

Evaluation et actualisation des potentialités hydrogéologiques sur le territoire de la commune de Saint-Benoit

hibd7-hia

Rapport final

BRGM/RP-66680-FR Avril 2017



.89 3740,46 -625.5







Evaluation et actualisation des potentialités hydrogéologiques sur le territoire de la commune de Saint-**Benoit**

Rapport final

BRGM/RP-66680-FR

Avril 2017

Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM AP15REU030

Aunay B., Dewandel B., Le Moigne B., Reninger P-A., Dumont M.

Vérificateur :	Approbateur :
Nom : Yvan Caballero	Nom : S. Bès de Berc
Fonction : Responsable Scientifique de Programme	Fonction : Directrice régionale BRGM Réunion
Date : 30/03/2017	Date : 18/04/2017
Signature :	Séverine BES DE BERC Difecting BRCN Reputer
de Programme Date : 30/03/2017 Signature :	Réunion Date : 18/04/2017 Signature :

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



Mots-clés : hydrogéologie, pompage d'essai, analyse chimique, phytosanitaire, pesticide, source, géologie, géophysique, tomographie électrique, roche volcanique, basalte, TEM (transient electromagnestism), AEM (Airborne ElectroMagnetic), potentialités, La Réunion (974), Saint-Benoit

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

Aunay B., Dewandel B., Le Moigne B. et Reninger P-A., Dumont M. (2017) – Evaluation et actualisation des potentialités hydrogéologiques sur le territoire de la commune de Saint-Benoit. Rapport final BRGM/RP-66680-FR, 126 p.

© BRGM, 2017, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

En raison de problèmes récurrents sur ses ressources en eau souterraine (présence de phytosanitaires) et en eau de surface (présence de bactéries), la commune de Saint-Benoît souhaite améliorer son schéma d'alimentation en eau potable en valorisant de nouvelles potentialités aquifères sur son territoire. La stratégie de la commune consiste à prioriser la recherche de ressources en eau souterraine afin d'éviter les problèmes relatifs à la présence de bactéries. Ces ressources devront être situées en altitude, c'est-à-dire en amont des zones agricoles, à l'origine de la pression phytosanitaire. La commune de Saint-Benoit souhaite ainsi appuyer sa réflexion sur une expertise géophysique, géochimique et hydrogéologique de détail, de certaines ressources en eau souterraine existantes (sources ou forages) non exploitées.

Les principales tâches mises en œuvre sont les suivantes : (i) sélection de sources qui pourraient représenter un intérêt en termes d'exploitation, (ii) valorisation de la géophysique héliportée pour l'identification de zones favorables à une exploitation des eaux souterraine, (iii) modélisation conceptuelle du comportement hydraulique des forages "Chemin Ceinture", "Petit-Saint-Pierre" et "Bourbier-les-Hauts" sur la base des données d'essais disponibles (iv) mise en œuvre d'une opération de prélèvements et de diagnostics sur ces trois forages.

Les principaux résultats déduits de cette démarche interdisciplinaire sont organisés sous la forme d'un tableau des potentialités hydrogéologiques de la commune de Saint-Benoit, listant, entre autres, les critères de quantité, qualité, études complémentaires et niveau de risque (p. 102).

Ainsi, pour des difficultés techniques peu élevées à moyennes, il conviendrait d'effectuer diverses démarches de prospection hydrogéologique sur les secteurs de (i) Bethléem-Abondance (nappe d'accompagnement de la rivière des Marsouins), (ii) Rivière de l'est (nappe d'accompagnement), (iii) Piton Armand / Cambourg / les Chicots / Les Orangers (nappe de base).

Pour des difficultés techniques élevées engendrant un niveau de risque non négligeable, des forages de reconnaissance pourraient permettre de caractériser les potentialités hydrogéologiques d'une structure résistante dans les Hauts de la commune de Saint-Benoit, dans le prolongement aval de la Plaine des Palmistes.

Au-delà de la problématique « ressource *sensu stricto* », la mise en œuvre d'une politique d'intercommunalité permettrait de partager l'importante ressource du sud de la Plaine des Palmistes, sur les contreforts de la Fournaise (forage de Bras Piton bis à réaliser).

Enfin, la notion d'adaptation des pratiques agricoles en vue de préserver la ressource est abordée dans le cadre d'une stratégie globale de la gestion de la ressource en eau. En effet, des ressources en eau en quantité importante sont présentes sur le territoire de la commune de Saint-Benoit. Ces dernières sont toutefois impactées par la présence de phytosanitaires en relation avec les activités agricoles. Le contexte hydrogéologique des planèzes de Saint-Benoit est très favorable à une amélioration rapide (≈ 5 ans) de la qualité des eaux suite à une adaptation des pratiques agricoles. Cette adaptation des pratiques agricoles constitue un objectif à mettre en œuvre dès que possible pour des résultats efficaces et durables à un horizon de quelques années.

Sommaire

1. Introduction11	
1.1. CONTEXTE	
1.2. PROBLEMATIQUE ET OBJECTIF11	
1.3. TACHES REALISEES12	
2. Les ressources en eau de la commune de Saint-Benoit13	
3. Etat des lieux des émergences de la commune de Saint-Benoit	
 3.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE	
 3.2. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE ET EMERGENCES	
4. Valorisation des données de géophysique héliportée	
4.1. DONNEES ISSUES DE LA CAMPAGNE D'AEM	
4.2. DEMARCHE DE PROSPECTION RETENUE	
 4.3. INTERPRETATION DES DONNEES D'AEM A L'ECHELLE REGIONALE36 4.3.1. Cohérence entre AEM et géologie	
4.4. INTERPRETATION DES DONNEES D'AEM A L'ECHELLE DE LA PLANEZE DE SAINT-BENOIT	
4.5. BILAN DES CONNAISSANCES ACQUISES AVEC LES DONNEES D'AEM51	
5. Opérations de diagnostic et de prélèvement en forage	
6. Ré-interprétation de tests hydrauliques réalisés sur la commune de Saint Benoît – Il de La Réunion	e

6.1. METHODOLOGIE UTILISEE POUR INTERPRETER LES ESSAIS PA 56	AR POMPAGE
6.1.1.Essais par paliers de débit	
6.1.2. Diagnostic des essais	57
6.2. BOURBIER-LES-HAUTS	
6.2.1. Essais par paliers de débit	
6.2.2. Diagnostic et modélisation des essais	61
6.3. CHEMIN DE CEINTURE	66
6.3.1.Essais par paliers de débit	
6.3.2. Diagnostic et modélisation des essais	67
6.4. PETIT SAINT PIERRE-LES-HAUTS (OU CHEMIN GAZET)	71
6.4.1.Essais par paliers de débit	71
6.4.2. Diagnostic et modélisation des essais	72
6.5. CONCLUSION	78
7. Age, altitude de recharge et qualité des eaux des trois forages invest	igués 81
7.1. ALTITUDE DE RECHARGE	81
7.2. AGE APPARENT DES EAUX	
7.2.1. Principe de la méthode de datation	
7.2.2. Echantillonnage et mesure	90
7.2.3. Estimation de l'age apparent des eaux	91
7.3. QUALITE DES EAUX	
7.3.1.Cas du forage Petit Saint-Pierre	97
7.3.2. Cas du forage Bourbier les Hauts	101
7.3.3. Cas du forage Chemin Ceinture	101
8. Actualisation des potentialités hydrogéologiques de la commune de	Saint-Benoit 102
9. Conclusions et perspectives	107
10. Bibliographie	111

Liste des illustrations

Illustration 1 - Répartition des volumes prélevés sur chaque ouvrage en 2013 (ARTELIA, 2016)	13
Illustration 2 - Carte de situation des ouvrages de la Banque-du-Sous-Sol	15
Illustration 3 - Extrait de la carte géologique au 1/100 000 de La Réunion sur la commune de Saint-Beno	it18
Illustration 4 - Affleurement d'altérites (β1) en bordure est de la forêt du Cratère	20

Illustration 5 - Affleurements de basalte sain au sein de la Ravine Sèche (β7) (à gauche) et dans un affluent de la rivière Saint-Anne (β8)
Illustration 6 - Alluvions anciennes consituant les berges de la ravine des Orangers (à gauche) et de la Rivière de l'Est (à droite) 23
Illustration 7 - Contextes d'émergences des nappes perchées au sein des formations du Piton des Neiges25
Illustration 8 - Contexte d'émergences des nappes perchées au sein des formations du Piton de la Fournaise
Illustration 9 - Contexte d'émergences des nappes superficielle au sein des formations alluviales
Illustration 10 - Sources observées le 02/12/2016 28
Illustration 11 - Localisation des observations hydrogéologiques effectuées le 02/12//2016
Illustration 12 - Vues du système SkyTEM®
Illustration 13 – Cartographie des sondages EM
Illustration 14 – Schéma chronologique théorique d'une paléovallée (de l'étape 1 à 4)
Illustration 15 – Aperçu des données géophysiques et géologiques à l'échelle de La Réunion
Illustration 16 – Carte géologique (BRGM / LGSR, 2006)
Illustration 17 – Classes de résistivités inférieures à 8 Ω .m
Illustration 18 – Profondeur (0-320 m) du toit des résistivités comprises entre 20 et 150 Ω.m
Illustration 19 – Profondeur du toit des résistivités supérieures à 1 000 Ω .m
Illustration 20 – Coupes NW-SE et vue 3D du bloc de résistivité de la planèze de Saint-Benoit
Illustration 21 – Secteur ayant fait l'objet d'un traitement géophysique spécifique afin de préciser la structure resistante (pointillés noirs)
Illustration 22 – Coupes de résistivité d'orientations NS et WE sur la structure resistante
Illustration 23 – Géométrie de la structure resistante pour différentes classes de résistivité
Illustration 24 – Vue cartographie du toit et du mur de la structure résistante
Illustration 25 – Epaisseur de la structure résistante (cadres du haut),
Illustration 26 – Vue en plan de la structure résistante (en haut) et zone à investiguer dans le cadre de la réalisation d'éventuels forages de reconnaissance (pointillés verts en bas)
Illustration 27 - Méthodologie mise en œuvre pour l'interprétation de pompages d'essai. Utilisation des dérivées des rabattements pour diagnostiquer les essais
Illustration 28 - Exemple de succession des régimes d'écoulement lors d'un pompage dans un aquifère rectangulaire clos
Illustration 29 - Essai par paliers de débit. Forage de Bourbier-les-Hauts, forage de 110 m, 09/01/1998 60
Illustration 30 - Essai par paliers de débit. Forage de Bourbier-les-Hauts, forage de 130 m, 19-20/02/1998.60
Illustration 31 - Diagnostic des essais. Bourbier-les-Hauts
Illustration 32 - Bourbier-les-Hauts, modélisation de l'essai par paliers de débit de janvier 1998 63
Illustration 33 - Bourbier-les-Hauts, modélisation des essais de longue durée réalisés en janvier 1998 (prof. 110 m) et février 1998 (prof. 130 m)64
Illustration 34 - Bourbier-les-Hauts, modélisation des essais de longue durée réalisés en janvier 1998 (prof. 110 m) et février 1998 (prof. 130 m)
Illustration 35 - Essai par paliers de débit. Forage de Chemin de Ceinture, forage de 100 m, 01-02/07/1992.
Illustration 36 - Diagnostic des essais. Chemin de Ceinture, forage de 100 m de profondeur (02-03/1992) ; forage de 120 m de profondeur (08/07/1992). RECOV=remontée
Illustration 37 - Chemin de Ceinture, modélisation de l'essai du 02-03/07/1992 (forage de 100 m)
Illustration 38 - Chemin de Ceinture, modélisation de l'essai du 08/07/1992 (forage de 120 m) 69

Illustration 39 - Essais par paliers de débit. Forage de Petit Saint Pierre, forage de 110 m (12-15/09/2003) et forage de 150 m (02-03/10/2003)71	
Illustration 40 - Diagnostic des essais. Petit Saint Pierre, forage de 110 m de profondeur (sept.2003) ;73	
Illustration 41 - Petit Saint Pierre, modélisation de l'essai par paliers de débit de septembre 200374	
Illustration 42 - Petit Saint Pierre, modélisation de l'essai par paliers de débit d'octobre 2003 (forage de 150 m Modèle : Hantush75).
Illustration 43 - Petit Saint Pierre, modélisation des essais de longue durée réalisés en septembre 2003 (prof. 110 m) et octobre 2003 (prof. 150 m)	
Illustration 44 - Petit Saint Pierre, modélisation des essais de longue durée réalisés en septembre 2003 (prof. 110 m) et octobre 2003 (prof. 150 m) ; arithmétique. Modèle : Hantush	
Illustration 45 - Equations des différents gradients altidinaux (Grunberger, 1989)	
Illustration 46 - Estimation des altitudes moyennes de recharge	
Illustration 47 - Chronique mensuelle des teneurs en 18O (en 0/00 vs SMOW) des pluies du cycle hydrologiqu 1986-1987	e
Illustration 48 - Evolution des rapports δ^2 H en fonction des rapports δ^{18} O83	
Illustration 49 – Courbes de niveaux à 200 m (© IGN, 2003) et occupation du sol (© DAAF de La Réunion, 2014)	
Illustration 50 – Normale pluviométrique © Météo-France	
Illustration 51 - Chroniques des concentrations des CFC et SF6 dans l'air	
Illustration 52 - Modèles de transfert couramment utilisés pour interpréter les resultats CFC	
Illustration 53 - Système de prélèvement utilisé pour les CFC et SF ₆ 90	
Illustration 54 - Schéma du système de prélèvement de l'eau pour analyses de CFC et SF ₆ 90	
Illustration 55 - Tableau des résultats des gaz dissous contenu dans l'eau à l'état de trace91	
Illustration 56 - Paramètres utilisés pour le calcul des ages de l'eau prélévée en 201592	
Illustration 57 - SF ₆ vs CFC-11 : comparaison des concentrations mesurées dans l'eau en juin201594	
Illustration 58 - SF ₆ vs CFC-12 : comparaison des concentrations mesurées dans l'eau en juin 201594	
Illustration 59 - SF ₆ vs CFC-113 : comparaison des concentrations mesurées dans l'eau en juin201595	
Illustration 60 - Résultats de la diagraphie GFTC en dynamique (Q=2.25 m ³ /h)98	
Illustration 61 – Estimation de l'indice GUS (adapté) pour différents couples sol/molécule	
Illustration 62 – Evolution des surfaces et des exploitations engagées en Agriculture Biologique	
Illustration 63 – Orientations technico-économiques des exploitaitons agricoles biologiques	

Liste des tableaux

Tableau 1 - Synthèse des tests hydrauliques réinterprétés sur la commune de St Benoît	55
Tableau 2 - synthèse des paramètres hydrodynamiques déduits des modélisations des essais sur le Bourbier-les-Hauts.	e forage de 65
Tableau 3 - Synthèse des paramètres hydrodynamiques déduits des modélisations des essais sur le Chemin de Ceinture.	e forage de 70
Tableau 4 - Synthèse des paramètres hydrodynamiques déduits des modélisations des essais sur le Bourbier-les-Hauts. Modèle Hantush.	e forage de 77
Tableau 5 – Ages apparents des eaux	93
Tableau 6 – Analyses caractérisées par une détection de micropolluants	96

Tableau 7 – Synthèse des nouvelles potentialités hydrogéologiques sur la commune de Saint-Benoit... 105

Annexes

Annexe 1	Coupes géologiques et technique des ouvrages	115
Annexe 2	Fiche descriptive des sources de Saint-Benoit	121
Annexe 3	Paramètres des prélèvements	122
Annexe 4	- Le cas de la ville de Munich	125
Annexe 5	- Bordereaux d'analyse	126
Annexe 6	- Rapport IdéesEAUX	126
Annexe 7	- Agreste n°103	126

Lexique

AEM	Airborne ElectroMagnetic
AEP	Alimentation en eau potable
ATZ	Atrazine
CE25	Conductivité électrique de l'eau normalisée à 25°C
DEA	Déséthylatrazine (métabolite de l'atrazine – produit de dégradation de l'atrazine)
NGR	Nivellement général de La Réunion
TEM	Transient electromagnestism
RAD	Rapport Annuel du Délégataire
SDAEP	Schéma Directeur d'Alimentation en Eau Potable

1. Introduction

1.1. CONTEXTE

En raison de problèmes récurrents sur ses ressources en eau souterraine (présence de phytosanitaires) et en eau de surface (présence de bactéries), la commune de Saint-Benoît souhaite améliorer son schéma d'alimentation en eau potable en valorisant de nouvelles potentialités aquifères sur son territoire. La stratégie de la commune consiste à prioriser la recherche de ressources en eau souterraine afin d'éviter les problèmes relatifs à la présence de bactéries. Ces ressources devront être situées en altitude, c'est-à-dire en amont des zones agricoles, à l'origine de la pression phytosanitaire.

1.2. PROBLEMATIQUE ET OBJECTIF

La commune de Saint-Benoit souhaite ainsi appuyer sa réflexion sur une expertise géophysique, géochimique et hydrogéologique de détail, de certaines ressources en eau souterraine existantes (sources ou forages) non exploitées.

Il s'agit de recadrer, aux plans de la qualité et de la quantité, les capacités d'exploitation d'ouvrages, voire de certains secteurs aquifères, pour juger de l'intérêt d'investir pour une meilleure réponse aux problématiques d'alimentation en eau potable de la commune.

Cette expertise scientifique constitue un complément d'analyse à la consultation lancée par la commune pour la mise à jour de son schéma directeur d'alimentation en AEP (ARTELIA, 2016). Dans ce cadre, la commune réalise un bilan des ressources existantes et la définition de scénarii d'exploitation. Elle souhaite également disposer en parallèle d'un complément de réflexion à son schéma directeur d'alimentation AEP via le présent projet de recherche et développement piloté par le BRGM. Il s'agit en fait d'engager une expertise scientifique qui permette de valoriser avec plus de précision, les techniques d'investigations géologique, géophysique, hydrogéologique et géochimique disponibles sur deux secteurs en particulier, ceux des forages "Petit-Saint-Pierre" et "Bourbier-les-Hauts".

Un troisième forage, le forage "Chemin de ceinture", de productivité moindre selon les essais préliminaires réalisés en 1992, pourrait s'avérer intéressant pour qualifier une potentielle exploitation future. L'essai de pompage réalisé à l'époque a permis de déceler en effet une limite étanche proche qui traduirait une position latérale du forage par rapport à une vallée proche, qui pourrait constituer une zone de drainage d'intérêt pour le secteur. Compte tenu de ces éléments, les investigations sur ce forage ont été intégrées dans le présent projet.

1.3. TACHES REALISEES

Afin d'actualiser les potentialités hydrogéologiques sur le territoire de la commune de Saint-Benoit, les tâches suivantes ont été réalisées :

- Compilation synthétique des données disponibles en BSS et sélection des sources qui pourraient représenter un intérêt en termes d'exploitation. Prospection terrain de ces émergences et mesures qualitative et quantitative in situ ;
- Valorisation de la géophysique aéroportée du secteur (Martelet et al., 2014) pour la réinterprétation des zones favorables à une exploitation des eaux souterraines. Il s'agira d'identifier les secteurs propices à l'implantation de points de prélèvement, notamment dans les Hauts de la commune, là où la qualité des eaux est probablement préservée ;
- Modélisation conceptuelle du comportement hydraulique des forages "Chemin Ceinture", "Petit-Saint-Pierre" et "Bourbier-les-Hauts" sur la base des données d'essai de pompage disponibles. Ce point concerne la définition d'un mode de fonctionnement théorique (aquifère compartimenté à limites multiples) et le calage d'un modèle théorique de fonctionnement afin de procéder à des simulations prospectives (si les données le permettent) pour disposer d'éléments d'appréciation sur la capacité de production estimée des ouvrages ;
- Mise en œuvre d'une opération de prélèvement, selon les règles de l'art, d'échantillons d'eau dans chacun des forages "Chemin Ceinture", "Petit-Saint-Pierre" et "Bourbier-les-Hauts" à l'aide de matériel adapté à la profondeur notable du niveau statique et des caractéristiques intrinsèques de l'ouvrage;
- Compilation synthétique de l'ensemble des données recueillies et acquise en cours de programme et rédaction d'un rapport technique complet incluant le descriptif des actions entreprises, l'interprétation des données et la formulation de recommandation au regard des enjeux en matière de schéma directeur eau potable de la commune.

2. Les ressources en eau de la commune de Saint-Benoit

Les informations relatives aux ressources AEP exploitées par la commune de Saint-Benoit sont détaillées dans le récent schéma directeur AEP (ARTELIA, 2016). L'alimentation de la commune en eau est assurée via sept ressources (Illustration 1). Une estimation des débits prélevés est indiquée en fonction des débits autorisés pour les forages ou en fonction des volumes annuels prélevés pour les ressources superficielles :

- Ressources souterraines
 - Forage Chemin Sévère 1227-7X-0053 335 m³/h
 - Forage Harmonie 1227-7X-0102 200 m³/h
- Ressources semi-souterraines (contribution significative des eaux de surface)
 - Puits Leconardel A & B 1227-7X-0051 200 m³/h
 - Puits Bras Canot 1227-7X-0024 90 m³/h
- Ressources superficielles
 - Source Bassin Bleu (Source Toinette) 1227-8X-0001 55 m³/h
 - Source Vallée / Genêts 1227-7X-0013 1227-7X-0014¹
 - Source Grand Bras / Congres 1227-6X-0006 1227-6X-0007 216 m³/h



Illustration 1 - Répartition des volumes prélevés sur chaque ouvrage en 2013 (ARTELIA, 2016) Sources des données : Rapport Annuel du Délégataire CISE en 2014

¹ Ces AEP sont abandonnés. En 2014, le prélèvements annuel a été de 355 m³ (soit < 1 m³/jour). Le prélèvement autorisé était de 100 m³/h (Vallée) et 60 m³/h (Genêts).

La commune de Saint-Benoît dispose également sur son territoire de nombreux points d'eau référencés dans la Banque du Sous-Sol (BSS) du BRGM. La carte de l'illustration 2 ci-après permet de visualiser la répartition géographique de ces points. Parmi ces points, on distingue plusieurs forages (mentionnés sur l'illustration 1) dont deux sont utilisés pour l'AEP (en vert sur la carte de l'illustration 2). Trois des forages non utilisés pour l'AEP (Bourbier les Hauts, Chemin Ceinture et Petit St-Pierre²) ont fait l'objet de diagnostics traités dans le présent rapport. Le forage Bourbier n'est pas exploité pour l'AEP et n'a pas fait l'objet d'investigation particulière.

² Egalement appelé « Chemin Gazet »



Illustration 2 - Carte de situation des ouvrages de la Banque-du-Sous-Sol En vert : les captages AEP exploités par la commune. Les trois forages étudiés dans le cadre de la présente étude sont entourés d'un cercle rouge.

3. Etat des lieux des émergences de la commune de Saint-Benoit

3.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE

Le territoire communal de Saint-Benoît, sur la façade orientale de La Réunion se situe à la jonction des massifs du Piton des Neiges et du Piton de la Fournaise. Les formations associées à ces deux édifices sont, sur le secteur d'étude, essentiellement de nature effusive (coulées basaltiques). Par ailleurs, des dépôts alluviaux, issus du démantèlement de ces reliefs, se sont déposés dans les basses-vallées de la commune (Illustration 3).

3.1.1. Formations issues du Piton des Neiges identifiées sur la zone d'étude

Les formations du Pitons des Neiges peuvent être classées en quatre grandes phases d'activité volcanique distinguées d'après la carte géologique de Billard (1976). Celles-ci sont généralement séparées par des périodes d'accalmie éruptive durant lesquelles les phénomènes d'érosion et d'altération ont dominé.

- Les phases I et II forment le substratum basaltique ancien (>340 000 ans à 3 Ma).
- Les phases III et IV forment les séries des laves différentiées récentes (<340 000 ans).

La description des principales unités géologiques rencontrées sur la commune de Saint Benoit est basée sur les éléments de contexte géologique détaillée par (Frissant et al., 2007).

a) Le substratum basaltique Ancien (>340 000 ans)

Dans l'ouest de la zone d'étude, le substratum basaltique est généralement masqué par les terrains plus récents et n'affleure qu'à la faveur de remparts ou de hauts versants abrupts (Trou Malais, ouest du Plateau Mazerin, Paléocirque de Bébour, Camp de Marseille).

Dans l'est de la zone, ce substratum affleure beaucoup plus largement, principalement sous forme de hautes et larges échines orientées NE-SW souvent déchiquetées (Est du Plateau Mazerin, Ilet Patience).

Le substratum basaltique ancien, distingué en 2 phases (Billard, 1976) et représenté sur l'Illustration 3 par un ensemble unique (β 1).



Illustration 3 - Extrait de la carte géologique au 1/100 000 de La Réunion sur la commune de Saint-Benoit (source : ©BRGM, fond ©IGN scan100® - 2006)

• Substratum basaltique de phase I

La partie la plus ancienne du substratum basaltique ancien (antérieure à 2,1 Ma), correspond à l'étape précoce de fin de construction sous-marine du vaste volcan bouclier. Elle est essentiellement représentée par des laves et des brèches basaltiques altérées, fortement zéolitisées, lardés de petits sills et de dykes. Elle n'affleure que très localement dans la zone d'étude, généralement en base de rempart ou en fond de vallée encaissée (Trou Malais, Rivière des Marsouins). Sa puissance apparente n'excède que rarement 80 m.

• Substratum basaltique de phase II

L'étape principale d'édification aérienne du volcan bouclier s'est faite entre 2,1 et 0,43 Ma (phase II). Elle est caractérisée par l'émission de grands volumes de laves fluides non différentiées de type océanite et basalte à olivine. La Phase II forme l'ossature des reliefs (essentiel de la masse émergée actuelle) et peut localement dépasser 1 000 m de puissance.

La Phase II est constituée d'un empilement monotone et subtabulaire de coulées basaltiques peu épaisses (métriques) à interlits scoriacés (« couches sandwich »). Les coulées sont généralement à pendage faible (2 à 10°) vers l'est ou le nord-est. Elles sont peu hydrothermalisées (zéolitisation discrète), peu fracturées, fréquemment soulignées par de fins paléosols argileux et recoupées de petits dykes. Les horizons de scories sont en revanche souvent plus altérés.

La Phase II représente à l'ouest l'assise principale des plateaux perchés (Trou Malais, Mazerin, Camp de Marseille) et structure à l'est les hauts reliefs (Morne du Bras des Lianes, Grand Rein, Grand Battoir, Ilet Patience). Sa puissance à l'affleurement atteint plus de 600 m au niveau du rempart du Bras de Caverne (Trou Malais).

Le toit de ces terrains, soumis à une période d'intense érosion, apparaît localement très accidenté avec l'incision de profondes paléovallées et le développement sur les paléoplanèzes, d'épais profils d'altération supergène.



Illustration 4 - Affleurement d'altérites (β1) en bordure est de la forêt du Cratère

b) Les laves différentiées récentes (<340 000 ans)

Cette série de laves différentiées, est distinguée en deux phases (III et IV) (Billard, 1976). Elles sont ici regroupées sur la carte géologique à 1/100 000 sous l'appellation β2.

Laves différenciées de la phase III

De 340 000 ans à 140 000 ans (phase III, selon Billard (1976)) correspond la première étape de déclin et de démantèlement du volcan qui se termine par un épisode érosif majeur durant lequel se forment les proto-cirques de Bélouve et Bébour. Les laves différentiées mise en place lors de cette période ont partiellement nappé les paléoreliefs accidentés du substratum basaltique en buttant sur les points hauts (Morne du Bras des Lianes, Grand Battoir, etc.) et en comblant les dépressions (proto-rivières des Roches et des Marsouins).

D'après la carte de Billard (1976), ces terrains n'affleurent que très localement dans la zone d'étude (Bébour et Rivières des Roches) où ils apparaissent largement masqués par les séries postérieures (Phase IV).

Laves différenciées de phase IV

De 140 000 ans à 20 000 ans (phase IV, selon Billard (1976)) correspond à l'étape tardive de déclin du volcan. Elle est marquée par l'émission de volumes limités de laves alcalines très différentiées plus acides et plus visqueuses à l'origine de coulées pyroclastiques. Ces laves ont largement nappé les pentes externes de l'édifice. Cette phase entraîne la formation d'un petit stratovolcan dans la caldeira, dont le Piton des Neiges actuel reste un témoin.

D'après la carte de Billard (1976), la puissance apparente de ces terrains atteint 450 m sur le rempart Ouest de Bébour (Coteau Kergueven) et 200 m sur le Rempart du Mazerin.

Ces formations sont essentiellement composées de coulées massives et assez épaisses (métriques à plurimétriques), à toit localement scoriacé, d'hawaïte, mugéarite et benmoreite aphyriques. Les roches sont saines à peu altérées, affectées par un réseau plutôt dense de fissures. Elles sont localement traversées de dykes ou sills trachytiques.

À l'ouest de la commune, les laves différentiées affleurent largement et masquent le substratum basaltique. Elles nappent les paléo-pentes en structurant un ensemble de plateaux perchés (Trou Malais, Ouest du Plateau Mazerin, Camp de Marseille). Elles remplissent le paléo-crique de Bébour.

Dans l'est, ces laves affleurent principalement sous forme de coulées de vallées d'extension latérale réduite qui comblent les grand talwegs et dépressions antérieures à elles, en buttant sur les hauts reliefs du substratum basaltique.

3.1.2. Formations issues du Piton de la Fournaise identifiées sur la zone d'étude

Les formations liées à l'activité du Massif du Piton de la Fournaise sont identifiées dans la partie sud de la commune. Il s'agit de coulées basaltiques qui peuvent être rattachées à 3 phases de l'activité du volcan:

- à la série volcanique subactuelle, β8 (<5 000 ans) identifiées au niveau des quartiers Saint-François et Cambourg ;
- à la série de la Plaine des Cafres, β7 (65 000 à 5 000 ans) présentes au niveau du centre de Saint-Benoit et le long de la RN3, menant à la Plaine des Palmistes et en amont du Piton Armand. Ces coulées viennent butter contre et recouvrir les reliefs plus anciens du Piton des Neiges ;
- à la série volcanique des Remparts, β5 (150 000 à 65 000 ans) au lieu-dit Rivière de l'Est les Hauts,

Les reliefs du Piton de la Fournaise se distinguent des reliefs plus anciens du Piton des Neiges par une géomorphologie de pentes régulières formée par la mise en place des coulées basaltiques encore peu érodées. Sur le territoire de Saint Benoit, seul le Piton Armand interprété comme un cône adventif scoriacé ressort de cette topographie régulière.

En pied de pente, elles s'intercalent localement avec les dépôts alluviaux.

Les coulées du Piton de la Fournaise (β 7 et β 8) apparaissent dans l'ensemble peu altérées.



Illustration 5 - Affleurements de basalte sain au sein de la Ravine Sèche (β 7) (à gauche) et dans un affluent de la rivière Saint-Anne (β 8)

3.1.3. Dépôts alluviaux des basses vallées

Des dépôts alluviaux issus du démantèlement des formations précitées sont observés dans les basses vallées de la commune, dans la zone du centre de St-Benoit et aux lieux-dits Saint-Anne et Rivière de l'Est. Ces zones de dépôts sont à rattacher respectivement aux divagations de la Rivière des Roches, de la Rivière des Marsouins et de la Rivière de l'Est. Ces dépôts sont localement observés sur épaisseurs jusqu'à plusieurs dizaines de mètres, parfois séparés par des coulées de lave interstratifiées.



Illustration 6 - Alluvions anciennes consituant les berges de la ravine des Orangers (à gauche) et de la Rivière de l'Est (à droite) La flèche noire pointe une coulée de lave massive interstratifiée dans les alluvions.

3.2. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE ET EMERGENCES

La commune de Saint Benoit est concernée par des contextes hydrogéologiques associés d'une part au domaine littoral et d'autre part au domaine d'altitude.

Pour mémoire, les aquifères de Saint-Benoit sont de type volcanique, ce qui leur confère, en raison de l'âge récent de l'île de La Réunion, les caractéristiques suivantes : double porosité, hétérogénéité et zone non-saturée pluri-hectométrique.

3.2.1. Domaine des bas de pente : le complexe aquifère régional

Ces aquifères appartiennent au complexe aquifère régional, dénommé historiquement « nappe de base » qui est identifiée tout autour de l'île dans les formations géologiques issues du Piton de la Fournaise, du Piton des Neiges et dans les dépôts alluviaux côtiers à une altitude entre 0 et 300-350 m NGR³. La ressource contenue dans ces aquifères est accessible à faible profondeur sur la frange côtière et, est à ce titre exploitée par la majorité des forages de la commune de Saint-Benoit.

Le gradient hydraulique de ces aquifères (pente de la nappe) est de l'ordre de quelques ‰. La nappe interagit avec les eaux marines, définissant des secteurs d'intrusion saline, de manière très notable sur l'ouest de La Réunion (Dumont et Aunay, 2017). Par ailleurs, ces ouvrages, situés en contexte péri-urbain et en aval des activités agricoles, sont exposés à des pollutions anthropiques.

Sur le territoire de la commune de Saint-Benoit, le domaine des bas de pente regroupe les aquifères constitués de roches volcaniques (formations $\beta 2$, $\beta 7$, $\beta 8$) ou détritiques (dépôts alluviaux, Fy et Fz).

3.2.2. Domaine d'altitude : formations du piton des neiges

Le domaine d'altitude est quant à lui constitué, au niveau des formations du Massif du Piton des Neiges :

 d'un vaste aquifère régional, l'aquifère de Bélouve-Bébour, émergeant à la faveur d'un niveau peu perméable continu dans les hauteurs de la commune de Saint Benoit dans le secteur de Takamaka (et dans le secteur du Voile de La Mariée / Trou de Fer sur la Commune de Salazie).

Les émergences de cet aquifère ont été caractérisées dans le cadre d'une étude sur les aquifères d'altitudes de l'Est de La Réunion (Frissant et al., 2007). Ces émergences sont difficiles d'accès, éloignées des besoins en eau de la commune et fréquemment exploitées par EDF. Pour cela, elles n'ont pas été considérées dans le cadre de ce projet.

³ Différents indices hydrogéologiques illustrent le fait que le complexe aquifère régional est présent au-delà de l'altitude de 350 m NGR. Il n'a cependant pas été caractérisé par la réalisation de forages.

Les émergences sont situées dans la partie amont de la Rivières des Marsouins, à la base des coulées basaltique de la phase IV, au contact avec les formations ignimbritiques de la phase III, considérées comme peu perméables en grand.

 d'aquifères « perchés » n'ayant pas de continuité hydraulique avec les nappes du domaine littoral. Ceux-ci ne sont recoupés par aucun forage sur le secteur d'étude. L'existence de circulation d'eau est cependant mise en évidence par la présence de nombreuses émergences (sources et augmentation spontanée des débits de cours d'eau). Les faibles débits des émergences et les fluctuations de débits saisonnières traduisent des aires d'alimentation réduites de ces aquifères perchés en lien avec des niveaux imperméables (substratum hydrogéologique) de faible extension et de ressauts topographiques ponctuels.

Les sources observées apparaissent aussi à la base des formations de la phase IV (β 2) au contact avec les formations basaltiques de la phase III sans être reliées à l'aquifère régional de Bélouve-Bébour (Illustration 7-A). Des émergences sont aussi identifiées au sein des formations de phase IV (β 2) au toit d'horizon de moindre perméabilité et à la faveur de ressauts topographiques (Illustration 7-B). Cette même configuration est parfois observée au sein des coulées de phase II (β 1) (Illustration 7-C), parfois localement moins altérées.



Illustration 7 - Contextes d'émergences des nappes perchées au sein des formations du Piton des Neiges

3.2.3. Domaine d'altitude au sein sur les formations du Piton de la fournaise

Les observations de terrain sur la commune témoignent d'un coefficient d'infiltration élevé pour les coulées issues du Piton de la Fournaise (absence d'écoulement de surface pour la majorité des cours d'eau malgré une pluviométrie de l'ordre de 3 à 5 m/an) (Illustration 11 - p. 29).

Cet important coefficient d'infiltration est à mettre en relation avec la forte perméabilité de des formations géologiques jeunes du Piton de la Fournaise (< 65 000 ans). Ainsi, différents aquifères profonds, dans la continuité de la nappe de base du domaine littoral, sont alimentés par les eaux infiltrées dans ces formations.

Des petits aquifères « perchés », émergent à la faveur de contrastes de perméabilité (niveaux de paléosols de faible extension) et lorsqu'ils sont recoupés par la topographie. Les débits des sources sont faibles (quelques litres par secondes) et tributaires de l'alimentation par les pluies en saison humide (Violette, 1993), (Illustration 8).



Illustration 8 - Contexte d'émergences des nappes perchées au sein des formations du Piton de la Fournaise

Des aquifères superficiels, contenus dans les formations alluviales (terrasses de la Rivière de l'Est notamment) qui draine préférentiellement les eaux de surface et les possibles émergences des petits aquifères perchés. Les eaux contenues dans cette formation émergent lorsque celleci se biseaute et que le substratum basaltique affleure (Illustration 9).



Illustration 9 - Contexte d'émergences des nappes superficielle au sein des formations alluviales

3.2.4. Émergences visées dans le cadre de cette étude

Dans le cadre de la présente démarche, qui n'a pas pour but d'établir un inventaire exhaustif des sources de la commune de St-Benoit, le potentiel de sources connues a été vérifié. Les émergences décrites ont été ciblées selon les critères suivants :

- Proximité des besoins AEP
- Débits d'intérêt pour un usage AEP
- Zone a priori peu ou pas exposée à des pollutions agricoles (en amont des zones cultivées)
- Accessibilité des sources
- Les sources anciennement exploitées par la commune et aujourd'hui abandonnées n'ont été inspectées dans le cadre de cette étude.

Sur cette base, 9 sources ont été identifiées et ont fait l'objet d'une reconnaissance de terrain réalisée le 2 décembre 2016, lors de l'étiage, afin de bénéficier de conditions hydrométriques objectives. Le tableau suivant (Illustration 10) synthétise les informations relatives aux émergences inspectées dans ce cadre.

Les sources observées sont toutes en lien avec des aquifères perchés ou superficiels peu capacitifs. Les débits des émergences semblent relativement peu tamponnés et donc influencés par la saisonnalité des précipitations. Le tarissement de certaines de ces sources est aussi probable à l'étiage. Celles-ci sont présentées sur l'illustration 11. Les fiches d'information de ces émergences sont fournies en annexe 2.

	Lieu-dit	Accès	Alt. (en m NGR)	Captage	Exploitation actuelle	Nature⁴ (ESU / ESO)	Débit observé
1	Source Bigarades aval – 12276X0139	En bordure de la RD53	794	Non observé : Captage ponctuel (selon bibliographie)	Oui	ESO	1,5 à 2 l/s
2	Source Bigarades amont - 12276X0067	En bordure de la RD53	750	Oui	Non	ESO	2 l/s
3	Affluent ravine Casse Gueule	Depuis la berge au niveau de l'ouvrage de franchissement de la ravine	750	Non	Non	ESU / ESO ?	0,1 l/s
4	Ancienne cité PK12	En bordure de la route départementale	640	Non	Non	ESU / ESO ?	0,2 l/s
5	Source du Petit Bras Droit de la Rivière des Roches – 12277X0015	Depuis le chemin de la paix monter environ 400 m le lit de la ravine	60	Oui	Non a priori	ESO	< 5 l/s
6	En aval immédiat du pont de la RD3 sur la ravine du Petit Saint- Pierre – 12277X0019	Depuis la berge en rive gauche au niveau du pont	230	Non	Non	ESO (résurgence⁵ ?)	2 l/s
7	Ravine des orangers en aval de la RD3 – 12277X0020	Depuis le pont de la ravine des orangers sur la RD3, à 400 m en aval du pont	250	Non	Non	ESO (résurgence ?)	2 l/s
8	Ravine des orangers en amont de la RD3 - 12277X0021	Depuis le pont de la ravine des orangers sur la RD3, à 400 m en amont du pont. L'émergence se situe en rive droite.	200	Oui	Non	ESO	0,5 l/s
9	Source Batardeau - 12277X0122	Non reconnue	325	Non observé	Non	ESU / ESO ?	NC

Illustration 10 - Sources observées le 02/12/2016

⁴ ESU : eau de surface ESO : eau souterraine

⁵ Résurgence : source correspondant à la réapparition d'une rivière aérienne ayant effectué un parcours souterrain.



Illustration 11 - Localisation des observations hydrogéologiques effectuées le 02/12//2016 (fond de carte : carte géologique à 1/100 000 - BRGM/LGSR, 2006) Le masque de transparence correspond aux limites communales

4. Valorisation des données de géophysique héliportée

4.1. DONNEES ISSUES DE LA CAMPAGNE D'AEM

Les caractéristiques du levé héliporté sont présentées et détaillées dans le rapport BRGM/RP-63818-FR (Martelet et al., 2014).

4.1.1. Principe de mesure

La théorie de l'électro-magnétisme (EM) appliquée à la géophysique est documentée dans différents ouvrages tels que Ward et Hohmann (1988) et Nabighian et Macnae (1991).

Les grands principes de l'EM se basent sur les équations de Maxwell (19^e siècle) et plus particulièrement sur celles du domaine diffusif (i.e. les courants de conduction dominent) dans le cas d'un levé EM en domaine temporel. Ces équations permettent d'expliquer la diffusion des courants dans le sous-sol suite à une excitation externe ; diffusion qui dépendra, au premier ordre, de la conductivité/résistivité électrique du milieu, qui sera donc le paramètre imagé.

Le système de mesure utilisé est le système SkyTEM[®] (<u>http://skytem.com</u>). Il est composé d'une boucle émettrice, qui permet l'excitation du sous-sol, d'une boucle réceptrice, pour mesurer la réponse du sous-sol, d'un générateur, comme source d'énergie, ainsi que de différents instruments de navigation tels que GPS, inclinomètres et altimètres laser afin de positionner à tout moment la mesure dans l'espace (Illustration 12). On note également la présence d'un magnétomètre, enregistrant le champ magnétique naturel, à l'avant du système ; les mesures magnétiques n'ont pas été utilisées dans la présente étude et ne sont donc pas discutées plus en détail. La particularité du système SkyTEM[®] est d'émettre deux moments magnétiques différents (fonction du nombre de tours et de l'aire de la boucle d'émission et de l'intensité du courant injecté) : un moment, dit faible, qui assure une résolution en proche surface (dans la gamme ~0-50m) et un moment, dit fort, fournissant une information à des profondeurs plus importantes. Ces deux moments sont interprétés conjointement et correspondent à un même point de mesure.

Lors d'une mesure EM, un courant d'une intensité donnée est injecté dans la boucle émettrice afin de créer un champ magnétique, dit primaire (d'après l'équation de Maxwell Ampère). Ce même courant est ensuite coupé le plus nettement possible, entraînant alors une variation du champ primaire. Celle-ci se traduit par l'induction de courants de Foucault dans le sous-sol (d'après l'équation de Maxwell Faraday), créant, à leur tour, un champ magnétique, dit secondaire, et mesuré au niveau de la boucle réceptrice. Les courants se dissipant dans le sous-sol avec le temps (effet Joule), la donnée recueillie informera donc sur la décroissance du champ secondaire en fonction du temps, celle-ci étant directement liée à la conductivité du milieu. La profondeur d'investigation de la méthode, de l'ordre de 200-250 m en moyenne dans le cadre de la mission menée sur La Réunion, dépend de l'intensité du courant injecté, de l'aire de la boucle d'émission, du niveau de bruit de la mesure ainsi que de la conductivité du sous-sol.



Illustration 12 - Vues du système SkyTEM® (a) arrière et (b) avant de la boucle émettrice et (c) en plein vol

4.1.2. Traitements des données de navigation

a) Données GPS

La position du dispositif est mesurée toutes les secondes grâce aux GPS différentiels installés à la fois sur la boucle et à la station de base. La position de la boucle est alors obtenue en interpolant la donnée GPS par ajustement polynomial. Toutes les mesures de navigation sont ramenées selon un même pas d'échantillonnage de 0.5 s.

b) Données d'attitude

L'attitude de la boucle est mesurée suivant l'axe de vol et sa perpendiculaire horizontale grâce aux deux inclinomètres placés sur la boucle. Ceux-ci permettent de suivre le comportement du système durant le levé afin de calculer les aires effectives des boucles d'émission et de réception. Un filtre médian permettant de retirer les valeurs aberrantes a été appliqué sur ces mesures.

c) Données d'altitude

Il existe deux moyens de connaitre l'altitude du dispositif, d'une part, grâce aux deux altimètres situés sur la boucle, d'autre part, par traitement du GPS différentiel et soustraction du modèle numérique de terrain. La première solution, utilisée par le prestataire, est souvent complexe et subjective, particulièrement dans le cas d'une topographie accidentée. La seconde solution a donc été préférée lors du retraitement local.

4.1.3. Description des données EM sur le secteur de Saint-Benoit

a) Acquisition des données

Le levé EM de l'île de La Réunion, effectué par SkyTEM ApS, sous maîtrise d'œuvre du BRGM, s'est déroulé du 2 mai au 23 juillet 2014. Il comprend 10 600 km linéaire principalement sous la forme d'un quadrillage de lignes de vol nord-sud et est-ouest espacées de 200 à 400 m (Illustration 13). Lors d'un vol, la mesure est prise sans discontinuer et à pas régulier, ce qui, dans le cas du levé de l'île de La Réunion, représente un point de donnée tous les 30 m environ suivant les lignes de vol.

Les points rouges, présentées sur l'illustration 13, localisent les différentes mesures conservées lors de la production du modèle de résistivité conservées pour le modèle local.



Illustration 13 – Cartographie des sondages EM Points gris : Points de mesure EM de la campagne SkyTEM ApS Points rouges : – Points de mesure EM conservés suite au retraitement local

b) Filtrage des données

La mesure EM est extrêmement sensible aux champs EM « ambiants », aussi bien naturels qu'artificiels, ces derniers induisent un bruit sur la donnée. Comme source naturelle de bruit, on peut citer les « sphérics », ondes EM, issues de l'activité orageuse, se propageant dans la

ionosphère ; les sources artificielles de bruits comprennent quant à elles toutes installations humaines interagissant avec ou produisant un champ électromagnétique.

Afin de garder uniquement les mesures fiables, il est donc nécessaire d'appliquer un filtre dans le but de « débruiter » le jeu de données. Suite au levé, un traitement a été réalisé en utilisant les outils du logiciel Aarhus Workbench (<u>https://www.aarhusgeosoftware.dk/aarhus-workbench</u>) afin d'obtenir un modèle régional. Dans le cadre de l'étude locale, le traitement est quant à lui basé sur l'utilisation de la décomposition en valeurs singulières (Reninger *et al.*, 2011), qui permet en outre et en général de garder un plus grand nombre de données. Ces traitements ont été complétés par une édition manuelle.

A l'issue de l'étape de filtrage, les données sont prêtes à être interprétées d'un point de vue géophysique afin d'imager les contrastes de résistivité du sous-sol qui seraient à l'origine des mesures acquises.

c) Inversion des données et résultats

Le principe de l'inversion en géophysique est de retrouver les propriétés physiques du sous-sol à l'origine des différents signaux mesurés (i.e. ici les décroissances EM), affectés par les caractéristiques de celui-ci. Pour ce faire, il est nécessaire de trouver le modèle, schématisant le sous-sol, qui minimise la différence entre les données mesurées et celles prédites par la théorie; celui-ci est obtenu par itération de modélisations EM et comparaisons à la donnée mesurée. Les modèles pris en considération à cette étape permettent donc d'imager les contrastes de résistivité dans le sous-sol.

L'inversion couramment utilisée considère, pour chaque point de mesure, un modèle 1D (selon la profondeur) constitué d'un nombre n de couches, caractérisée par une épaisseur et une résistivité. Afin de stabiliser le processus, des contraintes spatiales entre les différentes couches des différents modèles sont également appliquées lors de l'inversion (cf. Spatially Constrained Inversion ; Viezzoli et al., 2008). Au cours de cette inversion, la profondeur d'investigation de chaque mesure est également testée afin de calculer une limite basse (hypothèse pessimiste ; profondeur d'investigation la plus faible) et une limite haute (hypothèse optimiste ; profondeur d'investigation la plus importante).

A l'issue de l'étape d'inversion, nous obtenons donc, à l'emplacement de chaque mesure, un modèle 1D constitué de n couches et défini par n épaisseurs et résistivités censé rendre compte des contrastes de résistivité existants en subsurface. Le nombre n est fixé avant l'inversion et dépend de notre appréhension de l'environnement géologique et de la complexité de celui-ci.

Dans le cadre de cette étude, une inversion, dite « Smooth », a été utilisée. Celle-ci consiste en la définition de modèles possédant de nombreuses couches d'épaisseur fixe, 25 (entre 0 et 400 m de profondeur) pour le modèle régional et 30 (entre 0 et 800 m de profondeur) pour celui local, dont seule la résistivité peut varier. Ce type d'inversion a l'avantage d'être moins dépendant des *a priori* définis pour initialiser le calcul (i.e. reflétant notre appréhension de la géologie), mais il a le désavantage d'imager des variations lissées de la résistivité selon la profondeur. Dans le cas du traitement local, les aires effectives ont été corrigées de la topographie (Reninger *et al.*, 2015).
4.2. DEMARCHE DE PROSPECTION RETENUE

Afin d'identifier les potentialités en ressources en eau souterraine dans les secteurs d'altitude de la commune de Saint-Benoit, la démarche consiste à identifier les paléostructures géologiques qui peuvent favoriser le drainage et/ou le stockage des eaux souterraines (Illustration 14). Pour mémoire, les structures géophysiques les plus résistantes correspondent, en théorie, aux laves les plus récentes. En effet, l'altération des laves conduit à modifier les propriétés physico-chimiques des minéraux les constituant. Dans le cas des milieux volcaniques, l'altération des laves conduit à la formation de minéraux argileux et à une baisse de la porosité, qui engendrent une baisse de la résistivité.



Illustration 14 – Schéma chronologique théorique d'une paléovallée (de l'étape 1 à 4)
R = remparts : laves plus anciennes et altérées (résistivité plus faible) dont la perméabilité est plus faible
L = en gris, laves plus récentes (résistivité plus élevée) se mettant en place dans une structure géologique héritée et dont la perméabilité est plus élevée que celle de l'encaissant (R).
Le terme paléovallée est employé pour décrire ce type de structure géologique qui permet, en théorie, la concentration des flux d'eau souterraine en raison des contrastes de perméabilité entre remplissage et encaissant.

Les laves plus récentes (L) du remplissage constituent la cible hydrogéologique en milieu volcanique car les flux se concentrent de manière préférentielle dans les secteurs les plus perméables Différentes méthodes géophysiques permettent d'imager ce type de structure.

4.3. INTERPRETATION DES DONNEES D'AEM A L'ECHELLE REGIONALE

4.3.1. Cohérence entre AEM et géologie

Dans un 1^{er} temps, les données d'AEM sont analysées à l'échelle régionale afin de déterminer le degré de cohérence entre les données géophysiques et les connaissances géologiques (Illustration 15). Il est noté que les différentes entités géologiques correspondent à des réponses géophysiques cohérentes, c'est-à-dire que les contours de la carte géologique (BRGM/LGSR, 2006) correspondent à des réponses géophysiques assez similaires <u>en surface</u> :

- les résistivités du cirque de Salazie (brèches et laves anciennes altérées) sont inférieures à la centaine d'ohm.m ;
- les massifs anciens de l'est constitués d'océanites (> 340 ka Cratère, Piton Papangue, Grand Battoir... Aunay *et al.*, 2009), présentent des résistivités de l'ordre de la centaine d'ohm.m;
- les planèzes de Saint-André et du plateau de Mazerin (≈ 200 ka) présentent des résistivités de plusieurs centaines d'ohm.m;
- les entités géologiques les plus récentes telles que Bébour (≈ 50 à 100 ka) et la Planèze de St-Benoit (5 à 50 ka) sont marquées par des résistivités de l'ordre du millier d'ohm.m.

Il apparait donc qu'une relation élémentaire peut être établie entre les résistivités de surface et l'âge relatif des formations géologiques sur la partie Est de La Réunion : la résistivité décroit avec l'augmentation de l'altération des formations géologiques.

Par ailleurs, le phénomène de salinisation des aquifères côtiers est parfaitement illustré par des très faibles résistivités (< 10 Ω .m).





Illustration 15 – Aperçu des données géophysiques et géologiques à l'échelle de La Réunion Sur le secteur de Saint-Benoit, les différentes entités géologiques correspondent ponctuellement à des réponses géophysiques contrastées. Les principales entités géologiques sont marquées par des pointillés sur les données de géophysiques.

1 : cirque de Salazie – 2 : massif du Cratère – 3 : Plateau du Mazerin – 4 : Plateau de Bébour – 5 : Planèze de Saint-André – 6 : Planèze de Saint-Benoit

Données : Google Earth © et données géophysiques héliportées de La Réunion. (programme financé par le FEDER, le BRGM, le Conseil Régional de La Réunion). Référentiel Géologique de la France © BRGM Point rouge : centre-ville de Saint-Benoit



Illustration 16 - Carte géologique (BRGM / LGSR, 2006).

4.3.2. Distribution spatiale des entités géophysiques

Afin d'appréhender la structuration des différentes entités géophysiques, une description des données par classe de résistivité est effectuée.

a) Entités à très faible résistivité ($\rho < 8 \Omega.m$)

Seule la bordure littorale est marquée par la présence de formations dont les résistivités sont inférieures à 8 Ω .m (Illustration 17). Ces très faibles résistivités sont attribuées sans équivoque au phénomène de salinisation des aquifères (Dumont, à paraitre) pour la partie terrestre et aux sédiments saturés d'eau salée pour la partie océanique.

Compte tenu des éléments cartographiques, il peut être considéré que la géométrie de l'interface eau douce / eau salée est particulièrement redressée (proche du trait de côte), sans impact significatif sur les ressources en eau souterraine de la commune de Saint-Benoit. L'intrusion saline semble en effet se manifester très localement sur quelques centaines de mètres à l'intérieur des terres, ce qui est très peu marqué par rapport aux secteurs impactés à La Réunion (Bourhane et al., 2016 ; Dumont et Aunay, 2017).



Illustration 17 – Classes de résistivités inférieures à 8 Ω.m Seule la bordure littorale est marquée par la présence de formations dont les résistivités sont inférieures à 8 Ω.m. Carroyage blanc : 5 km - Carroyage noir : 1 km En bleu : réseau hydrographique Limites communales en jaune Le Nord est matérialisé par l'axe Y (en bas à gauche)

b) Entités à faible résistivité (20< ρ < 150 Ω .m)

Des formations marquées par de faibles résistivités sont identifiées entre le littoral et 1 000 m d'altitude. La visualisation de la profondeur du toit des formations conductrices permet de distinguer différents secteurs (Illustration 18) :

- Au nord de la Ravine Sèche (partie droite de la carte) : les entités conductrices sont subaffleurantes (profondeur du toit ≈ 0 m). Elles correspondent vraisemblablement aux différents massifs anciens du Piton des Neiges : Le Cratère, Ilet Patience... (Aunay *et al.*, 2009). Les faibles résistivités sont associées à l'altération pédoclimatique des anciennes coulées de lave ;
- Au sud de la Ravine Sèche (partie gauche de la carte) : des entités conductrices sont identifiées jusqu'à plus de 200 m de profondeur. Elles pourraient correspondre aux formations géologiques de la série du bouclier ancien (β4 - 150-450 ka - Illustration 16) ou à la série alcaline anté-fournaise (β3 - 450-530 ka). Pour mémoire, des gammes de résistivités identiques marquent également le flanc NW du Piton de la Fournaise, notamment sur la planèze du Tampon (β4) ;
- Dans les Hauts, à proximité de la limite communale de la Plaine des Palmistes, l'absence de formations conductrices est expliquée par l'absence de données AEM audelà de 300 m de profondeur. Au-delà de cette absence de donnée, une structure particulière est observée (flèches noires - Illustration 18) soulignant l'absence de formations conductrices. Cette lacune pourrait correspondre à la paléovallée évoquée au préalable (voir Illustration 14, p 35).



Illustration 18 – Profondeur (0-320 m) du toit des résistivités comprises entre 20 et 150 Ω.m Carroyage blanc : 5 km - Courbe topographique (blanc) : isoligne 100 m En bleu : réseau hydrographique - Limites communales en jaune Le Nord est matérialisé par l'axe Y (en bas à gauche)

c) Entités à résistivité élevée (> 1000 Ω.m)

Des formations marquées par des résistivités élevées sont identifiées à l'affleurement dans les Hauts du massif de la Fournaise (Illustration 20 – flèches noires) et sur le plateau de Bélouve-Bébour (Illustration 20 – flèche jaune).

Le Piton Armand, récent cône scoriacé (< 5 000 ans - β 8), est également marqué par des résistivités élevées.

Il convient de noter que les secteurs issus de l'activité ancienne du Piton des Neiges (Le Cratère, Grand Battoir, Eden...) ne présentent pas de terrain à résistivité élevé, ce qui signifie que l'altération a affecté les formations jusqu'à la profondeur de 250-300 m (limite de pénétration des données AEM). Au vu de l'âge élevé des formations géologiques concernées, cette altération peut être d'origine pédoclimatique ou hydrothermale⁶.



Illustration 19 – Profondeur du toit des résistivités supérieures à 1 000 Ω.m Carroyage blanc : 5 km Courbe topographique (blanc) : isoligne 100 m En bleu : réseau hydrographique - Limites communales en jaune Le Nord est matérialisé par l'axe Y (en bas à gauche)

⁶ Altération pédoclimatique : phénomène majoritairement *per descensum*.

Altération hydrothermale : phénomène pouvant être per ascensum, mais pouvant être contrôlé par des axes de drainage (Bret et al., 2003)

4.4. INTERPRETATION DES DONNEES D'AEM A L'ECHELLE DE LA PLANEZE DE SAINT-BENOIT

Afin de répondre aux besoins de la commune et suite aux résultats des précédentes études (Aunay *et al.*, 2009 et 2012), le secteur d'intérêt ciblé pour l'identification de structures géologiques favorables correspond à la planèze de Saint-Benoit (Illustration 15), en aval immédiat de la Plaine des Palmistes. Pour mémoire, la Plaine des Palmistes présente d'intéressantes perspectives hydrogéologiques en raison des critères suivants (Aunay *et al.*, 2012) :

- Structure géologique et géomorphologique constituée de formations géologiques récentes (65 000 ans à subactuelles) enchâssée dans un substratum plus ancien (> 200 000, voire 530 000 ans) et vraisemblablement moins perméable ;
- Fort taux d'infiltration sur l'ensemble de la Plaine des Palmistes (pas de réseau d'eau de surface pérenne) ;
- Bonnes modalités d'exploitation.

Ces intéressantes potentialités sont confrontées à l'existence de forages sur la Plaine des Palmistes dont le débit d'exploitation pourrait paraitre médiocre ($\approx 50 \text{ m}^3/\text{h}$) au regard d'autres ressources de La Réunion. A la suite d'une réinterprétation des pompages d'essais en considérant des aquifères compartimentés, la faible productivité des ouvrages de la Plaine est corrélée avec des équipements mal adaptés à ce type d'aquifère (dénoiement de venues d'eau productives notamment). (...) Ainsi, le débit théorique d'exploitation de Bras Piton passerait de 50 m³/h à près de 350 m³/h).

La démarche adoptée dans le cadre du présent projet vise à identifier l'éventuel exutoire souterrain de l'aquifère de la Plaine des Palmistes afin de déterminer si une exploitation est envisageable sur le territoire de la commune de Saint-Benoit.

Sur la planèze de Saint-Benoit, l'analyse visuelle des données d'AEM permet de mettre en évidence une structure résistante (> 1 000 ohm.m) dans le prolongement de la Plaine des Palmistes (Illustration 20). Au vu de sa géométrie, cette structure peut s'apparenter à une paléovallée (remplissage de lave récente dans un encaissante plus ancien et plus altéré).

A l'échelle de la planèze qui se développe entre Saint-Benoit et la Plaine des Palmistes, une unique structure de ce type est observée. Il est toutefois noté la présence de formations particulièrement résistives sur les pentes du Piton de la Fournaise (Rivière de l'Est les Hauts, au nord-ouest du Piton Armand).

Toutefois, l'absence de données AEM sur la zone urbanisée de la Plaine des Palmistes ne permet pas de déterminer avec précision les relations entre ce corps résistant et l'aquifère de la plaine.



Illustration 20 – Coupes NW-SE et vue 3D du bloc de résistivité de la planèze de Saint-Benoit Pointillés noirs : structure résistante en forme de paléovallée Carroyage blanc : 5 km En bleu : réseau hydrographique Le Nord est matérialisé par l'axe Y (en bas à gauche)

a) Analyse détaillée de la géométrie sur la planèze de Saint-Benoit

Afin de caractériser plus précisément la structure résistante identifiée dans le prolongement de la Plaine des Palmistes, un traitement spécifique des données AEM a été effectué (voir paragraphe « Inversion des données et résultats » – p. 34). Ce secteur, de l'ordre de 50 km², recoupe principalement les formations du Piton de La Fournaise, que cela soit sur le territoire de Saint-Benoit ou de la Plaine des Palmistes (Illustration 21).

Les coupes de résistivité NS et EW (Illustration 22) permettent de mettre en évidence la structure résistante ($\rho > 1\ 000\ \Omega$.m) sur les hauts de Saint-Benoit entre 500 et 800 m d'altitude.

La géométrie de la structure résistante forme une entité relativement continue pour des gammes de résistivité comprise entre 1000 et 1750 Ω .m (Illustration 23).

Cette structure occupe une surface d'une dizaine de km^2 (\approx 5 km selon la direction SW-NE et 2 km selon NW-SE).

La profondeur du toit de la structure varie entre 50 et 100 m, tandis que le mur varie entre 200 et 300 m.



Illustration 21 – Secteur ayant fait l'objet d'un traitement géophysique spécifique afin de préciser la structure resistante (pointillés noirs) Carroyage blanc : 5 km

Les sphères et le réseau hydrographique permettent de se repérer dans les illustrations suivantes. Le Nord est matérialisé par l'axe Y (en bas à gauche)



Illustration 22 – Coupes de résistivité d'orientations NS et WE sur la structure resistante Carroyage noir : 1 km Courbe noire : limite communale Courbes blanches fines : courbes de niveau - 100 m



 Illustration 23 – Géométrie de la structure resistante pour différentes classes de résistivité. Carroyage noir : 1 km
Courbe noire : limite communale
Courbes blanches fines : courbes de niveau - 100 m
Sphères : voir illustrations précédentes
La géométrie de la structure résistante forme une entité relativement continue pour des gammes de résistivité comprise entre 1 000 et 1 750 Ω.m.
La géométrie générale de la structure résistante évolue peu en fonction des classes de résistivité ce qui signifie que le contraste entre les terrains résistants et les terrains conducteurs est significatif.

47

b) Analyse détaillée du toit et du mur

L'analyse de la géométrie du toit et du mur (Illustration 24 - Illustration 25) permet de poser quelques hypothèses de drainage des eaux au sein de la structure résistante. Ces hypothèses reposent sur le schéma conceptuel d'une structuration en paléovallée marquée par des laves plus récentes, moins altérées et plus perméable. Pour mémoire, les eaux souterraines sont drainées de manière préférentielle par les milieux les plus perméables.

Ainsi, la structuration géométrique du mur de la structure résistante constitue un paramètre majeur pour la question du stockage des eaux : dans le cas présent il semble probable que les eaux s'écoulent en suivant le mur de la structure résistante sans rencontrer de « barrage hydraulique » pouvant générer un éventuel stock.

La pente du mur varie entre 5% et 15%, ce qui est très élevé par rapport à un gradient hydraulique de l'ordre de quelques ‰ dans le cas de La Réunion. En conséquence, les eaux drainées vers cette structure seront également rapidement évacuées vers les parties les plus basses en altitude, sans stockage dans une « structure piège » de type dépression fermée. Cependant, un stockage d'eau par réduction de la perméabilité créant un barrage hydraulique pourrait potentiellement avoir lieu vers la terminaison aval (NE de la structure résistante), en amont des structures conductrices, du fait de leur moindre perméabilité liée à leur plus grand degré d'altération (toujours selon le schéma conceptuel d'une paléovallée).

Par ailleurs, la réduction de l'épaisseur et de la largeur de la structure résistante vers l'aval (Illustration 25) pourrait contribuer à une concentration préférentielle des flux dans la partie aval.



Illustration 24 – Vue cartographie du toit et du mur de la structure résistante Les valeurs sont exprimées en mètres NGR et en profondeur par rapport au sol. Pointillées rouges : terminaison aval de la structure résistante Courbe noire fine : limite communale - Emprise du Parc National en vert



Illustration 25 – Epaisseur de la structure résistante (cadres du haut), vue 3D de la base (cadre en bas à gauche) et du toit (cadre en bas à droite) Les flèches noires matérialisent l'amincissement de la structure résistante vers l'aval. Cette structure est subdivisée en deux niveaux horizons résistants superposés (pointillés orange). Les valeurs sont exprimées en mètres Courbe noire fine ou jaune : limite communale - Emprise du Parc National en vert Carroyage noir : 1 km

4.5. BILAN DES CONNAISSANCES ACQUISES AVEC LES DONNEES D'AEM

Une cohérence effective est observée entre les données d'AEM et les connaissances historiques de géologie et d'hydrogéologie régionale sur le secteur de Saint-Benoit. A titre d'exemple, les secteurs géographiques suivants peuvent être cités :

- des résistivités faibles (< 150 Ω.m) sont observées à l'affleurement pour les massifs géologiques anciens du Piton des Neiges tels le Cratère, l'Ilet Patience ou du Piton de la Fournaise (Morne Saint-François);
- des résistivités élevées (> 1 000 Ω.m) sont observées à l'affleurement pour les formations géologiques récentes du Piton de la Fournaise (β7 ou β8) ou du Piton des Neiges (plateau de Bélouve - Bebour) ;

Différents concepts ou hypothèses ont pu être formulés sur la base des données d'AEM :

- L'interface eau douce / eau salée est très proche du littoral de Saint-Benoit avec une faible pénétration dans les terres, ce qui signifie une faible vulnérabilité aux intrusions salines;
- Des entités géophysiques peu résistantes, pouvant correspondre aux formations géologiques du β3 ou β4 du Piton de la Fournaise sont imagées jusqu'à plus de 200 m de profondeur sur la majeure partie du territoire sud de la commune de Saint-Benoit ;
- Une structure résistante relativement continue, dans le prolongement de la Plaine des Palmites et du Piton de la Fournaise est clairement imagée entre 400 et 800 m d'altitude. Cette structure occupe une surface d'une dizaine de km². Le toit de la structure varie entre 50 et 100 m de profondeur, tandis que le mur varie entre 200 et 300 m de profondeur ;
- La pluviométrie élevée sur les Hauts de l'Est engendre probablement une bonne alimentation de cette structure par les eaux souterraines. Il est ainsi possible que cette structure draine une partie significative des eaux précipitées sur les Hauts, que cela soit sur la Plaine des Palmistes ou sur la partie NE du Piton de la Fournaise.

Toutefois, l'absence de « verrou » ou de « barrage hydraulique » réduit les perspectives de pouvoir identifier un stockage d'eau souterraine significatif dans cette structure.

Sur la base des données géophysiques, le seul contexte susceptible de faire office de verrou se localiserait dans la partie aval de la structure, au droit de sa terminaison NE, lorsqu'elle rencontre des formations moins résistantes. Ces dernières correspondraient probablement à des entités géologiques plus anciennes et moins perméables.

Il convient de rappeler qu'aucune observation de terrain ne permet de confirmer ou d'infirmer cette hypothèse. De même, aucun forage n'a pu être utilisé afin de contraindre les interprétations.

Une donnée indépendante (forage / sondage) permettrait d'affiner notre compréhension du modèle et de mieux définir le contraste de résistivité d'intérêt. Ces nouveaux éléments pourraient alors nous renseigner directement sur la profondeur de la formation et sa géométrie ainsi que confirmer ou infirmer les hypothèses précédentes (e.g. absence de barrage hydraulique).

A ce titre, des ouvrages de reconnaissance dont la profondeur serait comprise entre 75 m et 150 m de profondeur permettraient de déterminer la présence éventuelle d'une ressource en eau souterraine exploitable. Le secteur à investiguer est localisé 1 à 2 km en amont de la RD3 entre le Chemin Lamadière au Nord et le Chemin Vabois au sud (Illustration 26).



Illustration 26 – Vue en plan de la structure résistante (en haut) et zone à investiguer dans le cadre de la réalisation d'éventuels forages de reconnaissance (pointillés verts en bas) Courbes rouges : profondeur du mur de la structure résistante Courbes noires : profondeur du toit de la structure résistante

5. Opérations de diagnostic et de prélèvement en forage

Les forages Chemin Ceinture, Bourbier les Hauts et Petit St-Pierre ont respectivement été réalisés en 1992, 1998 et 2003 lors de différentes campagnes de reconnaissance menées par le Département. Ces forages n'ont pas été mis en exploitation à la suite de leur réalisation et sont actuellement dépourvus d'équipement de pompage.

Dans le cadre d'une mise en exploitation future par la Commune de St-Benoit d'un ou plusieurs de ces ouvrages, un diagnostic devait être effectué afin d'appréhender leur état, 12 à 25 ans après leur réalisation. Par ailleurs, des prélèvements visant à déterminer la qualité des eaux et le contexte hydrogéologique local étaient nécessaires avant leur éventuelle mise en exploitation.

A ce titre, le BE IdéesEAUX a réalisé une mission afin de réaliser les tâches suivantes sur chacun des trois ouvrages :

- mise en place d'une pompe d'essai 3" au-delà de 50 m de profondeur pour la réalisation de divers prélèvements d'eau. Pour certains cas, ces prélèvements ont été réalisés à diverses profondeurs (voir chapitre 7 - Age, altitude de recharge et qualité des eaux des trois forages investigués, p. 81) :
 - une série de prélèvements d'eau effectuée par l'ARS Réunion pour une analyse de type PPESO⁷, avec envoi des échantillons au Laboratoire Départemental d'Analyse de la Drôme à Valence et au LDEHM à La Réunion ;
 - un prélèvement d'eau effectué par le BRGM pour analyser les CFC's et SF6, pour la datation des eaux, avec envoi au Spurenstofflabor en Allemagne ;
 - un prélèvement d'eau pour les analyses des isotopes stables de l'eau, pour calculer l'altitude de recharge, à destination du laboratoire du BRGM, à Orléans.
- réalisation d'une inspection vidéo pour contrôler la conformité technique des ouvrages et leur état général;
- réalisation de diagraphies hydrogéologiques par diagraphie de production (flux : micromoulinet ou Heat pulse), température et conductivité (chapitre 6 - Ré-interprétation de tests hydrauliques réalisés sur la commune de Saint Benoît – Ile de La Réunion p. 55)

L'intervention d'IdéesEAUX a eu lieu entre le mardi 23 et lundi 29 juin 2015, avec l'appui d'agents du BRGM.

En préalable à ces interventions, les équipements de l'Office de l'eau destinés à suivre la ressource en eau ont été démontés et/ou désinstallés provisoirement.

L'intégralité du rapport IdéesEAUX figure en annexe 5 du présent rapport.

⁷ Liste de paramètres fixée par la réglementation relative à l'utilisation d'eaux souterraines destinée à la consommation d'eau potable.

6. Ré-interprétation de tests hydrauliques réalisés sur la commune de Saint Benoît – lle de La Réunion

La démarche détaillée dans ce chapitre a pour objectif, à partir de tests hydrauliques par pompage, de définir le schéma de fonctionnement hydrogéologique des formations géologiques dans lesquelles sont implantés les ouvrages, mais aussi de statuer sur leur éventuelle exploitation.

Trois forages ont été ont été étudiés, Boubier-les-Hauts (code BSS : 1227-7x-0073), Chemin de Ceinture (1227-7x-0052) et Petit Saint Pierre-les-Hauts (1227-8x-0058). Le tableau suivant (Tableau 1) synthétise les informations sur les forages et les tests hydrauliques qui ont été effectués, à l'époque de la réalisation des forages. Les coupes géologiques et techniques des ouvrages sont disponibles en annexe 1.

Les tests par pompage sur ces trois forages ont été réalisés en deux temps, les premiers sur forages « courts » (tranche ferme des travaux), les ouvrages étaient néanmoins cimentés et crépinés, puis sur forages « longs », après approfondissement et équipement des parties profondes des forages (tranche conditionnelle des travaux).

	Prof. du forage (m)	Position des crépines (m)	Géologie captée	Durée pompage (min.)	Type d'essai	Débit (m ³ /h)	N.S. / sol (m)	Biblio.
Bourbier 07-08/01/1998	110.0	78.0- 107.0	basaltes	1800	Long. durée	381.4	49.74	Billard, 1998
Bourbier 09/01/1998	110.0	78.0- 107.0	basaltes	930	Paliers + Long. durée	147.0 à 381.0	49.83	Billard, 1998
Bourbier 19-20/02/1998	130.0	78.0- 107.0 & 124.0- 130.0	basaltes	305	Long. durée	187	47.13	Billard, 1998
Chemin Ceinture 01-03/07/1992	100.0	76.15- 98.5	Basaltes ±vacuolaires	1590	Paliers + Long. durée	4.35 à 19.8	68.82	Billard, 1992
Chemin Ceinture 08/07/1992	120.0	76.15- 120.0	Basaltes ±vacuolaires	28	Test court	4.1 à 6.0	78.15	Billard, 1992
Petit StPierre 12-15/09/2003	110.0	89.0- 110.0	Basaltes ±scories	260	Paliers	140.0 à 350.0	67.64	Daessle, 2003
Petit StPierre 16/09/2003	110.0	89.0- 110.0	Basaltes ±scories	1500	Long. durée	321	67.88	Daessle, 2003
Petit StPierre 02- 03/10/2003	150.0	89.0- 150.0	Basaltes ±scories	1440	Paliers	140.0 à 350.0	68.1	Daessle, 2003
Petit StPierre 06/10/2003	150.0	89.0- 150.0	Basaltes ±scories	960	Long. durée	321	67.95	Daessle, 2003

Tableau 1 - Synthèse des tests hydrauliques réinterprétés sur la commune de St Benoît.

6.1. METHODOLOGIE UTILISEE POUR INTERPRETER LES ESSAIS PAR POMPAGE

6.1.1. Essais par paliers de débit

Les essais de puits ou essais par paliers de débit sont destinés à estimer les pertes de charge quadratiques liées au puits qui se traduisent par un rabattement de pression additionnel dû à l'équipement du forage et/ou à la qualité des échanges hydrauliques entre le forage et la formation réservoir. Ces essais ont été interprétés suivant la méthode de Jacob (Cooper et Jacob, 1946), où le rabattement, s, à la fin de chaque palier est décrit par la relation suivante :

s=BQ+CQ²

où B est le coefficient de pertes de charge linéaires (liées à l'aquifère ; en m⁻³.s), C le coefficient de pertes de charge quadratiques (liées au puits ; en m⁻⁵.s²), s le rabattement après un certain temps de pompage (en général 1 ou 2 heures) et Q le débit de chacun des paliers.

Cette méthode peut être utilisée de façon adéquate et strictement correcte dans le cas où chaque palier de débit est suivi d'une remontée des niveaux jusqu'à ré-atteinte du niveau initial (débit nul), en pratique de durée équivalente à la phase de pompage. Par contre, dans le cas de paliers enchainés (les phases de pompage sont successives), l'utilisation de cette méthode surestime en général les coefficients B et C. Par ailleurs, on peut comparer plusieurs essais par paliers de débit réalisés sur un même ouvrage que lorsque ceux-ci ont été réalisés suivant le même protocole : même durée de pompage, même durée de remontée, mais pas forcément les mêmes débits.

Dans le cas des ouvrages analysés, les essais ont été réalisés comme suit :

- Bourbier les hauts
 - Forage court (110 m de profondeur) : 3 paliers non-enchainés de 60 minutes
 - Forage long (130 m) : 4 paliers enchainés de 40 à 60 minutes
- Chemin de Ceinture
 - Forage court (100 m) : 3 paliers non-enchainés de 120 minutes
 - Pas de test par paliers sur le forage long (120 m)
- Petit Saint Pierre
 - Forage court (110 m) : 4 paliers non-enchainés de 120 minutes
 - Forage long (150 m) : 4 paliers non-enchainés de 60 minutes

6.1.2. Diagnostic des essais

La méthode mise en œuvre est décrite dans le schéma suivant (Illustration 27). Elle sera utilisée pour réinterpréter les essais disponibles des trois forages dans les basaltes de la commune de Saint-Benoit. Comparée à la méthode précédente, cette technique à l'avantage de travailler en « courbe type » des essais (courbe de rabattement pour un débit unitaire), ce qui permet de comparer strictement tous les essais entre eux, qu'ils soient de durée, ou de débit, équivalente ou pas.



Illustration 27 - Méthodologie mise en œuvre pour l'interprétation de pompages d'essai. Utilisation des dérivées des rabattements pour diagnostiquer les essais.

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

Afin de déterminer les différentes composantes d'écoulement associées aux propriétés hydrauliques de tels aquifères, il est nécessaire de porter une attention particulière aux essais de pompage et de poser un diagnostic aussi fin que possible sur les essais avant toute modélisation. Le diagnostic repose sur l'interprétation des pentes de la courbe de dérivée logarithmique des rabattements ($\partial s / \partial \ln t$; à la descente ou à la remontée des niveaux) qui a l'avantage de représenter tous les régimes d'écoulement sur un seul et même graphique bilogarithmique (Bourdet *et al.*, 1983 et 1989; Spane & Wurstner, 1993; etc.). L'avantage de cette méthode est que pour chaque type et/ou géométrie d'aquifère, mais également pour

chaque type de configuration « forage-aquifère » (captage partiel de l'aquifère par exemple), 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 ; 4 limites étanches orthogonales (ou un autre type de réservoir fermé) par une pente de 1 ; un captage partiel de l'aquifère par une pente de -½ ; un effet de drainance par une pente négative infinie, etc. L'illustration 28 présente comme exemple les différents types d'écoulement que l'on observe lors d'un pompage dans un aquifère rectangulaire où, au fur et à mesure, les limites étanches (orthogonales entre elles) sont perçues par l'essai. L'effet capacitif du puits est aussi pris en compte.



Illustration 28 - Exemple de succession des régimes d'écoulement lors d'un pompage dans un aquifère rectangulaire clos. t_D : temps adimensionnel

 s_{D} (courbe pleine) et s_{D} ' (courbe tiretée) : rabattement et dérivée du rabattement (adimensionnel).

Le calcul de la dérivée nécessite souvent un traitement par lissage afin d'augmenter le rapport signal sur bruit (Bourdet *et al.*, 1983), le bruit étant engendré par des micro-variations du débit et/ou par la sensibilité de l'outil de mesure des niveaux d'eau (sonde manuelle, sonde automatique). Ce traitement n'altère en rien la qualité des données originelles.

De plus, lorsque le débit varie de façon significative durant l'essai, il est nécessaire de prendre en compte ces variations dans le calcul. Le calcul de la dérivée sera donc réalisé à partir des rabattements spécifiques (normalisation par rapport aux variations de débit) et du temps de superposition (fonction aussi des variations de débit) ; on obtient ainsi une courbe type de l'essai –*c*'est-à-dire pour un débit unitaire- qui est dérivée et interprétée suivant la méthode précédemment décrite.

Une fois la courbe des dérivées construite, le diagnostic consiste à identifier les différents régimes d'écoulement et à en déduire les propriétés du forage (effet de capacité, effet de skin...), de l'aquifère (isotrope, anisotrope, fracture verticale, double porosité, etc.), de sa

géométrie (effets de limites), des éventuelles relations entre l'aquifère capté et d'autres aquifères (effet de drainance par exemple) et, éventuellement, de la mise en évidence d'écoulements fractionnaires comme par exemple dus à la forte perméabilité d'un drain karstique. Enfin, une fois le diagnostic posé, l'estimation des paramètres de l'aquifère est réalisée à partir du modèle mathématique le plus approprié. Puis, le modèle conceptuel de l'aquifère est validé en jugeant de la pertinence de la modélisation et des informations géologiques disponibles sur la formation testée.

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

Les neuf essais disponibles (Tableau 1), soit trois sur Bourbier-les-Hauts, deux sur Chemin de Ceinture et quatre sur Petit Saint-Pierre ont été diagnostiqués suivant la méthode précédemment décrite puis modélisés.

6.2. BOURBIER-LES-HAUTS

Ce forage a été réalisé en 1998 (Billard, 1998). Il est profond de 130 m et a traversé plusieurs coulées de laves intercalées de niveaux sédimentaires (entre 0-79 m et 107-121 m). Les investigations de débitmétrie menées en 2015 (forage complet de 130 m) n'ont pas permis de mettre en évidence de zones productives de l'ouvrage (ininterprétable à partir de 108 m, IdéesEAUX, 2015 – Annexe 6).

Lors de la réalisation de l'ouvrage en 1998 deux phases de test ont été réalisées. Une première, comportant deux essais sur le forage court, 110 m de profondeur, du 07 au 09/01/1998 (à cette époque le forage était cimenté de 0 à 40 m de profondeur et crépiné de 78 à 107 m), suivie d'une seconde phase (1 test) où l'ouvrage était dans sa configuration actuelle (cimenté de 0 à 40 m et crépiné entre 78.0-107.0 m et 124.0-130.0 m).

6.2.1. Essais par paliers de débit

Les illustration 29 et illustration 30 présentent l'interprétation des deux essais par paliers de débit réalisés sur cet ouvrage : un lorsqu'il atteignait 110 m de profondeur (09/01/1998 ; essai non-enchainé) et l'autre lorsqu'il atteignait 130 m (test du 19-20/02/1998, essai enchainé). Ces deux essais ayant été réalisés dans des conditions différentes, l'un enchainé, l'autre non, il n'est donc pas possible de représenter leurs interprétations sur un même graphe. Néanmoins, ont été reportées les données du premier palier de février et la valeur du rabattement à 60 min de pompage de l'essai de longue durée (07/01/1992) sur les données du premier essai par paliers (Illustration 29).

Même si les calculs des coefficients B et C ne sont pas directement comparables du fait de l'inadéquation des protocoles de tests, on note que le fait d'avoir approfondi l'ouvrage de 20 m a significativement augmenté la performance du puits. Par contre, le rabattement au moment de l'essai de longue durée de janvier est inférieur à celui de l'essai par palier (Illustration 29). Ceci suggère qu'entre ces deux phases de tests –le pompage de longue durée ayant été réalisé en premier- l'ouvrage se serait en partie colmaté.

Les pertes de charge quadratiques (coefficient C) sont estimées aux environs 1 800 m⁻⁵.s² lorsque le forage atteignait 110 m de profondeur, et aux environs de 900 m⁻⁵.s² pour le forage terminé (130 m de profondeur). Le coefficient B est faible, de l'ordre de 40 m⁻³.s – celui du

deuxième essai n'est pas significatif car les paliers sont enchainés - et traduit la bonne transmissivité du système.



Illustration 29 - Essai par paliers de débit. Forage de Bourbier-les-Hauts, forage de 110 m, 09/01/1998.



Illustration 30 - Essai par paliers de débit. Forage de Bourbier-les-Hauts, forage de 130 m, 19-20/02/1998.

6.2.2. Diagnostic et modélisation des essais

L'illustration 31 présente les rabattements normalisés et dérivées des essais de longue durée réalisés lorsque le forage atteignait 110 et 130 m de profondeur. Ce graphe montre aussi la valeur des dérivées à la remontée des niveaux des deux essais.

Les courbes de rabattements normalisés montrent que l'essai de février (forage de 130 m) donne des valeurs moindres comparées à celles de janvier (forage 110 m). Ceci est à mettre en relation avec une diminution des effets de puits (pertes de charge qui passent de 1800 à 900 m⁻⁵.s²), comme vu précédemment.

Les courbes de dérivée sont de formes semblables, mais décalées suivant la verticale :

- 1- du début de l'essai à environ 5-6 minutes, elles traduisent l'effet de capacité du forage ;
- 2- de 6 à 90 minutes environ, elles suivent une pente de -0.5 qui est typique d'un captage partiel de l'ouvrage ;
- 3- et de 90 minutes à la fin des essais, la dérivée décrit un plateau, ce qui est caractéristique d'un écoulement radial à partir duquel la transmissivité de l'aquifère peut être estimée : elle est évaluée aux environs de 1,0-1,5.10⁻¹ m²/s pour le forage de 110 m et à 0,4-0,8 10⁻¹m²/s pour le forage de 130 m.

Ainsi, ce diagnostic montre que l'ouvrage, qu'il soit dans sa configuration 110 ou 130 m de profondeur, **ne capte que partiellement l'aquifère**. Mais les évaluations de transmissivité, plus faibles pour le forage profond que pour le court, montrent que **la poursuite de la foration a occulté en partie une partie de l'aquifère entre 78 et 107 m de profondeur**. Ceci est confirmé par les mesures micro-moulinet de 2015, où la zone crépinée située entre 78 et 107 m (zone du 1^{er} test de longue durée) n'a montré aucune venue d'eau.

Ces essais de longue durée ainsi que l'essai par paliers de débit de janvier 1998 (forage de 110 m) ont donc été modélisés avec un modèle prenant en compte les types d'écoulement observés (captage partiel de l'ouvrage et effet de puits). Le modèle de Hantush (1964) a été utilisé, il prend aussi en compte, si nécessaire, l'anisotropie verticale de perméabilité. Les résultats sont présentés sur les illustration 32 à illustration 34. Le tableau 2 présente les paramètres hydrodynamiques déduits.

Les résultats des modèles sont de bonne qualité et confirment le diagnostic de ces essais. La transmissivité diffère entre les essais de janvier et février, 1,2.10⁻¹ m²/s pour le forage de 110 m (janvier) et 0,8 10⁻¹m²/s pour le forage de 130 m (février). Cette baisse de transmissivité est à mettre en relation avec un colmatage partiel de la partie supérieure de l'ouvrage lors de son approfondissement. L'emmagasinement de l'aquifère, estimé à 0,05, apparait cohérent pour ce type de milieu. Cependant, ayant été estimé au puits de pompage, ce dernier ne peut être établi avec certitude. Seule son estimation à partir d'un piézomètre d'observation (ouvrage non pompé) aurait permis de donner plus de précision sur ce paramètre. Les pertes de charge quadratiques sont différentes d'un essai à l'autre conformément aux résultats des essais par paliers de débit. Ces modélisations apportent aussi une précision sur le captage partiel de l'ouvrage, puisque l'épaisseur de l'aquifère est estimée à 80 m. Ainsi, d'après ces calculs, le forage actuel (130 m de profondeur) ne capterait qu'une dizaine de mètres de cet aquifère. Une anisotropie verticale de transmissivité a aussi était nécessaire pour ajuster les modélisations, elle est estimée à 15 (rapport entre les perméabilités horizontale et verticale) ce qui apparait cohérent pour un empilement de coulée ; cette valeur traduit vraisemblablement le fait que des niveaux peu perméables (sols, matériaux très altérés, coulées indurées ou massive et peu fracturée) s'intercalent entre les différents niveaux productifs.



Illustration 31 - Diagnostic des essais. Bourbier-les-Hauts Forage de 110 m de profondeur (janvier 1998) Forage de 130 m de profondeur (février 1998) RECOV=remontée





Illustration 32 - Bourbier-les-Hauts, modélisation de l'essai par paliers de débit de janvier 1998 Forage de 110 m Modèle : Hantush.

Graphe du haut : représentation log-log ; graphe du bas : représentation arithmétique.



Illustration 33 - Bourbier-les-Hauts, modélisation des essais de longue durée réalisés en janvier 1998 (prof. 110 m) et février 1998 (prof. 130 m). Représentation log-log. Modèle : Hantush.



Illustration 34 - Bourbier-les-Hauts, modélisation des essais de longue durée réalisés en janvier 1998 (prof. 110 m) et février 1998 (prof. 130 m) représentation arithmétique. Modèle : Hantush.

Modèle: aquifère	homogène + captage partiel		
	Bourbier_07-08/01/1998; prof.: 110 m	Bourbier_09/01/1998; prof.: 110 m	Bourbier_19-20/02/1998; prof.: 130 m
r (m)	0.17	0.17	0.15
T (m2/s)	1.20E-01	1.20E-01	8.00E-02
S (-)	5.00E-02	5.00E-02	5.00E-02
Anis. Vert. (kh/kz)	15.0	15.0	15.0
B (m)	80.0	80.0	80.0
l (m)	30.0	30.0	13.0
d (m)	0.0	0.0	0.0
C (m-5s2)	1540.0	2050.0	850.0
Capacité (m)	0.2	0.2	0.2

r (m)	Rayon de l'ouvrage
T (m2/s)	Transmissivité
S (-)	Emmagasinement
Anis. Vert. (kh/kz)	Anisotropie de perméabilité verticale
B (m)	Epaisseur de l'aquifère
l (m)	Longueur du forage dans l'aquifère
d (m)	distance entre le toit de l'aquifère et le haut de la crépine
C (m-5s2)	Pertes de charge quadratiques
Capacité (m)	Effet capacitif de puits

Tableau 2 - synthèse des paramètres hydrodynamiques déduits des modélisations des essais sur le forage de Bourbier-les-Hauts. Modèle Hantush.

6.3. CHEMIN DE CEINTURE

Ce forage a été réalisé en 1992 (Billard, 1992). Il est profond de 120 m et a traversé des coulées de laves plus ou moins vacuolaires correspondant à plusieurs phases d'activité du Piton de la Fournaise. Les investigations de débitmétrie menées en 2015 (forage complet de 120 m) n'ont pas permis de mettre en évidence les zones productives de l'ouvrage en raison de l'impossibilité de descendre en-deçà de 101 m de profondeur et de la faible productivité de la partie haute de l'ouvrage (IdéesEAUX, 2015 – Annexe 6).

Lors de la réalisation de l'ouvrage deux phases de tests ont été réalisées. Une première, comportant deux essais sur le forage court, 100 m de profondeur, du 01 au 03/01/1992- à cette époque le forage était cimenté de 0 à 20 m de profondeur et crépiné de 76,15 à 98.5 m, suivie d'une deuxième phase (1 test) où l'ouvrage était dans sa configuration actuelle (cimenté de 0 à 20 m et crépiné entre 76,15-120,0 m).

6.3.1. Essais par paliers de débit

L'illustration 35 présente l'interprétation de l'essai par paliers de débit réalisé sur cet ouvrage lorsqu'il atteignait 100 m de profondeur (01-02/01/1992; essai non-enchainé). Aussi, ont été reportées les données suivantes : valeur à 120 minutes du pompage de longue durée qui lui a succédé (02-03/07/1992) et la valeur à 28 minutes du pompage de très courte durée après approfondissement à 120 m de l'ouvrage (08/07/1992 ; nota : ce test n'a duré que 28 min).

L'essai n'est pas interprétable à cause de la valeur négative du coefficient B. Cette valeur aberrante est vraisemblablement liée à la désaturation partielle de l'aquifère lors du test (désaturé à partir de 7.3 m de rabattement, rabattement maximal : 90,34 m). Les points correspondants aux deux autres essais (longue durée du 02-03/07/1992 et test de 28 minutes après approfondissement à 120 m, 08/07/1992) sont en dessous de la courbe théorique suggérant une détérioration de l'ouvrage après cette première phase de test.



Illustration 35 - Essai par paliers de débit. Forage de Chemin de Ceinture, forage de 100 m, 01-02/07/1992.

6.3.2. Diagnostic et modélisation des essais

L'illustration 36 présente les rabattements normalisées et dérivées des essais réalisés lorsque le forage atteignait 100 et 120 m de profondeur. Ce graphe montre aussi la valeur des dérivées à la remontée des niveaux des deux essais.

Les courbes de rabattements normalisés montrent que lorsque le forage atteignait 100 m de profondeur ceux-ci sont moins importants que lorsqu'il atteignait 120 m, montrant ainsi la détérioration de l'ouvrage entre les phases de tests, ce qui est cohérent avec l'analyse précédente.

Les courbes de dérivée des deux essais sont différentes. L'essai du 08/07/1992 (forage de 120 m) est court et ne montre qu'un effet de capacité de puits. Par contre, la courbe de dérivée de l'essai réalisé du 02 au 03/07/1992 (forage de 100 m) montre que:

- 1- du début de l'essai à 10 min, la dérivée traduit un effet de capacité du forage ;
- 2- de 10 à 800 minutes environ, la courbe de dérivée forme un « U » typique de la réaction d'un système moins poreux mais capacitif (micro-fractures par exemple), cela correspond à la réaction de la seconde porosité ;
- 3- et de 800 minutes à la fin de l'essai, la dérivée amorce une sorte de plateau, caractéristique d'un écoulement radial à partir duquel la transmissivité de l'aquifère est estimée à 1,0-2,0.10⁻⁴ m²/s. Il est aussi possible que durant cette phase il y ait aussi des effets de limites (atteinte de limites de l'aquifère).

Ainsi, ce diagnostic montre que l'aquifère capté par l'ouvrage dans sa configuration à 100 m de profondeur a un comportement de type double porosité. L'essai a donc été modélisé avec un modèle de type double porosité (Moench, 1984) prenant en compte les effets de puits et, si nécessaire, les limites de l'aquifère. L'essai de 08/07/1992, forage de 120 m, a aussi interprété avec ce modèle. Les résultats sont présentés sur les illustration 37 et illustration 38. Le tableau 3 présente les paramètres hydrodynamiques déduits.

Les résultats des modèles sont de relativement bonne qualité et confirment le diagnostic des essais. Cependant, une partie de l'essai du 02-03/07/1992, entre 70 et 120 minutes, n'a pas pu être modélisée correctement en raison d'une désaturation trop importante des crépines et donc de l'aquifère à proximité de l'ouvrage. L'aquifère capté a une transmissivité plutôt faible, elle est évaluée à 1,7.10⁻⁴ m²/s sur le forage de 100 m et 4,9 10⁻⁵m²/s pour le forage de 120 m. Comme dans le cas précédent, cette baisse de transmissivité est à mettre en relation avec un colmatage partiel de la partie supérieure de l'ouvrage entre les deux essais, a fortiori lors de son approfondissement. L'emmagasinement de l'aguifère (Stot) est estimé à 0,03-0,05 et apparait cohérent pour ce type de milieu. Cependant, ayant été estimé au puits de pompage, ce dernier ne peut être établi avec certitude. Seule son estimation à partir d'un piézomètre d'observation (ouvrage non pompé) aurait permis de donner plus de précision sur ce paramètre. La perméabilité de la matrice est estimée à 3,0.10⁻⁶ m/s environ. Les pertes de charge quadratiques diffèrent d'un essai à l'autre, cependant elles ne peuvent être estimées avec précision pour l'essai du 08/07/1992 (forage de 120 m), car l'essai est court avec peu de variations du débit de pompage. Notons que pour ajuster l'essai le plus long (02-03/07/1992, forage de 100 m) deux limites étanches parallèles (configuration chenal ouvert) ont été nécessaires ; celles-ci traduisent vraisemblablement la géométrie de la coulée captée par l'ouvrage. Leurs distances au puits de pompage ne sont pas certaines car fonction de l'emmagasinement de l'aquifère.



Illustration 36 - Diagnostic des essais. Chemin de Ceinture, forage de 100 m de profondeur (02-03/1992) ; forage de 120 m de profondeur (08/07/1992). RECOV=remontée.



Illustration 37 - Chemin de Ceinture, modélisation de l'essai du 02-03/07/1992 (forage de 100 m). Modèle : Moench.

Graphe du haut : représentation log-log ; graphe du bas : représentation arithmétique.



Illustration 38 - Chemin de Ceinture, modélisation de l'essai du 08/07/1992 (forage de 120 m). Modèle : Moench

Graphe du haut : représentation log-log ; graphe du bas : représentation arithmétique.

	CheminCeinture_01-03/07/1992; prof. 100 m	CheminCeinture_08/07/1992; prof. 120 m
r (m)	0.13	0.08
Tf (m2/s)	1.68E-04	4.90E-05
Sf (-)	8.00E-03	3.00E-02
Km (m/s)	2.80E-06	2.50E-06
Sm (-)	2.50E-02	2.50E-02
bm (-)	8.0	8.0
Sk (-)	0.3	0.0
Stot (-)	3.30E-02	5.50E-02
Sf/Stot (-)	0.2	0.5
Dist. Lim1&2 (min)	800	-
Dist. Lim1&2 (m)	31.3	-
C (m-5s2)	1500000	500000
Capacité (m)	0.25	0.115

r (m)	Distance (m)
Tf (m2/s)	Transimissivité fracture
Sf (-)	Emmagasinement fracture
Km (m/s)	Perméabilité matrice
Sm (-)	Emmagasinement matrice
bm (-)	Taille des blocs (slab)
Sk (-)	Skin de fracture
Stot (-)	Emmag. Total (Sf+Sm)
Sf/Stot (-)	ratio Sf/Stot
Dist. Lim1&2 (min)	Dist. Limites étanches en minutes
Dist. Lim1&2 (m)	Dist. Limites étanches en mètres
C (m-5s2)	Pertes de charge quadratiques
Capacité (m)	Effet capacitif de puits

Tableau 3 - Synthèse des paramètres hydrodynamiques déduits des modélisations des essais sur le forage de Chemin de Ceinture. Modèle Moench.
6.4. PETIT SAINT PIERRE-LES-HAUTS (OU CHEMIN GAZET)

Ce forage a été réalisé en 2003 (Daessle, 2003). Il est profond de 150 m et a traversé plusieurs coulées de laves. Les investigations de débitmétrie menées en 2015 (forage complet de 150 m), bien qu'ayant été réalisées avec un débit insuffisant pour créer de réelles arrivées d'eau (2,25 m³/h), ont tout de même permis d'identifier plusieurs niveaux à forte production au niveau d'interfaces de coulées (niveaux scoriacés, 98.5-102.5, 111.0-112.5, 116.5-117.5) et de coulée plus ou moins massives (90.4-91.4, 125.0-127.5 ; IdéesEAUX, 2015 – Annexe 6).

Lors de la réalisation de l'ouvrage deux phases de tests ont été réalisées. Une première, comportant deux essais sur le forage court, 110 m de profondeur, du 12 au 16/09/2003- à cette époque le forage était cimenté de 0 à 13 m de profondeur et crépiné de 89 à 110 m, suivie d'une seconde (deux tests, du 02 au 06/10/2003) où l'ouvrage était dans sa configuration actuelle (cimenté de 0 à 13 m et crépiné de 89,0 à 150,0 m).

6.4.1. Essais par paliers de débit

L'illustration 39 présente l'interprétation des deux essais par paliers de débit réalisés sur cet ouvrage : un lorsqu'il atteignait 110 m de profondeur (12-15/09/2003 ; essai non-enchainé) et l'autre lorsqu'il atteignait 150 m (02-03/10/2003, essai non-enchainé). De plus, ont été reportées les données des essais de longue durée (16/09, forage de 110 m et du 06/10, forage de 150 m ; valeurs à 60 minutes de pompage).

Dans les deux cas, les estimations des coefficients B (pertes de charge liées à l'aquifère) sont comparables et faibles ce qui traduit la bonne transmissivité de l'aquifère. Par contre, le coefficient C (pertes de charge quadratiques, liées à l'ouvrage) est beaucoup plus faible lors du deuxième essai ce qui traduit une amélioration significative de l'ouvrage entre les deux phases de tests (gain en productivité estimé à 60% environ, C_sept. : 57 m⁻⁵s², C_oct. : 21 m⁻⁵s²).



Illustration 39 - Essais par paliers de débit. Forage de Petit Saint Pierre, forage de 110 m (12-15/09/2003) et forage de 150 m (02-03/10/2003).

6.4.2. Diagnostic et modélisation des essais

L'illustration 40 présente les rabattements normalisées et dérivées des essais de longue durée réalisés lorsque le forage atteignait 110 et 150 m de profondeur. Ce graphe montre aussi la valeur des dérivées à la remontée des niveaux des deux essais.

Les courbes de rabattements normalisées montrent que l'essai d'octobre (forage de 150 m) donne des valeurs moindres comparées à celles de septembre (forage 110 m). Ceci est à mettre en relation avec une amélioration de l'ouvrage entre les deux phases de tests, comme vu précédemment.

Les courbes de dérivées des deux essais sont de formes semblables, mais légèrement décalées pour le début des essais (période inférieure à 20-30 min) ; la courbe de septembre étant située au-dessus de celle d'octobre. Ces courbes de dérivée montrent que :

- 1- du début de l'essai à environ 30 minutes, elles traduisent l'effet de capacité du forage suivi très rapidement d'une pente de -0,5 typique d'un captage partiel de l'ouvrage ;
- 2- de 30 à environ 90 minutes, la dérivée décrit un petit plateau caractéristique d'écoulement radial à partir duquel la transmissivité de l'aquifère est évaluée, dans les deux cas, entre 0,5 et 1,0 m²/s;
- 3- de 90 à environ 500 minutes, la dérivée augmente suivant une pente élevée, proche de 1. Ceci traduit l'atteinte de plusieurs limites étanches venant clore le système (aquifère fermé);
- 4- et de 500 minutes à la fin des essais, les rabattements tendent à stabiliser ce qui induit une diminution voire une stabilisation de la dérivée (à ce stade la dérivée est très erratique en raison de la pseudo-stabilisation des niveaux). Ce comportement pourrait être lié à un effet de drainance des formations superficielles ou sous-jacentes à l'aquifère capté.

Ainsi, ce diagnostic montre que l'ouvrage, qu'il soit dans sa configuration 110 ou 150 m de profondeur, ne **capte que partiellement l'aquifère**. La transmissivité de ce dernier est très importante, de l'ordre de 0,5 à 1,0 m²/s. De plus, le diagnostic montre que l'aquifère est limité dans l'espace (aquifère fermé) et soumis à des **effets de drainance** provenant de coulées moins perméables sus- ou sous-jacentes à l'aquifère capté.

Ces essais de longue durée ainsi que l'essai par paliers de débit d'octobre 2003 (forage de 150 m) ont donc été modélisés avec un modèle prenant en compte ces types d'écoulement (captage partiel de l'ouvrage, effet de puits, effets de limites et drainance). Le modèle de Hantush (1964) a été utilisé, il prend aussi en compte, si nécessaire, l'anisotropie verticale de perméabilité. Les résultats sont présentés sur les illustration 41 à illustration 44. Le tableau 4 présente les paramètres hydrodynamiques déduits.

Les résultats des modèles sont de bonne qualité et confirment le diagnostic des essais. La transmissivité est évaluée à 7,4.10⁻¹ m²/s et son emmagasinement à 0,05. Bien qu'apparaissant cohérent pour ce type de milieu, ce dernier ne peut être établi avec certitude car estimé au puits de pompage. Seule son estimation à partir d'un piézomètre d'observation (ouvrage non pompé) aurait permis de donner plus de précision sur ce paramètre. Les pertes de charge quadratiques prescrites dans les modèles ne sont par contre pas différentes entre les quatre essais, ce qui diffère des résultats des essais par paliers de débit. Ceci s'explique par le fait que l'approfondissement de l'ouvrage a contribué à améliorer la productivité de l'aquifère en augmentant la surface d'échange forage-aquifère suivant la verticale (forage plus long de 40 m en octobre 2003) sans pour autant diminuer de façon significatives les pertes de charge

quadratiques. Dans ce cas, l'augmentation de la productivité de l'ouvrage est essentiellement liée à un changement de géométrie de l'ouvrage.

Ces modélisations apportent aussi une précision sur le captage partiel de l'ouvrage, l'épaisseur de l'aquifère est estimée à 100 m. Ainsi le forage actuel (150 m de profondeur) ne capterait qu'environ 60 mètres de cet aquifère d'après ces calculs. L'anisotropie verticale de transmissivité a aussi été nécessaire pour ajuster l'ensemble des modélisations, elle est estimée à 15 (rapport entre la perméabilité horizontale et verticale), ce qui apparait cohérent pour un empilement de coulée. Cette valeur traduit vraisemblablement le fait que des niveaux peu perméables (sols, matériaux très altérés, coulées indurées, massives et peu fracturées) s'intercalent entre les différents niveaux productifs. Par ailleurs, comme proposés par le diagnostic, des effets de limites et de drainance ont été nécessaires pour modéliser les rabattements. Les limites interviennent relativement tôt, au bout de 50 minutes environ pour les deux premières (2 limites étanches parallèles) et au bout de 200 minutes environ pour les deux autres (parallèles entre elles et orthogonales aux deux précédentes), on a donc un aquifère fermé. Ces limites décrivent probablement les limites de la coulée basaltique aquifère. En termes de distance, elles seraient situées à environ 400 m du forage pour les deux premières et à environ 800 m pour les deux autres, ce qui donne une surface d'aquifère de l'ordre de 1,3 km². Néanmoins, ces évaluations de distance et de surface sont soumises à caution puisque leur calcul dépend de la valeur de l'emmagasinement, ici évalué au puits de pompage et non sur un piézomètre d'observation. D'un point de vue drainance, en provenance d'un niveau peu perméable sus- ou sous-jacent, la perméabilité de ce milieu est estimée à 7.0.10⁻⁷ m/s pour une épaisseur arbitraire unitaire.



Illustration 40 - Diagnostic des essais. Petit Saint Pierre, forage de 110 m de profondeur (sept.2003) ; forage de 150 m de profondeur (oct.2003). RECOV=remontée.



Illustration 41 - Petit Saint Pierre, modélisation de l'essai par paliers de débit de septembre 2003 (forage de 110 m). Modèle : Hantush.

Graphe du haut : représentation log-log ; graphe du bas : représentation arithmétique.



Illustration 42 - Petit Saint Pierre, modélisation de l'essai par paliers de débit d'octobre 2003 (forage de 150 m). Modèle : Hantush.

Graphe du haut : représentation log-log ; graphe du bas : représentation arithmétique.



Illustration 43 - Petit Saint Pierre, modélisation des essais de longue durée réalisés en septembre 2003 (prof. 110 m) et octobre 2003 (prof. 150 m) représentation log-log. Modèle : Hantush.



Illustration 44 - Petit Saint Pierre, modélisation des essais de longue durée réalisés en septembre 2003 (prof. 110 m) et octobre 2003 (prof. 150 m) ; arithmétique. Modèle : Hantush.

Modèlo: aquifère be	magène anisatrona L cantage partiel Llimites L	trainanco		
wodele. aquitere no	inogene anisotrope + captage partier +innites +t	Indition		
	StPierre (m)_12-15/09/2003; prof.: 110 m	PetitStPierre_16/09/2003; prof.: 110 m	PetitStPierre_02-03/10/2003; prof.: 150 m	PetitStPierre_06/10/2003; prof.: 150 m
r (m)	0.17	0.17	0.14	0.14
T (m2/s)	7.37E-01	7.37E-01	7.37E-01	7.37E-01
S (-)	5.00E-02	5.00E-02	5.00E-02	5.00E-02
Anis. Vert. (kh/kz)	15.0	15.0	15.0	15.0
B (m)	100.0	100.0	100.0	100.0
l (m)	20.0	20.0	60.0	60.0
d (m)	0.0	0.0	0.0	0.0
k' (m/s)	7.0E-07	7.0E-07	7.0E-07	7.0E-07
e' (m)	1.0	1.0	1.0	1.0
dist. Lim1 &2 (min)	50.0	50.0	50.0	50.0
dist. Lim3 &4 (min)	200.0	200.0	200.0	200.0
dist. Lim1 &2 (m)	420.6	420.6	420.6	420.6
dist. Lim3 &4 (m)	841.1	841.1	841.1	841.1
PDC (m-5s2)	50.0	50.0	50.0	50.0
Capacité (m)	0.2	0.3	0.2	0.2

r (m)	Rayon de l'ouvrage
T (m2/s)	Transmissivité
S (-)	Emmagasinement
Anis. Vert. (kh/kz)	Anisotropie de perméabilité verticale
B (m)	Epaisseur de l'aquifère
l (m)	Longueur du forage dans l'aquifère
d (m)	distance entre le toit de l'aquifère et le haut de la crépine
k' (m/s)	perméabilité du semi perméable
e' (m)	épaisseur du semi perméable
dist. Lim1 &2 (min)	Distance aux deux premières limites en minutes
dist. Lim3 &4 (min)	Distance aux deux autres limites en minutes
dist. Lim1 &2 (m)	Distance aux deux premières limites en mètres
dist. Lim3 &4 (m)	Distance aux deux autres limites en mètres
C (m-5s2)	Pertes de charge quadratiques
Capacité (m)	Effet capacitif de puits

Tableau 4 - Synthèse des paramètres hydrodynamiques déduits des modélisations des essais sur le forage de Bourbier-les-Hauts. Modèle Hantush.

6.5. CONCLUSION

La réinterprétation de ces anciens essais par pompage a permis d'amener des précisions sur les propriétés hydrogéologiques des coulées de lave dans la commune de Saint-Benoît ainsi que sur le potentiel d'exploitation des trois ouvrages analysés. En outre, elle montre un comportement relativement complexe des aquifères (double porosité, effets de limites et de drainance) à mettre en relation avec la structure géologique de l'empilement des coulées de lave.

Forage de Bourbier-les-Hauts

- aquifère très transmissif aux potentialités intéressantes ;
- ouvrage ne captant que partiellement l'aquifère ;
- ouvrage détérioré par la reprise de foration (occultation d'une des zones aquifères de la partie captante haute); un nettoyage de l'ouvrage et si possible de son massif de graviers est à prévoir;
- potentiel d'exploitation du forage et du site : très bon, plusieurs centaines de m³/h.

Forage de Chemin de Ceinture :

- aquifère peu transmissif de type double porosité, potentialités peu intéressantes ;
- aquifère limité en partie dans l'espace (géométrie de type chenal ouvert) ;
- ouvrage détérioré par la reprise de foration (occultation d'une des zones aquifères de la partie captante haute), un nettoyage de l'ouvrage et si possible de son massif de graviers est à prévoir. Toutefois, le risque de détérioration irréversible de l'ouvrage ne peut être écarté en raison de son état avancé d'usure ;
- potentiel d'exploitation du forage et du site : médiocre, quelques m³/h tout au plus.

Forage de Petit Saint Pierre-les-Hauts :

- aquifère très transmissif, potentialités très intéressantes ;
- aquifère limité dans l'espace (aquifère fermé) mais réalimenté par des aquifères sus- ou sous-jacents voire latéralement ;
- ouvrage a priori non ou peu détérioré par la reprise de foration, cependant étant donné la vétusté de l'ouvrage un nettoyage de l'ouvrage est à prévoir ;
- potentiel d'exploitation du forage et du site : très bon, plusieurs centaines de m³/h.

En vue de mettre en exploitation ces ouvrages, il est conseillé :

- de procéder à une phase de réhabilitation de l'ouvrage. Pour suivre les phases d'amélioration de l'ouvrage (nettoyage des crépines et/ou de la partie captante s.l.), il est conseillé avant toute phase de nettoyage, de procéder à un essai de pompage par paliers de débit afin de juger de l'état actuel du forage, pour quantifier le degré de colmatage actuel. En fonction des résultats, la ou les méthodes ad hoc pour nettoyer les ouvrages pourront être prodigués (brossage, injection d'acide, air-lift, etc.). Une fois cette phase effectuée, une deuxième phase de test hydraulique (essai par paliers de débit) devra être réalisée afin de quantifier l'amélioration de l'ouvrage, voire si nécessaire de procéder à une nouvelle phase de nettoyage et tests post nettoyage au cas où la première phase de nettoyage n'aurait pas atteint les objectifs requis. Une fois la ou les phases de nettoyage effectuées, une diagraphie micro-moulinet en production devrait être réalisée afin d'identifier avec certitude les venues d'eau. En effet, les diagraphies réalisées dans le cadre de cette étude n'ont pas été réalisées avec des débits suffisants pour localiser et quantifier précisément les venues d'eau (IdéesEAUX, 2015 – Annexe 6). Cette information permettra d'indiquer les zones à ne pas dénoyer lors de la mise en exploitation de l'ouvrage et donc d'optimiser la production de l'ouvrage ;

- de réaliser un essai par pompage de longue durée d'une semaine minimum (10 jours étant un plus) afin d'évaluer le débit d'exploitation des ouvrages; l'essai par paliers de débit seul ne pouvant prétendre à cette évaluation. En effet, le comportement en captage partiel, aquifères stratifiés et compartimentés des coulées de lave nécessite des temps de pompage assez longs afin de faire réagir l'ensemble du système. Ceci permettra en outre de disposer des informations nécessaires pour assurer des modélisations de scénarios d'exploitation les plus robustes possibles;
- et de procéder, durant les différentes phases de tests hydrauliques, à un suivi adéquat des niveaux d'eau dans le forage et du débit : acquisition automatique à un pas de temps minimum de 30 secondes pour les niveaux et 5 minutes pour les débits, avec contrôle manuel pour validation des suivis. En sus, un suivi physico-chimique durant ces essais est aussi à prévoir, celui-ci pouvant amener des informations sur les aquifères sollicités par le test.

7. Age, altitude de recharge et qualité des eaux des trois forages investigués

7.1. ALTITUDE DE RECHARGE

Les isotopes stables (δ^{18} O et δ^{2} H^{*}) de l'eau ont été analysés⁹ sur les trois forages afin de déterminer en particulier, les altitudes moyennes de recharge de la ressource exploitable.

Les résultats sont présentés sur les illustrations suivantes. Dans le diagramme $\delta^2 H$ vs $\delta^{18}O$, les eaux souterraines s'alignent suivant une droite parallèle à la droite des pluies mondiales définies par Craig (1961) : $\delta^2 H=8.\delta^{18}O+10$. La droite sur laquelle se répartissent ces points d'eau présente un léger excès en deutérium ($\approx 3 \%$).

Sur les illustration 46 et illustration 48, les gradients d'évolution altitudinaux des teneurs en ¹⁸O ont été calculés et reportés en utilisant les trois gradients altitudinaux déterminées à La Réunion (Grunberger, 1989 - Illustration 45).

Type de gradient	Equation
Gradient isotopique saison cyclonique 1985- 1986 – Ouest (humide W)	δ^{18} O = -0.0012Z - 4.9
Gradient isotopique saison cyclonique 1985- 1986 – Est (humide E)	δ^{18} O = -0.0009Z - 3.9
Gradient isotopique saison sèche 1986 (pas de différence significative entre côte Ouest et Est)	δ^{18} O = -0.0016Z - 1.9

Nom du forage	Prélèvement	δ18O ‰ vs SMOW (±0.1 ‰)	δD ‰ vs SMOW 2H (±0.8 ‰)	Gradient sec	Gradient Humide W	Gradient Humide E	Gradient retenu	Altitude moy. de recharge
Petit Saint- Pierre	PSP	-3.9	-18.1	1250	-833	0	Gradient sec	1250 m (± 63 m)
Petit Saint- Pierre (107 m)	PSP 107	-3.8	-16.4	1188	-917	-111	Gradient sec	1188 m (± 63 m)
Chemin Ceinture	CHC-REU	-3.8	-16.7	1188	-917	-111	Gradient sec	1188 m (± 63 m)
Bourbier les Hauts	BOU-REU	-3.9	-17.6	1250	-833	0	Gradient sec	1250 m (± 63 m)

Illustration 45 - Equations des différents gradients altidinaux (Grunberger, 1989)

Illustration 46 - Estimation des altitudes moyennes de recharge

Les différents gradients altitudinaux sont présentés afin de vérifier la cohérence des données et de caractériser, par déduction, la saisonnalité de la recharge.

Deux prélèvements ont été effectués sur le forage Petit Saint-Pierre : PSP107 provient de la venue d'eau la plus significative.

 $^{^{8} \}delta^{18}$ O vs SMOW (± 0.1 ‰) et δ^{2} H vs SMOW (± 0.8 ‰) - SMOW (standard mean ocean water)

⁹ Analyses réalisées par le laboratoire du BRGM à Orléans.

Le seul résultat pertinent est celui calculé en employant le gradient de la saison sèche de la de La Réunion (Illustration 46). Les autres gradients fournissent des résultats aberrants.

Ce résultat indiquant que le recharge et effective lors de la saison sèche pourrait paraitre singulier, mais il convient de rappeler que les évènements pluvieux intenses (cyclones, tempêtes tropicales) peuvent masquer le signal du fractionnement isotopique en fonction de l'altitude. Leur teneur en ¹⁸O est peu dépendante de l'altitude, leur signal est propre et très marqué (Illustration 47). Dans le cas d'un échantillonnage qui intègre les précipitations sur une longue durée, le volume important associé aux évènements intenses induit un effet de masse, qui se traduit par un gradient d'altitude négligeable par rapport au gradient de participation des pluies cycloniques à l'échantillonnage (Grunberger, 1989). Concrètement, les gradients altitudinaux déterminés par Grunberger sont discutables et les résultats déduits de ces gradients restent des ordres de grandeur plus ou moins quantitatifs. Différents projets sont actuellement en cours à La Réunion pour suivre la signature isotopique des plus et, entre autres, améliorer la caractérisation de ce gradient altitudinal¹⁰.



Illustration 47 - Chronique mensuelle des teneurs en 180 (en 0/00 vs SMOW) des pluies du cycle hydrologique 1986-1987

à la station de la Montagne et hauteurs des pluies mensuelles en mm. (Grunberger, 1989)

¹⁰ Station GNIP AIEA de Grand-Ilet

Observatoire du Maïdo – OPAR - Observatoire de Physique de l'Atmosphère de La Réunion



Illustration 48 - Evolution des rapports $\delta^2 H$ en fonction des rapports $\delta^{18} O$

Zone de recharge

Il convient de retenir que l'altitude moyenne de recharge est de l'ordre de 1 200 – 1 300 m NGR pour les trois forages analysés. Pour le contexte volcanique de La Réunion, il a été illustré que l'ensemble du bassin versant de surface en amont d'un forage donné contribue à alimenter la ressource exploitée (Aunay *et al.*, 2010). Concrètement, l'altitude moyenne de recharge de 1 200 – 1 300 m ne correspond pas à une fine bande de terrain en altitude. Cette dernière correspond plus vraisemblablement à une surface qui se développe entre quelques centaines de mètres d'altitude¹¹ et 2 300 - 2 500 m d'altitude.

Pour les forages Petit Saint-Pierre et Chemin Ceinture, le secteur de recharge pourrait se développer jusqu'aux contreforts de la Fournaise, au sud de la Plaine des Palmistes (Piton Textor, Piton de l'eau...). Pour le forage Bourbier, le plateau de Bélouve-Bébour peut être évoqué.

Il convient également de noter (i) que la distribution altimétrique de la quantité d'eau précipitée sur le bassin versant, ainsi que (ii) la perméabilité des sols constituent également des facteurs de contrôle des rapports isotopiques des stables de l'eau. En l'absence de connaissance quantitative sur ces facteurs, il conviendra de conserver une certaine prudence quant à l'utilisation de l'altitude de recharge des ouvrages concernés par la présente étude.

¹¹ La présence de phytosanitaires au sein des aquifères exploités justifie une zone de recharge qui descend jusqu'au terrain occupés par de la canne à sucre. Pour mémoire, cette dernière est cultivée jusqu'à l'altitude 450 m en amont des forages Petit Saint-Pierre et Chemin Ceinture et jusqu'à l'altitude 300 m en amont du forage Bourbier les Hauts.



Illustration 49 – Courbes de niveaux à 200 m (© IGN, 2003) et occupation du sol (© DAAF de La Réunion, 2014)



7.2. AGE APPARENT DES EAUX

7.2.1. Principe de la méthode de datation

La méthode utilisée pour la datation des eaux se base sur la mesure des gaz dissous contenus dans l'eau à l'état de traces : les composés halogénés CFC-11 (trichlorofluorométhane), CFC-12 trichlorodifluorométhane) et CFC-113 (trichlorotrifluorométhane) ainsi que le SF₆ (hexafluorure de soufre). Les gaz CFC ont été produits industriellement à partir des années 1930, avec une large utilisation dans les années 1950 à 1960 avant d'être interdits en 1987 (accords du protocole de Montréal) car les CFC sont des gaz destructeurs de la couche d'ozone. Les CFC étaient utilisés dans les fluides réfrigérants et les solvants tandis que le SF₆ est utilisé principalement pour ses capacités isolantes par l'industrie d'énergie électrique, dans les accélérateurs de particules et la production du double vitrage. La production industrielle du SF₆ a débuté en 1953. Le SF₆ est principalement d'origine anthropique mais, contrairement aux CFC, il existe également une production géogénique de ce gaz, estimé à 1% à l'échelle mondiale mais qui peut représenter, localement, un apport plus important.

L'analyse des gaz dissous (CFC et SF₆) dans les eaux souterraines permet donc de dater des eaux relativement jeunes. L'intérêt de l'utilisation de ces composés repose principalement sur leur origine et leurs propriétés physico-chimiques (IAEA, 2006) :

- Un temps de résidence atmosphérique élevé¹²
- Une homogénéité des concentrations atmosphériques
- Aucune production naturelle, sauf pour le SF₆ dans des cas particuliers
- Une bonne stabilité chimique dans le sol et dans l'eau sauf en milieu anaérobie

La datation des eaux par les CFC (Plummer et Friedman, 1999) et SF₆ (Busenberg & Plummer, 2000) a été rendu possible par la connaissance (1) de leurs concentrations atmosphériques depuis 1930 (Bauer et al., 2001) et (2) par leurs solubilités dans l'eau (Warner et Weiss, 1985 ; Bu et Warner, 1995 ; Bullister et al., 2002).

Les traceurs gazeux présents dans l'atmosphère passent la zone non saturée des hydrosystème selon un transport diffusif avant d'entrer dans l'eau souterraine sous forme de gaz dissous. La concentration d'un gaz dissous dans l'eau à l'équilibre avec l'atmosphère est régie par la loi de Henry qui définit la solubilité des gaz¹³. L'application de la loi de Henry nécessite des estimations de l'altitude de recharge et de la température de recharge pour calculer les âges apparents à partir des concentrations des gaz dissous (CFC et SF₆) mesurées dans les eaux.

¹² Les temps de vie dans l'atmosphère des CFC-11, CFC-12 et CFC-113 sont respectivement estimés à $45 \pm 7,87$ ans, 87 ± 17 ans et 100 ± 32 ans (Volk *et al.*, 1997)

¹³ Les concentrations d'un gaz dissous dans l'eau à l'équilibre avec l'atmosphère est régie par la loi de Henry qui définit la solubilité des gaz : $C_i=K_{Hi}p_i$. La pression partielle du gaz considéré (p_i) est fonction de la fraction molaire du gaz dans l'air (x_i), de la pression atmosphérique (P) et de la pression partielle de vapeur d'eau (Warner et Weiss, 1985) : $p_i=xi(P-p_{H2O})$. Les constantes d'Henry K_{Hi} sont fonction de la température et de la salinité des eaux. Les paramètres pour les calculs des K_H pour le CFC-11 et CFC-12 sont ceux de Warner et Weiss (1985) et Bullister *et al.* (2002) pour le K_H du SF₆.

De nombreuses études ont montré que les concentrations en gaz dissous (gaz nobles surtout) dans les eaux souterraines se situent presque toujours au-dessus de l'équilibre de solubilité attendue avec l'atmosphère. La composition du gaz en excès par rapport à l'équilibre de solubilité prouve son origine atmosphérique, d'où l'expression courante «excès d'air » (Heaton et Vogel, 1981).

La cause de l'excès d'air est liée à la présence de petites bulles d'air piégées dans la zone quasi-saturé (frange capillaire) située au-dessus de la nappe phréatique (Faybishenko, 1995). Des modèles complexes prenant en compte le fractionnement de la composition de l'air en excès par rapport à l'air ont été développés pour étudier la formation de l'excès d'air (Aeschbach-Hertig *et al.*, 2000). Ces modèles permettent de montrer que la pression hydrostatique a une influence prépondérante sur l'importance de l'excès d'air. Puisque la pression hydrostatique est liée aux fluctuations de la nappe phréatique, une relation entre l'excès d'air et la recharge ou l'intensité des précipitations peut être prévue (Aeschbach-Hertig et al., 2002; Beyerle *et al.*, 2003; Kulongoski *et al.* 2004). La procédure de correction de l'excès d'air est surtout importante pour le SF6. L'effet est quasiment négligeable dans le cas du CFC-11 du fait de la haute solubilité de ce gaz (Busenber et Plummer, 2000).

La datation des eaux se base sur la comparaison des concentrations en gaz de l'air recalculées à partir des gaz dissous dans les eaux souterraines et les chroniques de concentration des gaz dans l'atmosphère¹⁴ (Illustration 51). La méthode de datation des eaux par l'utilisation des CFC et du SF₆ est conditionnée par plusieurs hypothèses :

(1) la température et l'altitude de recharge sont connues (ou peuvent être estimées)¹⁵ ;

(2) la pression partielle des gaz dans la zone d'infiltration (zone non saturée) est identique à celle des couches de la troposphère et l'eau de recharge est en équilibre avec l'atmosphère de la zone d'infiltration¹⁶ ;

(3) les concentrations des gaz dissous dans l'eau ne sont pas altérées par des processus biologiques, géochimiques ou hydrologiques¹⁷;

¹⁴ Dans cette étude, les chroniques d'entrées pour les CFC et le SF₆ sont celles produites par John Bullister (NOAA/PMEL, John.L.Bullister@noaa.gov).

¹⁵ La température de recharge est un paramètre important pour le calcul des âges apparents. La température de recharge peut être estimée à partir des données climatologiques. Elle est souvent considérée comme égale à la température moyenne de l'air au niveau de la zone de recharge. On considère parfois la température moyenne des eaux de l'aquifère. La méthode de datation avec les CFC et SF₆ est relativement peu sensible à l'altitude de recharge. Toutefois, une augmentation de l'altitude moyenne de recharge peut entrainer une diminution de la température de l'eau de recharge. Pour les sites où la recharge peut se produire à des altitudes nettement supérieures à l'altitude de la nappe phréatique et, par conséquent, à des températures inférieures de recharge, une analyse de sensibilité est généralement effectuée.

¹⁶ L'épaisseur de la zone non saturée où se produit le transfert massique de l'eau vers l'aquifère peut fausser les estimations de l'âge de l'eau des aquifères (Busenberg *et al.*, 1993 ; Cook et Salomon, 1995). En effet, l'air contenu dans la zone non saturée échange en permanence avec l'eau porale ce qui peut retarder la mise à zéro du compteur de datation lorsque l'eau arrive dans l'aquifère. Pour une ZNS de 10 m, l'âge de l'eau souterraine peut être surestimé de 1 à 2 ans (Cook et Salomon, 1995). L'erreur d'estimation des âges en fonction de l'épaisseur de la ZNS dépend également du type et de la teneur en eau du sol et également des modalités de transfert (présence ou absence d'une double porosité).

¹⁷ Dans les climats arides où la zone d'infiltration (zone non saturée) peu s'assécher entre les épisodes de recharges, Russel et Thompson (1983) ont montré que les CFC pouvaient s'adsorber sur la matière organique des sols secs, l'adsorption du CFC-11 étant privilégiée par rapport au CFC-12 en raison de plus faibles teneurs en fluor. L'effet de sorption est minimal pour le CFC-113 et nul pour le SF₆. Au moment de la recharge, l'humidité du sol favorise le

(4) l'aquifère et/ou la zone d'infiltration ne sont pas contaminés par des sources anthropiques de gaz dissous (pollutions urbaines, agricoles, industrielles)¹⁸;

(5) la méthode de prélèvement ne doit pas permettre de contact entre l'échantillon d'eau et l'atmosphère¹⁹.



Illustration 51 - Chroniques des concentrations des CFC et SF6 dans l'air (NOAA/PMEL, John.L.Bullister@noaa.gov). PPtv = partie par trillion volumique (10-12).

relargage des CFC adsorbés dans l'air du sol ce qui conduit à enrichir les concentrations au-delà des concentrations d'équilibre air-eau. Puisque le CFC-11 est plus fortement adsorbé sur la matière organique des sols secs, les concentrations en CFC-11 de l'eau recharge sont plus fortes que les concentrations en CFC-12. Dans les zones arides, ce mécanisme de sorption-désorption sur la matière organique peut conduire à tort, a des âges apparents plus jeunes, notamment pour le CFC-11.

La dégradation microbienne affecte les concentrations en CFC en milieu anoxique (CFC-11 affecté d'un facteur 10 par rapport au CFC-12 et CFC-113 (Cook et Salomon, 1995; Oster *et al.*, 1996)). La séquence de dégradation des CFC est la suivante : CFC-11>CFC-113>CFC-12. Le SF₆ n'est pas affecté par ce phénomène.

¹⁸ La contamination locale de l'atmosphère par un ou plusieurs gaz en raison d'une source de pollution (production) du ou des gaz (proximité d'un milieu urbain, de sites de rejets des eaux usées ou de décharges officielles ou sauvages (vieux réfrigérateurs ou climatiseurs, récipient en plastique, propulseur aérosols, voiture...). Certains effluents d'eaux usées peuvent présenter des concentrations en CFC d'un ordre de grandeur supérieur aux concentrations attendues par l'équilibre air-eau.

¹⁹ Toutes les précautions sont prises pour éviter ces contaminations toutefois les conditions de terrain ne permettent pas toujours de se prémunir de ce risque

En l'absence de pollution locale, la comparaison des teneurs des différents gaz dissous par rapport aux teneurs connues dans l'atmosphère permet d'estimer un temps moyen de séjour de l'eau dans les aquifères. Cette notion de temps moyen de séjour dans l'aquifère est à pondérer par le contexte réunionnais caractérisé par la présence d'une zone non-saturée atteignant plusieurs centaines de mètres d'épaisseur. Actuellement, il n'est pas possible d'estimer la profondeur d'influence des gaz atmosphériques, ce qui correspond à l'impossibilité de déterminer la limite au-delà de laquelle le milieu peut être considéré comme fermé et indépendant de l'évolution des concentrations en CFC et SF₆. L'eau est donc vraisemblablement plus ancienne que les âges calculés dans le présent rapport.

La mesure des concentrations en gaz dissous ne donne qu'une information relative de l'âge d'une eau. L'âge « CFC » d'une eau souterraine est en fait l'âge moyen d'un mélange de nombreux écoulements élémentaires. La datation des eaux souterraines ne peut donc se limiter uniquement à déterminer un âge. C'est toute une répartition des âges qu'il faut déterminer. Pour permettre une datation des eaux souterraines, il est essentiel d'obtenir au préalable un modèle conceptuel des circulations souterraines qui permettra notamment la détermination des principaux modes de circulation des eaux (type piston, exponentiel, modèle de mélange).

Les estimations des âges de l'eau reposent donc sur l'utilisation de modèle de transfert (Illustration 52) :

- Le modèle piston (P) suppose le déplacement du fluide sans modification de la teneur (modèle convectif). C'est le modèle le plus simple qui permet d'attribuer un âge apparent sans définir de distribution des temps de séjour. Seules des dates de recharge postérieures aux années 50 pourront être proposées par l'utilisation des gaz dissous ;
- Le modèle exponentiel (EM) attribue une forme exponentielle décroissante à la distribution des temps de séjour de l'eau. Ce modèle ne nécessite qu'un paramètre : le temps moyen de séjour. Ce modèle correspond à la distribution des temps de séjour obtenue par un bilan de masse pour un réacteur discontinu à mélange parfait. Dans le cas d'un aquifère, ce modèle s'interprète comme la résultante sur une verticale de multiples lignes d'écoulements ayant une distribution exponentielle des âges. A l'échelle de l'aquifère, il peut donc s'interpréter comme le résultat d'une dispersion d'origine hydrodynamique.

Un troisième type de modèle est également classiquement utilisé pour décrire les résultats. Il s'agit du modèle de mélange binaire : l'eau étudiée est constituée d'un mélange de deux eaux d'âges différents. Un des pôles du mélange peut être ancien (anté ou post-traceur), l'autre pôle de mélange étant actuel (d'âge postérieur aux traceurs).

Compte tenu de l'importante variabilité géologique et hydrodynamique des aquifères, les trois modèles décrits ci-dessus peuvent être envisagés pour décrire un même système. Le choix du modèle pour chaque point de mesure se fait en plusieurs étapes. La première est la vérification de l'adéquation des quatre traceurs avec l'un des modèles (dans le cas où aucune dégradation ou contamination n'est observée).



Modèle conceptuel de transfert utilisé pour interpréter les résultats

Illustration 52 - Modèles de transfert couramment utilisés pour interpréter les resultats CFC (d'après Maloszewski et Zuber, 1982)

7.2.2. Echantillonnage et mesure

Les prélèvements pour mesure de CFC dissous dans l'eau suivent le protocole développé par Oster *et al.* (1996). Pour cette étude les prélèvements ont été réalisés par le BRGM lors des campagnes de prélèvement effectuées du 25/06/2015 au 29/06/2015. Les prélèvements ont été effectués par pompage.



Illustration 53 - Système de prélèvement utilisé pour les CFC et SF₆



Source : IAEA, 2006

Illustration 54 - Schéma du système de prélèvement de l'eau pour analyses de CFC et SF₆ a) récipient en métal, b) tuyau de prélèvement, c) flacon de verre, d) bouchon de verre, e) clip métallique pour bloquer le bouchon, f) récipient métallique, g) couvercle du récipient métallique, h) bloqueur couvercle métallique

Le prélèvement se fait dans un flacon en verre de 500 ml lui-même placé dans un récipient métallique (Illustration 53) qui sera également rempli d'eau prélevée en évitant les mélanges avec l'air ambiant. La fermeture de la bouteille en verre et du récipient métallique se fait impérativement sous l'eau (Illustration 54).

Les analyses des gaz dissous (CFC) ne font pas l'objet de normes ISO, inexistantes pour ces éléments mais suivent un contrôle continu (utilisation de standards internes et participation à des exercices de calibration inter-laboratoires) qui permettent de garantir l'obtention de faibles incertitudes.

Les CFC sont mesurés à l'aide de la chromatographie en phase gazeuse équipée d'un capteur à détecteur d'électron. L'incertitude analytique est de \pm 5%.

Les analyses des CFC et SF₆ par chromatographie gazeuse ont été réalisées par le laboratoire Spurenstofflabor (Allemagne).

7.2.3. Estimation de l'age apparent des eaux

a) Paramètres du calcul

Au préalable à l'interprétation, il est nécessaire de convertir les données brutes (exprimées en pmol/l - Illustration 55) en pptv (partie par trillion volumique) dans le but d'estimer la concentration en gaz dans l'air au moment de la recharge de l'aquifère. Le calcul est réalisé à l'aide des coefficients de solubilités donnés par le guide de l'IAEA (2006). Pour conduire ce calcul, il faut également connaître les paramètres susceptibles d'influencer la diffusion des gaz dans l'eau au moment de la recharge : altitude et température moyenne de la recharge.

sample	date	(SF_6 conc.		
		m CFC-12	CFC-11	CFC-113	in fmol/l
CHC	25.06.2015	$4,1 \pm 0,3$	$3,0 \pm 0,4$	$0,26\ \pm 0,05$	$2,0\ \pm 0,3$
BOU	29.06.2015	$2,3\ \pm 0,2$	$4,3 \pm 0,5$	$0,34\ \pm 0,05$	$2,0\ \pm 0,2$
PSP107	26.06.2015	$1,7 \pm 0,1$	$3,1 \pm 0,4$	$0,26\ \pm 0,05$	$1,8 \pm 0,2$

Illustration 55 - Tableau des résultats des gaz dissous contenu dans l'eau à l'état de trace CFC-11 (trichlorofluorométhane), CFC-12 trichlorodifluorométhane), CFC-113 (trichlorotrifluorométhane) et SF₆ (hexafluorure de soufre)

(Analyses réalisées par Dr H. Oster, Spurenstofflabor, Allemagne).

En pratique, pour interpréter les résultats, les données de chacun des traceurs sont comparées deux par deux (CFC-12 vs CFC-11, par exemple) sur des graphes représentant les courbes d'évolutions théoriques calculées par modèle de transfert « piston », le modèle exponentiel et le modèle de mélange entre les eaux d'infiltrations actuelles et les eaux anciennes (infiltrées avant 1950). La confrontation des résultats obtenus par les différents gaz permet en outre d'apprécier le phénomène de contamination et/ou dégradation des CFC's. Ce type de représentation permet également de tester l'effet de l'existence d'un excès d'air notamment pour le SF₆ qui est sensible à l'excès d'air en raison de sa faible solubilité.

Comme indiqué précédemment, pour dater les eaux, il faut poser quelques hypothèses de travail. La première concerne la température moyenne de recharge qui peut varier d'un ou deux degré Celsius par rapport à la température moyenne annuelle de l'air dans la zone de recharge de l'aquifère. On suppose donc ici que la recharge se produit sur de courtes périodes (ie : quelques mois) ou lors d'épisode ponctuelle de recharge. La sensibilité du paramètre « température » à \pm 2°C conduit à des modifications de l'âge apparent de l'ordre de 2-3 ans. Par ailleurs, du fait de l'absence de quantification de l'excès d'air à l'aide du rapport Ne/Ar, des tests de sensibilité ont été effectués en considérant des valeurs d'excès d'air compris entre 0 et 10 cm³/L (valeurs possibles d'après les informations de la littérature). Dans cette étude, ce paramètre a été ajusté à 6 cm³/L (Illustration 56) afin d'obtenir la meilleure adéquation possible des âges apparents estimés avec chacun des traceurs.

Les paramètres utilisés pour le calcul de l'âge apparent des eaux sont rassemblés dans le tableau de l'illustration 56. Les représentations graphiques des résultats des eaux prélevées en juin 2015 sont présentées sur les illustration 57 à illustration 59.

Les informations apportées par les isotopes stables de la molécule d'eau (voir 7.1 - Altitude de recharge – p. 81) indiquent que l'altitude moyenne de recharge est de l'ordre de 1 300 m NGR²⁰. Ce paramètre a donc été fixé pour le calcul des âges de l'eau. Les normales de température sur la période 1981-2010 d'après le site de Météo-France sont comprises entre 12.7 °C (min) et 20.8°C (max) sur la zone de recharge. Des résultats homogènes pour les différents gaz dissous sont obtenus pour des températures de recharge comprise entre 12 et 14°C (Illustration 56).

ld	nom	date	alt de recharge (m)	T°C recharge	Excess Air cm3/L	SF6 pptv	CFC-12 pptv	CFC-11 pptv	CFC-113 pptv
СНС	Forage Chemin Ceinture	25/06/15	1300	14	6	3.6	1005.0	205.1	56.4
BOU	Forage Bourbier les Hauts	29/06/15	1300	12	6	3.5	516.0	265.0	66.0
PSP107	Forage Petit St-Pierre	26/06/15	1300	14	6	3.3	420.3	213.9	56.9

Illustration 56 - Paramètres utilisés pour le calcul des ages de l'eau prélévée en 2015

²⁰ Pour mémoire, une variation de l'ordre de 150 m d'altitude n'impacte pas les résultats des calculs d'âge apparent dans la mesure où l'erreur analytique des concentrations en CFC's et SF6 est largement supérieure à la sensibilité de ce paramètre.

b) Résultats

L'illustration 57 permet de montrer que les concentrations en gaz dissous des eaux des forages Chemin Ceinture (CHC) et Petit St-Pierre (PSP107) expliquées par le **modèle exponentiel**, le **temps de résidence moyen de l'eau** (TRM) déterminé à partir des traceurs SF6 et CFC11 est estimé à 20 ans (± 5 ans).

Les concentrations en gaz dissous des eaux du forage Bourbier-les-Hauts (BOU) apparaissent expliquées par le modèle piston. Les eaux se seraient infiltrées **en 1996 (± 2 ans).**

L'illustration 58 permet de montrer que les eaux du forage Chemin Ceinture (CHC) sont enrichies en CFC 12 par rapport aux valeurs atmosphériques ce qui dénote l'existence d'une pollution, probablement dans le voisinage de d'ouvrage. Pour les forages Petit St-Pierre (PSP) et Bourbier-les-Hauts, on confirme les résultats précédents : PSP107 apparait expliqué par le **modèle exponentiel**, le TRM est estimé à **20 ans (± 5 ans)**; BOU apparait expliqué par le modèle piston, les eaux se seraient infiltrées **en 1996 (± 2 ans)**.

L'illustration 59 permet de montrer que les eaux du forage BOU et dans une moindre mesure CHC sont affectées par une dégradation du CFC113. Pour le forage Petit St-Pierre (PSP, on confirme les résultats précédents : les signatures en gaz dissous sont expliqué par le **modèle** exponentiel, le TRM est estimé à 20 ans (± 5 ans).

Bien que certains paramètres démontrent une dégradation ou une pollutions des teneurs en CFC's ou SF6, les résultats sont majoritairement cohérents entre eux et peuvent être considérés comme fiables.

	Code	TRM / infiltration
Forage Petit Saint-Pierre	PSP107	Exponentiel 20 ans (± 5 ans)
Forage Chemin Ceinture	CHC	Exponentiel 20 ans (± 5 ans)
Forage Bourbier les Hauts	BOU	Piston 1996 (± 2 ans)

Tableau 5 – Ages apparents des eaux



1990.5

500

CFC12 (pptv)

1000

1500

1980.5



Illustration 58 - SF₆ vs CFC-12 : comparaison des concentrations mesurées dans l'eau en juin 2015 (exprimées en pptv) aux évolutions théoriques calculées pour les modèles de transfert (modèles piston et exponentiel) et le modèle de mélange binaire

2

1 ____

0 0 -

0

• 1970.5 1996.9.5



Illustration 59 - SF₆ vs CFC-113 : comparaison des concentrations mesurées dans l'eau en juin2015 (exprimées en pptv) aux évolutions théoriques calculées pour les modèles de transfert (modèles piston et exponentiel) et le modèle de mélange binaire

7.3. QUALITE DES EAUX

Une série de prélèvements d'eau effectuée par l'ARS Réunion en vue de l'analyse de type PPESO a été effectuée dans le cadre du présent projet. Les analyses ont été effectuées dans les deux laboratoires suivants :

- Le Laboratoire Départemental d'Analyse (LDA) de la Drôme à Valence pour les micropolluants et les éléments traces ;
- Le Laboratoire Départemental des Eaux et d'Hygiène du Milieu (LDEHM) à Saint-Denis de La Réunion pour les paramètres suivantes : équilibre calco-carbonique (TAC), pH, turbidité, conductivité électrique à 25°C, éléments majeurs.

Les caractéristiques détaillées des prélèvements sont en annexe 3. L'intégralité des résultats d'analyse sont en annexe 5 du présent rapport (cd-rom). Seuls les résultats nécessitant une attention particulière sont présentés ci-après (Tableau 6).

Point	Code	Date	Prélèvement	Résultats LDA
Forage Petit Saint- Pierre	PSP	24/06/2015 - 13h	Pompe dans le tubage au-dessus des crépines - 65 m de profondeur	Métolachore - 0.13 μg/l Métribuzine - 0.07 μg/l
Forage Petit Saint- Pierre	PSP prel	 24/06/2015 - 15h	Tube préleveur à 115 m de profondeur	Métolachore 0.16 μg/l Métribuzine 0.15 μg/l
Forage Petit Saint- Pierre	PSP107	26/06/2015 - 11h	Pompe à 107 m de profondeur	Métolachore 0.07 μg/l Métribuzine 0.03 μg/l
Forage Chemin Ceinture	CHC	25/06/2015 - 13h	Pompe à 85 m de profondeur	DEA - 0.02 μg/l
Forage Bourbier les Hauts	BOU	29/06/2015 - 13h	Pompe à 57 m de profondeur	Toluène - 0.3 μg/l Atrazine - 0.02 μg/l DEA - 0.06 μg/l

Tableau 6 – Analyses caractérisées par une détection de micropolluants

Les lignes grisées correspondent à des analyses non représentatives de l'aquifère exploité sur le forage Petit Saint-Pierre (voir § suivant)

7.3.1. Cas du forage Petit Saint-Pierre

a) Représentativité des prélèvements

Trois prélèvements d'eau ont été effectués sur ce forage (voir annexe 3), à différentes profondeur et en utilisant différentes méthodes (Tableau 6).

En raison des arguments développés ci-après, il est considéré que **seul le prélèvement PSP107 du 26/06/2015 est représentatif des eaux** qui serait exploitées dans le cas d'une mise en production.

En effet, ce prélèvement PSP107 a visé spécifiquement les principales venues d'eau du forage, sur la base de l'interprétation des diagraphie de production (IdéesEAUX, 2015 - Illustration 60). Pour mémoire, le débit de pompage de 2.25 m³/h est insuffisant pour créer de réelles arrivées d'eau. Il peut donc être considéré que les deux autres prélèvements du 24/06/2015 sont le résultat d'un mélange d'eau plus ou moins représentatif de l'aquifère (eaux stagnantes au sein de la colonne de forage hors crépine notamment).

Le prélèvement à 107 m de profondeur (PSP107) repose sur les mesures quantitatives de production suivantes (Illustration 60) :

- la zone identifiée entre -112.5 et -111 m produit 5.6 m³/h ;
- la zone identifiée entre -102.5 et -98.5 m produit 43.6 m³/h ;
- la zone identifiée entre -91 et -90.4 m produit 32.7 m³/h.

Les venues d'eau sont exclusivement localisées dans la partie supérieure de l'ouvrage (90-110 m de profondeur) et le flux total descendant ($\approx 82 \text{ m}^3/\text{h}$) est particulièrement élevé, voire exceptionnel pour une circulation qui peut être considérée comme naturelle dans un ouvrage.

Au-delà des critères hydrodynamiques, la CE25²¹ l'eau prélevée à 107 m de profondeur (100 μ S/cm) est proche de la CE25 mesurée lors de la réalisation du pompage d'essai en 2003 à 350 m³/h. A l'inverse, les CE25 des deux autres prélèvements (PSP et PSP prel) sont plus élevées : respectivement 117.7 et 120.4 μ S/cm. Il peut donc être supposé que l'eau prélevée à 107 m de profondeur, au droit des principales venues d'eau, présente une physico-chimie plus proche de l'aquifère qui serait sollicité dans le cas d'une mise en exploitation à un débit de plusieurs centaines de m³/h.

²¹ Conductivité électrique de l'eau normalisée à 25°C



Illustration 60 - Résultats de la diagraphie GFTC en dynamique (Q=2.25 m³/h) Gamma naturel/flux/température/conductivité - IdéesEAUX, 2015

b) Résultats des analyses – ATZ et DEA

L'absence d'atrazine (ATZ) et de déséthylatrazine (DEA) constitue un premier résultat remarquable. Pour mémoire, ATZ (0.05 μ g/l) et DEA (0.12 μ g/l) avait été détecté en 2003 suite de la réalisation de l'ouvrage (Daessle, 2003).

L'atrazine a été interdit à la vente en 2003, ce qui signifie qu'une part des **eaux de l'aquifère sont rapidement renouvelées** (\approx 10 ans). Cette hypothèse²² est à mettre en relation avec les approches d'altitude de recharge²³ (voir §. 7.1 – p. 81) et d'âge apparent de l'eau²⁴ (voir §. 7.2 – p. 85).

En effet, l'ensemble du bassin versant en amont du forage Petit Saint-Pierre contribue à alimenter l'aquifère exploité²⁵, et cela jusqu'à plus de 2 000 m d'altitude. Les eaux infiltrées dans les Hauts empruntent un long cheminement par rapport aux eaux infiltrées dans la tranche d'altitude 100-400 m, correspondant à la zone de pression agricole.

c) Résultats des analyses – métolachore et métribuzine

En parallèle à la non détection de l'atrazine et de son métabolite le DEA, les molécules de substitution sont désormais détectées : métolachore (0.07 µg/l) et métribuzine (0.03 µg/l).

Pour mémoire, sur la période 2009-2011 (Martin *et al.*, 2013), 80 % des ventes de produits phytosanitaires à La Réunion sont constitués par les trois molécules suivantes : glyphosate (34%), 2,4 D (32%) et métolachlore (14%). Viennent ensuite métribuzine (5%) et asulame (4%).

Seules les molécules de métolachlore et métribuzine sont identifiées sur les eaux du forage Petit Saint-Pierre. Au-delà des pratiques agricoles²⁶ et des quantités appliquées en amont du forage, l'absence de glyphosate et de 2,4 D s'explique également par les propriétés intrinsèques des molécules : l'indice GUS est faible pour le glyphosate ou le 2,4 D (Petit *et al.*, 2013 - Illustration 61). Concrètement, métolachlore et métribuzine sont plus susceptibles de migrer vers les eaux souterraines par lessivage et sous forme dissoute.

En outre, l'indice GUS de l'atrazine est également supérieur à 2.8 (Geisler *et al.*, 2004) : la susceptibilité de migration dans les eaux souterraines est relativement similaire entre métolachore, métribuzine et atrazine. En d'autre terme, les problèmes de pollution à l'atrazine et DEA dans les eaux souterraines risquent fortement d'évoluer vers des pollutions aux métolachore et métribuzine. La détection de plus en plus fréquente de ces molécules est d'ailleurs soulignée par les analyses effectuées l'ARS Réunion et l'Office de l'eau Réunion.

²² Il s'agit ici d'une hypothèse dans la mesure où un prélèvement unique ne peut constituer une argumentation péremptoire. Toutefois, les critères hydrodynamiques et physico-chimiques tendent à attribuer un indice de confiance élevé à cette hypothèse.

²³ 1200-1300 m NGR

²⁴ Les concentrations en gaz dissous sont expliquées par le modèle exponentiel et le temps de résidence moyen de l'eau (TRM) est estimé à 20 ans (± 5 ans).

²⁵ Le modèle exponentiel (EM) attribue une forme exponentielle décroissante à la distribution des temps de séjour de l'eau. Dans le cas d'un aquifère, ce modèle s'interprète comme la résultante sur une verticale de multiples lignes d'écoulements ayant une distribution exponentielle des âges. A l'échelle de l'aquifère, il peut donc s'interpréter comme le résultat d'une dispersion d'origine hydrodynamique.

²⁶ En terme de pratique agricole, il est admis que le métolachlore remplace l'atrazine.



Illustration 61 – Estimation de l'indice GUS (adapté) pour différents couples sol/molécule (Petit et al., 2013)

GUS - Groundwater Ubiquity Score (Gustafson, 1989)

L'indice repose sur l'hypothèse que plus un produit est facilement adsorbé par les particules de sol et moins il est persistant, moins le risque est grand de le voir être entraîné en profondeur. Des valeurs seuils (1,8 et 2,8) permettent de définir trois classes de risque : si GUS > 2,8 les substances actives sont considérées comme lessivables et susceptibles d'atteindre les eaux souterraines (pesticides généralement retrouvés dans les eaux souterraines) ; si GUS < 1,8 les substances actives sont considérées comme non lessivables (pesticides généralement absents dans les eaux souterraines) ; dans l'intervalle [1,8-2,8] il est difficile de conclure sur la capacité de la substance active à être lessivée. Pour divers critères développés par Petit et al. (2013), ces résultats sont à considérer avec prudence et plutôt à titre indicatif

7.3.2. Cas du forage Bourbier les Hauts

Atrazine (0.02 μ g/l) et DEA (0.06 μ g/l) ont été détectés sur le forage Bourbier les Hauts lors de l'analyse réalisée dans le cadre du présent projet. Pour mémoire, du DEA (0.15 μ g/l) avait également été détecté en 1998 suite de la réalisation de l'ouvrage (Billard, 1998). L'atrazine n'avait probablement pas été détecté en 1998 car le seuil de quantification était de 0.05 μ g/l d'après les bordereaux d'analyse disponibles.

En ce qui concerne l'évolution la présence de DEA et d'atrazine, les concentrations en gaz dissous des eaux du forage Bourbier-les-Hauts (BOU) apparaissent expliquées par le modèle piston²⁷ (voir § 7.2.3 – p. 91). Les eaux se seraient infiltrées en 1996 (\pm 2 ans). Cela signifie qu'atrazine et DEA devrait être présents dans les eaux du forage pour une durée minimum de 5 à 9 ans²⁸ à des concentrations similaires. Par la suite, les teneurs devraient diminuer en fonction des concentrations résiduelles en ATZ et DEA dans les sols en amont du forage.

Du toluène²⁹ a également été détecté (0.3 µg/l) dans les eaux prélevées. En raison du caractère agricole des terrains en amont de l'ouvrage et de la concentration élevée, il est envisageable que la présence de cette molécule puisse être attribuée à une pollution très localisée à proximité de l'ouvrage. Pour mémoire, un entrepôt est situé 70 m en amont de l'ouvrage. Différentes machines et outils agricoles sont entreposées sur ce site et il est envisageable que du toluène y soit employé pour l'entretien des machines.

7.3.3. Cas du forage Chemin Ceinture

Du DEA (0.02 µg/l) a été détecté sur le forage Chemin Ceinture lors de l'analyse réalisée dans le cadre du présent projet. Aucune analyse historique n'est disponible sur la famille des phytosanitaire sur cet ouvrage.

Ce forage présente une qualité de l'eau intéressante, notamment du fait de sa localisation en altitude (≈ 240 m NGR) par rapport aux autres ouvrages exploités par la commune de Saint-Benoit. En conséquence, la superficie occupée par la canne en amont du forage est proportionnellement plus faible que sur les forages localisés dans les bas de la commune.

²⁷ Le modèle piston suppose le déplacement du fluide sans modification de la teneur (modèle convectif). C'est le modèle le plus simple qui permet d'attribuer un âge apparent sans définir de distribution des temps de séjour.

²⁸ Date d'interdiction de l'atrazine (2003) – date d'infiltration des eaux (1996 \pm 2 ans)).

²⁹ Le toluène, également appelé méthylbenzène ou phénylméthane est un hydrocarbure aromatique. Il est couramment utilisé en tant que réactif ou solvant, notamment dans le milieu industriel. Il dissout un grand nombre d'huiles, graisses, ou résines (naturelles ou de synthèse). Dans les conditions normales, c'est un liquide transparent à l'odeur caractéristique, rappelant celle du dissolvant pour peinture ou celle du benzène apparenté (Wikipédia).

8. Actualisation des potentialités hydrogéologiques de la commune de Saint-Benoit

L'objectif de ce chapitre est de présenter une actualisation des potentialités d'exploitation des ressources en eau souterraine. Certains éléments proviennent de résultats de la présente étude, d'autres éléments sont proposés sur la base de connaissances hydrogéologiques régionales. Par ailleurs, la mobilisation ou l'optimisation de nouvelles ressources souterraines a également été traité dans le SDAEP (ARTELIA, 2016). Ces éléments sont également repris ciaprès (Tableau 7).

La notion d'**adaptation des pratiques agricoles** en vue de préserver la ressource doit également être intégrée à une stratégie globale de la gestion de la ressource en eau. En effet, des ressources en eau en quantité importante sont présentes sur le territoire de la commune de Saint-Benoit. Ces dernières sont toutefois impactées par la présence de phytosanitaires en relation avec les activités agricoles. Le contexte hydrogéologique des planèzes de Saint-Benoit est très favorable à une amélioration rapide (≈ 5 ans) de la qualité des eaux suite à une adaptation des pratiques agricoles, notamment pour les raisons suivantes (voir § 7 - p. 81) :

- Renouvellement rapide des eaux souterraines exploitées par les forages (eg : pas de détection de DEA et d'atrazine en juin 2015 sur Petit Saint-Pierre) ;
- Un mélange entre des eaux infiltrées sur les secteurs agricoles et les eaux issues de zones dépourvues de pression constitue les eaux exploitées par forage. Les proportions de ce mélange sont fonctions de la distribution spatiale et temporelle des précipitations et de la perméabilité des sols. Toutefois, au vu de la part relativement faible du bassin versant occupé par l'agriculture (≈ 20-30 % dans le cas du forage Petit Saint-Pierre) par rapport aux secteurs dépourvus de pression, il peut être supposé une contribution significative d'eaux non impactées au droit du forage, qui produisent un effet « dilution » de la pollution.

Cette adaptation des pratiques agricoles constitue un objectif à mettre en œuvre dès que possible pour des résultats efficaces et durables à un horizon de quelques années. Concrètement, il s'agirait de stopper ou de réduire très significativement l'utilisation de produits phytosanitaires en amont des forages afin d'engendrer une baisse des teneurs en produits phytosanitaires dans les eaux souterraines. La SAU concernée à l'échelle communale serait de l'ordre de 5 à 10 % (2 à 5 km² pour une SAU de 46.4 km²). A ce titre, la mise en place d'activités agricoles biologiques pourrait permettre de réduire significativement les intrants dans les eaux souterraines³⁰.

D'après les données de la DAAF³¹, pour la commune de Saint-Benoit, la SAU est estimée à 4 640 ha (3 620 ha pour la canne, 761 ha pour la diversification et 259 ha pour l'élevage).

³⁰ Voir notamment le n°103 de la revue Agreste de la DAAF Réunion ou le cas de la ville de Munich (Annexe 4)

³¹ Base de l'Occupation du Sol de 2014 – Version de Mai 2015

Le cas de la production biologique réunionnaise (d'après DAAF, 2017)

De plus en plus de producteurs s'engagent dans une démarche de pratiques agricoles biologiques (AB). Le nombre d'ha certifiés ne cesse de croître, passant d'une centaine d'hectares engagés en AB en 2007 à plus de 700 en 2015. Ceci tend à démontrer que le mode de production en agriculture biologique est transférable sous des climats tropicaux malgré la forte pression parasitaire, la rareté et la cherté des moyens de production, et le déficit en références technico économiques. Alors que la surface en agriculture biologique augmente en moyenne de 17 % par an en France, le taux de progression est de 25 % pour La Réunion.

La majorité des systèmes d'exploitation sont à dominante cultures fruitières et/ou maraîchères.



	Nb d'expl.	Produit brut standard (€)	% sur le total AB
Cultures fruitières	41	2 840 160	29
Maraîchage et horticulture	31	2 259 968	22
Combinaison de maraîchage et de cultures fruitières	31	1 731 755	22
Culture de vanille	17	708 492	12
Cultures pour transformation (Canne à sucre)	9	256 148	6
Élevage hors apiculture	4	183 162	3
Élevage apicole	3	215 600	2
Polyculture-élevage	3	257 869	2
Total	139	8 453 154	

Illustration 63 – Orientations technico-économiques des exploitaitons agricoles biologiques Lecture : 41 exploitations (29% de l'ensemble des exploitations BIO), ont pour culture dominante les cultures fruitières.

Perspectives	Informations complémentaires	Indice de confiance sur la quantité de la ressource	Indice de confiance sur la qualité de la ressource	Etudes préalables	Difficultés techniques / niveau de risque
Prospection hydrogéologique et géophysique dans le secteur de Bethléem-Abondance et réalisation de forages de reconnaissance (ARTELIA, 2016)	 Deux cibles sont identifiées par ARTELIA (2016) : Nappe d'accompagnement de la rivière des Marsouins en amont d'Ilet Coco afin de se préserver des contaminations agricoles. Les sites potentiels se situent sur les basses terrasses de la rivière, au droit de sillons alluvionnaires, dans les secteurs le moins exposés aux crues ; Circulations profondes au droit de secteur Olympe/Abondance, soit dans les alluvions anciennes du paléo-cirque de Bébour / Bélouve, soit dans des coulées de lave. 	Bon à excellent en contexte volcanique Bon en milieu alluvionaire	L'emplacement des ouvrages devra viser un optimum entre surface agricole en amont de l'ouvrage et profondeur de l'ouvrage	Prospection hydrogéologique (géophysique ERT, AEM, géologie)	Peu élevés sous réserve d'études hydrogéologiques robustes.
Prospection hydrogéologique et géophysique dans le secteur de la Rivière de l'Est et réalisation de forages de reconnaissance (ARTELIA, 2016)	Cible : nappe d'accompagnement de la rivière de l'Est. Un puits profonds de 18 m avait été réalisé en 1973 sur une terrasse alluviale en amont immédiat du pont. (12278X0004/F).	≈ 200 m ³ /h (alimentation du puits par la rivière)	Problème de turbidité évoqué historiquement	Prospection hydrogéologique (géophysique ERT, géologie)	Peu élevés sous réserve d'une étude hydrogéologique
Prospection hydrogéologique et géophysique dans les secteurs Piton Armand / Cambourg / les Chicots / Les Orangers et réalisation de forage de reconnaissance	Cible : planèze de Saint-Benoit, alimentée par les précipitations de la Fournaise. Il s'agit de ressources conventionnelles (nappe de base) mais il n'existe pas de forage dans le secteur permettant de garantir la présence d'une ressource.	Probablement bon	Compromis entre qualité des eaux / altitude (coût) du forage (≈200 m NGR) ?	Prospection hydrogéologique (géophysique ERT, AEM, géologie)	Prise de risque moyenne
Mise en exploitation du forage du Bourbier les Hauts (ARTELIA, 2016) - <u>en cours de réalisation</u> <u>par la commune</u>	La ré-interprétation des pompages d'essai a permis de mettre en évidence que l'ouvrage a été détérioré par la reprise de foration (occultation d'une des zones	Très bon Plusieurs	Problème de	Nettoyage de l'ouvrage et si possible de son massif de graviers.	Mise en place d'un périmètre de
Réalisation d'un second forage dans le secteur Bourbier les Hauts afin de bénéficier des potentialités réelles de l'aquifère	aquileres de la partie captante naute entre 76 et 107 m de profondeur).	centaines de m ³ /h	phytosanitaires	Pompage d'essai longue durée (7 à 10 jours)	protection adapté
Mise en exploitation du forage du forage Petit Saint-Pierre	Ouvrage a priori non ou peu détérioré par la reprise de foration, cependant étant donné la vétusté de l'ouvrage un nettoyage de l'ouvrage est à prévoir	Très bon Plusieurs centaines de m ³ /h	Problème de phytosanitaires, qui pourraient se résoudre à court terme (≈ 5 ans)	Pompages d'essai longue durée (7 à 10 jours) + analyses phytosanitaires + étude périmètre de protection	Mise en place d'un périmètre de protection adapté (≈1 km de large – ≈2.5 km en amont)
Structure géophysique résistante en aval de la Plaine des Palmistes (secteur entre Piton Armand et Chemin de Ceinture – ≈350 m NGR) (voir § 4.5 p. 51)	Structure résistante relativement continue, dans le prolongement de la Plaine des Palmites et du Piton de la Fournaise clairement imagée entre 400 et 800 m d'altitude (surface \approx dizaine de km ²). Toit de la structure \approx de 50 à 100 m de prof. Mur \approx de 200 à 300 m de prof.	Probablement bon (pluviométrie élevée sur les Hauts de l'Est)	Probablement bon (pressions agricoles réduites)	Forages de reconnaissance à entre 75 m et 150 m de profondeur. Analyse de l'occupation des sols afin d'éviter les secteurs de diversification agricole.	Niveau de risque élevé (ressource non conventionnelle) Présence de diversification.
Exploitation de la ressource de la Plaine des Palmistes (Forage « Bras Piton bis ») dans le cadre d'une Intercommunalité.	D'intéressantes potentialités ont été mises en évidence sur la Paine des Palmistes, notamment au droit du forage Bras Piton (Aunay <i>et al,</i> 2012). La réalisation d'un ou plusieurs nouveaux forages permettrait de les exploiter et de partager cette ressource avec la commune de Saint-Benoit.	Très bon Plusieurs centaines de m ³ /h	Bon	Eventuellement Géophysique ERT locale	Peu élevés sous réserve d'une étude hydrogéologique
Sources ponctuelles (voir § 3.2.4 – p. 27)	Différentes sources ont été observées sur la commune de Saint-Benoit. Certaines sources du secteur de Taka-Maka (Bigarade - 12276X0139 - 12276X0067) pourraient présenter un intérêt pour desservir des populations en amont des captages.	De 0.5 à 2 l/s (< 10 m³/h)	Moyen (turbidité, bactéries ?)	Suivi bactério. et turbidité mensuel. Modalités de captage à étudier (longueur des canalisations)	Exposition des canalisations aux mouvements de terrain.
9. Conclusions et perspectives

Dans le cadre d'une démarche visant à améliorer les connaissances hydrogéologiques du territoire de Saint-Benoit, dans un contexte marqué par une qualité faible à moyenne des eaux actuellement exploitées, une méthodologie interdisciplinaire a été mise en œuvre.

Ainsi, une actualisation des données de la BSS a été réalisée et différentes observations de terrain ont permis de caractériser différentes **sources non exploitées** de la commune de Saint-Benoit. Il s'avère que les débits potentiellement mobilisables sont relativement faibles (< 10 m³/h) et qu'un risque de contamination bactériologique ne peut être écarté. Ces ressources peuvent toutefois présenter un intérêt pour desservir des populations en amont des importants captages de la partie basse de la commune. Un suivi régulier de la ressource devrait être envisagé avant toute intégration dans un schéma d'exploitation.

Dans un contexte de démarche prospective, les données de **géophysique héliportées** ont été interprétées, notamment dans les Hauts de la commune, là où la qualité des eaux est préservée de l'impact agricole. Une cohérence effective est observée entre les données d'AEM et les connaissances de géologie et d'hydrogéologie régionale sur le secteur de Saint-Benoit. Les différents concepts ou hypothèses suivantes ont pu être en formulés sur la base des données d'AEM :

- L'interface eau douce / eau salée est très proche du littoral de Saint-Benoit avec une faible pénétration dans les terres, ce qui signifie une faible vulnérabilité aux intrusions salines;
- Des entités géophysiques peu résistantes pouvant correspondre aux formations géologiques du β3 ou β4 du Piton de la Fournaise sont imagées jusqu'à plus de 200 m de profondeur sur la majeure partie du territoire sud de la commune de Saint-Benoit ;
- Une structure résistante relativement continue, dans le prolongement de la Plaine des Palmites et du Piton de la Fournaise est clairement imagée entre 400 et 800 m d'altitude. Cette structure géophysique peut être assimilée à une paléovallée à remplissage récent de laves. Cette structure occupe une surface d'une dizaine de km². Le toit de la structure varie entre 50 et 100 m de profondeur, tandis que le mur varie entre 200 et 300 m de profondeur ;
- En ce qui concerne les aspects hydrogéologiques de cette structure géophysique, il peut être évoqué la pluviométrie élevée sur les Hauts de l'Est qui engendre probablement une bonne alimentation par les eaux souterraines. Concrètement, il est probable que cette structure draine une partie significative des eaux précipitées sur les Hauts, que ce soit sur la Plaine des Palmistes ou sur la partie NE du Piton de la Fournaise.

Toutefois, l'absence de « verrou » ou de « barrage hydraulique » réduit les perspectives d'un stock significatif et complexifie la reconnaissance par forage.

Sur la base des données géophysiques, le seul verrou envisageable se localiserait dans la partie aval de la structure, au droit de sa terminaison NE, lorsqu'elle rencontre des formations moins résistantes. Ces formations correspondent probablement à des entités géologiques plus anciennes et moins perméables.

Il convient de rappeler qu'aucune observation de terrain ne permet de confirmer ou d'infirmer cette hypothèse. A ce titre, la réalisation d'ouvrages de reconnaissance dont la profondeur serait comprise entre 75 m et 150 m de profondeur permettrait de déterminer la présence éventuelle d'une ressource en eau souterraine exploitable. Le secteur à investiguer est localisé 1 à 2 km en amont de la RD3 entre le Chemin Lamadière au Nord et le Chemin Vabois au sud (Illustration 26).

Il convient également de rappeler que ce secteur est occupée par des parcelles en canne ou en diversification agricole. Il conviendra de trouver un équilibre entre altitude de forage et pression agricole en amont de l'ouvrage. Pour mémoire, si la présence d'eau est avérée, elle proviendra majoritairement des secteurs amont (pentes de la Fournaise et Plaine des Palmistes).

De manière plus opérationnelle, la mise en œuvre d'une opération de prélèvement et de diagnostic a été effectuée sur les trois forages "Chemin Ceinture", "Petit-Saint-Pierre" et "Bourbier-les-Hauts" via une sous-traitance au BE IdéesEAUX. Les interventions suivantes ont été réalisées avec l'appui d'agents du BRGM :

- mise en place d'une pompe d'essai 3" au-delà de 50 m de profondeur pour la réalisation de divers prélèvements d'eau : (i) analyses PPESO avec l'appui de l'ARS (laboratoire LDA et LDEHM, (ii) analyses des CFC's et SF6 pour la datation des eaux (laboratoire Spurenstofflabor) et (iii) l'analyse des isotopes stables de l'eau pour calculer l'altitude de recharge (laboratoire du BRGM, à Orléans).
- réalisation d'une inspection vidéo pour contrôler la conformité technique des ouvrages et leur état général;
- réalisation de diagraphies hydrogéologiques par diagraphie de production (flux : micromoulinet ou Heat pulse), température et conductivité (chapitre 6 - Ré-interprétation de tests hydrauliques réalisés sur la commune de Saint Benoît – Ile de La Réunion p. 55)

Ces données ont été ensuite intégrées au sein d'une réflexion scientifique sur le fonctionnement hydrogéologique des ouvrages selon des axes hydrodynamiques et qualitatifs.

La réinterprétation de ces anciens essais par pompage a permis d'amener des précisions sur les propriétés hydrogéologiques des coulées de lave dans la commune de Saint-Benoît ainsi que sur le potentiel d'exploitation des trois ouvrages analysés. En outre, elle montre un comportement relativement complexe des aquifères (double porosité, effets de limites et de drainance) à mettre en relation avec la structure géologique de l'empilement des coulées de lave.

Les forages de Bourbier-les-Hauts et Petit Saint-Pierre exploitent des aquifères très transmissifs aux potentialités intéressantes. Le forage **Bourbier les Hauts** a été détérioré par la reprise de foration. Un nettoyage de l'ouvrage et si possible de son massif de graviers est à prévoir. La réalisation d'un forage complémentaire à proximité pourrait permettre d'exploiter les capacités réelles de l'aquifère. Le forage de **Petit Saint-Pierre** est a priori non ou peu détérioré par la reprise de foration, cependant étant donné la vétusté de l'ouvrage un nettoyage de l'ouvrage est à prévoir. Le Forage de **Chemin de Ceinture** ne présente pas d'intérêt en raison de son état avancé d'usure et de sa faible productivité.

En vue de mettre en exploitation les ouvrages concernés, il est conseillé :

- de procéder à une phase de réhabilitation de l'ouvrage. Pour suivre les phases d'amélioration de l'ouvrage (nettoyage des crépines et/ou de la partie captante s.l.), il est conseillé avant toute phase de nettoyage de procéder à un essai de pompage par paliers de débit afin de juger de l'état actuel du forage, cela permettra de quantifier le degré de colmatage actuel. En fonction des résultats, la ou les méthodes ad hoc pour nettoyer les ouvrages pourront être prodigués (brossage, injection d'acide, air-lift, etc.). Une fois cette phase effectuée, une deuxième phase de test hydraulique (essai par paliers de débit) devra être réalisée afin de quantifier l'amélioration de l'ouvrage, voire si nécessaire de procéder à une nouvelle phase de nettoyage et tests post nettoyage au cas où la première phase de nettoyage n'aurait pas atteint les objectifs requis. Une fois la ou les phases de nettoyage effectuées, une diagraphie micro-moulinet en production devrait être réalisée afin d'identifier avec certitudes les venues d'eau ;
- de réaliser un essai par pompage de longue durée d'une semaine minimum (10 jours étant un plus) afin d'évaluer le débit d'exploitation des ouvrages ; l'essai par paliers de débit seul ne pouvant prétendre à cette évaluation. En effet, le comportement en captage partiel, aquifères stratifiés et compartimentés des coulées de lave nécessite des temps de pompage assez longs afin de faire réagir l'ensemble du système. Ceci permettra en outre de disposer des informations nécessaires pour assurer des modélisations de scénarios d'exploitation les plus robustes possibles ;
- et de procéder, durant les différentes phases de tests hydrauliques, à un suivi adéquat des niveaux d'eau dans le forage et du débit : acquisition automatique à un pas de temps minimum de 30 secondes pour les niveaux et 5 minutes pour les débits, avec contrôle manuel pour validation des suivis. En sus, un suivi physico-chimique durant ces essais est aussi à prévoir, celui-ci pouvant amener des informations sur les aquifères sollicités par le test.

Au-delà de ces aspects hydrodynamiques, les analyses réalisées en juin 2015 ont permis de proposer les résultats suivants :

- Altitude moyenne de recharge de 1200-1300 m NGR. Cette valeur correspond plus à une surface qui se développe entre quelques centaines de mètres d'altitude et 2 300 -2 500 m d'altitude ;
- Des temps de résidence de l'eau déterminés à partir des concentrations en gaz dissous des eaux des forages de l'ordre de 20 ans (± 5 ans) selon le modèle exponentiel pour les forages Petit Saint-Pierre et Chemin Ceinture et des eaux qui se seraient infiltrées en 1996 (± 2 ans) pour le forage Bourbier les Hauts, selon le modèle piston ;
- En ce qui concerne les produits phytosanitaires :
 - Forage Petit Saint-Pierre : l'absence d'atrazine (ATZ) et de déséthylatrazine (DEA) constitue un premier résultat remarquable, mais en parallèle, les molécules de substitution sont désormais détectées : métolachore (0.07 µg/l) et métribuzine (0.03 µg/l);
 - Forage Bourbier les Hauts : Atrazine (0.02 μg/l) et DEA (0.06 μg/l) ont été détectés ;
 - o Forage Chemin Ceinture : du DEA (0.02 μg/l) a été détecté.

Sur la base de l'ensemble de ces résultats, la notion d'**adaptation des pratiques agricoles** en vue de préserver la ressource est abordée dans le cadre d'une stratégie globale de la gestion de la ressource en eau. En effet, des ressources en eau en quantité importante sont présentes sur le territoire de la commune de Saint-Benoit. Ces dernières sont toutefois impactées par la présence de phytosanitaires en relation avec les activités agricoles. Le contexte hydrogéologique des planèzes de Saint-Benoit est très favorable à une amélioration rapide (≈ 5 ans) de la qualité des eaux suite à une adaptation des pratiques agricoles.

Cette adaptation des pratiques agricoles constitue un objectif à mettre en œuvre dès que possible pour des résultats efficaces et durables à un horizon de quelques années. Concrètement, il s'agirait de stopper ou réduire très significativement l'utilisation de produits phytosanitaires en amont des forages afin d'engendrer une baisse des teneurs en produits phytosanitaires dans les eaux souterraines.

La SAU concernée à l'échelle communale serait de l'ordre de 5 à 10 % (2 à 5 km² pour une SAU de 46.4 km²). A ce titre, la mise en place d'activités agricoles biologiques pourrait permettre de réduire significativement les intrants dans les eaux souterraines.

10. Bibliographie

Aeschbach-Hertig W, Beyerle U, Holocher J., Peeters F. (2002) - Excess air in groundwater as a potential indicator of past environmental changes. Study Of Environmental Change Using Isotope Techniques, IAEA, VIENNA, 2002, IAEA-CSP-13/P, pp. 174-183.

Aeschbach-Hertig W., Peeters F., Beyerle U., Kipfer R., (2000) - Paleotemperature reconstruction from noble gases in groundwater taking into account equilibrium with entrapped air, Nature 405, pp. 1040–1044.

ARTELIA (2016), en collaboration avec Mascareignes Géologie - Schéma Directeur d'Alimentation en Eau Potable de la commune de Saint-Benoit. Référence 4 70 1813 – 2 volumes. 163 et 27 p.

Aunay B., Dewandel B., Ladouche B., Oliva Z., Saussol P. (2012) - Identification des modalités d'exploitation des ressource en eaux souterraines du domaine d'altitude de l'Est de La Réunion - Phase 3 (Secteur des Plaines). Rapport BRGM/RP-59245-FR. 162 p.

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

Aunay B., Lachassagne P., Stollsteiner P. (2009) - Identification des modalités d'exploitation des ressources en eaux souterraines du domaine d'altitude de l'Est de La Réunion - Phase 2. Rapport BRGM/RP-57185-FR. 125 p.

Bauer S., Fulda C., Schäfer W. (2001) - A multi-tracer study in a shallow aquifer using age dating tracers 3H, 85Kr, CFC-113 and SF6 — Indication for retarded transport of CFC-113, J. Hydrol. 248 (2001), pp. 14–34.

Beyerle U., Rueedi J., Leuenberger M., Aeschbach-Hertig W., Peeters F., Kipfer R., Dodo A. (2003) - Evidence for periods of wetter and cooler climate in the Sahel between 6 and 40 kyr BP derived from groundwater - Geophysical Research Letters, 30, 1173, DOI: 10.1029/2002GL016310

Billard G. (1974) – Carte géologique de l'île de la Réunion (4 feuilles, 1/50 000). Carte géologique de la France, BRGM.

Billard, G. (1992) - Programme départemental de recherche en eau 1991. Réalisation de forages de reconnaissance de petit et gros diamètre. Suivi géologie, forage du Chemin de Ceinture (1227-7x-0052). Cabinet Guy Billard, 92GB06, juillet 1992.

Billard, G. (1998) - Programme départemental de recherche en eau 1994. Réalisation de forages de reconnaissance de petit et gros diamètre. Suivi géologie, forage de Bourbier les Hauts (1227-7x-0073). Cabinet Guy Billard, 98GB03, mars 1998.

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

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

Bourhane A., Dumont M. & Bonnier J. (2016) – Mise en place d'un réseau de suivi des intrusions salines dans les aquifères côtiers de La Réunion. Juin 2016. Rapport Office de l'eau de La Réunion.

Bret L., Join J-L., Legal X., Coudray J., Fritz B. - (2003) Argiles et zéolites dans l'altération d'un volcan bouclier en milieu tropical (Le Piton des Neiges, La Réunion), Comptes Rendus Geoscience, 335, 14, pp. 1031-1038.

BRGM / LGSR (2006) – Carte géologique de La Réunion au 1/100 000. Kit pédagogique Sciences de la Terrre (Région Réunion / Feder).

Bu X., Warner M.J. (1995) - Solubility of chlorofluorocarbon 113 in water and seawater, Deep-Sea Res. 427, pp. 1151–1161.

Bullister J.L., Wisegarver D.P. & Menzia F.A., (2002) - The solubility of sulphurhexafluoride in water and seawater, Deep-Sea Res I 49, pp. 175–187.

Busenberg E., Plummer L.N. (2000) - Dating young groundwater with sulphurhexafluoride — Natural and anthropogenic sources of sulphurhexafluoride, Water Resour. Res. 36, pp. 3011–3030.

Busenberg E., Weeks E., Plummer L. et Bartholemay R. (1993) - Age dating groundwater by use of chlorofluorocarbons (CCI3F and CCI2F2) and distribution of chlorofluorocarbons in the unsaturated zone, snake river plain aquifer, Idaho National Engineering Laboratory, Idaho. U.S. Geological Survey WaterResources Investigations 93-4054, 47p

Chaballier P.F. et Sentuc J.J. (1994) – Etude pédo-agronomique de la zone méridionale de la plaine de Dos d'Âne. Etude des impacts agronomiques possibles sur le périmètre de protection éloignée de la Source Blanche. Rapport CIRAD (service Agronomie CIRAD-CA). 17 p.

Cook P.G., Solomon D.K. (1995) - The transport of atmospheric trace gases to the water table: Implications for groundwater dating with chlorofluorocarbons and Krypton85. Water Resour. Res., Vol. 31, pp. 263-270.

Cooper H.H. and Jacob C.E. (1946) - A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. Am. Geoph. Union Trans. 27, 526-534.

Craig H. (1961) - Isotopic Variations in Meteoric Waters, Siences, 133, 3465, pp. 1702-1703.

Custodio E. (1985) - Low permeability volcanics in the Canary Islands (Spain). In: Hydrogeology of rocks of low permeability. International Association of Hydrogeologists, Tucson, Ariz., pp. 533–544.

DAAF (2017) - La production biologique réunionnaise. Agreste n°103 – Mars 2017. Service statistique agricole. http://daaf.reunion.agriculture.gouv.fr/La-production-biologique

Daessle M. (2003) - Programme départemental de recherche en eau 1997/1999. Réalisation de forages de Reconnaissance de petit et gros diamètre. Réalisation d'un forage de reconnaissance à Petit Saint Pierre les Hauts, commune de Saint Benoît (1227-8x-0058). Bureau d'étude Daessle Materne, Marché 02-154, décembre 2003.

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

Dumont M. & Aunay B. (2017) - Atlas des données AEM pour l'amélioration des connaissances du phénomène d'intrusion saline à La Réunion. Rapport final BRGM/RP-66629-FR.

Dumont M. (à paraitre) - Caractérisation des structures hydrogéologiques de l'île de La Réunion à partir des données de géophysique héliportée REUN_EM. Thèse de doctorat, Université de La Réunion, BRGM, ENSEGID.

Faybishenko B.A. (1995) - Hydraulic behavior of quasi-saturated soils in the presence of entrapped air: Laboratory experiments. Water Resources Research 31: doi: 10.1029/95WR01654. issn: 0043-1397.

Frissant N., Jaques E., Lachassagne P. (2007) - Étude des modalités d'exploitation du domaine d'altitude de l'Est de la Réunion. Rapport BRGM/RP-55327-FR. 54p.

Geisler G., Hellweg S., Liechti S. & Hungerbühler K. (2004) - Variability Assessment of Groundwater Exposure to Pesticides and Its Consideration in Life-Cycle Assessment. Environ. Sci. Technol., 2004, 38 (16), pp 4457–4464. DOI: 10.1021/es0352707

Grunberger O. (1989) - Etude géochimique et isotopique de l'infiltration sous climat tropical contrasté. Massif du Piton des Neiges, Ile de La Réunion. Thèse, Université de Paris-Sud.

Gustafson D.I., 1989. Groundwater ubiquity score: a simple method for assessing pesticide leachability. Environmental Toxicology and Chemistry, 8. pp. 339-357.

Hantush, M.S. (1964) - Hydraulics of wells. In: Chow V.T. (Ed.), Advances in Hydroscience, vol. 1. Academic Press New York, N.Y.,

Heaton T., Vogel J. (1981) - "Excess air" in groundwater, Journal of Hydrology, 50, pp. 201-216

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

IdéesEAUX (2015) - Diagnostic des forages de « Petit St-Pierre », « Chemin Ceinture » et « Bourbier les Hauts » par inspection vidéo, diagraphie Gamma naturel/flux/température/conductivité et prélèvement d'eau – Commune de Saint-Benoît (974). Bureau d'études IdéesEAUX, JG-150206-CAM, juillet 2015.

Kulongoski J.T., Hilton D.R., Selaolo E.T. (2004) - Climate variability in the Botswana Kalahari through the Last Glacial Period, Geophysical Research Letter, 31: L10204.

Maloszewski P., Zuber A., (1982) - Determining the turnover time of groundwater systems with the aid of environmental tracers, I-models and their applicability, Journal of Hydrology, 57, (3-4), pp. 207-231.

Martelet G., Reninger P.A., Perrin J., Deparis J. (2014) – Acquisition géophysique héliportée de l'île de La Réunion. Rapp. BRGM/RP-63818-FR, 90 p.

Martin J., Maillary L., Thomas P., Gossard C. (2013) - L'IFT herbicides canne a sucre a La Réunion : premières estimations. AFPP – 22e conférence du Columa. Journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes. Dijon – 10, 11 ET 12 Décembre 2013.

Moench, A.F., (1984) - Double-porosity models for a fissured groundwater reservoir with fracture skin, Water Resources Research, vol. 20, no. 7, pp. 831-846.

Nabighian M.N., Macnae J.C. (1991) - Time domain electromagnetic prospecting methods. Nabighian, M.N. (Ed.), Electromagnetic methods in applied geophysics, Society of Exploration Geophysicists, 2, part A, 427-520

Oster H., Sonntag C. et Münnich K., (1996) - Groundwater age dating with chlorofluorocarbons, Water Resources Research, 32, pp. 2989-3001

Petit V., Aunay B., Gourcy L., Baran N., Oliva Z., Lucas C. (2013) - Pollution diffuse et transferts des produits phytosanitaires du sol vers les ressources en eaux souterraines de l'île de La Réunion. Rapport final BRGM/RP-61477-FR. 174 p.

Plummer L.N., Friedman L.C. (1999) - Tracing and dating young ground water, USGS Fact Sheet, 134-99

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

Reninger P.-A., Martelet G., Deparis J., Perrin J., Chen Y. (2011) – Singular value decomposition as a denoising tool for airborne time domain electromagnetic data. Journal of Applied Geophysics 75, pp. 264-276.

Reninger PA, Martelet G., Perrin J., (2015) - Frame effective tilt correction for HEM data acquired over rugged terrain. First European Airborne Electromagnetics Conference, 6-10 Septembre, Turin

Russell A.D., Thompson G.M. (1983) - Mechanism leading to enrichment of the atmospheric fluorocarbons CCI3F and CCI2F2 in groundwater, Water Resour. Res. 19 (1983), pp. 57–60.

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

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

Viezzoli A., Christiansen A.V., Auken E., Sørensen K. (2008) – Quasi-3D modeling of airborne TEM data by spatially constrained inversion. Geophysics 73, F105-F113

Violette S., (1993) - Modélisation des circulations d'eau dans le volcan de la Fournaise : Approche du bilan hydrologique et des échanges thermiques, Thèse de doctorat de l'université de Paris VI.

Volk C. M., Elkins J. W., Fahey D. W. Dutton G. S., Gilligan J. M., Loewenstein M., Podolske J. R., Chan K. R. (1997) - Evaluation of source gas lifetimes from stratospheric observations, J. Geophys. Res. Atmosphere 102, D21, pp. 25543–25564

Ward S.H., Hohmann G.W. (1988) - Electromagnetic theory for geophysical applications. Nabighian, M.N. (Ed.), Electromagnetic methods in applied geophysics, Society of Exploration Geophysicists 1, pp. 131-311

Warner M.J., Weiss R.F. (1985) - Solubilities of chlorofluorocarbons 11 and 12 in water and seawater: Deep-Sea Res. 32 1485–1497.

Annexe 1

Coupes géologiques et technique des ouvrages



Coupe technique du forage de Bourbier les-Hauts

6 - RESULTATS

6.1. - <u>Géologie</u>

L'examen des échantillons récupérés et les paramètres de foration ent permis d'établir la coupe géologique suivante du forage de Bourbier les Hauts : 0,0 -20,0 m = alluvions altérées : graviers, galets, blocs basaltiques divers cimentés par un liant argilo-sableux marron 70,0 m = alluvions grossières : mélanges de sables silteux, graviers, galets et blocs basaltiques divers, plus ou moins altérés. Prédominance d'éléments scoriacés à partir de 64 m 20,0 -70.0 -72,0 m = paléosol : alluvions grossières rubéfiées 72,0 -79,0 m = scories remaniées 79.0 -84,0 n = basalte compact 84,0 -87,0 m = scories rubéfiées, riches en phénocristaux de feldpath 87,0 -88,0 m - basalte compact, riche en phénocristaux de feldspath 88,0 -90,0 m = scories légèrement rubéfiées, riches en phénocristaux de feldspath 90,0 -91,0 m - basalte vacuolaire, riche en phénocristaux de feldspath 91,0 -92,0 m - acories riches en phénocristaux de feldspath PHASE III 94,0 m = basalte compact, lógèrement altéré, riche en phénocristaux de feldspath - traces d'olivine 92,0 -PITON DES NEIGES 94.0 -95,0 m - scories riches en phénocristaux de feldspath 98,0 m = basalte vacuolaire, riche en phénocristaux 95,0 de feldspath 98,0 - 101,0 m = scories riches en phénocristaux de feldspath 101,0 - 103,0 m = basalte vacuolaire, riche en phénocristaux de feldspath - traces d'olivine 103,0 - 104,0 m = scories riches en phénocristaux de feldspath - traces d'olivine 104,0 - 107,0 m = basalte scoriacé, riche en phénocristaux de feldspath - traces d'olivine

12177×0073

- 12 -

107,0 -	121,0 m -	alluvions grossières altérées : graviers et galets basaltiques divers, plus ou moins sains, cimentés par un liant argilo-sableux marron
121,0 -	123,0 m =	argile graveleuse marron : basalte scoriacé très altéré
123,0 -	130,0 m =	basalte légèrement vacuolaire

Coupe géologique du forage de Bourbier les-Hauts



Coupe technique du forage de Chemin de Ceinture



						- 8 -
	20,0	-	52,5	л	 alternance de bancs d'épaisseur déciné- trique à métrique de basalte légérement vacuolaire à fins cristaux de feldspath traces d'olivine et de scories. Prédo- minance des scories entre 28,5 et 42 m 	I PRASE IV I PROVIDE LA I PRIDUATSE
	52,5	ð	59,0	10	basalte compact à fins cristaux de feldspath et traces d'olivine	
	59,0	2	73,0	n	basalte légèrement vacuolaire avec passages de scories, à fins cristaux de feldapath et olivine peu abondante. For- mation diaclasée. Début d'altération au niveau des diaclases et des scories	an 11 an 1
	73,0	2	81,0	n	= basalte compact à fins cristaux de foldspath et traces d'olivine	PHASE III2
	81,0	1	98,0	в	 basalte légérement vacuolaire avec pas- sages de scories, à fins cristaux de feléspath et d'olivine. Formation dia- clasée. Début d'altération au niveau des diaclases et des scories 	PITON DE LA POURNAISE
	98,0	24	109,0	.05	 basalte légèrement vacuolaire à fins cristaux de Celéspath et d'olivine. Formation très altérée décomposée en argile rouge dans les zones diaclasées ou scoriacées 	
	109,0		120,0	н	 basalto légèrement vacuolaire avec pas- sages de scories, à fins cristaux de feldspath et d'olivine. Formation dia- clasée et altérée 	
Remarque	: Au n subst = 200 III2 dans	rat rat aqu le	sau du tun co (), Co (iféres forage	f mdu sub , p	orage, la géophysique prévoyait la pré cteur vers 70 m de profondeur (cf. pr stratum correspond très vraisemblablement a us ou moins altérés, rencontrés à partir	sence d'un ofil XW-SE ux busalles de 67,4 m

Coupe géologique du forage de Chemin de Ceinture



Figure 3 Coupe lithologique et technique du forage Petit Saint Pierre les Hauts

Annexe 2

Fiche descriptive des sources de Saint-Benoit

Sur le CD-ROM

Annexe 3

Paramètres des prélèvements

		Por	npage	Analyses						
Point	Code	Précision	Date	Temps de pompage (hh:mm)	Débit (m³/h)	PPESO (LDA) + Microlab + LDEHM	HPLCMSP OS (LDA) (liste avec Atz)	Tous les pesticide s de la liste PPESO (LDA)	CFC's et SF6 Spurenst offlabor	lsotopes stables de l'eau
Forage Petit Saint-Pierre	PSP	Pompe dans le tubage au-dessus des crépines - 65 m de profondeur	24/06/2015 - 13h	05:30	2.29	х			BRGM / Allem.	BRGM (LAB)
Forage Petit Saint-Pierre	PSP prel	Tube préleveur à 115 m de profondeur	24/06/2015 - environ 15h				х			
Forage Petit Saint-Pierre	PSP107	Pompe à 107 m de profondeur	26/06/2015 - 11h	00:20				х	BRGM / Allem.	BRGM (LAB)
Forage Chemin Ceinture	СНС	Pompe à 85 m de profondeur	25/06/2015 - 13h	02:00	2.21	х			BRGM / Allem.	BRGM (LAB)
Forage Bourbier les Hauts	BOU	Pompe à 57 m de profondeur	29/06/2015 - 13h	07:00	2.61	x			BRGM / Allem.	BRGM (LAB)

			Paramètres au moment du prélèvement									
Point	Code	Tempéra ture (°C)	CE _{25℃} (μS/cm)	рН	Eh (mV)	Eh _{NHE} (mV)	O ₂ (%)	O₂ (mg/L)	Niveau piézomét rique (m)			
Forage Petit Saint-Pierre	PSP	23.4	117.7	7.68	231	439.2						
Forage Petit Saint-Pierre	-		120.4									
Forage Petit Saint-Pierre	PSP107	22.5	100.8	7.999	202	410.84	131	11.28				
Forage Chemin Ceinture	СНС	23.1	110.2	7.466	213	421.41			77.8			
Forage Bourbier les Hauts	BOU	21.8	143.6	7.006	230.7	440.04	119.4	10.4	48.2			

			Paramètres à l'état initial									
Point	Code	Tempéra ture (°C)	CE _{25℃} (μS/cm)	рН	Eh (mV)	Eh _{NHE} (mV)	O ₂ (%)	O2 (mg/L)	Niveau piézomét rique (m)	Temps de stabilisation des paramètres t _s		
Forage Petit Saint-Pierre	PSP	23.1	96.5	7.222					61.6	01h05 < t _s < 01h25		
Forage Petit Saint-Pierre	-								61.6	Sans objet		
Forage Petit Saint-Pierre	PSP107								61.2	instantanné		
Forage Chemin Ceinture	CHC	22.4	109.4	6.95	118	326.91			74.2	t _s < 00h20		
Forage Bourbier les Hauts	BOU	22.5	184.8	6.95	235	443.84	102.5	8.6	48.5	00h30 < t _s < 01h15		

			Résultats
Point	Code	Référence LDA	Anomalies sur les résultats LDA
Forage Petit Saint-Pierre	PSP	15-11010-001	Métolachore - 0.13 μg/l Métribuzine - 0.07 μg/l
Forage Petit Saint-Pierre	-	15-11022-001	Métolachore 0.16 μg/l Métribuzine 0.15 μg/l
Forage Petit Saint-Pierre	PSP107	15-11146-001	Métolachore 0.07 μg/l Métribuzine 0.03 μg/l
Forage Chemin Ceinture	СНС	15-11111-001	DEA - 0.02 μg/l
Forage Bourbier les Hauts	BOU	15-11180-001	Toluène - 0.3 μg/l Atrazine - 0.02 μg/l DEA - 0.06 μg/l

Annexe 4 – Le cas de la ville de Munich

Le cas de la ville de Munich est cité comme un exemple efficace d'acquisitions foncières et agriculture biologique ayant engendré une amélioration de la qualité des eaux. Différents articles sont disponibles en ligne. Quelques extraits sont présentés ci-dessous.

La Ville de Münich a donc décidé en 1991 de mener un programme incitatif de conversion à l'agriculture biologique des exploitations agricoles situées dans les zones d'influence du captage. Une zone de conversion à l'agriculture biologique a été définie de telle manière qu'il faille 150 jours à l'eau pour s'écouler de la limite extérieure jusqu'au point de captage. Cette zone, qui déborde largement des périmètres de protection réglementaires, couvre 6 000 ha, dont 2 250 sont cultivés et 2 900 occupés par la forêt dont la moitié appartient à la Ville. L'objectif de la Ville est de convertir à l'agriculture biologique le plus grand nombre d'exploitations de la « zone de conversion » (...).

La Ville a passé un accord avec des associations d'agriculture biologique reconnues, et propose aux agriculteurs qui y adhèrent une aide de 550 DM/ha/an (environ 274 e/ha/an) pendant 6 ans puis de 450 DM/ha/an (230 €/ha/an) pendant 12 ans. Cette aide s'ajoute aux subventions de l'État dans le cadre des mesures agri-environnementales qui s'élèvent à environ 300 DM/ha/an (153 €/ha/an). Le suivi de la réglementation est contrôlé continuellement par des organismes indépendants. Si le cahier des charges n'est pas respecté, l'agriculteur reçoit un avertissement et peut être exclu (...).

La qualité de l'eau est très satisfaisante ; en 1999, l'eau de Münich pouvait être comparée aux meilleures eaux minérales (...).

Le parti pris de retenir une option unique, l'agriculture biologique, a beaucoup facilité, pour la Ville, l'élaboration du cahier des charges et la promotion de l'opération auprès des agriculteurs. L'expérience est aussi particulièrement intéressante par l'exemple qu'elle donne d'une mise en œuvre entièrement sous-traitée aux associations qui sont organisées pour l'assurer.

CD-rom

Annexe 2

Fiche descriptive des sources de Saint-Benoit

Annexe 5 - Bordereaux d'analyse

Annexe 6 - Rapport IdéesEAUX

Diagnostic des forages de « Petit St-Pierre », « Chemin Ceinture » et « Bourbier les Hauts » par inspection vidéo, diagraphie Gamma naturel/flux/température/conductivité et prélèvement d'eau – Commune de Saint-Benoît (974) – Rapport Réf/ JG-150206-CAM – Juillet 2015 – 62 p.

Annexe 7 – Agreste n°103



Centre scientifique et technique 3, avenue Claude-Guillemin BP 36009 45060 – Orléans Cedex 2 – France Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr **Direction régionale La Réunion** 5, rue Sainte Anne CS 51016 97404 Saint-Denis Cedex Tél : 0262 21 22 14