



Contribution à l'étude du fonctionnement et de l'exploitation de la nappe stratégique de Saint Denis et de Sainte Marie

Novembre 2004 – Mars 2005

Andreas Stoll
ETH Zürich – Umweltingenieurwissenschaften
Stage de 4^{ème} année

Maître de stage: **Mr Folio Jean-Luc**
Tuteur de stage: **Prof. Wolfgang Kinzelbach**

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur François Bocquée, directeur de l'Office de l'Eau, de m'avoir reçu en tant que stagiaire à l'Office de l'Eau.

Je remercie Monsieur Loïc Giorgi, le responsable technique et tout particulièrement Monsieur Jean-Luc Folio l'hydrogéologue, qui ont été disponibles et m'ont aidé tout au long de mon stage ainsi que toute l'équipe de l'Office de l'Eau pour leur accueil chaleureux, leur aide et les sorties sur le terrain qui m'ont permis de découvrir leur travail et l'île de La Réunion.

Egalement je voudrais remercier Professeur Wolfgang Kinzelbach de l'ETH Zürich pour son soutien scientifique.

Sommaire

Introduction	5
Présentation de l'organisme : L'Office de l'Eau	6
1. Contexte de l'étude	7
1.1. Description de l'île de La Réunion	7
1.2. Présentation de la zone d'étude.....	9
1.2.1. Localisation et morphologie	9
1.2.2. Climat (d'après Meteo France).....	9
1.2.3. Hydrologie.....	10
1.2.4. Géologie et hydrogéologie.....	10
2. Définition du modèle.....	15
2.1. Présentation des outils de modélisation	15
2.2. Démarche de modélisation.....	15
2.3. Définition du modèle conceptuel	18
2.3.1. Limites.....	18
2.3.2. Maillage	19
2.3.3. Géologie	19
2.3.4. Alimentation de la nappe	19
2.4. Calage – Validation.....	21
2.4.1. Le calage en régime permanent.....	21
2.4.2. Le calage en régime transitoire	21
2.4.3. La validation en régime transitoire	22
2.4.4. Résultats du calage et de la validation du modèle	22
3. Simulation de scénarii d'exploitation – Impact des galeries du transfert sur la ressource en eau souterraine littorale.....	27
3.1. Présentation des scénarii	28
3.1.1. Scénario I - Exploitation des galeries.....	28
3.1.2. Scénario II - Augmentation de production.....	29
3.1.3. Scénario III - Galeries et augmentation de production	29
3.2. Résultats	30
3.2.1. Scénario I - Exploitation des galeries.....	30
3.2.2. Scénario II - Augmentation de production.....	30
3.2.3. Scénario III - Galeries et augmentation de production	31
3.2.4. Impact sur le biseau salé	32
3.3. Limites des simulations	34
3.3.1. Tests de sensibilité du modèle	34
Synthèse / Conclusions.....	36
Bilan des tests de sensibilité	36
Scénarii.....	36
L'interface eau douce - eau salée	36
Propositions pour améliorer le modèle	37
Bibliographie.....	38

Annexes	39
Annexe 1 - Vue d'ensemble des stations de mesures piézométrique de l'OLE sur le secteur d'étude.....	39
Annexe 2 - Calcul de l'évapotranspiration	40
Annexe 3 - Interpolation des pluies.....	40
Annexe 4 - Comparaison des bilans hydrologiques	40
Annexe 5 - Comparaison des transmissivités.....	41
Annexe 6 - Performance correcte	41
Annexe 7 - Performance correcte sauf phases de recharge	42
Annexe 8 - Performance moyenne	42
Annexe 9 - Performance problématique	43
Annexe 10 - Volumes.....	43
Annexe 11 - Esquisses piézométriques du scénario I	44
Annexe 12 - Esquisses piézométriques du scénario II	45
Annexe 13 - Esquisses piézométriques du scénario III	46
Annexe 14	47

Introduction

A l'île de La Réunion environ 240 millions m³ d'eau sont prélevées chaque année pour l'alimentation en eau potable, l'irrigation et l'usage industriel. Sur les 25 dernières années la consommation d'eau tous usages confondus a été multipliée par 2 à 3 fois et la consommation d'eau potable (public et usage industriel) dépasse aujourd'hui 310 l/jour/habitant en moyenne, soit plus de 85 millions de m³ par an. 50% de cette eau provient des nappes exploitées sur le pourtour littoral entre 0 et 200 m d'altitude.

L'eau souterraine apparaît donc comme une ressource stratégique pour La Réunion. Elle présente l'avantage d'être moins soumise aux aléas du climat et d'être moins vulnérable aux risques de pollutions depuis la surface. Mais les fortes pressions d'exploitations existantes ne sont pas sans influence sur la pérennité de cette ressource. Des abaissements parfois importants des niveaux piézométriques sont constatés en domaine littoral. Cette situation est potentiellement pénalisante car elle peut conduire à une salinisation progressive ou brutale des nappes, phénomènes qui sont parfois irréversibles.

Les communes de Saint Denis et de Sainte Marie (secteur nord de l'île) qui font l'objet de cette étude constituent un exemple typique de la problématique de l'eau à La Réunion à savoir : des risques de pollution de l'eau élevés du fait d'une urbanisation importante, une production en eau souterraine en augmentation (+30 % en 10 ans), la salinisation d'un forage dans un secteur considéré comme naturellement à l'abri de ce type de phénomène, des aménagements lourds pouvant entraîner des modifications de la recharge des nappes littorales (galerie du transfert des eaux d'Est en Ouest).

Cette étude a donc pour objectif la construction d'un modèle mathématique simple de circulation des eaux souterraines dans la partie littorale de Saint Denis et de Sainte Marie. Les travaux de modélisation sont effectués à l'aide de MODFLOW, l'un des codes de calcul numérique les couramment utilisés dans le monde. Le but de ce modèle est de mieux comprendre le fonctionnement de la nappe stratégique de Saint Denis et de Sainte Marie et de tester son comportement dans le cadre de différents scénarii d'exploitation

Cette étude est réalisée dans le cadre d'un stage de quatrième année d'un étudiant en ingénierie de l'environnement à l'ETH Zürich en Suisse. Il s'agit d'un stage d'une durée de quatre mois.

Présentation de l'organisme : L'Office de l'Eau

L'Office de l'Eau (OLE) est un établissement public local. Sous la direction de Mr Bocquée, il emploie actuellement 13 personnes à plein temps qui se répartissent en 5 cadres, 5 techniciens, 2 ouvriers et une secrétaire. Ses missions comportent principalement l'étude et le suivi des ressources en eau, des milieux aquatiques et littoraux et de leurs usages. Ainsi que le conseil et l'assistance technique aux maîtres d'ouvrage, la formation et l'information dans le domaine de la gestion de l'eau et des milieux aquatiques. Sur proposition du comité de bassin, il peut également assurer la programmation et le financement d'actions et de travaux.

Afin de suivre la ressource en eau à La Réunion au travers de mesures régulières l'OLE entretient un réseau avec au total 404 stations de mesures dont 218 pour des mesures de débit (dont 34 stations d'acquisition automatique et 8 stations équipées pour la télétransmission), 146 stations pour la mesure du niveau piézométrique (dont 31 stations d'acquisition automatique et 1 station équipée pour la télétransmission) et 40 stations bio-qualité (32 rivières et 8 sur les plans d'eau).

Toutes ces mesures complètent la base de données utilisée pour des fins statistiques et prévisionnelles. Cette base de données est accessible informatiquement et sous forme de CD pour les annuaires hydrologiques réalisés chaque année.

1. Contexte de l'étude

1.1. Description de l'île de La Réunion

L'île de La Réunion est située dans le Sud-Ouest de l'océan indien à 800 km de la côte Est de Madagascar (Fig. 1). Elle fait partie avec l'île Maurice et Rodrigues du plateau sous marin des Mascareignes. L'île de La Réunion est un département français depuis 1946 avec 760'000 habitants en 2004. Le chef-lieu est Saint-Denis.

C'est une île volcanique relativement jeune, de 2512 km² de superficie et de 207 km de circonférence. Elle est formée de deux importants massifs volcaniques, celui du Piton des Neiges au centre de l'île (le plus ancien et point culminant de l'île à 3071 m NGR) et celui du Piton de la Fournaise, situé au Sud-Ouest de l'île et qui est toujours en activité. Le centre de l'île est formé par les trois grands cirques de Salazie au Nord-Est, de Mafate au Nord-Ouest et de Cilaos au Sud qui encerclent le Piton des Neiges (Fig. 2).



Fig. 1 Situation géographique de l'île de la Réunion, océan Indien

En raison des hautes montagnes et du relief accidenté, trois grandes zones climatiques se détachent. La côte Est, dite "au vent", est constamment ventilée par les alizés venant du Sud-Est. Les nuages sont retenus par les hautes montagnes du cirque de Salazie et du Piton de la Fournaise et déchargent une pluie abondante avant de s'en aller vers l'Ouest. La côte Ouest de l'île, dite "sous le vent", n'est que très peu arrosée et est beaucoup plus sèche et plus chaude. La dernière région est constituée par les hauts de l'île (cirques, plaine des cafres, plaine des palmistes) où les pluies sont relativement importantes et les températures beaucoup plus fraîches qu'ailleurs.

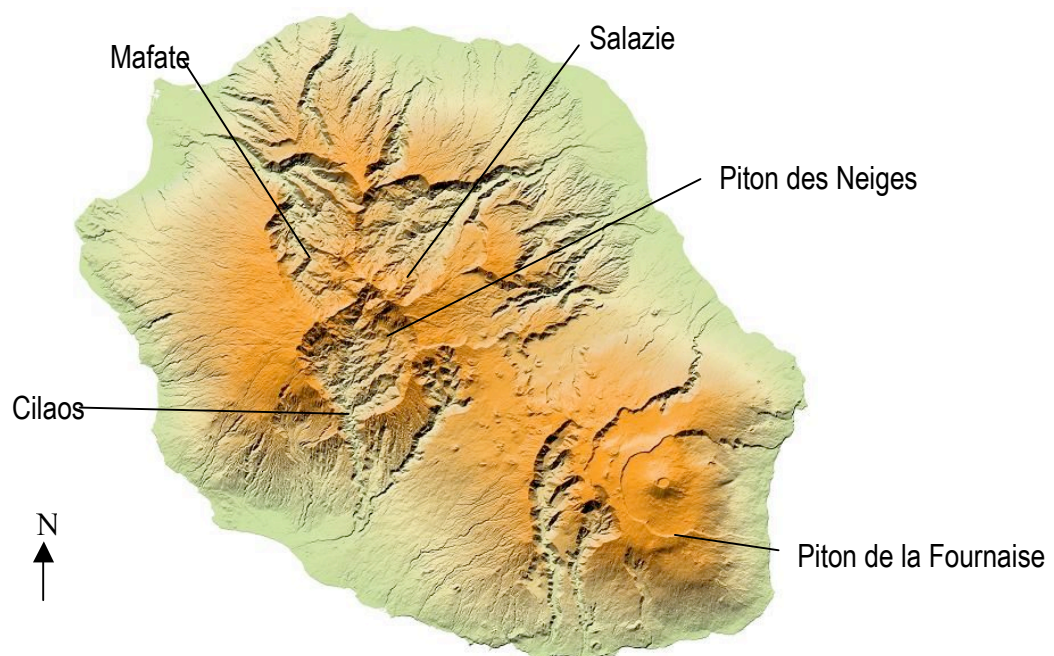


Fig. 2 l'île de la Réunion en relief

Le **climat** de La Réunion est tropical. Il est caractérisé par la douceur de ses températures. La position géographique de l'île, ni trop près ni trop loin de l'équateur, et surtout le rôle régulateur de l'océan et des alizés sont les principales causes de cette douceur (Fig. 3). Deux grands cycles de variations sont observables: un cycle quotidien, caractérisé par des variations diurnes des températures, et un cycle annuel caractérisé par deux grandes saisons:

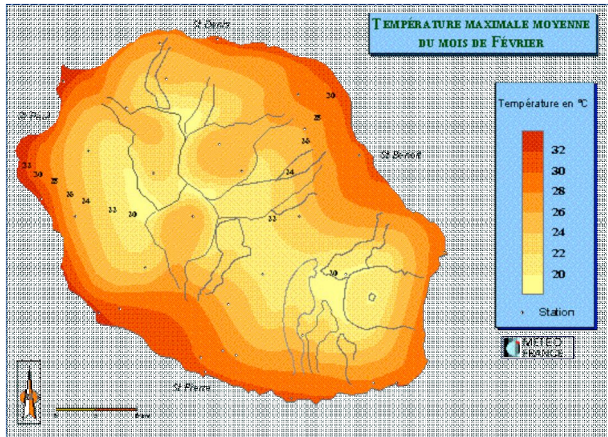


Fig. 3 Température maximale moyenne du mois de Février (Météo France)

La **saison fraîche**, de mai à octobre. Les températures varient au niveau de la mer, de 17 à 20°C pour les minima moyens et de 26 à 28°C pour les maxima moyens. A 1000m, les minima moyens oscillent de 8 à 10°C et les maxima moyens de 17 à 21°C.

La **saison chaude** de novembre à avril. Les minima moyens varient généralement entre 21 et 24°C, et les maxima moyens entre 28 à 31°C, sur la côte. A 1000m, les minima moyens fluctuent de 10 à 14°C, et les maxima moyens de 21 à 24°C.

Les amplitudes thermiques dans ces deux cycles sont faibles, dépassant rarement les 10°C pour un lieu donné.

Le phénomène important à La Réunion est la décroissance des températures avec l'altitude. En atmosphère libre, le gradient thermique vertical est d'environ $-0,6^{\circ}\text{C}$ pour 100m. Le long des pentes de l'île, ce gradient est un peu plus marqué variant de $-0,7$ à $-0,8^{\circ}\text{C}$ pour 100m. Comme le relief est très accentué sur l'île, les isothermes suivent le plus souvent la carte hypsométrique.

Les **précipitations** sont à La Réunion le phénomène météorologique le plus remarquable. L'île possède tous les records mondiaux de pluies pour les périodes comprises entre 12 heures et quinze jours. Le fait essentiel est la grande variabilité spatio-temporelle de ces précipitations. Sur un mois plusieurs mètres d'eau peuvent tomber sur la côte Est alors que pas une goutte ne tombera sur la côte Ouest (Fig.4). Par ailleurs, pour un lieu donné, la pluie peut être absente pendant plusieurs mois et tomber ensuite en abondance sur une courte période à la suite du passage d'une dépression ou d'un cyclone.

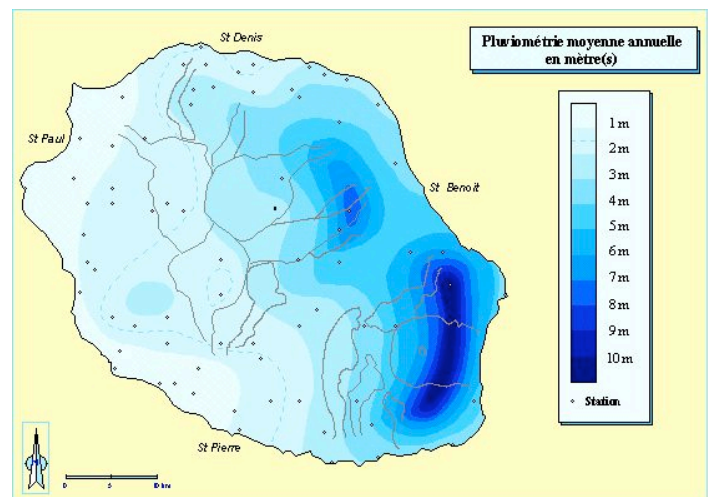


Fig.4 Pluviométrie moyenne annuelle (Météo France)

Les informations précédentes sont issues du site internet de Météo France (www.meteo.fr/temps/domtom/La_Reunion).

1.2. Présentation de la zone d'étude

1.2.1. Localisation et morphologie



Fig.5 L'île de la Réunion et la zone d'étude encadrée en rouge

La zone d'étude s'étend sur la plaine de Saint Denis et de Saint Marie depuis l'océan au Nord jusqu'à la ligne des crêtes des cirques de Mafate au Sud-Ouest et de Salazie au Sud-Est, qui culmine au sommet de la Roche Ecrée à 2277m NGR (Fig. 5). Le bassin versant couvre une surface de **183km²**. La plaine descend vers l'océan selon une pente régulière et assez forte. Le réseau hydrographique est constitué par deux grandes rivières (la rivière des Pluies et la rivière de Saint Denis cf. 1.2.3.) et de nombreuses ravines orientées Sud/Nord qui drainent l'eau sur le flanc du massif du Piton des Neiges (Fig. 6). Ces rivières et ravines entaillent la plaine parfois jusqu'à plus d'une centaine de mètres.

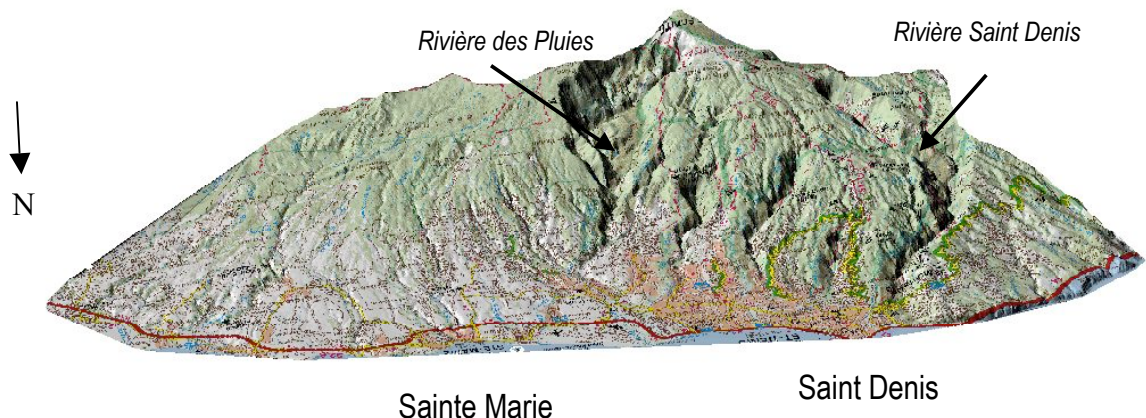


Fig. 6 Le relief du secteur d'étude

1.2.2. Climat (d'après Meteo France)

Les températures sur la zone d'étude varient pendant l'été austral entre 22°C (minimale moyenne) et 30°C (maximale moyenne) au mois de février et pendant l'hiver austral entre 16°C (minimale moyenne) et 22°C (maximale moyenne) au mois d'août. La pluviométrie moyenne annuelle est de 2m à 3m environ et varie selon la saison entre 400mm (moyenne mensuelle du mois de février) et 100mm (moyenne mensuelle du mois d'août). De manière générale les températures diminuent alors que les précipitations augmentent avec l'altitude (Fig. 3 et 4).

1.2.3. Hydrologie

La **rivière des Pluies** se trouve au milieu de la zone d'étude (Fig. 6). Elle prend sa source non loin de la Roche Ecrite vers 1600m d'altitude. Elle est alimentée dans sa partie amont où son lit est très creusé, par de nombreuses sources et ravines non répertoriées. Les sources semblent provenir d'écoulements souterrains profonds. Elle est rejointe dans sa partie aval par plusieurs ravines affluentes, pour la plupart en rive droite :

- La ravine Kiwi
- La ravine du Bachelier (alimentée par la source du Bachelier)
- Le bras Mussard
- La ravine Mère Canal
- La ravine sèche alimentée par le groupe des sources Appolon (sources Appolon, petite source Appolon, source aval Appolon)
- La ravine Cadet

La **rivière de Saint Denis** borde à l'Ouest de la zone d'étude (Fig. 6). Elle prend sa source vers 1500m d'altitude et se dirige sur Saint Denis par une vallée encaissée, profonde de 800 à 900m et longue de 15km. Son bassin versant est délimité par la topographie et les fortes pentes de part et d'autre de son lit. Dans sa partie avale, 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. D'après l'étude hydrologique de D. Legourières, ces sources seraient essentiellement d'origine profonde, ce qui expliquerait ainsi un débit à peu près constant de la rivière en période de sécheresse.

Plusieurs **ravines** non pérennes situées entre la rivière Saint Denis et la rivière des Pluies entaillent assez profondément la planèze et drainent l'eau vers l'océan lors des fortes précipitations d'été. Elles s'assèchent rapidement en l'absence de précipitations importantes. D'Ouest en Est ces ravines sont composées de la ravine du Butor, la ravine de Patate à Durand et 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 200l/s pour la ravine du Chaudron et de quelques l/s pour la ravine du Butor (source bras Mahot). Cependant les captages pour l'abduction d'eau potable prélèvent une large partie des débits et les ravines se tarissent rapidement en aval, en dehors des périodes de crues.

A l'Est de la rivière des Pluies il existe aussi des nombreuses ravines et une rivière non pérennes entaillant la planèze moins profondément que celles plus à l'Ouest ce qui se remarque bien dans le paysage. D'Ouest en Est ces ravines et rivières sont composées de la ravine de la Mare, la ravine des Figues, la rivière Sainte Marie, la ravine Charpentier et la ravine des Chèvres.

1.2.4. Géologie et hydrogéologie

L'ossature géologique profonde de la planèze de Saint Denis et de Sainte Marie correspond aux coulées anciennes du volcan (phases I et II du Piton de Neiges). Ce sont des séries basaltiques épaisses de plusieurs centaines de mètres. Elles sont constituées par un empilement en alternance coulées/scories d'océanites et de basaltes à olivine, parfois intercalées de paléosols, d'épandages d'alluvions ou de tufs. Cette alternance coulées/scories s'observe particulièrement bien sur les remparts des lits très creusés de la rivière Saint Denis et de la rivière des Pluies. Ces terrains du bouclier ancien ont été profondément érodés lors d'une longue période de calme. Sur la zone littorale, des alluvions anciens ont été déposés aux débouchés des paléoravines et paléovallées creusées dans le bouclier ancien. Puis ces terrains ont été recouverts, en particulier dans les lits étroits des ravines, par les coulées récentes du Piton des Neiges (phases III et IV), selon la même alternance coulée / scories de basaltes alcalins (Fig. 7).

A l'Ouest de la rivière Saint Denis se dresse le massif de la montagne, limité à l'Est par la faille de la rivière de Saint Denis. De l'autre côté de la rivière, le massif du Brûlé, postérieur au massif de la Montagne est limité à l'Est par la ravine de Patate à Durand. Les laves les 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 du massif du Brûlé (Domenjod, La Bretagne), qu'elles ont contourné. Elles ont également emprunté le lit de la rivière Saint Denis, à l'Ouest du massif du Brûlé pour constituer le substratum de la ville de Saint Denis. A l'Est de la rivière des Pluies s'étendent des coulées plus récentes et moins altérées.

L'**hydrogéologie** à La Réunion est très mal connue. La grande complexité des terrains volcaniques influencés par la fracturation et la forte variabilité des dépôts rendent le milieu extrêmement hétérogène et anisotrope. Bien que la majorité des laves soit perméable en grand (l'eau s'infiltrant dans les fissures et dans les interstices des niveaux scoriacés), la perméabilité peut varier fortement suivant l'ancienneté des terrains, leur altération et leur profondeur.

De manière générale, au niveau de la plaine de Saint Denis et de Sainte Marie, une partie des précipitations s'infiltré à travers les terrains récents (phases III et IV) jusqu'aux formations primitives profondes et altérées du bouclier (phases I et II) ; la phase II étant souvent aquifère, la vraie limite imperméable étant la phase I. Stoppée à ce niveau, cette eau constitue la nappe de base, en équilibre avec la mer. Cette nappe pourrait remonter assez haut en altitude et alimenter plusieurs sources débouchant sur les rivières et les ravines (par exemple la source de la ravine du Chaudron, les sources de la rivière de Saint Denis et les sources de la rivière des Pluies).

Localement, au sein des terrains récents, les eaux infiltrées peuvent être interceptées par des niveaux plus imperméables (horizons argileux, paléosols) et former des nappes perchées. L'eau de ces nappes peut alors rejoindre la nappe de base et s'écouler jusqu'à la zone littorale ou bien être drainée par des sources de déversements dans les ravines.

Les relations entre la nappe d'eau souterraine et les rivières et ravines sont très complexes. Les rivières et ravines sont perchées au dessus de la nappe, parfois à plusieurs centaines de mètres. Les terrains qui composent leur lit sont constitués par des éléments de toute taille (blocs de basaltes, galets, sable, fines), ce qui donne un ensemble qui est très hétérogène et perméable "en grand". Mais la perméabilité des alluvions des rivières et des ravines reste inférieure aux formations basaltiques (coulées, formations scoriacées).

Lors des fortes précipitations, ces rivières et ravines en crue alimentent la nappe souterraine. Toutefois en saison sèche l'eau s'infiltré rapidement en aval et une bonne partie de leur lit est asséché. Seules la rivière des Pluies et la rivière de Saint Denis sont pérennes.

Ainsi, les terrains volcaniques fortement perméables associés à une pluviométrie très contrastée (saison humide et saison sèche) font qu'il n'y a pas de liaison hydraulique constante entre les rivières et la nappe de base.

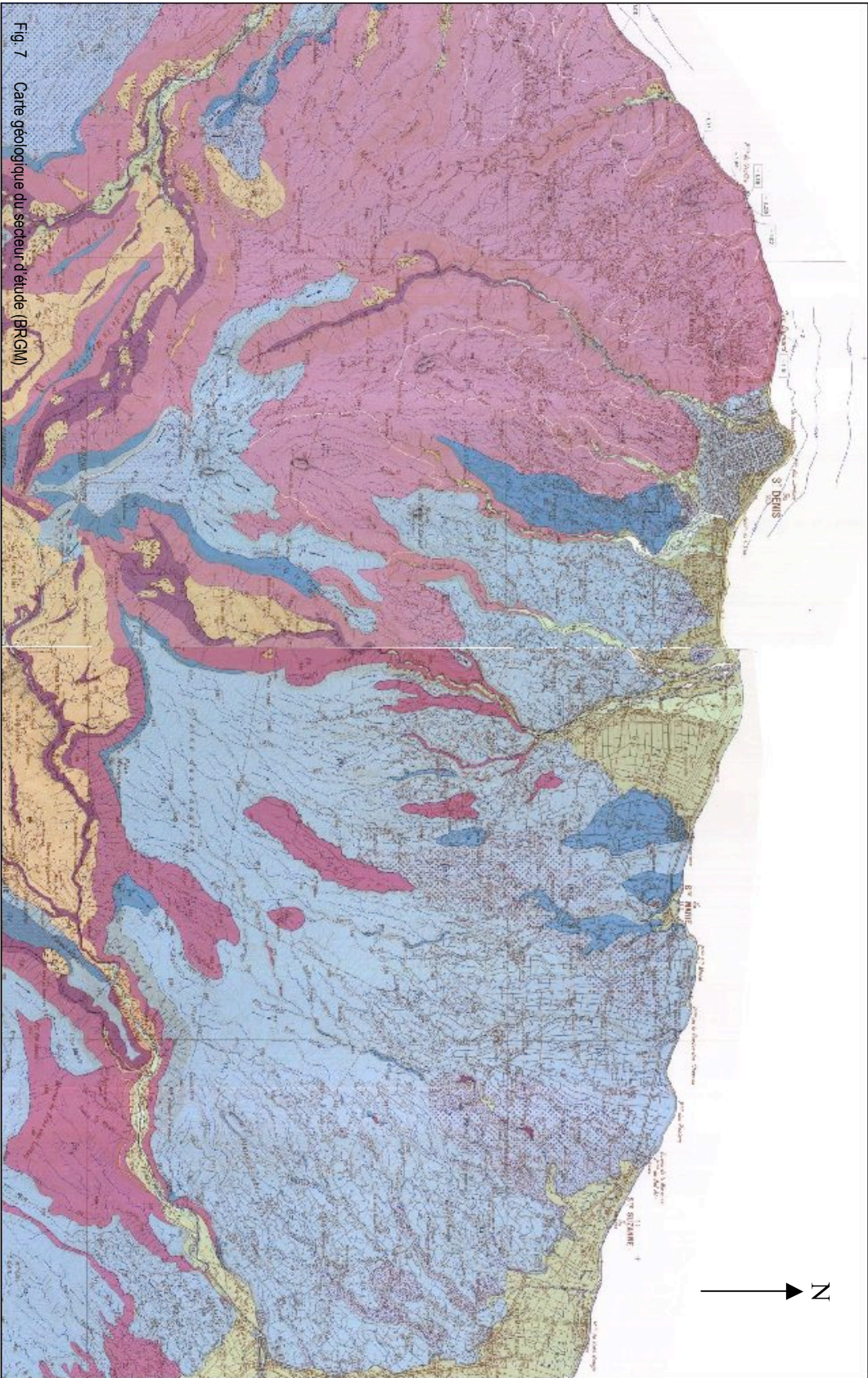


Fig. 7 Carte géologique du secteur d'étude (BRGM)

CARTE GÉOLOGIQUE DE LA FRANCE
 CARTE GÉOLOGIQUE STRUCTURALE DU DÉPARTEMENT DE LA RÉUNION

Echelle 1/50 000

Les explorations et les levés géologiques ont été effectués de 1967 à 1972 par M. G. Billard, ingénieur géologue au Bureau de recherches géologiques et minières, avec la collaboration de M. P. M. Vincent, professeur à l'université de Clermont-Ferrand. Les travaux de terrain et la publication de cette carte, ont été réalisés à la demande du département de la Réunion, à l'aide de crédits du Fond d'Investissement des Départements d'Outre-Mer (F.I.D.O.M.). Cette feuille a été publiée en 1974.

FORMATIONS SUPERFICIELLES

M
 1 2
 Sables et galets de plages:
 1 - sables coralliens dominants et rares petits bancs de grès coralliens (plages de Grand Bois)
 2 - sables et galets basaltiques dominants

MF₂
 Sables et galets de plages provenant du remaniement d'alluvions fluviatiles; galets basaltiques dominants

F₂
 Alluvions fluviatiles récentes:
 sables, graviers, galets, blocs basaltiques

$\beta\pi_{10}$
 Coulees basaltiques aphyriques ou à phénocristaux d'olivine, chloritisées, et zéolithisées (basaltes, basaltes à olivine, océanites)

Phase I (> 2 100 000 ans)

$\beta\pi_{10}$
 Agglomérats, breches basaltiques, chloritisés et zéolithisés

FORMATIONS DU MASSIF DU PITON DE LA FOURNAISE

Série sans termes différenciés

Phase V (Actuelle)

$\beta\pi_v$
 Coulees subactuelles: laves basaltiques aphyriques ou à phénocristaux d'olivine; localement, traces de petits phénocristaux de feldspath

$\beta\pi_v$
 Coulee de 1708 - Ankaramite

N.B. - Dans l'arête du Piton de la Fournaise, les coulees sont distinguées par une date, ou par une surcharge de figure pour celles dont la chronologie n'est pas établie. L'ordre d'apparition des cratères et fissures d'émission en 1972 est indiqué par le chiffre précédent la date.

Phase IV

$\beta\pi_{iv}$
 Coulees basaltiques aphyriques ou à phénocristaux d'olivine (basaltes, basaltes à olivine, océanites), et basaltes à nodules de peridot de la rivière Longevin (π_{iv})

Phase III (< 350 000 ans)

$\beta\pi_{iii}$
 $\beta\pi_{iii}$
 Coulees basaltiques aphyriques ou à phénocristaux d'olivine (basaltes, basaltes à olivine, océanites), $\beta\pi_{iii}$ recouvrant $\beta\pi_{iv}$

F₂
 Alluvions fluviatiles anciennes indifférenciées
 sables, graviers, galets, blocs basaltiques

S
 Coulees de solifluxion indifférenciées: éléments basaltiques divers cimentés par des produits silto-sableux ou cendres

E - Eboulis: accumulations caillouteuses et terreuses sur les pentes et en pieds d'escarpements.
SE - Coulees de solifluxion et eboulis qui en dérivent
PE - Ensemble d'épandages, coulees de solifluxion, tufs, eboulis, éluvions

FORMATIONS DU MASSIF DU PITON DES NEIGES

Série différenciée

Phase IV (environ 70 000 à 230 000 ans)

$\beta\pi_{iv}$
 Coulees basaltiques et andésitiques (Hawaïtes, Mugéarites), aphyriques ou à phénocristaux de feldspath et d'olivine généralement peu abondants

Phase III (environ 250 000 à 350 000 ans)

$\beta\pi_{iii}$
 Coulees basaltiques et andésitiques à phénocristaux de feldspath dominantes (Hawaïtes, Mugéarites)

Série sans termes différenciés

Phase II (de 430 000 à > 2 100 000 ans)

$\beta\pi_{ii}$
 Coulees basaltiques à phénocristaux d'olivine, dominantes (basaltes, basaltes à olivine, océanites)

Cône adventif

Cône adventif égueulé

Fissure d'émission

Direction d'écoulement des laves

Direction et pendage des couches et des coulees (valeur en degrés)

- 1 - Contour géologique visible
- 2 - Faille visible
- 3 - Limite de coulee
- 4 - Ancienne falaise littorale visible
- 5 - Ancienne falaise littorale masquée par les coulees

$\sim 0,057$
 +
 Point de prélèvement d'un échantillon ayant fait l'objet d'une datation absolue par la méthode potassium-argon, avec éventuellement indication de la nature pétrographique de l'échantillon (ex: β_{iv} - 0,057)
 Valeur moyenne de l'âge en million d'années.
 (Travaux de M. I. Mc Dougall, professeur à l'université de Canberra Australie)

MINÉRALOGIE - SUBSTANCES UTILES

- $\beta\pi$ Nodules de peridot de la plaine des Sables
- Zéolite
- Terres à briques
- Substances pouzzolaniques
- Soufre

Fig. 8 Légende de la carte géologique (Fig. 7)

Le **niveau piézométrique** des nappes exploitées d'eau souterraine de la zone étudiée est régulièrement relevé par l'Office de l'Eau. En effet, les communes de Saint Denis et Sainte Marie disposent de plusieurs ouvrages, puits et forages. Sur les 26 forages présentés ici (Annexe 1), tous font l'objet d'une mesure du niveau piézométrique mensuelle. 8 sont équipés en plus d'une mesure du niveau piézométrique en continu par piézographe.

On peut observer des variations de niveau piézométrique importantes, de l'ordre de plusieurs mètres, selon la saison. Pendant la saison sèche les nappes tarissent et pendant la saison humide elles se remplissent de nouveau. Ces variations sont d'autant plus remarquables selon la situation géographique des stations.

De manière générale on distingue dans les stations piézométriques étudiées trois types de comportement du niveau de la nappe. Les stations situées sur la zone basse de la plaine avec une zone non saturée peu épaisse sont influencées par l'infiltration des pluies. Celles situées à proximité des rivières ou ravines sont fortement influencées par les infiltrations de ces dernières. Cela signifie que le niveau de la nappe est corrélé avec le débit des rivières ou ravines ce dernier étant corrélé avec la précipitation sur le bassin versant correspondant. Par conséquent les variations observées sont plus importantes.

Les stations sur la zone haute de la plaine possèdent une importante épaisseur de la zone non saturée, ce qui a pour conséquence des variations très faibles de niveau piézométrique, étant donné que les précipitations sont tamponnées.

La connaissance des niveaux piézométriques grâce aux forages à l'intérieur du domaine modélisé est essentielle puisqu'elle permet le calage du modèle sur des valeurs observées.

2. Définition du modèle

2.1. Présentation des outils de modélisation

La modélisation est effectuée avec le code de calcul numérique MODFLOW sous GMS étant un outil quasi universel de modélisation hydrogéologique. Ce logiciel a été initialement mis au point par l'université américaine de Brigham Young à la demande du Centre de Développement et de Recherche du Corps des Ingénieurs de l'Armée des Etats-Unis. GMS est maintenant devenu un outil de référence utilisé par les administrations américaines (the Department of Defense, the Department of Energy, the Environmental Protection Agency, the Federal Highway Administration) et par de nombreuses entreprises et universités à travers le monde. L'interface de GMS est très efficace et permet de gérer la conceptualisation du modèle et l'entrée des données de manière simple.

MODFLOW résout les équations de l'écoulement souterrain (conservation de la masse, loi de Darcy) par la méthode des différences finies.

Au cours de ce travail une partie de la modélisation est faite en inverse et une autre en directe. Pour la modélisation inverse, les paramètres hydrodynamiques (transmissivités et coefficients d'emmagasinement) sont estimés de manière automatique à l'aide du modèle inverse PEST sous GMS à partir des niveaux piézométriques observés. La modélisation directe par contre comprend une calibration manuelle des paramètres.

2.2. Démarche de modélisation

La démarche de modélisation suit le schéma suivant :

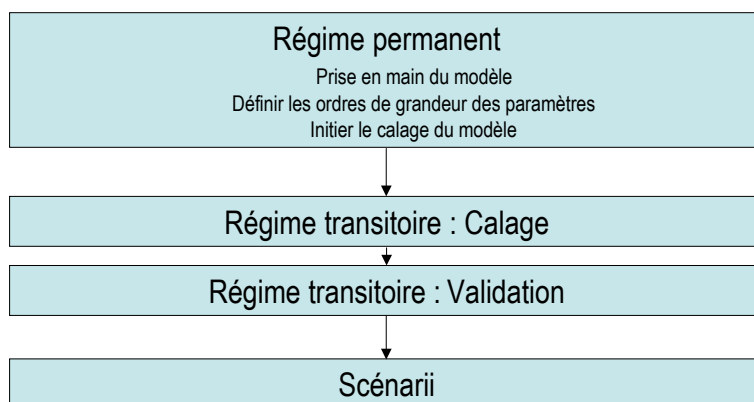


Fig. 9 Schéma de la démarche de modélisation réalisée

Dans un premier temps un modèle en régime permanent a été construit afin de prendre en main le logiciel, de définir les ordres de grandeur des paramètres hydrodynamiques et d'initier le calage du modèle en régime transitoire.

Le modèle en **régime permanent** a été construit afin de calculer les transmissivités du secteur modélisé pour permettre d'honorer l'allure piézométrique déduite des observations de terrain (de ce fait on considère être suffisamment proche de la réalité). Une carte de piézométrie moyenne a servi au calage de ce modèle

en régime permanent. Cette esquisse piézométrique de référence est composée d'une carte synthétique issue d'études de l'Office de l'Eau et du BRGM (Fig. 10). On remarque dans la zone des derniers forages de la rivière des Pluies que la dernière esquisse piézométrique fait une invagination (○ Fig. 10), ce phénomène reste inexpliqué. Cependant on considèrera que cette esquisse est proche de la réalité car elle est déduite des observations de terrain. Les transmissivités de chacune des mailles en régime permanent ont été calculées en inverse à partir du modèle PEST. C'est l'année moyenne 2002 qui a été modélisée.

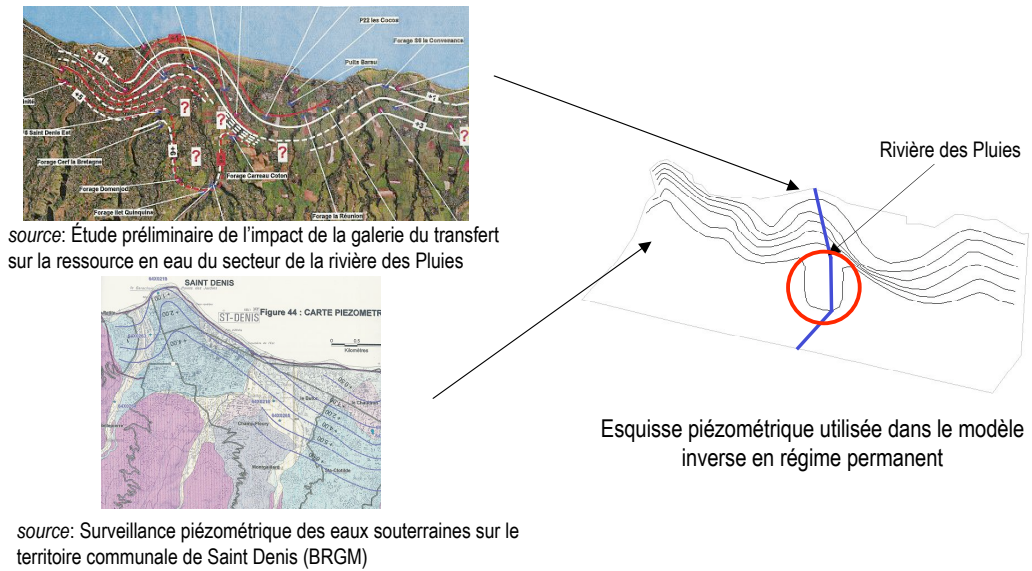


Fig. 10 Les deux sources et l'esquisse piézométrique de référence utilisées pour le calage du régime permanent

Ensuite un modèle en **régime transitoire** a été lancé avec un pas de temps mensuel. Le calage en régime transitoire a été principalement fait sur les stations de mesures en continu de l'OLE avec 9 années de données (1992 à 2000). Un calage en inverse (estimation automatisée des paramètres) et un calage en direct (modification manuelle des paramètres) ont été réalisés (Fig. 11). Ayant obtenu un résultat satisfaisant on est passé à l'étape de validation du modèle.

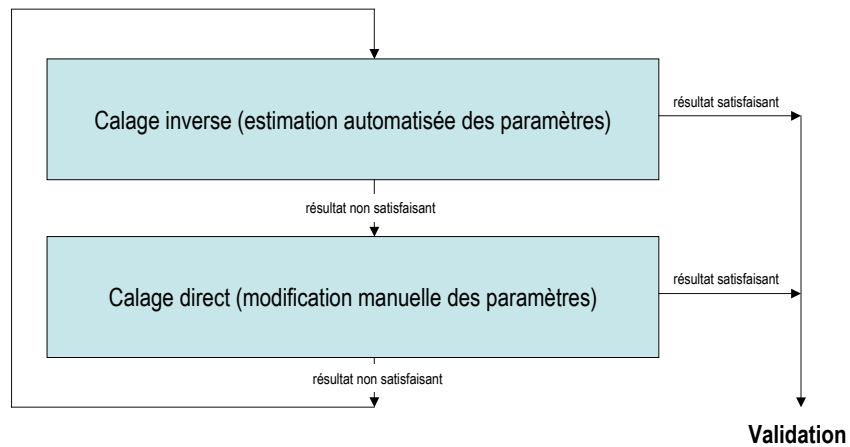


Fig. 11 Schéma de la démarche du calage du modèle en régime transitoire

La validation du modèle a été faite sur toutes les stations de mesures de l'OLE pour la zone étudiée sur des données comprises entre 1992 et 2003 selon le schéma suivant (Fig. 12):

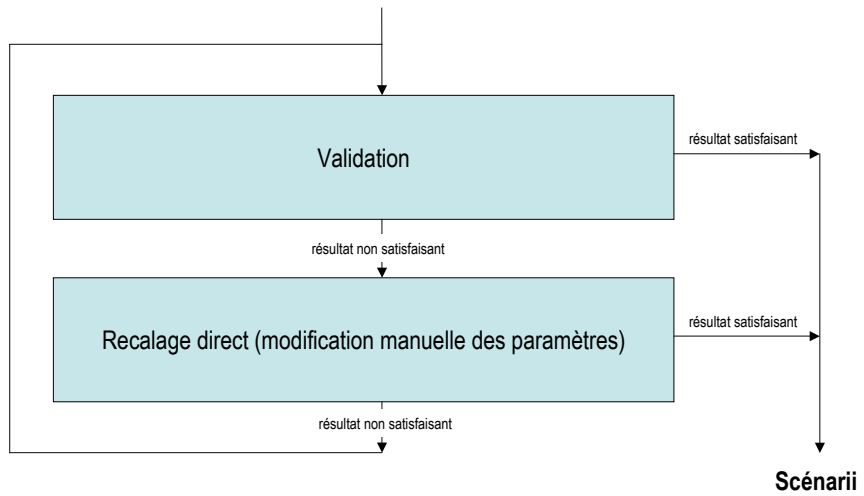


Fig. 12 Schéma de la démarche de la validation du modèle en régime transitoire

Une fois que la validation du modèle en régime transitoire a été terminée, l'étape suivante a consisté à émettre des scénarii en vue d'estimer le fonctionnement de l'aquifère à l'aide du modèle validé.

2.3. Définition du modèle conceptuel

2.3.1. Limites

Le domaine hydrogéologique modélisé fait 90 km² et se restreint à la partie côtière au Nord de la zone d'étude (Fig. 13). En effet, à l'intérieur de cette zone il existe une vingtaine de forages où les niveaux piézométriques sont mesurés ce qui permet le calage du modèle.

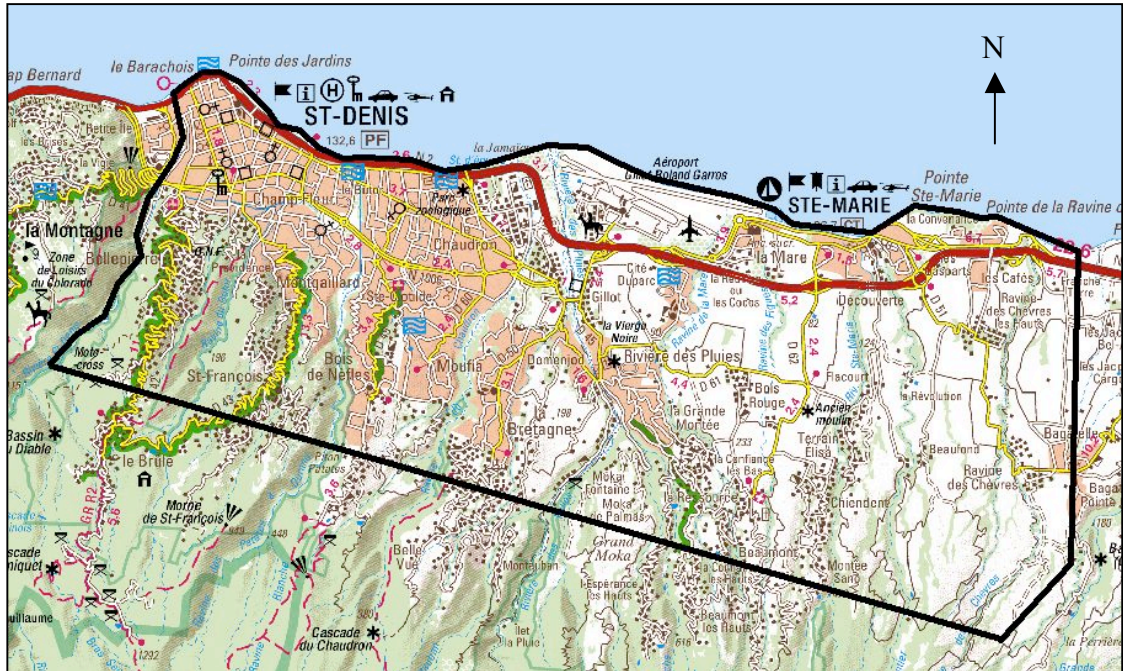


Fig. 13 Le secteur modélisé

On considère que la ligne de côte est également la limite de l'aquifère au **Nord**. Afin de prendre en considération les fluctuations du niveau de la nappe sur cette limite, une limite à charge imposée a été définie sur la base des observations du puits Tomi, situé à une dizaine de mètres de la côte.

La limite **Sud** du modèle a été arrêtée quelques 100 mètres en amont des derniers forages existants du côté de la rivière des Pluies pour limiter les problèmes d'initialisation du modèle. Cette limite est une limite à flux imposé.

La limite **Ouest** est localisée le long de la rivière de Saint Denis et est implantée comme limite à flux nul. On peut justifier cette approche du fait que la vallée est tellement profonde qu'elle atteint la coulée la plus ancienne qui constitue le mur de la nappe de base. Ce qui a pour conséquence un drainage par la rivière, en rive gauche comme en rive droite. On explique ainsi les nombreuses sources de cette vallée.

Pour la limite **Est** l'étude réalisée par SOGREAH a localisé dans les années 90 une remontée du toit des basaltes de phase I dans le secteur de Sainte Marie [6]. On considère cette entité comme la ligne de partage locale des eaux souterraines dans le secteur. Elle est prise comme limite à flux nul.

Vers les reliefs, on a prolongé cette ligne le long de la crête topographique entre la ravine des Chèvres et la rivière de Sainte Suzanne. On considère arbitrairement cette entité comme la ligne de partage des eaux souterraines, limite à flux nul.

2.3.2. Maillage

La taille des mailles choisie est de 100 m de coté. Cette dimension permet d'individualiser les rivières et les ravines sans aller vers une discrétisation trop fine (Fig. 14).

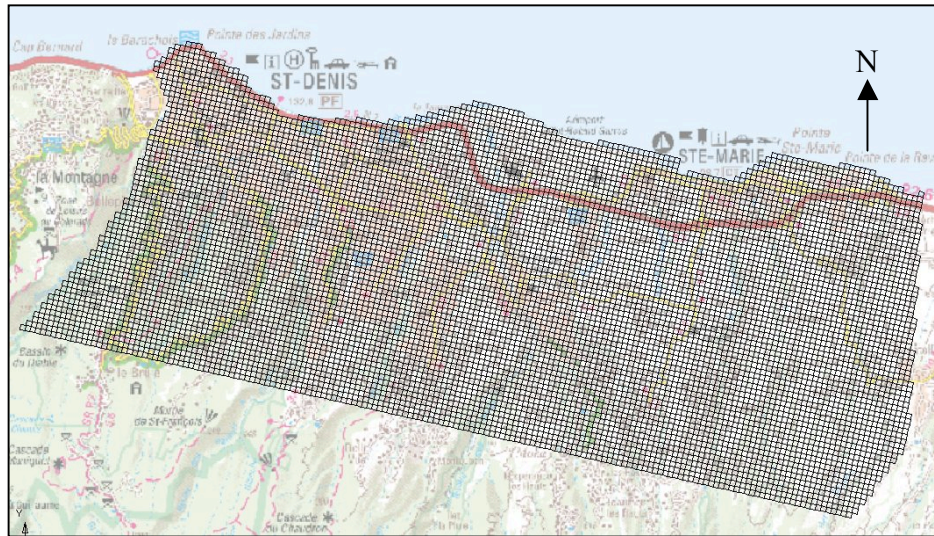


Fig. 14 Le maillage du domain modélisé

2.3.3. Géologie

Partant du fait que le système aquifère de base est considéré comme étant en relation hydraulique globale avec les nappes alluviales dans le domaine modélisé, le travail de modélisation s'est effectué avec **une seule couche**. Egalement nous avons travaillé avec des **transmissivités** nous permettant ainsi de nous affranchir des paramètres géologiques peu ou mal connus comme par exemple le mur. La transmissivité réunit les deux paramètres la conductivité et l'épaisseur du terrain. L'unique paramètre géométrique pris en compte est donc la **topographie**.

2.3.4. Alimentation de la nappe

2.3.4.1. Infiltration directe dans le modèle

Afin de calculer l'infiltration depuis la surface du sol vers la nappe sur la zone à modéliser, on a choisi un coefficient de ruissellement bibliographique de l'ordre 70 % des pluies efficaces. L'effet de la zone non saturée sur l'infiltration n'a pas été pris en compte (Volumes c.f. Annexe 10).

2.3.4.2. Alimentation de la nappe en amont

En ce qui concerne l'alimentation amont, le bassin versant a été limité côté **Sud** et côté **Est** par la ligne de partage des eaux superficielles. Nous remarquons que cela n'est pas forcément celle du partage des eaux souterraines, mais à cause de l'absence de données disponibles à propos du toit imperméable dans ce secteur, on est contraint de retenir cette approche. A l'**Ouest** on retombe sur la limite de la rivière de Saint Denis.

En raison d'une épaisseur très importante de la zone non saturée en amont et de la distance que l'eau infiltrée doit parcourir jusqu'à la limite Sud du modèle, on est contraint d'y implanter un flux constant (Fig. 15). Sur la quantité de ce flux le modèle a été également calibré (Volumes c.f. Annexe 10).

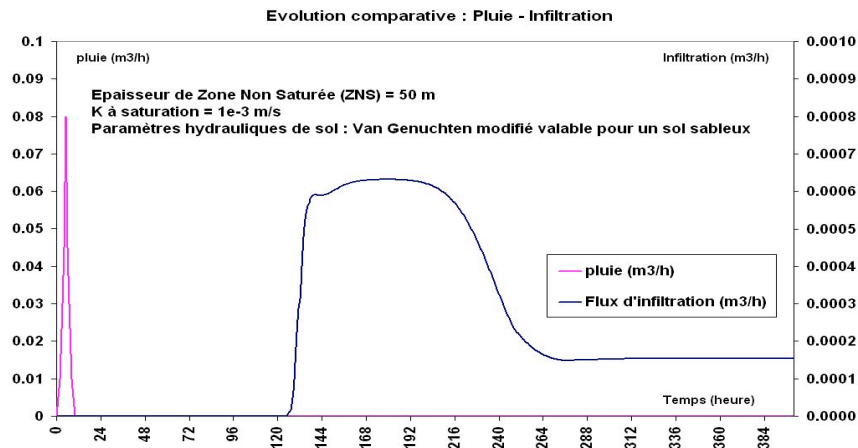


Fig. 15 Graphique théorique pour expliquer le flux de recharge constant. Une pluie (en bleu clair) parcourt un terrain non saturé avec des paramètres typiques d'un terrain volcanique et une épaisseur de 50 m. En bleu foncé c'est le flux arrivant au fond de ce terrain calculé par le modèle de Van Genuchten. L'eau sort donc quelques jours plus tard ayant un pic beaucoup moins important (même pas un dixième comparé à la pluie injectée). Ce qui est très intéressant c'est qu'au bout d'environ 264 heures après l'injection de la pluie le flux se stabilise à environ 0.2 l/h et reste constant très longtemps ce qu'on ne voit plus sur ce graphique. Cela explique le débit profond constant.

2.3.4.3. Infiltration des rivières et ravines

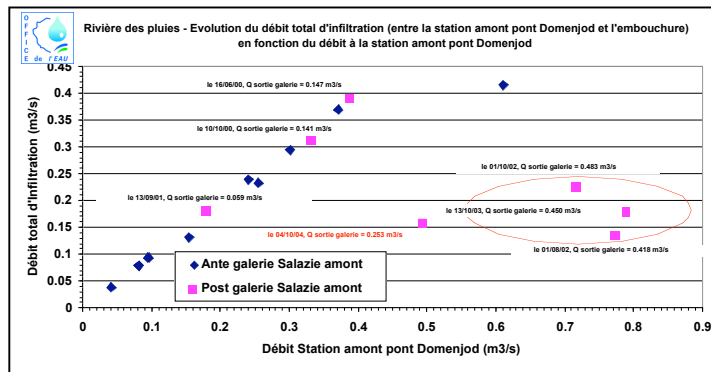


Fig. 16 Evolution du débit total d'infiltration de la rivière des Pluies entre la station amont pont Domenjod et l'embouchure en fonction du débit à la station amont pont Domenjod [14]

Pour l'infiltration de la rivière des Pluies, une recharge constante de 10Mm³/an (0.32m³/s) a été retenue et prise en compte sur la base d'une analyse des bilans hydrométriques réalisés par l'OLE [14].

La recharge de la rivière de St. Denis et des nombreuses ravines alentours n'ont pas été prises en compte de façon explicite dans notre modèle à cause de l'absence de données disponibles.

2.3.4.4. Prélèvements

Les prélèvements qui ont été pris en compte dans le modèle (Fig. 17) sont au pas de temps mensuel. Sur St. Denis les données communiquées par la CGE sont complètes de 1992 à 2003. Sur Ste. Marie, les données antérieures à 2001 ont été estimées sur la base de la répartition des prélèvements proposée par SOGREAH. De 2001 à 2003, les données sont issues des relevés fournis par la CISE (Volumes c.f. Annexe 10).

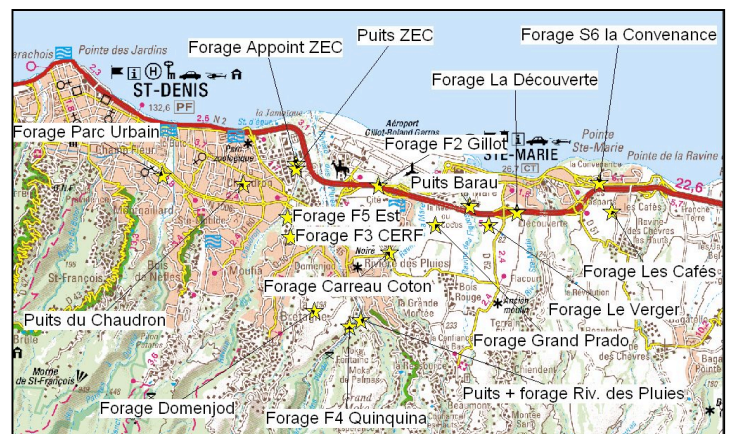


Fig. 17 Les forages et puits en exploitation qui sont pris en compte dans le modèle

2.4. Calage – Validation

2.4.1. Le calage en régime permanent

Après avoir implanté une alimentation totale de 104 Mm³/an (21 Mm³/an alimentation directe, 73 Mm³/an alimentation amont et 10 Mm³/an infiltration de la rivière des Pluies) on a lancé le calage en inverse afin de calculer les transmissivités pour chacune des mailles. On a obtenu un résultat satisfaisant après 10 modèles c'est-à-dire qu'on considère avoir obtenu une allure suffisamment proche de celle de référence (Fig. 18). Les transmissivités calculées ainsi ont été utilisées comme valeur de départ pour le calage en régime transitoire. Mais au lieu de prendre les valeurs de transmissivité par maille il a été préférable de créer des zones de transmissivité constante pour des zones où les transmissivités étaient voisines. Pour cela les valeurs de transmissivité ont été transformées en valeurs logarithmiques selon la formule $T^* = -\log T$ (T en m²/d) et des classes de variations de 0.5 ont été créées. Cette procédure a permis d'accélérer le temps de calcul pour le modèle en régime transitoire.

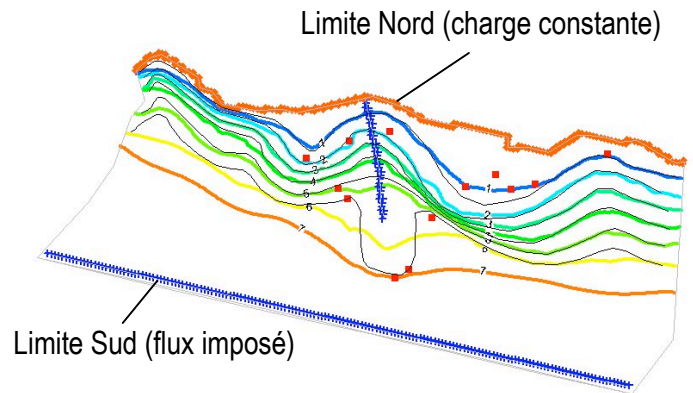


Fig. 18 Comparaison de l'esquisse piézométrique modélisée en couleurs et celle de référence en noir

2.4.2. Le calage en régime transitoire

Le calage a été fait sur 7 stations de mesures de l'Office de l'Eau en privilégiant les ouvrages non exploités pour l'Alimentation d'Eau Potable (AEP) sur les données comprises entre 1992 et 2000. Les données piézométriques sur Saint Denis sont complètes tandis que celles sur Sainte Marie ne sont complètes qu'à partir de 1995 (Tab. 1).

Le calage s'est fait de manière suivante : Les paramètres modifiés étaient la transmissivité, les coefficients d'emmagasinement et l'alimentation en amont. Afin d'obtenir un résultat satisfaisant 8 modèles en calage inverse (estimation automatisée des paramètres) et 58 modèles en calage direct (modification manuelle des paramètres) ont été faits. Ayant obtenu un résultat satisfaisant on est passé à la validation.

Tab. 1 Vue d'ensemble des données piézométriques utilisées pour le calage par commune

code	station	2000	1999	1998	1997	1996	1995	1994	1993	1992
SAINT-DENIS										
continu	14113									
continu	14213									
continu	21033									
SAINTE-MARIE										
continu	21059									
	21064-1									
continu	21065									
continu	21066									

données	
pas de données	

2.4.3. La validation en régime transitoire

La validation a été faite sur les stations de mesures de l'Office de l'Eau présentées dans la figure 20 sur les données comprises entre 1992 et 2003. Les drainages des galeries de transfert et les rejets d'eau dans la rivière des Pluies ne sont pas pris en compte à ce stade de l'étude.

Après une première validation on a obtenu un résultat satisfaisant sur les stations de calage. Les autres stations ont par contre exigé un recalage qui a été fait de manière directe (modification manuelle des paramètres).

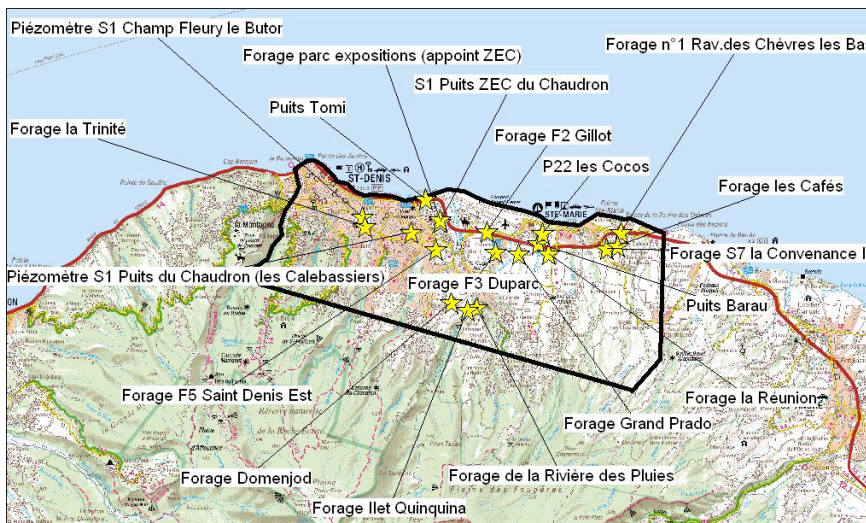


Fig. 20 L'ensemble des points d'observation du niveau piézométrique pris en compte dans la validation

2.4.4. Résultats du calage et de la validation du modèle

2.4.4.1. Bilan hydrologique global

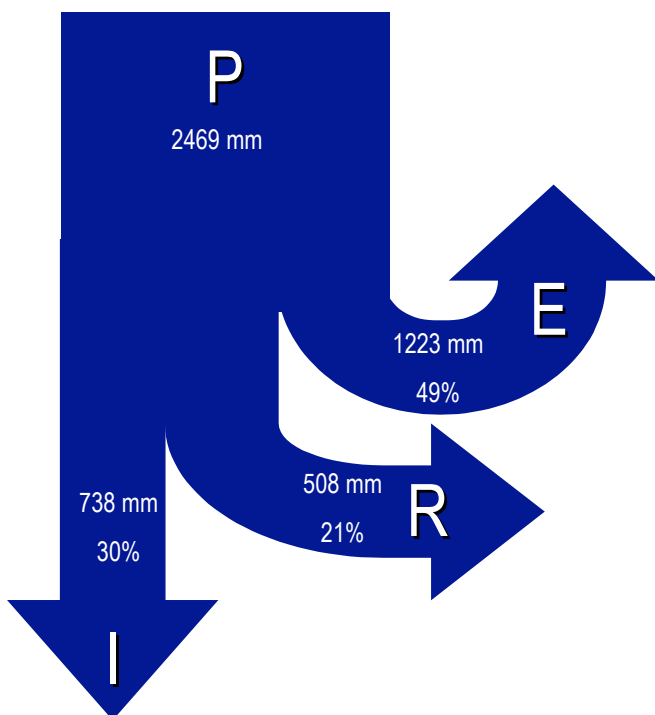


Fig. 21 Le bilan hydrologique moyenne du modèle

Un bilan hydrologique moyen a été calculé à l'aide des données climatiques disponibles comprises entre 1992 et 2003 sur le secteur de Saint Denis et de Sainte Marie (Fig. 21). On a obtenu une précipitation brute de 2469mm/an (Annexe 3), une évapotranspiration de 49% (Annexe 2) des pluies brutes soit 1223mm/an, un ruissellement de 21% des pluies brutes soit 508mm/an et une infiltration de 30% des pluies brutes soit 738mm/an (Volumes c.f. Annexe 10). Une comparaison des bilans hydrologiques dans le Nord et le Nord-Est a été fait (Annexe 4). Comparé à un bilan du BRGM sur les communes de Ste Marie et Ste Suzanne nos valeurs sont constamment inférieures à l'exception de l'évapotranspiration. On peut expliquer cela en considérant que notre modèle prend en compte une large partie située plus à l'Ouest où en général les précipitations sont moins fortes. En revanche, l'infiltration proposée par notre modèle est conforme aux estimations de SOGREAH.

2.4.4.2. Transmissivités

Les transmissivités obtenues lors de la phase de calage du modèle pour la zone basse de la planèze sont comprises entre 10^{-3} et $2.5\text{m}^2/\text{s}$ (Fig. 22). Au delà de 250m d'altitude, en raison de l'indisponibilité des observations, une transmissivité moyenne fixe ($10^{-1}\text{m}^2/\text{s}$) a été imposée, permettant ainsi de faire entrer l'eau facilement dans le modèle. Dans le domaine calé il y a des zones fortement transmissives dont certaines sont associées à des paléovallées géologiquement connues comme en rive droite de la rivière de Pluies.

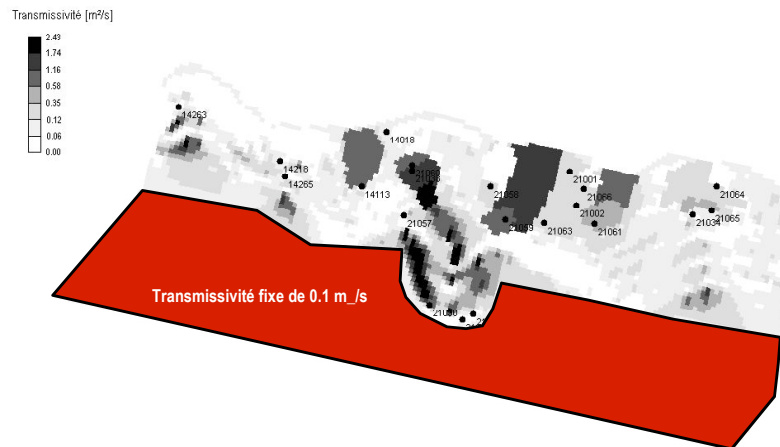


Fig. 22 Transmissivités obtenues lors du calage/recalage du modèle en m²/s

Les transmissivités issues des essais par pompage ont été comparées à celles obtenues par calage de notre modèle (Annexe 5). Globalement, les écarts restent acceptables même si ils sont parfois importants (écart moyen d'environ $10^{-1}\text{m}^2/\text{s}$) sur certains forages (forages Ilet Quinquina et La Découverte).

2.4.4.3. Coefficients d'emmagasinement

Le coefficient d'emmagasinement pour la nappe libre a été pris constant à une valeur de 0.1 et il n'a pas été modifié lors du calage du modèle. En ce qui concerne les coefficients d'emmagasinement pour la nappe captive dans un premier temps ils ont été calculés en inverse. Puis dans certaines zones, ils ont été réajustés manuellement. Les valeurs sont comprises entre 10^{-3} et 10^{-1} (Fig. 23).

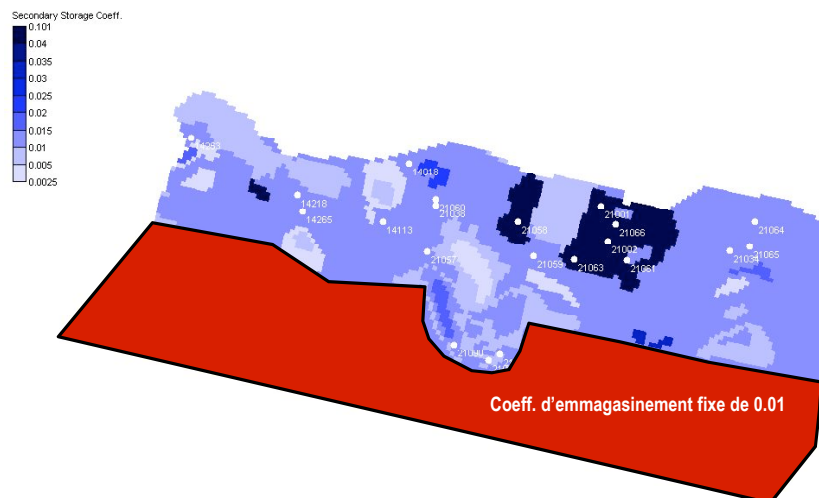


Fig. 23 Coefficients d'emmagasinement obtenus lors du calage/recalage du modèle

2.4.4.4. Chroniques piézométriques

Les résultats obtenus pour les points de validation ont été rangés en quatre classes selon la qualité du calage obtenue qui sont : performance de calage correcte, performance de calage correcte sauf phases de recharge, performance de calage moyenne et performance de calage problématique. Il est important de remarquer que notre modèle calcule des valeurs mensuelles, comparables à une moyenne mobile, ce qui a pour conséquence de fortement lisser les chroniques piézométriques calculées par le modèle.

Performance de calage correcte

Sur 8 points d'observation on obtient un résultat satisfaisant. Pendant les phases de tarissement il y a un écart d'environ 20cm entre les données piézométriques mesurées et calculées et pour les pics on est à un écart situé entre 1 et 2 mètres. Il s'agit des stations d'observation suivantes : Piézomètre S1 Champ Fleury le Butor, Forage la Trinité, Piézomètre S1 Puit du Chaudron (les Calebassiers), Puits Tomi, Forage F3 Duparc, P22 les Cocos, Forage les Cafés et Forage n°1 Ravine des Chèvres les Bas (Annexe 6).

Le piézomètre S1 Champ Fleury le Butor et le forage F3 Duparc sont présentés à titre d'exemple dans les graphiques ci-dessous. La chronique piézométrique pour le piézomètre *S1 Champ Fleury le Butor* montre de manière générale qu'on arrive à simuler les observations. On obtient donc une corrélation satisfaisante entre l'observation et le calcul (Fig. 24).

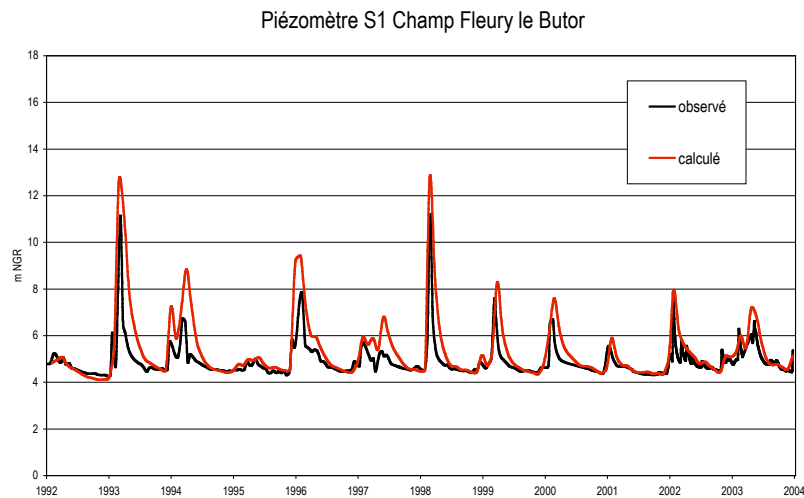


Fig. 24 Chronique piézométrique pour le piézomètre S1 Champ Fleury le Butor sur Saint Denis; les observations en noir et les valeurs calculées en rouge

La chronique piézométrique pour le deuxième exemple le forage *F3 Duparc* en rive droite de la rivière des Pluies montre un comportement légèrement différent. Pour les petites recharges le modèle a tendance à surestimer tandis que les grosses recharges sont bien reproduites (Fig. 25).

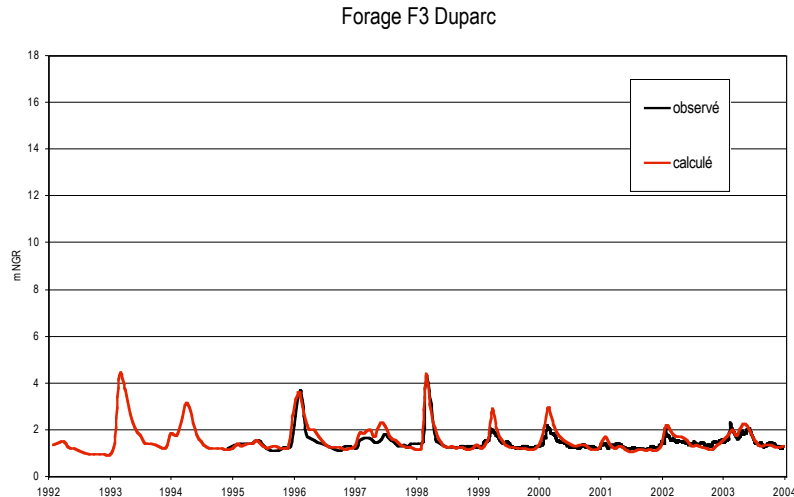


Fig. 25 Chronique piézométrique pour le forage F3 Duparc sur Sainte Marie; les observations en noir et les valeurs calculés en rouge

Performance de calage correcte sauf phases de recharge

Pour les 2 points d'observation Forage parc expositions (appoint ZEC) et S1 Puits ZEC du Chaudron on note un résultat qui montre l'absence de prise en compte de l'infiltration des ravines. Cela se matérialise par des pics calculés constamment trop bas (Fig. 26). Ces deux ouvrages sont situés juste à coté de la ravine du Chaudron (Annexe 7).

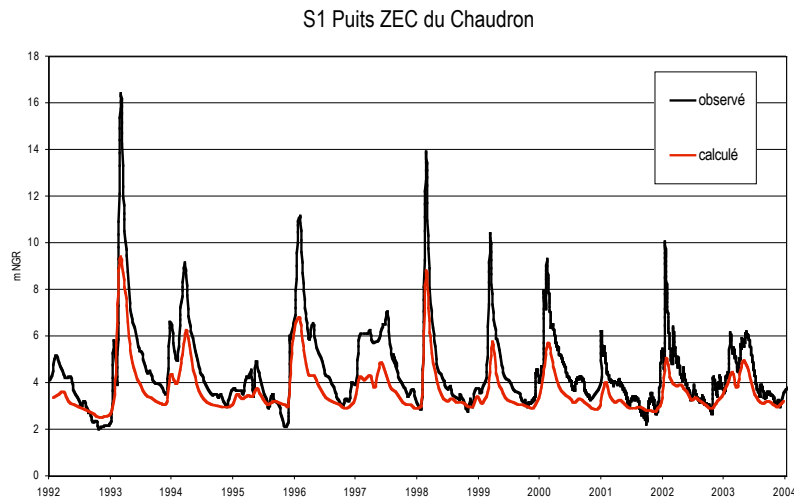


Fig. 26 Chronique piézométrique pour le piézomètre S1 Puits ZEC du Chaudron; les observations en noir et les valeurs calculés en rouge

Performance de calage moyenne

Pour 4 points d'observation, on obtient un calage moyen. Cette situation concerne uniquement des ouvrages pour lesquels la donnée piézométrique disponible est limitée et a un caractère instantané du fait d'une fréquence de mesure faible. Les écarts entre niveau mesuré et modélisé ne sont donc pas forcément significatifs d'un mauvais calage. C'est le cas pour les points d'observation Forage F2 Gillot (Fig. 27), Forage Grand Prado, Forage La Réunion et Puits Barau (Annexe 8).

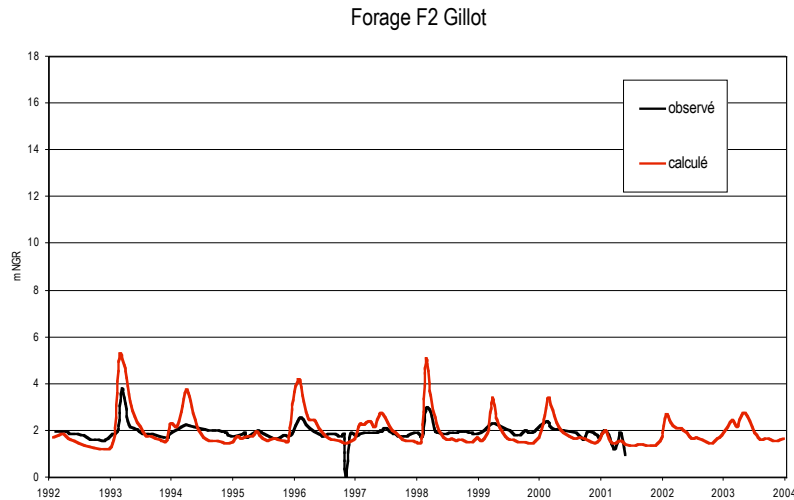


Fig. 27 Chronique piézométrique pour le forage F2 Gillot; les observations en noir et les valeurs calculés en rouge

Performance de calage problématique

Pour les 5 points d'observation Forage F5 Saint Denis Est, Forage Domenjod, Forage Ilet Quinquina, Forage de la Rivière des Pluies et Forage S7 la Convenance II (Annexe 9), les simplifications du modèle, en particulier la non prise en compte de la zone non saturée, empêchent la reproduction fidèle des observations.

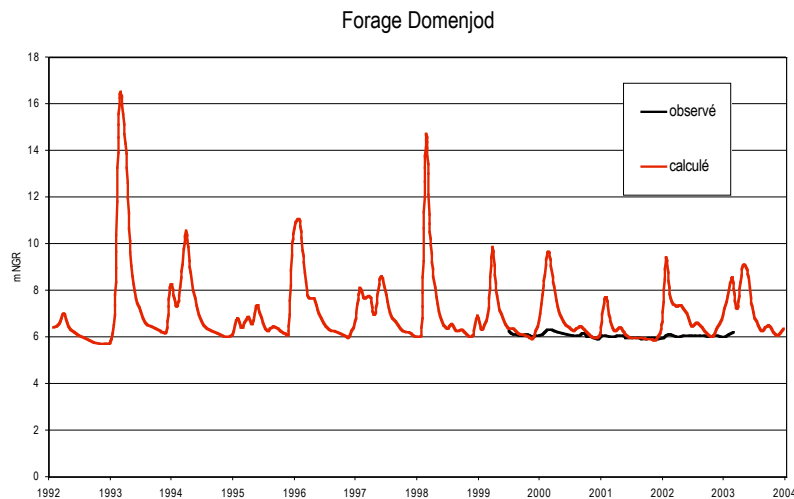


Fig. 28 Chronique piézométrique pour le Forage Domenjod; les observations en noir et les valeurs calculés en rouge

Lorsque l'épaisseur de la zone non saturée devient importante (cas valable pour les trois points Forage Domenjod, Forage Ilet Quinquina et Forage de la Rivière des Pluies situés à une altitude comprise entre 120 et 200 m NGR – Annexe 9), l'amplitude des signaux calculés est systématiquement trop marquée par rapport aux observations à cause de l'absence de l'effet d'amortissement.

Sur le **forage Domenjod** par exemple, le niveau observé reste constamment à 6 m NGR tandis que le niveau simulé oscille entre 6 et 10 m NGR (Fig. 28).

3. Simulation de scénarii d'exploitation – Impact des galeries du transfert sur la ressource en eau souterraine littorale

Pour faire face au problème de la répartition non homogène des précipitations sur les côtes "sous le vent" et "au vent" avec une différence de précipitation moyenne annuelle d'environ 5 m, d'importants travaux de canalisation ont été entrepris qui prévoient d'acheminer l'eau de l'Est de l'île vers l'Ouest, où le besoin en eau est actuellement le plus grand. Deux galeries avaient été planifiées : celle de Mafate est terminée et celle de Salazie est toujours en cours d'exécution (Fig. 29).

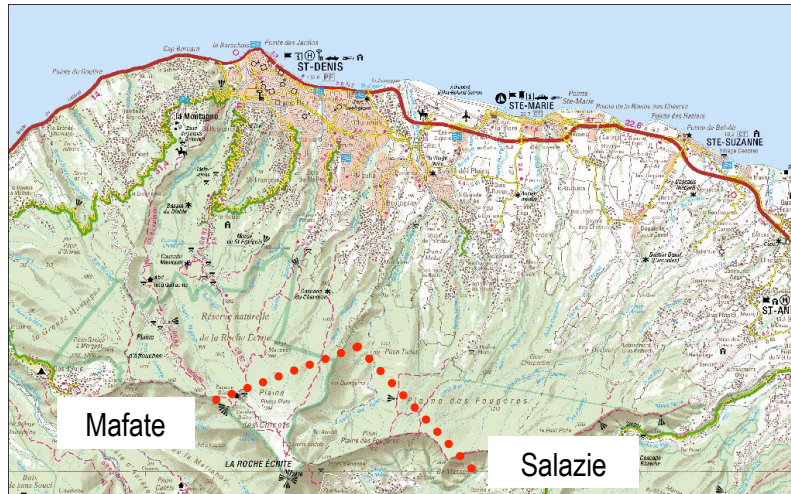


Fig. 29 Les galeries du transfert

Pendant leur creusement, les deux galeries ont rencontré de grosses venues d'eau comprises entre 200 et 400l/s (Fig. 30). Du côté de la galerie de Salazie l'eau drainée est actuellement rejetée dans la rivière des Pluies mais dans la configuration de l'exploitation future cette eau sera basculée vers l'Ouest, ces eaux alimentant normalement la nappe stratégique de Saint Denis et de Sainte Marie. Afin de simuler un impact éventuel de ces drainages et du rejet, on a réalisé différents scénarii.

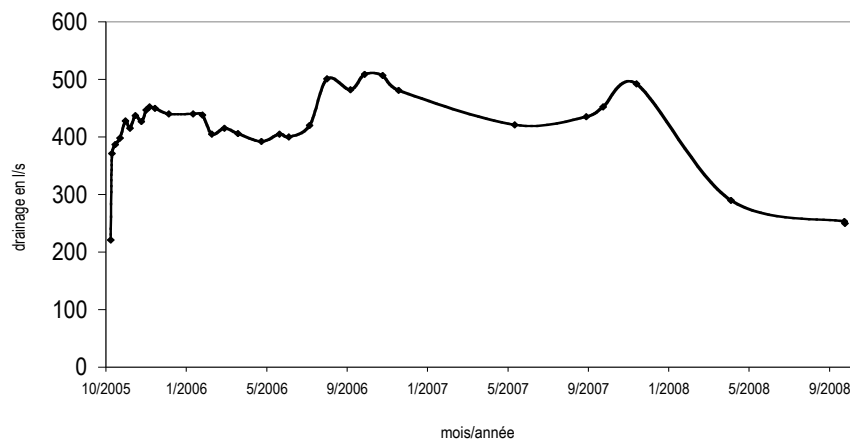


Fig. 30 Les venues d'eau de la galerie Salazie;

3.1. Présentation des scénarii

Trois scénarii en **régime permanent** ont été réalisés afin de définir les ordres de grandeur d'un impact final et maximal de différents scénarii d'exploitation de la nappe, sans prendre en compte l'emménagement c'est-à-dire la capacité de la nappe à amortir les impacts négatifs en faisant des réserves d'eau par temps de forte recharge.

3.1.1. Scénario I - Exploitation des galeries

Le premier scénario simule les conditions d'exploitation future des galeries, c'est-à-dire un drainage de l'aquifère de la planèze avec pour conséquence une diminution du flux de recharge à la limite Sud du modèle.

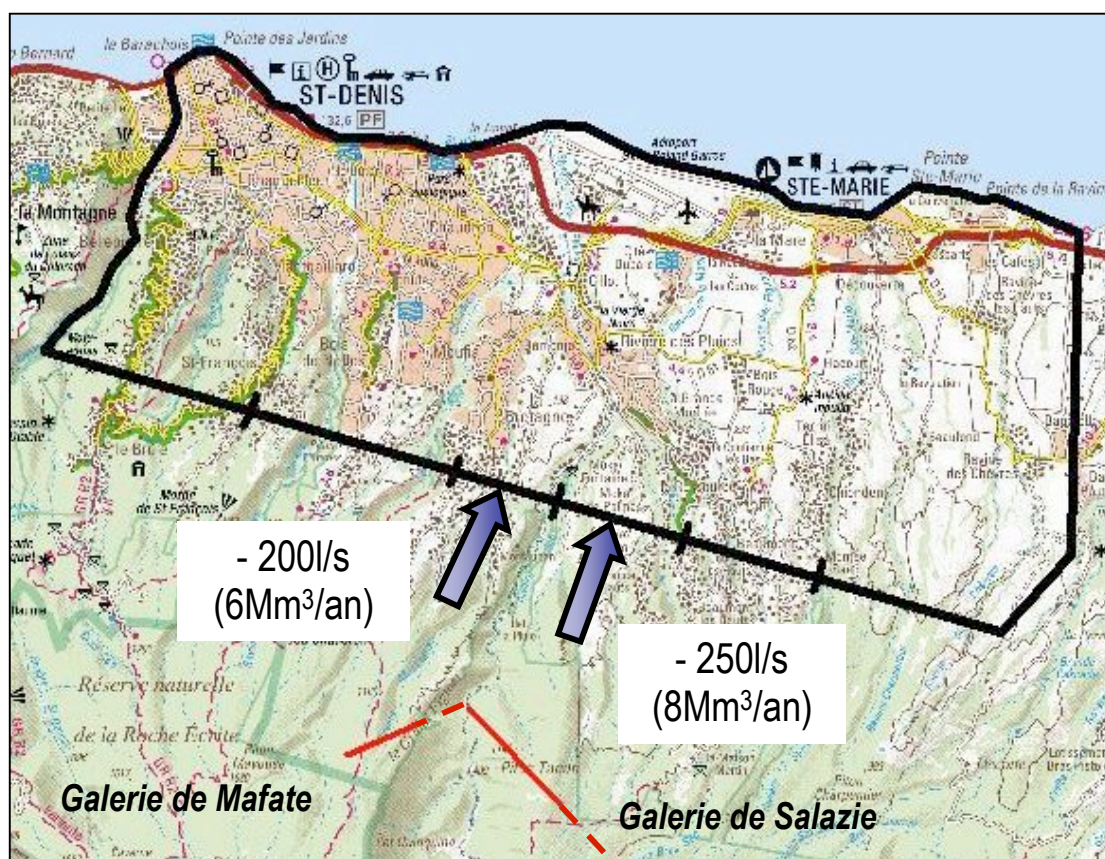


Fig. 31 Schéma du scénario 1

Les flux de recharge ont été réduits selon les modalités suivantes : moins **200l/s** en rive gauche pour la galerie de Mafate et moins **250l/s** en rive droite pour la galerie de Salazie (Fig. 31). Ces valeurs représentent le débit moyen d'exhaure des galeries fin 2003. Les simulations ont été faites en régime permanent pour des années de type sèche, humide et moyenne (c.f. Annexe 14).

3.1.2. Scénario II - Augmentation de production

Afin de comparer l'impact des galeries à un impact lié à une augmentation globale de la production en eaux souterraines par forage, la production a été augmentée globalement d'environ **60%**, correspondant à une production totale de **31Mm³/an**, soit la capacité de pompage maximale existant actuellement. Les simulations ont été faites en régime permanent pour des années de type sèche, humide et moyenne (c.f. Annexe 14).

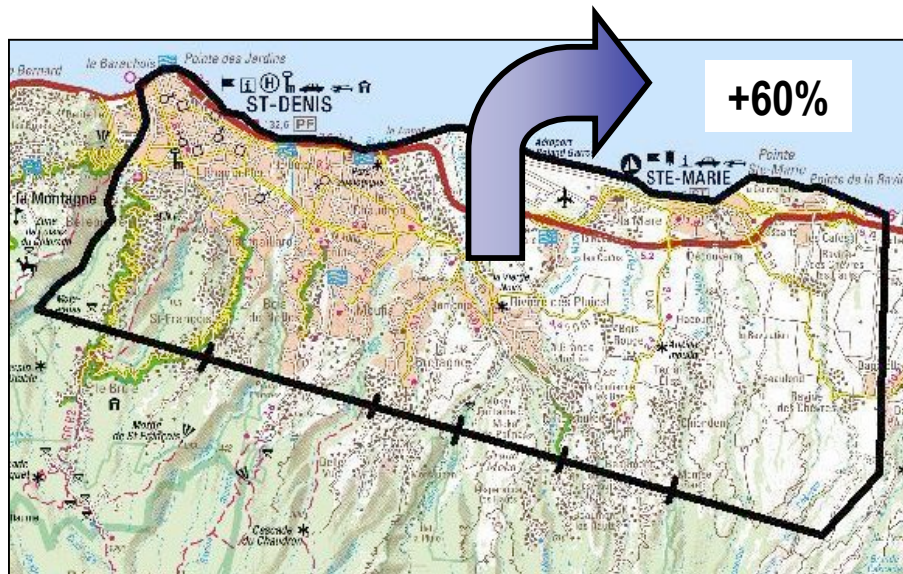


Fig. 32 Schéma du scénario 2

3.1.3. Scénario III - Galeries et augmentation de production

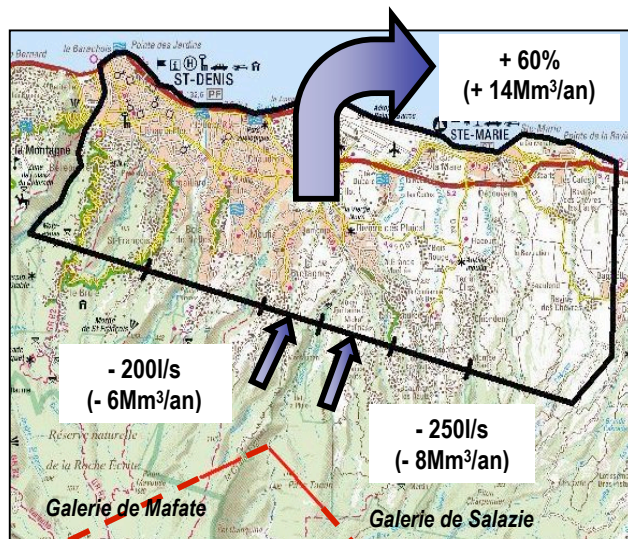


Fig. 33 Schéma du scénario 3

Ce scénario correspond à une combinaison des deux scénarios précédents. Afin de simuler l'impact des galeries, les flux de recharge ont été réduits selon les modalités suivantes : moins **200l/s** en rive gauche pour la galerie de Mafate et moins **250l/s** en rive droite pour la galerie de Salazie. La production a été augmentée globalement de **60%**, ce qui correspond à une production totale de **31Mm³/an** (Fig. 33). Les simulations ont également été faites en régime permanent pour des années de type sèche, humide et moyenne (c.f. Annexe 14).

3.2. Résultats

3.2.1. Scénario I - Exploitation des galeries

En limitant l'analyse dans le secteur où le modèle est le mieux calé (Fig.34 cercle noir), l'impact éventuel consisterait en une baisse maximale de **20 à 60cm** (Fig. 34). Cet abaissement devrait être moindre dans la réalité, en tenant compte de l'effet tampon dû à l'emmagasinement et à la capacité de la nappe à faire des réserves d'eau.

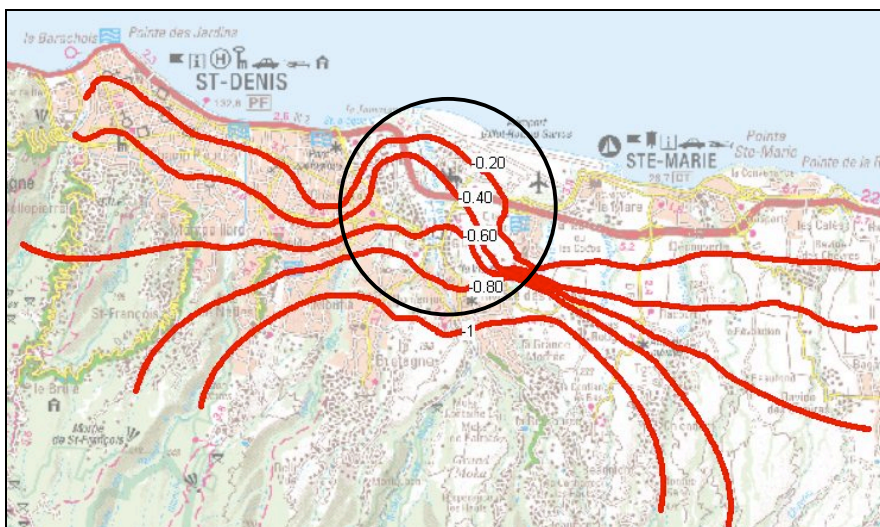


Fig. 34 Abaissement du niveau piézométrique en mètre à interpréter comme un impact éventuel maximal de l'exploitation future des galeries de transfert

Les esquisses piézométriques des différentes simulations de ce scénario se trouvent dans l' Annexe 11.

3.2.2. Scénario II - Augmentation de production

L'impact d'une augmentation de 60% de la production reste globalement inférieur à celui de l'exploitation des galeries du scénario I. L'impact d'une production maximale est logiquement plutôt localisé sur la zone la plus exploitée. L'ordre de grandeur des abaissements est de **10 à 50cm** (Fig. 35).

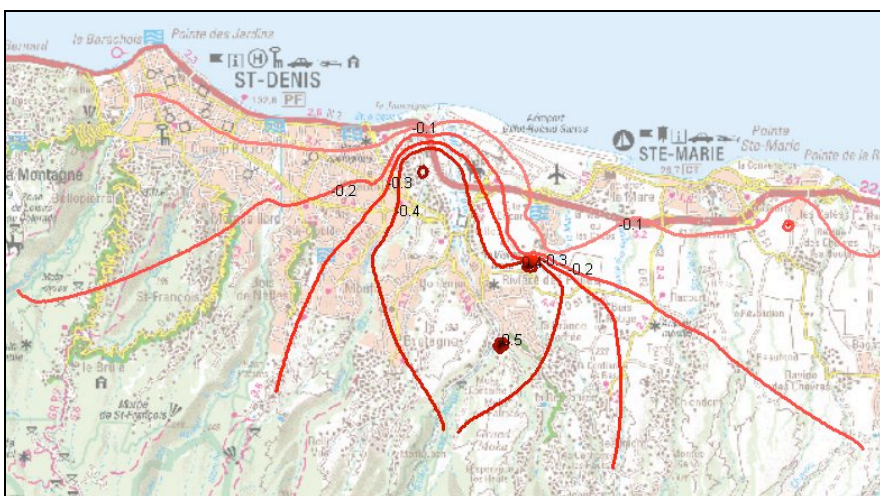


Fig. 35 Abaissement du niveau piézométrique en mètre à interpréter comme un impact éventuel maximal d'une augmentation de production selon le scénario II

Les esquisses piézométriques des différentes simulations de ce scénario se trouvent dans l' Annexe 12.

3.2.3. Scénario III - Galeries et augmentation de production

Les abaisséments maximaux des niveaux piézométriques pour une exploitation maximale selon les capacités existantes sont de l'ordre de **40cm à 1 mètre** (Fig. 36). Ils sont donc supérieurs aux abaisséments obtenus lors des deux autres scénarios.

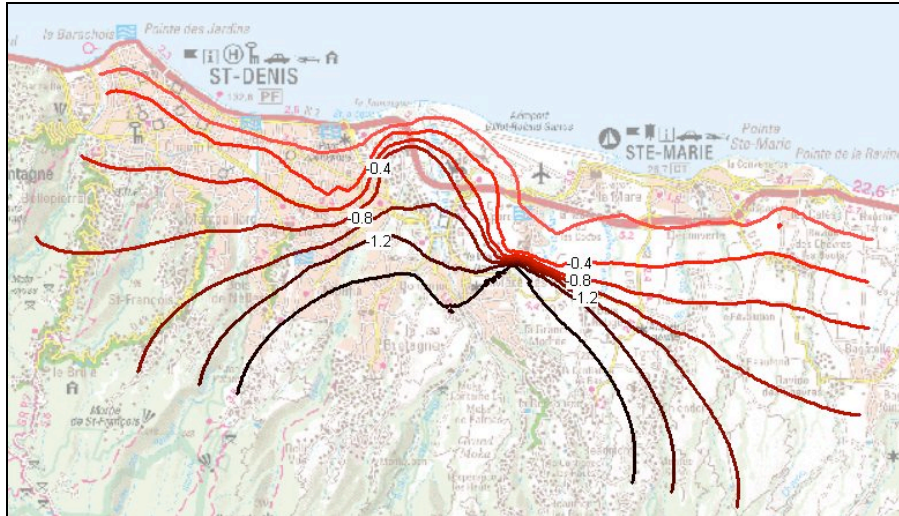


Fig. 36 Abaissement du niveau piézométrique en mètre à interpréter comme un impact éventuel maximal de la configuration selon le scénario III

Les esquisses piézométriques des différentes simulations de ce scénario se trouvent dans l'Annexe 13.

3.2.4. Impact sur le biseau salé

Pour illustrer une remontée éventuelle de l'interface eau douce - eau salée, des calculs à l'aide du logiciel CASE (Costal Aquifer Salinity Evaluation; S.A. Prathapar / Fonds Department of Infrastructure, Planning and Natural Resources, NSW – Australia) ont été faits. Ce logiciel propose deux modèles 2D verticaux : le modèle confiné et le modèle de nappe libre. La différence entre les deux modèles est illustrée dans la figure ci-dessous (Fig. 37). Le cas "nappe captive" est le plus défavorable d'un point de vue exploitation de la ressource. C'est pourquoi ce modèle a été utilisé pour simuler des impacts qualitatifs éventuels. Il est important de noter que cet approche reste purement théorique. Les résultats obtenus ne sont pas validés par des données d'observation. Ils sont présentés "en l'état" afin d'illustrer un impact potentiel d'un point de vue qualitatif pour une nappe homogène "idéale". Néanmoins, il représente la réponse hydrodynamique réelle de cette nappe "idéale".

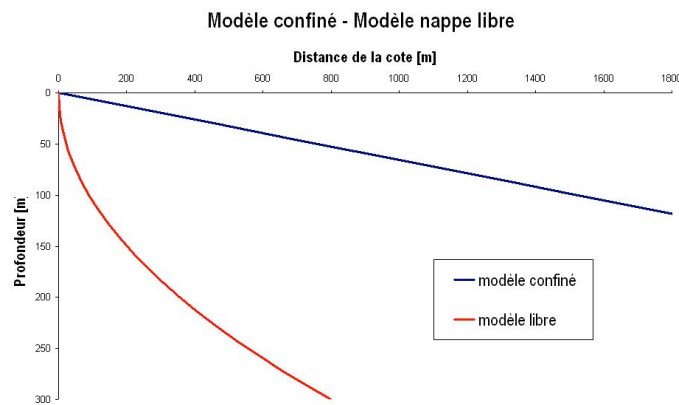


Fig. 37 Comparaison théorique des interfaces eau douce – eau salée simulées avec le modèle confiné en bleu et avec le modèle libre en rouge

Les paramètres du terrain (transmissivité et coefficient d'emmagasinement) représentent des valeurs moyennes obtenues lors du calage/recalage du modèle d'écoulement présenté précédemment. Pour chaque scénario évoqué précédemment, la position du biseau salé le long de la coupe passant par un forage représentatif d'un secteur donné a été calculée. Ces positions sont comparées avec une interface de référence correspondant à la situation actuelle (modèle validé, sans galeries, ni augmentation de la production par pompage).

3.2.4.1. Sainte Marie – Forage F2 Gillot

Pour illustrer un impact éventuel du côté de Sainte Marie on a choisi une coupe passant par le **forage F2 Gillot**. C'est un forage qui n'est actuellement plus exploité parce qu'il est salé depuis janvier 2001.

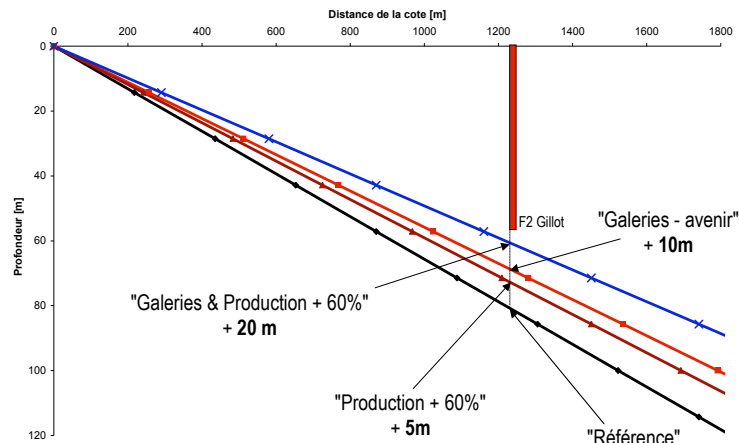


Fig. 38 L'interface eau douce – eau salée simulée (modèle confiné) pour chacun des scénarii pour la coupe F2 Gillot et les remontées correspondantes. La référence a été calculé à base des valeurs du modèle validé. Le forage est à la profondeur réelle

Le modèle propose des remontées théoriques de cette interface comprises entre **5** et **20m** par rapport au niveau de référence. Une augmentation de production pourrait faire remonter l'interface eau douce – eau salée de **5m**, la configuration "Galleries – future exploitation" à peu près de **10m** et de l'ordre de **20m** selon le scénario "Galleries & Production + 60%" (Fig. 38).

3.2.4.2. Saint Denis – Puits ZEC du Chaudron

Du côté de Saint Denis la coupe traversant le **forage parc expositions** et le **puits ZEC du Chaudron** a été choisi.

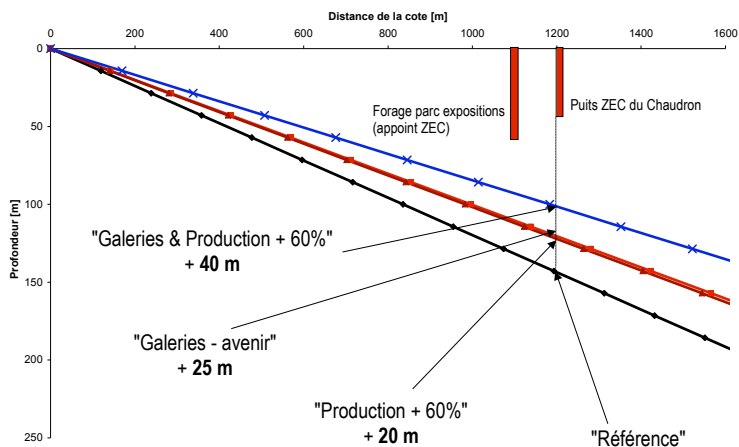


Fig. 39 L'interface eau douce – eau salée simulée (modèle confiné) pour chacun des scénarii pour la coupe puits ZEC du Chaudron et les remontées correspondantes. La référence a été calculé à base des valeurs du modèle validé. Les forages sont à la profondeur réelle

Le long de cette coupe les remontées provoquées par les abaissement du niveau piézométrique lors des différents scénarii sont plus importantes que de côté de Sainte Marie. Elles sont comprises entre **20** et **40m**. Le scénario "Production + 60%" correspond également à l'impact le plus petit de l'ensemble des différents scénarii avec **20m** (Fig. 39).

3.3. Limites des simulations

3.3.1. Tests de sensibilité du modèle

Après la validation, un test de sensibilité du modèle a été réalisé pour appréhender sa capacité à réagir à des modifications des conditions aux limites en régime transitoire, c'est-à-dire avec prise en compte de la variation des réserves de la nappe. Plusieurs cas ont été testés. D'une part une diminution de l'alimentation amont à cause des drainages des galeries accompagnée par une augmentation du débit de la rivière de Pluies (du fait des rejets de l'eau drainée par les galeries) et d'autre part une simple augmentation du débit de la rivière de Pluies sans diminution de l'alimentation amont (Tab. 2). Ces scénarii sont comparés au calcul du "modèle validé" (scénario référence) et aux observations. Les simulations ont été faites en régime transitoire pour les années 1992 à 2003.

Tab. 2 Volumes moyens d'alimentation en million m³ par an selon les différents scénarii du test de sensibilité

	"Référence"	"Galeries et rejet"	"Rejet"
Alimentation amont	115	95	115
Infiltration Rivière des Pluies	10	14	14
Recharge (pluie)	20	20	20
Alimentation moyenne totale	145	129	149

Pour le scénario "Galeries et rejet" les drainages ont été enlevés de l'alimentation amont du modèle dès octobre 2001, c'est-à-dire immédiatement après les premières venues d'eau interceptées par les galeries. A cause de l'absence de données sur la planèze, le chemin que l'eau doit parcourir entre les galeries et la limite Sud du modèle n'a pas été pris en compte. Pour la galerie "Salazie" ont été soustraits les vraies valeurs mesurées lors des campagnes de terrain de l'OLE (Fig. 30, moyenne de 14Mm³/an) et pour la galerie "Mafate" a été enlevée constamment la valeur de 6Mm³/an. L'infiltration de la rivière des Pluies a été augmentée de 10 à 14Mm³/an.

Le scénario "Rejet" englobe une augmentation seule de l'infiltration de la rivière des Pluies de 10 à 14Mm³/an. Ce cas représente la possibilité que les drainages n'ont pas encore d'influence sur le flux de recharge à la limite sud du modèle en raison du long chemin entre les galeries et la limite qui n'était probablement pas encore parcouru pendant ces deux ans.

3.3.1.1. Résultat des tests de sensibilité du modèle

Afin d'illustrer ces résultats deux points d'observation ont été choisis : le piézomètre **S1 Puits ZEC du Chaudron** en rive gauche de la rivière des Pluies et le forage **F3 Duparc** situé en rive droite de la rivière des Pluies.

En observant les résultats de ces simulations à partir de 2001 pour le **S1 Puits ZEC du Chaudron** (Fig. 35) on voit que lorsqu'on augmente l'infiltration de la rivière des Pluies, le niveau augmente tout de suite de manière cohérente. Le modèle ne réagit donc pas de manière excessive. La réponse pour le cas "rejet avec galerie" est également immédiate mais reste constante avec un abaissement d'environ 70cm. La référence est le calcul "modèle validé".

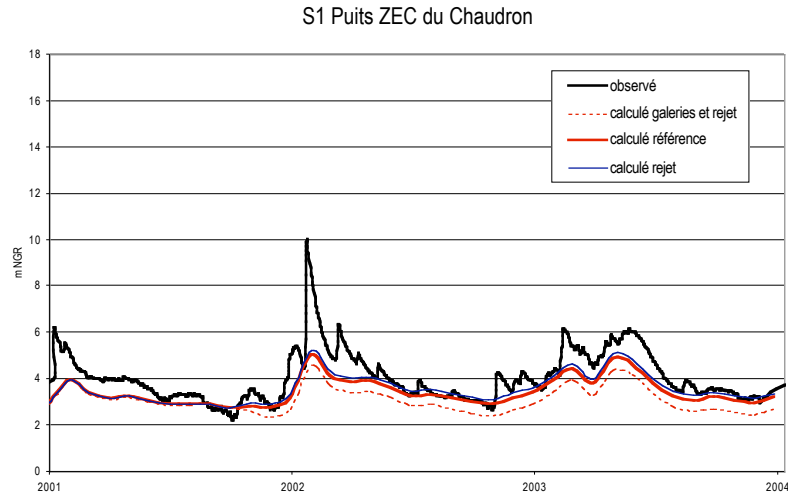


Fig. 35 Chronique piézométrique pour le piézomètre S1 Puits ZEC du Chaudron en rive gauche de la rivière des Pluies – test de sensibilité

Le résultat pour le **forage F3 Duparc** situé en rive droite de la rivière des Pluies montre un comportement similaire, le modèle réagit donc de manière cohérente pour les deux rives de la rivière des Pluies (Fig. 36). Pour le cas "rejet avec galerie" on obtient un abaissement final d'environ 30cm.

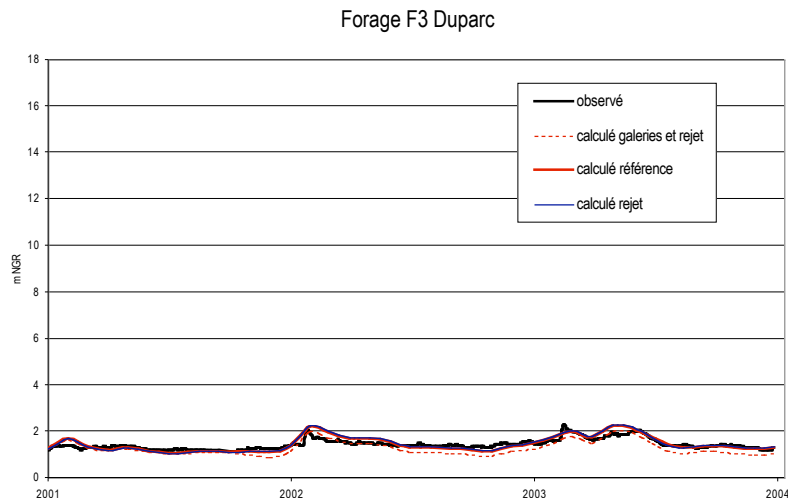


Fig. 36 Chronique piézométrique pour le forage F3 Duparc en rive droite de la rivière des Pluies – test de sensibilité

Synthèse / Conclusions

Bilan des tests de sensibilité

Le bilan des tests de sensibilité s'est avéré sans surprise. Du fait des limites géométriques choisies pour le modèle (compromis entre la recherche d'une meilleure représentativité régionale et la prise en compte de l'absence d'information hydrogéologique dans certaines zones, les planèzes en particulier) la réaction à des modifications des conditions aux limites est immédiate. Le modèle, dans sa version actuelle, ne permet pas de répondre à la question : "au bout de combien de temps, l'impact éventuel des galeries se fera sentir sur la ressource en eau souterraine littorale ?». Néanmoins la réponse de ce modèle à des stimuli variés apparaît cohérent d'un point de vue hydrodynamique. Ce modèle permet d'estimer l'ordre de grandeur des impacts sur une séquence de 3 ans avec prise en compte de la variation des réserves de la nappe (en régime transitoire).

Scénarii

Les volumes de recharge sont manifestement plus grands que les volumes exploités. Même dans le scénario III, qui est celui avec la plus grande exploitation, le volume exploité atteint à peine 30% du volume de recharge (Tab.3). Il ne s'agit donc pas d'un problème de volume d'eau. Ce qui est intéressant d'étudier c'est la **qualité** de cette eau exploitée par rapport à la teneur en sel.

Tab. 3 Volumes d'exploitation de la nappe selon les différents scénarii et les pourcentages correspondants par rapport à l'alimentation totale du modèle

	Pompage actuel	Galeries	Scénario I - Exploitation des galeries	Scénario II - Augmentation de production	Scénario III - Galeries et Augmentation de production
Volume (Mm ³ /an)	18	14	32	31	45
% de la recharge	11	9	20	19	28

L'interface eau douce - eau salée

Les résultats de cette étude de l'interface eau douce - eau salée restent théoriques car il n'existe aucune donnée concernant le positionnement de l'interface eau douce - eau salée dans la zone. Aucun forage existant ne recoupe cette interface. Or depuis la salinisation rapide et pour le moment non réversible du forage F2 Gillot en janvier 2001, on a la preuve que cette interface peut être influencée par les pompages d'exploitation et que les nappes de Sainte Marie et probablement de Saint Denis sont vulnérables vis-à-vis de ce phénomène.

La question de la réversibilité de ces phénomènes de salinisation, et plus généralement de leur surveillance doit être posée avec d'autant plus d'acuité que l'exploitation des nappes littorales de La Réunion a tendance à s'accroître. Un premier élément de réponse sera vraisemblablement apporté par le nouveau forage en cours d'implantation dans le secteur du Petit Prado à l'initiative du Conseil Général de La Réunion.

Propositions pour améliorer le modèle

Pour améliorer le rendu du modèle il faudra d'abord prendre en compte l'ensemble des données réelles (prélèvements, observations, ...) pour la phase du calage. On devra réaliser un traitement des recharges plus poussé en ce qui concerne les infiltrations des rivières et des ravines. Mais surtout il faudra prendre en compte la zone non saturée qui a une influence majeure sur les simulations lorsque l'épaisseur de cette zone augmente.

Egalement on pourrait envisager une approche en trois dimensions ce qui permettrait d'intégrer par exemple la géologie et les effets de densité. Ces derniers devraient être d'un intérêt majeur car il devrait être intéressant de pouvoir simuler de manière fiable des scénarii qui prennent en compte la problématique de l'intrusion d'eau salée dans l'aquifère .

Pour mieux comprendre les aquifères on pourrait alors envisager une étude d'écoulement souterrain à l'aide d'essais de traçage.

Par ailleurs, l'amélioration de ce modèle nécessite une meilleure connaissance des phénomènes de salination. Cela passe inévitablement par la mise en place d'un réseau spécifique de suivi du biseau salé dans la partie littorale de l'île de La Réunion et par la densification des réseaux de suivi piézométrique en continu existants et ce dans le cadre d'une approche partenariale.

Bibliographie

- [1] "CARACTERISATION HYDROLOGIQUE DU MILIEU VOLCANIQUE INSULAIRE – LE PITON DES NEIGES – ILE DE LA REUNION" [Jean-Lambert JOIN – 1991]
- [2] "ETUDE DE LA MINERALISATION DES EAUX AU CONTACT DE LA SERIE MAGMATIQUE DIFFERENCIEE DE L'ILE DE LA REUNION." [Jean-Luc HOAREAU - 2001]
- [3] "INTERPRETATION DE GEOPHYSIQUE ELECTRIQUE - SECTEUR DE SAINTE-MARIE" [BRGM - 1988]
- [4] "REALISATION ET INTERPRETATION D'UNE PROSPECTION GEOPHYSIQUE PAR SONDAGES ELECTRIQUES DANS LE SECTEUR DE GILLOT (COMMUNE DE SAINTE MARIE)" [BRGM – 1988]
- [5] "EXPLOITATION DES RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES DU SECTEUR BRETAGNE/DOMENJOD - ETUDES PRELIMINAIRES - PHASE A - PROSPECTION GEOPHYSIQUE PAR SONDAGES AUDIOMAGNETOTELLURIQUE (AMT) ET SONDAGES ELECTRIQUES" [BRGM - REUNION - 1995]
- [6] "PDRE 1994 - SECTEUR SAINTE-MARIE - SAINTE-SUZANNE - ELABORATION D'UN MODELE MATHEMATIQUE DE GESTION DES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE DANS LE SECTEUR COMPRIS ENTRE RIVIERE DES PLUIES ET RIVIERE SAINTE-SUZANNE - RAPPORT DE PREMIERE PHASE – RECEUIL ET SYTHESE DES DONEES HYDROGEOLOGIQUE" n° 104029R2 - [SOGREAH - 1998]
- [7] "PDRE 1994 - SECTEUR SAINTE-MARIE - SAINTE-SUZANNE - ELABORATION D'UN MODELE MATHEMATIQUE DE GESTION DES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE DANS LE SECTEUR COMPRIS ENTRE RIVIERE DES PLUIES ET RIVIERE SAINTE-SUZANNE - RAPPORT DE SECONDE PHASE - MODELE MATHEMATIQUE" n° 104029R3 - [SOGREAH - 1999]
- [8] "ATLAS HYDROGEOLOGIQUE DE LA REUNION" [BRGM - 1986]
- [9] "ATLAS DE L'ENVIRONNEMENT - ILE DE LA REUNION" [2001]
- [10] "MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE DE LA REGION DE SAINT-DENIS" [Brice TRUONG – 2001]
- [11] "SUIVI PIEZOMETRIQUE DES AQUIFERES DE SAINT-DENIS" [Office de l'Eau]
- [12] "SUIVI PIEZOMETRIQUE DES AQUIFERES DE SAINTE-MARIE" [Office de l'Eau]
- [13] "CARTE DE RANDONNEE - SAINT-DENIS – CIRQUES DE MAFATE ET DE SALAZIE – ILE DE LA REUNION" n° 4402 RT [Institut Geographique National – 1 : 25 000]
- [14] "ETUDE PRELIMINAIRE DE L'IMPACT DE LA GALERIE DU TRANSFERT SUR LA RESSOURCE EN EAU DU SECTEUR DE LA RIVIERE DES PLUIES" [Office de l'Eau, Jean-Luc FOLIO - 2002]
- [15] "SURVEILLANCE PIEZOMETRIQUE DES EAUX SOUTERRAINES SUR LE TERRITOIRE COMMUNALE DE SAINT DENIS" [BRGM – 1996/1997]
- [16] "FLUCTUATION SAISONNIERE DE L'EVAPOTRANSPIRATION (ET₀ PENMAN-MONTEITH) DANS LE NORD, L'EST ET LE SUD-EST DE L'ILE DE LA REUNION. INFLUENCE DE L'ALTITUDE ET COMPARAISON AVEC L'OUEST ET LE SUD" [CIRAD (centre de coopération international en recherche agronomique pour le développement) - Juillet 2003]

Annexes

Annexe 1 - Vue d'ensemble des stations de mesures piézométrique de l'OLE sur le secteur d'étude

Code OLE	n° BSS	Nom de la station	X	Y
14018	12264X0018	Puits Tomi	156440	76940
14113	12264X0113	Piézomètre S1 Puits du Chaudron (les Calebassiers)	155870	75655
14218	12264X0218	Piézomètre S1 Champ Fleury le Butor	153960	76250
14219	12264X0219	Piézomètre S1 Casino	151740	78320
14263	12264X0263	Piézomètre parking mairie St-Denis	151590	77520
14264	12264X0264	Forage pépinière Ouest	150920	76215
14265	12264X0265	Forage la Trinité	154074	75883
21001	12271X0001	Puits usine de la Mare	160720	76000
21002	12271X0002	Puits Barau	160873	75225
21015	12271X0015	Forage de la Rivière des Pluies	158458	72702
21030	12271X0030	Puits CCIR Gillot BA 181	157975	76320
21034	12271X0034	Forage La Réserve	163650	75040
21038	12271X0038	S1 Puits ZEC du Chaudron	157030	76033
21044	12271X0044	Forage Cerf la Bretagne	156910	74540
21049	12271X0049	Forage Ilet Quinquina	158205	72555
21050-B	12271X0050	Forage de Carreau Coton	159100	74190
21057	12271X0057	Forage F5 Saint Denis Est	156850	74979
21058	12271X0058	Forage F2 Gillot	158857	75667
21059	12271X0059	Forage F3 Duparc	159208	74889
21060	12271X0060	Forage parc expositions (appoint ZEC)	157031	76156
21061	12271X0061	Forage la Réunion	161284	74798
21063	12271X0063	Forage Grand Prado	160108	74806
21064-1	12271X0064	Forage Ravine des Chèvres	164129	75653
21065	12271X0065	Forage les Cafés	164012	75093
21066	12271X0066	P22 les Cocos	161037	75607
21090	12271X0090	Forage Domenjod	157440	72905

Annexe 2 - Calcul de l'évapotranspiration

L'évapotranspiration a été calculée à base des évapotranspirations potentielles mesurées à la station Gillot-Aéroport (Météo France) à l'aide du modèle proposé par le CIRAD pour l'estimation de l'ET₀ par décade [16].

Annexe 3 - Interpolation des pluies

Les pluies ont été interpolées à partir des moyennes mensuelles de 12 stations de Météo France dont 3 à l'extérieur du secteur d'étude. La méthode d'interpolation choisie dans GMS est : Inverse Distance Weighted (IDW) - gradient hyperplane.

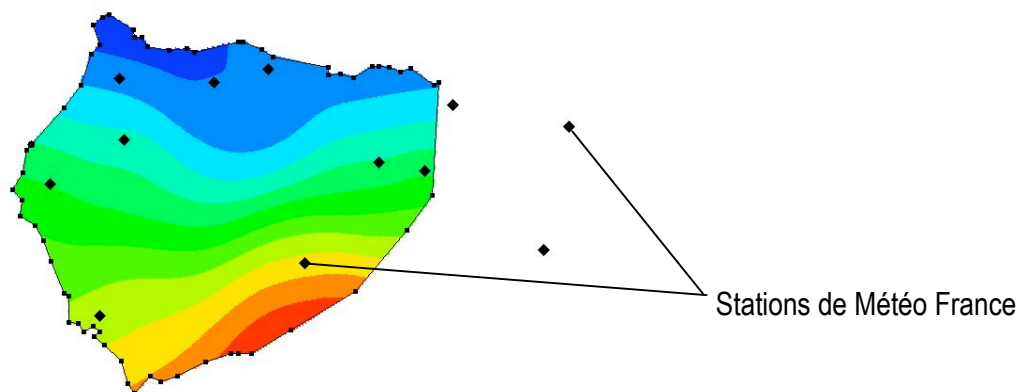


Fig. 42 Exemple pour l'interpolation des pluies sur le bassin versant entier dans GMS avec les 12 stations météo

Annexe 4 - Comparaison des bilans hydrologiques

Une comparaison de bilans hydrologiques dans le Nord et le Nord-Est.

	BRGM Communes de Ste Marie et Ste Suzanne		Modèle St Denis et Ste Marie, moyenne 1992 - 2003		SOGREAH Ste Marie et Ste Suzanne, 1996/1997		Modèle St Denis et Ste Marie, 1996/1997	
	mm	% de la pluie brute	mm	% de la pluie brute	mm	% de la pluie brute	mm	% de la pluie brute
Pluie brute	2718	100	2465	100	3470	100	2231	100
ETP	1176	43	1219	49	1042	30	1232	55
Ruissellement	544	20	508	21	1796	52	289	13
Infiltration	999	37	740	30	634	18	707	32

Annexe 5 - Comparaison des transmissivités

valeurs en m ² /s	transmissivité (essais de pompage)	transmissivité modélisé	transmissivité Sogreah
Forage pépinière Ouest	0.0070	0.0675	-
Forage la Trinité	0.5600	0.0575	-
Puits CCIR Gillot BA 181	0.0010	0.0728	0.0280
S1 Puits ZEC du Chaudron	0.8000	1.1574	0.0280
Forage Cerf la Bretagne	0.4500	2.3148	-
Forage F5 Saint Denis Est	0.0045	0.0917	-
Forage F2 Gillot	0.3000	0.1157	0.0280
Forage F3 Duparc	0.2200	0.5787	0.3500
Forage parc expositions (appoint ZEC)	0.2500	0.5787	0.0280
Forage la Réunion	0.5000	0.4051	0.3500
Forage Grand Prado	3.4000	0.1157	0.3500
Forage Ravine des Chèvres	0.0030	0.2894	0.1500
Forage les Cafés	0.0800	0.0579	0.1500
P22 les Cocos	0.1000	0.1157	2.0000
Forage Domenjod	0.4000	0.3059	-
Forage de Carreau Coton	0.0500	0.0471	0.0280
Puits Barau	0.0400	0.1157	0.3500
Forage de la Rivière des Pluies	0.1400	0.0525	-
Forage Ilet Quinquina	0.1400	0.0047	-
La Découverte	0.0050	0.4051	0.7500

calculé avec STARPOINT SOFTWARE

SOGREAH (bureau d'étude qui avait fait un modèle en 1998) sur le secteur de Ste Marie/Ste Suzanne)

Annexe 6 - Performance correcte

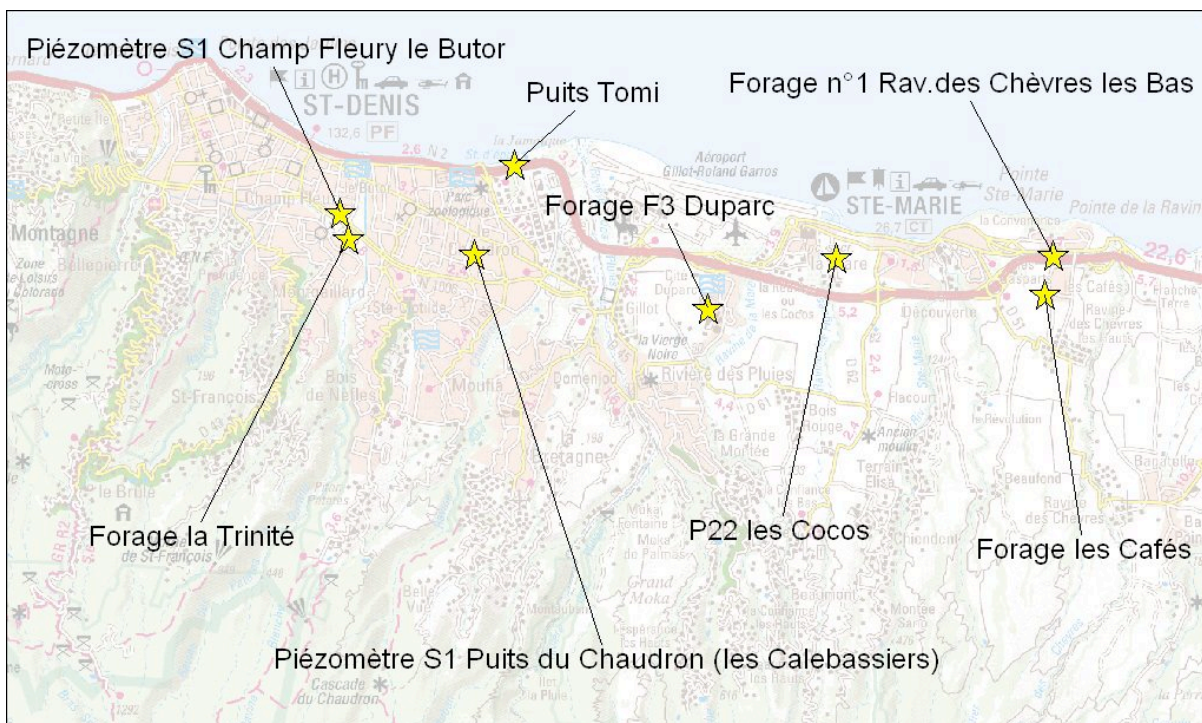


Fig. 43 Station d'observation où on a obtenu une performance correcte

Annexe 7 - Performance correcte sauf phases de recharge

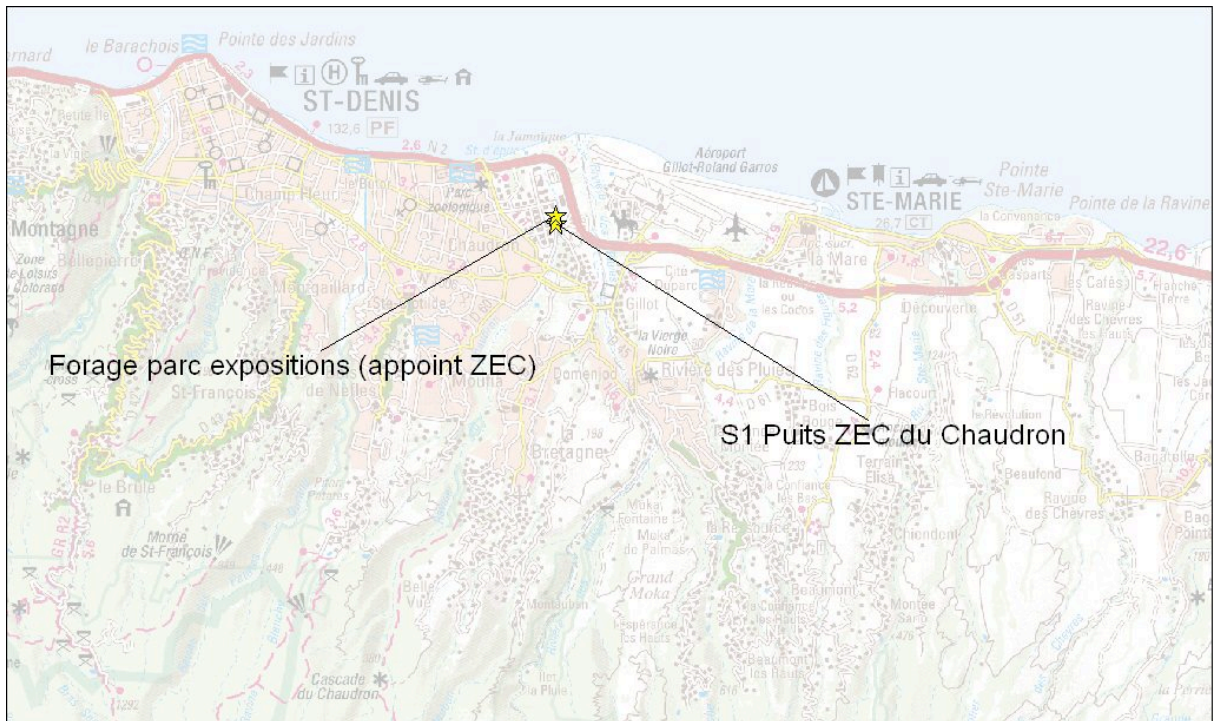


Fig. 44 Station d'observation où on a obtenu une performance correcte sauf phases de recharge

Annexe 8 - Performance moyenne

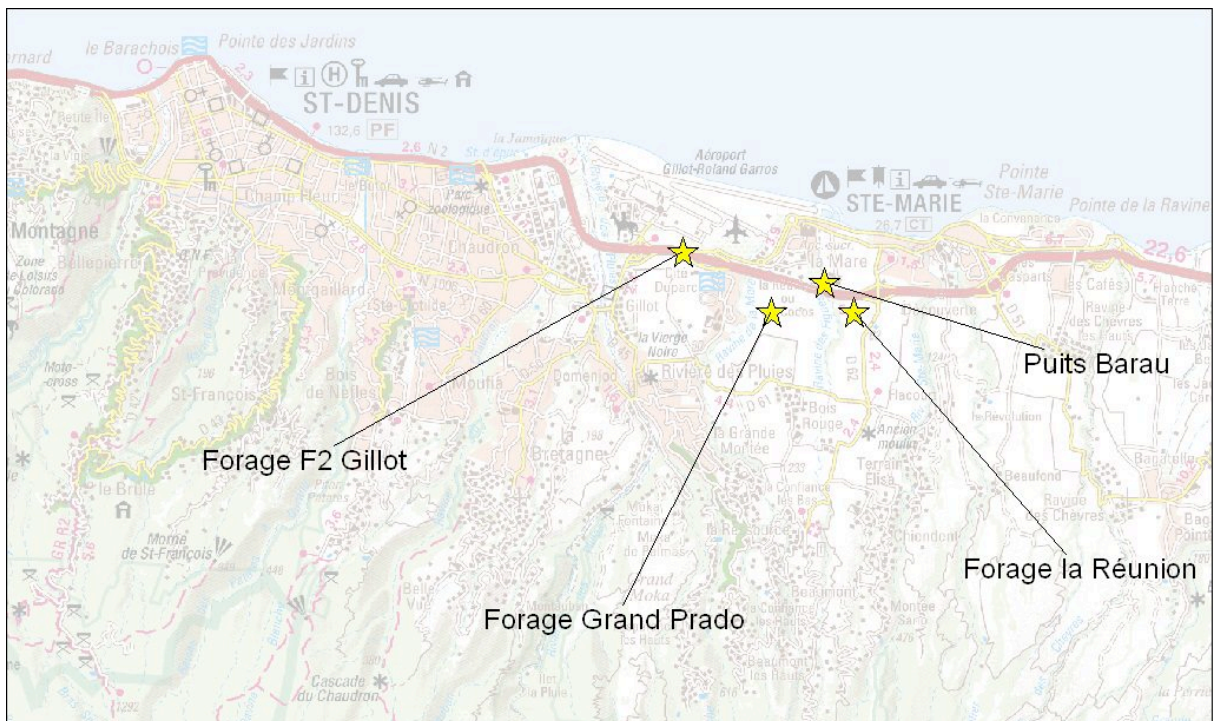


Fig. 45 Station d'observation où on a obtenu une performance moyenne

Annexe 9 - Performance problématique

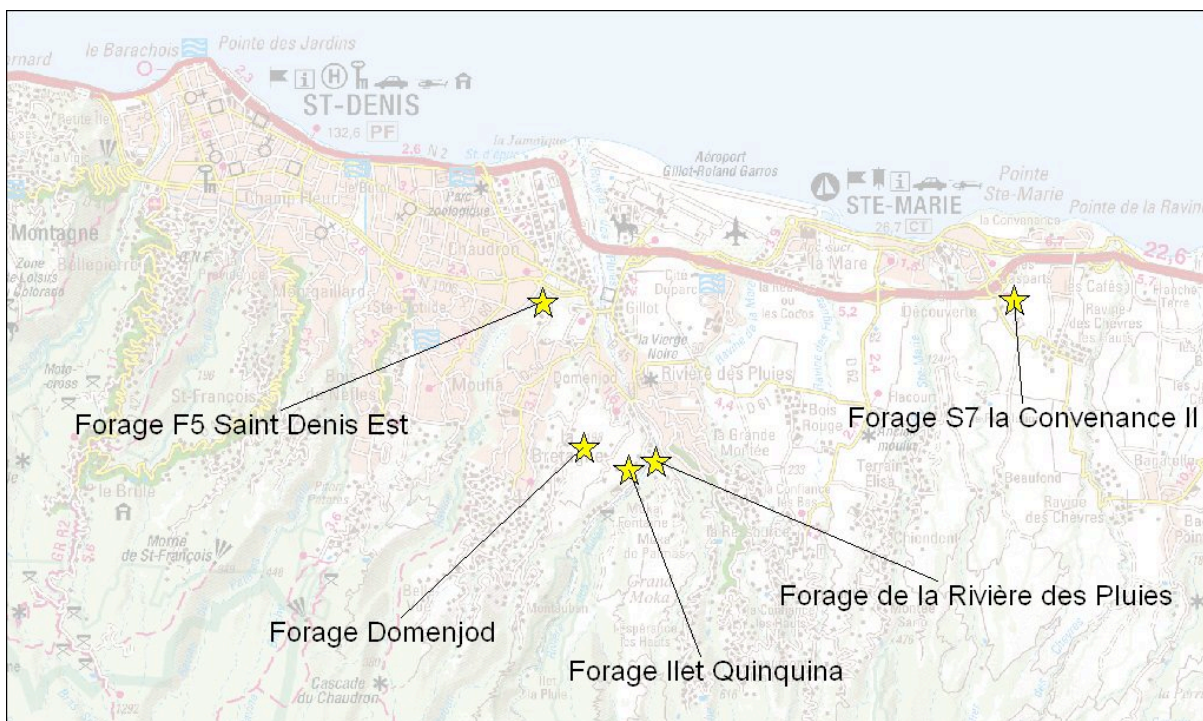


Fig. 46 Station d'observation où on a obtenu une performance problématique

Annexe 10 - Volumes

Tab. 4 Les volumes d'alimentation du modèle et les volumes des prélèvements (puits et forages)

en million m ³ /an	Recharge	Alimentation amont	Infiltration Rivière des Pluies	Total Alimentation	Total Prélèvements
1992	5	116	10	131	15
1993	52	115	10	187	14
1994	15	115	10	150	14
1995	25	115	10	160	14
1996	12	116	10	138	14
1997	16	115	10	151	14
1998	31	115	10	166	15
1999	12	115	10	147	15
2000	14	116	10	140	15
2001	9	115	10	144	18
2002	21	115	10	156	18
2003	26	115	10	161	18

Annexe 11 - Esquisses piézométriques du scénario I

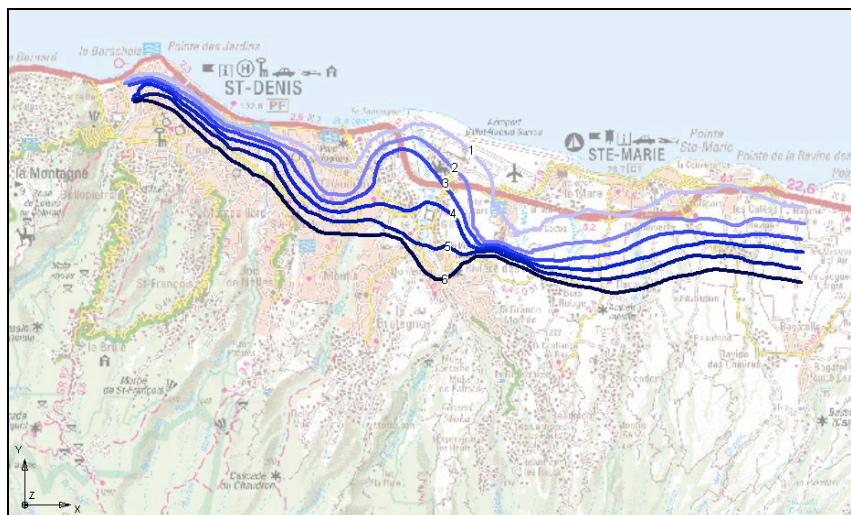


Fig. 47 Année humide, scénario I

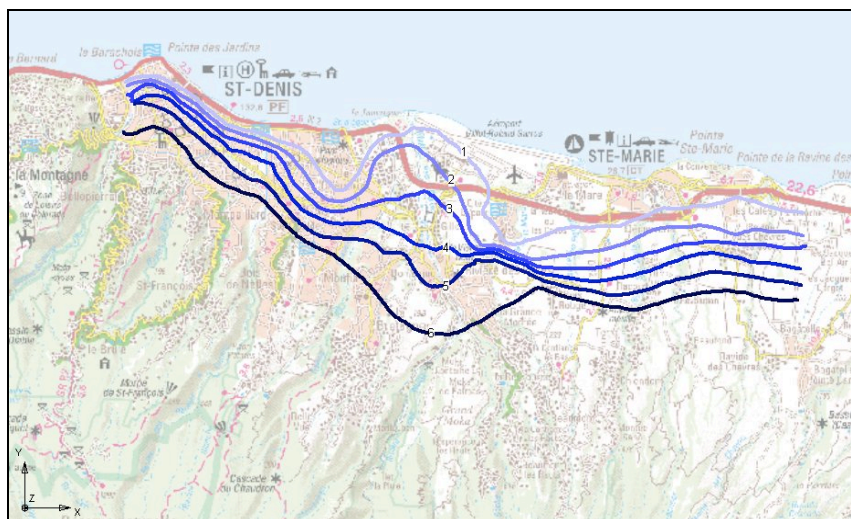


Fig. 48 Année moyenne, scénario I

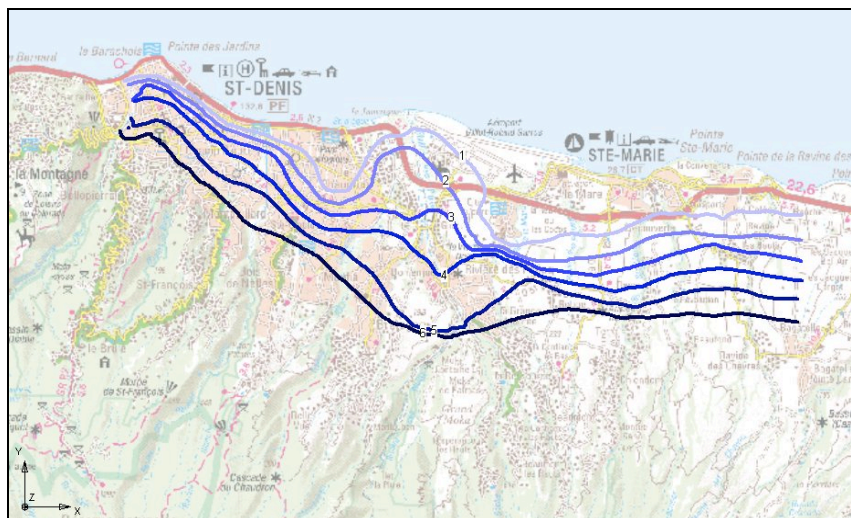


Fig. 49 Année sèche, scénario I

Annexe 12 - Esquisses piézométriques du scénario II

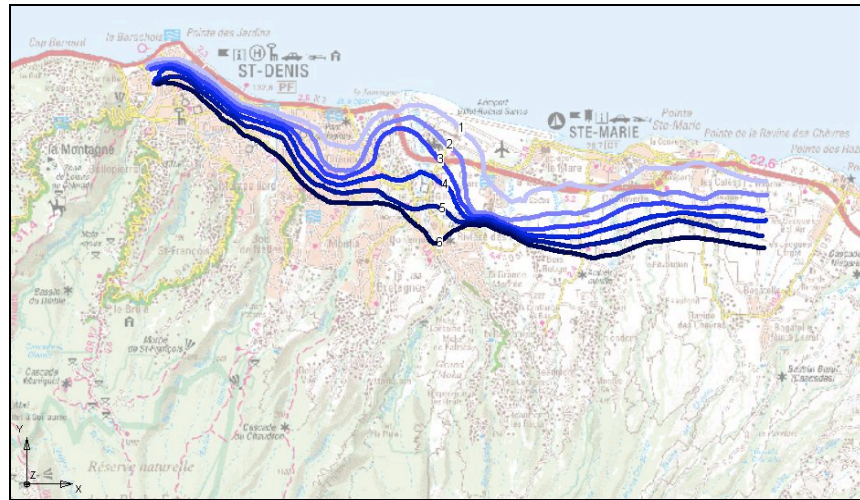


Fig. 50 Année humide, scénario II

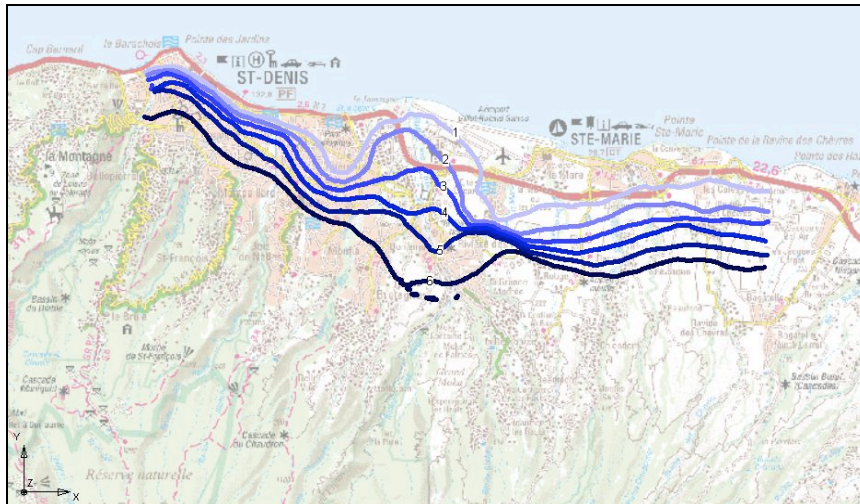


Fig. 51 Année moyenne, scénario II

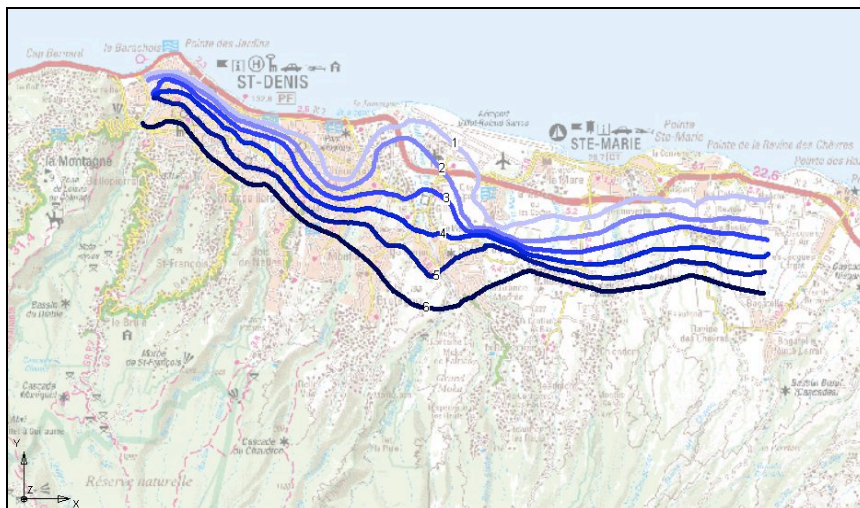


Fig. 52 Année sèche, scénario II

Annexe 13 - Esquisses piézométriques du scénario III

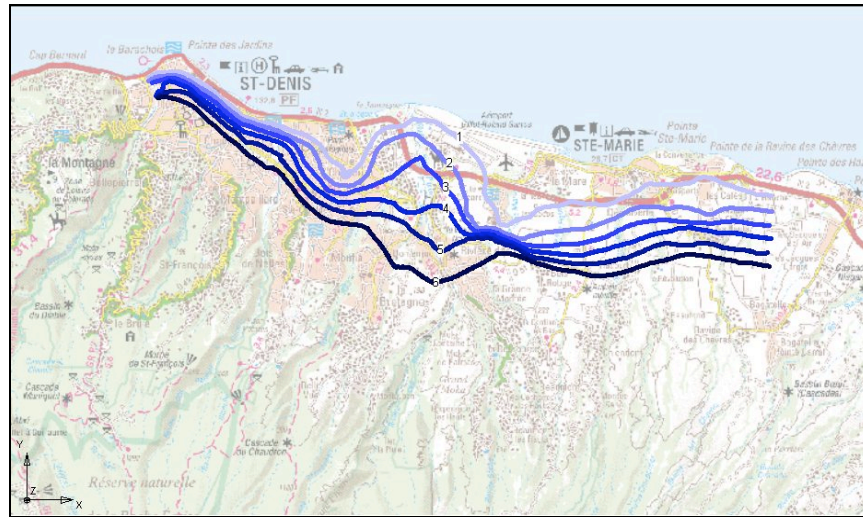


Fig. 53 Année humide, scénario III

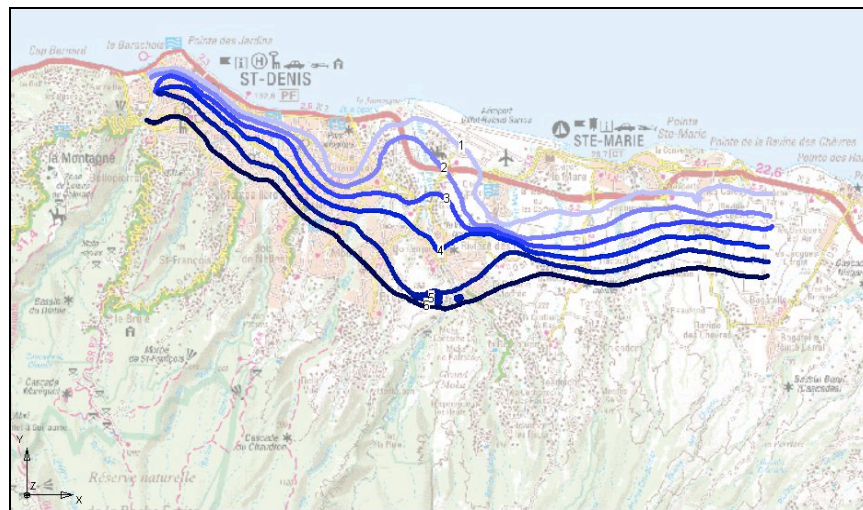


Fig. 54 Année moyenne, scénario III

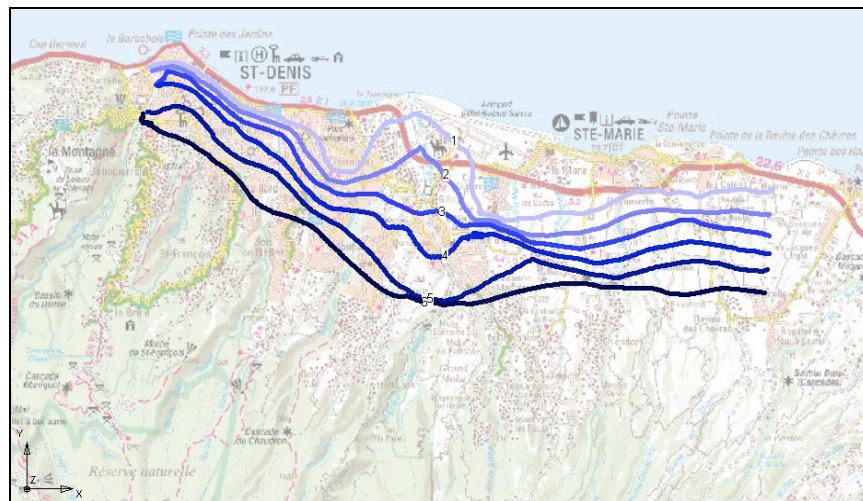


Fig. 55 Année sèche, scénario III

Annexe 14

Tab. 5 Ecart à la moyenne des précipitations annuelles entre 1992 et 2003 sur deux stations de mesure de Météo France sur le secteur d'étude

	année sèche 1992	année humide 1993	année moyenne 2002
Station Providence	-54%	+58%	+4%
Station St. François	-47%	+80%	+5%