



HAL
open science

Bilan hydrologique de Mayotte: écoulements souterrains et ressource en eau de l'île de Petite Terre

F Métivier, A Groleau, J Frere, D Jézequel, M Ader

► **To cite this version:**

F Métivier, A Groleau, J Frere, D Jézequel, M Ader. Bilan hydrologique de Mayotte: écoulements souterrains et ressource en eau de l'île de Petite Terre. 2024. hal-04632890

HAL Id: hal-04632890

<https://hal.science/hal-04632890>

Preprint submitted on 2 Jul 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Bilan hydrologique de Mayotte: écoulements souterrains et ressource en eau de l'île de Petite Terre

F. Métivier, A. Groleau, J. Frere, D. Jézequel, M. Ader
IPGP, 1 rue Jussieu, 75251 Paris Cedex 05 France
metivier@ipgp.fr

Document de travail RESAM-2024-01
2 juillet 2024

Résumé

À partir d'une analyse des données disponibles couplée à de nouvelles observations, nous proposons une modélisation des écoulements souterrains en régime stationnaire de Petite Terre sous la forme d'une bulle d'eau douce posée sur l'eau de mer. Le bilan hydrologique de la station météorologique de l'aéroport permet en outre de proposer une estimation de la recharge annuelle. Nous montrons que celle-ci est de l'ordre de $2 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ dont une partie pourraient être prélevée pour l'alimentation en eau potable de la Petite Terre. Ces résultats suggèrent l'existence d'une ressource non négligeable et appellent à la mise en place de suivis et d'analyses complémentaires couplés à une réflexion sur la stratégie d'extraction d'eau souterraine des pouvoirs publics dans un contexte insulaire, en présence d'un biseau salé.

Table des matières

1 Le projet RESAM	2
2 Introduction et problème hydrologique	3

3	Ce qu'on sait de la nappe de Petite Terre	3
3.1	Revue de littérature : une ressource fragile et sous pression . . .	3
3.2	Ce que la banque du sous-sol (BSS) nous apprend	4
3.3	Les forages de reconnaissance	7
3.4	Conductivité et chimie des eaux de la nappe	8
3.5	Données météorologiques et recharge de la nappe	10
4	Modélisation de la nappe en condition stationnaire	11
4.1	État quasi-statique	11
4.2	Solution numérique	13
5	Discussion	18
5.1	Piézométrie	18
5.2	Quid de la Ressource potentielle ?	20
6	Conclusion et perspectives	21
A	Positionnement altimétrique des mesures	23

1 Le projet RESAM

Ce document de travail est le résultat d'un travail mené dans le cadre du projet RESAM : Ressource en eau et stratégies d'adaptation pour faire face à la pénurie : le cas de Mayotte. RESAM est un projet pluridisciplinaire porté par des chercheurs de l'Université Paris Cité et de l'Institut de Physique du Globe de Paris. Dans sa première phase RESAM comporte trois volets.

- Le 1er volet vise à actualiser les connaissances disponibles sur la ressource en eau à Mayotte - en commençant par Petite Terre ;
- Le 2nd à analyser les stratégies d'adaptation déployées par les habitants pour faire face à la pénurie ;
- Le 3ème à évaluer les conséquences psychologiques, sociales et économiques de la pénurie, notamment auprès de groupes vulnérables (femmes et enfants).

Ce document relève du premier volet.

2 Introduction et problème hydrologique

L'alimentation en eau de Mayotte repose sur une stratégie triple : le stockage d'eau dans deux réservoirs localisés sur Grande Terre durant la saison des pluies, le désalement de l'eau de mer et le captage d'eaux souterraines (Jaouën et al., 2012; Jaouën et al., 2013). D'après le bilan de Diakit  (2017) le pompage des eaux souterraines représente environ 18% de l'alimentation en eau potable de la population. Aucun captage n'existe sur Petite Terre dont l'alimentation en eau repose essentiellement sur son usine de désalinisation.

On dispose cependant d'indications sur l'existence d'une nappe d'eau douce sur Petite Terre dont les mahorais font usage . Deux forages effectués en février 1990 montrent l'existence d'eau douce jusqu'à des profondeurs de plusieurs dizaines de mètre sous le niveau de la mer. Un de ces forages est équipé et sert aujourd'hui de piézomètre de Petite Terre (Mauroux, 1992). Le second a été abandonné. La banque du sous sol¹ (BSS) recense en outre quelques dizaines de puits utilisés pour l'agriculture et les jardins. Enfin, au nord de la Petite Terre, le lac Dziani, hypersalin, semble situé une partie de l'année sous le niveau de la mer. Cette localisation particulière suggère une connexion directe du lac avec celle-ci.

Cependant aucune étude hydrologique n'est allée au delà de ces constats. C'est ce que nous proposons de faire dans cette note. Nous commencerons par détailler les arguments en faveur de l'existence d'une lentille d'eau douce posée sur l'eau salée. Puis nous estimerons l'ordre de grandeur de la recharge. Cette estimation nous permettra enfin de proposer une modélisation de la forme moyenne, en conditions stationnaires de cette lentille et de discuter de son utilité pour l'alimentation en eau de l' le.

3 Ce qu'on sait de la nappe de Petite Terre

3.1 Revue de littérature : une ressource fragile et sous pression

6 masses d'eau souterraines sont identifiées sur Mayotte dont une (MG003 selon la nomenclature utilisée par le BRGM) correspond à la masse d'eau de Petite Terre (Comité de l'eau et de la biodiversité, 2022). Les eaux souterraines sont considérées comme une ressource complémentaire des retenues et

1. <https://infoterre.brgm.fr/page/banque-sol-bss>.

du captage de rivières. D'après [Diakité \(2017\)](#) elles constituent environ 18% des 24000 m³/j de production moyenne.

Un tiers des habitants de Mayotte font de l'agriculture vivrière, manioc et fruits (coco et banane essentiellement) sur de petite exploitations (entre 1 et 5 ha). La surface agricole représente environ 19% des îles. Cette agriculture sert avant tout à la consommation personnelle des propriétaires. Elle peut aussi servir à des échanges entre habitants. Il y a un peu d'élevage et de maraîchage professionnel mais cela reste encore très limité. L'essentiel des denrées même de base sont importées ([Comité de l'eau et de la biodiversité, 2022](#)).

Les ressources superficielles qui constituent l'essentiel du prélèvement sont en dégradation et en plus ou moins mauvais état. le problème vient d'une gestion des déchets et d'un assainissement encore très incomplets, de décharges sauvages, de lavandiers dans les rivières, ainsi que d'une utilisation non maîtrisée des intrants. Tous ces facteurs concourent à fragiliser la ressource en eau.

Et ce d'autant que le tiers de la population reste sans assainissement, 18% seulement du territoire peut être raccordé aujourd'hui à un réseau en mauvais état. Le ramassage des déchets manque d'efficacité. La cour des comptes relève d'ailleurs des irrégularités de gestion du syndicat intercommunal d'eau et d'assainissement qui interroge sur le bon fonctionnement des autorités en charge de l'eau ([Chambre régionale des comptes de Mayotte, 2019](#))

À ces problèmes s'ajoute enfin une croissance interne de 3% qui ne tient pas compte de l'immigration clandestine.

3.2 Ce que la banque du sous-sol (BSS) nous apprend

La référence est la banque du sous sol² (BSS), maintenue par le BRGM, dans laquelle tout ouvrage souterrain devrait être référencé. On dénombre 191 ouvrages sur Petite Terre. Sur ces 191 ouvrages on compte, selon la nomenclature de BSS, 140 sondages, 3 «échantillons», 2 excavations, 37 puits, 8 forages et 1 «source». Si on enlève les sondages et les échantillons on obtient alors la table 1. Si maintenant on ne conserve que les puits exploités on obtient la table 2.

La «source» enfin est notée comme «alimentation en eau potable» (AEP) et correspond en fait à la première prise d'eau prévue pour alimenter la

2. <https://infoterre.brgm.fr/page/banque-sol-bss>

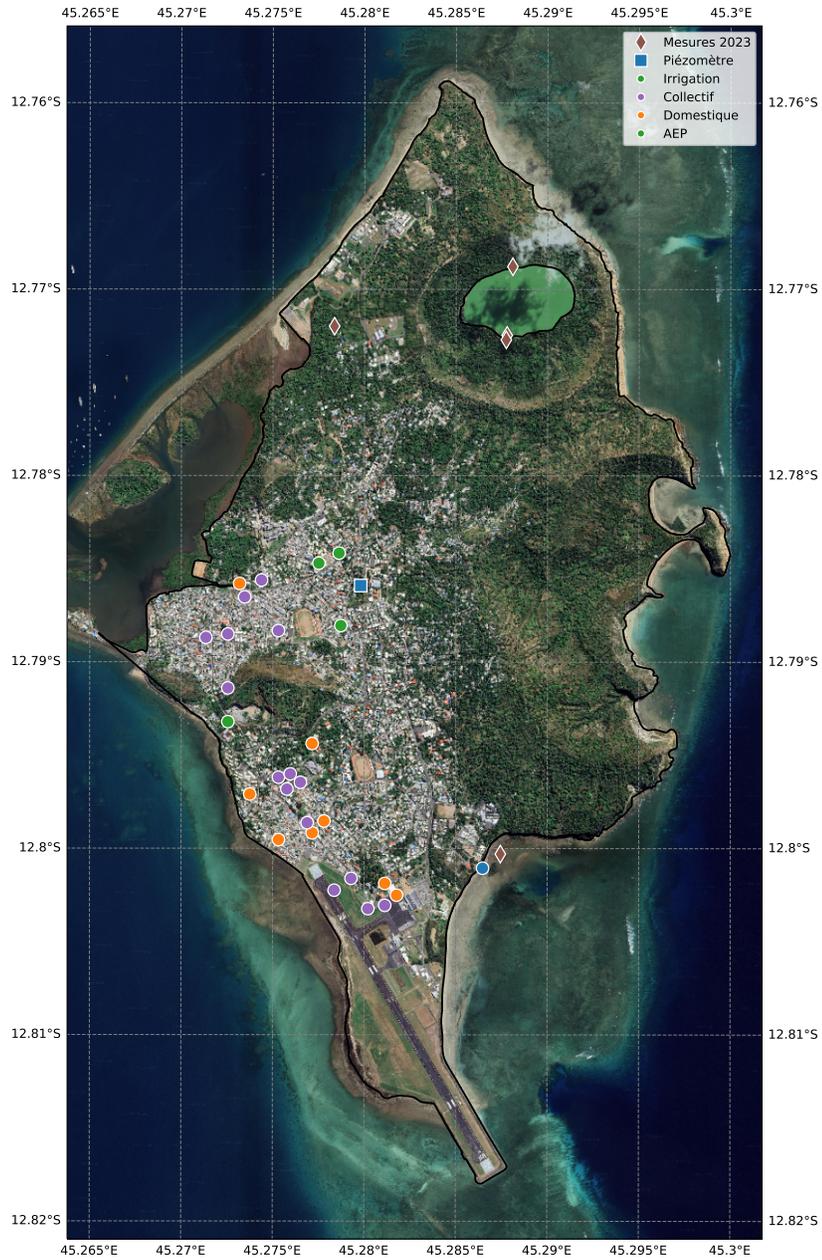


FIGURE 1 – Image GoogleEarth de la Petite Terre. Localisation et utilisation des puits exploités référencés dans la base BSS.

N	Nature	État	Utilisation
1	EXCAVATION-CIEL-OUVERT	EXPLOITE, ACCES.	NULL
1	EXCAVATION-CIEL-OUVERT	EXPLOITE, ACCES.	GRANULAT-BETON, VIABILITE.
3	FORAGE	NULL	NULL
1	FORAGE	MESURE-REGULIERE, ACCES. NON-EXPLOITE,	NULL
2	FORAGE	ACCES, CIMENTATION-EXTRADOS, MASSIF-GRAVIER, MESURE, TUBE-PLASTIQUE, PRELEV.	PIEZOMETRE.
2	FORAGE	REBOUCHE.	NULL
1	PUITS	EXPLOITE, PAROI-BETON, CREPINE, POMPE.	EAU-COLLECTIVE.
1	PUITS	EXPLOITE, PAROI-BETON, POMPE.	EAU-INDIVIDUELLE.
1	PUITS	EXPLOITE, PAROI-BETON.	EAU-COLLECTIVE.
1	PUITS	EXPLOITE, PAROI-PIERRE, CREPINE,	EAU-COLLECTIVE.
1	PUITS	POMPE, EXPLOITE, PAROI-PIERRE, CREPINE,	EAU-DOMESTIQUE.
1	PUITS	POMPE, EXPLOITE, PAROI-PIERRE, CREPINE,	EAU-INDIVIDUELLE.
3	PUITS	EXPLOITE, PAROI-PIERRE, POMPE.	EAU-COLLECTIVE.
1	PUITS	EXPLOITE, PAROI-PIERRE, POMPE.	EAU-INDIVIDUELLE, EAU-IRRIGATION.
1	PUITS	EXPLOITE, PAROI-PIERRE, POMPE.	EAU-INDIVIDUELLE.
1	PUITS	EXPLOITE, PAROI-PIERRE, POMPE.	EAU-IRRIGATION.
4	PUITS	EXPLOITE, PAROI-PIERRE.	EAU-COLLECTIVE.
5	PUITS	EXPLOITE, PAROI-PIERRE.	EAU-DOMESTIQUE.
1	PUITS	EXPLOITE, POMPE, PAROI-PIERRE.	EAU-INDIVIDUELLE.
1	PUITS	EXPLOITE, POMPE.	EAU-INDIVIDUELLE.
1	PUITS	EXPLOITE, POMPE.	EAU-IRRIGATION, EAU-DOMESTIQUE.
1	PUITS	EXPLOITE-TEMP, PAROI-PIERRE.	EAU-IRRIGATION.
5	PUITS	EXPLOITE.	EAU-COLLECTIVE.
2	PUITS	EXPLOITE.	EAU-DOMESTIQUE.
1	PUITS	NON-EXPLOITE, PAROI-PIERRE, CREPINE.	NULL
1	PUITS	NON-EXPLOITE, PAROI-PIERRE.	NULL
2	PUITS	NON-RETROUVE.	NULL
1	PUITS	SEC.	NULL
1	SOURCE	NULL	AEP.

TABLE 1 – Ouvrages sur Petite Terre recensés dans BSS

Nombre	utilisation
15	EAU-COLLECTIVE.
8	EAU-DOMESTIQUE.
1	EAU-INDIVIDUELLE,EAU-IRRIGATION.
5	EAU-INDIVIDUELLE.
1	EAU-IRRIGATION,EAU-DOMESTIQUE.
2	EAU-IRRIGATION.

TABLE 2 – Usage des puits utilisés sur Petite Terre et recensés dans BSS

station de dessalement, prise d'eau abandonnée aujourd'hui. BSS laisse donc entrevoir une masse d'eau faiblement exploitée pour un usage d'irrigation ou d'eau collective ou domestique.

Cette vision est cependant probablement faussée par le fait que des puits traditionnels ne sont pas tous recensés (aucun des puits que nous avons identifié dans le nord de Petite Terre ne l'est). Les quelques témoignages que nous avons laissés penser en outre qu'il y a fort probablement une exploitation informelle de la nappe bien plus étendue que ce que peut laisser entrevoir BSS.

3.3 Les forages de reconnaissance

Deux forages de reconnaissances, Pamandzi 1 et 2, ont été effectués sur la Petite Terre (Mauroux (1992) et figure 2). Ces forages nous permettent de voir que les couches aquifères sont constituées de cendres et de pyroclastites à des degrés d'induration et d'altération divers, et de sables basaltiques, le tout pouvant être recouvert de limons. Ces forages sont en outre importants pour trois raisons.

1. Des essais Lefranc, effectués durant le forage, nous permettent d'avoir une idée de la conductivité des couches aquifères traversées. Dans le cadre des forages de Mayotte, l'essai Lefranc est une forme de "slug test" durant lequel une quantité d'eau est injectée dans le forage. On mesure alors le débit d'injection dans la nappe et on en déduit la conductivité de la section de forage étudiée. Cette injection peut se faire à charge variable ou constante.
2. Des mesures de conductivité permettent de tracer la présence d'eau salée.

3. Des essais de pompage à l'air lift³ donnent une idée de débits naturels de la nappe.

À partir des essais Lefranc on peut estimer une conductivité équivalente pour l'ensemble des couches aquifères selon

$$K = \sum_i K_i h_i \quad (1)$$

où K_i, h_i représentent respectivement la conductivité et l'épaisseur de l'horizon i de l'aquifère (Pour le détail de ces mesures voir [Mauroux \(1992\)](#)).

Les essais Lefrancs donnent une conductivité, pondérée de l'épaisseur des essais, de l'ordre de $K = 2 \cdot 10^{-5}$ m/s pour Pamandzi 1 et de $K = 1.7 \cdot 10^{-4}$ m/s pour Pamandzi 2.

Les débits mesurés à l'air lift sur un des deux forages donnent des valeurs de l'ordre de 0.6 – 0.7 l/s soit environ 2 – 2.5 m³/h.

3.4 Conductivité et chimie des eaux de la nappe

Les mesures de conductivité (figure 3) montrent bien que les eaux sont douces même si on observe une variation de la conductivité qui peut être importante. Les mesures de mars 1991 dans le forage de Pamandzi 2 montrent même un pic de 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ traduisant probablement une remontée de l'eau de mer dans le forage. Les données sont cependant anciennes et nous ne disposons d'aucune information sur les puits avoisinants et leur usage. Il est donc difficile d'attribuer clairement cette variation. Outre que la marée implique une remontée d'eau de mer dans le tube qui va induire mécaniquement une variation de conductivité en profondeur, des prélèvements dans les puits avoisinant peuvent aggraver la situation. Sur la même période [Malcuit et al. \(2019\)](#) indiquent une conductivité de 2190 $\mu\text{S}/\text{cm}$ mais on ne sait pas comment celle-ci est calculée à partir des mesures brutes.

L'analyse du fond hydrogéochimique ([Malcuit et al., 2019](#)) donne les informations suivantes. Les eaux présentent une faciès bicarbonaté sodique (fig 17, p 57). Elles sont nettement plus enrichies en sodium (fig 20, p60) plus faibles en silice (fig 21, p 61). Les Fluorures sont très forts à 29 mg/l. Deux campagnes en basses eaux (2017) et hautes eaux (2018) ont confirmé les données issues de suivis antérieurs.

3. Le pompage à l'air lift est un pompage de test de faible puissance dont le moteur est l'injection d'air comprimé en base de colonne d'eau qui provoque la remontée du mélange eau-air.

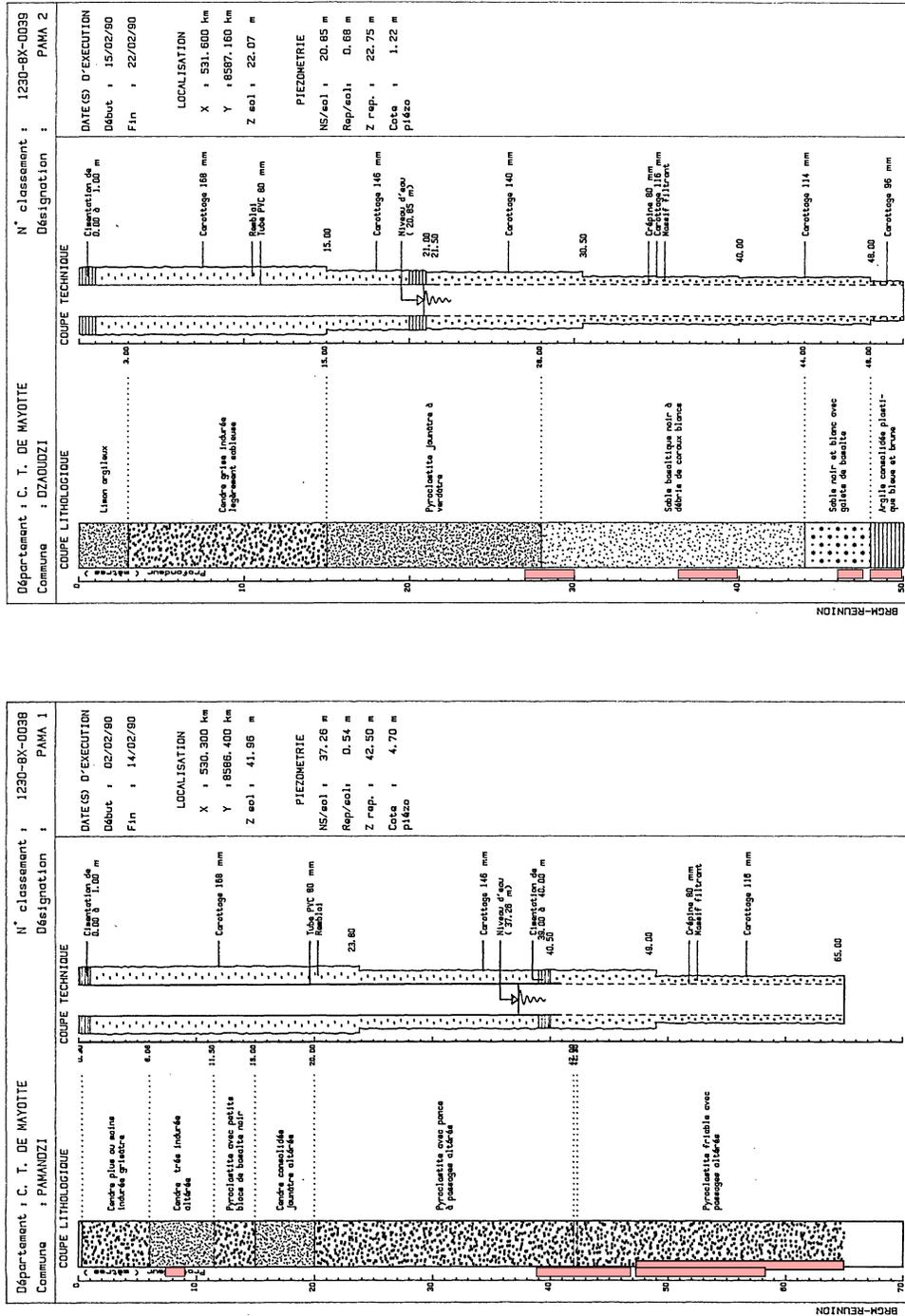


FIGURE 2 – Logs des forages de Pamandzi réalisés en février 1990 et analysés par Mauroux (1992). les rectangle de couleur indiquent les positions des essais Lefranc.

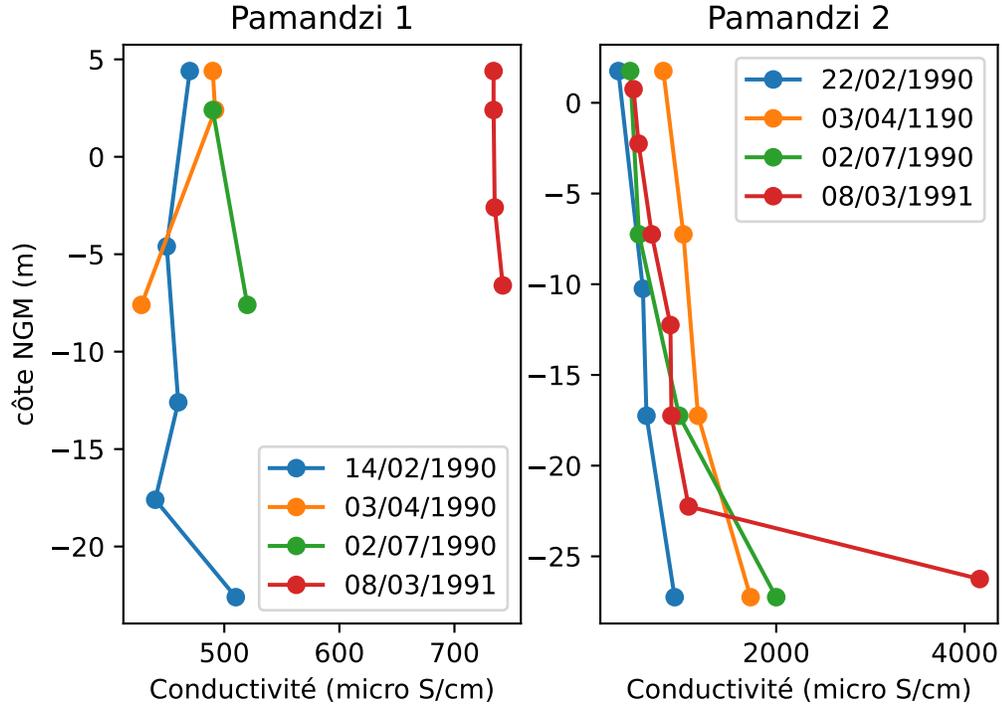


FIGURE 3 – Profils de conductivité des deux forages de Pamandzi.

3.5 Données météorologiques et recharge de la nappe

Une station météorologique permet de connaître les précipitations sur Petite Terre depuis 1950. En moyenne la précipitation totale ($\pm 1\sigma$) vaut $P_A = 1200 \pm 200$ mm/a, $N = 75$.

Le calcul de l'évapotranspiration par la méthode de Monteith est aussi fourni et donne des valeurs de $ETP_M = 1600 \pm 300$ mm/a. Ces valeurs sont irréalistes. En effet l'évapotranspiration réelle est forcément inférieure aux précipitations puisque sinon il n'y aurait pas de nappe d'eau douce sur Petite Terre. À l'échelle de l'île une formule moyenne comme celle de [Turc \(1955\)](#) semble plus appropriée car elle permet d'avoir un ordre de grandeur fiable de l'évaporation annuelle ([Andréassian and Sari, 2019](#)). La formulation pour l'évapotranspiration annuelle proposée par [Turc \(1955\)](#) est la suivante

$$ETR(\text{mm/an}) = \frac{P}{(0,9 + P^2/L^2)^{1/2}}, \quad (2)$$

où ETR représente l'évapotranspiration annuelle, P la lame d'eau précipitée, et $L = 0.05T^3 + 25T + 300$, est une fonction de la température moyenne annuelle T . La température moyenne annuelle sur Petite Terre est $T_A = 26.9 \pm 0.6^\circ\text{C}$. On obtient alors une évapotranspiration réelle $ETR = 1000 \pm 400 \text{ mm/a}$. On voit donc, qu'en moyenne, celle-ci est très importante, de l'ordre de 80% des précipitations. Restent donc environ 200 mm de précipitations efficaces pour la recharge en moyenne sur les 50 années de mesures disponibles.

4 Modélisation de la nappe en condition stationnaire

4.1 État quasi-statique

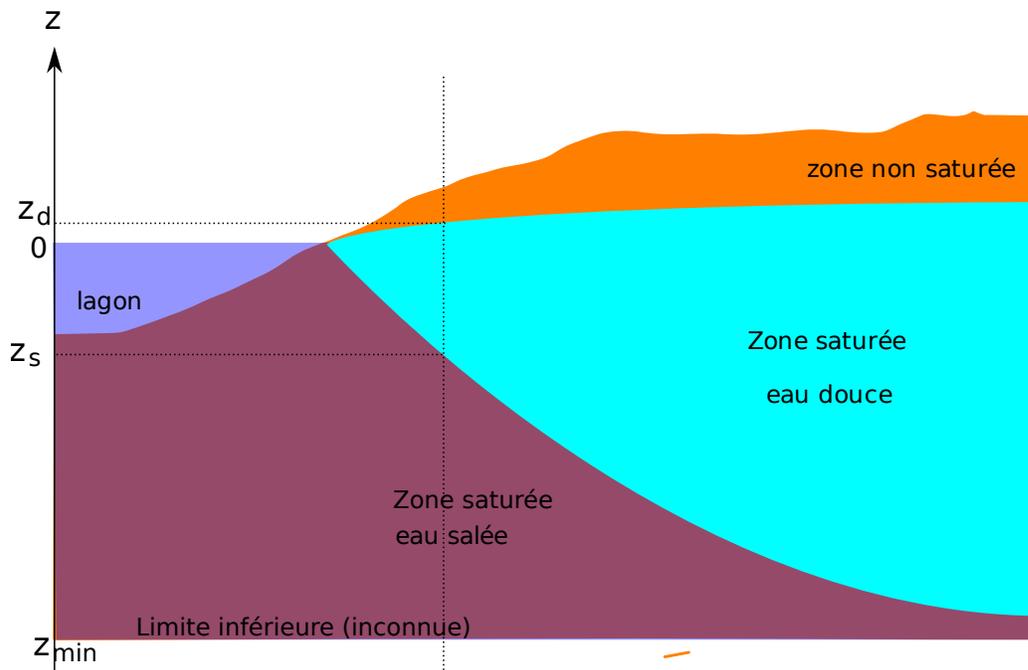


FIGURE 4 – Coupe schématique de l'interface eau-douce eau-salée.

L'écoulement dans une nappe libre sur biseau salé est tridimensionnel. Cependant sur Petite Terre la niveau d'eau mesuré dans le piézomètre de Pamandzi indique un rapport d'aspect de la nappe située au dessus du niveau de la mer d'environ 10^{-3} (différence entre la cote moyenne de l'eau dans le piézomètre et la distance séparant celui-ci du lagon). Même en tenant compte d'un biseau en équilibre statique on reste en deça de 1%. On peut donc, au premier ordre, se placer dans l'hypothèse de Dupuit-Boussinesq et ne considérer que la composante horizontale des vitesses.

Dans ces conditions, le problème de l'écoulement d'une nappe libre sur biseau revient à résoudre l'équation de deux surfaces libres, celle séparant l'eau douce de l'air et celle séparant l'eau douce de l'eau salée (figure 4).

La conservation de la masse et Darcy donnent le débit d'eau douce dans la lentille

$$Q_d = -\langle K \rangle (z_d - z_s) \nabla z_d, \quad (3)$$

où $z_d, z_s, \langle K \rangle$ correspondent respectivement à la surface piézométrique de la nappe d'eau douce, la surface de l'interface eau douce - eau salée et la conductivité hydraulique moyenne des couches aquifères de l'île.

Pour le flux d'eau de mer on a

$$Q_s = -\langle K \rangle \int_{z_{min}}^{z_s} \nabla (\rho_d g (z_d - z_s) + \rho_s g (z_s)) dz \quad (4)$$

où z_{min}, ρ_d, ρ_s représentent respectivement la limite inférieure (que nous ne connaissons pas) de la couche d'eau salée dans l'île, la masse volumique de l'eau douce, la masse volumique de l'eau salée et l'accélération de la gravité

Enfin localement le flux d'eau douce correspond à la recharge R par unité de longueur (ou de surface en 2D).

$$\nabla Q_d = R \quad (5)$$

En première approximation nous supposons que la vitesse dans le réservoir salé est quasi-nulle. Dans ces conditions (4) se réduit à l'équation du biseau salée, dite de Ghyben-Herzberg :

$$z_s = -\frac{\rho_d}{\rho_s - \rho_d} z_d. \quad (6)$$

Le signe négatif provient ici du fait que z_d est au dessus du niveau moyen de la mer et z_s en dessous. (6) montre que seul 1/40ème de la pluie environ

se retrouve dans la topographie de la nappe. Le reste, l'essentiel, gonfle la bulle d'eau douce. En couplant (6) et (3) on obtient

$$Q_d = -\langle K \rangle \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_d} z_d \nabla z_d, \quad (7)$$

puis en dérivant

$$\nabla Q_d = -\frac{\langle K \rangle \rho_s}{2\rho_s - \rho_d} \Delta z_d^2 = R. \quad (8)$$

D'où finalement l'équation de Poisson pour la surface libre eau douce - air :

$$\Delta z_d^2 + \frac{2R(\rho_s - \rho_d)}{\langle K \rangle \rho_s} = 0. \quad (9)$$

Une fois (9) résolue, La surface de l'interface eau douce eau salée se déduit de l'équation de Ghyben-Herzberg (6).

4.2 Solution numérique

Pour aller plus loin on peut alors résoudre (9). Afin de simplifier l'analyse et parce que nous ne disposons pas de données suffisantes sur l'ensemble de l'année hydrologique, nous considérerons la surface du lac comme étant au niveau de la mer ce qui est cohérent avec un flux nul d'eau salée dans le biseau.

Les conditions au limites sont donc une hauteur $z_d = 0$ sur les rives de l'île et sur les rives du lac⁴. Pour les valeurs de recharge et de conductivité nous prenons celles issues de l'analyse précédente soit une recharge $R = 0.2$ m/a et une conductivité $\langle K \rangle = 9 \cdot 10^{-5}$ m/s. Enfin la densité de l'eau de mer est $\rho_s = 1025$ g/l. Notons que les valeurs aux limites et des paramètres ne font pour l'heure l'objet d'aucun ajustement.

La solution de (9) se fait par éléments finis en utilisant pyFreeFem (Abramian et al., 2019), un wrapper python du solveur FreeFem⁵. Les contours de l'île et du lac sont extraits de la base de donnée BDTOPO de l'IGN. Afin de faciliter les calculs les contours ont été sous-échantillonnés d'un facteur 5⁶. La triangulation est ensuite effectuée avec la librairie triangle⁷ (figure 5)

4. Pour une discussion sur le niveau du lac et les problèmes liés aux mesures altimétriques depuis la naissance du volcan Fani Maoré voire l'annexe A.

5. pyFreeFem est disponible sur [Github](https://github.com), FreeFem est disponible à <https://freefem.org/>.

6. On ne garde qu'un point sur 5 des contours enregistrés dans le fichier de données de BDTOPO.

7. Disponible sur [Github](https://github.com).

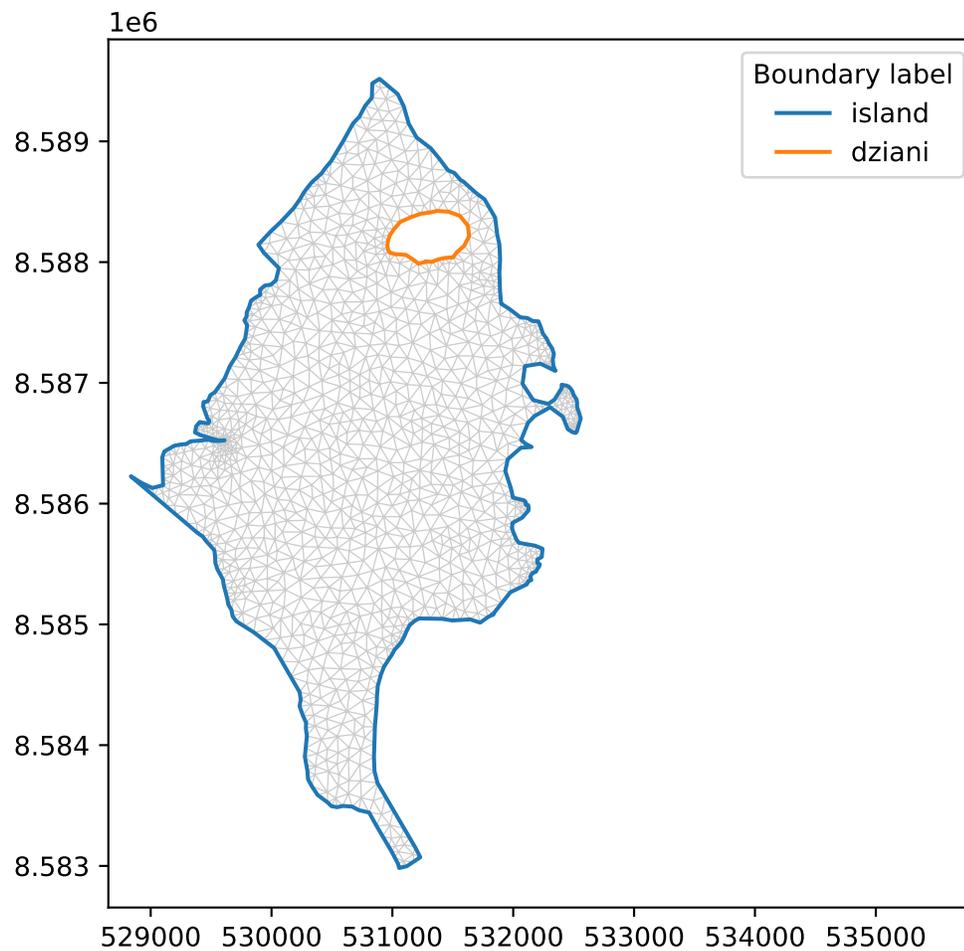


FIGURE 5 – Triangulation utilisée pour résoudre (9). Coordonnées en UTM 38S.

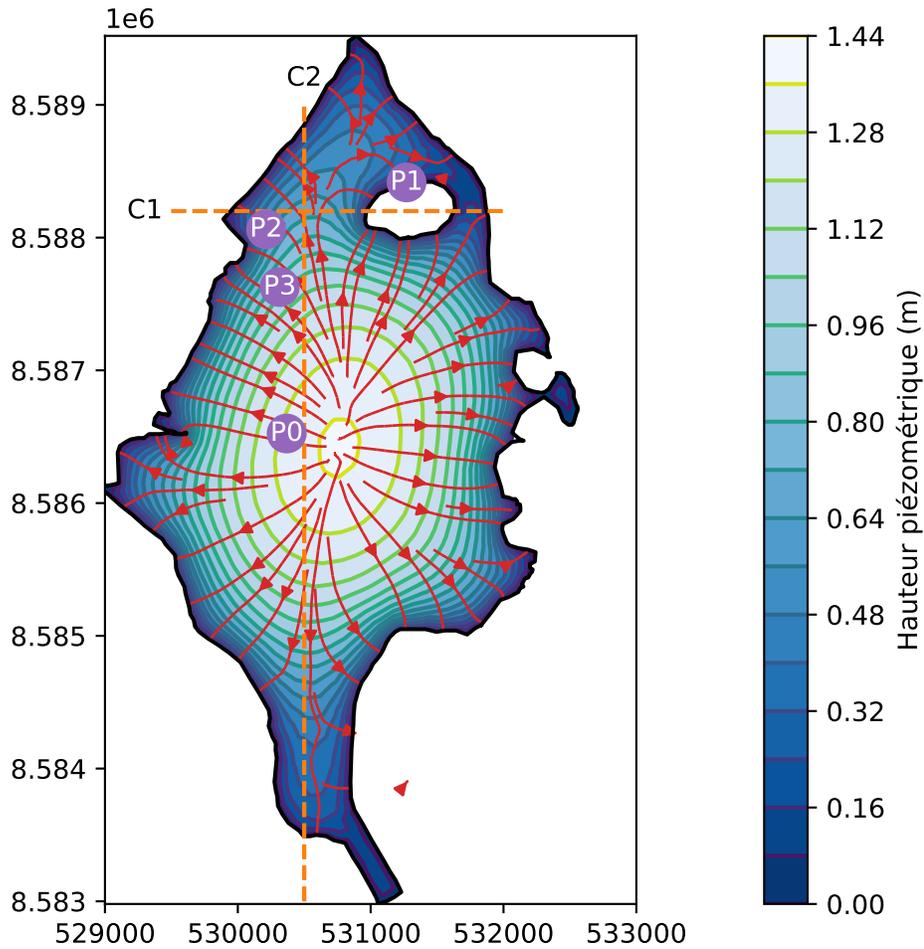


FIGURE 6 – Modélisation de la nappe de Petite Terre. Les lignes rouges représentent les lignes de courant, le point P0 correspond au piézomètre situé sur petite terre, les points P1 à P3 correspondent aux puits traditionnels échantillonnés. Coordonnées en UTM 38S. Les pointillés indiquent les tracés des coupes C1 et C2 de la figure 7.

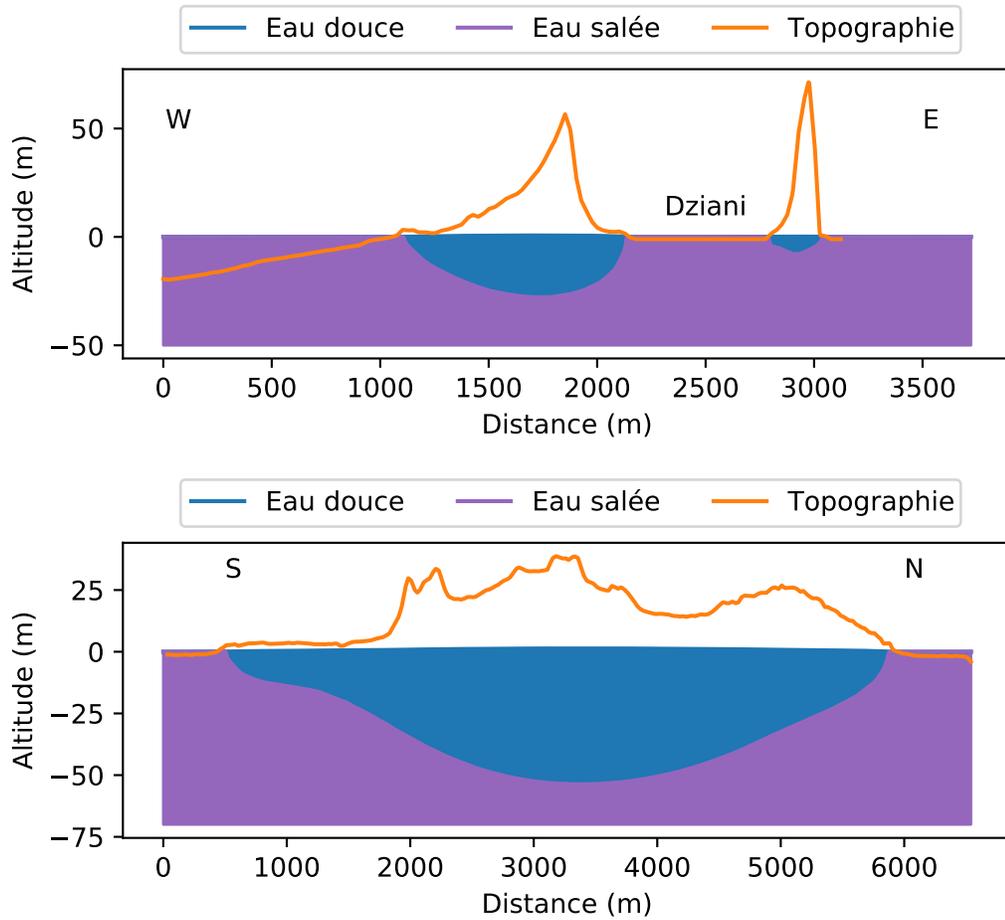


FIGURE 7 – C1 : coupe Ouest - Est (au niveau du lac Dziani). C2 : coupe Sud - Nord montrant la forme probable de la lentille d'eau douce de Petite Terre. Localisation figure 6

L'équation (9) est ensuite résolue à chaque noeud. La figure 6 représente le résultat de la modélisation. La hauteur piézométrique est représentée par les couleurs bleus et les contours allant du bleu au jaune, les lignes de courant sont représentées par des flèches rouges. La figure 7 présente deux coupes une Oues-Est et l'autre Sud-Nord qui permettent en outre de se faire une idée de la forme de la lentille d'eau sous l'île.

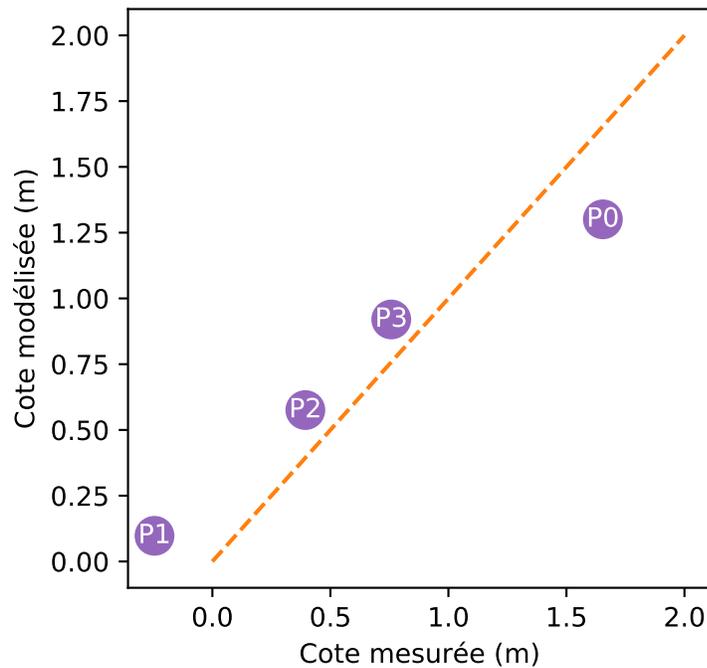


FIGURE 8 – Comparaison entre les mesures de puits et les résultats de la solution de l'équation de Poisson sans ajustement. La droite en pointillé représente la droite de parfait accord. Pour la localisations des points voir la figure 6.

La figure 8 montre la comparaison entre les hauteurs de la surface piézométrique (eau douce - air) prédites par la solution de (9), les chroniques du piézomètre de Dzaoudzi et les premières mesures faites dans les puits au nord de Petite Terre. On voit les hauteurs mesurées et prédites sont en bon accord, au premier ordre, ce qui est très prometteur et suggère que la description des écoulements par (9) semble pertinente.

La hauteur de la surface libre est légèrement inférieure aux données du piézomètre (figure 9 et discussion) qui donnent une altitude moyenne de 1.66 ± 0.2 m avant la crise volcanique de 2018. De même les mesures de piézométrie que nous avons initiées autour du lac et chez deux habitants volontaires (table 3) son cohérentes mais légèrement supérieures à la hauteur prédite par le modèle.

Les écarts entre mesures et prédiction sont de l'ordre de 10 à 20 centimètres. L'écart du puits aux abords du lac est quand à lui normal puisque nous imposons une altitude nulle du lac comme condition à la limite. Or nous savons que celui-ci est en moyenne légèrement sous le niveau de la mer ce que confirme les mesures du puits elles aussi sous le niveau de la mer le jour de la mesure (voir table 2).

Étant donné que nous n'avons pas encore pu initier de suivi en plusieurs endroit nous ne pouvons guère aller plus loin et confirmer la tendance prometteuse de la figure 8. Cependant ces premiers résultats indiquent qu'au centre de l'île, on pourrait avoir environ entre 50 et 70 m d'eau douce.

5 Discussion

5.1 Piézométrie

Le piézomètre de Pamandzi enregistre les données à une fréquence horaire mais seul un échantillon journalier est accessible sur la base ADES (figure 9). Deux faits marquants sont cependant à noter.

En premier lieu, la côte NGF (Nivellement Général de la France) ne semble ne pas beaucoup évoluer dans le temps entre deux saisons. Cette absence de sensibilité du piézomètre est en accord avec le modèle précédent. En effet si la nappe d'eau douce repose sur l'eau salée, celle-ci présente deux surfaces libres : une au niveau de l'interface eau douce-air et une au niveau de l'interface eau douce-eau salée. L'application du principe d'Archimède (la loi de Ghyben-Herzberg n'est rien d'autre) implique que seul 2.5% de la variation liée à la recharge s'effectue au niveau de la surface supérieure. l'essentiel de la variation liée à la recharge de cette nappe est pris en charge par la surface inférieure de la nappe. Notre estimation de premier ordre étant d'une recharge de 200 mm, en faisant l'hypothèse d'une porosité de 30% pour des roches volcaniques altérées et des sables on devrait enregistrer une variation de la surface libre eau-air une amplitude annuelle de 15 mm. Connaissant

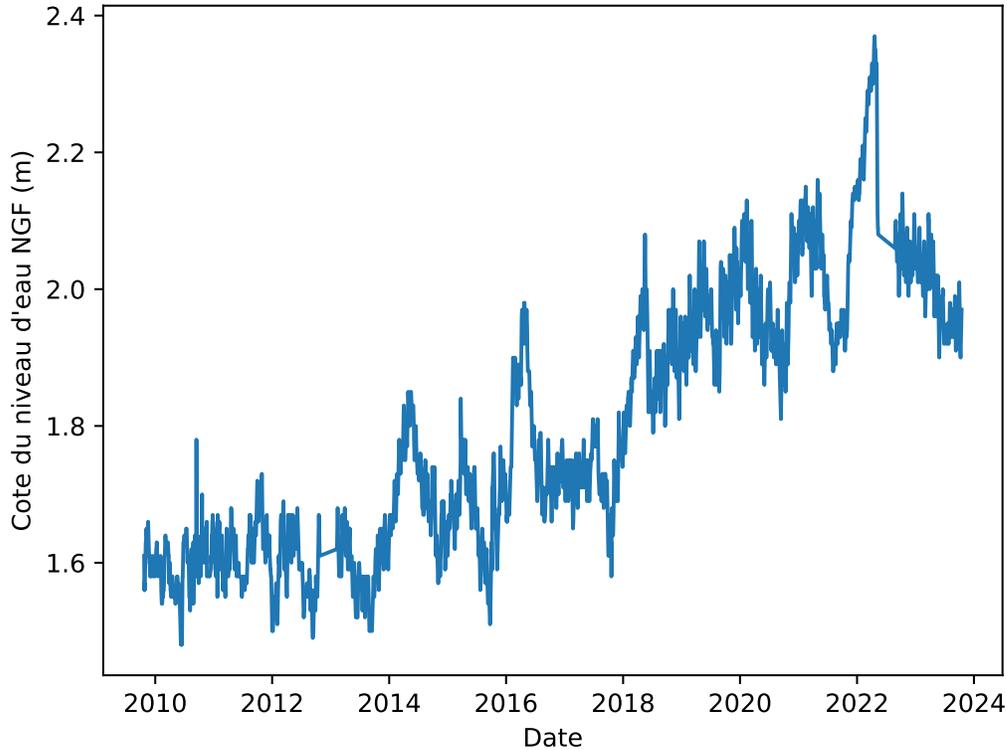


FIGURE 9 – Cote NGF du piézomètre BSS002PNML de Petite Terre

le bruit qui accompagne les mesures de piézométrie, il est illusoire de chercher de telles variations dans le signal d'autant que, d'après [Ollivaud \(2012\)](#) qui montre un échantillon du signal complet, cette variation serait noyée par le signal des marées auquel le piézomètre semble sensible. Indication supplémentaire si nécessaire de la connexion à la mer. Si on devait faire la piézométrie d'une nappe comme celle de Petite Terre il faudrait suivre non pas sa limite supérieure mais son interface inférieure. On en est loin techniquement.

En second lieu on note une évolution de la cote NGF moyenne qui passe de $1.7 \pm 0.2(2\sigma)$ m avant 2018 à 1.9 ± 0.2 m après 2018. Il semble donc que le piézomètre enregistre la subsidence de l'île engendrée par la naissance du volcan Fani Maoré au large de Mayotte. Là encore ceci est cohérent avec une nappe connectée à la mer. La subsidence de l'île est compensée au sein de la nappe par une poussée de la mer correspondant à la subsidence. La cote

NGF restant elle inchangée tant que la correction correspondante n'a pas été faite par l'IGN, le piézomètre «voit» une montée de l'eau correspondant à la subsidence.

5.2 Quid de la Ressource potentielle ?

La surface de l'île étant de 12 km^2 , si on accepte l'idée d'un recharge d'environ 200 mm/a , on se retrouve avec un débit potentiellement disponible $V_r = 2.4 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$. Les prélèvements doivent rester inférieur à ce débit afin de ne pas mettre en danger la nappe. Si on devait fournir 0.1 m^3 par habitant de Petite Terre et par jour, sachant qu'on a environ $40,000$ habitants sur la Petite Terre, on arrive à un prélèvement d'environ $1.5 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$. Il est donc probablement envisageable d'alimenter une partie non négligeable de population de Petite Terre avec l'eau de la nappe.

Ce bilan étant fait à l'ordre 1 plusieurs questions émergent. Quelle est la qualité de cette ressource si on ne prélève que sa partie superficielle? Comment procéder? À quel coût en comparaison, notamment, du coût de d'installation et de fonctionnement d'une usine de désalinisation, sans parler du coût de l'acheminement de bouteilles par cargo.

Pour ce qui concerne le prélèvement on ne peut se permettre de rabattre la nappe au delà de quelques dizaines de centimètres sans prendre le risque de la saler. Les essais à l'air lift mentionnés plus haut donnent des débits de l'ordre de $2 \text{ m}^3/\text{h}$. Ces valeurs sont considérés comme très faibles d'ordinaires et, couplées aux mesures de conductivités sont probablement à l'origine de l'abandon de toute tentative de captage de la nappe de Petite Terre. Cependant, un forage comme ceux de Pamandzi, qu'on ferait fonctionner 5 heures par jour fournirait 10 m^3 soit 10000 bouteilles d'eau chaque jour. Il faut donc, comme suggéré il y a 30 ans déjà par [Mauroux \(1992\)](#), porter la réflexion sur la faisabilité de multiples prélèvements de faible valeur. Le volume serait alors donné par un réseau de puits. Des tests de pompage à très faible débit devront être réalisés afin de vérifier ce qu'il en est.

On pourrait probablement s'appuyer pour ce faire sur les puits traditionnels existants et toujours mal connus, car non déclarés, ainsi que sur les savoirs et les méthodes de gestions traditionnels. Cette hypothèse n'est pas sans poser de problèmes notamment sur la façon de gérer la potabilisation de l'eau. Mais on ne fera pas l'économie d'une étude plus poussée sur de telles pratiques dans un contexte où le stress sur les ressources côtières ne fera que s'accroître dans le futur. D'autant que l'alternative choisie par les

pouvoirs publics, la désalinisation, n'est pas sans poser problème. Outre un coût élevé, les rejets, toxiques, finissent à l'heure actuelle dans la seule réelle ressource de Mayotte : son lagon. Pour l'heure, la solution mise en place consiste donc à faire naviguer la Petite Terre de Charybde en Scylla.

6 Conclusion et perspectives

Les calculs précédents permettent de se faire une bonne idée de ce à quoi ressemble la nappe sous la Petite Terre. Il faut cependant poursuivre l'effort pour mieux caractériser la dynamique de la nappe et de son biseau et, partant, la réserve en eau, sa disponibilité et la meilleure façon, du point de vue hydrologique s'entend, de la gérer (prélèvement, assainissement, utilisation).

En premier lieu on pourrait comparer aux données de géophysique du BRGM qui semblent indiquer assez clairement la présence d'un biseau. On pourrait ainsi projeter des profils de l'interface eau douce - eau salée sur les profils géophysiques. Il faut en outre des mesures ailleurs sur l'île et idéalement des suivis. Avec ces mesures on doit pouvoir, vérifier la façon dont la nappe fluctue avec la marée. On pourra alors tenter une minimisation pour mieux approcher la surface de la nappe.

Concernant la forme de l'interface eau douce - eau salée, les calculs considèrent un flux d'eau de mer nul. On peut relâcher cette hypothèse et faire des calculs avec un flux entrant dans le lac. Cela n'apportera probablement pas un changement majeur concernant la ressource mais c'est important pour l'étude du lac Dziani. Toujours concernant cet interface, la modélisation est forcément fautive aux abords de l'océan car, pour être plus précis, il faut résoudre l'équation de Laplace ce qui représente une difficulté supplémentaire. Par contre cela peut se révéler réellement intéressant pour les puits en bordure de lagon ou pour les écoulements à proximité du lac.

Il faut évidemment reprendre les calculs d'évaporation et d'infiltration ainsi que les estimations de conductivité K trois facteurs essentiels pour la gestion et le prélèvement. L'idéal serait de forer à un autre endroit de l'île et de refaire des essais de débit.

Références

- Abramian, A., Devauchelle, O., Seizilles, G., and Lajeunesse, E. (2019). Boltzmann distribution of sediment transport. *Phys. Rev. Lett.*, 123, 014501. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.123.014501>.
- Andréassian, V. and Sari, T. (2019). Technical note : On the puzzling similarity of two water balance formulas – turc–mezentsev vs. tixeront–fu. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(5), 2339–2350. <https://hess.copernicus.org/articles/23/2339/2019/>.
- Chambre régionale des comptes de Mayotte (2019). Rapport d’observation définitive et ses réponses : Syndicat intercommunal d’eau et d’assainissement de Mayotte (département de Mayotte).
- Comité de l’eau et de la biodiversité (2022). Document d’accompagnement du SDAGE Mayotte 2022-2027.
- Diakité, D. (2017). Alimentation en eau potable à Mayotte : un état des lieux. *La Lettre du CEMOI*, (11), 1–3. <https://hal.univ-reunion.fr/hal-03546553>.
- Jaouën, T., Vittecoq, B., Lions, J., Castillo, C., Deparis, J., Baltassat, J., François, B., Pinson, S., Gourcy, L., Winkel, A., et al. (2012). Caractérisation hydrogéologique du potentiel en eau souterraine de Mayotte-Secteurs nord-ouest. Rapport final BRGM. Technical report, Rapport final BRGM/RP-59550-FR. 424 p., 258 ill., 7 ann.
- Jaouën, T., Vittecoq, B., Castillo, C., Deparis, J., Lions, J., Gourcy, L., Allier, D., and Pinson, S. (2013). Caractérisation hydrogéologique du potentiel en eau souterraine de Mayotte – Secteurs Centre et Sud. Technical report, Rapport final BRGM/RP-61757-FR. 320 p., 148 ill. et 8 ann.
- Malcuit, E., Serniguet, H., Eddam, S., Ratsimihara, T., and L., G. (2019). Caractérisation des fonds hydrogéochimiques des eaux souterraines et des cours d’eau de Mayotte. Technical report, Rapport final. BRGM/RP-68526-FR, 192 p., 75 ill., 61 tabl.

Mauroux, B. (1992). Programme des forages de reconnaissance des eaux souterraines à Mayotte. Technical report, Rapport BRGM/R335165 REU 4S 92, 246p.

Ollivaud, N. (2012). Valorisation des données piézométriques ds réseaux sous maîtrise d’ouvrage DEAL et BRGM de Mayotte. rapport final. Technical report, Rapport final BRGM/RP-60955-FR. 153 p.

Turc, L. (1955). Le bilan d’eau des sols : relations entre les précipitations, l’évaporation et l’écoulement. *Journées de l’hydraulique*, 3(1), 36–44.

A Positionnement altimétrique des mesures

Les positions GPS des points ont été mesurées avec une antenne bi-fréquence ArduSimple et un récepteur ZED FP-9. Le mode de mesure est en RTK avec correction transmise au rover par une base du réseau Teria se situant à proximité. Tous les points sont acquis avec un mode FIX. Les altitudes données sont de deux types : élévation par rapport à l’ellipsoïde de référence (e) ou altitude orthométrique (h) par rapport au géoïde Le géoïde utilisé par les réseaux de correction est un géoïde moyen. Localement le géoïde réel dévie de façon significative du géoïde moyen. Il faut donc effectuer une correction en utilisant des grilles de corrections e_g fournies par l’IGN. Pour Mayotte la grille est représentée en figure 11.

Grâce à cette grille on peut normalement recalculer une altitude orthométrique locale (table 3 colonne 4) :

$$h_r = e - e_g \quad (10)$$

Le problème à Mayotte c’est que le géoïde de la figure 11 n’est plus correct depuis la naissance du volcan. La Petite Terre a subi une subsidence de près de 20 cm et les corrections de géoïdes ne permettent pas, par exemple de retrouver la position du niveau de la mer même en connaissant la marée grâce à la bouée du SHOM (nous avons fait le test en novembre 2023).

Dans l’attente d’une nouvelle estimation des corrections de géoïde par l’IGN nous procédons en utilisant la mesure du niveau de la mer effectuée le 13 novembre 2023. connaissant le coefficient de marée nous avons positionné tous les points de mesures par rapport à la Basse mer intermédiaire (BMI

Point	Date et Heure GMT+4	Altitude ellipsoïdale	Profondeur nappe	Altitude ref. BMI
Mer	13/11/23 10 :54	-20.997		-1.47
Lac	12/11/23 18 :24	-20.368		-0.84
Puits lac	15/11/23 17 :05	-19.115	0.66	-0.25
Puits P1	14/11/23 18 :38	-13.336	5.8	0.39
Point côté lac (sud)	12/11/23 ??	-19.443		0.09
Puits P2	06/10/24 18 :08	-8.602	10.17	0.76

TABLE 3 – Mesures GPS et corrections. BMI : Basse mer intermédiaire, PN Puits particulier N=1,2.

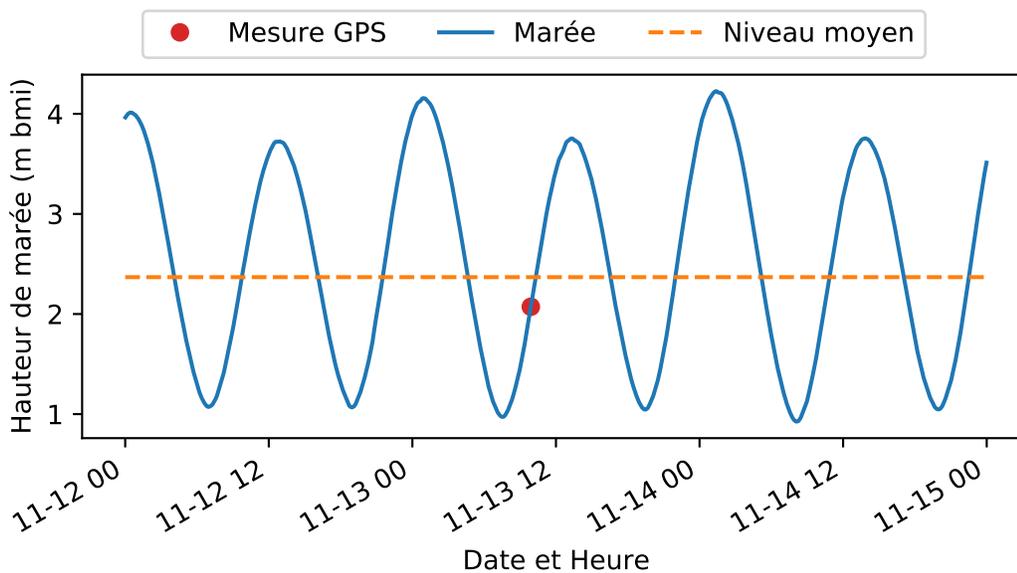


FIGURE 10 – Signal de Marée à la bouée du SHOM de Dzaoudzi et position du point de mesure GPS de la mer le 13/11/2023. Le BMI est donné par la ligne pointillée

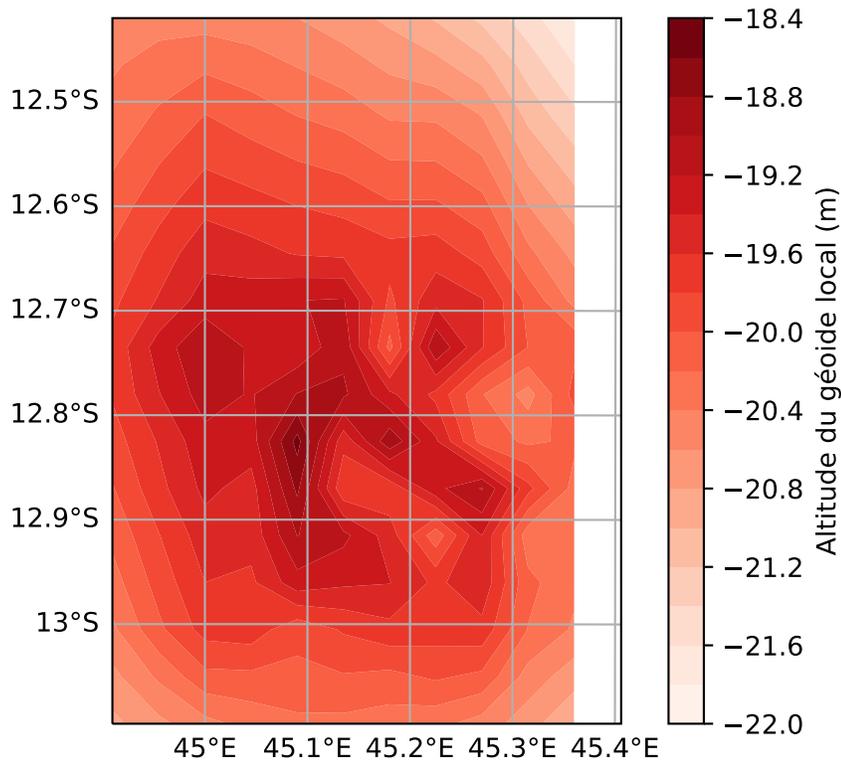
à ne pas confondre avec la basse mer moyenne inférieure) qui correspond au niveau moyen de la mer mesuré à la bouée de Dzaoudzi (figure 10).

La moyenne du BMI sur toute la série de mesures du SHOM donne 2.11 m. Cependant, comme le révèle la figure 12, cette valeur a évolué dans le temps. Elle augmente rapidement depuis environ vingt ans. Même en prenant le BMI des années 60 le lac est en moyenne sous le niveau du BMI. En moyenne la mer alimente donc apparemment bien le lac.

Notons que dans le cas des puits on cherche l'altitude de la surface piézométrique matérialisée par la surface de l'eau dans le puits. la profondeur de l'eau est donc incluse dans les altitudes corrigées, des points des puits.

Par contre nous n'avons pas corrigé des marées pour les puits. Il faudra, en fonction de leur position, comprendre si ils sont tous sensibles ou non aux marées et avec quel déphasage éventuel. Pour cela il faudra équiper un second piézomètre, celui de Dzaoudzi étant insuffisant.

FIGURE 11 – Géoïde local (source IGN)



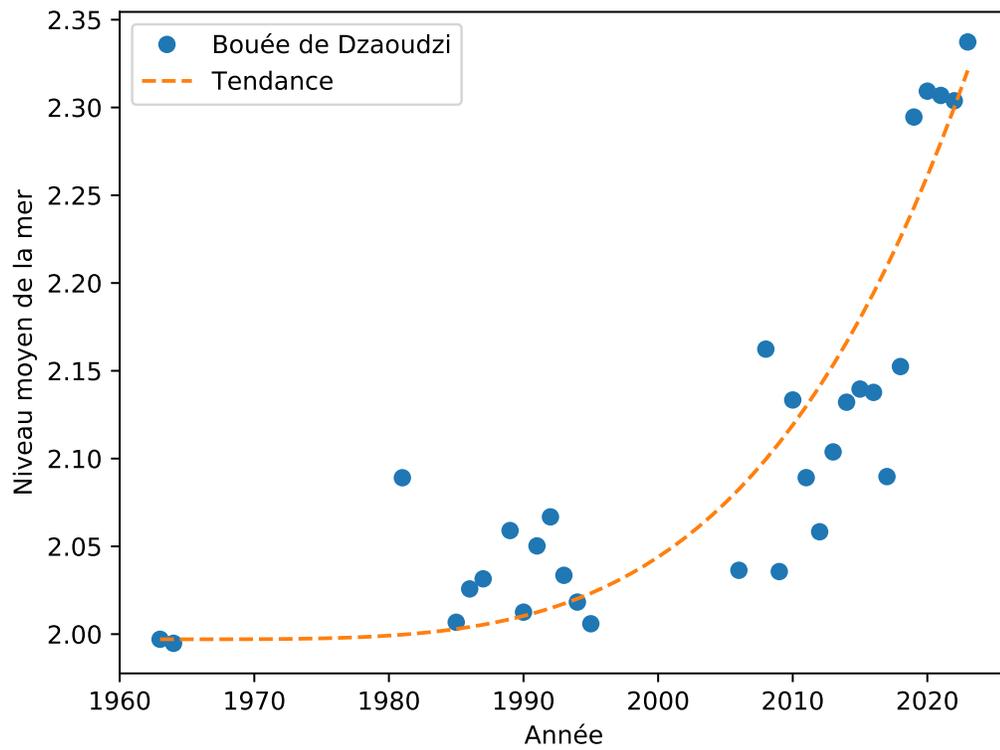


FIGURE 12 – Niveau moyen de la mer mesuré au niveau de la bouée de Dzaoudzi par rapport au niveau bmi (basse mer inférieure).