

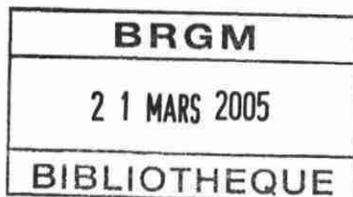
**Quantification des volumes d'eau
souterraine mobilisable sur la
micro-région Est sur la base des
données existantes et avis sur le franchissement des
rivières par l'ouvrage destiné à transférer les eaux**

Rapport « intermédiaire »
Phase 1

BRGM/RP-53459-FR
Décembre 2004

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 2003

N. Frissant, O. Jossot, M. Cruchet



Vérificateur :
Nom : M. Cruchet
Date : 20 janvier 2004
Signature :



Approbateur :
Nom : Ph. Roubichou
Date : 20 janvier 2004
Signature :



Mots clés : Hydrogéologie, Ile de La Réunion, Région Est, Ressource en eau, Synthèse.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : Frissant N., Jossot O., Cruchet M. (2004) – Quantification des volumes d'eau souterraine mobilisable sur la micro-région Est sur la base des données existantes et avis sur le franchissement des rivières par l'ouvrage destiné à transférer les eaux. Rapport d'avancement. Rapport BRGM / SP 53459-FR, 27 p., 6 Ill..

© BRGM, 2004, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Un principe de basculement des eaux est inscrit dans le SCOT Est, le Schéma de Cohérence Territoriale de la CIREST (Communauté Intercommunale de La Réunion de l'Est). L'objectif de cette ouvrage est d'alimenter en eau les espaces de reconquête agricoles et sylvicoles, ainsi que les espaces urbains de densification des mi-pentes et des bas de l'Est de La Réunion.

Dans le cadre de la ligne d'appui 2003 du BRGM à La Région, cette dernière a sollicité l'intervention du BRGM pour analyser le principe de basculement des eaux envisagé, quantifier les volumes d'eau souterraine mobilisable sur la micro-région Est sur la base des données existantes et donner un avis sur le franchissement des rivières par l'ouvrage destiné à transférer les eaux. Ce travail comprend 2 phases et s'échelonne sur 2004 (synthèse des informations) et 2005 (quantification des volumes).

En 2004 (phase 1), l'appui du BRGM à La Région a consisté à synthétiser, simplifier et homogénéiser les informations les plus pertinentes sur la typologie des aquifères de La Réunion et sur la caractérisation des principaux aquifères de la zone d'étude. Les informations recueillies sont essentiellement issues de deux travaux de synthèses : « PDRE, bilan et synthèse hydrogéologique de quinze années de recherche » réalisé en 2000 par Hydroexpert à la demande du Conseil Général de La Réunion et « gestion intégrée des eaux à La Réunion : vision d'ensemble et problèmes clefs » publié en 2003 par Jean Coudray dans la revue Géologues. Les études hydrogéologiques de base ont principalement été menées par le BRGM et l'Université de La Réunion.

Les systèmes aquifères sont abordés par commune et leur description est structurée selon leurs limites géographiques, leur géologie, la description de leur fonctionnement hydrogéologique et les termes de leur bilan hydrologique.

La quantification des volumes d'eaux souterraines mobilisables sera effectuée lors de la phase 2 en 2005.

L'examen du franchissement des ravines par un ouvrage destiné à transférer les eaux de l'Est vers le Nord, montre que les difficultés seront croissantes avec l'altitude. La réalisation de ce projet sera contraignante si le tracé devait emprunter des berges hautes de plusieurs centaines de mètres. Un tracé vers 200 m d'altitude permettrait de franchir les rivières principales sans difficulté majeure et éviter les massifs du Cratère et des hauts de Bras Panon où existent de nombreuses ravines encaissées.

Des reconnaissances géologiques et géotechniques préliminaires devront être lancées pour optimiser l'implantation du tracé et éviter les zones soumises à des mouvements de terrain.

Sommaire

1. Objet de l'étude.....	6
2. Caractéristiques hydrogéologiques générales des aquifères de La Réunion	7
2.1. GRANDS ENSEMBLES DE L'ILE DE LA RÉUNION.....	7
2.1.1. Hydrogéologie du domaine littoral	7
2.1.2. Hydrogéologie du domaine d'altitude	8
3. Les aquifères de l'Est de La Réunion	14
3.1. LE SYSTÈME AQUIFÈRE DE SAINTE-MARIE.....	14
3.2. LE SYSTÈME AQUIFÈRE DE SAINTE-SUZANNE.....	15
3.3. LE SYSTÈME AQUIFÈRE DE SAINT-ANDRÉ.....	16
3.4. LE SYSTÈME AQUIFÈRE DE BRAS-PANON	17
3.5. LE SYSTÈME AQUIFÈRE DE SAINT-BENOÎT SAINTE-ANNE	18
3.6. LE SYSTÈME AQUIFÈRE DE SAINTE-ROSE.....	18
3.7. HYDROGÉOLOGIE DE LA PLAINE DES PALMISTES.....	19
3.8. HYDROGÉOLOGIE DU SITE DE GRAND ETANG.....	20
3.9. LES AQUIFÈRES DU CIRQUE DE SALAZIE	20
3.10. HYDROGÉOLOGIE DU PLATEAU DE BÉLOUVE.....	21
3.11. HYDROGÉOLOGIE DU MASSIF DE PITON DE LA FOURNAISE.....	21

4. Avis sur le franchissement des ravines	22
4.1. CONTEXTE GÉOMORPHOGÉOLOGIQUE.....	22
4.2. LE FRANCHISSEMENT DES RIVIÈRES OU GRANDES RAVINES.....	23
4.3. LE FRANCHISSEMENT DES RAVINES DES PLANÈZES	24
4.4. LE FRANCHISSEMENT DES MASSIFS DU CRATÈRE ET DES HAUTS DE BRAS PANON.....	24
4.5. AVIS PRÉLIMINAIRE.....	24
5. Conclusions	26
6. Inventaire bibliographie	27

Liste des illustrations

Illustration 1 – schéma conceptuel des entités hydrogéologique de La Réunion (d'après atlas hydrogéologique de La Réunion 1986 modifié)	9
Illustration 2 – répartition des ouvrages de prélèvement des eaux souterraines et de surfaces et des sources dans la micro région Est.....	10
Illustration 3 – Cadre morphostructural des émergences des nappes d'altitude (Join, 1991)	11
Illustration 4 – Localisation des aquifères stratégique telles que définies par le SDAGE de l'Est de La Réunion.....	12
Illustration 5 – localisation des aquifères de l'Est de La Réunion	13
Illustration 6 - Report du projet de basculement des eaux sur la cartographie de l'aléa "mouvement de terrain" à l'échelle 1/100 000.....	25

1. Objet de l'étude

Un principe de basculement des eaux est inscrit dans le SCOT Est, le Schéma de Cohérence Territoriale de la CIREST (communauté intercommunale de La Réunion de l'Est). L'objectif de cette ouvrage est d'alimenter en eau les espaces de reconquête agricoles et sylvicoles, ainsi que les espaces urbains de densification des mi-pentes et des bas. Ce principe de basculement des eaux constitue un des éléments de la mise en service de réseaux adaptés aux besoins des populations et de l'activité agricole. Il répond en partie à la volonté de structurer les agglomérations et de protéger les terres agricoles affichée dans le SAR et déclinée dans le SCOT de la CIREST. Il est aussi un élément de la reconquête des friches agricoles et d'une meilleure valorisation des terres à canne. Ce projet est cohérent avec les recommandations du SDAGE relatifs à la gestion quantitative de l'eau.

Dans le cadre des lignes d'appui 2003 du BRGM à La Région, cette dernière a sollicité l'intervention du BRGM pour analyser le principe de basculement des eaux, envisagé par le SCOT Est dans la perspective du SCOT 2020. Les objectifs de l'étude sont de :

- a) localiser, sur carte au 1/50 000, les aquifères potentiels au sein de la micro-région Est ;
- b) estimer les volumes d'eau souterraine mobilisables au sein des aquifères de la micro-région Est à partir des données recueillies ;
- c) décrire l'état des connaissances sur les eaux souterraines sur la zone étudiée (les zones où subsistent des lacunes importantes seront identifiées).
- d) formuler un avis sur le franchissement des ravines et rivières par l'ouvrage destiné à transférer les eaux de l'Est vers le Nord.

Il convient de rappeler que seuls les aspects quantitatifs des ressources en eau souterraine seront abordés ; les aspects qualitatifs pourront faire l'objet d'une autre étude.

Les travaux réalisés par le BRGM en 2004 ont consisté en :

- une synthèse hydrogéologique comprenant l'inventaire des études existantes, l'identification de la structure géologique des aquifères et la description des modalités de fonctionnement des systèmes aquifères ;
- un avis sur les franchissements de ravines et de rivières.

2. Caractéristiques hydrogéologiques générales des aquifères de La Réunion

2.1. GRANDS ENSEMBLES DE L'ILE DE LA RÉUNION

Join (1991) distingue deux zones sur l'île (Cf. illustration 1) :

1. Un « domaine littoral » caractérisé par un « complexe aquifère de base » qui contient une « nappe de base » en équilibre avec le biseau salé et les nappes alluviales (en équilibre ou non avec le biseau salé). Ce domaine est connu grâce aux forages ;
2. Un « domaine d'altitude » caractérisé par des « aquifères d'altitude » contenant des nappes perchées. Ce domaine est surtout connu grâce aux sources.

2.1.1. Hydrogéologie du domaine littoral

D'après Coudray (2003), le littoral réunionnais est constitué :

- de falaises entaillant les planèzes formées par l'empilement de coulées de lave volcanique et de scories ;
- de plaines littorales constituées de dépôts détritiques alluviaux, et parfois marins.

Le complexe aquifère de base s'étend de façon plus ou moins continue sur ces différentes formations géologiques. Ces aquifères sont caractérisés par des gradients piézométriques faibles (entre 0,2 et 3,2 %), des zones d'émergences en mer et un équilibre hydrodynamique avec les intrusions marines qui constituent le mur de ces aquifères. La continuité de ces nappes vers l'intérieur de l'île reste encore hypothétique.

Les complexes fluvio-deltaïques construits à l'embouchure des principales rivières (rivière du Mât, rivière de l'Est) renferment une ou plusieurs nappes superposées (les plus basses étant captives). Cette mise en captivité des nappes par des niveaux détritiques ou volcaniques imperméables permet de limiter les phénomènes de contamination marine. Inversement, la pénétration de l'eau de mer est maximale lorsque l'aquifère volcanique atteint la mer sous forme d'une falaise rocheuse soumise à l'effet de la houle.

Dans l'Est de l'île, les eaux de la nappe de base sont moyennement à faiblement minéralisées (de 50 à 1000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) et de faciès hydrogénocarbonaté calcique ou magnésien.

2.1.2. Hydrogéologie du domaine d'altitude

Les systèmes hydrogéologiques des domaines d'altitude et de l'intérieur de l'île sont moins bien connus que les domaines littoraux, largement reconnus par forage (Cf. illustration 2). Cependant, l'existence de nombreuses émergences met en évidence la présence de circulations souterraines dans les parties hautes de l'île.

Ces sources, parfois regroupées en ligne de source comme au Voile de la Mariée à Salazie, constituent des exutoires de nappes perchées. Leur substratum peut être constitué de paléosol, de cendres, de coulées boueuses, de coulées massives non fracturées ou colmatées. Coudray (2003) note que leur fréquence d'apparition est maximale entre 900 et 1500 m d'altitude. Leur débit est généralement faible et peu soutenu à l'étiage et les plus forts débits se trouvent au niveau des sources du massif du Piton de la Fournaise.

Join (1991) distingue trois types de sources (Cf. illustration 3) :

- les sources superficielles, les plus nombreuses. Elles apparaissent dans les terrains de subsurface profondément altérés (source d'altérite) ou dans les ravines, au contact de coulées laviques imperméables avec des alluvions récentes ou des niveaux scoriacés (source d'inféroflux) ;
- les sources intermédiaires localisées dans les versants abrupts. Elles peuvent constituer des alignements horizontaux de sources ou être chenalées à la base de paléovallée mis à nu par l'érosion ;
- les sources profondes, rares. Elles sont situées au pied des têtes de ravines les plus encaissées de l'île. Leur débit est bien supérieur à celui des sources superficielles et intermédiaires.

Les aquifères profonds et la nappe de base littorale seraient en continuité hydraulique et formeraient un aquifère volcanique généralisé à l'échelle de l'île (Join, 1991). L'augmentation rapide du gradient piézométrique de la nappe de base vers le centre du massif, jusqu'à des altitudes supérieures à 1000 m (altitude des sources profondes), s'expliquerait par la diminution de la perméabilité vers l'intérieur du massif, l'augmentation de l'infiltration due à la forte pluviométrie en altitude et la diminution de la section perpendiculaire à l'écoulement de l'amont vers l'aval (Coudray, 2003).

COUPE SCHÉMATIQUE DES SYSTÈMES HYDROGÉOLOGIQUES DE LA RÉUNION

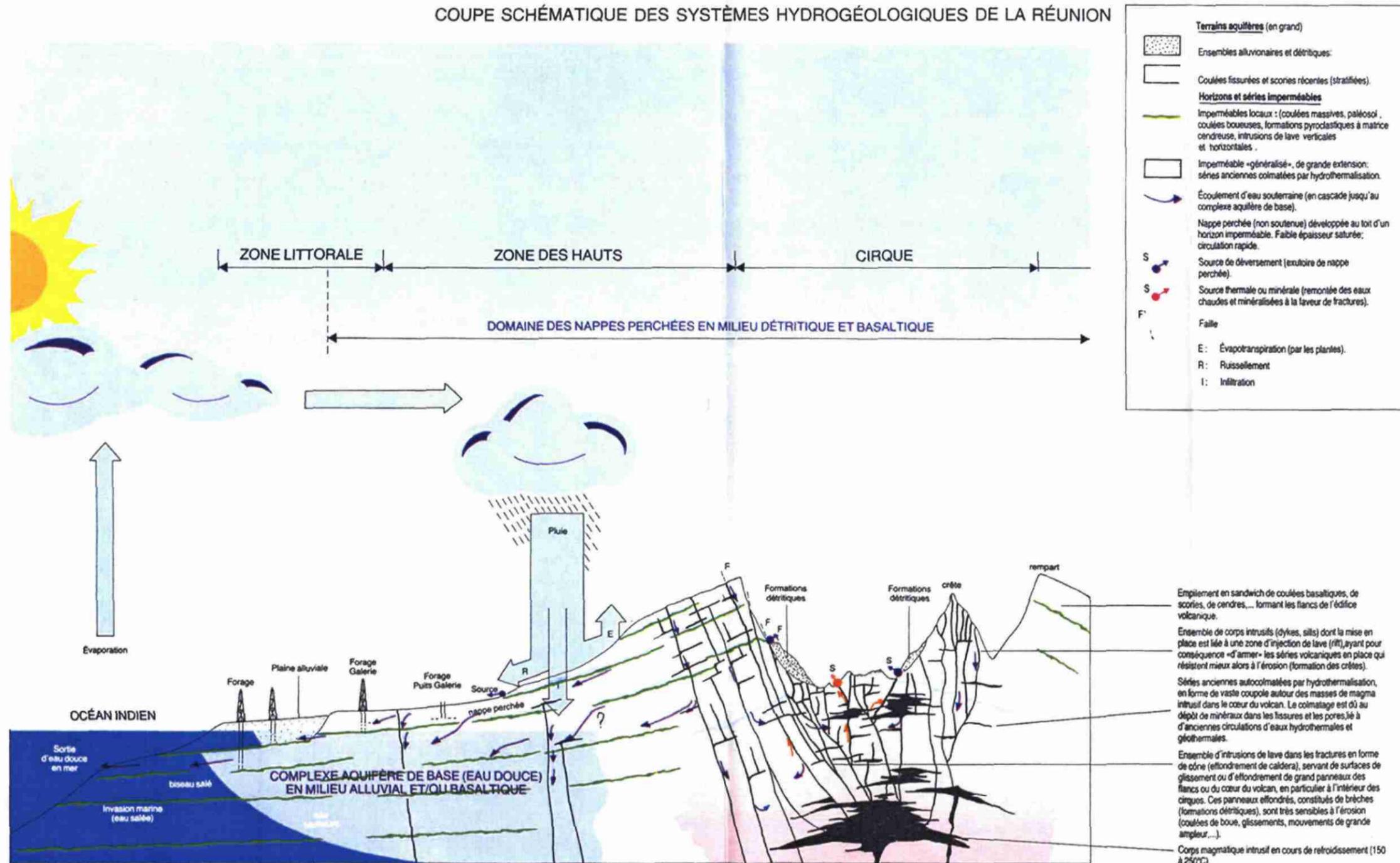


Illustration 1 – schéma conceptuel des entités hydrogéologique de La Réunion (d'après atlas hydrogéologique de La Réunion 1986 modifié)

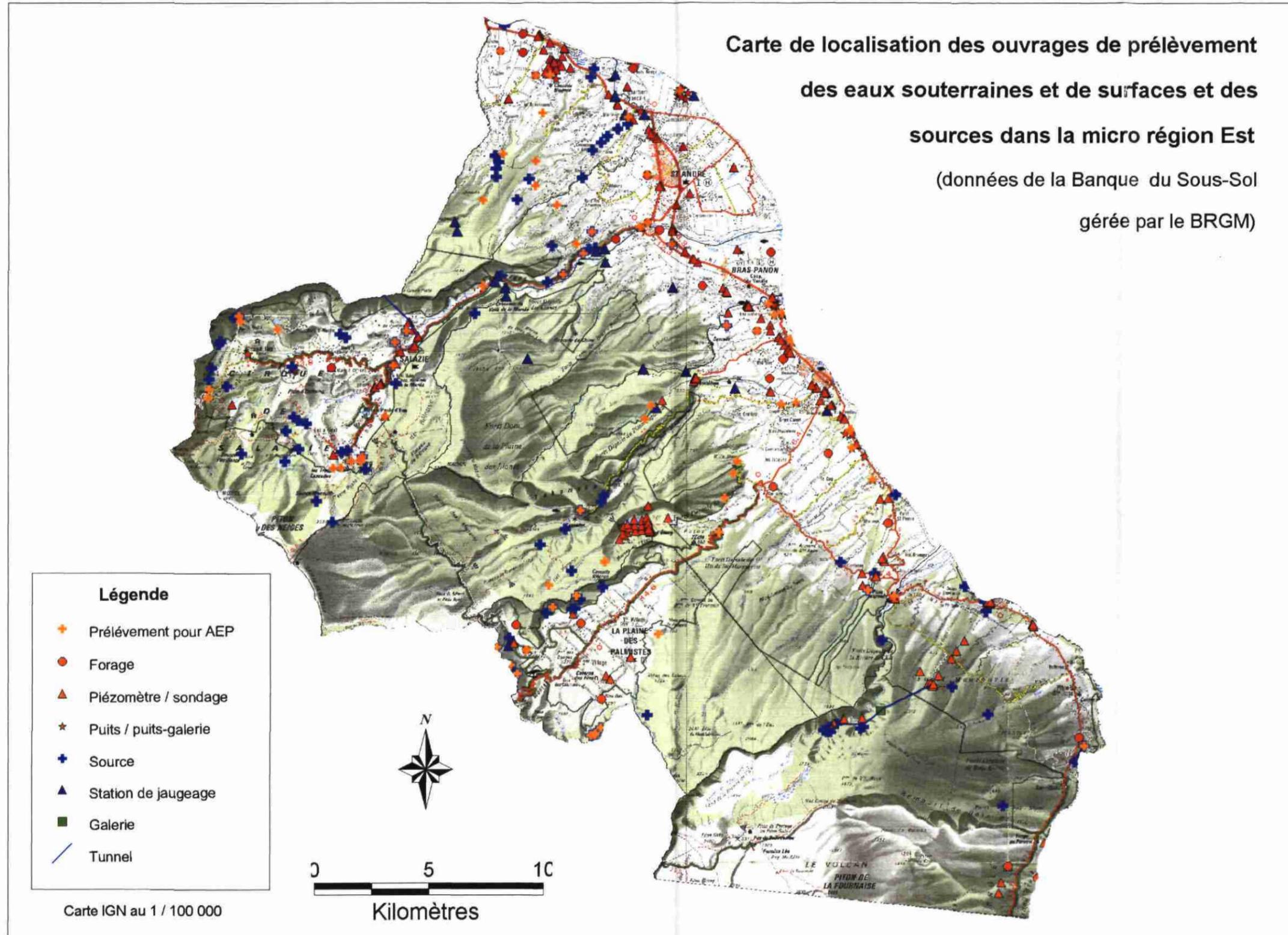


Illustration 2 – répartition des ouvrages de prélèvement des eaux souterraines et de surfaces et des sources dans la micro région Est

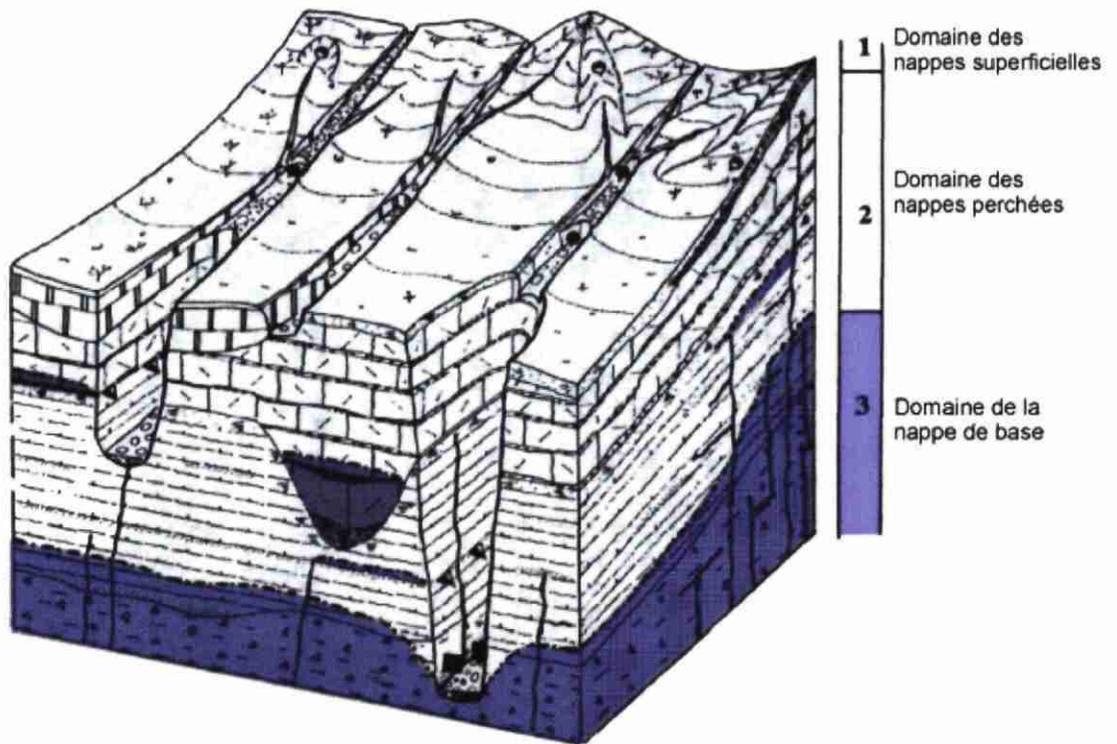


Illustration 3 – Cadre morphostructural des émergences des nappes d'altitude (Join, 1991)

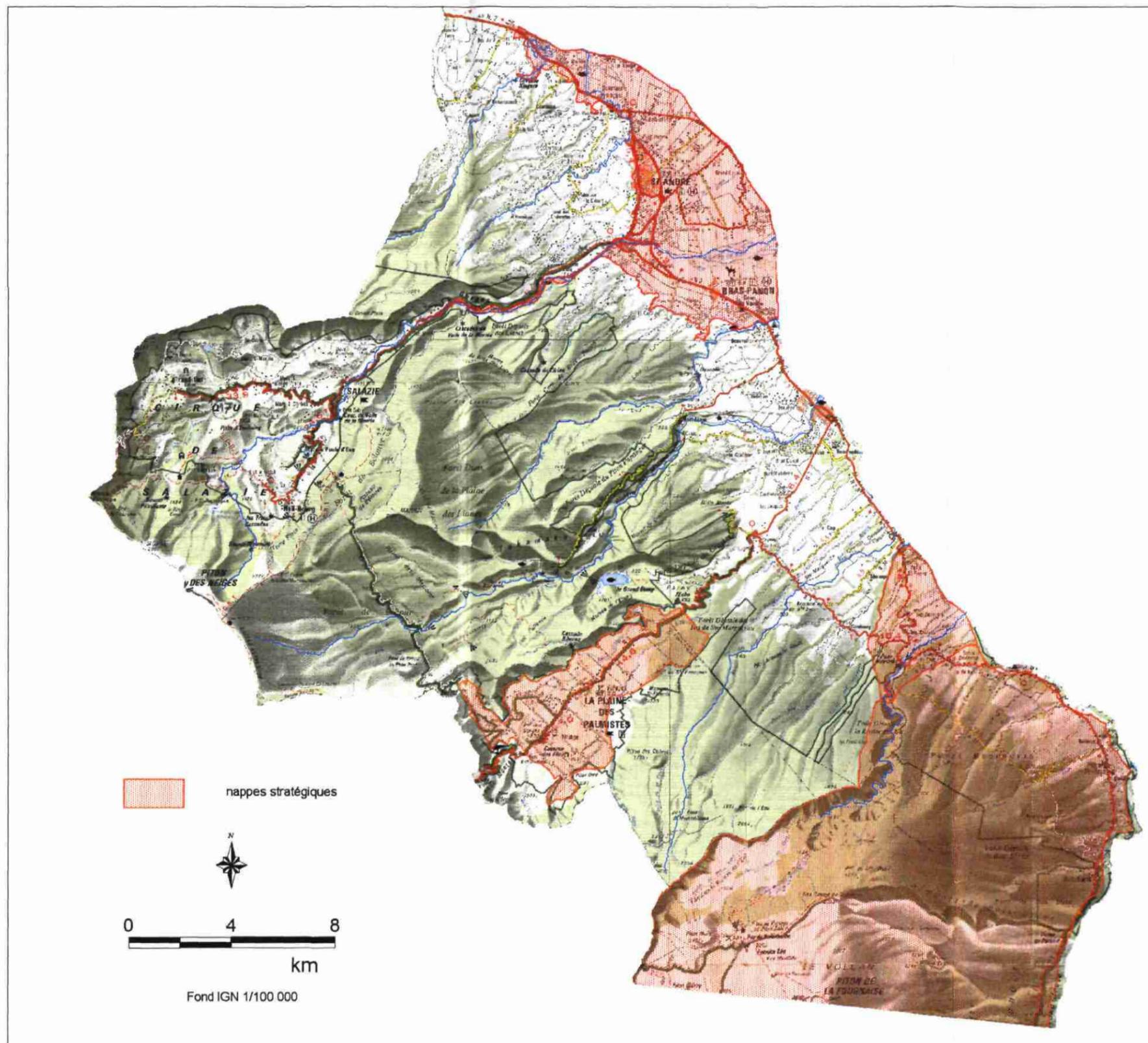


Illustration 4 – Localisation des aquifères stratégique telles que définies par le SDAGE de l'Est de La Réunion

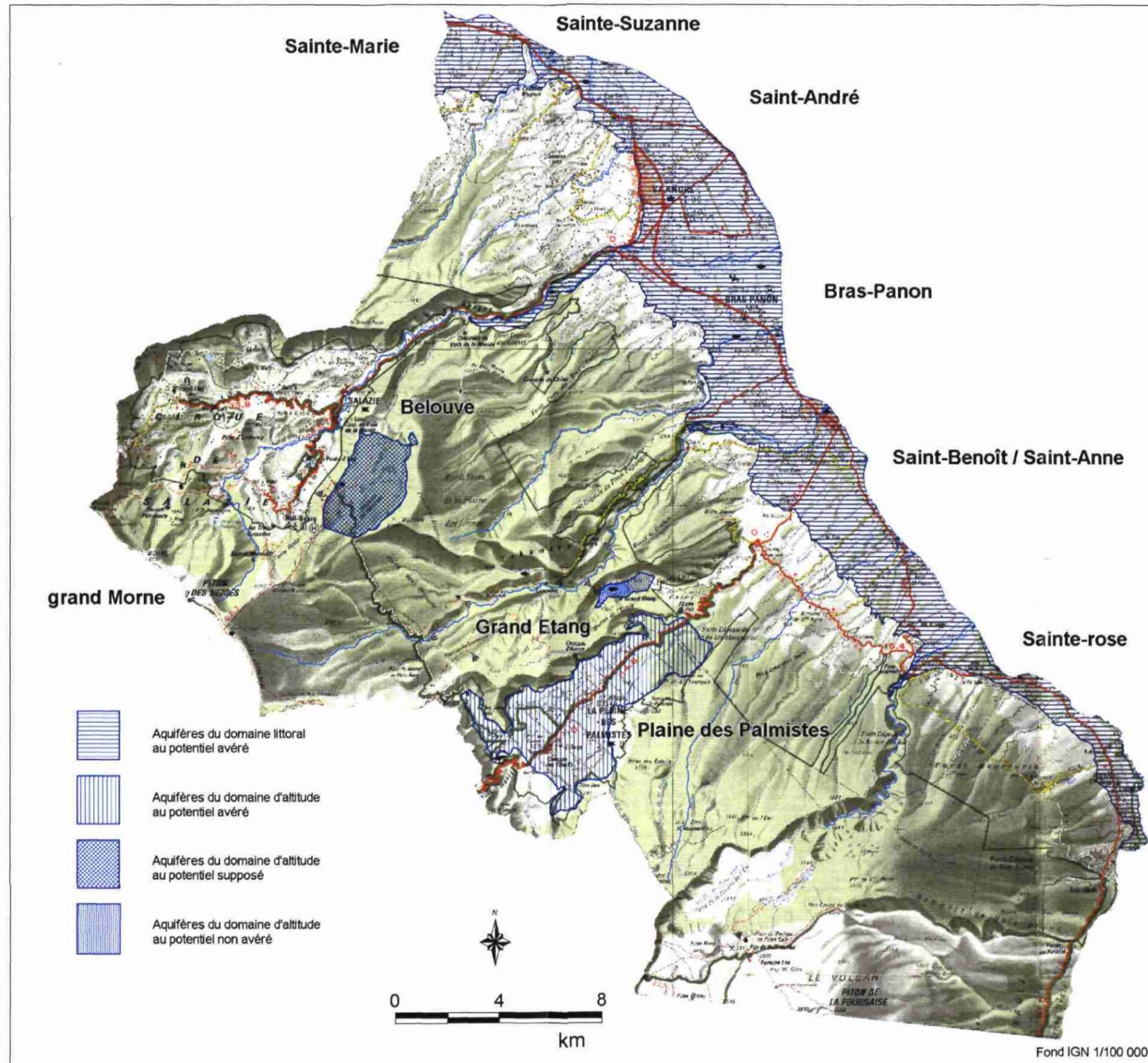


Illustration 5 – localisation des aquifères de l'Est de La Réunion

3. Les aquifères de l'Est de La Réunion

3.1. LE SYSTÈME AQUIFÈRE DE SAINTE-MARIE

Le système aquifère de Sainte-Marie s'étend de la Rivière des Pluies à la Rivière Sainte-Suzanne (Cf. Illustration 5). Il appartient au domaine littoral. Ses nappes font partie de la nappe de base et sont contenues dans des terrains volcaniques et / ou alluviaux. SOGREAH (1998) distingue :

- la couverture pédologique qui constitue un réservoir superficiel ;
- les coulées récentes de phase III et IV qui sont fortement perméables et qui représentent des axes de drainage potentiels vers la partie aval de la planèze ;
- les terrains anciens de la phase II dont les caractéristiques hydrogéologiques sont complexes : niveaux perméables (empilement coulées/scories), niveaux imperméables (paléosols, niveaux scoriacés altérés, tufs...), géométrie chaotique.

Les variations piézométriques de ce système aquifère sont rapides et d'ampleur métrique après les forts événements pluvieux. Ce comportement s'explique par :

- une alimentation par les aquifères perchés peu profonds (coulées de lave volcanique récentes) ;
- un écoulement dans les paléoravines au sein de la planèze ;
- des temps de transfert rapides de quelques jours à quelques semaines.

Aucun aquifère de Sainte-Marie n'a été défini comme stratégique (Cf. Illustration 4) mais les forages réalisés au sein de ces aquifères sont très productifs (jusqu'à 370 m³.h⁻¹).

Le secteur compris entre la Rivière des Pluies et la Rivière Sainte-Suzanne a fait l'objet d'une modélisation hydrodynamique. Les termes du bilan hydrologique pour la période s'étendant de novembre 96 à novembre 97 sont : précipitations : 493 Mm³ / an, évaporation : 148 Mm³ / an, ruissellement direct : 21 Mm³ / an, écoulement des rivières vers la mer : 229 Mm³ / an, infiltration vers la nappe : 88 Mm³ / an, variation du stock : 5 Mm³ / an, écoulement de la nappe vers la mer : 75 Mm³ / an, prélèvement : 8.3 Mm³ / an.

3.2. LE SYSTÈME AQUIFÈRE DE SAINTE-SUZANNE

Le système aquifère de Sainte-Suzanne s'étend de la Pointe de Bel Air à la Rivière Saint-Jean (Cf. Illustration 5). Il appartient au domaine littoral. Ses nappes font partie de la nappe de base et sont contenues dans des terrains volcaniques et / ou alluviaux.

Varniol et Lenclud (1999) subdivise ce secteur en trois parties :

- une large zone alluviale se développant vers le Nord et s'évasant selon une forme deltaïque au niveau de la pointe des Hazières ; les forages de Belle Eau et de Bel Air y sont implantés ;
- de part et d'autre de ces formations alluviales, un aquifère principalement basaltique ;
- la limite de ces deux systèmes aquifères est marquée par des alternances verticales d'alluvions et de basaltes ; le forage du Chemin Grimm recoupe ce type de formation.

Les coulées volcaniques basaltiques de la phase II du Piton des Neiges sont probablement altérées et constituent un substratum hydrogéologique. Les nappes sont majoritairement contenues dans des formations alluviales, mais aussi dans des coulées volcaniques basaltiques de la phase III du Piton des Neiges. Les potentialités hydrogéologiques de ces deux aquifères sont comparables. Tous deux sont protégés par des coulées boueuses ou des tufs imperméables qui les recouvrent.

Les nappes contenues au droit des formations alluviales ont été définies comme aquifère stratégique de La Réunion (Cf. Illustration 4). Les forages réalisés au sein de ces aquifères sont très productifs ($200 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ à Bel Air et $150 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ au forage du Chemin Grimm).

La zone comprise entre la Rivière des Pluies et la Rivière Sainte-Suzanne a fait l'objet d'une modélisation mathématique. Les termes du bilan hydrologique pour la période s'étendant de novembre 96 à novembre 97 sont : précipitations : $493 \text{ Mm}^3 / \text{an}$, évaporation : $148 \text{ Mm}^3 / \text{an}$, ruissellement direct : $21 \text{ Mm}^3 / \text{an}$, écoulement des rivières vers la mer : $229 \text{ Mm}^3 / \text{an}$, infiltration vers la nappe : $88 \text{ Mm}^3 / \text{an}$, variation du stock : $5 \text{ Mm}^3 / \text{an}$, écoulement de la nappe vers la mer : $75 \text{ Mm}^3 / \text{an}$, prélèvement : $8.3 \text{ Mm}^3 / \text{an}$.

L'aquifère inférieur du cône alluvial de la Rivière du Mât a fait l'objet d'une modélisation mathématique (ARMINES, 1994) entre Sainte-Suzanne et Bras-Panon, de la côte jusqu'à 130 m d'altitude. Le débit d'alimentation de cette nappe est estimé à $67 \text{ Mm}^3 / \text{an}$.

3.3. LE SYSTÈME AQUIFÈRE DE SAINT-ANDRÉ

Le système aquifère de Saint-André s'étend globalement de la Grande Rivière Saint-Jean à la rivière du Mât (Cf. Illustration 5). Il appartient au domaine littoral. Ses nappes font partie de la nappe de base et sont contenues dans des terrains volcaniques et / ou alluviaux.

L'aquifère est essentiellement constitué de dépôts alluviaux qui recouvrent les planèzes où affleurent des coulées volcaniques de phase IV du Piton des Neiges. Une paléovallée comblée par des coulées volcaniques de la phase IV du Piton des Neiges a été mise en évidence (SOGREAH, 1989) entre La Cressonnière et Ravine Creuse.

Trois entités hydrogéologiques distinctes sont distinguées dans cette même étude :

- des nappes perchées dans la région du rempart de la rivière du Mât ;
- un aquifère inférieur qui est contenu, soit exclusivement dans les formations basaltiques qui forment les planèzes, soit dans les formations basaltiques et les alluvions les surmontant. Cet aquifère a fait l'objet d'une modélisation (ARMINE, 1994) ;
- un aquifère supérieur probablement multicouches, contenu dans les formations alluviales associées à la rivière du Mât. Il est situé à une dizaine de mètres de profondeur et son épaisseur varie entre 15 et 30 m. Son extension est limitée au deux tiers aval du cône alluvial.

Les deux derniers systèmes hydrogéologiques cités, sont séparés par des horizons alluviaux limoneux peu perméables. La distinction entre ces deux aquifères se fait selon des caractéristiques piézométriques et non sur leurs caractéristiques lithologiques.

L'alimentation des aquifères du cône de la Rivière du Mât provient des planèzes (notamment de la ravine Sèche et de la ravine Saint-Jean à l'Est de Saint-André), de la rivière du Mât à partir de la cote 50 m NGR et des écoulements profonds issus de l'ensemble des formations volcaniques situées l'amont.

Les nappes contenues au droit des formations alluviales ont été définies comme aquifère stratégique de La Réunion (Cf. Illustration 4). Les forages réalisés au sein de ces aquifères sont très productifs ($500 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ au forage de Ravine Creuse).

L'aquifère inférieur de la région de Saint-André a été modélisé (ARMINES, 1994). Le modèle a pris en compte la zone du cône alluvial de la rivière du Mât entre Sainte-Suzanne et Bras-Panon, de la côte jusqu'à 130 m d'altitude. Le débit d'alimentation de cette nappe est estimé à $67 \text{ Mm}^3 / \text{an}$.

3.4. LE SYSTÈME AQUIFÈRE DE BRAS-PANON

Le système aquifère de Bras-Panon s'individualise entre la Rivière du Mât et celle des Marsouins (Cf. Illustration 5). Il appartient au domaine littoral. Ses nappes font partie de la nappe de base et sont contenues dans des terrains volcaniques et / ou alluviaux. Les nappes contenues au droit des formations alluviales ont été définies comme aquifère stratégique de La Réunion (Cf. Illustration 4).

Des coulées volcaniques de phase IV du Piton des Neiges, des tufs et des cendres affleurent dans les planèzes du secteur et des dépôts sédimentaires forment la bordure littorale. Entre la Rivière des Roches, la Rivière des Marsouins et le littoral, le sous-sol est constitué d'une alternance d'alluvions anciennes et de basaltes.

L'aquifère de Bras-Panon apparaît limité à sa base entre 20 et 30 m de profondeur par des alluvions imperméables ainsi que latéralement et en amont par des coulées boueuses. Ainsi, le forage de Paniandy 2 (N° BSS : 12272X0143 réalisé en 2000 et profond de 323 m de profondeur (côte – 210 m NGR au fond du forage) s'est avéré totalement sec.

Dans la zone de la rivière des Roches, le forage S4 (N° BSS : 12273X0015) met en évidence deux niveaux aquifères : le premier entre 10 et 50 m de profondeur dans des basaltes sains et fracturés, et l'autre entre 50 et 80 m de profondeur dans un encaissant non identifié (Hydroexpert, 2000).

A proximité de la Rivière du Mât, la nappe supérieure est essentiellement alimentée par les pertes de la rivière et les infiltrations directes des pluies. Les nappes inférieures sont alimentées par les planèzes bordant le cône alluvial (ARMINES, 1994). La recharge des nappes inférieures est plus progressive et plus tardive que celle des nappes supérieures.

Les forages réalisés au sein de ces aquifères peuvent être très productif ($450 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ au forage de Paniandy 1, $370 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ au forage de Bengalis, $200 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ aux forages de Bourbier les Hauts et Harmonie). Cependant certaines zones ne sont pas productrices comme l'atteste le forage sec de Paniandy 2.

L'aquifère inférieur du cône alluvial de la Rivière du Mât a fait l'objet d'une modélisation (ARMINES, 1994) entre Sainte-Suzanne et Bras-Panon, de la côte jusqu'à 130 m d'altitude. Le débit d'alimentation de cette nappe est estimé à $67 \text{ Mm}^3 / \text{an}$.

En rive droite de la Rivière du Mât, l'alimentation des nappes supérieures provient de l'infiltration des précipitations et des pertes de la rivière qui interviennent pour 24 à $26 \text{ Mm}^3 / \text{an}$ (ARMINES, 1994).

3.5. LE SYSTÈME AQUIFÈRE DE SAINT-BENOÎT SAINTE-ANNE

Ce système hydrogéologique est compris entre la Rivière des Marsouins et la Rivière de l'Est (Cf. Illustration 5). Il appartient au domaine littoral. Ses nappes font partie de la nappe de base et sont contenues dans des terrains volcaniques et / ou alluviaux.

Les caractéristiques géologiques de ce secteur sont particulièrement hétérogènes. Situé en limite du massif du Piton des Neiges et de celui du Piton de la Fournaise, la zone se caractérise par l'imbrication des coulées des deux massifs volcaniques et par l'existence d'un cône alluvial situé au débouché de la rivière de l'Est. Une campagne de prospection géophysique (CGB, 1990) a mis en évidence un substratum conducteur correspondant vraisemblablement à des formations basaltiques argilisées et peu perméables. La morphologie de ce conducteur montre plusieurs axes bas orientés SW-NE pouvant constituer des axes de drainage des eaux souterraines.

Le forage du Chemin de Ceinture a recoupé 59 m d'alternances de coulées volcaniques basaltiques et de niveaux de scories appartenant à la phase IV du Piton de la Fournaise et 61 m de coulées volcaniques basaltiques plus ou moins altérées interstratifiées de niveaux scoriacées de la phase III du Piton de la Fournaise. Une nappe libre a été mise en évidence à 67.4 m de profondeur. Le forage s'est avéré très peu productif ($6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$). Le forage du Petit Saint-Pierre les Hauts (N° BSS 12278X0058) implanté en 2003 s'est avéré très productif ($350 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$).

Dans un bilan des connaissances hydrologiques et hydrogéologiques sur la commune de Saint-Benoît (CGB, 1988) cinq zones ont été distinguées. Les infiltrations moyennes sont : Rivière des roches (amont de la confluence Bras-Panon) : $36.9 \text{ Mm}^3 / \text{an}$, Rivière des Marsouins en amont de Bethléem : $166 \text{ Mm}^3 / \text{an}$, Massif du Cratère : $34,4 \text{ Mm}^3 / \text{an}$, pentes de Saint-François et de Sainte-Marguerite : $243,4 \text{ Mm}^3 / \text{an}$.

3.6. LE SYSTÈME AQUIFÈRE DE SAINTE-ROSE

Le système aquifère de Sainte-Rose s'étend de la Rivière de l'Est à Bois Blanc voire plus au Sud, au niveau de l'Enclos Fouquet (Cf. Illustration 5). Il appartient au domaine littoral. Ses nappes font partie de la nappe de base et sont contenues dans des terrains volcaniques. Ce système aquifère a été défini comme nappe stratégique (Cf. Illustration 4).

Le forage (N° BSS 12294X0030) implanté dans le secteur de l'Anse des Cascades, à la cote 120 m NGR traverse successivement 166 m de coulées volcaniques basaltiques et de niveaux de scories altérées, 31 m de coulées massives de basalte, 53 m de formation basaltiques sous-marines. Deux aquifères ont été recoupés :

- une nappe supérieure, de 60 à 80 m de profondeur, au toit d'un substratum imperméable constitué de basaltes et de scorie altérés ;
- nappe inférieure, en équilibre hydrodynamique avec les intrusions marines, à partir de 120 m de profondeur (+1.8 m NGR).

La faible concentration de regard sur la nappe (forage, piézomètre) ne permet pas d'appréhender dans le détail le fonctionnement hydrogéologique de la zone.

3.7. HYDROGÉOLOGIE DE LA PLAINE DES PALMISTES

Le système hydrogéologique de la Plaine des Palmistes s'étend sous l'agglomération éponyme (Cf. Illustration 5). Il appartient au domaine d'altitude et certains de ses aquifères ont été définis comme nappe stratégique (Cf. Illustration 4).

La géologie de la Plaine des Palmistes se caractérise par la présence de coulées volcaniques des phases II et III du Piton des Neiges, surmontées localement par des coulées anciennes du Piton de la Fournaise. Plusieurs hypothèses sont avancées pour expliquer la géomorphologie de la zone, elles font soit appel à des structures de glissement soit à des mécanismes d'érosion comparables à ceux qui sont responsables du creusement des cirques.

L'existence d'une vaste paléovallée sous la Plaine des Palmistes a été mise en évidence par des forages de reconnaissance géothermique en 1980 (N° BSS 12276X13 et 12299X23). Cette vallée fossile, en partie encaissée dans les formations de phase I du Piton des Neiges, est comblée sur 200 à 300 m d'épaisseur par des coulées basaltiques issues du massif du Piton de la Fournaise et des édifices volcaniques de la plaine des Cafres.

L'aquifère principal est en partie alimenté par les pertes de la rivière du Bras Noir et par une partie des infiltrations qui se font sur l'îlet Patience, à l'Ouest du village de la Plaine des Palmistes. L'autre partie des infiltrations qui se font sur cet îlet est drainée par le Bras Cabot et la rivière des Marsouin. Les eaux de l'aquifère de la Plaine des Palmistes s'écoulent en direction du Nord Est et une partie d'entre elles émerge dans la zone côtière entre Saint-Benoît et la rivière de l'Est. Par contre, les eaux qui s'infiltrent sur le versant du Piton de la Fournaise circuleraient en profondeur vers le Nord.

Les circulations souterraines peuvent être très rapides. Ainsi, l'amplitude des variations piézométriques du forage S1 (N° BSS 12292X0041) située 1 Km à l'aval de la zone de perte de la rivière du Bras Noir atteint 35 m lors des forts épisodes pluviométriques (Hydroexpert, 2000).

Les forages réalisés au sein des aquifères de la Plaine des Palmistes peuvent être productifs ($80 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ au forage S1 de Petite Plaine (N° BSS 12292X0041), $60 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ au forage S3 de la Plaine des Palmistes (N° BSS 12276S0085). Cependant certaines zones le sont moins comme l'atteste le forage du Bras Creux à la Plaine des Palmistes (N° BSS 12276X0071) ($10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$).

Une synthèse hydrogéologique (CPGF-BRGM, 1991) reprend un bilan hydrologique des bassins versants de la Plaine des Palmistes. Les pluies efficaces pour chacun de ses bassins versants sont : Premier Village-les-Bas : 3774 mm/an, Bras Piton : 3442 mm/an, Deuxième Village : 3794 mm/an, Petite Plaine : 3800 mm/an.

3.8. HYDROGÉOLOGIE DU SITE DE GRAND ETANG

Cet aquifère est situé dans la dépression du site de Grand Etang sur la commune de Saint-Benoît (Cf. Illustration 5). Il appartient au domaine d'altitude et sa nappe est contenue dans des terrains volcaniques et sédimentaires.

Cet aquifère a fait l'objet d'une thèse de troisième cycle (Banton, 1985). Le site de Grand Etang résulte du creusement d'une vallée au sein du massif du Piton des Neiges à l'intérieur de laquelle se sont mis en place des cônes volcaniques appartenant au système du Piton de la Fournaise. Ces cônes, aussi appelé puys, ont formé un barrage naturel qui retient les eaux et à l'arrière duquel se sont accumulés des dépôts alluvio-lacustres et volcaniques.

La nappe est captive sous le Grand Etang et libre en amont et en aval de celui-ci. Le devenir de cette nappe au-delà du Puy de l'Etang n'est pas précisément connue.

Le potentiel d'exploitation de cette nappe n'a pas été mis en évidence par des essais de pompage ou des bilans hydrogéologiques.

3.9. LES AQUIFÈRES DU CIRQUE DE SALAZIE

Les aquifères du Cirque de Salazie appartiennent au domaine d'altitude. Les nappes sont contenues dans des terrains volcaniques ou détritiques.

La configuration actuelle du cirque de Salazie est le résultat d'une succession de phénomènes érosifs, volcaniques et tectoniques qui sont principalement intervenus au cours du stade « différencié ».

Sa morphologie actuelle résulte :

- du creusement d'une ancienne et vaste dépression (le « proto-cirque » de Salazie) ;
- du remplissage de cette dernière par des formations bréchiques et d'épaisses coulées d'ignimbrites et de laves différenciées.

Le fond du cirque est rempli de formations bréchiques massives issues de déstabilisations en masse des formations volcaniques différenciées et du substratum ancien.

La présence de formations détritiques superficielles dans l'ensemble du cirque atteste d'une activité érosive intense.

La plupart des données géophysiques disponibles sur le cirque de Salazie ont été acquises au cours des premières phases exploratoires de l'évaluation du potentiel géothermique à La Réunion entre 1977 et 1986 (Sanjuan et *al.*, 2000). Les profils électromagnétiques montrent que c'est au sein des couches supérieures moyennement résistantes que la probabilité de trouver des aquifères est maximale. En

dessous de ces couches, les terrains conducteurs constitueraient un substratum hydrogéologique.

Les émergences connues peuvent être réparties en « sources de fond de cirque », « sources de pied de rempart » et en « sources de rempart » (Cf. chapitre 2.1.2).

Les ressources intéressantes pour la commune de Salazie se situent au sein du plateau de Bélouve, dans le versant Nord Ouest du massif du Gros Morne (ravine du Chien notamment) ; et dans une moindre mesure au sud de la Mare à Vieille Place et au niveau de la ravine Sèche et de la rivière Fleurs Jaunes.

Un bilan hydrologique effectué sur la base de données très moyennées, donc seulement indicatrices des grandes tendances indique que les émergences dans le cirque auraient un débit cumulé compris entre 69 et 107 Mm³ / an (Moulin et *al.*, 2002).

3.10. HYDROGÉOLOGIE DU PLATEAU DE BÉLOUVE

Le plateau de Bélouve est situé au Sud Est de la commune de Salazie à une altitude de 1400 m d'altitude environ (Cf. Illustration 5). Au niveau du plateau de Bélouve, l'interprétation des prospection géophysique (ANTEA, 2004) a mis en évidence, jusqu'à 400 m de profondeur, limite inférieure des d'investigations, une structure tabulaire relativement homogène et légèrement inclinées vers le Nord-Est.

Trois niveaux aquifères ont été mis en évidence :

- deux aquifères peu productifs entre 1360 et 1200 m d'altitude ;
- un niveau aquifère productif dont les émergences constituent les sources du Voile de la Mariée et les émergences principales du Trou de Fer.

3.11. HYDROGÉOLOGIE DU MASSIF DE PITON DE LA FOURNAISE

En raison de la faible population vivant sur le du massif du Piton de la Fournaise, les forages y sont moins nombreux que sur le massif du Piton des Neiges. Par voie de conséquence, les aquifères de cette zone sont moins bien connus que sur le reste de l'île. Cependant, Join et Coudray (2003) situent ses émergences dans un contexte géostructural identique à celui du massif du Piton des Neiges (nappe de base, nappes perchées).

Les aquifères du massif du Piton de la Fournaise ont été définis comme aquifère stratégique de La Réunion (Cf. Illustration 4) (Cf. chapitre 2).

4. Avis sur le franchissement des ravines

4.1. CONTEXTE GÉOMORPHOGÉOLOGIQUE

Le projet de basculement des eaux de l'Est vers le Nord doit permettre une alimentation en eaux des terres situées vers 400 m d'altitude. Le principe de basculement est figuré sur la carte de l'aléa « mouvements de terrain » à l'échelle 1/100 000 (Cf. illustration 6).

Le projet, long de 25 km environ, recoupe 4 rivières principales qui sont du sud vers le nord : la rivière de l'Est, la rivière des Marsouins, la rivière des Roches et la rivière du Mât.

Ces rivières remarquables sont caractérisées par des berges dont la hauteur croit de l'aval vers l'amont. Vers le littoral, leur hauteur est de quelques mètres à une dizaine de mètres alors que vers l'amont, la hauteur des berges peut atteindre plusieurs centaines de mètres.

Sur leur cours aval, les rivières principales ont un profil en « U » et s'écoulent sur un lit d'alluvions grossières. Sur leur cours amont, le lit des rivières est étroit et présente un profil en « V ». Elles s'écoulent sur des coulées de lave dure ayant résisté à l'érosion.

Entre ces rivières, le projet de basculement recoupe différentes unités morphologiques qui sont :

- la planèze Nord-Est du massif du Piton de La Fournaise entre la rivière de l'Est à la RN 3. La planèze est incisée par des ravines peu profondes : ce sont les ravines des Orangers, Boucherie, Petit Saint Pierre, Sainte Anne, Sainte Marguerite, Saint François ;
- le massif du Cratère qui constitue l'extrémité Sud-Est du massif du Piton des Neiges. Le massif, délimité au nord par la rivière des Marsouins, est accidenté et son réseau hydrographique est dense ;
- les chaînes de Piton Papangue et du Grand Battoir entre la rivière des Marsouins et la rivière des Roches ;
- les reliefs des hauts de Bras Panon au-dessus des secteurs de la Caroline et de Libéria. Le relief est accidenté avec un réseau hydrographique dense : les ravines sont encaissées. Sur ce secteur, les formations géologiques anciennes du massif du Piton des Neiges sont recouvertes par des cendres épaisses ;
- le Cap Argile entre le Bras des Lianes et la rivière du Mât. Ce relief est constitué par de puissantes coulées volcaniques massives ;
- la planèze de Saint -André inclinée vers le Nord-Est.

Le projet de basculement des eaux de l'Est vers le Nord nécessitera donc de franchir un nombre important de ravines. Ce sont :

- les grandes ravines ou rivières qui atteignent l'océan. Quelque soit le tracé retenu, la canalisation franchira ces dernières ;
- les ravines qui incisent les planèzes Sud, de Sainte-Anne et de la Plaine des Palmistes, et Nord (planèzes de Saint-André). Ces ravines sont peu profondes ;
- les nombreuses ravines incisant les massifs du Cratère et des Hauts de Bras Panon. Ces ravines présentent des profils irréguliers et ont un aspect de « canyon » avec leur succession de replats et de bassins. Ces ravines se jettent dans les grandes rivières et peuvent être contournées par un tracé aval.

4.2. LE FRANCHISSEMENT DES RIVIÈRES OU GRANDES RAVINES

Après le passage des cyclones, de nombreuses conduites d'eau sont arrachées par des éboulements ou par des ravinements. Ces dégâts sont constatés dans les berges des ravines et au droit des franchissements des lits des rivières où les conduites sont arrachées par les eaux en crue.

Le choix du tracé doit tenir compte de l'exposition de la canalisation aux aléas naturels. Cette dernière peut être exposée aux mouvements de terrain (chutes de pierres et éboulements au droit des berges). Pour les grandes rivières, des reconnaissances géologiques préliminaires devront être engagées dans les zones de franchissement potentiel afin d'éviter les zones d'érosion actives et de repérer les portions de berge stables où la canalisation pourra être ancrée ou enterrée.

Dans les lits de rivière, la canalisation devra être enterrée soit dans le substratum rocheux soit dans un massif béton noyé dans les alluvions.

L'implantation de la conduite doit également tenir compte des difficultés techniques de pose. Les berges peuvent, de par leur hauteur ou leur caractère instable, rendre les opérations de pose délicates et onéreuses.

De même, la pose d'une canalisation dans un lit de rivière peut présenter des difficultés si l'écoulement est pérenne. La construction de batardeaux est alors nécessaire.

Pour ces raisons, le franchissement des grandes rivières sera plus aisé dans les zones où les berges sont saines, d'hauteur réduite et dans les zones où le lit de la rivière est stable.

Rappelons que le franchissement des rivières peut être aérien en utilisant des ouvrages existants (ponts) ou construits spécifiquement pour le projet.

4.3. LE FRANCHISSEMENT DES RAVINES DES PLANÈZES

Les ravines de la planèze entre la rivière de l'Est et le massif du Cratère ne présentent pas de difficultés particulières : elles sont peu encaissées et le lit est le plus souvent de nature rocheuse.

Les ravines de la planèze de Saint André s'incisent plus profondément vers l'aval, c'est le cas du Bras des Chevrettes, de la grande rivière Saint Jean. Un tracé haut, vers l'altitude 400 m, facilitera les franchissements.

4.4. LE FRANCHISSEMENT DES MASSIFS DU CRATÈRE ET DES HAUTS DE BRAS PANON

Ces zones sont difficilement accessibles du fait de leur topographie escarpée. Entre chaque ravine, le tracé empruntera des versants pentus plus ou moins sensibles à l'érosion. Ces zones sont actuellement en espace de forêt.

L'implantation d'une conduite dans ces zones imposera des reconnaissances préliminaires détaillées afin d'optimiser le choix du tracé et évaluer correctement les difficultés liées au franchissement des ravines (profils des cours d'eau, repérage des zones rocheuses, recensement des zones instables, ..etc).

4.5. AVIS PRÉLIMINAIRE

Ce premier examen du franchissement des ravines par un ouvrage destiné à transférer les eaux de l'Est vers le Nord, montre que les difficultés seront croissantes avec l'altitude. Les conditions de franchissement seront très contraignantes si le tracé devait emprunter des berges à fort dénivelé (plusieurs centaines de mètres de hauteur) et/ou de stabilité précaire.

En altitude, le réseau hydrographique est plus dense et le nombre de ravine à franchir y sera donc plus élevé. En revanche, vers le littoral, le tracé peut être implanté sur des zones alluvionnaires planes ou moins escarpées.

Pour visualiser la complexité de pose d'une conduite d'eau de grand diamètre de l'Est vers le Nord, nous avons défini une zone à contrainte moyenne à forte (Cf. illustration 6). Sur cette même figure, nous avons figuré, à titre indicatif, un projet de tracé aval contournant à la fois les massifs du Cratère et des Hauts de Bras Panon.

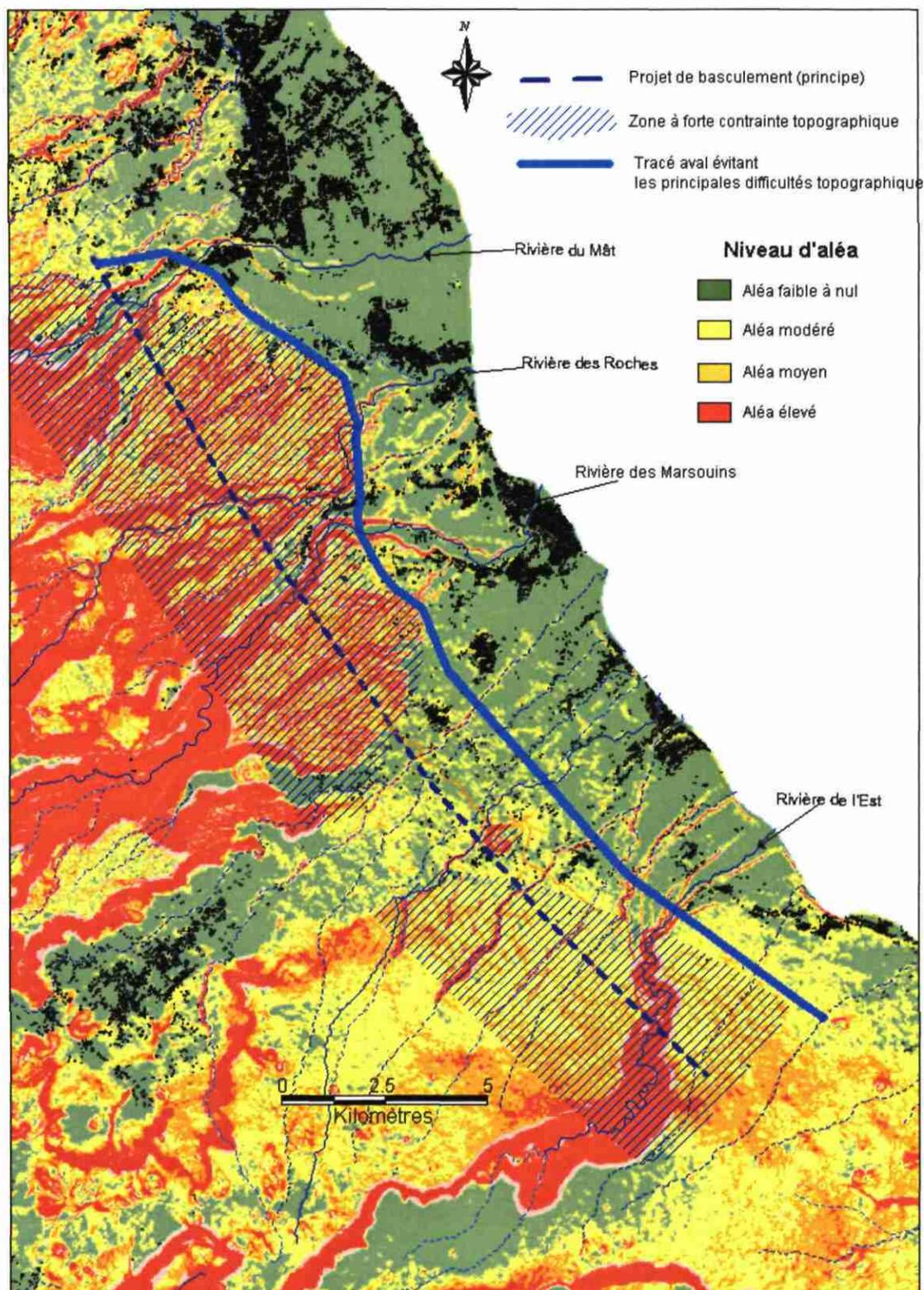


Illustration 6 - Report du projet de basculement des eaux sur la cartographie de l'aléa "mouvement de terrain" à l'échelle 1/100 000.

5. Conclusions

Le présent rapport constitue un état d'avancement de l'étude sur la quantification des volumes d'eau souterraine mobilisable sur la micro-région Est sur la base des données existantes. Un avis a également été donné sur le franchissement des ravines et rivières par l'ouvrage destiné à transférer les eaux de l'Est vers le Nord.

Ce document comprend :

- un inventaire bibliographique des principales études hydrogéologiques menées sur la micro-région Est ;
- une typologie simplifiée des aquifères de La Réunion ;
- la caractérisation des principaux aquifères de chaque commune de la micro-région Est.

La quantification des volumes d'eaux souterraines mobilisable sur la micro-région Est et l'identification des études et investigations à mener pour améliorer la connaissance hydrogéologique de la zone d'étude seront abordées au cours de la phase 2 de l'appui du BRGM à La Région.

L'examen du franchissement des ravines par un ouvrage destiné à transférer les eaux de l'Est vers le Nord, montre que les difficultés seront croissantes avec l'altitude. La construction de cette conduite sera très contraignante si son tracé devait emprunter des berges hautes de plusieurs centaines de mètres.

Un tracé vers 200 m d'altitude permettrait de franchir les rivières principales sans difficultés majeures et éviter les massifs du Cratère et des hauts de Bras Panon où existent de nombreuses ravines encaissées.

Des reconnaissances géologiques et géotechniques préliminaires devront être lancées pour optimiser l'implantation du tracé et éviter les zones soumises à des mouvements de terrain.

6. Inventaire bibliographie

Les références précédées d'un astérisque sont mentionnées dans le texte.

***ANTEA (2004)** - Prospection hydrogéologique et géophysique du plateau de Bélouve. 33569/B

***ARMINES (1994)** – Etude par modèle mathématique de l'aquifère inférieur de la région de Saint-André

***Banton (1985)** – Etude hydrogéologique d'un complexe alluvial en pays volcanique, sous climat tropical, site du Grand Etang, île de La Réunion. Université des Sciences et Techniques du Languedoc. Thèse de 3^{ème} cycle

Barcelo (1996) – Analyse des mécanismes hydrologiques en domaine volcanique insulaire tropical à relief jeune. Apports à la connaissance du bilan hydrique. Massif du Piton de la Fournaise (île de La Réunion). Thèse de Doctorat, Université Montpellier II, 265 p. + annexes.

BCEOM (1990) – Etude de faisabilité de galeries drainantes, Plaine des Palmistes, Plaine des Cafres. A.90/10

Billard G. (1988) – Bilan des connaissances hydrologiques et hydrogéologiques actuelles sur la commune de Saint-Benoît. 88 CGB 06

Billard G (1989) – Réalisation de sondages piézométriques. Suivi géologique. Piézomètre P12. Pierrefonds. 89 CGB 07

Billard G. (1990) – Reconnaissance géophysique en vue de l'amélioration des ressources en eau de la commune de Saint-Benoît. 90 CGB 02

Billard G. (1991) – Etude du potentiel aquifère de la Plaine des Palmiste. CPGF-Horizon.

Billard G. (1998) – Réalisation de forages de reconnaissance en petit et en gros diamètre. Suivi géologique. Forage S3. Plaine des Palmistes (12276X0085). 98 CGB 07

Billard G. (1998) – Réalisation de forages de reconnaissance en petit et en gros diamètre. Suivi géologique. Forage S3. Plaine des Palmistes (12276X0085). 98 CGB 07

BRGM (1999) - Etude de vulnérabilité des captages destinés à l'alimentation en eau potable à La Réunion (commune de Saint-André) Rapport BRGM/R-40549-FR

CGG (1999) – Prospection géophysique par méthodes électrique et électromagnétique sur le secteur de la Petite Plaine.

***Coudray (2003)** – Gestion intégrée des eaux à La Réunion : vision d'ensemble et problèmes clef. Géologue. N°137 - pp. 69 – 78

Courteaud M. (1996) – Etude des structures géologiques et hydrogéologiques du massif de la Fournaise par la méthode audiomagnétotellurique. Thèse, Sciences de la terre, Université de La Réunion, avril 1996, 212 p. + ann.

***CPGF-BRGM (1991)** – Etude du potentiel aquifère de la plaine des Palmistes. Notes préliminaires. Etude 3887

***CPGF-BRGM (1991)** – Etude du potentiel aquifère de la Plaine des palmistes. Notes préliminaires. Etude 3887.

Daesslé (1988) – Bilan des connaissances et définition du programme d'études et de travaux dans la plaine alluviale de la Rivière du Mât. Rapport BRGM - 88REU31

Folio (2001) – Distribution de la perméabilité dans le massif du Piton de la Fournaise : apport à la connaissance du fonctionnement hydrogéologique d'un volcan-bouclier. Thèse de Doctorat Université de La Réunion, 148 p. + annexes.

Grunberger (1989) – Etude géochimique et isotopique de l'infiltration sous climat tropical contrasté, massif du Piton des Neiges, île de La Réunion. Thèse de Doctorat Université Paris XI, 197 p.

***Varniol et Lenclud (1999)** – Sainte-Suzanne (Réunion). Secteur de Bel Air. Prospection géophysique complémentaire. Synthèse hydrogéologique. HORIZONS. Etude IC21.

HPC Envirotec (1996) – Reconnaissance de l'aquifère perché mis en évidence par le sondage S2 « Bras-Creux ». Tentative de définition d'un compartiment plus productif. HPC-F 950043

***Hydroexpert (2000)** – PDRE. Bilan et synthèse hydrogéologique de quinze années de recherche. RP00H070/B

***Join (1991)** – Caractérisation hydrogéologique du milieu volcanique insulaire. Le Piton des Neiges – île de La Réunion. Thèse de Doctorat Université Montpellier II, 197 p. + annexes.

***Join et Coudray (2003)** – Hydrogéologie du massif de la Fournaise. Géologue. N° 137 - p.p. 78 – 83

Lemoine Y., Billard G., Siwertz E. (1994) – Etude du cône alluvial de la Rivière du Mât. Reconnaissance géophysique par sondages électriques et gravimétrie. Etude 4335

Lemoine Y., Billard G., Siwertz E. (1994) – Recherche en eau dans la région Nord Saint-Benoît. Reconnaissance géophysique.

Moulin M., Lebon D., Frissant N. (2002) – Synthèse hydrogéologique du Cirque de Salazie (Ile de La Réunion). Rapport BRGM/RP-51450-FR, 91 p., 35 figs., 11 tabs., 4 ann.

ORE (1998) – Bilan hydrologique du bassin versant du Bras Panon.

***Sanjuan B., Traineau H., Rançon J.-Ph., Demange J. (2000)** – Le potentiel géothermique de l'île de La Réunion. Bilan des connaissances et perspectives. Rapport BRGM / RP-50388-FR

***SOGREAH (1989)** – Etude de la nappe alluviale de la Rivière du Mât (communes de Saint-André et de Saint-Benoît). Rapport de phase I. 6 0467

SOGREAH – SOGELBERG (1991) – Etude de la nappe alluviale de la rivière du Mât (communes de Saint-André et Saint-Benoît). Campagne de reconnaissances mécaniques. 6 0467 R2.

***SOGREAH (1998)** – Secteur de Sainte-Marie / Sainte-Suzanne. Elaboration d'un modèle mathématique de gestion des ressources en eau souterraine dans le secteur compris entre Rivière des Pluies et Rivière Sainte-Suzanne. Rapport de première phase. Recueil et synthèse des données hydrogéologiques. 10 4029 R2

***SOGREAH (1998)** – Secteur Sainte-Marie / Sainte-suzanne. Elaboration d'un modèle mathématique de gestion des ressources en eau souterraine dans le secteur compris entre Rivière des Pluies et Rivières Sainte-Suzanne. Rapport de seconde phase. Modèle Mathématique. 104029 R3

Stieltjes L., Gourgand B. et Steenhoudt M. (1998) – Modes de circulation et de gisement de l'eau souterraine dans un volcan bouclier basaltique. Exemple de l'île de la Réunion, milieu océanique tropical – Hydrogéologie, n°2, 1988, pp. 83-94.

Violette (1993) – Modélisation des circulations d'eau dans le volcan de la Fournaise : approche du bilan hydrologique et des échanges thermiques. Thèse de Doctorat Université Paris VI, 159 p.