



MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE DES SYSTEMES AQUIFERES DU NORD DE LA REUNION

FEVRIER 2012

Date	Etablissement	Nombre de pages
11.04.2012	Office de l'Eau Réunion	54

TABLE DES MATIERES

I	INTRODUCTION	6
II	PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	7
II.1	CONTEXTE GEOGRAPHIQUE	7
II.2	CONTEXTE CLIMATIQUE ET PLUVIOMETRIQUE	7
II.3	CONTEXTE HYDROLOGIQUE	9
II.3.1	<i>La Rivière Saint-Denis</i>	9
II.3.2	<i>La Rivière des Pluies</i>	10
II.3.3	<i>La Rivière Sainte-Suzanne</i>	10
II.3.4	<i>La Rivière du Mât</i>	10
II.3.5	<i>Les ravines et « petites » rivières non pérennes</i>	11
II.4	CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE	11
III	LES DONNEES DISPONIBLES	14
III.1	DONNEES GEOLOGIQUES	14
III.1.1	<i>La carte géologique</i>	14
III.1.2	<i>Les coupes géologiques de forage</i>	17
III.1.3	<i>Les études géophysiques</i>	19
III.2	DONNEES CLIMATIQUES	20
III.2.1	<i>Pluviométrie</i>	20
III.2.2	<i>Evapotranspiration</i>	20
III.3	DONNEES HYDROMETRIQUES	21
III.4	DONNEES PIEZOMETRIQUES	26
III.5	EXPLOITATION DES AQUIFERES	29
IV	MODELISATION DES « AQUIFERES NORD »	30
IV.1	PRESENTATION DU MODELE CONCEPTUEL	30
IV.1.1	<i>Extension et construction du modèle</i>	30
IV.1.2	<i>Paramètres hydrodynamiques du modèle et débits prélevés</i>	33
IV.2	CALAGE EN REGIME PERMANENT	38
IV.2.1	<i>Présentation</i>	38
IV.2.2	<i>Analyse de sensibilité du calage</i>	43
V	SCENARII DE SIMULATION	47
V.1	ANALYSE DE L'IMPACT DU DRAINAGE DES EAUX DU MASSIF PAR LE CREUSEMENT DE LA GALERIE ILO (SCENARIO 1)	47
V.2	ANALYSE DE L'IMPACT D'UNE MODIFICATION DES PRELEVEMENTS (SCENARIO 2)	48
V.3	ANALYSE DE L'IMPACT COUPLE DU DRAINAGE DE LA GALERIE « ILO » ET D'UNE AUGMENTATION DES PRELEVEMENTS (+100%) (SCENARIO 3)	49
V.4	ANALYSE ET RESULTATS DES DIFFERENTS SCENARII DE GESTION DU SYSTEME AQUIFERE	50
VI	CONCLUSIONS	52
VI.1	SYNTHESE	52
VI.2	PISTES D'AMELIORATION DU MODELE	53

Liste des figures

Figure 1 : Localisation de la zone d'étude.....	7
Figure 2 : Cumuls de pluviométrie de l'année 2010.....	8
Figure 3 : Répartition des postes pluviométriques sur le secteur d'étude.....	9
Figure 4 : Schéma de synthèse des zones préférentielles d'infiltration dans le massif (ECSHY 2010).....	13
Figure 5 : Carte géologique de la Réunion au 1/50000 ^{ème} (BRGM).....	15
Figure 6 : Légende de la carte géologique de la Réunion au 1/50000 ^{ème}	16
Figure 7 : Localisation des sondages et forages supérieur à 20 mètres.....	17
Figure 8 : Coupes géoélectriques interprétatives de la campagne géophysique de 1988 (BRGM, 88REU46)....	19
Figure 9 : Unités hydrologiques du nord de la Réunion.....	22
Figure 10 : Carte des valeurs d'infiltration annuelle par unités hydrologiques (2002).....	24
Figure 11 : Réseau de suivi piézométrique de l'Office de l'Eau.....	26
Figure 12 : Carte piézométrique de la partie aval de la Rivière des Pluies – fond géographique (Décembre 2010).....	28
Figure 13 : Carte piézométrique de la partie aval de la Rivière des Pluies – fond géologique (Décembre 2010).....	28
Figure 14 : Extension de « l'unité » de modélisation sur fond géologique.....	30
Figure 15 : Représentation de la structure de « l'unité » de modélisation.....	31
Figure 16 : Représentation du maillage et des conditions aux limites du modèle.....	32
Figure 17 : Localisation des points de calage.....	33
Figure 18 : Représentation des zones d'alimentations en limite sud.....	35
Figure 19 : Localisation des forages d'exploitations.....	37
Figure 20 : Carte piézométrique simulée des systèmes aquifères du nord de la Réunion.....	39
Figure 21 : Carte des salinités simulées en surface.....	40
Figure 22 : Carte des salinités simulées à une profondeur moyenne de -100 mNGR.....	41
Figure 23 : Carte des salinités simulées à une profondeur moyenne de -400 mNGR.....	41
Figure 24 : Position des traits de coupes.....	42
Coupe 1 : Coupe Nord - Sud d'invasion du sel à travers le massif (axe de la Rivière des Pluies).....	42
Coupe 2 : Coupe Sud-Ouest – Nord-Est d'invasion du sel à travers le massif (Plaine alluviale du Mât).....	42
Figure 25 : Comparaison des cartes piézométriques simulées entre l'état de référence et une perméabilité élevée des basaltes de phase III-IV.....	43
Figure 26 : Comparaison des cartes de salinité simulées entre l'état de référence et une perméabilité élevée des basaltes de phase III-IV.....	44
Figure 27 : Piézométrie simulée pour des basaltes de phase II de perméabilité 5.10^{-6} m/s.....	44
Figure 28 : Envahissement du sel simulé à -400 mNGR (basaltes de phase II $K=5.10^{-6}$ m/s).....	45
Figure 29 : Piézométrie simulée pour un axe de drainage à l'aplomb de la Rivière des Pluies de perméabilité $K = 0.05$ m/s.....	46
Figure 30 : Envahissement du sel simulé à -400 mNGR (axe de drainage RdP, $K = 0.05$ m/s).....	46
Figure 31 : Représentation du tracé de la galerie et des venues d'eau rencontrées.....	48
Figure 32 : Localisation des forages d'exploitations.....	49
Figure 33 : Carte des écarts de piézométrie du Scénario 3 avec l'état de référence.....	51

Liste des tableaux

<i>Tableau 1 : Illustration de l'effet du gradient d'altitude sur les cumuls pluviométriques</i>	9
<i>Tableau 2 : Sondages et forages disposant de données géologiques et hydrogéologiques</i>	18
<i>Tableau 3 : Liste des postes pluviométriques</i>	20
<i>Tableau 4 : Données d'évapotranspiration pour la zone nord et est de la Réunion</i>	21
<i>Tableau 5 : Surface des différentes unités hydrologiques</i>	22
<i>Tableau 6 : Valeurs d'infiltration annuelle des différentes unités hydrologiques (2002)</i>	23
<i>Tableau 7 : Pertes par infiltration de la Rivière Saint-Denis</i>	25
<i>Tableau 8 : Pertes par infiltration de la Rivière des Pluies</i>	25
<i>Tableau 9 : Pertes par infiltration de la Rivière du Mât</i>	25
<i>Tableau 10 : Ouvrages disposant de données piézométriques</i>	27
<i>Tableau 11 : Liste et caractéristiques des forages d'exploitation en 2011</i>	29
<i>Tableau 12 : Résultats de l'interprétation des pompages d'essais</i>	34
<i>Tableau 13 : Alimentation souterraine au sein du massif basaltique en limite sud</i>	35
<i>Tableau 14 : Alimentation par infiltration des rivières dans leur partie aval</i>	36
<i>Tableau 15 : Volume journalier des forages d'exploitation</i>	36
<i>Tableau 16 : Perméabilités obtenues à l'issue du calage</i>	38
<i>Tableau 17 : Comparaison des niveaux mesurés et simulés des points de calage</i>	39
<i>Tableau 18 : Extrait du « réseau salinité » de la banque de données de l'Office</i>	40
<i>Tableau 20 : Augmentation des prélèvements sur les ouvrages d'exploitation actuels</i>	48
<i>Tableau 21 : Résultats comparés de la piézométrie simulée pour chacun des scénarii</i>	50

Préambule

Ce travail réalisé par l'Office de l'Eau Réunion a été effectué afin de faire un état des lieux des connaissances hydrogéologiques des systèmes aquifères sur le nord de La Réunion, entre la Rivière Saint-Denis et la Rivière du Mât, et de développer un outil de modélisation informatique.

Il s'agit, d'après les données disponibles et notre connaissance du secteur :

- De modéliser les écoulements souterrains et l'invasion saline observée,
- D'évaluer les ressources en eaux disponibles,
- D'envisager des perspectives d'évolutions des modes de gestion de ces aquifères littoraux.

Ce rapport présente trois parties :

- La description générale de la zone d'étude,
- Les données disponibles, utilisées pour la construction du modèle,
- L'élaboration et les résultats apportés par les simulations et l'analyse de différents scénarii.

I Introduction

L'île de la Réunion est globalement caractérisée par l'abondance de ses ressources en eau grâce à une forte pluviométrie. Ce constat doit néanmoins être nuancé à l'échelle des microrégions du fait des grandes variations spatiales et temporelles des précipitations.

La région nord de l'île fait partie des zones où les précipitations sont relativement importantes. A titre d'exemple les communes de Saint-Denis et Sainte-Marie peuvent recevoir plusieurs millions de mètres cubes d'eau par an. Une partie de ces précipitations ruisselle jusqu'à la mer alors que le reste s'infiltré et alimente ainsi les nappes souterraines.

Dans un contexte où la population ne cesse d'augmenter la pression devient de plus en plus forte sur les ressources en eau souterraine. Sur la zone qui s'étend de la Rivière Saint-Denis à la Rivière du Mât il existe de nombreux forages d'adduction en eau potable en bordure littorale. Certains d'entre eux ont vu leur teneur en sel augmenter lorsque les débits de prélèvements étaient trop importants.

La corrélation d'une gestion durable de la ressource en eau en lien avec les enjeux liés à l'atteinte du bon état des masses d'eau en 2015 (Directive cadre sur l'eau) milite pour une amélioration des connaissances du fonctionnement des aquifères souterrains. Le SDAGE 2010-2015 a ainsi retenu plusieurs dispositions afin d'assurer l'équilibre ressources/besoins pour les différents usages en préservant le milieu aquatique (dispositions 1.1.3, 1.1.4 et 1.5.1).

En vue d'améliorer la connaissance sur les aquifères nécessaires à leurs bonnes gestions, l'Office de l'Eau Réunion s'est doté d'un réseau important de mesure permettant le suivi de l'évolution de la qualité et de la quantité des masses d'eau souterraines et superficielles. Elle souhaite aussi disposer de modèles mathématiques de simulation des écoulements souterrains afin d'accompagner les gestionnaires publics dans leur projet d'aménagement du territoire et gérer de manière durable les ressources en eaux souterraines. Ce type d'outils d'aide à la décision permet également d'appréhender de façon plus précise le fonctionnement complexe des systèmes aquifères littoraux Réunionnais.

L'Office de l'Eau Réunion souhaite ainsi disposer d'un modèle de simulation des écoulements représentatif du fonctionnement des nappes souterraines sur la zone nord entre la Rivière Saint-Denis et la Rivière du Mât (désignées par la suite sous le terme « Aquifères Nord ») afin d'appréhender les conséquences sur les ressources en eau des pressions anthropiques actuelles et futures que sont :

- L'impact du creusement de la galerie du transfert des eaux d'est en ouest,
- L'impact d'une augmentation des prélèvements.

L'utilisation du logiciel « FEFLOW-FM3 » doit permettre d'appréhender avec précision l'écoulement souterrain ainsi que la position dans l'espace du biseau salé des « Aquifères Nord ».

II Présentation de la zone d'étude

II.1 Contexte géographique

La zone d'étude se situe au nord de La Réunion, elle s'étend sur les communes de Saint-Denis, Sainte-Marie, Sainte-Suzanne et Saint-André, entre la Rivière Saint-Denis à l'ouest et la Rivière du Mât à l'est. La morphologie générale du secteur d'étude correspond à la zone littorale comprise grossièrement entre le trait de cote au nord et le début des planèzes au sud. On remarque l'hétérogénéité du secteur en terme d'occupation des sols très contrasté entre des zones densément peuplé et d'autres plus agricoles.



Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

II.2 Contexte climatique et pluviométrique

Situé à proximité immédiate du tropique du Capricorne dans le sud-ouest de l'Océan Indien, l'île de La Réunion est caractérisée par un climat tropical. Cependant, plus de 300 microclimats sont recensés sur l'île. Néanmoins, l'alternance de deux saisons est assez bien marquée avec un « été » chaud et humide de Novembre à Avril et un « hiver » plus frais et plus sec de Mai à Octobre.

Les communes du nord de l'île bénéficient de précipitations importantes qui varient selon la saison et avec l'altitude. Les températures « tropicales » évoluent de la même façon dans l'espace et dans le temps.

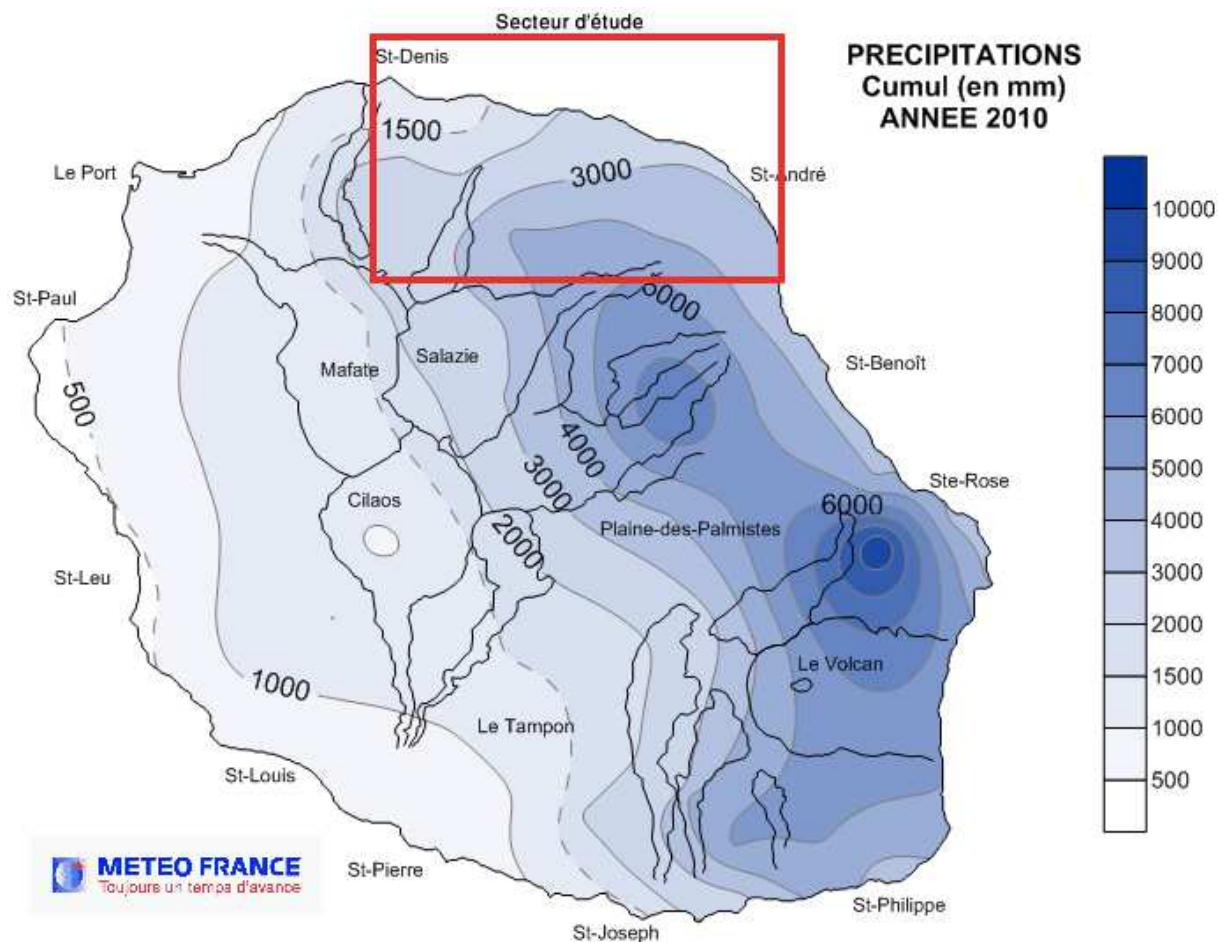


Figure 2 : Cumuls de pluviométrie de l'année 2010

La figure 2 présente les cumuls pluviométriques de l'année 2010. Cette année plus sèche que la normale illustre bien l'inégale répartition généralement observée des précipitations dans l'espace.

L'analyse des précipitations sur la zone d'étude se fait sur plusieurs postes pluviométriques appartenant pour la plupart à Meteo-France mais également au CIRAD et à l'Office de l'Eau Réunion. La figure 3 présente leurs répartitions.



Figure 3 : Répartition des postes pluviométriques sur le secteur d'étude

Le contraste de pluviométrie qui existe entre le littoral et les zones d'altitudes est illustré à travers le tableau 1 qui présente les cumuls de précipitations sur l'année 2009 de trois postes pluviométriques situés à des altitudes différentes :

Poste pluviométrique	Altitude en m NGR	Cumul 2009 en mm
Grand Hazier	72	2082
Bras-Pistolet	262	2937
Plaine des Fougères	1062	5300

Tableau 1 : Illustration de l'effet du gradient d'altitude sur les cumuls pluviométriques

II.3 Contexte hydrologique

II.3.1 La Rivière Saint-Denis

Cette rivière pérenne se situe en bordure ouest du secteur d'étude. Elle prend sa source vers 1500 m d'altitude et se dirige vers Saint-Denis par une vallée encaissée, profonde de 800 à 900 mètres et longue de 15 kilomètres. Son bassin versant est délimité par la topographie et les fortes pentes de part et d'autres de son lit. La superficie de son bassin versant jusqu'à la prise amont du barrage est de 26.97 km². Dans sa partie aval, la rivière possède deux affluents, le Bras Guillaume et le Grand Bras.

Tout au long de son cours, la rivière est alimentée par de nombreuses sources et ravines dont les apports sont mal évalués. Des études ont montrées que ces sources, essentiellement d'origines profondes, contribuent au maintien d'un débit de base à peu près constant de la rivière.

Un bilan hydrologique de la Rivière Saint-Denis est présenté en annexe 1.

II.3.2 La Rivière des Pluies

La Rivière des Pluies se trouve au milieu de la zone d'étude. Elle prend sa source non loin de la Roche Ecrite, vers 1600 m d'altitude. Elle est alimentée dans sa partie amont où son lit est très creusé, par de nombreuses sources et ravines non répertoriées. Comme pour la Rivière Saint-Denis, les sources semblent provenir d'écoulements souterrains profonds. Elle est rejoint dans sa partie aval par plusieurs ravines affluentes, pour la plupart en rive droite :

- La Ravine Kiwi,
- La Ravine du Bachelier,
- Le Bras Mussard,
- La Ravine Mère Canal,
- La Ravine sèche,
- La Ravine Cadet.

La superficie de son bassin d'alimentation jusqu'au niveau du barrage d'Ilet Quinquina (altitude 140m) est de 23.5 km².

Un bilan hydrologique de la Rivière des Pluies est présenté en annexe 1.

II.3.3 La Rivière Sainte-Suzanne

La Rivière Sainte-Suzanne se situe sur la partie est du secteur étudié. Elle prend sa source sur la Plaine des Fougères, vers 1600 m d'altitude en bordure du rempart nord du Cirque de Salazie. Dans sa partie amont, un de ses affluents principal, le Bras Laurent, la rejoint au niveau du lieu-dit « Decotte ». Plus en aval, de nombreux cours d'eau et ravines temporaires viennent la rejoindre. Elle donne naissance à de nombreux bassins et cascades dont les plus connus sont :

- Bassin Bœuf,
- Bassin Nicole,
- Bassin Grondin,
- Cascade Niagara.

En aval de la RN2, le lit de la rivière s'élargie et l'écoulement devient lent et laminaire jusqu'à ce qu'elle se jette dans l'océan.

La superficie de son bassin versant est de 30.7 km².

Un bilan hydrologique de la Rivière Sainte-Suzanne est présenté en annexe 1.

II.3.4 La Rivière du Mât

Elle se situe en bordure est du secteur d'étude. Elle prend sa source dans le Cirque de Salazie au pied du Piton des Neiges. Elle draine tous les écoulements à l'intérieur de ce cirque. Son affluent principal est la Rivière des Fleurs Jaunes. Cependant elle est rejointe par de nombreux cours d'eau dont certains prennent leurs sources sur la forêt de Bélouve et la forêt départementale de la Plaine des Lianes :

- Bras sec,
- Bras des Demoiselles,
- Bras de Caverne (forêt de Bélouve),
- Bras des Lianes (Forêt de la Plaine des Lianes).

La superficie de son bassin d'alimentation est d'environ 150 km².

Un bilan hydrologique de la Rivière du Mât est présenté en annexe 1.

II.3.5 Les ravines et « petites » rivières non pérennes

Plusieurs ravines non pérennes entaillent assez profondément les planèzes en drainant l'eau vers l'océan lors d'évènements de fortes pluviométries. Elles s'assèchent rapidement en l'absence de précipitations importantes. Entre la Rivière Saint-Denis et la Rivière des Pluies on observe trois ravines de ce type :

- La Ravine du Butor,
- La Ravine Patates à Durand,
- La Ravine du Chaudron.

Les sources de la Ravine du Chaudron et de la Ravine du Butor sont pérennes avec des débits respectivement compris entre 100 et 200 l/s pour la Ravine du Chaudron et de quelques l/s pour la Ravine du Butor. Cependant, les captages pour l'adduction en eau potable prélèvent une large partie des débits et les ravines se tarissent rapidement en aval, en dehors des périodes de crues.

Entre la Rivière des Pluies et la Rivière du Mât, les ravines sont de moins grandes importances et on observe plusieurs « petites » rivières temporaires. D'est en ouest on trouve :

- La Ravine de la Mare,
- La Ravine des Figues,
- La Rivière Sainte-Marie,
- La Ravine Charpentier,
- La Ravine des Chèvres,
- La Grande Rivière Saint-Jean,
- La Ravine Sèche.

II.4 Contexte géologique et hydrogéologique

La géologie de la zone d'étude a été définie dans un premier temps avec la carte géologique au 1/50000^{ème} (cf. figure 8). On observe des terrains à l'affleurement d'âges et de natures différentes. On distingue principalement des alluvions de natures et d'âges différents en bordure littorale et des basaltes de phases II, III et IV sur les planèzes qui correspondent au flanc du volcan bouclier lors de sa mise en place. On distingue dans la partie amont de la Rivière des Pluies et de la Rivière du Mât, le cirque de Salazie, où des formations plus récentes issues de l'effondrement et du démantèlement du Piton des Neiges sont représentées.

La géologie profonde de la planèze Saint-Denis, entre la rivière du même nom et la Rivière des Pluies, correspond aux coulées anciennes du volcan (phases I et II du Piton des Neiges). Ce sont des séries basaltiques épaisses de plusieurs centaines de mètres. Elles sont constituées par un empilement en alternance de coulées massives et de

scories, parfois intercalées localement par des paléosols, des épandages d'alluvions ou des tufs. Cette alternance coulées massives / scories s'observe particulièrement bien sur les remparts de la Rivière Saint-Denis et de la Rivière des Pluies comme sur la « Route du littoral ».

Ces terrains du bouclier ancien ont été profondément érodés lors d'une période de répit de l'activité volcanique longue de 80 000 ans. Sur la zone littorale, des alluvions anciennes ont été déposées aux débouchés des paléovallées creusées dans le bouclier ancien. Puis ces terrains ont été recouverts, suite à un regain d'activité, par des coulées plus récentes du Piton des Neiges (phases III et IV), comblant les paléovallées et recouvrant tout le massif selon la même alternance coulées massives / scories de basaltes alcalins.

Les laves plus récentes de la Plaine des Chicots et de la Plaine des Fougères dans lesquelles la Rivière des Pluies a entaillé profondément son lit, se sont épanchées en grande partie à l'est de cette rivière. Elles ont également emprunté le lit de la Rivière Saint-Denis pour s'épandre sur le littoral et former le substratum de l'actuelle ville de Saint-Denis. L'érosion a permis de remettre à l'affleurement des terrains plus anciens, de phase II, à l'ouest de la Rivière des Pluies.

La constitution géologique de la planèze située entre la Rivière des Pluies et la Rivière du Mât est identique à celle décrite précédemment dans sa partie profonde avec une couverture plus importante de coulées de phases III-IV. Généralement, entre les deux, on trouve un paléosol qui s'est formé pendant la longue période d'arrêt de l'activité volcanique du Piton des Neiges. Cette Planèze présente un relief régulier légèrement entaillé par quelques ravines et rivières.

Le secteur de Saint-André représente le cône alluvial de la Rivière du Mât. Il s'étend au nord jusqu'à Sainte-Suzanne et au sud jusqu'à Bras-Panon. Des études géophysiques et la réalisation de forages ont permis d'identifier une épaisseur importante d'alluvions (jusqu'à 280 m au forage Paniandy au centre de la plaine). En amont des formations basaltiques de phases III ont été identifiés sous les alluvions à -46 mNGR (forage Ravine Creuse). Plus en aval, des coulées de basalte à olivine, de phase II, sont identifiés à -100 mNGR (forage P14 Champ Borne).

Sur la zone d'étude plusieurs particularités géologiques ont été mises en évidence grâce à la reconnaissance du sous-sol par de nombreux forages :

- La coupe géologique réalisée par le BRGM (BRGMRP-57955-FR, avril 2010), entre Sainte-Marie et Sainte-Suzanne a probablement identifié une importante paléo-vallée, large de plusieurs kilomètres et épaisse de plusieurs dizaines de mètres dans l'axe de la Ravine des Chèvres.
- Sur la Plaine alluviale du Mât, les forages P14 Champ Borne et Ravine Creuse, ont traversés des alluvions limoneuses plus ou moins imperméables, paléosols et coulées boueuses sur des épaisseurs considérables (plusieurs dizaines de mètres).

« L'étude des circulations d'eau des systèmes hydriques du secteur Saint-Denis Sainte-Marie » (ECSHY, Office de l'Eau, juillet 2010) a proposé une thèse selon laquelle pendant la phase de démantèlement et d'érosion du massif, longue de 80 000 ans, initiée après la mise en place des basaltes de phase II, l'affaissement et l'étalement du massif auraient créés d'importantes zones de faiblesses sous la forme de fracture et fissures, permettant la mise en place d'axes préférentiels de drainage, où se concentrent les écoulements souterrains. Il en résulte aujourd'hui l'existence de zones fortement perméables dans l'axe des paléo-vallées, des vallées et rivières actuelles (figure 4).

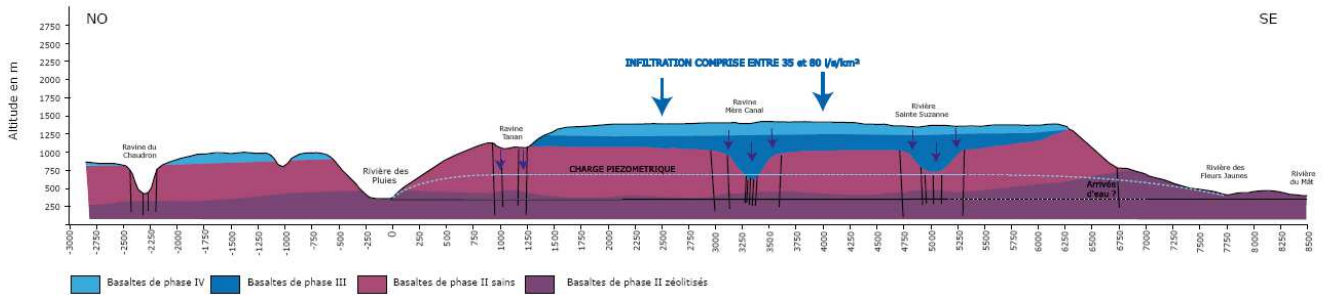


Figure 4 : Schéma de synthèse des zones préférentielles d'infiltration dans le massif (ECSHY 2010)

Ces différents paramètres géologiques rendent le milieu extrêmement hétérogène et anisotrope et la compréhension des circulations d'eau à travers le massif difficile à appréhender.

Les relations entre les rivières et ravines et la nappe d'eau souterraine (nappe de base) sont très complexes. Pour la plupart, elles sont perchées au dessus de la nappe de base, parfois à plusieurs centaines de mètres. Les terrains qui composent leurs lits sont de tailles très variés et extrêmement perméables (blocs de basalte, galets, sable). Cependant, ces formations alluvionnaires restent moins perméables que les formations basaltiques sur lesquelles elles reposent (coulées fracturées, tufs, scories,...). L'ensemble des formations est donc très hétérogène mais néanmoins globalement perméable voir très perméable.

L'alimentation de la nappe de base se fait principalement lors de fortes précipitations quand les rivières et ravines sont en crue. Toutefois, les rivières pérennes possèdent des zones où l'infiltration se fait en continu, en aval de ces cours d'eau, au droit des plaines alluviales. Il se peut même qu'en aval de ces zones d'infiltration leurs lits soient asséchés. En amont des plaines alluviales la liaison hydraulique entre les ravines et rivières et la Nappe de base est moins évidente voir inexistante.

Localement, des nappes perchées existent à la faveur de particularités géologiques mais ne représentent qu'une infime partie du stock d'eau qui nous intéresse.

III Les données disponibles

Nous avons recueillis sur le domaine d'étude les données permettant d'établir le modèle conceptuel hydrogéologique des systèmes aquifères du nord de La Réunion entre la Rivière Saint-Denis et la Rivière du Mât. Les données nécessaires à cette approche sont les suivantes :

- Topographie du secteur
- Formations et structures géologiques (carte, coupes et études)
- Données climatiques (pluviométrie et évapotranspiration)
- Données hydrométriques (débit et infiltration des cours d'eau)
- Données piézométriques (Banque de données Office de l'Eau)
- Exploitation des aquifères

III.1 Données géologiques

Les données recensées sur le secteur d'étude sont :

- La carte géologique de la Réunion au 1/50000^{ème} (BRGM)
- Les coupes géologiques de forage (BRGM)
- Les études géologiques et géophysiques

III.1.1 La carte géologique

La géologie de la zone d'étude a pu être définie dans un premier temps à partir de la carte géologique de la Réunion au 1/50000^{ème} représenté sur la figure 8. Au centre, les terrains de phases III-IV représentent l'essentiel du recouvrement, à l'ouest l'érosion a été plus intense et a permis de mettre à l'affleurement des terrains de phase II. Des coulées pyroclastiques ont été déposées avec parcimonie sur le secteur. Les plaines alluviales sont associées à la Rivière Saint-Denis et la Rivière des Pluies d'une part et d'autre part à la Rivière du Mât. De profondes rivières et ravines entaillent le massif (Rivière Saint-Denis, Rivière des Pluies, Rivière du Mât,...).

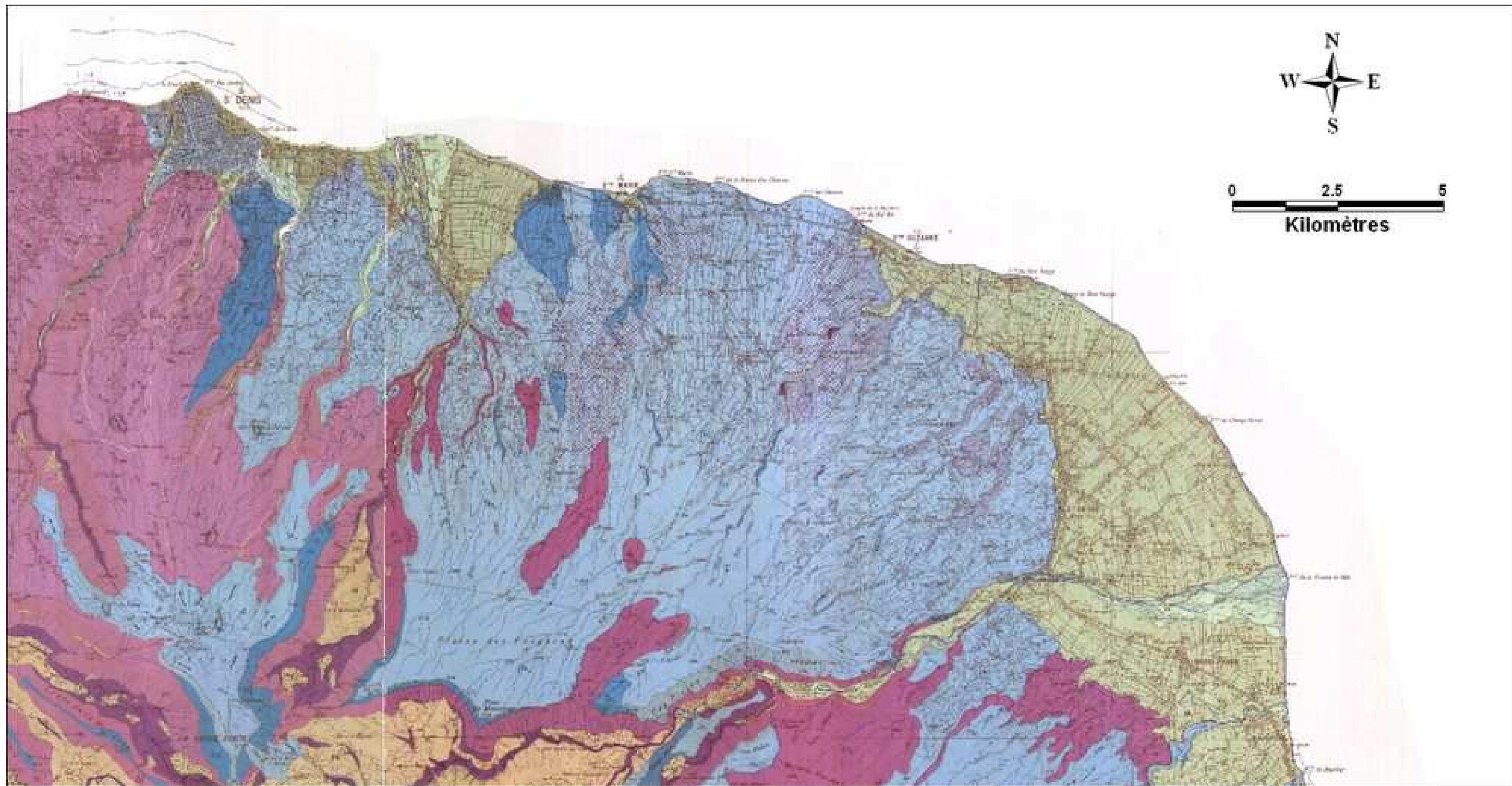


Figure 5 : Carte géologique de la Réunion au 1/50000^{ème} (BRGM)

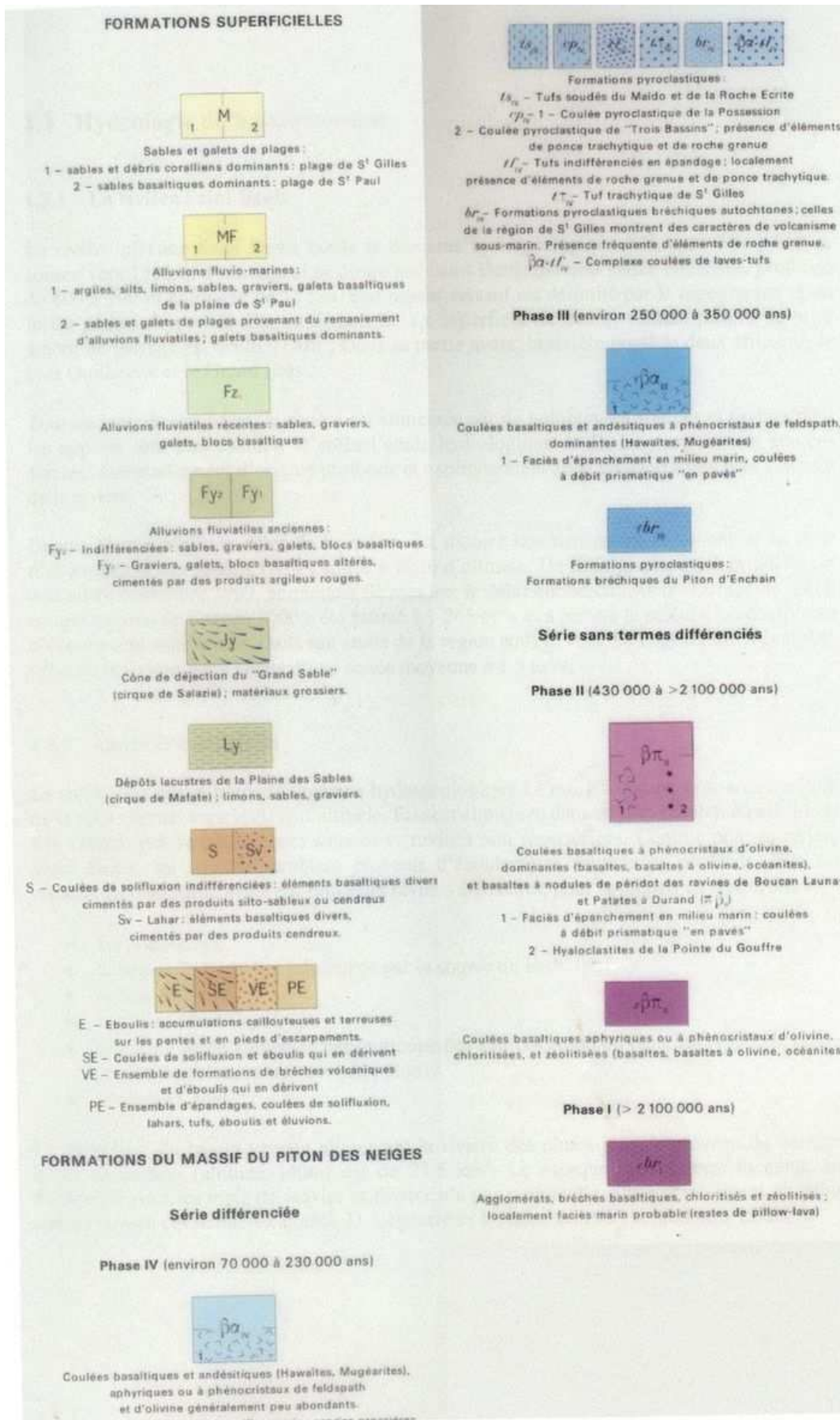


Figure 6 : Légende de la carte géologique de la Réunion au 1/50000^{ème}

III.1.2 Les coupes géologiques de forages

Le BRGM gère la Banque de données du sous-sol (BSS) qui a pour objectif de répertorier tous les ouvrages existants dont la profondeur est supérieure à 10m. Cette base de données donne accès à de nombreuses informations sur les formations géologiques rencontrées pendant les travaux de creusement et leurs propriétés hydrogéologiques.

Plusieurs ouvrages principalement répartis sur la bordure côtière nous ont permis d'affiner les connaissances du sous-sol sur le secteur. Une coupe hydrogéologique réalisée par le BRGM dans le cadre de *l'analyse fonctionnelle par traitement du signal et approche hydrochimique des aquifères du nord de la Réunion (BRGMRP-57955-FR)* nous renseigne sur la géométrie des formations géologiques et des paramètres hydrogéologique entre la Rivière des Pluies et la Rivière Sainte-Suzanne (annexe 3).

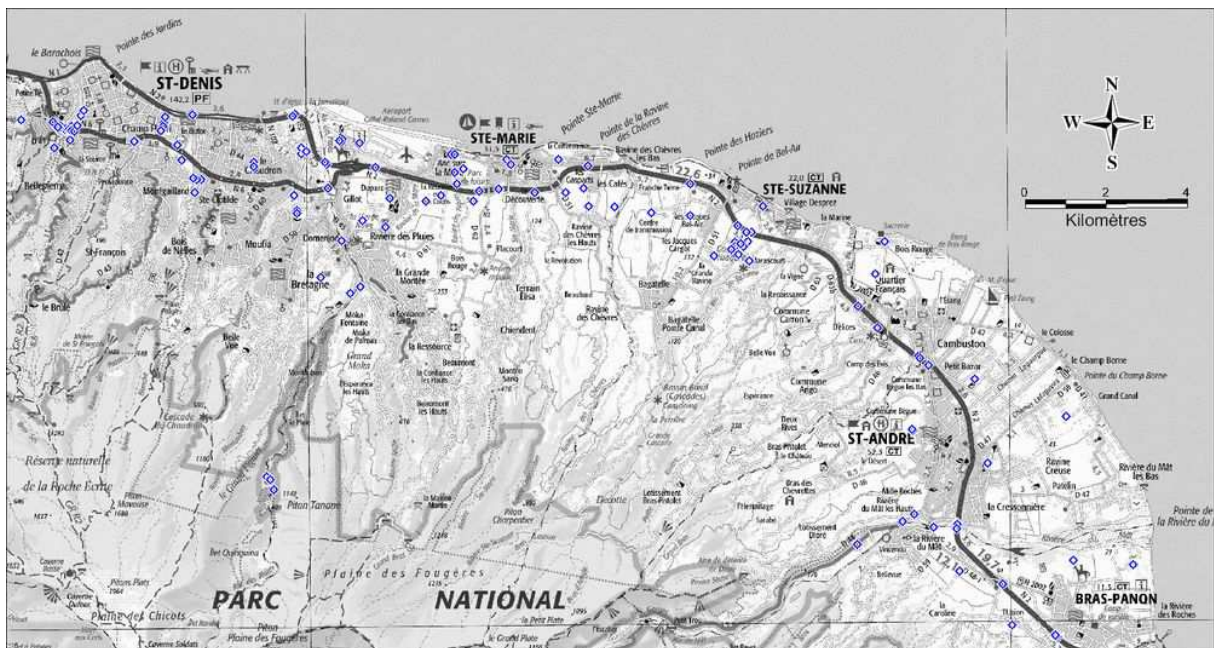


Figure 7 : Localisation des sondages et forages supérieur à 20 mètres

station		Altitude (mNGR)	Profondeur d'investigation (m)	Profondeur des crépines (m)	Transmissivité (m ² /s)	Emmagasinement
code OE	code BSS					
14018	12264X0018/F	6	16	5.19 - 14.19		
14113	12264X0113/S1	26	60			
14218	12264X0218/S1	24	25			
14219	12264X0219/S1	5	15			
14263	12264X0263/S1	10	20			
14264	12264X0264/F	36	80			
14265	12264X0265/FORAGE	47	80	52 - 78	5,5.10 ⁻¹	
21001	12271X0001/F	7	22			
21002	12271X0002/F	38	39			
21015	12271X0015/F6	114	140	110 - 140		
21028	12271X0028/F	115	16			
21030	12271X0030/F	23	35	23 - 35.2		
21034	12271X0034/2-1-S7	58	204			
21038	12271X0038/S1	31	90	27 - 31.8		
21044	12271X0044/F3	85	119	76.50 - 118.60	4,3.10 ⁻¹	
21049	12271X0049/F4	157	185	167 - 185		
21057	12271X0057/F5	63	169	52.85 - 169	4,5.10 ⁻³	2,0.10 ⁻¹
21058	12271X0058/F2	43	100	61 - 99	2,4.10 ⁻¹	
21059	12271X0059/F3	64	114	78 - 114	2,1.10 ⁻¹	
21060	12271X0060/FORAGE	26	58	27 - 55	2,5.10 ⁻¹	2,0.10 ⁻¹
21061	12271X0061/FORAGE	70	120	78 - 119	5,0.10 ⁻¹	
21063	12271X0063/CERF	72	113	82 - 113	3,4.10 ⁻⁰	
21065	12271X0065/F	73	136	90 - 135	7,9.10 ⁻²	
21066	12271X0066/P22	35	100	33.90 - 99.50	1,0.10 ⁻¹	1,0.10 ⁻²
21090	12271X0090/F	63	169	191 - 256	4,0.10 ⁻¹	5,0.10 ⁻²
22001	12272X0001/F	7	5			
22004	12272X0004/F	7	3			
22006	12272X0006/F	10	7			
22017	12272X0017/F	17	23			
22018	12272X0018/F	19	9			
22050	12272X0050/F2-BIS	103	140	115,38 - 140		
22051	12272X0166/F1	30	44	11,99 - 36,25		
22052	12272X0052/2-2-F3	80	125			
22053	12272X0053/P	110	0			
22072	12272X0072/F	120	160	128,50 - 157,40	1,0.10 ⁻¹	
22075	12272X0075/P1	36	40	28,70 - 40		
22076	12272X0076/P2	5	11			
22095	12272X0095/P27	56	120	67 - 118,50	8,2.10 ⁻²	2,0.10 ⁻²
22096	12272X0096/F	85	161	138,30 - 161	1,3.10 ⁻¹	
22137	12272X0137/F	83	130	104,50 - 128,50	2,0.10 ⁻¹	
23014	12273X0014/S2	40	30	5,60 - 28,10	3,0.10 ⁻²	
23016	12273X0016/S5	62	40	9,20 - 37,20	2,6.10 ⁻⁵	
21050-B	12271X0050/F5	80	110	86 - 110		
21064-1	12271X0162/PIEZO	54	110			
22051-A	12272X0166/F1	30	44			
22064-2	12272X0064/FORAGE	109	198	118 - 193,50	1,3.10 ⁻²	
23009-2	12273X0009/P14	24	133	123,70 - 133		
23011-2	12273X0011/F	71	143	79 - 139		
23019-2	12273X0019/P19	13	140	119 - 139	9,5.10 ⁻²	
22070	12272X0070/S3	146	40	9,75 - 38	1,7.10 ⁻²	

Tableau 2 : Sondages et forages disposant de données géologiques et hydrogéologiques

III.1.3 Les études géophysiques

Les campagnes géophysiques recensées sur le secteur sont les suivantes :

- Géophysique électrique, secteur de Sainte-Marie, BRGM, réalisées en 1987 (Rapport 87REU47 et 87REU54)
- Géophysique électrique, secteur Gillot, BRGM, réalisée en 1988 (Rapport 88REU46)
- Géophysique électrique et AMT, HORIZON, réalisée en 1995 (Rapport Q4104)

La campagne de 1988 a permis de réaliser deux coupes géoélectriques (cf. figure 8), dont le tracé est-ouest se situe à environ 500 mètres au sud de l'aéroport Gillot - Roland Garros, qui mettent en évidence la présence d'un horizon conducteur à environ -40 mNGR. Il a été interprété comme une coulée de basalte de phase II avec des scories et présentant une altération importante.

Au dessus de ce niveau conducteur, se trouve un horizon plus résistant, interprété comme des basaltes de phase III-IV altérés et fissurés.

Une zone de forme ovoïdale très résistante a été repérée au sein des niveaux supposés de phase III-IV. Elle pourrait correspondre au remplissage d'une paléo-vallée dont l'extension est inconnue.

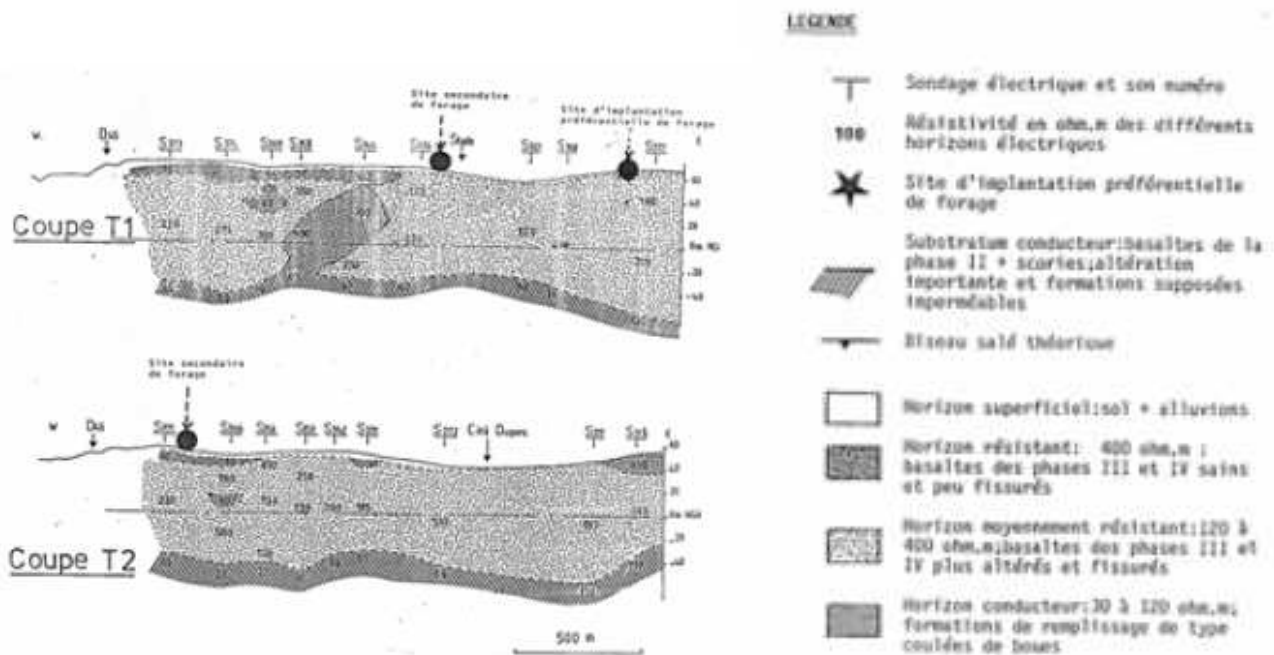


Figure 8 : Coupes géoélectriques interprétatives de la campagne géophysique de 1988 (BRGM, 88REU46)

III.2 Données climatiques

III.2.1 Pluviométrie

Il y a 20 postes pluviométriques sur la zone d'études (cf. figure 3) suivis pour la plupart par Météo France à l'exception du poste « LA MARE » suivi par le CIRAD et de « Mère Canal » qui est gérée par l'Office de l'Eau Réunion. Pour certains d'entre eux la durée des chroniques est de plusieurs dizaines d'années.

Station pluviométrique	Altitude (mNGR)	Chronique (années)
BAGATELLE	262	1992-2009
BEAUF STE-MARIE	225	1992-2009
BOIS-ROUGE	3	1992-2009
BRAS-PANON	480	1993-2002;2004-05;2007-09
BRAS-PISTOLET	555	2003-05 ; 2008-09
BRULE-VAL-FLEUR	1065	1992-2009
CHAUDRON	38	1992-2009
ESPERANCE	383	2004-2006
GILLOT - AERO	8	1992-2009
GRAND-HAZIER	72	1992-2009
GRAND-ILET	1185	2004-09
LA MARE	68	2001-2009
LE COLOSSE	16	1992-2002 ; 2004-09
MENCIOL	181	1992-2009
Mère Canal	1250	2006-2010
PL. CHICOTS	1834	2007-2009
PL. DES FOUGERE	1062	1993;1995-2009
PROVIDENCE	138	1992-2009
ST-DENIS COLLE	36	1998-2009
ST-FRANCOIS	545	1992-2009

Tableau 3 : Liste des postes pluviométriques

III.2.2 Evapotranspiration

Les données d'évapotranspiration potentielle ont été calculées par le CIRAD pour la zone nord et est de la Réunion. Des valeurs par décades ont été définies auxquelles il faut retrancher un gradient d'altitude suivant l'emplacement de la station étudiée.

ETP_CIRAD (zone NORD et EST)			
Mois	Décade	ET0 Nord Est (mm/j)	Gradient Nord Est (/100m)
Janvier	1	4.88	-0.18
	2	4.98	-0.15
	3	4.8	-0.14
Fevrier	4	4.85	-0.19
	5	4.53	-0.15
	6	4.55	-0.14
Mars	7	4.68	-0.17
	8	4.31	-0.16
	9	4.42	-0.16
Avril	10	4.2	-0.15
	11	3.74	-0.13
	12	3.64	-0.15
Mai	13	3.32	-0.12
	14	3.17	-0.1
	15	2.98	-0.11
Juin	16	2.93	-0.1
	17	2.86	-0.11
	18	2.72	-0.1
Juillet	19	2.77	-0.11
	20	2.84	-0.11
	21	3.02	-0.12
Aout	22	3.06	-0.11
	23	3.31	-0.12
	24	3.42	-0.14
Septembre	25	3.8	-0.13
	26	3.73	-0.12
	27	4.21	-0.15
Octobre	28	4.4	-0.16
	29	4.07	-0.15
	30	4.5	-0.17
Novembre	31	4.6	-0.17
	32	5	-0.19
	33	4.91	-0.15
Decembre	34	4.81	-0.19
	35	4.63	-0.16
	36	4.89	-0.17

Tableau 4 : Données d'évapotranspiration pour la zone nord et est de la Réunion

III.3 Données hydrométriques

Dix huit unités hydrologiques sont identifiées entre la Rivière Saint-Denis et la Rivière du Mât, avec des bassins versants bien distincts (cf. figure 9). Chacune d'entre elles est associée à une rivière pérenne ou un cours d'eau temporaire. Les unités hydrologiques de la Cascade Chaudron, la Rivière des Pluies, la Rivière Sainte-Suzanne et Saint-André ont été subdivisées en deux (station OE / aval) car des stations hydrométriques nous permettent de contrôler les résultats et ainsi d'affiner les données.

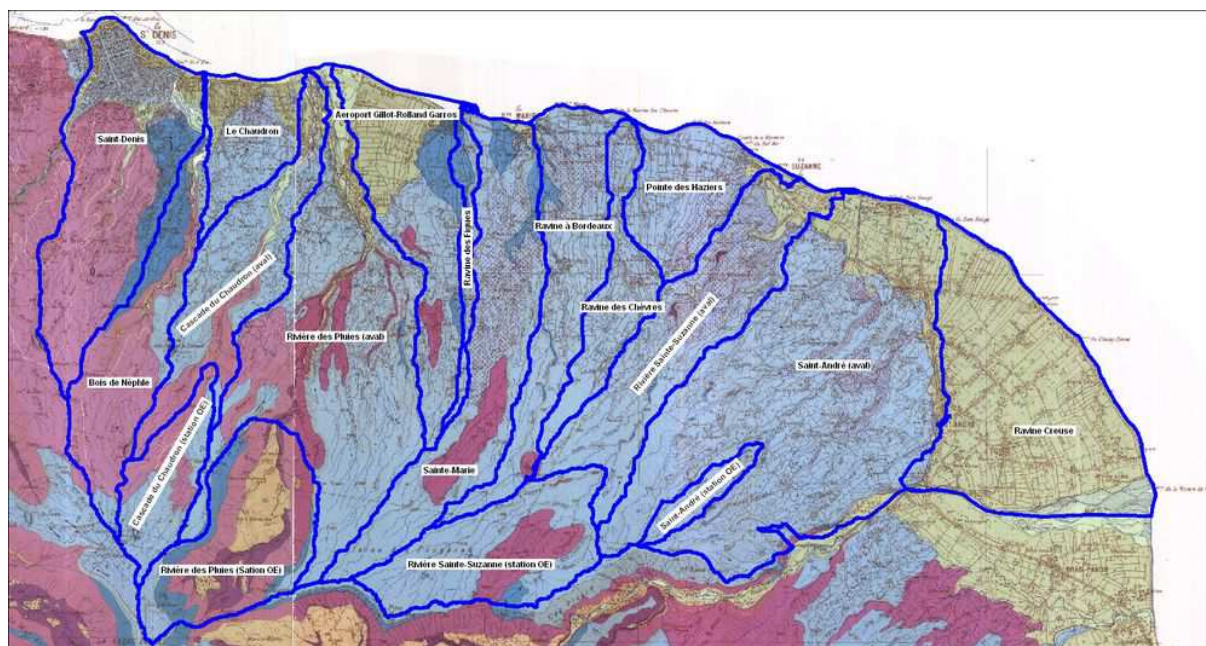


Figure 9 : Unités hydrologiques du nord de la Réunion

Unités hydrologiques	Surface (km ²)
Saint-Denis	20.98
Le Chaudron	6.818
Bois-de-Nèphle	12.99
Cascade du Chaudron (Station OE)	6.564
Cascade du Chaudron (aval)	13.31
Rivière des Pluies (Station OE)	14.39
Rivière des Pluies (aval)	31.66
Aéroport Gillot-Rolland Garros	14.83
Ravine des Figs	2.664
Sainte-Marie	19.13
Ravine à Bordeaux	13.81
Ravine des Chèvres	7.456
Pointe des Haziers	8.831
Rivière Sainte Suzanne (Station OE)	13.19
Rivière Sainte Suzanne (aval)	17.51
Saint-André (Station OE)	2.193
Saint-André (aval)	47.53
Ravine Creuse	26.72

Tableau 5: Surface des différentes unités hydrologiques

Les bilans hydrologiques ont été réalisés pour une année moyenne (2002) afin de déterminer la part des précipitations qui alimente les nappes souterraines.

L'hypothèse retenue considère que les précipitations s'infiltrent jusqu'à une limite journalière de 50 mm/j (phase II du Piton des Neiges) ou 80 mm/j (phases III et IV du Piton des Neiges) et qu'au-delà, tout le reste ruisselle jusqu'à la mer. Ces valeurs sont généralement retenues comme valeurs de référence pour la réalisation de bilans hydrologiques sur l'île de la Réunion.

Le stock d'eau infiltré à la suite d'évènements pluvieux constitue la « réserve utile (**Ru**) ». Une partie de ce stock d'eau infiltré sera repris par l'évapotranspiration alors que le reste, la « réserve hydrologique (**Rh**) » servira à réalimenter les nappes souterraines.

Lors d'évènement pluvieux, l'évapotranspiration potentielle est relativement faible du fait de la couverture nuageuse et des températures qui baissent. L'évapotranspiration réelle agit donc en dehors de ces évènements. Les valeurs d'évapotranspiration par décennie ont donc été pondérées pour calculer les bilans hydrologiques sur le même laps de temps.

Ainsi, nous avons établis nos bilans hydrologiques de la manière suivante :

$$(1) \quad Ru = P - R$$

$$(2) \quad Rh = Ru - ETR$$

Avec : P : Précipitations
 R : Ruissellement
 Ru : Réserve utile
 ETR : Evapotranspiration réelle
 Rh : Réserve hydrologique

Pour chaque unité hydrologique nous avons calculé les valeurs d'infiltration annuelle selon les deux hypothèses de ruissellement. Les résultats sont présentés dans le tableau 6 et sur la figure 10.

	Infiltration (mm/an)	
	seuil 50 mm/j	seuil 80 mm/j
Saint-Denis	597.9	808.0
Le Chaudron	477.6	635.1
Bois-de-Nèphle	975.7	1254.3
Cascade du Chaudron (Station OE)	1404.7	1769.1
Cascade du Chaudron (aval)	667.5	874.1
Rivière des Pluies (Station OE)	1444.9	1788.5
Rivière des Pluies (aval)	763.2	974.6
Aéroport Gillot-Rolland Garros	520.8	685.7
Ravine des Figues	568.9	741.9
Sainte-Marie	1292.9	1610.3
Ravine à Bordeaux	1145.5	1431.2
Ravine des Chèvres	1780.4	2041.8
Pointe des Haziers	910.4	1135.7
Rivière Sainte Suzanne (Station OE)	2882.1	3281.2
Rivière Sainte Suzanne (aval)	3206.1	3550.8
Saint-André (Station OE)	6835.2	7357.4
Saint-André (aval)	2949.8	3294.7
Ravine Creuse	948.5	1175.7

Tableau 6 : Valeurs d'infiltration annuelle des différentes unités hydrologiques (2002)

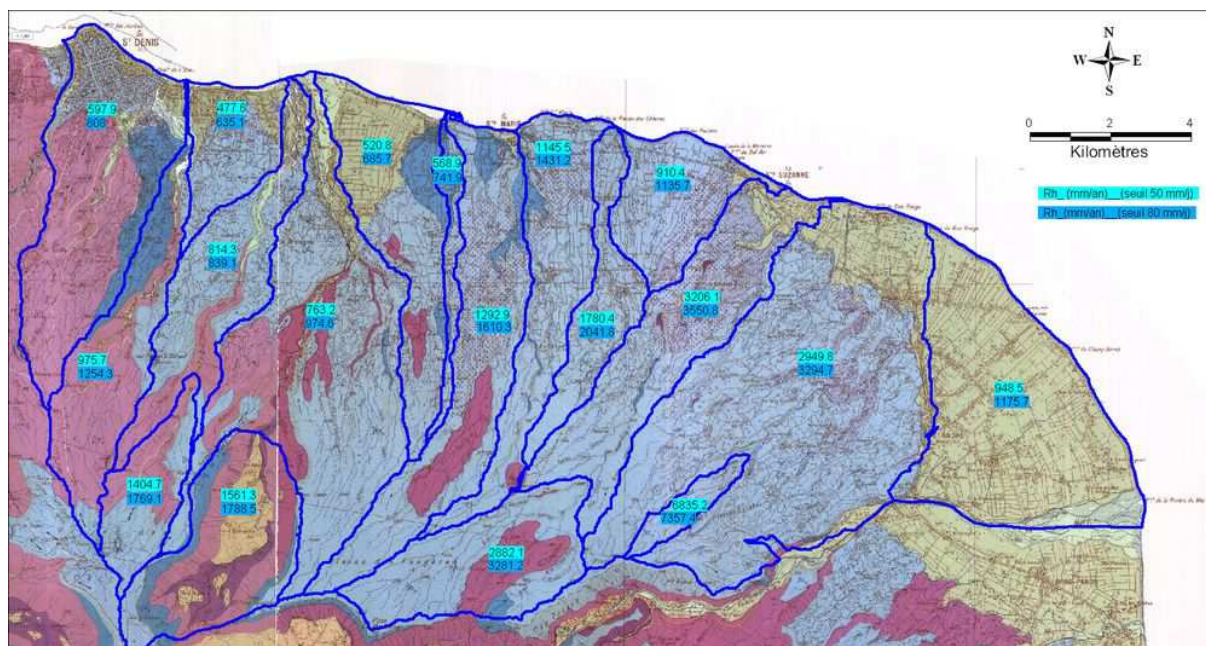


Figure 10 : Carte des valeurs d'infiltration annuelle par unités hydrologiques (2002)

La plupart des unités hydrologiques sont inégalement répartis sur des formations de phases II et des formations de phases III-IV. Le choix de la valeur d'infiltration se fera en fonction de la formation la plus représentée sur chaque unité hydrologique. Pour les unités essentiellement recouvertes par des alluvions nous avons pris l'hypothèse du seuil 80 mm/j.

Les valeurs d'infiltrations augmentent avec l'altitude et selon un gradient ouest-est.

Sur le secteur d'étude une autre forme d'infiltration permettant la réalimentation des aquifères est représentée par l'infiltration souterraine des rivières. Les pertes moyennes de trois rivières pérennes sont connues grâce aux bilans hydrométriques réalisés par l'Office de l'Eau :

- La Rivière Saint-Denis
- La Rivière des Pluies
- La Rivière du Mât

Les bilans hydrométriques pour des années de références sont présentés en annexe 1 pour ces trois rivières pérennes.

Les tableaux 7, 8 et 9 représentent les pertes de ces rivières mesurées lors de campagnes de jaugeages différentiels. Les moyennes de ces valeurs seront utilisées par la suite pour la modélisation.

Date	Pertes (infiltrations) (m ³ /s)
03.11.1999	0.07
11.07.2000	0.072
22.08.2000	0.052
26.09.2000	0.049
25.10.2000	0.051
18.01.2001	0.082
07.06.2001	0.059
30.08.2001	0.058
10.10.2001	0.057
06.11.2001	0.058
02.02.2002	0.093
29.05.2002	0.085
22.05.2003	0.02
22.07.2003	0.069
21.10.2003	0.047
26.05.2004	0.021
06.10.2004	0.057

Tableau 7 : Pertes par infiltration de la Rivière Saint-Denis

Date	Pertes (infiltrations) (m ³ /s)
21.10.1997	0.25
21.10.1998	0.237
22.09.1999	0.133
10.10.2000	0.311
13.09.2001	0.18
22.10.2002	0.149
13.10.2003	0.177
07.10.2004	0.156
11.10.2005	0.256

Tableau 8 : Pertes par infiltration de la Rivière des Pluies

Date	Pertes (infiltrations) (m ³ /s)
29.10.1997	0.73
03-04.11.1998	0.77
17-18.11.1999	0.8
07-08.11.2000	0.44
16-17.11.2001	0.9
23-24.10.2002	1.05
22-23.10.2003	0.42
27-28.10.2004	0.36
02-03.11.2005	0.87

Tableau 9 : Pertes par infiltration de la Rivière du Mât

III.4 Données piézométriques

L'Office de l'Eau Réunion dispose d'un réseau de suivi piézométrique qui permet d'approcher le comportement souterrain des écoulements. Sur la zone d'étude, 42 points de suivis sont recensés. Pour la plupart d'entre eux les chroniques de données acquises sont supérieures à 10 ans à des pas de temps plus ou moins court allant de relevés mensuels à des données journalières. La figure 11 et le tableau 10 présentent leurs emplacements, leurs caractéristiques ainsi que la durée de leur chronique.

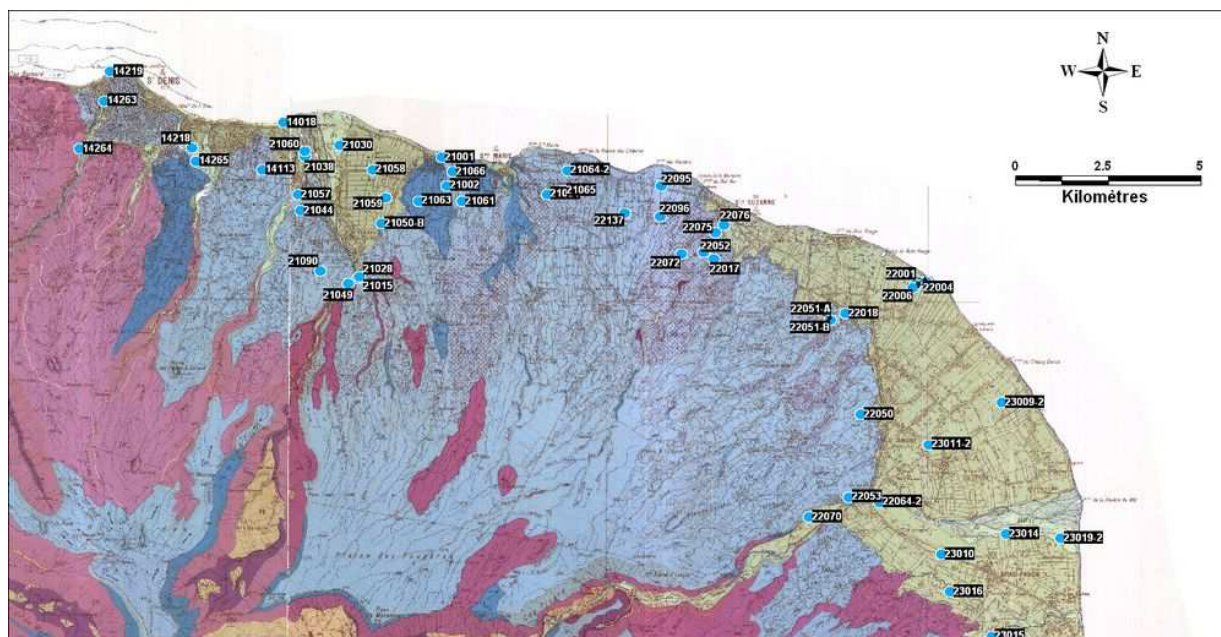


Figure 11 : Réseau de suivi piézométrique de l'Office de l'Eau

station	Altitude (mNGR)	Profondeur d'investigation (m)	Chroniques
14219	5	15	1988-97
14263	10	20	1988-2011
14264	36	80	1989-2001
14218	24	25	1988-2011
14265	47	80	1995-2001
14113	26	60	1988-2011
14018	6	16	1988-2011
21060	26	58	1992-2010
21038	31	90	1988-2011
21057	63	169	1990;1994-2010
21044	85	119	1987-91;1994-2001;2010
21030			1987-90;1998-2001;2010
21090	63	169	1999-2011
21058	43	100	1990-2010
21059	64	114	
21050-B	80	110	1997-2000;2008-2010
21015	114	140	1998-2010
21028	115	16	1986-2003
21049	157	185	1993-2011
21063	72	113	1995-99;2007-2010
21001	7	22	1998-2010
21066	35	100	1995-2011
21002	38	39	1997-2001
21061	70	120	1996-2011;2007-2010
21034	58	204	1997-2001;2007-2011
21065	73	136	1995-2001
21064-1	54	110	1994-2011
22137	83	130	1999-2011
22095	56	120	1996-2011
22096	85	161	1997-2009
22072	120	160	1998-2001
22052	80	125	1998-2001
22017	17	23	1988-2009
22075	36	40	1998-2009
22076	5	11	1998-2011
22051-A	30	44	1986-89;2009
22018	19	9	1987-89
22006	10	7	1988-91
22004	7	3	1998-91
22001	7	5	1988-2003
22050	103	140	1989-1997
22053	110	0	1987-88
22064-2	109	198	1992-2011
23011-2	71	143	1992-2008
23009-2	24	133	1990-2011

Tableau 10 : Ouvrages disposant de données piézométriques

Sur le secteur de la Rivière des Pluies, la piézométrie a la particularité de former un dôme piézométrique. Les figures 12 et 13 représentent la carte piézométrique réalisée pour le mois de Décembre 2010. Cette particularité piézométrique ne semble pas évoluer radicalement dans le temps.

Au sud de la zone, les courbes piézométriques s'invaginent comme si il existait un axe de drainage important. Au nord, elles forment un dôme qui traduit une alimentation de la nappe par la rivière.

Cette particularité peut s'expliquer par l'existence, dans la partie amont, d'un axe de drainage souterrain existant à la faveur d'une zone très perméable telle que pourrait

l'être les zones extrêmement faillées à l'aplomb d'anciennes paléo-vallées comme expliqué au paragraphe II.4.

En plus de cet axe de drainage, l'infiltration de la Rivière des pluies et de la Ravine du Chaudron, représenté par les flèches rouges sur la figure 13, accentueraient l'invagination des courbes piézométriques dans ce secteur.

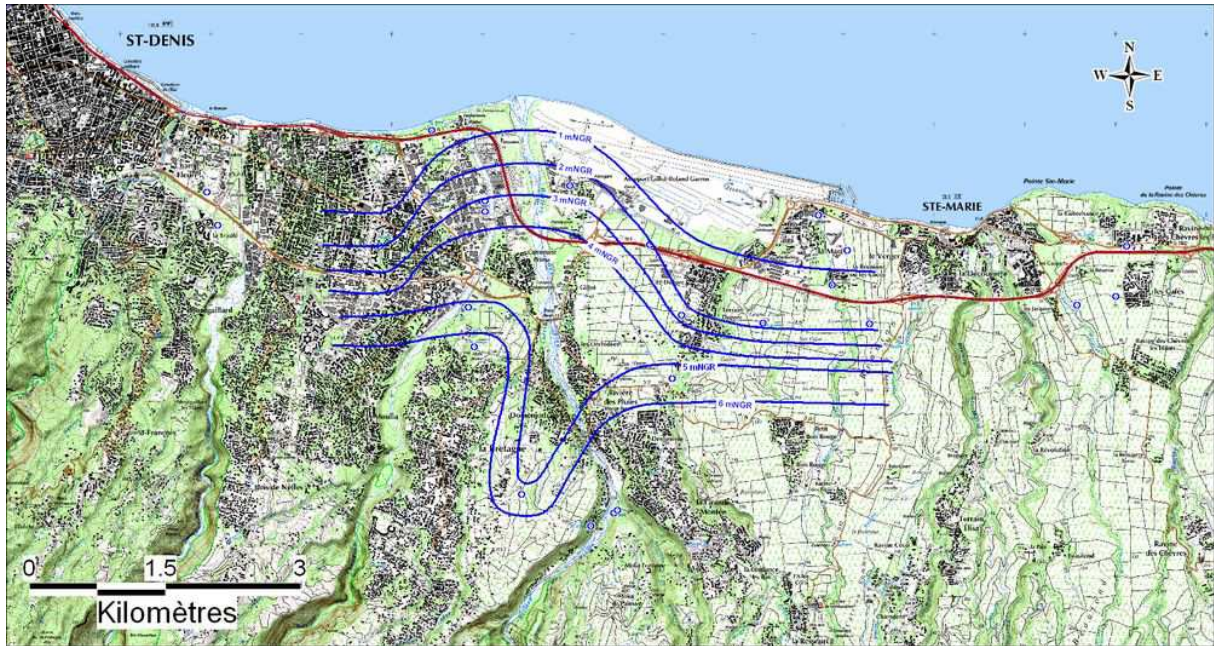


Figure 12 : Carte piézométrique de la partie aval de la Rivière des Pluies – fond géographique (Décembre 2010)

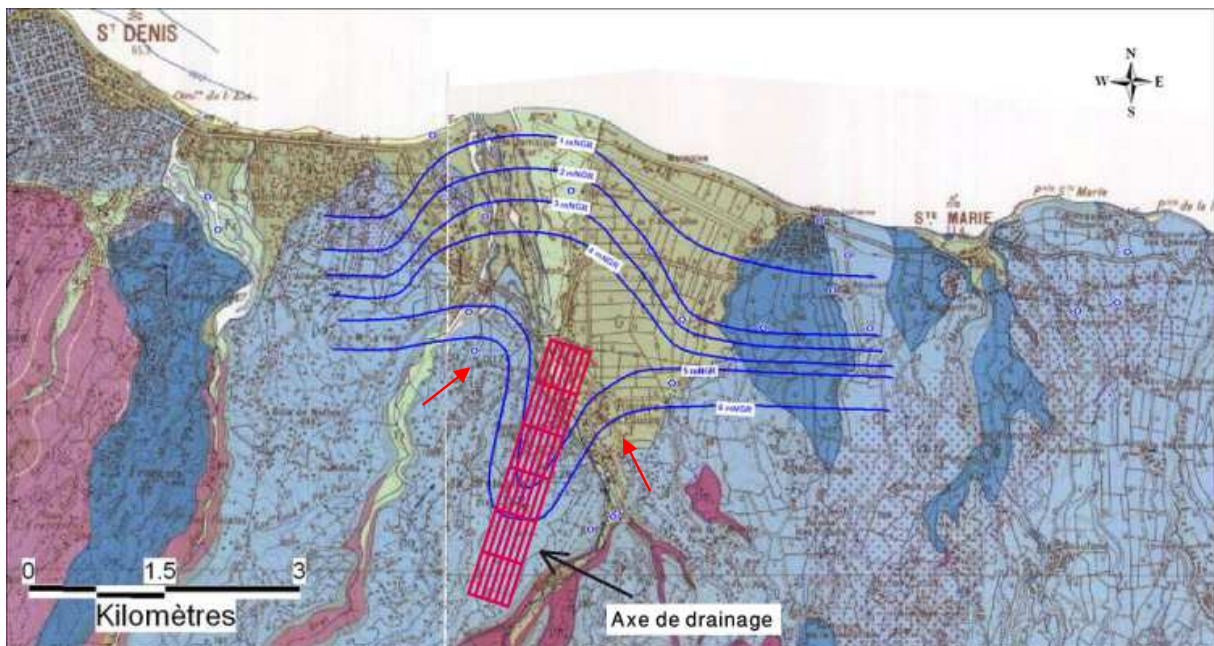


Figure 13 : Carte piézométrique de la partie aval de la Rivière des Pluies – fond géologique (Décembre 2010)

III.5 Exploitation des aquifères

Les valeurs de débits autorisés nous ont permis d'évaluer les volumes prélevés par les forages d'exploitation sur les communes de Saint-Denis, Sainte-Marie, Sainte-Suzanne et Saint-André. Ces débits donnés au titre de limite d'exploitation ne sont pas toujours atteints. Sur une année, les volumes réellement prélevés sont, pour la plupart des ouvrages, nettement inférieur à ceux autorisés. Pour certains forages comme le forage « Dioré » sur la commune de Saint-André les volumes annuels sur la période 2005-2010 représentent seulement 15% du débit autorisé. Dans la plupart des cas les volumes prélevés annuellement sont 10 à 20% inférieurs à ceux autorisés.

Afin de compenser sur la totalité des ouvrages, une valeur arbitraire de 60% des débits autorisés a été retenue. Le tableau 11 présente pour chaque ouvrage d'exploitation ses différentes caractéristiques et les valeurs de débits utilisées par la suite dans le modèle.

Forages	Code Office	n° BSS	Ressource superficielle ou souterraine.	n° de l'arrêté	Q autorisé (l/s, m ³ /s ou m ³ /h)	Q autorisé (m ³ /jour)	profondeur de crépine	Q (60% du Q autorisé) m ³ /j
St Denis								
Forage « Trinité »	14265	12264X0265	souter.	Arrêté n° 02-441 SG/DAI/3	300 m ³ /h	5700	51 - 79	3420
Forage « Domenjod »	21090	12271X0090	souter.	Arrêté n° 01-3690 SG/DAI-3	250 m ³ /h	4750	191 - 256	2850
Ste Marie								
Forage « Rivière des Pluies »	21015	12271X0015	souter.	Arrêté n° 86-3537/DAGR/2	130 m ³ /h	non précisé	110 - 140	1872
Forage « Les Cafés »	21065	12271X0065	souter.	Arrêté n° 0259 SG/DICV/3 (prélèv.)	200 m ³ /h	3800	90 - 135	2280
Forage « Carreau Coton 2 » et « F5 bis »		12271X0206 12271X0158	souter.	Arrêté n° 10-2252/SG/DRCTCV	300 m ³ /h 120 m ³ /h	7200 2880	? 86 - 110	4320 1728
Ste Suzanne								
Forage « Au dessus des Trois Frères »	22072	12272X0072	souter.	Arrêté n° 2421 SG/DICV/3 (prélèv.) Arrêté n° 05-0730/SG/DRCTCV (prot.)	150 m ³ /h	3600	128 - 157	2160
Forages « Sainte Vivienne » 1 et 1 ^{bis}	22051-B 22051-A	12272X0051 12272X0166	souter.	Arrêté n° 05-0731/SG/DRCTCV	90 m ³ /h	2160	012 - 36 ?	1296
Forage de « Bel Air »	22096	12272X0096	souter.	Arrêté n° 09-3608/SG/DRCTCV	200 m ³ /h	3800	139 - 161	2280
St André								
Forage « Dioré »	22130	12272X0130	souter.	Arrêté n° 05-2149/SG/DRCTCV	350 m ³ /h	7000	230 - 280	4200
Forages « Terre Rouge 1 et 2 »	22050	12272X0050 12272X0149	souter.	Arrêté n° 06-1816/SG/DRCTCV	100 m ³ /h 125 m ³ /h	2400 3000	115 - 140 ?	1440 1800
Forage « Ravine Creuse »	23011-2	12273X0011	souter.	Arrêté n° 06-2196/SG/DRCTCV	360 m ³ /h	7200	79 - 139	4320

Tableau 11 : Liste et caractéristiques des forages d'exploitation en 2011

IV Modélisation des « aquifères nord »

IV.1 Présentation du modèle conceptuel

IV.1.1 Extension et construction du modèle

Le secteur modélisé se situe en aval d'un grand bassin versant entre la Rivière Saint-Denis et la Rivière du Mât, dominé par le sommet de la Roche Ecrite à 2276 mètres d'altitude. Il a une superficie de 128 km² (figure 14).

Son extension est basée sur des critères géologiques et sur la connaissance des bassins versants hydrologiques du secteur.

La limite nord correspond au trait de cote. Les limites est et ouest se superposent respectivement sur la Rivière du Mât et la Rivière Saint-Denis aux endroits où elles s'infiltrent. La limite sud est plus arbitraire mais correspond sensiblement à la rupture de pente qui existe entre la zone littorale et le début des planèzes qui montent jusqu'au rempart nord du cirque de Salazie (cf. BRGMRP-57955-FR).

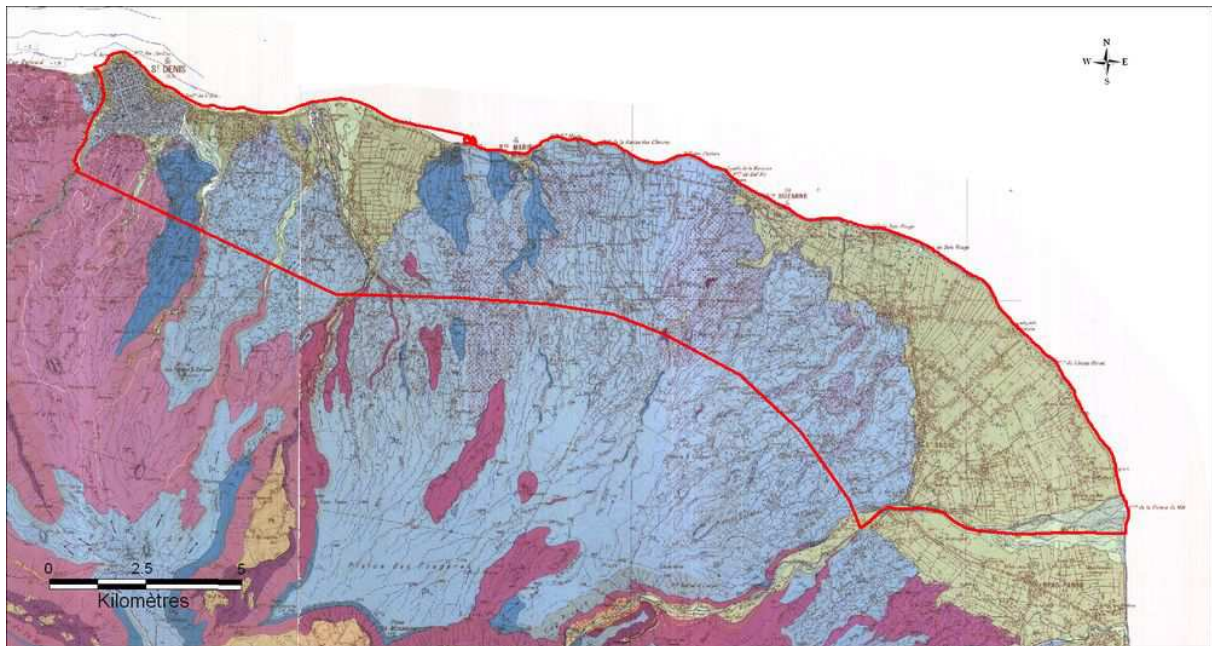


Figure 14 : Extension de « l'unité » de modélisation sur fond géologique

Le maillage en éléments finis représenté sur la figure 15 a été raffiné sur les bordures du modèle, au niveau des ouvrages de reconnaissances recensés sur le secteur, localement aux limites d'affleurement entre alluvions et basaltes et au niveau des rivières. Au total sur toute l'épaisseur du modèle on compte 1 403 472 éléments et 789 000 nœuds.

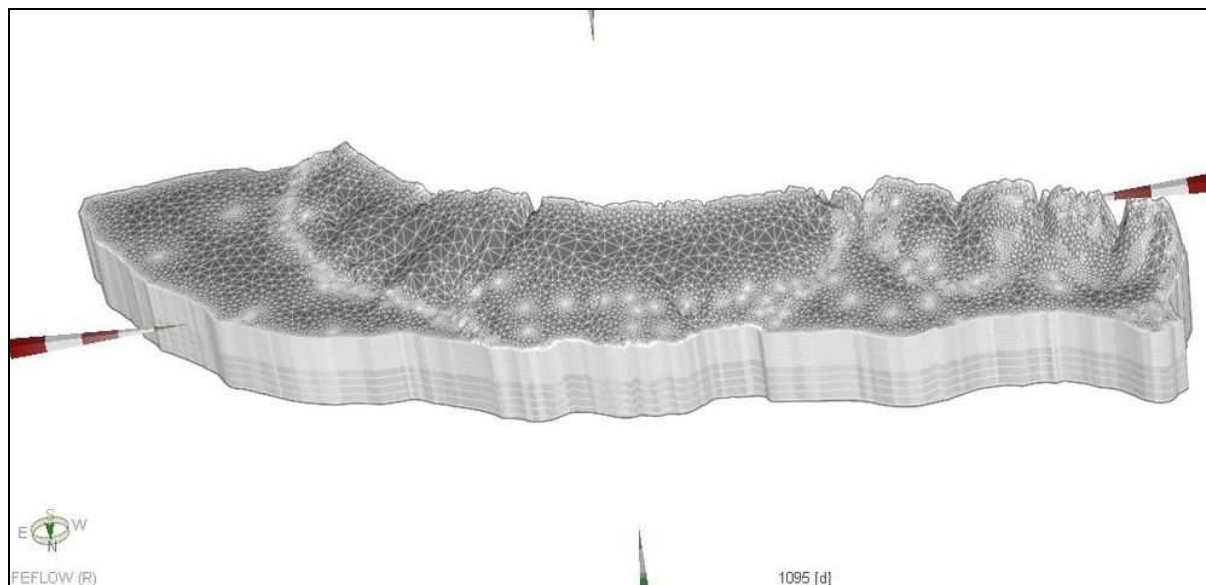


Figure 15 : Représentation de la structure de « l'unité » de modélisation

o **Couches, zones de géométries et limites du modèle**

Le nombre de couches est fixé à 25 afin de reproduire finement l'extension des formations géologiques en profondeur. La topographie de chacune d'entre-elles se moule sur la topographie de surface de la zone. Seule la couche la plus profonde est fixée à -400 mNGR. Les 20 premières couches sont espacées entre elles de 10 mètres et les suivantes de 50 mètres.

La géométrie des couches est basée sur la différenciation lithologique des formations géologiques reconnues sur le secteur. L'attribution des paramètres caractéristiques (K, porosité,...) de chacune de ces formations sont attribuées selon des zones de géométries présentées en annexe 2 en fonction des connaissances géologiques et hydrogéologiques et de différentes hypothèses sur la structure du massif en profondeur.

L'attribution des différentes zones de géométries est la suivante :

- Les plaines alluviales de la Rivière des Pluies et de la Rivière du Mât s'enfoncent chacune avec une pente constante, respectivement jusqu'aux couches 5 et 17.
- Les formations basaltiques de phase III-IV présentent sur les couches 1 à 8 et des basaltes de phase II sur les couches 9 à 25.
- Dans l'axe de la Rivière des Pluies une zone de forte perméabilité liée à la présence de zone de fracture (cf. contexte géologique II.4) est représentée sur les couches 9 à 25.

- Entre Sainte-Marie et Sainte-Suzanne la paléo-vallée identifiée par le BRGM (BRGMRP-57955-FR, avril 2010) est représentée sur les couches 9 à 12.
- La zone imperméable à peu perméable mise en évidence par les forages 23009-2 et 23011-2 est représentée sur les couches 8 à 14.

o **Conditions aux limites**

Une des difficultés majeures de la modélisation de ce système hydrogéologique est l'incertitude des conditions aux limites à appliquer. L'absence de relation directe entre les rivières et la nappe de base ne permet pas d'appliquer une limite à charge imposée, classiquement utilisée pour des rivières plus « normales ». Sur les zones d'infiltrations des rivières (Saint-Denis, Pluies et Mât) des flux imposés ont été appliqués sur les deux premières couches du modèle. Au niveau des ravines du Chaudron, Patates à Durand et du Butor, qui se tarissent rapidement, aucun type de limite n'a été affecté.

En limite sud du modèle, des flux imposés ont également été appliqués. Considérant que ces flux sont le résultat d'une infiltration « profonde » issue des pluies sur les planèzes en amont du modèle, l'alimentation associée a été appliquée en profondeur, de la couche 15 à la couche 25.

Au nord, une limite à potentiel imposé égale à 0 correspond au niveau de la mer, celle-ci étant supposée en équilibre avec la nappe de base et être son exutoire.

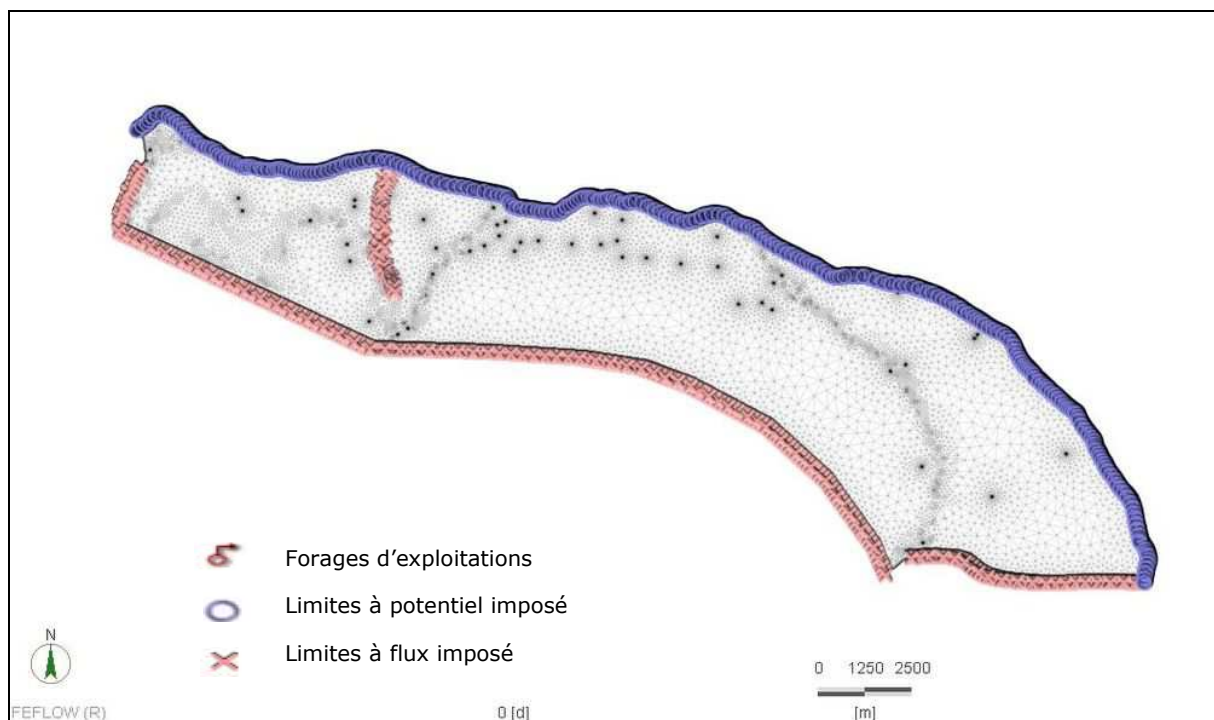


Figure 16 : Représentation du maillage et des conditions aux limites du modèle

Les forages d'exploitations évoqués au chapitre III.5 (pas tous visibles sur la figure 16) sont représentés au niveau des couches qu'ils interceptent via leurs crépines.

o Points de contrôle

Les points de contrôle sont des ouvrages existants sur lesquels la piézométrie est bien connue. Ils sont utilisés pour comparer les signaux piézométriques observés à ceux modélisés puis d'ajuster les paramètres de calage du modèle (perméabilités, géologie,...). Cette phase de calage du modèle a été faite sur 24 points situés globalement en bordure littorale.

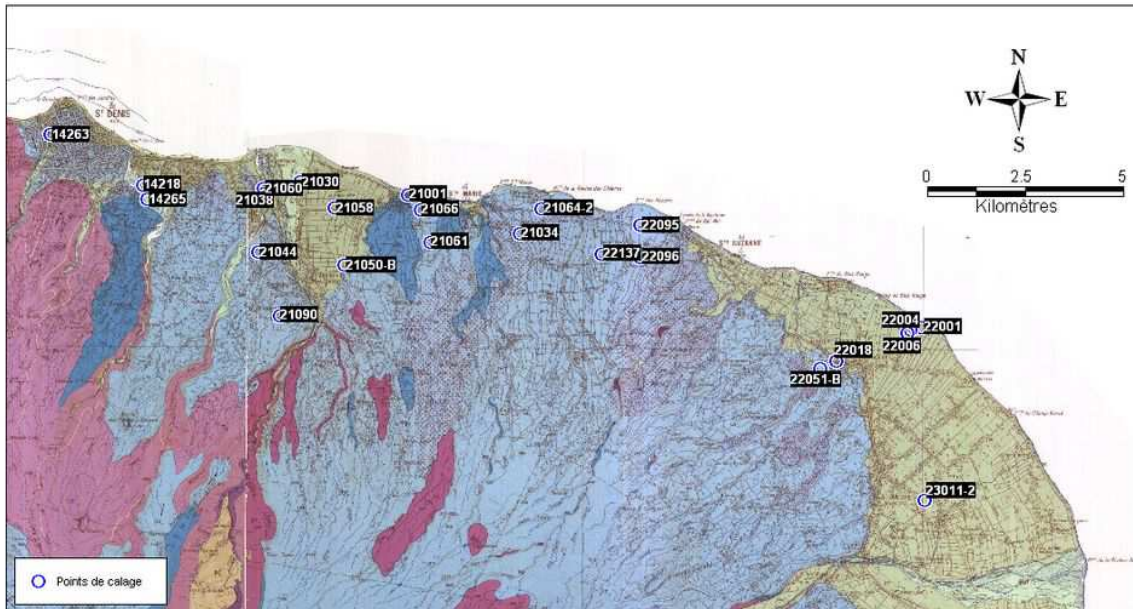


Figure 17 : Localisation des points de calage

IV.1.2 Paramètres hydrodynamiques du modèle et débits prélevés

Les paramètres hydrodynamiques introduits dans le modèle correspondent aux paramètres directement liés à la nature des formations géologiques composant la zone d'étude mais aussi aux valeurs d'alimentation et d'exploitation du système.

Ils sont définis par :

- les couches et les zones de géométries correspondantes,
- les valeurs de flux entrant par les bassins d'alimentation en amont hydraulique du modèle,
- les infiltrations de la Rivière des Galets,
- Les valeurs de flux sortant par exploitation.

o Les perméabilités

Les valeurs de transmissivités tirées de l'interprétation des pompages d'essais réalisés dans des formations alluviales ou basaltiques sont récapitulées dans le tableau 11. Ces valeurs, associées aux connaissances des terrains, ont permis d'attribuer des valeurs de références à chaque type de formation lors de la phase de calage du modèle en régime permanent.

En ce qui concerne l'aquiclude, localisé en rive gauche de la Rivière du Mât, une valeur réaliste de 1.10^{-8} m/s a été attribuée.

Afin de simplifier le problème aucune anisotropie verticale n'a été introduite ($K_h=K_v$).

Alluvions					
station		Nom usuel	Profondeur des crépines (m)	Transmissivité (m ² /s)	Perméabilité (m/s)
code OE	code BSS				
21066	12271X0066/P22	P22 les Cocos	33,90 - 99,50	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
22072	12272X0072/F	les Trois frères	128,50 - 157,40	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$
22095	12272X0095/P27	Belle Eau	67 - 118,50	$8,2 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$
22096	12272X0096/F	Bel Air	138,30 - 161	$1,3 \cdot 10^{-1}$	$5,7 \cdot 10^{-3}$
23014	12273X0014/S2	Rivière du Mât les Bas	5,60 - 28,10	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$
22064-2	12272X0064/FORAGE	Bengalis, n°2	118 - 193,50	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$
22070	12272X0070/S3	Citronniers	9,75 - 38	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-4}$
				moyenne	$2,0 \cdot 10^{-3}$

Tranche supérieure des basaltes					
station		Nom usuel	Profondeur des crépines (m)	Transmissivité (m ² /s)	Perméabilité (m/s)
code OE	code BSS				
14265	12264X0265/FORAGE	la Trinité	52 - 78	$5,5 \cdot 10^{-1}$	$2,1 \cdot 10^{-2}$
21044	12271X0044/F3	F3 Cerf la Bretagne	76,50 - 118,60	$4,3 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-2}$
21058	12271X0058/F2	F2 Gillot	61 - 99	$2,4 \cdot 10^{-1}$	$3,9 \cdot 10^{-5}$
21059	12271X0059/F3	F3 Duparc	78 - 114	$2,1 \cdot 10^{-1}$	$5,8 \cdot 10^{-3}$
21060	12271X0060/FORAGE	Parc des exposition	27 - 55	$2,5 \cdot 10^{-1}$	$8,9 \cdot 10^{-3}$
21061	12271X0061/FORAGE	la Réunion	78 - 119	$5,0 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$
21063	12271X0063/CERF	CERF Grand Prado	82 - 113	$3,4 \cdot 10^{-0}$	$1 \cdot 10^{-1}$
21065	12271X0065/F	les Cafés	90 - 135	$7,9 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$
21090	12271X0090/F	Domenjod	191 - 256	$4,0 \cdot 10^{-1}$	$6,2 \cdot 10^{-3}$
22137	12272X0137/F	Chemin du Grimm	104,50 - 128,50	$2,0 \cdot 10^{-1}$	$8,3 \cdot 10^{-3}$
				moyenne	$1,7 \cdot 10^{-2}$

Tranche inférieure des basaltes					
station		Nom usuel	Profondeur des crépines (m)	Transmissivité (m ² /s)	Perméabilité (m/s)
code OE	code BSS				
21057	12271X0057/F5	F5 Saint-Denis Est	52,85 - 169	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{-5}$

Tableau 12 : Résultats de l'interprétation des pompages d'essais

o La porosité

La porosité efficace gouverne l'écoulement de l'eau au sein d'un massif. Elle intervient aussi dans l'équation de transport du sel et dans le bilan de masse qui en découle. Dans notre cas, en accord avec la littérature, une valeur unique de 20% a été appliquée à tout le modèle.

o Alimentation du système aquifère

Trois sources principales d'alimentation de la nappe de base sur la zone d'étude ont été définies : une d'origine souterraine provenant des écoulements souterrains au sein du massif basaltique, une autre due aux infiltrations le long des rivières pérennes du secteur (Saint-Denis, Pluies, Mât) et une liée aux apports par les précipitations.

Alimentation souterraine au sein du massif basaltique

Ces flux souterrains sont la conséquence des infiltrations d'eau sur les planètes en amont de la zone modélisée. Ils ont été calculés à partir des bilans de chacune des unités hydrologiques et sont appliqués en limite sud, sur la partie basse de l'épaisseur du modèle (couches 15 à 25). Afin de ne pas associer la même valeur de flux sur toute cette limite, trois zones d'infiltration ont été définies en regroupant plusieurs sous bassins versants (figure 18). Les valeurs d'alimentation sont présentées sur le tableau 13 ci-dessous.

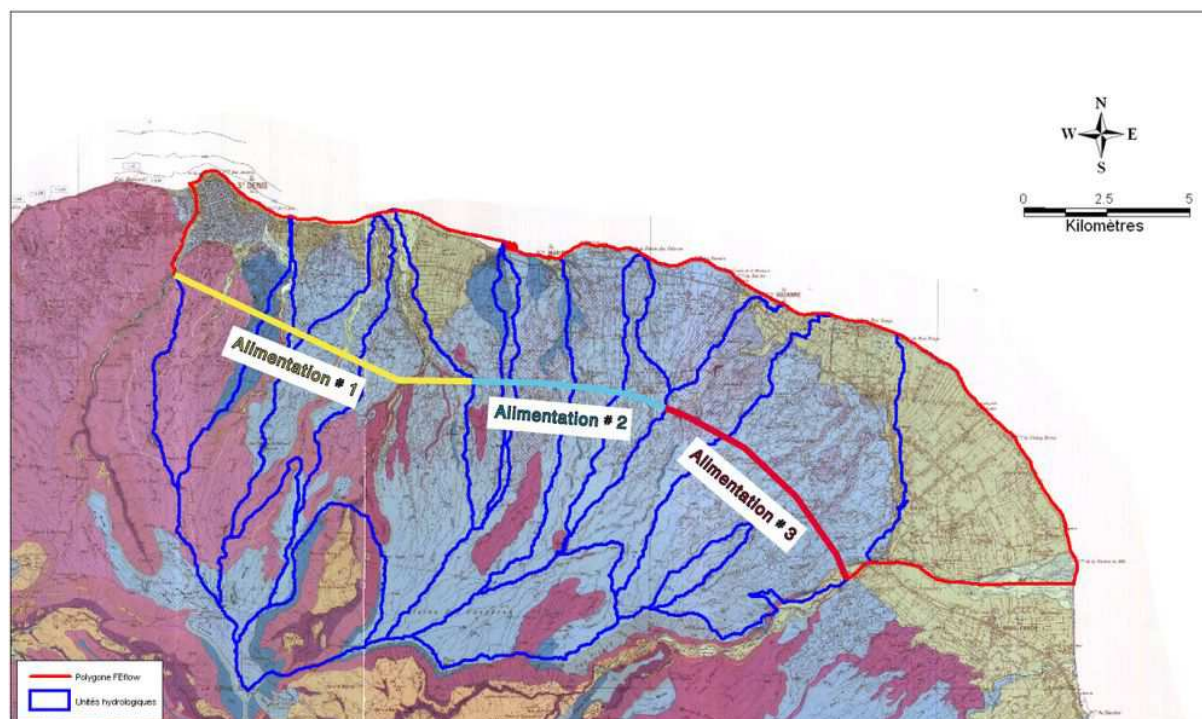


Figure 18 : Représentation des zones d'alimentations en limite sud

Dénomination	volume journalier (m3)	Vitesse / nœuds (m/j)
alimentation #1	222150.4	0.067237
alimentation #2	112638.1	0.056385
alimentation #3	446696.4	0.151806

Tableau 13 : Alimentation souterraine au sein du massif basaltique en limite sud

Alimentation par les précipitations

Une part importante de l'alimentation du système provient de l'infiltration des précipitations directement sur le secteur d'étude. Une valeur moyenne de 1696.6 mm/an évaluée à partir des bilans hydrologiques est attribuée sur toute la surface du modèle.

Infiltration le long des rivières

Trois rivières contribuent à la recharge de la nappe de base sur la zone d'étude. Une valeur moyenne et unique pour chacune d'entre elles a été définie à partir de leurs bilans hydrométriques. Ces valeurs sont affectées à la couche de surface du modèle (Tableau 14).

Rivière	volume journalier (m3)	Vitesse / nœuds (m/j)
Rivière Saint-Denis	2541.175	0.31736315
Rivière des Pluies	17750	0.035960413
Rivière du Mât	30432	1.021766

Tableau 14 : Alimentation par infiltration des rivières dans leur partie aval

Exploitation du système aquifère

Sur le secteur d'étude, 11 forages sont exclusivement destinés à l'alimentation en eau potable. Les débits autorisés par arrêté sont rarement atteints. Comme expliqué dans le paragraphe III.5 une valeur de 60% de ces débits est attribuée pour chacun des forages (Tableau 15).

Nom usuel	code OE	code BSS	Débit moyen d'exploitation (m3/j)
Forage « Trinité »	14265	12264X0265	3420.0
Forage « Domenjod »	21090	12271X0090	2850.0
Forage « Rivière des Pluies »	21015	12271X0015	1872.0
Forage « Les Cafés »	21065	12271X0065	2280.0
Forage « Carreau Coton 2 » et « F5 bis »	21050	12271X0206 12271X0158	4320 1728
Forage « Au dessus des Trois Frères »	22072	12272X0072	2160.0
Forages « Sainte Vivienne » 1 et 1 ^{bis}	22051	12272X0051 12272X0166	1296.0
Forage de « Bel Air »	22096	12272X0096	2280.0
Forage « Dioré »	22130	12272X0130	4200.0
Forages « Terre Rouge 1 et 2 »	22050	12272X0050 12272X0149	1440 1800
Forage « Ravine Creuse »	23011	12273X0011	4320.0

Tableau 15 : Volume journalier des forages d'exploitation

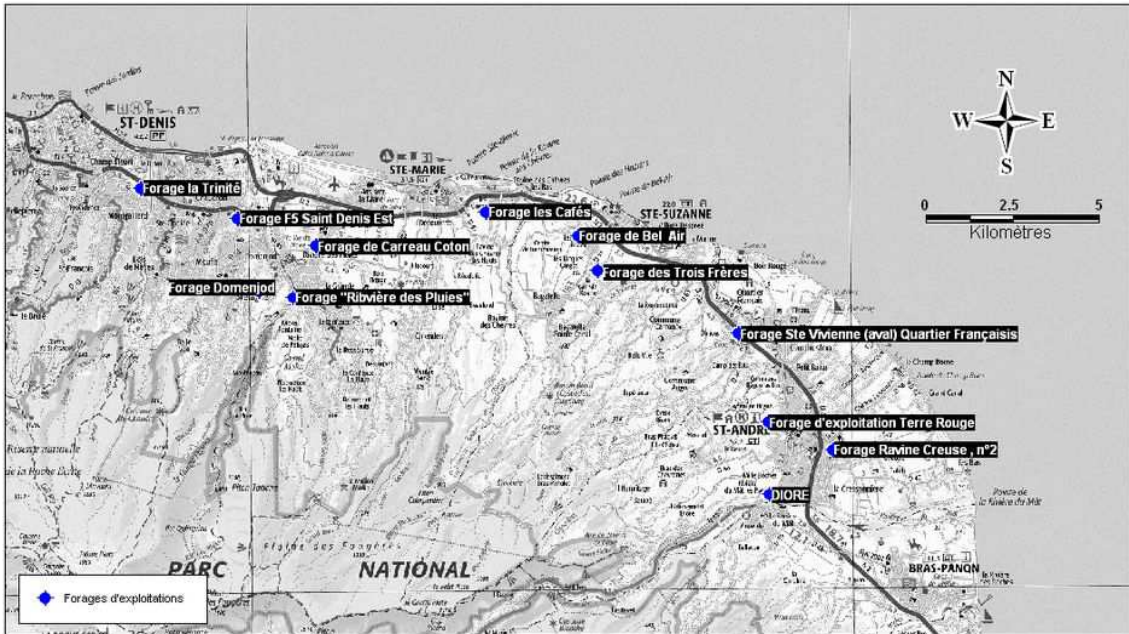


Figure 19 : Localisation des forages d'exploitations

o **Paramètres liés à la prise en compte de la Salinité**

La salinité de l'Océan Indien est fixée à 36 g/L. Le coefficient de diffusion moléculaire du Chlorure de sodium dans l'eau régite la diffusion du sel de mer dans la nappe. Sa valeur est fixée à 1.10^{-9} m²/s selon les valeurs communément admises. Les dispersivités longitudinales et transversales α_L et α_T gouvernent la largeur de la zone de mélange au contact « eau douce – eau salée ». Il est communément admis que le rapport α_L / α_T doit être égal à 10. Elles sont donc fixées respectivement à 100 et 10 mètres.

IV.2 Calage en régime permanent

La prise en compte du biseau salé nécessite de mettre en place ce que l'on appelle un modèle couplé, soit un calage simultané à la fois sur les niveaux piézométriques et sur l'intrusion de sel dans la nappe.

L'objectif du calage en régime permanent est d'estimer les perméabilités des grands ensembles représentant les formations géologiques principales du secteur de façon à reproduire au mieux les tendances piézométriques observées ainsi que les tendances à l'envahissement progressif par le sel au sein de la nappe.

Contrairement aux limites du modèle qui sont verticales, la surface du fond marin de l'île se prolonge sous le niveau de la mer selon une pente de 20 à 25 %. Dans notre cas, la limite nord du modèle ne prend pas en compte la bathymétrie. Elle est verticale de 0 à -400 mNGR au niveau du trait de cote. Dans ce contexte et en absence de données sur ce point particulier, on admet que la salinité en bordure du modèle varie linéairement avec la profondeur, passant de 0 en surface à 36 g/L en profondeur.

IV.2.1 Présentation

Le calage en régime permanent représente le calage de référence qui permettra ensuite de travailler en régime transitoire. Le tableau 16 ci-dessous présente le jeu de perméabilités le plus pertinent permettant d'obtenir la piézométrie souhaitée, ainsi que les valeurs de perméabilités issues des pompages d'essais pour chacune des grandes zones homogènes définies précédemment.

Formations	Perméabilités issues des pompages d'essais (m/s)	Perméabilités issues du calage (m/s)
Alluvions	$2.0.10^{-3}$	5.10^{-4}
Paléosol (Plaine du Mât)	-	1.10^{-8}
Paléovallée (BRGM)	-	5.10^{-3}
Axe de drainage (ECSHY)	-	5.10^{-1}
Basaltes de phases III-IV	$1.7.10^{-3}$	3.10^{-3}
Basaltes "zéolithisé" de phase II	$3.9.10^{-5}$	5.10^{-5}

Tableau 16 : Perméabilités obtenues à l'issue du calage

Les perméabilités issues du calage restent du même ordre de grandeur que celles tirées de l'interprétation des pompages d'essais. Pour les formations dont la perméabilité n'avait pu être estimée, des valeurs cohérentes avec les connaissances des terrains ont été obtenues.

La figure 20 et le tableau 17 montrent que les résultats de la modélisation en régime permanent sont cohérent avec les niveaux piézométriques observés à part pour l'ouvrage 22096 où une différence de 2 mètres est observée. Les niveaux mesurés sont des valeurs moyennes des données sur l'année 2002 quand elles sont disponibles. Sinon des valeurs moyennes de références ont été utilisées.

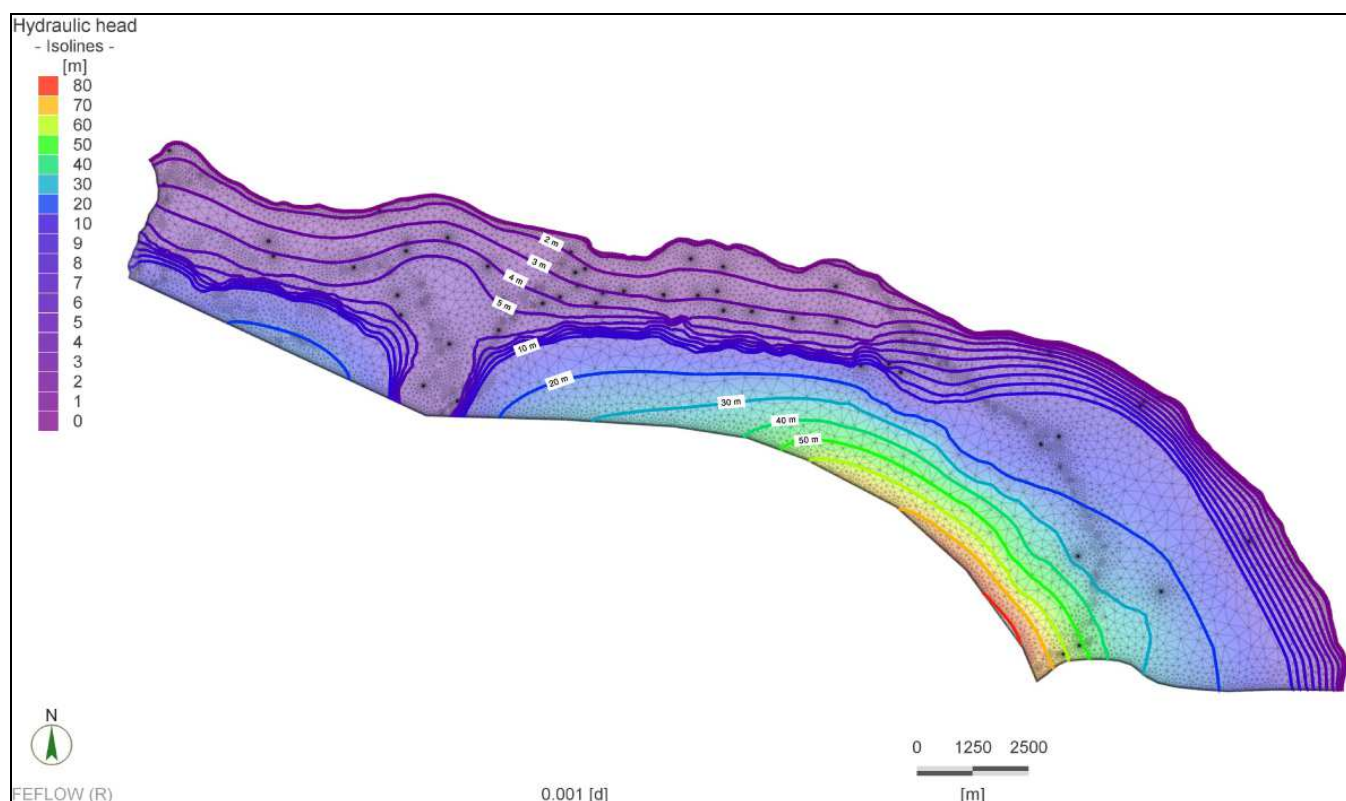


Figure 20 : Carte piézométrique simulée des systèmes aquifères du nord de la Réunion

Sur l'ensemble de la zone, des gradients hydrauliques importants en amont s'opposent à des gradients plus faibles sur la bordure littorale.

La piézométrie particulière au niveau de la Rivière des Pluies (dôme piézométrique) est bien respectée.

Au niveau de la Rivière du Mât une alimentation du massif très importante est observée ainsi qu'un gradient hydraulique beaucoup plus régulier.

station		piézométrie (mNGR)	
code OE	code BSS	mesurée	simulée
14218	12264X0218/S1	4.9	3.7
14263	12264X0263/S1	3.7	3
14265	12264X0265/FORAGE	5.2	4.1
21001	12271X0001/F	1.1	1.9
21034	12271X0034/2-1-S7	1.7	2.8
21038	12271X0038/S1	4.3	4.4
21058	12271X0058/F2	3.8	4.2
21060	12271X0060/FORAGE	3.8	4
21066	12271X0066/P22	1.1	2.2
21090	12271X0090/F	6	5.8
22001	12272X0001/F	4	2.7
22004	12272X0004/F	4.1	5.1
22006	12272X0006/F	4.9	6.3
22018	12272X0018/F	12.6	13.6
22051	12272X0166/F1	14.5	14.3
22095	12272X0095/P27	1.8	1.8
22096	12272X0096/F	5.2	3.2
22137	12272X0137/F	2.9	3.2
21050-B	12271X0050/F5	6.6	5.6
21064-1	12271X0162/PIEZO	1.2	1.7
23011-2	12273X0011/F	24.8	23.9

Tableau 17 : Comparaison des niveaux mesurés et simulés des points de calage

En ce qui concerne le paramètre « sel », l'Office de l'Eau possède un « réseau salinité » constitué d'un ensemble de points qui font l'objet de plusieurs mesures

physico-chimiques par an. Sur la zone nord de l'île, seulement des valeurs de concentration en Chlorure inférieure à 80 mg/L ont été détectées, même sur les forages les plus profonds. Cependant, l'absence de mesure de conductivité à moyenne et grande profondeur présente une limite dans la compréhension de l'intrusion saline sur ce secteur. Le tableau 18 présente certains points de ce réseau sur le secteur qui nous intéresse.

station	profondeur (mNGR)	Concentration en Chlorures (mg/L)
14265	-33	14.33
21060	-32	4.43
21049	-28	8.66
21002	-1	11
22072	-40	8.4
21034	-146	40

Tableau 18 : Extrait du « réseau salinité » de la banque de données de l'Office

Les figures 21 à 24 et les coupes 1 et 2 présentent les résultats obtenus sur la salinité. L'invasion de la nappe de base est plus importante sur la zone comprise entre Saint-Denis et Sainte-Suzanne qu'entre Sainte-Suzanne à la Rivière du Mât. Sur tout le secteur d'étude, l'invasion d'eau de mer est inversement proportionnelle aux flux sortants du modèle. Effectivement, sur les coupes verticales (Coupes 1 et 2) un biseau salé à « deux étages » correspond à l'envahissement à travers les formations basaltiques de phases III-IV d'une part, et de phase II d'autre part. Les circulations d'eau plus importantes dans la tranche supérieure de basalte (phase III-IV) semblent limiter l'intrusion saline alors que dans la tranche de basalte inférieur (phase II) l'écoulement est plus lent et par conséquent l'intrusion saline plus importante.

Dans la situation actuelle, les forages d'exploitations présentent un risque faible d'envahissement par le sel.

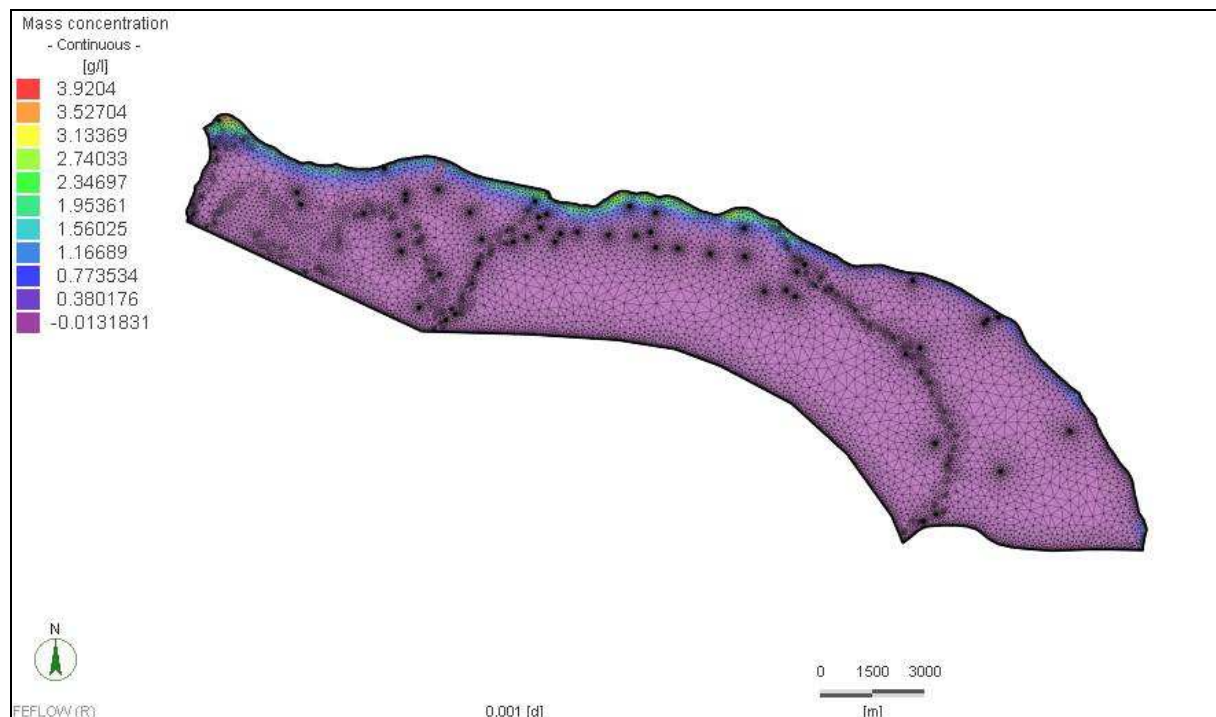


Figure 21 : Carte des salinités simulées en surface

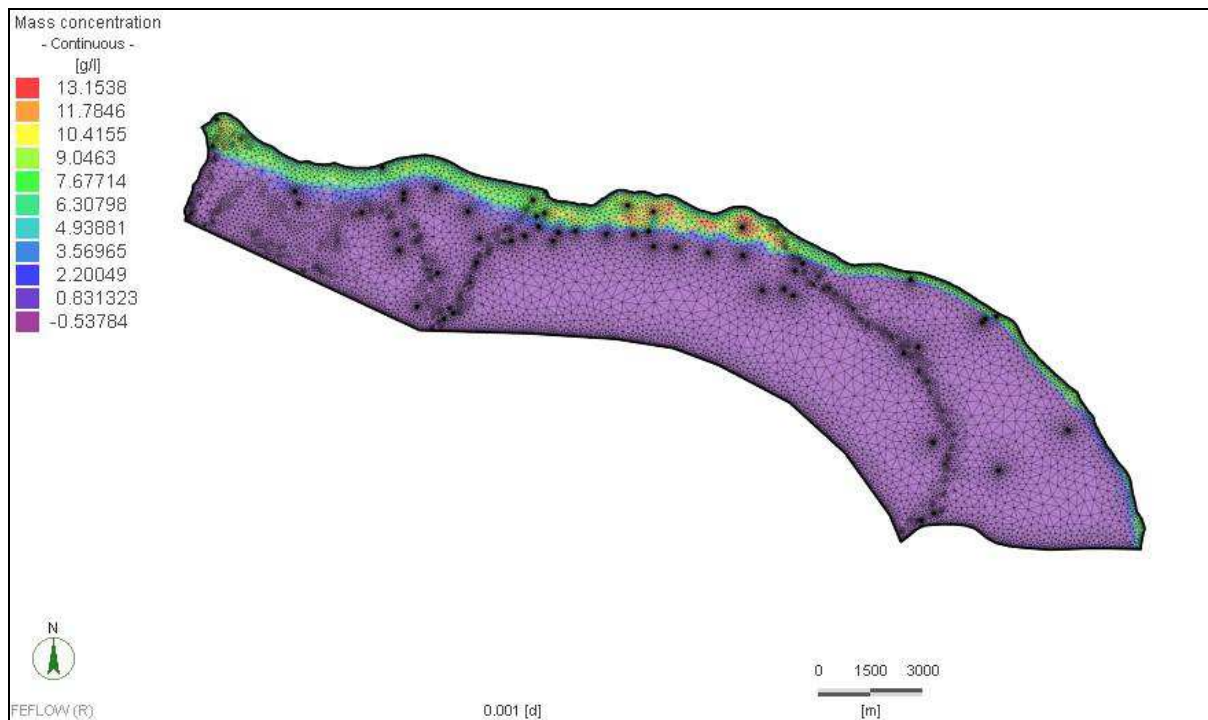


Figure 22 : Carte des salinités simulées à une profondeur moyenne de -100 mNGR

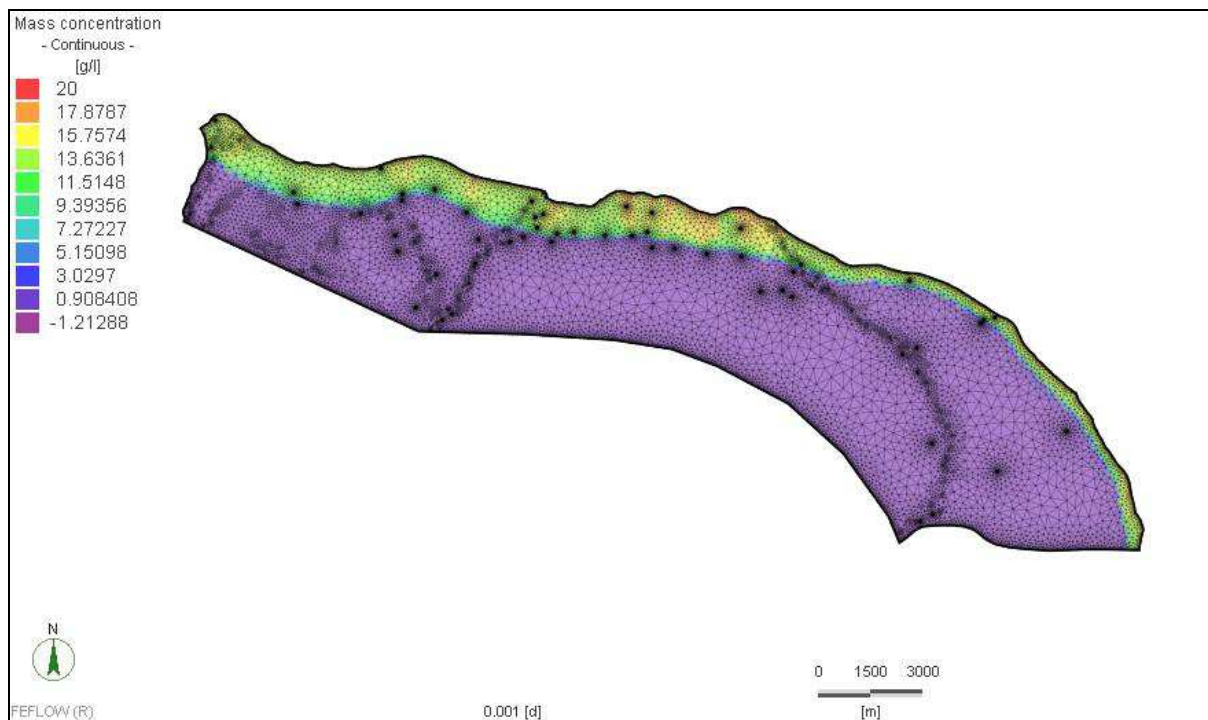


Figure 23 : Carte des salinités simulées à une profondeur moyenne de -400 mNGR

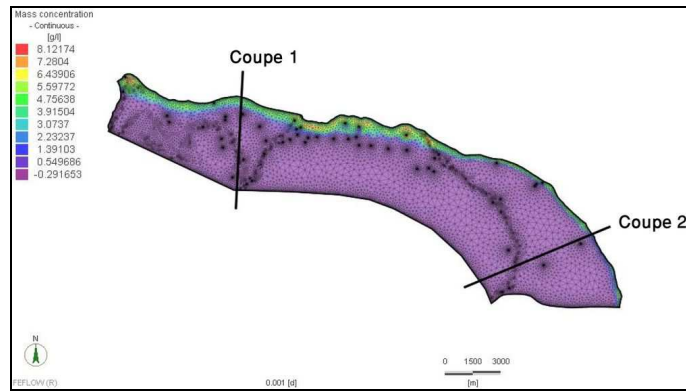
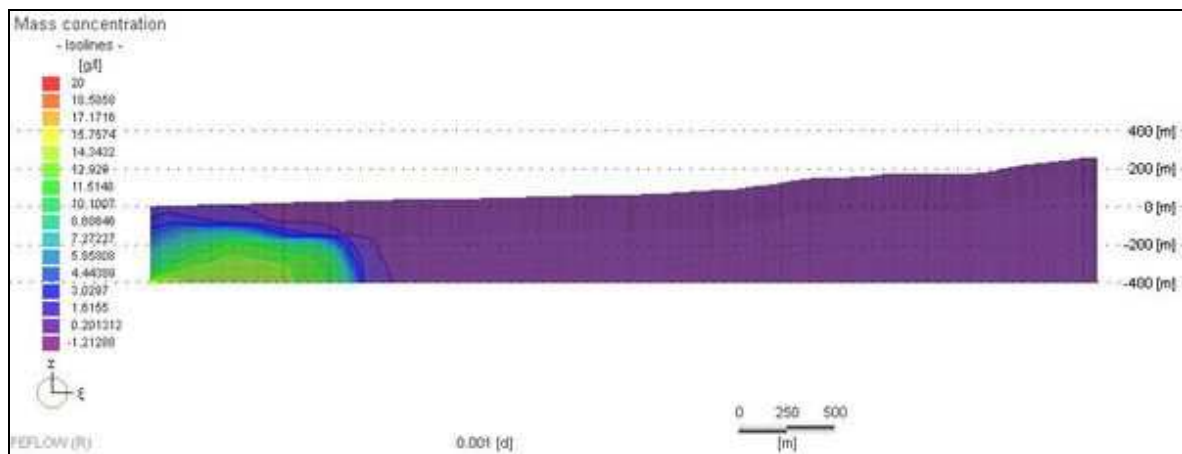
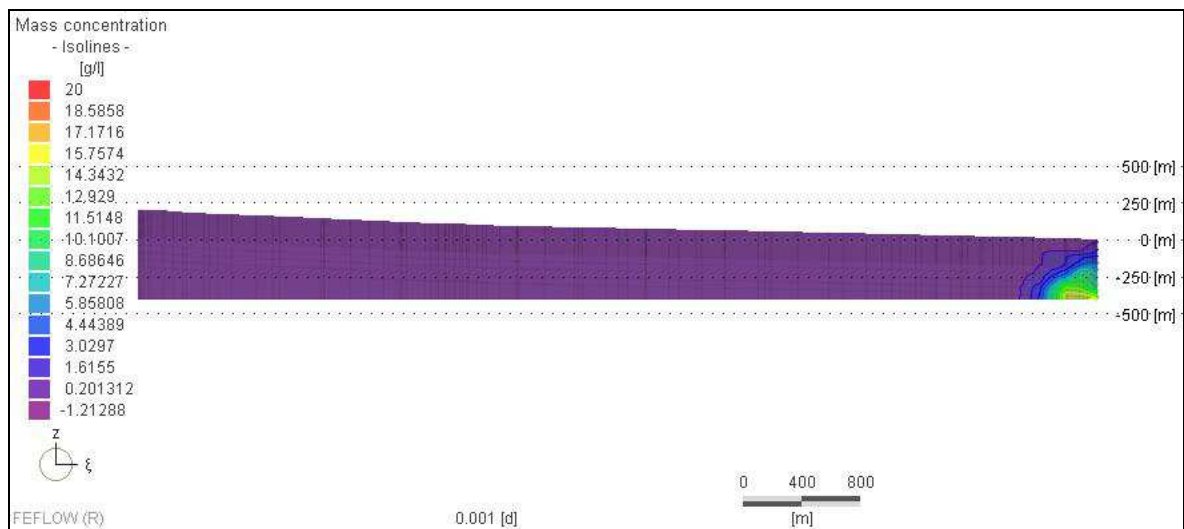


Figure 24 : Position des traits de coupes



Coupe 1 : Coupe Nord - Sud d'invasion du sel à travers le massif (axe de la Rivière des Pluies)



Coupe 2 : Coupe Sud-Ouest – Nord-Est d'invasion du sel à travers le massif (Plaine alluviale du Mât)

IV.2.2 Analyse de sensibilité du calage

Afin de tester la sensibilité du modèle obtenu, nous allons étudier l'effet d'un changement de valeurs de perméabilités pour plusieurs formations géologiques.

o Sensibilité à la perméabilité des formations basaltiques de phase III-IV

On considère pour ces formations géologiques une perméabilité de 9.10^{-3} m/s, au lieu de 3.10^{-3} pour la situation de référence (figure 25).

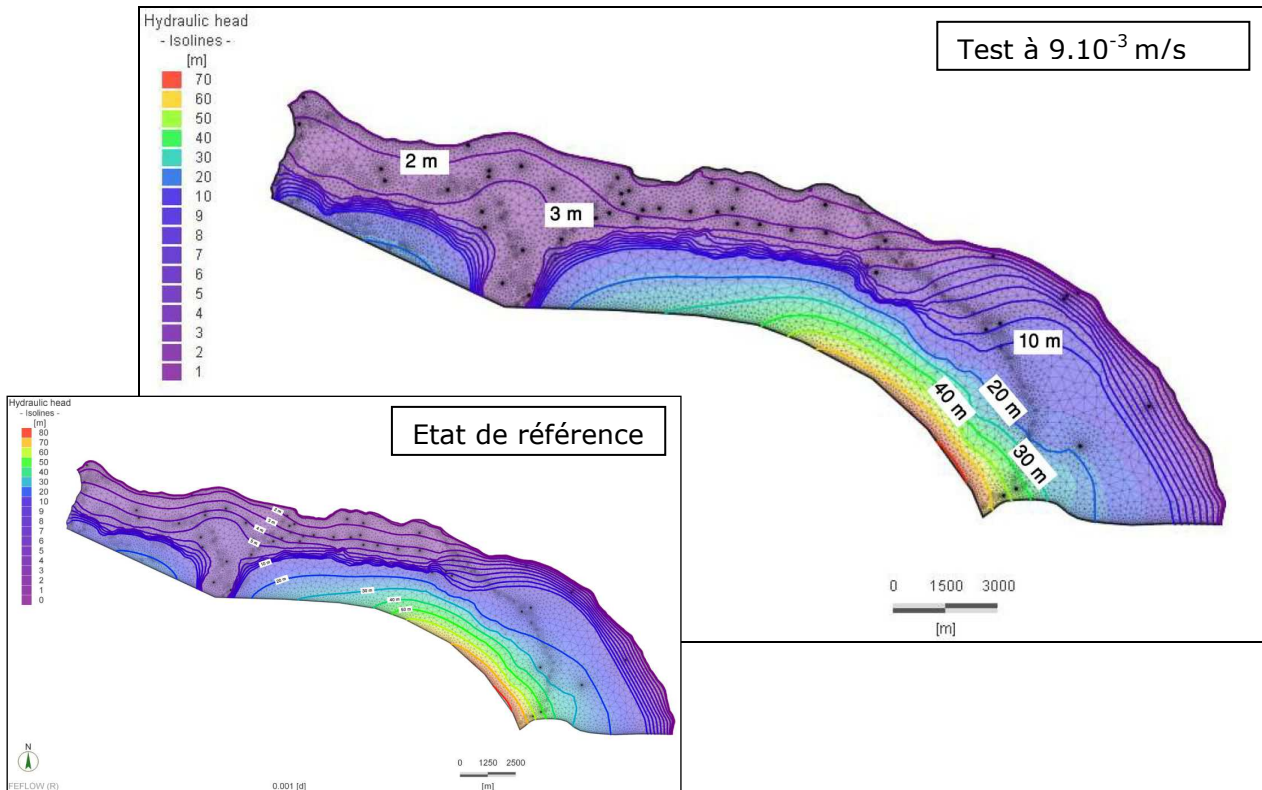


Figure 25 : Comparaison des cartes piézométriques simulées entre l'état de référence et une perméabilité élevée des basaltes de phase III-IV

La piézométrie réagit fortement selon la perméabilité des basaltes de phases III-IV, notamment dans les secteurs entre la ville de Saint-Denis et Sainte-Suzanne où la piézométrie diminue de 2 mètres. Ce changement est le résultat d'écoulements qui sont plus rapidement évacués à travers des formations plus perméables.

Cet impact est également significatif du point de vue de l'invasion d'eau de mer dans la nappe qui est plus importante, notamment dans l'axe de la Rivière des Pluies (figure 26). En effet, des charges piézométriques moins importantes entraînent un reflux plus faible de l'entrée d'eau saumâtre dans la nappe souterraine.

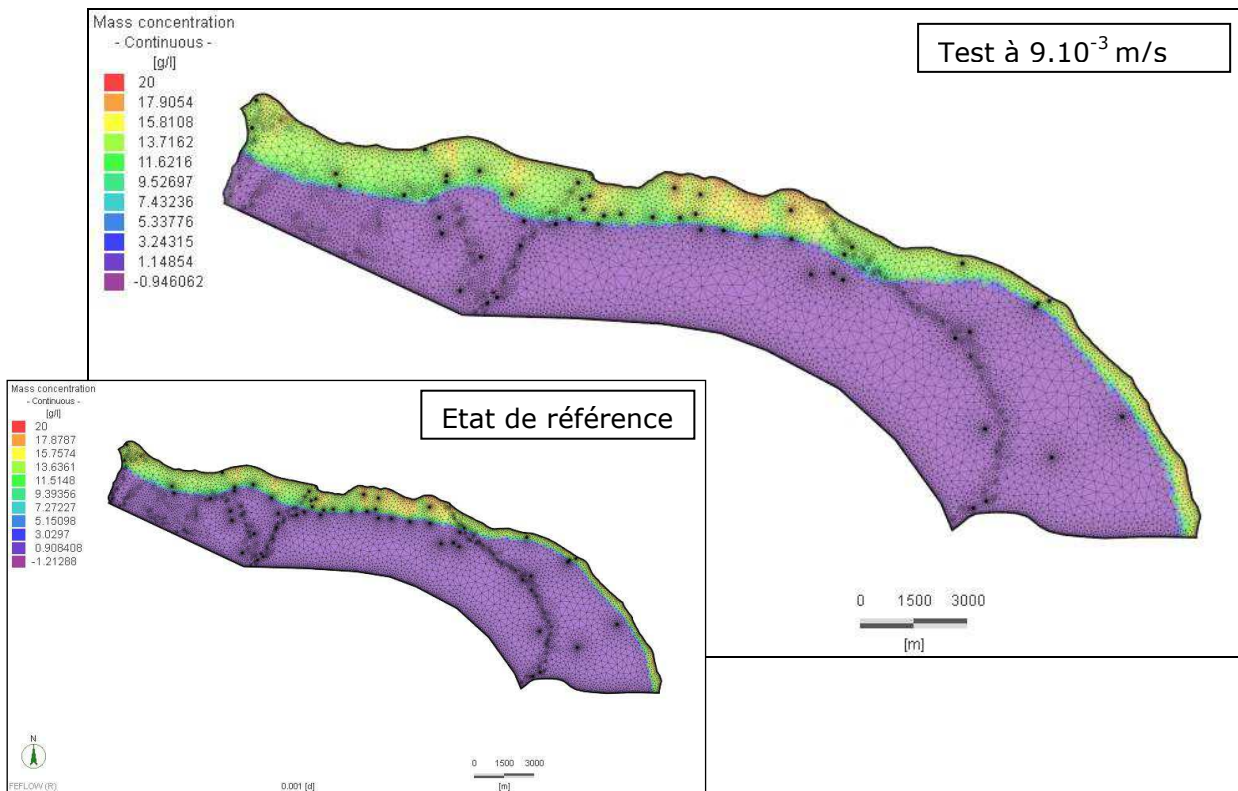


Figure 26 : Comparaison des cartes de salinité simulées entre l'état de référence et une perméabilité élevée des basaltes de phase III-IV

o **Sensibilité à la perméabilité des formations basaltiques de phase II**

Pour ces formations géologiques, une perméabilité de 5.10^{-6} m/s (figures 27) a été testée au lieu de 5.10^{-5} pour la situation de référence. Dans ce test, l'axe de drainage à forte perméabilité (5.10^{-1} m/s) est conservé dans l'axe de la Rivière des Pluies.

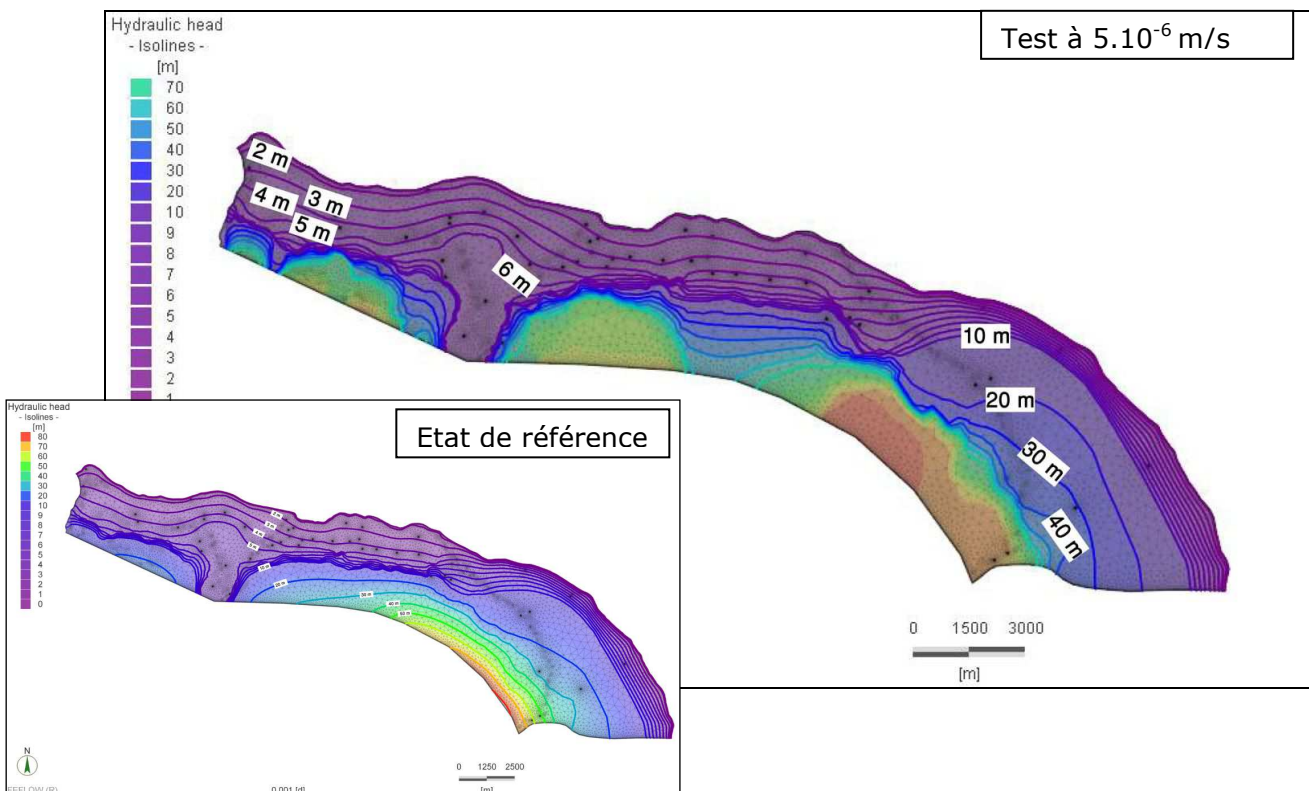


Figure 27 : Piézométrie simulée pour des basaltes de phase II de perméabilité 5.10^{-6} m/s

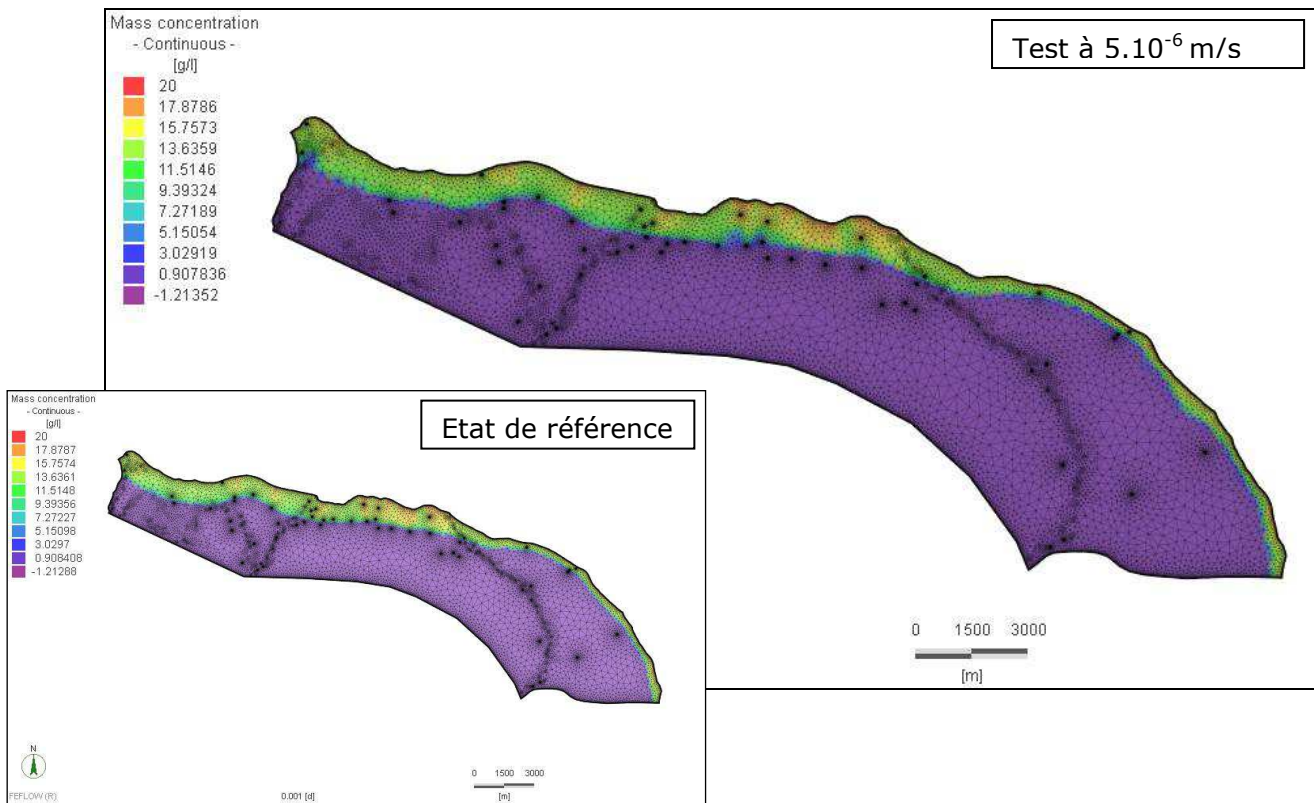


Figure 28 : Envahissement du sel simulé à -400 mNGR (basaltes de phase II $K=5.10^{-6}$ m/s)

Contrairement, au test de sensibilité précédent, on assigne cette fois, une valeur de perméabilité plus faible aux formations de phase II. Les conséquences logiquement attendues d'une retenue plus importante des écoulements entraînent globalement une augmentation des charges piézométriques.

La figure 27 montre que cette diminution de la perméabilité de la tranche inférieure des basaltes (phase II) entraîne une augmentation de la piézométrie d'un à deux mètres sur toute la zone. Du point de vue de la salinité, l'invasion marine est moins importante que dans la situation de référence (figure 28).

o **Sensibilité à la perméabilité de la zone de drainage dans l'axe de la Rivière des Pluies**

Une perméabilité de 5.10^{-2} m/s est testée pour ces formations géologiques au lieu de 5.10^{-1} pour la situation de référence.

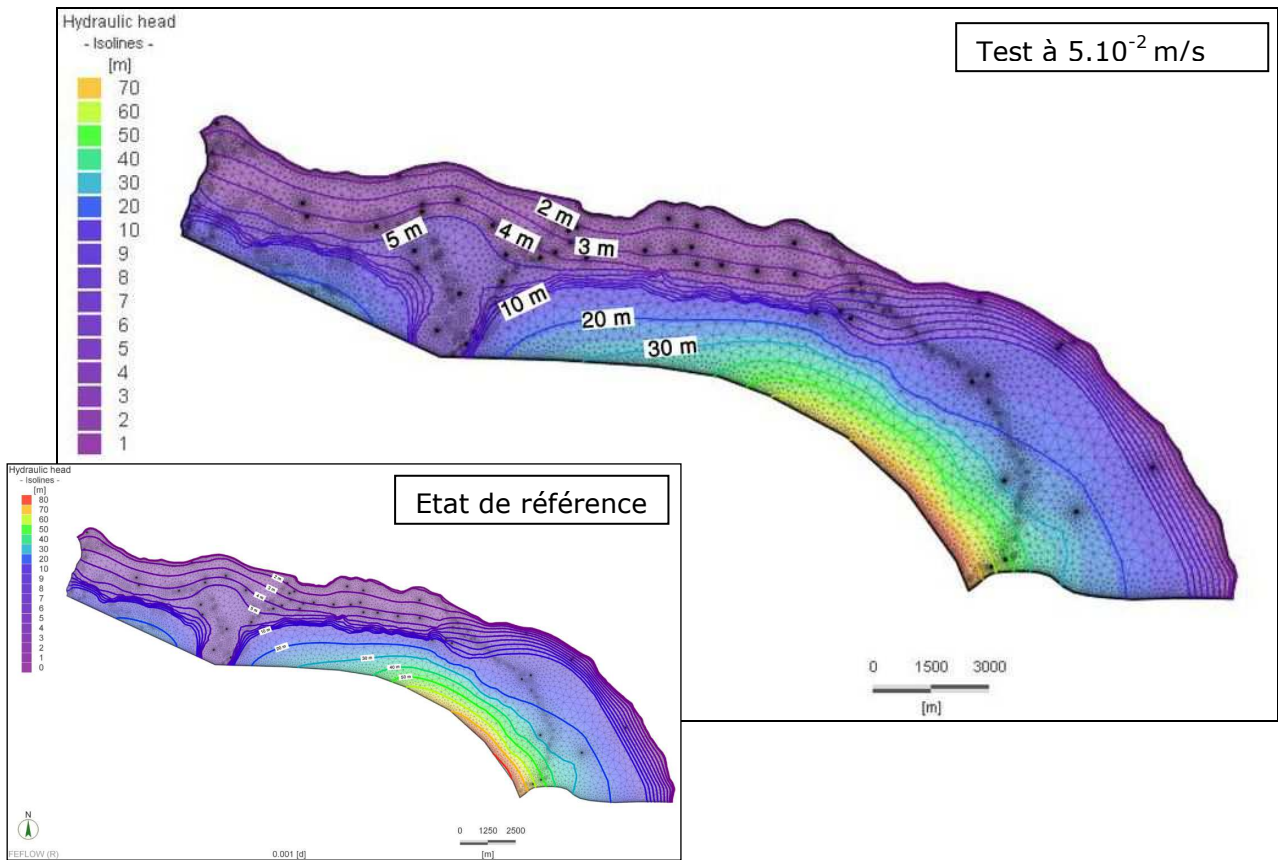


Figure 29 : Piézométrie simulée pour un axe de drainage à l'aplomb de la Rivière des Pluies de perméabilité $K = 0.05$ m/s

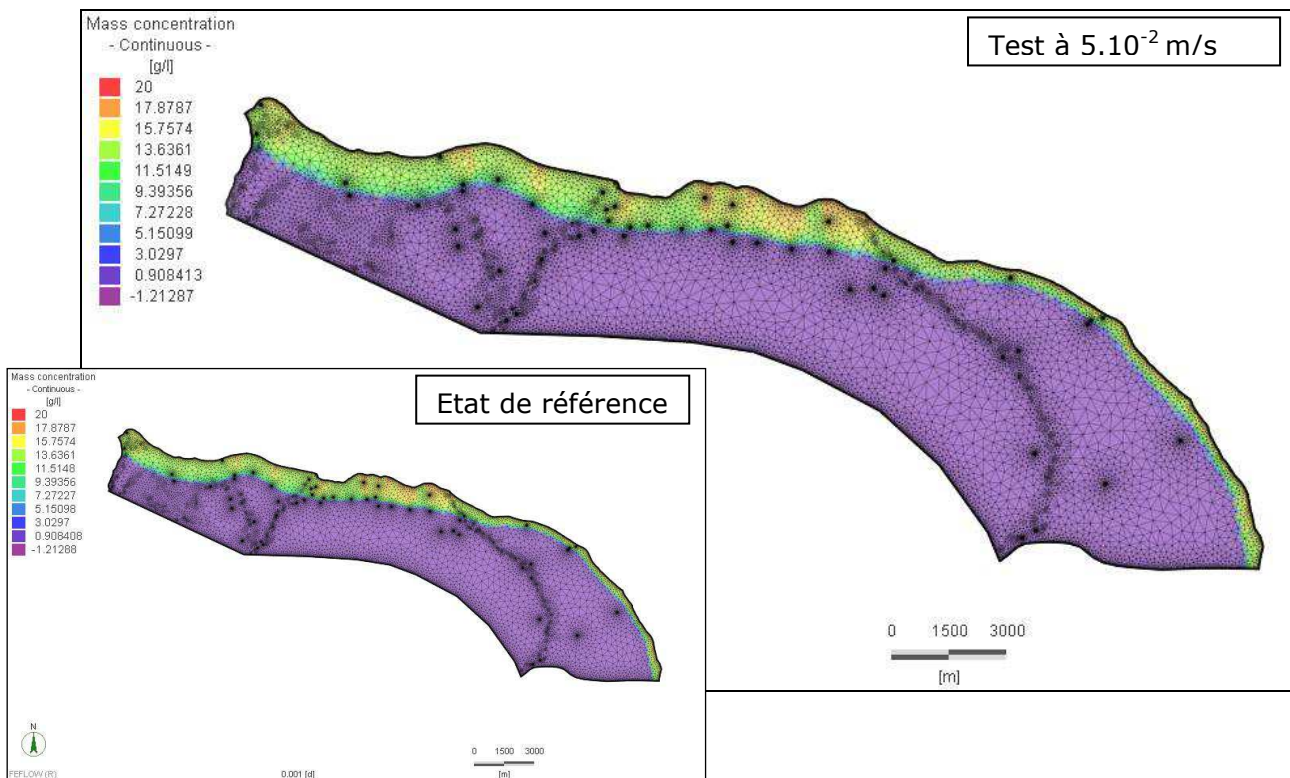


Figure 30 : Envahissement du sel simulé à -400 mNGR (axe de drainage RdP, $K = 0.05$ m/s)

Sur la figure 29 illustre que cette diminution de la perméabilité de l' « axe de drainage » à l'aplomb de la Rivière des Pluies ne modifie pas sensiblement le calage. Cette nouvelle valeur de perméabilité pourrait éventuellement être assignée à cette zone du modèle et représenter de manière plus exacte la réalité. Seuls des essais de pompages pourront le confirmer. Sur ce test, et conformément aux tendances mise en évidence sur les précédents, l'invasion d'eau de mer dans la nappe a elle aussi très peu évoluée (figure 30).

V Scénarii de simulation

L'élaboration d'un modèle mathématique de simulation des écoulements souterrains, outil d'aide à la décision, permet le suivi et l'évaluation des évolutions possibles, naturelles ou anthropiques, de la ressource en eau.

Concernant les systèmes aquifères du nord de la Réunion, les pressions anthropiques sont représentées par l'importance de l'exploitation de la ressource souterraine en bordure littorale d'une part, principalement pour l'AEP, mais également par le creusement de la galerie de transfert des eaux vers le littoral ouest (ILO) qui draine des écoulements souterrains profonds situés en altitude.

La démographie croissante et l'augmentation des besoins en eau nous amène à réfléchir à de nouveaux modes de gestion des aquifères pour préparer l'avenir.

Au regard de l'état de référence, représenté par la simulation de la situation hydrologique en 2002, différents scénarii ont été élaborés afin d'évaluer leurs impacts sur les ressources en eau.

V.1 Scénario 1 : Impact du drainage des eaux du massif par le creusement de la galerie ILO

Le creusement de la galerie d'irrigation du littoral ouest (ILO) a provoqué le percement de plusieurs systèmes aquifères. Dans la galerie Salazie aval (GSAV), entre la rivière des Galets et la Rivière des Pluies, plusieurs zones aquifères ont été interceptées mais seulement une partie, à proximité du point métrique 9000 font aujourd'hui l'objet d'une autorisation de captage. Aujourd'hui les débits stabilisés à ce niveau sont d'environ 140 l/s. Au niveau de la galerie Salazie amont (GSAM), des venues d'eau ont été rencontrées au niveau des points métriques 1238, 3600 et 4600. Sur le premier point le débit s'est stabilisé autour d'une valeur de 60 l/s Les débits, encore en cours de tarissement pour les deux derniers, devraient se stabiliser autour d'une valeur moyenne de 150 l/s chacun (Rapport ECSHY, Office de l'Eau, juillet 2010).

La totalité des venues d'eau drainées par les deux tronçons de la galerie représente un débit total d'environ 500 l/s, soit 5% du débit total drainé par le massif sur la zone délimitée entre la ville de Saint-Denis, le sommet de la Roche Ecrite et l'embouchure de la Rivière du Mât.



Figure 31 : Représentation du tracé de la galerie et des venues d'eau rencontrées

V.2 Scénario 2 : Impact d'une modification des prélèvements

La population croissante du département et plus particulièrement au nord de La Réunion se corrèlera sans doute avec une augmentation des prélèvements d'eau souterraine.

Dans cette hypothèse, l'impact théorique de cette augmentation a été testé sur les écoulements et l'invasion de l'eau de mer dans la nappe à différentes échelles pour 4 augmentations successives des débits prélevés :

- Référence + 10%,
- Référence + 30%,
- Référence + 50%,
- Référence + 100%.

Forages d'exploitations	Q (60% du Q autorisé) m ³ /j	Q + 10%	Q + 30%	Q + 50%	Q + 100%
Forage « Trinité »	3420	3762	4446	5130	6840
Forage « Domenjod »	2850	3135	3705	4275	5700
Forage « Rivière des Pluies »	1872	2059	2434	2808	3744
Forage « Les Cafés »	2280	2508	2964	3420	4560
Forage « Carreau Coton 2 » et « F5 bis »	4320	4752	5616	6480	8640
Forage « Au dessus des Trois Frères »	1728	1901	2246	2592	3456
Forage « Sainte Vivienne » 1 et 1 ^{bis}	2160	2376	2808	3240	4320
Forages « Sainte Vivienne » 1 et 1 ^{bis}	1296	1426	1685	1944	2592
Forage de « Bel Air »	2280	2508	2964	3420	4560
Forage « Dioré »	4200	4620	5460	6300	8400
Forages « Terre Rouge 1 et 2 »	1440	1584	1872	2160	2880
Forage « Ravine Creuse »	1800	1980	2340	2700	3600
Forage « Ravine Creuse »	4320	4752	5616	6480	8640
TOTAL	33966	37363	44155	50949	67932

Tableau 20 : Augmentation des prélèvements sur les ouvrages d'exploitation actuels

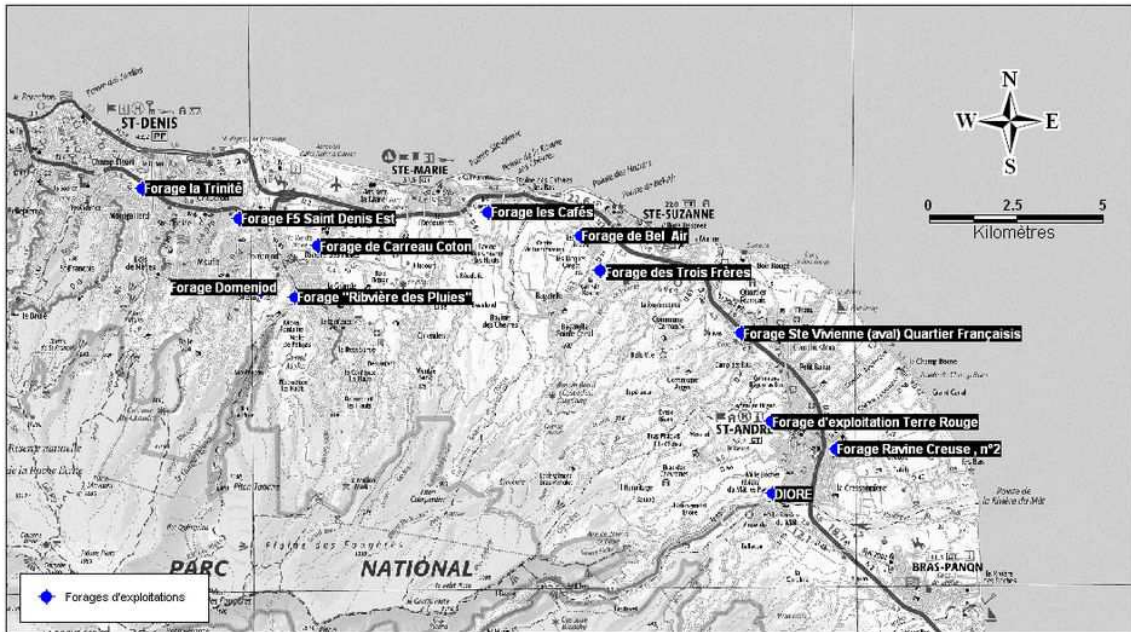
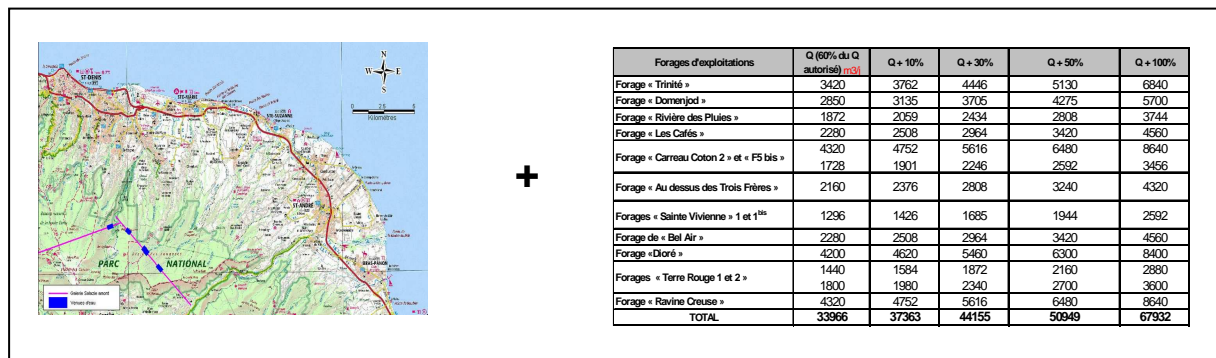


Figure 32 : Localisation des forages d'exploitations

V.3 Scénario 3 : Impact couplé du drainage de la galerie « ILO » et d'une augmentation des prélèvements (+100%)

Les venues d'eau à travers la galerie associées à une augmentation des débits de prélèvements sur les forages d'exploitations actuels sont autant de facteurs qui contribuent à faire diminuer les écoulements à travers le massif et faire décroître les niveaux piézométriques sur le littoral.



V.4 Analyse et résultats des différents scénarii de gestion du système aquifère

Sur le tableau 21 ci-dessous sont présentés les résultats obtenus pour les simulations des différents scénarii.

station		piézométrie (mNGR)				
code OE	code BSS	mesurée	simulation de référence	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
14218	12264X0218/S1	4.9	3.7	3.5	3.4	3.4
14263	12264X0263/S1	3.7	3	2.9	2.9	2.9
14265	12264X0265/FORAGE	5.2	4.1	3.9	3.7	3.7
21001	12271X0001/F	1.1	1.9	1.8	1.8	1.9
21034	12271X0034/2-1-S7	1.7	2.8	2.8	2.8	2.8
21038	12271X0038/S1	4.3	4.4	4.2	4.2	4.2
21058	12271X0058/F2	3.8	4.2	4.1	4	3.9
21060	12271X0060/FORAGE	3.8	4	3.8	3.9	3.8
21066	12271X0066/P22	1.1	2.2	2.1	2.2	2.1
21090	12271X0090/F	6	5.8	5.5	5.5	5.4
22001	12272X0001/F	4	2.7	2.8	3	2.7
22004	12272X0004/F	4.1	5.1	5	4.9	5.1
22006	12272X0006/F	4.9	6.3	6.1	6.1	6.2
22018	12272X0018/F	12.6	13.6	13.5	13.5	13.2
22051	12272X0166/F1	14.5	14.3	14.1	14.1	13.6
22095	12272X0095/P27	1.8	1.8	1.8	1.7	1.8
22096	12272X0096/F	5.2	3.2	3.1	3.1	3
22137	12272X0137/F	2.9	3.2	3.2	3.2	3.1
21050-B	12271X0050/F5	6.6	5.6	5.4	5	4.8
21064-1	12271X0162/PIEZO	1.2	1.7	1.7	1.8	1.8
23011-2	12273X0011/F	24.8	23.9	23.4	23	22.6

écart > 10 cm par rapport à la simulation de référence
écart > 30 cm par rapport à la simulation de référence
écart > 50 cm par rapport à la simulation de référence
écart > 100 cm par rapport à la simulation de référence

Tableau 21 : Résultats comparés de la piézométrie simulée pour chacun des scénarii

Concernant le scénario 1 on note une baisse des niveaux variables selon les secteurs, mais globalement comprise entre 20 et 50 cm.

Cette diminution mise en évidence par la modélisation n'est pas visible sur l'évolution des charges piézométriques des points suivis en continu depuis 2002 par l'Office de l'Eau. Dans la zone de la Rivière des Pluies, la première raison est que la plus grande partie des eaux « interceptées » par la galerie sont rejetées dans la rivière, en amont des points de mesures piézométriques, et servent donc à la réalimentation de la nappe de base en bordure littorale, au droit de la zone d'infiltration.

Une deuxième hypothèse, pourrait venir du fait que les écoulements à travers le massif sont relativement lents. Leurs diminutions dues aux interceptions à travers la galerie, n'auraient pas encore impactés les piézométries en bordure littorale. Cependant, même à l'aval des venues d'eaux interceptées au point métrique 9000 de la GSAV qui sont relativement anciennes, les piézomètres ne montrent pas de variations significatives. Ces interceptions, sont sans doute suffisamment en amont des premières mesures de charges hydrauliques pour qu'un effet de « lissage » de la piézométrie se produise.

Comme l'intrusion d'eau saumâtre est uniquement fonction des charges piézométriques, la position du biseau salé n'a été que très faiblement modifié.

Pour le scénario 2 les simulations montrent que le doublement des volumes prélevés aujourd'hui aurait un effet significatif sur la piézométrie pour une année moyenne avec une baisse de la piézométrie quasi généralisée comprise entre 10 et 30 cm et des secteurs où elle dépasse les -50 cm. Ces observations sont faites sur une année pluviométrique "moyenne", elles ne peuvent pas être extrapolées à une année sèche pour laquelle l'impact pourrait être plus important. Une augmentation de 100% des prélèvements actuels représente un volume journalier d'environ 68 000 m³, soit environ 34 000 m³ de plus qu'aujourd'hui. Si ce seuil était franchi, une influence négative

sur le stock d'eau pourrait être envisagée qui ne pourrait être compensée dans l'état actuel des connaissances. En dessous de ce seuil, les effets ne sont pas notables (+10%, +30%, +50%). Effectivement, la piézométrie ne varie que très légèrement et ne paraît pas réellement influencée par de telles augmentations dans ce secteur.

Pour le scénario 3, la plupart des piézomètres d'observations voient leurs charges diminuer significativement. La baisse peut atteindre 20-30 centimètres dans le secteur de la Rivière des Pluies jusqu'à plus d'un mètre en rive gauche de la Rivière du Mât (figure 34).

Les résultats obtenus, uniquement théorique, ne peuvent se substituer à un suivi précis et régulier de la ressource en eau d'un point de vue quantitatif et qualitatif. Cependant, nous pouvons émettre l'hypothèse que l'augmentation importante des prélèvements en bordure littorale associée au captage des venues d'eau rencontrées dans la galerie ILO aboutiront à une diminution des niveaux piézométriques actuellement observés et donc à une évolution de l'invasion d'eau salée à travers la nappe de base.

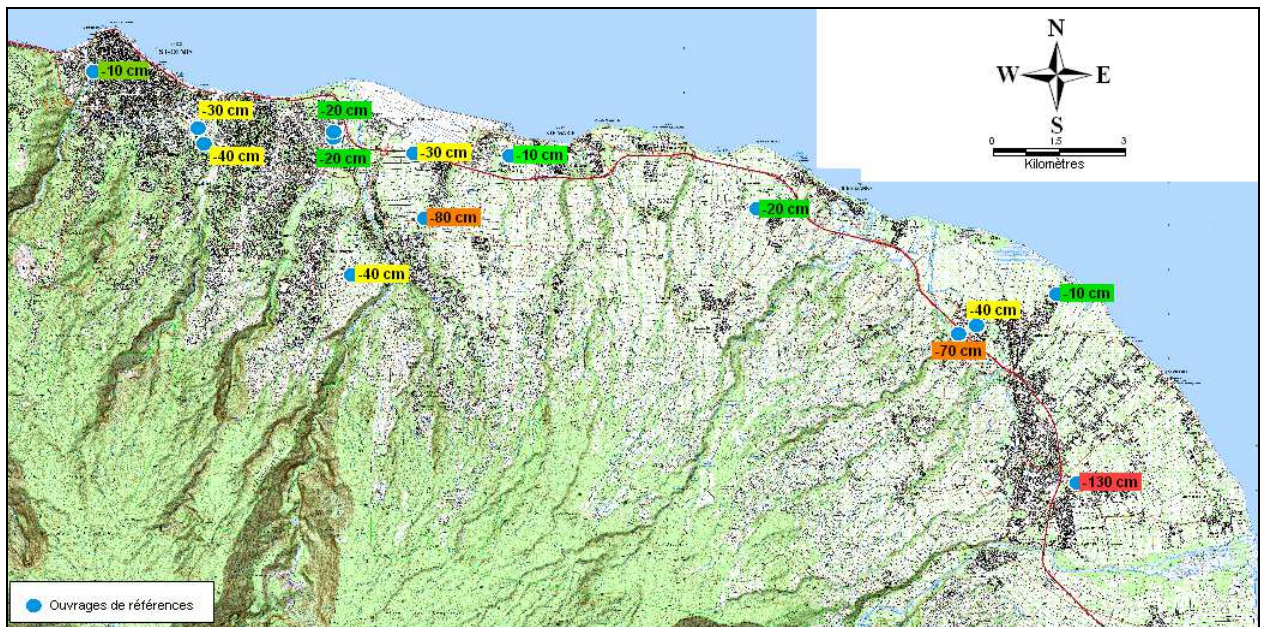


Figure 33 : Carte des écarts de piézométrie du Scénario 3 avec l'état de référence

VI Conclusions

VI.1 Synthèse

Dans un contexte réglementaire lié à la Directive Cadre sur l'Eau, la présente étude contribue à l'amélioration des connaissances des systèmes aquifères du nord de la Réunion, entre la Rivière Saint-Denis et la Rivière du Mât.

Suite au chantier de transfert des eaux est-ouest (ILO), le fonctionnement voir la structure de certains sous-systèmes aquifères ont été modifiés. Effectivement, plusieurs « poches » aquifères ont été percées lors du creusement, entraînant leurs vidanges partielles. Ces changements auront sûrement un impact relativement important à long terme qu'il est important d'anticiper.

La compilation des données disponibles a servi à identifier puis évaluer les paramètres importants, impliqués dans les circulations d'eau de surface et souterraine.

L'état des lieux des connaissances hydrogéologiques sur ce secteur a permis d'établir un modèle conceptuel relativement complexe, constitué d'un empilement classique des basaltes de phases II, III et IV sur toute la zone et localement des particularités géologiques responsables du cheminement particulier des écoulements souterrains.

La modélisation mathématique représentative des écoulements souterrains entre la ville de Saint-Denis et l'embouchure de la Rivière du Mât permet d'apporter une aide à la compréhension de ce système aquifère complexe.

Les simulations ont permis d'évaluer les effets potentiels du drainage d'une partie des écoulements du massif à travers les galeries ILO ainsi qu'une augmentation des prélèvements sur le secteur. Des résultats ont été obtenus en terme de piézométrie et de salinité.

Dans son scénario 1 simulant l'impact du drainage de la galerie du transfert des eaux, le modèle a montré une diminution des niveaux piézométriques des ouvrages situés en bordure comprise entre 10 et 30 cm. Néanmoins, les résultats obtenus l'ont été en simulant le modèle en régime permanent. Ce type de régime, contrairement au régime transitoire, est un régime « intemporel », c'est-à-dire que le modèle simule les écoulements souterrains jusqu'à obtenir une situation stable. Dans notre cas il est difficile de prévoir dans combien de temps le système aquifère perturbé par la vidange de poches d'eau mis à jour dans la galerie atteindra son état d'équilibre. Les modes et temps de transfert des eaux souterraines sont trop complexes pour donner une estimation précise de ces échelles de temps. Les résultats des différents scénarii obtenus après simulation du modèle en régime permanent nous donnent des pistes de réflexions plutôt que des estimations précises du fonctionnement du complexe aquifère dans son ensemble.

En matière de salinité, le modèle traduit bien la relation entre la charge piézométrique et l'équilibre avec l'eau de mer. Si la première diminue, l'intrusion saline progresse dans les terres et inversement. L'analyse montre que dans l'état actuel de la gestion des eaux souterraines et pour une année moyenne, la baisse piézométrique liée au drainage par la galerie entraîne une augmentation modérée de la salinité dans les aquifères nord.

Dans le deuxième scénario, également simulé en régime permanent, le modèle montre que le doublement des prélèvements entraîne une diminution de la piézométrie comprise entre 10 et 30 cm avec un secteur où elle dépasse les 50 cm. Les effets sur la salinisation des aquifères restent également modérés sans augmentation excessive des concentrations en ions chlorures.

L'impact couplé des conséquences des aménagements ILO et d'une intensification des prélèvements a été testé dans un troisième scénario. Les simulations en régime permanent donne une diminution conséquente dans certains secteurs (plus d'1 m en rive gauche de la Rivière du Mât).

La valeur de ces résultats est néanmoins soumise à la validité de notre modèle, suivant les hypothèses de travail et les différents paramètres choisis.

De manière générale, le modèle peut être utilisé pour reproduire :

- Une piézométrie moyenne tirée de bilans hydrologiques annuels,
- L'invasion de la salinité en fonction de conditions piézométriques précises,
- L'analyse de variations piézométriques et d'invasion saline en fonction de nouvelles conditions d'alimentation ou de prélèvement.

VI.2 Pistes d'amélioration du modèle

1. Simplification de la structure du modèle : Le modèle obtenu représente de manière fine les différentes formations géologiques mises en évidence sur la zone d'étude, les flux entrants en amont du modèle via les écoulements souterrains à travers le massif ainsi que les précipitations. Un nombre de couches important nous a permis cette réalisation mais entraîne des calculs assez conséquents susceptibles d'aboutir à des temps de simulation long et à erreurs numériques liées à la complexité des calculs. Une simplification de la structure du modèle en diminuant le nombre de couche permettrait sûrement de limiter ces problèmes ;
2. Modélisations en régime transitoire : Des essais ont été réalisés afin de modéliser les variations mensuelles de la piézométrie. Ces tests n'ont pas permis d'obtenir des résultats exploitables à cause de temps de calculs particulièrement longs et de la difficulté à ajuster certains paramètres (introduction de conditions aux limites variables dans le temps) ;
3. Simuler les écoulements en année sèche et en année humide : Afin de mieux appréhender l'impact des aménagements et des prélèvements sur les ressources disponibles, de nouvelles simulations seront réalisées dans des conditions hydrologiques différentes. L'impact le plus défavorable sera évalué en réalisant des bilans hydrologiques pour une année sèche de référence ;
4. Améliorer les connaissances sur le positionnement de l'interface eau douce – eau salée : A l'heure actuelle, il n'existe pas d'ouvrages suffisamment profonds qui aient permis d'identifier clairement la zone de diffusion entre les eaux douces et les intrusion d'eau salée. A plus long terme, il serait donc utile de bénéficier de ce type d'information pour évaluer la pertinence de la simulation de l'interface par le modèle.

- ANNEXES -

Annexe 1

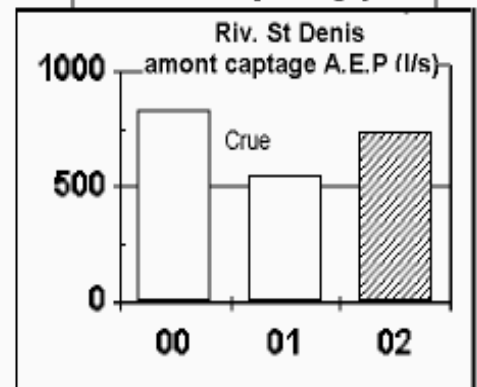
Bilans hydrométriques des rivières pérennes du nord de la Réunion

Bilan hydrométrique de la RIVIERE SAINT DENIS

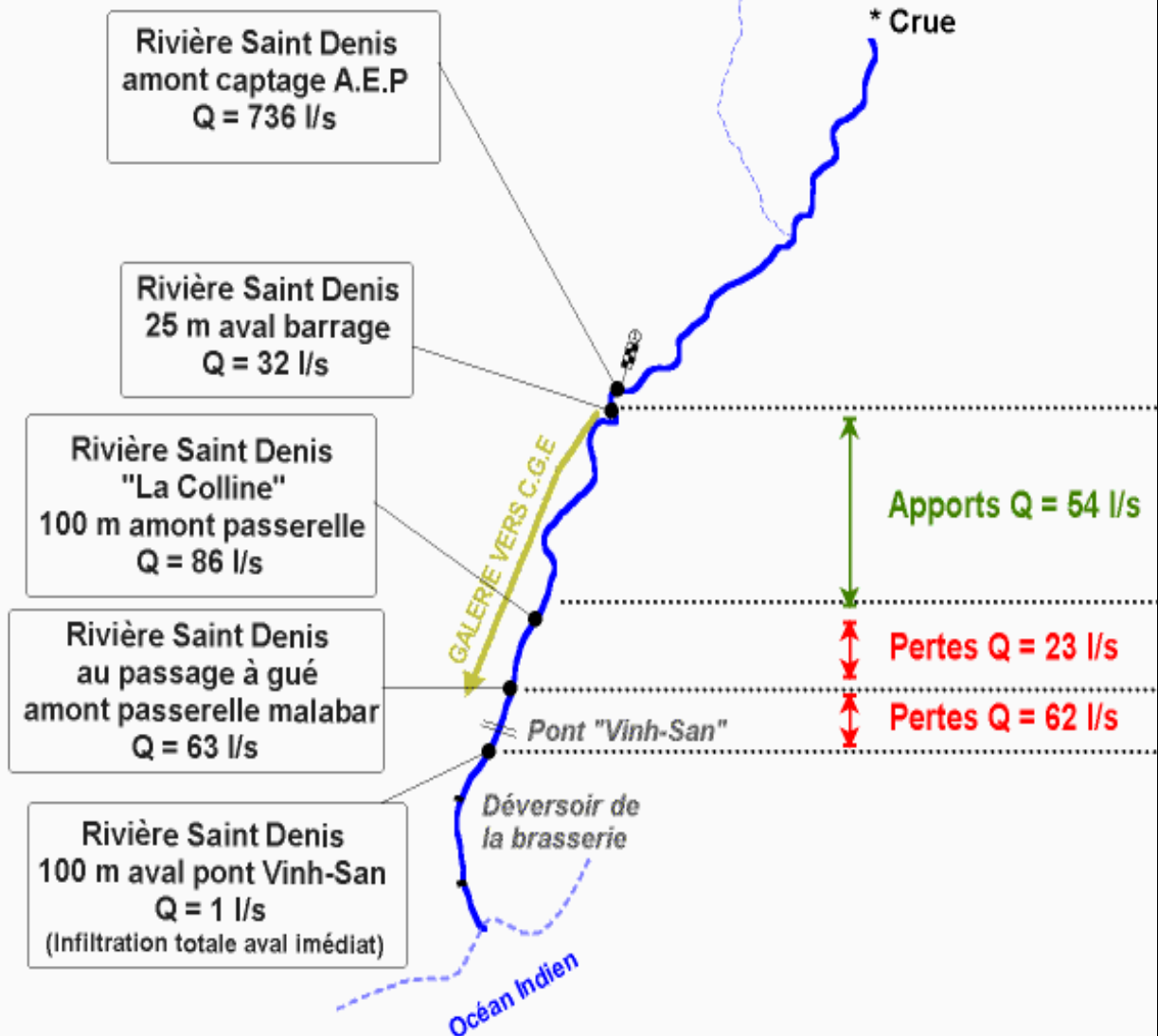
29 MAI 2002



Tendance hydrologique



29/05/00 Q = 830 l/s*
 29/05/01 Q = 550 l/s
 29/05/02 Q = 736 l/s
 * Crue



Remarque :

- Rejet CGE amont passerelle Malabar # 10 l/s.
- Rejet fluctuant de la CGE 100 m en amont du deversoir de la Brasserie

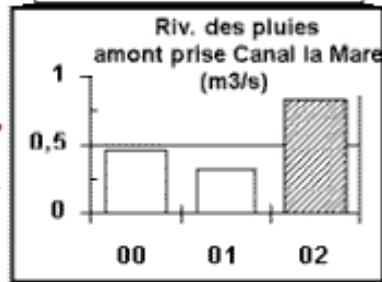
BILAN HYDROMETRIQUE DE LA RIVIERE DES PLUIES

22 Octobre 2002



0 1km

Tendance hydrologique



Riv. des Pluies
100 m amont rejet
Galerie Salazie amont
Q = 0.321 m3/s

10/10/00 Q = 0.46 m3/s *
13/09/01 Q = 0.31 m3/s *
22/10/02 Q = 0.82 m3/s *

* = dont apports supplémentaires
variables selon production
galerie Salazie amont

Riv. des Pluies amont
prise Canal de la Mare
Q = 0.820 m3/s

Canal de la Mare
amont partiteur CERF
Q = 0.126 m3/s

Riv. des Pluies amont pont
Domenjod (limnigraphe)
Q = 0.619 m3/s

Canal de la Mare
amont la Vierge Noire
Q = 70 l/s

Riv. des Pluies amont
Pont Métallique
Q = 0.599 m3/s

Riv. des Pluies au
Pont Béton RN2
Q = 0.524 m3/s

Riv. des Pluies 200 m
amont embouchure
Q = 0.470 m3/s

Apports
= 499 l/s

Prise Canal du Cerf
Q = 15 l/s
(débit total restitué)

Infiltrations
= 20 l/s

Infiltrations
= 75 l/s

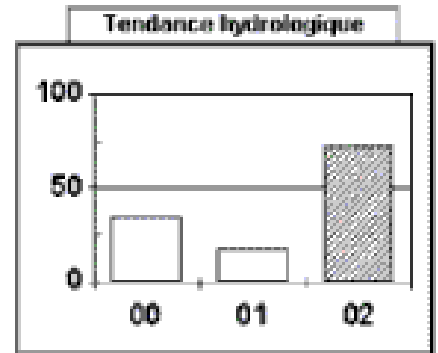
Infiltrations
= 54 l/s

Bilan hydrométrique de LA RIVIERE SAINTE SUZANNE

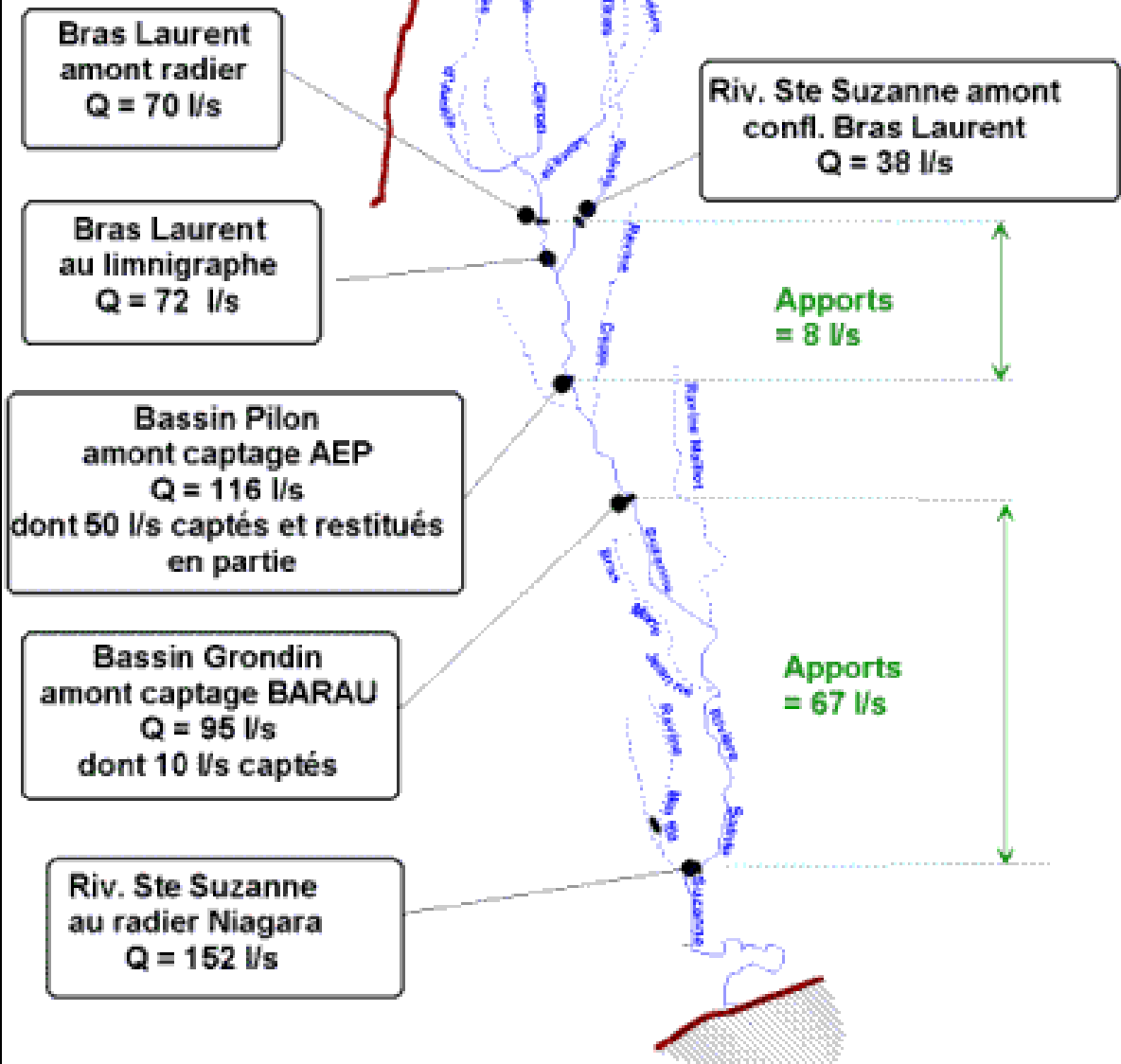
03 Octobre 2002



0 1 km



03/10/00 Q = 34 l/s
03/10/01 Q = 18 l/s
03/10/02 Q = 72 l/s

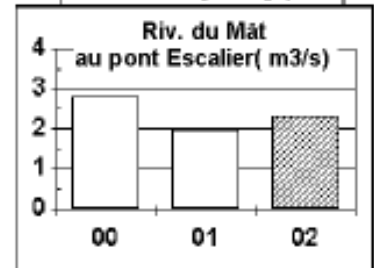




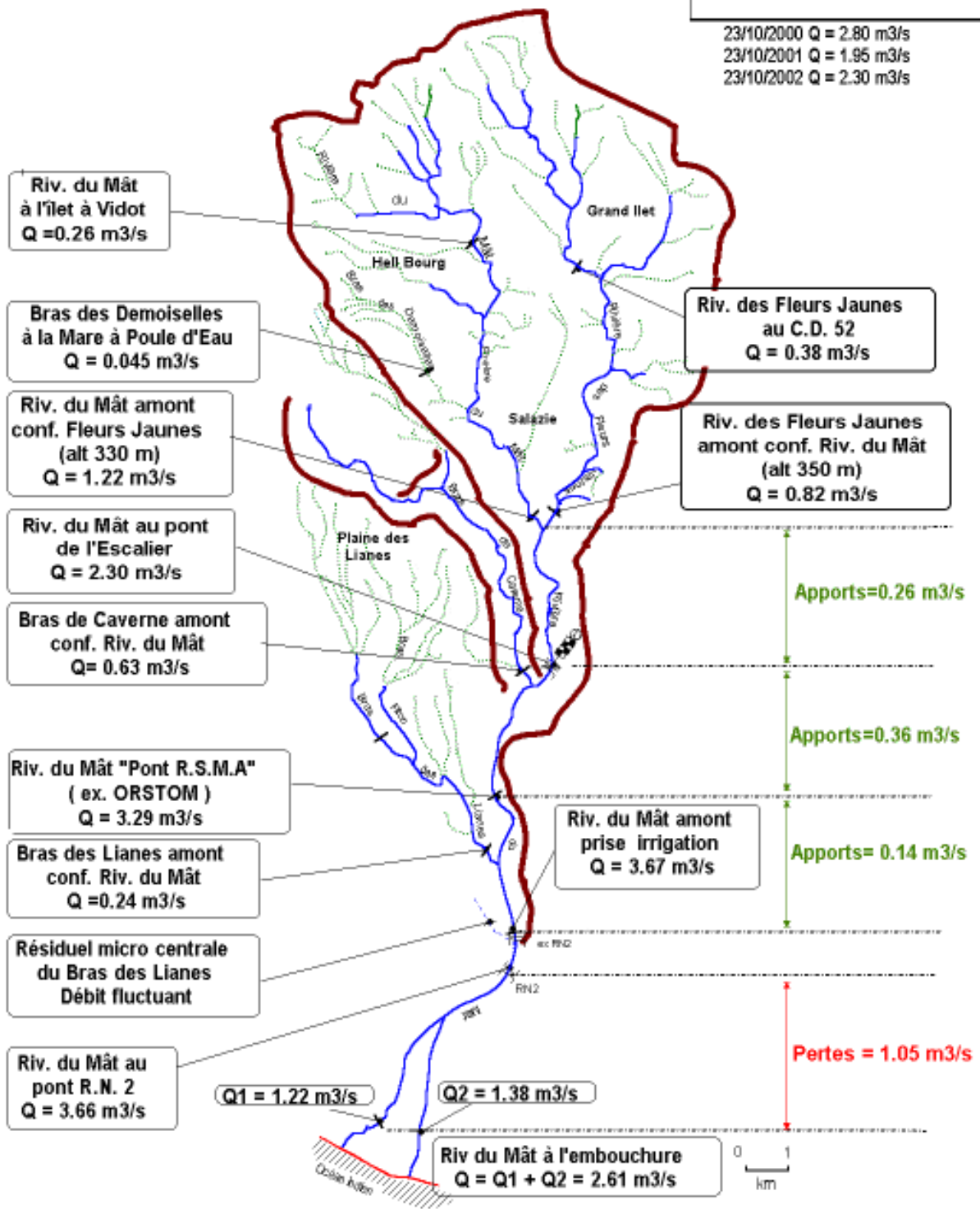
Bilan hydrométrique de la RIVIERE DU MAT

23/24 octobre 2002

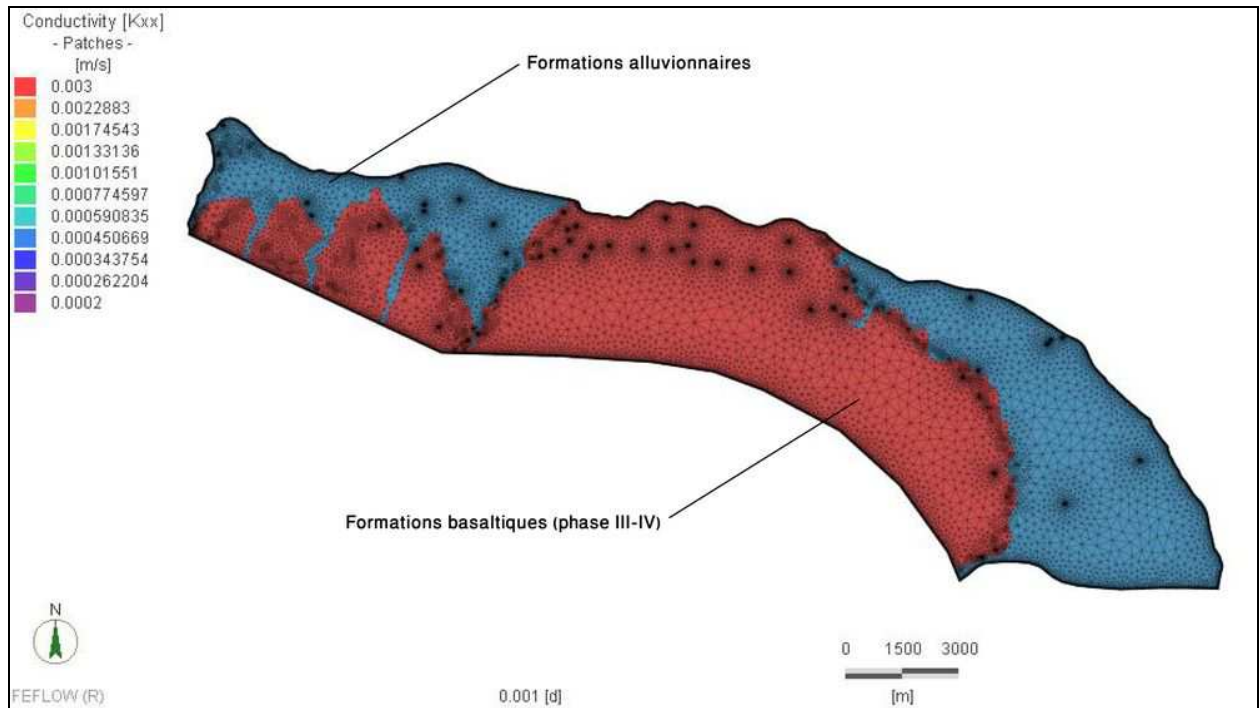
Tendance hydrologique



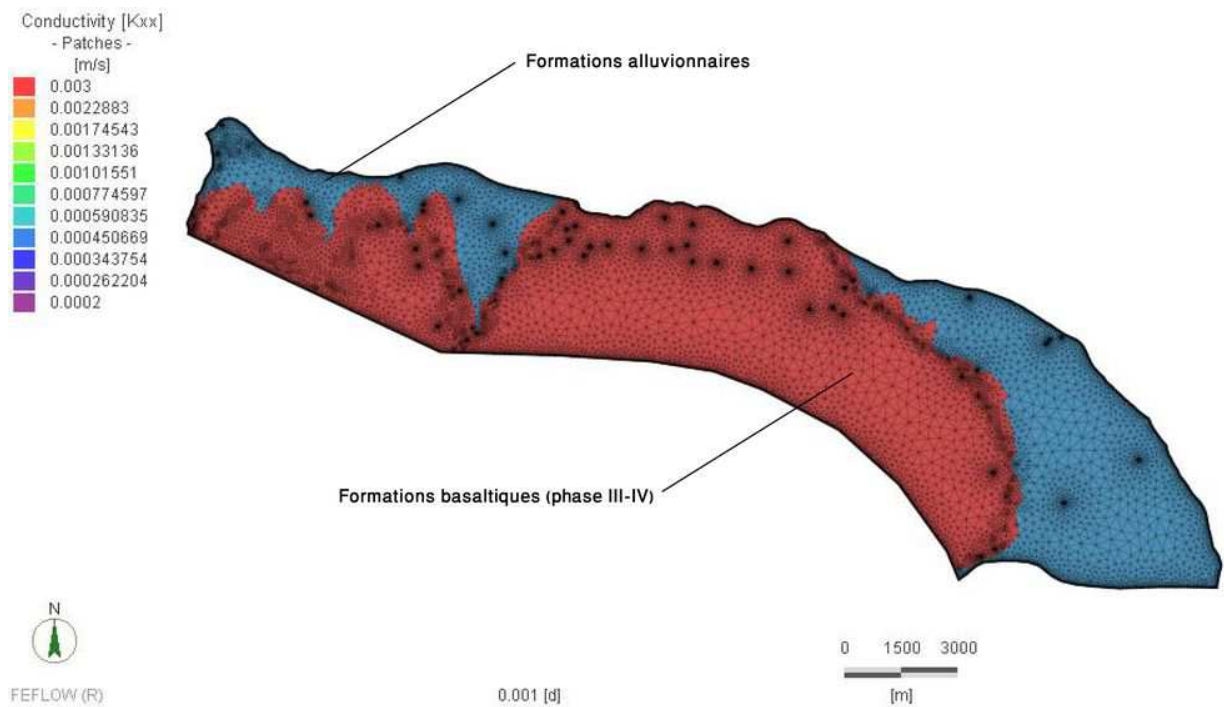
23/10/2000 Q = 2.80 m3/s
 23/10/2001 Q = 1.95 m3/s
 23/10/2002 Q = 2.30 m3/s



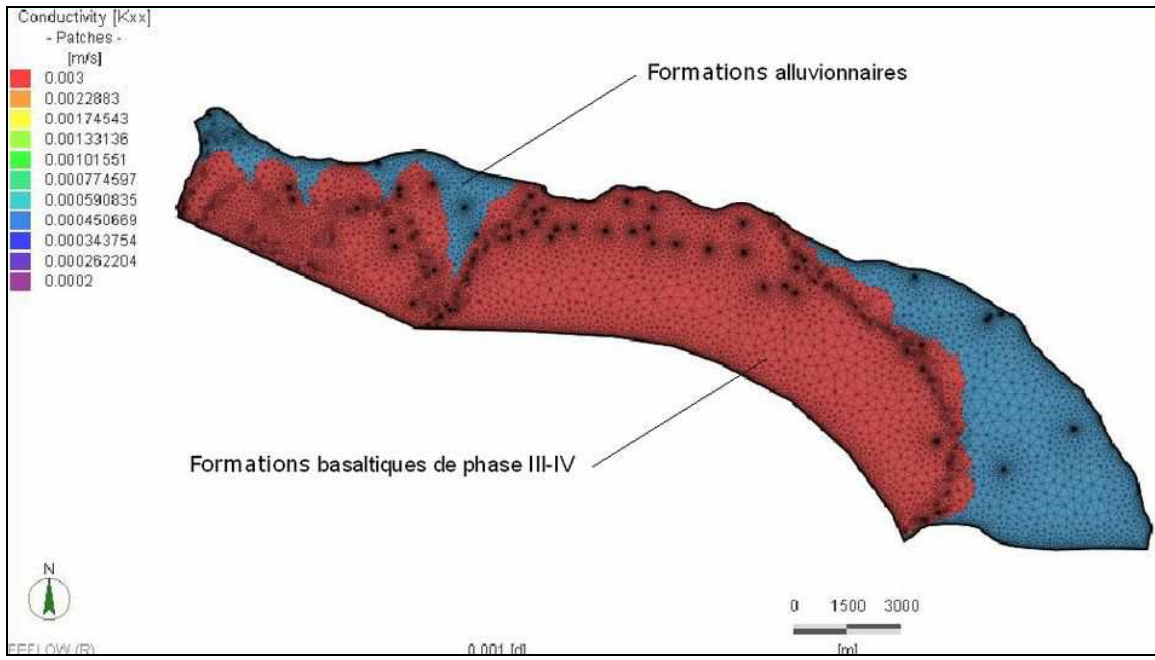
Annexe 2
Zones de géométries



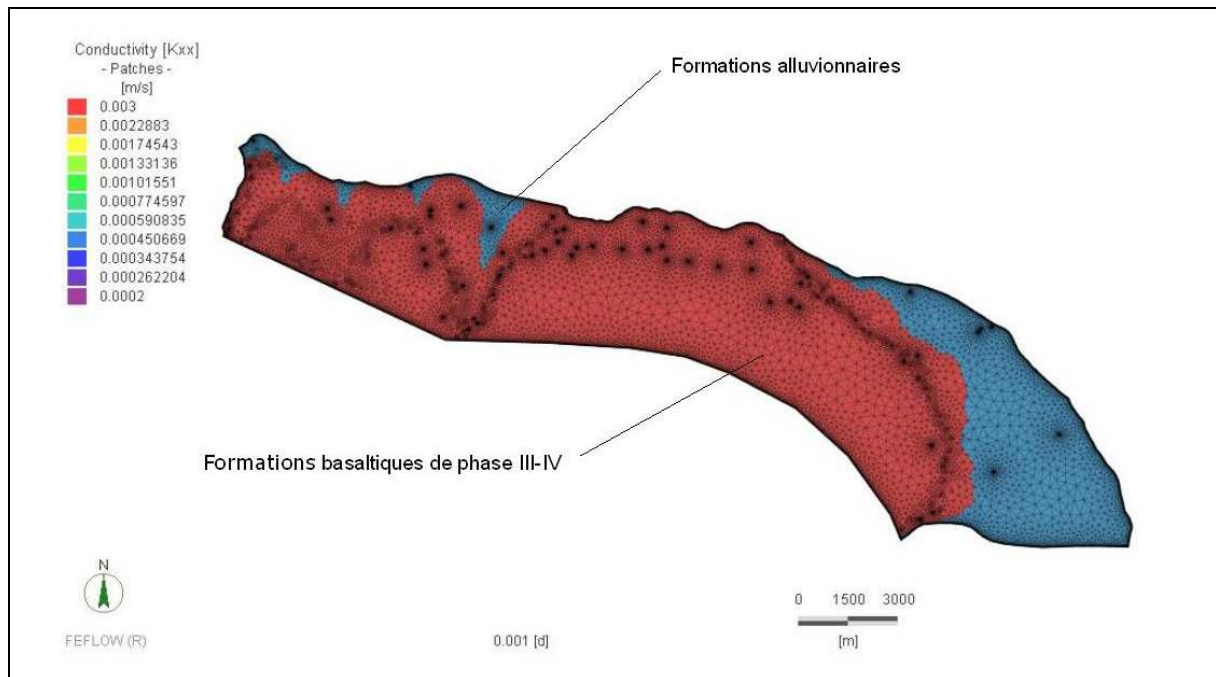
Extension des différentes zones de géométries – Couche 1



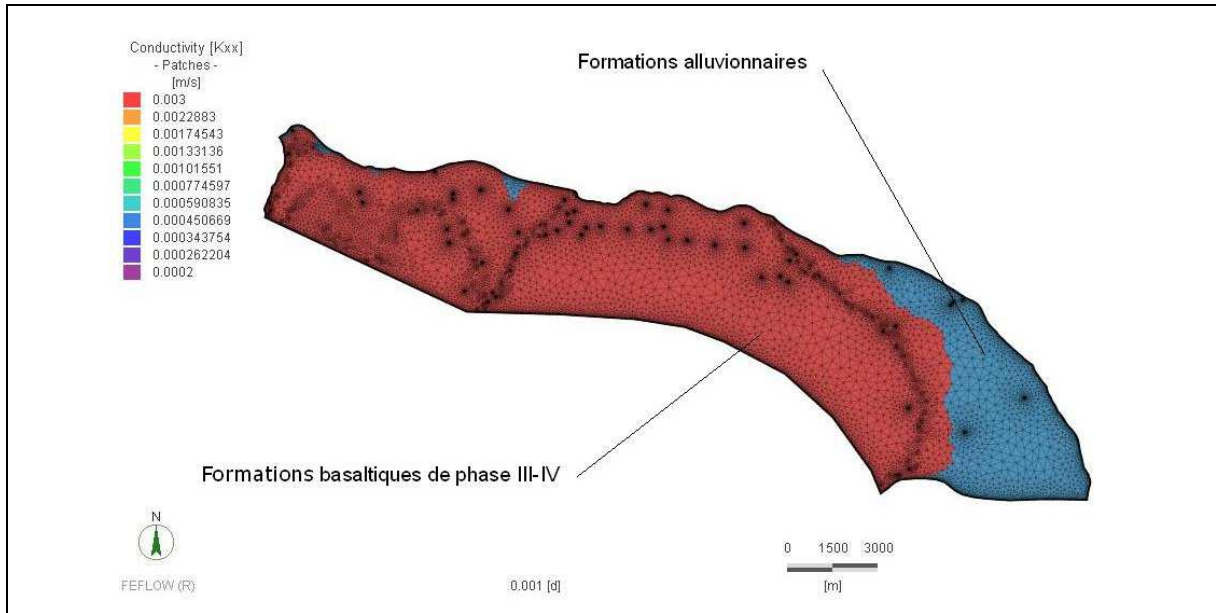
Extension des différentes zones de géométries – Couche 2



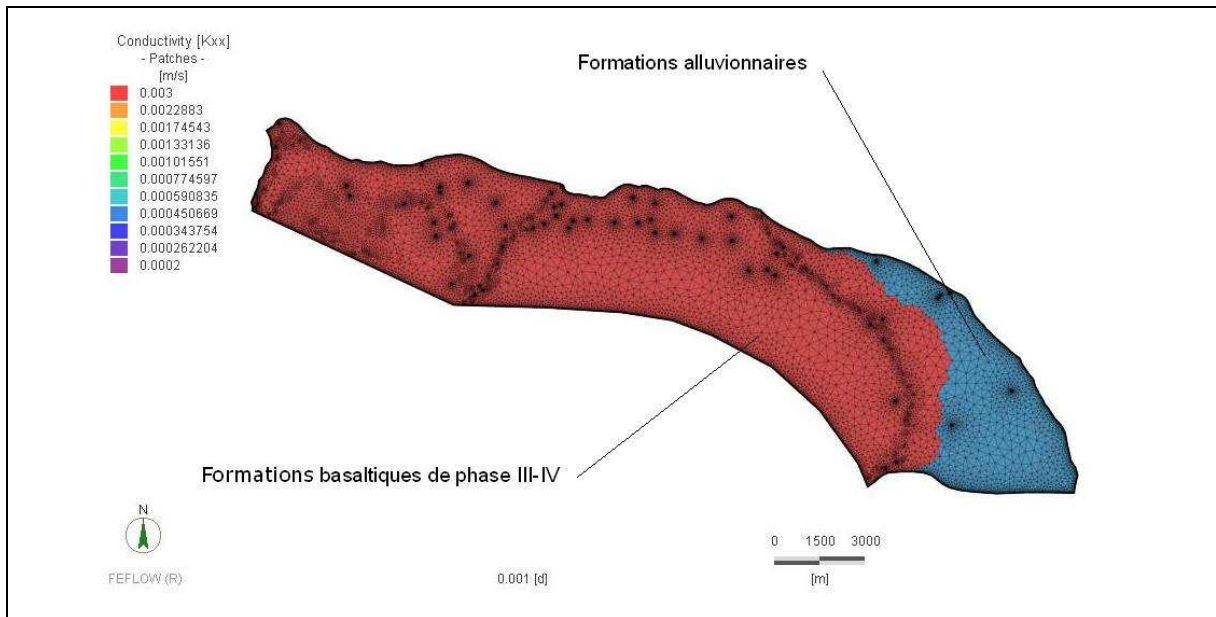
Extension des différentes zones de géométries - Couche 3



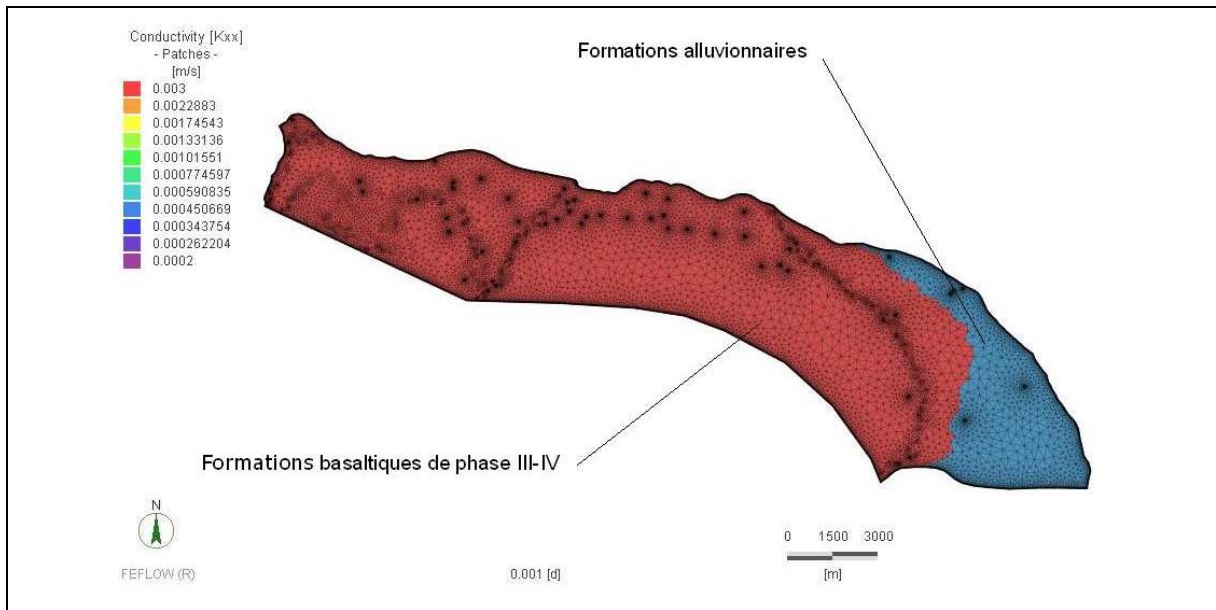
Extension des différentes zones de géométries - Couche 4



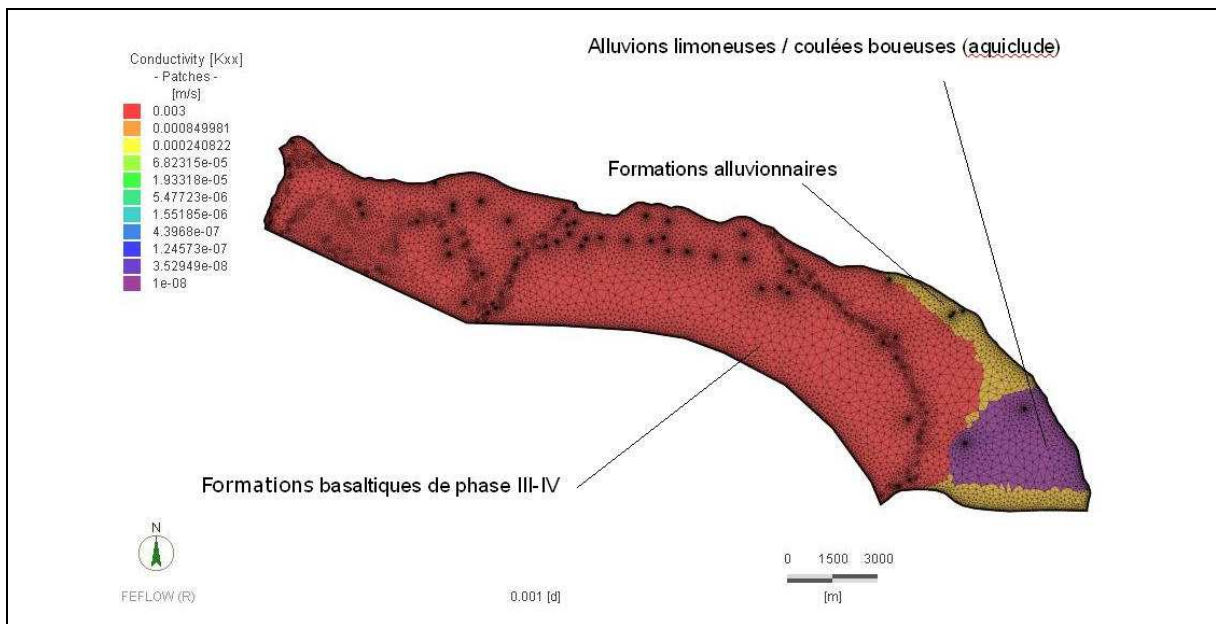
Extension des différentes zones de géométries - Couche 5



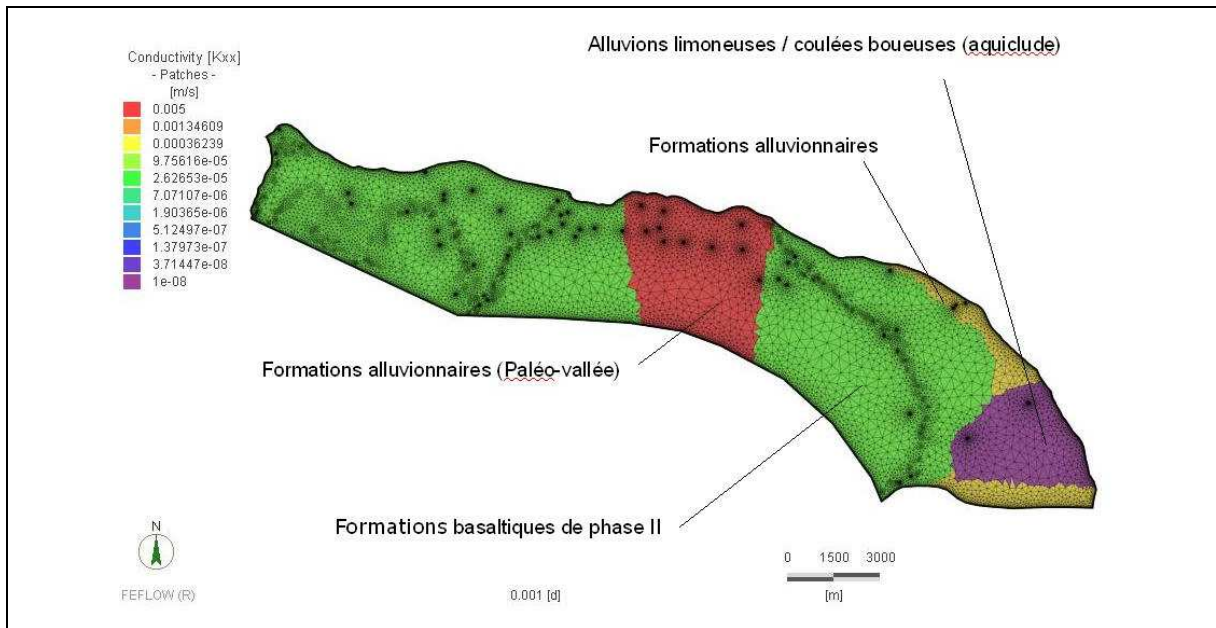
Extension des différentes zones de géométries - Couche 6



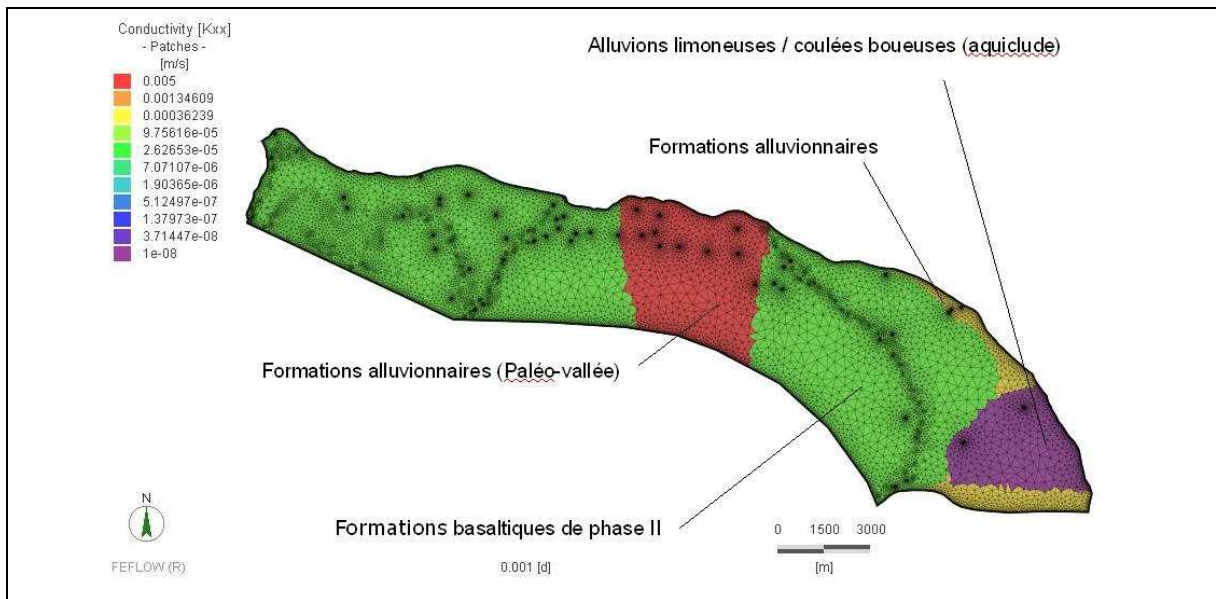
Extension des différentes zones de géométries – Couche 7



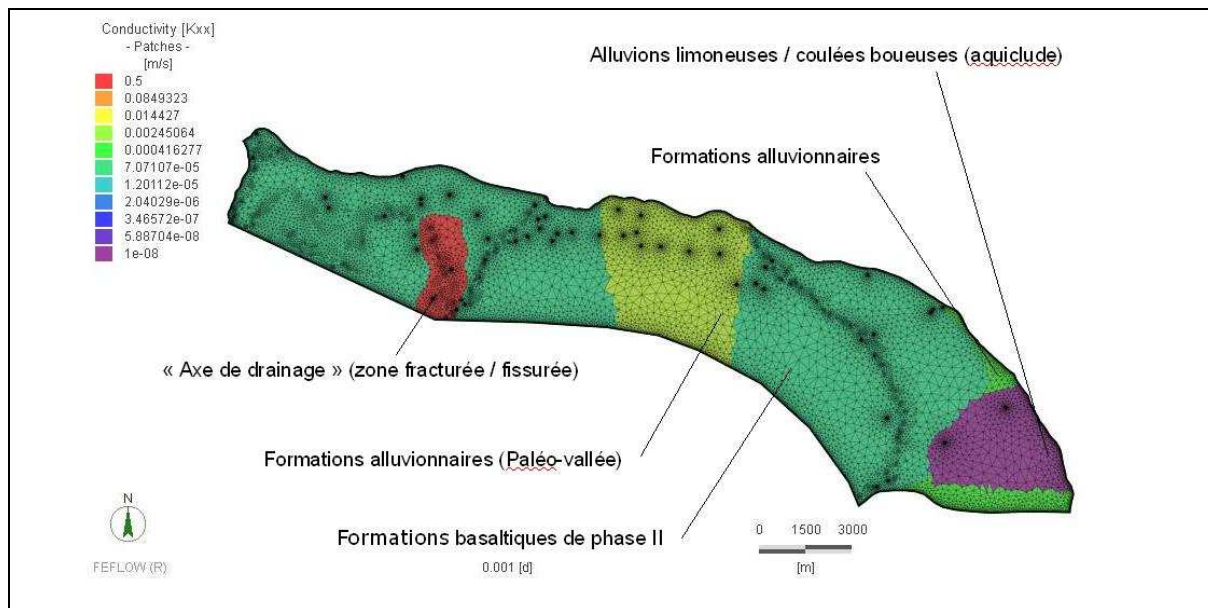
Extension des différentes zones de géométries – Couche 8



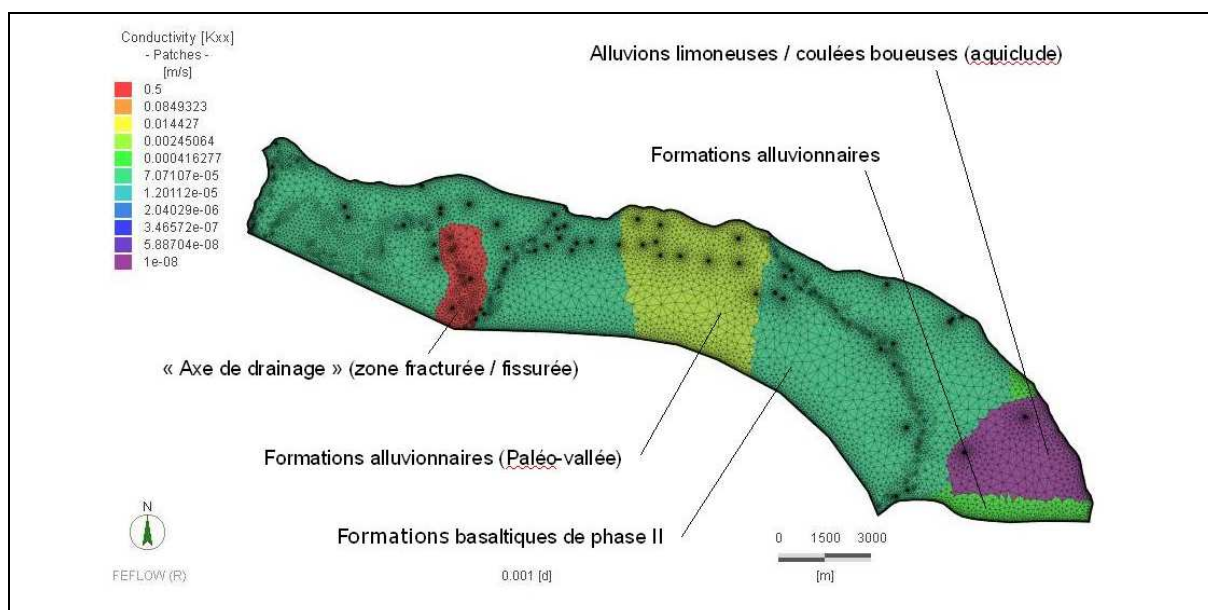
Extension des différentes zones de géométries – Couche 9



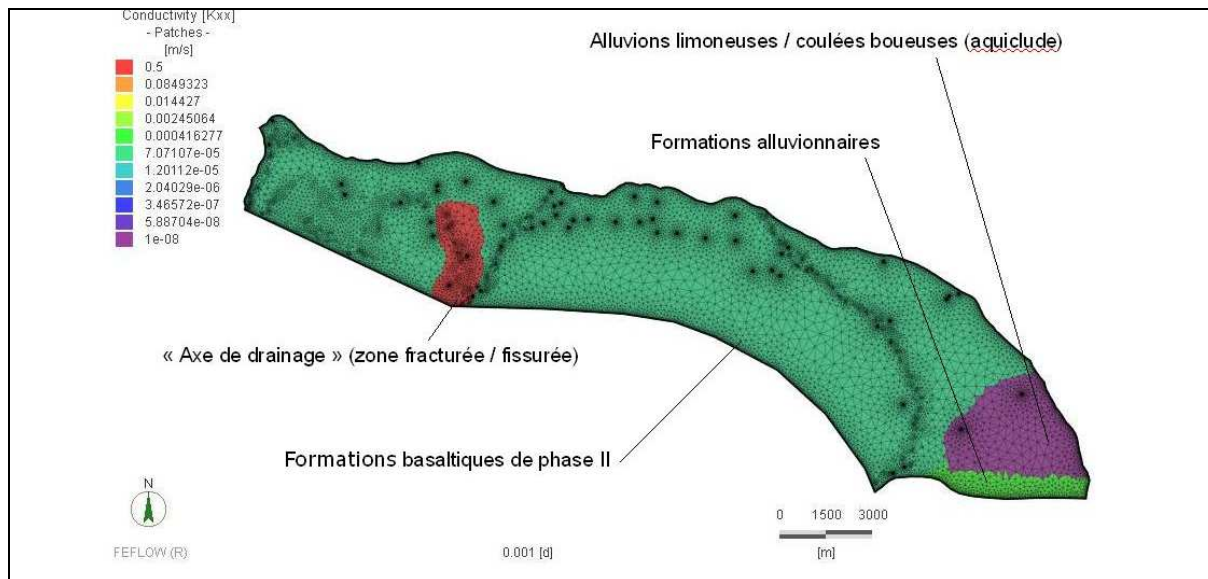
Extension des différentes zones de géométries – Couche 10



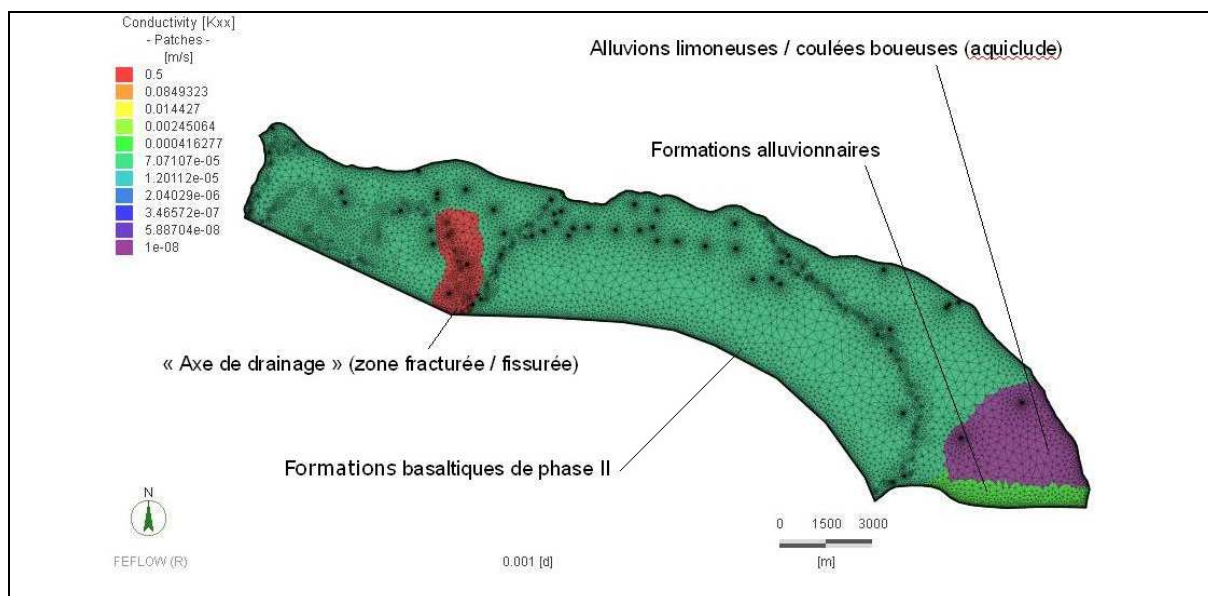
Extension des différentes zones de géométries – Couche 11



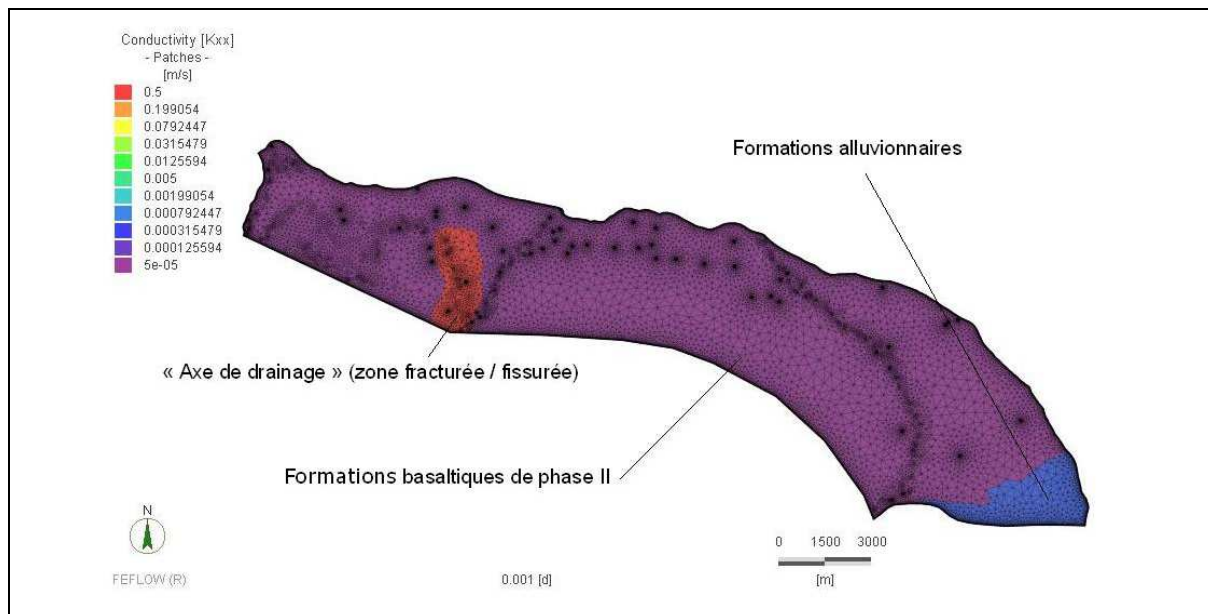
Extension des différentes zones de géométries – Couche 12



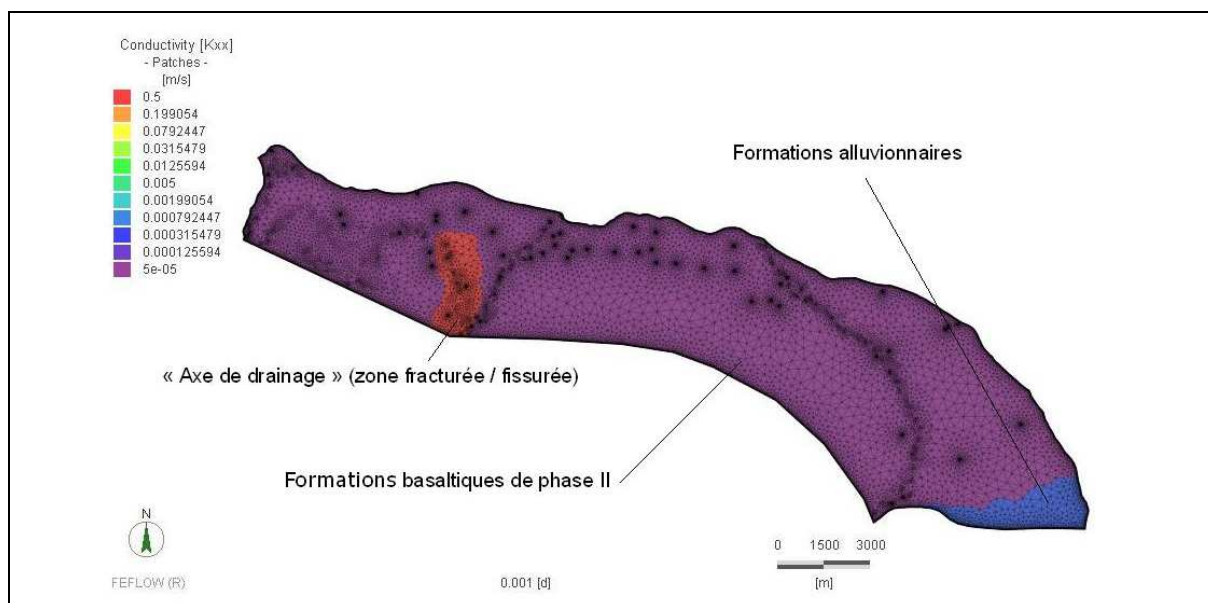
Extension des différentes zones de géométries – Couche 13



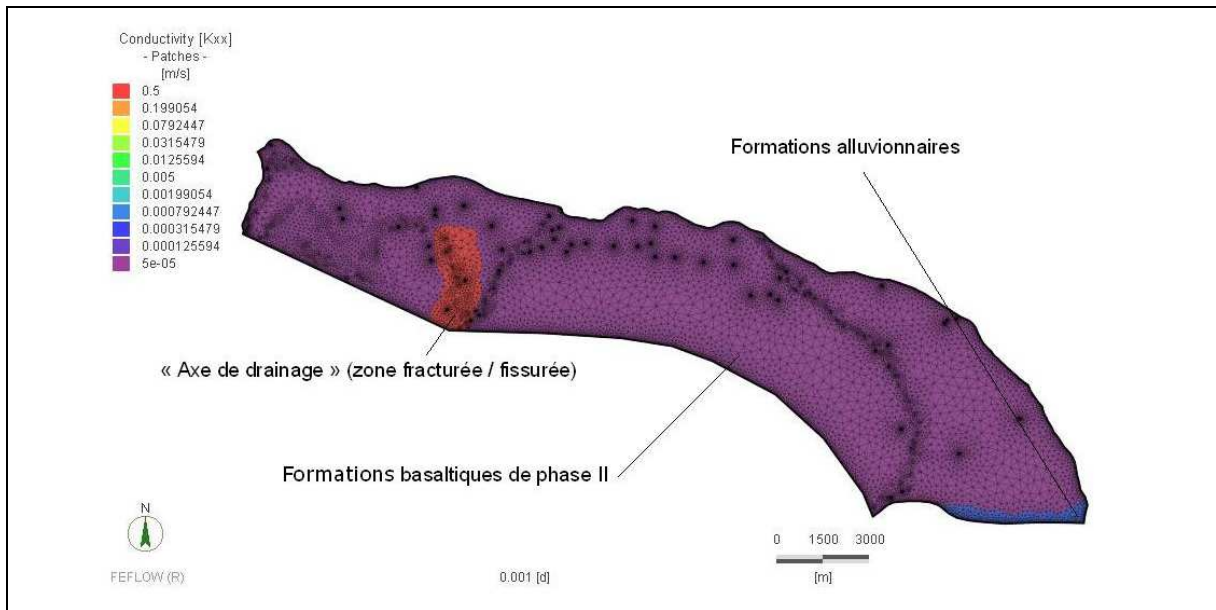
Extension des différentes zones de géométries – Couche 14



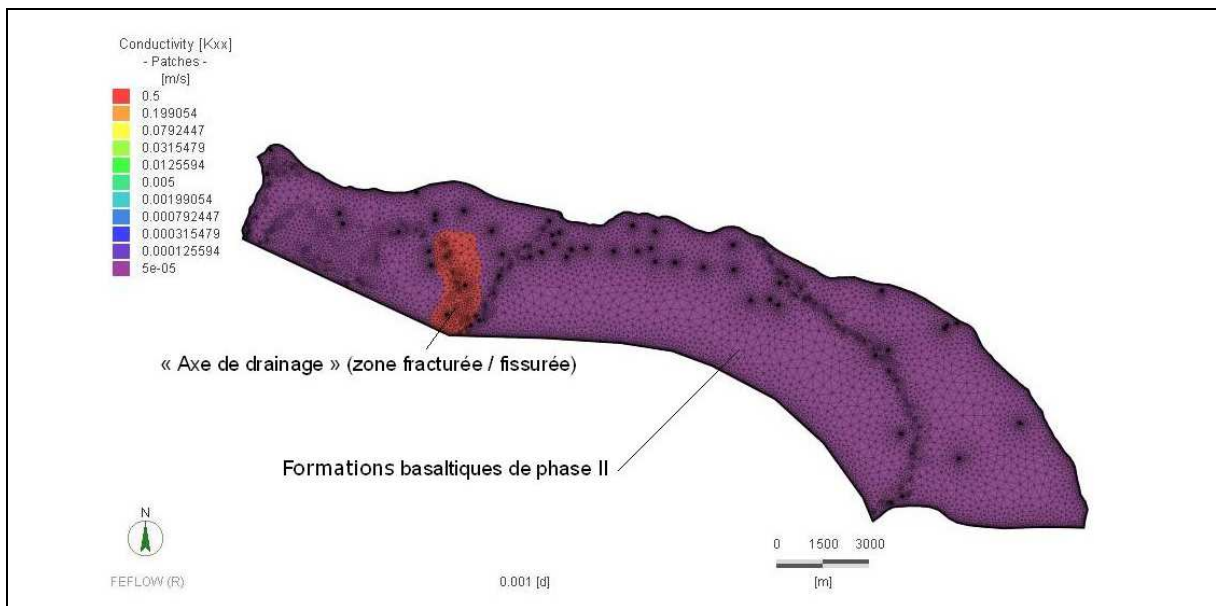
Extension des différentes zones de géométries – Couche 15



Extension des différentes zones de géométries – Couche 16



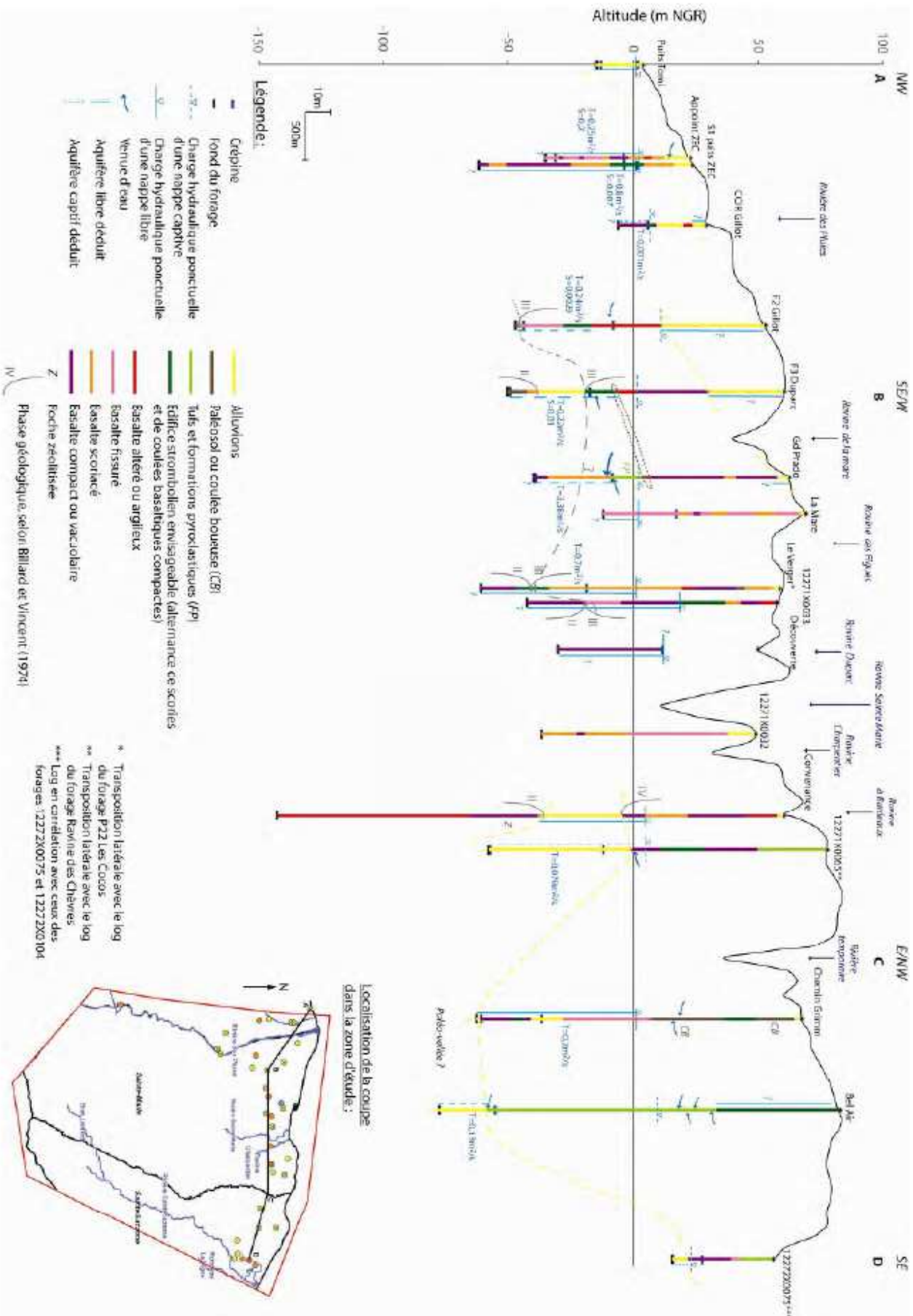
Extension des différentes zones de géométries – Couche 17



Extension des différentes zones de géométries – Couches 18 à 25

Annexe 3

Coupe hydrogéologique au centre de la zone d'étude (BRGMRP-57955-FR)



Bibliographie

Rapports :

SOGREAH (1998) – Secteur Sainte-Marie / Sainte-Suzanne. Elaboration d'un modèle mathématique de gestion des ressources en eau souterraine dans le secteur compris entre Rivière des Pluies et Rivière Sainte-Suzanne. Rapport de première phase. Avril 1998. Rapport n°104029 R2.

SOGREAH (1998) – Secteur Sainte-Marie / Sainte-Suzanne. Elaboration d'un modèle mathématique de gestion des ressources en eau souterraine dans le secteur compris entre Rivière des Pluies et Rivière Sainte-Suzanne. Rapport de seconde phase. Juillet 1999. Rapport n°104029 R3

Office de l'Eau Réunion (2005) – Contribution à l'étude du fonctionnement et l'exploitation de la nappe stratégique de Saint-Denis et de Sainte-Marie.

Office de l'Eau Réunion (2010) – Etude des circulations d'eau des systèmes hydriques du secteur Saint-Denis/Sainte-Marie. Juillet 2010.

Observatoire Réunionnais de l'EAU (2001) – Modélisation hydrogéologique de la région de Saint-Denis. Septembre 2001.

Observatoire Réunionnais de l'EAU (1999) – Modèle mathématique de l'aquifère inférieur de la région de Saint-André. Etat des connaissances. Analyse du modèle. Décembre 1999.

BRGM (2010) – Analyse fonctionnelle par traitement du signal et approche hydrochimique des aquifères du nord de la Réunion. Avril 2010. Rapport n° BRGMRP-57955-FR.

ARMINES – Ile de la Réunion – Etude par modèle mathématique de l'aquifère inférieur de la région de Saint-André. Avril 1994.

Sites Internet :

- <http://www.eaureunion.fr/>
- <http://infoterre.brgm.fr/>