et de leurs dérivées (Illustration 103) permet d'identifier deux comportements distincts et de supposer la présence de deux niveaux aquifères : un premier dans les formations alluviales (ou les coulées de débris) captées par F1 et un second capté par les forages F2 et F3 à partir de 80 mètres de profondeur. On notera que pour les temps importants, les courbes de dérivées des trois essais convergent vers les mêmes valeurs. Sur le long terme les essais ont donc sollicité l'ensemble de la pile aquifère.



Illustration 103 : Représentation des courbes de rabattement et de leurs dérivées relatives aux essais de pompages menés dans les forages F1, F2 et F3 de la Brasserie de Tahiti.

Lors de l'essai de pompage réalisé sur l'ouvrage F1, un léger rabattement a été observé sur le forage F2 situé à 18 mètres. En revanche, aucun effet n'a été remarqué sur le forage F3 situé à 38 mètres. La courbe représentant la dérivée du rabattement est très bruitée (Illustration 104). Le modèle retenu correspond à un captage complet de l'aquifère capté par F1 sans conditions de limite. Le forage F2, peu influencé par cet essai, est modélisé dans l'aquifère sous-jacent séparé par un niveau semi-perméable (Illustration 105). Les paramètres obtenus sont récapitulés dans l'Illustration 106.

Lors de l'essai de pompage réalisé sur l'ouvrage F2, un rabattement a été observé sur le forage F3 situé à 39 mètres mais une remontée du niveau de ce dernier a été observée avant la fin du pompage. Ceci peut être dû à un effet de recharge ou à l'arrêt d'un pompage effectué dans un ouvrage situé à proximité. Le niveau du forage F1, situé à 18 mètres, n'a quant à lui pas varié lors de l'essai. La forme de la courbe représentant la dérivée (Illustration 107) a permis de retenir un modèle de captage partiel de l'aquifère par F2 sans conditions de limite. Le forage F3 est modélisé dans le même aquifère (Illustration 108). Les paramètres obtenus sont récapitulés dans l'Illustration 109.

Lors de l'essai de pompage réalisé sur l'ouvrage F3, un rabattement a été observé sur le forage F2 situé à 39 mètres. Le niveau piézométrique du forage F1 situé à 38 mètres, n'a en revanche pas subi de variation. La forme de la courbe représentant la dérivée (Illustration 110) a permis de retenir un modèle de captage partiel de l'aquifère par F2 sans conditions de limite. Le forage F3, est modélisé dans le même aquifère (Illustration 111). Les paramètres obtenus sont récapitulés dans l'Illustration 112.



Illustration 104 : Modélisation de l'essai longue durée réalisé sur le forage Brasserie F1.



Illustration 105 : Schéma du modèle utilisé pour la réinterprétation.

distance	r (m)	0.20	18.00
Transmissivité de l'aquifère capté	T (m ² /s)	7.5E-02	7.5E-02
Emmagasinement de l'aquifère capté	S (-)	1.5E-02	1.5E-02
Epaisseur de l'aquifère	B (m)	20	20
Perméabilité de l'éponte (aquitard)	k' (m/s)	2.00E-07	2.00E-07
Epaisseur de l'éponte	e' (m)	1	1
Transmissivité de l'aquifère de surface	$T_o (m^2/s)$	5.0E-03	5.0E-03
Emmagasinement de l'aquifère de surface	Sy (-)	2.0E-03	2.0E-03
Longueur du puits	/ (m)	20	20
Dist. haut de la partie captée – toit de l'aquifère pour le puits	d (m)	0	0
Longueur du piézomètre	/' (m)	-	-
Dist. haut de la partie captée – toit de l'aquifère du piézomètre	d' (m)	-	-
Anisotropie de transmissivité verticale	Th/Tv (-)	-	-
Anisotropie de transmissivité dans le plan x,y	Tyy/Txx (-)	-	-
Distance à la 1 ^{ère} limite (a)*	Dist.lim. 1 (min)	-	-
Distance à la 2 ^{lème} limite (L-a)*	Dist.lim. 2 (min)	-	-
Distance à la 3 ^{ième} limite (b)*	Dist.lim. 3 (min)	-	-
Distance à la 4 ^{ième} limite (K-b)*	Dist.lim. 4 (min)	-	-
Distance à la 1 ^{ère} limite (a)*	Dist.lim. 1 (m)	-	-
Distance à la 2 ^{ième} limite $(L-a)^*$	Dist.lim. 2 (m)	-	-
Distance à la 3 ^{lème} limite (b)*	Dist.lim. 3 (m)	-	-
Distance à la 4 ^{ième} limite (K-b)*	Dist.lim. 4 (m)	-	-
Capacité du puits	<i>Rc</i> (m)	0.16	-
Pertes de charge quadratiques	C (m ⁻⁵ s ²)	1780	-

Illustration 106 : Paramètres obtenus après réinterprétation de l'essai de pompage mené sur le forage Brasserie F1 en 2003.



Illustration 107 : Modélisation de l'essai longue durée réalisé sur le forage Brasserie F2.



Vue en coupe

Illustration 108 : Schéma du modèle utilisé pour la réinterprétation.

		FOR_V044 - Brasserie F2	FOR_V045 - Brasserie
		(2003)	F3_39m
distance	r (m)	0.08	39.00
Transmissivité de l'aquifère capté	$T (m^2/s)$	5.0E-03	5.0E-03
Emmagasinement de l'aquifère capté	S (-)	2.0E-03	2.0E-03
Epaisseur de l'aquifère	B (m)	120	120
Perméabilité de l'éponte (aquitard)	k' (m/s)	2.00E-07	2.00E-07
Epaisseur de l'épont e	e' (m)	1	1
Transmissivité de l'aquifère de surface	T_{a} (m ² /s)	7.5E-02	7.5E-02
Emmagasinement de l'aquifère de surface	Sy (-)	1.5E-02	1.5E-02
Longueur du puits	/ (m)	62	62
Dist. haut de la partie captée - toit de l'aquifère pour le puits	d (m)	0	0
Longueur du piézomètre	/' (m)	-	100
Dist. haut de la partie captée - toit de l'aquifère du piézomètre	d' (m)	-	0
Anisotropie de transmissivité verticale	Th/Tv (-)	-	-
Anisotropie de transmissivité dans le plan x, y	Tyy/Txx (-)	-	-
Distance à la 1 ^{ère} limite (a)*	Dist.lim. 1 (min)	-	-
Distance à la 2 ^{ième} limite (L-a)*	Dist.lim. 2 (min)	-	-
Distance à la 3 ^{ième} limite (b)*	Dist.lim. 3 (min)	-	-
Distance à la 4 ^{ième} limite (K-b)*	Dist.lim. 4 (min)	-	-
Distance à la 1 ^{ère} limite (a)*	Dist.lim. 1 (m)	-	-
Distance à la 2 ^{ième} limite (L-a)*	Dist.lim. 2 (m)	-	-
Distance à la 3 ^{ième} limite (b)*	Dist.lim. 3 (m)	-	-
Distance à la 4 ^{ième} limite (K-b)*	Dist.lim. 4 (m)	-	-
Capacité du puits	<i>Rc</i> (m)	0.1	-
Pertes de charge quadratiques	C (m ³ s ²)	16000	-

Illustration 109 : Paramètres obtenus après réinterprétation de l'essai de pompage mené sur le forage Brasserie F2 en 2003.



Illustration 110 : Modélisation de l'essai longue durée réalisé sur le forage Brasserie F3.



Illustration 111 : Schéma du modèle utilisé pour la réinterprétation.

		FOR_V045 - Brasserie F3	FOR_V044 - Brasserie
		(2003)	F2_39m
distance	r (m)	0.15	39.00
Transmissivité de l'aquifère capté	T (m ² /s)	5.0E-03	5.0E-03
Emmagasinement de l'aquifère capté	S (-)	2.0E-03	2.0E-03
Epaisseur de l'aquifère	B (m)	120	120
Perméabilité de l'éponte (aquitard)	k' (m/s)	2.00E-07	1.40E-06
Epaisseur de l'éponte	e' (m)	1	1
Transmissivité de l'aquifère de surface	$T_o (m^2/s)$	7.5E-02	7.5E-02
Emmagasinement de l'aquifère de surface	Sy (-)	1.5E-02	1.5E-02
Longueur du puits	/ (m)	100	100
Dist. haut de la partie captée – toit de l'aquifère pour le puits	d (m)	0	0
Longueur du piézomètre	/' (m)	-	62
Dist. haut de la partie captée - toit de l'aquifère du piézomètre	d' (m)	-	0
Anisotropie de transmissivité verticale	Th/Tv (-)	-	-
Anisotropie de transmissivité dans le plan x,y	Tyy/Txx (-)	-	-
Distance à la 1 ^{ère} limite (a)*	Dist.lim. 1 (min)	-	-
Distance à la 2 ^{ième} limite (L-a)*	Dist.lim. 2 (min)	-	-
Distance à la 3 ^{ieme} limite (b)*	Dist.lim. 3 (min)	-	-
Distance à la 4 ^{ième} limite (K-b)*	Dist.lim. 4 (min)	-	-
Distance à la 1 ^{ere} limite (α)*	Dist.lim. 1 (m)	-	-
Distance à la 2 ^{ième} limite $(L-\alpha)^*$	Dist.lim. 2 (m)	-	-
Distance à la 3 ^{ieme} limite (b)*	Dist.lim. 3 (m)	-	-
Distance à la 4 ^{ième} limite (K-b)*	Dist.lim. 4 (m)	-	-
Capacité du puits	Rc (m)	0.16	-
Pertes de charge quadratiques	C (m ⁻⁵ s ²)	62000	-

Illustration 112 : Paramètres obtenus après réinterprétation de l'essai de pompage mené sur le forage Brasserie F3 en 2003.

Au final, le modèle permettant d'avoir le meilleur calage pour les trois essais réalisés suppose la présence (Illustration 113) :

- d'un aquifère alluvial (ou constitué de coulées de débris) capté par le forage Brasserie F1 se caractérisant par une transmissivité importante de 7,5.1⁰⁻²m²/s et un coefficient d'emmagasinement de 0,015 ;
- d'un aquifère inférieur d'une puissance de 120 mètres se caractérisant par une transmissivité de 5,0.10⁻³ m²/s et un coefficient d'emmagasinement de 0,002 ;
- d'un aquitard se caractérisant par une perméabilité de 2,0.10⁻⁷ m/s pour une épaisseur unitaire (on peut également supposer une épaisseur plus importante couplée avec une perméabilité plus forte ; le rapport « perméabilité/épaisseur » devant rester constant).

				Epaisseur		dist.toit						
				aquifère	Long.	aquifère -					PDC (m-	
Nom	r (m)	T (m2/s)	S (-)	(m)	forage (m)	crépine (m)	k' (m/s)	e' (m)	T0 (m2/s)	Sy (-)	5s2)	Rc (m)
FOR_V043 - Brasserie F1 (2003)	0.2	7.5E-02	1.5E-02	-	-	-	2.0E-07	1	5.0E-03	2.0E-03	1780	0.16
FOR_V044 - Brasserie F2_18m (ModèleEta)	18	7.5E-02	1.5E-02	-	-	-	2.0E-07	1	5.0E-03	2.0E-03	-	-
FOR_V044 - Brasserie F2 (2003)	0.083	5.0E-03	2.0E-03	120	62	0	2.0E-07	1	7.5E-02	1.5E-02	16000	0.1
FOR_V045 - Brasserie F3_39m	39	5.0E-03	2.0E-03	120	100	0	2.0E-07	1	7.5E-02	1.5E-02	-	-
FOR_V045 - Brasserie F3 (2003)	0.15	5.0E-03	2.0E-03	120	100	0	2.0E-07	1	7.5E-02	1.5E-02	62000	0.16
FOR_V044 - Brasserie F2_39m	39	5.0E-03	2.0E-03	120	62	0	1.4E-06	1	7.5E-02	1.5E-02	-	-

Illustration 113 : Paramètres obtenus après modélisation et réinterprétation des essais de pompage sur le site de la Brasserie de Tahiti.

Synthèse

La réinterprétation des pompages d'essai disponibles à partir de la technique des dérivées a permis de mieux appréhender les caractéristiques hydrodynamiques des nappes présentes dans le sous-sol de la basse vallée de la Punaruu et de mieux évaluer leurs relations.

Sur la base de la dénomination des différents horizons retenus par Aureau en 2014, il apparaît que :

- la nappe basale fracturée (NBF) partiellement captée par les ouvrages F3 et F2 de la Brasserie de Tahiti se caractérise par une transmissivité de 5,0.10⁻³ m²/s et un coefficient d'emmagasinement de 0,002 ;
- cette dernière est séparée de la nappe inférieure semi-captive (NISC) contenue dans les coulées de débris par un aquitard de quelques mètres d'épaisseur dont la perméabilité n'excèderait pas 4,0.10⁻⁶ m/s;
- la NISC entièrement captée par le forage F1 de la Brasserie de Tahiti se caractérise, quant à elle, par une transmissivité importante de 7,5.10⁻² m²/s et un coefficient d'emmagasinement de 0,015 ;
- un niveau argileux de quelques mètres d'épaisseur sépare la NISC de la NAI (nappe alluviale intermédiaire). Ce niveau qui se biseaute probablement vers l'amont n'isole toutefois pas réellement les 2 nappes qui présentent des fluctuations piézométriques similaires ;
- la NAI sollicitée par les 2 forages d'EDT se caractérise par une transmissivité de 3,0.10⁻¹ m²/s et un coefficient d'emmagasinement de 0,025 ;
- la NAI serait alimentée, au moins partiellement, par drainance par la NSLP (nappe supérieure libre périodique) au travers d'une éponte de 1 m environ ;
- la NSLP se caractérise par une transmissivité de 1,0.10⁻³ m²/s et un coefficient d'emmagasinement de 0,16.
Afin de pouvoir mieux comparer les propriétés des différentes nappes, les valeurs précédemment indiquées ont été reportées dans l'Illustration 114 de même que celles observées au droit de l'ouvrage de Tahiti Agrégats (transmissivité de 6,0.10⁻³ m²/s et coefficient d'emmagasinement de 8,0.10⁻⁴).

Pour cet ouvrage situé à une cote de 75 m NGPF, la succession interceptée représentée sur l'Illustration 76 (alluvions récentes puis NBF) n'est probablement pas la bonne.

Une hypothèse plus réaliste consisterait à supposer que cet ouvrage intercepte les alluvions anciennes repérées en hauteur du côté nord de la vallée puis les formations basaltiques du bouclier principal ou NBF (Illustration 72). La similitude des valeurs de transmissivité et d'emmagasinement observées au droit du forage et de la NBF conforte en tout cas cette hypothèse.



Illustration 114 : Valeurs de transmissivité et de coefficient d'emmagasinement issues de la réinterprétation des pompages d'essai dans la vallée de la Punaruu.

4.3. APPROCHE GÉOPHYSIQUE

En complément des reconnaissances géologiques et hydrogéologiques, 2 sondages électriques ont été mis en œuvre dans la basse vallée et le début de la moyenne vallée de la Punaruu, zone susceptible d'accueillir une extension de la zone industrielle. Ils avaient pour objectifs :

- de déterminer les propriétés électriques et les épaisseurs des formations géologiques ;
- de définir leur extension latérale ;
- de définir, si possible, un modèle géologique et hydrogéologique du site ;
- de proposer d'éventuels sites pour l'implantation des forages de reconnaissance.

Les opérations ont été menées entre le 3 et le 5 avril 2018 et ont nécessité comme dans le cas de la vallée de la Papenoo, l'intervention d'une société pour les travaux de layonnage préalables.

À noter que les principes de réalisation et des d'interprétation des sondages électriques ont été rappelés dans le chapitre 3.3.1. Ils ne sont donc pas détaillés dans cette partie.

4.3.1. Implantation des profils

L'implantation des profils est figurée sur l'Illustration 115. Elle s'est faite en collaboration avec les services techniques de la mairie de Punaauia. Ces derniers ont notamment fait le lien entre le BRGM et les sociétés de la zone industrielle ainsi qu'avec les propriétaires des parcelles traversées pour obtenir les autorisations adéquates.

La présence de canalisations (réseau d'adduction d'eau potable en provenance du captage Te Oropa) et de réseaux électriques enterrés dont il a fallu s'écarter au maximum a également conditionné l'implantation des sondages.



Illustration 115 : Implantation des profils PUP1 et PUP 2 dans la vallée de la Punaruu.

Au droit des secteurs d'implantation, le sous-sol est potentiellement constitué par des laves basaltiques de l'épanchement principal (représentées en vert), des formations alluvio-torrentielles détritiques de fond de vallée (représentées en orange) et des formations de remplissage des vallées (représentées en bleu) (Illustration 116). Plusieurs failles d'orientation SW-NE à WSW-ENE sont également reportées sur la carte géologique.

Les laves basaltiques de l'épanchement principal se présentent généralement sous la forme d'une succession de coulées métriques recoupées par de nombreux petits dykes.

Les formations de remplissage des vallées ont, quant à elles, été assimilées à des coulées de débris issues d'un effondrement sectoriel de l'édifice volcanique par le géologue en charge des reconnaissances préalables.



Illustration 116 : Implantation des investigations géophysiques dans la vallée de la Punaruu.

4.3.2. Résultats obtenus

> Profil PUP1

Le panneau électrique PUP1 (870 mètres) met en évidence (Illustration 117) :

- un substratum résistant R1 (ρ > 300 Ω.m) qui est potentiellement en lien avec le résistant R1'.
 Il semble s'approfondir entre les abscisses 170 et 400 m, au-delà de la profondeur d'investigation du dispositif de tomographie. Ce niveau résistant correspond vraisemblablement à la partie saine des laves basaltiques de l'épanchement principal β1 formant une paléovallée ;
- ce substratum est surmonté par des horizons conducteurs C1 et C1' (20 > ρ > 80 Ω.m) qui sont associés à la partie altérée des basaltes β1 sous-jacents. Leur épaisseur est comprise entre 30 et 70 m. Cet horizon n'est observé qu'au-dessus du résistant R1, et n'est pas présent dans la partie centrale de la coupe, entre les abscisses 240 et 400 m ;
- des résistivités équivalentes sont observées au niveau du conducteur C1", situé au SE de la discontinuité D1. Il pourrait s'agir, comme pour C1 et C1', de la frange altérée de basaltes sous-jacents. Ceux-ci se seraient trouvés décalés par le jeux d'une faille présente au niveau de D1, dont le rejet serait supérieur à 50 m;
- au centre de la coupe, on observe une seconde unité conductrice C2 (100 > ρ > 200 Ω.m) dont l'épaisseur n'est pas clairement mise en évidence, le mur n'étant pas atteint par les investigations. Il pourrait s'agir d'une coulée de débris ayant rempli une paléovallée entaillant les basaltes β1;
- entre les abscisses 440 et 540 m, on trouve une seconde unité résistante R2, d'une épaisseur de 35 m environ et dont le toit se situe à une profondeur de 35 m. Ce résistant de dimension restreinte et sans continuité latérale pourrait correspondre à un panneau de roche saine entraîné dans la coulée de débris C2 ;
- un 3^{ème} horizon résistant R3, superficiel et d'une épaisseur d'environ 15 m surmonte C2 entre les abscisses 200 et 400 m, ce qui correspond au lit de la rivière et à la terrasse alluvionnaire qui le jouxte. Il s'agit vraisemblablement des dépôts torrentiels.



Illustration 117 : Coupe de résistivité vraie obtenue en résultat d'inversion de la tomographie du profil PUP1 avec la combinaison des dispositifs Wenner-Schlumberger réciproque et dipôle-dipôle.

> Profil PUP2

Le panneau électrique PUP2 a été réalisé sur une plus courte distance (370 mètres). De ce fait, la profondeur d'investigation atteinte est moins importante. Il met néanmoins en évidence 2 zones bien distinctes séparées par la discontinuité verticale D2 (Illustration 118).

Au sud de cette discontinuité, on observe :

- un ensemble résistant R1 (100 > ρ > 150 Ω.m) dont l'épaisseur dépasse les 55 m et dont le toit qui suit la topographie se trouve à une profondeur de 15 à 20 m ;
- ce dernier est surmonté par un horizon conducteur C2 (20 > ρ > 100 Ω.m) affleurant au sud de l'abscisse 210 m et présentant une épaisseur comprise entre 15 et 25 m. Il est très probable que cet horizon corresponde au profil d'altération des basaltes sous-jacents ;
- un 2^{ème} horizon résistant R2, superficiel et d'une épaisseur d'environ 15 m surmonte R1 entre les abscisses 130 et 210 m, ce qui correspond au lit de la rivière actuelle et à la terrasse alluvionnaire qui le jouxte. Il s'agit vraisemblablement de dépôts torrentiels.

Au nord de D2, les résultats de l'inversion mettent en évidence un ensemble conducteur C1 ($20 > \rho > 70 \ \Omega$.m) dont l'épaisseur n'a pas pu être déterminée par les investigations mais qui dépasse 50 m. La faible profondeur d'investigation de ce profil ne permet pas de tirer des conclusions quant à sa nature.



Illustration 118 : Coupe de résistivité vraie obtenue en résultat d'inversion de la tomographie du profil PUP2 avec le dispositif Wenner-Schlumberger réciproque.

4.3.3. Synthèse

Les investigations par tomographies électriques réalisées dans la vallée de la Punaruu permettent de retenir les informations suivantes :

 la présence d'une zone conductrice en rive droite de la rivière, au niveau de la zone industrielle (profil PUP2). Il est possible que cet horizon corresponde à des matériaux remaniés par l'homme (comblement de fouilles par exemple);

- la présence d'un profil d'altération des formations basaltiques au droit et au sud de la Punaruu laisse supposer l'existence de basalte sain à une profondeur supérieure à la profondeur d'investigation (> 60 m) (profil PUP2);
- le profil PUP1 situé dans la moyenne vallée permet d'identifier les formations alluviales présentes dans le lit majeur de la rivière, ces dernières se caractérisent par une puissance d'une quinzaine de mètres. Ces formations alluviales reposent sur des formations de type coulées de débris qui aurait comblé une paléovallée ;
- de part et d'autre de cette paléovallée, des formations basaltiques saines se situent à une centaine de mètres de profondeur.

Pour la réalisation de forages, les formations basaltiques saines constituent une cible à privilégier. Au niveau de la moyenne vallée, le long du profil PUP1, des forages d'au moins 100 mètres de profondeur aux abscisses 130 et 480 m permettraient d'attendre cet horizon (Illustration 116).

5. Approche hydrogéochimique

5.1. PRÉAMBULE

L'annexe 1 à la convention MCE n° 1366 prévoyait que 30 points d'eau fassent l'objet d'analyses chimiques complètes sur l'île de Tahiti avec une répartition équivalente pour les 2 bassins versants étudiés en détails.

À l'issue des investigations hydrogéologiques préliminaires, il a été décidé de retenir une majorité de points situés au droit de ces 2 entités mais d'ajouter également quelques points d'eau se situant au droit du bassin versant de la Fautaua ainsi que quelques sources littorales d'intérêt patrimonial à la sélection initiale.

La localisation et la nature des 28 points d'eau prélevés est représentée sur l'Illustration 119. Le tableau de l'Illustration 120 précise, quant à lui, leur répartition en fonction des bassins versants et la nature de l'eau prélevée (souterraine ou superficielle).

Parmi les points d'eau échantillonnés, certains ont également fait l'objet de prélèvements en vue d'analyses isotopiques et des CFC/SF₆.

Les opérations de prélèvements se sont déroulées entre le 23 et le 26 juillet 2018. Les échantillons en vue du dosage des éléments majeurs et traces et des isotopes ont été envoyés dans les plus courts délais possibles au laboratoire du BRGM situé à Orléans via un service de transport express alors que les échantillons en vue du dosage des CFC/SF₆ ont été confiés au Spurenstofflabor (Allemagne).

Les points prélevés ont fait l'objet de fiches compilées en Annexe 5 et les résultats obtenus (de même que les limites de quantification des méthodes retenues) synthétisés dans l'Annexe 6.

Parallèlement à cette opération ponctuelle de prélèvement, un suivi isotopique des précipitations a été réalisé au droit de 9 postes pluviométriques dont 4 se situent sur l'île de Tahiti. Les échantillons prélevés ont également été confiés au laboratoire du BRGM.

L'analyse proposée dans les paragraphes suivants porte dans un premier temps sur les paramètres physico-chimiques mesurés *in situ* puis sur les éléments majeurs, mineurs et traces. Les résultats des analyses isotopiques et en CFC/SF₆ sont ensuite présentés après certains rappels méthodologiques.

Dans chaque partie décrite précédemment, les résultats sont analysés dans leur globalité. Un focus a toutefois été réalisé sur les bassins versants de la Papenoo et de la Punaruu lorsque cela a été jugé nécessaire.



Illustration 119 : Localisation des points d'eau prélevés à Tahiti.

	Points d'eau souterraine (ESO)	Points d'eau superficielle (ESU)	Nombre de points d'eau prélevés
Bassin versant de la Fautaua	3	-	3
Bassin versant de la Papenoo	1	9	10
Bassin versant de la Punaruu	6	4	10
Sources littorales	5	-	5
Total	15	13	28

Illustration 120 : Répartition des rélèvements effectués à Tahiti.

5.2. PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES MESURES IN SITU

À l'échelle de Tahiti, les mesures réalisées in situ ont montré que :

- la température de l'eau variait peu. Les mesures se sont en effet étagées entre 21,8 et 26,0 °C pour les ESO et entre 19,8 à 26,7 °C pour les ESU ;
- la conductivité électrique présentait une plus grande variabilité avec des valeurs comprises entre 186 et 647 µS/cm pour les ESO et entre 86 à 404 µS/cm pour les ESU (Illustration 121). À noter que les plus fortes valeurs ont été observées dans la caldeira (TAH_6 et TAH_28) mais également à l'aval du bassin versant de la Punaruu (TAH_21) ou sur la source de la Reine (TAH_17);
- le pH présentait également une assez grande variabilité avec des valeurs comprises entre 5,4 à 7,9 pour les ESO et entre 6,7 à 8,8 pour les ESU (Illustration 122) ;
- la plupart des teneurs en oxygène dissous étaient comprises entre 4 et 10 mg/l (Illustration 123).

Les mesures du potentiel d'oxydoréduction (Eh NHE) n'ayant pas été jugées fiables (mauvais calibrage ou problème de sonde), elles n'ont pas fait l'objet d'une cartographie spécifique.



Illustration 121 : Répartition des valeurs de conductivité mesurées in-situ lors des prélèvements effectués à Tahiti.



Illustration 122 : Répartition des valeurs de pH mesurées in-situ lors des prélèvements effectués à Tahiti.



Illustration 123 : Répartition des valeurs d'oxygène dissous mesurées in-situ lors des prélèvements effectués à Tahiti.

En ce qui concerne les 10 prélèvements effectués dans la vallée de la Papenoo (Illustration 124 et Illustration 125), on constate des conductivités élevées corrélées avec des pH acides dans la zone andésitique. Le point d'eau TAH_6 (source située juste en dessous du barrage de Tahinu) se caractérise par exemple par un pH de 5,4 et une conductivité de 647 μ S/cm. Ces caractéristiques de même que les remontées de CO₂ qui ont été observées lors du prélèvement et lors d'investigations antérieures (Gadalia *et al.*, 2007) semblent témoigner de circulations hydrothermales. Les points d'eau échantillonnés ont enfin présenté des teneurs en oxygène dissous comprises entre 8 et 10 mg/l à l'exception de la source TAH_6 (4 mg/l) et du point TAH_5 (10,5 mg/l) où la présence d'une grande quantité d'algues a été notée.



Illustration 124 : Répartition des valeurs de conductivité dans la Papenoo (juillet 2018).



Illustration 125 : Répartition des valeurs de pH et des teneurs en oxygène dissous dans la Papenoo (juillet 2018).

En ce qui concerne les 10 prélèvements effectués dans la vallée de la Punaruu (Illustration 126, Illustration 127, Illustration 128), on ne note pas d'évolution particulière de la conductivité d'amont en aval mais les eaux souterraines semblent présenter des conductivités très légèrement supérieures à celles des eaux de surface (en raison d'un temps d'interaction eau-roche probablement plus important). La conductivité élevée observée sur le forage TAH_21 (518 μ S/cm) pourrait, quant à elle, s'expliquer par un phénomène d'intrusion marine qui reste à confirmer.

Sur les 10 échantillons prélevés, 7 ont présenté un pH basique et les 3 autres, des valeurs comprises entre 6,5 et 7. La valeur de 8,8 a, quant à elle, été relevée sur le point TAH_16 dans un secteur où la rivière ne courrait presque plus.

Les 6 forages situés à l'aval de la vallée (TAH_21, TAH_22, TAH_23, TAH_24, TAH_25 et TAH_27) se sont également caractérisés par des teneurs en oxygène dissous plus faibles que celles relatives aux prélèvements effectués en rivière.



Illustration 126 : Conductivités mesurées in situ lors des prélèvements dans la Punaruu (juillet 2018).



Illustration 127 : Valeurs de pH mesurées in situ lors des prélèvements dans la Punaruu (juillet 2018).



Illustration 128 : Teneurs en d'oxygène dissous mesurées in situ lors des prélèvements dans la Punaruu (juillet 2018).

5.3. ÉLÉMENTS MAJEURS, MINEURS ET TRACES

5.3.1. Vérification des balances ioniques

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 % (dans ce cas, les résultats sont difficilement exploitables).

Tous les prélèvements réalisés à Tahiti se sont caractérisés par une balance ionique comprise entre -5 et + 5 %, à l'exception de celui réalisé au droit du point TAH_16. Pour ce point d'eau, la balance ionique de +11,2 % indique que l'eau n'était pas tout à fait à l'équilibre naturel soit en raison d'un déficit d'anions, soit en raison d'un excès de cations. Le faible débit du cours d'eau au lieu de prélèvement ainsi que la présence d'un bassin de stockage contenant un liquide vert jaune à proximité pourraient expliquer ce résultat. Dans ces conditions, les analyses effectuées sur ce point d'eau devront être considérés avec prudence.

5.3.2. Conductivité électrique *in situ* et éléments dissous totaux

La somme des éléments dissous (Total Dissolved Solid ou TDS) a été calculée pour l'ensemble des prélèvements puis comparée aux mesures de conductivité électrique réalisées sur le terrain.

L'Illustration 129 met en évidence une bonne corrélation entre les paramètres ; validant ainsi d'une seconde manière le jeu de données. Le point d'eau souterraine TAH_6 (source située au pied du barrage Tahinu) apparaît comme le point le plus minéralisé de ce dernier.

Les plus grands écarts sont observés pour 2 points d'eau situés dans la Punaruu. TAH_13 et TAH_25 présentent en effet des conductivités respectivement trop faibles et trop fortes par rapport au TDS. Des erreurs de lecture de la conductivité sur l'appareil de mesure pourraient être à l'origine de ces décalages.



Illustration 129 : TDS (g/l) vs Conductivité pour l'ensemble des échantillons d'eau prélevés à Tahiti en juillet 2018.

5.3.3. Faciès hydrochimiques des eaux

Le report des résultats d'analyses en ions majeurs dans un diagramme de Piper a permis de déterminer le faciès hydrochimique des points d'eau prélevés en juillet 2018 (Illustration 130). Tous se caractérisent par un faciès bicarbonaté calcique (Illustration 131).

Il apparaît que les points d'eau prélevés dans la Papenoo, la Punaruu et la Fautaua sont très proches les uns des autres, ce qui semble témoigner d'un environnement géologique relativement homogène.

Les 5 sources littorales se caractérisent par une plus grande variabilité et s'éloignent du groupe décrit précédemment. La source TAH_18 (Vaitupa) en connexion directe avec le lagon est logiquement celle qui est la plus influencée par le pôle « eau de mer » (représenté par l'eau de mer échantillonnée à Rangiroa). La source TAH_17 (Reine) est, quant à elle, plus minéralisée mais moins influencée par ce pôle.



Illustration 130 : Diagramme de Piper repésentant l'ensemble des prélèvements effectués à Tahiti en juillet 2018.



Illustration 131 : Faciès hydrochimique des points d'eau prélévés à Tahiti en juillet 2018.

5.3.4. Fond hydrogéochimique et normes de potabilité

En contexte volcanique, le fond hydrogéochimique dépend du type de formations et de leur degré d'altération. Il est généralement élevé en fer, manganèse et parfois en aluminium. Ces éléments sont principalement mobilisés sous formes colloïdales.

Il existe également des risques d'observer de fortes teneurs en fluor et/ou en arsenic au droit des zones affectées par des phénomènes hydrothermaux et en éléments qui composent l'eau de mer (chlorures, sodium, bore...) au droit des premiers secteurs affectés par l'intrusion marine.

Les résultats des analyses menées sur les 28 prélèvements effectués à Tahiti ont donné lieu à une analyse statistique descriptive. Ils ont notamment été comparés aux normes de potabilité des eaux destinées à la consommation humaine extraites du Journal Officiel de la Polynésie Française en date du 25 novembre 1999 ainsi qu'aux normes de potabilité appliquées en France.

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).

Pour 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).

Pour les éléments traces, les normes de potabilité appliquées en Polynésie Française sont les mêmes qu'en France sauf pour le cadmium (Cd), le cuivre (Cu) et le Zinc (Zn) où elles sont plus restrictives. La Polynésie française n'a par contre pas défini de norme pour le bore alors qu'une limite de 1 000 µg/l a été fixée en métropole.

L'examen de l'

Illustration 132 montre que le fer est le seul élément majeur dont la concentration maximale ou moyenne peut dépasser les normes de potabilité. Cette observation reste toutefois fortement conditionnée par les résultats obtenus sur les ouvrages TAH_6 (12 mg/l) et TAH_28 (0,4 mg/l) ; le reste des analyses ayant mis en évidence soit de faibles concentrations, soit des teneurs inférieures aux limites de détection (25 points d'eau concernés).

Ces ouvrages de même que le point d'eau TAH_3 se caractérisent également par des dépassements en manganèse (teneur maximale de 371 µg/l observée sur TAH_6) (Illustration 133). Une concentration en nickel de 47,6 µg/l peut également être reportée pour cet ouvrage.

Il existe donc un risque de fond géochimique élevé en fer, manganèse et nickel associé à un faible pH dans la caldeira et notamment à proximité du culot magmatique où les échantillons TAH_3, TAH_6 et TAH_28 ont été prélevés.

Partout ailleurs, les eaux respectent les normes de potabilité des éléments pris en compte.

ТАНІТІ	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
Tahiti-ESO	Ca	mg/L			15	8,2	35,7	12,6	15,2	17,2	17,0	7,5
Tahiti-ESO	HCO ₃	mg/L			15	65,0	216,0	88,0	108,0	111,0	114,8	43,3
Tahiti-ESO	CI	mg/L	200	250	15	2,4	37,0	2,9	3,7	7,9	7,6	8,9
Tahiti-ESO	F	mg/L	0,7 (pour T = 25°C à 30°C)	1,5	15	0,05	0,20	0,05	0,05	0,05	0,06	0,04
Tahiti-ESO	к	mg/L	12	12	15	1,3	3,4	1,5	1,7	2,2	1,9	0,6
Tahiti-ESO	Fe	mg/L	0,2	0,2	15	0,01	12,05	0,01	0,01	0,01	0,81	3,11
Tahiti-ESO	Mg	mg/L	50	50	15	5,5	24,5	8,7	9,8	10,6	10,9	4,9
Tahiti-ESO	NH_4	mg/L	0,5	0,5	15	0,03	0,08	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
Tahiti-ESO	NO ₂	mg/L	0,1		15	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
Tahiti-ESO	NO ₃	mg/L	50	50	15	0,3	15,0	1,0	1,5	2,1	2,7	3,8
Tahiti-ESO	Na	mg/L	150	200	15	6,0	26,2	7,3	9,3	13,2	11,2	5,8
Tahiti-ESO	PO ₄	mg/L		0,5	15	0,0	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1
Tahiti-ESO	SO4	mg/L	250	250	15	0,7	34,1	1,7	2,5	4,6	5,4	8,5
Tahiti-ESO	SiO ₂	mg/L			15	26,9	92,0	32,6	37,7	41,9	41,7	16,9

TAHITI	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
Tahiti-ESU	Ca	mg/L			13	5,1	26,6	12,2	14,6	15,7	14,8	5,3
Tahiti-ESU	HCO ₃	mg/L			13	34,0	144,0	73,0	93,0	100,0	91,3	30,5
Tahiti-ESU	CI	mg/L	200	250	13	1,7	3,8	2,0	2,1	2,4	2,3	0,5
Tahiti-ESU	F	mg/L	0,7 (pour T = 25°C à 30°C)	1,5	13	<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.<>	
Tahiti-ESU	к	mg/L	12	12	13	0,3	1,4	0,8	1,1	1,3	1,0	0,4
Tahiti-ESU	Fe	mg/L	0,2	0,2	13	0,01	0,42	0,01	0,01	0,01	0,06	0,12
Tahiti-ESU	Mg	mg/L	50	50	13	3,7	14,9	5,8	8,3	8,5	8,2	3,2
Tahiti-ESU	NH_4	mg/L	0,5	0,5	13	<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.<>	
Tahiti-ESU	NO ₂	mg/L	0,1		13	<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.<>	
Tahiti-ESU	NO ₃	mg/L	50	50	13	0,3	1,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3
Tahiti-ESU	Na	mg/L	150	200	13	1,9	9,1	5,3	5,7	6,9	5,9	1,6
Tahiti-ESU	PO ₄	mg/L		0,5	13	0,0	0,2	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1
Tahiti-ESU	SO_4	mg/L	250	250	13	0,3	17,4	0,9	1,4	3,3	3,5	5,1
Tahiti-ESU	SiO ₂	mg/L			13	6,7	45,1	24,3	30,1	32,6	29,2	9,7

Illustration 132 : Analyse statistique descriptive des concentrations en éléments majeurs pour les eaux souterraines (ESO) et les eaux superficielles (ESU) prélevées en juillet 2018 à Tahithi.

ТАНІТІ	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
Tahiti-ESO	Ag	μg/L	10		15	<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.<>	
Tahiti-ESO	AI	μg/L	200	200	15	1,22	29,80	2,05	2,73	6,88	6,31	8,11
Tahiti-ESO	As	μg/L	10	10	15	0,06	0,20	0,10	0,12	0,14	0,12	0,04
Tahiti-ESO	В	μg/L		1000	15	6,78	26,50	7,23	8,45	16,80	12,22	6,15
Tahiti-ESO	Ва	μg/L	700	700	15	0,17	45,93	0,52	0,67	1,43	3,88	11,65
Tahiti-ESO	Be	μg/L			15	0,005	0,1	0,005	0,005	0,005	0,011	0,025
Tahiti-ESO	Cd	μg/L	3	5	15	0,005	0,020	0,005	0,005	0,005	0,006	0,004
Tahiti-ESO	Co	μg/L		20	15	0,00	7,80	0,00	0,00	0,00	0,53	2,01
Tahiti-ESO	Cr	μg/L	50	50	15	0,19	1,47	0,56	0,66	0,98	0,77	0,35
Tahiti-ESO	Cu	μg/L	1000	2000	15	0,05	0,97	0,22	0,39	0,45	0,36	0,24
Tahiti-ESO	Li	μg/L			15	0,05	0,78	0,05	0,05	0,05	0,10	0,19
Tahiti-ESO	Mn	μg/L	50	50	15	0,05	371,00	0,05	0,11	0,16	24,87	95,76
Tahiti-ESO	Ni	μg/L	20	20	15	0,05	47,62	0,05	0,16	0,22	3,30	12,26
Tahiti-ESO	Pb	μg/L	10	10	15	0,00	0,27	0,00	0,00	0,00	0,04	0,08
Tahiti-ESO	Sr	μg/L			15	62,0	254,0	84,4	111,0	141,0	124,0	52,4
Tahiti-ESO	Zn	μg/L	3000	5000	15	0,25	14,04	0,44	1,77	3,31	2,91	3,75

ΤΑΗΙΤΙ	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
Tahiti-ESU	Ag	μg/L	10		13	<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.<>	
Tahiti-ESU	AI	μg/L	200	200	13	1,85	24,50	7,37	15,60	19,10	14,06	7,31
Tahiti-ESU	As	μg/L	10	10	13	0,03	0,16	0,03	0,03	0,08	0,06	0,04
Tahiti-ESU	В	μg/L		1000	13	3,44	15,20	4,79	5,07	6,02	6,52	3,71
Tahiti-ESU	Ва	μg/L	700	700	13	0,65	9,22	0,95	1,32	2,50	2,43	2,65
Tahiti-ESU	Ве	μg/L			13	0,005	0,01	0,005	0,005	0,005	0,006	0,002
Tahiti-ESU	Cd	μg/L	3	5	13	<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.<>	
Tahiti-ESU	Co	μg/L		20	13	0,00	1,53	0,00	0,00	0,00	0,20	0,50
Tahiti-ESU	Cr	μg/L	50	50	13	0,05	1,16	0,39	0,49	0,61	0,50	0,28
Tahiti-ESU	Cu	μg/L	1000	2000	13	0,05	0,35	0,16	0,20	0,24	0,20	0,08
Tahiti-ESU	Li	μg/L			13	0,05	0,24	0,05	0,05	0,05	0,07	0,06
Tahiti-ESU	Mn	μg/L	50	50	13	0,05	97,90	0,16	0,37	1,76	12,81	30,21
Tahiti-ESU	Ni	μg/L	20	20	13	0,05	13,48	0,05	0,05	0,23	1,77	4,12
Tahiti-ESU	Pb	μg/L	10	10	13	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	0,02	0,03
Tahiti-ESU	Sr	μg/L			13	40,4	185,0	88,2	106,0	129,0	103,1	41,2
Tahiti-ESU	Zn	μg/L	3000	5000	13	0,25	1,19	0,25	0,25	0,25	0,37	0,30

Illustration 133 : Analyse statistique descriptive des concentrations en éléments traces pour les eaux souterraines (ESO) et les eaux superficielles (ESU) prélevées en juillet 2018 à Tahithi.

5.3.5. Diagrammes binaires

Les diagrammes binaires présentés dans ce chapitre ont pour objectif de mettre en évidence des relations inter-éléments au sein des eaux souterraines et des eaux superficielles. Ces diagrammes permettent également d'identifier des pôles qui influencent la chimie des eaux et de mettre en avant des facteurs de dilution par la recharge météoritique ou par l'intrusion saline par exemple. À noter que la droite de dilution de l'eau de mer reportée sur les graphiques a été établie d'après la composition de l'eau de mer prélevée à Rangiroa.

Dans le diagramme CI vs Na (Illustration 134), l'ensemble des points prélevés à Tahiti sont situés sous la droite de dilution locale de l'eau de mer, ce qui traduit un enrichissement en sodium par rapport à l'eau de mer. Ce dernier est en lien direct avec le lessivage des roches volcaniques. Les sources littorales tendent également à se rapprocher de la droite locale de dilution de l'eau de mer en raison de leur contamination plus ou moins marquée par l'intrusion saline.

Dans le diagramme B vs SO₄ (Illustration 135), deux pôles distincts (un pôle « recharge » représenté par une pluie tropicale analysée à Mayotte et un pôle « eau de mer ») peuvent être mis en évidence. Compte tenu de l'alignement de la majorité des points d'eau entre ces deux pôles, on peut en conclure que le bore et les sulfates dosés sur les échantillons prélevés à Tahiti proviennent principalement de l'eau de mer, avec un phénomène de dilution par les eaux de pluies plus ou moins important. Les points TAH_6 et TAH_28 prélevés à proximité du barrage Tahinu dans la vallée de la Papenoo et probablement sous l'influence de remontées hydrothermales s'écartent de cet alignement.



Illustration 134 : Diagramme CI vs Na (mmol/l) repésentant l'ensemble des prélèvements effectués à Tahiti en juillet 2018.



Illustration 135 : Diagramme B vs SO₄ (mmol/l) représentant l'ensemble des prélèvements effectués à Tahiti en juillet 2018.

Les diagrammes Ca vs HCO₃ (Illustration 136) et Ca+Mg vs HCO₃ (Illustration 137) mettent en évidence les processus d'interaction eau-roche. En dehors du phénomène d'intrusion saline, l'enrichissement en calcium et en magnésium des eaux provient de processus d'interactions entre l'eau et les roches volcaniques qui sont riches en olivine (Fe, Mg) et en pyroxène (Ca, Fe, Mg).

Sur le diagramme Ca vs HCO₃, les points d'eau semblent s'aligner sur une droite de pente 1:4 alors que sur le diagramme Ca+Mg vs HCO₃, les points d'eau s'alignent parfaitement sur une droite de pente 1:2. Ces alignements prouvent que les mécanismes d'acquisition des teneurs en bicarbonates, calcium et magnésium sont relativement semblables pour tous les points d'eau.

En complément, le diagramme Na+K vs SiO₂ (Illustration 138) montre qu'à l'exception des points d'eau TAH_6 et TAH_21 et des sources littorales, les points s'alignent selon une droite. Dans ces conditions, il est possible d'émettre l'hypothèse que les eaux circulent au contact de formations géologiques relativement similaires.

Cette hypothèse est confirmée par le diagramme de TAS (Total Alkalis-Silica) établi par Hildebrand *et al.* (2004) (Illustration 139). Les formations du bouclier primaire et du bouclier secondaire correspondent en effet à des basaltes dont la teneur en silice est comprise entre 40 et 50 % et celle en minéraux alcalins, entre 3 et 6 %.

L'enrichissement en silice noté sur le point TAH_6 constitue, quant à lui, un indice de temps de circulation plus important et/ou de remontée de fluide profond.

La position du forage TAH_21 au milieu des points représentant les sources littorales tend enfin à confirmer l'influence de l'intrusion saline sur cet ouvrage.



Illustration 136 : Diagramme Ca vs HCO₃ (mmol/l) représentant l'ensemble des prélèvements effectués à Tahiti en juillet 2018.



Illustration 137 : Diagramme Ca + Mg vs HCO₃ (mmol/l) représentant l'ensemble des prélèvements effectués à Tahiti en juillet 2018.



Illustration 138 : Diagramme Na + K vs SiO₂ (mmol/l) représentant l'ensemble des prélèvements effectués à Tahiti en juillet 2018.



Illustration 139 : Diagramme de TAS (Total Alkalis-Silica) établi pour les roches volcaniques et plutoniques de Tahiti (Hildenbrand et Guillot, 2004).

5.4. ANALYSES ISOTOPIQUES

Comme indiqué en introduction de ce chapitre, des analyses isotopiques ont été réalisées sur des échantillons d'eau souterraine et superficielle, de même que sur des échantillons d'eau de pluie récoltées au droit de 4 sites. Les analyses effectuées ont concerné les isotopes stables de la molécule d'eau, l'objectif étant de déterminer la droite météorique locale et l'origine spatiale des eaux souterraines et superficielles. Les résultats obtenus seront analysés après de brefs rappels.

5.4.1. Rappels

Pour un élément chimique donné, la composition isotopique correspond aux proportions des divers isotopes qui le compose (99,76 % de ¹⁶O, 0,04 % de ¹⁷O et 0,2 % de ¹⁸O dans le cas de l'oxygène). Cette dernière est notamment susceptible d'évoluer lors des changements d'état (fractionnement cinétique) ou de réactions à l'équilibre (fractionnement thermodynamique).

Pour un échantillon d'eau, le rapport isotopique correspond, quant à lui, au rapport de la concentration de l'isotope lourd sur celle de l'isotope léger (ex : ²H/¹H ou ¹⁸O/¹⁶O). Ce rapport étant très faible, il a été décidé de l'exprimer par rapport à un standard qui diffère pour chacun des éléments considérés. Dans le cas de l'oxygène et de l'hydrogène, le standard correspond au V-SMOW (Vienna-Standard Mean Ocean Water) et la différence s'exprime selon la relation :

$$\delta$$
 (‰) = [(R_{échantillon}/R_{étalon}) - 1] x 1000

L'Illustration 140 permet de visualiser le fractionnement isotopique au cours du cycle de l'eau et les variations de δ^2 H et δ^{18} O qui en résultent. Il apparaît ainsi que la composition isotopique des eaux météoriques varie en fonction de paramètres géographiques comme la latitude, l'altitude ou la saison.



Illustration 140 : Fractionnement isotopique au cours du cycle de l'eau et variations de δ 2H et δ 18O.

Une approche statistique (IAEA, 1992) a également montré que les valeurs de δ^2 H étaient linéairement corrélées à celle du δ^{18} O dans les pluies et les eaux naturelles d'origine météorique.

Cette relation d'équation δ^2 H= 8* δ^{18} O +10 est appelée « droite météorique mondiale » (DMM) et constitue une référence à laquelle on peut comparer les couples δ^2 H et δ^{18} O.

Pour des eaux ayant subi des phénomènes d'évaporation, une corrélation entre ²H et ¹⁸O existe mais la droite présente une pente inférieure à 8 (généralement comprise entre 3,5 et 6) et une ordonnée à l'origine différente.

5.4.2. Définition de la droite météorique locale

Dans le cadre du programme d'actions pour l'exploitation et la gestion des eaux souterraines de la Polynésie française, 9 sites ont été équipés de récupérateurs d'eau de pluie au droit des 4 îles qui ont fait l'objet d'études détaillées. À l'exception de l'atoll de Rangiroa où un seul récupérateur a été installé mais déplacé (mairie puis gendarmerie), les autres secteurs ont été équipés de 2 dispositifs. Ces derniers ont été positionnés de façon à couvrir un différentiel d'altitude maximum.

L'échantillonnage a été réalisé sur un cycle hydrologique (février 2018-mars 2019) à pas de temps variable compte tenu des contraintes d'accès et de remplissage des dispositifs. L'Illustration 41 synthétise les informations relatives aux sites suivis et aux modalités d'échantillonnage. Il apparaît que les 2 bassins versants suivis sur l'île de Tahiti ont respectivement fait l'objet de 19 (Punaruu) et 17 prélèvements (Papenoo).

Île ou bassin versant	Nom station	Altitude [m]	Date début mesures	Date fin mesures	Nbre de prélèvements
Moorea	Services techniques	2	22/06/18	04/03/19	6
Moorea	Mouaputa	827	03/05/18	04/03/19	8
Rangiroa	Gendarmerie	2	13/09/18	25/02/19	3
Rangiroa	Mairie	2	27/04/18	11/09/18	1
Tahiti Punaruu	SIGFA	44	06/04/18	16/03/19	9
Tahiti Punaruu	Mont Tuhi	1414	01/03/18	05/03/19	10
Tahiti Papenoo	Marie Papenoo	5	07/04/18	06/03/19	8
Tahiti Papenoo	Pihaiateta	1743	17/04/18	01/03/19	9
Ua Pou	Hakahau	20	17/ 02/18	31/01/19	5
Ua Pou	Poumaka	664	12/04/18	03/03/19	5

Illustration 141 : Informations sur les stations de prélèvement des pluies et les modalités d'échantillonnage.

Le report des résultats obtenus sur un diagramme $\delta^2 H$ vs $\delta^{18}O$ montre que les points représentant les échantillons de pluie s'alignent selon une droite d'équation $\delta^2 H = 7,20 \ \delta^{18}O + 11,94$ représentée par un trait plein sur l'Illustration 142. Cette droite présente une pente plus faible que celle de la droite météorique mondiale (DMM) tracée en pointillés. Si l'on examine dans le détail la position des différents points, il apparaît que certains échantillons représentatifs du bassin versant de la Punaruu mais également de Ua Pu et Rangiroa contribuent à faire diminuer la pente de la droite. Ils pourraient avoir subi des phénomènes d'évaporation en lien avec la nature des collecteurs utilisés.

L'illustration 143 qui représente les échantillons d'eaux souterraines et superficielles montre également que les points ne s'alignent pas sur la droite d'équation $\delta^2 H = 7,20 \delta^{18} O + 11,94$ établie à partir des échantillons de pluie.



Illustration 142 : Diagramme $\delta^2 H$ vs δ^{18} O pour les précipitations collectées au droit des 4 îles.



Illustration 143 : Diagramme $\delta^2 H$ vs δ^{18} O pour les eaux de surface et les eaux souterraines prélevées au droit des 4 îles.

Dans ces conditions, une analyse bibliographique des données disponibles pour la région sud pacifique a été menée. Elle a permis de recenser les équations suivantes :

- Australie : $\delta^2 H = 8,4 \delta^{18} O + 15,8$ (Duvert *et al.*, 2015) ;
- Île de Pâques : $\delta^2 H = 8^* \delta^{18} O + 10$ (Herrera et Custodio, 2008) ;
- Indonésie/Papouasie : $\delta^2 H = 7,98 \delta^{18} O + 14,38$ (Permana *et al.*, 2016) ;
- Hawaï : Volcan Kilauea δ^2 H = 8 δ^{18} O +12 (Scholl *et al.*, 1996) et est Maui δ^2 H = 8,2 δ^{18} O +14,7 (Scholl *et al.*, 2002) ;
- Rarotonga (Iles Cook) : $\delta^2 H = 8,17 \delta^{18}O + 10,73$ (IAEA, 1992) ;
- Tahiti et Moorea : $\delta^2 H = 8 \delta^{18} O + 14$ (Hassler *et al.*, 2019).

Ces dernières traduisent un excès en deutérium systématique par rapport à la DMM (ordonnée à l'origine supérieure à 10) qui a également été constaté sur l'Illustration 142.

Si l'on reporte l'ensemble des résultats d'analyse (pluies, eaux de surface et souterraines), il apparaît que ces derniers s'alignent parfaitement avec la droite des pluies établies pour Hawaï ou Tahiti et Moorea par Hassler *et al.* (2019) (Illustration 144). Quelques points d'écartent de cette droite, en se positionnant sous la droite des pluies locales.). Un fractionnement isotopique similaire a été observé sur d'autres îles volcaniques comme Hawaï (Scholl *et al.*, 1996) ou en raison d'une forte évaporation des eaux de surface (Gat, 1996).

Compte tenu de ces observations, c'est la droite établie pour Hawaï et notamment l'est de Maui estimée à partir d'un plus grand nombre de données (permettant ainsi de prendre en compte la variabilité interannuelle des précipitations) et d'équation $\delta^2 H = 8,2 \delta^{18} O + 14,7$ qui sera considérée comme la droite météorique locale (DML).



Illustration 144 : Diagramme $\delta^2 H$ vs δ^{18} O établi pour l'ensemble des prélèvements effectués au droit des 4 îles et droites de référence.

5.4.3. Évolution spatio-temporelle des teneurs isotopiques dans les pluies

L'importance de la variation saisonnière des teneurs isotopiques en lien avec l'effet de masse (appauvrissement isotopique plus marqué pour les pluies les plus abondantes) est reconnue pour le Pacifique Sud (Rozanski *et al.*, 1993 ; Araguas *et al.*, 1998). Il s'avère que ce phénomène est observable sur le jeu de données relatif aux pluies récoltées sur les 10 collecteurs (Illustration 145).



Illustration 145 : Relation entre le deutérium et la hauteur totale des pluies collectées sur les 10 collecteurs.

En complément de ce premier graphique, les teneurs isotopiques déterminées pour l'ensemble des postes à l'exception de ceux de Rangiroa ont été représentées sur l'Illustration 146.

Pour les échantillons prélevés de façon synchrone ou quasi-synchrone (avec quelques jours de différence), il apparaît que les échantillons prélevés à haute altitude se sont systématiquement caractérisés par des teneurs plus appauvries que celles des échantillons prélevés à basse altitude.

La détermination d'un gradient moyen d'appauvrissement s'est par contre avérée délicate compte tenu du faible nombre de stations de mesures et de prélèvements, de l'impossibilité d'associer des cumuls pluviométriques fiables à certains prélèvements (débordement des dispositifs) et de l'effet de masse préalablement mis en évidence.

En 2004, Hildenbrand *et al.* avaient pu estimer un gradient δ^{18} O/km de - 0,7 ‰ en période humide et de - 1,6 ‰ en période sèche sur la base d'un suivi pluviométrique effectué dans la partie nord-ouest de Tahiti.

Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que les gradients calculés sur 8 périodes différentes pour le bassin versant de la Papenoo (Illustration 147). Elles ne pourront toutefois pas être utilisées pour définir avec précision l'altitude moyenne des zones de recharge des aquifères.



Illustration 146 : Relation entre l'altitude de la station de mesure et le δ^{18} O pour les 8 collecteurs de pluie.

Site	Période	Gradient d'altitude δ ¹⁸ O/km	Gradient d'altitude δ ² H/km	Remarques
Papenoo	Juin	-1,05 ‰	-6,68 ‰	
	Juillet	-1,38 ‰	-9,68 ‰	Échantillons haut et bas non synchrones
	Août	-0,88 ‰	-6,04 ‰	Échantillons haut et bas non synchrones
	Octobre	-0,98 ‰	-5,58 ‰	
	Novembre	-1,04 ‰	-6,1 ‰	
	Décembre	-1,6 ‰	-10,24 ‰	
	Janvier	-0,74 ‰	-5,12 ‰	
	Février	-1,9 ‰	-13,7 ‰	

Illustration 147 : Gradients d'altitude calculés sur le bassin versant de la Papenoo.

5.4.4. Zoom sur Tahiti

Si l'on examine les résultats plus finement et uniquement à l'échelle de Tahiti, les points d'eau prélevés dans le bassin versant de la Fautaua sont les plus appauvris tout en restant proches des points d'eau prélevés dans la Punaruu (Illustration 148). Les sources littorales TAH-17 (Reine) et TAH-18 (Vaitupa) qui se situent dans le quart nord-ouest de l'île peuvent également être rattachées à cet ensemble.

Les deux sources littorales localisées au sud de l'île, TAH_19 (Maraa) et TAH_20 (Vaima) présentent des teneurs isotopiques plus enrichies, proches de celles qui ont été observées dans la Papenoo. La source Ahavini (TAH_9) se situe, quant à elle, en position intermédiaire.

Il semble donc que les eaux météoriques qui alimentent le forage horizontal TAH_10 et les forages verticaux TAH_11 et TAH_12 situés dans la vallée de la Fautaua s'infiltrent à plus haute altitude. Les données antérieures donnent une altitude moyenne de recharge supérieure à 1000 m (Hildenbrand *et al.*, 2005).

Le léger enrichissement isotopique qui s'observe du point amont (TAH_10) vers le point aval (TAH_12) semble, quant à lui, traduire l'influence de plus en plus importante d'une eau infiltrée à plus basse altitude.



Illustration 148 : Relation δ^2 H- δ^{18} O pour les prélèvements d'eaux de surface et d'eaux souterraines réalisés à Tahiti.

Dans la Papenoo, l'alignement du point TAH_6 sur la DML (Illustration 149) ne permet pas de valider l'hypothèse d'une contribution importante de fluides géothermaux ; ces derniers se caractérisant par un enrichissement du δ^{18} O par rapport au δ^{2} H par réaction avec le CO₂ profond. Dans ces conditions, il est possible que les eaux hydrothermales dont la présence a été démontrée à l'aide des données hydrochimiques ne soient pas de hautes températures (>80°) et/ou qu'elles aient subi un mélange avec des eaux de pluie, de rivière ou provenant d'autres aquifères.

Plusieurs groupes de points peuvent par ailleurs être identifiés, les plus enrichis qui sont également situés le plus en amont (TAH_2, TAH_5 et TAH_8) pouvant correspondre à des points sous l'influence principale des précipitations (teneurs proches de celles des pluies échantillonnées à la station haute à la même époque que les prélèvements) et les plus appauvris situés plus à l'aval (TAH_3, TAH_28) à des points sous une influence plus marquée des eaux souterraines. Cette hypothèse suggère une contribution croissante des eaux souterraines de l'amont vers l'aval.



Illustration 149 : Diagramme δ^2 H vs δ^{18} O pour les pluies, les eaux de surface et les eaux souterraines du bassin versant de la Papenoo.

Dans la Punaruu, les eaux souterraines et superficielles présentent des teneurs appauvries et plus homogènes que les précipitations (Illustration 150). Cette observation suggère une infiltration de l'eau à haute altitude, un temps de transfert permettant une homogénéisation du signal et une contribution importante des eaux souterraines au débit de la rivière.

À noter que les forages F1 et F2 de la Brasserie de Tahiti, de même que les forages F1 et F2 d'EDT et le forage de Tahiti Agrégats présentent des valeurs de δ^{18} O et δ^{2} H particulièrement similaires laissant supposer une origine commune pour l'eau qu'ils captent.

L'intrusion marine qui affecte le forage TAH-21 ne semble, par contre, pas se manifester sur le plan isotopique.



Illustration 150 : $\delta^2 H$ vs δ^{18} O pour les eaux du bassin versant de la Punaruu.

5.5. ESTIMATION DES TEMPS MOYENS DE TRANSFERT DES EAUX SOUTERRAINES

5.5.1. Préambule

Il existe plusieurs méthodes pour estimer le temps moyen de transfert (TMR) des eaux souterraines (Illustration 151). Pour Tahiti et les autres îles de la Polynésie française, des temps relativement courts sont attendus. Ce sont donc les gaz dissous CFCs et SF₆ qui ont été retenus.



Illustration 151 : Méthodes de datation basées sur les traceurs radioactifs et gazeux (Newmann et al., 2010).

Les gaz dissous ont été utilisés dès le début des années 1980 pour estimer les temps moyens de transfert. À l'heure actuelle, on dispose donc d'un certain recul pour les mettre en œuvre de façon optimum (IAEA, 2006).

Les composés halogénés CFC-11 (trichlorofluorométhane), CFC-12 trichlorodifluorométhane), et CFC-113 (trichlorotrifluorométhane) communément appelés « fréons » ont été utilisés en raison de leur origine exclusivement anthropique et de leurs propriétés physico-chimiques :

- temps de résidence atmosphérique élevé ;
- bonne stabilité chimique dans le sol et dans l'eau ;
- homogénéité des concentrations atmosphériques dans les deux hémisphères.

La première synthétisation date de 1928 mais ce n'est qu'au début des années 30 que leur commercialisation a commencé. Entre les années 1950 et 1960, ces gaz ont été largement été utilisés dans l'industrie (froid, nettoyants industriels, propulseurs, mousses isolantes...) et se sont diffusés dans l'atmosphère et l'hydrosphère. Compte tenu de leurs effets délétères sur la couche d'ozone, de nombreux états en ont interdit l'utilisation en 1987.

L'hexafluorure de soufre (SF₆) est, quant à lui, principalement utilisé pour ses capacités isolantes (industrie électrique, double vitrage...). Ce gaz est également utilisé dans la production du magnésium et comme traceur dans la détection des transferts de polluants. Sa production industrielle a débuté en 1953 et il est actuellement considéré comme le plus puissant gaz à effet de serre. Il est principalement d'origine anthropique mais 1% des émissions mondiales serait d'origine naturelle.

La datation des eaux se base sur la comparaison des concentrations en gaz dissous dans les eaux souterraines et les concentrations en gaz dans l'atmosphère qui sont parfaitement connues en divers endroits de la planète. Dans le cas de la présente étude, ce sont les chroniques données par le Earth System Research Laboratory / National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA/ESRL, 2019) et l'Advanced Global Atmospheric Gases Experiment (AGAGE, Prinn *et al.*, 2018) pour la station de Tituila aux îles Samoa qui ont servi de référence (Illustration 152).



Illustration 152 : Chroniques des concentrations dans l'air des CFC et SF₆ (Tituila, Samoa).

5.5.2. Méthode de prélèvement

Les prélèvements d'eau doivent être réalisés de manière à ce que l'échantillon ne soit jamais en contact avec l'atmosphère. Dans cet objectif, Oster *et al.* (1996) ont défini un protocole basé sur l'utilisation de flacons en verre de 500 ml eux même placés dans un récipient métallique (Illustration 153) qui est également rempli d'eau prélevée puis scellé.

Les analyses des gaz dissous (CFC, SF₆) ne font pas l'objet de normes ISO mais le recours à un contrôle continu avec l'utilisation de standards internes et la participation à des exercices de calibration inter-laboratoires permettent de garantir l'obtention de faibles incertitudes (environ 5 %).

Les CFC sont dosés à l'aide d'un chromatographe en phase gazeuse équipé d'un capteur à détecteur d'électrons. Le SF₆ est dosé de la même manière mais une préconcentration initiale de type « purge-and-trap » doit être mise en œuvre. Au final, les concentrations s'expriment en pmol/l pour les CFC et en fmol/f pour le SF₆.



Illustration 153 : Système de prélèvement utilisé en vue du dosage des CFC et SF_{6.}

Il convient de noter que plusieurs phénomènes peuvent entraîner une altération de la concentration en gaz dissous.

Contamination du milieu ou de l'échantillon : le milieu peut être contaminé par la présence d'objets contenant des fréons ou du SF₆ (vieux frigos, transformateurs électriques...). Le non-respect des consignes de prélèvement (contact de l'échantillon avec l'atmosphère actuelle, mauvaise fermeture du flacon...) peut également conduire à une contamination de l'échantillon.

Dégradation : les gaz dissous peuvent être dégradés dans un environnement réducteur, de même que par la présence de matière organique dissoute dans l'échantillon.

Excès d'air : lors des épisodes de recharge, une quantité de gaz additionnelle peut être dissoute sous une pression supérieure à la pression atmosphérique (Wilson et McNeill, 1997). Ce phénomène concerne très fréquemment le SF_6 et dans une moindre mesure le CFC-12.

Formation géogénique : pour le SF₆, il existe un possible apport terrigène en milieu sédimentaire ou riche en fluor ou en soufre.

5.5.3. Estimation des temps moyens de transfert

L'estimation du temps moyen de transfert d'une eau souterraine passe par la prise en compte des concentrations en gaz dissous mais également par l'identification du modèle de circulation le plus probable. Parmi ces modèles, on distingue (Illustration 154) :

- le modèle « piston » qui considère qu'il n'y a pas de mélange entre l'impluvium et la zone de captage ni de modification des activités par dispersion, diffusion ou échange direct ;
- le modèle « exponentiel » qui considère une stratification verticale des âges qui croissent logarithmiquement de 0 à l'infini de la surface de la nappe à sa base, ce qui peut correspondre à un aquifère homogène d'épaisseur négligeable pour lequel la recharge se fait sur toute la surface ;
- le modèle « mélange » qui considère un mélange entre 2 pôles différents.



Illustration 154 : Modèles d'écoulement type piston, exponentiel et mélange binaire.

5.5.4. Zoom sur Tahiti

Compte tenu des contraintes de prélèvements décrites plus haut, seuls 13 points d'eau ont pu faire l'objet de prélèvements en vue du dosage des CFC et du SF₆.

Les analyses effectuées sur les 4 forages de la Punaruu ont mis en évidence des teneurs en CFC-11, CFC-12, CFC-113 et SF₆ très supérieures aux teneurs de l'air atmosphérique, ce qui témoigne d'un phénomène de contamination. Parmi les sources potentielles de pollution les plus probables, on peut mentionner les nombreuses décharges plus ou moins contrôlées qui jalonnent la vallée ainsi que les installations industrielles qui peuvent être équipées de gros transformateurs électriques. Pour ces points, une estimation des temps moyens de résidence n'a donc pas été possible.

Les teneurs relatives aux autres points d'eau ont été reportées dans des diagrammes CFC-113 vs CFC-11 et SF₆ vs CFC-12 puis comparées aux modèles de circulation décrits précédemment (Illustration 155). À noter que sur ces figures, les points clairement contaminés ou influencés par une production géogénique ont été retirés.



Illustration 155 : CFC-113 vs CFC-11 et SF₆ vs CFC-12 (en pptv) pour les échantillons d'eau collectés à Tahiti et modèles théoriques (pointillés = mélange binaire ; trait rouge = modèle exponentiel, trait bleu = modèle piston).

Afin de pouvoir comparer les temps moyens de résidence (TMR) entre eux, un même modèle (le modèle exponentiel qui a semblé être le plus adapté) a été retenu pour l'ensemble des points.

Sur le bassin de la Fautaua, on constate un « rajeunissement » des eaux souterraines de l'amont (TAH_10) vers l'aval (TAH_12), ce qui tend à valider l'hypothèse d'un apport d'eau de surface ou d'eau souterraine rechargée à plus faible altitude. Des temps moyens de résidence de 30-33 ans et de 18 ans ont respectivement pu être déterminés pour TAH_10 et TAH_11 (datation impossible de TAH_12).

Dans le cas des sources littorales du quart nord-ouest de Tahiti (TAH_9, TAH_17 et TAH_18), l'évaluation du TMR est délicate en raison des phénomènes possibles de mélange des eaux souterraines avec l'eau de mer. Il a néanmoins été possible d'estimer une proportion de 70 % d'eau jeune et 30 % d'eau ancienne pour TAH_09 (source Ahavini à Mahina) et de 50 % d'eau

jeune et 50 % d'eau ancienne pour TAH_18 (source Vaitupa à Faa'a). Les résultats obtenus sur la source de la Reine (TAH_17) n'ont, quant à eux, pas été jugés interprétables.

Pour les sources littorales situées à l'ouest et au sud de Tahiti, des TMR respectifs de l'ordre de 42-45 ans et d'une vingtaine d'années ont pu être déterminés pour TAH_19 (grotte de Maraa) et TAH-20 (source Vaima).

Enfin, pour le seul point d'eau du bassin versant de la Papenoo ayant fait l'objet d'analyses (TAH_6, source située au pied du barrage de Tahinu), un TMR d'environ 70 ans a pu être déterminé.

5.6. SYNTHÈSE

Les analyses mises en œuvre sur 28 points d'eau se situant au droit des bassins versants de la Papenoo, de la Punaruu et de la Fautaua ou correspondant à de grosses sources d'intérêt patrimonial ont permis de mettre en évidence :

- le caractère bicarbonaté calcique des eaux ;
- un chimisme peu différent d'un point d'eau à un autre en lien avec un environnement géologique relativement homogène,
- une influence de l'intrusion saline peut toutefois être notée sur quelques points d'eau situés à proximité des côtes (source Vaitupa à Faa'a et forage Vaiopu à Punaauia essentiellement) ;
- un risque de fond hydrogéochimique élevé au droit de la zone située à proximité du culot magmatique dans la haute vallée de la Papenoo. Dans ce secteur, des conductivités plus élevées qu'en moyenne (valeurs supérieures à 600 µS/cm), de même que des pH acides (valeurs inférieures à 5,5) et des teneurs en fer, manganèse et nickel supérieures aux limites de qualité retenues pour la production d'eau potable ont en effet été observées. Des remontées gazeuses de même que des teneurs élevées en silice sont également à mentionner;
- un risque de fond hydrogéochimique faible ailleurs (pour les éléments analysés dans le cadre de cette étude), ce qui valide l'hypothèse d'une bonne qualité générale des eaux superficielles et souterraines émise dans le rapport BRGM/RP-68355-FR (Abou Akar *et al.*, 2019) relatif à la mise en place des réseaux sur l'île de Tahiti.

Les analyses des isotopes de l'oxygène et de l'hydrogène menées sur des échantillons de pluie, d'eaux souterraines et d'eaux superficielles ont permis de montrer que les points s'alignaient selon une droite d'équation légèrement différente de celle qui est retenue à l'échelle mondiale (DMM). La droite météorique locale (DML) s'aligne par contre parfaitement avec celle établie pour les îles Hawaï.

Le faible nombre de stations de mesures et de prélèvements, l'impossibilité d'associer des cumuls pluviométriques fiables à certains prélèvements ainsi que le net effet de masse (appauvrissement isotopique plus marqué des précipitations les plus abondantes) ont par contre rendu le calcul d'un gradient d'altitude moyen impossible. Des hypothèses concernant la circulation des eaux ont néanmoins pu être avancées.

> Bassin versant de la Papenoo

Les teneurs isotopiques observées suggèrent une participation croissante des eaux souterraines de l'amont vers l'aval. Une remontée de fluides géothermaux à proximité du culot magmatique est possible mais ces derniers subissent probablement un phénomène de dilution important.
Sur la base d'un modèle de type exponentiel, un TMR d'environ 70 ans a pu être déterminé pour la source située au pied du barrage de Tahinu (zone à risque de fond hydrogéochimique élevé).

Bassin versant de la Punaruu

Les teneurs isotopiques appauvries suggèrent une infiltration de l'eau à haute altitude (probablement à plus de 1 000 m), un temps de transfert assez important pour permettre une homogénéisation du signal et une contribution importante des eaux souterraines au débit de la rivière.

Des teneurs très supérieures aux teneurs de l'air atmosphérique ont été observées sur les 4 forages échantillonnés, laissant supposer un phénomène de contamination anthropique. Dans ces conditions, aucun temps moyen de résidence n'a pu être calculé.

> Autres bassins versants et sources patrimoniales

La signature isotopique des forages de la Fautaua et des sources de la Reine (Papeete) et de Vaitupa (Faa'a) est proche de celle des points d'eau prélevés dans la Punaruu. Une contribution d'eaux infiltrées à plus basse altitude et de plus en plus importante de l'amont vers l'aval est toutefois soupçonnée dans la Fautaua.

Les autres sources littorales ont présenté soit des teneurs isotopiques proches de celles observées dans la Papenoo (cas des grottes de Maraa et de la source Vaima), soit des teneurs intermédiaires (source Ahavini à Mahina).

Dans la vallée de la Fautaua, l'hypothèse d'un apport d'eau de surface ou d'eau souterraine rechargée à plus faible altitude sur les points situés les plus à l'aval a pu être confirmée par les datations. Les âges les plus importants (30 à 33 ans) correspondent au forage horizontal TAH_10.

Pour les sources littorales situées à l'ouest et au sud de Tahiti, des TMR respectifs de l'ordre de 42-45 ans et d'une vingtaine d'années ont pu être calculés pour la grotte de Maraa et la source Vaima.

Enfin, pour les autres sources littorales du quart nord-ouest de Tahiti, l'évaluation du TMR est délicate en raison des phénomènes possibles de mélange des eaux souterraines avec l'eau de mer. Il a néanmoins été possible d'estimer une proportion de 70 % d'eau jeune et 30% d'eau ancienne pour la source Ahavini à Mahina et de 50 % d'eau jeune et 50 % d'eau ancienne pour la source Vaitupa à Faa'a.

6. Modèles conceptuels

Sur la base des résultats des différentes investigations, il est possible de proposer un modèle conceptuel hydrogéologique pour les 2 bassins versants étudiés de façon détaillée.

Dans le cas de la Papenoo, le modèle retenu correspond à celui d'un bassin versant limité par de très hautes crêtes et présentant un allongement sud-nord d'environ 20 km. Le bassin versant est parcouru par un réseau hydrographique dense et jalonné par plusieurs barrages à vocation hydroélectrique (Illustration 156).

Le bassin versant est soumis à un gradient pluviométrique avec des cumuls annuels supérieurs à 10 000 mm sur les plus hauts sommets, des précipitations de l'ordre de 5 500 mm/an au droit de la zone centrale et de l'ordre de 3 500 mm/an sur la bande côtière. Sur la base d'une RFU de 5 mm, les pluies efficaces ont pu être estimées à 80 % de la pluie totale, soit 4 400 mm/an. En l'absence de données hydrométriques récentes fiables, la répartition de ce cumul entre ruissellement et infiltration n'a pas pu être estimée mais des études anciennes mentionnent un coefficient de 69 %. Dans ces conditions, l'infiltration ne représente que 600 mm/an (soit un peu moins de 10 % des précipitations).



Illustration 156 : Modèle conceptuel hydrogéologique défini pour le bassin versant de la Papenoo.

Sur le plan de la géologie, le flanc nord de l'île de Tahiti a connu un phénomène d'effondrement majeur à l'origine du comblement des vallées par des coulées de débris il y a environ 0,87 Ma. L'épisode de remplissage basaltique qui s'est déroulé aux alentours de 0,22 Ma est, quant à lui, à l'origine des plateaux visibles dans la moyenne vallée.

Dans la haute vallée, des sources d'altitude émergeant à la faveur de niveaux imperméables peuvent être repérées sur les flancs des plus hauts sommets. Leur caractère souvent pérenne atteste des dimensions importantes des aquifères drainés.

Dans ce secteur, les laves anciennes présentent un caractère altéré et le culot magmatique (non visible à l'affleurement) est a priori constitué de roches grenues très denses que l'on retrouve sous forme de galets dans le lit des rivières. La zone andésitique recoupée par de nombreux filons semble donc être plus intéressante pour la recherche de nouvelles ressources en eau même si les tomographies électriques ont montré que ces dernières étaient également altérées sur une épaisseur pouvant atteindre 50 m.

Les reconnaissances hydrogéologiques ont en effet permis d'identifier des circulations d'eau dans ces formations et la présence de nombreuses venues de gaz (CO₂) notamment à mesure que l'on s'approche du culot magmatique renforce l'hypothèse d'une perméabilité importante.

Ce potentiel aquifère qui reste à reconnaître est néanmoins associé à un risque de fond hydrogéochimique élevé. Des conductivités supérieures à 600 μ S/cm de même que des pH inférieurs à 5,5 et des teneurs en fer, manganèse et nickel supérieures aux limites de qualité retenues pour la production d'eau potable ont en effet été observées dans cette zone. On peut également reporter de fortes teneurs en silice (indicateur du temps de contact eau/roche) et un TMR (temps moyen de résidence) de 70 ans pour une source située au pied du barrage Tahinu.

Dans le secteur de la Vaiputoa (moyenne vallée), les rivières s'écoulent à la base des formations basaltiques prismées récentes, au contact des coulées de débris moins perméables. Les reconnaissances géophysiques ont montré que les dépôts alluvionnaires étaient homogènes et présentaient une puissance d'environ 10 à 15 mètres. Ces derniers reposent sur des coulées de débris d'environ 40 mètres d'épaisseur dont le sommet est altéré et dont le substratum est constitué par la partie supérieure, également altérée, des coulées basaltiques anciennes.

Les coulées de débris et les coulées basaltiques altérées ne représentant pas, a priori, de bons réservoirs, la présence de ressources en eau souterraine profonde est peu probable. Dans ces conditions, seul l'aquifère alluvial dont la vulnérabilité peut être considérée comme forte du fait de son caractère superficiel et de sa faible épaisseur pourrait constituer une cible pour la recherche de ressources.

À l'aval, le phénomène d'intrusion saline, bien que très probable, n'a pas été observé.

Dans la Papenoo, les teneurs isotopiques observées (δ^2 H et δ^{18} O) suggèrent une participation croissante des eaux souterraines de l'amont vers l'aval. Une remontée de fluides géothermaux à proximité du culot magmatique est possible mais ces derniers subissent probablement un phénomène de dilution important (faibles températures et absence de fractionnement).

Au final, il apparaît que les secteurs étudiés peuvent receler des ressources en eau intéressantes mais leur qualité reste incertaine soit en raison du caractère superficiel de l'aquifère (cas de la moyenne vallée) soit en raison de la proximité du culot magmatique (cas de la haute vallée).

Dans le cas de la Punaruu, le modèle retenu correspond également à celui d'un bassin versant limité par de hautes crêtes et présentant un allongement est-ouest d'environ 13,5 km. Par rapport au bassin versant de la Papenoo, la zone d'étude se caractérise par une vaste zone de plateaux d'altitudes intermédiaires et par un réseau hydrographique moins dense (Illustration 157).

Le bassin versant est soumis à un gradient pluviométrique avec des cumuls annuels de l'ordre de 2 795 mm à 1 410 m, de 2 100 mm à 580 m et de 1 705 mm à 10 m. Sur la base d'une RFU de 5 mm, les pluies efficaces ont pu être estimées à 72 % de la pluie totale, soit 1 500 mm/an. Le taux de ruissellement (lame ruisselée sur lame précipitée) a, quant à lui, été estimé à 60 % en moyennant des données anciennes et des données acquises dans le cadre de la présente étude. Dans ces conditions, l'infiltration ne représente que 240 mm/an (soit un peu plus de 10 % des précipitations). En complément de ces éléments, les prélèvements en eau superficielle effectués sur le captage te Oropa (5,6 Mm³ en 2017) ont été précisés.

Sur le plan de la géologie, les interprétations les plus récentes considèrent que la vallée de la Punaruu est constituée par les épanchements du bouclier principal et que les plateaux intermédiaires (dont celui de Tamanu) sont issus d'un remplissage de lave fluide porphyrique provenant de la formation du deuxième bouclier. Les investigations menées ont également permis de reconnaître, en rive gauche du cours d'eau, des coulées de débris témoignant d'effondrements sectoriels.



Illustration 157 : Modèle conceptuel hydrogéologique défini pour le bassin versant de la Punaruu.

Reconnu par quelques forages industriels, le remplissage alluvionnaire semble très hétérogène. Sur les premières dizaines de mètres, les alluvions présentent une granulométrie variable et une alternance de passages colmatés et de couches perméables (au moins 2). Ce niveau surmonte un horizon argilo-limoneux imperméable de quelques mètres d'épaisseur contenant des galets de petites tailles. Plus en profondeur (vers 40 m), une incertitude demeure sur la nature de l'horizon fissuré aquifère rencontré mais l'hypothèse la plus probable consiste à l'attribuer à une coulée de débris. L'ensemble repose sur les coulées basaltiques de l'épanchement principal.

Sur la base des dénominations retenues par Aureau (2014) et des travaux de réinterprétation des données de pompages d'essai disponibles par la méthode des dérivées, il a été possible de mieux approcher les paramètres hydrodynamiques (transmissivité et coefficient d'emmagasinement) de ces 4 ensembles et de préciser leurs connexions éventuelles. Au droit de la zone industrielle, le sous-sol se caractériserait par la présence :

- d'une nappe supérieure libre périodique dite « **NSLP** » (T = $1,0.10^{-3}$ m²/s, S = 0,16);
- d'une éponte de 1 m environ ;
- d'une nappe alluviale intermédiaire dite « NAI » (T = 3,0.10⁻¹ m²/s, S = 0,025) sollicitée par les 2 forages d'EDT et alimentée, au moins partiellement, par drainance par la NSLP ;
- d'un niveau argileux de quelques mètres d'épaisseur se biseautant vers l'amont ;
- d'une nappe inférieure semi-captive dite « NISC » (7,5.10⁻² m²/s, S = 0,015) entièrement captée par le forage F1 de la Brasserie de Tahiti ;
- d'une éponte de quelques mètres d'épaisseur dont la perméabilité (K) n'excèderait pas 4,0.10⁻⁶ m/s;
- d'une nappe basale fracturée dite « NBF » (T = 5,0.10⁻³ m²/s, S = 0,002) partiellement captée par les ouvrages F3 et F2 de la Brasserie de Tahiti.

L'approche mise en œuvre a également permis de réinterpréter la coupe géologique du forage de Tahiti Agrégats et d'attribuer les niveaux alluvionnaires traversés aux alluvions anciennes repérées en hauteur du côté nord de la vallée.

Si la nappe supérieure libre périodique (NSLP) et la nappe alluviale intermédiaire (NAI) n'ont pas pu être distinguées au sein des alluvions, les profils géophysiques ont néanmoins permis d'imager l'agencement des terrains au droit de 2 profils. De façon globale, l'épaisseur des alluvions mise en évidence (15 m environ) est inférieure à celles observées plus en aval au droit des forages d'EDT ou de la Brasserie. Sur le profil amont, ces dernières surmontent une coulée de débris puis les formations altérées du bouclier principal puis les basaltes sains (situés aux environs de 100 m de profondeur aux abscisses 130 et 480 m). Sur le profil aval, les alluvions semblent directement surmonter les laves altérées alors que le toit du basalte sain se situe à plus de 60 m de profondeur. Dans les 2 cas, les formations basaltiques saines doivent constituer une cible à privilégier pour la recherche de nouvelles ressources en eau par forage.

Dans la Punaruu, les teneurs isotopiques observées (δ^2 H et δ^{18} O) suggèrent une infiltration de l'eau à haute altitude, un temps de transfert assez important pour permettre une homogénéisation du signal et une contribution importante des eaux souterraines au débit de la rivière. On peut supposer que les phénomènes de mélange interviennent à l'aplomb des plateaux.

À l'aval, le léger phénomène d'intrusion saline mis en évidence sur le forage de Vaiopu et la probable contamination des eaux souterraines par des CFC et du SF₆ (qui a rendu la datation des eaux impossible) constituent les 2 problèmes qualitatifs majeurs. Cette dernière pourrait provenir des dépôts plus ou moins contrôlés qui jalonnent la vallée ou de l'activité industrielle.

7. Conclusion

Les investigations menées sur l'île de Tahiti entre février 2018 et mars 2019 ont principalement porté sur 2 bassins versants situés dans des contextes géographiques et géologiques bien différents. Malgré ces différences, les 2 bassins versants présentent des caractéristiques communes, notamment en ce qui concerne les modalités d'écoulement ou le chimisme de l'eau.

Dans la Papenoo, la zone andésitique recoupée par de nombreux filons semble correspondre à la zone la plus favorable pour la recherche de nouvelles ressources en eau dans la haute vallée. Les reconnaissances hydrogéologiques ont en effet permis d'identifier des circulations d'eau et la présence de nombreuses venues de gaz (CO₂) notamment à mesure que l'on s'approche du culot magmatique, renforce l'hypothèse d'une perméabilité importante. Ces remontées gazeuses ainsi que les temps de séjour importants dans l'aquifère (confirmés par les teneurs en silice et un TMR de l'ordre de 70 ans) induisent toutefois un risque de fond hydrogéochimique élevé (conductivité, pH, fer, manganèse et nickel). Les nombreux filons présents dans la zone pourraient contribuer à compartimenter l'aquifère. Le toit des andésites saines pourrait être intercepté à une profondeur comprise entre 30 et 65 m.

Dans le cas où le Pays souhaiterait passer à une phase de recherche opérationnelle, le BRGM recommande d'implanter le forage dans la zone andésitique mais à distance du culot magmatique.

Dans le secteur de la Vaiputoa (moyenne vallée), la présence de coulées de débris à faible profondeur rend la présence de ressources en eaux souterraines profondes peu probable. Dans ces conditions, l'aquifère alluvial dont l'épaisseur atteint 10 à 15 m peut représenter une cible pour la recherche de nouvelles ressources.

Dans le cas où le Pays souhaiterait également passer à une phase de recherche opérationnelle dans ce secteur, le BRGM recommande de réaliser le forage en rive droite de la rivière où les alluvions semblent un peu plus épaisses et de ne pas dépasser la profondeur de 20 à 25 m.

Au final, il apparaît que les secteurs étudiés dans la Papenoo peuvent receler des ressources en eau intéressantes mais leur qualité reste incertaine soit en raison du caractère superficiel de l'aquifère (cas de la moyenne vallée) soit en raison des remontées gazeuses (qui à ce stade de connaissance ne présentent pas d'intérêt économique) et/ou d'un temps de séjour important dans l'aquifère qui peuvent engendrer des pH acides et de fortes teneurs en métaux (cas de la haute vallée).

Dans la vallée de la Punaruu, des traces d'effondrement sectoriel ont pu être identifiées et 4 nappes sont recensées à l'aplomb de la zone industrielle. Les 2 plus superficielles se situent au droit des formations alluviales, la troisième (qui n'est pas systématiquement présente) au droit des coulées de débris et la quatrième, au droit des formations basaltiques du bouclier initial (à partir de 40 à 50 m de profondeur).

En termes de potentiel et de qualité, cette dernière demeure la plus intéressante. Elle doit donc constituer un objectif pour la recherche de nouvelles ressources.

En amont de la zone industrielle, le toit de cette formation a pu être reconnu entre 60 et 100 m. Dans ces conditions, la création d'un ouvrage destiné à alimenter l'extension de la zone industrielle pourrait être envisagé. A noter toutefois que la réalisation d'un tel ouvrage pourrait impacter la productivité des forages F2 et F3 de la Brasserie de Tahiti. Les prélèvements prévisionnels devront être comparés au volume annuel infiltré sur le bassin versant (estimé à 11 M m³).

Sur le plan de la qualité, à l'exception de la zone andésitique située dans la haute vallée de la Papenoo, il n'existe pas d'autre zone à risque de fond hydrogéochimique élevé au droit des 2 bassins versants étudiés, ce qui valide l'hypothèse d'une bonne qualité chimique générale des eaux superficielles et souterraines émise préalablement (Abou Akar *et al.*, 2019).

Dans la vallée de la Fautaua, l'hypothèse d'un apport d'eau de surface ou d'eau souterraine rechargée à plus faible altitude sur les points situés les plus à l'aval a pu être formulée et des âges de 30 à 33 ans ont pu être calculés pour les eaux les plus vieilles. Pour les sources littorales situées à l'ouest et au sud de Tahiti, des temps moyens de résidence respectifs de l'ordre de 42-45 ans et de 20 ans ont pu être calculés pour la grotte de Maraa et la source Vaima.

Au-delà de ces résultats, il apparaît que l'approche pluridisciplinaire mise en œuvre s'est avérée adaptée pour juger de la pertinence de réaliser des forages dans les secteurs d'intérêt préalablement identifiés et préciser certains mécanismes hydrogéologiques.

Elle a par contre montré des limites en ce qui concerne la détermination de l'origine géographique et de l'âge des eaux prélevées. Compte tenu de ces observations, il est recommandé que le suivi isotopique des pluies puisse être mené sur au moins 2 cycles hydrologiques à partir de dispositifs permettant de récupérer l'ensemble des précipitations si de nouveaux bassins versants devaient faire l'objet d'une approche similaire. Le recours à des méthodes de datation complémentaires ainsi que l'instrumentation de 1 à 2 forages en vue d'un suivi des niveaux piézométriques et de paramètres physiques tels que la température et la conductivité pourraient également constituer une amélioration méthodologique.

8. Bibliographie

Abou Akar A., Pasquier S. et Corbier P. (2019) – Programme d'actions pour l'exploitation et la gestion des eaux souterraines de la Polynésie française : mise en place d'un réseau piézométrique et d'un réseau qualité sur l'île de Tahiti. Rapport final. BRGM/RP-68355-FR, 27 p., 17 ill., 4 ann.

Araguas L., Froelich K., Rozanski K. (1998) – Stable isotope composition of precipitation over southeast Asia. Journal of Geophysical Research, 103, D22, 28721-28742.

Aureau M. (2014) – Modélisation des écoulements en surface et souterrains, vallée de la Punaru'u – Tahiti. Thèse de doctorat, Laboratoire géopôle du Pacifique sud. 220 p.

Bardintzeff J.M., Bellon H., Bonin H., Brousse., Mc Birney A. (1988) – Plutonic rocks from Tahiti-Nui caldera (Society archipelago, French Polynesia): a petrological, geochemical and mineralogical study. *In: journal of volcanology and geothermal research, 35,* pp. 31-53.

Becker M., Brousse R., Guille G., Bellon H (1974) – Phases d'érosion comblement de la vallée de la Papenoo et volcanisme sub-récent à Tahiti, en relation avec l'évolution des îles de la Société (Pacifique Sud). *In: Marine Geology, 16.* pp. 71-77.

Bonin B., Bardintzeff J.M. (1989) – Plutonic rocks from Tahiti-Nui caldera (French Polynesia) – Evolution of thermodynamical parameters during magma differentiation and emplacement. Applications to other alkaline magmatic provinces. *In: Bull. Soc. France, 1989, (8)*, pp. 1091-1099.

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

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

Boyer (2007) – Rapport sur les essais de pompage menés sur le forage de Tahiti Agrégats

Bretaudeau F., Mathieur F., 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.

Brousse R. (1993) – La géologie des îles hautes, Atlas de la Polynésie française, ORSTOM éditions, planche 28.

Clouard V., Bonneville A. (2004) - Submarine landslides in French Polynesia. Oceanic hotspots. Ed. Springer, pp. 209-238.

Corbier P., Pasquier S. (2018) – 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., 4 ann.

Deneufbourg G. (1965) - Carte géologique de Tahiti (1/40 000), notice explicative, BRGM.

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

Duvert C., Raiber M., Owen D. D. R., Cendón D. I., Batiot-Guilhe C., Cox M. E. (2015) - Hydrochemical pro-cesses in a shallow coal seam gas aquifer and its over-lying stream–alluvial system: implications for recharge and inter-aquifer connectivity, Appl. Geochem., 61, 146–159,doi:10.1016/j.apgeochem.2015.05.021.

Gadalia A., Nehlig P., Tegyey M., Guillou-Frottier L., Thiéblemont D., Barroux B. (2007) - Reconnaissance géothermique de l'île de Tahiti – Première phase. Rapport final. BRGM/RC-55598-FR, 40 p., 6 fig., 1 tabl., 6 annexes en volume séparé.

Gallant J.C., Wilson J.P. (2000) - Primary topographic attributes in J.P. Wilson, J.C. Gallant (Eds.), Terrain Analysis: Principles and Applications, Wiley, New York (2000), pp. 51-85

Gat J.R. (1996) - Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle. Annu. Rev. Earth Planet Sci. 24, 225–262.

Gillot P.Y., Talandier H., Guillou H. and Le Roy I. (1993) – Temporal evolution of the volcanism at Tahiti Island: Geology and structural evolution. In *Internationnal Workshop on Intraplate Volcanism: The Polynesian Plume Province,* Papeete, Tahiti.

Haßler K., Dähnke K., Kölling M., Sichoix L., Nickl A.L., Moosdorf N. (2019) - Provenance of nutrients in submarine fresh groundwater discharge on Tahiti and Moorea, French Polynesia. Applied Geochemistry, 100, 181-189

Herrera C., Custodio E. (2008) – Conceptual hydrogeological model of Easter Island (Chile) after chemical and isotopic survey. Hydrogeology journal, 16:1329-1348

Hildenbrand A., Gillot P.Y, Le Roy I. (2004) – Volcano-tentonic and geochemical evolution of an aceanic intra-plate volcano: Tahiti-Nui (French Polynesia). Earth and Planetary Science Letters, 217(3), pp. 349-365.

Hildenbrand A., Marlin C., Conroy A., Gillot P.Y., Filly A., Massault M. (2005) – Isotopic approach of rainfall and groundwater circulation in the volcanic structure of Tahiti-Nui (French Polynesia). Journal of hydrology, 302(1), pp. 187-208.

Hildenbrand A., Gillot P.-Y. (2006) – Evidence for a differentiated ignimbritic activity ending the building stage of Tahiti-Nui (French Polynesia). C.R. Geosciences, 338, pp. 280-287.

IAEA (1992) – Statistical treatment of data on environmental isotopes in precipitation, Tech. Rep. Serie, vol. 331, 720 pp., Vienna.

IAEA (2006) – Use of Chlorofluorocarbons in hydrology: A guidebook. STI/PUB 1238, IAEA, Vienna. 277p.]

Join J.L., Folio J.L., Robineau B. (2005) – Aquifers and groundwater within active shield volcanoes. Evolution of conceptual models in the Piton de la Fournaise volcano. Journal of volcanology and geothermal research, pp. 187-201.

Lafforgue R. (1993) – L'hydrologie, Atlas de la Polynésie française, ORSTOM éditions, planche 41.

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

Le Roy I., Cheminée P.Y., Hékinian R and Guillou H. (1993) – Synchronicity of the volcanisme in Tahiti and in the Society active zone: volcanic budget. In *Internationnal Workshop on Intraplate Volcanism: The Polynesian Plume Province,* Papeete, Tahiti.

Mardhel V., Gravier A. (2005) – Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines du Bassin Seine-Normandie. Rapport BRGM RP-54148-FR, 92 p.

Maury R.C., Le Dez A. (2000) – Carte géol. France (1/25 000), feuille Moorea – Polynésie française. Orléans : BRGM. Notice explicative par Maury R.C., Le Dez A., Guillou H. (2000) 62p.

Newmann B.D., Osenbruck K., Aeschbach-Hertig W., Solomon K., Cook P., Rozanski K., Kipfer R. (2010) – D ating of "young" groundwater using environmental tracers : advantages, applications, and research needs. Isotopes in Environmental and Health Studies, 46:3, 259-278

NOAA/ESRL (2019) – Chloroflurocarbon-11, Chloroflurocarbon-12, Chloroflurocarbon-113, Sulfur hexaflouride data from the NOAA/ESRL halocarbons in situ program DOI: http://doi.org/10.7289/V5X0659V

ORSTOM (1993) – Atlas de la Polynésie française

Oster H., Sonntag C., Munnich K.O. (1996) – Groundwater age dating with chlorofluorocarbons, Water Ressour. Res., Vol. 32, No. 10, 2989-3001

Ozog R., Vernoux J.F. (2012) – Inventaire des données relatives à l'eau souterraine disponibles à Tahiti. Rapport final – Rapport BRGM/RP-61597-FR, 102 p., 35 figures, 21 tableaux, 2 annexes

Permana D. S., Thompson L.G., Setyadi G. (2016) – Tropical West Pacific moisture dynamics and climate controls on rainfall isotopic ratios in southern Papua, Indonesia, J. Geophys. Res. Atmos., 121, 2222–2245, doi:10.1002/2015JD023893.

Petit P. (1969) – Etudes hydrogéologiques en Polynésie française. Service des Travaux Publics et des Mines – Centre Expérimental de Recherches et d'Etudes du Bâtiment et des Travaux Publics, Papeete, pp. 378.

Prinn R.G., Weiss R.F., Frasser P.J. et al. (2018) – History of chemically and radiatively important atmospheric gases from the Advanced Global Atmospheric Gases Experiment (AGAGE), Earth Syst. Sci. Data, 10, 985-1018, https://doi.org/10.5194/essd-10-985-2018, 2018.

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

Rozanski K., Araguás L., Gonfiantini R. (1993) – Isotopic Patterns in Modern Global Precipitation, in: Climate Change in Continental Isotopic Records, edited by Swart, P. K., Lohman, K. C., McKenzie, J., and Savin, S., 1–36, American Geophysical Union, Washington D.C., USA, doi:10.1029/GM078p0001.

SAFEGE (1988) – Etude des ressources en eau. Syndicat central de l'hydraulique. Rapport de synthèse.

Schlumberger (2002) – Well test interpretation. SCHLUMBERGER. Rap., 122 p.

Scholl M.A., Ingebritsen S.E., Janik C.J., Kauahikaua J.P. (1996) – Use of precipitation and ground water isotopes to interpret regional hydrology on a tropical volcanic island: Kilauea volcano area, Hawaii. Water Resour. Res. 32 (12), 3525–3537.

Scholl M.A., Gingerich S.B., Tribble G.W. (2002) – The influence of microclimates and fog on stable isotope signatures used in interpretation of regional hydrology: East Maui, Hawaii. Journal of Hydrology, 264, 170-184

SEDEP (1988) – Aménagement hydroélectrique de la haute Papenoo, Etude d'impact. 191 p.

SEDEP (1992) – Aménagement hydroélectrique de la moyenne vallée de la Papenoo, Notice d'impact. 124 p.

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

SPEED (2003) – Diagnostic des forages de production d'eau potable de la Punaruu.

SPEED (2006) – Diagnostic des forages de la centrale électrique de la Punaruu.

Wilson G. B., McNeill G. W. (1997) – Noble gas recharge temperatures and the excess air component. Appl. Geochem. 12(6), 747–762.

Annexe 1

Données des reconnaissances géologiques

POINT GEOL	DATE	х	Y	Z	Formation	Type_Affleurem ent	Petrologie	Description
283	19/02/2018	241784	8056196	60,70	Lave basaltique	Lave massive	basalte	Falaise de basalte abrupte ou coule une cascade. Roche massive sans scories. Basalte légèrement vacuolaire. Pyroxène de 0,5 à 1 mm. Feldspaths
284	19/02/2018	241834	8056370	50,09	Lave	Lave scoriacée	basalte	Lave scoriacée basaltique moins altérée qu'auparavant. Paroi verticale de 40 m de baut avec belles diaclases de même bauteur
285	19/02/2018	241615	8056009	155 18	Alluvions	Allvions		Traversée de la Panenoo
286	19/02/2018	241596	8056038	143,01	Coulée de débris	Coulées de débris		ci, la cascade en provenace du Plateau d'Umauma coule sur une marche de 2 à 3 m de haut constituée de coulées de débris ou de lahars (les blocs sont relativement arrondis mais dautres restent anguleux). On suit cette marche sur plus de 50 m de long en direction de la vallée.
288	19/02/2018	241558	8055951	50,94	Coulée de débris	Coulées de débris		la formation de débris tourne vers l'ouest en dehors du chemin.
289	19/02/2018	241439	8055738	72,65	Lave basaltique	Lave massive	basalte	Au pied de la falaise en rive droite, empilement d'orgues basaltiques sur au moins 80 m de haut.
290	19/02/2018	241365	8055793	74 23	Coulée de	Coulées de		Au début du canyon, en rive gauche, on retrouve la coulée de débris
291	19/02/2018	241297	8055947	74,38	débris Coulée de débris	débris Coulées de débris		surmontées des orgues basaltiques En amont du premier virage de la vallée, on retrouve les coulées de débris aussi bien en rive droite que gauche. En rive gauche, on voit une très belle coulée basaltique reposant sur la coulée de débris (coupe transversale dans la coulée montrant les structures de refroidissement inférieures et supèrieures) (Dessin)
292	19/02/2018	241378	8055856	75,32	Altérites	Altérites		on est remonté sur le chemin en direction du plateau d'Umauma. Tout est très altéré sur cette pente. Beaucoup d'éboulis dont certaines sont légèrement indurés.
293	19/02/2018	241316	8055911	134,21	Lave basaltique	Lave massive	basalte	Toujours dans la montée vers le plateau, on est clairement repassé dans les laves basaltiques mais son substratum n'est pas net (éboulis, coulée de débris ou lave altérée 2)
296	20/02/2018	242384	8047082	408,72	Altérites	Altérites		Jusqu'ici, rien de visible. On est dans des formations superficielles altérées, très végétalisées. Le roche basaltique très diaclasée
297	20/02/2018	242408	8047026	413,99	Lave basaltique	lave massive	basalte	Un peu plus haut, on retrouve les roches massives diaclasées
298	20/02/2018	242422	8046972	422,87	Lave basaltique	lave massive	basalte	En bordure de la route en montant, on retrouve un beau basalte aphyrique bien diaclasé.
299	20/02/2018	242498	8046662	436,50	Lave basaltique	lave scoriacée	basalte	Cascade sur lave massive scoriacée à gros blocs décimétriques. La lave noire avec seulement quelques gros feldspaths altérés. Un peu plus haut, la lave est véritablement aphyrique.
300	20/02/2018	242509	8046616	446,40	Lave basaltique	lave scoriacée	basalte	En se rapprochant du captage, affleurement d'1 m de haut de brèche à blocs vacuolaires plutôt anguleux. Il pourrait s'agir d'un effondrement de bordure de grosse coulée scoriacée ou d'une coulée pyroclastique.
301	20/02/2018	242481	8046561	447,49	Coulée de débris	Coulée de débris		Au niveau du captage. En rive droite, brèches plutôt homogène mais à matrice très altérée. Les clastes sont homogènes gris-clair et parfois vacuolaires. Plutôt de type coulée pyroclastique. Plus haut dans la ravine, la même brèche est visible, et plus bas également sur plusieurs dizaines de mètres de hauteur. En rive gauche, belle lave massive diaclasée.
302	20/02/2018	242505	8046582	459,25	Coulée de débris	Coulée de débris		Plus bas dans la ravine, une cascade de plus de 30 m de haut en rive droit coule sur 3 unités de coulées de débris. Ceci confirme le fait que plus haut, la brèche est plutôt une coulée de débris. Ici, les clastes sont identiques mais il y a des clastes hétérogènes également.
303	20/02/2018	241938	8047924	289,26	Lave basaltique	lave massive	basalte	Sur la route en descendant sur la gauche, roche basaltique noir à débit en plaquette. Elle pourrait de pas être en place. Elle est très altérée malgré son aspect massif.
305	20/02/2018	241866	8048201	238,78	Coulée de débris	Coulée de débris		Toujours à droite de la route, coulée de débris avec blocs plurimétriques. On les suit jusqu'en bas au croisement des chemins
306	20/02/2018	242956	8046842	351,52	Lave basaltique	lave massive	basalte	On remonte légèrement un affluent de la rivière. En rive droite, belle lave massive à diaclases subverticales. Basalte gris-sombre aphyrique. La rivière coule sur une épaisse colonne de colluvions.
307	20/02/2018	242976	8046842	337,12	Lave basaltique	lave massive	basalte	Un peu plus haut dans la ravine, belle cascade sur lave massive avec sills sub-horizontaux + dyke E-W. Au pied de la cascade, la lave parait plus scoriacée. Empilement net de coulées. A droite de la cascade, la géologie est plus compliquée mais les pointements de lave massive sont bien visibles. Les dykes semblent plus nombreux de ce côté-là. Il y a au moins une cascade acec une sortie d'eau dans les laves (à droite de la cascade).
308	20/02/2018	242928	8046678	362,25	Coulée de débris	Coulée de débris		La rivière coule sur un affleurement de coulée de débris à blocs décimétriques. La matrice est très altérée. Certains blocs sont très vitreux, d'autres très vacuolaires.
309	20/02/2018	242926	8046539	378,60	Lave basaltique	lave massive	basalte	Au pied du barrage, la rivière coule sur une belle lave massive, probablement basaltique. On la trouve également dans la falaise en rive gauche sur 30 m de hauteur + dyke bien visible.
311	20/02/2018	242867	8046974	353,43	Lave basaltique	lave massive	basalte	En montant sur le 2ème chemin vers le barrage, belle cascade de 30 m de haut sur lave massive à blocs bien anguleux par endroits (probablement basaltique)
312	20/02/2018	242765	8047057	347,19	Lave basaltique	lave scoriacée	basalte	Dyke de lave noire aphyrique E-W bien prismé horizontalement (flanc droit de la route en descendant) dans des laves scoriacées très altérées (matrice marron).
313	20/02/2018	242735	8047123	333,65	Lave basaltique	lave scoriacée	basalte	Flanc droit de la route en descendant. Cascade de 10 m de haut sur lave scoriacées à blocs massifs et vacuolaires selon les zones.
314	20/02/2018	242527	8047651	274,11	Lave basaltique	lave scoriacée	basalte	La rivière coule en cascade sur des laves scoriacées à massives très altérées avec bandes d'altération hydrothermale. Présence de baguettes de feldspaths.

315	20/02/2018	241997	8048086	236,78	Lave basaltique	lave scoriacée	basalte	En contrebas du pont, en rive droite, on voit clairement les laves légèrement scoriacées.
318	21/02/2018	242087	8047514	314,75	Lave basaltique	lave massive	basalte	Dans zone éboulée, lave massive gris aphyrique très altérée à matrice gris- marron. Très diaclasée
319	21/02/2018	242154	8047420	314,23	Lave basaltique	lave massive	basalte	De nouveau un bel éboulis au pied d'une lave massive altérée à matrice gris- marron. Trace de minéralisation (Sulfure, galène ?)
320	21/02/2018	242166	8047383	317,29	Lave basaltique	lave massive		Petite cascade sur couloir de lave massive altérée. Matrice aphyrique gris- marron
322	21/02/2018	242199	8047313	319,57	Lave	lave massive		Depuis 320, deux pointements de lave massive anguleuse à diaclase.
323	21/02/2018	242174	8046995	336,72	Lave basaltique	lave scoriacéé		Encore un éboulis (arrachement de végétation) sur un soubassement de lave massive, un peu plus scoriacée ici. Quelques fragments plus frais sont conservés : matrice gris-noir totalement aphyrique.
324	21/02/2018	242137	8046947	356,11	Andésite	lave massive	andésite	Bel affleurement de 15 m de haut d'une coulée complètement altérée. Matrice gris-clair andésitique grenue entourant des blocs plus conservés. Présence nette de nombreux cristaux de pyrite altérée (tâches rouges). Diaclases bien présentes.
325	21/02/2018	242093	8046896	356,61	Lave basaltique	lave massive	basalte	Belle cascade coté gauche de la route sur coulée de lave massive légèrement scoriacée. Petit dyke N190 de 30 cm.
326	21/02/2018	242018	8046889	375,73	Lave basaltique	lave massive	basalte	Arrachement d'arbre laissant apparaître une lave massive contenant de rares cristaux de pyroxène (0,5 mm)
327	21/02/2018	242003	8046884	372,13	Lave basaltique	lave massive	basalte	5 mètres plus loin, on voit cette lave massive en place avec débit en plaquette verticale. Il s'agit d'un sill au contact duquel coule une petite cascades et plusieurs suintements dans le sill. Il est injecté dans des laves massives très altérées.
328	21/02/2018	241885	8046843	381,45	Andésite	lave massive	andésite	La cascade coule à droite d'une formation andésitique très altérée avec débit en boules
330	21/02/2018	241793	8046731	428,93	Andésite	lave massive	andésite	Au-dessus de la conduite enterrée (partiellement dégagée), on retrouve la lave massive andésitique bien altérée à débit sub-horizontal sur 10 m de haut.
331	21/02/2018	241782	8046610	405,59	Andésite	lave massive	andésite	Toujours dans les laves massives anciennes andésitiques très diaclasées et très altérées localement.
332	21/02/2018	241788	8046576	418,56	Sill	Sill	basalte	Sill de lave gris-noir aphyrique dans les laves andésitiques altérées.
333	21/02/2018	241751	8046379	458,14	Andésite	lave massive	andésite	La rivière coule sur un affleurement de lave massive andésitique très altérée à tâche rouges (cristaux de pyrite altérés). Roche peu consolidée. Plusieurs dykes sont présents. Un dyke de lave aphyrique de direction N230. Le plus gros dyke (lave grise aphyrique) d'un mètre de large est de direction F-W
334	21/02/2018	241682	8046424	511,58	Andésite	lave massive	andésite	Au centre du réservoir (où seule coule la rivière). En rive gauche, sur 30 m de haut, lave andésitique altérée. Nombreux dykes très inclinés parfois. En rive droite, c'est moins haut mais la même lithologie est observée. Les diaclases sont importantes.
336	21/02/2018	241694	8046460	536,64	Andésite	lave massive	andésite	Photo prise du haut du barrage montrant les laves andésitiques altérées zébrées de dykes et sills.
338	21/02/2018	243014	8045139	771,02	Lave basaltique	lave massive	basalte	Montée jusqu'au tunnel de la Papenoo. A droite de l'entrée du tunnel, présence d'une lave massive plutôt fraîche, peu altérée mais aphyrique de couleur gris-noir légèrement rouge à certaines endroits.
339	21/02/2018	242831	8045122	781,15	Lave basaltique	lave scoriacée	basalte	Coulées de lave scoriacées rouge à gros pyroxène et clastes vacuolaires. Altération moyenne
341	21/02/2018	242640	8045323	1057,69	Coulée de débris	coulée de débris		Sur la route en redescendant du tunnel, petite cascade de 5 m de haut sur brèches très homogènes. Blocs très hétérogènes en taille mais homogènes dont certaines arrondis (effondrement de coulées scoriacée épaisses). Plus bas sur la route, les grandes falaises de 80 à 100 m de haut son clairement constituées de coulées de débris.
342	21/02/2018	242490	8045584	648,94	Altérites	Altérites		La route passe dans une grande loupe d'arrachement d'une centaine de m de large (ayant emporté la route initiale située beaucoup plus haut)
344	21/02/2018	242556	8045842	636,97	Lave basaltique	lave massive	basalte	Petite cascade sur lave massive de couleur gris-noir légèrement altérée.
345	21/02/2018	242319	8046019	614,82	Lave basaltique	lave scoriacée	basalte	Deux petites cascades sur coulées scoriacées altérées avec quelques blocs massifs.
346	21/02/2018	242297	8046382	570,18	Lave basaltique	lave massive		Eboulis sur côté gauche de la route laissant apparaitre des laves massives anciennes et très altérées. Dyke de lave plus claire
347	21/02/2018	242298	8046525	546,30	Dyke	Dyke		Dans petit arrachement sur talus, dyke de 50 cm de large de roche grise dans lave massive altérée. Le contact vitrifié du dyke est conservé par endroit (Dyke ou sill par pendage à 45°)
348	21/02/2018	242405	8046687	513,54	Lave basaltique	lave massive	basalte	Bel affleurement de 10 m de haut de lave massive scoriacée ancienne légèrement altérée, zébrée de dyke sub-verticaux
350	21/02/2018	242373	8046825	498,93	Lave basaltique	Lave scoriacée	basalte	De nouveau des laves massive anciennes légèrement scoriacées
352	22/02/2018	240091	8047570	420,63	Lave basaltique	Lave scoriacée		Formation en place sur la piste: roche très altérée sur une dizaine de mètres avec clastes très hétérogènes dans matrice très altérée. Lave scoriacée ancienne ou coulée de débirs très altérée
353	22/02/2018	239570	8047850	452,42	Eboulis	éboulis		Uniquement dans les éboulis de pente jusqu'ici très végétalisés. Plusieurs venues d'eau superficielles dans ces éboulis
354	22/02/2018	239431	8047821	449,23	Alluvions	Alluvions		Au niveau de la vanne de relargage de la prise d'eau. La rivière coule sur un lits de blocs massifs décamétriques très hétérogènes. En face, en rive gauche, présence de colluvions à teintes orangée
356	22/02/2018	239386	8047711	449,59	Coulée de débris	Coulée de débris		Belle cascade sur falaise de 15 à 20 m de haut. Probablement coulée de débris mais très altérée

358	22/02/2018	239262	8047732	467,54	Alluvions	Alluvions		En remontant la rivière. Présence uniquement d'alluvions. Plusieurs émanations de CO2 sont visibles en rive gauche
359	22/02/2018	239227	8047748	450,82	Alluvions	Alluvions		Aucune formation géologique visible. Présence d'émanations de CO2 en rive droite
360	22/02/2018	239191	8047724	470,67	Alluvions	Alluvions		Pas de formations visibles, présence d'une petite mare en retrait de la rivière avec nombreuses venues gazeuses et dépôts oxydés orange
361	22/02/2018	240253	8047556	420,89	Coulée de débris	Coulée de débris		Sur la route du retour, sur 6 à 8 m de haut, présence d'un assemblage à blocs (anguleux et scoriacés) complètement altéré. Plutôt une coulée de débris
363	22/02/2018	240247	8047367	413,32	Coulée de débris	Coulée de débris		De l'autre côté de la ride, belle falaise de 10 à 20 m de haut où coule une cascade. Même formation très altéré à blocs de tailles variables et ici de nature variable. C'est donc bien une coulée de débris
364	22/02/2018	240210	8047242	427,65	Lave basaltique	Lave massive	basalte	Belle cascade sur lave massive diaclasée gris-noir aphyrique.
365	22/02/2018	240127	8047153	425,66	Coulée de débris	Coulée de débris		A droite en redescendant, éboulis dans des formations très altérées où subsiste des blocs anguleux. Coulée de débris
366	22/02/2018	240079	8047045	418,84	Coulée de débris	Coulée de débris		Petite cascade sur formation indurée mais complètement altéré (Coulée de débris);
367	22/02/2018	239863	8046751	419,17	Andésite	Lave massive	andésite	En rive droite du barrage, présence d'un affleurement limité de lave andésitique à pyrite (très altérée ici) et de dyke de lave basaltique gris-noir juxstaposée.
369	22/02/2018	240120	8046826	358,43	Andésite	Lave massive	andésite	Sous le pont Tahinu, roche andésitique blanche très porphyrique (pyroxène) très altérée zébrée de filons aplitique (noire, aphyrique, très altéré également). En rive droite, on les suit jusq'au barrage qui s'appuye sur ces formations. Nombreuses venues de gaz dans la rivière. Dépôts orange
372	22/02/2018	239967	8046698	372,59	Andésite	Lave massive	andésite	Au pied du barrage en rive droite, présence d'une roche andésitique claire riche en pyroxène, plus frâcihe qu'au niveau du pont. Présence de nombreuses intrusions aplitiques gris-noir. Ici, l'injection des sills dans l'andésite formet des bancs de direction N53 et de pendage 50° vers le SE. Il y a plusieurs venues d'eau acide en rive gauche de la ravine située en contrebas (mais en rive droite du barrage). Les massifs au-dessus du barrage ne sont pas andésitiques mais plutôt bréchifiés (lave scoriacée ou coulée de débris)
373	22/02/2018	240601	8047366	344,66	Lave basaltique	Lave scoriacée	basalte	Point de vue sur l'arrête en coté droit de la route en descendant: les formations très abruptes sont clairement scoriacée, altérées de couleur gris marron. Pas de blocs, pas de dykes.
374	22/02/2018	240887	8047730	328,04	Lave basaltique	Lave massive	basalte	Bel affleurement de lave massive diaclasée le long de la route (30 m de haut sur 30 m de large). Lave gris-noir aphyrique avec légère altération dans les fissures. Localement. elle peut être légèrement scoriacée
375	22/02/2018	240919	8047924	274,06	Fm filonienne	Formation filonienne		Au croisement des 2 ravines, présence d'une "ignimbrite soudée". Roche très dure mais à éléments relativement hétérogène. Clastes centimétriques à décimétriques, mais aussi gros clastes vacuolaires arrondis. Les vacuoles sont remplis de minéraux (calcite?). La formation est présente ici sur une vingtaine de m de part et d'autre de la rivière. Présence d'un dyke noir aphyrique NE-SW mais très allongé (>sill). Cette formation est diaclasée et de plus en plus riches en dyke et sills vers l'amont. Il ne s'agit pas d'une ignimbrite per se mais d'une brèche initiale métamorphisée par le complexe filonien iniectée.
376	22/02/2018	240916	8047922	277,85	Fm filonienne	Formation		En rive gauche, toujours dans "l'ignimbrite". Nombreux dykes de direction N60. En rive droite, présence d'un sill
377	22/02/2018	240866	8047915	300,12	Fm filonienne	Formation filonienne		En rive droite de la 2ème rivière, même formation "ignimbritique" avec 2 dyke subverticaux de direction N45.
379	23/02/2018	241670	8048531	290,20	Coulée de débris	Coulée de débris		Au pied d'une petite cascade coulant sur une brèche très hétérogène à blocs parfois métriques. Présence de blocs lités verts. La rivière coule dans un fossé sur ces formations de coulées de débris jusqu'à la voiture plus bas
381	23/02/2018	241706	8048567	268,78	Dyke	Dyke		Présence d'un dyke NS injecté dans les brèches de coulées de débris Bel affleurement sur falaise de 8 m de baut de coulées de débris à blocs
382	23/02/2018	241705	8048567	268,86	Coulée de débris	Coulée de débris		métriques anguleux. La matrice est complètement altérée ici car nombreuses venues d'eau superficielles
383	23/02/2018	241698	8048681	312,48	Coulée de débris	Coulée de débris		De nouveau un bel affleurement de coulée de débris jusqu'à 20 m de hauteur. Sa couleur est relativement uniforme mais présence des blocs très hétérogènes en taille et nature (très vacuolaires à très massifs). Un peu plus loin, présence d'un dyke incliné à 45°
384	23/02/2018	241647	8048802	318,28	Coulée de débris	Coulée de débris		Petite cascade pour partie sur brèche de type coulée de débris, présence de blocs arrondis d'1m50 pris dans la matrice.
386	23/02/2018	241406	8048891	380,36	Lave basaltique	Lave massive		Présence d'une lave massive ancienne légèrement foliée, mais complètement altérée rouge-orange. Présence d'un dyke à débit anguleux de lave noire aphyrique.
387	23/02/2018	241406	8048891	380,58	Lave basaltique	Lave massive		Confirmation de la lave ancienne relativement massive (peu de scories) mais bien diaclasées. Compte-tenu des observations suivantes, il pourrait s'agir d'un megabloc dans la coulée de débris
389	23/02/2018	241174	8049008	442,82	Lave basaltique	Lave massive	basalte	Belle lave massive très fraîche (cœur de coulée) sur laquelle passe la rivière. Roche très porphyrique,très riche en pyroxènes, oxyde ferro- titanés et quelques olivines altérées. Pas de feldspaths. basalte très dense. Elle repose sur une brèche très altérée de type coulées de débris très bien visible sur la falaise en contrebas de la route. Ils'agit d'une coulée basaltique isolée tardive en provenance de l'amont.
					1			

390	23/02/2018	241260	8049123	432,19	Coulée de débris	Coulée de débris	Le long de la route, bel affleurement de coulées de débris sur 4 m de haut.
391	23/02/2018	241260	8049123	432,11	Coulée de débris	Coulée de débris	Prise de vue sur la cascade en face qui coule en contrebas de la route sur une formation de coulée de débris de plusieurs dizaines de mètres de hauteur.
392	23/02/2018	240868	8047867	364,28	Fm filonienne	Formation filonienne	On est retournée dans la ravine à "l'ignimbrite", dans le bras gauche de la rivière en direction de la cascade principale. Ici, en rive droite, présence d'un dyke d'1 m de large N60 dans gangue de roche gris-verte très altérée, parcourue de diaclase altérée (hydrothermalisme lié au dyke). En rive droite, on voit les clastes de "l'ignimbrite" dans une matrice grise.
393	23/02/2018	240664	8047843	337,02	Fm filonienne	Formation filonienne	On reste dans "l'ignimbrite soudée". Localement, elle peut être très perturbées par les nombreux dikes et sill présents. Petite venue de gaz aperçu un peu plus bas.
395	23/02/2018	240661	8047791	285,41	Fm filonienne	Formation filonienne	Sill bien visible dans l'encaissant "d'ignimbrite". Sous le sill, l'encaissant prend une teinte vert-beige (hydrothermalisme)
397	23/02/2018	240588	8047761	332,42	Fm filonienne	Formation filonienne	En rive droite de la cascade, présence d'un dyke de 2 m de large qui traverse la vasque (on l'aperçoit de l'autre côté). Lave grise aphyrique. Des petites venues d'eau bulleuse émergent dans le dyke ou à proximité (dépôts orange)
398	23/02/2018	240596	8047805	352,16	Fm filonienne	formation filonienne	Un peu plus bas, là où le torrent débute, présende de "l'ignimbrite". La zone est injectée de dyke et de sills dans toutes les directions, certains se recoupant clairement. Il y a de nombreux suintements dans le complexe de dykes/sills. L'encaissant prend une texture feuilletée à certaine endroits. Les clastes de "l'ignimbrite soudée" sont trop hétérogènes pour une ignimbrite
400	23/02/2018	240664	8047813	287,30	Fm filonienne	formation filonienne	Au retour dans la rivière. Présende de 2 générations de dyke côte à côte dans l'encaissant. Un dyke gris clair aphyrique et un dyke blanc-gris à beaux crisaux de feldspaths en baguettes. Petite venue bulleuse en bordure du dyke.

404 26/02/2018 226980 8049006 95,87 Lave Scoriacée Basalte Dépôt de la voiture avant le village et resdescente le long de la route. En rive droite belle succession de coulées de laves basaltiques à cœur massif et semelles scoriacées. Idem en rive gauche avec des pendages de coulées de 10° vers l'aval 405 26/02/2018 226846 8049005 64,06 Lave Scoriacée Basalte En rive droite, au niveau de la route, toujours dans les coulées scoriacées avec plusieurs suitements au sein des brèches scoriacées. Toujours des empilement de coulées de lave. Tout le promotoire en face est constitué de lave gris clair aphyrique relativement fraîche. Pas de trace d'altération (il y a plusieurs gros blocs de coulées de débris dans la rivière). 407 26/02/2018 226517 8049032 192,83 Lave Scoriacée Basalte En rive droite, encore un contact entre les laves scoriacées à droite et un placage de coulées de débris de débris à gauche sur 20 m de haut. Il y a beaucoup de blocs arrondis dans la coulées de débris (formation distale?) 408 26/02/2018 226477 8049053 104.03 Coulée de débris En rive gauche, beau oromontoire de coulées de débris de formations de remaniement
405 26/02/2018 226846 8049005 64,06 Lave Scoriacée Basalte En rive droite, au niveau de la route, toujours dans les coulées scoriacées avec plusieurs suintements au sein des brèches scoriacées. Toujours des empilement de coulées de lave. Tout le promontoire en face est constitué de lave gris clair aphyrique relativement fraîche. Pas de trace d'altération (il y a plusieurs gros blocs de coulées de débris dans la rivière). 407 26/02/2018 226517 8049032 192,83 Lave Scoriacée Basalte En rive droite, encore un contact entre les laves scoriacées à droite et un placage de coulées de débris de débris de sur 20 m de haut. Il y a beaucoup de blocs arrondis dans la coulées de débris (formation distale?) 408 26/02/2018 226477 8049053 104.03 Coulée de débris En rive grup compontoire de coulées de débris de remaniement
407 26/02/2018 226517 8049032 192,83 Lave Scoriacée Basalte En rive droite, encore un contact entre les laves scoriacées à droite et un placage de coulées de débris à gauche sur 20 m de haut. Il y a beaucoup de blocs arrondis dans la coulées de débris (formation distale?) 408 26/02/2018 226477 8049053 104.03 Coulée de débris En rive droite, encore un contact entre les laves scoriacées à droite et un placage de coulées de débris (formation distale?)
408 26/02/2018 226477 8049053 104.03 Coulée de débris En rive gauche, beau promontoire de coulées de débris et formations de remaniement
409 26/02/2018 226435 8049012 100,95 Lave Scoriacée Basalte Basalte En rive droite, au bord de la route, sur 10 à 20 m de haut, sucession de coulées scoriacées, un peu plus vacuolaires ici de couleur gris-rouge à quelques petits feldspaths.
411 26/02/2018 226327 8048993 111,72 Coulée de débris 26/02/2018 226327 8048993 111,72 Coulée de débris 111,72 Coulée de débris Coulée de dé
412 26/02/2018 226252 8048878 75,40 Alluvions Alluvions En rive droite, plusieurs venues d'eau à débit importante émerge de la plaine alluviale. En rive gauche, la rivière coule (plus bas que les colluvions) sur une coulées de débris à structure complexe: injection de matériel beige à grains fins dans matrice beaucoup plus grossière. En rive droite, plusieurs venues d'eau à débit importante émerge de la plaine alluviale (y compris sous la route aménagée)
413 26/02/2018 225781 8048948 85,66 Lave Scoriacée Basalte Sur la route en rive droite, affleurement dégagé récemment de lave scoriacée très altérée (altération hydrothermale à dépôts jaunâtres) sur 30 à 40 m de long. suintements et venues d'eau. Au dessus, on retrouve la même coulée scoriacée altérée. La roche est beaucoup plus vacuolaire que celle vue jusqu'à présent. Il pourrait s'agir d'une lave beaucoup plus nacuolaire que celle vue jusqu'à présent. Il pourrait s'agir d'une lave beaucoup plus anatrice marron. Juste sous la coulée scoriacée présence d'une venue d'eau à bon débit, probablement au contact (masqué) entre la lave scoriacée ta la coulée de débris. L'afflaurement de coulée de débris. L'afflaurement de coulée de débris.
414 26/02/2018 226503 8049062 99,63 Coulée de débris Coulée de débris de débris au nord et la lave au sud. La vasque est la cascade en contre bas est bien constituée de coulée de lave scoriacée.
415 26/02/2018 225745 8048885 72,19 Lave Scoriacée Basalte Basalte A proximité d'un réservoir. Coulées de lave scoriacées à cœur massif et vacuolaire sur 3 m de haut. Juste à côté, 2ème réservoir avec la même lave scoriacée très vacuolaire.
417 26/02/2018 225713 8048805 57,71 Lave Scoriacée Basalte Au ras de la route, belle falaise de 20 à 30 m de haut de coulées de lave scoriacées. Lave très vacuolaire à olivine altérée. Plusieurs suintements d'eau sont visibles.
419 26/02/2018 225583 8048684 62,80 Lave Scoriacée Basalte Fin de laves vacuolaires ici très altérées car on remonte dans le profil d'alteration superficielle. Les semelles scoriacées sont toujours bien présentes.
421 27/02/2018 224524 8048964 269,70 Altérites Au bout de la route qui monte vers les hauteurs, côté Nord de la Punaruu. Sur la crète, essentiellement des sols latéritiques rouges
422 27/02/2018 224229 8048936 216,23 Lave Massive Basalte Dans l'entrée d'un terrain bâti le long de la route, beau cœur de coulée massif, peu bréchifiée
424 27/02/2018 223972 8048942 163,95 Lave Scoriacée Basalte Bord droit de la route, belles coulées scoriacées avec venues d'eau (probablement anthropiques)
426 27/02/2018 224955 8048940 368,92 Lave Scoriacée Basalte + top (1,5 m de haut). Couche de cendre altérée (orange) supérieure, sous nouvelle coulée de lave altérée (orange) supérieure, sous nouvelle coulée de lave plus petite.

427	27/02/2018	224666	8048916	309,31	Lave Scoriacée	Basalte	On longe la crête jusq'au point géodésique. On passe dans la partie supérieure altérée de la coulée de lave
428	27/02/2018	224907	8049060	323,42	Lave Scoriacée	Basalte	Coulées scoriacées avec niveau de suintement au pied du cœur massif de la coulée (réseau fiuvard des maisons situées au-dessus?)
429	27/02/2018	224811	8049140	285,87	Lave Scoriacée	Basalte	La route se finit en cul-de-sac. Une rivière coule sur la partie droite de la route, sur des formations de laves scoriacées qui forment également la bordure de la ravine sur 4 à 5 m de haut. Il va de nombreux suintements en rive droite de la ravine dans les coulées scoriacées
430	27/02/2018	225157	8049256	371,87			Sources aménagée au sein de blocs, situés en contrebas d'un hangar. Source très conductrice à dépôts orangés, peut-être lié à une ancienne décharge dans le vallon? Elle est diluée par une venur d'eau superficielle venant de la gauche (au travers d'une conduite)
431	27/02/2018	225199	8049298	389,60	Lave Scoriacée	Basalte	Au dessus de la source, dans le prolongement du vallon, à proximité d'un hangar (arêne de combat de coqs), un canal aménagé aux pieds d'un long affleurement de laves scoriacées reçoit de nombreux suintement dans les laves scoriacées en rive droite.
433	27/02/2018	224749	8049102	284,59	Lave Scoriacée	Basalte	En redescendant, laves scoriacées en bordure droite de la route.
435	27/02/2018	224295	8049054	227,01	Lave Scoriacée	Basalte	On a traversé la rivière sur le pont. Rive droite, coulées de plusieurs m d'épaisseur de lave à cœur massif et top scoriacée (peu vacuolaire ici)
436	27/02/2018	224174	8049060	173,45	Lave Scoriacée	Basalte	Belles coulées fraîches. Cœur massif de 4 à 5 m de haut dont la base et le top sont très vacuolaires. Présence d'une semelle de scorie rouge
437	27/02/2018	223526	8048789	43,58	Lave Scoriacée	Basalte	Presque revenu sur la route principal. La rivière a changé de côté dans le vallon (rive gauche maintenant). Elle coule toujours sur un empilement de laves scoriacées
438	27/02/2018	223458	8048440	40,71	Coulée de débris		Du côté du CFPA. Ici, on voit la limite entre les coulées scoriacées (au Nord) et les coulées de débris (Sud). Le contact est masqué par le passage d'une route mais environ N40. Les laves scoriacées sont très altérées ici avec débit en boules et pelures d'oignon.
439	27/02/2018	223412	8048368	27,08	Coulée de débris		A l'entrée du CFPA, les dépôts de coulées de débris font 5 à 6 m de haut.
440	27/02/2018	223451	8048316	69,20	Coulée de débris		A proximité du réservoir d'eau de la commune, on est dans les coulées de débris avec des blocs décimétriques à métriques très hétérogènes en nature
441	27/02/2018	223392	8048261	60,36	Coulée de débris		Entrée de terrain bâti (maison). Bel affleurement de 8 m de haut de coulée de débris, que l'ont suit tout le long du chemin qui redescend
442	27/02/2018	223294	8048323	24,26	Coulée de débris		Au niveau de la route principale, coulées de débris avec traces d'altération hydrothermale (dépôts blancs dans les failles)
444	27/02/2018	228409	8048999	90,48	Coulée de débris		On est au fond de la Punaruu chez Cody Lenoir. En bordure gauche du vallon. Ici, belle cascade en provenance de la falaise qui paraît être faite de coulées de débris. Selon Cody, l'eau provient d'un trou dans la falaise (contact Coulées de débris/laves vacuolaires situés plus haut?). Les 2 types de roches sont trouvés en blocs décamétriques dans le vallon.
445	27/02/2018	228385	8048993	188,06			Le vallon principal est sec.
446	27/02/2018	228330	8048944	152,73	Coulée de débris		Un bloc de 6 à 7m de long s'est détaché de la falaise récemment, laissant derrière lui une trouée impressionnant dans la forêt. Il s'agit bien d'une coulée de débris.
448	27/02/2018	228212	8048878	127,37	Coulée de débris		Ici, tout le fond de la rivière est constituées de coulées de débris (il y a 2 seuils bien définis dans la rivière). Il y a quelques venues d'eau dans les diaclase de la coulées de débris. Beau dyke N30 dans les diaclase de la coulées de débris.
449	27/02/2018	228169	8048817	114,93	Coulée de débris		A l'embouchure de la cascade venant en rive gauche, on reste dans les coulées de débris très argilisées. De l'autre côté du vallon, mais toujours en rive gauche de la Punaruu, on retrouve les laues sociacéer recoursées na des dukes.
450	27/02/2018	228180	8048716	126,28	Coulée de débris		Petite cascade en eau sur coulées de débris très altérée.
452	27/02/2018	228215	8048628	175,84	Coulée de débris		En rive droite de la ravine, falaise de 8 à 10 m de haut de coulées de débris (relativement
454	27/02/2018	228228	8048611	167,08	Coulée de débris		En rive gauche, Affleurement de 10 à 15 m de haut de coulées de débris recouvertes de mousses. Beaux blocs anguleux dans la matrice. Quelques diaclases semblent laisser passer de l'eau (mais beaucoup de ruissellement)
455	27/02/2018	228244	8048616	166,94	Coulée de débris		Ici, la rivière coule dans un petit canyon lisse de coulées de débris. Blocs métriques à décamétriques relativement anguleux. Coloration rouge due à l'altération hydrothermale?
456	27/02/2018	228124	8048797	129,83	Lave Scoriacée	Basalte	Retour à lembouchure et traversée de la rivière Punaruu. On voit bien comme décrit au 449, le contact entre la coulée de débris au NW et les coulées scoriacées injectées de dyke au SE.
457	28/02/2018	227752	8048927	122,93	Lave Scoriacée	Basalte	Retour dans la partie haute de la Punaruu pour explorer les 2 ravines aval. Ici, en rive gauche, la falaise est constituée par un empilement de coulées scoriacées sur 30 à 40 m de long et 20 m de haut
458	28/02/2018	227458	8048821	127,80	Coulée de débris		On a traversé la Punaruu. Ici en rive gauche, la papenoo coule sur des coulées de débris très semblables à celles vues plus haut: grandes lentilles de matériel cataclasé. Les dépôts font 20 m de haut.
459	28/02/2018	227623	8048651	179,94	Eboulis		Sur une zone plane avec marae. Jusqu'ici, on est resté dans les éboulis de pente
460	28/02/2018	227778	8048510	201,67	Coulée de débris		En remontant la ravine, on voit en rive gauche des coulées scoriacées vacuolaires et en rive droite des coulées de débris
461	28/02/2018	227833	8048520	209,48	Lave Scoriacée	Basalte	Dyke N105 en rive gauche au sein des coulées scoriacées très altérées formant une cascade de 10 m de haut (sans eau).
462	28/02/2018	227642	8048463	201,30	Lave Scoriacée	Basalte	On a remonté une petite ravine adjacente en rive gauche mais pas longtemps car présence d'une cascade en eau sur des laves scoriacées à blocs massifs. La cascade présentent plusieurs ressaut ce qui laisse à penser qu'il existe plusieurs unités de coulées de lave.
464	28/02/2018	227015	8048741	120,01	Lave Scoriacée	Basalte	On est au bout de la 2ème ravine (Yannick, toujours en rive gauche de la Punaruu). Grande cascade de 60 m de haut au sein d'un cirque montrant un très important empilement de laves scoriacées (au moins 12 coulées) pendage de 10° vers la vallée principale. Les cœurs massifs font 1 à 2 m d'épaisseur mais ne sont pas très étendus (10 m maximum). On les voit par la tranche.

Annexe 2

Coupes techniques et géologiques des forages



COUPE DU FORAGE PUHI

1 : Coupe géologique du forage Puhi (bassin versant de la Papenoo)



2 : Coupe géologique du forage de Tahiti Agrégats (bassin versant de la Punaruu)



3 : Coupe technique du forage EDT F1 (bassin versant de la Punaruu)



4 : Coupe technique du forage EDT F2 (bassin versant de la Punaruu)



5 : Coupe technique du forage de la Brasserie F1(bassin versant de la Punaruu)

na portar pre-	ين مريد م	BRA	-SSERIE	DE TAHITI PUNARUU	
e.		F()RAG	E D'EXPLOITATION	
ENTI EXE Date Type Profe Tuba	REI CU ⁻ s - ond ge -	PRISE FION - début eur - Crépin	Foreuse n 55.00, e	I SITUATION Cote	
(ates des faciës	M m m	Coupe géologique	cssuis (arottage. _25 50 75	Caractères lithologiques et structuraux	(aracrere) hydrogéologiqu
8.00 10 15	men 494 .			Alluvions B dont certaines atteignent an Q de l'ordre d'Am Natiriau treis colmate Passeesableuse contenant des fines en des rognons de basalte ne dépossant pas Alluvions de granulametrie moyenne assez compactes contena une assez grande quantité	10cm Ø <u>N.E. 10.80m</u>

6 : Coupe géologique du forage de la Brasserie F1 (bassin versant de la Punaruu) (1ère feuille)

(ates des focies	Ømm	Coupe: . géologique	A él <u>évements</u> Es <u>sais</u> Carottage 25 50 715	(aractères lithologiques et structuraux	Caracteres bydrogeologiqu
1120		0.00		de fines argileuses	
URITINA				Matériau très colmaté	
Anith and	E E				
10	194	000	-		-
anna an		0000	-	Alluvions de granulometrie	
			2		
31. 50				Alluvions grossières pout être un bloc de taille métrique non identifiable du fait de la methode destructive utilis	
33.00			-	Alluvions de granulométrie variable non colmaties	-
35			5	Argile plastique brune incluant	
eun nin		~ ~ ~		de patits éléments roules d'orig basaltique plus ou moins alleres	iinz
70.00	e a	0~0			
40	16.8			Materiau tres comporte comporte	x.p.t

7 : Coupe géologique du forage de la Brasserie F1(bassin versant de la Punaruu) (2ème feuille)

(otes des facies	Ømm	Coupe géologique	Prél <u>eve</u> ments Essais (arottage rs so 45	(aractères lithologiques et structuraux	Caractères hydrogéologique
43.00			0.0.0	dont la taille peut attaindre 30cm	
45.00			0	de cliamètre. les éléments sont très peu alteirés et peu anquileux sout	
and a summer	168 mm		0.0.0.0.0.	pour les o'le'ments de taville re'duite qui avec les fines de couleur brun parfois alfe'rées en jaune blanc forment la matrice le mateiriau comporte une fractura	e tion
70.00 -			20000 2000 2000	importante Jans les plans de cass des dépots se condaires de Couleur blanchatre dues aux circulations d'eau peuvent être abservés	ore Debie 2511s
55.00			100 000	L'origine de ce materiau est à priori nature alluvionnaire. Toutetois une origine volcanique n'est pas à exclur du fait de son aspect très soude. Sarait alors un labur. L'oulee de boue	rie ce chaude)

(HANILLEW ROALSAIS DE TALIT BALARIAI

8 : Coupe géologique du forage de la Brasserie F1 (bassin versant de la Punaruu) (3ème feuille)

1997 - 1997 1997 - 1997 1997 - 1997		DANUY _ ITHAT BE BIGESSAGE .	_טע
	SONDAGE	DE RECONNAISSANC	E
SNTI		N° 1	
EXE Date Tube	CIITION - Sandeus s - iébut Carotte	fin Cote	ΠЛ
Field Tube	.ndaui Approfo 1ge	N H - 76.2 m	
Cotes des feciés	€ (oupe Prélèvement géologique E <u>ssais.</u> Ø (or ottage. <u>25 50 75</u>	s Caractères lithologiques et structuraux	(aractères hydrogéologiques
822X 827.24		De 55.00 a 61.00m - materiaux alluvionnaire Omposte's rencontre's prese clement clans le sonclage.	
97000 - F07000 - F		Alluvions compactes Bloc de basalte à Olivine plus quelque Breze Alluvions compactes Bloc de basalte à Pyrozia plus quelque olivine Bloc de basalte à Olivine Alluvions com pactés Bloc Basalte Bloc de basalte à Olivine	Wappe en charge N ² 3
ал. 40. 40. 40. 40. 40. 40. 40. 40. 40. 40		Alluvions Compactés	
		Coulez Nº 1 massive basalte sub aphinique	Sac
2 ₹ 1= m	. Lucin	Niveau recuit Degradation dela partie su	-J

9 : Coupe géologique du forage de la Brasserie F1 (bassin versant de la Punaruu) (4ème feuille)

CHANTIER			นกาย	ERIE DE TAMITI PUNARUU	
Cotes des facies	M III ge	Coupe cologique	Prél <u>evem</u> ents Essois Carottage	Caractères lithologiques et structuraux	Coroctères hydrogéologique:
67.B 68.4 13.4				Coule'e Nº 2 Niveou recuit Degradation de la partie supérieure Coule'e Nº 3 - Occanite bulleuse (nid d'abeilles)	
70.0 70.2 70.2	NII / YUN			Degradation - Coulee Nº 4. Couleé basalte Aphirique aluziolaire Nº 4 Choules Bréche de basalte aphirique - Dégradation	Sec Imperméable Matériaux () ci
Fin du Sondage				de la partie supérieure de la Couleé nº 5 Louleé de basalte aphirique gris nº 5 partie inférieure alvéolaire à bulleuse — Peutêtre base de la couleé en aspect Scoriacé de la base de la carolle	Je dépàt artistes Une circulation probable d'éa l'souterraine

10 : Coupe géologique du forage de la Brasserie F1 (bassin versant de la Punaruu) (5ème feuille)



11 : Coupe technique du forage de la Brasserie F2 (bassin versant de la Punaruu)



12 : Coupe géologique et technique du forage de la Brasserie F3 (bassin versant de la Punaruu) (1ère feuille)



13 : Coupe géologique et technique du forage de la Brasserie F3 (bassin versant de la Punaruu) (2ème feuille)

Annexe 3 Données des reconnaissances hydrogéologiques
POINT HYDRO	DATE	х	Y	z	NATURE EAU	DEBIT (L/S)	CE (µS/cm)	TEMP (°C)	PH	eH (mV)	OD (MG/L)	COM EAU
572	19/02/2018	241669	8056244	53	Rivière		110	23,9	7,27	203,8	8,33	Mesure dans la Papenoo, fortes pluies les 3 semaines précédentes
573	19/02/2018	241791	8056197	57	Rivière		69	24,8	7,97	144,6	8,5	Eau qui ruisselle de l'amont
574	19/02/2018	241614	8056042	60	Rivière		97	23,7	7,56	154,7	8,56	Mesure dans la Vaiputoa avant la confluence avec la Papenoo
575	19/02/2018	241628	8056037	61	Rivière		111	23,8	7,3	161,3	8,32	Mesure dans la Papenoo avant la confluence avec la Vaiputoa
576	19/02/2018	241581	8056081	62	Rivière		25	24,4	7,4	154,3	8,49	Eau de ruissellement, non pérenne
577	19/02/2018	241404	8055768	77	Rivière		97	23,5	7,59	139,8	8,64	Mesure dans la Vaiputoa
578	19/02/2018	241287	8055818	112	Source	0,5	99	24,15	7,38	141,8	8,49	Sourd d'une fracture en rive gauche de la Vaiputoa - Pérenne ??
579	20/02/2018	242495	8046665	429	Rivière	1	92	25,7	7,54	120,8	8,06	Eau de ruissellement
580	20/02/2018	242482	8046561	434	Rivière		104	23,1	7,71	118,9	8,47	Affluent en rive gauche de la Vainavenave - A l'amont d'un captage de Marama-Nui
581	20/02/2018	242496	8046562	436	Rivière	0,5	91	23,5	7,69	113,3	8,34	Ruissellement en rive droite
582	20/02/2018	242505	8046596	431	Rivière		96	24,7	7,61	108,7	8,17	Ruissellement en rive droite
583	20/02/2018	242965	8046851	366	Rivière		168	23,3	8,15	121,5	8,49	Affluent en rive droite de la Vainavenave - Basalte massif avec intrusions horizontales et sub-verticales
584	20/02/2018	242970	8046843	360	Source		184	25,4	8,36	75,5	8,23	Venues d'eau en rive gauche de la cascade
585	20/02/2018	242938	8046691	357	Rivière		149	24,6	7,8	100,3	8,41	Rivière Vainavenave à l'aval du barrage
586	20/02/2018	242857	8046941	348	Rivière		177	22,6	7,35	121,5	8,47	Rivière traverse la piste - Présence d'algues vertes
587	20/02/2018	242773	8047068	338	Rivière		145	24,7	7,69	102,3	8,18	Eau de ruissellement en rive droite
588	20/02/2018	242735	8047133	326	Rivière		129	24,5	7,63	106,1	8,22	Rivière en rive droite
589	20/02/2018	242538	8047657	278	Rivière		138	24,3	7,73	101	8,34	Affluent en rive droite de la Vainavenave
590	20/02/2018	241991	8048078	235	Rivière		140	25,1	7,71	111,9	8,32	Rivière Vainavenave sous le pont
591	21/02/2018	242170	8047379	317	Rivière	0,5	140	23,6	7,38	168,9	8,48	Eau de ruissellement en rive droite
592	21/02/2018	242197	8047177	332	Rivière	0,5	166	24,2	7,12	176,5	8,21	Eau de ruissellement en rive droite
593	21/02/2018	242145	8046940	346	Rivière	< 0,05	135	25,1	7,58	131,6	8,28	Eau de ruissellement en rive droite
594	21/02/2018	242084	8046877	352	Source	0.25	137	24	7,73	107,5	8,25	Sourd au-contact d'un sill
596	21/02/2018	242003	8046837	374	Bivière	1	138	24,1	7 74	115.8	8 36	Affluent en rive droite de la Vaitonaa
597	21/02/2018	241838	8046783	380	Rivière	1	150	27	7,74	115,0	0,50	Affluent en rive droite de la Valtopaa
598	21/02/2018	241784	8046608	397	Rivière	< 0.1	172	23.5	7.75	120.1	8.37	Venue d'eau faible
599	21/02/2018	241804	8046548	395	Rivière	> 2	138	23,6	7,64	108,6	8,5	Affluent en rive droite de la Vaitopaa
600	21/02/2018	241759	8046383	409	Rivière		188	23,7	7,72	112,3	8,44	Rivière Vaitopaa en amont du barrage
601	21/02/2018	241722	8046414	406	Rivière	> 5	156	25,2	8,07	108,3	8,28	Affluent en rive gauche en amont du barrage
602	21/02/2018	242703	8045112	725	Rivière		80	25,8	7,63	133,6	7,7	
603	21/02/2018	242512	8045375	681	Rivière		109	22,4	7,73	129	8,06	
604	21/02/2018	242490	8045590	636	Rivière		148	22,7	7,62	128,4	8,36	
605	21/02/2018	242337	8046010	613	Rivière		132	22,6	7,63	118,8	8,37	
607	22/02/2018	240064	8047576	389	Rivière		97	24,3	7,54	122,2	8,39	
608	22/02/2018	240045	8047696	401	Rivière	2	64	23,6	7,19	57	7,73	
609	22/02/2018	239740	8047842	410	Rivière	< 0,5	29	23,7	7,32	100,3	8,21	
610	22/02/2018	239573	8047832	417	Rivière	2	55	22,8	7,02	120,3	8,44	
611a	22/02/2018	239431	8047825	423	Rivière		218	23,3	6,66	41,3	8,41	roches dans la rivière
611b	22/02/2018	239431	8047830	423	Source		123	23	5,45	180	8,04	Sourd des colluvions en rive gauche, à l'interface entre les colluvions et les brèches/alluvions très indurés (imperméables)
612	22/02/2018	239323	8047733	446	Rivière	2	54	22,7	6,6	110,3	8,41	Affluent de la Maroto en RD, en amont du captage
613	22/02/2018	239332	8047747	448	Rivière		195	23,1	6,41	72,4	8,45	Rivière de la Maroto
614	22/02/2018	239269	8047734	453	Rivière		127	22,4	4,77	224,5	3,44	RG de la Maroto, remontées gazeuses et venues d'eau
615	22/02/2018	239214	8047754	461	Rivière		287	23,7	5,46	180,7	6,73	Eau légérement laiteuse, suintement en RD, eau avec dépôt orange arrivant de l'amont

POINT HYDRO	DATE	x	Y	Z	NATURE EAU	DEBIT (L/S)	CE	TEMP	РН	ORP	OD (MG/L)	COM EAU
646	26/02/2018	227006	8048982	102	Rivière		240	24,8	7,63	98,9	8,2	Rivière de la Punaruu
647	26/02/2018	226867	8049057	103	Suintement		270	24,9	8,06	90,9	8,41	Zone de suintement, eau sourd au niveau d'une coulée basaltique scoriacée
648	26/02/2018	226738	8049074	87	Rivière	< 1	185	25,4	8,34	79,4	8,48	Cascade, s'écoule sur un empilement de coulées
649a	26/02/2018	226254	8048868	64	Source	2	210	23,8	7,29	120,7	7,03	Résurgence de la nappe alluviale au profit d'un méandre
649b	26/02/2018	226260	8048870	64	Rivière		230	25,7	7,99	104,2	8,56	Rivière de la Punaruu à l'amont des venues précédentes
650	26/02/2018	225829	8048913	62	Suintement	< 0,01	370	32,2	7,31	126,8	8,07	Flaque d'eau sur coulées de débris dans le lit de la rivière - Zone de suintement dans des laves très altérées en RD
651	26/02/2018	225842	8048910	59	Rivière		227	26,5	8,2	85,2	8,24	Rivière de la Punaruu
653	27/02/2018	224829	8049145	260	Rivière	1	236	23,6	7,7	103	8,42	Petite rivière
654	27/02/2018	225166	8049274	355	Source	0,25	355	25,25	6,36	13	3,41	Source, dépôts oranges
655	27/02/2018	225155	8049264	358	Rivière	0,5-1	128	23,9	7,11	30,3	7,91	Arrivée d'un ru, 5 m à l'aval de la source
656	27/02/2018	225212	8049301	368	Suintement	< 0,01						Zone de suintement d'une dizaine de mètre - Niveaux de laves scoriacées
657	27/02/2018	225186	8049203	365	Rivière	0,5-1	131	23,7	7,18	95	8,18	
658	27/02/2018	223539	8048788	47	Rivière	1-2	364	25,4	8,02	103	8,27	
659	27/02/2018	228389	8048990	168	Rivière	2	226	24,2	8,09	99,2	8,48	Source de la rivière une centaine de m en amont (d'après le proprio)
660	27/02/2018	228222	8048889	134	Rivière		222	24,1	8,01	112,7	8,57	Rivière de la Punaruu
661	27/02/2018	228210	8048854	129	Suintement							Sourd de la coulée de débris - Ecoulement faible mais visible
662	27/02/2018	228174	8048781	130	Rivière	5-10	292	23,9	8,02	114,6	8,62	Rivière pérenne qui provient du plateau Tamanu
663	27/02/2018	228188	8048717	142	Rivière	< 0,05	320	24,5	7,74	110,7	8,17	Ru temporaire
664	27/02/2018	228199	8048623	151	Rivière		295	23,9	7,96	101	8,55	Rivière pérenne qui provient du plateau Tamanu
665	27/02/2018	228217	8048620	155	Suintement	0,1	269	24,1	7,01	118,4	6,73	Suintement important au niveau d'une coulée de débris
666	28/02/2018	227813	8048506	181	Ravine sèche							Ravine sèche
667	28/02/2018	227717	8048468	200	Rivière - Perte	< 0,5	253	23,7	8,02	206,3	8,45	Ru qui s'infiltre totalement dans les alluvions 20m en aval
669	28/02/2018	227055	8048712	152	Suintement		305	27	7,94	104,6	7,65	Suintement important en RD du ru asséché - Mesure dans une petite flaque

Annexe 4

Données relatives aux essais de pompage menés sur les forages de la Punaruu

Tahiti Agrégats FOR_V049

Essai par paliers



Essai par paliers de débit mené en septembre 2006



Courbes caractéristiques du puits

Essai longue durée



Essai de pompage longue durée mené en septembre 2006

EDT F2 FOR_V047

Essai par paliers de débit



Courbes caractéristiques du puits

Essai de longue durée et suivi piézométrique dans le forage EDT F2



Données acquises lors de l'essai de pompage longue durée mené sur le forage EDT F2 en juillet 2006

FOR_V043 (Brasserie F1), FOR_V044 (Brasserie F2) et FOR_V045 (Brasserie F3)



Essai de longue durée dans le forage FOR_V043, Brasserie F1

Données acquises lors de l'essai de pompage longue durée mené sur le forage Brasserie F1 en 2003



Essai de longue durée dans le forage FOR_V044, Brasserie F2

Données acquises lors de l'essai de pompage longue durée mené sur le forage Brasserie F2 en 2003



Essai de longue durée dans le forage FOR_V045, Brasserie F3

Données acquises lors de l'essai de pompage longue durée mené sur le forage Brasserie F3 en 2003

Annexe 5

Fiches des points de prélèvement

ID :

Lieu-dit :	Centrale Papenoo 2
X :	241815

- Y: 8048353
- Z: 197

Paramètres mesurés in-situ :

Moyen de prélèvement : Prise directe

T eau (°C) :	24,2	O2 dissous (%) :	108,8
C (µS/cm) :	249	O2 dissous (mg/L) :	8,95
pH :	7,18	eH mesuré (mV) :	369,9
Couleur :	Incolore		
Odeur :	Inodore		

		1	A Star	
Ra.		and the second second		
and the second second	2	A CONT		
	E de			CT CA
Contraction of the	THE EAST			1. 22
Alter in the	See.	1999 - C. 1999	S. Aller	Edge.
	and the second		1	it is a second s
N. C. State	A PARTICIPAL STREET	C. All	work Pla	Contraction of the
A THE A	it is a second second	and the second second	Contraction of the	and the second
A STATE OF STATE	Martin Co		CONT.	and the second
STATE -			-	the same
2			and the second second	
Sel the second	and the second	and the second second		

Nature :	Rivière
Date :	25/07/2018
Heure	14h30

7790 0.000



	_	
	n	
	D	
-	_	-

Lieu-dit :	Aval tunnel
X :	242703

- Y: 8045112
- Z: 712



Paramètres mesurés in-situ :

Moyen de prélèvement : Prise directe

T eau (°C) :	19,8	O2 dissous (%) :	102,2	Nature :	Rivière
C (µS/cm) :	86	O2 dissous (mg/L) :	8,64	Date :	25/07/2018
pH :	7,01	eH mesuré (mV) :	497,3	Heure	9h45
Couleur :	Incolore				

Odeur : Inodore



ID :

Lieu-dit :	Captage Maroto
X :	239323
Y :	8047743
Z :	437



Paramètres mesurés in-situ :

T eau (°C) :	21,5	O2 dissous (%) :	102,9	Nature :	Rivière
C (µS/cm) :	318	O2 dissous (mg/L) :	8,69	Date :	25/07/2018
pH :	6,65	eH mesuré (mV) :	310,4	Heure	12h20
Couleur :	Incolore				
Odeur :	Inodore				



ID :

Lieu-dit :	Captage	Vaitopaa

- X : 241759
- Y: 8046383
- Z: 408



Paramètres mesurés in-situ :

T eau (°C) :	21,3	O2 dissous (%) :	102,7
C (µS/cm) :	225	O2 dissous (mg/L) :	8,75
pH :	7,97	eH mesuré (mV) :	450,5
Couleur :	Incolore		
Odeur :	Inodore		

Nature :	Rivière
Date :	25/07/2018
Heure	10h25



ID :

- Lieu-dit : Vainavenave
- X: 242939
- Y: 8046691
- Z: 348



Paramètres mesurés in-situ :

T eau (°C) :	23,3	O2 dissous (%) :	127,8
C (µS/cm) :	194	O2 dissous (mg/L) :	10,54
pH :	8,68	eH mesuré (mV) :	386,5
Couleur :	Incolore		
Odeur :	Inodore		

Nature :	Rivière
Date :	25/07/2018
Heure	11h10



ID :

Lieu-dit :	Barrage	Tahinu

- X: 239965
- Y: 8046695
- Z: 361

Paramètres mesurés in-situ :

Moyen de prélèvement : Pompage

T eau (°C) :	23,6	O2 dissous (%) :	40,0
C (µS/cm) :	647	O2 dissous (mg/L) :	3,25
pH :	5,40	eH mesuré (mV) :	326,3
Couleur :	Incolore		
Odeur :	Inodore		



Nature :	Source
Date :	25/07/2018
Heure	13h45



ID : Lieu-dit : Vaiputoa X : 241613 Y : 8056043 Z : 52



Paramètres mesurés in-situ :

T eau (°C) :	22,7	O2 dissous (%) :	102,5	Nature :	Rivière
C (µS/cm) :	171	O2 dissous (mg/L) :	8,81	Date :	25/07/2018
pH :	7,61	eH mesuré (mV) :	421,9	Heure	15h55
Couleur :	Incolore				
Odeur :	Inodore				



I	D	:

Lieu-dit :	Affluent Vainavenave
X :	242965

- Y: 8046851
- Z: 347

Paramètres mesurés in-situ :

T eau (°C) :	22,3	O2 dissous (%) :	103,6
C (µS/cm) :	248	O2 dissous (mg/L) :	8,72
pH :	8,10	eH mesuré (mV) :	392,6
Couleur :	Incolore		
Odeur :	Inodore		

		Contra M
	No ne la	
		the second of
	2	E. C.
- 1 K - 1 K - 1		ALL THE THE ALL AND A

Nature :	Rivière
Date :	25/07/2018
Heure	11h20



ID :	STB102
Lieu-dit :	Source Ahavini
X :	237242
Y :	8062670

Z: 10

Paramètres mesurés in-situ :

Moyen de prélèvement : Tuyau dans le griffon				
T eau (°C) :	24,3	O2 dissous (%) :	95,4	
C (µS/cm) :	271	O2 dissous (mg/L) :	8,02	
pH :	7,11	eH mesuré (mV) :	414,1	
Couleur :	Incolore			
Odeur :	Inodore			

LICH	RE	ki	A.C.
	-		Contraction of the
	ia	3 Mar	
			10 312
	A Star	Re-	a de
			Q

Nature :	Source
Date :	23/07/2018
Heure	10h15



- ID : FOR_H002 Lieu-dit : Forage E2
- X: 230630
- Y: 8055386
- Z: 119



Paramètres mesurés in-situ :

Moyen de prélèvement : Robinet

T eau (°C) :	23,8	O2 dissous (%) :	103,7	Nature :	Forage Horizontal
C (µS/cm) :	246	O2 dissous (mg/L) :	8,68	Date :	23/07/2018
pH :	7,74	eH mesuré (mV) :	385,1	Heure	12h00
Couleur :	Incolore				
Odeur :	Inodore				



- ID : FOR_V071
- Lieu-dit : Forage S1-89
- X: 230443
- Y: 8056534
- Z: 73

Paramètres mesurés in-situ :

Moyen de prélèvement : Robinet

T eau (°C) :	23,8	O2 dissous (%) :	69,1	Nature :	Forage
C (µS/cm) :	209	O2 dissous (mg/L) :	5,81	Date :	23/07/2018
pH :	6,7,13	eH mesuré (mV) :	346,9	Heure	11h15
Couleur :	Incolore				

Odeur : Inodore



ID :	FOR_V088
Lieu-dit :	Stade Pater
X :	228952
Y :	8058856
Z :	21

Paramètres mesurés in-situ :

Moyen de prélèvement : Pompage

T eau (°C) :	24,6	O2 dissous (%) :	61,1
C (µS/cm) :	186	O2 dissous (mg/L) :	5,11
pH :	6,53	eH mesuré (mV) :	405,8
Couleur :	Incolore		
Odeur :	Inodore		



Nature :	Forage
Date :	23/07/2018
Heure	9h15



ID :

Lieu-dit :	Vaipuna
X :	228164
Y :	8048756
Z :	119

Paramètres mesurés in-situ :

T eau (°C) :	21,2	O2 dissous (%) :	101,9
C (µS/cm) :	287	O2 dissous (mg/L) :	8,95
pH :	7,85	eH mesuré (mV) :	455,0
Couleur :	Incolore		
Odeur :	Inodore		



Nature :	Rivière
Date :	24/07/2018
Heure	10h15



	_	
н	n	
н	υ	

- Lieu-dit : Punaruu Amont
- X: 228107
- Y: 8049030
- Z: 125



Paramètres mesurés in-situ :

T eau (°C) :	21,0	O2 dissous (%) :	103,3	Nature :	Rivière
C (µS/cm) :	243	O2 dissous (mg/L) :	9,14	Date :	24/07/2018
pH :	7,59	eH mesuré (mV) :	475,3	Heure	9h50
Couleur :	Incolore				
Odeur :	Inodore				



ID :	
Lieu-dit :	Punaruu Intermédiaire
X :	226247
Y :	8048875
Z :	63



Paramètres mesurés in-situ :

T eau (°C) :	22,4	O2 dissous (%) :	103,1	Nature :	Rivière
C (µS/cm) :	253	O2 dissous (mg/L) :	8,93	Date :	24/07/2018
pH :	7,91	eH mesuré (mV) :	410,9	Heure	10h45
Couleur :	Incolore				
Odeur :	Inodore				



ID :

Lieu-dit :	Punaruu Aval	
X :	224910	

- Y: 8048319
- Z: 30

Paramètres mesurés in-situ :

T eau (°C) :	26,7	O2 dissous (%) :	115,9
C (µS/cm) :	251	O2 dissous (mg/L) :	9,32
pH :	8,76	eH mesuré (mV) :	384,4
Couleur :	Légèrement trouble		
Odeur :	Inodore		

		The second second	
			Aur.
Grad,			Stelle
	A Second		
		4	

Nature :	Rivière
Date :	24/07/2018
Heure	11h15



ID :	STA202
Lieu-dit :	Bassin de la reine
X :	227305
Y :	8058497
Z :	5

Paramètres mesurés in-situ :

Moyen de prélèvement : Pompage dans la vasque

T eau (°C) :	26,0	O2 dissous (%) :	74,3
C (µS/cm) :	415	O2 dissous (mg/L) :	6,04
pH :	6,62	eH mesuré (mV) :	401,5
Couleur :	Incolore		
Odeur :	Inodore		

1	7.

Nature :	Source
Date :	23/07/2018
Heure	13h45



ID :	STA216
Lieu-dit :	Vaitupa
X :	222432
Y :	8055564
Z :	1

Paramètres mesurés in-situ :

Moyen de prélèvement : Pompage dans la vasque

T eau (°C) :	23,9	O2 dissous (%) :	95,3	
C (µS/cm) :	398	O2 dissous (mg/L) :	8,05	
pH :	6,89	eH mesuré (mV) :	-	
Couleur :	Incolore			
Odeur :	Inodore			



Nature :	Source
Date :	23/07/2018
Heure	14h45



ID :	STA414
Lieu-dit :	Grotte Maraa
X :	227834

Y : 8036180

Ζ: 4

Paramètres mesurés in-situ :

Moyen de prélèvement : Pompage



T eau (°C) :	21,8	O2 dissous (%) :	97,7	Nature :	Lac dans grotte
C (µS/cm) :	242	O2 dissous (mg/L) :	8,60	Date :	24/07/2018
pH :	7,85	eH mesuré (mV) :	409,5	Heure	14h00
Couleur :	Incolore				
	Légère odeur de				

salpêtre Odeur :



ID :	STC419b
Lieu-dit :	Source Vaima
X :	246224
Y :	8034616

Z: 2



Paramètres mesurés in-situ :

Moyen de prélèvement : Pompage

T eau (°C) :	23,4	O2 dissous (%) :	89,0
C (µS/cm) :	240	O2 dissous (mg/L) :	7,59
pH :	7,76	eH mesuré (mV) :	416,4
Couleur :	Incolore		
Odeur :	Inodore		

Nature :	Source
Date :	24/07/2018
Heure	12h45



- ID: FOR_V042
- Lieu-dit : Forage Vaiopu
- X: 223661
- Y: 8048853
- Z: 49

Paramètres mesurés in-situ :

Moyen de prélèvement : Robinet

T eau (°C) :	25,8	O2 dissous (%) :	27,8
C (µS/cm) :	518	O2 dissous (mg/L) :	2,26
pH :	7,00	eH mesuré (mV) :	804,3
Couleur :	Incolore		
Odeur :	Inodore		



Nature :	Forage
Date :	24/07/2018
Heure	8h50



ID :	FOR_V043
Lieu-dit :	Brasserie F1
X :	224100
Y :	8048374
7 ·	18



Paramètres mesurés in-situ :

Moyen de prélèvement : Robinet

T eau (°C) :	24,8	O2 dissous (%) :	66,2
C (µS/cm) :	311	O2 dissous (mg/L) :	5,54
pH :	6,97	eH mesuré (mV) :	423,2
Couleur :	Incolore		
Odeur :	Inodore		

Nature :	Forage
Date :	26/07/2018
Heure	10h30



- ID: FOR_V044 Lieu-dit: Brasserie F2 X: 224095
- Y: 8048391
- Z: 18



Paramètres mesurés in-situ :

Moyen de prélèvement : Robinet

T eau (°C) :	24,2	O2 dissous (%) :	70,5	Nature :	Forage
C (µS/cm) :	300	O2 dissous (mg/L) :	5,95	Date :	26/07/2018
pH :	7,07	eH mesuré (mV) :	455,9	Heure	10h15
Couleur :	Incolore				

Odeur : Inodore



ID :	FOR_V046
Lieu-dit :	EDT 1
X :	224332
Y :	8048377
Z :	22

Paramètres mesurés in-situ :

Moyen de prélèvement : Robinet

T eau (°C) :	24,0	O2 dissous (%) :	68,3
C (µS/cm) :	293	O2 dissous (mg/L) :	5,79
pH :	6,90	eH mesuré (mV) :	499,7
Couleur :	Incolore		
Odeur :	Inodore		



Nature :	Forage
Date :	26/07/2018
Heure	8h55


- ID : FOR_V049
- Lieu-dit : Tahiti Agregats
- X: 225227
- Y: 8048675
- Z: 75

Odeur :

Paramètres mesurés in-situ :

Inodore

Moyen de bassin en so	prélèvement ortie de forage	: Prise dans le e			
T eau (°C) :	24,6	O2 dissous (%) :	83,0	Nature :	Forage
C (µS/cm) :	382	O2 dissous (mg/L) :	6,92	Date :	27/07/2018
pH :	7,52	eH mesuré (mV) :	455,9	Heure	8h45
Couleur :	Incolore				



ID :	FOR_V047
Lieu-dit :	EDT 2
X :	224231
Y :	8048387
Z :	20



Paramètres mesurés in-situ :

Moyen de prélèvement : Robinet

T eau (°C) :	24,0	O2 dissous (%) :	67,7
C (µS/cm) :	299	O2 dissous (mg/L) :	5,73
pH :	6,93	eH mesuré (mV) :	468,1
Couleur :	Incolore		
Odeur :	Inodore		

Nature :	Forage
Date :	26/07/2018
Heure	9h25



ID :

- X: 239449
- Y: 8046452
- Z: 400

Paramètres mesurés in-situ :

Moyen de prélèvement : Prise directe

T eau (°C) :	22,2	O2 dissous (%) :	105,1	Nature :	Rivière
C (µS/cm) :	404	O2 dissous (mg/L) :	8,80	Date :	25/07/2018
pH :	6,75	eH mesuré (mV) :	258,3	Heure	13h00
Couleur :	Incolore				

Odeur : Inodore



- ID :
- Lieu-dit : Papenoo Vaiputoa
- X: 241628
- Y: 8056037
- Z: 52



Paramètres mesurés in-situ :

Moyen de prélèvement : Prise directe

T eau (°C) :	25,0	O2 dissous (%) :	101,6	Nature :	Rivière
C (µS/cm) :	197	O2 dissous (mg/L) :	8,38	Date :	25/07/2018
рН :	7,48	eH mesuré (mV) :	421,5	Heure	15h55
Couleur :	Incolore				

Odeur : Inodore



Annexe 6

Résultats des analyses chimiques

	TAH_1	TAH_2	TAH_3	TAH_4	TAH_5	TAH_6
	25/07/2018	25/07/2018	25/07/2018	25/07/2018	25/07/2018	25/07/2018
Température (°C)	24,2	19,8	21,5	21,3	23,3	23,6
Conductivité (µS/cm)	249	86	318	225	194	647
рН	7,18	7,01	6,65	7,97	8,68	5,40
Eh (mV)	369,9	497,3	310,4	450,5	386,5	326,3
O2 (mg/L)	8,95	8,64	8,69	8,75	10,54	3,25
O2 (%)	108,8	102,2	102,9	102,7	127,8	40,0
Ag (Argent) - 0,01 μg/l	< LQ					
Al (Aluminium) - 0,5 μg/l	19,1	22,1	6,78	24,5	22,4	6,8
As (Arsenic) - 0,05 μg/l	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0,08	0,2
B (Bore) - 0,5 μg/l	14,2	3,44	15,2	5,03	4,7	14,6
Ba (Baryum) - 0,05 μg/l	3,49	1,41	6,88	1,42	0,98	45,93
Be (Béryllium) - 0,01 μg/l	< LQ	< LQ	0,01	< LQ	< LQ	0,1
CO3 (Carbonates) - 10 mg/l	< LQ					
Ca (Calcium) - 0,5 mg/l	15,7	5,1	20,3	15	12,2	35,7
Cd (Cadmium) - 0,01 µg/l	< LQ	0,02				
Cl (Chlorures) - 0,5 mg/l	2,6	2,1	1,8	2	2,2	2,6
Co (Cobalt) - 0,05 µg/l	< LQ	< LQ	1,1	< LQ	< LQ	7,8
Cr (Chrome) - 0,1 μg/l	0,49	0,39	< LQ	0,37	0,57	0,19

	TAH_7	TAH_8	TAH_9	TAH_10	TAH_11	TAH_12
	25/07/2018	25/07/2018	23/07/2018	23/07/2018	23/07/2018	23/07/2018
Température (°C)	22,7	22,3	24,3	23,8	23,8	24,6
Conductivité (µS/cm)	171	248	271	246	209	186
рН	7,61	8,10	7,11	7,74	7,13	6,53
Eh (mV)	421,9	392,6	414,1	385,1	346,9	405,8
O2 (mg/L)	8,81	8,72	8,02	8,68	5,81	5,11
O2 (%)	102,5	103,6	95,4	103,7	69,1	61,1
Ag (Argent) - 0,01 μg/l	< LQ					
Al (Aluminium) - 0,5 μg/l	15,6	18,6	1,73	7,97	2,13	1,22
As (Arsenic) - 0,05 μg/l	0,06	< LQ	0,1	0,13	0,15	0,06
B (Bore) - 0,5 μg/l	5,07	5,56	16,2	10,4	6,78	8,45
Ba (Baryum) - 0,05 μg/l	1,02	1,32	0,86	0,17	0,65	0,5
Be (Béryllium) - 0,01 μg/l	< LQ					
CO3 (Carbonates) - 10 mg/l	< LQ					
Ca (Calcium) - 0,5 mg/l	8,5	15,3	13,4	13,8	11,8	10,8
Cd (Cadmium) - 0,01 μg/l	< LQ					
Cl (Chlorures) - 0,5 mg/l	2,4	2,4	8,4	3,7	2,6	2,4
Co (Cobalt) - 0,05 μg/l	< LQ					
Cr (Chrome) - 0,1 µg/l	0,44	1,16	1,11	0,98	0,71	0,48

	TAH_13	TAH_14	TAH_15	TAH_16	TAH_17	TAH_18
	24/07/2018	24/07/2018	24/07/2018	24/07/2018	23/07/2018	23/07/2018
Température (°C)	21,2	21,0	22,4	26,7	26,0	23,9
Conductivité (µS/cm)	287	243	253	251	415	398
рН	7,85	7,59	7,91	8,76	6,62	6,89
Eh (mV)	455,0	475,3	410,9	384,4	401,5	NR
O2 (mg/L)	8,95	9,14	8,93	9,32	6,04	8,05
O2 (%)	101,9	103,3	103,1	115,9	74,3	95,3
Ag (Argent) - 0,01 μg/l	< LQ					
Al (Aluminium) - 0,5 μg/l	1,85	8,55	7,37	17	1,97	2,73
As (Arsenic) - 0,05 μg/l	0,16	0,1	0,08	0,09	0,14	0,1
B (Bore) - 0,5 μg/l	6,33	4,27	5,02	4,79	26,5	20,2
Ba (Baryum) - 0,05 μg/l	2,5	0,9	0,87	0,95	2,12	1,57
Be (Béryllium) - 0,01 μg/l	< LQ					
CO3 (Carbonates) - 10 mg/l	< LQ					
Ca (Calcium) - 0,5 mg/l	19,1	14,2	14,6	14,5	24,3	13,7
Cd (Cadmium) - 0,01 µg/l	< LQ					
Cl (Chlorures) - 0,5 mg/l	3,8	1,7	2,1	2,1	11,4	37
Co (Cobalt) - 0,05 µg/l	< LQ					
Cr (Chrome) - 0,1 μg/l	0,65	0,6	0,61	0,62	0,56	1,47

	TAH_19	TAH_20	TAH_21	TAH_22	TAH_23
	24/07/2018	24/07/2018	24/07/2018	26/07/2018	26/07/2018
Température (°C)	21,8	23,4	25,8	24,8	24,2
Conductivité (µS/cm)	242	240	518	311	300
рН	7,85	7,76	7,00	6,97	7,07
Eh (mV)	409,5	416,4	804,3	423,2	455,9
O2 (mg/L)	8,60	7,59	2,26	5,54	5,95
O2 (%)	97,7	89,0	27,8	66,2	70,5
Ag (Argent) - 0,01 μg/l	< LQ				
Al (Aluminium) - 0,5 μg/l	20,4	29,8	2,22	2,35	3,54
As (Arsenic) - 0,05 μg/l	0,14	0,09	0,07	0,09	0,13
B (Bore) - 0,5 μg/l	17,8	8,45	17,4	8,27	7,18
Ba (Baryum) - 0,05 μg/l	1,29	0,23	1,88	0,55	0,67
Be (Béryllium) - 0,01 μg/l	< LQ				
CO3 (Carbonates) - 10 mg/l	< LQ				
Ca (Calcium) - 0,5 mg/l	8,2	11	29,7	17,4	16,9
Cd (Cadmium) - 0,01 μg/l	< LQ				
Cl (Chlorures) - 0,5 mg/l	15,1	6,6	7,3	3,6	3,4
Co (Cobalt) - 0,05 μg/l	< LQ	< LQ	0,11	< LQ	< LQ
Cr (Chrome) - 0,1 μg/l	0,98	0,55	0,43	0,66	0,92

	TAH_24	TAH_25	TAH_27	TAH_28	TAH_29
	26/07/2018	26/07/2018	26/07/2018	25/07/2018	25/07/2018
Température (°C)	24,0	24,6	24,0	22,2	25,0
Conductivité (µS/cm)	293	382	299	404	197
рН	6,90	7,52	6,93	6,75	7,48
Eh (mV)	499,7	455,9	468,1	258,3	421,5
O2 (mg/L)	5,79	6,92	5,73	8,80	8,38
O2 (%)	68,3	83,0	67,7	105,1	101,6
Ag (Argent) - 0,01 μg/l	< LQ				
Al (Aluminium) - 0,5 μg/l	2,83	6,96	1,97	6,12	12,8
As (Arsenic) - 0,05 μg/l	0,12	0,15	0,11	< LQ	< LQ
B (Bore) - 0,5 μg/l	6,89	6,92	7,28	6,02	5,08
Ba (Baryum) - 0,05 μg/l	0,53	0,81	0,44	9,22	0,65
Be (Béryllium) - 0,01 μg/l	< LQ	< LQ	< LQ	0,01	< LQ
CO3 (Carbonates) - 10 mg/l	< LQ				
Ca (Calcium) - 0,5 mg/l	16,9	15,2	16,8	26,6	11,2
Cd (Cadmium) - 0,01 µg/l	< LQ				
Cl (Chlorures) - 0,5 mg/l	2,8	4,6	2,9	2	2,3
Co (Cobalt) - 0,05 µg/l	< LQ	< LQ	< LQ	1,53	< LQ
Cr (Chrome) - 0,1 μg/l	0,61	1,35	0,61	< LQ	0,49

	TAH_1	TAH_2	TAH_3	TAH_4	TAH_5	TAH_6
	25/07/2018	25/07/2018	25/07/2018	25/07/2018	25/07/2018	25/07/2018
Cu (Cuivre) - 0,1 μg/l	0,19	0,22	0,17	0,14	0,16	< LQ
F (Fluorures) - 0,1 mg/l	< LQ	0,2				
Fe (Fer) - 0,02 mg/l	< LQ	< LQ	0,196	< LQ	< LQ	12,053
HCO3 (Bicarbonates) - 10 mg/l	93	34	115	86	65	216
K (Potassium) - 0,5 mg/l	1,1	< LQ	0,8	1,1	0,6	3,4
Li (Lithium) - 0,1 μg/l	< LQ	< LQ	0,18	< LQ	< LQ	0,78
Mg (Magnésium) - 0,5 mg/l	8,4	3,7	10,2	5,8	4,9	24,5
Mn (Manganèse) - 0,1 μg/l	5,19	0,76	58,9	< LQ	0,37	371
NH4 (Ammonium exprimé en NH4) - 0,05 mg/l	< LQ					
NO2 (Nitrites exprimés en NO2) - 0,01 mg/l	< LQ					
NO3 (Nitrates exprimés en NO3) - 0,5 mg/l	< LQ					
Na (Sodium) - 0,5 mg/l	5	1,9	6,5	5,7	4,8	9,3
Ni (Nickel) - 0,1 μg/l	0,92	< LQ	7,84	< LQ	< LQ	47,62
PO4 (OrthoPhosphates en PO4) - 0,05 mg/l	< LQ					
Pb (Plomb) - 0,05 μg/l	< LQ					
SO4 (Sulfates) - 0,5 mg/l	6,5	< LQ	10,5	1,1	0,9	34,1
SiO2 (Silice) - 0,5 mg/l	30,1	6,7	36,2	24,3	19,7	92
Sr (Strontium) - 0,1 μg/l	112	42,1	149	107	106	192
Zn (Zinc) - 0,5 μg/l	< LQ	< LQ	0,84	< LQ	< LQ	14,04

	TAH_7	TAH_8	TAH_9	TAH_10	TAH_11	TAH_12
	25/07/2018	25/07/2018	23/07/2018	23/07/2018	23/07/2018	23/07/2018
Cu (Cuivre) - 0,1 μg/l	0,28	< LQ	< LQ	0,46	0,25	0,18
F (Fluorures) - 0,1 mg/l	< LQ					
Fe (Fer) - 0,02 mg/l	< LQ					
HCO3 (Bicarbonates) - 10 mg/l	63	96	98	102	88	75
K (Potassium) - 0,5 mg/l	1,1	0,5	1,4	1,7	1,9	1,5
Li (Lithium) - 0,1 μg/l	< LQ					
Mg (Magnésium) - 0,5 mg/l	5,6	8,2	10,4	9,9	7,9	6,6
Mn (Manganèse) - 0,1 μg/l	0,18	0,82	< LQ	< LQ	0,11	0,12
NH4 (Ammonium exprimé en NH4) - 0,05 mg/l	< LQ					
NO2 (Nitrites exprimés en NO2) - 0,01 mg/l	< LQ					
NO3 (Nitrates exprimés en NO3) - 0,5 mg/l	< LQ	< LQ	3,3	1,2	0,7	2,5
Na (Sodium) - 0,5 mg/l	5,4	5,3	9,6	7,3	7	6
Ni (Nickel) - 0,1 μg/l	< LQ					
PO4 (OrthoPhosphates en PO4) - 0,05 mg/l	0,12	0,07	0,15	0,12	0,14	0,13
Pb (Plomb) - 0,05 μg/l	0,11	< LQ				
SO4 (Sulfates) - 0,5 mg/l	< LQ	0,6	2,1	0,8	0,7	1,3
SiO2 (Silice) - 0,5 mg/l	29,6	26,4	37,9	46,7	37,7	31,9
Sr (Strontium) - 0,1 μg/l	40,4	129	89	136	79,7	62
Zn (Zinc) - 0,5 μg/l	< LQ	< LQ	< LQ	0,63	7,15	< LQ

	TAH_13	TAH_14	TAH_15	TAH_16	TAH_17	TAH_18
	24/07/2018	24/07/2018	24/07/2018	24/07/2018	23/07/2018	23/07/2018
Cu (Cuivre) - 0,1 μg/l	0,24	0,2	0,23	0,35	0,48	0,42
F (Fluorures) - 0,1 mg/l	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0,1	< LQ
Fe (Fer) - 0,02 mg/l	< LQ					
HCO3 (Bicarbonates) - 10 mg/l	144	99	100	79	157	88
K (Potassium) - 0,5 mg/l	1,2	1,3	1,3	1,3	3,1	2,2
Li (Lithium) - 0,1 μg/l	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0,1	< LQ
Mg (Magnésium) - 0,5 mg/l	14,9	8,3	8,5	8,3	16,5	10,8
Mn (Manganèse) - 0,1 μg/l	< LQ	0,16	0,13	0,24	0,5	0,14
NH4 (Ammonium exprimé en NH4) - 0,05 mg/l	< LQ					
NO2 (Nitrites exprimés en NO2) - 0,01 mg/l	0,01	0,01	< LQ	< LQ	< LQ	0,01
NO3 (Nitrates exprimés en NO3) - 0,5 mg/l	1,3	< LQ	0,7	< LQ	15	7,5
Na (Sodium) - 0,5 mg/l	9,1	6,9	6,9	6,9	15,4	26,2
Ni (Nickel) - 0,1 μg/l	0,23	< LQ	< LQ	< LQ	0,23	0,17
PO4 (OrthoPhosphates en PO4) - 0,05 mg/l	0,23	0,14	0,12	0,08	0,22	0,09
Pb (Plomb) - 0,05 μg/l	< LQ	< LQ	< LQ	0,07	< LQ	< LQ
SO4 (Sulfates) - 0,5 mg/l	3,3	1	1,4	1,4	5,8	7,1
SiO2 (Silice) - 0,5 mg/l	45,1	32,3	32,6	31,8	67,3	41,7
Sr (Strontium) - 0,1 μg/l	135	88,2	92,3	91	254	146
Zn (Zinc) - 0,5 μg/l	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	3,92	1,79

	TAH_19	TAH_20	TAH_21	TAH_22	TAH_23
	24/07/2018	24/07/2018	24/07/2018	26/07/2018	26/07/2018
Cu (Cuivre) - 0,1 μg/l	0,39	< LQ	0,97	0,44	0,54
F (Fluorures) - 0,1 mg/l	< LQ				
Fe (Fer) - 0,02 mg/l	< LQ				
HCO3 (Bicarbonates) - 10 mg/l	65	85	200	111	111
K (Potassium) - 0,5 mg/l	1,6	2,4	2,1	1,5	1,5
Li (Lithium) - 0,1 μg/l	< LQ				
Mg (Magnésium) - 0,5 mg/l	5,5	6,5	16,9	9,9	9,8
Mn (Manganèse) - 0,1 μg/l	0,46	< LQ	< LQ	< LQ	0,18
NH4 (Ammonium exprimé en NH4) - 0,05 mg/l	0,07	< LQ	< LQ	< LQ	0,08
NO2 (Nitrites exprimés en NO2) - 0,01 mg/l	< LQ				
NO3 (Nitrates exprimés en NO3) - 0,5 mg/l	0,7	< LQ	1,5	1,7	1,5
Na (Sodium) - 0,5 mg/l	14,8	11,5	20,8	7,7	7,8
Ni (Nickel) - 0,1 μg/l	0,16	< LQ	0,3	0,21	0,29
PO4 (OrthoPhosphates en PO4) - 0,05 mg/l	0,13	0,17	0,14	0,15	0,2
Pb (Plomb) - 0,05 μg/l	< LQ	< LQ	0,27	< LQ	< LQ
SO4 (Sulfates) - 0,5 mg/l	2,2	1,1	13	3,4	2,6
SiO2 (Silice) - 0,5 mg/l	26,9	33,1	37,8	33,2	34
Sr (Strontium) - 0,1 μg/l	79,1	64,5	177	114	111
Zn (Zinc) - 0,5 μg/l	1,27	< LQ	6,24	< LQ	1,1

	TAH_24	TAH_25	TAH_27	TAH_28	TAH_29
	26/07/2018	26/07/2018	26/07/2018	25/07/2018	25/07/2018
Cu (Cuivre) - 0,1 μg/l	0,41	0,37	0,31	0,12	0,26
F (Fluorures) - 0,1 mg/l	< LQ				
Fe (Fer) - 0,02 mg/l	< LQ	< LQ	< LQ	0,418	< LQ
HCO3 (Bicarbonates) - 10 mg/l	109	108	109	140	73
K (Potassium) - 0,5 mg/l	1,3	2	1,4	1,4	0,9
Li (Lithium) - 0,1 μg/l	< LQ	< LQ	< LQ	0,24	< LQ
Mg (Magnésium) - 0,5 mg/l	9,5	9,5	9,6	13,3	5,9
Mn (Manganèse) - 0,1 μg/l	< LQ	0,13	< LQ	97,9	1,76
NH4 (Ammonium exprimé en NH4) - 0,05 mg/l	< LQ				
NO2 (Nitrites exprimés en NO2) - 0,01 mg/l	< LQ	0,02	< LQ	< LQ	< LQ
NO3 (Nitrates exprimés en NO3) - 0,5 mg/l	1,4	1,5	1,5	< LQ	< LQ
Na (Sodium) - 0,5 mg/l	7,2	9,8	7,2	6,5	5,7
Ni (Nickel) - 0,1 μg/l	< LQ	0,2	< LQ	13,48	0,14
PO4 (OrthoPhosphates en PO4) - 0,05 mg/l	0,1	< LQ	0,18	< LQ	0,08
Pb (Plomb) - 0,05 μg/l	0,15	< LQ	0,11	< LQ	< LQ
SO4 (Sulfates) - 0,5 mg/l	2,4	2,6	2,5	17,4	1,5
SiO2 (Silice) - 0,5 mg/l	31,5	42,1	32	41,4	24
Sr (Strontium) - 0,1 μg/l	109	136	110	185	63,2
Zn (Zinc) - 0,5 μg/l	1,77	2,05	2,69	1,19	< LQ

	TAH_1	TAH_2	TAH_3	TAH_4	TAH_5	TAH_6
	25/07/2018	25/07/2018	25/07/2018	25/07/2018	25/07/2018	25/07/2018
lsotope 87Sr / 86Sr	NR	NR	NR	NR	NR	NR
² H (vs SMOW)	-14,3	-10,6	-20,1	-14,9	-10,8	-17,3
¹⁸ O (vs SMOW)	-3,4	-3,2	-4,4	-3,6	-3,1	-4,0
CFC-11 (pmol/l)	NR	NR	NR	NR	NR	1,0 +/- 0,1
CFC-12 (pmol/l)	NR	NR	NR	NR	NR	0,59 +/- 0,05
CFC-113 (pmol/l)	NR	NR	NR	NR	NR	0,08 +/- 0,05
SF6 (fmol/l)	NR	NR	NR	NR	NR	0,4 +/- 0,1

	TAH_7	TAH_8	TAH_9	TAH_10	TAH_11	TAH_12
	25/07/2018	25/07/2018	23/07/2018	23/07/2018	23/07/2018	23/07/2018
lsotope 87Sr / 86Sr	NR	NR	NR	NR	NR	NR
² H (vs SMOW)	-21,3	-11,2	-25,4	-31,9	-29,5	-28,7
¹⁸ O (vs SMOW)	-4,3	-3,2	-4,8	-5,7	-5,4	-5,3
CFC-11 (pmol/l)	NR	NR	3,4 +/- 0,4	1,1 +/- 0,2	3,3 +/- 0,4	6,4 +/- 0,7
CFC-12 (pmol/l)	NR	NR	1,1 +/- 0,1	0,43 +/- 0,05	1,2 +/- 0,1	2,4 +/- 0,2
CFC-113 (pmol/l)	NR	NR	0,56 +/- 0,05	0,05 +/- 0,05	0,17 +/- 0,05	0,24 +/- 0,05
SF6 (fmol/l)	NR	NR	1,1 +/- 0,2	< 0,1	1,5 +/- 0,2	2,0 +/- 0,3

	TAH_13	TAH_14	TAH_15	TAH_16	TAH_17	TAH_18
	24/07/2018	24/07/2018	24/07/2018	24/07/2018	23/07/2018	23/07/2018
Isotope 87Sr / 86Sr	NR	NR	NR	NR	NR	NR
² H (vs SMOW)	-30,3	-27,2	-27,5	-27,0	-28,3	-28,7
¹⁸ O (vs SMOW)	-5,3	-5,1	-5,1	-5,0	-5,1	-5,0
CFC-11 (pmol/l)	NR	NR	NR	NR	about 140	14 +/- 3
CFC-12 (pmol/l)	NR	NR	NR	NR	5,1 +/-0,3	2,0 +/-0,1
CFC-113 (pmol/l)	NR	NR	NR	NR	0,21 +/- 0,05	0,14 +/- 0,05
SF6 (fmol/l)	NR	NR	NR	NR	1,5 +/- 0,2	0,6 +/- 0,1

	TAH 19	TAH 20	TAH 21	TAH 22	TAH 23
lsotope 87Sr / 86Sr	NR	NR	NR	NR	NR
² H (vs SMOW)	-17,9	-13,5	-29,3	-27,5	-27,5
¹⁸ O (vs SMOW)	-4,1	-3,5	-5,2	-5,0	-5,2
CFC-11 (pmol/l)	1,8 +/- 0,2	3,5 +/- 0,4	about 150	54 +/- 17	72 +/- 22
CFC-12 (pmol/l)	0,86 +/- 0,05	1,3 +/- 0,1	33 +/- 7	9 +/- 1	9 +/- 1
CFC-113 (pmol/l)	0,13 +/- 0,05	0,19 +/- 0,05	0,35 +/- 0,05	0,29 +/- 0,05	0,24 +/- 0,05
SF6 (fmol/l)	0,9 +/- 0,1	0,5 +/- 0,1	42 +/- 9	57 +/- 12	75 +/- 16

	TAH_24	TAH_25	TAH_27	TAH_28	TAH_29
	26/07/2018	26/07/2018	26/07/2018	25/07/2018	25/07/2018
lsotope 87Sr / 86Sr	NR	NR	NR	NR	NR
² H (vs SMOW)	-27,9	-28,2	-28,5	-20,2	-15,8
¹⁸ O (vs SMOW)	-5,1	-5,1	-5,2	-4,3	-3,7
CFC-11 (pmol/l)	67 +/- 21	NR	Err	NR	NR
CFC-12 (pmol/l)	9 +/- 1	NR	Err	NR	NR
CFC-113 (pmol/l)	0,30 +/- 0,05	NR	Err	NR	NR
SF6 (fmol/l)	46 +/- 10	NR	Err	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 BP 141 227 Immeuble Le Bihan L1, Pirae 98701 – Arue – Tahiti Tél. : 87 33 56 50