

**MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE
DU SYSTEME AQUIFERE
DE LA PLAINE DES GALETS**

FEVRIER 2012

Date	Etablissement	Nombre de pages
Février 2012	Office de l'Eau	39

TABLE DES MATIERES

<u>I</u>	<u>CONTEXTE ET OBJECTIFS</u>	<u>2</u>
<u>II</u>	<u>DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE</u>	<u>3</u>
II.1	LOCALISATION GEOGRAPHIQUE	3
II.2	CONTEXTE CLIMATIQUE ET PLUVIOMETRIQUE	3
II.3	CONTEXTE HYDROLOGIQUE	5
II.4	CONTEXTE GEOLOGIQUE	6
II.5	CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE	10
<u>III</u>	<u>MODELISATION DES NAPPES DE LA PLAINE DES GALETS</u>	<u>15</u>
III.1	DEFINITION DU MODELE CONCEPTUEL	15
III.2	MODELISATION DES ECOULEMENTS EN REGIME PERMANENT	21
III.3	MODELISATION DES INTRUSIONS SALINES	25
<u>IV</u>	<u>CONCLUSIONS</u>	<u>25</u>
IV.1	SYNTHESE	25
IV.2	PROBLEMES RENCONTRES	25
IV.3	PISTES D'AMELIORATION DU MODELE	26
<u>ANNEXES</u>		<u>27</u>
	ANNEXE 1 : ZONES DE GEOMETRIE	28
	ANNEXE 2 : ZONES D'ALIMENTATION	37

Liste des figures

Figure 1 : Localisation de la zone d'étude	3
Figure 2 : Répartition de la pluviométrie de l'année 2006	4
Figure 3 : Précipitations journalières de la station Dos d'Ane (2002 - 2010)	4
Figure 4 : Précipitations journalières de la station du Port (2002 - 2010)	5
Figure 5 : Carte de situation des biefs d'infiltration de la Rivière des Galets	6
Figure 6 : Chronique de débit reconstituée de la Rivière des Galets (1988 - 2006)	6
Figure 7 : Carte géologique 1/50000ème BRGM	7
Figure 8 : Coupe géologique interprétative A-B	7
Figure 9 : Photographie aérienne, campagne IGN 1966	8
Figure 10 : Synthèse des données géophysiques disponibles sur la zone du Port	9
Figure 11 : Schéma de principe des nappes de la Plaine des Galets (ANTEA)	10
Figure 12 : Coupe NW-SE passant proche de la centrale EDF (BRGM 1998)	11
Figure 13 : Coupe NNE-SSW passant vers le pont de la RN1 (BRGM 1998)	11
Figure 14 : Extension des nappes identifiées sur la Plaine des Galets	14
Figure 15 : Carte piézométrique générale de la Plaine des Galets (1992 à 1996)	14
Figure 16 : Extension du polygone de modélisation sur fond géologique	16
Figure 17 : Représentation du maillage et des différents types de limites du modèle	17
Figure 18 : Schéma conceptuel du modèle (ANTEA - 2010)	18
Figure 19 : Niveaux piézométriques simulés dans la nappe supérieure	22
Figure 20 : Niveaux piézométriques simulés dans la nappe moyenne	23
Figure 21 : Niveaux piézométriques simulés dans la nappe inférieure	24

Liste des tableaux

Tableau 1 : Perméabilités des différentes formations géologiques	19
Tableau 2 : Porosités efficaces des différentes formations géologiques	20
Tableau 3 : Alimentation souterraine en limite Est	20
Tableau 4 : Alimentation par infiltration le long de la Rivière des Galets	20
Tableau 5 : Forages d'exploitation et débits moyen annuel exploité (2000-2008)	21
Tableau 6 : Résultats du calage pour la nappe supérieure	22
Tableau 7 : Résultats du calage pour la nappe moyenne	24
Tableau 8 : Résultats du calage pour la nappe inférieure	25

Préambule

Une modélisation mathématique des aquifères de la plaine des Galets a été réalisée en 2010 à la demande du Conseil Général de La Réunion par le bureau d'étude ANTEA. Cette modélisation a tenu compte des phénomènes de salinisation marine sur le secteur d'étude.

L'objet de ce travail est de reprendre le modèle hydrodynamique de 2010 avec le logiciel FEFLOW afin de pouvoir le faire évoluer en fonction du temps, des nouvelles connaissances et des nouveaux enjeux territoriaux.

Pour cela, le Conseil Général a transmis l'ensemble des données qui ont permis la réalisation du modèle mathématique. Ces données ont été utilisées pour concevoir le modèle avec l'outil de modélisation disponible à l'Office de l'eau Réunion. Cette première étape reprend strictement les choix de conception du bureau d'étude que ce soit au niveau :

- des données sur la géométrie des formations et le modèle conceptuel
- des valeurs des paramètres hydrodynamiques
- des données d'alimentation et d'exploitation du système

I Contexte et objectifs

L'île de La Réunion est globalement caractérisée par l'abondance de ses ressources en eau grâce à une très forte pluviométrie. Ce constat doit néanmoins être nuancé à l'échelle des microrégions du fait d'une grande variabilité spatiale et temporelle des précipitations.

A titre d'exemple, la côte au vent est caractérisée par des records mondiaux de pluviométrie alors que la côte sous le vent et précisément la commune du Port est une zone considérée comme sèche avec moins de 1000 mm de précipitations par an concentrés sur quelques événements pluviométriques intenses.

En vue de favoriser le développement agricole, le Département de La Réunion a lancé un projet de transfert des eaux d'est en ouest. La solution retenue consiste à réaliser des captages dans les rivières du cirque de Mafate (Bras Sainte Suzanne et Rivière des Galets) et du cirque de Salazie (Rivière Fleurs Jaunes et Rivière du Mât) puis de les relier par un réseau de 30 Km de galeries souterraines afin de distribuer l'eau récupérée dans l'Ouest sur huit antennes d'irrigation réparties entre les communes du Port et de Saint-Leu.

La corrélation d'une gestion durable de la ressource en eau en lien avec les enjeux 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 de la Plaine des Galets. 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).

La modélisation mathématique représente un très bon outil d'aide à la décision. Elle permet d'appréhender les mécanismes, le fonctionnement et les relations entre différentes zones aquifères. Plusieurs modèles ont été réalisés sur le secteur de la Plaine des Galets successivement par ARMINES (1995) et l'Observatoire Réunionnais de l'Eau (1999). Cependant, le basculement des eaux de l'est vers l'ouest, opérationnel dans toute sa dimension au cours de l'année 2014 (parties Salazie et Mafate), est une situation substantielle non représentée par ces « anciens » modèles.

Dans ce contexte, l'Office de l'eau Réunion reprend la modélisation hydrogéologique réalisée par ANTEA en 2010 sur ce secteur. L'utilisation du logiciel « FEFLOW-FM3 » doit permettre d'évaluer :

- l'équilibre global de la masse d'eau souterraine entre les prélèvements et la recharge naturelle,
- les impacts potentiels quantitatifs et qualitatifs,
- les implications sur les phénomènes d'intrusion salines au sein du système aquifère.

Dans un premier temps, cette note présentera le contexte hydrogéologique et pluviométrique de la zone d'étude. Dans un deuxième temps, une description du modèle conceptuel détaillera les choix de construction (géométrie, conditions aux limites) et les différents paramètres hydrodynamiques introduits (perméabilité, porosité). Dans un troisième temps, les résultats de la modélisation seront présentés ainsi que les perspectives d'évolution à court terme de l'outil.

II Description de la zone d'étude

II.1 Localisation géographique

La zone d'étude correspond aux aquifères associés à la Rivière des Galets. La Plaine des Galets se situe au nord-ouest de l'île de La Réunion sur les communes du Port et de Saint-Paul. Ses limites correspondent sensiblement à la bordure de la planèze Sainte Thérèse et au niveau des débouchés des différentes ravines à l'est, la Rivière des Galets au sud et l'Océan Indien au nord et à l'ouest.



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. La commune du Port, située sur la côte sous le vent, détient les plus faibles cumuls de précipitations annuelles avec le record de température enregistré à 40°C.

Figure 2 présente les cumuls pluviométriques enregistrés en 2006. Malgré le passage de deux tempêtes tropicales, la carte illustre bien l'inégale répartition observée entre l'est et l'ouest.

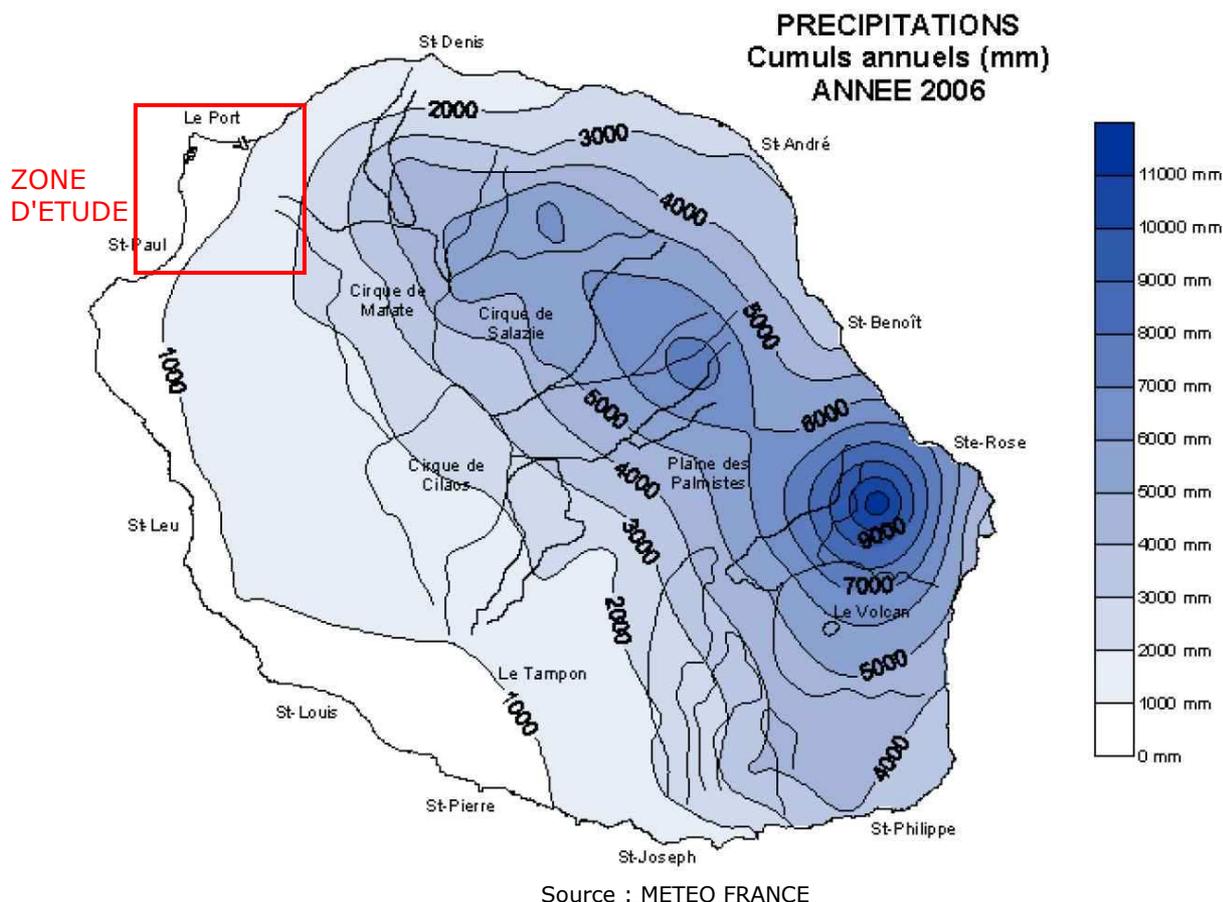


Figure 2 : Répartition de la pluviométrie de l'année 2006

L'analyse des précipitations au niveau de la Plaine des Galets porte sur deux stations du réseau Météo France : Le Port (altitude : 11 mNGR) et Dos d'Ane (altitude : 930 mNGR). En moyenne, les pluies enregistrées à la station de Dos d'Ane sont deux fois plus importantes que celles de la station du Port, conséquence logique de l'existence d'un gradient altimétrique des précipitations à la Réunion.

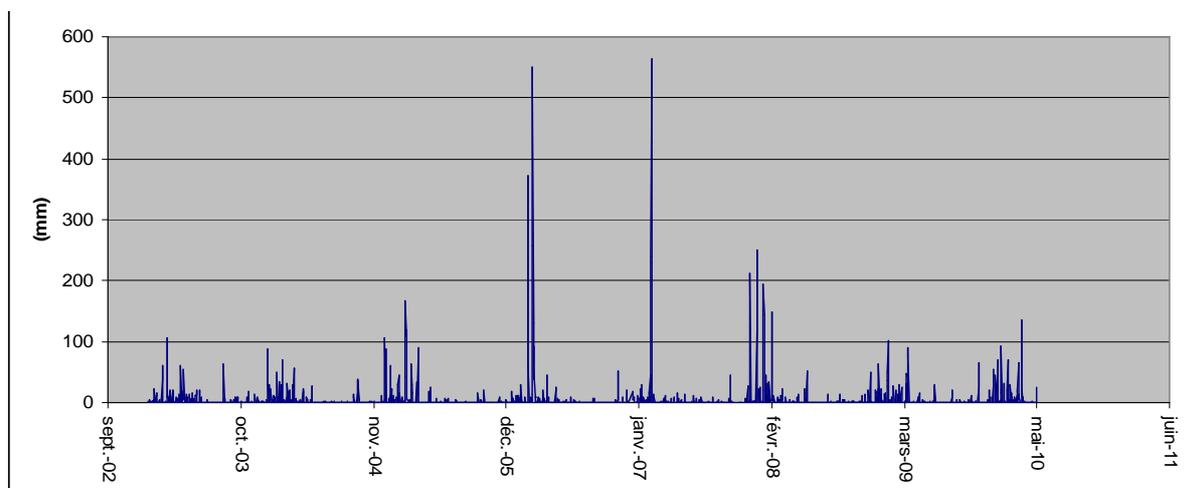


Figure 3 : Chronique de précipitations journalières de la station Dos d'Ane (2002 – 2010)

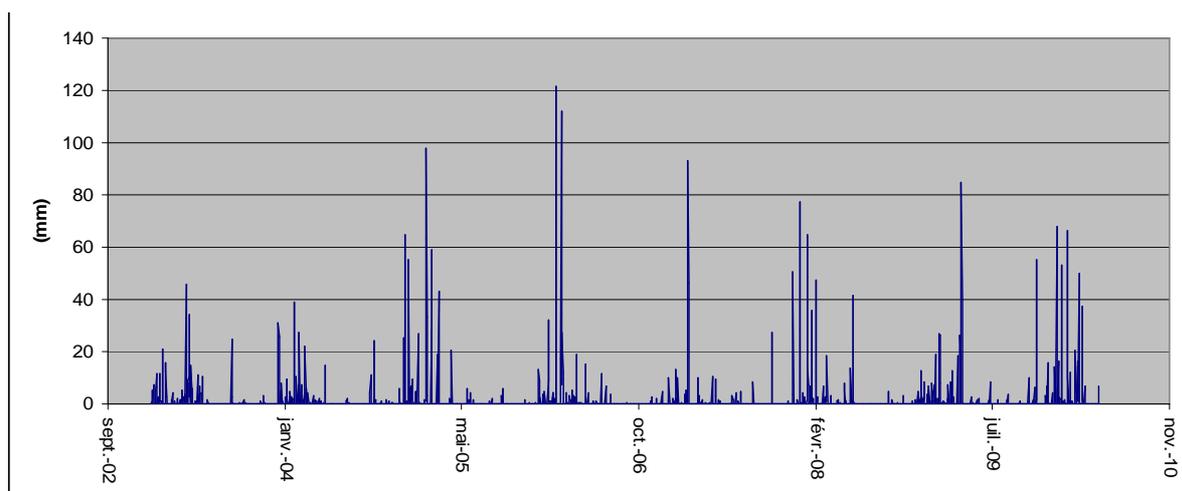


Figure 4 : Chronique de précipitations journalières de la station du Port (2002 - 2010)

II.3 Contexte hydrologique

La Rivière des Galets est l'exutoire principal du cirque de Mafate. Son bassin versant a une superficie de 117 km² à son embouchure.

A partir de 1989, une station d'enregistrement du débit installée au niveau du Cap Lebot, à l'aval de la confluence avec le Bras Sainte-Suzanne, a permis de suivre en continu l'évolution du débit de la Rivière des Galets. A partir de 2002, cette station est remplacée par celle de l'Ilet Malidé, légèrement plus à l'aval, qui a cessé de fonctionner en février 2006 suite aux conséquences de la tempête tropicale « Diwa ». Entre les deux stations une légère infiltration de l'ordre de quelques dizaines de litres par seconde est observée.

Le débit de la Rivière des Galets augmente de l'amont du bassin versant jusqu'au Cap Lebot. Ensuite, le débit de la rivière diminue à la faveur de trois zones d'infiltration (cf. Figure 5) :

- Le bief amont : il s'étend du Cap Lebot à la prise du canal Lemarchand. Le débit maximum susceptible de s'y infiltrer est de 0.07 m³/s,
- Le bief intermédiaire : il s'étend de la prise du canal Lemarchand au pont de la RN1. Le débit maximum susceptible de s'y infiltrer est de 0.47 m³/s,
- Le bief aval : il s'étend du pont de la RN1 à l'océan Indien. Le débit maximum susceptible de s'y infiltrer est de 0.45 m³/s.

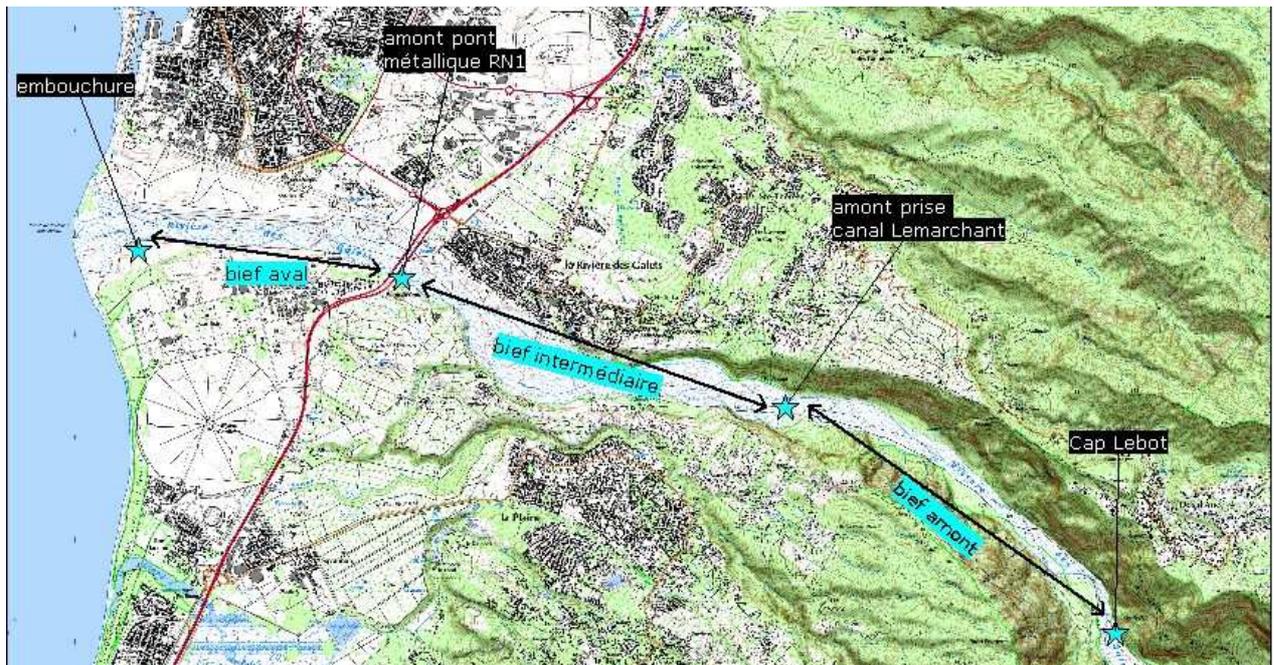


Figure 5 : Carte de situation des biefs d'infiltration de la Rivière des Galets

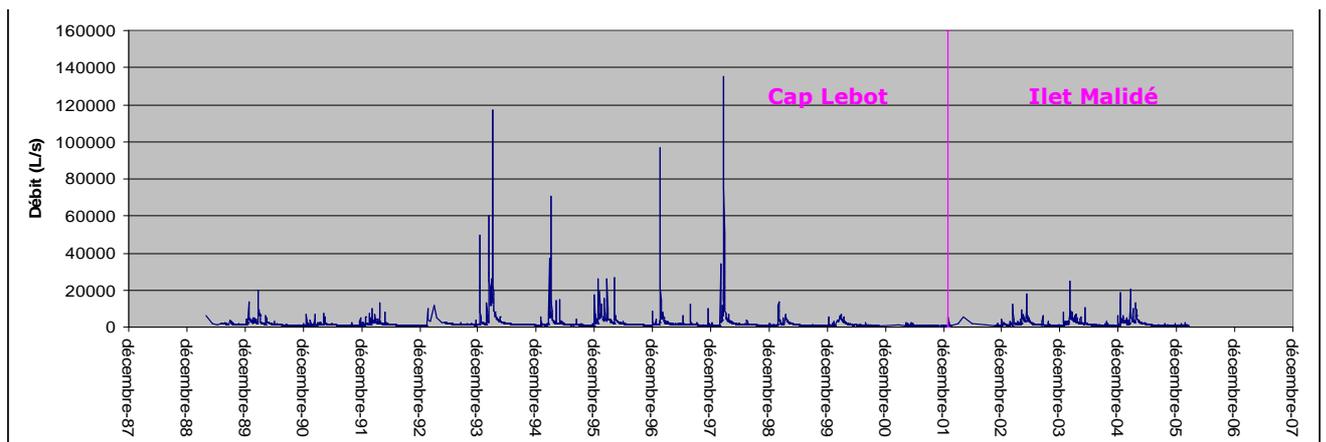


Figure 6 : Chronique de débit reconstituée de la Rivière des Galets (1988 – 2006)

La Figure 6 montre l'amplitude des variations de débit de la Rivière des Galets lors d'évènements pluvieux importants tels que les cyclones et tempêtes tropicales qui touchent l'île de la Réunion. L'intensité du débit peut monter jusqu'à plus de 100 m³/s.

II.4 Contexte géologique

La Plaine des Galets résulte de la mise en place d'un cône de déjection sur les formations volcaniques du Piton des Neiges. La nature et la configuration des dépôts traduisent une capacité de transport de matériel sédimentaire exceptionnelle liée aux périodes de crues. La granulométrie est très variée, des silts aux blocs plurimétriques. Des niveaux discontinus plus ou moins limoneux peuvent séparer des alluvions plus propres. Au sein des alluvions, les contrastes de perméabilités créent différents niveaux piézométriques et impliquent la mise en jeu de phénomènes de drainance entre les différentes unités hydrogéologiques.

La Plaine des Galets se raccorde vers le sud-est aux planèzes de Sainte-Thérèse et de la Plaine Saint-Paul qui forment les pentes du volcan bouclier. Le massif volcanique est constitué par des coulées anciennes des phases I et II du massif du Piton des Neiges. Elles sont recouvertes au sud de la Ravine à Marquet par des formations plus récentes des phases III et IV.

Une ancienne coulée boueuse (lahar) s'est mise en place dans le lit de la Rivière des Galets avant les coulées de la phase III. Cette formation indurée a une très faible perméabilité. Elle contraint les écoulements souterrains alimentés par les infiltrations de la rivière. Les flux se dirigent en grande partie vers la commune du Port sous l'effet de cette formation.

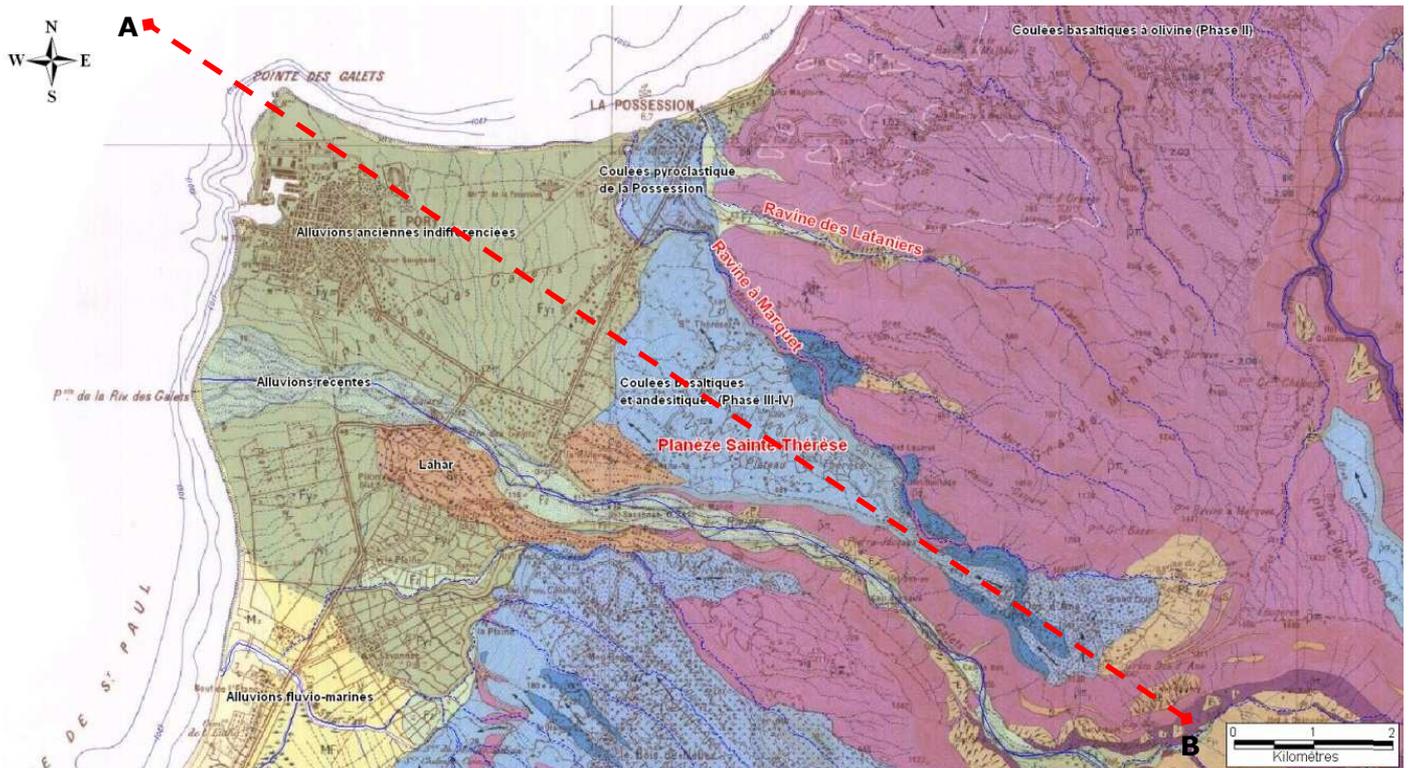


Figure 7 : Carte géologique 1/50000ème BRGM

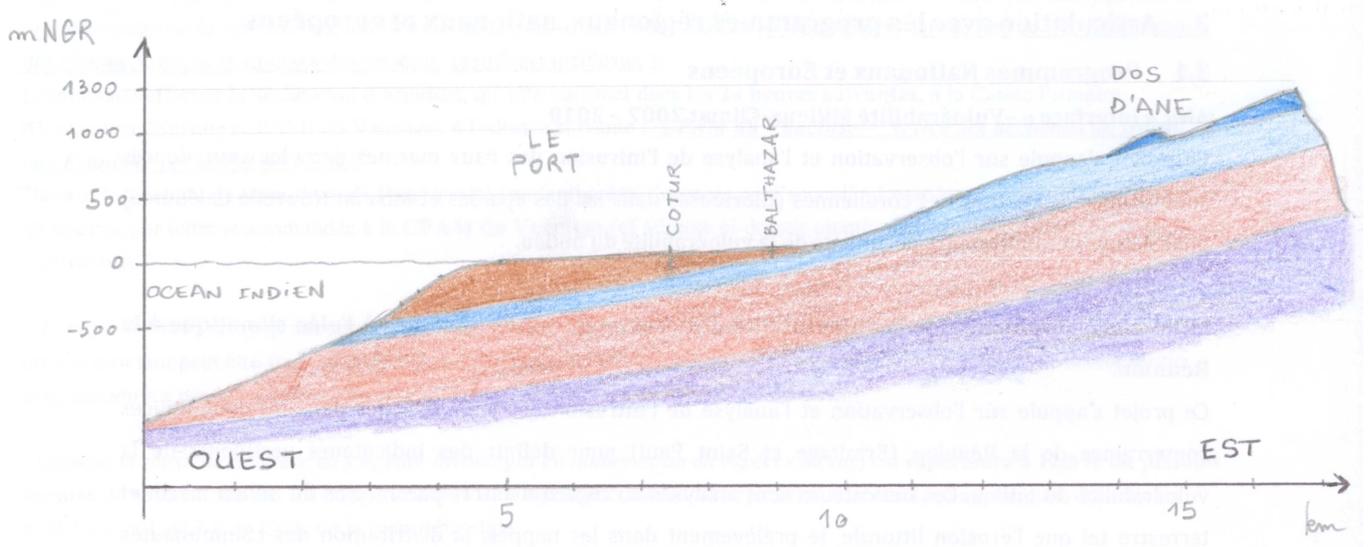


Figure 8 : Coupe géologique interprétative A-B

La Figure 8 présente une coupe selon l'axe AB (cf. Figure 7). Elle montre que les coulées basaltiques se prolongent sous le niveau de la mer et que les alluvions forment une plateforme deltaïque.

La position du lit majeur de la Rivière des Galets a variée au cours du temps. Sur la photographie aérienne (Figure 9), les paléo-chenaux balayent toute la plaine alluviale. Certains d'entre eux sont même de direction sud-nord alors que les plus récents sont de direction est-ouest. On peut donc imaginer qu'il existe des paléo-vallées remplies d'alluvions ailleurs qu'à l'aplomb du lit actuel de la rivière.

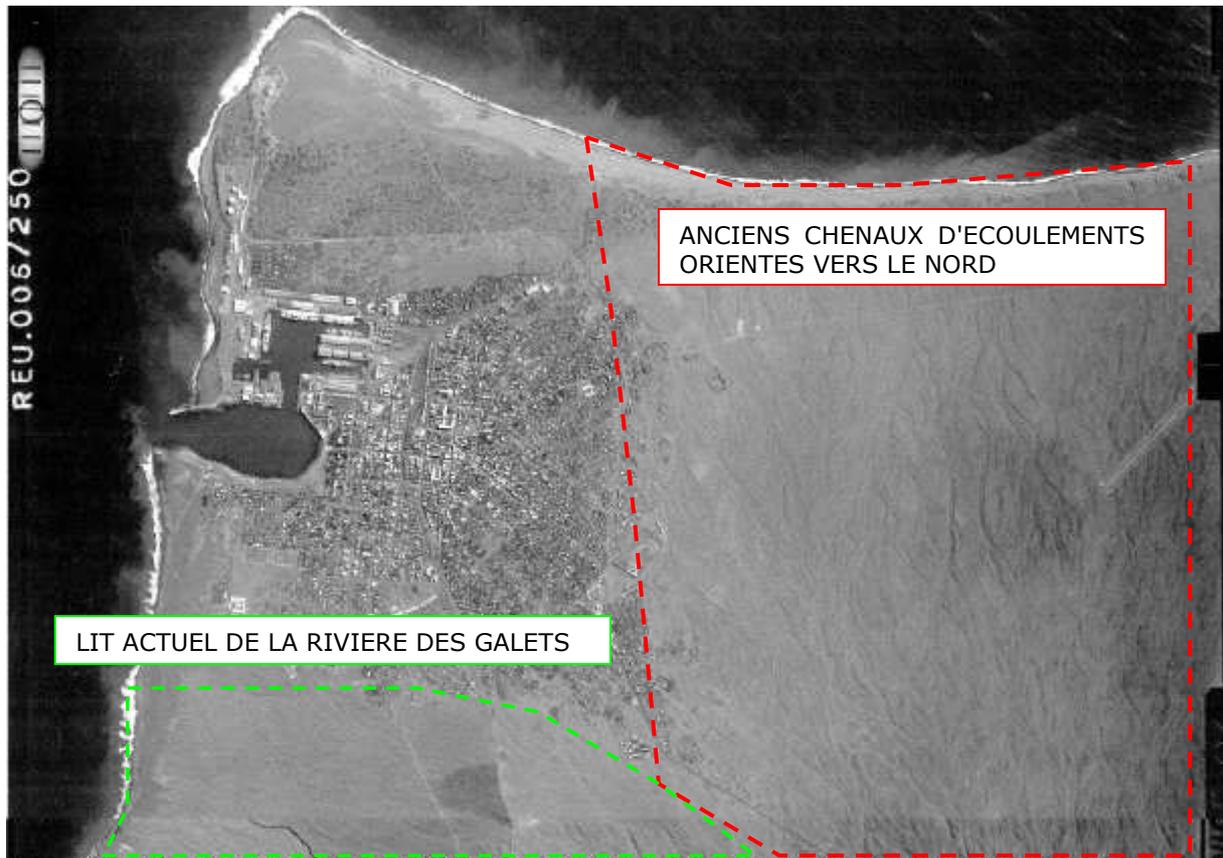


Figure 9 : Photographie aérienne, campagne IGN 1966

Cette hypothèse a été vérifiée par des campagnes de prospections géophysiques. Une campagne sismique réalisée en 1973 (Rapport BRGM n° 73RME029AF) a mis en évidence différentes paléo-vallées. La Figure 10 synthétise l'ensemble des informations disponibles.

II.5 Contexte hydrogéologique

Le schéma hydrogéologique de synthèse basé sur l'analyse de nombreuses données d'interprétations de travaux de forages et de suivis piézométriques propose trois nappes superposées et délimitées par des horizons imperméables ou semi perméables :

- une nappe supérieure dans les alluvions grossières, dont les limites s'éloignent très peu du lit de la Rivière des Galets. Elle est libre, jusqu'à 65 m/sol de profondeur, son niveau oscille autour de +40 m NGR. Son alimentation est essentiellement liée aux infiltrations des eaux de la Rivière des Galets. Les flux d'infiltrations sont essentiellement verticaux ce qui positionne la rivière bien au dessus du niveau de la nappe.
- des alluvions limoneuses : aquiclude.
- une nappe moyenne dans des alluvions grossières et anciennes. Elle est généralement sous-jacente à la nappe supérieure, séparée par un niveau semi-perméable. La nappe moyenne est semi captive entre 80 et 120 m de profondeur, son niveau se situe entre +2 et +5 m NGR. Son alimentation est semblable à la nappe supérieure dont elle draine une partie des eaux.
- des alluvions limoneuses : aquiclude
- une nappe inférieure dans un mélange complexe de formations volcaniques et d'alluvions. Elle est captive à partir d'environ 125 m de profondeur et son niveau se situe entre +2 et +2,5 m NGR. Son alimentation est principalement représentée par des écoulements souterrains horizontaux correspondant aux eaux infiltrées à travers les formations basaltiques de la planèze Sainte-Thérèse, la Ravine à Marquet et la Ravine des Lataniers. Un complément par soutirage de la nappe moyenne est possible à la faveur de discontinuités des formations imperméables qui les séparent.



Figure 11 : Schéma de principe des nappes de la Plaine des Galets (ANTEA)

Les Figure 12 et Figure 13 illustrent la complexité de cette plaine alluviale. L'extension et l'épaisseur des couches perméables et des couches imperméables peuvent être très variées dans l'espace.

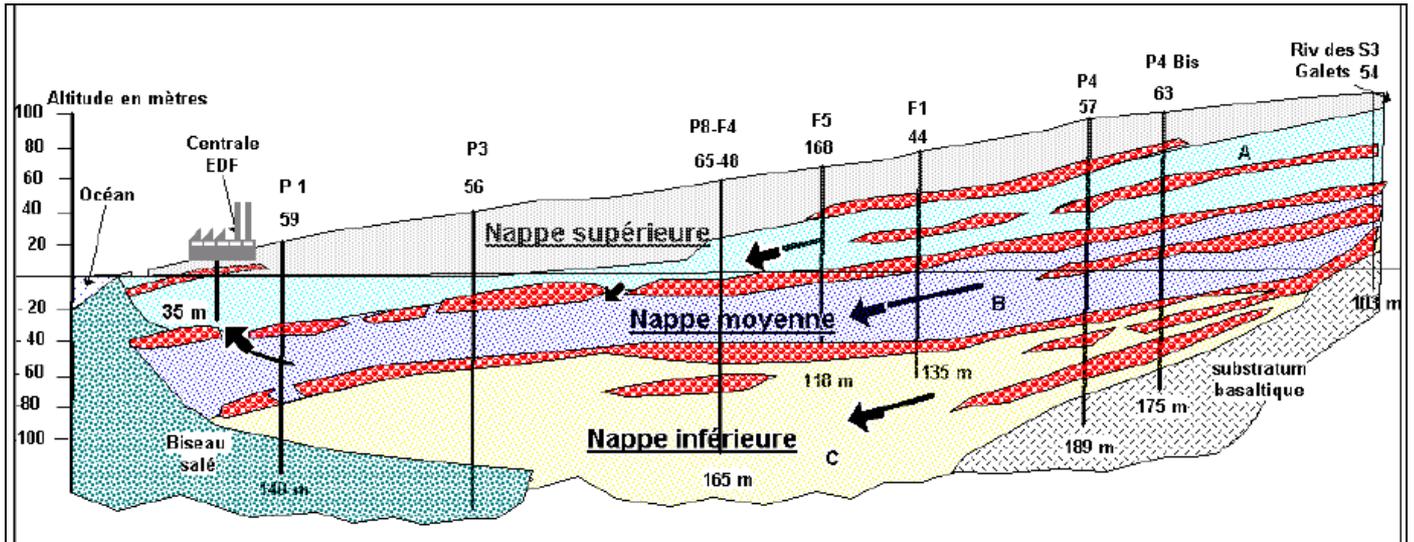


Figure 12 : Coupe NW-SE passant proche de la centrale EDF (BRGM 1998)

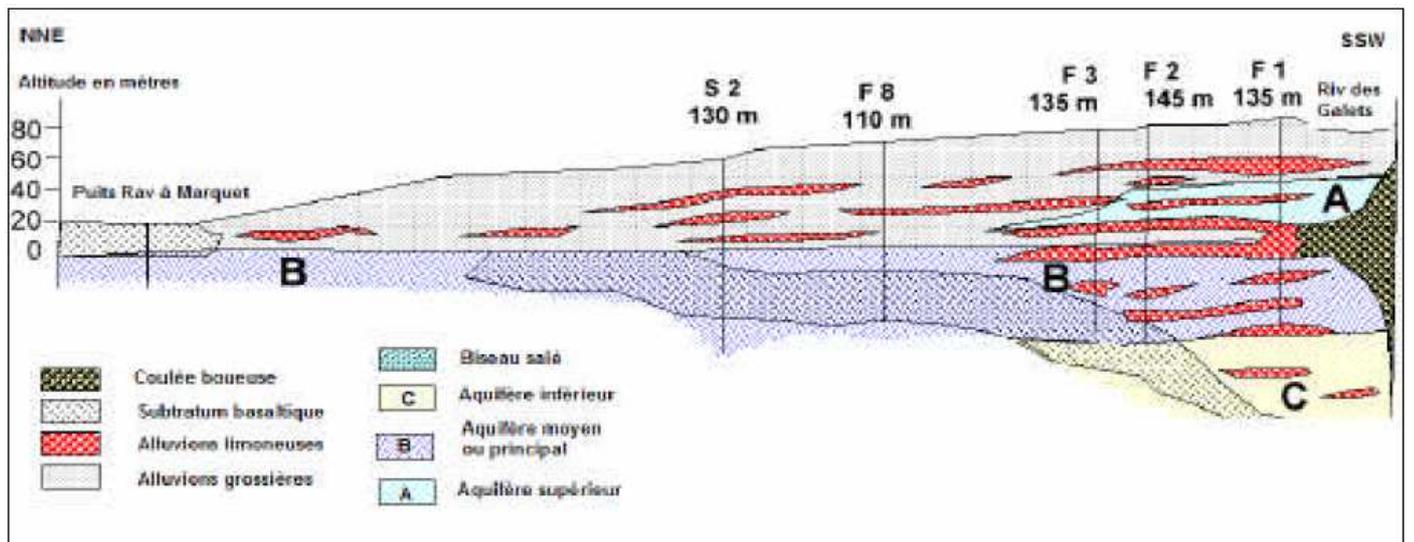


Figure 13 : Coupe NNE-SSW passant vers le pont de la RN1 (BRGM 1998)

II.5.1 Secteur de la Rivière des Galets

- Nappe supérieure

Elle est alimentée par les infiltrations provenant de la Rivière des Galets qui peuvent atteindre jusqu'à 600 l/s. Le gradient est d'environ 3% à l'amont et inférieur à 1% à l'aval de la RN1.

L'analyse des comportements piézométriques vise à réduire l'extension de cette nappe à proximité de la rivière. La remontée de la coulée boueuse à proximité du centre pénitencier induit un effet de seuil.

Les eaux de la nappe prennent une direction nord. Les évolutions piézométriques sont comparables sur l'ensemble des ouvrages captant cette nappe. L'épaisseur de cette nappe est d'une dizaine de mètre.

- Nappe moyenne

La nappe moyenne est alimentée principalement par drainance de la nappe supérieure et/ou directement à partir des infiltrations de la rivière plus à l'amont. Une autre source d'alimentation proviendrait de l'impact direct d'épisodes de fortes précipitations.

On observe bien ce phénomène au niveau de l'évolution piézométrique. Effectivement, les chroniques piézométriques montrent une remontée rapide (quelques jours) en début d'année en cas d'évènements pluvieux importants pouvant atteindre une vingtaine de centimètres suivi d'une seconde augmentation, plus lente et plus importante (20 à 60 cm).

Les études du BRGM prennent en compte une nappe moyenne individualisée dans l'axe de la Rivière des Galets et des nappes moyenne et supérieure confondues à l'ouest et au nord. L'écoulement des eaux souterraines de cette nappe fortement exploitée se fait essentiellement vers le nord. Comme pour la nappe supérieure, c'est probablement la coulée boueuse qui « détourne » l'écoulement de cette unité. Ses variations piézométriques sont retardées par rapport à la nappe supérieure, ce qui illustre bien l'effet de drainance verticale entre les deux systèmes.

- Nappe inférieure

Une troisième nappe a été identifiée sous les deux précédentes. Ses eaux sont saumâtres, sa piézométrie avoisine les 2,50 m NGR et ses variations annuelles sont très faibles. Elle présente un comportement typique d'une nappe alimentée par les infiltrations par les planèzes à l'amont hydraulique.

Son maximum piézométrique se situe juste après les fortes pluies de la saison cyclonique. Elle semble en continuité hydraulique sur l'ensemble du secteur, d'abord dans les formations volcaniques de la planèze, ensuite dans les alluvions. Les mesures de conductivité via les ouvrages profonds montrent qu'elle est quasiment totalement envahie par le sel.

II.5.2 La nappe libre de la Planèze Sainte Thérèse

Cette nappe existe à la faveur des infiltrations dans les basaltes. Elle contribue à l'alimentation du système de la Plaine des Galets. La piézométrie est faible et avoisine les 2,5 m NGR sur l'ensemble du secteur. Elle présente le comportement typique d'une nappe alimentée de manière quasi continue par les infiltrations sur la planèze avec un soutien de l'étiage en milieu d'année et des alimentations rapides lors de la saison des pluies. Des apports par les débits de la Ravine à Marquet sont visibles sur les enregistrements piézométriques.

L'amplitude de ses variations ne dépasse pas 50 cm. Ses caractéristiques géologiques sont identiques à la nappe inférieure évoquée précédemment mais les eaux de cet aquifère sont douces. Du point de vue géologique, les données de forages sur ce secteur révèlent qu'une trentaine de mètres de coulées basaltiques de Phase IV reposent sur des coulées de Phase III ou directement sur des coulées de Phase II.

II.5.3 Les nappes du Port Est

Dans la zone allant du centre pénitencier jusqu'au Port Est, plusieurs nappes superposées ont été identifiées sur les ouvrages FT6, P11, FT5 et P11. L'invasion par des eaux d'origine marine est très marquée sur la nappe inférieure du FT6 ainsi que sur le mélange des deux nappes au FT5 et à proximité de la cote.

II.5.4 Le Secteur aval de la Ravine à Marquet

Ce secteur a fait l'objet de plusieurs études menées par ANTEA dans le cadre de l'extension du Port Est. Une dizaine de piézomètres ont été implantés pour améliorer les connaissances géologiques sur cette zone. D'une profondeur moyenne de 50 mètres (environ -40 m NGR), ils ont rencontré exclusivement des formations alluvionnaires allant du sable limoneux aux graves puis aux blocs.

L'aquifère rencontré au droit du site est en relation directe avec l'Océan Indien. Il est localisé dans des formations fluvio-marines, alimentées par les basaltes directement à l'est (amont hydraulique) et par les infiltrations directes de la Ravine à Marquet.

La présence d'une coulée boueuse ou de niveaux alluvionnaires fins plus ou moins imperméables implique également l'existence de niveaux piézométriques localisés et perchés (Rapport ANTEA 36061/A novembre 2004). La Ravine à Marquet semble constituer une discontinuité du système aquifère par la présence supposée d'une coulée boueuse qui oriente les écoulements d'eau douce au dessus du niveau aquifère général.

On retiendra de cette zone :

- Des niveaux de base observés entre 0,5 et 1 m NGR à l'est du secteur,
- La présence de niveaux perchés avec des cotes de l'ordre de 3,5 à 4 m NGR sur la partie proche du port Est,
- Des amplitudes piézométriques importantes liées à la présence de la Ravine à Marquet en cas d'épisodes de fortes pluies (2,5 à 3,5 m NGR sur la partie Est du secteur, 6 m NGR sur la partie ouest).

II.5.5 Les nappes aval de la Rivière des Galets

La partie aval de la Rivière des Galets présente dans l'axe de la rivière, des niveaux saturés discontinus qui se répartissent de part et d'autre de la rivière. Ces niveaux discontinus existent à la faveur des infiltrations du cours d'eau. Les variations y sont importantes avec une différence marquée entre la rive droite et la rive gauche.

II.5.6 Conclusions

Le schéma conceptuel du fonctionnement hydrogéologique de la Plaine des Galets peut se définir comme :

- La superposition de trois nappes dans l'axe de la rivière, plus ou moins connectées entre elles par drainance verticale à travers les formations qui les séparent.
- Un système monocouche (à l'exception des niveaux perchés) lorsque on se rapproche du littoral. Ces nappes sont certainement le résultat de la disparition progressive des niveaux (cf. Figure 12 et Figure 13).
- Une nappe libre sur la Planète Sainte-Thérèse dans les formations volcaniques. Elle se poursuit dans les alluvions dont la piézométrie est fortement liée aux précipitations sur la planète.

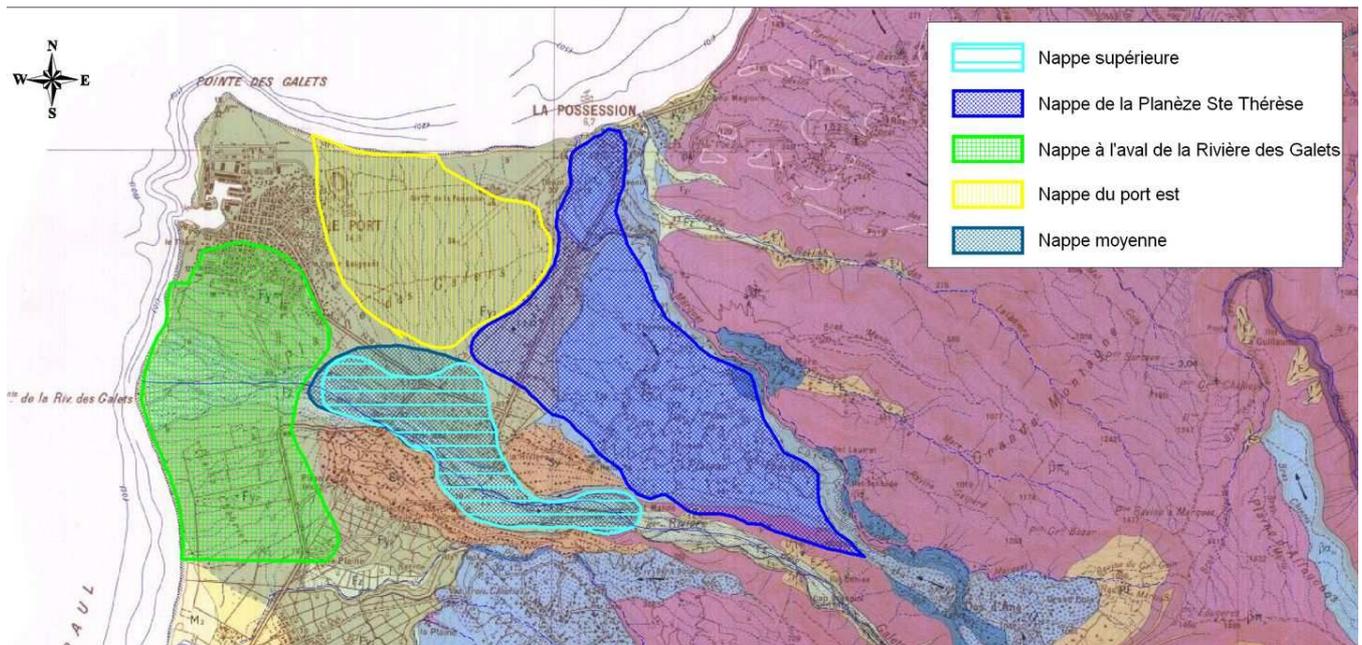


Figure 14 : Extension des nappes identifiées sur la Plaine alluviale de la Rivière des Galets

La Figure 15 donne une bonne idée des tendances piézométriques de chacune des trois nappes de la Rivière des Galets ainsi que le sens d'écoulement général.

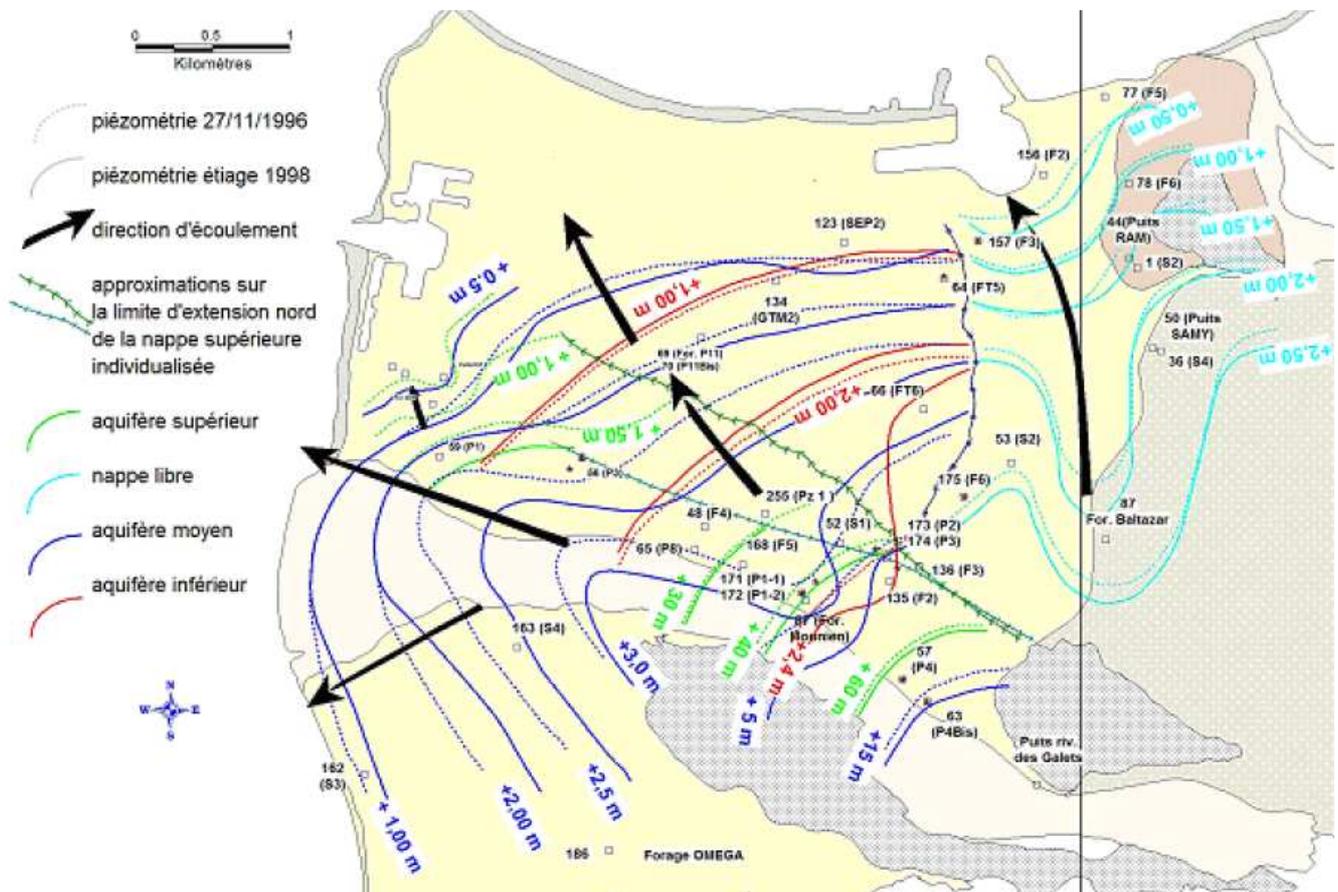


Figure 15 : Carte piézométrique générale de la Plaine des Galets (synthèse BRGM 1992 à 1996)

III Modélisation des nappes de la Plaine des Galets

L'objectif de cette étude est d'obtenir un outil permettant de simuler les écoulements souterrains du système aquifère de la Plaine des Galets puis d'évaluer la morphologie de l'interface eau douce/eau salée.

Pour cela, il est nécessaire d'adapter le modèle réalisé par le bureau d'étude à l'outil de modélisation FEFLOW. L'enjeu est de pouvoir actualiser et faire évoluer le modèle en fonction des nouvelles connaissances. Cet outil permettra d'évaluer la ressource potentiellement mobilisable et sa vulnérabilité à l'échelle de l'unité aquifère littorale de Saint-Paul/La Possession. Par contre, l'échelle d'observation et la précision du modèle ne permettront pas d'estimer l'impact d'un forage en particulier.

III.1 Définition du modèle conceptuel

III.1.1 Extension et construction du modèle

❖ Délimitation, maillage et limites.

L'extension de la zone à modéliser est basée sur des critères géologiques et sur la connaissance des bassins versants hydrologiques du secteur. Les limites du modèle sont illustrées sur la Figure 16.

La limite sud est positionnée sur la limite géologique supposée imperméable que constitue la coulée boueuse. Cette hypothèse peut être discutée car on ne connaît pas précisément la profondeur de cette coulée (qui passe par endroit sur les alluvions) et il n'est pas exclu qu'une partie de l'alimentation aille vers Cambaie au niveau du Grand Pourpier.

Vers le Sud-Ouest, la coulée disparaît et la limite devient localement perméable vers la rive gauche. La limite Est représente la limite de reconnaissance par forage. Au Nord et à l'Ouest, les limites sont naturellement établies au niveau du trait de côte. Par ailleurs, le modèle a été étendu vers le sud-est dans l'axe de la rivière au sud-est afin d'englober la totalité de la zone d'infiltration souterraine.

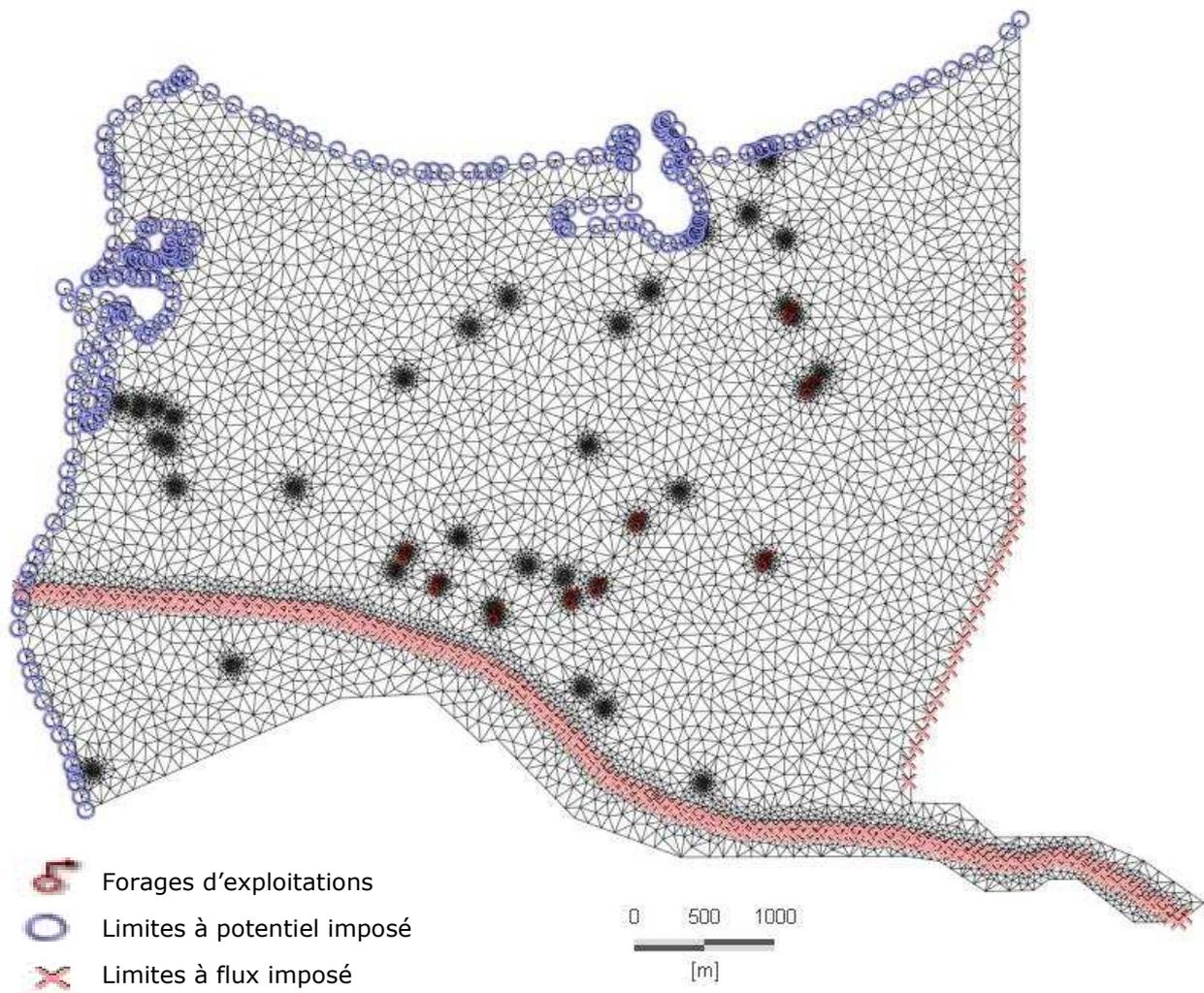


Figure 17 : Représentation du maillage et des différents types de limites du modèle

Le maillage en éléments finis présenté sur la Figure 17 est affiné le long de la Rivière des Galets et à l'emplacement des ouvrages de référence connus sur le secteur. Au total, sur toute l'épaisseur du modèle, on compte 228 390 éléments et 124 848 nœuds.

❖ Couches et géométrie du modèle

Le nombre de couches a été fixé à 15 par le bureau d'étude. La géométrie des couches est basée sur la différenciation lithologique des formations géologiques présentes au sein du cône alluvial de la Plaine des Galets. Les valeurs de conductivités hydrauliques ont été attribuées pour chaque couche dans des zones de géométries en fonction de la géologie rencontrée. Ces zones de géométries sont présentées pour chaque couche en annexe 1.

Les 15 couches correspondent aux formations géologiques suivantes de la surface vers le bas :

- les couches 1 à 3 représentent les alluvions de la nappe supérieure. Les zones de géométrie individualisent les lahars de la Rivière des Galets et de la Ravine à Marquet, les basaltes des phases III-IV et les alluvions de la nappe supérieure.

- la couche 4 : aquiclude représentant à la fois le mur de la nappe supérieure et le toit de la nappe moyenne.
- les couches 5 à 7 correspondent globalement à la nappe moyenne. Elles sont néanmoins subdivisées en plusieurs zones de géométries, correspondant aux alluvions, au lahar et aux basaltes des phases III-IV. Dans la partie basaltique des planèzes, la couche 7 correspond au paléosol qui existe régulièrement entre les formations de phases II et III. Ce niveau est très peu perméable et bloque ou ralentit les écoulements qui pourraient se faire vers le bas.
- la couche 8 correspond à l'aquiclude représentant le mur de la nappe moyenne et le toit de la nappe inférieure. Elle recoupe le lahar au sud du modèle dans sa partie inférieure.
- les couches 9 à 15 se situent entre la base de l'aquiclude sus-jacent et la base du modèle défini à -400 m NGR. Les zones de géométries individualisent les alluvions de la nappe inférieure et les basaltes de phase II.

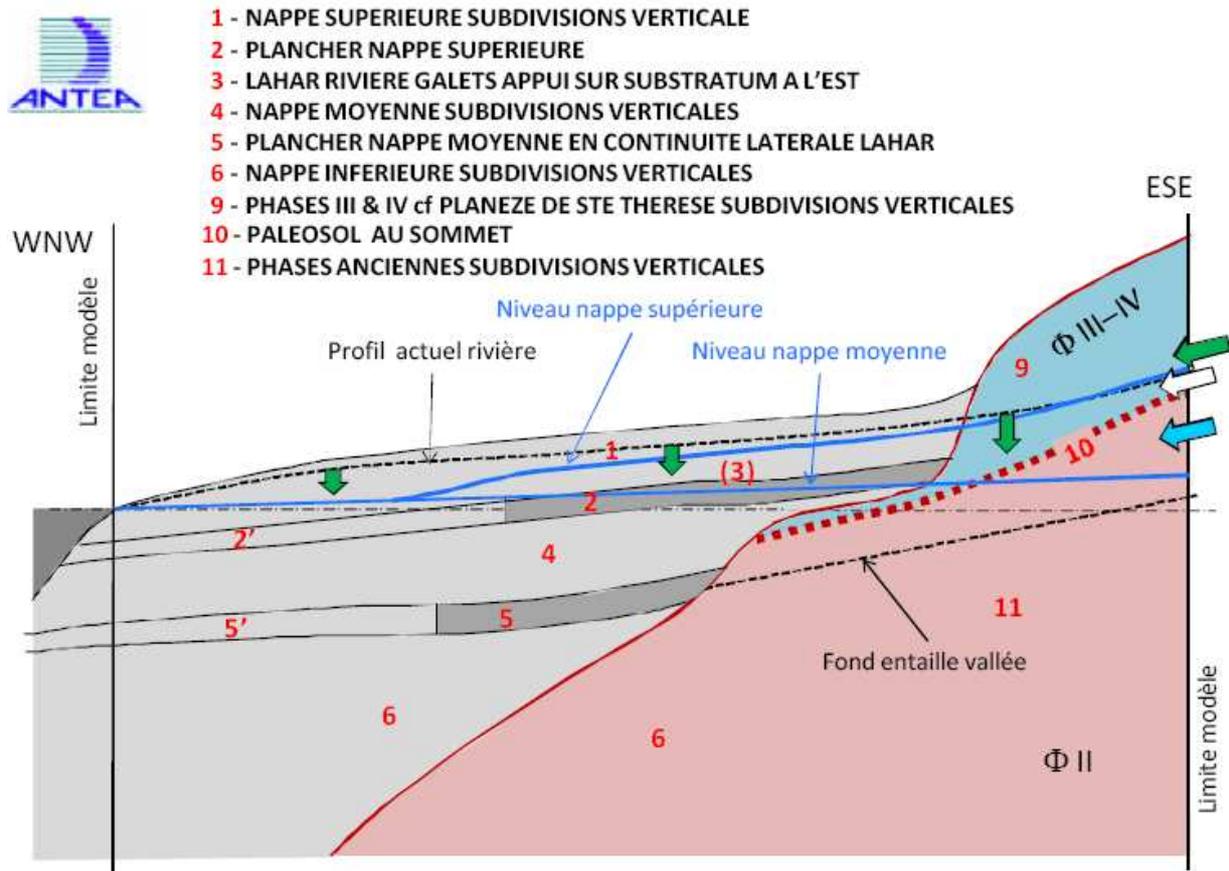


Figure 18 : Schéma conceptuel du modèle (ANTEA – Rapport n° 55794/D-année 2010)

❖ Points de contrôles

Les points de contrôle correspondent aux ouvrages (forages d'exploitations, piézomètres) pour lesquels des informations sur les charges hydrauliques sont

disponibles. Ils permettent de comparer les niveaux simulés aux niveaux mesurés sur le terrain afin d'évaluer la finesse et la justesse de la modélisation.

III.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 Plaine des Galets 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.

Illustrés par la Figure 18, les flux d'alimentations en limite est du modèle sont distribués sur les couches 9 à 15 et les flux d'infiltrations de la Rivière des Galets sont distribués sur la couche 1. Des limites à potentiels imposés égaux à 0 sont assignées sur toutes les couches au niveau du littoral.

❖ Les perméabilités.

Les valeurs issues de l'interprétation de pompages d'essais et celles déterminées pendant le calage du modèle (ANTEA, Rapport n°55794/D) restent dans les mêmes gammes de valeurs. Elles seront utilisées comme valeurs de références.

	Perméabilité moyenne tirée des pompages d'essai	Perméabilité à l'issue du calage
Nappe alluviale supérieure	2.10^{-4}	$5,0.10^{-5}$
Aquitard n°1	-	$1,0.10^{-7}$
Nappe alluviale moyenne	$6,5.10^{-4}$	$5,0.10^{-4}$
Aquitard n°2	-	$1,0.10^{-7}$
Nappe alluviale inférieure	-	$1,0.10^{-5}$
Lahars	-	$1,0.10^{-9}$
Paléosol	-	$1,0.10^{-7}$
Tranche supérieure basaltes	$9,5.10^{-3}$	$2,0.10^{-2}$
Ranche inférieure basaltes	-	$5,0.10^{-5}$

Tableau 1 : Perméabilités des différentes formations géologiques (ANTEA – Rapport n° 55794)

❖ Les porosités.

La porosité efficace gouverne l'écoulement de l'eau au sein d'un massif. Les valeurs introduites dans le modèle apparaissent dans le tableau 2 ci-dessous.

	Porosités efficaces
Aquifères	15%
Aquicludes	25%
Lahars	5%
Basaltes	5%
Paléosol	30%

Tableau 2 : Porosités efficaces des différentes formations géologiques (ANTEA – Rapport n° 55794)

❖ L'alimentation du système aquifère.

Trois sources principales d'alimentation des nappes de la Plaine des Galets ont été définies : une d'origine souterraine provenant des écoulements au sein du massif basaltique, une autre due aux infiltrations le long de la Rivière des Galets et une liée aux apports par les précipitations (130 mm/an). La répartition de ces flux sur le modèle est présentée en annexe 2.

- Alimentation souterraine à travers le massif basaltique

Ces flux souterrains sont la conséquence des infiltrations d'eau depuis la Ravine des Lataniers, la Ravine à Marquet et la Planèze Sainte-Thérèse. Ils sont appliqués en limite Est du modèle.

Dénomination	Volume annuel (m3)	Débit / nœuds (m3/s)
R. des Lataniers	4 953 675	9.03516 E-7
R. à Marquet	3 991 196	2.43089 E-7
Planèze Sainte-Thérèse	5 173 544	1.181065 E-7

Tableau 3 : Alimentation souterraine en limite Est

- Infiltration le long de la Rivière des Galets

On différencie trois biefs d'infiltrations différents, amont, intermédiaire et aval (cf. Figure 5). Les volumes correspondent au calcul de la distribution des trois modules d'infiltration le long de la rivière. Ces valeurs sont appliquées sur la couche de surface du modèle et les volumes se déversent donc dans la nappe supérieure.

Bief d'infiltration	Volume annuel (m3)	Débits / nœuds (m3/s)
Amont	2 516 573	1.13 E-6
Intermédiaire	16 022 811	2.9245 E-6
Aval	11 324 578	2.87 E-6

Tableau 4 : Alimentation par infiltration le long de la Rivière des Galets

❖ L'exploitation du système aquifère

L'exploitation du système se fait à la faveur de 11 ouvrages destinés à l'alimentation en eau potable de la population. La plupart d'entre eux exploitent la nappe moyenne, alors que d'autres captent les eaux du massif basaltique plus à l'Est.

Les valeurs fournies dans le tableau 5 sont des moyennes des modules annuels sur la période 2000-2008 (rapport ANTEA n° 55794/D).

Nom usuel	code BSS	Code OE	Débits (m3/s)	Couche atteinte
Forage Balthazar	12263X0087/F	13087	0.0262	9
Forage Ravine à Marquet	12263X0111/S2	13001-B	0.0495	9
Forage SAMY	12263X0050/P	13050	0.0629	9
Forage F6	12262X0175/F6	12175	0.0249	9
Forage Mounien	12262X0044/F1		0.0153	5
Forage F2	12262X0135/F2	12135	0.0114	5
Forage F3	12262X0136/F3	12136	0.0463	5
Forage F4	12262X0048/F4A	12048	0.0296	5
Forage F5	12262X0168/F5	12168	0.0268	5
Forage P11	12262X0070/P1	12070	0.0537	5
Forage EDF	12262X0046/F	12046	0.0347	5

Tableau 5 : Forages d'exploitation et débits moyen annuel exploité (2000 - 2008)

III.2 Modélisation des écoulements souterrains en régime permanent

III.2.1 Méthode de calage du modèle en régime permanent

Cette étape consiste à ajuster le schéma conceptuel en fonction des résultats des niveaux piézométriques obtenus par les premières modélisations. Des résultats de calage satisfaisants ont été obtenus après plus de 20 essais. La principale difficulté a résidé dans l'adaptation des données d'entrées aux méthodes de calculs différentes entre les deux modèles.

Dans l'ensemble, les valeurs de perméabilités initiales n'ont pas été modifiées à l'exception de celles de la nappe moyenne qui a du être diminuée d'un facteur 10 ($5,0 \cdot 10^{-5}$ m/s).

III.2.2 Résultats de calage

Les Figure 19, Figure 20 et Figure 21 présentent la piézométrie obtenue pour la nappe supérieure, la nappe moyenne et la nappe inférieure. Les points de contrôles (piézomètres et forages d'exploitations) sont aussi représentés.

❖ Nappe supérieure

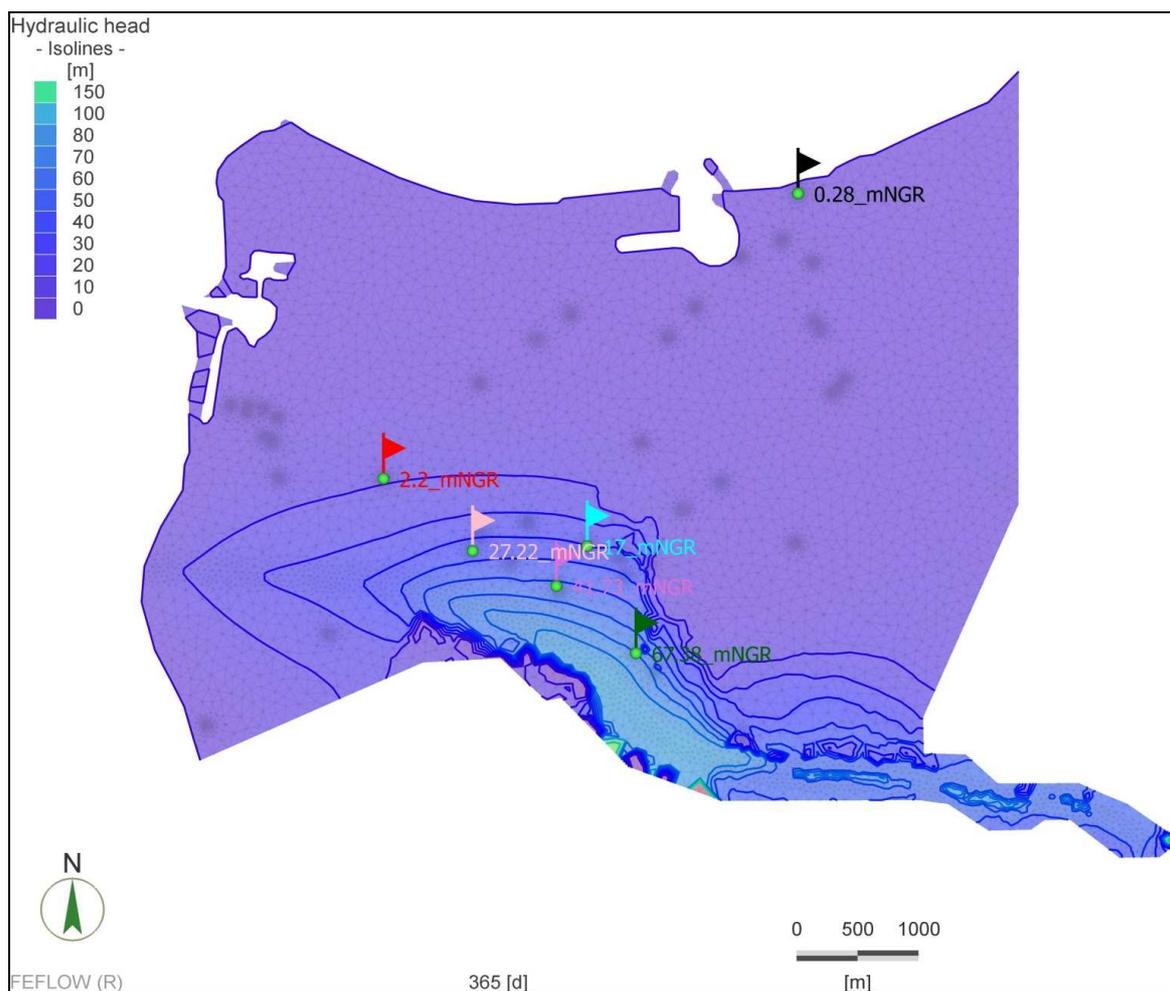


Figure 19 : Niveaux piézométriques simulés dans la nappe supérieure (en m NGR)

Les niveaux simulés sur la nappe alluviale supérieure sont en corrélation avec les niveaux mesurés sur les points de référence. L'alimentation due aux infiltrations de la Rivière des Gales et l'effet de seuil créé par le lahar en limite sud sont bien visible. Cette formation très imperméable a pour effet de dévier les écoulements vers le nord. Certains nœuds présentent des piézométries aberrantes supérieures à 150 mNGR. Ils se trouvent à proximité du lit de la Rivière des Galets où le modèle doit combiner des flux importants venant des infiltrations et la barrière hydraulique imperméable qui bloque les écoulements (lahar). Ces artéfacts numériques restent localisés et ils n'ont pas d'influence réelle sur les résultats du modèle.

Nappe alluviale supérieure			
Piézomètre		Piézométrie (mNGR)	
Code BSS	Code OE	Mesurée	Simulée
12263X0077/F5	13077	0.28	0.69
12262X0056/P3	12056-A	2.2	3.9
12262X0172/P1-2A	12172	41.73	46.04
12262X0057/P4-A	12057	67.38	69.77
12262X0065/P8-A	12065	27.22	26.93
12262X0052/SPZ1	12052	17	11.62

Tableau 6 : Résultats du calage pour la nappe alluviale supérieure

Comme le montre le tableau 6, les ordres de grandeur des niveaux piézométriques simulés sont en accord avec les niveaux réels. La précision n'est pas très bonne avec des niveaux simulés supérieurs à la réalité mais les tendances et les sens d'écoulement sont globalement bien représentés.

❖ Nappe moyenne

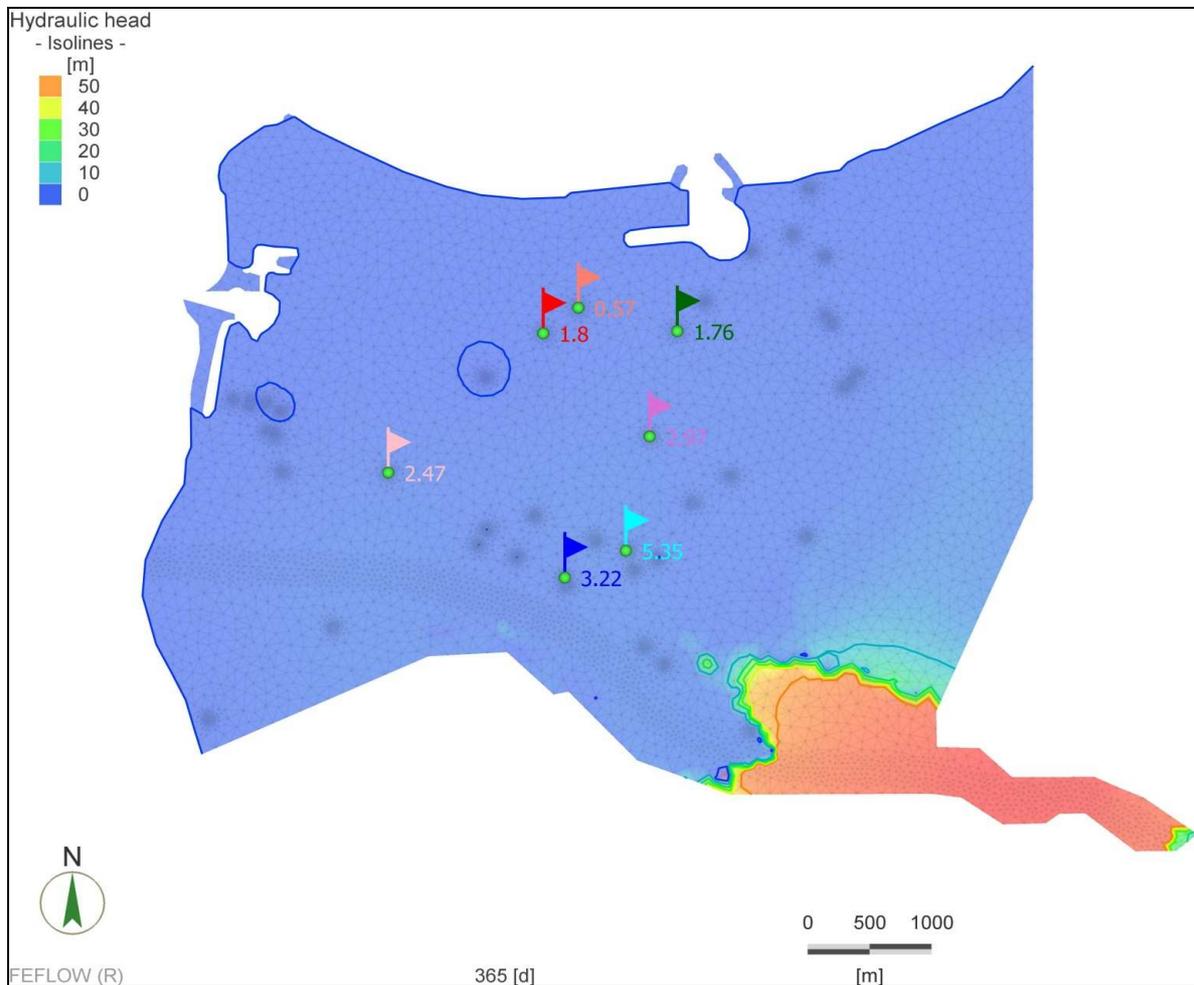


Figure 20 : Niveaux piézométriques simulés dans la nappe moyenne (en m NGR)

Au niveau de la nappe alluviale moyenne de la Rivière des Galets, la corrélation est bonne entre des niveaux piézométriques simulés et les niveaux mesurés sur les ouvrages de référence. Seuls les niveaux piézométriques simulés pour les forages 12171-B et 12123 sont en décalage avec les niveaux observés.

Le secteur Sud-Est est marqué par une alimentation importante associée au bief d'infiltration amont de la Rivière des Galets. Le modèle représente clairement l'influence des puits de pompage EDF et P11 (cercles bleus).

Nappe alluviale moyenne			
Piézomètre		Piézométrie (mNGR)	
Code BSS	Code OE	Mesurée	Simulée
12262X0134/GTM-2	12134	1.8	1.66
12262X0066/FT-6A	12066	2.97	2.24
12262X0064/FT-5A	12064	1.76	1.12
12262X0056/P3	12056-B	2.47	2.77
12262X0337/P2-B	12173-B	5.35	4.98
12262X0336/P1-1B	12171-B	3.22	0.29
12262X0123/SEP-2	12123	0.57	2.59

Tableau 7 : Résultats du calage pour la nappe alluviale moyenne

❖ Nappe inférieure

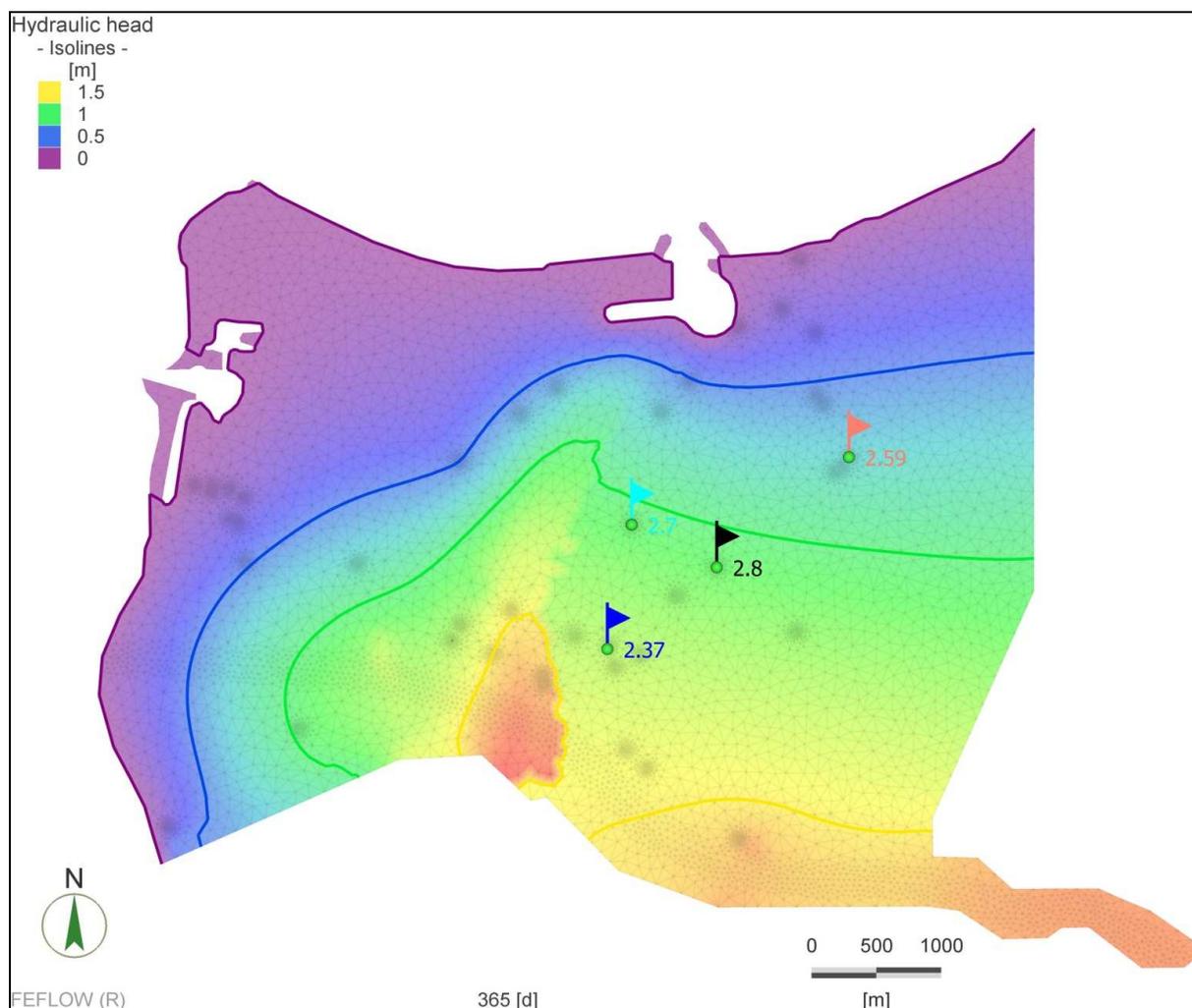


Figure 21 : Niveaux piézométriques simulés dans la Nappe inférieure (en m NGR)

La simulation des niveaux piézométriques de la nappe alluviale inférieure de la Rivière des Galets est quand à elle moins bien corrélée avec les niveaux mesurés sur les ouvrages de référence. En effet, les niveaux simulés dans les piézomètres de référence sont plus bas que les niveaux mesurés (environ un mètre d'écart).

Il est très probable que cet écart soit lié à la présence de sels dans la nappe inférieure. A ce stade du calage, l'apport de sels n'a pas été modélisé. L'ajout de sels

dissous dans l'eau augmentera la densité du fluide ce qui entraînera une hausse des niveaux piézométriques dans les ouvrages de référence.

De plus l'alimentation en limite Est, censée alimenter prioritairement cette nappe n'est pas visible et donne l'impression d'une limite imperméable. Cependant, la tendance d'une nappe avec un faible gradient et des niveaux piézométriques bas (2 à 2.5 mNGR) comparé aux nappes qui lui sont supérieure est respectée.

Nappe alluviale inférieure			
Piézomètre		Piézométrie (mNGR)	
Code BSS	Code OE	Mesurée	Simulée
12262X0318/FT-6B	12066-B	2.7	1.1
12262X0174/P3	12174	2.37	1.3
12263X0036/S4	13036	2.59	0.75
12262X0053/S2	12053	2.8	1.1

Tableau 8 : Résultats du calage pour la nappe alluviale inférieure

III.3 Modélisation des intrusions salines

Cette étape n'a pas pu être modélisée car la structure complexe de la géométrie du modèle entraîne de nombreuses erreurs numériques qui bloquent le modèle pendant la phase de calcul.

La méthode nécessite des ajustements de la géométrie du modèle conceptuel afin d'obtenir des résultats conformes à la réalité. De nouveaux essais seront réalisés lors d'une prochaine étude après une simplification de la structure du modèle et une extension de ses limites à la rive gauche de la Plaine des Galets.

IV Conclusions

IV.1 Synthèse

La conception du modèle mathématique représentatif de l'écoulement souterrain permet d'apporter une aide à la compréhension du système aquifère complexe de la plaine alluviale de la Rivière des Galets.

Les résultats obtenus sont suffisamment représentatifs des différences de comportement reconnues entre les trois unités principales de ce système. Les tendances piézométriques caractéristiques des nappes supérieure, moyenne et inférieure indiquent une « image » en corrélation avec la réalité. L'équilibre réel des circulations d'eau souterraines entre la recharge, les pertes en mer et les prélèvements du système aquifère est respecté.

Cet outil informatique permet de simuler l'impact de certains scénarii comme par exemple une augmentation des prélèvements ou une diminution de la recharge et ainsi être capable d'alerter le public des conséquences encourues.

IV.2 Problèmes rencontrés

La reprise du modèle hydrodynamique réalisé par ANTEA, sous le logiciel FEFLOW a été difficile.

Le logiciel de modélisation MARTHE utilisé par ANTEA travaille en différences finies alors que le logiciel FEFLOW fonctionne en éléments finis. Cette différence demande un certain nombre de réajustements des données d'entrée.

Dans un premier temps, une restructuration complète de ces fichiers d'entrée a été nécessaire. Les fichiers concernant la topographie des différentes couches du modèle ont dû être arrangés de façon à obtenir la bonne structure géométrique. Ensuite, les fichiers concernant les paramètres hydrodynamiques ont dû être, eux aussi, retravaillés afin de les introduire dans le logiciel de modélisation.

Dans un second temps, les flux d'alimentation ont dû être recalculés pour les assigner à un certain nombre de nœuds contrairement au logiciel MARTHE qui répartit les flux sur des surfaces représentées par les mailles.

Toutes ces étapes compliquent la reprise d'un modèle à partir des données utilisées par un autre logiciel de modélisation, qui plus est, lorsque l'un travaille en différences finies et l'autre en éléments finis.

D'autres difficultés sont apparues à l'obtention des résultats de modélisation. La piézométrie de certains nœuds est incohérente avec l'ensemble des résultats. Des piézométries extrêmement élevées se retrouvent à des endroits précis du modèle et sur des couches différentes. L'origine de ces problèmes provient de la définition du modèle conceptuel et plus particulièrement du choix des limites. Les contrastes de faibles et fortes perméabilités aux contacts entre basaltes fissurés (0.02 m/s) et lahars ($1,0E^{-9}$ m/s) sont trop proches et provoquent des erreurs de calcul.

IV.3 Pistes d'amélioration du modèle

Il paraît essentiel d'obtenir de meilleurs résultats en régime permanent, notamment pour la nappe alluviale inférieure, avant de pousser l'analyse en régime transitoire et d'étudier les intrusions salines dans ce système aquifère. Ainsi, l'influence de la présence de sels dans la nappe inférieure pourra être observée sur les niveaux piézométriques. .

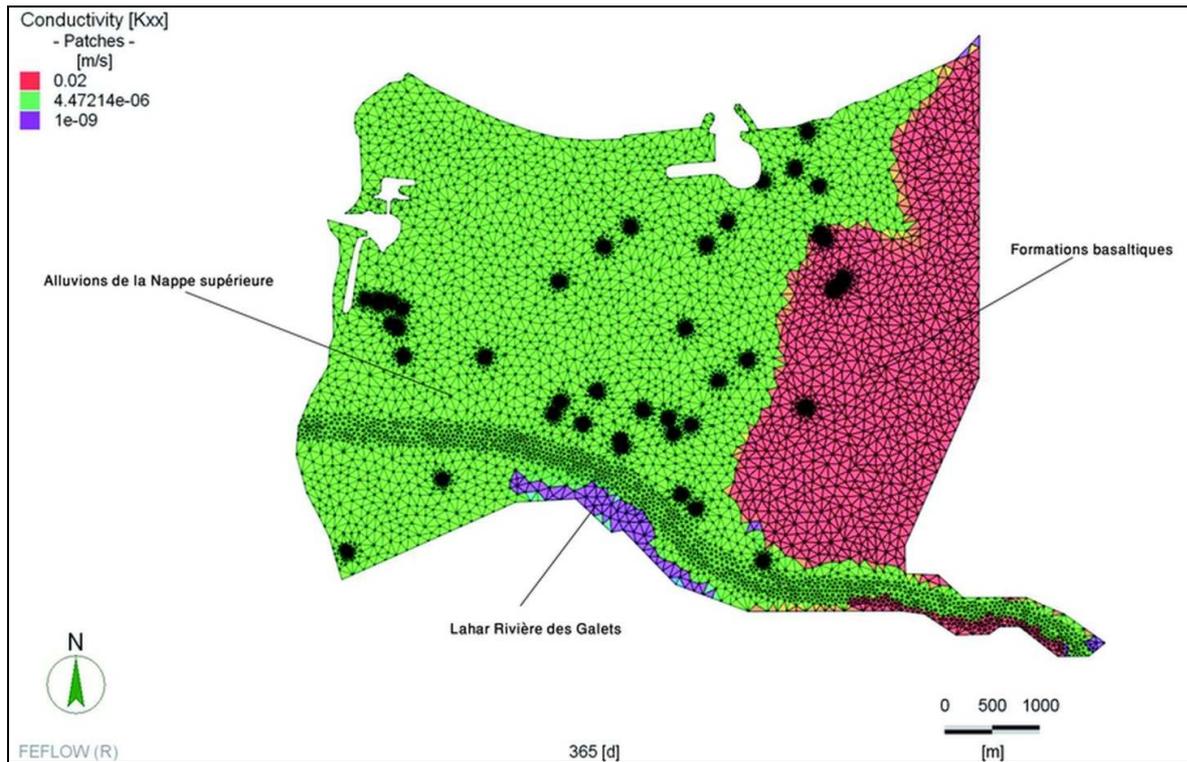
Afin d'améliorer les résultats du modèle en régime permanent, plusieurs pistes sont envisagées :

- Extension de la zone de modélisation au niveau de la rive gauche de la Rivière des Galets. Cette extension aura pour but d'éviter de mettre une limite à flux imposé à proximité d'une limite à flux nul ;
- Réduction du nombre de couches pour faciliter le calcul ;
- Atténuation des contacts brutaux entre des coulées boueuses très peu perméables et les alluvions plus perméables.

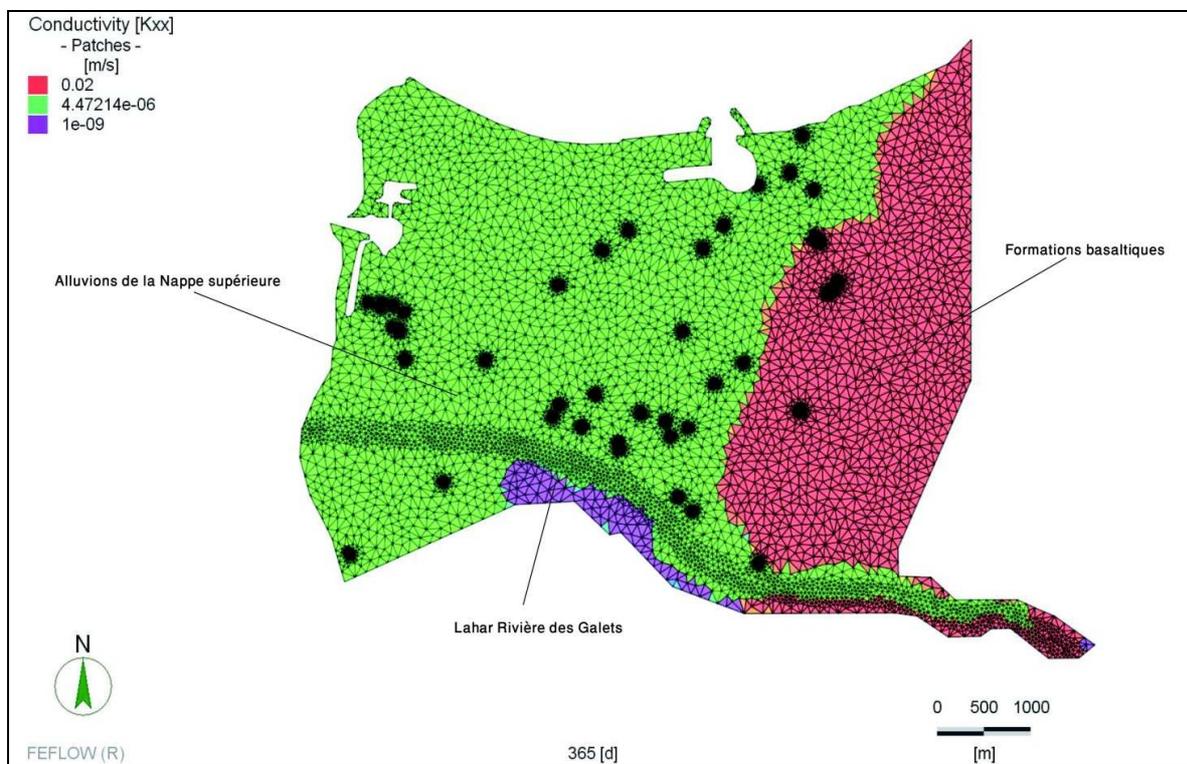
ANNEXES

Annexe 1

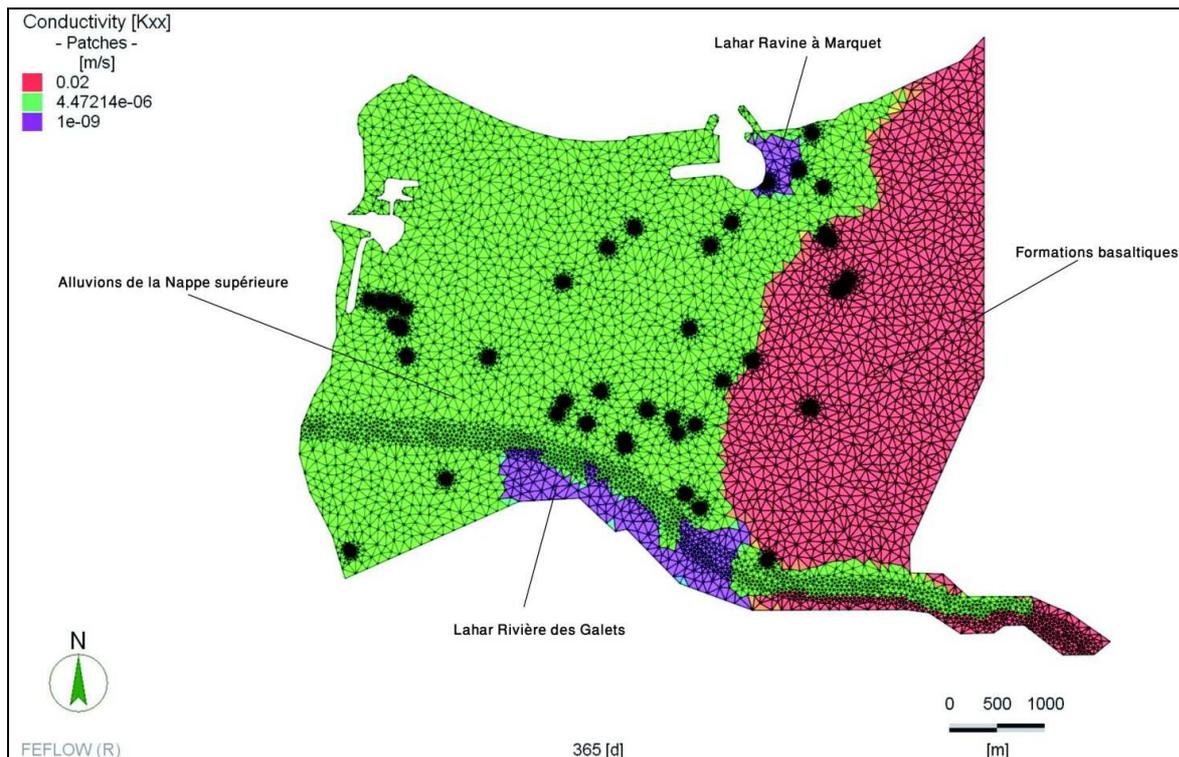
Zones de géométries



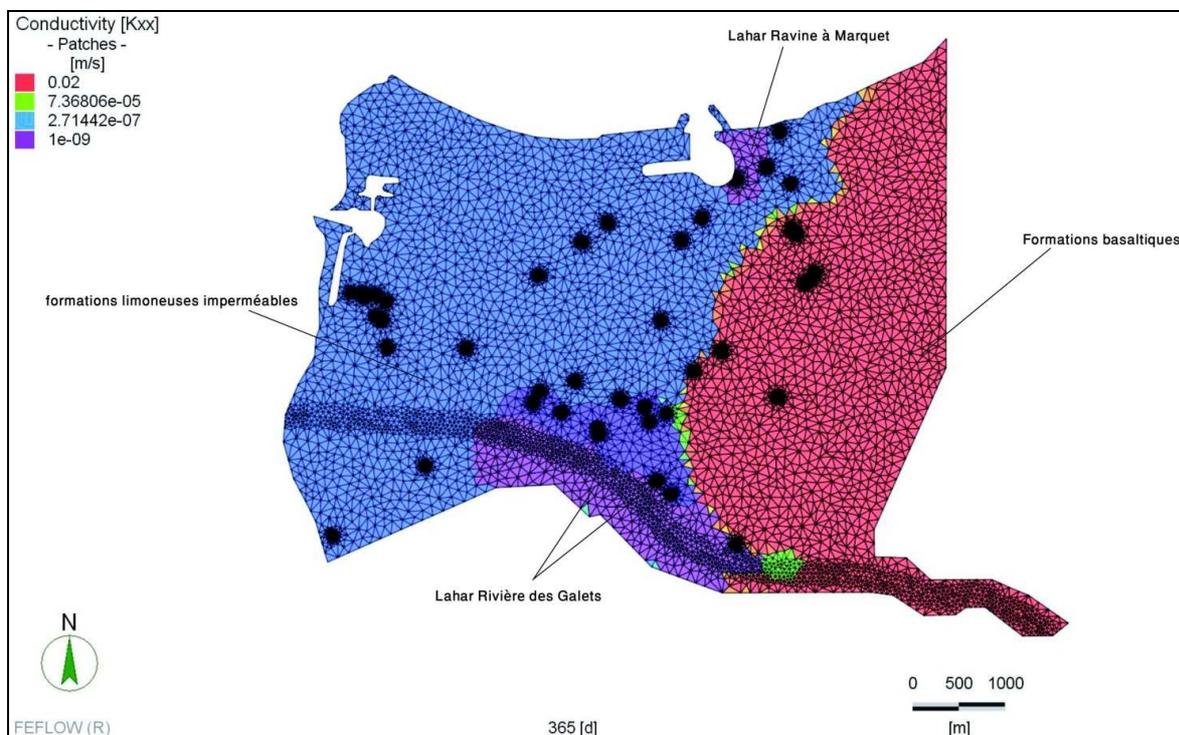
Extension des différentes zones de géométries – Couche 1



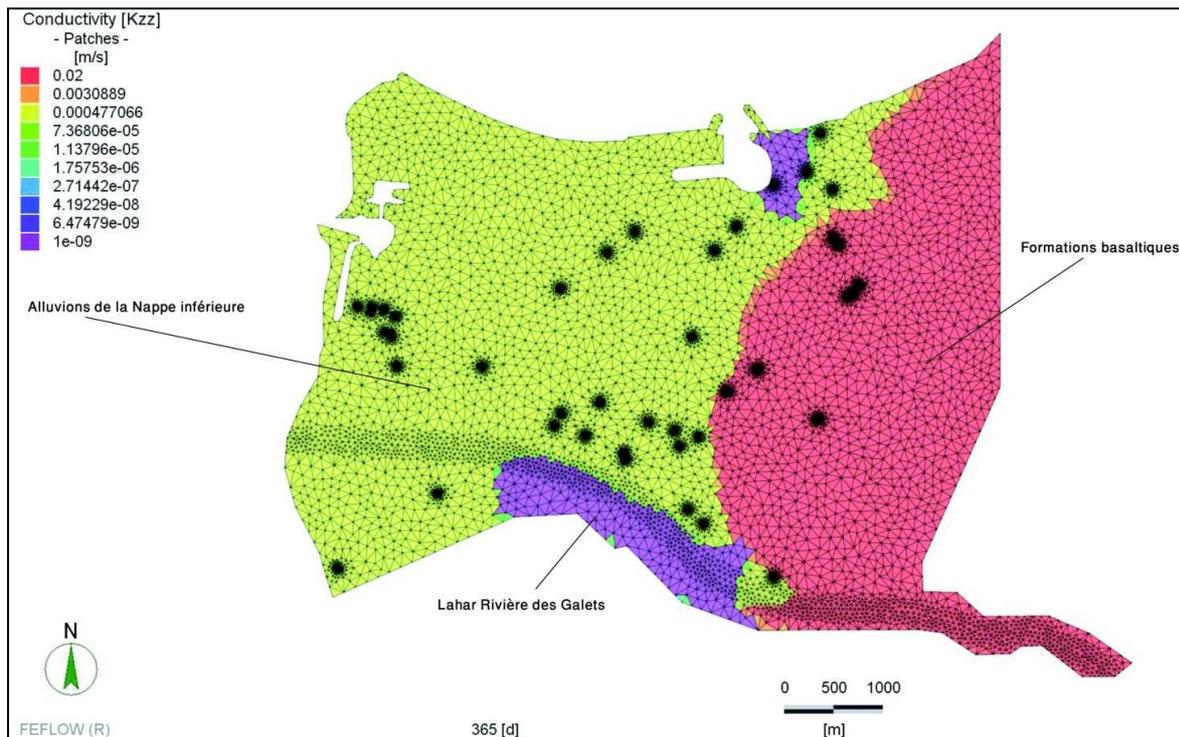
Extension des différentes zones de géométries – Couche 2



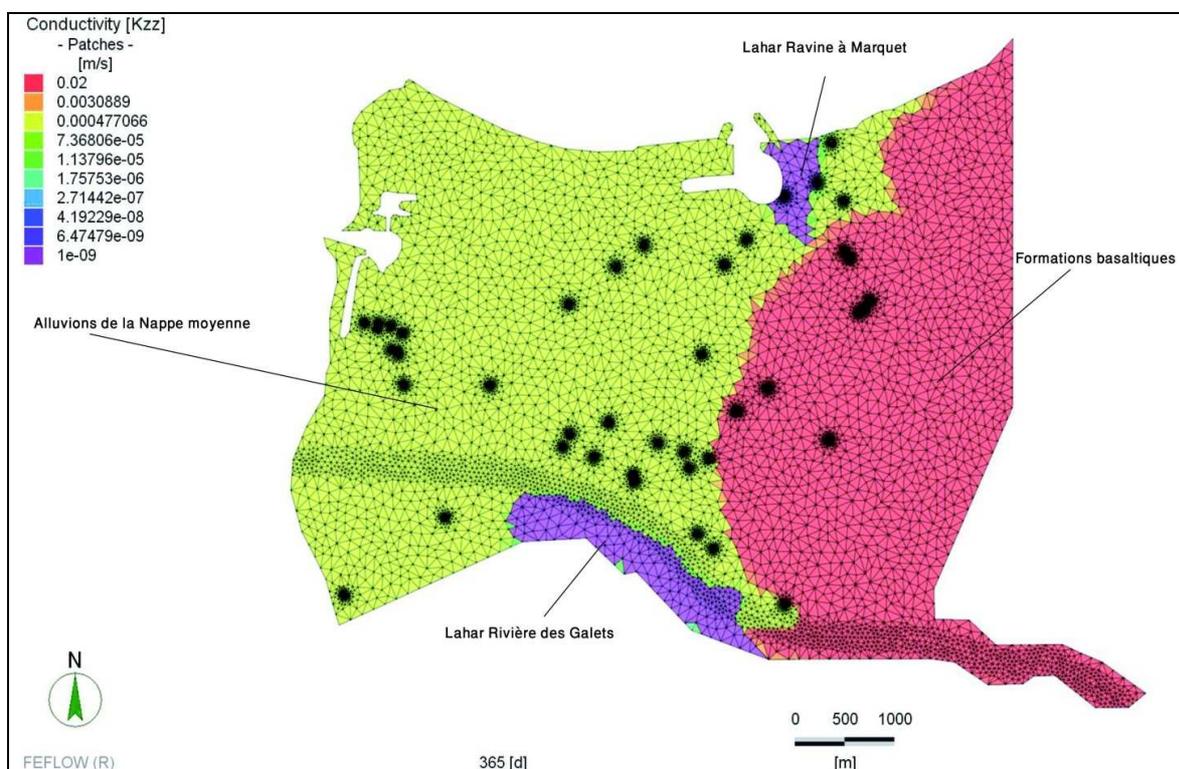
Extension des différentes zones de géométries – Couche 3



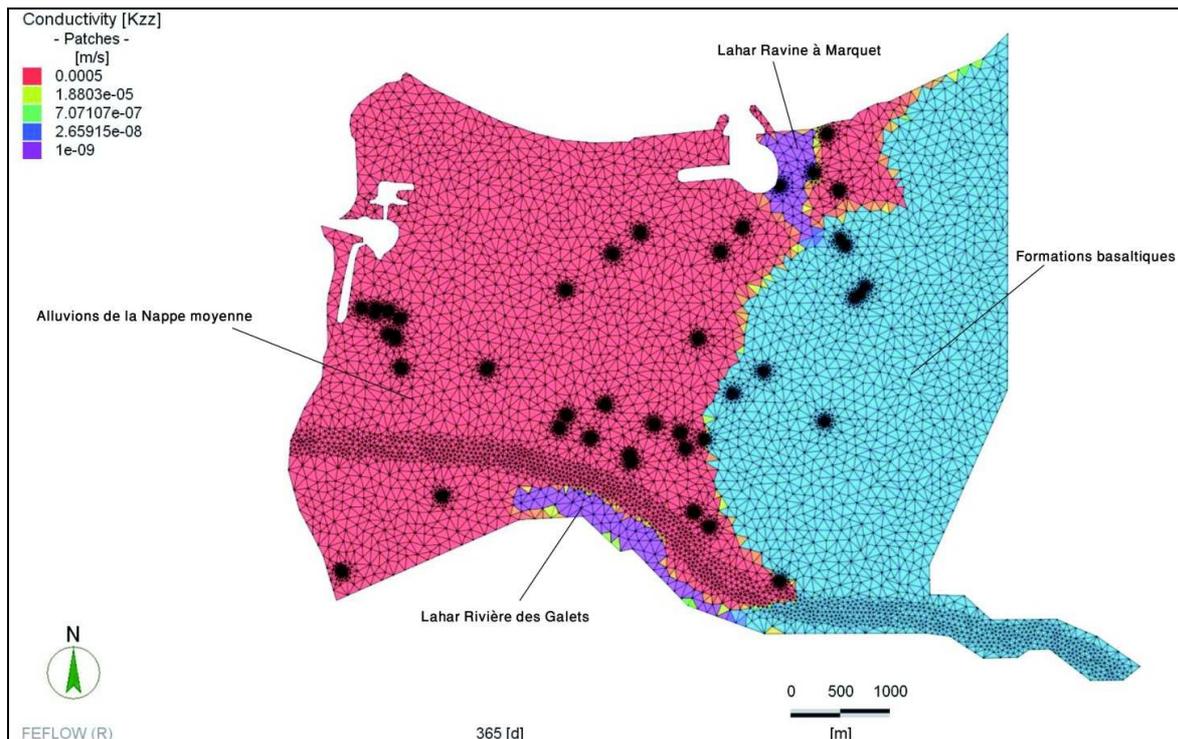
Extension des différentes zones de géométries – Couche 4



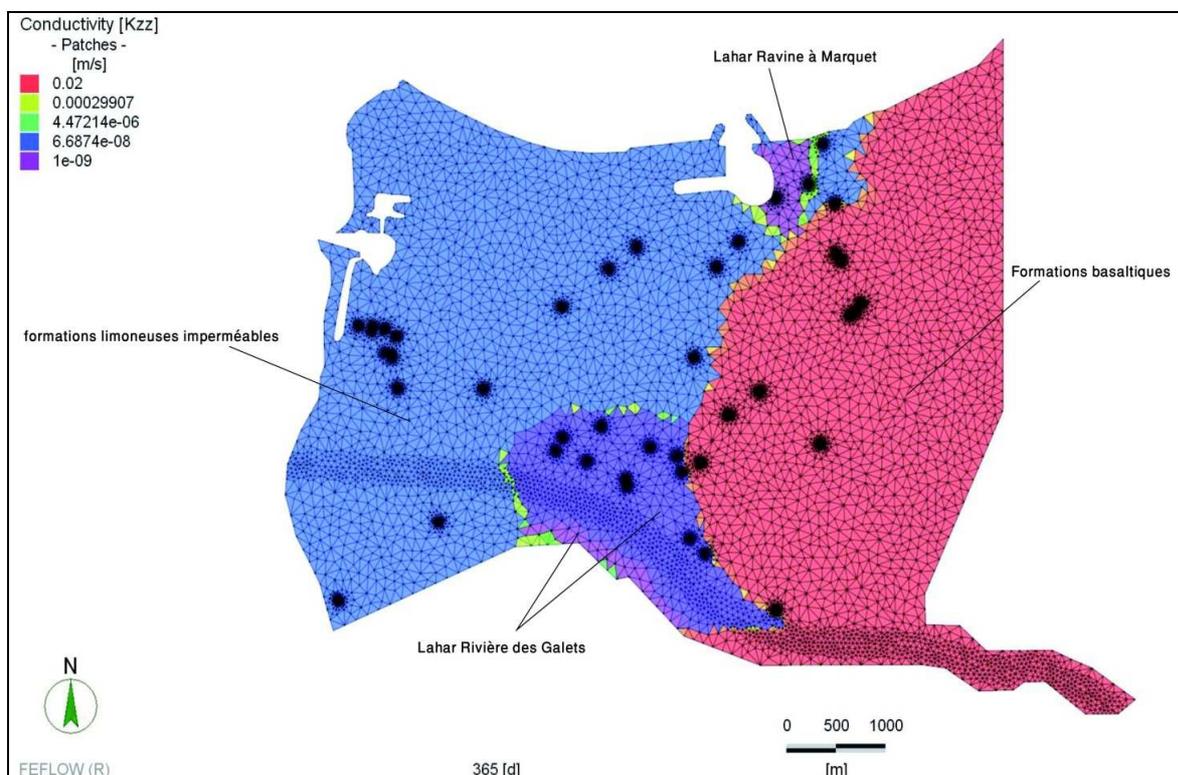
Extension des différentes zones de géométries – Couche 5



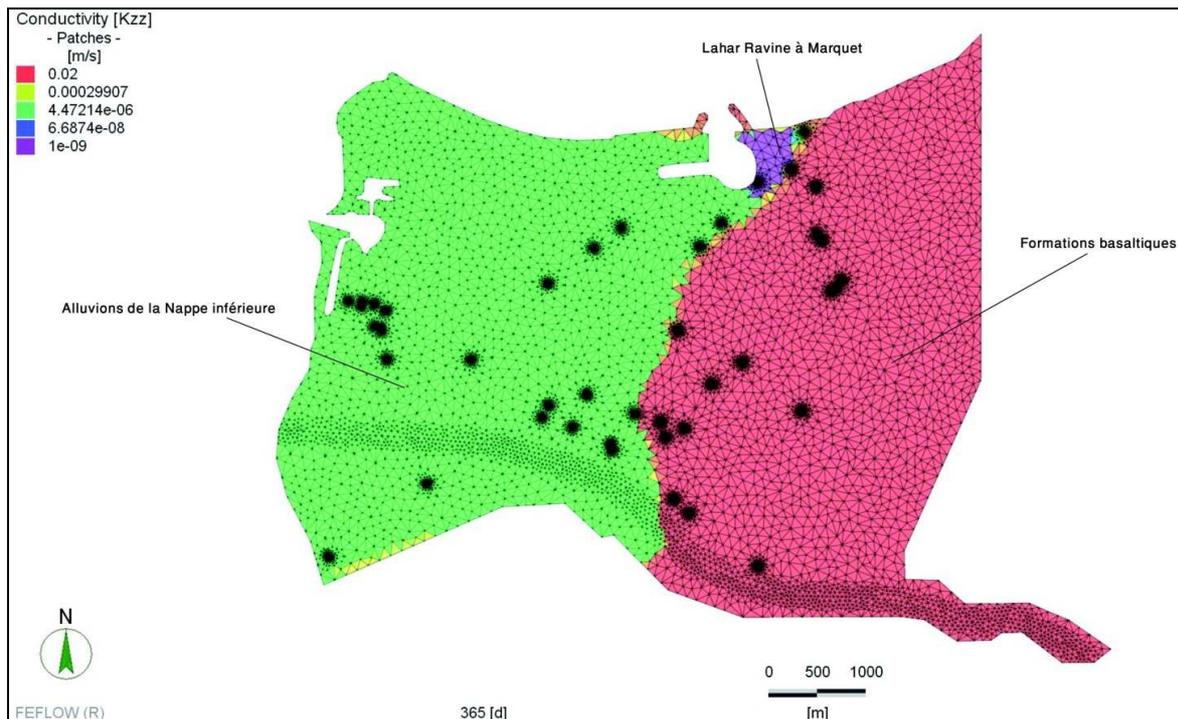
Extension des différentes zones de géométries – Couche 6



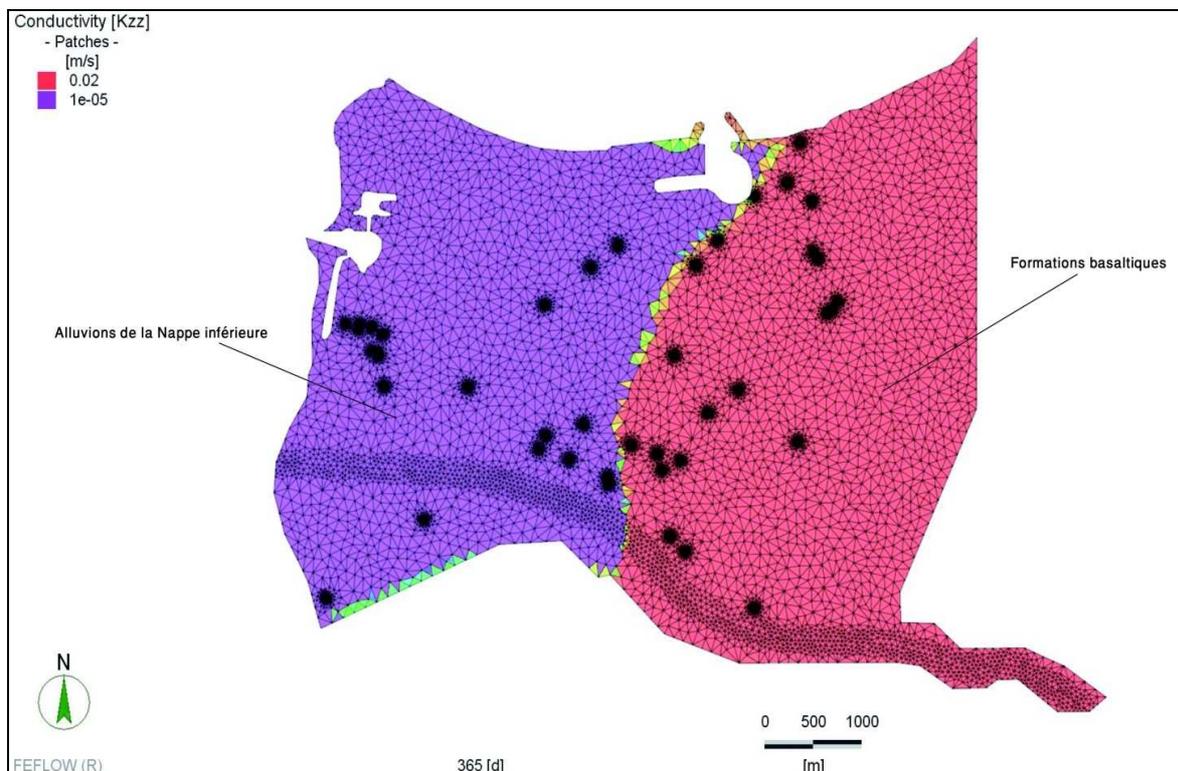
Extension des différentes zones de géométries – Couche 7



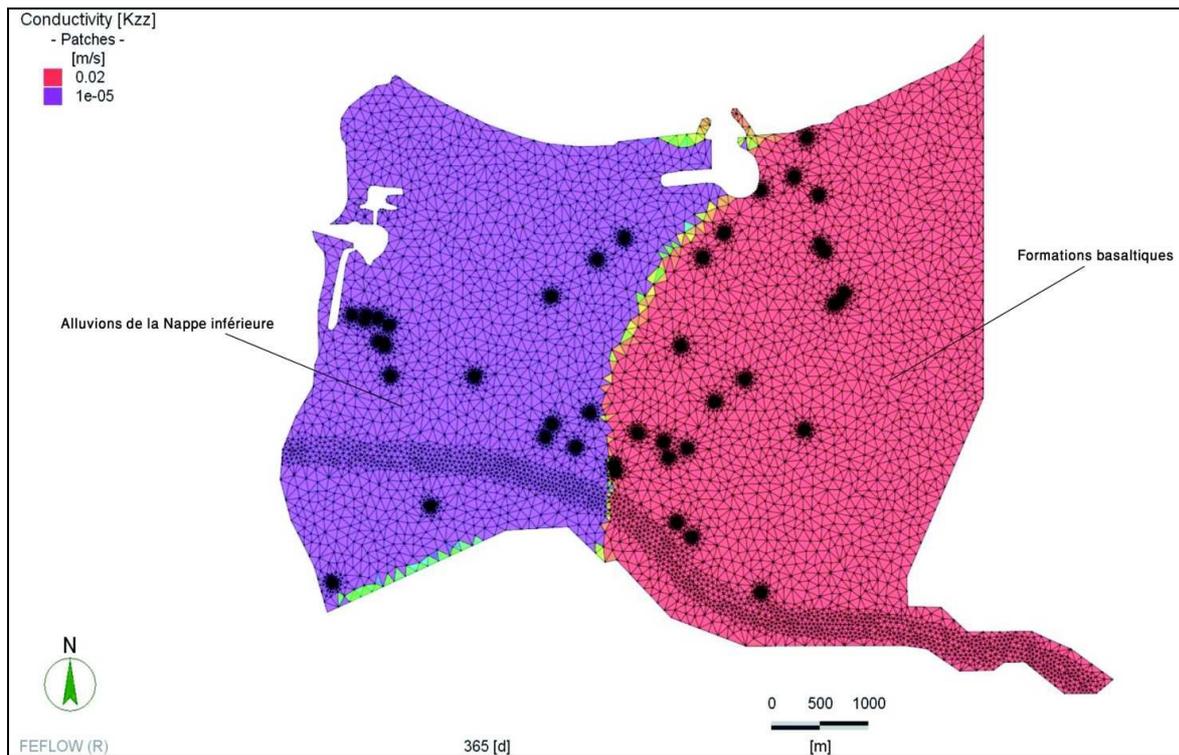
Extension des différentes zones de géométries – Couche 8



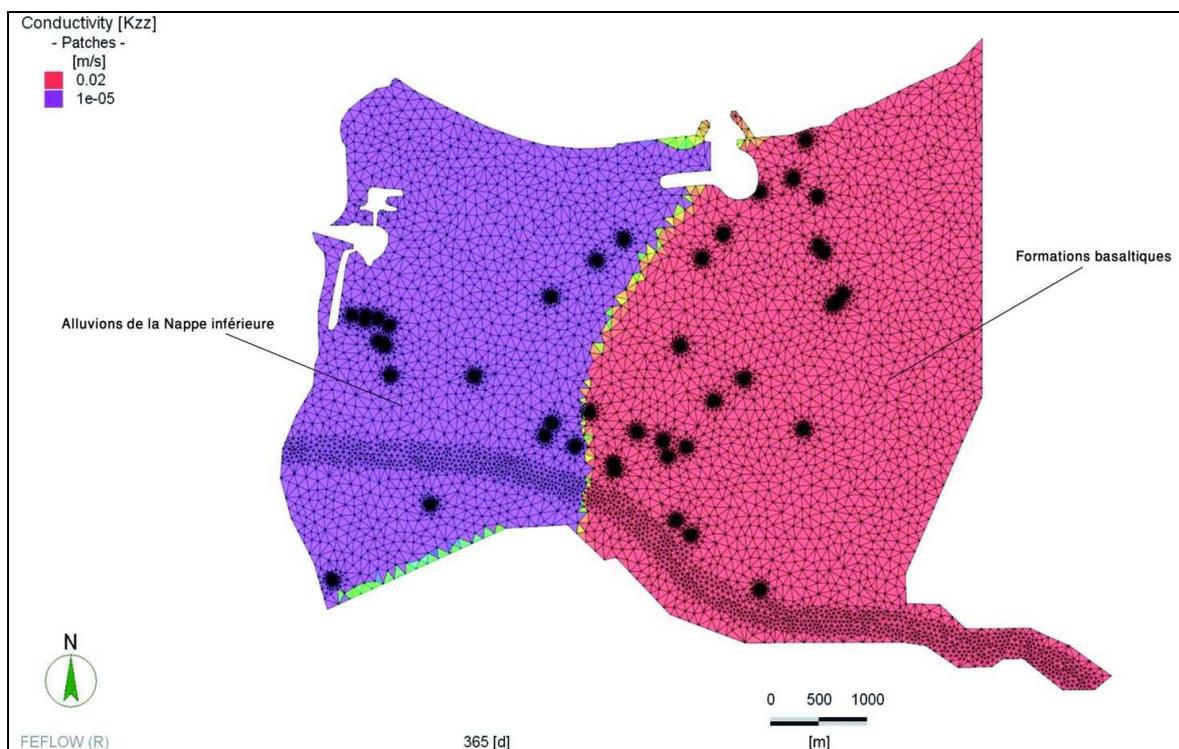
Extension des différentes zones de géométries – Couche 9



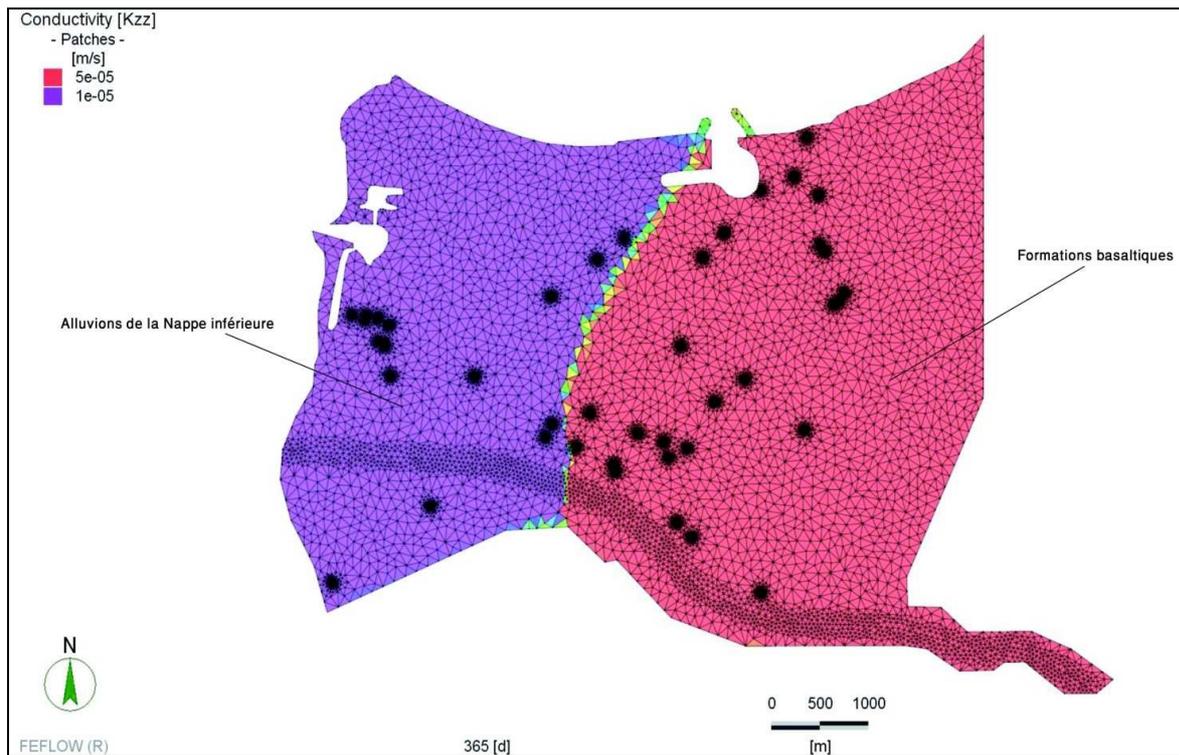
Extension des différentes zones de géométries – Couche 10



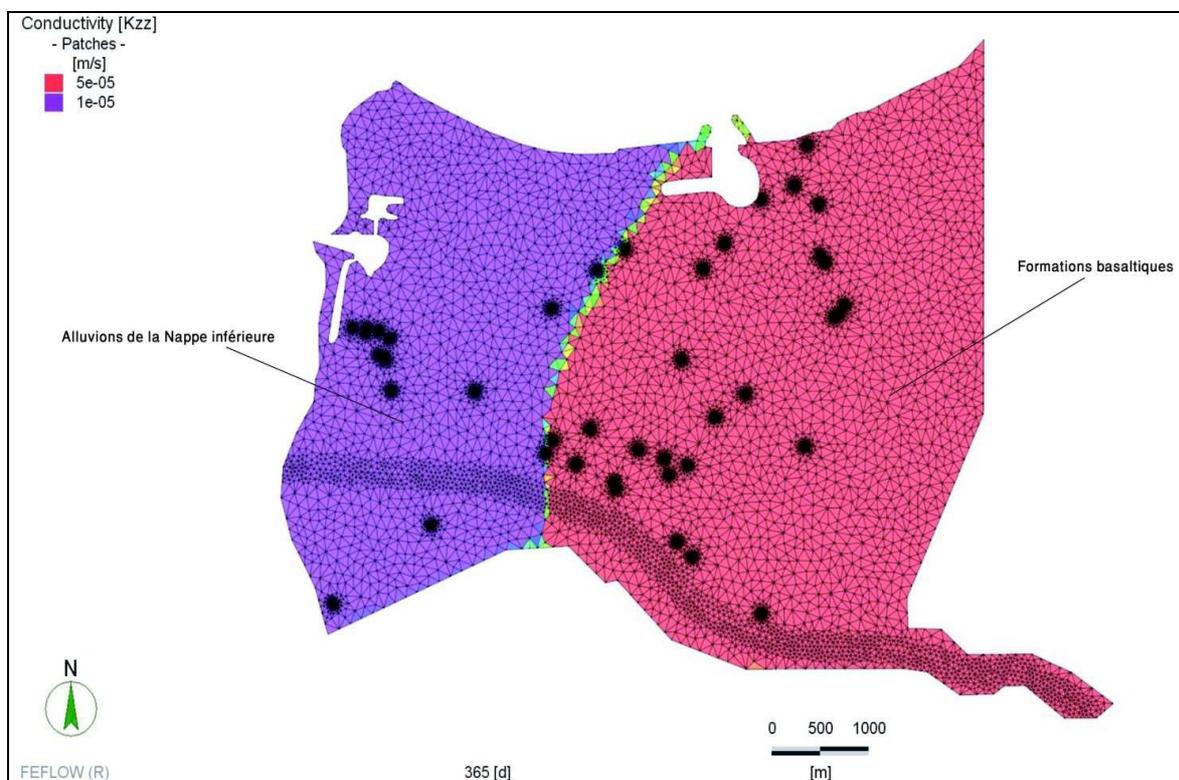
Extension des différentes zones de géométries – Couche 11



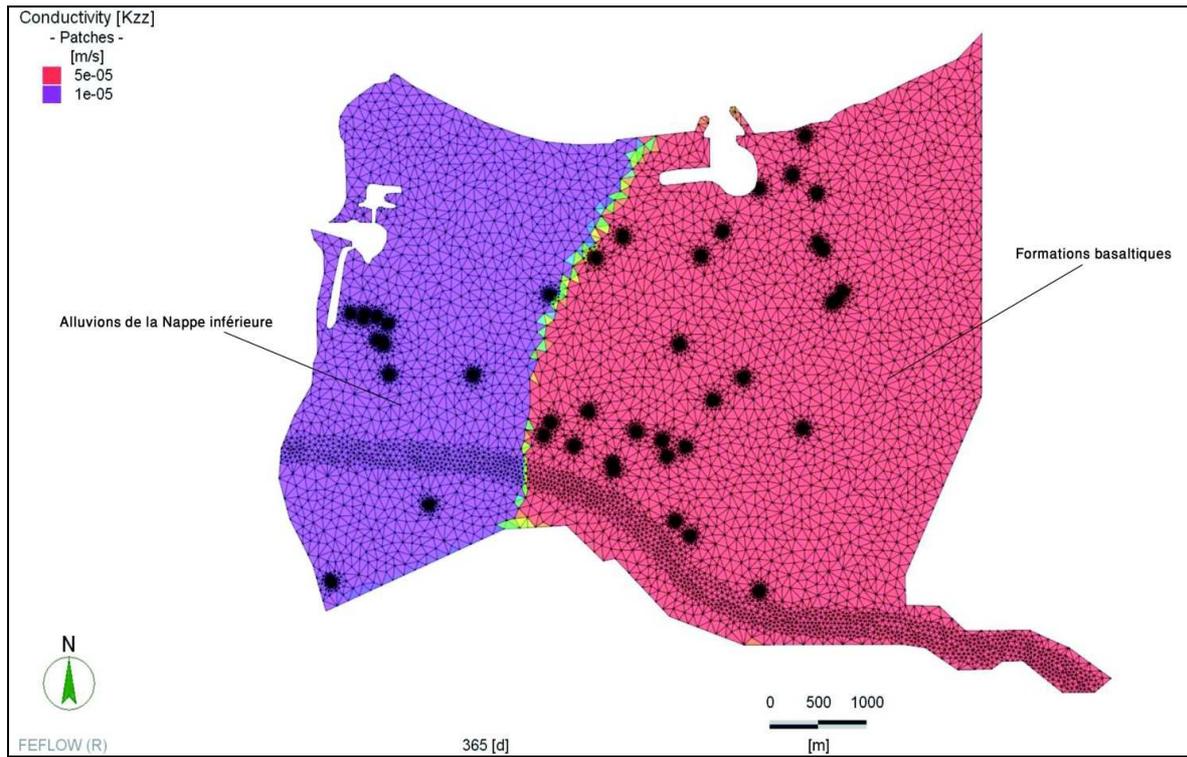
Extension des différentes zones de géométries – Couche 12



Extension des différentes zones de géométries – Couche 13



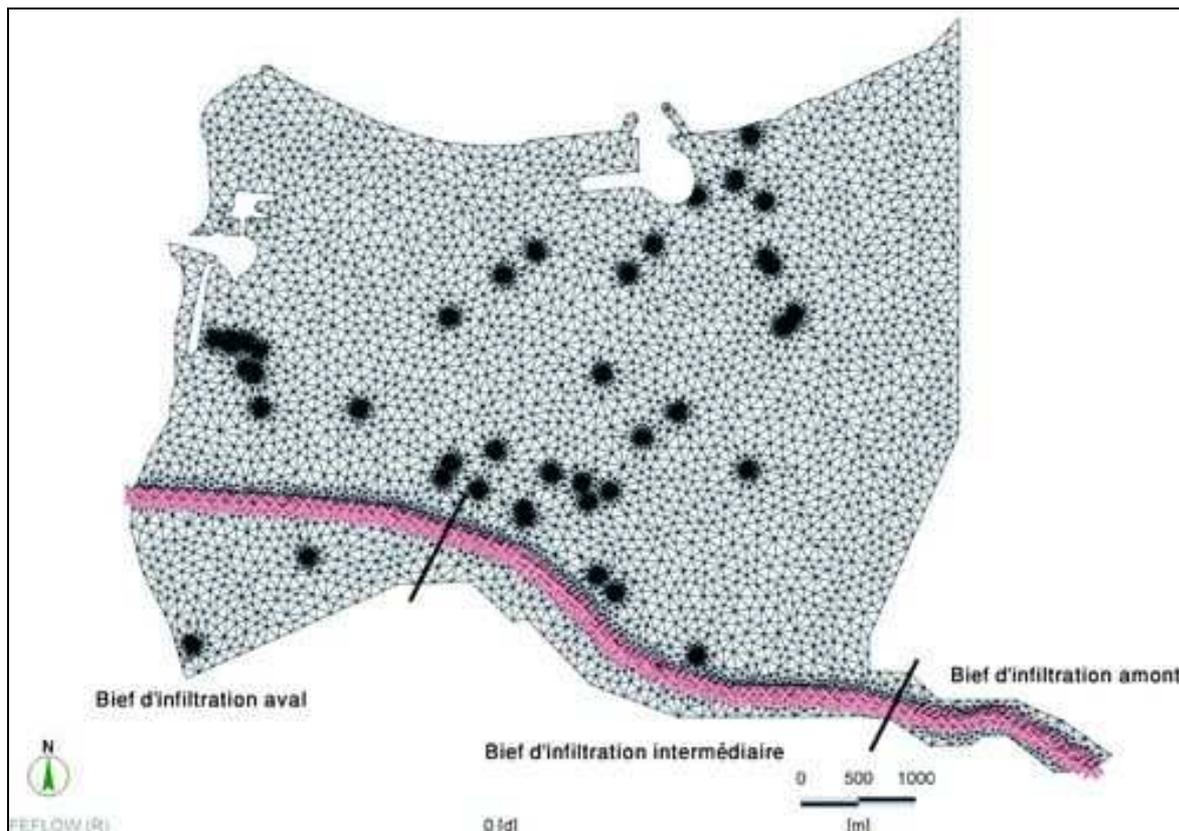
Extension des différentes zones de géométries – Couche 14



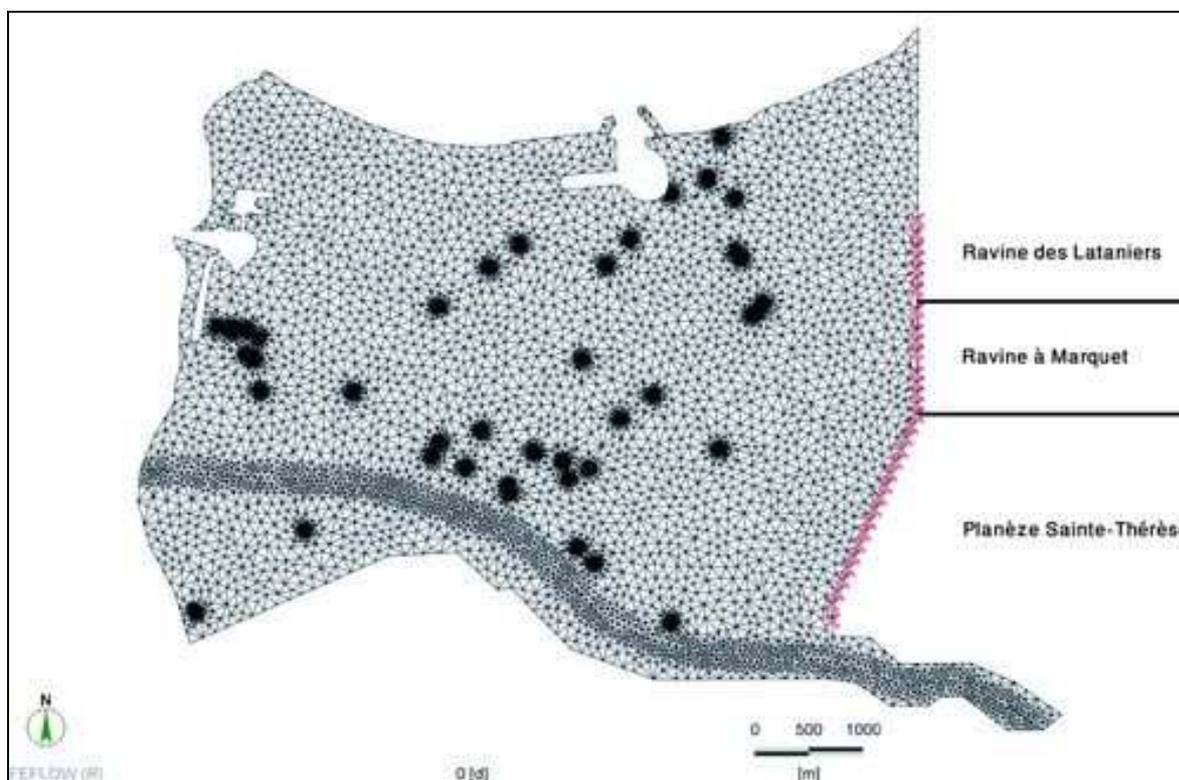
Extension des différentes zones de géométries – Couche 15

Annexe 2

Zones d'alimentation



Extension des différentes zones infiltration au niveau de la Rivière des Galets



Extension des différentes zones infiltration au niveau de la limite Est du modèle

Bibliographie

Rapports :

ANTEA (2009) – Cône alluvial de la Rivière des Galets –Elaboration d'un modèle mathématique d'évaluation des impacts sur la ressource souterraine. Rapport de Phase I. Juin 2009. Rapport n° 54086/B.

ANTEA (2010) – Cône alluvial de la Rivière des Galets –Elaboration d'un modèle mathématique d'évaluation des impacts sur la ressource souterraine. Rapport de Phase II : Calage. Juillet 2010. Rapport n° 55794/E.

ANTEA (2010) – Cône alluvial de la Rivière des Galets –Elaboration d'un modèle mathématique d'évaluation des impacts sur la ressource souterraine. Rapport de Phase III : Résultats des simulations. Décembre 2010. Rapport n°60176/B.

Office de l'Eau Réunion (1999) – Modèle Mathématique de l'aquifère inférieur de la Plaine des Galets. Etat des connaissances – Analyse du modèle

Office de l'Eau Réunion (1996) – Modélisation mathématique du système aquifère de la Plaine des Galets. Rapport de stage de 3^o année. Juin 1996

Office de l'Eau Réunion (2002) – Redéfinition d'un modèle de nappe multicouche pour la prévision des niveaux piézométriques d'étiage des aquifères de la Plaine des Galets. Modélisation sous GMS/Modflow en approche « True Layer » préliminaire au calage au pas de temps mensuel de décembre 1991 à novembre 1997. Rapport de stage de 3^o année. Septembre 2002

ARMINES – Etude des ressources en eau souterraine de la région de Saint-Paul. Ile de la Réunion. Construction et exploitation du modèle mathématique (texte). LHM/RD/92/69

ARMINES – Etude des ressources en eau souterraine de la région de Saint-Paul. Ile de la Réunion. Construction et exploitation du modèle mathématique (figures). LHM/RD/92/69

CG974 – Direction de l'Agriculture et de la Forêt (1995) – Actualisation du modèle mathématique du système aquifère de la Plaine des Galets (texte)

CG974 – Direction de l'Agriculture et de la Forêt (1995) – Actualisation du modèle mathématique du système aquifère de la Plaine des Galets (figures)

Sites Internet :

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