

Document à accès immédiat

**Contribution à l'évaluation des volumes prélevables
(EVP) des formations volcaniques du littoral Nord -
FRLG101.
Phase 1 – Diagnostic, bilan et conceptualisation en
vue de la réalisation d'un modèle de simulation
hydrodynamique en régime transitoire**

Rapport final

BRGM/RP-71143-FR

1er août 2022

Étude réalisée dans le cadre des opérations de service public du BRGM
AP20SDN024

Laurent L. et Aunay B.

Vérificateur :	Approbateur :
Nom : Etienne Buscarlet	Nom : Kévin Samyn
Fonction : Hydrogéologue	Fonction : Directeur régional – La Réunion
Date : 03/05/2022	Date : 30/05/2022
Signature : 	Signature : 

Le système de management de la qualité et de l'environnement du BRGM
est certifié selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.
Contact : qualite@brgm.fr

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctq> ou par ce code :



Mots clés : Eau ; hydrogéologie ; modélisation ; bilan ; piézométrie ; Gardénia ; aquifère ; pluviométrie ; nappe ; volcanique ; La Réunion

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

Laurent L. et Aunay B. (2022) – Contribution à l'évaluation des volumes prélevables (EVP) des formations volcaniques du littoral Nord - FRLG101.

Phase 1 – Diagnostic, bilan et conceptualisation en vue de la réalisation d'un modèle de simulation hydrodynamique en régime transitoire. Rapport final. **BRGM/RP-71143-FR**, 92 p.

Synthèse

Dans le cadre d'une convention de recherche et de développement, le BRGM intervient sur l'évaluation des volumes prélevables (EVP) des formations volcaniques du littoral nord. Cette première phase, d'un projet qui en compte trois, a permis de faire un diagnostic, des bilans et une conceptualisation en vue de la réalisation d'un modèle de simulation hydrodynamique en régime transitoire qui servira à déterminer et mettre en œuvre des scénarios de gestion de la ressource en eau.

En 2019, une évaluation de l'état quantitatif des Masses d'Eaux Souterraines (MESO), réalisée par l'Office de l'eau, indique que plusieurs MESO font état d'un risque de non atteinte des objectifs environnementaux et notamment la MESO FRLG101 – Formations volcaniques du littoral Nord qui fait l'objet de cette étude.

Le littoral nord est soumis à d'importantes pressions sur la ressource en eau, avec des tendances à la baisse sur 4 piézomètres et un déséquilibre entre les volumes prélevés et la recharge. Il a été mis en évidence un état quantitatif médiocre de cette ressource sur les communes de Saint-Denis et Sainte-Marie. Le secteur de Sainte-Suzanne et Saint-André n'est pas concerné par ce déséquilibre quantitatif.

Cette étude s'est déroulée en plusieurs étapes :

- La première étape consistait à collecter et analyser des données provenant de la bibliographie et de bases de données (BSS, Météo France, Office de l'eau). Il s'agissait de données climatiques, géologiques, hydrogéologiques, géophysiques, hydrologiques, topographiques et de prélèvements ;
- Dans un second temps, une acquisition de données complémentaires sur le terrain a été réalisée. Il s'agissait de jauger des cours d'eau en période d'étiage. Ce travail a permis de localiser les zones d'infiltration alimentant le domaine souterrain et d'identifier les ravines en eaux ou sèches à cette période. En parallèle de ces mesures visuelles, les différents captages ont pu être visités ;
- Enfin, un schéma conceptuel du fonctionnement hydrodynamique de la zone d'étude a été réalisé. Il permet de localiser les différents flux entrants et sortants sur la zone d'étude.

Les principaux résultats de cette étude sont les suivants :

- Le complexe aquifère régional qui est capté pour l'AEP par forage est présent sous toute la zone d'étude. Son gradient est de l'ordre de 1 à 6 ‰ et la pente topographique est de l'ordre de 15 à 25 %, l'épaisseur de zone non-saturée est donc importante dans les hauts de la zone d'étude (elle peut atteindre plus de 1 000 mètres) ;
- Le complexe aquifère est alimenté par l'infiltration des précipitations, par déversement des nappes perchées et par l'infiltration depuis les cours d'eau ;
- La géologie est caractérisée par un empilement de basalte et de scories qui se développe sur les planèzes et qui se prolonge sous des formations alluvionnaires localisées en pied de pente au niveau des exutoires des cours d'eau ;
- Des paléovallées ont pu être distinguées, il s'agit d'axe de drainage des eaux souterraines.

Tous ces éléments sont essentiels pour bâtir le modèle hydrogéologique lors de la phase suivante. Outre le fait de préciser les caractéristiques hydrogéologiques du système aquifère, ils soulignent en particulier les spécificités des processus de recharge du système aquifère (dont épaisseur de ZNS très élevée, déversement des nappes perchées, infiltration depuis les cours d'eau) qu'il conviendra de bien prendre en compte dans les simulations pour représenter de manière pertinente la dynamique du système aquifère et ainsi fiabiliser la détermination des volumes prélevables.

Sommaire

1. INTRODUCTION	9
1.1. ELEMENTS DE CONTEXTE DU PROJET EVP	9
1.2. OBJECTIFS	10
2. CONTEXTE	11
2.1. CLIMATOLOGIE.....	11
2.2. GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE	13
2.2.1. <i>Planète</i>	16
2.2.2. <i>Littoral</i>	16
2.2.3. <i>Grands encaissements</i>	17
2.3. HYDROLOGIE	17
2.3.1. <i>Cours d'eau pérennes</i>	18
2.3.2. <i>Cours d'eau temporaires</i>	19
2.4. CONTEXTE SPECIFIQUE : LE PROJET D'IRRIGATION DU LITTORAL OUEST (ILO).....	21
2.4.1. <i>Galerie Salazie amont - GSAM</i>	21
2.4.2. <i>Galerie Salazie Aval - GSAV</i>	22
2.4.3. <i>Conséquence sur les écoulements naturels</i>	23
3. DONNEES ET INTERPRETATIONS.....	24
3.1. DONNEES CLIMATIQUES	24
3.1.1. <i>Pluviométrie</i>	24
3.1.2. <i>Evapotranspiration</i>	26
3.2. DONNEES GEOLOGIQUES.....	27
3.2.1. <i>Coupes géologique de forage</i>	27
3.2.2. <i>Géologie dans la bibliographie</i>	31
3.2.3. <i>Bilan</i>	32
3.3. DONNEES HYDROGEOLOGIQUES.....	33
3.3.1. <i>Piézométrie</i>	33
3.3.2. <i>Emergence de sources</i>	38
3.3.3. <i>Gradient hydraulique</i>	38
3.3.4. <i>Propriétés hydrodynamiques</i>	39
3.3.5. <i>Carte piézométrique</i>	42
3.3.6. <i>Bilan</i>	43
3.4. VALORISATION DES DONNEES ISSUES DE L'IDPR.....	44
3.4.1. <i>Principe</i>	44
3.4.2. <i>Interprétation des données</i>	45
3.5. VALORISATION DES DONNEES DE GEOPHYSIQUE AEROPORTEE ISSUE DE LA CAMPAGNE D'AEM.....	47
3.5.1. <i>Principe de mesure</i>	47
3.5.2. <i>Interprétation des données d'AEM</i>	48
3.5.3. <i>Bilan</i>	59
3.6. GEOMETRIE DES FORMATIONS GEOLOGIQUES AQUIFERES.....	60
3.6.1. <i>Formations basaltiques aquifères</i>	60
3.6.2. <i>Formations alluvionnaires aquifères</i>	60
3.6.3. <i>Nappes perchées</i>	60
3.6.4. <i>Formations particulières</i>	61
3.6.5. <i>Bilan</i>	61
3.7. DONNEES HYDROLOGIQUES.....	62
3.7.1. <i>Mesures en continu du débit des cours d'eau de l'Office de l'eau</i>	62
3.7.2. <i>Jaugeages des cours d'eau</i>	64
3.7.3. <i>Bilan</i>	69

4. ALIMENTATION DU COMPLEXE AQUIFERE REGIONAL	70
4.1. CONTEXTE	70
4.2. SIMULATION ET ESTIMATION.....	71
4.2.1. Infiltration des cours d'eau	71
4.2.2. Infiltration sur les planèzes	74
4.3. BILAN	76
5. PRELEVEMENTS	77
5.1.1. Prélèvements pour l'alimentation en eau potable (AEP)	77
5.1.2. Prélèvements industriels et agricoles	86
5.1.3. Bilan	86
6. SCHEMA CONCEPTUEL	87
7. CONCLUSION	88
8. BIBLIOGRAPHIE	90

Liste des figures

Figure 1 : Evaluation de l'état quantitatif (Office de l'eau Réunion, 2019).....	9
Figure 2 : Cumul moyen annuel de précipitation à La Réunion (Source : Météo France)	11
Figure 3 : Normales mensuelles par secteur de l'île (Météo France, 2021)	12
Figure 4 : Carte géologique au 1 / 100 000 (BRGM/LGSR, 2006).....	14
Figure 5 : Profils topographiques	15
Figure 6 : Schéma conceptuel de la géologie et de l'hydrogéologie de la zone d'étude (Modifié à partir de Join et al., 2005)	17
Figure 7 : Carte du réseau hydrographique (Source : BD Carthage).....	20
Figure 8 : Carte de présentation du basculement des eaux (Aunay et al., 2012).....	21
Figure 9 : Aire d'alimentation possible de la galerie GSAM (Aunay et al., 2012).	22
Figure 10 - Relation entre le débit de la rivière des Pluies au pont Domenjod et les infiltrations (Office de l'eau, 2008a).....	23
Figure 11 : Stations pluviométriques retenues pour la présente synthèse (Source : IGN)	25
Figure 12 : Cumul mensuel de l'évapotranspiration mesurée à la station Météo-France de l'aéroport Gillot.....	26
Figure 13 : Forages disposants de coupes géologiques (BRGM/LGSR, 2006)	29
Figure 14 : Coupe géologique sur la commune de Sainte-Marie (Aunay et al., 2010).	31
Figure 15 : Chroniques piézométriques disponibles	33
Figure 16 : Forages étudiés disposant d'un suivi de piézométrie sur la zone d'étude.....	35
Figure 17 : Description quantitative des chroniques piézométrique	36
Figure 18 : Représentation graphique de l'épaisseur de la zone non saturée au droit du forage en fonction de la distance séparant le forage d'un cours d'eau.	37

Figure 19 : Représentation graphique de l'épaisseur de la zone non saturée au droit du forage en fonction de la distance séparant le forage de l'océan en fonction.	37
Figure 20 : Histogramme des distributions des transmissivités.....	40
Figure 21 : Représentation cartographique des transmissivités (BRGM/LGSR, 2006)	41
Figure 22 : Schéma hydrogéologique régional et piézométrie du complexe aquifère régional sur Saint-Denis et Sainte-Marie.....	42
Figure 23 : Réseau hydrographique naturel, réseau de talwegs et IDRP correspondant	44
Figure 24 : Représentation cartographique de l'IDPR.....	46
Figure 25: vues du système SkyTEM® ; (a) arrière et (b) avant de la boucle émettrice et (c) en plein vol.....	48
Figure 26 : Représentation 3D des données (Logiciel : Paraview).....	49
Figure 27 : Représentation 3D des données AEM (Gamme de résistivité : 50 - 100 Ohm.m) ...	51
Figure 28 : Représentation 3D des données AEM (Gamme de résistivité : 500 - 2000 Ohm.m)	52
Figure 29 : Représentation 3D des données AEM (Gamme de résistivité : 0 - 8 Ohm.m).....	54
Figure 30 : Représentation 3D des données AEM (Gamme de résistivité : 0 - 8 Ohm.m) sur le secteur de Quartier-Français.....	55
Figure 31 : Représentation en coupes des données AEM (Gamme de résistivité : 0 - 2000 Ohm.m).....	57
Figure 32 : Représentation en profondeur du mur des paléovallées (Gamme de résistivité : 50 - 100 Ohm.m)	58
Figure 33 : Stations hydrométriques de l'Office de l'eau (Source fond de carte : IGN).....	63
Figure 34 : Bilan hydrométrique de la rivière des Pluies réalisé par l'Office de l'eau en Octobre 2005.....	64
Figure 35 : Cours d'eau secondaires jaugés en septembre 2021	68
Figure 36 : Simulation des débits mesurés sur la rivière Saint-Denis.....	72
Figure 37 : Volumes infiltrés à l'échelle des masses d'eau souterraines (Office de l'eau, 2019)	75
Figure 38 : Estimation de la recharge à l'échelle des masses d'eau souterraine (Office de l'eau, 2019).....	75
Figure 39 : Localisation des captages pour l'AEP.....	78
Figure 40 : Volumes produits et consommés sur la commune de Saint-Denis.....	79
Figure 41 : Rendement des réseaux sur la commune de Saint-Denis	80
Figure 42 : Volumes produits et consommés sur la commune de Sainte-Marie.....	81
Figure 43 : Rendement des réseaux sur la commune de Sainte-Marie.....	81
Figure 44 : Volumes produits et consommés sur la commune de Sainte-Suzanne.....	82
Figure 45 : Rendement des réseaux sur la commune de Sainte-Suzanne.....	82
Figure 46 : Schéma conceptuel de la zone d'étude (pas de temps annuel)	87

Liste des tableaux

Tableau 1 : Débits moyens, en saisons sèches et en saisons humides des rivières pérennes (Source : données Office de l'eau et DEAL).....	19
Tableau 2 : Stations pluviométriques retenues pour la présente synthèse	24
Tableau 3 : Données du gradient interpolé de l'ETP sur le Nord-Est de la Réunion (Chopart et al., 2003).....	27
Tableau 4 : Forages disposant de coupes géologiques	30
Tableau 5 : Gradient hydraulique	39
Tableau 6 : Paramètres hydrodynamiques issus de la bibliographie	40
Tableau 7 : Correspondance des valeurs d'IDPR.....	44
Tableau 8 : Stations hydrométriques de l'Office de l'eau.....	62
Tableau 9 : Synthèse des bilans hydrométriques réalisés par l'Office de l'eau entre les années 1997 et 2005.....	65
Tableau 10 : coefficients d'ajustement « R » de GARDENIA et Nash-Sutcliffe des simulations réalisées	73
Tableau 11 : Données de sortie des simulations.....	73
Tableau 12 : Rapport annuel de délégataire et SDAEP transmises par la CINOR	77
Tableau 13 : Captages d'ESO pour l'AEP	84
Tableau 14 : Captages d'ESU pour l'AEP	85
Tableau 15 : Débit annuel moyen pour les prélèvements industriels.....	86
Tableau 16 : Synthèse de la collecte des données et intégration dans les phases suivantes...	89

1. Introduction

1.1. ELEMENTS DE CONTEXTE DU PROJET EVP

L'état des lieux 2019, porté par l'Office de l'eau et la DEAL, fait état d'un Risque de Non Atteinte des Objectifs Environnementaux (RNAOE) global à l'horizon 2027 pour la Masse d'Eau Souterraine (MESO) FRLG101 – Formations volcaniques du littoral Nord (Office de l'eau Réunion, 2019). La zone concernée est représentée en figure 1.

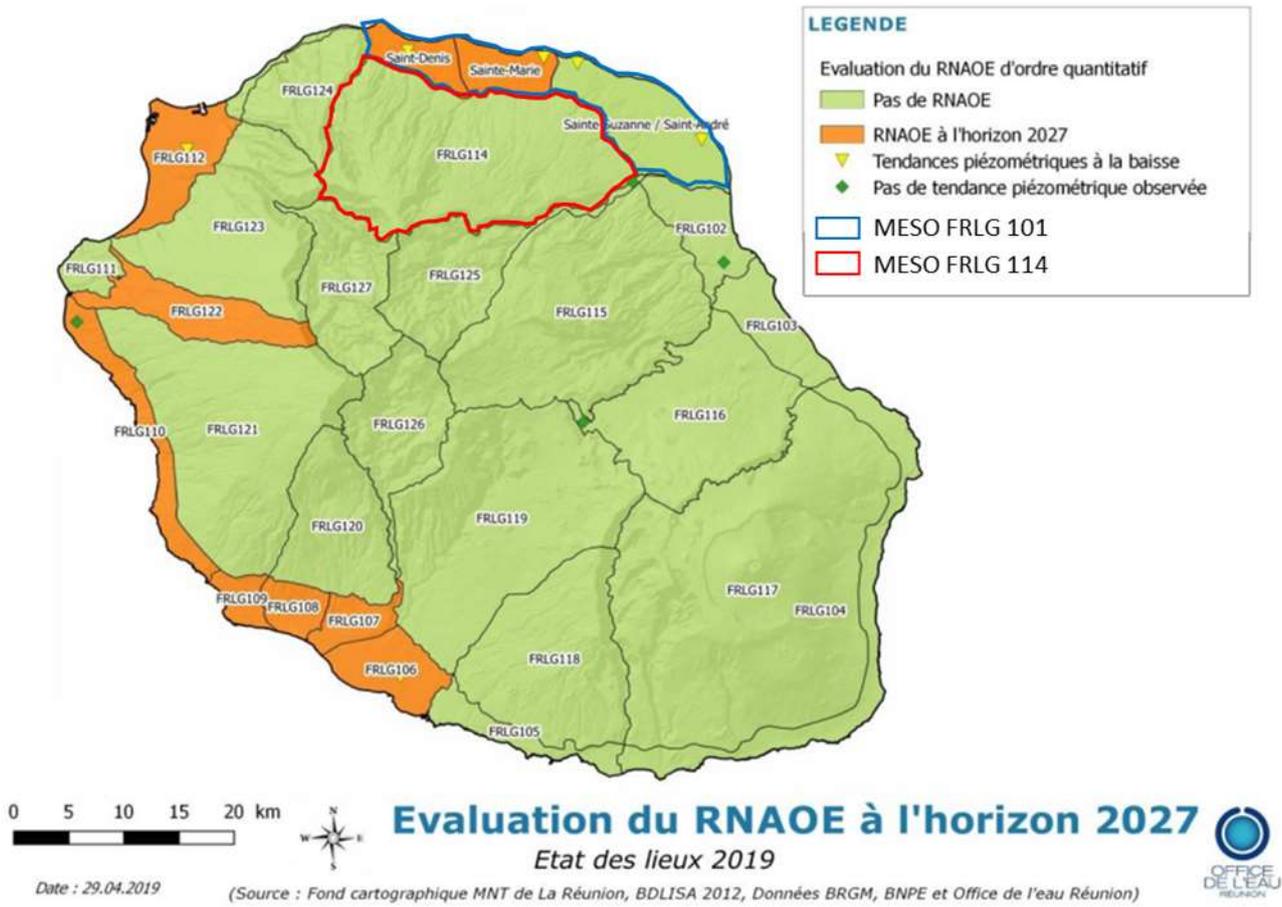


Figure 1 : Evaluation de l'état quantitatif (Office de l'eau Réunion, 2019)

Ce RNAOE est motivé par la mise en évidence d'un état quantitatif médiocre, suite aux résultats du « test balance ». Ce test évalue l'équilibre entre la ressource disponible et les prélèvements. Il s'agit de savoir s'il existe une tendance à la baisse provoquée par les prélèvements (Office de l'eau Réunion, 2019).

Des tendances à la baisse ont été mises en évidence sur 4 piézomètres (S1 Champ Fleuri, P27 Belle Eau, P14 Champ Borne, Piézomètre de la Ravine des Chèvres).

Le ratio prélèvements / recharge est calculé afin de savoir si la masse d'eau souterraine est en équilibre. Dans le guide de Arnaud, 2017 une valeur de 5% est proposé pour le contexte volcanique de La Réunion :

- Ratio < 5% : pas de déséquilibre quantitatif
- Ratio > 5% : déséquilibre quantitatif

Pour le cas de notre secteur d'étude, le calcul du ratio prélèvements / recharge souligne un déséquilibre quantitatif qui affecte les secteurs de Saint-Denis et de Sainte-Marie (ratio = 9%). Les secteurs de Sainte-Suzanne et Saint-André ne sont pas concernés par ce déséquilibre quantitatif (ratio = 2%).

Un niveau de confiance élevé est attribué au résultat du test balance pour cette MESO FRLG101 en raison des tendances à la baisse de la piézométrie.

Ce RNAOE étant établi, il devient nécessaire d'infléchir ce risque en agissant sur la situation d'exploitation des eaux souterraines dans le but d'atteindre le bon état quantitatif à l'horizon 2027. Pour cela, il convient d'objectiver l'état réel de la MESO et de déterminer les volumes d'eau souterraine qui peuvent être prélevés sur le milieu tout en assurant l'équilibre quantitatif de la masse d'eau.

Cette évaluation des volumes prélevables repose principalement sur la réalisation d'une modélisation numérique de l'hydrodynamique en régime transitoire qui permet de déterminer les flux souterrains pour différents états du stock et différentes conditions temporelles (hautes eaux, étiage, années humide ou sèche...). Plusieurs méthodes numériques existent et sont dépendantes de la précision attendue, des données disponibles et des contextes.

1.2. OBJECTIFS

L'élaboration du modèle numérique hydrodynamique répondant à la problématique posée requiert la réalisation successive de trois phases :

- 1- L'élaboration d'un schéma conceptuel d'écoulement reposant sur une synthèse des connaissances et des données géologiques et hydrogéologiques. Cette phase intègre également la réalisation d'un premier bilan hydrologique qui vise à mieux comprendre et à estimer les flux dans les différents aquifères concernés (processus de recharge, prélèvement, vidange...);
- 2- La construction du modèle hydrogéologique avec l'utilisation d'un logiciel dédié à la simulation des écoulements souterrains. Ceci peut passer par une étape préalable de modélisation géologique à l'aide d'un logiciel dédié ;
- 3- La détermination et la mise en œuvre de scénario de gestion de la ressource en eau.

Le présent rapport concerne la première phase de travail qui consiste à réaliser un diagnostic, un bilan et une conceptualisation du fonctionnement hydro(géo)logique en vue de la réalisation d'un modèle de simulation hydrodynamique en régime transitoire pour l'aide à l'évaluation de volumes potentiellement prélevables. Elle est destinée à permettre la réalisation des deux phases suivantes du travail, objectifs sous-jacents principaux de cette première partie. Il est important de souligner ici que la démarche proposée repose sur une approche hydrogéologique et n'intègre pas les étapes de discussion avec les différents acteurs. En effet, la notion de « volume prélevable » est connoté en terme de réglementation et le BRGM n'a pas pour mission de fixer ces valeurs. Il s'agit pour le BRGM de proposer des valeurs de volumes prélevables qui pourront par la suite faire l'objet de discussions et d'échanges avec les différents acteurs de l'eau.

Les objectifs du présent rapport sont les suivants :

- Recensement, collecte et analyse des données en vue de leur intégration dans le futur modèle (données géologiques, hydrogéologiques, hydrologiques, climatologiques, topographiques, de prélèvements, rejets etc.) ;
- Acquisition de données complémentaires par la réalisation de jaugeages sur certains cours d'eau de la zone d'étude ;
- Valorisation des données de géophysique aéroportée ;
- Elaboration d'une synthèse hydrogéologique comportant un schéma conceptuel du fonctionnement hydrodynamique de la zone d'étude.

2. Contexte

La délimitation initiale de la zone d'étude comprenait les secteurs de Sainte-Marie et Saint-Denis (secteurs concernés par la RNAOE). Afin d'avoir une vue d'ensemble des masses d'eau FRLG101 et FRLG114, la zone d'étude a été élargie aux communes de Sainte-Suzanne et de Saint-André jusqu'à la rivière du Mât. Cela ne signifie pas que le modèle sera réalisé sur l'intégralité de ces MESO, mais qu'il est important de replacer les problématiques hydrogéologiques dans un contexte élargi.

2.1. CLIMATOLOGIE

L'île de La Réunion est caractérisée par un climat tropical humide avec des variations spatiales des précipitations. Le contraste spatial des précipitations est identifié principalement de part et d'autre d'un linéaire NNW-SSE divisant la côte au vent à l'Est (très arrosée : 2000 à 9000 mm/an) de la côte sous le vent (moins arrosée : <1000 mm/an) - (Figure 2). En ce qui concerne le contraste temporel, la saison des pluies s'étale de Novembre à Avril et la saison sèche de Mai à Octobre (Figure 3). Lors de passages de dépressions tropicales ou de cyclones, l'île peut recevoir en abondance et sur une très courte période d'importantes précipitations.

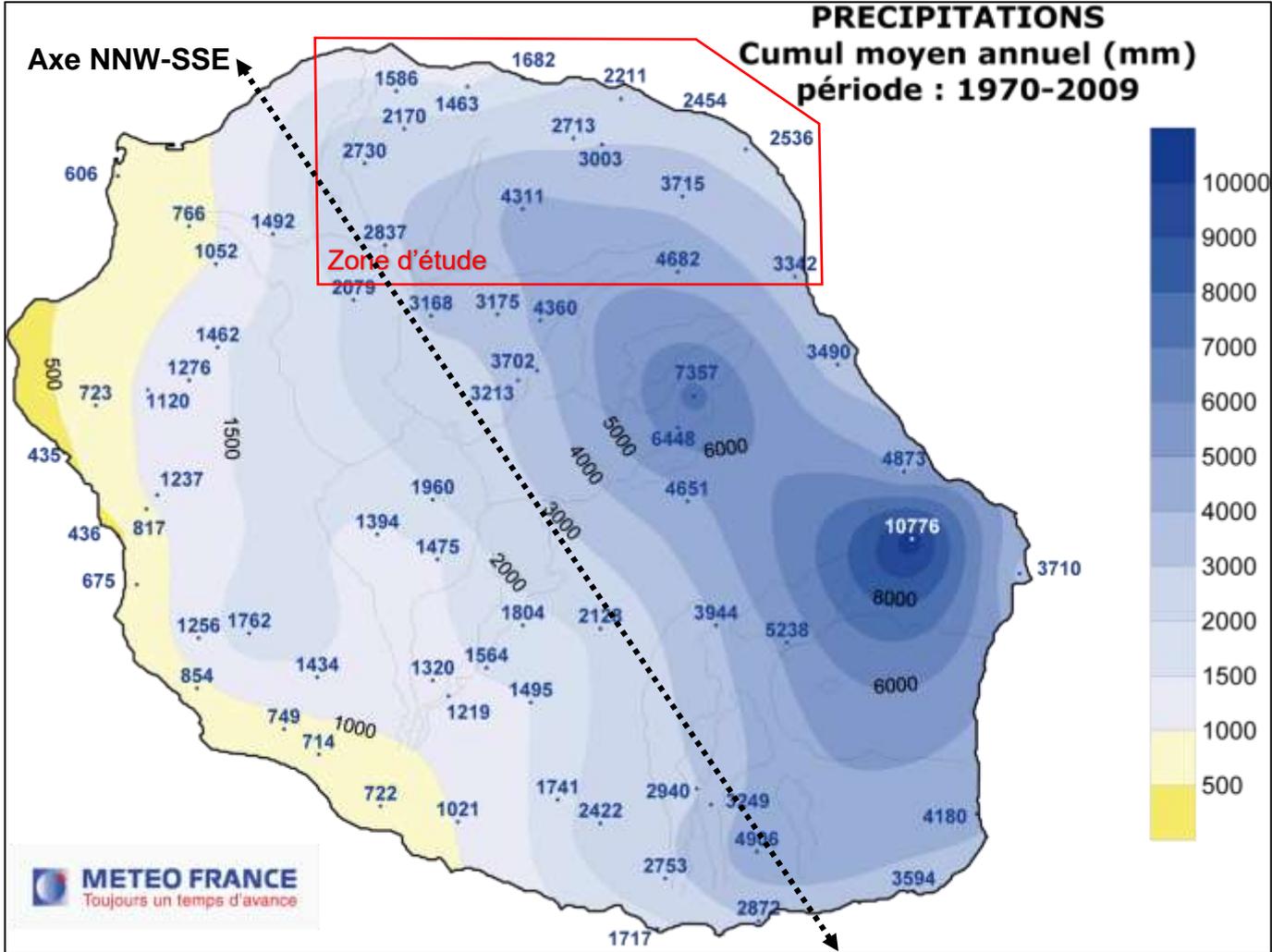


Figure 2 : Cumul moyen annuel de précipitation à La Réunion (Source : Météo France)

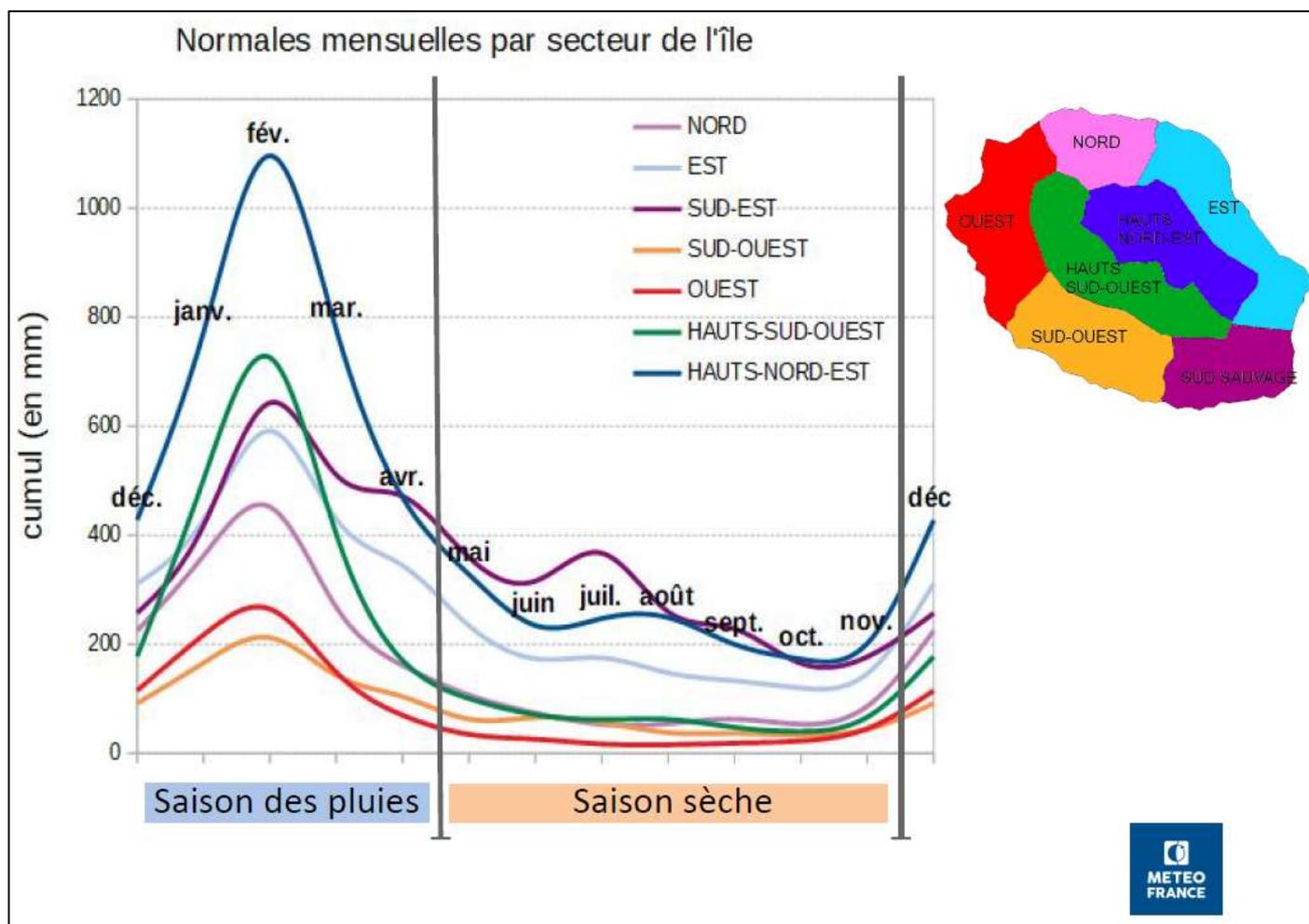


Figure 3 : Normales mensuelles par secteur de l'île (Météo France, 2021)

2.2. GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE

La zone d'étude est comprise entre la rivière Saint-Denis à l'Ouest, la rivière du Mât à l'Est et se prolonge au Sud jusqu'au rempart du cirque de Salazie (Plaine des Chicots et Plaine des Fougères). La morphologie générale du secteur d'étude est celle des pentes externes d'un volcan bouclier (Figure 4, Figure 5 et Figure 6). Deux zones peuvent être distinguées :

- La zone littorale entre la côte océanique et l'altitude 250 m NGR environ ;
- La planèze amont qui correspond au flanc du volcan (Hauts des communes de Saint-Denis, Sainte-Marie, Sainte-Suzanne et Saint-André). Elle s'étend depuis la rupture de pente avec le littoral jusqu'au rempart nord du cirque de Salazie.

La distinction entre ces deux domaines est particulièrement marquée par une très nette rupture de pente dans le paysage (environ 250 m d'altitude).

La géologie de la zone est relativement simple à l'échelle de la carte géologique au 1/100 000 (BRGM/LGSR, 2006). En surface, on distingue sept formations parmi lesquelles des alluvions, des tufs en épandages et des coulées basaltiques. La zone d'étude se situe sur le versant nord du massif du Piton des Neiges où l'on retrouve quelques-unes des différentes phases définies par Billard en 1974 (Billard and Vincent, 1974).

Le sous-sol est traversé par endroit par des coulées en discordance avec l'encaissant (dykes) ou en concordance avec celui-ci (sills).

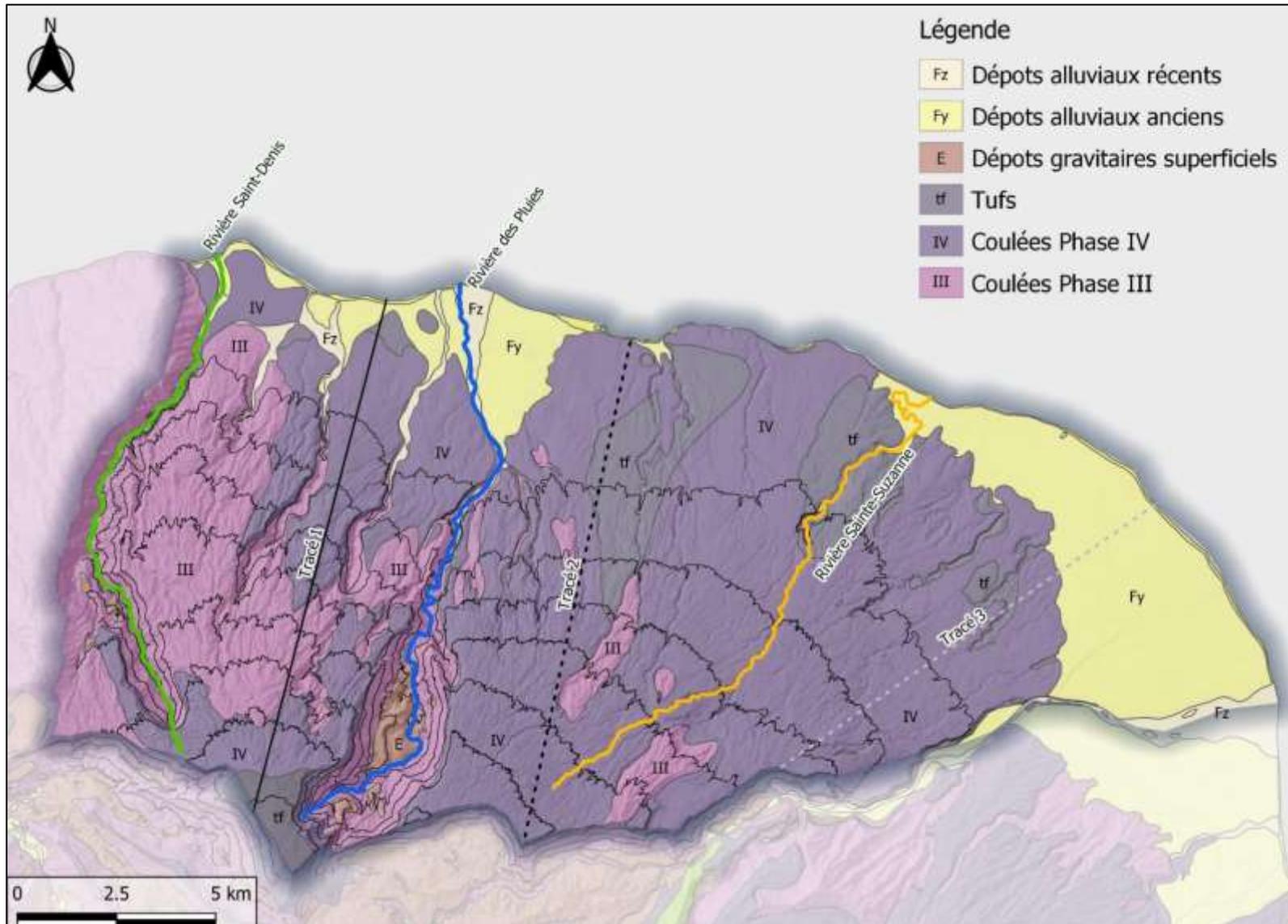


Figure 4 : Carte géologique au 1 / 100 000 (BRGM/LGSR, 2006).

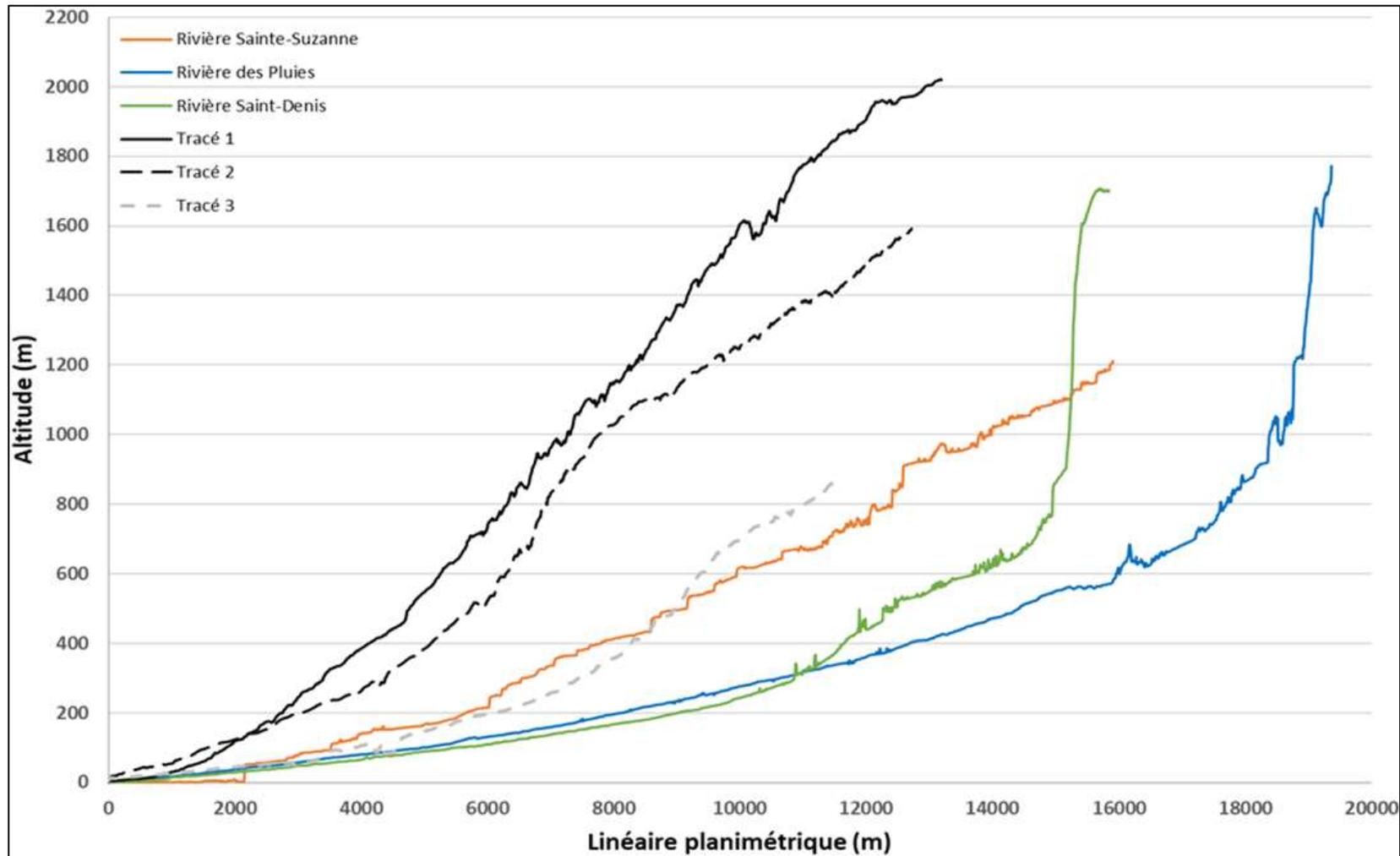


Figure 5 : Profils topographiques
Tracé 1 : planèze de la Roche Ecrite – orientation à N10
Tracé 2 : planèze du Piton Bémassoune / plaine des Fougères – orientation à N10
Tracé 3 : planèze du haut de Menciol – orientation à N45

2.2.1. Planèze

Les planèzes sont composées de coulées récentes de Phase III et IV reposant sur des coulées anciennes et altérées du Piton des Neiges (Phase I et II). Ces empilements de coulées anciennes du bouclier (épaisses de plusieurs centaines de mètres) sont constitués d'alternance d'océanites et de scories, parfois intercalés de paléosols, d'épandages d'alluvions ou de tufs. Ces terrains anciens ont été profondément érodés lors de période de baisse d'activité volcanique. Des alluvions anciennes ont, par la suite, rebouchées ces paléoravines et paléovallées. Puis ces terrains ont été recouverts par les coulées récentes du Piton des Neiges correspondant aux Phase III et IV.

Les eaux météoriques s'infiltrent sur la planèze à travers les terrains récents (Phase III et IV) jusqu'au formations anciennes du bouclier (Phase I et II). Les formations anciennes représentent la limite imperméable (présence de front de zéolitisation¹). Les terrains récents abritent le complexe aquifère régional (Join, 1991), qui possède les caractéristiques suivantes :

- Formations géologiques aquifères hétérogènes ;
- En équilibre hydrostatique avec le niveau marin ;
- Gradient piézométrique faible ;
- Forte transmissivité.

Localement, au sein des coulées récentes, les eaux infiltrées peuvent être interceptées par des niveaux moins perméables (horizons argileux, paléosols) et former des nappes perchées. L'eau de ces nappes peut alors être drainée par des sources de déversements dans les ravines.

D'importantes zones de faiblesses sous la forme de fractures et de fissures sont présentes sur la planèze. Elles permettent la mise en place d'axes préférentiels de drainages où se concentrent les flux.

2.2.2. Littoral

La frange littorale est composée de coulées récentes et de dépôts alluvionnaires. Ces matériaux alluvionnaires ont été canalisés par les cours d'eau avant de s'accumuler au pied des reliefs pour former des plaines alluvionnaires.

Le complexe aquifère régional est présent sur la frange littorale, il est continu et l'épaisseur de la zone non saturée est moins importante qu'au niveau des planèzes.

Les alluvions récentes, dans les lits des cours d'eau actuels, sont peu ou non compactées et très perméables formant des nappes libres, alors que les alluvions anciennes hétérogènes à matrice argileuse et les coulées boueuses, généralement compactées, peuvent être peu perméables. Ces formations peuvent former le toit de nappes captives.

¹ Altération de la roche entraînant une réduction de sa perméabilité.

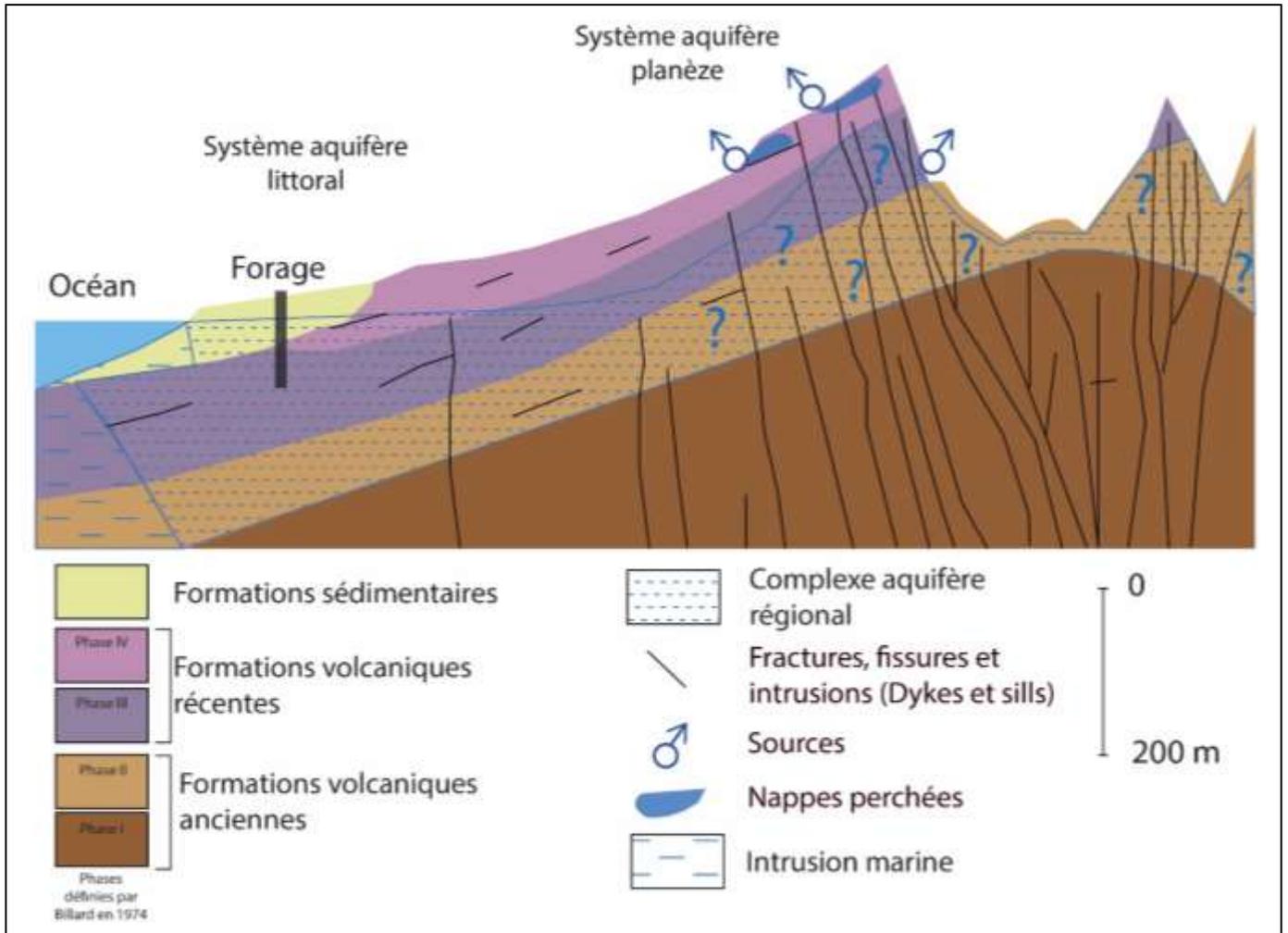


Figure 6 : Schéma conceptuel de la géologie et de l'hydrogéologie de la zone d'étude (Modifié à partir de Join et al., 2005)

2.2.3. Grands encaissements

Les grands encaissements de la rivière des Pluies, de la rivière Saint-Denis et de la ravine du Chaudron ont atteint un niveau hydrogéologique de base qui permet l'installation d'un écoulement de surface permanent alimenté par des sources profondes. En aval, ces rivières présentent une infiltration significative et contribuent à alimenter des axes d'écoulement souterrains préférentiels.

2.3. HYDROLOGIE

Les cours d'eau de la zone d'étude (Figure 7) sont alimentés par les eaux météoriques et par apports d'eaux souterraines. Les relations entre les rivières et les nappes sont variables à l'échelle spatiale. Sur les hauteurs de la planèze, les rivières et ravines sont largement perchées au-dessus des nappes souterraines alors que sur le littoral, elles s'en rapprochent. Lors de fortes précipitations, les rivières et ravines en crues alimentent la nappe souterraine. A l'étiage, les rivières peuvent être rapidement sèches en aval, l'eau s'infiltre et alimente la nappe.

Les cours d'eau sont détaillés d'Ouest en Est dans les paragraphes suivants. Les débits moyens, en saisons sèches et en saison humides sont présentés dans le Tableau 1.

2.3.1. Cours d'eau pérennes

a) *Rivière Saint-Denis*

La rivière Saint-Denis se trouve à l'ouest de la zone d'étude. Cette rivière pérenne prend source au niveau de la cascade de l'entonnoir entre les plaines des Chicots et d'Affouche à une altitude de 1 500 m. La vallée est encaissée, jusqu'à 700 à 800 m d'incision. Le long de ses 14,3 km, la rivière Saint-Denis est alimentée par ses deux principaux affluents qui sont le Bras Guillaume et le Grand Bras. Son bassin versant mesure 30,8 km².

b) *Rivière des Pluies*

La rivière des Pluies se trouve au centre de la zone d'étude. Elle prend source au pied de de la Roche Ecrite. La vallée est très encaissée en amont (jusqu'à 1000 m d'incision) et ouverte dans sa partie aval. Son bassin versant mesure 46 km². Le long de ses 17.3 km la rivière est alimentée par les affluents suivantes :

- Ravine Sèche ;
- Ravine Bachelier ;
- Ravine Kiwi ;
- Ravine Mère-Canal ;
- Ravine Montauban.

c) *Rivière Sainte-Suzanne*

La rivière Saint-Suzanne se trouve à l'est de la zone d'étude. Elle prend source sur la Plaine des Fougères à 1600 m d'altitude. Cette rivière n'est pas marquée par un encaissement important. De nombreux bassins et cascades se trouvent le long de ce cours d'eau. Le bras Laurent en amont est le principal affluent de la rivière Saint-Suzanne. Son bassin versant mesure 30 km² et la longueur du bras principal est de 27km.

d) *Rivière du Mât*

La rivière du Mât se trouve en bordure Est de la zone d'étude. Elle prend source dans le cirque de Salazie et draine tous les flux du cirque. Son bassin versant mesure 130 km². Le long de ses 35 km la rivière est rejointe par les cours d'eau suivants :

- Rivière Fleurs-Jaunes ;
- Bras Caverne ;
- Bras Sec ;
- Bras des Lianes.

Rivière	Station de mesure	Débit moyen (L/s)	Débit en saison sèche (L/s)	Débit en saison des pluies (L/s)	Chronique
Rivière Saint-Denis	Amont captage AEP	500	300	700	1999 - 2020
Rivière des Pluies	Pont Domenjod	1 285	680	1 900	2008-2021
Rivière Sainte-Suzanne	Cascade Niagara Amont	1 200	480	2 200	2012 - 2020
Rivière du Mât	La Rivière du Mât à l'Escalier	5 000	3 500	7 300	1987 - 2020

Tableau 1 : Débits moyens, en saisons sèches et en saisons humides des rivières pérennes (Source : données Office de l'eau et DEAL)

2.3.2. Cours d'eau temporaires

De nombreuses ravines et rivières temporaires se trouvent sur le secteur d'étude. Elles ont la particularité de n'être en eau que sur une courte période allant de quelques jours à quelques semaines et seulement après de fortes précipitations (durant la saison cyclonique).

Entre la rivière Saint Denis et la rivière des Pluies sont présentent les ravines du Butor, de Patates à Durand et du Chaudron. Ces ravines sont marquées par une rupture de pente importante de l'ordre de 200 m pour la ravine du Butor et de 500 m pour la Ravine du Chaudron. Aux pieds de ces ruptures de pente se trouvent des sources pérennes qui alimentent en partie ces cours d'eau. A l'aval de ces résurgences, une partie ou la totalité de l'eau de ces cours d'eau s'infiltré.

Entre la rivière des Pluies et la rivière du Mât se trouvent de nombreuses ravines qui entaillent la planèze. Les ravines les plus importantes sont les suivantes :

- Ravine de la Mare ;
- Ravine des Figues ;
- Rivière Sainte-Marie
- Ravine Charpentier ;
- Ravine à Bardeaux ;
- Ravine des Chèvres ;
- Petite et Grande rivière Saint-Jean ;
- Ravine Sèche.

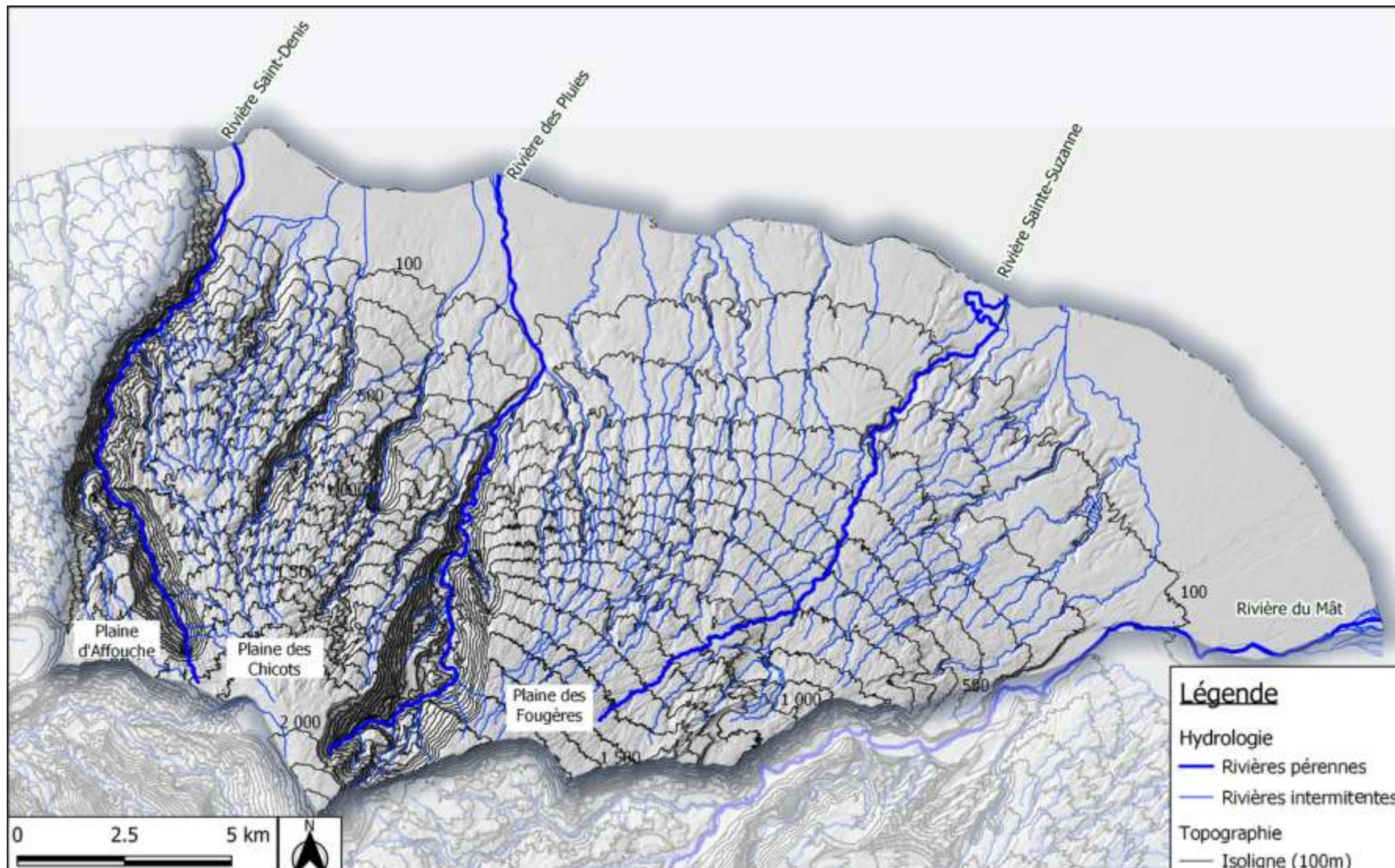


Figure 7 : Carte du réseau hydrographique (Source : BD Carthage).

2.4. CONTEXTE SPECIFIQUE : LE PROJET D'IRRIGATION DU LITTORAL OUEST (ILO)

Afin de palier à l'inégalité de répartition des précipitations et pour soutenir les besoins croissants en eau, un projet de basculement des eaux d'Est en Ouest a été initié dans les années 80. Trois galeries principales acheminent l'eau prélevée dans le cirque de Salazie (rivière du Mât et rivière des Fleurs Jaunes) et dans le cirque de Mafate (Bras Sainte-Suzanne et rivière des Galets) - (Figure 8). Le chantier a débuté en 1983 par le Département et a pour objectifs :

- L'irrigation des terres agricoles dans l'Ouest ;
- La réalimentation de la nappe de la Rivière des Galets ;
- L'amélioration de la desserte en eau potable des communes de l'Ouest.

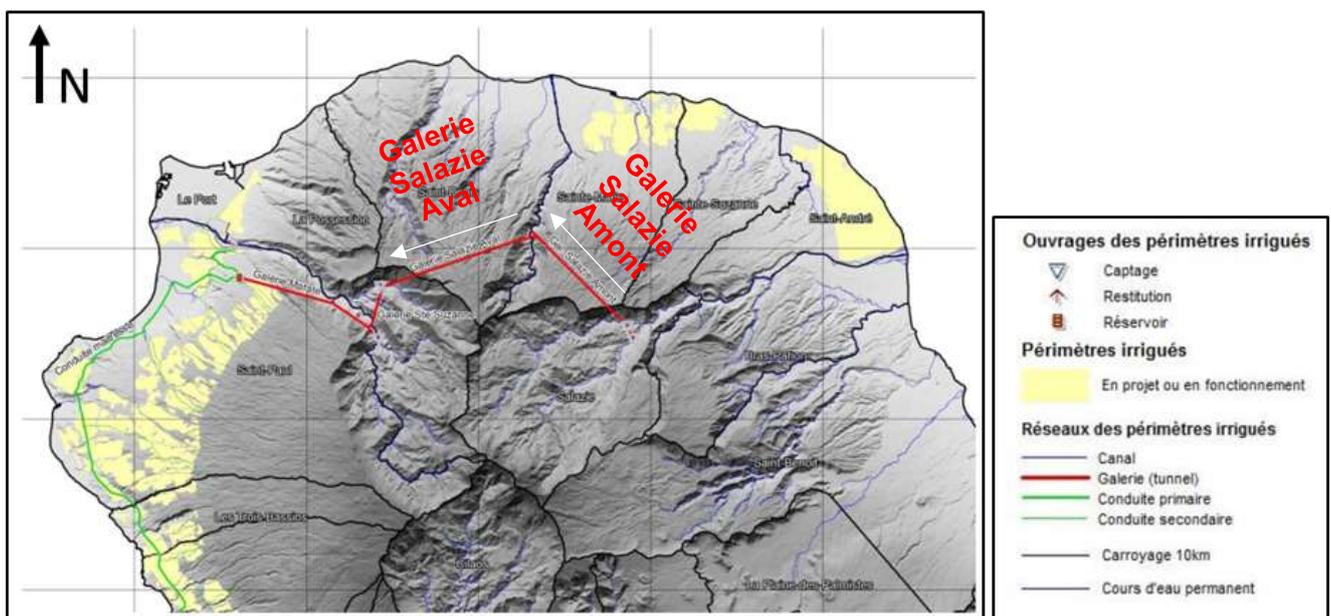


Figure 8 : Carte de présentation du basculement des eaux (Aunay et al., 2012)

2.4.1. Galerie Salazie amont - GSAM

La Galerie de Salazie Amont débute dans le cirque de Salazie au niveau de la prise de la rivière des Fleurs Jaunes et de la rivière du Mât, passe sous la plaine des Fougères et sous la rivière des Pluies au niveau du Piton Tanan.

La galerie a traversé trois zones aquifères sièges d'importantes venues d'eau (Aunay et al., 2012). Le premier aquifère (nommé PM1238) se trouve sous la ravine Tanan, il a provoqué l'arrêt du tunnelier en octobre 2001 suite à une venue d'eau trop importante (> 400 L/s et 18 bars de pression). Le deuxième aquifère (PM3000) d'une longueur de 620 mètres localisé sous la ravine Mère Canal et le troisième aquifère (PM5000) d'une extension latérale de 502 mètres se trouve sous la rivière Sainte-Suzanne. La traversée de ces aquifères s'est traduite par de fortes augmentations des débits d'exhaure de la galerie. Une partie des eaux captées est rejetée dans la Rivière des Pluies à une altitude de 410 m (sous le Piton Tanan).

Ces venues d'eau ont pour origine l'infiltration des précipitations dans la zone non saturée d'une épaisseur de 1 000 mètres. L'aire d'alimentation possible des venues d'eau est de 16km² (Aunay et al., 2012) – (Figure 9).

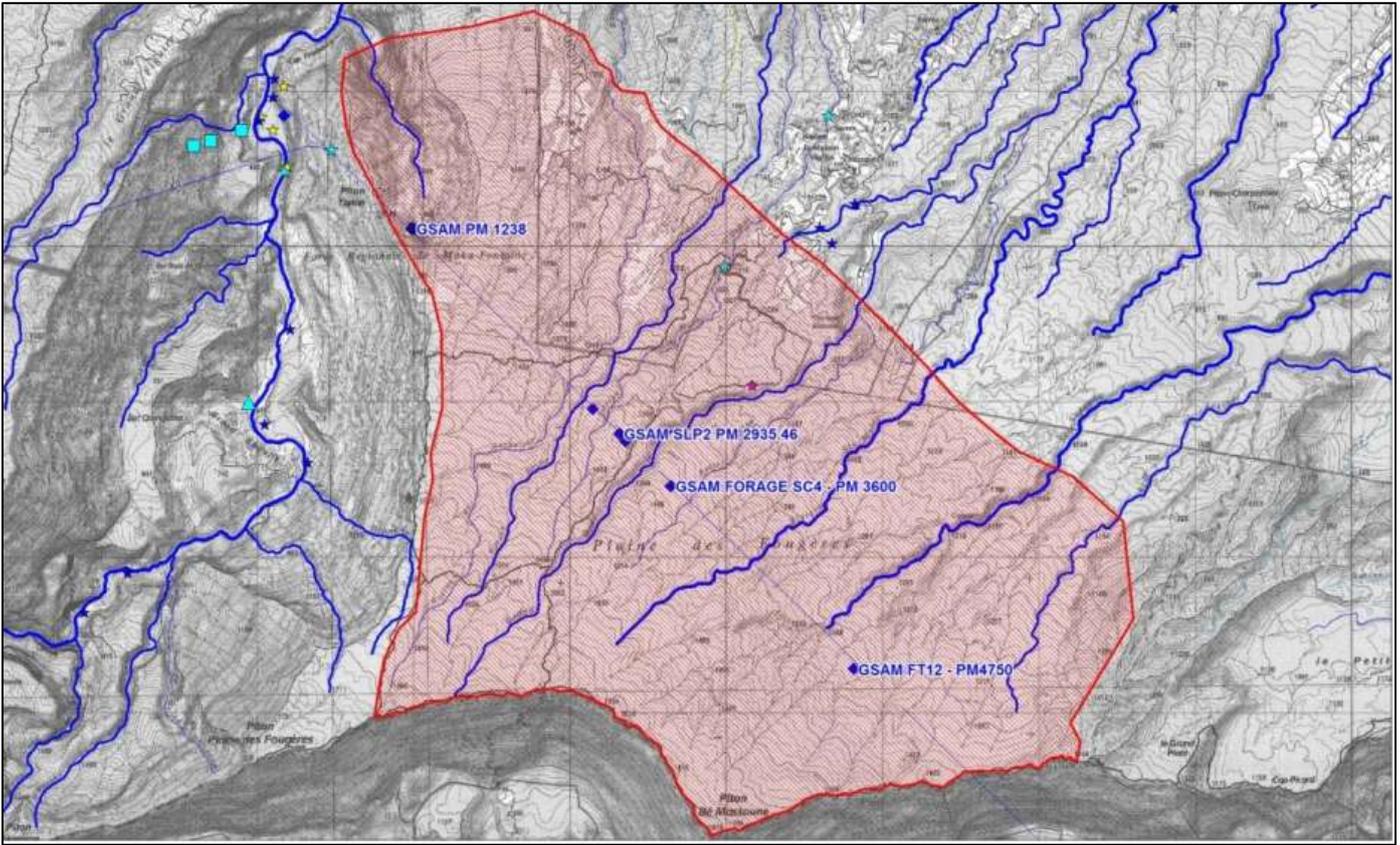


Figure 9 : Aire d'alimentation possible de la galerie GSAM (Aunay et al., 2012).

Dans le rapport intitulé « Bilan et recommandations sur le suivi des aquifères rencontrés par le creusement des galeries du transfert des eaux » il a été proposé d'instrumenter la GSAM afin de caractériser l'état des aquifères exploités (Aunay and Maréchal, 2014). Le suivi en continu du débit mis en place se fait par 3 capteurs. Un capteur se trouve en amont de l'aquifère PM5000, un autre capteur est localisé entre le PM5000 et le PM3000, le dernier capteur se trouve au niveau rejet dans la rivière des Pluies.

Des mesures ponctuelles de débit sont réalisées afin de calibrer les sondes. Ces jaugeages ont été réalisées entre le mois de mars 2019 et mars 2020, durant cette période 5 jaugeages ont été fait sur le point GSAM1, 7 sur le point GSAM2 et 9 sur le point GSAM3. Lors de ces mesures, les pompes sont à l'arrêt et l'eau qui circule dans le tunnel provient exclusivement des aquifères recoupés par la galerie.

En amont du PM 5000, les débits mesurés sont proches de 0 L/s. Entre les deux aquifères PM3000 et PM5000 la moyenne des débits mesurés est de 181 L/s (min=162 L/s et max=196 L/s). Au niveau du rejet de la rivière des Pluies les débits mesurés sont de l'ordre de 157 L/s (min=127 L/s et max=184 L/s). Le 13 avril 2021, lors de la visite de la galerie, ces valeurs ont pu être vérifiées.

2.4.2. Galerie Salazie Aval - GSAV

La Galerie Salazie Aval débute sous la rivière des Pluies, passe sous la plaine des Chicots et rejoint le cirque de Mafate au niveau du Bras Sainte-Suzanne. Les travaux de la Galerie Salazie Aval ont commencé en 1998 et se sont achevés en 2006.

Durant le creusement, des venues d'eau ont été observées à proximité de la rivière des Pluies, à l'aplomb de la cascade Emmanuel. Ces venues d'eau interceptées en septembre 2003 ont été rejetés dans la rivière des Pluies jusqu'en décembre 2003. Entre décembre 2003 et décembre 2006, le rejet se faisait dans le Bras

Sainte-Suzanne (Cirque de Mafate). Depuis décembre 2006, elles peuvent alimenter le réservoir de Mon Repos localisé dans le cirque de Mafate.

2.4.3. Conséquence sur les écoulements naturels

Avant d'atteindre les venues d'eau principales, les deux galeries ont recoupées de nombreuses venues d'eau qui se sont tariées rapidement. Toutes ces venues d'eau interceptées pourraient modifier les conditions naturelles d'écoulement de ces eaux qui contribuent à la recharge du complexe aquifère régional. Les venues d'eau dans les deux galeries sont de l'ordre de 9 Mm³/an pour la GSAM et 3 Mm³/an pour la GSAV.

Le BRGM (Aunay et al., 2010) ainsi que l'Office de l'eau (Office de l'eau, 2007, 2008a, 2008b) se sont intéressés aux conséquences du drainage des aquifères par les galeries sur les modifications des conditions naturelles d'écoulement.

Les études sur les galeries de Salazie Amont et Aval ont montré qu'il n'y avait pas de baisse significative des niveaux piézométriques du complexe aquifère régional entre 2001 et 2010. Les niveaux d'eaux dans les ouvrages influencés par les infiltrations de la rivière des Pluies ont augmenté en période d'étiage.

Les bilans hydrométriques de l'Office de l'eau entre 1999 et 2005, réalisés sur la rivière des Pluies ont montré que la rivière alimente les nappes d'eau souterraine du pont de Domenjod à l'embouchure. Depuis la mise en place des rejets de la galerie dans la rivière, l'eau arrive jusqu'à l'Océan en période d'étiage. Toutefois, cette observation est variable en fonction du débit rejeté, des infiltrations vers le milieu souterrain (colmatage du fond de la rivière) et du débit naturel de la Rivière des Pluies.

La relation entre le débit de la rivière des Pluies dans sa partie aval et les infiltrations a été caractérisée par l'Office de l'eau dans les rapports sur l'étude des circulations d'eau des systèmes hydriques du secteur Sainte-Marie / Saint-Denis (Office de l'eau, 2008a). Différentes relations existent entre les infiltrations et le débit de la rivière en fonction du colmatage du fond du lit de la rivière. L'infiltration est fortement diminuée lors de colmatages de la rivière (provoqués, notamment, par des coulées boueuses) – (Figure 10).

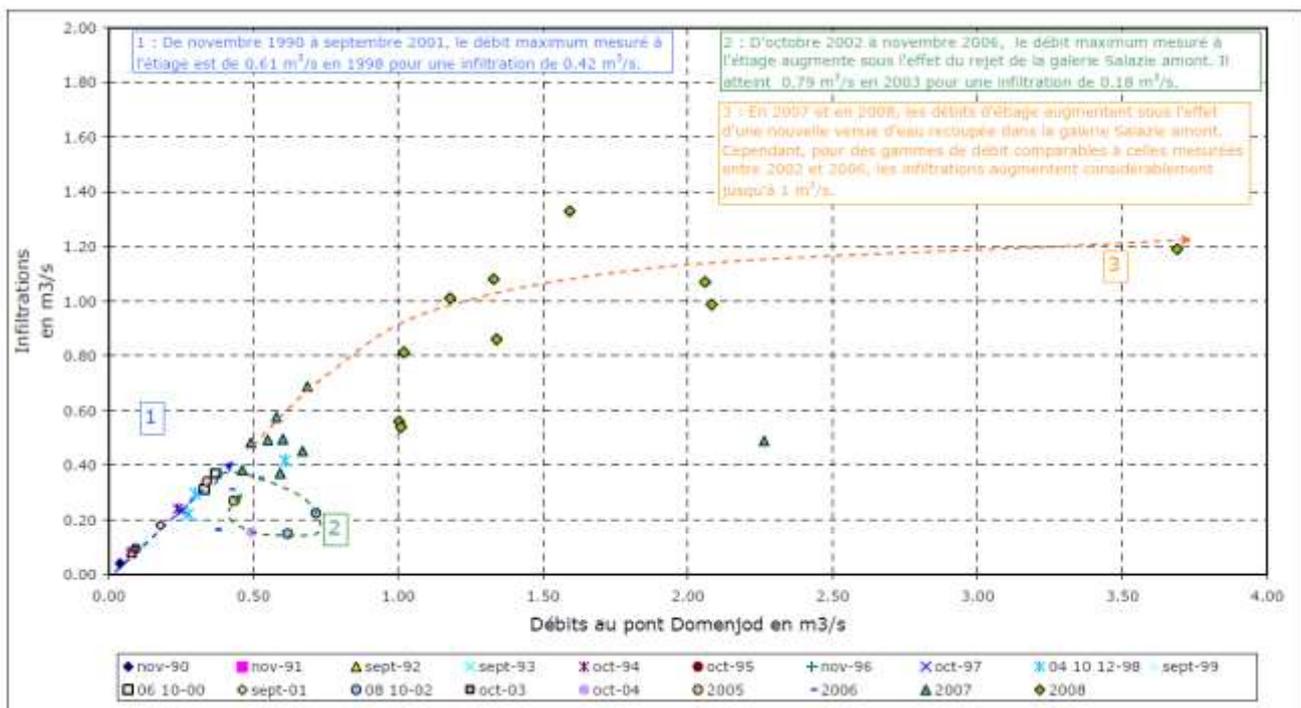


Figure 10 - Relation entre le débit de la rivière des Pluies au pont Domenjod et les infiltrations (Office de l'eau, 2008a).

3. Données et interprétations

Afin d'établir le fonctionnement hydro(géo)logique de la zone et d'élaborer le schéma conceptuel d'écoulement, une synthèse des connaissances et une interprétation des données est proposée. Il s'agit de données climatiques, géologiques, hydrogéologiques et hydrologiques.

Toutes les données et connaissances de cette première phase du projet seront intégrées lors des prochaines phases avec la réalisation d'un modèle de simulation hydrodynamique en régime transitoire pour évaluer les volumes potentiellement prélevables sur le secteur nord de l'île.

3.1. DONNEES CLIMATIQUES

Les données climatiques sont les données d'entrée du modèle qui sera développé dans la deuxième phase du projet.

3.1.1. Pluviométrie

Les données de pluviométrie ont été récupérées sur la plateforme de Météo-France. Sur la zone d'étude on dénombre 46 stations météorologiques qui enregistrent des cumuls de pluie. Pour cette synthèse, 16 stations pluviométriques ont été sélectionnées selon leurs emplacement et selon la longueur des chroniques.

Pour compléter la synthèse, les données de la station « Mère Canal » appartenant à l'Office de l'eau et la station « La Mare » gérée par le CIRAD de La Réunion ont été collectées.

Les données de cumuls pluviométriques sont au pas de temps journalier. Le Tableau 2 et la Figure 11 reprennent le détail des stations pluviométriques retenues pour l'analyse.

Le calcul de la pluviométrie annuelle moyenne, du cumul de pluviométrie lors de la saison sèche et de la saison humide pour ces stations permet de mettre en évidence deux gradients : Est-Ouest et selon l'altitude.

Nom poste	Identifiant	Altitude (m)	Chroniques	Pluvio annuelle moy (mm)	Cumul pluvio saison humide (mm)	Cumul pluvio saison sèche (mm)
SAINT-DENIS COLLEGE	97411111	22	1997-2016	1 302	1 041	261
SAINT-FRANCOIS	97411150	509	2000-2021	2 004	1 565	439
RADAR COLORADO	97411146	702	2003-2021	1 758	1 377	381
LE BRULE-VAL-FLEURIE	97411164	888	2000-2021	2 624	2 083	541
SAINT-DENIS LE CHAUDRON	97411132	39	1990-2021	1 342	1 069	273
PLAINE DES CHICOTS_SAPC	97411170	1 834	2000-2021	2 856	2 363	493
MONTAUBAN	97418165	398	2009-2021	2 043	1 609	434
GILLOT	97418110	24	2000-2021	1 561	1 182	379
LA MARE	97418123	69	2001-2020	1 525	914	612
PLAINE DES FOUGERES	97418170	1 025	2000-2021	4 126	2 896	1 230
MERE CANAL	-	1 250	2006-2021	2 183	1 540	640
BEAUFOND SAINTE-MARIE	97418150	227	2000-2019	2 689	1 881	808
GRAND-HAZIER	97420110	74	2000-2021	2 061	1 464	597
BAGATELLE	97420150	259	2000-2021	2 928	1 978	950
BRAS PISTOLET	97420180	561	2002-2021	4 405	2 880	1 525
BOIS ROUGE	97409210	5	2000-2021	2 378	1 650	728
MENCIOL	97409240	180	2000-2021	3 291	2 222	1 069
LE COLOSSE	97409230	19	2000-2021	2 579	1 801	777

Tableau 2 : Stations pluviométriques retenues pour la présente synthèse

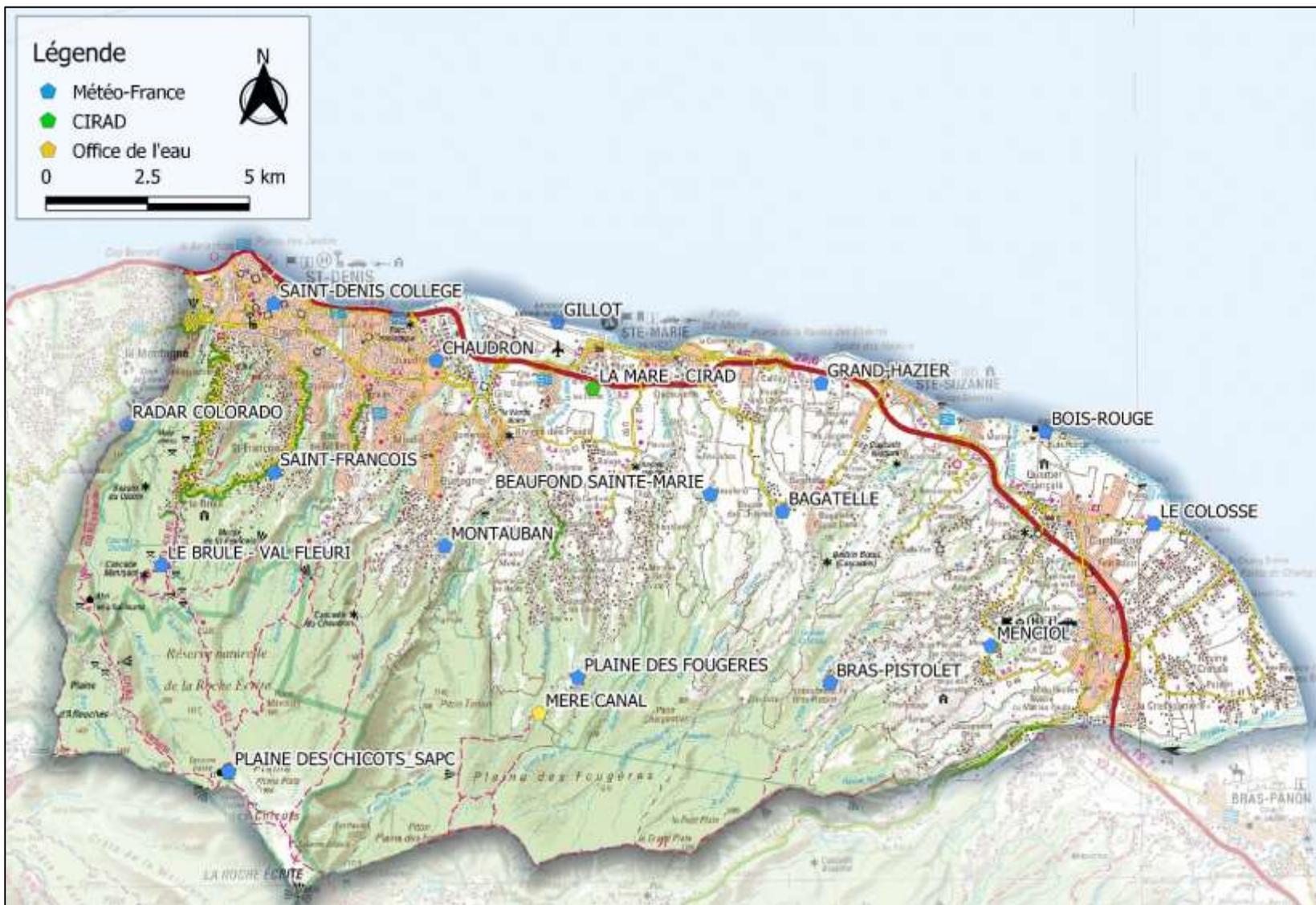


Figure 11 : Stations pluviométriques retenues pour la présente synthèse (Source : IGN)

3.1.2. Evapotranspiration

L'évapotranspiration (ETP) résulte de deux phénomènes, l'évaporation et la transpiration des plantes. Ce paramètre est exprimé en mm par unité de temps.

a) Données Météo-France

La seule station météorologique qui mesure l'évapotranspiration est localisée à l'aéroport Gillot sur la commune de Sainte-Marie. La chronique est continue depuis 2000. Les données sont au pas de temps journalier. Les valeurs oscillent entre 3,8 et 7,4 mm/jour, la valeur médiane de la chronique est de 5,3 mm/jour.

Le cumul mensuel des données d'évapotranspiration est présenté en Figure 12.

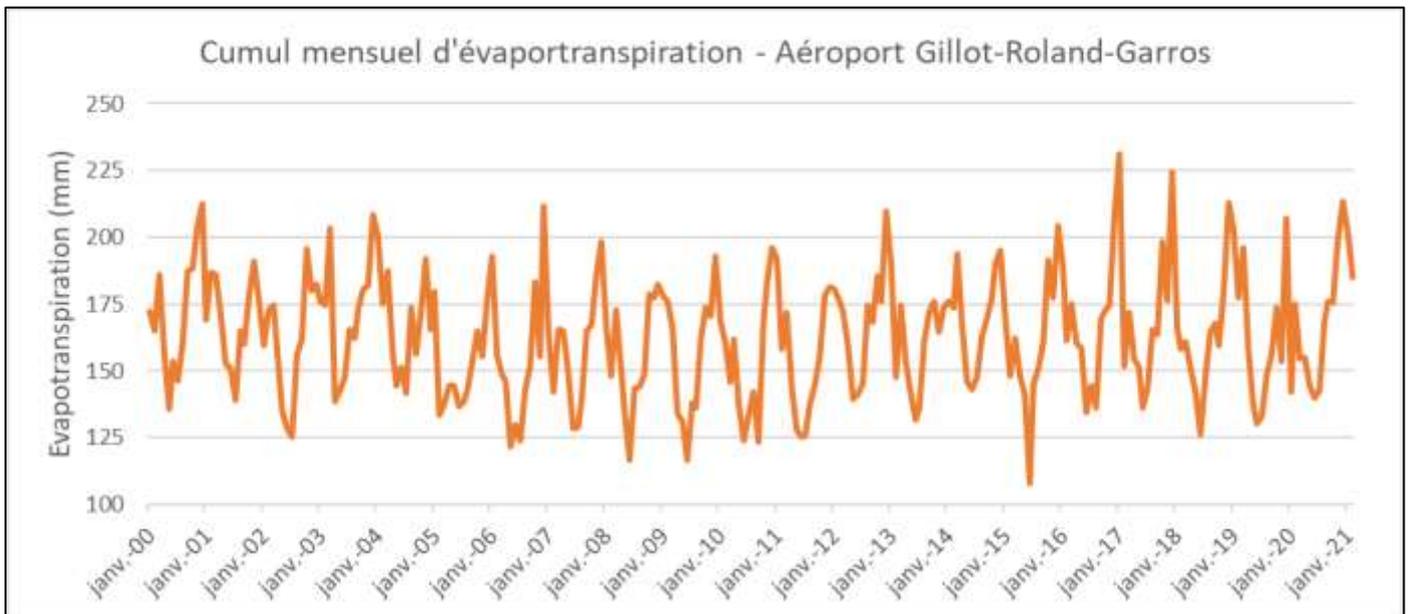


Figure 12 : Cumul mensuel de l'évapotranspiration mesurée à la station Météo-France de l'aéroport Gillot.

b) Données CIRAD

Le CIRAD de La Réunion a mené une étude sur les fluctuations saisonnières de l'évapotranspiration sur l'île (Chopart et al., 2003). Ce paramètre est corrélé avec l'augmentation de l'altitude. Sa corrélation est moins significative avec la latitude ou la longitude à l'échelle du territoire Réunionnais. Les valeurs de ce paramètre au pas de temps mensuel et en fonction de l'altitude sont reprises dans le Tableau 3.

Zone Nord/Est		
Mois	Evapotranspiration à 0 m NGR	Perte du à l'altitude par tranche de 100 m
1	145.8	-5.67
2	127.72	-4.96
3	130.58	-5.07
4	108.3	-3.6
5	90.96	-2.99
6	78	-2.4
7	81.78	-2.59
8	94	-3.11
9	107.5	-3.9
10	125.59	-4.97
11	134.5	-5.6
12	143.79	-5.79
Année	1368.52	-50.65

Tableau 3 : Données du gradient interpolé de l'ETP sur le Nord-Est de la Réunion (Chopart et al., 2003).

3.2. DONNEES GEOLOGIQUES

Les données géologiques collectées permettent d'avoir une représentation de la géologie en profondeur. Les différentes structures géologiques pourront être modélisées lors de la deuxième phase du projet.

3.2.1. Coupes géologique de forage

La géologie en profondeur est définie à partir des coupes géologiques de forages. Elles permettent de connaître les différentes formations géologiques traversées ainsi que leurs épaisseurs.

Les coupes géologiques proviennent de la Banque du Sous-Sol (BSS) du BRGM. Ainsi, 43 coupes géologiques ont pu être extraites et analysées (Tableau 4).

Les coupes géologiques proviennent de forages répartis sur la frange littorale. Les altitudes des têtes de forages sont comprises entre 2 et 169 m NGR et les profondeurs investiguées varient entre 15 et 280 m.

Les formations alluvionnaires localisées sur la surface de la frange du littorale représentent 4 825 hectares (dont 3 147 ha pour la plaine alluviale de Saint-André). Ces alluvions reposent sur des formations basaltiques. La limite entre ces deux formations permet de connaître l'épaisseur des alluvions. Parmi les coupes de forages analysées, 10 ont atteint cette limite :

- Forage Pépinières (à 24,5 m NGR) ;
- Forage La Trinité (à 35,4 m NGR) ;
- Forage La Trinité 2 (43 m NGR) ;
- Forage F3 Duparc (à 34,5 m NGR) ;
- Forage F2 Gillot (à 1,9 m NGR) ;
- Forage Marencourt (à -61,6 m NGR) ;
- Forage Usine Bois Rouge (à -106 m NGR) ;

- Champ de borne inférieur (à -100 m NGR) ;
- Puits ZEC Chaudron (à 22,4 m NGR) ;
- Puits Gillot (à 18,3 m NGR) ;
- Sondage 2-1-S3 (à 22,5 m NGR).

D'autres forages localisés dans les formations alluvionnaires n'ont pas atteint cette limite. Il s'agit des forages Brasserie Bourbon (avec 40m d'épaisseur d'alluvions), le puits Tomi (avec 16 m d'épaisseur d'alluvions) et le forage Champ de Borne (avec 30 m d'épaisseur d'alluvions).

Les formations basaltiques peuvent être continues ou avec des alternances entre des formations de natures différentes (Alluvions, tufs ou coulées boueuses). Les forages composés seulement de roches basaltiques sont localisés sur la commune de Sainte-Marie, il s'agit des forages CERF, Sainte-Marie ZNS et du Sondage 2-1-S5.

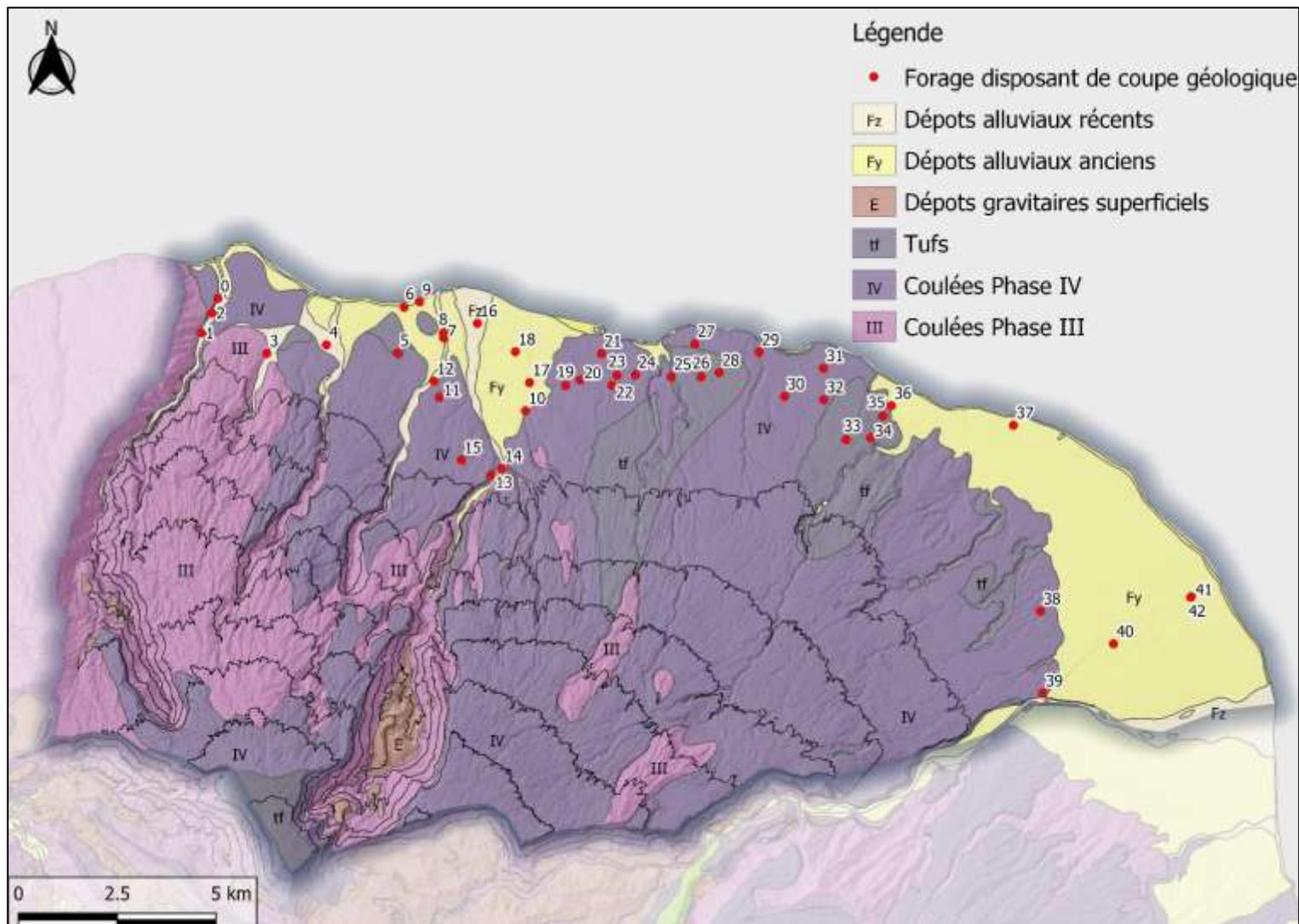


Figure 13 : Forages disposants de coupes géologiques (BRGM/LGSR, 2006)
Les caractéristiques des forages sont repris dans le Tableau 4

Commune	Nom Forage	ID Carte	Code BSS	Latitude	Longitude	Altitude (m NGR)	Profondeur (m)
Saint-Denis	Forage Brasserie Bourbon	0	BSS004AMNR/X	-20.88454074	55.44412695	18.34	41
Saint-Denis	Forage Pépinière	1	12264X0264	-20.89232919	55.44006744	35.5	80
Saint-Denis	Forage BD Sud	2	12264X0253	-20.88785006	55.4427405	26.95	50
Saint-Denis	Sondage "Endiguement de la ravine du Butor"	3	12264X0329	-20.89712845	55.45597262	43.9	15
Saint-Denis	Forage La trinité	4	12264X0265	-20.8953311	55.47048057	47.43	80
Saint-Denis	Puits du chaudron	5	12264X0113	-20.89734428	55.48772757	26.39	60
Saint-Denis	Piézomètre RN2 Chaudron	6	12264X0241	-20.88696081	55.4894674	7	20
Saint-Denis	Puits ZEC Chaudron	7	12271X0037	-20.89396546	55.49901405	30.41	31.8
Saint-Denis	Forage d'appoint ZEC	8	12271X0060	-20.89288974	55.49892862	26,45	58
Saint-Denis	Puits Tomi	9	12264X0018	-20.88577204	55.49326207	5.55	16.39
Saint-Denis	Forage Carreau Coton	10	12271X0158	-20.91071112	55.51878515	80	110
Saint-Denis	Forage CERF	11	12271X0044	-20.90746264	55.49773435	85	120
Saint-Denis	Forage F5 Est	12	12271X0057	-20.90380857	55.4965801	62.97	169
Saint-Denis	Forage F4 Ilet Quinquina	13	12271X0049	-20.92525538	55.51026038	157	185
Saint-Denis	Forage Rivière des Pluies	14	12271X0015	-20.92374421	55.51287522	114	140
Saint-Denis	Forage Bretagne Domenjod	15	12271X0090	-20.92174311	55.50302345	196	256
Sainte-Marie	Puits Gillot	16	12271X0030	-20.89076138	55.50727577	23.29	35.2
Sainte-Marie	Forage F3 DuParc	17	12271X0059	-20.90430771	55.51983188	64.46	114
Sainte-Marie	Forage F2 Gillot	18	12271X0058	-20.8972833	55.51644944	42.9	100
Sainte-Marie	Forage CERF ou Le Grand Prado	19	12271X0053	-20.90505889	55.52856915	72.18	113
Sainte-Marie	Forage Saint Marie ZNS	20	12271X0172	-20.90382564	55.53210533	70	82
Sainte-Marie	Forage P22 Les Cocos	21	12271X0066	-20.89790273	55.53737848	35.32	100
Sainte-Marie	Forage Le Verger	22	12271X0061	-20.90507972	55.53983054	69.83	120
Sainte-Marie	Sondage 2-1-S5	23	12271X0033	-20.90284743	55.54113031	40	100
Sainte-Marie	Forage La Découverte	24	12271X0052	-20.90279269	55.54564534	39.7	80
Sainte-Marie	Sondage 2-1-S3	25	12271X0032	-20.9032941	55.55434647	33.5	86
Sainte-Marie	Forage S7 Convenance II	26	12271X0034	-20.90334579	55.56159553	59.45	204
Sainte-Marie	Forage La Convenance	27	12271X0031	-20.89588552	55.56010972	36	60.6
Sainte-Marie	Forage Les Cafés	28	12271X0065	-20.90245126	55.56602039	73.33	135.8
Sainte-Marie	Forage n°2 Ravine des Chèvres	29	12271X0064	-20.89739058	55.56711708	53.4	150
Sainte-Suzanne	Forage Chemin Grimm	30	12272X0137	-20.90799876	55.58185753	83.1	128.5
Sainte-Suzanne	Forage Belle Eau Grand Hazier	31	12272X0095	-20.90167328	55.59140089	56.43	120
Sainte-Suzanne	Forage Bel Air	32	12272X0096	-20.90875264	55.59122682	85	161
Sainte-Suzanne	Forage des Trois Frères	33	12272X0072	-20.91791794	55.59676609	121	160
Sainte-Suzanne	Forage Marencourt	34	12272X0052	-20.91753767	55.60270416	108.27	198
Sainte-Suzanne	Forage CET	35	12272X0075	-20.91265833	55.60577623	36	40.3
Sainte-Suzanne	Forage CET (aval)	36	12272X0076	-20.91030505	55.60785026	4.5	11
Saint-André	Piézomètre Usine Bois Rouge	37	12272X0074	-20.91498107	55.63749892	2	126.5
Saint-André	Forage F3 Terre Rouge	38	12272X0149	-20.95708178	55.64353195	101	174
Saint-André	Forage Dioré	39	12272X130	-20.97603912	55.6438886	152	280
Saint-André	Forage Ravine Creuse	40	12273X0011	-20.96468685	55.66151144	71	143
Saint-André	Forage Champ de Borne Nappe inférieure	41	12273X0009	-20.95422255	55.68046013	23.67	133
Saint-André	Forage Champ de Borne	42	12273X0013	-20.95433393	55.68030593	23.93	30

Tableau 4 : Forages disposant de coupes géologiques

3.2.2. Géologie dans la bibliographie

Dans le rapport « Analyse fonctionnel par traitement du signal et approche hydrochimiques des aquifères du nord de la Réunion » le BRGM a réalisé une coupe géologique et hydrogéologique à partir d'une quarantaine de forages localisés sur le littoral sur un transect Ouest-Est (Figure 14). Ce modèle géologique conceptuel met en évidence l'hétérogénéité de la géologie de la zone (Aunay et al., 2010).

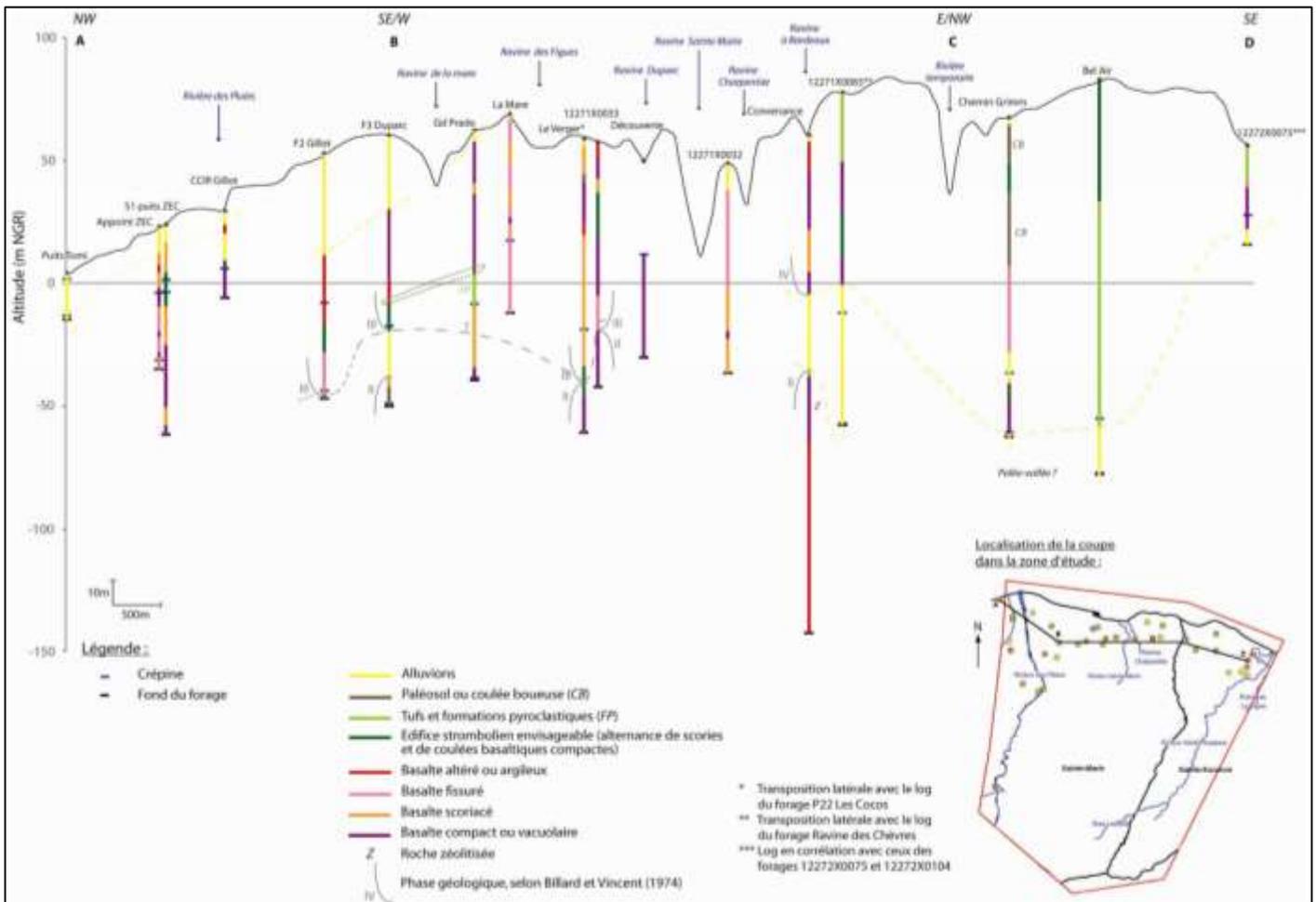


Figure 14 : Coupe géologique sur la commune de Sainte-Marie (Aunay et al., 2010).

3.2.3. Bilan

La géologie de la zone a été approchée de plusieurs façons. La carte géologique permet de déterminer la géologie en surface et les coupes de forages et les coupes géologiques de la bibliographie et de la BSS permettent de comprendre la géologie en souterrain.

En surface, les formations basaltiques sont localisées sur les planèzes et se prolongent sous des formations alluvionnaires localisées en pied de pente au niveau des exutoires des cours d'eau. Des formations de tufs sont localisées au sommet du massif de la Roche Ecrite et sur la commune de Sainte-Marie.

En souterrain, l'analyse met en évidence une hétérogénéité des formations géologiques rencontrées avec des états d'altérations et de fissurations plus ou moins avancés.

Des formations alluvionnaires ont été rencontrées sous des formations basaltiques. Ce type d'empilement est le témoin des phases d'activité et d'érosion du Piton des Neiges. Ces paléovallées canalisent les flux souterrains, il s'agit potentiellement d'axes de drainage des eaux souterraines.

Quelques particularités ont pu être observées dans les coupes de forages, il s'agit de formations de coulées boueuses épaisses (≈ 60 m). Ces formations peu perméables pourraient dévier les flux souterrains.

3.3. DONNEES HYDROGEOLOGIQUES

Le complexe aquifère régional est l'élément à modéliser lors de la prochaine phase de ce présent projet. Il est donc nécessaire de collecter et d'analyser des données piézométriques afin de voir s'il existe ou non des différences de comportements (réactif, inertiel, captif, libre...) et de propriétés hydrodynamique.

3.3.1. Piézométrie

L'Office de l'eau suit en continu et depuis plusieurs décennies les niveaux piézométriques sur le territoire. Les chroniques sont de longueurs variables et peuvent présenter des lacunes.

Parmi les 27 forages suivis par l'Office de l'eau sur le secteur, 19 ont été analysés. Ils présentent des chroniques récentes et relativement continues. La Figure 15 représente la disponibilité des données piézométriques.

Sur la commune de Sainte-Marie, le forage Ravine des Chèvres est équipé d'un multi-piézomètre. Les niveaux piézométriques des nappes inférieure et supérieure sont suivis.

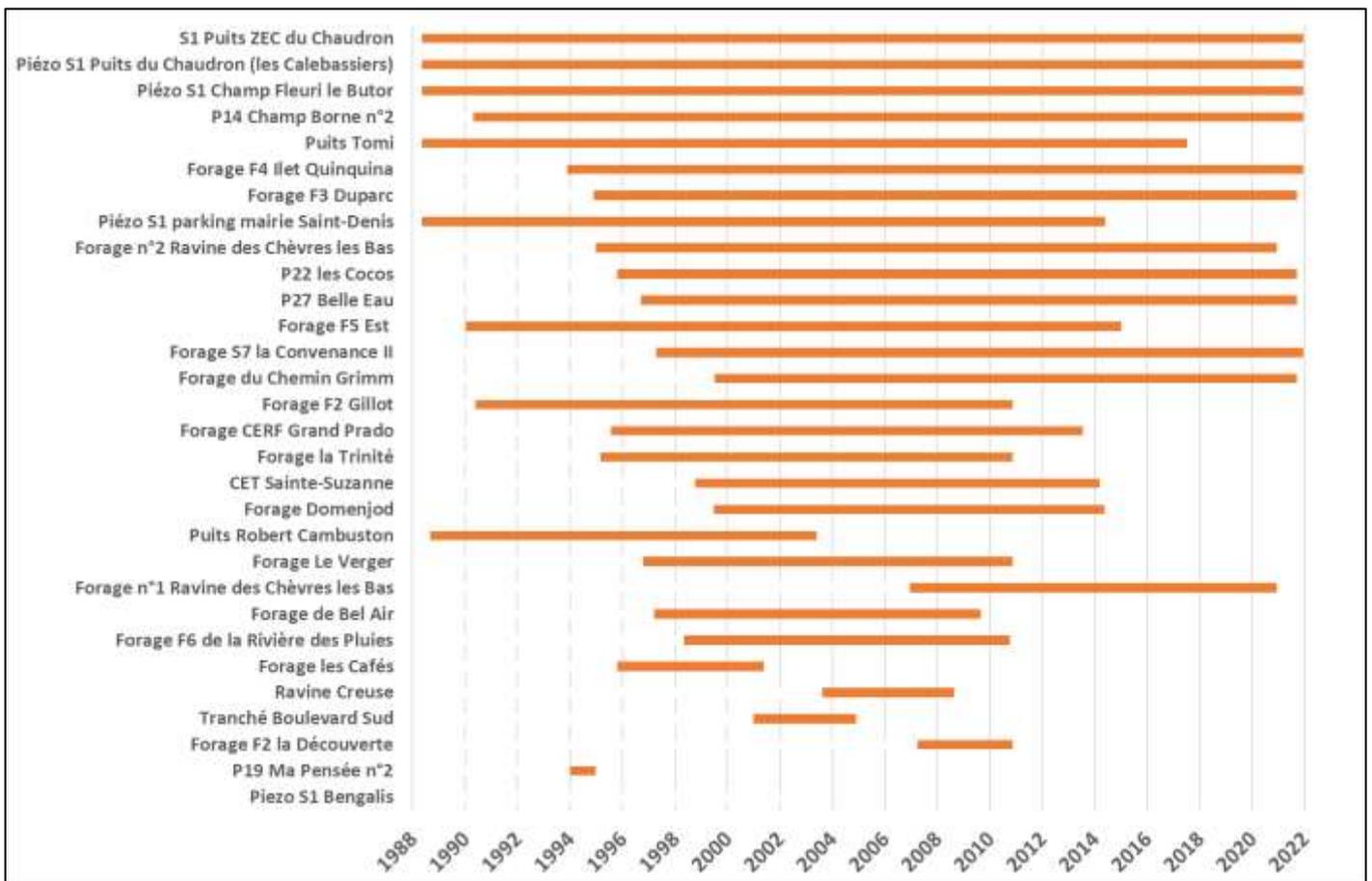


Figure 15 : Chroniques piézométriques disponibles

Une description qualitative des données piézométriques est proposée afin d'identifier des comportements de nappes similaires.

Les aquifères de la zone d'étude ont un cycle annuel avec une recharge qui intervient en début d'année, de janvier à mars (jusqu'en mai pour les nappes les plus inertielles) suivi d'une vidange qui se prolonge sur la période de mai à septembre. Une période d'étiage intervient entre les phases de vidange et de recharge sur la fin d'année.

Trois types de comportement de la piézométrie sont identifiés (Figure 16, Figure 17, Figure 18 et Figure 19). Cette typologie est basée sur des approches de traitement du signal mis en œuvre dans les études de Aunay et al., 2010 et Petit et al., 2013 .

- **Réactif** : l'amplitude des variations du niveau piézométrique entre la recharge et la vidange est importante (plusieurs mètres), le forage réagit en quelques jours aux précipitations, la recharge est plus rapide que la vidange, qui se fait en quelques semaines. Ce type de réponse est observé sur les forages Champ Fleuri, la Trinité, F5 Est, Belle Eau et les puits Tomi, Chaudron S1, ZEC S1, Robert Cambuston ;
- **Inertiel** : l'amplitude des variations du niveau piézométrique entre la recharge et la vidange est faible (quelques centimètres, voire décimètres), le forage réagit en quelques semaines aux précipitations. La recharge et la vidange sont assez symétriques avec un pic de recharge plusieurs semaines / mois après la saison des pluies. Ce type de comportement est observé pour les forages Domenjod, F2 Gillot, Grand Prado, S7 Convenance II, Chèvres inférieur, Bel Air et P14 Champ de Borne ;
- **Hybride** : le niveau piézométrique varie de plusieurs décimètres à quelques mètres d'une saison à l'autre. Le forage réagit rapidement aux précipitations (quelques jours). Ce comportement est observé sur les forages F4 ilet Quinquina, F3 Du Parc, P22 Les Cocos, Chèvres supérieur, Chemin Grimm.

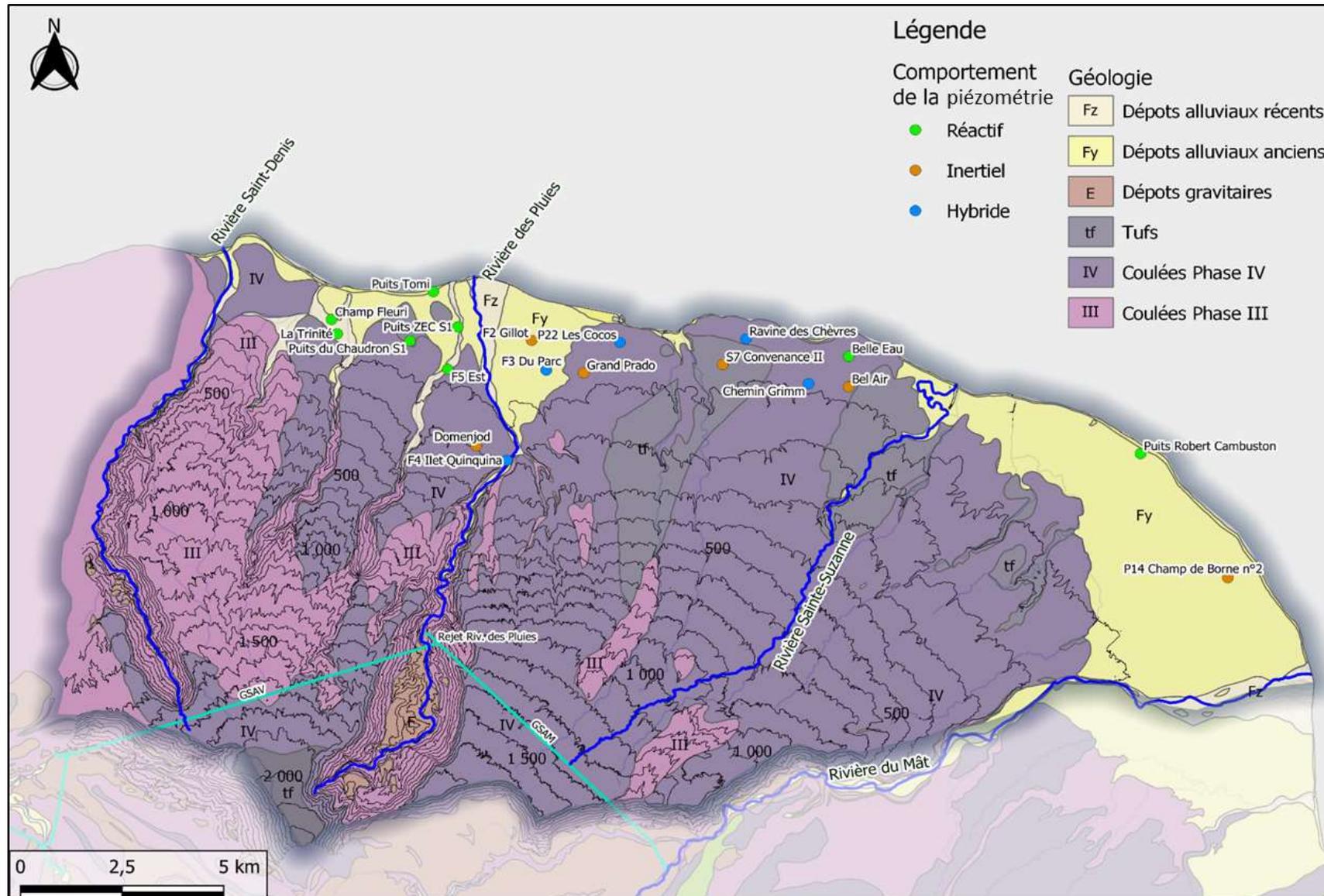


Figure 16 : Forages étudiés disposant d'un suivi de piézométrie sur la zone d'étude.

Contribution à l'évaluation des volumes prélevables (EVP) des formations volcaniques du littoral Nord - FRLG101.
Phase 1 – Diagnostic, bilan et conceptualisation en vue de la réalisation d'un modèle de simulation hydrodynamique en régime transitoire

Secteur	Désignation forage Code BSS	Pompage	Nappe libre	Nappe captive	Période des données	Longueur chronique	Médiane de la piézométrie sur la chronique	Recharge	Vidange	Comportement piézométrie	Amplitude du NP entre BE et HE	Evolution tendancielle des variations piézométriques	Observations de la symétrie
Littoral de Saint-Denis	Champ Fleuri 12264X0218		x		07/09/2001 - 30/06/2020	19 ans	4,6 m NGR	Décembre à mars	Avril à juillet	Réactif	2 à 6 m	Augmentation du niveau d'étiage et des pics lors de saison des pluies	Recharge plus rapide que la vidange
	La trinité 12264X0265	x	x		02/01/1996 - 06/09/2001	5 ans	5,1 m NGR	Janvier à Mars	Mars à Mai	Réactif	2 à 3 m mais 7 m en 1998	Augmentation du niveau d'étiage et des pics lors de saison des pluies	Recharge plus rapide que la vidange
	Puits Tomi 12264X0018		x		17/04/2007 - 27/07/2017	4 ans (lacune de 2009 à 2014)	4 m NGR	Janvier à mars	Avril à mai	Réactif	2 à 3 m	Augmentation du niveau d'étiage et des pics lors de saison des pluies	Recharge et vidange assez symétriques
	Puits du Chadron S1 12264X0113	x	x		16/10/1999 - 27/07/2020	18 ans (lacune de 2010 à 2014)	1,8 m NGR	Janvier à mars	Mars à juin	Réactif	1 à 3 m	Augmentation du niveau d'étiage et des pics lors de saison des pluies	Recharge plus rapide que la vidange
	F5 Est 12271X0057	x	x		09/01/1990 - 16/12/2004	14 ans	10,1 m NGR	Janvier à Mars	Avril à Juillet	Réactif	5 à 10 m	Augmentation du niveau d'étiage et des pics lors de saison des pluies	Recharge plus rapide que la vidange
	Puits ZEC S1 12271X0038	x	x		06/10/1999 - 30/06/2020	20 ans	4,2 m NGR	Décembre à mars	Mars à juillet	Réactif	6 à 8 m	Augmentation du niveau d'étiage et des pics lors de saison des pluies	Recharge plus rapide que la vidange
Hauteurs de Saint-Denis	Domenjod 12271X0090	x	x		12/04/2007 - 06/02/2012	5 ans	5,7 m NGR	Janvier à Mars	Mars à juillet	Inertiel	0,5 m	Baisse de la piézométrie sur la période	Recharge et vidange assez symétriques
Rivière des Pluies	F4 Ilet Quinquina 12271X0049	x		x	12/04/2007 - 07/04/2021	13 ans	6,1 m NGR	Janvier à Avril	Mai à septembre	Hybride / réactif	0,5 à 1 m	Baisse de la piézométrie sur la période	Recharge et vidange assez symétriques
	F2 Gillot 12271X0058			x	30/08/2007 - 11/01/2009	1,5 ans (lacunes)	3,8 m NGR	Janvier à Mars	Avril à Juin	Inertiel	0,2 m	Période trop courte pour conclure	Recharge et vidange assez symétriques
	F3 DuParc 12271X0059			x	32/09/1998 - 30/06/2020	22 ans	1,5 m NGR	Janvier à Mars	Avril à Juin	Hybride / réactif	0,5 à 2,5 m	Augmentation du niveau d'étiage et des pics lors de saison des pluies	Recharge plus rapide que la vidange
Littoral de Sainte-Marie et Sainte- Suzanne	Grand Prado 12271X0063			x	12/04/2007 - 31/12/2008	1,5 ans	2,4 m NGR	Janvier à mars	Mars à mai	Inertiel	0,5 m	Période trop courte pour conclure	Recharge et vidange assez symétriques
	P22 Les Cocos 12271X0066			x	05/01/1996 - 30/06/2020	24 ans	1,1 m NGR	Janvier à Mars	Mars à juillet	Hybride / réactif	1 à 2 m	Augmentation du niveau d'étiage et des pics lors de saison des pluies	Recharge plus rapide que la vidange
	S7 Convenance II 12271X0034		x		36/05/2007 - 30/06/2020	13 ans	2,9 m NGR	Janvier à avril	Mai à Septembre	Inertiel	0,5 m mais 2 m en 2015	Augmentation de la piézométrie sur la période	Recharge et vidange assez symétriques
	Ravine des Chèvres sup. 12271X0162		x		28/09/2006 - 05/07/2021	14 ans	1,2 m NGR	Janvier à mars	Avril à Juillet	Hybride / réactif	2 à 3 m mais 9 m en 2015	Augmentation du niveau d'étiage et des pics lors de saison des pluies	Recharge plus rapide que la vidange
	Ravine des Chèvres inf. 12271X0064			x	05/12/1994 - 05/07/2021	27 ans	4,2 m NGR	Janvier à mars	Avril à septembre	Inertiel	0,5 à 1 m	Augmentation du niveau d'étiage et des pics lors de saison des pluies	Recharge et vidange assez symétriques
	Chemin Grimm 12272X0137		x		12/04/2007 - 30/06/2020	13 ans	2,7 m NGR	Février à Avril	Mai à Aout	Hybride / réactif	2 à 3 m	Baisse de la piézométrie sur la période	Recharge plus rapide que la vidange
	Belle Eau 12272X0095		x		23/09/1998 - 14/01/2020	22 ans	1,4 m NGR	Janvier à Mars	Mars à Aout	Réactif	2 à 3 m mais 6 à 7 m en 2006, 2007 et 2015	Augmentation du niveau d'étiage et des pics lors de saison des pluies	Recharge plus rapide que la vidange
Bel Air 12272X0096	x		x	23/09/1998 - 31/12/2008	10 ans	5,1 m NGR	Janvier à Mars	Avril à Juin	Inertiel	0,5 m	Pas d'évolution notable sur la période	Recharge et vidange assez symétriques	
Littoral de Saint-André	Puits Robert Cambuston 12272X0001		x		07/02/1990 - 06/06/2003	13 ans	3,1 m NGR	Janvier à mars	Avril à juillet	Réactif	3 à 4 m	Augmentation du niveau d'étiage et des pics lors de saison des pluies	Recharge plus rapide que la vidange
	P14 Champ Borne n°2 12273X0009		x		24/04/1990 - 30/06/2020	30 ans	9,7 m NGR	Fevrier à Mai	Mai à décembre	Inertiel	1 m	Baisse de la piézométrie à partir de 2014	Recharge et vidange assez symétriques

*Figure 17 : Description quantitative des chroniques piézométrique
Code couleur pour le comportement piézométrique : Vert : réactif // orange : piézomètre inertiel // bleu : hybride.
Classement : Ouest en Est.*

Au-delà des pompages, les comportements de la piézométrie peuvent potentiellement être expliqués par les facteurs suivants :

- Distance à l'océan ;
- Distance à un cours d'eau ;
- Epaisseur de la zone non saturée.

D'une manière générale, les forages aux comportements réactifs sont proches de l'océan, proches des lits des cours d'eau et ont une faible épaisseur de zone non-saturée (Figure 18 et Figure 19). Les forages aux comportements inertiels et hybrides ont une épaisseur de zone non saturée (ZNS) plus importante et la distance les séparant de l'océan et des cours d'eau est plus importante.

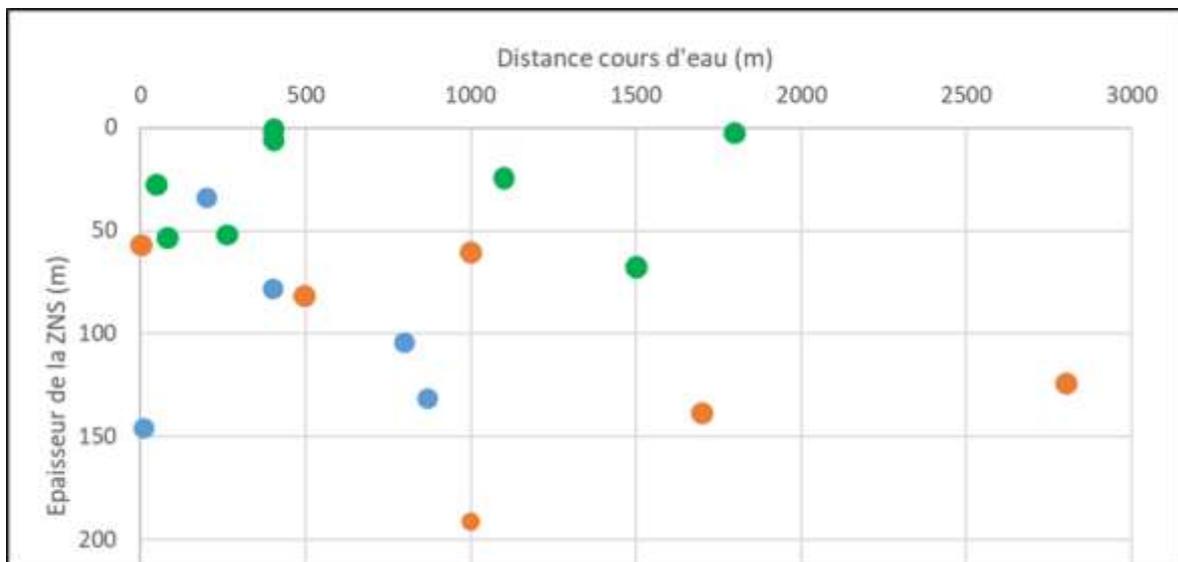


Figure 18 : Représentation graphique de l'épaisseur de la zone non saturée au droit du forage en fonction de la distance séparant le forage d'un cours d'eau.

Code couleur pour le comportement piézométrique : Vert : réactif // orange : piézomètre inertielle // bleu : hybride

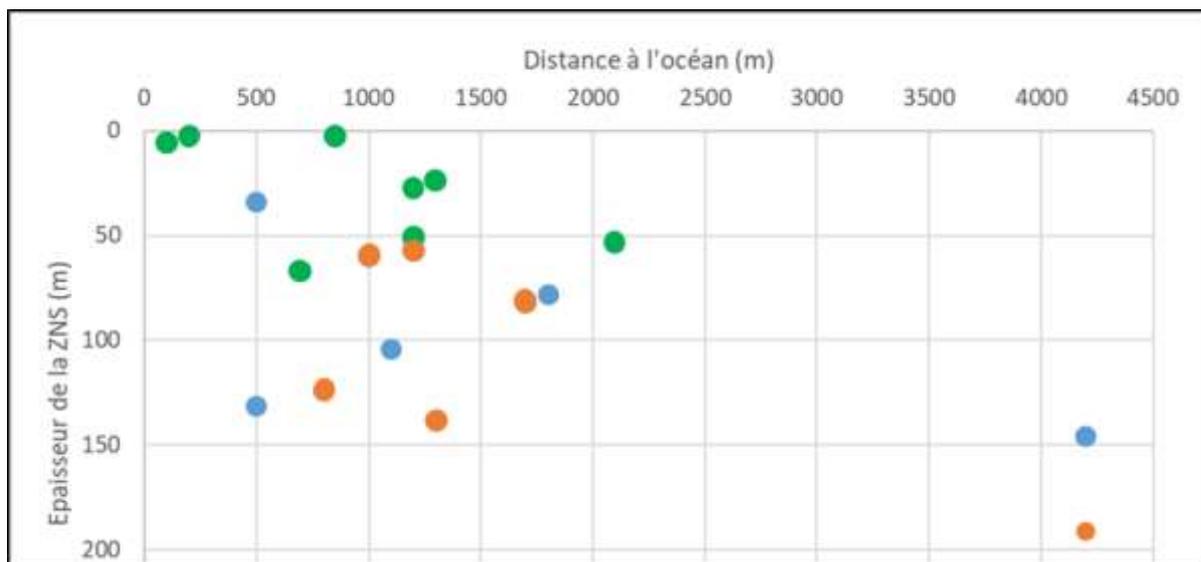


Figure 19 : Représentation graphique de l'épaisseur de la zone non saturée au droit du forage en fonction de la distance séparant le forage de l'océan en fonction.

Code couleur pour le comportement piézométrique : Vert : réactif // orange : piézomètre inertielle // bleu : hybride

3.3.2. Emergence de sources

Des sources sont localisées sur les planèzes à des altitudes comprises entre 360 et 700 m NGR. Il s'agit d'émergence de nappes perchées souvent captées pour l'alimentation en eaux potables. Le débit de ces sources est de l'ordre de la dizaine de L/s en étiage. D'autres sources sont localisées dans le rempart du cirque de Salazie, au sud (en dehors de la zone d'étude). Il s'agit notamment des sources Ravine Blanche, Bras Sainte-Suzanne et Citronniers.

L'Office de l'eau a suivi deux sites afin d'en étudier le comportement hydrogéologique. Il s'agit des sources du Chaudron et du Bras Guillaume (Bourhane et al., 2017).

La source de la cascade du Chaudron est localisée à l'aplomb d'un cassé de 500 m de hauteur dans des formations basaltiques. Le débit d'étiage est supérieur à 300 m³/h. Les émergences se trouvent à 400 m d'altitude, il s'agit d'exutoires de nappes perchées alimentées par les précipitations de la plaine des Chicots. L'eau arrive dans un bassin de 40 mètres de diamètre et 18 m de profondeur. Le débit de débordement du bassin est capté pour l'alimentation en eau potable.

La source du Bras Guillaume est localisée à 800 m d'altitude en rive gauche de la rivière Saint-Denis. Elle est captée par la ville de Saint-Denis pour l'AEP via une galerie drainante d'une longueur de 310 m creusée dans des formations basaltiques fracturées. Le débit moyen est de l'ordre de 162 m³/h et environ 108 m³/h en étiage. Ces résurgences sont des exutoires de nappes perchées alimentées par les précipitations sur la plaine d'Affouches (Vaudour and Aunay, 2008).

3.3.3. Gradient hydraulique

Le complexe aquifère régional est en équilibre hydrostatique avec l'océan. Au niveau du trait de côte son altitude est de 0 m NGR. Le gradient du complexe aquifère régional est de l'ordre de 0,5 à 2 m/km à l'échelle de l'île de La Réunion (soit une pente de 1 à 2‰)-(Join, 1991).

Le gradient hydraulique est calculé avec l'altitude de la nappe (piézométrie moyenne au droit d'un forage ou altitude de l'émergence d'une source) et la distance à l'océan.

Sur la zone d'étude, les gradients hydrauliques calculés varient entre 1 et 89 ‰ (Tableau 5). Le gradient du complexe aquifère régional est compris entre 1 et 6 ‰. Sur la plaine alluviale de la rivière du Mât, le gradient est plus important (12 et 16‰). Le gradient théorique des trois sources étudiées (sources du Chaudron, Bras Guillaume et Apollon) est nettement supérieur au gradient du complexe aquifère régional (entre 54 et 89‰), il s'agit donc d'émergences de nappes perchées, déconnectées du complexe aquifère régional car ce gradient hydraulique n'a pas de réalité physique.

Désignation	Piézométrie médiane ou altitude d'émergence (m)	Distance à l'océan	Pente (‰)
Forage Champ Fleuri	4,66	850	5
Forage La trinité	5,05	1 200	4
Puits Tomi	0,64	100	6
Puits du Chadron S1	1,9	1 300	1
Forage F5 Est	10,07	2 100	5
Puits ZEC S1	4,16	1 200	3
Forage Domenjod	5,71	4 200	1
Forage F4 Ilet Quinquina	6,16	4 200	1
Forage F2 Gillot	3,85	1 000	4
Forage F3 DuParc	1,48	1 800	1
Forage Grand Prado	2,38	1 700	1
Forage P22 Les Cocos	1,08	500	2
Forage S7 Convenance II	2,92	1 200	2
Forage Ravine des Chèvres	1,19	500	2
Forage Chemin Grimm	2,69	1 100	2
Forage Belle Eau	1,43	700	2
Forage Bel Air	5,13	1 300	4
Puits Robert Cambuston	3,11	200	16
Forage P14 Champ Borne n°2	9,74	800	12
Source du Chaudron	400	7 400	54
Source du Bras Guillaume	800	9 000	89
Source Apollon (ravine Sèche)	400	6100	66

Tableau 5 : Gradient hydraulique

Le gradient hydraulique des 3 sources (bas du tableau) ne correspond pas à une réalité hydrogéologique dans la mesure où ces sources sont déconnectées de l'océan.

3.3.4. Propriétés hydrodynamiques

Certains forages de la zone ont donné lieu à des pompages d'essai permettant d'approcher le comportement hydrodynamique local (transmissivité et coefficient d'emmagasinement). Ces informations ont été extraites de la BSS.

Les transmissivités sont comprises entre 8×10^{-3} et $3,4 \text{ m}^2/\text{s}$ (Figure 20, Tableau 6 et Figure 21). Les transmissivités sont les plus faibles dans les dépôts alluvionnaires de la rivière Saint-Denis et dans la plaine alluviale de la rivière du Mât. Au centre de la zone d'étude, les transmissivités sont plus importantes. D'une manière générale, les formations volcaniques sont plus perméables que les formations alluviales.

Les valeurs de coefficients d'emmagasinement étaient plus rares dans la bibliographie. Ils sont compris entre 5×10^{-4} et 10^{-1} .

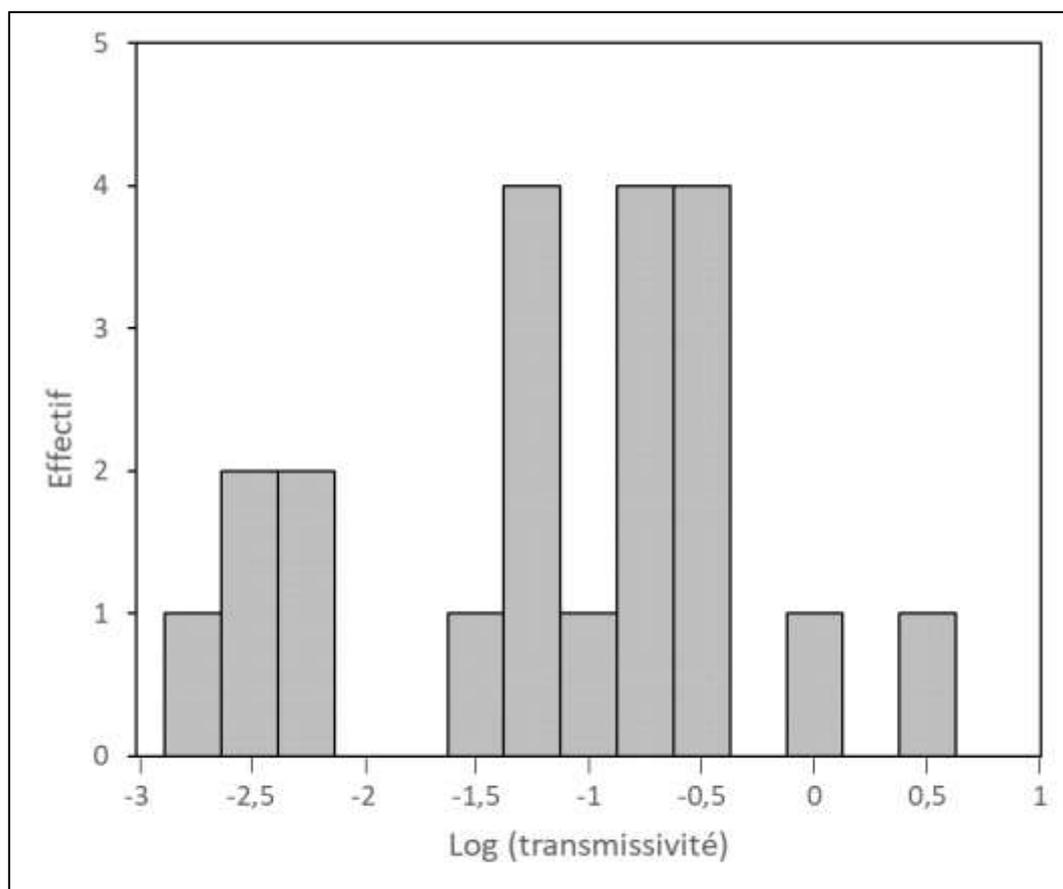


Figure 20 : Histogramme des distributions des transmissivités

Nom Forage	Code BSS	Altitude (m NGR)	Profondeur (m)	Transmissivité (m ² /s)	Log Transmissivité (m ² /s)	Coefficient d'emmagasinement
Forage Pépinière	12264X0264	35,5	80	2,6 x 10 ⁻³	-2,59	10 ⁻¹
Forage La trinité	12264X0265	47,43	80	5,6 x 10 ⁻¹	-0,25	
Puits ZEC Chaudron	12271X0037	30,41	31,8	7 x 10 ⁻¹	-0,15	7 x 10 ⁻³
Forage d'appoint ZEC	12271X0060	26,45	58	2,5 x 10 ⁻¹	-0,60	2 x 10 ⁻¹
Forage CERF	12271X0044	85	120	4,3 x 10 ⁻¹	-0,37	
Forage F5 Est	12271X0057	62,97	169	4,5 x 10 ⁻³	-1,35	2 x 10 ⁻¹
Forage Bretagne Domenjod	12271X0090	196	256	4 x 10 ⁻¹	-0,40	5 x 10 ⁻²
Forage F3 DuParc	12271X0059	64,46	114	2,1 x 10 ⁻¹	-0,68	
Forage F2 Gillot	12271X0058	42,9	100	2,1 x 10 ⁻¹	-0,68	
Forage CERF ou Le Grand Prado	12271X0053	72,18	113	3,4	0,53	
Forage Le Verger	12271X0061	69,83	120	5 x 10 ⁻¹	-0,30	
Forage La Découverte	12271X0052	39,7	80	4 x 10 ⁻³	-2,40	10 ⁻¹
Forage n°2 Ravine des Chèvres	12271X0064	53,4	150	7,9 x 10 ⁻²	-1,10	
Forage Chemin Grimm	12272X0137	83,1	128,5	2 x 10 ⁻¹	-0,70	
Forage Belle Eau Grand Hazier	12272X0095	56,43	120	8,2 x 10 ⁻²	-1,09	2 x 10 ⁻²
Forage Bel Air	12272X0096	85	161	1,3 x 10 ⁻¹	-0,89	
Forage des Trois Frères	12272X0072	121	160	10 ⁻¹	-1,00	
Forage Marencourt	12272X0052	108,27	198	6,3 x 10 ⁻²	-1,20	2 x 10 ⁻³
Forage F3 Terre Rouge	12272X0149	101	174	5 x 10 ⁻³	-2,30	
Forage Dioré	12272X130	152	280	8 x 10 ⁻³	-2,10	5 x 10 ⁻⁴
Forage Ravine Creuse	12273X0011	71	143	8 x 10 ⁻³	-2,10	

Tableau 6 : Paramètres hydrodynamiques issus de la bibliographie

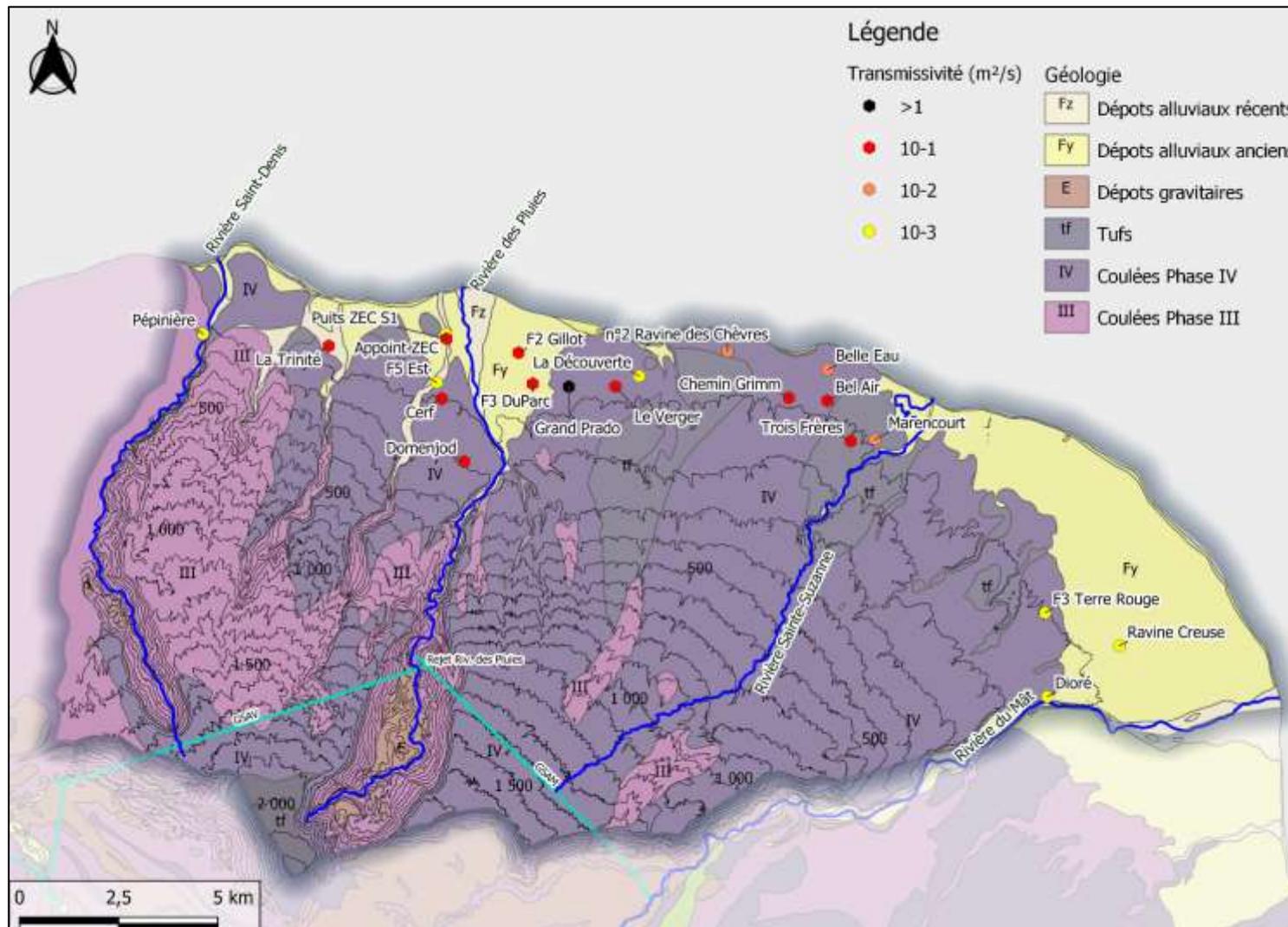


Figure 21 : Représentation cartographique des transmissivités (BRGM/LGSR, 2006)

3.3.5. Carte piézométrique

Plusieurs études ont permis de caractériser et de cartographier le complexe aquifère régional. La carte piézométrique réalisée par Paul Chemin en 1999 (Figure 22) a permis de mettre en évidence la présence de plusieurs axes de drainages et d'alimentation du complexe aquifère régional. L'Office de l'eau a réalisé des modélisations du cône alluvial de la rivière des Pluies afin d'améliorer les connaissances du fonctionnement de l'aquifère sur Saint-Denis et Sainte-Marie. L'étude a confirmé la présence d'un axe de drainage au niveau de l'exutoire de la rivière des Pluies (Stoll, 2005).

Cet axe de drainage est interprété comme une zone de fracture avec une forte perméabilité.

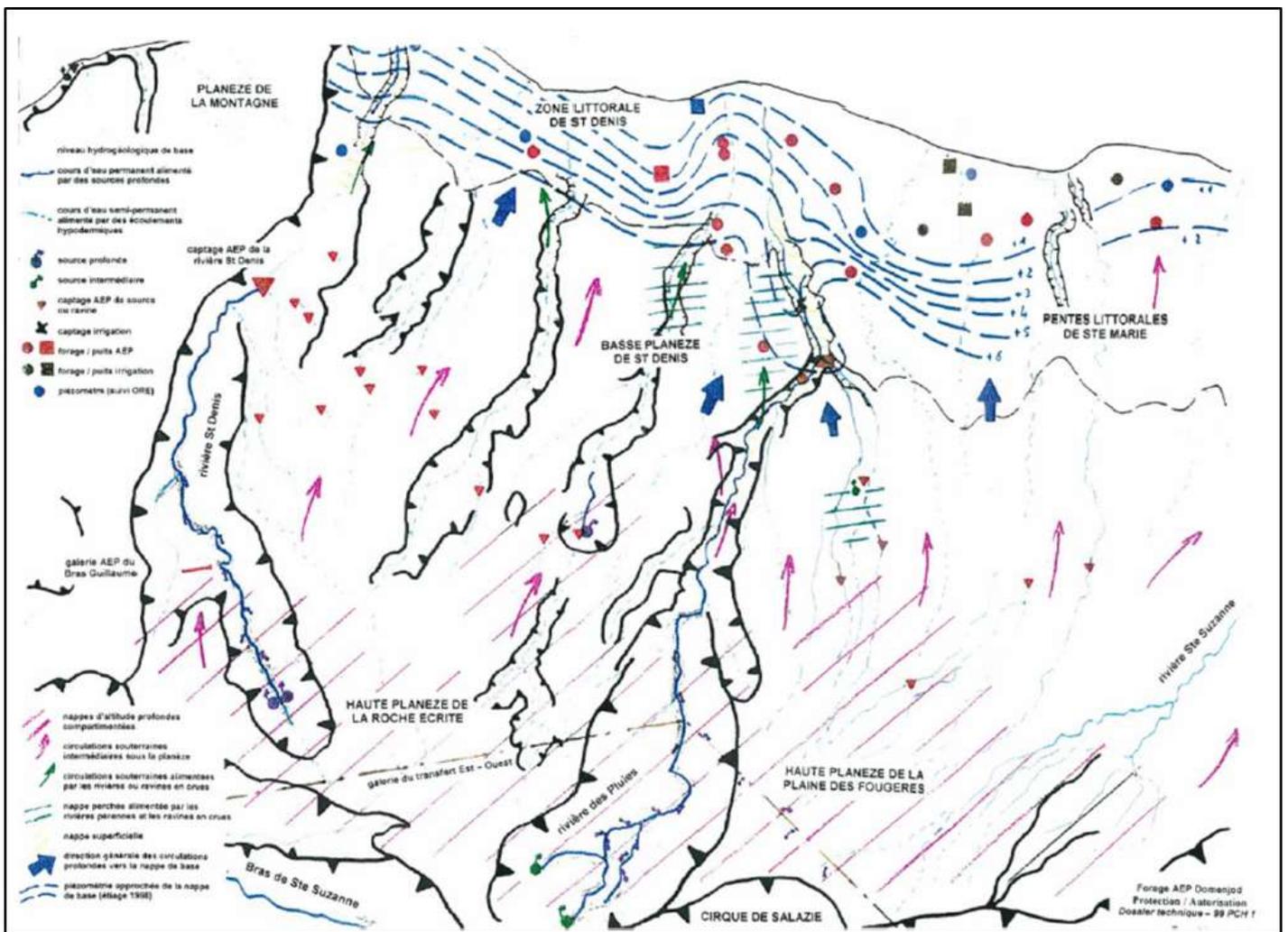


Figure 22 : Schéma hydrogéologique régional et piézométrie du complexe aquifère régional sur Saint-Denis et Sainte-Marie.
Source biblio (Chemin, 1999)

3.3.6. Bilan

Au-delà des sources des hauts, le complexe aquifère régional est l'aquifère qui est capté par forage pour l'AEP sur le littoral Nord de l'île. Les forages sont localisés à une distance maximale de 4,5 km du trait de côte. Le facteur limitant pour capter cet aquifère est l'épaisseur de la zone non-saturée qui croit vers l'intérieur des terres. Le gradient hydraulique de l'aquifère est faible (1 à 6‰ sur la zone d'étude) alors que la pente topographique est de l'ordre de 15 à 25%.

Le complexe aquifère régional présente un cycle annuel dominant avec une recharge qui intervient en début d'année, de janvier à mars jusqu'en mai pour les nappes les plus inertielles, suivie d'une vidange qui se prolonge sur la période de mai à septembre. Une période d'étiage intervient entre les phases de vidange et de recharge.

Trois types de comportement piézométrique ont pu être identifiés sur la zone d'étude. Les forages avec des signaux réactifs ont une faible épaisseur de ZNS et sont proches de l'océan et cours d'eau, on les retrouve principalement sur la commune de Saint-Denis. Les forages avec des signaux inertiel et hybride ont une épaisseur de ZNS plus importantes et leurs distances à l'océan et aux cours d'eau sont plus importantes, on les retrouve principalement sur les communes de Sainte-Marie et Sainte-Suzanne.

L'analyse des propriétés hydrodynamiques du complexe aquifère régional sur la zone d'étude a montré que les formations basaltiques aquifères sont plus perméables que les formations alluvionnaires.

Un axe de drainage et d'alimentation du complexe aquifère régional a été mis en évidence. Il s'agit d'un axe orienté Sud-Nord au niveau de l'exutoire de la rivière des Pluies qui est interprété comme une zone de fracture à forte perméabilité.

Localement, au niveau de la ravine des Chèvres, il est possible d'observer une superposition de deux nappes séparées par un niveau peu perméable. La nappe inférieure est captive et a un comportement inertiel. Son niveau piézométrique se situe vers 4,16 m NGR. La nappe supérieure est libre et a un comportement hybride. Son niveau piézométrique se situe vers 1,19 m NGR. L'extension latérale de ces deux nappes n'est pas connue.

En plus du complexe aquifère régional, on retrouve des nappes perchées sur les planèzes. Ces nappes alimentent par déversement le complexe aquifère régional. Des émergences localisées entre les altitudes 360 et 700 m NGR enregistrent des débits d'étiage de quelques L/s voire centaines de L/s pour les sources du Chaudron et Bras Guillaume. D'autres sources sont localisées dans le rempart du cirque de Salazie, au sud.

3.4. VALORISATION DES DONNEES ISSUES DE L'IDPR

3.4.1. Principe

L'IDPR ou l'Indice de Développement et Persistance des Réseaux développé par le BRGM (Mardhel et al., 2021) qualifie l'aptitude des terrains à laisser infiltrer ou ruisseler les eaux de surface en comparant le réseau hydrographique naturel (réseau réel) au réseau hydrographique calculé à partir des talwegs (réseau théorique) - (Figure 23).

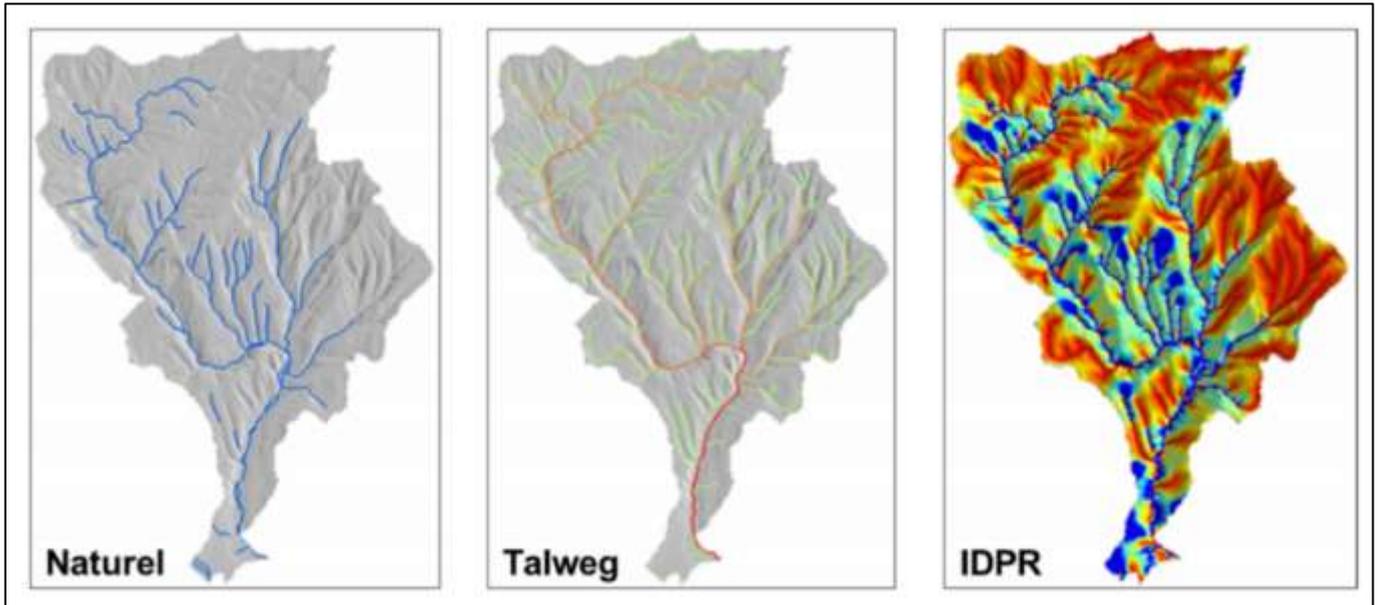


Figure 23 : Réseau hydrographique naturel, réseau de talwegs et IDPR correspondant

L'IDPR résulte du rapport entre la distance au plus proche cours d'eau réel et la distance au plus proche talweg calculé. Il varie selon une gamme comprise entre 0 et 2000 (Tableau 7). Les deux distances sont pondérées par la pente.

IDPR < 1000	Infiltration majoritaire par rapport au ruissellement superficiel. L'eau ruisselant sur les terrains naturels rejoint un axe de drainage défini par l'analyse des talwegs sans que celui-ci ne se concrétise par l'apparition d'un axe hydrologique naturel.
IDPR = 1000	Infiltration et ruissellement superficiel de même importance. Il y a conformité entre la disponibilité des axes de drainage liés au talweg et les écoulements en place.
IDPR > 1000	Ruissellement superficiel majoritaire par rapport à l'infiltration vers le milieu souterrain. L'eau ruisselant sur les terrains naturels rejoint très rapidement un axe hydrologique naturel sans que la présence de celui-ci soit directement justifiée par un talweg.
IDPR voisin ou égal à 2000	Stagnation transitoire ou permanente des eaux, menant à deux interprétations différentes. Si la nappe est proche de la surface des terrains naturels, (cours d'eau et zones humides), le terrain est saturé et l'eau ne s'infiltré pas. Si la nappe est profonde, le caractère ruisselant peut démontrer une imperméabilité des terrains naturels.

Tableau 7 : Correspondance des valeurs d'IDPR

3.4.2. Interprétation des données

Dans les zones où le sous-sol est constitué de matériaux perméables, l'infiltration sera forte et le réseau hydrographique peu développé. A l'inverse, dans les zones où le sous-sol est constitué de formations imperméables mais meubles et érodables, le ruissellement sera important et le réseau hydrographique, bien développé.

Sur le secteur d'étude, plusieurs zones peuvent être mise en évidence grâce à l'IDPR (Figure 24). Sur la frange littorale l'IDPR est faible (inférieur à 1000). Sur la planèze, l'IDPR est plus élevé (supérieur à 1000). L'IDPR est maximum sur les grands escarpements localisés sur les remparts des cours d'eau principaux.

On peut aussi observer sur la planèze des zones où l'infiltration est majoritaire :

- Le sommet du massif de la Roche Ecrite ;
- La plaine des Chicots ;
- La plaine des Fougères ;
- Le lieu-dit « Petit plat », situé dans les hauteurs de la commune de Sainte-Suzanne ;
- Le lieu-dit « Hauts de Menciol », situé dans les hauteurs de la commune de Saint-André.

L'analyse de l'IDPR permet de montrer que :

- L'infiltration est majoritaire sur la frange littorale où on retrouve les dépôts alluvionnaires ;
- Le ruissellement est majoritaire sur les planèzes.

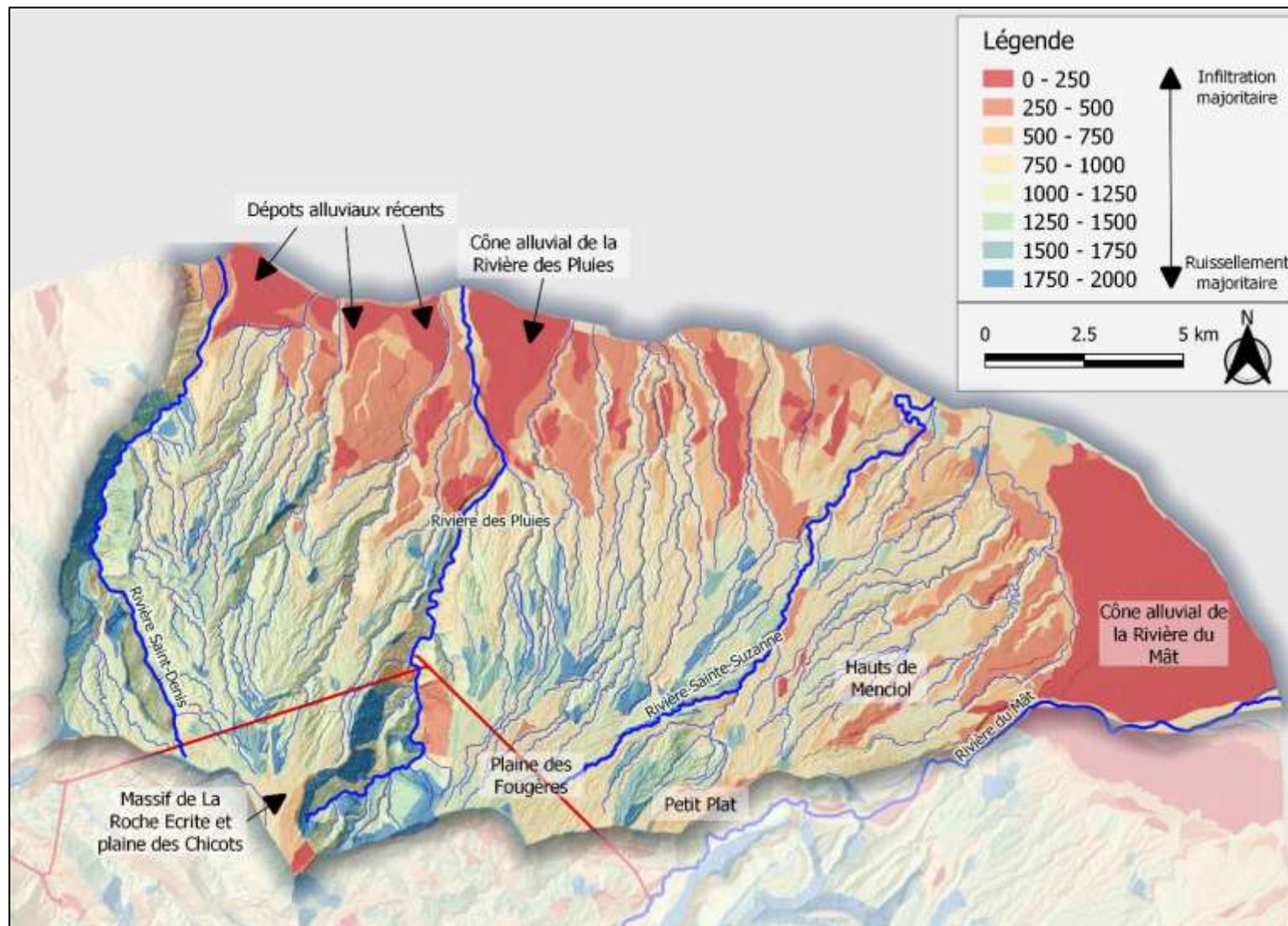


Figure 24 : Représentation cartographique de l'IDPR

3.5. VALORISATION DES DONNEES DE GEOPHYSIQUE AEROPORTEE ISSUE DE LA CAMPAGNE D'AEM

Les données analysées dans le cadre du présent projet sont issues de la campagne AEM de 2014 (Martelet et al., 2014). Les données de la récente campagne AEM de juin 2021 (projet Ganor_EM²) seront analysées dans le cadre de la seconde phase du présent projet.

3.5.1. Principe de mesure

Les grands principes de l'EM se basent sur les équations de Maxwell (19e siècle), et plus particulièrement sur celles du domaine diffusif (i.e. les courants de conduction dominant) 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 en 2014 est le système SkyTEM® (<http://skytem.com>). Il est composé d'une boucle émettrice, qui permet l'excitation du sous-sol et d'une boucle réceptrice, pour mesurer la réponse du sous-sol. Il comporte également, un générateur, comme source d'énergie, ainsi que différents instruments de navigation tels que GPS, inclinomètres et altimètres laser afin de positionner à tout moment la mesure dans l'espace (Figure 25). 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, 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 ~0-50 m) et un moment, dit fort, fournissant une information à des profondeurs plus importantes. Ces deux moments regroupés dans un même point de mesure (un sondage électromagnétique) et sont interprétés conjointement.

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 dissipent 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 300 m en moyenne dans le cadre de la mission menée à 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.

² Rapport BRGM/RP-71628-FR en cours d'édition

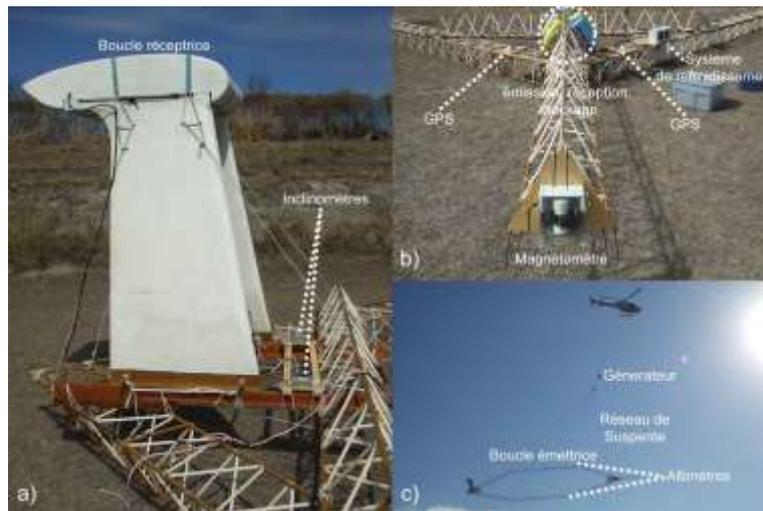


Figure 25: vues du système SkyTEM® ; (a) arrière et (b) avant de la boucle émettrice et (c) en plein vol

3.5.2. Interprétation des données d'AEM

Les données acquises ont permis l'élaboration d'un cube 3D de résistivité électrique permettant d'avoir une vision d'ensemble de la structuration continue de la zone d'étude.

Le travail d'analyse de ces données de géophysique s'est déroulé en plusieurs étapes. Dans un premier temps, une approche qualitative visuelle du bloc 3D (Figure 26) a été faite puis dans un second temps, des coupes verticales dans le bloc 3D ainsi que des coupes d'iso-valeurs (iso-résistivité ou iso-profondeur) ont été réalisées.

Les gammes de résistivité investiguées sont comprises entre 0 et 2000 Ohm.m.

Les gammes de résistivités basses (inférieurs à 10 Ohm.m) sont localisées sur le littoral. En remontant sur la planèze les valeurs de résistivité augmentent jusqu'à atteindre le maximum de la plage investiguée au sommet de ces planèzes (2 000 Ohm.m).

Contribution à l'évaluation des volumes prélevables (EVP) des formations volcaniques du littoral Nord - FRLG101.
Phase 1 – Diagnostic, bilan et conceptualisation en vue de la réalisation d'un modèle de simulation hydrodynamique en régime transitoire

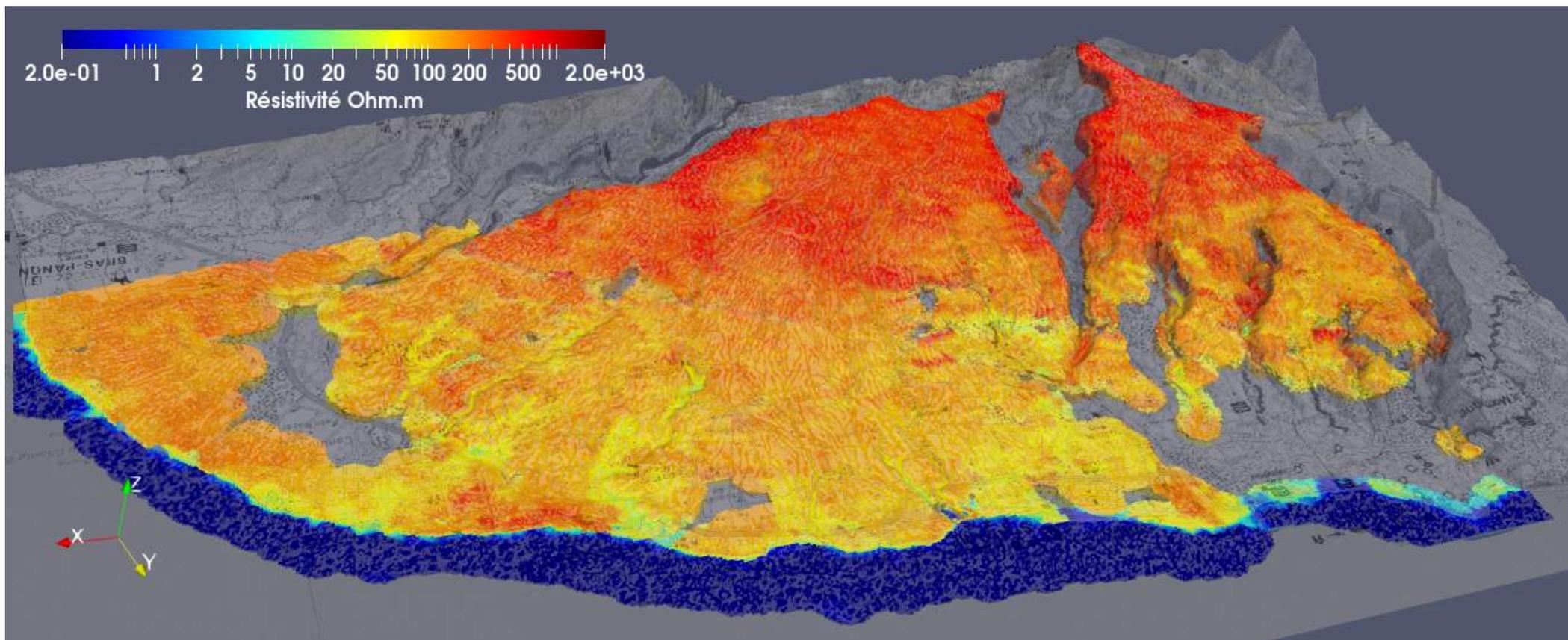


Figure 26 : Représentation 3D des données (Logiciel : Paraview)

a) Cohérence entre les données d'AEM avec la géologie

Les données géophysiques sont mises en relation avec les connaissances de la géologie locale. Les grands ensembles géologiques de la zone d'étude, qu'ils soient de natures alluvionnaires, basaltiques ou gravitaires, sont susceptibles d'être marqués par des contrastes géophysiques. En principe, les lithologies différentes peuvent engendrer des signatures géophysiques contrastées.

A l'échelle du bloc 3D et en surface, les différentes formations géologiques ne sont pas contrastées. Cependant, il existe un gradient de résistivité qui s'exprime en fonction de l'altitude. A la surface, la résistivité augmente en fonction de l'altitude.

A l'aide des coupes d'iso-valeurs de résistivité réalisées depuis le bloc 3D, il est possible de distinguer des formations géologiques ayant des résistivités proches. Les coulées basaltiques localisées au pied des planèzes et les formations alluvionnaires localisées sur les plaines alluviales des cours d'eau principaux (rivières Saint-Denis, des Pluies et du Mât) s'expriment entre des gammes de résistivités comprises entre 50 et 100 Ohm.m (Figure 27). Des traitements spécifiques pourront être mis en œuvre dans la seconde phase du présent projet afin de déterminer si des contrastes géophysiques peuvent être mis en évidence.

Les formations basaltiques localisées sur les sommets des planèzes (Plaines des Fougères et massif de la Roche Ecrite) s'expriment entre des résistivités comprises entre 500 et 2 000 Ohm.m (Figure 28).

Les formations basaltiques et alluvionnaires localisées dans les bas ont des faibles résistivités (entre 50 et 100 Ohm.m) et les formations basaltiques localisées dans les hauteurs des planèzes sont plus résistives (500 – 2 000 Ohm.m). Cette différence pourrait s'expliquer par le phénomène d'altération qui est plus important à faible altitude, où la végétation est plus dense, qu'en haute altitude.

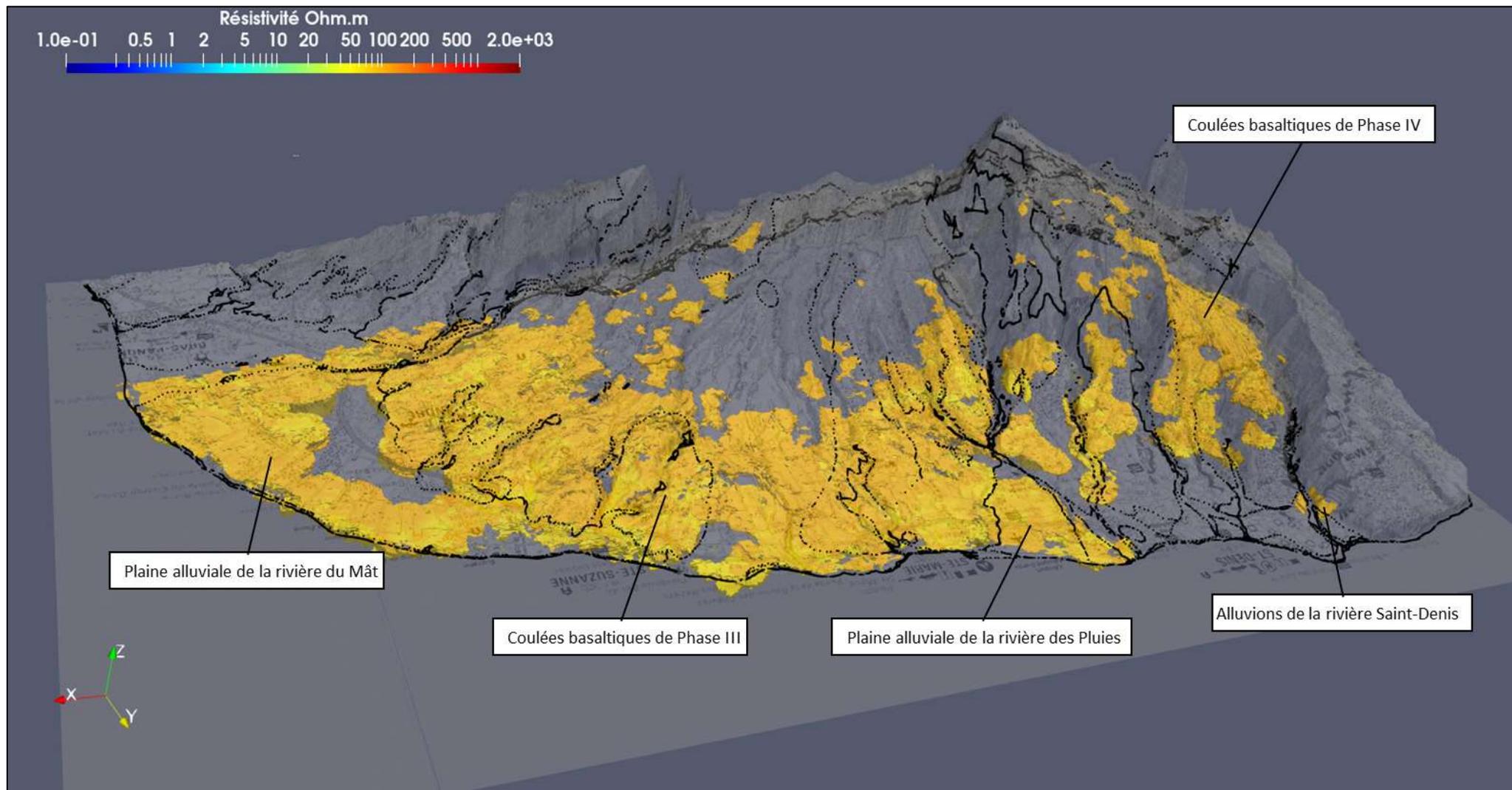


Figure 27 : Représentation 3D des données AEM (Gamme de résistivité : 50 - 100 Ohm.m)

Les traits noirs en pointillés représentent des limites géologiques

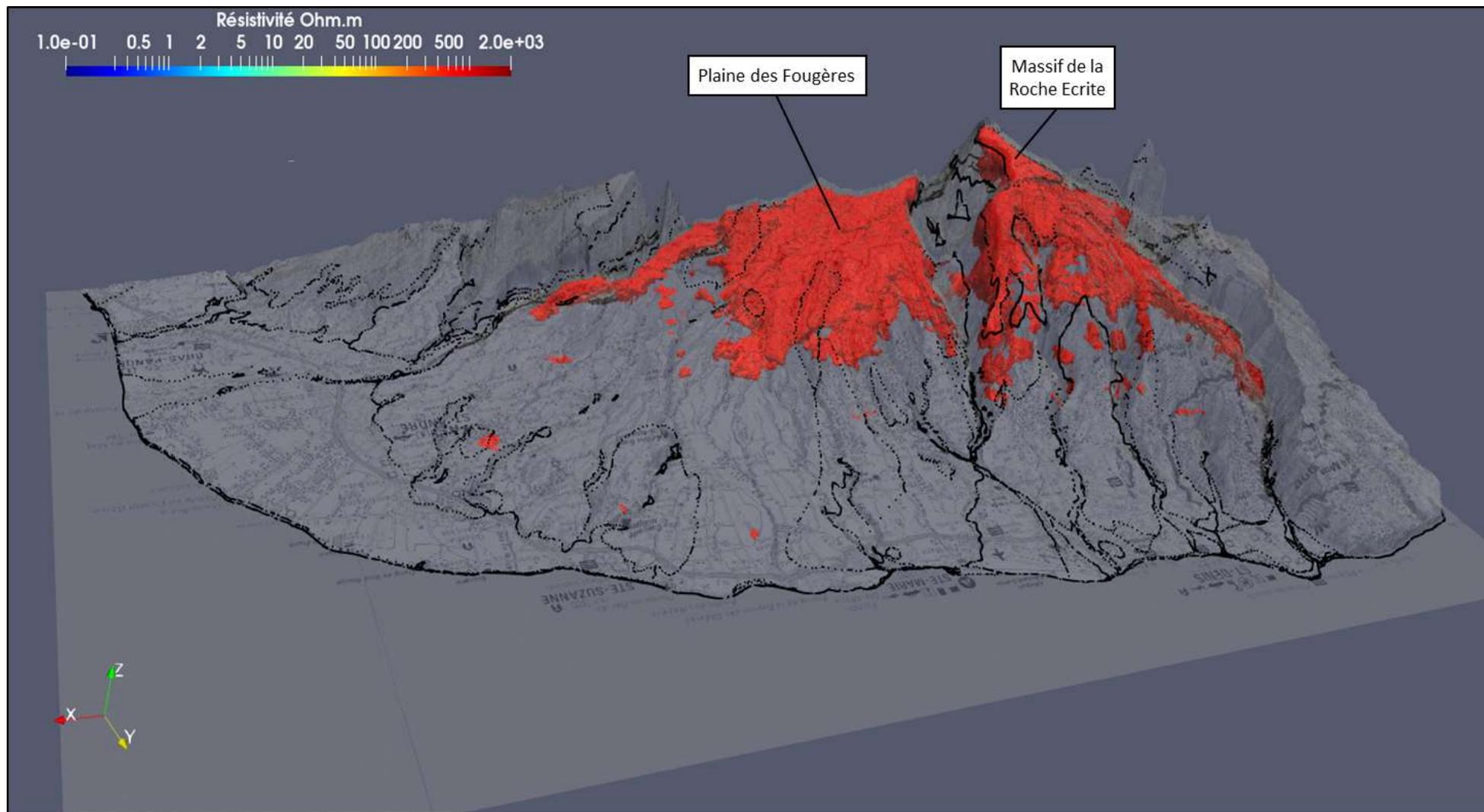


Figure 28 : Représentation 3D des données AEM (Gamme de résistivité : 500 - 2000 Ohm.m)

Les traits noirs en pointillés représentent des limites géologiques

b) Phénomène d'intrusion saline

La bordure littorale est marquée par des résistivités inférieures à $8 \Omega.m$ (Figure 29). Ces très faibles résistivités sont attribuées au phénomène de salinisation des aquifères pour la partie terrestre et aux sédiments saturés en eau salée pour la partie océanique (Dumont et al., 2018).

Le littoral de la commune de Saint-Denis n'a pas été entièrement couvert par l'AEM car le survol de cette zone fortement urbanisée avec le dispositif de mesure n'est pas autorisé.

L'intrusion saline est visible sur une centaine de mètres en distance horizontale par rapport à la côte (voire quelques centaines de mètres) et à une profondeur pouvant aller jusqu'à la centaine de mètres. La géométrie de l'intrusion saline est redressée (proche du trait de côte).

Au niveau des embouchures des cours d'eau, le phénomène d'intrusion saline est marqué. L'eau salée pénètre dans les dépôts alluvionnaires des embouchures. Le littoral composé de coulées basaltiques est moins touché par ce phénomène.

A Quartier-Français, l'étalement horizontal est plus important (1,5 km à l'embouchure de la Grande rivière Saint-Jean et 500 m à l'embouchure de la Rivière Sainte-Suzanne) – (Figure 30).

Sur le littoral de Saint-Denis le phénomène est bien marqué, malheureusement des données sont manquantes pour permettre de le cartographier (zone trop urbanisée).

Les données de géophysique aéroportée permettent d'avoir une bonne représentation du phénomène d'intrusion saline. Ce phénomène est plus important sur les formations alluvionnaires que sur les formations basaltiques. L'étalement horizontal par rapport à la côte est compris entre une dizaine de mètres et peut atteindre jusqu'à 1,5 kilomètres au niveau de Quartier Français.

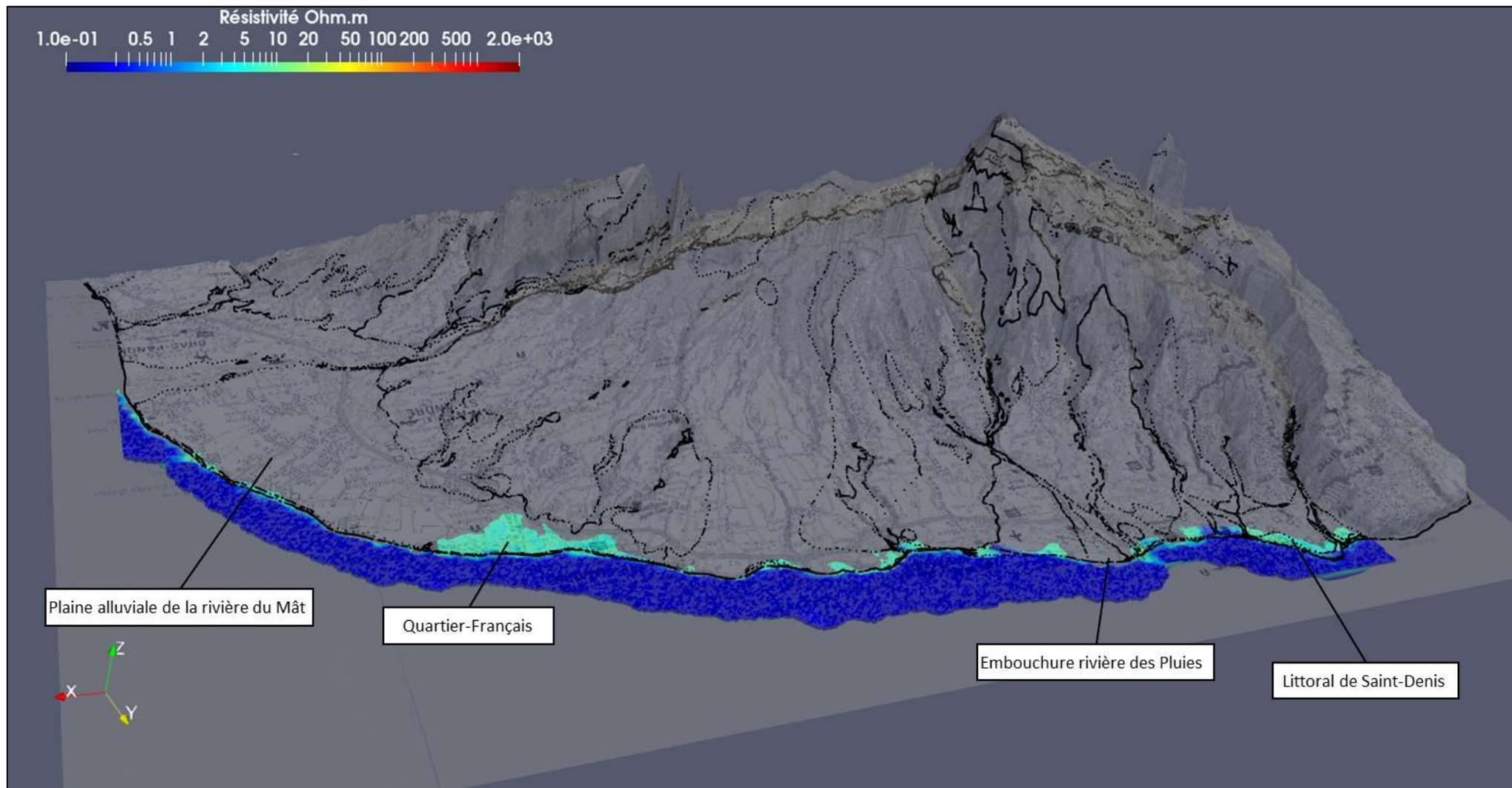


Figure 29 : Représentation 3D des données AEM (Gamme de résistivité : 0 - 8 Ohm.m)
Cette représentation illustre le phénomène d'intrusion saline.
Les traits noirs en pointillés représentent les limites de la carte géologique (BRGM/LGSR, 2006).

Contribution à l'évaluation des volumes prélevables (EVP) des formations volcaniques du littoral Nord - FRLG101.
Phase 1 – Diagnostic, bilan et conceptualisation en vue de la réalisation d'un modèle de simulation hydrodynamique en régime transitoire

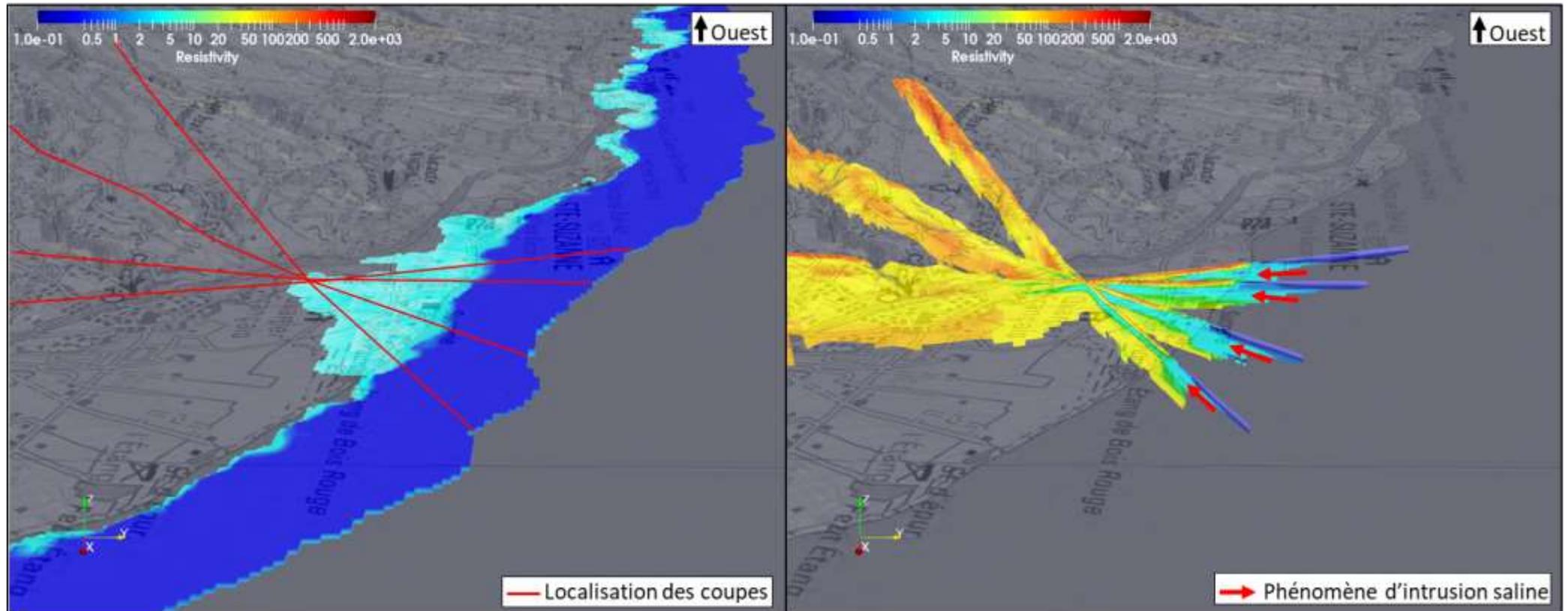


Figure 30 : Représentation 3D des données AEM (Gamme de résistivité : 0 - 8 Ohm.m) sur le secteur de Quartier-Français
Les coupes illustrent le phénomène d'intrusion saline sur le secteur de Quartier-Français

c) Structures particulières

Grace aux coupes verticales et d'iso-valeurs de résistivité il est possible d'observer des structures particulières sur la zone d'étude. Sur la commune de Saint-Denis, aucune structure particulière n'a été observée.

A l'est, sur la planèze de Sainte-Marie, il est possible d'observer plusieurs structures résistantes qui se propage du sud vers le nord (Figure 31). Ces structures prennent source sur la plaine des Fougères et suivent la pente de la planèze. L'axe le plus à l'ouest est parallèle à la rivière Sainte-Suzanne et l'autre est parallèle à la rivière Saint-Jean. Ces deux axes se subdivisent pour former deux nouveaux axes.

Les deux axes localisés aux abords de la rivière Sainte-Suzanne sont visibles à l'aide de coupes d'iso-valeurs de résistivités comprises entre 50 et 100 Ohm.m (Figure 32). Ces axes, d'orientation NNE-SSO, atteignent des profondeurs allant de 250 à 300 m de profondeur.

Ces structures ont été identifiées par Dumont et al. (Dumont et al., 2021). Il s'agit d'axes de remplissage de paléovallée par des coulées basaltiques de Phase III (Billard and Vincent, 1974). Ces axes de remplissage de paléovallée canalisent les flux souterrains en profondeur et les restituent au cours d'eau le long de leurs parcours.

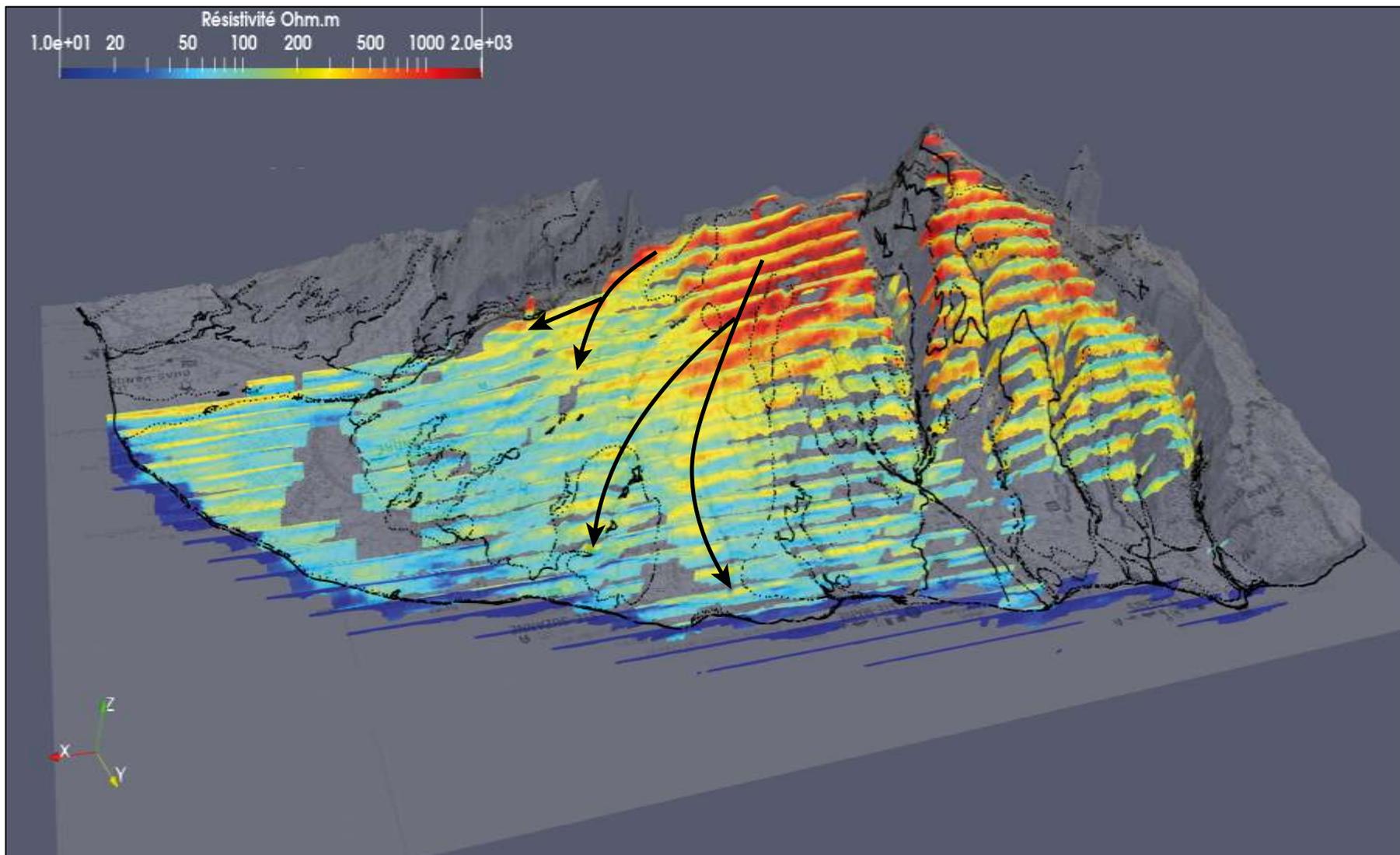


Figure 31 : Représentation en coupes des données AEM (Gamme de résistivité : 0 - 2000 Ohm.m)
Les traits noirs en pointillés représentent des limites géologiques (BRGM/LGSR, 2006).
Les flèches noires représentent des axes de mises en place des formations de phase III.

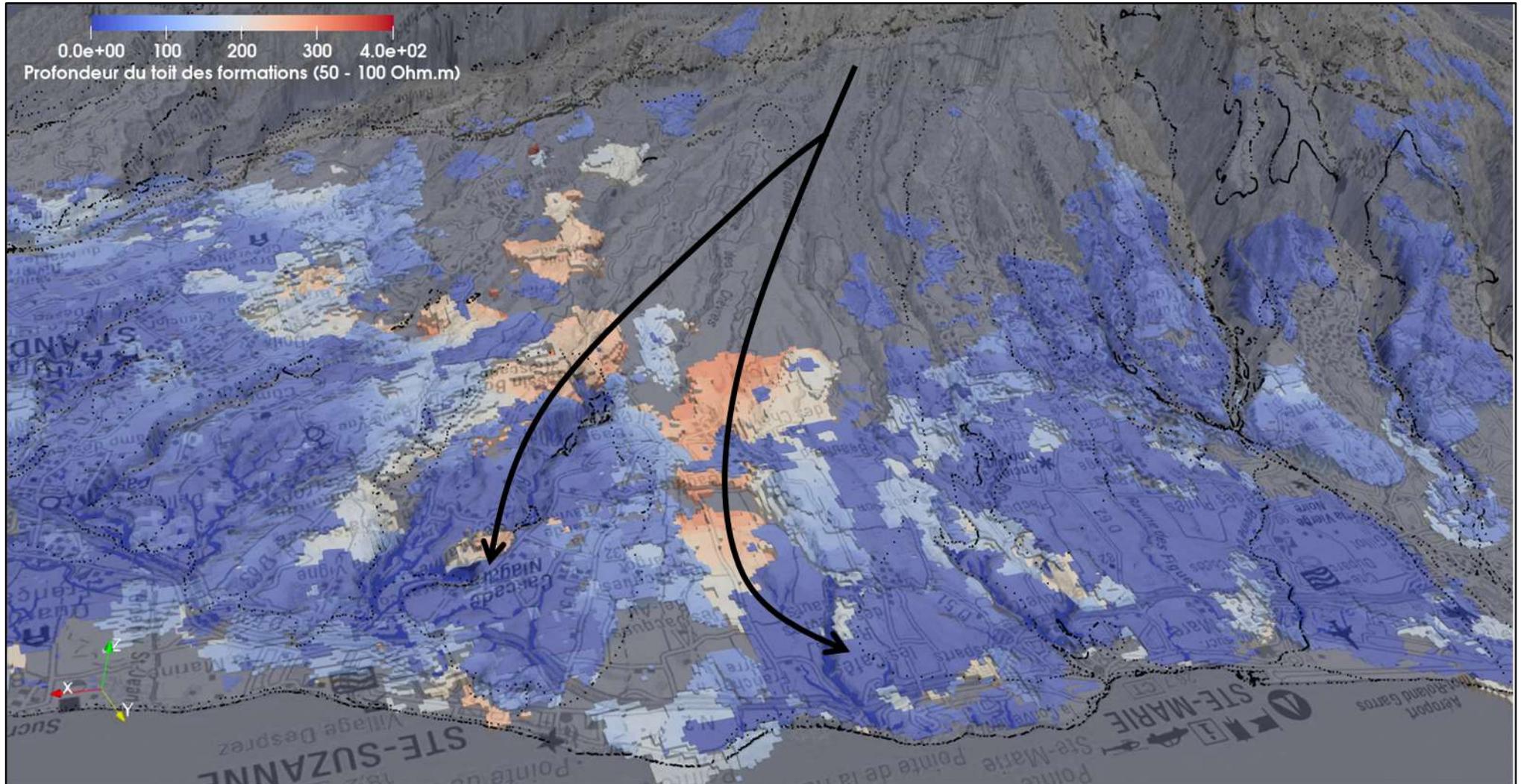


Figure 32 : Représentation en profondeur du mur des paléovallées (Gamme de résistivité : 50 - 100 Ohm.m)
Code couleur : Profondeur par rapport à la surface du sol (Bleu : 0 – 100 m // Bleu clair : 100 – 200 m // Rouge clair : 200 – 300m // Rouge : 300 – 400 m)
Les traits noirs en pointillés représentent des limites géologiques (BRGM/LGSR, 2006).

3.5.3. Bilan

Les données de géophysique aéroportée permettent d'obtenir une représentation en 3D de la zone d'étude selon le paramètre de résistivité électrique. En effet, les informations récoltées permettent notamment de distinguer des ensembles géologiques, de connaître les caractéristiques spatiales de l'intrusion saline et d'identifier des structures géologiques particulières.

Sur la commune de Saint-Denis, aucune information n'a pu être extraite des données de géophysique. Le survol de la ville avec le dispositif est interdit. Cependant, plus à l'est, la géophysique aéroportée permet de mettre en évidence des différences de résistivité pouvant potentiellement correspondre à des contrastes de lithologie et/ou d'altération. Dans les bas, les formations géologiques saines ne possèdent pas la même signature de résistivité que les formations géologiques localisées dans les hauts de la plaine (recevant plus de précipitations et plus altérées).

Le phénomène d'intrusion saline a pu être cartographié. Ce phénomène est plus important sur les formations alluvionnaires que sur les formations basaltiques. L'étalement horizontal par rapport à la côte est compris entre la dizaine de mètres et peut atteindre jusqu'à 1,5 kilomètres.

Les structures particulières identifiées sur la plaine à l'est sont probablement des axes de remplissage de paléovallée par des coulées basaltiques de Phase III (Billard ; 1974). Ces axes de remplissage de paléovallées canalisent les flux souterrains en profondeur et les restituent au cours d'eau le long de leurs parcours.

3.6. GEOMETRIE DES FORMATIONS GEOLOGIQUES AQUIFERES

La géométrie des formations géologiques aquifères a été appréhendée par l'analyse de la carte géologique, des données extraites des coupes géologiques de forage, et grâce à la bibliographie. La géométrie des formations sera intégrée au modèle lors de la prochaine phase du projet. En ce qui concerne la valorisation de la géophysique AEM, il n'a pas été possible d'extraire les géométries des formations géologiques. Toutefois, des traitements spécifiques sont envisagés en phase 2 du présent projet (résolution du problème d'équivalence entre formations alluvionnaires et basaltiques sur le littoral).

3.6.1. Formations basaltiques aquifères

Les formations volcaniques de Phase III et IV émanant du Piton des Neiges sont aquifères. La puissance de ces formations est de l'ordre de la centaine de mètres sur la frange littorale. C'est dans ces formations basaltiques que se développe le complexe aquifère régional. La pente moyenne du complexe aquifère régional sur le secteur est comprise entre 1 et 6 ‰. Le complexe aquifère régional est présent sous toute la zone d'étude mais n'est atteint par forage seulement sur la frange littorale. En effet, l'épaisseur de la zone non-saturée est trop importante sur les planèzes.

Les formations basaltiques de Phase II du Piton des Neiges représentent le substratum du complexe aquifère régional. Cet horizon a été recoupé par les forages localisés entre la rivière des Pluies et la rivière Sainte Suzanne, à des altitudes comprises entre -34 et -62 m NGR.

Le comportement de la piézométrie dans ces formations basaltiques est inertielle et hybride (cf. chapitre 3.3.1 Piézométrie).

3.6.2. Formations alluvionnaires aquifères

Les formations alluvionnaires se développent sur la frange littorale à l'exutoire des cours d'eau principaux (rivière Saint-Denis, des Pluies, Sainte-Suzanne et du Mât) et des ravines temporaires. Ces alluvions recouvrent les formations basaltiques. L'épaisseur des formations croît du Sud au Nord et sont de l'ordre de 30 à 40 m au niveau de la rivière Saint-Denis. Le complexe aquifère régional se développe dans ces formations.

A l'est, la plaine alluvionnaire en rive gauche de la Rivière du Mât peut être divisée en deux niveaux aquifères :

- L'aquifère supérieur, à nappe libre, contenu dans les formations alluviales de subsurface alimentés par les eaux météoriques ;
- L'aquifère inférieur, à nappe captive, contenus dans des formations basaltiques et alluvionnaires.

Les nappes alluviales sont en continuité hydraulique avec le complexe aquifère régional. Le comportement de la piézométrie dans ces formations est réactive en nappe libre et inertiel en nappe captive (cf. chapitre 3.3.1 Piézométrie).

3.6.3. Nappes perchées

Des émergences de nappes perchées dans des formations basaltiques sont localisées dans les hauts de la zone d'étude. Ces nappes sont portées par des horizons à faible perméabilité et ont une faible épaisseur de zone saturée. En saison sèche, les sources peuvent atteindre des débits de l'ordre du L/s ou être taris.

Les sources du Chaudron et du Bras Guillaume sont des émergences de nappes perchées profondes comprises dans des formations basaltiques. Elles ne sont pas en connexion directe avec le complexe aquifère régional. Les débits d'étiage sont de l'ordre de la centaine de L/s.

3.6.4. Formations particulières

Sur la zone d'étude, plusieurs formations particulières ont pu être identifiées :

- Une superposition de deux nappes (nappe libre sur une nappe captive) au niveau du forage Ravine des Chèvres ;
- Dans l'axe de la rivière des Pluies, une zone de forte perméabilité liée à la présence de zone de fracture ;
- Aux abords de la rivière Sainte-Suzanne, des paléovallées d'orientations NNE-SSO représentent des axes de drainages préférentielles des écoulements souterrains ;
- Au niveau du forage Chemin Grimm, une coulée boueuse de 64 m d'épaisseur qui représente une zone à faible perméabilité.

3.6.5. Bilan

Le complexe aquifère se développe sous l'ensemble de la zone d'étude dans les formations basaltiques et alluvionnaires. Il est exploité par forages uniquement sur la frange littorale. Sur les planèzes, la zone non-saturée, peut atteindre plus de 1 000 mètres. Pour les secteurs situés au-delà de 250-300 m d'altitude, le complexe aquifère régional n'est pas reconnu.

Les nappes perchées localisées sur les planèzes sont alimentées par l'infiltration des eaux de pluies. Il est supposé que ces nappes perchées alimentent le complexe aquifère régional sous-jacents par déversement.

3.7. DONNEES HYDROLOGIQUES

Les données hydrométriques sont nécessaires afin d'appréhender le cycle de l'eau et les conditions d'alimentation des aquifères sous-jacents. Elles seront utilisées lors de l'élaboration du modèle lors de la prochaine phase du projet.

3.7.1. Mesures en continu du débit des cours d'eau de l'Office de l'eau

L'Office de l'eau de La Réunion suit depuis plusieurs décennies les débits de 9 rivières et ravines sur la zone d'étude (Figure 33 et Tableau 8). Les bassins versants de la rivière des Pluies et la rivière Sainte-Suzanne sont couverts chacun par trois stations de mesure.

Les cours d'eau ont un cycle annuel qui dépend des précipitations. Lors des saisons cycloniques, les pluies sont abondantes et les hydrosytèmes sont saturés, les rivières sont en crue. Lors des saisons sèches, les précipitations sont moins importantes et les cours d'eau atteignent leurs niveaux d'étiage. Tous les cours d'eau suivis sont en eau toute l'année sauf la ravine du Butor qui n'est en eau que pendant quelques jours à quelques semaines en fonction des intensités de pluies.

Dénomination	Code Office de l'eau	Code Sandre	Date de mise en service
Rivière Saint-Denis à l'amont du captage AEP	14015	10320350	06/04/1978
Ravine du Butor	14289	-	05/07/1993
Rivière des Pluies (pont Domenjod)	21101	10310850	21/10/1997
Rivière des Pluies à l'aplomb du piton Tanan	14287	10310812	30/04/1987
Ravine Mère Canal à La Plaine des Fougères	21201	-	30/12/2005
Rivière Sainte-Suzanne amont confluence Bras Laurent	21083	10300215	22/12/1986
Bras Laurent amont confluence Rivière Sainte-Suzanne	21062	10305908	15/10/1992
Rivière Sainte-Suzanne en amont de la cascade Niagara	22180	10300250	01/01/2008
Grand Bras de la Grande Rivière Saint-Jean	22011	10300110	06/10/1977
Grande Rivière Saint-Jean à la cascade Pichon	22181	-	01/04/2009
Petite Rivière Saint-Jean (cascade Délices)	22182	-	03/02/2009

Tableau 8 : Stations hydrométriques de l'Office de l'eau

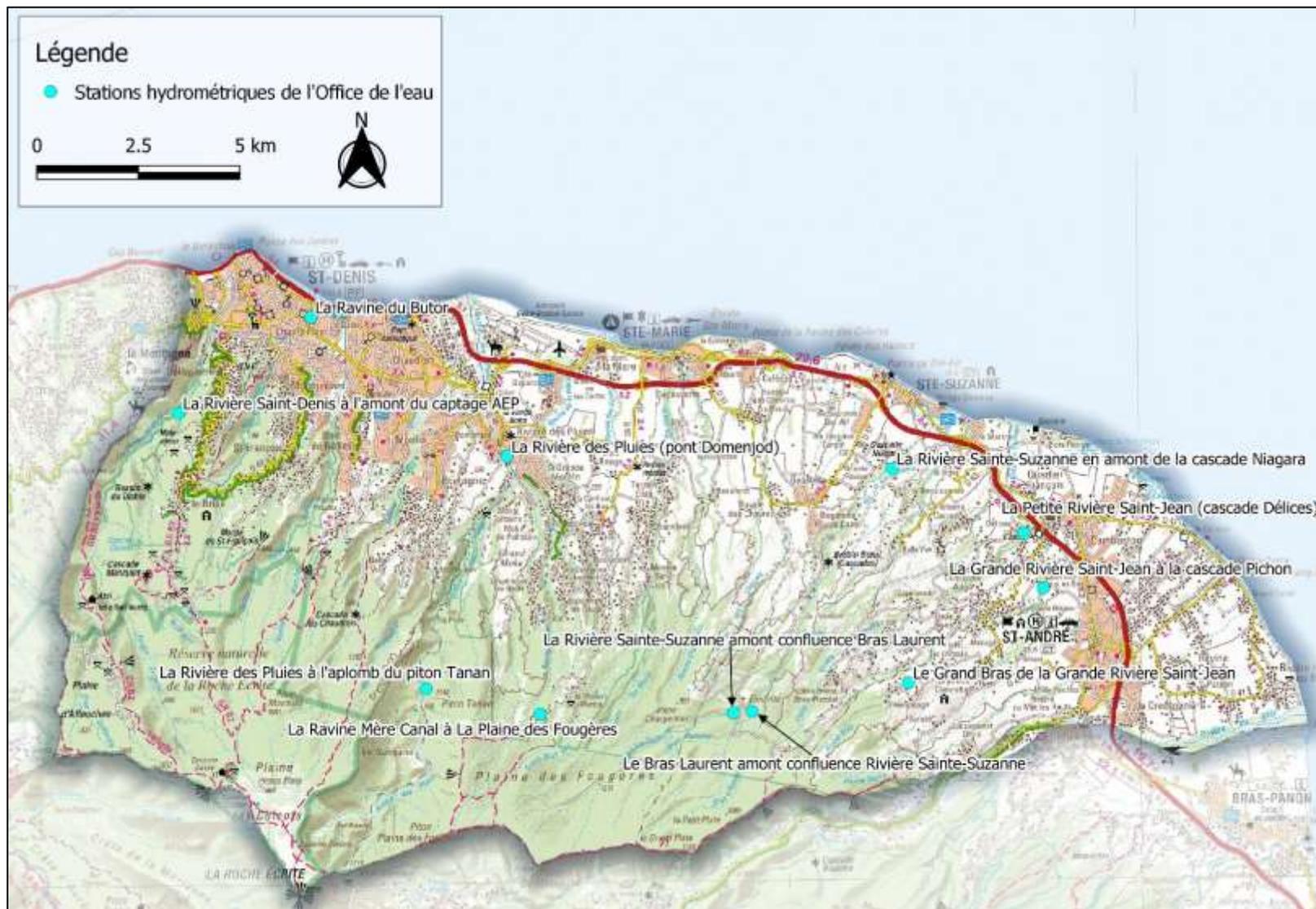


Figure 33 : Stations hydrométriques de l'Office de l'eau (Source fond de carte : IGN)

3.7.2. Jaugeages des cours d'eau

a) Bilan hydrométrique

Les principaux cours d'eau de la zone d'étude (Rivière Saint-Denis, rivière des Pluies, rivière Sainte-Suzanne et la Rivière du Mât) ont été suivis par l'Office de l'eau qui a élaboré des bilans hydrométriques entre les années 1999 et 2005 (Figure 34). Les bilans hydrométriques ont été réalisés en saison sèche. Ces bilans permettent de localiser les zones d'apports (augmentation du débit entre deux points de jaugeage), les zones de pertes (diminution de débit observé) et de quantifier les volumes d'eau s'infiltrant dans le complexe aquifère régional.

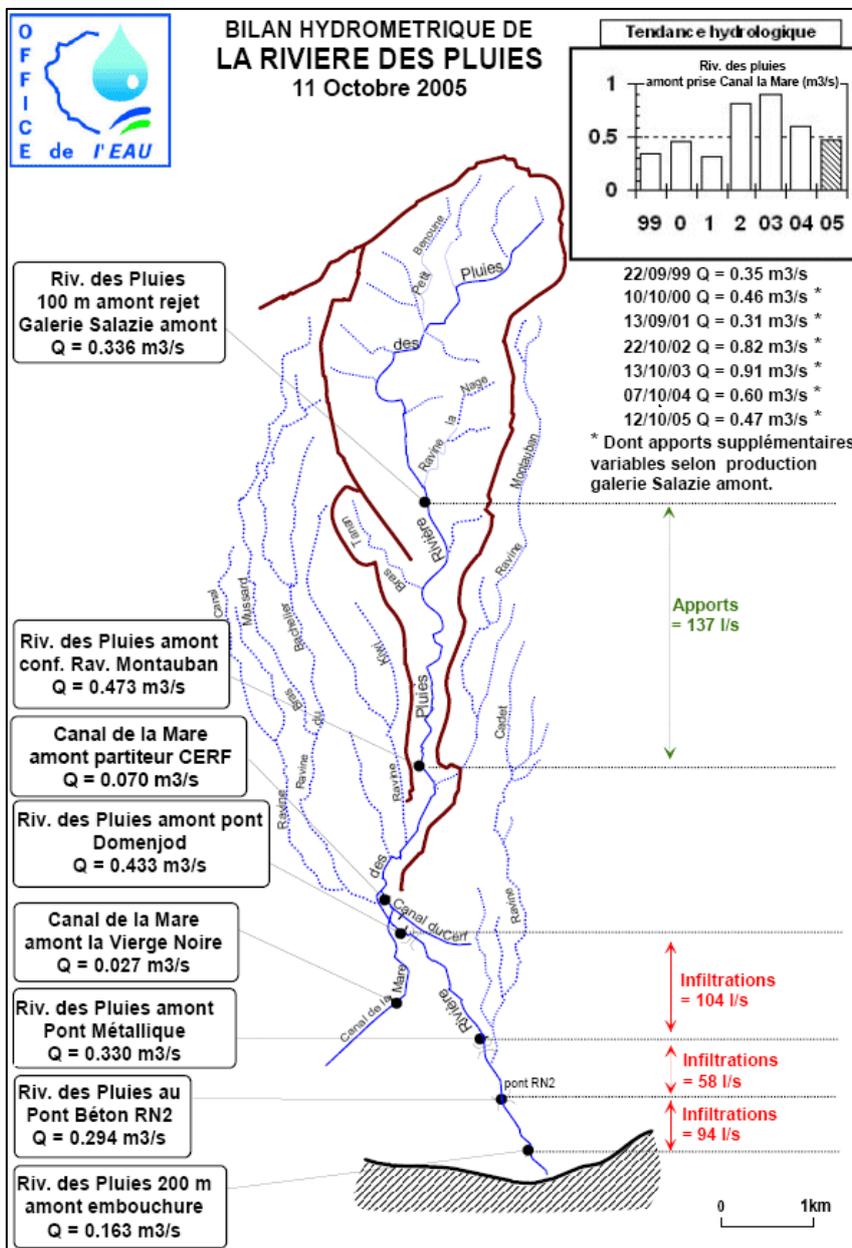


Figure 34 : Bilan hydrométrique de la rivière des Pluies réalisé par l'Office de l'eau en Octobre 2005.

Une synthèse des bilans hydrométriques a été réalisée (Tableau 9). Une moyenne arithmétique et l'écart-type des apports et des pertes des cours d'eau ont été calculés (vert : apports et rouge : pertes).

	Apports	Zone des apports	Pertes	Zones des pertes
<p>Rivière Saint-Denis</p> <p>Superficie : 30,8 km² Bras principal : 14,3 km</p>	<p>50 L/s en 1999 41 L/s en 2000 38 L/s en 2001 54 L/s en 2002 41 L/s en 2003 51 L/s en 2004 51 L/s en 2005</p> <p>Moyenne = 46,5 L/s (Ecart type = 6,3)</p>	<p>Entre le captage AEP et le lieu-dit « La Colline » à 100 m en amont de la passerelle</p>	<p>70 L/s en 1999 51 L/s en 2000 58 L/s en 2001 85 L/s en 2002 47 L/s en 2003 57 L/s en 2004 22 L/s en 2005</p> <p>Moyenne = 55 L/s (Ecart type = 19,6)</p>	<p>Entre le lieu-dit « La Colline » à 100 m en amont de la passerelle (≈ 30 m NGR) et jusqu'à l'embouchure</p>
<p>Rivière des Pluies</p> <p>Superficie : 46 km² Bras principal : 17,3 km</p>	<p>40 L/s en 1997 156 L/s en 2000 55 L/s en 2001 499 L/s en 2002 569 L/s en 2003 281 L/s en 2004 137 L/s en 2005</p> <p>Moyenne = 250 L/s (Ecart type = 211)</p>	<p>Entre l'amont du rejet de la Galerie Salazie Amont et l'amont de la confluence de la ravine Montauban</p>	<p>250 L/s en 1997 487 L/s en 1998 133 L/s en 1999 311 L/s en 2000 180 L/s en 2001 149 L/s en 2002 177 L/s en 2003 156 L/s en 2004 257 L/s en 2005</p> <p>Moyenne = 233 L/s (Ecart type = 112)</p>	<p>Entre le pont Domenjod (≈ 100 m NGR) et l'embouchure</p>
<p>Rivière Sainte-Suzanne</p> <p>Superficie : 30 km² Bras principal : 27 km</p>	<p>79 L/s en 1997 143 L/s en 1998 66 L/s en 1999 391 L/s en 2000 7 L/s en 2001 42 L/s en 2002 185 L/s en 2003 3 L/s en 2004 150 L/s en 2005</p> <p>Moyenne = 120 L/s (Ecart type = 120)</p>	<p>Entre la confluence avec le Bras Laurent et l'embouchure (remarque : Captages le long du cours d'eau)</p>	<p>Pas de pertes mesurées entre les points jaugés.</p>	<p>Pas de pertes mesurées entre les points jaugés.</p>
<p>Rivière du Mât</p> <p>Superficie : 130 km² Bras principal : 35 km</p>	<p>2 080 L/s en 1997 1 600 L/s en 1998 1 070 L/s en 1999 1 800 en 2000 1 110 L/s en 2001 760 L/s en 2002 680 L/s en 2003 1 040 L/s en 2004 760 L/s en 2005</p> <p>Moyenne = 1 200 L/s (Ecart type = 172)</p>	<p>Entre la confluence de la rivière du Mât avec la rivière des Fleurs Jaunes et la prise irrigation</p>	<p>730 L/s en 1997 770 L/s en 1998 800 L/s en 1999 440 L/s en 2000 900 L/s en 2001 1 050 L/s en 2002 420 L/s en 2003 360 L/s en 2004 870 L/s en 2005</p> <p>Moyenne = 700 L/s (Ecart type = 218)</p>	<p>Entre la prise irrigation (≈ 100 m NGR) et l'embouchure</p>

Tableau 9 : Synthèse des bilans hydrométriques réalisés par l'Office de l'eau entre les années 1997 et 2005.

D'après ces bilans hydrométriques, les zones d'apports des cours d'eau pérennes se trouvent dans la partie supérieure des bassins versants et le long du parcours des cours d'eau. Il existe un lien entre la superficie du bassin versant et les apports. Plus le bassin versant du cours d'eau est important plus ils possèdent d'affluents et donc plus les apports vont être conséquents.

Les zones de pertes et donc d'infiltration vers le complexe aquifère régional ont lieu dans la partie inférieure des bassins versants. Sur ces zones d'infiltration, le lit des rivières est composé de dépôts alluvionnaires et la pente est douce (entre 2 et 4 %). Les volumes infiltrés cumulés de la rivière Saint-Denis, la rivière des Pluies et la rivière Sainte-Suzanne en saison sèche sont de l'ordre de 300 L/s. Les infiltrations de la rivière du Mât à l'étiage sont de l'ordre de 700 L/s.

b) Jaugeages ponctuels

L'Office de l'eau réalise des jaugeages des cours d'eau de la Réunion. Les données sont accessibles sur la bases de données de l'Office de l'eau. Ces données permettent de compléter les bilans hydrométriques sur les ravines non couvertes par les campagnes de 1999 à 2005.

Une campagne de terrain a été réalisée afin de compléter les données hydrologiques manquantes sur la zone d'étude. Les cours d'eau temporaires ont été investigués en priorité. Cette campagne de terrain a été réalisée à l'étiage (septembre 2021) – (Figure 35). Les ravines en eaux et sèches ont pu être cartographiées. Les débits ont été jaugés visuellement (ou à l'aide d'un seau si la configuration du cours d'eau le permettait). Tous les cours d'eau accessibles en voiture (radier ou pont) ou à pieds (accès par des sentiers de randonnées) ont été visités. Certaines ravines n'ont pas pu être visitées à cause de l'accès dangereux ou de l'accès nécessitant plusieurs heures de marche.

Les cours d'eau investigués sont détaillés ci-après :

- **Ravine du Butor :**
Cette ravine est sèche sur la bordure littorale. En remontant vers la planèze, cette ravine et ses affluents (Bras Mahot, Bras Samy et Ravine Duchesne et la ravine Boucan Launay sont en eau, avec des débits d'étiage de l'ordre de la dizaine de litres par seconde. L'infiltration de la totalité du débit d'étiage soit 10 L/s, de ces ravines est observé à une altitude d'environ 300 m NGR.
- **Ravine Patates à Durand :**
Cette ravine est sèche sur la bordure littorale, pourtant la ravine Blanche (avec un débit d'étiage de l'ordre de 5-10 L/s) ainsi que d'autres ravines et sources perchées (de l'ordre du L/s en régime d'étiage) affluent dans cette ravine. L'infiltration, de l'ordre de la dizaine de L/s, a lieu dans le lit de la ravine Patates à Durand composé d'alluvions récentes. La zone d'infiltration n'a pas pu être observée sur le terrain, cependant en se basant sur une approche cartographique elle devrait se situer entre 300 et 500 m NGR.
- **Ravine du Chaudron :**
Cette ravine est sèche sur la frange littorale et au-dessus de la cascade du même nom. Cette ravine est alimentée par des sources localisées au pied d'une rupture de pente de 400 m. Les débits d'étiage est de l'ordre de la centaine de L/s (Bourhane et al., 2017). Une partie de cette eau est captée pour l'AEP, le surplus s'infiltré dans le lit de la ravine entre 300 m et 100 m d'altitude.
- **Ravine Bachelier et Ravine Sèche :**
Ces ravines confluent à 80 m d'altitude. Il n'y a pas de circulation d'eau de surface entre la confluence et l'affluence avec la rivière des Pluies. Le débit d'étiage de ces ravines à 200 m d'altitude est de l'ordre de 2 à 4 litres par secondes. En remontant sur la planèze, au lieu-dit « l'Espérance les Bas », le débit augmente et est de l'ordre de 5 à 10 litres par seconde (apport de la source Apollon dans la ravine Sèche). Plus haut sur la planèze, au lieu-dit « l'Espérance les Hauts » les ravines sont sèches.

- **Ravine La Mare, Ravine des Figues et Ravine du Parc**
Ces ravines sont totalement sèches de l'embouchure jusqu'au hauteur de la planèze de Sainte-Marie.
- **Ravine des Cocos**
Cette ravine est un affluent de la rivière Sainte-Marie (confluence à 140 m d'altitude). Cette ravine est en eau aux niveaux des lieudits « Montée Sano » et « Chiendent ». Le débit d'étiage est de l'ordre de 5 litres par seconde. Toute l'eau s'infiltré à 250 m d'altitude.
- **Rivière Sainte-Marie**
Ce cours d'eau est celui qui a le débit d'étiage le plus important sur le secteur. Des jaugeages de l'Office de l'eau au niveau du Bassin Bleu ont été effectués entre les années 1976 et 2003 (58 jaugeages effectués sur cette période). Le débit d'étiage est de l'ordre d'une trentaine de litres par seconde. Le captage de Bassin Bleu, en amont du point de jaugeage, prélève une trentaine de litres par seconde. La rivière Sainte-Marie est alimentée par des ravines (situées en rive gauche), les apports de celles-ci sont de l'ordre de la vingtaine de litres par seconde. En aval, à la confluence avec la ravine des Cocos, la ravine est totalement sèche jusqu'à l'embouchure où le débit d'étiage est de l'ordre de 10-20 litres par seconde.
- **Ravine Charpentier**
La ravine Charpentier est en eau de l'embouchure jusqu'aux hauteurs dans la planèze. Le débit d'étiage est soutenue aux lieudits « La Révolution » et « Beaufond », de l'ordre de 25 à 50 litres par secondes. A l'embouchure, le débit diminue pour atteindre la dizaine de litres par seconde.
- **Entre la Ravine Charpentier et la Rivière Sainte-Suzanne**
Les cours d'eau entre la ravine Charpentier et la rivière Saint-Suzanne, soit la ravine Jean-Baptiste (affluent de la ravine Charpentier), la ravine à Bardeaux, la ravine en Bois, la ravine des Chèvres, la ravine du Grand Hazier et la ravine Maillot sont totalement à sec en période d'étiage.
- **Grande Rivière Saint-Jean**
Cette rivière est en eau de l'embouchure jusqu'aux hauteurs de la planèze. Le débit de la rivière augmente vers l'aval. Dans les hauts le débit est de l'ordre de la dizaine de litres par seconde. Plusieurs ravines qui confluent à différentes altitudes (250 m, 70 m et 30 m NGR). Au niveau de l'embouchure, le débit est important (50-100 litres par seconde).
- **Petite Rivière Saint-Jean**
Cette rivière est un affluent de la Grande Rivière Saint-Jean (confluence à 6 m NGR). Le débit est constant le long du cours d'eau, de l'ordre de 5-10 litres par secondes. Le Bras Pistolet qui est un affluent se trouve à une altitude de 239 m NGR et à un débit de l'ordre de 5-10 litre par seconde.

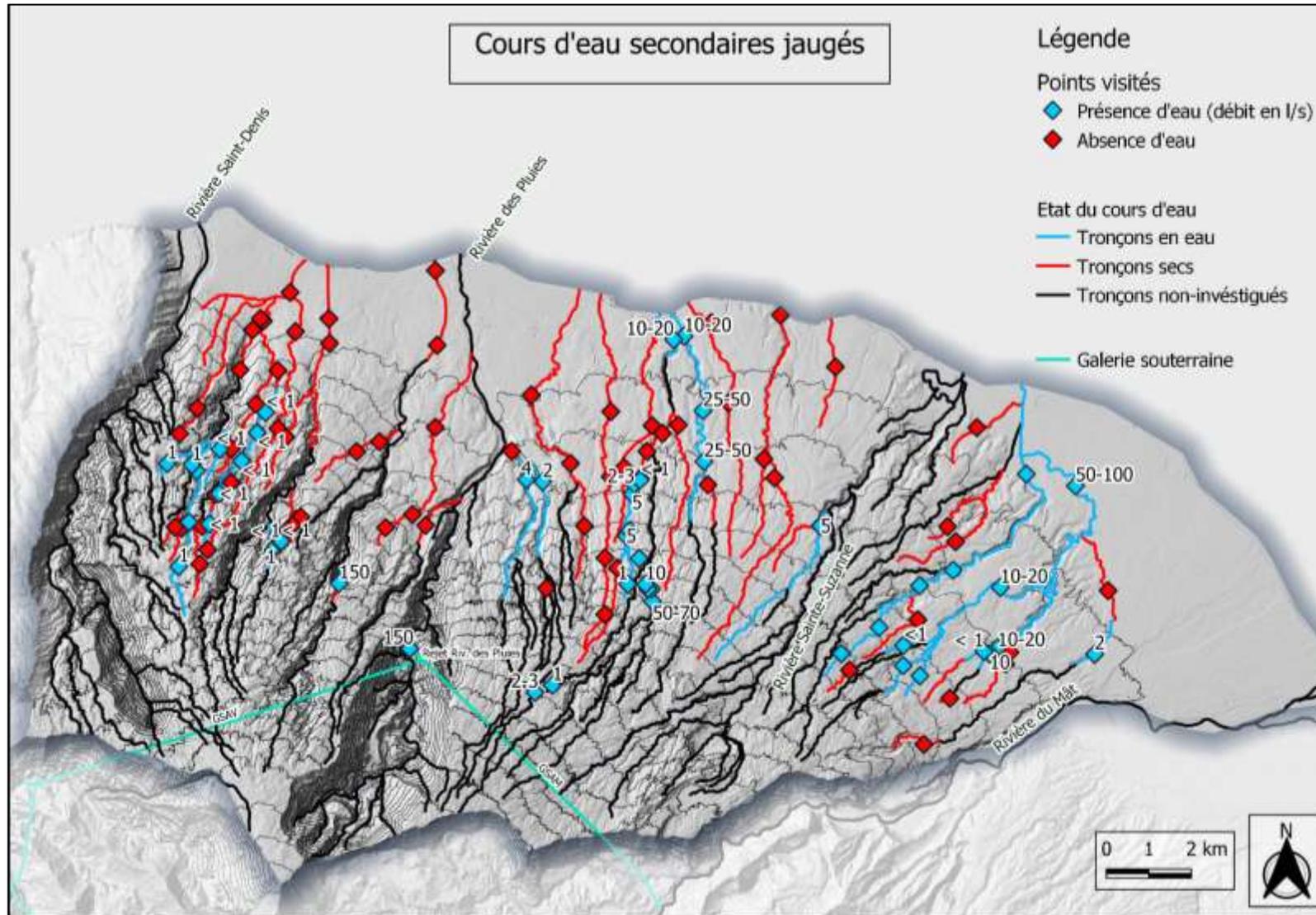


Figure 35 : Cours d'eau secondaires jaugés en septembre 2021

3.7.3. Bilan

Les bilans hydrométriques, les jaugeages réalisés par l'Office de l'eau ainsi que la campagne de terrain ont permis de mieux comprendre le fonctionnement hydrologique de la zone d'étude.

Les cours d'eau pérennes (§ 2.3.1 – p. 18) sont quasiment en eau jusqu'à l'embouchure. Leurs débits augmentent le long de leurs parcours. Les infiltrations ont lieu dès lors que le lit de la rivière est composé d'alluvions, toutefois c'est dans la partie aval des cours d'eau, dans les cônes détritiques littoraux, qu'on retrouve la majorité des infiltrations.

- Sur la rivière Saint-Denis les infiltrations ont lieu de l'altitude 30 m NGR jusqu'à l'embouchure, située à 1 800 m de distance ;
- Sur la rivière des Pluies les infiltrations ont lieu de l'altitude 100 m NGR jusqu'à l'embouchure, située à 3 800 m de distance ;
- Sur la rivière Sainte-Suzanne, aucune infiltration n'a pu être mesurée par l'Office de l'eau. De nombreuses émergences sont présentes le long du cours d'eau et participent au maintien du débit même en période d'étiage. De plus l'eau circule sur des formations basaltiques, les infiltrations sont moins importantes que s'il s'agissait de formations alluvionnaires ;
- Sur la rivière du Mât, les infiltrations ont lieu entre l'altitude 130 m NGR jusqu'à l'embouchure.

Les infiltrations des cours d'eau principaux (rivières Saint-Denis et des Pluies) sont de l'ordre de 300 L/s (9,5 Mm³/an). Sur la rivière Sainte-Suzanne, aucune infiltration n'a pu être quantifiée. Les infiltrations de la rivière du Mât, à l'est de la zone d'étude sont de l'ordre de 700 L/s (22 Mm³/an). Les infiltrations des cours d'eau temporaires (§ 2.3.2 - p. 19) de la zone d'étude sont de l'ordre de 300 - 350 L/s (9,5 – 11 Mm³/an) en période d'étiage.

Les cours d'eau temporaires sont en eau sur un faible tronçon en période d'étiage (quelques kilomètres sur la plaine). Ils sont totalement en eau après d'importantes précipitations au cours de la saison cyclonique notamment. Ces cours d'eau sont alimentés par des sources de nappes perchées et par le ruissellement issu des précipitations.

4. Alimentation du complexe aquifère régional

4.1. CONTEXTE

Le complexe aquifère régional est alimenté par les précipitations et par les flux souterrains via un système de réservoirs intermédiaires (déversement des nappes perchées) lui assurant une recharge régulée. Les niveaux d'eau dans ces nappes perchées sont tributaires des précipitations qui assurent la recharge.

L'alimentation du complexe aquifère régional par les précipitations localisées sur la frange littorale n'est pas prépondérante (Join, 1991). Pour mémoire, il s'agit de secteurs plutôt urbanisés.

JL Join (1991) indique :

« La quantification des débits d'alimentation du système aquifère de base reste aléatoire à l'échelle des bassins versants (...) la définition des bassins se heurte successivement à des problèmes liés :

- *A la délimitation topographique des bassins (souterrains), difficile à établir dans les régions volcaniques récentes ou dans les zones de comblement littorales,*
- *A l'influence de caractères topo-climatiques qui sont susceptibles de modifier l'estimation des surfaces de réception des bassins versants,*
- *Au rôle prépondérant des structures volcaniques souterraines qui peuvent engendrer des écoulements superposés n'aboutissant pas au même bassin versant.*

L'approche du bilan hydrologique des nappes établies sur des bassins versants témoins reste délicate du fait de la méconnaissance des limites des bassins d'alimentation (alimentation souterraine à l'amont), et de l'absence de contrôle sur les débits à l'exutoire des bassins (pertes par l'infiltration à l'aval). » (Join, 1991).

Les différentes études, rapports et thèses en hydrogéologie en domaine volcanique de ces 30 dernières années permettent de mieux appréhender le rôle des précipitations dans la recharge du complexe aquifère régional. Les zones ou les surfaces d'infiltration sur les bassins versants ont pu être précisées, les structures volcaniques ont pu être mieux définies, notamment grâce aux nombreux nouveaux forages, carottés ou non, réalisés sur le territoire réunionnais et grâce aux levés de géophysiques de surface ou aéroporté.

4.2. SIMULATION ET ESTIMATION

La recharge du complexe aquifère régional correspond au flux d'eau de surface qui percole à travers le sol et la zone non saturée pour atteindre la zone saturée. La recharge se fait par infiltration de l'eau de pluie et par l'infiltration des cours d'eau.

4.2.1. Infiltration des cours d'eau

a) *Simulation GARDENIA*

Le logiciel GARDENIA³ est un modèle hydrologique global à réservoirs. Il est développé par le BRGM (Thiery, 2003). Il est utilisé afin de simuler les principaux mécanismes du cycle de l'eau dans un bassin versant (pluie, évapotranspiration, infiltration, écoulements rapide et lent).

Des bilans hydrologiques ont été réalisés sur certains cours d'eau de la zone d'étude. Il s'agit de ceux disposant de chroniques de débit. La ravine du Butor n'est pas traitée dans ce chapitre. Les suivis réalisés indiquent que cette ravine n'a été en eau que pendant 20 jours en 3 ans (pendant les mois de janvier à mars). En réalité, cette ravine est en eau une plus grande partie de l'année (débit de quelques L/s même en saisons sèches).

Le travail réalisé consiste à simuler les débits mesurés (Figure 36) et à quantifier les volumes d'eau qui s'infiltreront vers le milieu souterrain.

Les infiltrations en amont des stations ne sont pas prises en compte dans cette partie. Cette première approche exploratoire a donc des limites, le modèle maillé qui sera utilisé lors de la prochaine phase du projet permettra d'affiner ce bilan.

³ Site Web : <https://www.brgm.fr/fr/logiciel/gardenia-logiciel-modelisation-hydrologique-globale-bassin-versant>

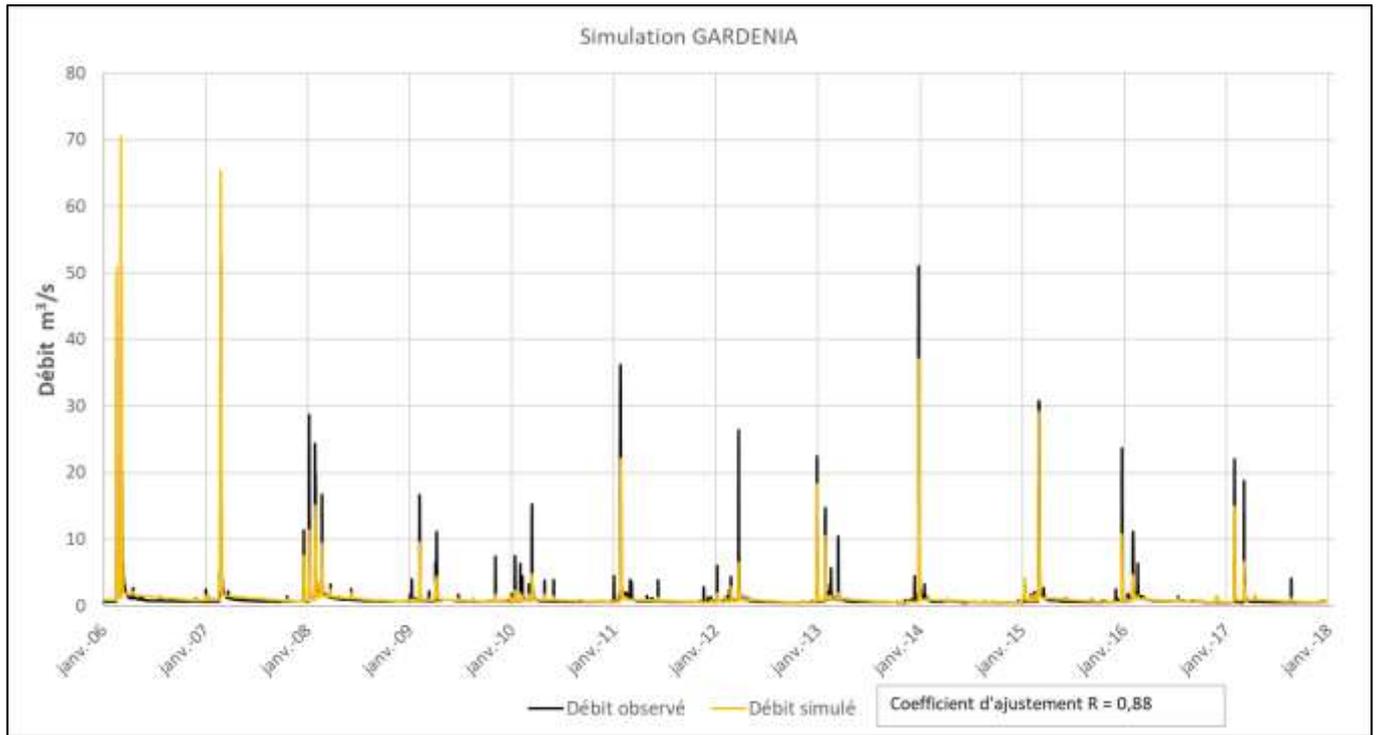


Figure 36 : Simulation des débits mesurés sur la rivière Saint-Denis
 $R =$ coefficient d'ajustement de Gardenia

Les données d'entrée pour les simulations sont les suivantes :

- Pluie journalière, en mm/j ;
- Evapotranspiration journalière, en mm/j ;
- Débit journalier, en m^3/s .

Les paramètres hydrologiques de simulation (capacité de rétention du sol, temps de tarissement notamment) ont été calibrés par procédure semi-automatique afin de garantir le meilleur ajustement entre les débits observés et les débits simulés par le logiciel. Le coefficient d'ajustement de GARDENIA est la racine carrée du coefficient de Nash-Sutcliffe. Le coefficient de Nash Sutcliffe détermine la qualité d'un modèle quelconque, la valeur du coefficient est compris entre $-\infty$ et 1. Un modèle est correct lorsque la valeur de Nash est supérieure à 0,8.

Les coefficients d'ajustement de GARDENIA et de Nash-Sutcliffe des simulations sont présentés dans le Tableau 10. Les débits de la rivière Saint-Denis, de la petite rivière Saint-Jean (Cascade Délice) et du Bras Laurent sont bien simulés (coefficient de Nash proche de 0,8). Les débits des autres cours d'eau ne sont pas correctement simulés, ces simulations pourront être affinée lors de la deuxième phase de ce présent projet.

Bassin versant	Coefficient d'ajustement GARDENIA – « R »	Coefficient Nash-Sutcliffe
Rivière Saint Denis	0,88	0,83
Rivière des Pluies - Domenjod	0,56	0,53
Rivière des Pluies – Ravine Tanan	0,67	0,63
Ravine Mère Canal	0,54	0,51
Rivière Sainte-Suzanne	0,68	0,65
Petite Rivière Saint-Jean (Cascade Délice)	0,76	0,72
Bras Laurent	0,81	0,77

Tableau 10 : coefficients d'ajustement « R » de GARDENIA et Nash-Sutcliffe des simulations réalisées

Les données de sortie d'une simulation permettent de dresser le bilan hydrologique du bassin versant. Le cours d'eau est alimenté par la pluie efficace (Pluie – ETP) et est vidangé par deux exutoires que l'on nomme « Q_rapide », il s'agit de la composante rapide de l'écoulement (écoulement superficiel) et « Q_souterrain », il s'agit de la composante lente de l'écoulement (écoulement souterrain). Une partie de la pluie efficace reste dans le système et s'infiltré par percolation, il s'agit du paramètres « Alim_sout ».

Les paramètres de sortie des cours d'eau correctement simulés sont repris dans le tableau 11. Sur ces bassins versants, il y a d'avantage d'infiltration que d'écoulement superficiel (entre 1,5 à 7 fois plus d'infiltration que de d'écoulement superficiel).

Bassin	Pluie	ETR	Pluie efficace	Q_rapide	Q_souterrain	Alim_sout	Alim_sout (Mm ³ /an)
Rivière Saint Denis	2977	178	2798	341	974	2456	74,6
Petite Rivière Saint-Jean (Cascade Délice)	2131	519	1611	522	883	1 090	20,7
Bras Laurent	2124	652	1471	574	1617	898	6,7

Tableau 11 : Données de sortie des simulations
Les flux sont exprimés en mm/an.

Les termes d'alimentations souterraines (Alim_sout) des simulations de GARDENIA exprimés en Mm³/an permettent d'appréhender les infiltrations des rivières vers le complexe aquifère régional. Les infiltrations obtenues lors de ces simulations sont différentes des infiltrations indiquées dans la partie §3.7 en page 62, cet écart montre la nécessité de réajuster les simulations lors de la deuxième phase du projet.

Les simulations réalisées sur GARDENIA à ce stade du projet permettent de simuler correctement 50% des cours d'eau suivi par l'Office de l'eau. Sur ces cours d'eau, l'infiltration est plus importante que l'écoulement superficiel.

Cette approche exploratoire de simulations avec GARDENIA permet de mettre en évidence la nécessité d'utiliser un modèle maillé lors de la prochaine phase du projet afin d'affiner ces bilans hydrologiques.

b) Données issues des jaugeages

Les données issues des jaugeages détaillés dans le chapitre Données Hydrologiques permettent de dresser un premier bilan des infiltrations des cours d'eau principaux et des autres cours d'eau temporaires. Les infiltrations des cours d'eau principaux en étiage (rivières Saint-Denis et des Pluies) sont de l'ordre de 300 L/s. Les infiltrations des autres cours d'eau de la zone d'étude sont de l'ordre de 300 - 350 L/s en période d'étiage.

Les infiltrations des cours d'eau sont donc de l'ordre de :

- 1,6 Mm³/an sur la rivière Saint-Denis ;
- 7,8 Mm³/an sur rivière des Pluies ;
- 22 Mm³/an sur la rivière du Mât ;
- 21 Mm³/an sur les cours d'eau temporaires.

4.2.2. Infiltration sur les planèzes

L'Office de l'eau dans son rapport « Etat quantitatif et qualitatif des MESO » a estimé la recharge des nappes sur le territoire Réunionnais la méthode est détaillé dans le rapport (Office de l'eau, 2019) il s'agit des paramètres suivants :

- Taux d'infiltration sur les hauteurs de la zone d'étude est estimé à 40 %, dans les bas il est de 66% ;
- La pluviométrie moyenne entre 500 et 1000 mm/an ;
- Prises en compte des zones urbanisées (imperméable) ;

Avec ces paramètres, la quantité d'eau disponible pour l'infiltration sur les hauteurs de la zone d'étude est de 159 Mm³/an et dans les bas de 43 Mm³/an (Figure 37).

La recharge du complexe aquifère régional se fait par de l'infiltration direct des précipitations (159 Mm³/an et 43 Mm³/an) et par l'infiltration dans les cours d'eau pérennes et intermittents. La recharge du complexe aquifère régional sur le secteur nord est de 402 Mm³/an (avec 88 Mm³/an des flux souterrains qui proviennent de la plaine des Chicots et 197 Mm³/an provenant de la plaine des Fougères) - (Figure 38).

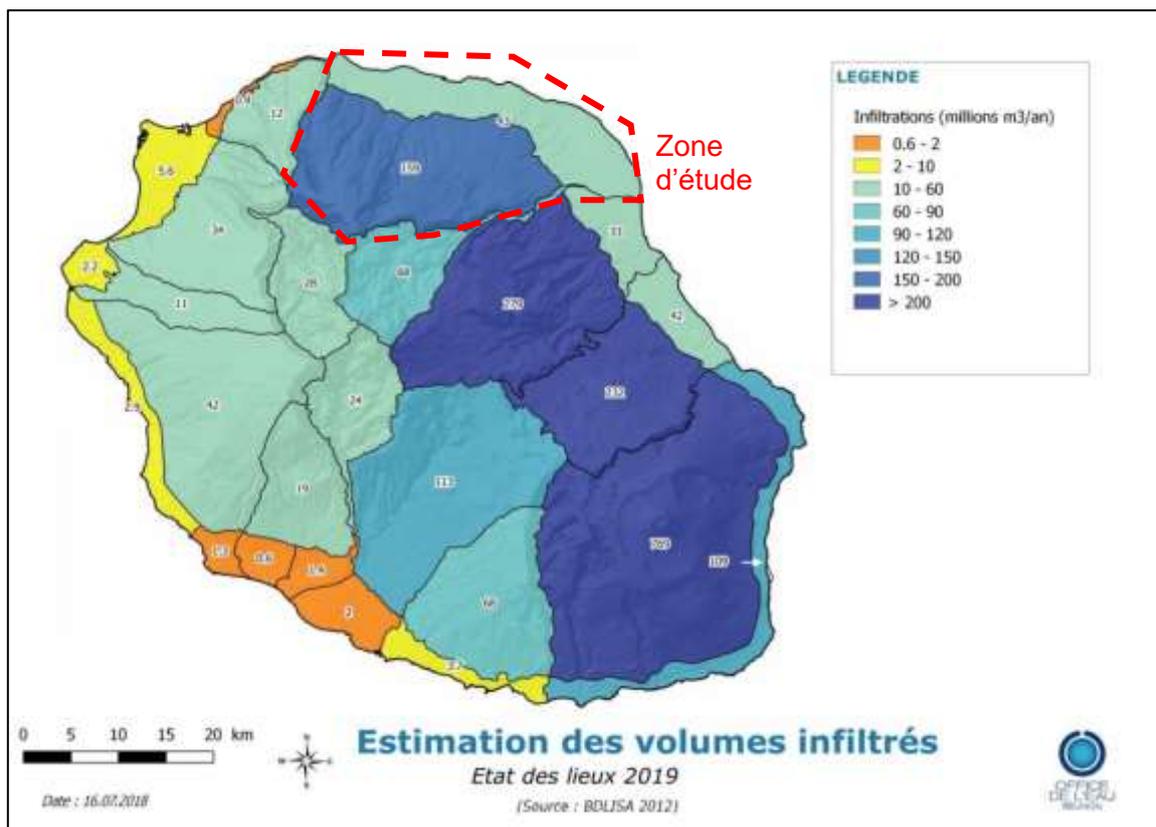


Figure 37 : Volumes infiltrés à l'échelle des masses d'eau souterraines (Office de l'eau, 2019)

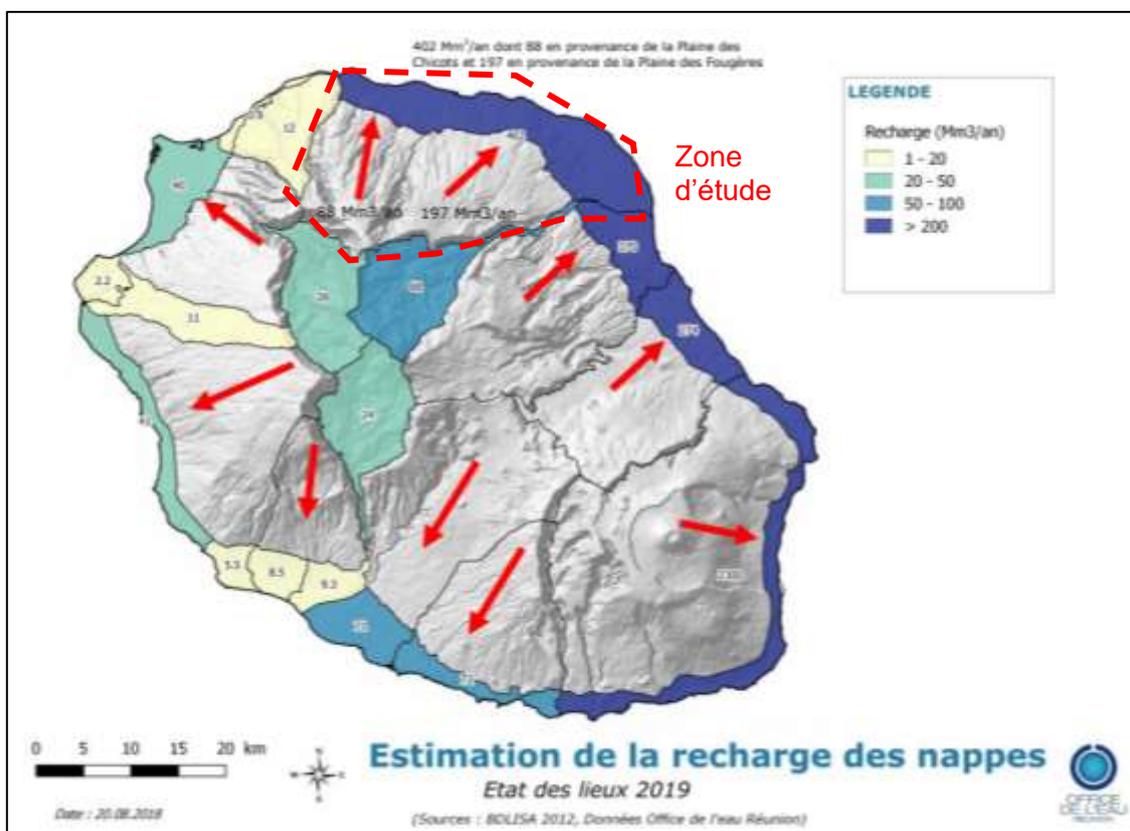


Figure 38 : Estimation de la recharge à l'échelle des masses d'eau souterraine (Office de l'eau, 2019)

4.3. BILAN

L'alimentation du complexe aquifère régional se fait via un système de déversements de réservoirs intermédiaires qui eux-mêmes sont alimentés par les précipitations sur le bassin versant. L'épaisseur de la zone non saturée peut atteindre 1 000 mètres d'épaisseur, la recharge est donc régulée dans le temps.

La recharge du complexe aquifère est estimée par l'Office de l'eau à 402 Mm³/an dont 88 Mm³/an provenant de flux de la plaine des Chicots et 197 Mm³/an de la plaine des Fougères.

Les cours d'eau étudiés ont un volume annuel d'infiltration de l'ordre de 52,4 Mm³ ; 1,6 Mm³/an par la rivière Saint-Denis, 7,8 Mm³/an pour la rivière des Pluies, 22 Mm³/an pour la rivière du Mât et 21 Mm³/an pour les cours d'eau temporaires.

Lors de la prochaine phase du projet l'estimation de la recharge va être affinée.

5. Prélèvements

Sur le secteur d'étude, les prélèvements d'eau pour l'adduction d'eau potable (Figure 39) et pour les besoins agricoles et industriels se font par des captages d'eau souterraine (forages et sources) et par des captages d'eau de surface. Les forages sont localisés sur la frange littorale et les captages de sources et d'eau de surface sont localisés sur les planèzes (sauf pour le captage de la rivière Saint- Denis).

5.1.1. Prélèvements pour l'alimentation en eau potable (AEP)

Les données dont nous disposons pour cette analyse ont été transmises par la DEAL et par la CINOR.

Les données fournies par la DEAL sont des volumes mensuels prélevés par chaque ouvrage entre les années 2015 et 2019. La donnée transmise n'est pas continue (nombreuses lacunes de plus d'un an).

La CINOR, qui est la communauté d'agglomération des communes de Saint-Denis, Sainte-Marie et Sainte-Suzanne, a fourni les rapports annuels du délégataire (RAD) ainsi que les schéma directeur d'alimentation en eau potable (SDAEP) des trois communes. Les données dont nous disposons sont reprises dans le Tableau 12.

Communes	Rapport annuel de délégataire (RAD)	Schéma directeur d'alimentation en eau potable (SDAEP)
Saint-Denis	2012 à 2016 (VEOLIA)	2009 (SAFEGE)
	2017 à 2019 (RUNEO)	
Sainte-Marie	2010 à 2019 (CISE)	2015 (ARTELIA)
Sainte-Suzanne	2018 et 2019 (RUNEO)	2011 (SOGREAH)

Tableau 12 : Rapport annuel de délégataire et SDAEP transmises par la CINOR

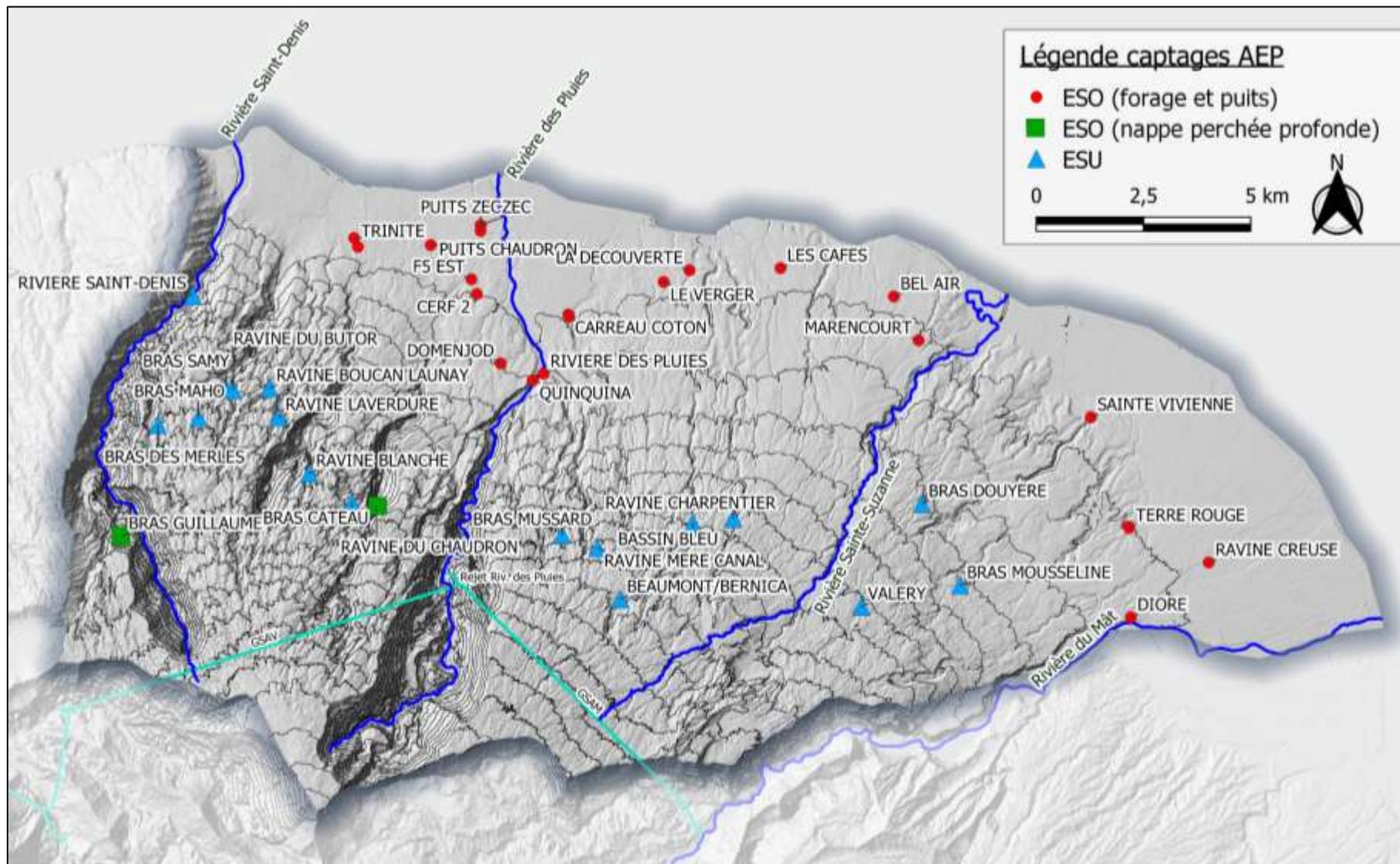


Figure 39 : Localisation des captages pour l'AEP

a) Commune de Saint-Denis

Sur la commune de Saint-Denis les prélèvements pour l'AEP se font via 9 forages et puits et 13 captages d'eau superficielle. Les forages et les puits sont localisés sur le frange littorale, il s'agit des forages Trinité 1 et Trinité 2, F5 EST, Cerf 2 et Cerf 3, ZEC, Quinquina et Domenjod et des Puits ZEC et Chaudron. Les captages superficiels sont localisés sur la planèze, il s'agit des captages de bras Guillaume, rivière Saint-Denis, bras des Merles, bras Maho, ravine du Butor, bras Samy, ravine Boucan Launay, ravine Laverdure, ravine Blanche, bras Cateaux et ravine du Chaudron.

Les forages et puits prélèvent l'eau du complexe aquifère régional alors que les captages superficiels captent soit de l'eau de surface (captage rivière Saint-Denis) ou soit des émergences de nappes perchées (qui peuvent être profonde dans le cas de bras Guillaume et de la ravine du Chaudron).

La production annuelle a diminué entre les années 2012 et 2019, elle est passé de 25,2 Mm³ à 20,4 Mm³, soit une baisse de production de l'ordre de -24% (Figure 40).

Les volumes consommés entre les années 2012 et 2019 sont stables (augmentation de 1%), il passe de 13,9 Mm³ en 2012 à 14,1 Mm³ en 2019 (Figure 40). Pourtant le nombre d'habitants desservis augmente sur cette même période (146 706 hab. en 2012 contre 149 337 hab. en 2019).

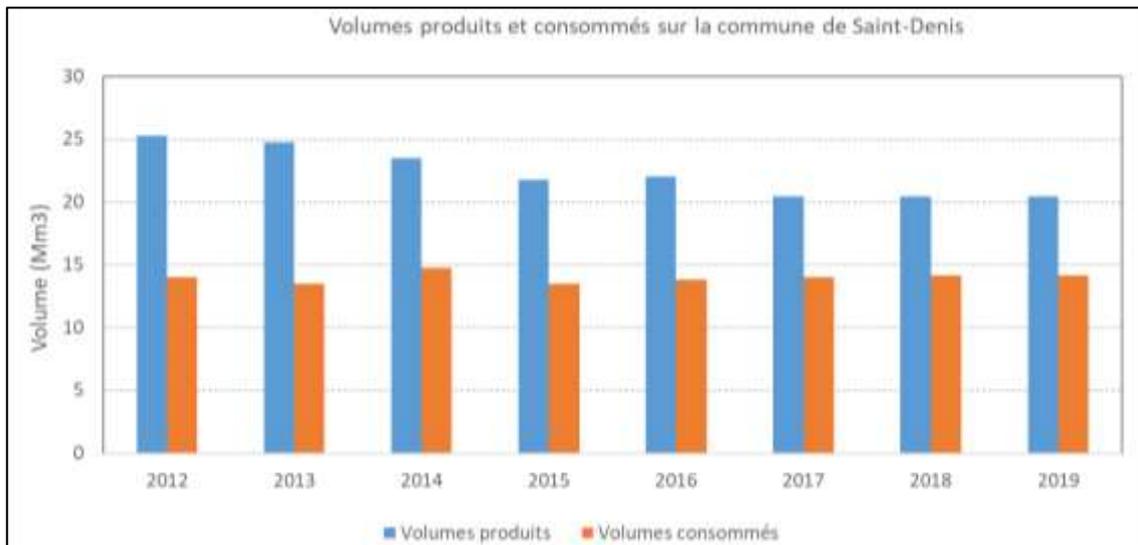


Figure 40 : Volumes produits et consommés sur la commune de Saint-Denis

Entre 2012 et 2019, le volume consommé n'évolue donc pas. Pour autant le volume prélevé, lui, diminue. Pour expliquer cela, il faut regarder le rendement des réseaux sur la commune.

Le rendement d'un réseau vise à établir le rapport entre les volumes d'eau prélevés sur le milieu naturel et ceux consommés par les usagers. Ce rapport correspond aux volumes non comptabilisés dont les fuites et les vols d'eau sur les réseaux.

Sur la commune de Saint-Denis, ce rendement est passé de 56,6% en 2012 à 69,1% en 2018 avec une baisse de rendement en 2019 (66%) – (Figure 41).



Figure 41 : Rendement des réseaux sur la commune de Saint-Denis

Sur Saint-Denis les volumes prélevés et consommés entre 2012 et 2019 sont différents (+45% en 2012 et +31% en 2019). La production diminue sur cette période alors que la population augmente sur cette même période. Le rendement des réseaux qui s'améliore peut expliquer cela, il est de 69% en 2018 alors qu'il était de 56,6% en 2012.

b) Commune de Sainte-Marie

Sur la commune de Sainte-Marie les prélèvements pour l'AEP se font par 5 forages et par 5 captages d'eau superficielle. Les forages sont localisés sur le frange littorale, il s'agit des forages Rivière des Pluies, Carreau Coton, Le Verger, La Découverte et Les Cafés. Les captages superficiels sont localisés sur la planèze, il s'agit des captages bras Mussard, ravine Mère-Canal, Beaumont/Bernica, bassin Bleu et ravine Charpentier.

Les forages prélèvent l'eau du complexe aquifère régional alors que les captages superficiels captent des émergences de nappes perchées.

La production annuelle a augmenté entre les années 2006 et 2018, elle est passé de 5,2 Mm³ à 6,23 Mm³. L'année 2019 est marquée par une baisse de production avec un volume annuel de l'ordre de 5,99 Mm³. La production a ainsi augmenté de 17% entre les années 2006 et 2018 et a diminué de -4% entre 2018 et 2019 (Figure 42).

Les volumes consommés entre les années 2006 et 2019 augmente de 20%, il passe de 2,53 en 2006 à 3,15 Mm³ en 2019 (Figure 42). Cette augmentation s'explique par l'augmentation de clients sur la commune de Sainte-Marie.

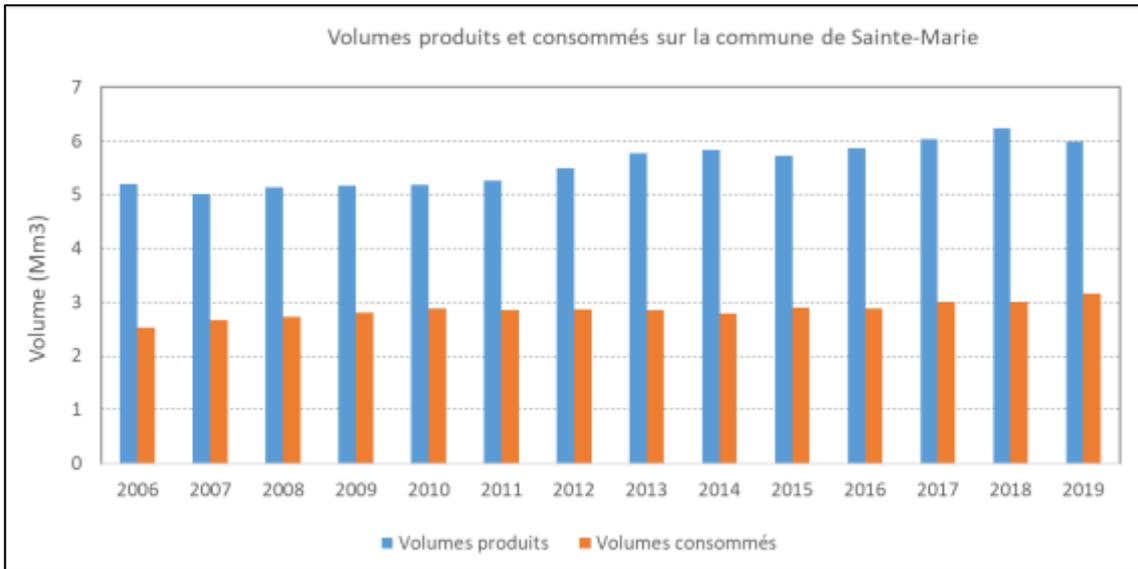


Figure 42 : Volumes produits et consommés sur la commune de Sainte-Marie

Sur la commune de Sainte-Marie, le rendement des réseaux s'est amélioré entre 2009 et 2015, il est passé de 54,7% en 2009 à 58,7% en 2015. Entre les années 2015 et 2017 le rendement a diminué pour atteindre le rendement le plus faible sur la chronique de 54,5%. Entre 2017 et 2019, le rendement s'est nettement amélioré, il atteint 60% en 2019 (Figure 43).



Figure 43 : Rendement des réseaux sur la commune de Sainte-Marie

Sur la commune de Sainte-Marie, les volumes prélevés et consommés entre 2006 et 2019 sont significativement différents, presque la moitié du volume prélevés n'est pas consommés par les clients. Pourtant, sur cette même période aucuns exports d'eau n'est enregistré sur la commune. Cette différence peut s'expliquer par le rendement des réseaux qui oscille entre 54,5 et 60%. En 2018 le pic de production (6,23 Mm3) peut être expliquer par le rendement des réseaux de l'année 2017 qui était de 54,5% (pourcentage le plus faible sur la chronique) qui a dû forcer la CISE à prélever davantage pour compenser les pertes des réseaux.

c) Commune de Sainte-Suzanne

Sur la commune de Sainte-Suzanne les prélèvements pour l'AEP se font par 3 forages et par 3 captages d'eau superficielle. Les forages sont localisés sur le fringe littorale, il s'agit des forages Marencourt (ou Les Trois Frères), Sainte-Vivienne et Bel Air. Les captages superficiels sont localisés sur la planète, il s'agit des captages Valery, Bras Douyère et Bassin Pilon (remis en service en 2021).

Sur la commune de Sainte-Suzanne, la production annuelle moyenne est de l'ordre 2,8 Mm³ (moyenne entre 2017 et 2019). Même tendance pour la consommation sur cette période, les volumes consommés sont stables, de l'ordre de 2,1 Mm³/an (Figure 44).

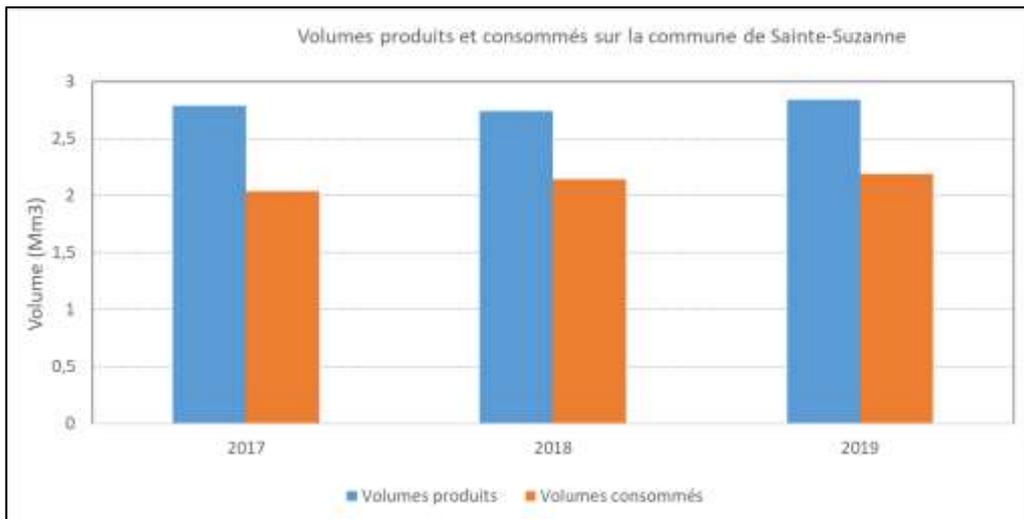


Figure 44 : Volumes produits et consommés sur la commune de Sainte-Suzanne

Les rendements de réseaux sur la commune de Sainte-Suzanne sont meilleurs en comparaison avec les rendements des réseaux des autres communes. Elle est comprise entre 73% et 78% entre 2017 et 2018 (Figure 45).

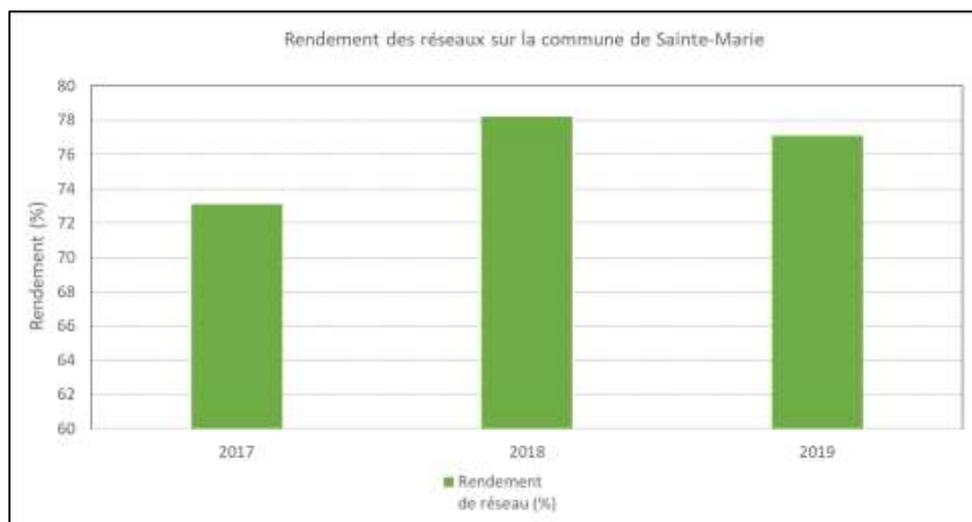


Figure 45 : Rendement des réseaux sur la commune de Sainte-Suzanne

Sur la commune de Sainte-Suzanne les rendements des réseaux sont bon par rapport à la moyenne régionale. Ceci permet d'expliquer la faible différence entre les volumes prélevés et consommés, seulement 25% de l'eau produite n'est pas consommées.

d) Données DEAL

Les données de prélèvements pour l'adduction d'eau potable ont été fournies par la DEAL. Les valeurs présentées ci-après sont des moyennes mensuelles réalisées sur les chroniques disponibles au moment de la réalisation de cette analyse. En général, les chroniques fournies débutent en janvier 2015 et terminent en décembre 2019, avec un manque d'information sur l'année 2018.

Sur la zone d'étude, les prélèvements pour l'AEP se font par 21 forages localisés sur la frange littorale qui captent l'eau souterraine et 2 captages de nappes perchées profondes (ESO) – (Tableau 13) et 14 captages d'eau de surface (ESU) - (Tableau 14).

Les forages prélèvent l'eau dans le complexe aquifère régional. Les deux captages de sources du Chaudron et du Bras Guillaume prélèvent l'eau de nappes perchées profonde. Les forages prélèvent **1,66 Mm³/mois** pour l'AEP et les deux captages des sources prélèvent **195 500 m³/mois**.

Les captages d'ESU sont localisés sur les planèzes au-dessus de 500 m d'altitude, à l'exception du captage de la rivière Saint-Denis localisés à 100 m d'altitude. Les captages localisés sur les planèzes prélèvent 191 000 m³/mois et le captage de la rivière Saint-Denis prélève 854 000 m³/mois. Le volume total pour les prélèvements d'ESU est donc de **1,04 Mm³/mois**.

Captages d'ESO pour l'AEP	Arrêté préfectoral	Débit autorisé	Période des données	Débit moyen sur la chronique (m3/mois)	Débit min sur la chronique (m3/mois)	Débit max sur la chronique (m3/mois)
Saint-Denis						
Captage Bras Guillaume			Jan 2015 à Déc 2017 Janv 2019 à Déc 2019	58 014	6 534	86 478
Forage Trinité 1	AP 441/SG/DAI/3	5 700 m3/j 300 m3/h	Jan 2015 à Déc 2017 Janv 2019 à Déc 2019	67 016	0	85 643
Forage Trinité 2		6 000 m3/j 250 m3/h	Nov 2019 à Déc 2019	Pas assez de données		
Puits du Chaudron			Jan 2015 à Déc 2017 Janv 2019 à Déc 2019	225 232	141 620	300 821
Puits ZEC bas			Jan 2015 à Déc 2017 Janv 2019 à Déc 2019	108 320	37 589	153 636
Puits ZEC haut			Jan 2015 à Déc 2017 Janv 2019 à Déc 2019	70 497	0	153 636
Forage ZEC Chaudron			Jan 2015 à Déc 2017 Janv 2019 à Déc 2019	125 345	98 251	152 691
FORAGE F5 EST			Jan 2015 à Déc 2017	2 374	1 445	14 309
Forage CERF 2	AP 13-488/SG/DRCTCV	6000 m3/j 250 m3/h	Juin 2015 à Aout 2015 Juin 2016 à Juil 2016	Pas assez de données		
Forage Domenjod	AP 3690/SG/DAI/3	4750 m3/j 250 m3/h	Jan 2015 à Déc 2017 Janv 2019 à Déc 2019	68 415	28 023	111 327
Forage Quinquina			Jan 2015 à Déc 2017 Janv 2019 à Déc 2019	24 477	16 149	30 591
Captage ravine du Chaudon			Jan 2015 à Déc 2017 Janv 2019 à Déc 2019	137 633	420 005	216 346
Sainte-Marie						
Forage Rivière des Pluies	AP 86-3537	130 m3/h	Jan 2016 à Déc 2017 Janv 2019 à Déc 2019	75 680	48 400	122 400
Forage F5bis Carreau Coton	AP 10-2252	7200 m3/j 300 m3/h	Jan 2016 à Déc 2017 Janv 2019 à Déc 2019	85 750	2 646	171 065
Forage Le Verger				71 776	0	133 127
Forage La Découverte				96 464	62 781	124 589
Forage Les Cafés		3 800 m3/j 200 m3/h	Jan 2016 à Déc 2017 Janv 2019 à Déc 2019	79 996	53 980	107 030
Sainte-Suzanne						
Forage Bel Air	AP 09-3608	3 800 m3/j 200 m3/h	Jan 2015 à Déc 2019	55 487	35 304	75 788
Forage Trois Frères	AP 05-0730	3 300 m3/j 150 m3/h	Jan 2015 à Déc 2019	57 206	34 278	81 144
Forage Sainte-Vivienne	AP 05-0731	2160 m3/j 90 m3/h	Jan 2015 à Déc 2019	55 910	43 654	68 258
Saint-André						
Forage Terre Rouge	AP 06-1816		Jan 2017 à Dec 2017	69 554	52 242	95 707
Forage Ravine Creuse	AP 06-2196		Jan 2017 à Dec 2017	116 592	101 549	150 171
Forage Dioré	AP 05-0730		Jan 2017 à Dec 2017	207 476	174 930	271 881

Tableau 13 : Captages d'ESO pour l'AEP

Captages d'ESU pour l'AEP	Période des données	Débit moyen sur la chronique (m3/mois)	Débit min sur la chronique (m3/mois)	Débit max sur la chronique (m3/mois)
Saint-Denis				
Riviere Saint Denis	Jan 2015 à Déc 2017 Janv 2019 à Déc 2019		742 344	974 549
Captage Brulé (Bras des merles et Bras Maho)	Jan 2015 à Déc 2017 Janv 2019 à Déc 2019	5 899	38 886	8 778
Captage Ravine Butor et captage Bras Samy	Jan 2015 à Déc 2017 Janv 2019 à Déc 2019	4 928	1 629	10 347
Captage Saint-Francois (Ravine Boucan Launay et Laverdure)	Jan 2015 à Déc 2017 Janv 2019 à Déc 2019	15 086	12 828	18 788
Captage Bois de Nefles (Ravine Blanche et Bras cateau)	Jan 2015 à Déc 2017 Janv 2019 à Déc 2019	21 057	3 314	38 179
Sainte-Marie				
Captage Bras Mussard	Jan 2016 à Déc 2017 Janv 2019 à Déc 2019	10 278	3111	17047
Captage Mere canal	Jan 2016 à Déc 2017 Janv 2019 à Déc 2019	22 341	1940	45778
Captage Bernica	Jan 2016 à Déc 2017 Janv 2019 à Déc 2019	5 191	1838	7001
Captage Bassin Bleu	Jan 2016 à Déc 2017 Janv 2019 à Déc 2019	36 518	23376	54378
Captage Charpentier (Beaufond La Paix)	Jan 2016 à Déc 2017 Janv 2019 à Déc 2019	12 787	3520	34452
Sainte-Suzanne				
Captage Valery	Jan 2015 à Déc 2019	11 965	1372	15511
Captage Bras Douyere	Jan 2015 à Déc 2019	45 086	32025	53630

Tableau 14 : Captages d'ESU pour l'AEP

5.1.2. Prélèvements industriels et agricoles

Les données de prélèvements agricoles et industriels ont été transmises par la DEAL. Les volumes prélevés par ces ouvrages sont au pas de temps annuels. Nous disposons d'informations entre les années 2015 et 2019.

Les prélèvements des industries de la sucrerie de Bois-Rouge et de la centrale thermique de Bois-Rouge figurent dans le registre. Il s'agit d'un prélèvement dans la rivière Foutaques (affluent de la rivière Saint-Jean) qui capte à la fois de l'eau de surface et de l'eau du complexe aquifère souterrain via une résurgence (Source des Foutaques).

Les prélèvements de ces deux industries est de l'ordre de 3,95 Mm³/an (Tableau 15).

Désignation du captage	Débit moyen sur la chronique (m ³ /an)
CTBR 1 (Centrale thermique de Bois Rouge)	1 624 963
CTBR 2 (Centrale thermique de Bois Rouge)	1 171 949
Foutaques (Sucrerie Bois Rouge)	36 680
Source Foutaques (Sucrerie Bois Rouge)	1 114 448

Tableau 15 : Débit annuel moyen pour les prélèvements industriels.

Sur la commune de Saint-Denis, la société Les Brasseries de Bourbon possède un forage qui n'est pas encore en état de marche, le dispositif de pompage est en attente d'approbation par les services de l'Etat. Le débit annuel autorisé de ce forage est de 220 000 m³/an pour un débit instantané maximum autorisé de 55 m³/h (arrêté préfectoral n°2022-844 du 9 mai 2022).

Les informations récoltées concernent seulement les prélèvements industriels. Nous ne disposons pas de d'information sur les prélèvements agricoles pourtant 22% de la surface de la zone d'étude (310 km²) est occupé par des parcelles agricoles et on retrouve sur la zone un des trois périmètres irrigués du département, il s'agit du périmètre irrigué de Champ-Borne à Saint-André.

5.1.3. Bilan

Les prélèvements pour l'AEP se font via 21 forages localisés sur la frange littorale qui captent l'eau souterraine, 2 captages de nappes perchées profondes et 14 captages d'eau de surface localisés sur les planèzes au-dessus de 500 m d'altitude, à l'exception du captage de la rivière Saint-Denis localisé à 100 m d'altitude.

Ainsi, 1,66 Mm³/mois d'eau sont prélevés par forage, 0,2 Mm³/mois sont prélevés par les deux captages de nappes perchées profondes, 191 000 m³/mois sont captés sur les planèzes et 854 000 m³/mois sont captés sur la rivière Saint-Denis.

L'analyse des volumes prélevés et consommés sur les communes de la zone d'étude montre que des efforts sont faits pour augmenter le rendement des réseaux afin de diminuer l'écart entre les volumes prélevés et les volumes consommés.

Les prélèvements industriels localisés sur la commune de Sainte-Suzanne sont de l'ordre de 3,95 Mm³ par an. Sur la commune de Saint-Denis, le forage de La Brasserie de Bourbon sera intégré à la modélisation dès lors que les prélèvements auront débuté.

La surface agricole représente 22% de la surface totale de la zone d'étude pourtant nous ne disposons pas de données sur les prélèvements effectués par les exploitants.

6. Schéma conceptuel

Les données récoltées et les connaissances sur le contexte hydrogéologique du secteur d'étude sont essentielles pour bâtir le modèle hydrogéologique lors de la seconde phase de ce présent projet.

Les différents éléments ont été rassemblés et sont présentés au pas de temps annuel en Figure 46. Ce schéma conceptuel permet d'identifier les grands ensembles et structures géologiques, les cours d'eau, et les flux entrants (déversement des nappes perchées, infiltrations des précipitations et des cours d'eau) et sortants (pompage par forage et infiltration dans les galeries souterraines) du complexe aquifère régional.

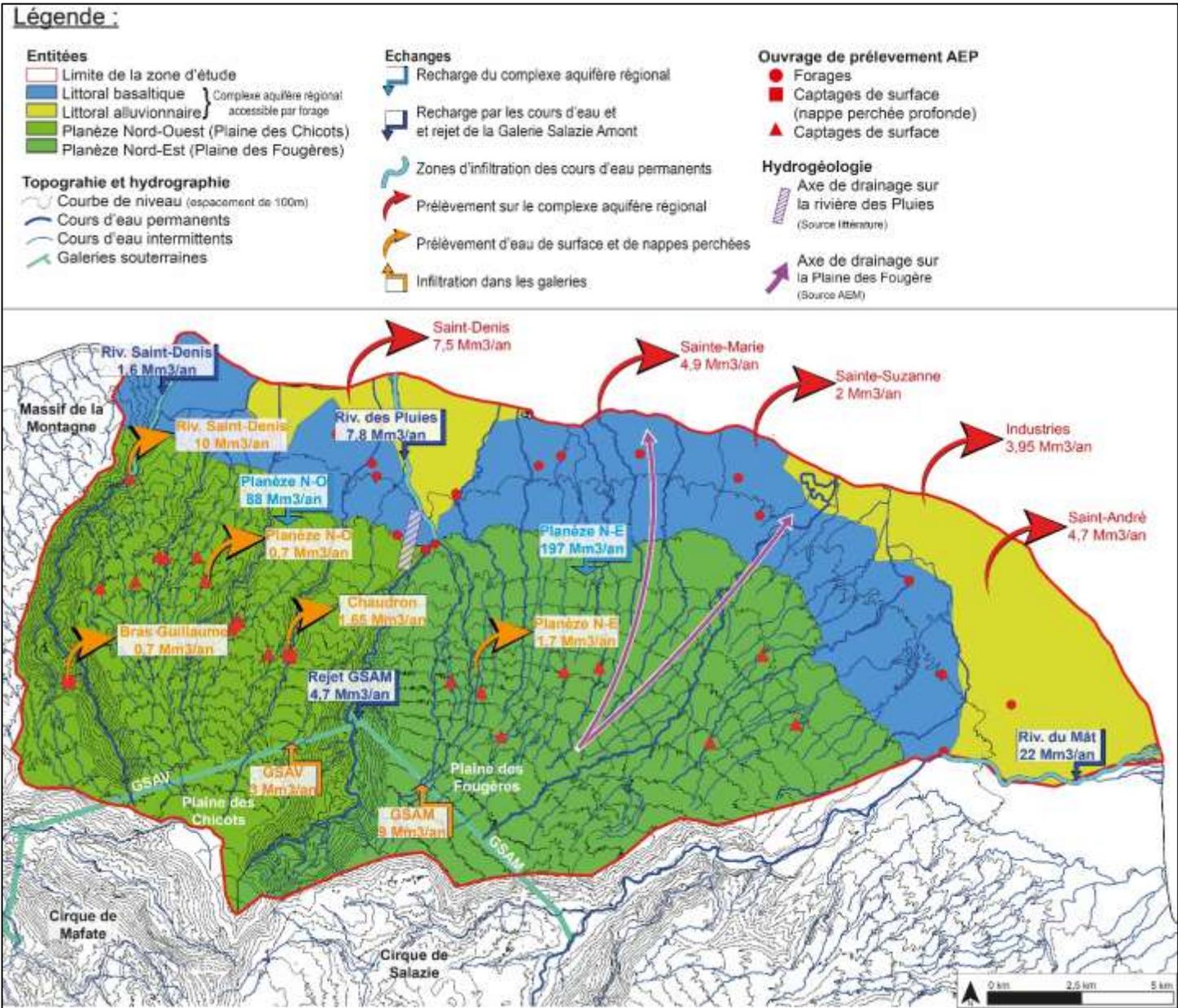


Figure 46 : Schéma conceptuel de la zone d'étude (pas de temps annuel)

7. Conclusion

Cette première phase, d'un projet qui en compte trois, a permis de réaliser un état des lieux des connaissances et des données disponibles sur le territoire de la MESO FRLG101 pour laquelle avait été mis en évidence un état quantitatif médiocre.

Durant cette étude la zone d'étude a été élargie à la MESO FRLG114 localisée en amont sur la planèze et qui alimente par phénomène de déversement la MESO FRLG101.

La géologie de la zone d'étude est peu complexe, les formations basaltiques sont localisées sur les planèzes et se prolongent sous des formations alluvionnaires localisées en pied de pente au niveau des exutoires des cours d'eau. En souterrain, les formations géologiques présentent des hétérogénéités avec des états d'altérations et de fissurations avancés. Des formations alluvionnaires sont rencontrées en souterrain, il s'agit de paléovallées qui canalisent les flux souterrains.

L'eau souterraine est présente sous l'entièreté du secteur d'étude, il s'agit du complexe aquifère régional qui est l'aquifère capté par 21 forage sur le territoire. Les forages sont localisés sur la frange littorale où l'épaisseur de zone non-saturée est inférieure à 300 m. Plus haut, sur la planèze l'épaisseur de la zone non-saturée peut atteindre plus de 1 000 m, en effet le gradient hydraulique du complexe aquifère régional est faible (de l'ordre de 1 à 6‰ sur la zone d'étude). Dans les hauts, des nappes perchées sont aussi prélevées pour l'AEP via des captages de sources, ces nappes par déversement le complexe aquifère régional.

Les aquifères ont des cycles annuels liés au contexte climatique réunionnais, la recharge intervient en saison cyclonique, la vidange se fait à la saison sèche et une période d'étiage entre les mois de septembre et décembre.

Les données de géophysique aéroportée ont permis d'appréhender et distinguer des ensembles géologiques, de connaître les caractéristiques spatiales de l'intrusion saline et d'identifier des structures géologiques particulières. Dans l'est de la zone d'étude, des contrastes d'altération sont mis en évidence.

On distingue deux types de cours d'eau sur la zone d'étude, il s'agit de cours d'eau pérennes, qui sont en eau jusqu'à l'exutoire et toute l'année et les cours d'eau temporaires qui sont en eau sur un faible tronçon en période d'étiage (quelques km). Ils sont totalement en eau après d'importantes précipitations au cours de la saison cyclonique notamment. Ces cours d'eau sont alimentés par des sources de nappes perchées et par le ruissellement issu des précipitations.

Les cours d'eau ont un rôle important dans la recharge du complexe aquifère régional, en effet les infiltrations ont lieu dès lors que le lit de la rivière est composé d'alluvions, toutefois c'est dans la partie aval des cours d'eau, dans les cônes détritiques littoraux, qu'on retrouve la majorité des infiltrations.

La recharge du complexe aquifère est estimée par l'Office de l'eau à 402 Mm³/an dont 88 Mm³/an provenant de flux de la plaine des Chicots et 197 Mm³/an de la plaine des Fougères.

Les cours d'eau étudiés ont un débit annuel d'infiltration de l'ordre de 52,4 Mm³; 1,6 Mm³/an par la rivière Saint-Denis, 7,8 Mm³/an pour la rivière des Pluies, 22 Mm³/an pour la rivière du Mât et 21 Mm³/an pour les cours d'eau temporaires.

Les prélèvements sur le complexe aquifère régional sont localisés sur la frange littorale. Ainsi, 20 Mm³ sont prélevés chaque année pour l'AEP et 4,17 Mm³/an pour l'industrie. A ce stade du projet, les prélèvements agricoles n'ont pas pu être quantifiés, ils le seront dans la seconde phase.

Lors de la prochaine phase du projet l'estimation de la recharge du complexe aquifère régional via les précipitations et l'infiltration des cours d'eau sera affinée.

Le Tableau 16 synthétise toutes les connaissances et les données récoltées lors de cette première phase et permet de comprendre comment elles seront utilisées lors des prochaines phases de ce présent projet.

Données récoltées dans cette première phase		Apports pour les phases suivantes
Climatologie	Chroniques de pluviométrie	Calcul de la recharge (infiltration directe)
	Chroniques et méthode de calcul de l'évapotranspiration	
Hydrologie	Chroniques de débits des cours d'eau	Calcul de la recharge (infiltration dans les cours d'eau)
	Comportement des cours d'eau (Pérennes et intermittents)	
	Bilan hydrologique	
	Localisation des zones d'infiltration	
Géologie	Localisation des formations géologiques de surface	Structures géologiques à modéliser
	Coupes géologiques des formations souterraines	
	Structures identifiées avec l'AEM	
Hydrogéologie	Caractéristiques du complexe aquifère régional (Gradient hydraulique, épaisseur de la zone non saturée, recharge)	Aquifère à modéliser
Prélèvements	Localisation des captages	Flux sortants du complexe aquifère régional
	Chroniques des débits de prélèvements	

Tableau 16 : Synthèse de la collecte des données et intégration dans les phases suivantes

8. Bibliographie

- Arnaud, L., 2017. Estimation prélèvements / ressource dans le cadre de la DCE : compléments méthodologiques pour les eaux souterraines (No. BRGM/RP-67212-FR).
- Aunay, B., Genevier, G., Ladouche, B., Maréchal, J.-C., 2010. Analyse fonctionnelle par traitement du signal et approche hydrochimique des aquifères du nord de la Réunion (No. Rapport BRGM/RP-57955-FR), BRGM.
- Aunay, B., Ladouche, B., Maréchal, J.C., 2012. Étude des venues d'eau dans la Galerie Salazie Amont (Report No. Rapport BRGM/RP-60780-FR), BRGM.
- Aunay, B., Maréchal, J.-C., 2014. Bilan et recommandations sur le suivi des aquifères rencontrés par le creusement des galeries du transfert des eaux - La Réunion (Report No. Rapport BRGM/RP-62901-FR), BRGM.
- Billard, G., Vincent, P.M., 1974. Cartes géologiques de la France - La Réunion 1/50000ème (4 feuilles). BRGM.
- Bourhane, A., Bonnier, J., payet, V., 2017. Mise en place d'un réseau de suivi des aquifères d'altitude des la Réunion (RAA). Office de l'Eau.
- BRGM/LGSR, 2006. Carte géologique de la Réunion au 1/100 000.
- Chopart, J.-L., Mézino, M., Nativel, R., 2003. Fluctuation saisonnière de l'Evapotranspiration (Eto Penman-Monteith) dans le Nord, l'Est et le Sud-est de l'île de la Réunion. Influence de l'altitude et comparaison avec l'Ouest et le Sud. CIRAD CA (Pôle Canne à Sucre Réunion).
- Dumont, M., Reninger, P.A., Pryet, A., Martelet, G., Aunay, B., Join, J.L., 2018. Agglomerative hierarchical clustering of airborne electromagnetic data for multi-scale geological studies. *J. Appl. Geophys.* 157, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.06.020>
- Dumont, M., Reninger, P.A., Pryet, A., Martelet, G., Aunay, B., Join, J.L., Michon, L., Jougnot, D., 2021. Hydrogeophysical Characterization in a Volcanic Context From Local to Regional Scales Combining Airborne Electromagnetism and Magnetism. *Geophys. Res. Lett.* 48.
- Join, J.-L., 1991. Caractérisation hydrogéologique du milieu volcanique insulaire, Le piton des neiges. Montpellier II.
- Join, J.L., Folio, J.L., Robineau, B., 2005. Aquifers and groundwater within active shield volcanoes. Evolution of conceptual models in the Piton de la Fournaise volcano. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 147, 187–201. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2005.03.013>
- Martelet, G., Reninger, P.A., Perrin, J., Deparis, J., 2014. Acquisition géophysique hélicoptère de l'île de La Réunion (Report No. Rapport BRGM/RP-63818-FR). <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-63818-FR.pdf>.
- Météo France, 2021. Bilan pluviométrique - Comité Sécheresse du 2 novembre 2021. Météo-France, DIROI, Etudes et Climatologie.
- Office de l'eau, 2019. Etat quantitatif et qualitatif des MESO. Office de l'Eau.

- Office de l'eau, 2008a. Etude des circulations d'eau des systèmes hydriques du secteur de Saint-Denis / Sainte-Marie (Rapport intermédiaire 3). Office de l'Eau.
- Office de l'eau, 2008b. Etude des circulations d'eau des systèmes hydriques du secteur de Saint-Denis / Sainte-Marie (Rapport année 2). Office de l'Eau.
- Office de l'eau, 2007. Etude des circulations d'eau des systèmes hydriques du secteur de Saint-Denis / Sainte-Marie (Rapport année 1). Office de l'Eau.
- Office de l'eau Réunion, 2019. Evaluation de l'état quantitatif et chimique des masses d'eau souterraine (No. Version du 23 avril 2019). Office de l'Eau.
- Petit, V., Aunay, B., Charlier, JB., Dufrenoy, R., Surdyk, N., 2013. Référentiel Hydrogéologique Français BDLISA. Délimitation des entités hydrogéologiques de la Réunion. Rapport final Mise à jour BDLISA Version 0 (Report No. Rapport BRGM/RP-63052_FR), BRGM.
- Stoll, A., 2005. Contribution à l'étude du fonctionnement et de l'exploitation de la nappe stratégique de Saint-Denis et de Sainte-Marie. Office de l'Eau.
- Thiery, D., 2003. Logiciel GARDENIA. version 6.0. Guide d'utilisation (No. BRGM/RP-52832-FR). BRGM.
- Vaudour, K., Aunay, B., 2008. Modalités de captage des eaux souterraines à la Réunion. Analyse critique de l'existant (techniques, coût, opérateurs). BRGM.



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

Direction régionale - La Réunion
5 rue Saint Anne
97400 La Réunion
Tél. : 0262212214
www.brgm.fr