

Modalités d'exploitation et de protection de l'aquifère de Kawéni

Année 4

Rapport final

BRGM/RP-57385-FR

Décembre 2009



Modalités d'exploitation et de protection de l'aquifère de Kawéni

Année 4

Rapport final

BRGM/RP-57385-FR
Décembre 2009

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM

A. Malard, A. Bourhane et A. Wuilleumier

Vérificateur :

Nom : B. Aunay

Date :

Signature :

Approbateur :

Nom : P. Puvilland

Date :

Signature :

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.

Mots clés : Hydrogéologie, hydrochimie, aquifère volcanique, jaugeages, aquifère côtier, Tempo, intrusion saline, essai de nappe, test de capacité d'absorption, vulnérabilité, Kawéni, Kaouénilajoli, Mayotte, Comores, France

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

Malard A., Bourhane A. et Wuilleumier A. (2009) – Modalités d'exploitation et de protection de l'aquifère de Kawéni – Année 4 – BRGM/RP-57385-FR, 117 p., 40 ill., 9 tab. , 6 ann.

© BRGM, 2009, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Le projet de Service Public 2002-2004 « Modalités d'exploitation et de protection de l'aquifère de Kawéni » commandé par la Collectivité Départementale de Mayotte a débuté en 2003, et ce pour une durée prévisionnelle de 3 ans¹. Le projet a fait l'objet de trois rapports d'avancement parus respectivement en 2004, 2005 et 2008, concernant les années d'étude 1, 2 et 3 (rapports BRGM/RP-53161-FR, BRGM/RP-54082-FR et BRGM/RP-56773-FR).

Selon le cahier des charges initial (2003), les objectifs affichés du projet sont :

- 1) « **évaluer, avec la meilleure précision possible, la ressource en eau exploitable à l'échelle de l'ensemble de l'aquifère [de la dépression de Kawéni] ainsi que les modalités pratiques de cette exploitation** »,
- 2) « **préciser la vulnérabilité de l'aquifère vis-à-vis des activités humaines** »

Les principaux travaux réalisés en année 1 et leurs résultats sont les suivants :

- les prospections géophysiques associées aux reconnaitances géologiques réalisées en mars 2004 ont permis d'acquérir de précieuses informations sur la géométrie des lithologies concernant la dépression de Kawéni. Ces profils ont permis d'identifier la succession des structures géologiques en profondeur et d'estimer l'absence de contamination saline au dessus de la cote -80 m NGM² ;
- un premier inventaire des points d'eau a permis de dresser une carte piézométrique indicative (en l'absence d'un nivellement absolu des piézomètres) de la nappe superficielle et d'y faire figurer la distribution des mesures de conductivité (sans purge des puits au préalable).

Les études réalisées en année 2 ont abouti aux résultats suivants :

- la répétition des prospections géophysiques a mis en évidence une baisse des résistivités au-delà de -50 m NGM pouvant être une réponse à l'avancée de l'interface eau douce / eau salée consécutive à l'exploitation de l'aquifère (hypothèse invoquée à l'époque) mais pourrait tout aussi bien être une conséquence d'un régime hydrogéologique différent (les deux profils n'ont pas été réalisés à la même saison et les fluctuations des nappes pourraient avoir une incidence sur l'avancée/retrait de l'interface avec les eaux saumâtres...) ;
- un inventaire des activités industrielles et artisanales ainsi que des produits susceptibles d'y être utilisés et qui représentent un risque potentiel de pollution pour la nappe a été réalisé.

¹ Cahier des charges prévisionnel sur 3 ans (programmation initiale de Service Public du BRGM 2002, 2003 et 2004) signé le 05/01/2004. Fiche d'Année 3 - 06EAUC28.

² Nivellement Général de Mayotte

Les études initialement programmées en année 3 ont dues être révisées en raison de l'absence de nivellement des points de mesure (forages et piézomètres du bassin, action à la charge de la Collectivité Départementale de Mayotte) et de leur disparition progressive (par mise en exploitation ou par vandalisme). La perte de ces points de mesure et les modifications importantes survenues dans le bassin – et principalement dans la zone de Kawéni – ont entraîné des modifications irréversibles des objectifs à atteindre précisés dans le cahier des charges. Ainsi, les études d'année 3 (réalisées en 2008) ont permis de progresser dans la connaissance de l'aquifère, à travers notamment :

- la mise en place d'un modèle géologique conceptuel ;
- les investigations de terrain et jaugeages ont permis de comprendre la logique des régimes hydrologiques du cours d'eau du Mro Oua Kaouénilajoli et d'approcher les mécanismes de recharge de l'aquifère. Le Mro Oua Kaouénilajoli est un cours d'eau qui s'avère non pérenne, ce qui traduit un comportement hydrologique particulier compte tenu de la taille du bassin versant ;
- la caractérisation physico-chimique de la ressource en eau souterraine, basée sur pas moins de 120 analyses multi-paramètres, a montré que la mise en exploitation de la zone a conduit à une homogénéisation probable des eaux entre les forages F1, F2 et Kawéni 3 10". Les analyses n'ont pas mis en évidence de contamination significative de la nappe par intrusion marine, ni même de dégradation notable de la qualité des eaux compte tenu du développement industriel (ZI et ZAC de Kawéni) et urbain de la zone (village de Kawéni Bagdad, Kawéni la Geôle, etc.) ;

Il a été démontré que la régression des niveaux piézométriques de l'aquifère volcano-sédimentaire est probablement conséquente à l'exploitation des forages AEP mais peut être également expliquée ou amplifiée par d'autres facteurs conditionnant la recharge comme le raccourcissement de la saison humide ou la modification du cours d'eau en raison des aménagements et dégradation (principal vecteur de recharge). En effet, il avait été avancé que le tapissage du fond de la rivière par des matériaux issus du lessivage des versants (déforestation) amplifié par une activité hydrologique du cours d'eau en diminution pouvait réduire les mécanismes d'infiltration.

En année 4, il a été défini un programme d'étude complémentaire aux années précédentes compte tenu des résultats. Les études se focalisent principalement sur :

- la présentation de la problématique de l'exploitation des aquifères cotiers. L'aquifère de Kawéni répondant aux critères de définition des aquifères cotiers, il est nécessaire de présenter les caractéristiques de ces derniers et les difficultés que posent leur exploitation dans le souci d'anticiper les surveillances, études et moyens à mettre en œuvre dans l'optique d'une exploitation durable ;
- la vérification des propriétés hydrodynamiques de l'aquifère à travers la réalisation et l'interprétation d'un essai de nappe (à hauteur du forage F1 entre le 27 mai et le 2 juin 2009). La transmissivité réinterprétée est de $7,5.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$;
- l'actualisation de l'inventaire des pressions à l'échelle du bassin et notamment dans les secteurs de Kawéni « La Poste », Kawéni « Collège » et de Kawéni la Geôle plus proches des forages et inscrits dans les bassins d'alimentation. Le développement

des activités industrielles et de service et de l'urbanisation du bassin rend obsolète le premier inventaire réalisé en Année 2 (rapport BRGM/RP-54082-FR) ;

Parallèlement à ces travaux, les études relatives à la caractérisation des bassins d'alimentation des forages F1, F2 et Kawéni 3 (Wuilleumier et al., 2009 - rapport BRGM/RP-57620-FR) ont été menées entre septembre et octobre et ont permis de mutualiser un certain nombre de connaissances et d'observations.

Les résultats des 4 années d'études montrent qu'il est capital de surveiller l'évolution de la ressource en eau souterraine - considérée à Kawéni comme une ressource stratégique. Compte tenu de l'insuffisance de données piézométriques, physico-chimiques, hydrologiques, etc. des poursuites d'étude focalisées sur l'aquifère ne sont pas à envisager dans les années qui viennent. Il est plus urgent – et il s'agit là de la recommandation majeure - de mettre en place un réseau de mesures permettant de suivre :

- l'évolution spatiotemporelle de la nappe. Cela suppose la réalisation et l'instrumentation de nouveaux piézomètres comme préconisé dans le rapport BRGM/RP-53160-FR dont la proposition d'implantation peut être conservée ;
- l'évolution en continue de la conductivité en plusieurs points de la nappe mais aussi des relevés ponctuels sur toute la longueur des forages en production (= logs). Ces données permettraient d'apprécier la répartition des intrusions d'eau saumâtre et leur avancée dans l'espace et le temps et d'alerter en cas de dépassement d'un seuil. Des stratégies d'exploitation alternatives pourraient être mises en place en concertation avec le fermier ;
- les débits de la rivière Mro Oua Kaouénilajoli, si possible à hauteur du forage de Kawéni 3 10''. Des jaugeages ponctuels en amont (de préférence au niveau des basaltes $\beta 2$ et $\beta 3$ ¹ – cf. Guilbert et al., 2008 rapport BRGM/RP-56600-FR) permettraient alors – par comparaison avec les valeurs enregistrées à la hauteur du forage – de mettre en évidence et de quantifier les phénomènes d'infiltration. Cette rivière étant asséchée ou montrant des débits très faibles la majeure partie de l'année, la mesure de débits reste délicate à assurer.

La surveillance et la compilation de données en temps réel permettront – dans les années qui viennent – de relancer les études relatives à l'évolution de la ressource en eau souterraine, notamment à travers la mise en œuvre d'un modèle numérique de fonctionnement de l'aquifère dont le développement pourra – à long terme – s'avérer précieux en termes de prévisions et de gestion de l'évolution de la ressource en eau souterraine.

Pour progresser dans la compréhension du fonctionnement de l'aquifère de Kawéni, les résultats de l'étude montrent que de nombreuses interrogations subsistent dans la

¹ Les basaltes $\beta 2$ et $\beta 3$ ont été définies dans le périmètre du massif de M'tsapéré en 2008 (Guilbert et al., 2008 – rapport BRGM/RP-56600-FR). Les basaltes $\beta 2$ à phénocristaux de pyroxène sont anciens et souvent altérés, les basaltes $\beta 3$ mésocrates, à olivine, pyroxène et amphibole sont plus récents et moins largement distribués.

partie centrale et amont du bassin d'alimentation, à l'amont de l'interface entre les basaltes β_2 et β_3 . La zone où il faudrait focaliser les études correspond à la bande d'altitude comprise entre 90 et 200 m NGM, soit celle qui fournit une part importante de la pluie efficace. Sur ce secteur, il conviendrait d'étudier les modalités hydrologiques du cours d'eau (régime annuel, débit, conductivité, etc.) :

- Identifier les structures lithologiques à travers des reconnaissances géologiques et géophysiques,
- localiser les sources et les zones de pertes conduiraient à mieux cerner les mécanismes hydrogéologiques à l'amont, indispensables à la caractérisation de l'extension de la nappe et à la compréhension de la recharge aquifère.

Il est important aussi d'avancer rapidement sur le plan de la protection de la ressource. A cet effet, des travaux sont à envisager sur le recensement, la mise en sécurité et/ou la fermeture des ouvrages susceptibles de constituer un vecteur privilégié de pollution vers les eaux souterraines. Ces travaux, à l'échelle du bassin d'alimentation des forages de Kawéni devront s'accompagner d'un plan d'action de sensibilisation et d'éducation de la population, notamment des riverains¹.

¹ Les plans d'action sont inscrits dans le programme de mesure du SDAGE, approuvé le 10 décembre 2009.

Sommaire

1. Introduction et contexte	13
1.1. INTRODUCTION	13
1.2. CONTEXTE	13
2. Evolution de la ressource en eau souterraine	17
2.1. LES PARAMETRES ACTUELLEMENT SUIVIS.....	17
2.1.1. La piézométrie (Kawéni 1 8", DAF & BRGM).....	17
2.1.2. La qualité de l'eau (F1, F2 et Kawéni 3 10", SOGEA, données DASS et SOGEA en Annexe 1)	19
2.1.3. Les volumes prélevés (F1, F2 et Kawéni 3 10", SOGEA).....	21
2.2. CONFIRMATION DES PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES DE L'AQUIFERE – ESSAI DE NAPPE DE JUIN 2009	22
2.2.1. Utilité des essais.....	22
2.2.2. Les essais de nappe de 1991.....	22
2.2.3. Mode opératoire et instrumentation.....	23
2.2.4. Résultats.....	24
2.2.5. Interprétation des résultats et confrontation avec les essais de 1991	30
2.3. APPROCHE DE LA PLUIE EFFICACE ANNUELLE DE L'AQUIFERE DE KAWENI.....	32
2.3.1. Approche spatialisée de la pluviométrie sur le bassin de Kawéni	32
2.3.2. Evapotranspiration.....	38
2.3.3. Pluviométrie efficace et notion de recharge	41
2.4. LE CONTROLE MARIN	45
2.4.1. Principes théoriques de contrôle du niveau de la nappe par les marées	45
2.4.2. Application à Kawéni – données de septembre à novembre 2009	46
2.4.3. Conclusion.....	52
3. La rivière de Kaouénilajoli, marqueur des modalités de recharge de l'aquifère	53
4. Actualisation de l'inventaire des pressions existantes dans le bassin de Kawéni	59
4.1. L'UTILITE D'UN TEL INVENTAIRE (UN PREMIER INVENTAIRE A DEJA ETE REALISE EN 2004)	59

4.2. 2009 : ACTUALISATION DES INFORMATIONS	59
4.2.1. La ravine Kawéni 'la poste'	59
4.2.2. La ravine Kawéni 'collège'	62
4.2.3. La rivière Kaouénilajoli	63
4.2.4. Les activités industrielles au droit des forages.....	63
4.2.5. Les activités en amont des forages.....	65
4.3. CONCLUSION	67
5. Perspectives d'exploitation de l'aquifère de Kawéni.....	69
5.1. ETUDE DES BAC DE KAWENI ; LA PROTECTION REGLEMENTAIRE DES FORAGES.....	69
5.2. MONITORING DE LA CONDUCTIVITE.....	70
5.3. RELANCER LES PROJETS DE SONDRAGE POUR UNE SURVEILLANCE DE L'AQUIFERE ? UTILITE D'UN RESEAU D'ALERTE ?	70
6. Conclusion.....	71
7. Références bibliographiques	73
II. PROBLEMATIQUE	108
III. ORIGINE ET CONSEQUENCES DE LA POLLUTION SALINE	109
a) L'interface eau douce-eau salée	109
b) L'approximation de Ghyben-Herzberg	109
c) Les conséquences de la salinisation	111
IV. MÉTHODES DE MISE EN ÉVIDENCE	112
a) L'étude piézométrique.....	112
b) L'étude chimique	112
c) Conductivité et résistivité.....	113
V. GESTION ET TECHNOLOGIES DE REMÉDIATION.....	113
a) Le pompage saisonnier.....	113
b) La recharge artificielle	114
VI. CONCLUSION	115

Liste des illustrations

Illustration 1. Fluctuations des niveaux de la nappe enregistrées au piézomètre de Kawéni 1 8'' entre 1993 et décembre 2009.	18
Illustration 2. Fluctuations des niveaux de la nappe enregistrées au piézomètre de Kawéni 1 8'' entre mai 2008 et décembre 2009.	18
Illustration 3. Résultats des analyse des paramètres bactériologiques des eaux du forage de Kawéni 3 10'' (analyses du 20 octobre 2009).....	21
Illustration 4. Évolution du rabattement en fonction du temps au niveau du forage F2 sur une échelle bi-logarithmique.	25
Illustration 5. Calcul des paramètres hydrodynamiques en descente selon la méthode de Cooper-Jacob.....	26
Illustration 6. Détection des éventuelles limites de l'aquifère	27
Illustration 7. Détermination graphique des paramètres hydrodynamiques selon la méthode de Jacob en remontée.	28
Illustration 8. Comportement hydrologique annuel schématique de l'aquifère de Kawéni (document extrait du Rapport BRGM/RP-56773-FR, 2008).	31
Illustration 9. Fluctuations journalières du signal piézométrique sur le forage F1.....	31
Illustration 10. Localisation des postes pluviométriques Météo-France (rouges) et DAF (verts), situés au Centre et au Nord de Mayotte (Document DAF).....	33
Illustration 11. Isohyètes moyennes annuelles à Mayotte (source des données et interpolations : : DAF)	34
Illustration 12. Corrélation linéaire entre l'altitude du poste pluviométrique et la pluviométrie moyenne interannuelle (année civile).....	35
Illustration 13. Relation entre l'altitude des postes pluviométriques et la pluviométrie moyenne mensuelle pour les mois de novembre à mars (1996-2008)	38
Illustration 14. Corrélation linéaire entre l'altitude du poste pluviométrique et l'évapotranspiration potentielle moyenne interannuelle entre 0 et 90 m NGM. Quatre stations sont utilisées (Pamandzi, Mamoudzou, Dzoumonyé et Coconi).....	39
Illustration 15. Corrélation linéaire entre l'altitude du poste pluviométrique et l'évapotranspiration potentielle moyenne interannuelle : exemple de la Guadeloupe. En haut, la plage d'altitude comprise entre 8 et 84 m ; en bas, la plage d'altitude supérieure comprise entre 84 et 428 m	40
Illustration 16. Pluies efficaces mensuelles du bassin versant du Mro Oua Kaouénilajoli (en mm) en fonction de l'altitude. Le tableau de données est placé en Annexe 3. Les valeurs de pluies efficaces sont nulles pour les mois de mai, juin, juillet, août, septembre et octobre quelque soit la tranche d'altitude considérée.	42
Illustration 17. Répartition des surfaces par classes d'altitude (borne inférieure et supérieure en m NGM). Par effectif est entendu le nombre de mailles carrées de 25 m de coté.....	43
Illustration 18. Pluie efficace annuelle du bassin de Kaouénilajoli par classe d'altitude (de 10 m en 10 m) pondérée par la surface correspondante.	43

Illustration 19. Caractéristique d'une courbe de marée (Lefèvre, 2000).	45
Illustration 20. Variations de la pression atmosphérique horaire enregistrées à Dzaoudzi entre le 25/08/2009 et le 07/12/2009 (données SHOM).	46
Illustration 21. Chronique du piézomètre de Kawéni 1 8'' (en m NGM) enregistrée entre le 27/08/2009 et le 07/12/2009 au pas de temps de 10 min et corrigée des valeurs de la pression atmosphérique.	47
Illustration 22. Surimposition de la chronique piézométrique et des volumes hebdomadaires prélevés par la SOGEA sur la même période (somme des forages F1 et F2) entre le 23/08/2009 et le 06/12/2009 (données SOGEA).	48
Illustration 23. Fluctuations des marées enregistrées à Dzaoudzi entre le 25/08/2009 et le 09/12/2009 (chronique ci-dessus) et agrandies entre le 27 et le 30/08/2009 (données SHOM).	49
Illustration 24. Corrélogramme des marées de Dzaoudzi entre le 25/08/2009 et le 09/12/2009 (données SHOM, traitement TEMPO).	50
Illustration 25. Densité spectrale de puissance relative des marées de Dzaoudzi entre le 25/08/2009 et le 09/12/2009 (données SHOM, traitement TEMPO).	50
Illustration 26. Corrélogramme des données piézométriques de Kawéni 1 8'' entre le 25/08/2009 et le 09/12/2009 (traitement TEMPO).	51
Illustration 27. Corrélogramme croisé du signal de marées de Dzaoudzi et des données piézométriques de Kawéni 1 8'' entre le 25/08/2009 et le 09/12/2009 (traitement TEMPO).	51
Illustration 28. Fonction d'amplitude du signal des marées de Dzaoudzi (données SHOM) sur la piézométrie de Kawéni 1 8''.	52
Illustration 29. Comparaison relative des retards de recharge des aquifères. En haut, les aquifères d'altitude des plateaux de Combani et Kahani (cote piézométrique vers 100 m NGM), au milieu les aquifères intermédiaires de Tsingoni et Orovéni (cote piézométrique vers 50 m NGM) et en bas l'aquifère de Kawéni (cote piézométrique entre 5 et 7 m NGM).	55
Illustration 30. Modèles de recharge de l'aquifère de Kawéni. MODELE 1 : les infiltrations sont localisées en partie basse du bassin (interface entre les unités basaltiques et les dépôts récents). MODELE 2 : les infiltrations sont drainées dans la zone non saturée verticalement et rapidement vers la nappe (dont la géométrie n'est qu'indicative) et rejoignent le bassin de Kawéni.	57
Illustration 31. Dépotoir d'ordures dans la ravine Kawéni 'la poste'.	60
Illustration 32. Évacuation d'eaux usées dans la ravine.	61
Illustration 33. Morceau d'une fondation arrachée pendant la crue de la ravine Kawéni 'la poste'.	61
Illustration 34. Incinération d'ordures dans la ravine Kawéni 'collège'.	62
Illustration 35. Décharge sauvage (à gauche) et rejet d'eaux usées (à droite) dans la rivière Kaouénilajoli.	63
Illustration 36. Site de stockage fréquenté par les poids lourds (à gauche) et menuiserie (à droite).	64
Illustration 37. Site fréquenté par les poids lourds (à gauche) menuiserie (au milieu) et entreposage de peinture (à droite).	64

Illustration 38. Localisation des ouvrages AEP dans la zone agricole.	65
Illustration 39. Culture sur brulis et champs de manioc en amont des forages F2 et Kawéni 3.....	65
Illustration 40. Localisation des forages et synthèse cartographique des pressions exercées sur le bassin.	66

Liste des tableaux

Tableau 1. Les forages exploités du bassin de Kawéni (informations actualisées 2009).	14
Tableau 2 : Paramètres mesurés par la SOGEA et la DASS sur les eaux brutes des forages F1, F2 et Kawéni 3 10".....	19
Tableau 3. Les résultats de la réinterprétation de l'essai de nappe de février 1991.	23
Tableau 4. Mesures des niveaux piézométriques	23
Tableau 5. les résultats obtenus aux essais de nappe de 1991 et 2009.....	29
Tableau 6. Caractéristiques des postes pluviométriques situés dans le voisinage du bassin versant de Kaouénilajoli. Les altitudes ont été actualisées sur la base du MNT IGN 2009, plus précis que les anciennes références altimétriques basées sur la carte IGN au 1/25 000.....	34
Tableau 7. Cumul annuel des précipitations des postes pluviométriques situés dans le voisinage du bassin versant de Kaouénilajoli	35
Tableau 8. Evapotranspiration mensuelle pour six stations à Mayotte (exprimée en mm/j ; source : Lapègue – 1999). Les altitudes des stations de Pamandzi et Mamoudzou ont été corrigées (respectivement 7 m NGM au lieu de 10 m NGM et 60 m NGM au lieu de 40 m NGM).....	38
Tableau 9. Comparaison des ETP annuelles Lapègue (1999) et estimée à partir de l'altitude sur la base des relations précédentes. Les résidus sont très faibles.	41

Liste des annexes

Annexe 1 Analyses physico-chimiques réalisées sur les forages F1, F2 et Kawéni 3 10" en 2009 (données DASS / SOGEA)	77
Annexe 2 Calendrier d'exécution de l'essai de nappe du 27 mai au 2 juin 2009.....	83
Annexe 3 Données des calculs de pluies efficaces et évapotranspiration du bassin de Kawéni	87
Annexe 4 Inventaire des activités et industries potentiellement polluantes en amont et au droit des forages d'exploitation AEP de Kawéni (Commune de Mamoudzou)	93
Annexe 5 Compte rendu des sorties de reconnaissance des 15 et 16 juin 2009	101
Annexe 6 Spécificité des aquifères côtiers : cas de Kawéni (commune de Mamoudzou – Mayotte).....	106

1. Introduction et contexte

1.1. INTRODUCTION

En 2003, la Collectivité Départementale de Mayotte a confié au BRGM la réalisation d'une étude relative aux modalités d'exploitation et de protection de l'aquifère de Kawéni, en raison de la mise en exploitation programmée du forage de Kawéni 3 10'' au régime prévisionnel de 30 m³/h. Initialement, le programme d'étude portait sur une durée de 3 ans afin de suivre la mise en sollicitation de l'aquifère sur plusieurs cycles hydrogéologiques.

Les études réalisées depuis 2003 sur l'aquifère de Kawéni ont permis – à travers la rédaction de 4 rapports dont l'actuel document – d'élaborer un modèle géologique et hydrogéologique de l'aquifère et de cerner les problématiques principales auquel il était exposé depuis sa mise en exploitation en 1991/1992 et d'apporter des éléments de réponse quant à son fonctionnement et aux modalités de protection à adopter.

Ce rapport synthétise l'ensemble de ces connaissances et aborde quelques volets complémentaires qui se substituent aux volets non traités du cahier des charges initial du 05/01/2004. Cette année 4 d'étude apporte, en particulier, un modèle conceptuel de la structure et du fonctionnement de l'aquifère et une actualisation des pressions s'exerçant sur ce dernier. Ces conclusions apportent des perspectives quant aux mesures de protection et pour la poursuite de l'étude de cette ressource.

1.2. CONTEXTE

La dépression de Kawéni, située dans la partie Nord-est de Grande-Terre (Mayotte) au Nord de Mamoudzou, correspond à un cratère volcanique Pléistocène rempli de dépôts de pyroclastites en partie remaniés. Les dépôts de mangrove ont partiellement envahi la partie Est de la zone. L'aquifère - identifié comme semi captif à captif au niveau des forages F1, F2 et des piézomètres 1 8'', 2 8'', etc. est composé de dépôts de pyroclastites argillitiques et d'un substratum basaltique (basalte identifié comme de la série dite « $\beta 2$ » et partiellement fracturé, cf. rapport BRGM/RP-56600-FR et BRGM/RP-56773-FR). Le réseau hydrologique est constitué principalement par la rivière non pérenne Mro Oua Kaouénilajoli et ses affluents. Les débits de cette rivière ne sont pas suivis.

Considéré comme une ressource stratégique pour l'alimentation de l'agglomération de Mamoudzou, il a paru important aux yeux de la Collectivité départementale de Mayotte d'engager des études relatives aux modalités de fonctionnement de l'aquifère et à sa protection.

Trois ouvrages sont actuellement exploités, temporairement ou en permanence :

Forage	F1	F2	Kawéni 3 10''
Code BSS	12307X0013/F1	12307X0014/F2	12307X0021/Kaoué3
X_{RGM04} (en m)	523 938	523 978	523 828
Y_{RGM04} (en m)	8 588 511	8 588 671	8 589 220
Z_{NGM} (en m)	13	15	20
Régime exploitation (m ³ /h)	15	12	30
Date de mise en service	1991	1991	2004

Tableau 1. Les forages exploités du bassin de Kawéni (informations actualisées 2009).

Il est important de rappeler que le parc de mesures existant dans le bassin de Kawéni est en voie de disparition :

- En ce qui concerne les piézomètres de Kawéni 2 8'' (12307X0012/Kawé1), Kawéni 1 10'' (12307X0019/Kaoué1) et Kawéni 2 10'' (12307X0020/Kaoué2), ils ont été détruits ou deviennent progressivement inaccessibles en raison du développement anarchique de l'urbanisation dans la zone. Le piézomètre de Kawéni 1 10'' - dont l'accessibilité a été rendue délicate en raison du comportement du propriétaire - est redevenu accessible récemment. La DAF a ainsi pu recommencer à assurer le suivi piézométrique ;
- le piézomètre de Kawéni 1 8'' (chroniques en Illustration 1) n'a jamais été entretenu depuis sa création et devra faire l'objet d'une réhabilitation en 2010 afin d'éviter le risque de le voir disparaître à son tour (réhabilitation prévue dans le cadre du réseau piézométrique MO BRGM de Mayotte, cf. Malard et al. rapport BRGM/RP-57459-FR à paraître) ;
- la station de jaugeage de la rivière Mro Oua Kaouénilajoli (code DAF B10, mentionnée dans la thèse de Lapègue 1999), dont le suivi n'a jamais été vraiment assuré depuis sa création dans les années 90, a été abandonnée.

Les recommandations de sondages complémentaires, de nivellement des points de mesure et de mise en place de monitoring (rapport 2004 et 2005) n'ont jamais aboutis.

Par conséquent, du fait de la détérioration progressive du parc de mesures, les données deviennent plus rares, moins régulières et moins précises. Dans les années qui viennent, l'accent doit donc être porté sur la ré-instrumentation et la mise en place de dispositifs de surveillance dans le bassin de Kawéni.

La capitalisation de données quantitatives et qualitatives est indispensable à la bonne opération des études scientifiques relatives à la description du fonctionnement de l'aquifère et par conséquent des modalités de son exploitation.

2. Evolution de la ressource en eau souterraine

Dans le cas des aquifères poreux et particulièrement dans le cas des aquifères captifs ou semi captifs, l'exploitation excessive de la ressource peut entraîner une baisse du niveau piézométrique, une dépressurisation de l'aquifère et un tassement du matériau pour combler les vides occasionnés par la baisse de pression hydrostatique. Ce phénomène est susceptible de rétrécir les espaces inter-granulaires, diminuer la section d'écoulement et parallèlement la transmissivité de l'aquifère et le rendement des puits pompés (*Dassargues et Montjoie, 1991*). Ce processus, comme l'intrusion d'eau marine pourraient être responsable de la dégradation de l'aquifère de Kawéni si aucune mesure compensatoire n'est envisagée.

2.1. LES PARAMETRES ACTUELLEMENT SUIVIS

2.1.1. La piézométrie (Kawéni 1 8", DAF & BRGM)

La nappe de Kawéni est suivie en continu et au pas de temps horaire par le BRGM au niveau du piézomètre de Kawéni 1 8" (BSS 12307X0011/KAWÉ1) depuis juin 2008. Antérieurement, les niveaux étaient suivis manuellement par la DAF depuis 1993 (2 mesures par mois entre 1993 et 2003 et une mesure hebdomadaire depuis avec des périodes de lacune).

Les chroniques piézométriques sont déposées régulièrement dans la banque de données des eaux souterraines (ADES).

De 1993 à aujourd'hui la chronique est la suivante.

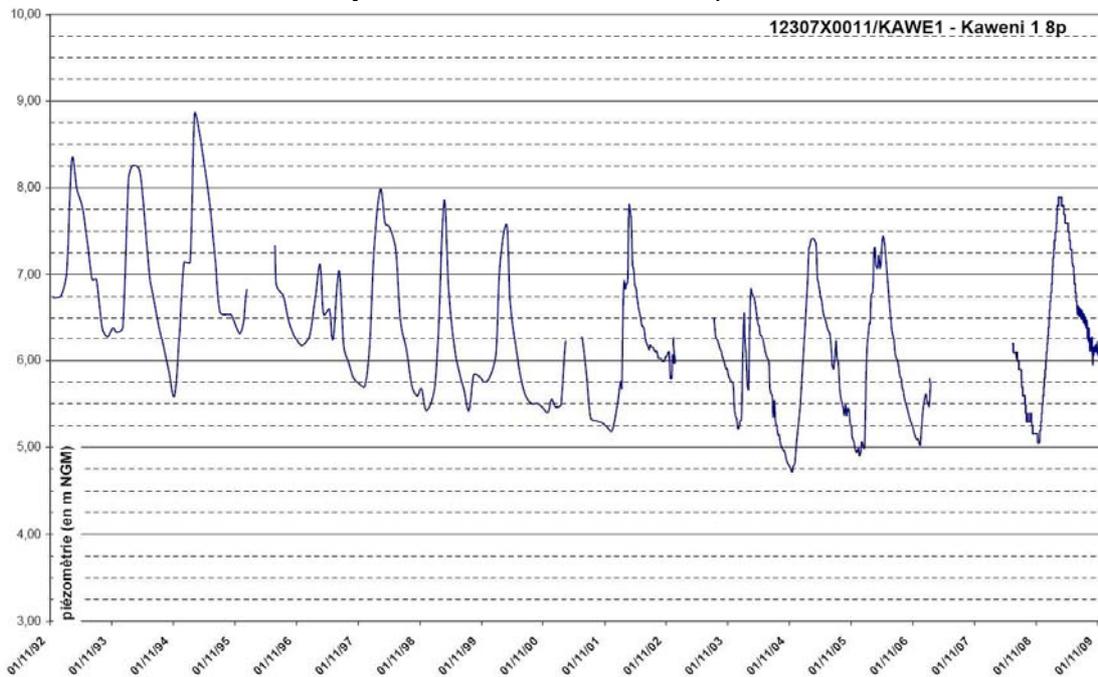


Illustration 1. Fluctuations des niveaux de la nappe enregistrées au piézomètre de Kawéni 1 8" entre 1993 et décembre 2009.

Les niveaux spécifiques des 2008-2009 peuvent être tracés ci-dessous.

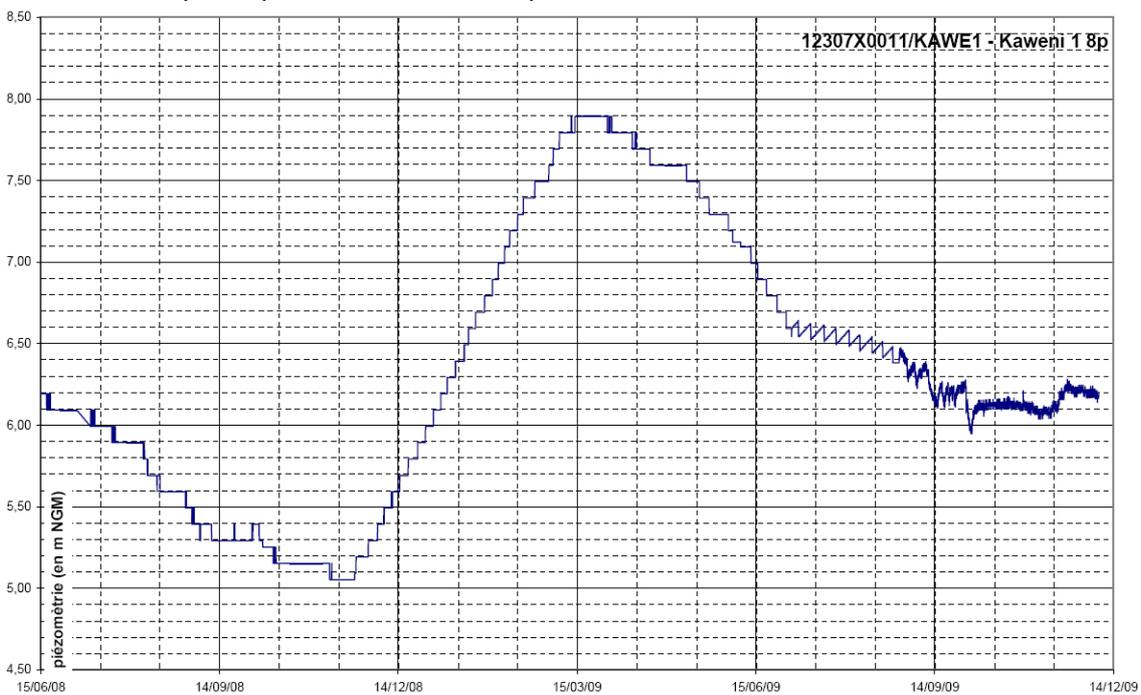


Illustration 2. Fluctuations des niveaux de la nappe enregistrées au piézomètre de Kawéni 1 8" entre mai 2008 et décembre 2009.

Les niveaux piézométriques de l'aquifère entre 1993 et 2008 ont été interprétées dans le rapport d'Année 3 (Malard et al. Rapport BRGM/RP-56773-FR).

Il est intéressant de noter que les niveaux de basses eaux, les niveaux moyens et les niveaux de hautes eaux qui remontent sensiblement depuis 2004 – continuent de remonter sur les années 2008 et 2009 :

- les niveaux de hautes eaux enregistrés en mars 2009 atteignent près de 8 m NGM, ce qui n'avait pas été observé depuis 2002, c'est-à-dire avant la mise en exploitation du forage de Kaouéni 3 10'' (12307X0021/Kaoué3) ;
- les niveaux de basses eaux enregistrées en septembre/octobre 2009 sont les plus hauts jamais enregistrés depuis 1995/1996 (autour de 6,1 m NGM contre 5,1 m NGM en basses eaux 2008).

2.1.2. La qualité de l'eau (F1, F2 et Kawéni 3 10'', SOGEA, données DASS et SOGEA en Annexe 1)

La qualité des eaux souterraines (eau brute) est suivie conjointement par la DASS et la SOGEA sur les ressources.

En 2009, il y a eu 7 analyses physico-chimiques réalisées sur F1, 2 analyses réalisées sur F2 et 7 analyses sur le forage de Kawéni 3 10'' (cf. Annexe 1). Les paramètres mesurés lors de ces analyses sont les suivants :

<i>Paramètre Mesuré</i>	<i>pH</i>	<i>Conductivité</i>	<i>TAC</i>	<i>THCa</i>	<i>THtotal</i>	<i>MeS</i>
<i>Seuil de quantification (mg/l)</i>	-	-	-	-	-	-
<i>Ca</i>	<i>Mg</i>	<i>Cl</i>	<i>SO₄²⁻</i>	<i>NH₄⁺</i>	<i>NO₂⁻</i>	<i>NO₃⁻</i>
< 200	< 200	< 250	< 250	< 50	< 50	< 100
<i>F</i>	<i>PO₄</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>	<i>Mn</i>	<i>Al</i>	<i>Zn</i>
> 0,01	> 0,02	> 0,02	> 0,02	> 0,01	> 0,005	> 0,02

Tableau 2 : Paramètres mesurés par la SOGEA et la DASS sur les eaux brutes des forages F1, F2 et Kawéni 3 10''.

Les analyses montrent que la conductivité annuelle des eaux souterraines de la nappe de Kawéni reste toujours sensiblement plus forte que celle des autres aquifères, et s'établit autour de 450 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Il est intéressant de remarquer que les teneurs en chlorures $[\text{Cl}^-]$ ont été mesurées à 40 et 56,8 mg/L au forage F1, à 43 mg/L au forage de Kawéni 3 10'' et à 40 mg/L au niveau de F2. Ces valeurs sont sensiblement plus élevées que celles mesurées les années précédentes (novembre 1992 à juillet 2008 : de 27,4 mg/L, cf. rapport BRGM/RP-56773-FR). Cette hausse en chlorures peut être la conséquence d'aérosols contenus dans les eaux de pluie, des apports anthropiques *via* les fertilisants ou les eaux usées mais peut aussi être la conséquence de la migration de l'interface eau douce / eau salée...

En l'absence de caractérisation des bromures $[\text{Br}^-]$, il est délicat de se prononcer sur la hausse des teneurs en chlorures.

En ce qui concerne le fer et le manganèse, les teneurs sont assez aléatoires d'une analyse à l'autre.

- En ce qui concerne le fer, les teneurs de F1 en 2009 ont été mesurées entre <0.02 mg/L et 0.08 mg/L. Au niveau de Kawéni 3 10'', elles ont été mesurées entre <0.02 mg/L et 0.13 mg/L (soit proche de la CMA¹ fixée à 0,2 mg/L). Les teneurs de F2 ont été mesurées entre <0.02 mg/L et 0.06 mg/L. Les teneurs les plus élevées ont été mesurées le 28 juillet 2009, en basses eaux. Ces observations confirment qu'en période de basses eaux, les eaux sollicitées lors des prélèvements ont des temps de résidence plus élevés qu'en période de hautes eaux, ce qui facilite les interactions eau/roche, la réduction du milieu et la dissolution du fer.
- Dans le cas du manganèse : les teneurs mesurées au forage de Kawéni 3 10'' se situent entre <0,01 mg/L et 0,01 mg/L, au niveau de F1, elles sont entre <0,01 mg/L et 0.08 mg/L, soit supérieures à la CMA fixée à 0,05 mg/L et au niveau de F2, les teneurs sont <0,01 mg/L. Les teneurs les plus fortes mesurées au forage F1 datent d'avril et mai 2009, soit en plein période de hautes eaux.

Des teneurs en cuivre sont régulièrement relevées dans les analyses, 0,26 mg/L au forage F1 le 24/03/2009, 0,25 mg/L au forage F2 le 28/07/2009 et 0,22 mg/L le 14/05/2009 au forage de Kawéni 3 10''. Ces teneurs restent bien inférieures à la CMA de 1 mg/L. Le zinc est absent des analyses.

Par ailleurs, dans le cadre de la définition du réseau de surveillance DCE de la qualité des eaux à Mayotte (Malard et al. 2008, BRGM/RP-56774-FR), le forage de Kawéni 3 10'' a été prélevé lors de la campagne d'échantillonnage d'octobre 2009, c'est-à-dire en conditions de basses eaux (cf. rapport BRGM/RP-57377-FR). Les analyses portent à la fois sur les paramètres majeurs, les métaux, les substances phytosanitaires, les BTEX, COV, HAP et les paramètres bactériologiques. Les résultats – à l'exception des paramètres bactériologiques présentés en suivant - seront interprétés en 2010.

¹ Concentration maximale admissible, cf. Annexe 1, §I-2, au décret n°2001-1220 du 20 décembre 2001 relatif aux eaux destinées à la consommation humaine, à l'exception des eaux minérales naturelles.

D'après les résultats des analyses des paramètres bactériologiques du 20 octobre 2009 (tableau suivant), il n'y a aucun germe à signaler dans les eaux du forage.

Lieux	Dates	en col/100 ml		
		Coliformes totaux	E.COLI	Entérocoques
Forage Kawéni 3 10''	20-oct-09	<1	<1	<1

Illustration 3. Résultats des analyse des paramètres bactériologiques des eaux du forage de Kawéni 3 10'' (analyses du 20 octobre 2009)

La campagne d'analyse prévue en 2010 condition de hautes eaux, comprenant les mêmes paramètres et sur la base des mêmes procédés viendra conforter ou nuancer les résultats obtenus en condition de basses eaux.

2.1.3. Les volumes prélevés (F1, F2 et Kawéni 3 10'', SOGEA)

L'étude des volumes prélevés par la SOGEA au niveau des forages d'exploitation F1, F2 et Kawéni 3 10'' fait l'objet d'un chapitre du rapport d'étude des bassins d'alimentation de captage (Wuilleumier et al. 2009, rapport BGRM/RP-57620-FR).

De façon synthétique, on rappelle que (pour la période du 01/01/2006 au 30/08/2009) :

- le forage Kawéni F1 a été exploité quotidiennement (moins de 12 h/j), à un débit moyen horaire de 13,2 m³/h ;
- le forage Kawéni F2 ne fonctionne pas en permanence : il n'est pas utilisé pendant les premiers mois de l'année, parfois durant le deuxième semestre également. Le prélèvement s'effectue autour d'un débit horaire de 10,4 m³/h ;
- le forage Kawéni 3 10 pouces est prélevé à un débit horaire moyen de 14,5 m³/h. En pratique, cet ouvrage est utilisé uniquement plusieurs heures par jour à un débit d'exploitation de 30 m³/h.

2.2. CONFIRMATION DES PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES DE L'AQUIFERE – ESSAI DE NAPPE DE JUIN 2009

2.2.1. Utilité des essais

Compte tenu de la récente mise en exploitation du bassin (1991, soit moins de 20 ans) et du peu de recul (chroniques, observations, investigations profondes) en termes de données disponibles, il s'est avéré important de repréciser les grandeurs hydrodynamiques de la nappe exploitée.

Ces valeurs caractéristiques des aquifères peuvent présenter une forte variabilité spatiale mais demeurent généralement constantes dans le temps. Cependant une modification de la structure du matériau aquifère (par dissolution ou compaction) ou des caractéristiques d'un ouvrage (dégradation / rupture de la colonne ou des massifs filtrants) sont susceptibles d'agir sur l'équilibre hydrodynamique de ce dernier. Dans la littérature, un tel changement est observé dans les horizons superficiels des sols agricoles. (Mubarak, 2009) (Podwojewski et al., 2008). Dans le cas des aquifères poreux et particulièrement dans le cas des aquifères captifs ou semi captifs, l'exploitation excessive de la ressource peut entraîner une baisse du niveau piézométrique, une dépressurisation de l'aquifère et un tassement du matériau pour combler les vides occasionnés par la baisse de pression hydrostatique. Ce phénomène est susceptible de rétrécir les espaces inter-granulaires, diminuer la section d'écoulement et parallèlement la transmissivité de l'aquifère et le rendement des puits pompés (Dassargues et Montjoie, 1991)

2.2.2. Les essais de nappe de 1991

Après les pompages par paliers (essais de puits) visant à déterminer les caractéristiques de l'ouvrage et le débit optimal d'exploitation, un essai de pompage de longue durée (essai de nappe) pendant 72 heures à un débit constant de 12,9 m³/h est réalisé, du 26 février au 2 mars, (en pleine période de hautes eaux, le pic annuel de hautes eaux étant mi-mars). Le suivi de la remontée a été assuré durant 12 heures.

Le niveau mesuré avant essai était situé à 3,17 m de profondeur par rapport au sol. Le rabattement maximal observé lors de l'essai a été de 3,08 m. ceci correspond à un niveau dynamique d'environ 7 m NGM¹.

Pour la détermination des caractéristiques hydrodynamiques de la nappe, les méthodes d'interprétation bi-logarithmiques de Theis et semi-logarithmiques de Jacob (approximation de Jacob) ainsi qu'une interprétation semi-automatique avec le logiciel ISAPE (BRGM) ont été utilisées. Les données obtenues en février 1991 sont

¹ Nivellement Général de Mayotte. (En l'absence de nivellement, on a considéré une altitude de +13 m NGM environ pour le terrain naturel au droit du forage)

réinterprétées en 2009. L'interprétation a été refaite afin de pouvoir comparer des données obtenues à l'aide d'une même méthode.

Les résultats de cette réinterprétation sont les suivants :

	THEIS	JACOB	JACOB en remontée
T (m ² /s)	5,7.10 ⁻³	6,56.10 ⁻³	5,75.10 ⁻³
S	8,13.10 ⁻⁵	6,31.10 ⁻⁵	

Tableau 3. Les résultats de la réinterprétation de l'essai de nappe de février 1991.

Après discussion et synthèse des résultats, les valeurs suivantes ont été retenues en 1991.

$$T = 6,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$S = 7,22 \cdot 10^{-5}$$

Durant cet essai, aucune limite de l'aquifère (limite étanche ou front de réalimentation) n'a été mise en évidence.

2.2.3. Mode opératoire et instrumentation

L'essai de nappe est réalisé entre le 27 mai et le 2 juin 2009 (en période de moyennes eaux) à un débit moyen et maintenu constant de 13,25 m³/h, au niveau du forage F1.

Au terme du pompage, la remontée a été observée pendant 10 heures et 20 minutes.

Une telle opération a pour intérêt, (i) d'apprécier l'influence du régime hydrologique (essai de nappe en période de moyennes eaux) et (ii) vérifier les valeurs des paramètres hydrodynamiques de la nappe depuis sa mise en exploitation.

Le forage F2 - situé à une distance de 167,5 m de F1, en arrêt et stabilisé pendant la durée de l'opération - a servi de piézomètre d'observation. Les données piézométriques suivantes sont recueillies au début et à la fin du pompage.

Forage	F1	F2
Altitude estimé (m NGM)	13	15
Niveau pseudo-statique avant le début du pompage (m NGM)	8,35	8,01
Niveau dynamique observé à la fin du pompage (m NGM)	3,60	7,74

Tableau 4. Mesures des niveaux piézométriques .

L'essai de nappe a été poursuivi au-delà des 72 heures afin de déceler d'éventuelles limites (étanches ou alimentées) de l'aquifère; limites qui n'avaient pas été décelées en 1991.

Le calendrier de l'essai nappe est renvoyé en Annexe 2

2.2.4. Résultats

Les données obtenues par le biais des sonde de type « Diver » sont recalées grâce aux mesures manuelles. Les profondeurs au droit de chaque puits sont ensuite corrigées par rapport au sol pris ici comme niveau de référence. Enfin, les rabattements sont calculés et les courbes d'évolution du rabattement en fonction du temps sont établies. Le détail du traitement des données se trouve en annexe (Annexe 2).

Pour la détermination des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère, deux méthodes ont été mises en œuvre : la méthode d'interprétation bi-logarithmique de Theis, dite aussi méthode de superposition et la méthode d'interprétation semi-logarithmique de Cooper-Jacob, en descente et en remontée, dite aussi méthode approximative de Jacob.

1) Interprétation selon la méthode de Theis

La méthode d'interprétation de Theis, utilisée depuis 1935 permet de calculer les valeurs des paramètres hydrodynamiques d'une nappe captive. La courbe du rabattement en fonction du temps est exprimée en coordonnées bi-logarithmiques. La description détaillée de cette méthode est disponible dans le chapitre 5 du guide d'interprétation des essais de pompage de Robert P. Chapuis, 2007, (Annexe 2).

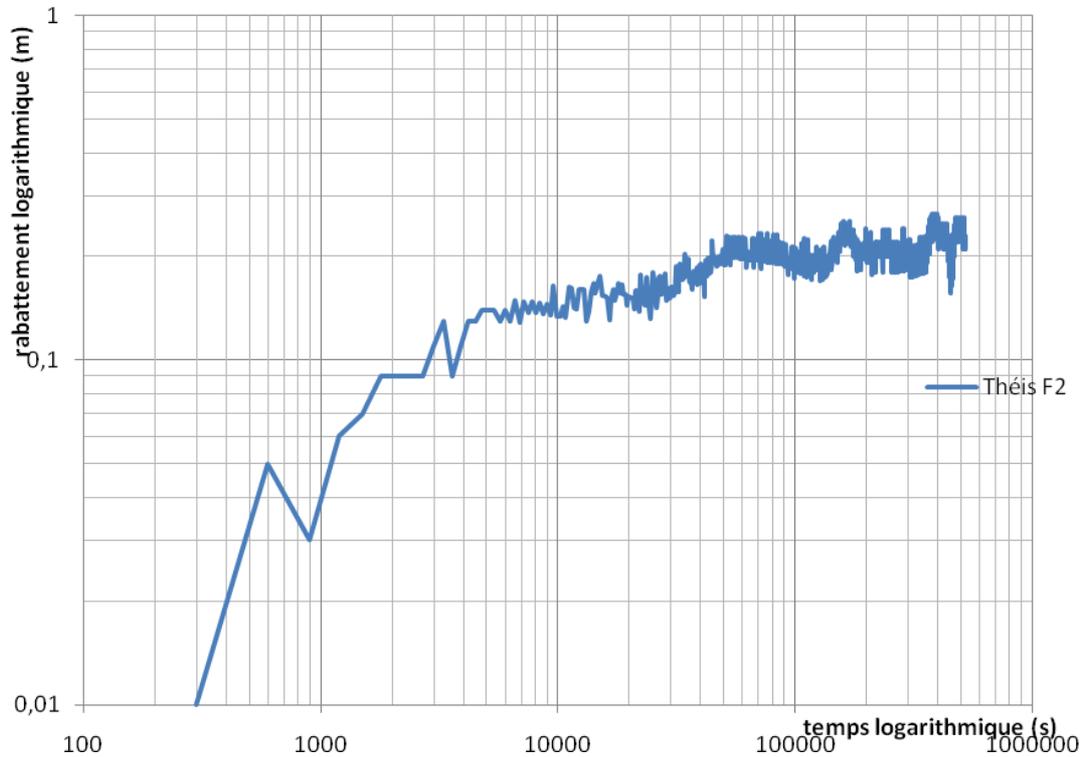


Illustration 4. Évolution du rabattement en fonction du temps au niveau du forage F2 sur une échelle bi-logarithmique.

Cette courbe relative aux mesures expérimentales de l'essai est ajustée à la courbe standard. Ainsi, au couple de la courbe standard ($W(u)=1, u=1$) correspond le couple de la courbe réelle ($s_0= 0,04$ m, $t_0= 80$ s). Par application des formules suivantes, on peut calculer les valeurs des paramètres hydrodynamiques :

$$T = Q.W(u)/(4\pi S_0) \quad \text{et} \quad S = (4uT.t)/r^2$$

Avec T = Transmissivité (m^2/s)

S = coefficient d'emmagasinement (sans unité)

Q = débit de pompage (m^3/s)

Et r = rayon d'observation (m)

On obtient alors les valeurs suivantes :

T (m^2/s)	$7,3.10^{-3}$
S	$8,4.10^{-5}$

2) Interprétation selon la méthode de Jacob en descente

La méthode que Jacob et Cooper ont proposée en 1946 suppose que lorsque le temps de pompage est suffisamment grand, les termes supérieurs de $W(u)$ deviennent négligeables et l'équation de Theis de l'écoulement laminaire en nappe captive, isotrope et infinie admet une approximation logarithmique. Les conditions d'utilisation et le niveau de précision de l'approximation de Cooper-Jacob sont disponibles en annexe (Annexe 2).

Cette approximation est valable aussi pour une nappe libre si le rabattement reste inférieur à 10% de la puissance de l'aquifère.

Suivant cette méthode d'interprétation, la courbe de rabattement (m) en fonction du temps est tracée en coordonnées semi-logarithmique, avec le temps (s) en abscisse logarithmique et le rabattement en ordonnée arithmétique. Conformément à l'approximation qui admet une relation linéaire entre le rabattement s et $\log(t)$, on trace une droite d'extrapolation de la partie rectiligne de la courbe. Cette droite possède comme caractéristiques une pente m (Δs par cycle de temps) et une intersection t_0 avec l'axe des temps lorsque le rabattement est nul.

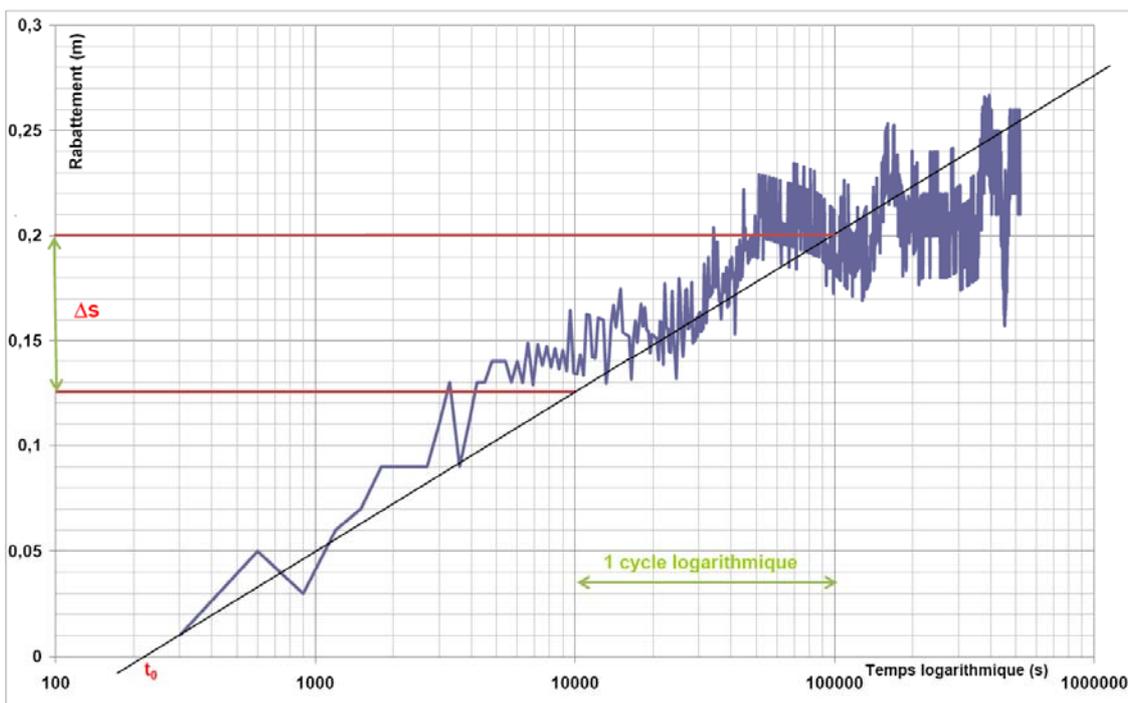


Illustration 5. Calcul des paramètres hydrodynamiques en descente selon la méthode de Cooper-Jacob.

Cette méthode permet également de déceler la présence d'éventuelles limites de l'aquifère (étanche ou de réalimentation) selon le comportement de la courbe en dehors des limites dites de validité de l'approximation de Cooper-Jacob.

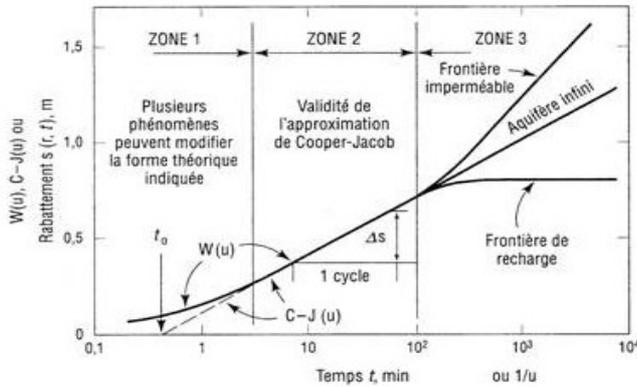


Illustration 6. Détection des éventuelles limites de l'aquifère

Les résultats de cette interprétation selon la méthode de Cooper-Jacob (Illustration 5) font état d'un aquifère infini, soumis à de fortes fluctuations naturelles du niveau de la nappe. (Probablement dues à la marée océanique, cf. § 2.4 mais aussi à l'incertitude du capteur). L'application des formules suivantes permet de quantifier les paramètres hydrodynamiques de cet aquifère :

$$T = 0,183.Q/m \quad \text{et} \quad S = (2,25.T.t_0)/r^2$$

Avec T = Transmissivité (m^2/s)

S = coefficient d'emmagasinement

Q = débit pompé (m^3/s)

r = rayon d'observation (m)

m = pente de la droite d'extrapolation de la partie rectiligne de la courbe.

t_0 = abscisse de l'intersection de la droite d'extrapolation avec l'axe des abscisses.

Les valeurs suivantes sont alors obtenues :

T (m^2/s)	$8,6.10^{-3}$
S	$1,4.10^{-4}$

3) Interprétation selon la méthode de Jacob en remontée

A partir d'un essai de pompage longue durée, il est possible de tracer la courbe de remontée, sur laquelle sont reportés les rabattements résiduels (m) en fonction du $\text{Log}((tp + tr)/tr)$ où :

tp = temps total de pompage et tr = temps depuis le début de la remontée.

Les limites de cette méthode résident (i) dans le fait qu'elle ne s'applique qu'aux nappes captives et (ii) qu'elle ne permet pas de calculer le coefficient d'emménagement S. Tout d'abord, il faut rechercher sur la courbe utilisée la région où un certain alignement des points successifs se produit, puis tracer la droite moyenne passant par ces points. L'avantage de cette méthode est qu'elle permet de s'affranchir des effets de puits qui peuvent être conséquents selon le diamètre du forage et la position de la pompe.

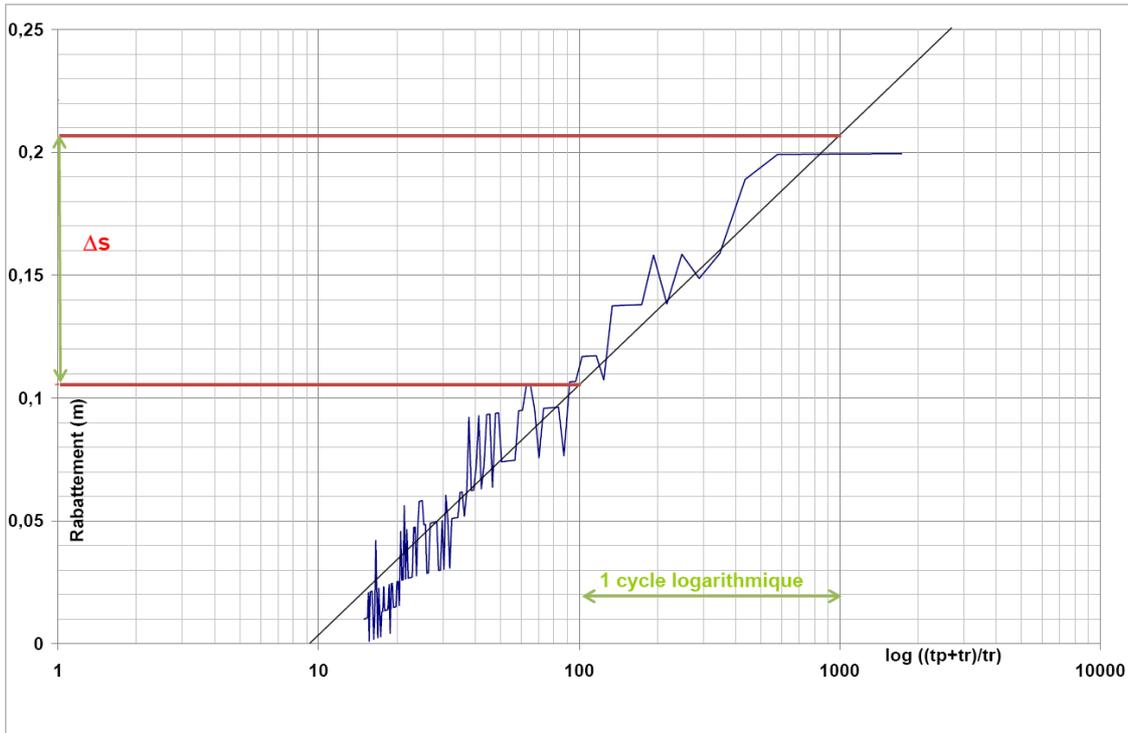


Illustration 7. Détermination graphique des paramètres hydrodynamiques selon la méthode de Jacob en remontée.

On calcule ensuite la pente m de cette droite qui permet de trouver la transmissivité T , connaissant le débit pompé Q grâce à la formule suivante: $T = 0,183.Q/m$

Avec T en (m^2/s), et Q en (m^3/s) et m en mètres.

On obtient ainsi la valeur suivante: **$T = 6,5 \times 10^{-3} m^2/s$**

D'autre part, l'examen des courbes n'indique pas la présence d'une limite (étanche ou de réalimentation) de l'aquifère.

L'interprétation détaillée selon la méthode de Jacob en remontée est disponible dans le chapitre 6 du guide d'interprétation des essais de pompage de Robert P. Chapuis, 2007.

4) Synthèse des résultats

Méthode	Paramètres hydrodynamiques	1991	2009
ISAPE	Transmissivité T (m ² /s)	2,3.10 ⁻³	3,85.10 ⁻⁴
	Coefficient d'emmagasinement S (sans unité)	4,0.10 ⁻⁴	1,4.10 ⁻⁴
THEIS	Transmissivité T (m ² /s)	5,7.10 ⁻³	7,3.10 ⁻³
	Coefficient d'emmagasinement S (sans unité)	8,1.10 ⁻⁵	8,4.10 ⁻⁵
JACOB Descente	Transmissivité T (m ² /s)	6,6.10 ⁻³	8,6.10 ⁻³
	Coefficient d'emmagasinement S (sans unité)	6,3.10 ⁻⁵	1,4.10 ⁻⁴
JACOB Remontée	Transmissivité T (m ² /s)	5,8.10 ⁻³	6,5.10 ⁻³
	Coefficient d'emmagasinement S (sans unité)	/	/

Tableau 5. les résultats obtenus aux essais de nappe de 1991 et 2009.

Les valeurs de transmissivité obtenues par les différentes méthodes sont équivalentes. En effet, elles varient entre $6,54.10^{-3}$ m²/s et $8,64.10^{-3}$ m²/s. Dans ces conditions, la valeur moyenne suivante peut être retenue: $T = 7,50.10^{-3}$ m²/s.

Les valeurs du coefficient d'emmagasinement sont relativement concordantes également : en effet elles sont de $8,35.10^{-5}$ et $1,39.10^{-4}$ ce qui est du même ordre de grandeur. Dans ce contexte, la valeur moyenne suivante peut présenter un bon ordre de grandeur de ce coefficient: $S = 1,11.10^{-4}$.

D'où le tableau récapitulatif suivant des résultats qui seront retenus :

T (m ² /s)	7,5.10 ⁻³
S	1,1.10 ⁻⁴

2.2.5. Interprétation des résultats et confrontation avec les essais de 1991

La comparaison avec les résultats de l'essai de février 1991 montre que les valeurs de transmissivités ($6,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ en 1991 et $7,50 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ en 2009) sont très proches. Vu l'ordre de grandeur et la précision des méthodes de calcul, cette variation sera supposée négligeable. Les paramètres hydrodynamiques peuvent donc être confirmés et aucun changement significatif ne semble être survenu (tassement des aquifères, colmatage des parties proches de l'ouvrage, dégradation de la colonne, etc.)

Globalement, les valeurs obtenues en mai 2009 - qu'il s'agisse de la transmissivité ou du coefficient d'emmagasinement - sont légèrement supérieures à celles calculées à l'aide des données de février 1991. Cependant, la différence n'excédant pas un ordre de grandeur, les paramètres hydrodynamiques peuvent être supposés constants.

En somme, il apparaît que la mise en exploitation de cette zone depuis bientôt deux décennies n'a vraisemblablement pas de répercussions directes sur les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère de Kawéni.

A priori, le fait de réaliser l'essai de nappe en hautes eaux ou en moyennes eaux ne devrait pas avoir d'influence sur les paramètres mesurés. En effet, étant donné que la mesure porte sur la capacité de l'aquifère à emmagasiner puis à restituer l'eau, le volume d'eau initialement présent n'intervient pas directement sur la valeur des paramètres hydrodynamiques. Sur le graphique ci-dessous illustrant le comportement hydrologique annuel schématisé de l'aquifère de Kawéni, le delta piézométrique moyen entre les deux périodes (fin février à fin mai) est d'environ 0,75 m. Au terme de l'essai de nappe, le 3 juin 2009 la charge du piézomètre Kawéni 1 8'' était de 7,64 m NGM. Ce niveau correspond assez bien au comportement annuel schématisé de l'aquifère. La variation saisonnière des piézométries observées ici n'est toutefois pas en mesure de provoquer un tassement capable de modifier les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère de Kawéni.



Illustration 8. Comportement hydrologique annuel schématique de l'aquifère de Kawéni (document extrait du Rapport BRGM/RP-56773-FR, 2008).

Par ailleurs, constat en accord avec les observations de février 1991, aucune limite de l'aquifère n'a été mise en évidence.

En revanche, malgré les pompages soutenus, des fluctuations piézométriques journalières ont été remarquées sur les courbes d'évolution du rabattement. Ces oscillations du signal peuvent s'expliquer par une influence possible de la marée océanique. Cette hypothèse reste à vérifier par un traitement approfondi des signaux piézométrique et marégraphique de la zone d'étude (cf. § 2.4).

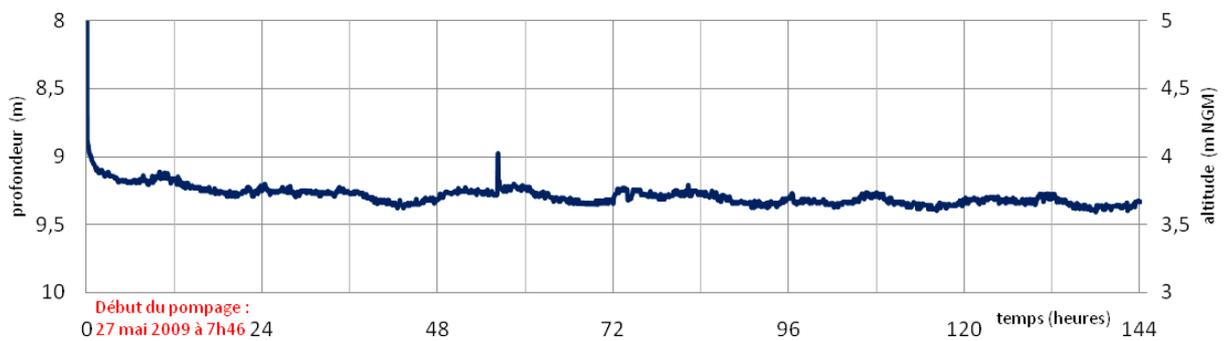


Illustration 9. Fluctuations journalières du signal piézométrique sur le forage F1.

2.3. APPROCHE DE LA PLUIE EFFICACE ANNUELLE DE L'AQUIFERE DE KAWENI

2.3.1. Approche spatialisée de la pluviométrie sur le bassin de Kawéni

L'hypothèse d'une relation linéaire entre les précipitations moyennes annuelles $P_{(z)}$ et l'altitude peut s'exprimer sous la forme $P_{(z)} = Az + B + \varepsilon$ où $P_{(z)}$ correspond à la valeur des précipitations survenues à l'altitude z exprimée en mètres (Castellani, 1986). A représente alors le gradient pluviométrique en fonction de l'altitude (en mètres) et B une valeur $P_{(z=0)}$ factice des précipitations au niveau d'altitude zéro. Le résidu ε représente l'écart qui peut exister entre la valeur Y réellement observée et la valeur mathématique donnée par l'équation de la droite de régression. La détermination des paramètres A et B permet d'estimer pour un endroit donné la valeur $P_{(z)}$ en fonction de l'altitude.

Les postes pluviométriques suivis à Mayotte sont présentés dans l'illustration 10.

La dépression de Kawéni se situe dans un secteur recevant une pluviométrie moyenne comprise entre 1500 et 1900 mm d'après la carte des isohyètes (cf. Illustration 11). Les données disponibles de 1996 à 2008 sur six postes pluviométriques situés au voisinage de la dépression de Kawéni tendent à donner une gamme de pluviométrie annuelle un peu plus faible (1200 et 1600 mm environ) mais pour une gamme d'altitude allant de 4 à 306 m NGM uniquement (cf. Tableau 6).

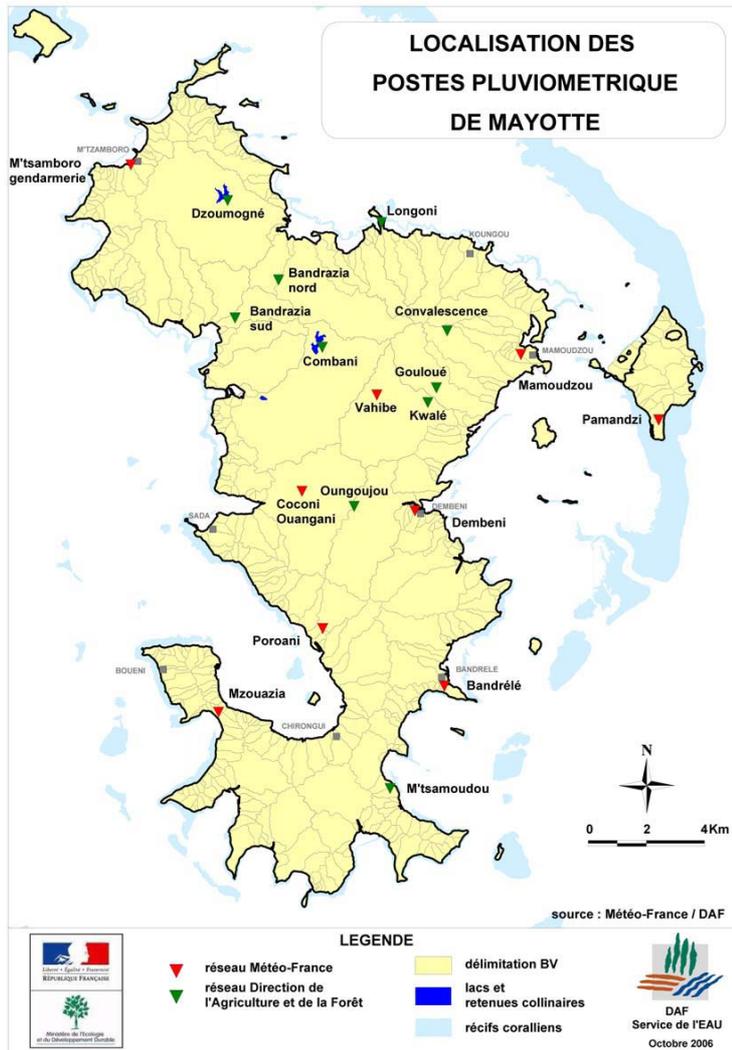


Illustration 10. Localisation des postes pluviométriques Météo-France (rouges) et DAF (verts), situés au Centre et au Nord de Mayotte (Document DAF).

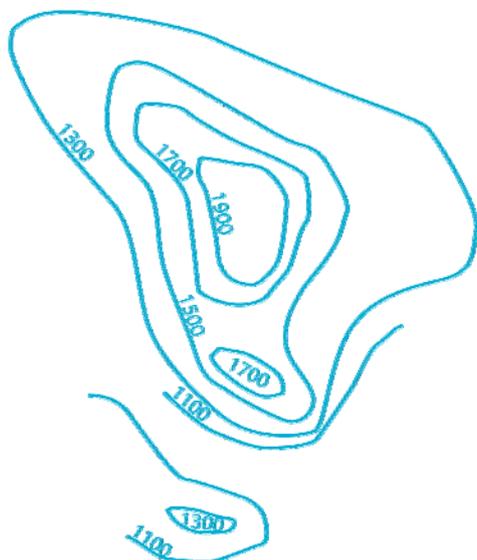


Illustration 11. Isohyètes moyennes annuelles à Mayotte (source des données et interpolations : : DAF)

Stations Pluviométriques	Code	Altitude (m NGM)	P moyenne annuelle (mm)	Période	Organisme gestionnaire
Convalescence	M08	306	1596	1996-2008	DAF
Ongoujou	M12	216	1481	1996-2008	DAF
Gouloué	M09	159	1432	1996-2008	DAF
Mamoudzou	MFA09*	60	1315	1996-2008	Météo France
Longoni	M11	45	1270	1996-2008	DAF
Pamandzi	MFA10**	7	1178	1996-2008	Météo France

Tableau 6. Caractéristiques des postes pluviométriques situés dans le voisinage du bassin versant de Kaouénilajoli. Les altitudes ont été actualisées sur la base du MNT IGN 2009, plus précis que les anciennes références altimétriques basées sur la carte IGN au 1/25 000.

La variabilité de la pluviométrie annuelle enregistrée sur ces postes est importante sur la période 1996-2008 (du simple à plus du double, voire au triple, cf. Tableau 7). On note l'existence d'années sèches (1997, 2001) et d'années plus humides (2008). Pour certaines des stations (Ongoujou, Gouloué, Longoni), des données ont été reconstituées par la DAF à partir d'autres postes pluviométriques. Pour la station de Convalescence, on note l'absence de données en saison sèche (mai à septembre) pour les années 2002 et 2004. La pluviométrie de cette période correspondant en moyenne à moins de 5% de la pluviométrie annuelle, un calcul de cumul annuel a été effectué. Pour le poste de Pamandzi, l'absence de données en janvier et février 1998, soit durant la saison humide, ne permet pas de calculer de cumul annuel pour cette année là.

Stations pluviométriques	Altitudes (m NGM)	Moyenne	Ecart type	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Convalescence	306	1595,92	594,19	1835	983	1340	1654	1598	967	1606	1071	1445	1334	2229	1489	3196
Ongoujou	216	1481,23	291,47	1411	1167	993	1253	1415	1261	1662	1328	1463	1765	1691	1933	1914
Gouloué	159	1432,38	444,93	1552	1170	1090	1134	1181	857	1709	1047	1562	1275	2031	1555	2458
Mamoudzou	60	1315,54	345,42	1562	906	1229	1314	1241	858	1769	1358	1492	1194	1542	737	1900
Longoni	45	1269,85	348,64	1600	1034	1046	1210	1334	718	1693	1259	1751	932	1400	824	1707
Pamandzi	7	1178,17	261,33	1276	851		1120	1104	786	1407	1218	1334	1036	1366	934	1706

Tableau 7. Cumul annuel des précipitations des postes pluviométriques situés dans le voisinage du bassin versant de Kaouénilajoli

Une corrélation linéaire a été obtenue entre la pluie moyenne interannuelle enregistrée sur ces six stations météorologiques et leur altitude. Le graphique de la corrélation linéaire est présenté en Illustration 12. Cette corrélation linéaire est d'autant plus intéressante qu'elle couvre une gamme d'altitude comprise entre 4 et 306 m d'altitude, soit une part importante des altitudes rencontrées dans le bassin versant de la dépression (d'altitude maximale égale à 513 m NGM).

Il est donc proposé pour le bassin versant de la dépression une corrélation – sur la base d'une relation linéaire - du cumul annuel de la pluie en fonction de l'altitude, avec une extrapolation (linéaire) à la gamme d'altitude comprise au-delà du poste de la Convalescence (altitude maximale pour un poste pluviométrique à Mayotte de 306 m NGM).

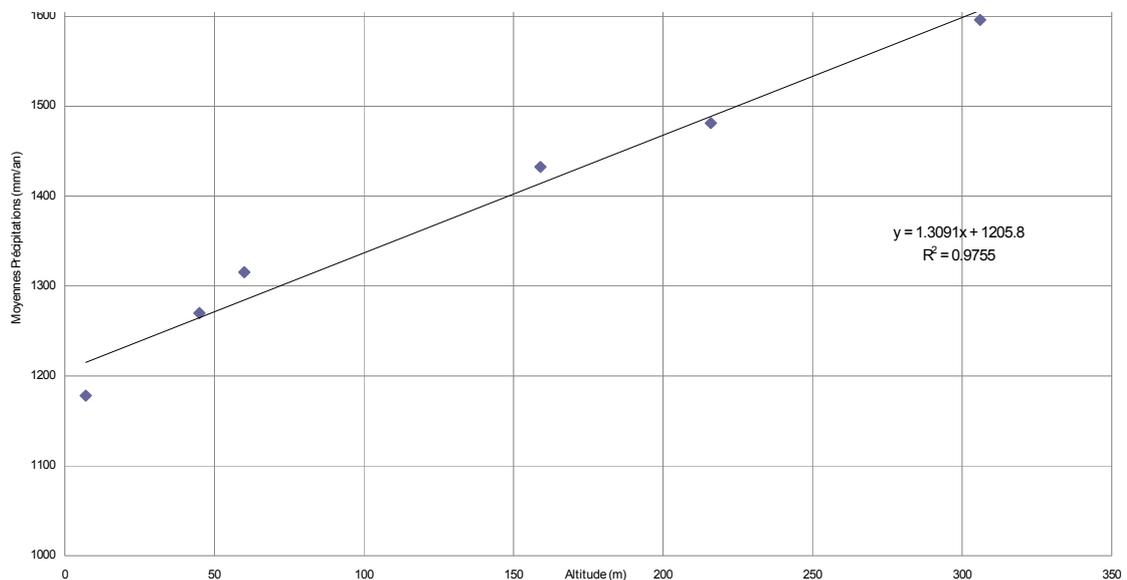


Illustration 12. Corrélation linéaire entre l'altitude du poste pluviométrique et la pluviométrie moyenne interannuelle (année civile)

Ce travail de corrélation de la pluviométrie avec l'altitude a aussi été conduit au pas de temps mensuel. Aucune corrélation n'a pu être obtenue durant les mois les plus secs (d'avril à novembre) pour lesquels la faible pluviométrie enregistrée ne semble pas être corrélée avec l'altitude. Des résultats intéressants ont été obtenus pour les mois les plus humides (novembre à mars). Ils sont présentés en Illustration 13. Pour le mois de

février, le cumul moyen mensuel de la station de Mamoudzou n'a pas été utilisé pour établir la corrélation qu'il dégrade notablement. Il en est de même pour le mois de décembre, pour lequel la station de Gouloué n'a pas été utilisée et le mois de janvier pour lequel le cumul de la station d'Ongoujou est particulièrement élevé. Ceci peut être lié à un défaut de représentativité de la corrélation obtenue ou à une erreur dans l'acquisition ou la retranscription des données.

Les corrélations obtenues sur 5 ou 6 stations pluviométriques situées au voisinage du bassin versant de la dépression de Kawéni sont bonnes à très bonnes (R^2 entre 0,96 et 0,98), hormis pour les mois de janvier et mars où elle reste moyenne : $R^2 = 0,91$. Ces résultats ne doivent en aucun cas occulter les remarques faites dans le cadre de l'étude réalisée par Stollsteiner en novembre 2008 (Stollsteiner et al., 2008) : il en ressortait que la « qualité des données issues des stations pluviométriques est disparate d'un poste à l'autre mais que globalement il y a eu et il y a encore, malgré certaines améliorations, de nombreuses lacunes qui proviennent de causes très diverses notamment :

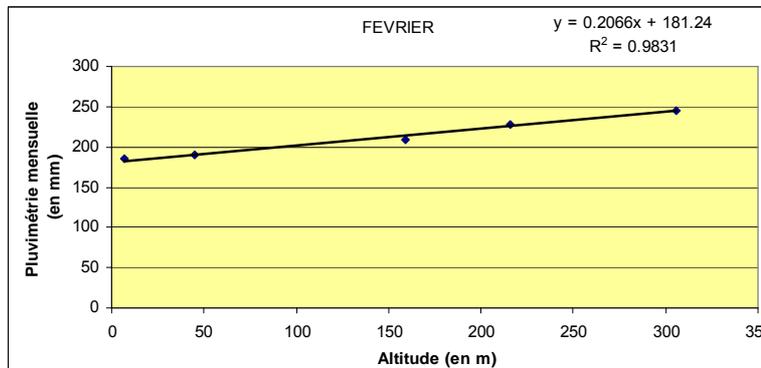
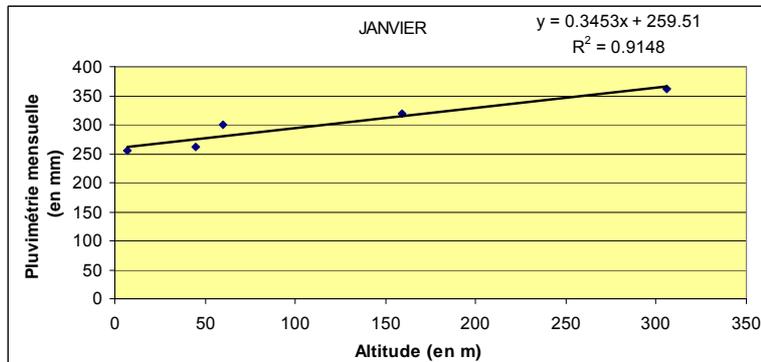
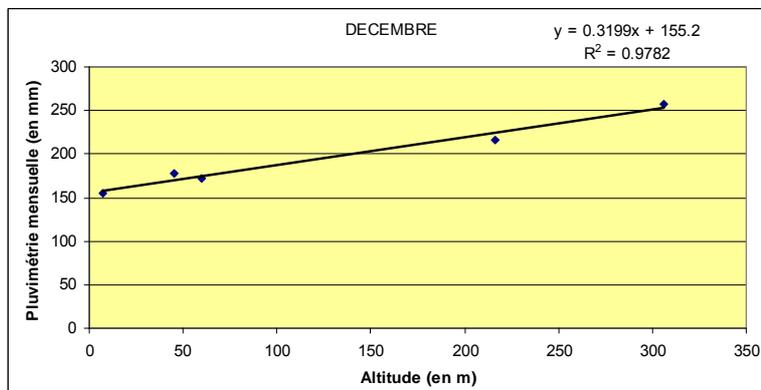
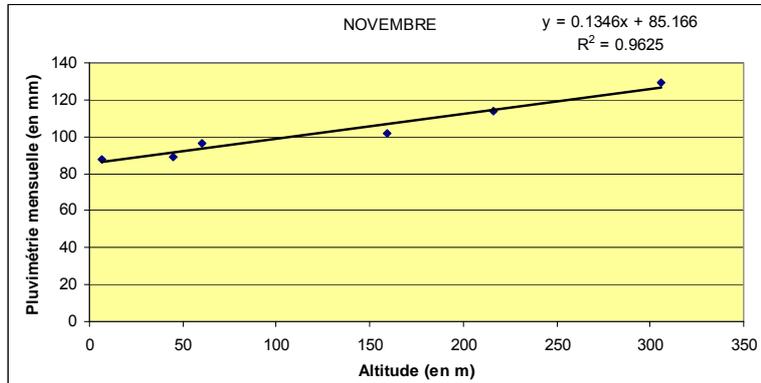
- des sites et conditions d'implantation qui, principalement pour des raisons de sécurité, ne respectent pas les normes internationales et subissent les effets d'écran (bâtiments, arbres, grillage,...) ou sont exposées au vent. La mesure en elle-même est donc en partie détériorée ;
- des pannes d'équipements (batteries, panne de l'auge mécanique...), d'entretien ou de récupération des données (télétransmission) qui génèrent de nombreuses lacunes. »

La démarche qui est proposée est donc avant tout pragmatique : elle vise, en l'état actuel des connaissances et à partir des données disponibles, à prendre en compte la variabilité de la pluie d'un bassin versant à un autre (plus de 400 mm d'écart entre le poste de la Convalescence et celui de Pamandzi, ce qui représente plus d'un tiers du cumul moyen annuel de Pamandzi) voire sur un même bassin versant à des altitudes différentes.

Les corrélations obtenues permettent d'envisager une spatialisation de la pluie sur le bassin versant, basée sur l'altitude. Ce travail a été effectué au pas de temps mensuel, et contrôlé en termes de cumul annuel au travers :

- des mesures effectuées au niveau des stations pluviométriques ;
- de la corrélation linéaire obtenue sur les cumuls annuels.

La pluviométrie utilisée durant la saison sèche correspond soit à la moyenne observée sur les six stations, soit à celle mesurée à Pamandzi. En effet, deux scénarii de pluie ont été introduits dans le calcul de la pluie efficace afin de rendre compte de l'incertitude sur la pluviométrie dans le bassin versant.



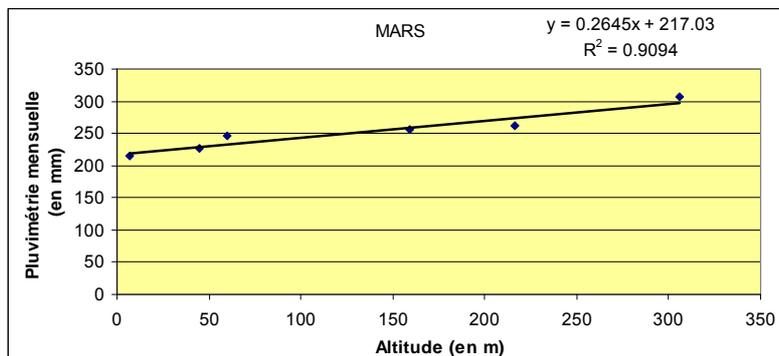


Illustration 13. Relation entre l'altitude des postes pluviométriques et la pluviométrie moyenne mensuelle pour les mois de novembre à mars (1996-2008)

2.3.2. Evapotranspiration

L'évapotranspiration (ETP) provient des valeurs mensuelles de l'ETP Penman de Lapègue (1999) calculée sur la base de six postes météorologiques de l'île (cf. Tableau 8). A l'heure actuelle, il n'existe qu'un seul poste météorologique pour lequel une ETP est calculée : c'est le poste de Pamandzi, sur Petite-Terre. Il n'est pas possible, avec cette seule chronique, de spatialiser l'ETP à l'échelle du bassin versant et notamment d'observer sa variabilité en fonction de l'altitude.

	Altitude	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Cumul annuel	Période
Combani	128	71.3	89.6	80.6	84.0	86.8	84.0	74.4	93.0	84.0	80.6	93.0	93.0	1014.3	1936-74
Pamandzi	7	139.5	109.2	139.5	129.0	139.5	123.0	130.2	133.3	141.0	155.0	150.0	148.8	1638.0	1951-80
Mamoudzou	60	117.8	89.6	120.9	120.0	124.0	117.0	120.9	130.2	129.0	133.3	132.0	124.0	1458.7	1952-74
Coconi	91	120.9	84	139.5	120	114.7	93	99.2	124	108	111.6	117	114.7	1346.6	1967-75
Dzoumonye	45	124.0	120.4	127.1	123.0	127.1	120.0	124.0	127.1	129.0	130.2	135.0	133.3	1520.2	1935-74
M'tsamboro	17	133.3	81.2	158.1	135.0	139.5	123.0	114.7	127.1	111.0	124.0	135.0	130.2	1512.1	1984-85

Tableau 8. Evapotranspiration mensuelle pour six stations à Mayotte (exprimée en mm/j ; source : Lapègue – 1999). Les altitudes des stations de Pamandzi et Mamoudzou ont été corrigées (respectivement 7 m NGM au lieu de 10 m NGM et 60 m NGM au lieu de 40 m NGM)

Cette variabilité de l'ETP en fonction de l'altitude a un impact fort sur le calcul de la pluie efficace : un essai conduit au pas de temps journalier sur les données pluviométriques de la station de Combani (1996-2008) montre un écart de plus de 25% sur la pluie efficace calculée selon que l'on utilise l'ETP de Combani ou celle de Pamandzi. Il est donc important de considérer sa variabilité en fonction de l'altitude.

A défaut, les valeurs mensuelles proposées par Lapègue dans sa thèse ont donc été prises en compte. Un essai de corrélation avec l'altitude est effectué.

Certaines valeurs d'altitude fournies par Lapègue ont été corrigées (Pamandzi : 7 m NGM et non 10 m NGM ; Mamoudzou : 60 m NGM et non 40 m NGM ; Dzoumonye : 45 m NGM et non 20 m NGM). L'altitude fournie pour le poste de Combani paraît par ailleurs extrêmement faible. En se basant par exemple sur les corrélations obtenues pour la pluviométrie mensuelle des mois de novembre à mars (cf. 2.3.1), et en prenant en compte les valeurs de pluviométrie fournies pour le poste de Combani (en p. 71 de la thèse), il apparaît que ces valeurs correspondent à une gamme d'altitude

systématiquement supérieure à 250 m, à une altitude médiane voisine de celle du poste de la Convalescence (306 m NGM et non 332 m NGM comme indiqué dans les documents de la DAF). La station de Combani a donc du être écartée, faute de pouvoir confirmer sa position exacte et de fait, son altitude.

La recherche de corrélation entre l'ETP et l'altitude – sur la base d'une relation linéaire - est effectuée en utilisant les stations suivantes : Pamandzi, Mamoudzou, Dzoumonyé et Coconi. La station de M'tsamboro, plus éloignée du bassin versant de la dépression de Kawéni, semble présenter un contexte évaporatoire légèrement différent ou de façon plus probable, une vision biaisée compte tenu de la durée très courte de la période considérée (1984-1985).

La corrélation obtenue sur le cumul annuel de l'ETP donne une pente de 3,4 mm par mètre de dénivelé (pour les 4 stations, $R^2=0.998$). Ces corrélations sont valides sur une plage d'altitude s'étalant de 7 à 90 m NGM.

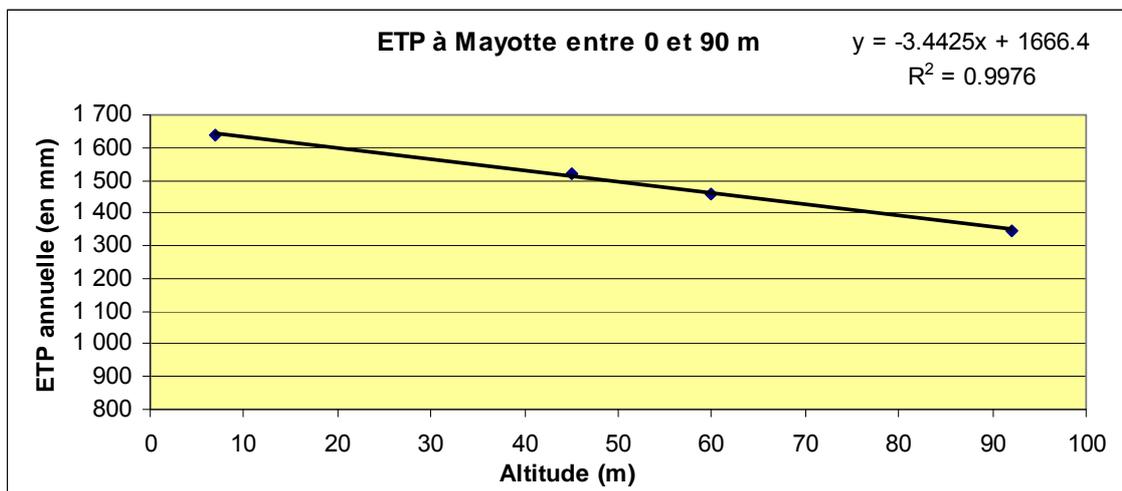


Illustration 14. Corrélation linéaire entre l'altitude du poste pluviométrique et l'évapotranspiration potentielle moyenne interannuelle entre 0 et 90 m NGM. Quatre stations sont utilisées (Pamandzi, Mamoudzou, Dzoumonyé et Coconi).

Leur prolongation théorique au-delà de ces altitudes conduirait à sous-estimer très largement l'ETP réelle. Compte tenu d'une part du faible nombre de stations utilisées, et d'autre part de la question de l'extrapolation de la corrélation (question de la continuité linéaire), des exemples de corrélation avec l'altitude ont été recherchés dans des contextes insulaires tropicaux. Le cas de la Guadeloupe (Dumon A., 2009) montre qu'il est nécessaire de considérer différentes gammes d'altitude. Sur 4 stations de mesure de l'ETP situées à des altitudes comprises entre 8 et 84 m, la décroissance obtenue pour l'ETP est de 3,8 mm par mètre de dénivelé par an ($R^2=0.895$ – cf. Illustration 15), ce qui est du même ordre de grandeur que le résultat obtenu à Mayotte (décroissance de 3,4 mm par mètre par an). Au-delà, sur quatre stations situées entre 84 et 428 m, la décroissance est de 1,1 mm par mètre de dénivelé par an ($R^2=0.92$).

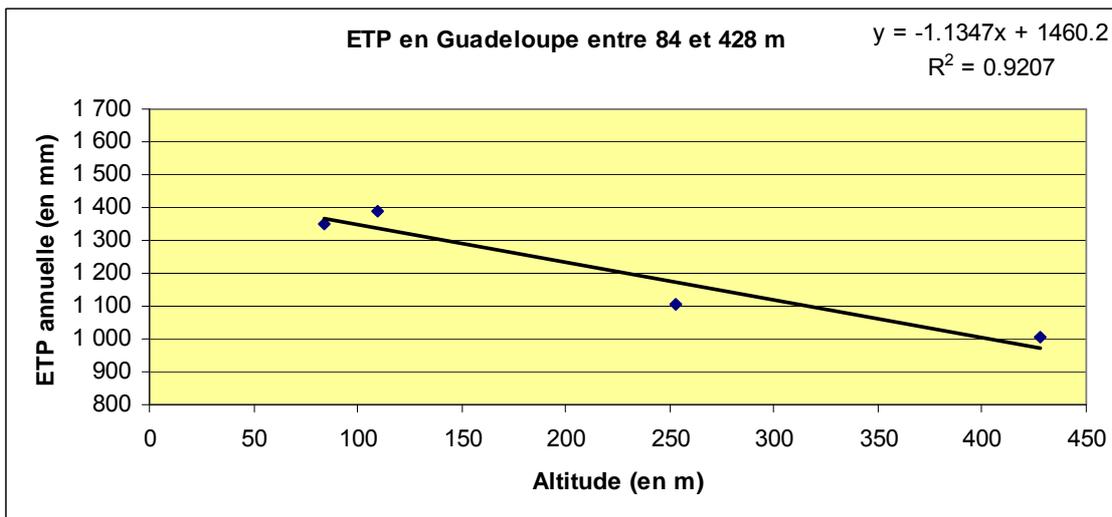
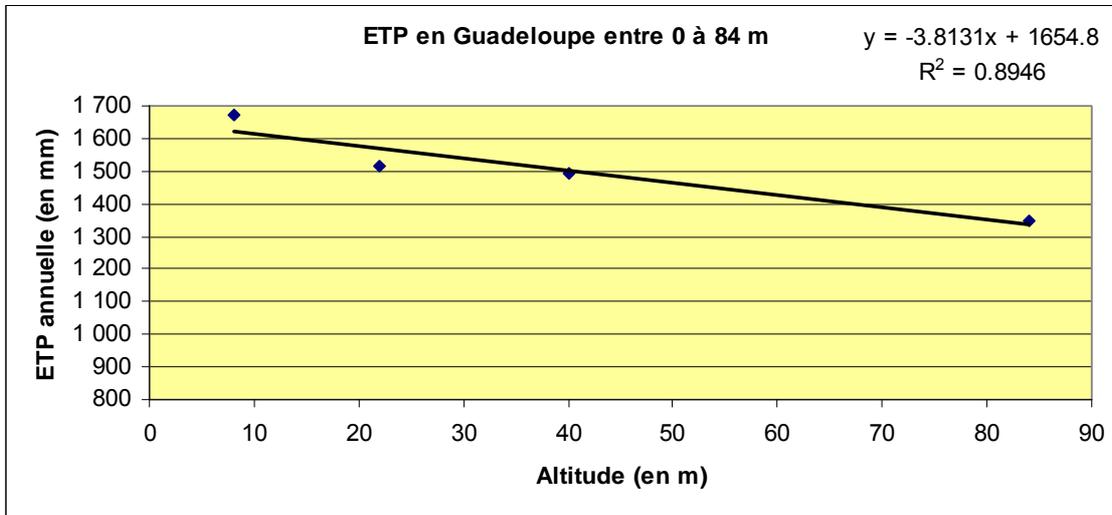


Illustration 15. Corrélation linéaire entre l'altitude du poste pluviométrique et l'évapotranspiration potentielle moyenne interannuelle : exemple de la Guadeloupe. En haut, la plage d'altitude comprise entre 8 et 84 m ; en bas, la plage d'altitude supérieure comprise entre 84 et 428 m

Par similarité des contextes et à défaut de données, une décroissance de 1,1 mm par mètre de dénivelé est adoptée pour les altitudes dépassant 100 m. Il est rappelé que le point le plus haut de Mayotte (le mont Bénara) atteint une altitude de 660 m NGM.

Des essais de corrélation ont été effectués mois par mois. Les résultats ne sont pas apparus probants pour tous les mois de la saison humide : ils n'ont donc pas été utilisés dans la suite.

A Mayotte, il a donc été retenu deux pentes de décroissance de l'ETP en fonction de la plage d'altitude :

- entre 0 et 100 m : -3,4 mm par mètre de dénivelé ;

- au delà de 100 m : -1,1 mm par mètre de dénivelé.

Sur le bassin versant de la dépression de Kawéni, l'estimation de l'ETP en fonction de l'altitude a été effectuée par classes d'altitude de 10 m. La valeur prise en compte pour la classe d'altitude comprise entre 0 et 10 m est celle fournie par Lapègue (1999) à la station de Pamandzi. Le Tableau 9 compare l'ETP fournie par Lapègue à celle estimée à partir de l'altitude selon la méthode décrite précédemment.

	Altitude	ETP Lapègue	ETP estimée	Résidu
Pamandzi	7	1638.0	1642	0.2%
Mamoudzou	60	1458.7	1460	0.1%
Coconi	91	1346.6	1350	0.3%
Dzoumonye	45	1520.2	1511	0.6%

Tableau 9. Comparaison des ETP annuelles Lapègue (1999) et estimée à partir de l'altitude sur la base des relations précédentes. Les résidus sont très faibles.

2.3.3. Pluviométrie efficace et notion de recharge

La pluie efficace correspond à la partie des précipitations brutes qui n'est pas restituée à l'atmosphère par évapotranspiration et qui participe à l'alimentation des cours d'eau et des nappes. Elle a été calculée mensuellement et en fonction des classes d'altitudes (de 10 m) du bassin versant. Le calcul a été effectué à partir des données de pluie et d'ETP présentées précédemment et de la RFU¹ du sol qui permet de calculer l'évapotranspiration réelle. Une RFU de 100 mm a été considérée comme représentative à l'échelle de Mayotte (valeur usuelle utilisée dans la thèse de Lapègue, 1999).

Les résultats sont présentés ci-dessous.

¹ Réserve Facilement Utilisable. Il s'agit de la réserve d'eau maximale du sol qui soit mobilisable pour l'alimentation des végétaux (exprimée en millimètres).

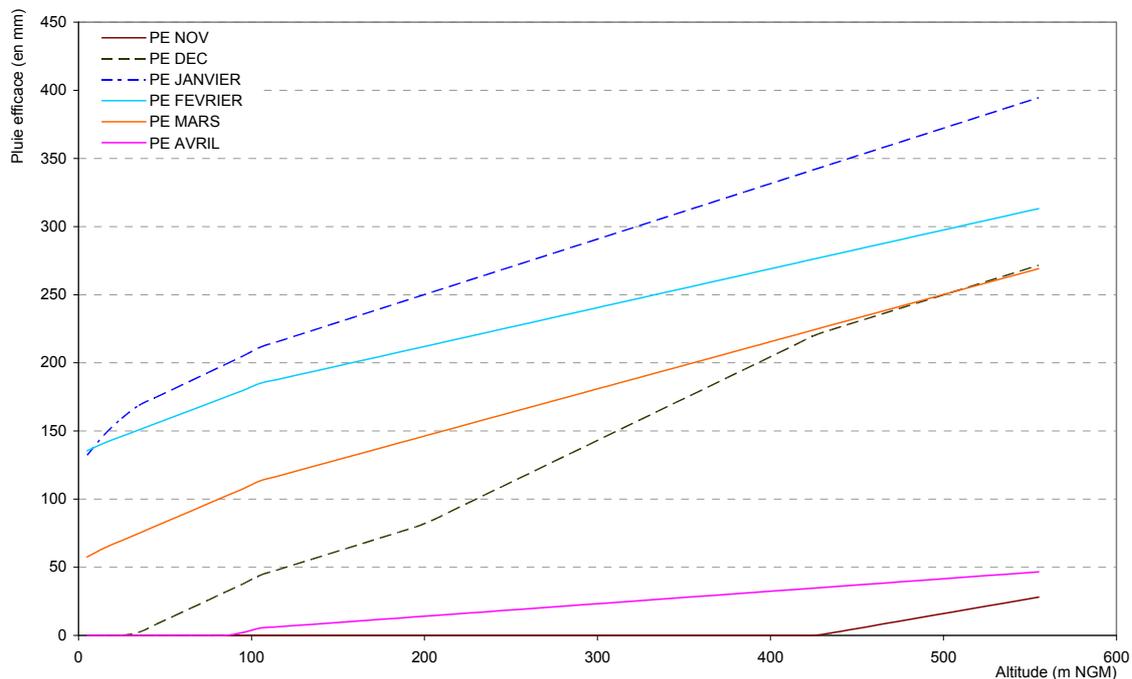


Illustration 16. Pluies efficaces mensuelles du bassin versant du Mro Oua Kaouénilajoli (en mm) en fonction de l'altitude. Le tableau de données est placé en Annexe 3. Les valeurs de pluies efficaces sont nulles pour les mois de mai, juin, juillet, août, septembre et octobre quelque soit la tranche d'altitude considérée.

A la lecture du graphique (et du tableau de données en Annexe 3), il s'avère que les pluies efficaces ne sont effectives qu'entre le mois de novembre et le mois d'avril (ces observations rejoignent celles réalisées en 2008, cf. rapport BRGM/RP-56773-FR, § 3.3). Par ailleurs, les précipitations efficaces sont plus précoces et plus effectives en altitude.

Ainsi, les précipitations efficaces cumulées annuellement entre 0 et 5 m NGM s'établissent autour de 300 mm alors qu'elles atteignent plus de 1300 mm entre 545 et 555 m NGM.

Connaissant la répartition des surfaces du bassin versant par classes d'altitude d'après le MNT de l'IGN au pas de 25 m (l'altitude est connue par cellule carrée de 25 m de côté), il est possible d'estimer les précipitations efficaces sur toute sa surface.

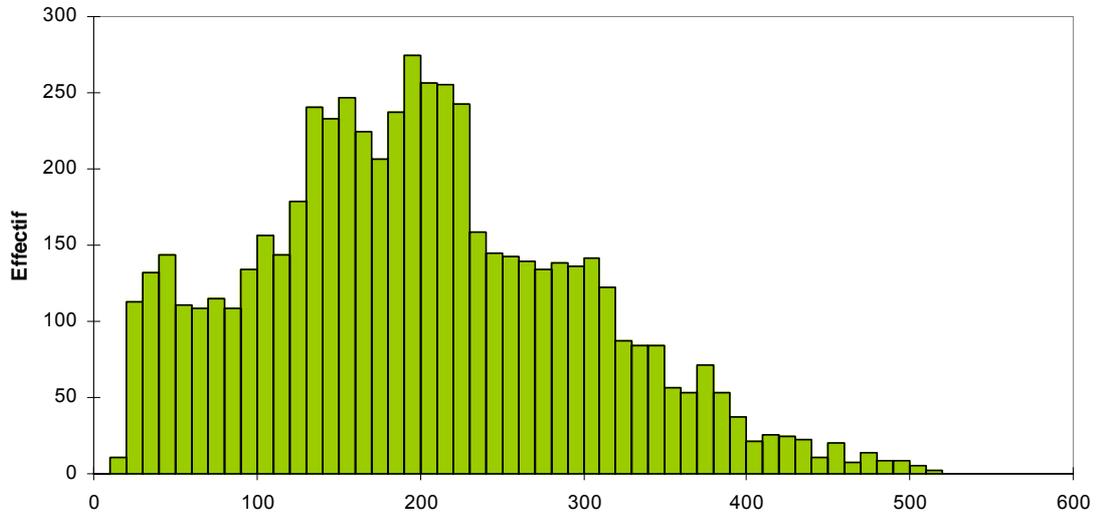


Illustration 17. Répartition des surfaces par classes d'altitude (borne inférieure et supérieure en m NGM). Par effectif est entendu le nombre de mailles carrées de 25 m de côté.

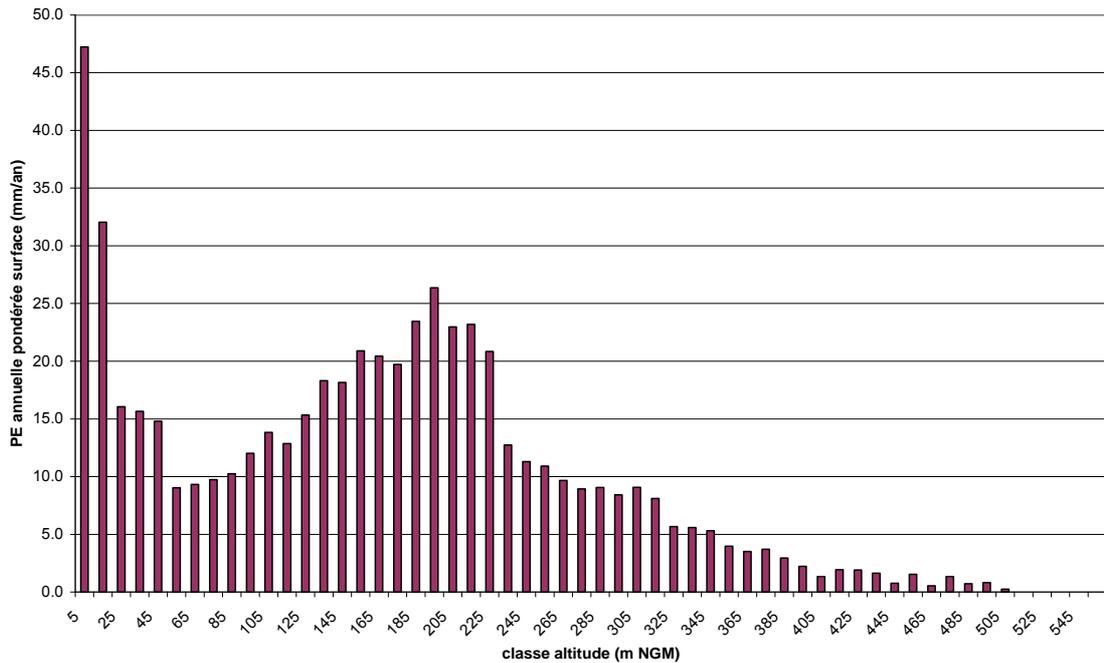


Illustration 18. Pluie efficace annuelle du bassin de Kaouénilajoli par classe d'altitude (de 10 m en 10 m) pondérée par la surface correspondante.

Le cumul des pluies efficaces par tranche d'altitude donne une pluie efficace moyenne annuelle (mais calculée sur la base de données mensuelles) de 567 mm.

Il faut noter que la participation des surfaces du bassin versant situées entre 125 et 225 m NGM dans le cumul de la pluie efficace est importante. Cette participation est estimée à plus de 40 % du cumul alors que la densité de ces surfaces ne représente

que 34 % de la totalité du bassin. Les versants du bassin situés entre 125 et 225 m NGM ont un rôle capital dans le cumul des précipitations efficaces.

La pluie efficace cumulée sur l'année représente à l'échelle du bassin versant représente 39 % des précipitations moyennes annuelles (1420 mm) modulées par la surface. Ces résultats sont proches des conclusions de Lapègue (1999) qui calcule une valeur de 42 %.

2.4. LE CONTROLE MARIN

2.4.1. Principes théoriques de contrôle du niveau de la nappe par les marées

La *marée océanique d'origine astronomique* est définie comme étant la variation à allure périodique du niveau des océans due aux seules actions des corps célestes qui se déplacent autour de la Terre. C'est le mouvement relatif apparent de ces corps célestes par rapport à la Terre qui, combiné à la rotation de la Terre sur elle-même, génère des forces d'attraction gravitationnelle périodiques entraînant un déplacement périodique et ondulatoire des masses d'eaux océaniques. La Lune se trouve dans la même position par rapport à la Terre toutes les 24 heures et 50 minutes. La marée est donc haute toutes les 12 heures et 25 minutes.

Il existe d'autres types de marées que les marées océaniques. Ainsi, les *marées atmosphériques* sont des déplacements ondulatoires des masses d'air de notre atmosphère et les *marées terrestres* sont des déformations périodiques de la croûte terrestre. Ces deux marées se font au même rythme que celui des marées océaniques et sont aussi générées par le mouvement des astres. Mais il existe d'autres marées qui ne sont pas d'origine astronomique. Les *seiches* apparaissent dans des bassins de géométrie particulière et sont générées par le vent ou les variations de pression atmosphérique qui engendrent des oscillations de la surface (ce phénomène a souvent lieu dans des lacs). La *marée radiationnelle* provient de la dilatation des eaux de surface des océans due aux alternances jour/nuit cycliques qui réchauffent ou refroidissent l'eau. Les *marées météorologiques* sont créées par les variations périodiques de vents alternatifs (comme la mousson ou les vents solaires) ou par les variations de pression atmosphérique (Lefèvre, 2000). Cependant, le but de cette analyse étant l'étude du signal de la marée océanique, dans la suite la marée océanique sera désignée par le terme de 'marée'.

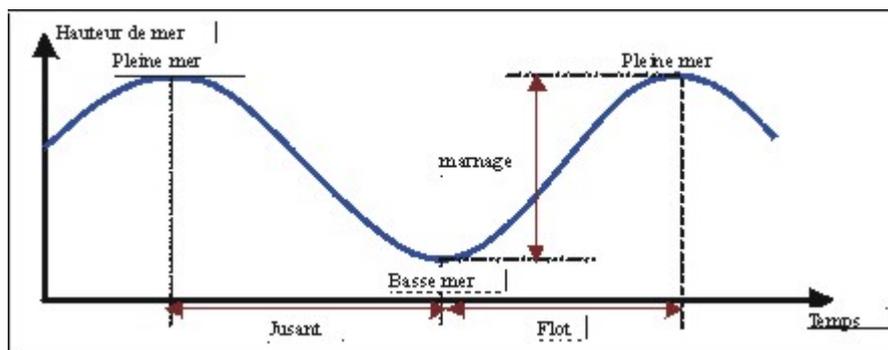


Illustration 19.
Caractéristique
d'une courbe de
marée (Lefèvre,
2000).

Il est particulièrement important de faire ressortir la principale caractéristique de la marée : la rigoureuse périodicité du phénomène. En effet, le mouvement des astres étant la cause de la marée et leurs déplacements périodiques étant parfaitement connus, la périodicité des élévations du niveau des océans due à la marée est, elle aussi, connue. D'ailleurs, cette caractéristique permet l'analyse harmonique et la prédiction de la marée.

2.4.2. Application à Kawéni – données de septembre à novembre 2009

1) Présentation des chroniques

Le piézomètre de Kawéni 1 8'' a été instrumenté de deux capteurs autonomes de mesure de niveau entre le 27 août et le 7 décembre 2009 (soit 3 mois de mesure). Le pas de temps d'acquisition est de 10 min, soit une fréquence de scrutation 6 fois plus élevée que l'instrument en place en permanence (mesure horaire). Le type de capteur utilisé, de gamme 0-100 m H₂O n'a qu'une précision limitée à +/- 10 cm (l'incertitude est égale à 0,1 % de la gamme de mesure). L'utilisation conjointe de deux capteurs et la vérification des niveaux piézométriques lors de la mise en place et du retrait du capteur ainsi que ponctuellement permet de réduire la marge d'incertitude et la dérive par comparaison des signaux.

Les signaux sont corrigés des variations de pression atmosphérique enregistrées sur la période (Illustration 20) selon le facteur de correction -1 hpa = +1 cm. Toute augmentation de la pression d'1 hpa par rapport à la pression de référence (pression de 1017 hpa enregistrée lors de la mise en place du capteur) entrainera une baisse sensible de l'aquifère d'1 cm. Compte tenu de la gamme de fluctuation de la pression atmosphérique sur la période considérée de +5 hpa /-7 hpa par rapport à la pression de référence, la gamme de correction apportée va varier entre +7 et -5 cm par rapport à l'enregistrement. La chronique des fluctuations piézométriques ainsi corrigée est présentée en Illustration 21.

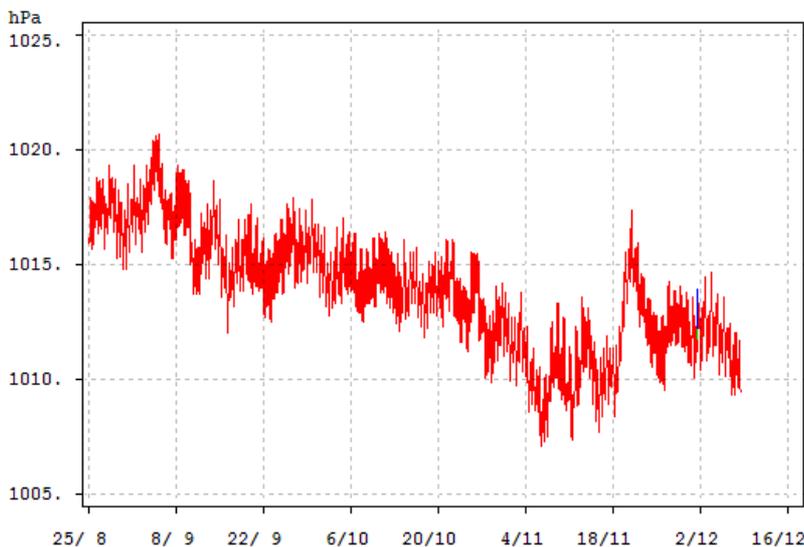


Illustration 20. Variations de la pression atmosphérique horaire enregistrées à Dzaoudzi entre le 25/08/2009 et le 07/12/2009 (données SHOM)

Il est important de noter que la gamme des corrections apportées (1 à quelques centimètres) est de l'ordre de grandeur de la gamme de précision du capteur.

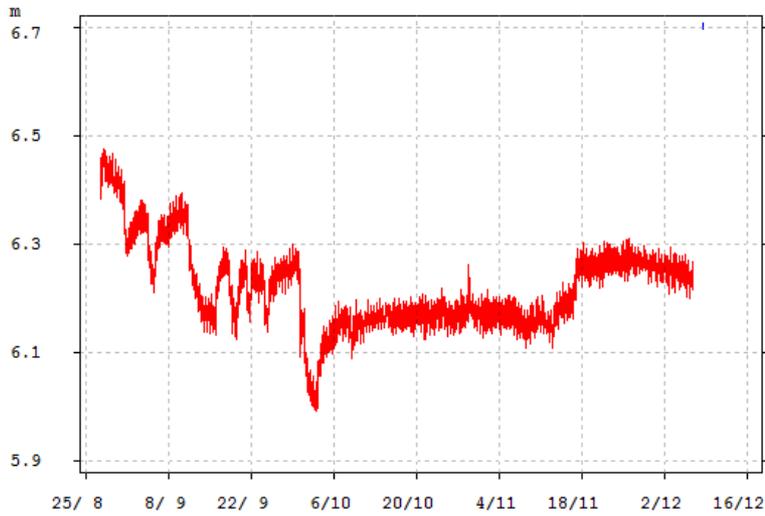
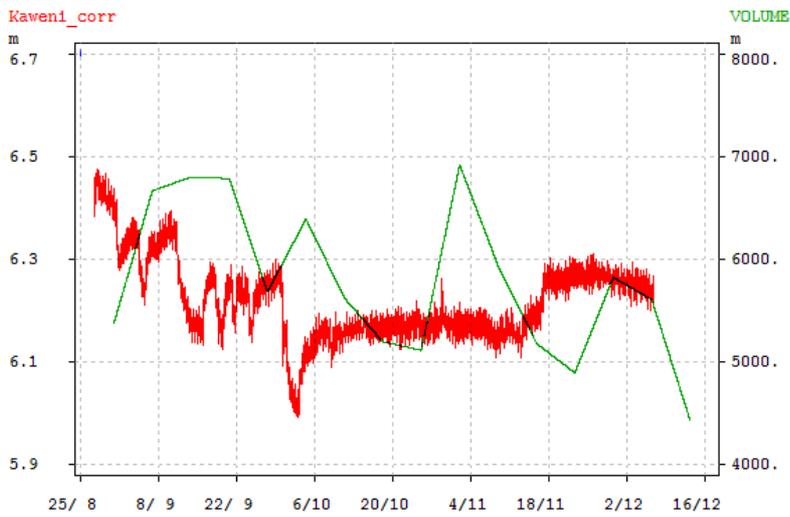


Illustration 21. Chronique du piézomètre de Kawéni 1 8'' (en m NGM) enregistrée entre le 27/08/2009 et le 07/12/2009 au pas de temps de 10 min et corrigée des valeurs de la pression atmosphérique.

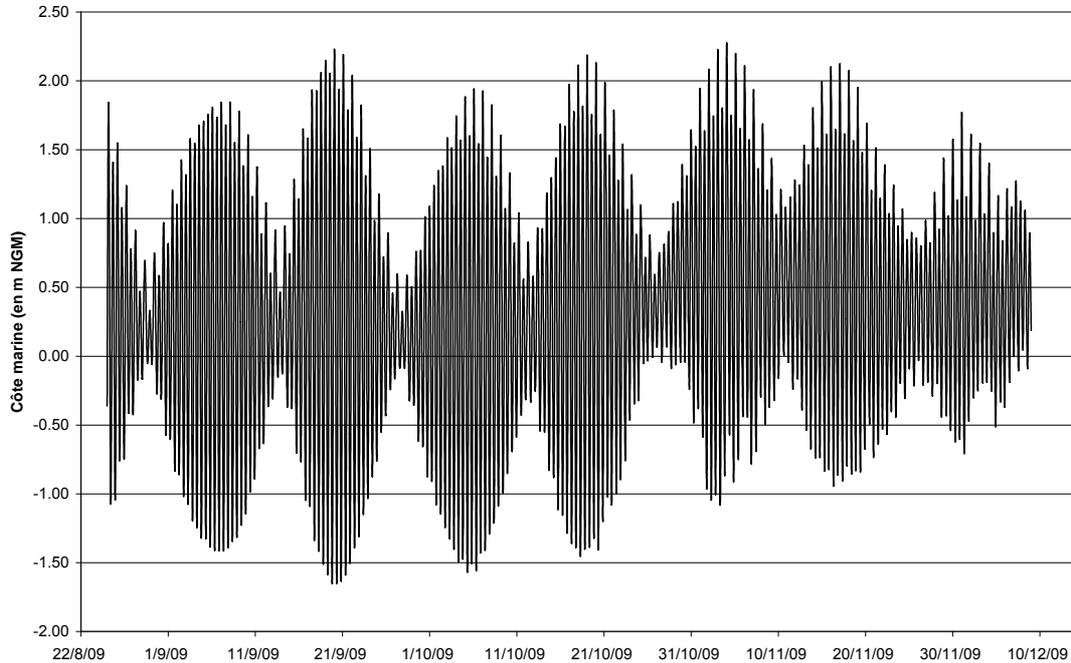
Sur la période considérée, l'aquifère est en période de vidange comme en témoigne la régression des niveaux. Les niveaux piézométriques passent d'environ 6,5 m NGM à 6,2 m NGM soit une régression globale de 30 cm. Dans le détail, les fluctuations sont plus nombreuses :

- entre le 27/08/2009 et le 01/10/09, les niveaux sont en constante régression et marqués par les cycles de pompage des forages F1 (12307X0013/F1) et F2 (12307X0014/F2) qui induisent visiblement des rabattements journaliers de l'ordre d'une dizaine de centimètres ;
- entre le 01/10/2009 et le 04/10/2009 l'aquifère montre un rabattement important dû à une hausse de production des forages (cf. Illustration 22). Le rabattement est estimé à près de 30 cm. Il est intéressant de noter que suite à cette hausse de production temporaire, l'aquifère ne retrouve pas son niveau initial ;
- entre le 04/10/2009 et le 11/11/2009, les niveaux piézométriques semblent relativement stables et ne montrent pas de baisse significative ;
- à compter du 11 novembre, les niveaux de l'aquifère remontent.



*Illustration 22.
Surimposition de la
chronique piézométrique
et des volumes
hebdomadaires prélevés
par la SOGEA sur la
même période (somme
des forages F1 et F2)
entre le 23/08/2009 et le
06/12/2009 (données
SOGEA).*

Sur la même période, les données marégraphiques enregistrées à la station de Dzaoudzi ont été obtenues auprès du SHOM. Le pas de temps d'acquisition des données marégraphiques est de 10 min. Ces données sont exprimées sur la base du référentiel CM (Côte Marine) qu'il convient de rattacher au référentiel NGM selon : $0 \text{ m CM} = -1,78 \text{ m NGM}$.



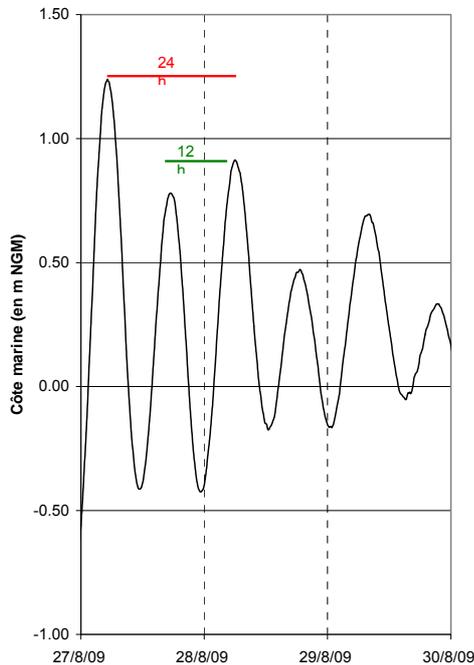


Illustration 23. Fluctuations des marées enregistrées à Dzaoudzi entre le 25/08/2009 et le 09/12/2009 (chronique ci-dessus) et agrandies entre le 27 et le 30/08/2009 (données SHOM).

Sur les illustrations ci-dessus apparaissent non seulement les cycles journaliers de marées, mais aussi des cycles plus longs alternant marnages forts et marnages faibles (cf. Illustration 19). Ces cycles – d'une période de 15 jours – traduisent la succession des périodes de quadrature (la trajectoire soleil-terre et lune forme un angle de 90° , réduisant ainsi l'amplitude des marnages. On parle de marées de mortes eaux) et des périodes de syzygie (lorsque le soleil, la terre et la lune sont alignés et leur influence s'exerce conjointement, augmentant l'amplitude des marnages. On parle de marées de vives eaux).

L'analyse du signal (Illustration 24) au moyen du logiciel TEMPO (Pinault, 2001a ; Pinault et al, 2001a, b ; 2004 ; 2005 ; 2006) qui a été développé par le BRGM, montre que les marées dites journalières se reproduisent selon deux périodes (1 période de 43 800 s soit 12h09 et 1 période de 88 800 s soit 24h39, la période de rotation de la lune autour de la Terre). L'amplitude de la période – qui témoigne de la qualité du signal et donc de la récurrence du système périodique - est plus importante pour le signal de période 24h39 (97,2 %) que pour le signal de période 12h09 (93,7 %). Les périodes de 15 jours correspondant aux alternances des marées de vives eaux et de mortes eaux ne sont pas visibles car fréquemment moins représentées que celles de 12h09 et de 24h39.

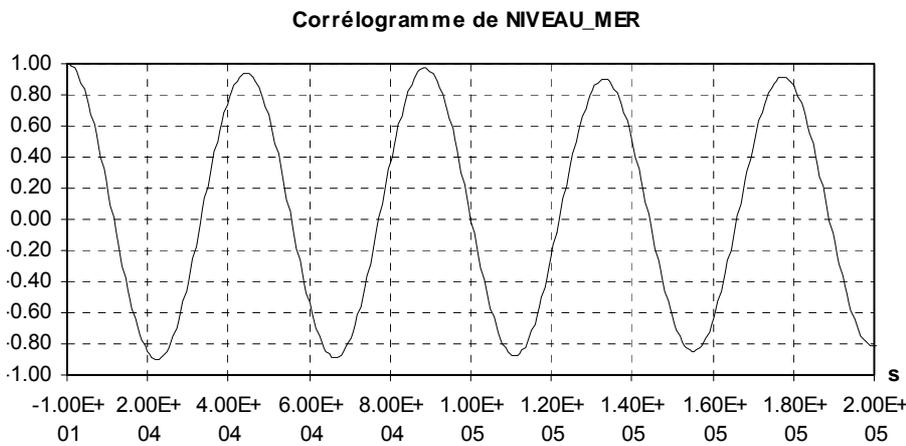


Illustration 24. Corrélogramme des marées de Dzaoudzi entre le 25/08/2009 et le 09/12/2009 (données SHOM, traitement TEMPO)

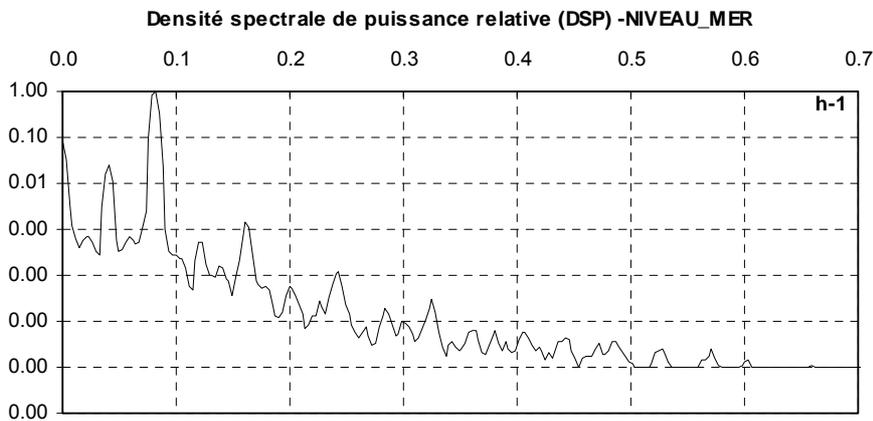


Illustration 25. Densité spectrale de puissance relative des marées de Dzaoudzi entre le 25/08/2009 et le 09/12/2009 (données SHOM, traitement TEMPO)

L'amplitude des signaux de marées de période 24h39 est plus élevée que celles de période 12h09, ce qui s'explique par le fait (i) que la période de 24h39 inclue la période de 12h09 et (ii) que la marée induite directement par l'attraction lunaire est probablement plus régulière que la marée indirecte induite de l'autre côté du globe.

L'autocontrôle des données de piézométrie sur la période concernée peut être représenté sous la forme du corrélogramme suivant.

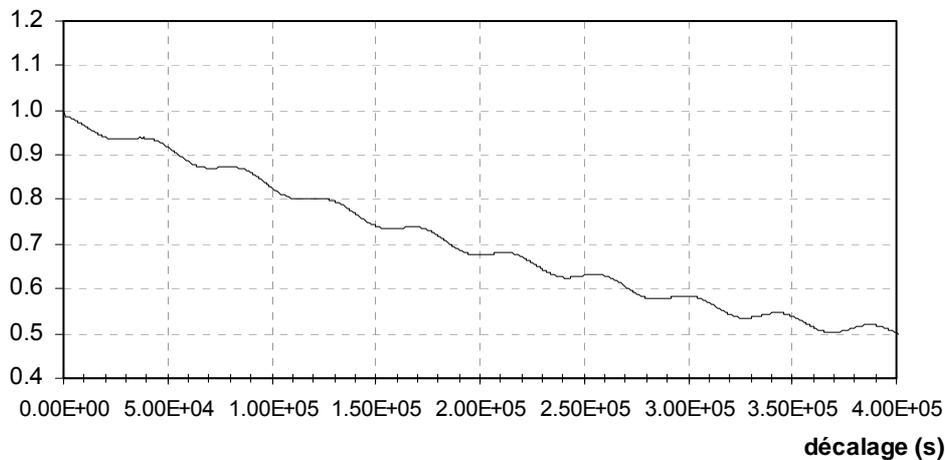


Illustration 26.
Corrélogramme des données piézométriques de Kawéni 1 8'' entre le 25/08/2009 et le 09/12/2009 (traitement TEMPO)

Le corrélogramme montre des oscillations régulières à 42000 s (11h40), 84000 s (23h30), etc. soit des oscillations étalées de période 12 h et 24 h dont l'amplitude n'est pas excessivement marquée. Ces fluctuations sont de l'ordre de 1 à quelques centimètres par jour, c'est-à-dire que la gamme des fluctuations avoisine la gamme de précision du capteur. La quantification des variations est par conséquent délicate à approcher.

2) Croisement des données

Le croisement des données permet de vérifier la cohérence entre la périodicité des signaux de marées et de piézométrie et donc de vérifier l'influence de la périodicité de la marée sur la piézométrie de la nappe au niveau du point d'observation.

Le corrélogramme croisé (Illustration 27) représente l'amplitude impulsionnelle de réponse d'un signal en fonction de sa fréquence de reproduction. Cela permet d'analyser les relations de causalité entre deux séries.

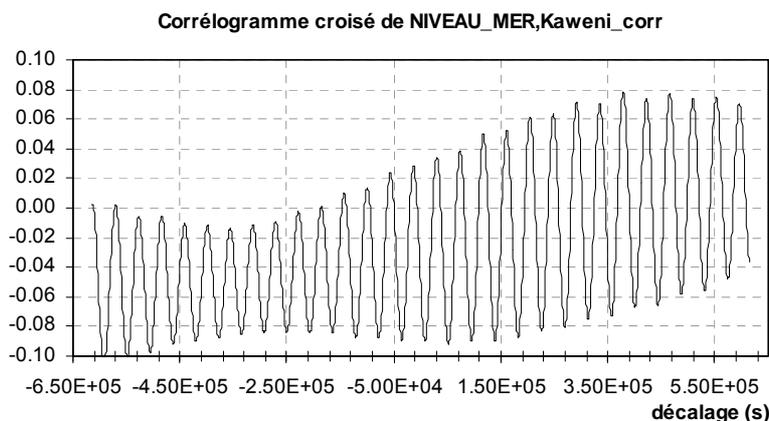
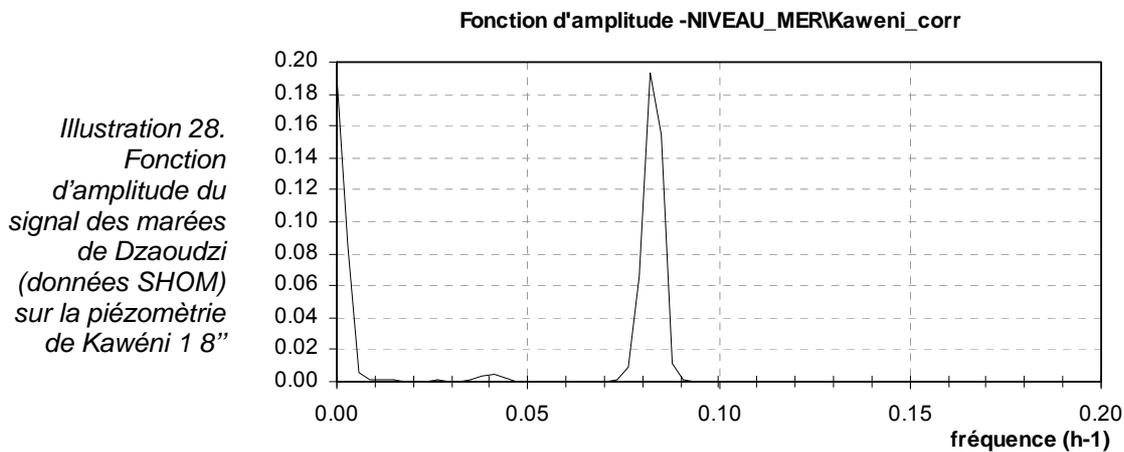


Illustration 27.
Corrélogramme croisé du signal de marées de Dzaoudzi et des données piézométriques de Kawéni 1 8'' entre le 25/08/2009 et le 09/12/2009 (traitement TEMPO)

Dans le cas de l'illustration 28, le croisement des données fait ressortir une période de 15 jours (de $-6,5 \cdot 10^5 \text{ s} = -1 \text{ semaine}$ à $6,5 \cdot 10^5 \text{ s} = 1 \text{ semaine}$, c'est-à-dire le cycle, correspondant aux grandes marées) rythmée par 30 période sinusoïdale

correspondant aux marées journalières de 12h. Plus le décalage (en s) augmente (en positif ou en négatif) et plus l'amplitude du signal augmente jusqu'à atteindre +0,08 pour un décalage de 4 jours (380 000 s) ou -0,10 pour un décalage de -6 jours (-590 000 s). Cette rythmicité correspond à l'augmentation ou à la régression progressive du marnage lors des grandes marées, le pic de marnage étant obtenu entre 4 et 6 jours. Il est important de noter que l'amplitude de la corrélation n'est pas très élevée, ce que corrobore la fonction d'amplitude ci-dessous et indique que – dans la limite de mesure du capteur utilisé – l'influence relative des marées sur les fluctuations de la nappe reste faible.

La fonction d'amplitude montre l'amplitude du signal des marées sur la piézométrie. Outre le pic à l'abscisse 0, deux pics apparaissent aux abscisses $0,41 \text{ h}^{-1}$ (24h22) et $0,82 \text{ h}^{-1}$ (12h11). Le pic d'amplitude la plus prononcée est celui de période 12h11 mais il ne dépasse pas 0,2 d'amplitude, ce qui reste une valeur faible.



2.4.3. Conclusion

Malgré le fait que les variations enregistrées soient de l'ordre de grandeur de l'incertitude du capteur (de 1 à quelques centimètres), l'analyse conjointe de la piézométrie et des signaux de marées met en évidence une influence des variations de la marée océanique sur celles de l'aquifère et notamment une influence des marées journalières de période 12h et 24h. Ces résultats tendent à montrer que l'aquifère de Kawéni répond bien aux critères d'un aquifère côtier, à savoir qu'il est sensible aux phénomènes de marées en raison de sa proximité du trait de côte. Cependant, l'emprise des variations du niveau de la mer demeure plutôt faible comme en témoigne le corrélogramme croisé. L'utilisation d'un capteur plus précis sur une période de temps plus longue permettrait de préciser la relation.

3. La rivière de Kaouénilajoli, marqueur des modalités de recharge de l'aquifère

Le modèle d'alimentation de l'aquifère proposé en 2008 était basé sur les pertes observées le long du Mro Oua Kaouénilajoli (cf. Malard et al. 2008, rapport BRGM/RP-56773-FR) en début de saison des pluies (démarrage de la période de hautes eaux annuelles).

Lors de l'observation de ces pertes, le régime hydrologique de la rivière était modéré – environ une dizaine de L/s, ce qui avait permis d'observer la disparition totale du débit en l'espace d'une centaine de mètres. Conclusion avait alors été émise, selon laquelle le modèle et les zones d'alimentation de l'aquifère avait été découvertes.

Les reconnaissances fréquentes du cours d'eau du Mro Oua Kaouénilajoli opérées en 2009 dans le cadre du projet, mais aussi dans le cadre des études de bassin d'alimentation de captage (BRGM/RP-57620-FR) et du réseau de surveillance DCE de la qualité des eaux de Mayotte (BRGM/RP-57377-FR) ont montré que le cours d'eau était à sec pendant toute la période de basses eaux, et ce jusqu'à l'altitude minimale (altitude au-delà de laquelle les reconnaissances n'ont pas été faites) de 110 m NGM, soit environ la moitié du développement linéaire du cours d'eau.

L'absence d'activité hydrologique en saison sèche d'un cours d'eau au bassin versant aussi important que celui de la Kaouénilajoli dont la surface est estimée à 4,6 km², soit le 14^{ème} bassin versant le plus important de l'île (Stieltjes et Rigal, 1982) est suspecte. En effet, les cours d'eau de bassins versants moins importants tels que les Mro Oua Majimbini, Mro Oua Longoni (Wuilleumier et al. 2009 BRGM/RP-57625-FR), Mro Oua Ampouriana (Mougin et al. 2009 BRGM/RP-57618-FR), etc. sont pérennes tout au long de l'année hydrologique.

Les travaux de Lapègue (Lapègue 1999) ont montré que les débits spécifiques calculés sur un échantillon de 10 cours d'eau de Mayotte à l'étiage s'échelonnaient entre 0,4 L/s/km² (cas du Mro Oua Gouloué) à 3,5 L/s/km² (cas des Mro Oua Boungoumouhé et Mro Oua Bouyouni). Par conséquent – compte tenu des 4,6 km² de surface du bassin versant, le débit spécifique d'étiage du Mro Oua Kaouénilajoli devrait se situer entre 2 et 16 L/s à l'exutoire du bassin.

Or, des mesures de débits d'étiage réalisées entre 1992 et 1995 (Lapègue 1999) au seuil B10 - c'est-à-dire à l'exutoire du bassin versant – affichaient moins de 0,5 L/s. Il est évident que le bassin versant du Mro Oua Kaouénilajoli montre un déficit d'activité hydrologique de surface en basses eaux.

Etant entendu que l'activité hydrologique des cours d'eau de Mayotte en période de basses eaux constitue la conséquence des phénomènes de restitution des eaux souterraines emmagasinées dans les aquifères perchées, l'absence d'activité hydrologique sous-entend l'absence de phénomènes de restitution des eaux

souterraines voire l'absence de nappes perchées. L'autre explication peut venir d'une perméabilité très élevée des sols privilégiant l'infiltration de ces eaux.

Ces mécanismes du bassin versant du Mro Oua Kaouénilajoli (défini depuis comme bassin d'alimentation du forage de Kawéni 3 10") penchent en faveur de la présence d'une zone non saturée très épaisse d'une centaine de mètres au moins.

Cette zone non saturée alimentent vraisemblablement les horizons aquifères par drainage à tendance verticale, ce qui explique d'une part l'absence de restitution dans le cours d'eau mais aussi l'absence de retard dans l'alimentation de l'aquifère.

Souvent, la présence d'une zone non saturée épaisse a pour effet de retarder les alimentations de l'horizon aquifère de base en raison du transit prolongé des eaux (Illustration 29). Ce n'est manifestement pas le cas de l'aquifère de Kawéni. L'illustration montre qu'il n'existe pas d'écart significatif entre les périodes de début de recharge et d'atteinte du niveau piézométrique maximal par rapport aux aquifères d'altitude ou intermédiaires pour lesquels l'épaisseur de la zone non saturée est très probablement moindre. Néanmoins, dans le cas d'une recharge de l'aquifère multiple, ce qui est le cas du bassin – étant donné qu'une part des infiltrations s'effectue en partie basse du bassin comme signalé en 2008 - cet écart est difficile à mettre en évidence.

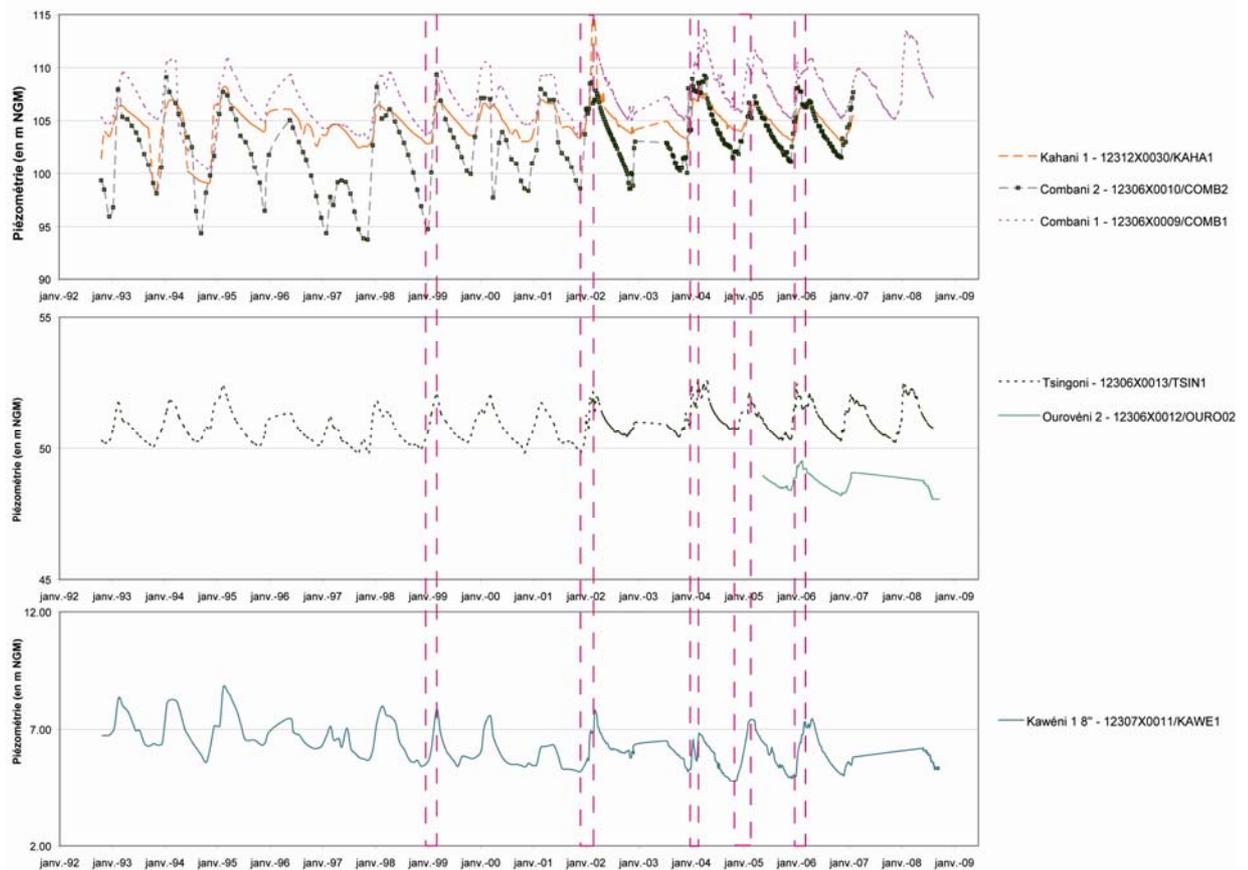


Illustration 29. Comparaison relative des retards de recharge des aquifères. En haut, les aquifères d'altitude des plateaux de Combani et Kahani (cote piézométrique vers 100 m NGM), au milieu les aquifères intermédiaires de Tsingoni et Ourovéni (cote piézométrique vers 50 m NGM) et en bas l'aquifère de Kawéni (cote piézométrique entre 5 et 7 m NGM).

Pour information, le forage de Combani Kahani 12306X0047 (Bonnier et al. 2003, rapport BRGM/RP-52721-FR) profond de 120 m fait état (i) de plus de 80 m de zone non saturée entre 170 et 90 m NGM et (ii) d'une potentialité hydrogéologique qui dépasse la recharge assurée par le bassin versant de surface (recharge estimée). Cette caractéristique n'est peut être pas un cas isolé au forage de Combani Kahani.

Cette information montre que dans le cas de l'aquifère de Kawéni, et dans l'hypothèse d'une zone non saturée très épaisse, soit :

- les connexions entre la zone non saturée et l'aquifère sont très rapides, d'où l'absence de retard dans l'alimentation. Le drainage vertical peut éventuellement être facilité par la présence de fracturation ou pseudo-fracturation ;
- les alimentations s'effectuent en partie basse du bassin, c'est-à-dire à une altitude proche des niveaux piézométriques de la nappe. Dans ce cas, il faut envisager que rien - ou très peu - ne s'infiltre en amont. Ce modèle rejoint les observations faites dans le rapport de 2008 (Malard et al., BRGM/RP-567736FR) où les pertes sont

localisées à l'interface entre les basaltes β_2 et les remplissages volcano-détritiques de maar.

Des investigations complémentaires – et notamment en amont du bassin - sont nécessaires afin d'accréditer complètement ou partiellement l'un, l'autre ou les deux modèles proposés (cf. Illustration 30).

Dans le cas du MODELE 1, la nappe n'est supposée n'avoir qu'une extension réduite et le lit du Mro Oua Kaouénilajoli suffisamment imperméable pour empêcher les infiltrations.

Dans le cas du MODELE 2, la nappe montre une plus grande extension en amont. Ce modèle implique - ou du moins sous entend – une relative homogénéité des unités lithologiques sous jacentes et/ou une fracturation efficace.

Il est probable que dans la réalité, le schéma de fonctionnement de l'aquifère de Kawéni soit composite de ces deux modèles.

Pour répondre à ces questions, l'instrumentation du cours d'eau en différents points de son cours pourrait apporter des informations précieuses – le comportement hydrologique du cours d'eau étant différent selon si son infiltration est continue le long du linéaire du cours d'eau ou si elle survient ponctuellement ou sur une distance très courte.

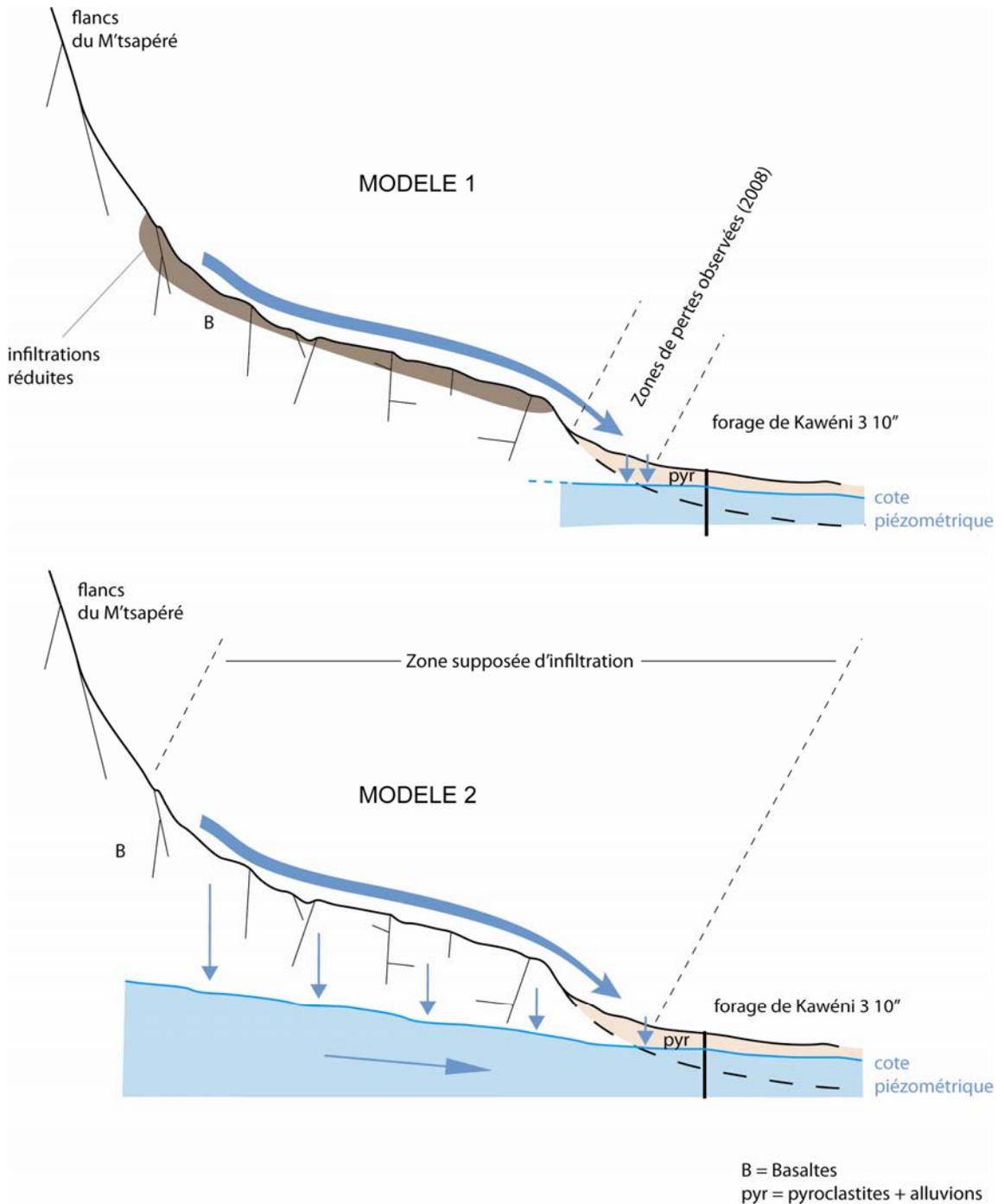


Illustration 30. Modèles de recharge de l'aquifère de Kawéni. MODELE 1 : les infiltrations sont localisées en partie basse du bassin (interface entre les unités basaltiques et les dépôts récents). MODELE 2 : les infiltrations sont drainées dans la zone non saturée verticalement et rapidement vers la nappe (dont la géométrie n'est qu'indicative) et rejoignent le bassin de Kawéni.

4. Actualisation de l'inventaire des pressions existantes dans le bassin de Kawéni

4.1. L'UTILITE D'UN TEL INVENTAIRE (UN PREMIER INVENTAIRE A DEJA ETE REALISE EN 2004)

Dans le cadre d'une étude de protection d'un aquifère, l'accent est porté sur l'estimation de la nature et du volume des pressions exercées sur le bassin. L'identification du type de pression exercé sur le bassin permet de cibler – ou du moins d'avoir une idée - des risques de dégradation encourus par les eaux souterraines et des polluants à analyser dans les eaux de forage.

L'exercice d'inventaire des pressions a été réalisé en Année 2 (2005). Cet inventaire s'était focalisé sur les activités industrielles ou de service et avait mis en évidence 52 sites industriels ou activités de service dans le bassin dont aucun ne présentait un risque significatif pour les eaux souterraines captées.

L'inventaire des pressions de 2009 se limite aux zones de proximité des forages (considérées comme les plus sensibles) et pointe aussi bien les industries que les activités de service, les défauts d'assainissement, les rejets d'eau usée, les décharges sauvages, les sites de stockages ou de transit de produits, les élevages, etc. Cet inventaire est complété en amont des observations réalisées dans le cadre des études de bassin d'alimentation des forages F1, F2 et Kawéni 3 10" (cf. rapport BRGM/RP-57620-FR).

4.2. 2009 : ACTUALISATION DES INFORMATIONS

Les informations sont présentées dans les paragraphes suivants et cartographiées illustration 40.

4.2.1. La ravine Kawéni 'la poste'

Il s'agit de l'un des cours d'eau majeur de la dépression de Kawéni. Située au sud du secteur d'étude cette ravine prend sa source dans le massif de Namohakou, traverse le village avant de se jeter dans la mangrove. Les premières observations sont effectuées dans le village, au niveau de l'école primaire Kawéni Poste, à 500 m du forage F1.

Date	X _{RGM04} (m)	Y _{RGM04} (m)	Distance par rapport à F1 (m)	Activités
21/07/2009	524043	8588089	400	Dépotoir de détritux Garage automobile



Brgm

Illustration 31. Dépotoir d'ordures dans la ravine Kawéni 'la poste'.

Ici, comme sur toute la section de la ravine qui traverse le village, se trouve un dépotoir d'ordures en provenance des habitations environnantes. Les eaux usées et les huiles provenant d'un garage mécanique situé sur la rive droite sont directement évacuées dans le cours d'eau. Ces rejets potentiellement polluants sont susceptibles de s'infiltrer et de détériorer la qualité de l'eau souterraine.

Vers l'amont, la rivière se faufile entre les habitations. Dans ce secteur dépourvu d'assainissement les eaux usagées sont déversées dans la ravine, par le biais de tuyaux en plastique. Des ordures de nature diverse sont observées sur tout le linéaire visité de la rivière.

Date	X _{RGM04} (m)	Y _{RGM04} (m)	Distance par rapport à F1 (m)	Activités
21/07/2009	523851	8588104	350	Dépotoir de détritius Évacuation d'eaux usées



Brgm

Illustration 32. Évacuation d'eaux usées dans la ravine.

Le long de cette section de la rivière, la largeur du lit est estimée entre 1,5 m (sous la passerelle) et 4 m. Les traces laissées par la crue indiquent de forts débits (plusieurs dizaines à centaines de L/s) pendant la saison pluvieuse.



Illustration 33. Morceau d'une fondation arrachée pendant la crue de la ravine Kawéni 'la poste'.

La dégradation décrite ici (dépôt de détritius et rejets d'eaux usées) est malheureusement observable sur toute la section du cours d'eau qui traverse le village.

4.2.2. La ravine Kawéni 'collège'

Ce cours d'eau temporaire prend sa source dans le massif de Namohakou, traverse la partie centrale de la dépression de Kawéni, avant de se jeter dans la mangrove. Un écoulement turbulent généralement violent et d'une durée limitée (quelques jours à quelques semaines) est observé pendant la saison humide. Les événements pluvieux de l'été austral de 2008 ont provoqué le 15 décembre 2008 une crue d'une violence exceptionnelle. Les forts courants occasionnés ont emporté des habitations installées sur les rives et des carcasses de véhicules entreposées dans le lit de la ravine (témoignage d'un riverain). Cet événement hydrologique montre que l'entreposage de matériaux divers dans une rivière entraîne primo un risque de pollution pour les eaux superficielles et souterraines et secundo une formation d'embâcles à l'origine de crues et d'inondations parfois dramatiques.

Les observations effectuées sur la décharge sauvage située dans le lit de cette ravine, à 50 m du forage AEP F1 sont plutôt alarmantes.

Date	X _{RGM04} (m)	Y _{RGM04} (m)	Distance par rapport à F1 (m)	Activités
21/07/2009	523991,00	8588478,53	50	Décharge sauvage Dépotoir de débris divers Incinération d'ordures

Illustration 34. Incinération d'ordures dans la ravine Kawéni 'collège'



L'état de dégradation de cette ravine est particulièrement inquiétant car sa section la plus vulnérable passe à moins de 20 m du forage AEP F1. En effet autour de ce forage, s'est développé une urbanisation sans assainissement ni système de collecte

des déchets. Les bacs à ordures y sont inexistantes et le quartier est complètement ignoré par les services municipaux de la voirie.

4.2.3. La rivière Kaouénilajoli

La rivière Kaouénilajoli, qui prend sa source dans le massif de Majimbini est le cours d'eau le plus important de la dépression de Kawéni. La dégradation d'origine anthropique qui touche la rivière est surtout localisée dans sa partie aval, traversant une zone habitée et sans assainissement. Les pressions vis-à-vis de la ressource se manifestent par la présence de décharges sauvages et le rejet d'eaux usées dans la rivière.

Date	X _{RGM04} (m)	Y _{RGM04} (m)	Distance par rapp à 3.10'' (m)	Activités
22/07/2009	524219	8589101	300	Décharge sauvage Dépotoir de détritrus divers
22/07/2009	524383	8588776	400	Évacuation d'eaux usées



Illustration 35. Décharge sauvage (à gauche) et rejet d'eaux usées (à droite) dans la rivière Kaouénilajoli.

4.2.4. Les activités industrielles au droit des forages.

Les activités industrielles recensées au droit des forages sont très peu nombreux. Cependant, une surveillance vigilante est nécessaire dans la mesure où cette zone connaît un développement accéléré et anarchique de différentes formes d'industries. Les quelques activités présentant une menace potentielle repérées sont reportées sur les tableaux ci-dessous.

Date	X _{RGM04} (m)	Y _{RGM04} (m)	Distance par rapport à F1 (m)	Activités
21/07/2009	524046	8588210	200	Site fréquenté par les poids lourds
21/07/2009	523978	8588385	100	Menuiserie, travail du bois



Illustration 36. Site de stockage fréquenté par les poids lourds (à gauche) et menuiserie (à droite).

Date	X _{RGM04} (m)	Y _{RGM04} (m)	Distance par rapport à F2 (m)	Activités
21/07/2009	524227	8588715	200	Site fréquenté par les poids lourds
21/07/2009	524278	8588706	220	Menuiserie, travail du bois
07/08/2009	524404	8588694	300	Entreposage de peinture



Illustration 37. Site fréquenté par les poids lourds (à gauche) menuiserie (au milieu) et entreposage de peinture (à droite).

4.2.5. Les activités en amont des forages.

Dans la zone amont des forages, aucune activité industrielle n'a été recensée, mis à part une agriculture vivrière (cocotiers, manioc, bananiers, manguiers, jaquiers...) notamment sur brulis. Cette zone étant principalement dédiée à une agriculture traditionnelle, l'ampleur des pressions anthropiques sur la ressource en eau exploitée en aval est amoindrie.



Illustration 38. Localisation des ouvrages AEP dans la zone agricole.



Brgm



Brgm

Illustration 39. Culture sur brulis et champs de manioc en amont des forages F2 et Kawéni 3.

A l'échelle du bassin de Kawéni, les pressions majeures peuvent être synthétisées sur l'illustration 40 suivante.

4.3. CONCLUSION

Les observations effectuées sur le terrain aux mois de mai, juin, juillet et août ont permis de faire un constat des agressions anthropiques à l'endroit des cours d'eau de la dépression de Kawéni et de dresser un inventaire des activités potentiellement polluantes pratiquées en amont et au droit des ouvrages exploités pour l'alimentation en eau potable.

Ce travail d'investigation montre que les cours d'eau pérennes et temporaires, de la dépression de Kawéni subissent une dégradation liée aux activités anthropiques sous plusieurs formes. Ces atteintes sur le milieu se traduisent par une prolifération des décharges sauvages et des dépotoirs de débris dans les lits ou sur les bordures des trois cours d'eau majeurs du bassin versant de Kawéni. Cette dégradation est particulièrement marquée dans la partie aval des rivières qui reçoit les ordures et les eaux usées des habitations installées sur les rives. Cependant, vu la distance qui sépare les sites dégradés des ouvrages exploités et la nature des produits entreposés, l'impact de cette pollution 'visuelle' sur la ressource n'est pas immédiat.

Les activités industrielles potentiellement polluantes recensés en amont et au droit des forages sont très peu nombreux pour l'instant, mais connaissent toutefois un développement rapide et incontrôlé. Les industries les plus fréquentes sont de type : menuiseries, entrepôts de peinture, dépôts de produits commercialisés (ciment, riz, métal...), petits garages, etc. dont les activités nécessitent l'intervention de gros transporteurs pas toujours sécuritaires sur les sites concernés. La présence de ces activités à proximité des ouvrages exploités constitue certainement une menace potentielle sur les réserves d'eau souterraine. Une campagne de sensibilisation (envoi de prospectus par exemple) auprès de différents industriels présents sur la zone est donc nécessaire pour une prise de conscience collective par rapport, *primo* à la vulnérabilité des ressources aquifères et *secundo* à la responsabilité qui incombe à chacun de préserver la ressource.

5. Perspectives d'exploitation de l'aquifère de Kawéni

5.1. ETUDE DES BAC DE KAWENI ; LA PROTECTION REGLEMENTAIRE DES FORAGES

L'étude réalisée en 2009 relative à la délimitation et à la caractérisation des bassins d'alimentation de captage des forages F1, F2 et Kawéni 3 10'' (Wuilleumier et al. 2009 rapport BRGM/RP-57620-FR) a apporté les conclusions suivantes (extraites du rapport) :

- I. Les résultats de la combinaison de l'IDPR¹ avec l'indice de rugosité montrent que le bassin versant de la dépression de Kawéni présente - au même titre que les autres bassins versants du massif du M'tsapéré - un caractère plutôt infiltrant par rapport aux autres bassins versants de l'île.
- II. En ce qui concerne l'inventaire et la caractérisation des pressions s'exerçant sur les captages, les pressions identifiées comme les plus importantes sont concentrées dans la partie aval des BAC. En premier lieu, on doit citer les puits, puisards et fosses d'évacuation des eaux usées qui constituent des fenêtres directes pour le déversement de polluants dans la nappe. Ces ouvrages constituent le point noir vis-à-vis de la protection des eaux souterraines. Au second plan arrivent les décharges et les casses automobiles situées au voisinage des forages, ainsi que les lessives manuelles avec l'utilisation de produits détergents directement dans le cours d'eau. De façon moindre, on peut citer la mobilisation des sols conséquemment aux aménagements et pratiques agricoles (responsables des fortes turbidités des eaux). Ces dernières pressions ne sont néanmoins pas à négliger, notamment en cas d'évolution des pratiques culturelles à Mayotte. Des travaux doivent rapidement être menés dans le recensement de ces ouvrages (fosses, puisards, etc.) qui constituent des vecteurs privilégiés de pollution vers les eaux souterraines. Il est important de sécuriser voire de fermer ces ouvrages et d'accompagner la population via des actions de sensibilisation et d'éducation vers le respect de ces travaux de protection.
- III. En termes de qualité des eaux captées, les analyses effectuées montrent d'ores et déjà un impact des activités anthropiques sur les eaux souterraines : des hydrocarbures aromatiques polycycliques ont par exemple été observés sur les forages Kawéni F1 et Kawéni F2, et ce, malgré la bonne protection naturelle dont ils bénéficient (couverture épaisse de matériaux peu perméables

¹ Indice De Persistance des Réseaux.

- BRGM/RP-57620-FR – Rapport final Bassins d'alimentation de captage de Mayotte – cas du bassin versant du Mro Oua Kaouénilajoli). Par ailleurs, l'absence d'identification de produits phytosanitaires n'est qu'un résultat partiel, la liste des molécules recherchées dans les eaux ne coïncidant pas avec celle des molécules utilisées.

Ces études mèneront en 2010 à la réalisation des dossiers d'études hydrogéologiques préliminaires à la définition des périmètres de protection. Le calendrier en vigueur prévoit que les périmètres de protection soient définis dans le courant des années 2010/2011.

5.2. MONITORING DE LA CONDUCTIVITE

Parmi les préconisations fournies dans les rapports BRGM/RP-54082-FR et BRGM/RP-57620-FR, on retient la nécessité de mettre en place un système de suivi de l'avancée de l'interface eau douce / eau salée à l'aval des forages AEP. Ceci a pour but suivre l'évolution du phénomène. Ce système de suivi peut prendre la forme d'un dispositif d'alerte, constitué par un réseau de quelques piézomètres répartis dans la dépression de Kawéni (l'implantation de ces piézomètres a déjà été suggérée dans le rapport BRGM/RP-54082-FR). Le pas de temps du monitoring doit être assez fin (30 minutes) afin de pouvoir distinguer les variations dues le cas échéant aux phénomènes des marées journalières.

Cet aspect est capital compte tenu de la salinisation d'ores et déjà observée sur le forage Kawéni 2 10 pouces d'après les informations recueillies auprès de la SOGEA et des résultats obtenus lors de la comparaison de la pluie efficace moyenne sur les bassins versants F1 et F2 avec les prélèvements sur les forages Kawéni F1 et Kawéni F2.

5.3. RELANCER LES PROJETS DE SONDAGE POUR UNE SURVEILLANCE DE L'AQUIFERE ? UTILITE D'UN RESEAU D'ALERTE ?

(i) **les importantes fluctuations interannuelles de la nappe** (plusieurs mètres de battements par an et plus d'un mètre de différence entre les niveaux de basses eaux 2008 et ceux de 2009, un constat similaire avait été dressé en Année 3, cf. Malard et al., rapport BRGM/RP-56773-FR), (ii) **l'exploitation des eaux souterraines** au niveau des 3 forages de Kawéni, mais aussi l'exploitation illégale à travers les dizaines de puits qui ont pu être recensés (cf. rapport BRGM/RP-53161-FR, BRGM/RP-54082-FR, BRGM/RP-57620-FR) (iii) **l'irrégularité des précipitations** qui ont été enregistrées à Convalence en saison des pluies (entre 600 mm et 1800 mm selon les années sèches ou humides) et (iv) **le contrôle des marées sur les niveaux aquifère** sont des facteurs qui justifient la mise en place d'un programme de surveillance de l'aquifère au moyen de l'implantation et de l'instrumentation en continu (piézométrie et conductivité) de sondages, comme préconisé en 2004 dans le rapport BRGM/RP-53161-FR.

6. Conclusion

Les études réalisées en 2009 sont l'aboutissement des travaux entrepris depuis 2003 sur la caractérisation de l'aquifère de Kawéni en vue de son exploitation et de sa protection. Cet aquifère - considéré comme une ressource stratégique – est situé sous le bassin de Kawéni en proie à un développement très rapide depuis maintenant une dizaine d'années.

Les études antérieures ont permis de progresser dans la définition du modèle géologique de l'aquifère, dans la cartographie des limites de la nappe et dans la caractérisation de son fonctionnement (mécanismes de recharge, aspects hydrochimiques, etc.).

En 2008, l'accent avait été porté sur la tendance évolutive de la ressource, tant en quantité qu'en qualité. Il s'avère que les niveaux moyens de l'aquifère baissent d'une année sur l'autre, et ce malgré des pluviométries assez élevées depuis 2005.

Au vu de ces résultats, il a paru important en 2009 de vérifier les propriétés de l'aquifère et de préciser ses mécanismes de recharge, mais aussi de compléter l'inventaire des pressions exercées sur le bassin au vu du rythme de développement urbain et industriel.

En 2008 et 2009, les niveaux de l'aquifère ont remonté par rapport aux années antérieures. L'essai de nappe réalisé en mai 2009 a permis de confirmer les paramètres hydrodynamiques de la nappe à proximité des ouvrages F1 et F2 étudiés pour la première fois en 1991. Les résultats sont les suivants.

T (m ² /s)	7,5.10 ⁻³
S	1,1.10 ⁻⁴

L'analyse statistique des données marégraphiques enregistrées par le SHOM à Dzaoudzi et des données piézométriques de Kawéni 1 8'' au pas de temps 10 min pendant 3 mois ont permis de mettre en évidence une influence des marées sur les fluctuations piézométriques, notamment des marées journalières. Compte tenu du fait que ces influences sont de l'ordre centimétrique, ces observations sont à préciser dans les années à venir au moyen d'une instrumentation plus fine (capteur de pression plus sensibles, période d'acquisition plus longue).

L'inventaire des pressions a montré que la majorité d'entre elles étaient d'origine domestique (rejets des eaux usées des particuliers, décharges sauvages, casses automobiles, etc.) et peuvent être en partie réduites par l'application des politiques réglementaires. Ces pressions sont en train de se développer et à l'heure actuelle il est

important de signaler qu'aucune amélioration n'est visible dans les environs des forages.

En termes de préconisation, les 4 années d'étude ont montré qu'il était urgent de mettre en place sur le bassin :

- un monitoring efficient de la nappe de Kawéni qui permettrait de suivre précisément les variations spatiotemporelles de la nappe en fonction (i) des régimes hydrologiques, (ii) des fluctuations marégraphiques et (iii) des régimes de pompage. Ces données s'avéreraient très utiles pour l'optimisation de l'exploitation des ouvrages. Ces préconisations et des propositions d'implantation ont été définies en 2004 dans le rapport BRGM/RP-53161-FR ;
- un suivi de la conductivité dans des piézomètres annexes, en aval des ouvrages exploités - comme préconisé en 2008 (cf. rapport BRGM/RP-56773-FR) – permettraient de suivre les intrusions d'eaux salées dans la nappe (problématique de contamination des réservoirs) au-delà d'un certain seuil et rémanence de conductivité ;
- de suivre régulièrement les débits du Mro Oua Kaouénilajoli afin de pouvoir un jour réaliser un bilan hydrologique à l'échelle du bassin d'alimentation.

7. Références bibliographiques

Publications scientifiques et rapports BRGM

Banton O., Bangoy L., Hydrogéologie, multiscience environnementale des eaux souterraines, 1999

Bates C.R. et Robinson R., 2000. Geophysical surveys for groundwater modelling of Coastal Golf Courses. EAGE 62nd Conference and Technical Exhibition – Glasgow, Scotland, 29 May – 2 June, 2000. 1-5.

Bear, J. 1999. Conceptual and mathematical modeling, in Seawater Intrusion in Coastal Aquifers – Concepts, Methods and Practices, J. Bear, A. H.-D. Cheng, S. Sorek, D. Ouazar, and I. Herrera (Eds.). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p. 625.

Bonnier J., Jossot O., Lachassagne P. et Mouron R. (2003) en collaboration avec J.-P. Rançon – Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte (campagne 2001-2003) – Forage de Combani – Kahani (12306X0047). Rapport BRGM/RP-52721-FR, 53 p., 16 fig., 4 ann.

Boutkhil MORSLI, Étude de l'intrusion marine et de ses répercussions sur la dégradation des sols : cas des zones côtières d'Alger Est, Actes des JSIRAUF, Hanoi, 6-9 novembre 2007

Castellani C., Régionalisation des précipitations annuelles par la méthode de la régression linéaire simple, Revue de géographie alpine, Année 1986, Volume 74, Numéro 4 p. 393 – 403. E. Gilli, C. Mangan, J. Mudry, Hydrogéologie, objets, méthodes, applications, 2008_s

Cazes-Duvat Virginie et Magnan Alexandre, « Les îles-hôtels, terrain d'application privilégié des préceptes du développement durable : l'exemple des Seychelles et des Maldives (Océan Indien) », Les Cahiers d'Outre-Mer [En ligne], 225 | Janvier-Mars 2004, mis en ligne le 13 février 2008. URL : <http://com.revues.org/index706.html> DOI : en cours d'attribution

Comte J.C. (2008) – Apport de la tomographie électrique à la modélisation des écoulements densitaires dans les aquifères côtiers, Thèse de Doctorat – Université d'Avignon / Hydriad

Comte J.-C. et Banton O. (2005), Apport de la tomographie électrique à la modélisation des intrusions salines dans les aquifères gréseux des Iles-de-la-Madeleine (Québec, Canada), Actes du 5e colloque GEOFCAN, Orléans, France, 20-21 septembre.

Custodio, E., 1985. Saline Intrusion. Hydrogeology in the Service of Man. Memories of the 18th Congress of the International Association of Hydrogeologists, Cambridge, pp. 65–90.

Custodio, E. (1997) Groundwater quantity and quality changes related to land and water management around urban areas: Blessing and misfortunes In: Chilton et al. (ed) Groundwater in the urban area: problems processes and management. 27th Cong. Int. Assoc. Hydrogeologists (IAH), 21–27 September 1997, Nottingham, pp 11–22

Custodio, E. (2002). Aquifer overexploitation, what does it mean?. *Hydrogeology Journal*: 10 (2): 254-277.

Dumon A., Vittecoq B., Allier D., Mougin B., Ladouche B. (2009) – Contribution à l'évaluation de la ressource en eau souterraine de la Basse-Terre - Guadeloupe. BRGM/RP-56821-FR.

Eucher G., Miehé J.M., Mouron R. (2005) – Modalités d'exploitation et de protection de l'aquifère de Kawéni (commune de Mamoudzou – Mayotte) – Année 2 – BRGM/RP-54082-FR, 70 p., 20 ill., 4 ann.

Ghyben B.W. - 1889, Nota in verband met de voorgenomen putboring Nabij Amsterdam; Tijdschrift van het Koninklijk Instituut van Ingenieurs 1888-1889, The Hague, 21

Griffiths D.H. et Barker R.D., (1993) - Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of Applied Geophysics*, 29, 211-226.

Herzberg B. - 1901, Die Wasserversorgung einiger Nordseebäder ; *Jour. Gasbeleuchtung und Wasserversorgung* 44, Munich, 815-9, 842-4.

Lapègue J. (1999), Aspects quantitatifs et qualitatifs de la pluviométrie dans deux enjeux majeurs de la problématique de l'eau à Mayotte; la ressource hydrique, l'assainissement pluvial et l'érosion, Thèse, Université de La Réunion, Avril 1999.

Malard A. et Winckel A. (2009) - Réseaux de surveillance de la qualité des eaux de surface, souterraines et côtières de Mayotte. Programme 2009. Rapport BRGM/RP-57377-FR.

Malard A. et Jaouen T. (2009) – Réseau de surveillance piézométrique de Mayotte sous maîtrise d'ouvrage BRGM. Année 2009. BRGM/RP-57459-FR.

Malard A., Winckel A. (2008) – Définition des réseaux de surveillance DCE de la qualité des eaux souterraines, de surface et côtières de Mayotte – BRGM/RP-56774-FR, 218 p., 48 ill., 9 ann.

Mauroux B. (1992) – Programme de reconnaissance des eaux souterraines à Mayotte – Rapport BRGM R35165 REU 4S 92, 92 p., 6 ann

Montety (de) V., Salinisation d'un Aquifère Captif Côtier en Contexte Deltaïque - Cas de La Camargue (Delta du Rhône, France), 2008, Thèse, Université d'Avignon.

Mougin B., Malard A., avec la collaboration de Brugeron A., Wuilleumier A. (2009) - Etude des bassins d'alimentation des 2 captages du bassin versant du Mro Oua Andrianabé – Mayotte – BRGM/RP-57618-FR.

Nazoumou Y. et Besbes M., *Revue Sciences Eau* 13(4), 2000.

PINAULT.J.L. 2001. Manuel utilisateur de TEMPO. Logiciel de traitement et de modélisation des séries temporelles en hydrogéologie et en hydrogéochimie. BRGM/RP-51459-FR.

Rhoades J.D., Raats P.A.C. et Prather R.S., 1976. Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 40, 651-665.

Stieljes L., Rigal D. (1982) – Schéma directeur de mise en valeur des ressources en eau de Mayotte. Rapport BRGM 82 REU 18

Stollsteiner P., Cluzet C. 2008. Actualisation des propositions pour une méthodologie relatives aux études hydrauliques et hydrologiques à Mayotte. BRGM/RP-56881-FR.

Wuilleumier A., Malard A., avec la collaboration de Brugeron A. et Mougin B. (2009) - Etude des bassins d'alimentation des forages de Kawéni - bassin versant du Mro Oua Kaouénilajoli – Mayotte – BRGM/RP-57620-FR. 140 p., 68 ill., 10 tab., 5 ann.

Wuilleumier A., Malard A., avec la collaboration de Brugeron A., Mougin B. (2009) - Etude du bassin d'alimentation du captage de Longoni - bassin versant du Mro Oua Longoni – Mayotte – BRGM/RP-57625-FR. 94 p., 32 illustrations, 11 tableaux, 5 annexes

Wuilleumier A., Mathieu F., Jossot O., Euchet G. (2004) – Modalités d'exploitation et de protection de l'aquifère de Kawéni – Année 1 – BRGM/RP-53161-FR, 168 p., 19 ill., 6 tab., 14 ann.

Wuilleumier A., Seguin J.J. - 2008. Réalimentation artificielle des nappes en France. Bilan de l'existant et conditions hydrogéologiques requises. Rapport final. BRGM/RP-55063-FR, 122 pages, 21 figures, 3 tableaux et 5 annexes.

Références bibliographiques des données utilisées

Annuaire DAF des données hydrométéorologiques de 1993 à 2008

Données marégraphiques de Dzaoudzi - SHOM

Références juridiques

Annexe 1, §I-2, au décret n°2001-1220 du 20 décembre 2001 relatif aux eaux destinées à la consommation humaine, à l'exception des eaux minérales naturelles.

Annexe 1

Analyses physico-chimiques réalisées sur les forages F1, F2 et Kawéni 3 10'' en 2009 (données DASS / SOGEA)

Origine	Kawéni Amont						
Date du prélèvement	22/01/2009	12/02/2009	24/03/2009	22/04/2009	14/05/2009	19/06/2009	28/07/2009
Index en sortie	694 778	700 062	716 349	726 846	732 618	743 436	759 417
Code	KAWÉ220109Am	KAWÉ120209Am	KAWÉ240309AM	KAWÉ220409AM	KAWÉ140509AM	KAWÉ190609Am	KAWÉ280709Am

paramètres organoleptiques

Odeur	Aucune						
Couleur	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15
Turbidité en NFU	0.66	0.25	0.33	0.25	0.51	0.27	0.09

paramètres physico-chimiques

pH	7.30	7.5	7.5	7.6	7.5	7.6	7.6
Conductivité en µS/cm	486	484	422	418	443	425	442
TAC en °f	23.2	20.8	19.6	17.2	22	18.3	18.4
THCa en °f	11.5	7.6	6.7	6.2	7.0	6.4	6.0
THtotal en °f	12.6	12.4	12.1	11.9	12.6	12.2	12.0
Calcium en mg/l	46.0	30.4	26.8	24.8	28.0	25.4	24.0
Magnésium en mg/l	2.7	11.8	13.2	14.0	13.7	14.3	14.7
Chlorures en mg/l			42.6	42.6		43	
MeS en g/l		0.000		0.000		0.000	

substances indésirables

Ammonium en mg/l	0.10	0.12	0.08	0.10	0.13	0.09	0.10
Fer en mg/l	< 0.02	0.13	< 0.02	< 0.02	< 0.002	0.07	0.13
Manganèse en mg/l	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.03	< 0.01	0.01	0.01
Cuivre en mg/l	< 0.02		0.08		0.22		0.20

Origine	Forage Kawéni F1	Forage Kawéni F1							
Date du prélèvement	22/01/2009	12/02/2009	24/03/2009	22/04/2009	14/05/2009	19/06/2009	28/07/2009	04/08/2009	
Index en sortie	49 283	55 873	68 449	77 482	86 120	100 519	113 683		
Code	KAWÉ220108F1	KAWÉ120208F1	KAWÉ240309F1	KAWÉ220409F1	KAWÉ140509F1	KAWÉ190609F1	KAWÉ280708F1	Analyse D.D.A.S.S	
paramètres organoleptiques									
Odeur	Aucune								
Couleur	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	27.3
Température (°C)									
Turbidité en NTU	0.38	0.25	0.23	0.24	0.16	0.26	0.17		< 0.25
paramètres physico-chimiques									
pH	7.5	7.4	7.4	7.5	7.5	7.5	7.4		7.35
Conductivité en µS/cm	491	483	427	427	447	450	460		462
TAC en °f	21.2	20.0	37.2	15.6	18.6	17.3	16.8		17.7
THCa en °f	7.9	7.0	6.3	6.3	6.5	6.5	6.8		
THtotal en °f	12.0	11.5	11.1	11.1	11.4	11.1	11.0		
Calcium en mg/l	31.6	28.0	25.2	25.2	28.0	26.0	23.2		25.0
Magnésium en mg/l	10.0	11.0	11.8	11.8	12.0	11.3	12.7		13.0
Chlorures en mg/l			56.8			40			34.3
Fluorures en mg/l									0.37
Sulfates en mg/l									5.5
MeS en gj	0.000	0.000		0.000		0.000			
substances indésirables									
Ammonium en mg/l		0.11		0.12	0.09	0.116	0.06		<0.05
Nitrites (mg/l de NO2-)									<0.025
Nitrates (mg/l de NO3-)									5.2
Orthophosphates (mg/l PO4)									0.99
Aluminium en mg/l									0
Fer en mg/l	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	0.07	0.08		0.02
Manganèse en mg/l	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.02	0.08	< 0.01	< 0.01		< 0.01
Cuivre en mg/l	< 0.02		0.26		0.2		0.21		
COI (mg/l de C)									< 0.30
analyse Bactériologique:									
Escherichia Coli (Col/100ml)									<15
Entérocoques (Col/100ml)									<15

Origine	Forage Kawéni F2	Forage Kawéni F2	Forage Kawéni F2	Forage Kawéni F2
Date du prélèvement	28/10/2008	26/11/2008	19/06/2009	28/07/2009
Code	KAWE281008F2	KAWE261108F2	KAWE190609F2	KAWE280709F2
<u>Paramètres organoleptiques</u>				
Odeur	Aucune	Aucune	Aucune	Aucune
Couleur	< 15	< 15	< 15	< 15
Turbidité en NFU	0.34	0.32	0.53	0.22
<u>Paramètres physico-chimiques</u>				
pH	7.4	7.1	7.51	7.43
Conductivité en µS/cm	445	492	450.00	453
TAC en °f	17.8	20.4	18.60	18.0
THCa en °f	7.8	7.9	6.30	5.5
THtotal en °f	12.2	14.3	11.30	11.3
Calcium en mg/l	31.2	31.6	25.30	22.0
Magnésium en mg/l	10.8	15.7	12.24	14.2
Chlorures en mg/l			40.00	
MeS en g/l	0.000	0.001	0.00	
<u>Substances indésirables</u>				
Ammonium en mg/l	0.13	0.09	0.129	0.09
Fer en mg/l	0.01	0.01	<0,02	0.06
Manganèse en mg/l		< 0,05	<0,01	< 0,01
Zinc en mg/l		< 0,02		< 0,02
Cuivre en mg/l		< 0,02		0.25

Annexe 2

Calendrier d'exécution de l'essai de nappe du 27 mai au 2 juin 2009

L'essai de nappe est exécuté entre le 27 mai et le 2 juin 2009, avec la collaboration de la SOGEA - qui a permis l'accès sur les sites des forages, la mise à disposition des ouvrages et la mesure du débit de pompage.

- le 26 mai vers 12 heures : Arrêt des pompages sur les forages F1 et F2
- le 26 mai vers 17 heures : Calage et installation des Divers (capteurs automatiques et autonomes de pression) sur les forages F1 et F2. Mesure ponctuelle du niveau pseudo-statique de la nappe.
- le 27 mai à 7h46 : Démarrage de la pompe sur le forage F1. Début du pompage, le débit est fixé autour de 13 m³/h.
- le 27 mai à 12h01 : Installation du Diver sur le piézomètre d'observation Kawéni 1 8".
- du 27 mai à 7h46 au 2 juin à 18h21 : Suivi piézométrique automatisé en continue au moyen de Divers, à raison d'une mesure toutes les 5 minutes, sur les forages F1, F2 et sur le piézomètre d'observation Kawéni 1 8". Suivi piézométrique de vérification à l'aide de la sonde manuelle, sur les forages F1, F2 et sur le piézomètre d'observation Kawéni 1 8". Vérification du débit de pompage, à raison de deux mesures par jour, en début et en fin de journée, pendant les trois premiers jours.
- le 2 juin à 8h01 : Arrêt du pompage sur le forage F1 (fin du test à la descente). Début de la remontée.
- le 2 juin à 18h21 : Mesure ponctuelle à la sonde manuelle du niveau pseudo-statique au terme de la remontée. Retrait des Divers aux forages F1 et F2. Fin de l'opération.
- le 3 juin à 10h46 : Mesure à la sonde manuelle du niveau sur le piézomètre d'observation Kawéni 1 8". Retrait du troisième Diver. Fin de l'acquisition des données

Annexe 3

Données des calculs de pluies efficaces et évapotranspiration du bassin de Kawéni

ALTITUDE	PE JUIN	PE JUILLET	PE AOUT	PE SEPT	PE OCT	PE NOV	PE DEC	PE JANVIER	PE FEVRIER	PE MARS	PE AVRIL	PE MAI	CUMUL
5	0	0	0	0	0	0	0	132	136	58	0	0	325
15	0	0	0	0	0	0	0	147	141	64	0	0	353
25	0	0	0	0	0	0	0	159	146	70	0	0	375
35	0	0	0	0	0	0	2	169	151	75	0	0	397
45	0	0	0	0	0	0	8	175	156	80	0	0	419
55	0	0	0	0	0	0	14	181	160	86	0	0	441
65	0	0	0	0	0	0	20	187	165	91	0	0	463
75	0	0	0	0	0	0	26	193	170	97	0	0	486
85	0	0	0	0	0	0	32	199	175	102	0	0	508
95	0	0	0	0	0	0	38	205	180	108	2	0	532
105	0	0	0	0	0	0	44	211	185	113	5	0	559
115	0	0	0	0	0	0	48	216	188	117	6	0	574
125	0	0	0	0	0	0	52	220	191	120	7	0	590
135	0	0	0	0	0	0	56	224	194	124	8	0	605
145	0	0	0	0	0	0	60	228	196	127	9	0	620
155	0	0	0	0	0	0	64	232	199	131	10	0	635
165	0	0	0	0	0	0	68	236	202	134	11	0	651
175	0	0	0	0	0	0	72	240	205	138	12	0	666
185	0	0	0	0	0	0	76	244	208	141	13	0	681
195	0	0	0	0	0	0	80	248	211	145	14	0	696
205	0	0	0	0	0	0	85	252	213	148	15	0	713
215	0	0	0	0	0	0	91	256	216	151	15	0	730
225	0	0	0	0	0	0	97	260	219	155	16	0	748
235	0	0	0	0	0	0	103	264	222	158	17	0	765
245	0	0	0	0	0	0	109	268	225	162	18	0	783
255	0	0	0	0	0	0	115	272	228	165	19	0	800
265	0	0	0	0	0	0	122	277	231	169	20	0	818
275	0	0	0	0	0	0	128	281	233	172	21	0	835
285	0	0	0	0	0	0	134	285	236	176	22	0	852
295	0	0	0	0	0	0	140	289	239	179	23	0	870
305	0	0	0	0	0	0	146	293	242	183	24	0	887
315	0	0	0	0	0	0	152	297	245	186	25	0	905
325	0	0	0	0	0	0	158	301	248	190	26	0	922
335	0	0	0	0	0	0	165	305	251	193	26	0	940
345	0	0	0	0	0	0	171	309	253	196	27	0	957
355	0	0	0	0	0	0	177	313	256	200	28	0	974
365	0	0	0	0	0	0	183	317	259	203	29	0	992
375	0	0	0	0	0	0	189	321	262	207	30	0	1009
385	0	0	0	0	0	0	195	325	265	210	31	0	1027
395	0	0	0	0	0	0	201	329	268	214	32	0	1044
405	0	0	0	0	0	0	208	334	270	217	33	0	1062
415	0	0	0	0	0	0	214	338	273	221	34	0	1079
425	0	0	0	0	0	0	220	342	276	224	35	0	1097
435	0	0	0	0	0	2	224	346	279	228	36	0	1114
445	0	0	0	0	0	4	228	350	282	231	37	0	1131
455	0	0	0	0	0	6	232	354	285	235	37	0	1149
465	0	0	0	0	0	8	236	358	288	238	38	0	1166
475	0	0	0	0	0	11	240	362	290	241	39	0	1184
485	0	0	0	0	0	13	244	366	293	245	40	0	1201
495	0	0	0	0	0	15	248	370	296	248	41	0	1219
505	0	0	0	0	0	17	252	374	299	252	42	0	1236
515	0	0	0	0	0	19	256	378	302	255	43	0	1254
525	0	0	0	0	0	21	260	382	305	259	44	0	1271
535	0	0	0	0	0	24	264	386	308	262	45	0	1288
545	0	0	0	0	0	26	268	391	310	266	46	0	1306
555	0	0	0	0	0	28	272	395	313	269	47	0	1323

Pluies efficaces mensuelles en fonction de l'altitude

Borne inférieure [Borne supérieure [Effectif	Fréquence	Densité
0	10	2171	0.145	0.015
10	20	1359	0.091	0.009
20	30	641	0.043	0.004
30	40	590	0.039	0.004
40	50	528	0.035	0.004
50	60	306	0.020	0.002
60	70	301	0.020	0.002
70	80	300	0.020	0.002
80	90	302	0.020	0.002
90	100	338	0.023	0.002
100	110	370	0.025	0.002
110	120	335	0.022	0.002
120	130	389	0.026	0.003
130	140	453	0.030	0.003
140	150	438	0.029	0.003
150	160	492	0.033	0.003
160	170	470	0.031	0.003
170	180	443	0.030	0.003
180	190	515	0.034	0.003
190	200	566	0.038	0.004
200	210	482	0.032	0.003
210	220	475	0.032	0.003
220	230	417	0.028	0.003
230	240	249	0.017	0.002
240	250	216	0.014	0.001
250	260	204	0.014	0.001
260	270	177	0.012	0.001
270	280	160	0.011	0.001
280	290	159	0.011	0.001
290	300	145	0.010	0.001
300	310	153	0.010	0.001
310	320	134	0.009	0.001
320	330	92	0.006	0.001
330	340	89	0.006	0.001
340	350	83	0.006	0.001
350	360	61	0.004	0.000
360	370	53	0.004	0.000
370	380	55	0.004	0.000
380	390	43	0.003	0.000
390	400	32	0.002	0.000
400	410	19	0.001	0.000
410	420	27	0.002	0.000
420	430	26	0.002	0.000
430	440	22	0.001	0.000
440	450	10	0.001	0.000
450	460	20	0.001	0.000
460	470	7	0.000	0.000
470	480	17	0.001	0.000
480	490	9	0.001	0.000
490	500	10	0.001	0.000
500	510	3	0.000	0.000

Répartition des surfaces par classes d'altitude (borne inférieure et supérieure en m NGM). Par effectif est entendu le nombre de mailles carrées de 25 m de coté

ALTITUDE (m NGM)	CUMUL	DENSITE SURFACIQUE	CUMUL ANNUEL PONDERE (mm) / SURFACE	CUMUL ANNUEL (mm) CUMUL SURFACE
5	325	0.14516	47.2	47.2
15	353	0.09087	32.1	79.3
25	375	0.04286	16.1	95.3
35	397	0.03945	15.7	111.0
45	419	0.03530	14.8	125.8
55	441	0.02046	9.0	134.8
65	463	0.02013	9.3	144.2
75	486	0.02006	9.7	153.9
85	508	0.02019	10.3	164.2
95	532	0.02260	12.0	176.2
105	559	0.02474	13.8	190.0
115	574	0.02240	12.9	202.9
125	590	0.02601	15.3	218.2
135	605	0.03029	18.3	236.5
145	620	0.02929	18.2	254.7
155	635	0.03290	20.9	275.6
165	651	0.03143	20.4	296.0
175	666	0.02962	19.7	315.8
185	681	0.03443	23.5	339.2
195	696	0.03784	26.4	365.6
205	713	0.03223	23.0	388.6
215	730	0.03176	23.2	411.7
225	748	0.02788	20.8	432.6
235	765	0.01665	12.7	445.3
245	783	0.01444	11.3	456.6
255	800	0.01364	10.9	467.6
265	818	0.01183	9.7	477.2
275	835	0.01070	8.9	486.2
285	852	0.01063	9.1	495.2
295	870	0.00970	8.4	503.7
305	887	0.01023	9.1	512.7
315	905	0.00896	8.1	520.8
325	922	0.00615	5.7	526.5
335	940	0.00595	5.6	532.1
345	957	0.00555	5.3	537.4
355	974	0.00408	4.0	541.4
365	992	0.00354	3.5	544.9
375	1009	0.00368	3.7	548.6
385	1027	0.00288	3.0	551.6
395	1044	0.00214	2.2	553.8
405	1062	0.00127	1.3	555.1
415	1079	0.00181	1.9	557.1
425	1097	0.00174	1.9	559.0
435	1114	0.00147	1.6	560.6
445	1131	0.00067	0.8	561.4
455	1149	0.00134	1.5	562.9
465	1166	0.00047	0.5	563.5
475	1184	0.00114	1.3	564.8
485	1201	0.00060	0.7	565.5
495	1219	0.00067	0.8	566.4
505	1236	0.00020	0.2	566.6

Calcul de la pluie efficace du bassin de Kaouénilajoli par classe d'altitude (de 10 m en 10 m) et cumulée ensuite en fonction de l'altitude.

Annexe 4

Inventaire des activités et industries potentiellement polluantes en amont et au droit des forages d'exploitation AEP de Kawéni (Commune de Mamoudzou)

Activités	Contaminants potentiels	Utilisations et sources	Observations
Menuiserie et travail du bois	Polychlorés Biphényles (PCB) Composés phénoliques Dioxines et furanes Huiles et graisses minérales et synthétiques déterminées par la méthode des hydrocarbures pétroliers (C ₁₀ -C ₅₀). Hydrocarbures halogénés totaux (HHT)	Protection et préservation du bois Imprégnation du bois Transformation du bois	Activités très fréquentes dans la zone de Kawéni. Ateliers souvent individuels et de faible importance. Dangerosité moyenne à faible Des PCB ont déjà été retrouvés dans la nappe.
Stockage de peinture, solvants et vernis	Hydrocarbures aromatiques monocycliques (HAM) Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) Hydrocarbures halogénés totaux (HHT)	Solvants, vernis-décantation Peinture et teinture Vernis Peintures	Activités très fréquentes dans la zone de Kawéni. Entrepôts souvent commerciaux et de faible importance. Dangerosité très faible à faible.
Garage automobile	Huiles et graisses minérales et	Entretien des automobiles	Activités très fréquentes dans la

	synthétiques déterminées par la méthode des hydrocarbures pétroliers (C ₁₀ -C ₅₀).		zone de Kawéni. Garages, souvent individuels et de faible importance. Dangerosité très faible à faible.
Rejets d'eaux usées domestiques	Matière organique Oxydable (DCO, DBO) Hydrocarbures aromatiques monocycliques (HAM) Hydrocarbures halogénés totaux (HHT)	Détergents Désinfectant	Activités très fréquentes dans la zone de Kawéni. Rejets journaliers de volume importants. Dangerosité faible (eau souterraine) à moyenne (eau de surface).
Incineration de débris divers dans les cours d'eau.	Dioxines et furanes Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	Combustion incomplète de matières organiques chlorées (Ex : PCB). Combustion de matières organiques en présence de produits chlorés. Chauffage de matières organiques en présence de produits chlorés. Combustion incomplète de matières organiques.	Activité peu fréquente dans la zone de Kawéni. volume de déchets parfois important. Dangerosité faible (eau souterraine) à moyen (eau de surface).
Transport routier	Hydrocarbures (essence, gasoil...)	Accidents de la route (citerne, cuves, etc...)	Forte fréquentation par les camions-bennes et les transporteurs de contenants dans la zone de Kawéni.

			Dangerosité quasi nul à très faible.
Activité agricole	Composés phénoliques Hydrocarbures aromatiques monocycliques (HAM) Hydrocarbures halogénés totaux (HHT)	produits phytosanitaires pesticides chlorés (DDT, Lindane...)	Activité fréquente dans la zone de Kawéni. Pratiques agricoles souvent traditionnelles. Dangerosité quasi nulle.

 Tableau 1 : Sources potentielles de contaminants organiques.

Activités	Contaminants potentiels	Utilisations et sources	Observations
Menuiserie et travail du bois	Métaux lourds : Arsenic (As) Bore (B) Cadmium (Cd) Chrome (Cr) Cuivre (Cu) Étain (Sn) Mercure (Hg) Zinc (Zn)	Protection et préservation du bois Imprégnation du bois Transformation du bois Vernis	Activités très fréquentes dans la zone de Kawéni. Ateliers souvent individuels et de faible importance. Dangerosité quasi nulle à faible. Des métaux lourds ont déjà été retrouvés dans la nappe
Stockage de peinture, solvants et vernis	Métaux lourds : Aluminium (Al) Chrome (Cr) Plomb (Pb)	Solvants, vernis-décantation Peinture Vernis Produits décapants	Activités très fréquentes dans la zone de Kawéni. Entrepôts souvent commerciaux et de faible importance. Dangerosité très faible

			à faible.
Garage automobile	<p>Métaux lourds :</p> <p>Antimoine (Sb)</p> <p>Chrome (Cr)</p> <p>Manganèse (Mn)</p> <p>Molybdène (Mo)</p> <p>Plomb (Pb)</p> <p>Sulfures (S²⁻)...</p>	<p>Accumulateurs au plomb</p> <p>Huiles de moteur usées</p> <p>Batterie</p> <p>Agents anti-détonants (essence)</p> <p>Lubrifiants</p>	<p>Activités très fréquentes dans la zone de Kawéni. Garages souvent individuels et de faible importance.</p> <p>Dangerosité très faible à faible.</p>
Rejets d'eaux usées domestiques	<p>Métaux lourds :</p> <p>Manganèse (Mn)...(très rares)</p>	<p>Détergents</p> <p>Désinfectant</p>	<p>Activités très fréquentes dans la zone de Kawéni. Rejets journaliers de volume importants.</p> <p>Dangerosité faible (eau souterraine) à moyenne (eau de surface).</p>
Incinération de débris divers dans les cours d'eau.	<p>Composés azotés</p> <p>+ HAP, furanes, dioxines, etc...</p>	<p>Combustion de produits pétroliers.</p>	<p>Activité peu fréquente dans la zone de Kawéni. volume de déchets parfois important.</p> <p>Dangerosité faible (eau souterraine) à moyenne (eau de surface).</p>
Décharge sauvage	<p>Métaux lourds :</p> <p>Antimoine (Sb)</p> <p>Cadmium (Cd)</p> <p>Nickel (Ni)</p> <p>Zinc (Zn)...</p>	<p>Accumulateurs au plomb</p> <p>Piles (Ni-Cd)</p> <p>Piles sèches alcalines</p>	<p>Activité fréquente dans la zone de Kawéni. volume de déchets parfois important.</p> <p>Dangerosité quasi-nulle (eau souterraine) à moyenne (eau de surface).</p>

<p>stockage de ciment et autres matériaux de construction</p>	<p>Base OH Métaux lourds : Aluminium (Al) Fluorures (F⁻) Manganèse (Mn)...</p>	<p>Matériau de construction Déroutillant</p>	<p>Activité très fréquente dans la zone de Kawéni. Entrepôts souvent commerciaux et de faible importance. Dangerosité très faible à faible.</p>
<p>Activité agricole</p>	<p>Composés azotés Composés phosphorés Métaux lourds en traces: Arsenic (As) Bore...</p>	<p>produits phytosanitaires engrais pesticides (DDT...) épandage agricole</p>	<p>Activité fréquente dans la zone de Kawéni. Pratiques agricoles souvent traditionnelles. Dangerosité quasi nulle.</p>

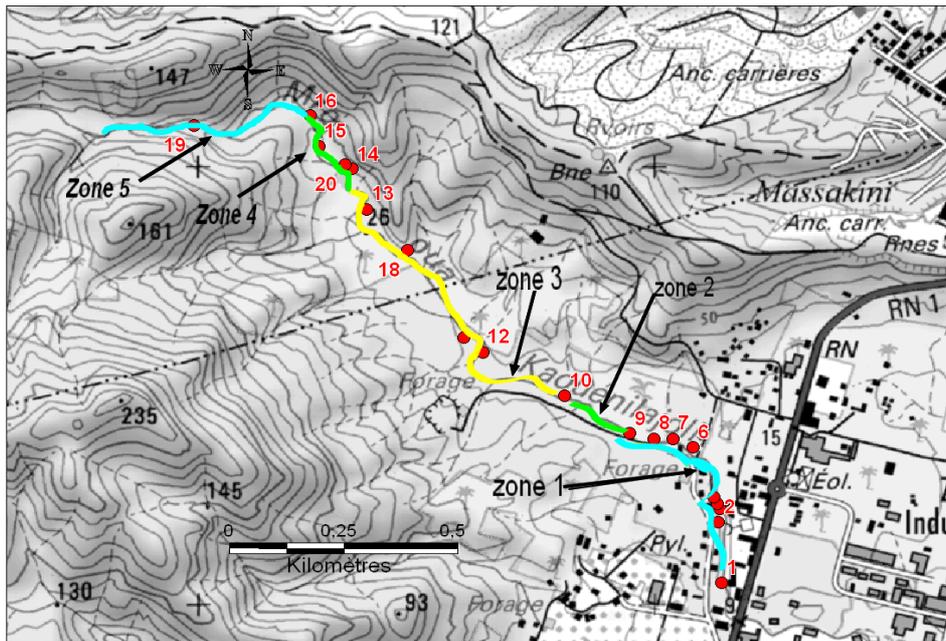
Tableau 2 : Sources potentielles de contaminants inorganiques.

Annexe 5

Compte rendu des sorties de reconnaissance des 15 et 16 juin 2009

Introduction

L'objectif de ces excursions sur le terrain en pleine période d'étiage consiste à observer la présence ou non d'écoulement superficiel dans la rivière Kaouénilajoli, retrouver les puisards recensés en saison pluvieuse et enfin, repérer un site accessible et favorable à la réalisation d'un test de capacité d'absorption (TCA).



Sortie 1 du 15/06/09 : Kaouénilajoli

- Zone 1 : entre les points 6 et 9 :



On observe un écoulement à un très faible débit estimé à 1 ou 2 L/s. Cet écoulement peut provenir soit des eaux usées rejetées par les habitations présentes sur les deux rives, soit d'un écoulement épidermique qui se manifesterait par la présence de zones d'exfiltration.



On note la présence de puits qui servent à stocker l'eau de la rivière pendant la saison sèche. Cette eau est utilisée sans traitement préalable pour un usage quotidien (lavage de

véhicules, lessive, douche, vaisselle, cuisine...).

On remarque sur la rive droite plusieurs décharges sauvages, des carcasses de voitures et des accumulateurs brisés. On note également une intense érosion des berges.

- **Zone 2 : entre les points 9 et 10 :**



On rencontre une succession de petits bassins aux eaux stagnantes, entre lesquels aucun écoulement superficiel n'est observé. Quelques puits asséchés sont présents. On remarque un petit trou de 60cm de diamètre sur 40cm de profondeur dont le fond est encore humide. Cette humidité pourrait indiquer une faible capacité d'absorption du matériau tapissant le lit de la

rivière dans cette zone.

- **Zone 3**

Sur ce tronçon du cours d'eau (jaune), aucun écoulement superficiel n'est constaté. Les puits rencontrés sont complètement secs. La lithologie est constituée de dépôts de pyroclastites.

Sortie 2 du 16/06/09

- **Zone 4**

On retrouve une succession de bassins séparés d'une dizaine de mètres. Ces bassins sont probablement en connexion, mais aucun écoulement superficiel n'est visible. On observe un changement lithologique. Les formations de pyroclastites laissent place au basalte.

- **Zone 5**

On rentre progressivement dans les basaltes $\beta 3$ sains. Ici, le lit de la rivière est creusé dans les basaltes. On observe des blocs de basalte de taille plurimétrique. On remarque un écoulement dont le débit est estimé à 1 L/s. On rencontre des petites cascades (5 à 7 m) et des bassins. Dans les basaltes altérés apparaissent des zones d'exfiltration.



Conclusions

Les observations effectuées durant ces deux sorties de reconnaissance montrent un écoulement de faible débit localisé en zone amont et en zone aval. Sur le tronçon intermédiaire du cours d'eau, aucun écoulement superficiel n'est observé mis à part quelques bassins aux eaux stagnantes.

D'autre part, les puisards repérés sur le lit de la rivière pendant la saison pluvieuse n'ont pas été retrouvés. Aussi, quelques interrogations subsistent. D'où proviennent les eaux alimentant l'écoulement de la zone aval ? Quelle est la part des exfiltrations par rapport aux eaux usées rejetées par les habitations environnantes ? Qu'est-il arrivé aux puisards recensés en saison pluvieuse (cf. rapport BRGM/RP-56773-FR) ? L'objectif de la prochaine sortie sera d'apporter des éléments de réponse à toutes ces questions.

*

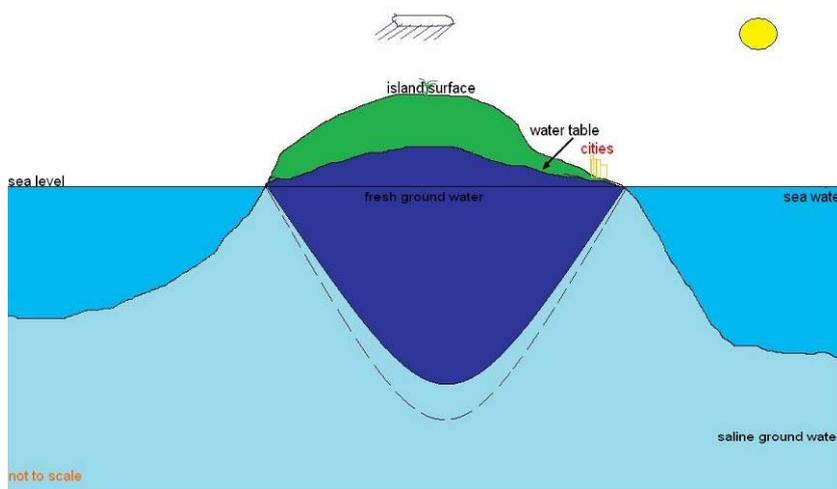
Annexe 6 Spécificité des aquifères côtiers : cas de Kawéni (commune de Mamoudzou – Mayotte)

*Rapport de stage de Anli Bourhane
Master 1^{ère} année à l'université de la Réunion*

I. INTRODUCTION

L'objectif de cette synthèse consiste à rassembler et combiner les informations disponibles dans la littérature et relatives aux spécificités et aux problématiques des aquifères côtiers. Le résultat de ce travail n'est donc pas exhaustif. Il peut être complété ou actualisé à tout moment en fonction des avancées de la science dans ce domaine. Le lecteur pourra se référer à Custodio (1985; 1997; 2002) et Bear *et al.* (1999) pour une présentation plus complète. Cependant, dans le cadre de l'étude sur les modalités d'exploitation et de protection de l'aquifère côtier de Kawéni, il a paru pertinent de revenir sur deux notions essentielles associées aux aquifères côtiers et qui font souvent l'objet de vision erronée (Custodio, 2004) : l'interface eau douce/eau de mer et l'origine de la salinité des aquifères côtiers.

En domaine intracontinental, l'eau souterraine circule vers le niveau de base local. Sur les îles et en zone littorale, le niveau de base local est directement la mer ou l'océan.



*Illustration A1.
Lentille d'eau douce à la base des aquifères insulaires*

Les aquifères côtiers demeurent pour cette raison le théâtre d'un compromis hydrodynamique dont les règles sont complexes entre les eaux douces et salées. En outre, un aquifère étant par essence perméable, l'eau de mer peut aussi y pénétrer et contaminer progressivement le stock d'eau douce, de façon saisonnière ou permanente et parfois de manière irréversible. On parle alors d'intrusion marine. Les deux milieux vont ainsi s'affronter selon des règles simples en théorie, mais complexes dans la réalité. A partir de quelques études de cas, on se propose d'illustrer ici les origines, les conséquences et les méthodes de gestion de cette problématique.

II. PROBLEMATIQUE

Les menaces qui pèsent sur cette ressource sont de différentes natures (contamination, surexploitation...). Le plus souvent celles-ci tiennent leur origine de l'activité anthropique, qui peut aussi agir comme facteur aggravant.

Dans le contexte des changements climatiques que l'on connaît, l'accès à l'eau potable s'annonce extrêmement difficile pour certaines régions du monde dans les décennies à venir. Pour la plupart, il s'agit des régions les plus défavorisées et aussi les plus instables. De cette façon, certains considèrent dorénavant et déjà cette ressource comme étant le problème majeur du nouveau millénaire et l'enjeu principal d'éventuels conflits inter ou intra-étatiques.

Aussi, c'est dans un tel climat que l'Homme voit la nécessité de préserver et mieux gérer dans la limite du possible les réserves d'eau douce.

Les eaux souterraines constituent 30 % des réserves d'eau douce de la planète. L'accès à cette eau est relativement facile pour la majorité de la population et l'exploitation plus rentable. Les glaciers et couvertures neigeuses permanentes représentent 68,7 % de l'eau douce terrestre mais demeurent difficilement exploitables. Les eaux de surface (permafrost, lacs, rivières...) représentent 1,3 % de l'eau douce. Elles sont plus faciles d'accès mais plus vulnérables aux contaminations.

Par ailleurs, avec une concentration de 80 % de la population mondiale sur les zones littorales et une croissance exponentielle des consommateurs (9 Milliards en 2050 selon les estimations), les réserves d'eau souterraine connaissent une surexploitation sans précédent. Elles se trouvent ainsi exposées d'une part à la pression des activités anthropiques de plus en plus consommatrices d'eau et d'autre part à la surconsommation de la ressource qui entraîne notamment la problématique de l'intrusion marine.

On explique souvent l'invasion marine par la surexploitation des aquifères côtiers liée à la concentration de la population et des activités anthropiques (infrastructures industrielles, agricoles, balnéaires, portuaires, communications, etc.) sur les côtes et les plaines littorales. Seulement, en raison de sa rareté dans certaines régions et de sa vulnérabilité dans d'autres, l'eau souterraine reste une ressource vitale et revêt parfois d'un caractère stratégique.

III. ORIGINE ET CONSEQUENCES DE LA POLLUTION SALINE

a) L'interface eau douce-eau salée

En raison de la présence d'eau de mer dans les formations aquifères, une zone de contact se forme sous le niveau de la mer, entre l'eau douce plus légère (masse volumique $\rho_f \sim 1000 \text{ g/L}$) s'écoulant vers la mer et l'eau de mer sous-jacente plus lourde (masse volumique $\rho_s \sim 1025 \text{ g/L}$), cf.

Illustration .

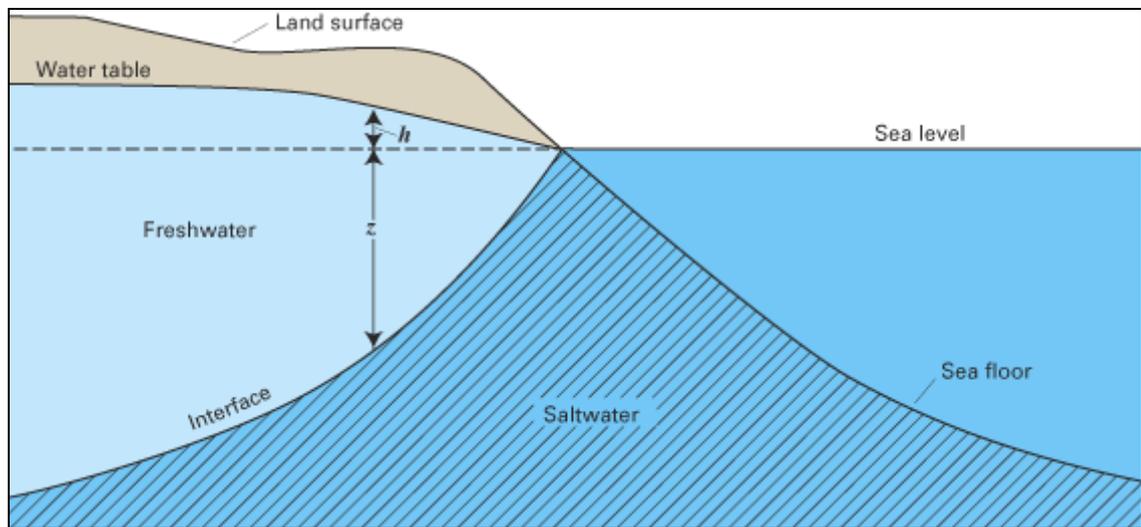


Illustration A2. le biseau salé entre la nappe et la mer

Déterminer la forme ainsi que la position de la zone de contact entre l'eau douce et l'eau de mer a motivé de nombreuses recherches depuis plus d'un siècle ; les premières recherches sont réalisées par Ghyben (1889) et Herzberg (1901) à la fin du 19^{ème} siècle.

b) L'approximation de Ghyben-Herzberg

Les aquifères littoraux poreux ont été étudiés à la fin du XIX^{ème} siècle par Ghyben et Herzberg sur la base du principe des équilibres hydrostatiques.

Dans un aquifère poreux à l'équilibre, les deux milieux se mélangent très peu. En effet, l'eau douce, moins dense ($\rho_f = 1$) flotte sur l'eau de mer ($\rho_s = 1,025$) avec un contact incliné assimilé à un plan. L'interface dont la position est liée à la différence de densité des deux milieux demeure statique et ceci tant que le poids

de la colonne d'eau douce reste égal à celui de la colonne d'eau de mer. La loi de Ghyben-Herzberg définit la position du contact entre les deux milieux à l'équilibre comme suit (à mettre en relation avec l'illustration A) : $\rho_f \times (h_1 + h_2) = \rho_s \times h_2$ soit approximativement $h_2 = 40 \times h_1$, avec h_2 : la profondeur de l'interface, h_1 : la charge hydraulique (ou niveau piézométrique) par rapport au niveau de base et ρ_f : densité de l'eau douce et ρ_s : densité de l'eau de mer.

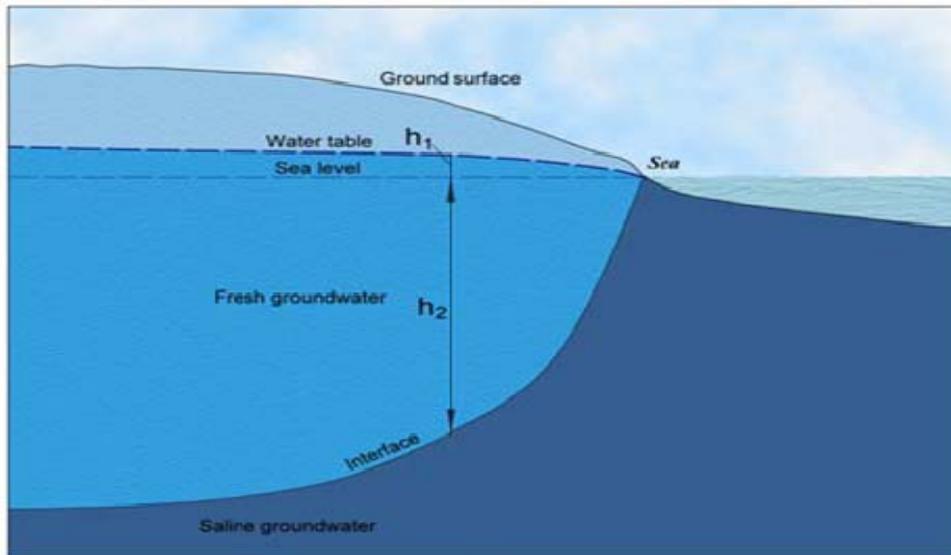


Illustration A3. Position de l'interface eau douce-eau salée (British Geological Survey. © NERC. [IPR/47-4])

En première approximation, l'interface entre l'eau douce et l'eau de mer peut être assimilée à une limite franche. Les conditions d'équilibre entre l'eau douce et l'eau salée peuvent alors être décrites par le principe de Ghyben-Herzberg. Cette approximation correspond au cas de 2 fluides non miscibles, de densités différentes, en équilibre hydrostatique. L'eau de mer est supposée immobile et l'aquifère est supposé homogène avec une répartition hydrostatique des pressions. On considère plus fréquemment un équilibre dynamique, en régime permanent, où la composante verticale de l'écoulement dans l'aquifère est négligeable (hypothèse de Dupuit).

La profondeur de l'interface est déterminée en résolvant l'équation d'équilibre entre les charges de 2 fluides de densité différente (cas analogue à un tube en U, cf. Illustration). La profondeur de l'interface est alors proportionnelle à la piézométrie ; la référence étant le niveau moyen local de la mer (Zéro m NGM¹ à Mayotte).

¹ Nivellement Général de Mayotte

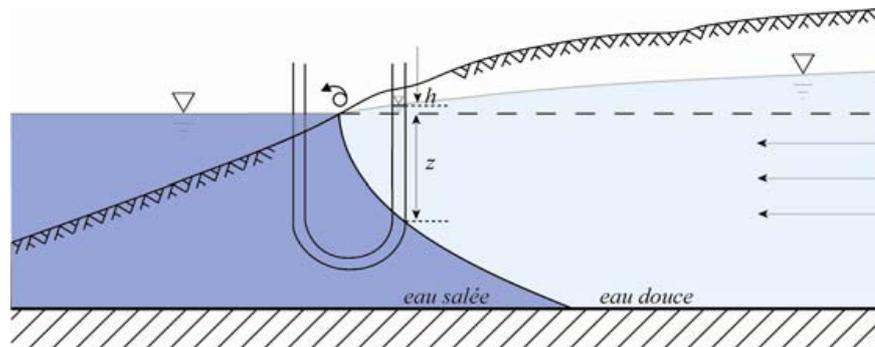


Illustration A4. Position de l'interface selon le modèle de Ghyben-Herzberg (d'après Custodio (2002) ; modifié, extrait de V. de Montety, 2008) et détermination de la profondeur de l'interface. L'échelle verticale a été exagérée par rapport à l'échelle horizontale.

Cet équilibre est rompu lorsqu'un changement de poids intervient sur l'une des deux colonnes, généralement lié à la variation d'épaisseur des couches d'eau. Dans le cas où l'aquifère se recharge suffisamment, la nappe d'eau s'épaissit, devient plus lourde et la position de l'interface migre en profondeur et l'eau douce s'écoule vers la mer. Dans le cas contraire, la couche d'eau douce s'amincit, devient plus légère, la position de l'interface remonte et l'eau salée s'introduit dans l'aquifère. On observe alors une avancée du biseau salé. La couche d'eaux saumâtres envahit l'aquifère : on est alors face à une invasion marine.

Seulement, si un tel scénario peut être observé dans les conditions naturelles, notamment en cas de sécheresse et d'abaissement saisonnier des charges hydrauliques, il devient de plus en plus fréquent en zones côtières surpeuplées. La surexploitation modifie les charges hydrauliques et entraîne l'établissement d'un nouvel équilibre et la migration du biseau salé. La surconsommation de la ressource par un pompage excessif pour subvenir aux besoins des activités humaines (irrigation intensive, industries, consommation domestique, etc.) entraîne le rabattement de la nappe. Ce prélèvement provoque une remontée verticale du biseau salé sous le forage, qui peut donc atteindre 40 fois la valeur de rabattement observé. Cette arrivée indésirable d'eau salée détériore sérieusement la qualité de la ressource.

c) Les conséquences de la salinisation

Les effets délétères de l'intrusion marine ne sont pas ressentis seulement au niveau des caractéristiques qualitatives de l'eau souterraine mais surtout sur la fertilité des sols agricoles des champs irrigués. L'irrigation altère le bilan hydrique du sol en générant un apport d'eau supplémentaire; cet apport est toujours associé à un apport de sels. En effet, même une eau douce de la meilleure qualité contient des sels dissous et, si la quantité de sels apportée par cette eau peut sembler négligeable, les quantités d'eau apportées au fil du temps entraînent un dépôt cumulé de sels dans les sols qui peut s'avérer considérable. L'eau s'évapore mais les sels restent et s'accumulent. Lorsque cette eau destinée à

l'irrigation est initialement fortement salée, l'impact de la salinisation du sol est ainsi augmenté.

Dans les régions arides, l'effet est d'autant plus marqué : les eaux de surface et les eaux souterraines sont relativement riches en sels (parce que l'eau s'est infiltrée dans des sols qui contiennent généralement des minéraux facilement altérables) et le climat sec crée une perte par évaporation élevée. Ceci se traduit par la nécessité de grandes quantités d'eau pour l'irrigation des cultures.

Dans le contexte d'une intrusion marine, ce dépôt de sels dans les sols agricoles augmente de façon alarmante. Si l'eau d'irrigation appliquée contient des quantités relativement significatives d'ions sodium (Na^+) par rapport aux quantités présentes d'ions magnésium (Mg^{2+}) et d'ions calcium (Ca^{2+}), et en particulier si l'ion bicarbonate (HCO_3^-) est aussi présent, les ions sodium peuvent alors saturer la majeure partie des sites d'échanges colloïdaux. Ceci est à l'origine de la formation de sols sodiques. C'est un type de sol extrêmement peu fertile. Dans la plupart des régions du monde, la perte de sols fertiles par salinisation peut avoir des répercussions tragiques sur les populations.

IV. MÉTHODES DE MISE EN ÉVIDENCE

Pour déceler les zones de pollution marine ainsi que les zones sensibles, une approche pluridisciplinaire est adoptée. Cette approche combine méthodes géophysiques, géochimiques et hydrodynamiques.

En fonction du contexte, et du budget alloué au projet, des méthodes complémentaires peuvent être entreprises afin de mieux cerner toutes les caractéristiques de la problématique.

a) L'étude piézométrique

Les cartes piézométriques tracées (corrigées en terme de densité) renseignent sur le sens d'écoulement de l'eau souterraine. Dans le cas d'une invasion marine, les courbes piézométriques indiquent un écoulement qui se fait de la mer vers l'aquifère. L'écoulement souterrain peut être localement détourné sous l'influence des pompages excessifs. Au bord de la mer où les fluctuations sont quasi nulles, la côte piézométrique est presque égale à celle de la mer et même moins à certains endroits, ce qui n'empêche pas l'eau de mer de pénétrer à l'intérieur des terres, selon les règles hydrodynamiques. Toute dépression même légère de la surface piézométrique peut se traduire, même si le niveau demeure au-dessus de la mer, par une élévation considérable de l'interface qui peut rapidement atteindre le fond du puits.

b) L'étude chimique

En présence d'une invasion marine, on observe que la salinité augmente de plus en plus vers la mer, ainsi que vers les zones de dépression piézométrique, avec

un faciès chimique des eaux qui tend à évoluer vers un enrichissement en sodium et en chlore ($7 < \text{Na}^+ < 35$ méq/l et $15 < \text{Cl} < 50$ méq/l)). Le développement de ce type de salinité pourrait être un indice d'une invasion marine. Quelquefois, le passage de faibles aux fortes concentrations est brutal (le resserrement des courbes d'isoconcentration est très marqué), indice d'une intrusion salifère.

La salinité de type (Na, Cl) est associée à des valeurs de conductivité électrique élevées, ce type de salinité s'observe surtout dans les zones qui sont proches de la mer. Dans cette zone, c'est le pompage lui-même qui est le moteur de l'intrusion marine. Il est alors évident que plus celui-ci est intense et prolongé, plus le degré de pollution augmente. Ainsi, l'exploitation de la nappe doit être contrôlée de près, de façon à éviter l'extension de la pollution. D'autre part, l'accroissement des concentrations est dirigé vers la zone qui correspond à la dépression piézométrique, au voisinage du puits de pompage.

c) Conductivité et résistivité

Afin de délimiter la zone polluée, il peut s'avérer nécessaire de procéder à une analyse géophysique, notamment, une campagne de mesure de la conductivité σ ou de la résistivité ($\rho = 1/\sigma$) du matériau constituant l'aquifère. En présence d'une intrusion marine, les valeurs de résistivité pour différentes profondeurs décroissent vers la mer. Les résistivités peuvent atteindre des valeurs de 1 à 5 $\Omega \cdot \text{m}$ dans le cas d'aquifères contaminés.

V. GESTION ET TECHNOLOGIES DE REMÉDIATION

a) Le pompage saisonnier

Face à une telle problématique, une gestion des aquifères paraît indispensable. L'une des méthodes de gestion serait par exemple le pompage alterné. Cette méthode consiste à mettre en place un puits de pompage en zone amont de l'aquifère et un deuxième puits de pompage en zone aval. Pendant la période hivernale, alors que la recharge de la nappe atteint son niveau maximal, le pompage se ferait exclusivement dans la zone aval de l'aquifère pour minimiser les pertes vers la mer.

Ensuite, pendant la période estivale, alors que la nappe atteint son plus bas niveau, le pompage se ferait cette fois-ci seulement en zone amont de l'aquifère pour limiter le rabattement en aval et empêcher ainsi l'intrusion marine (cf. Illustration).

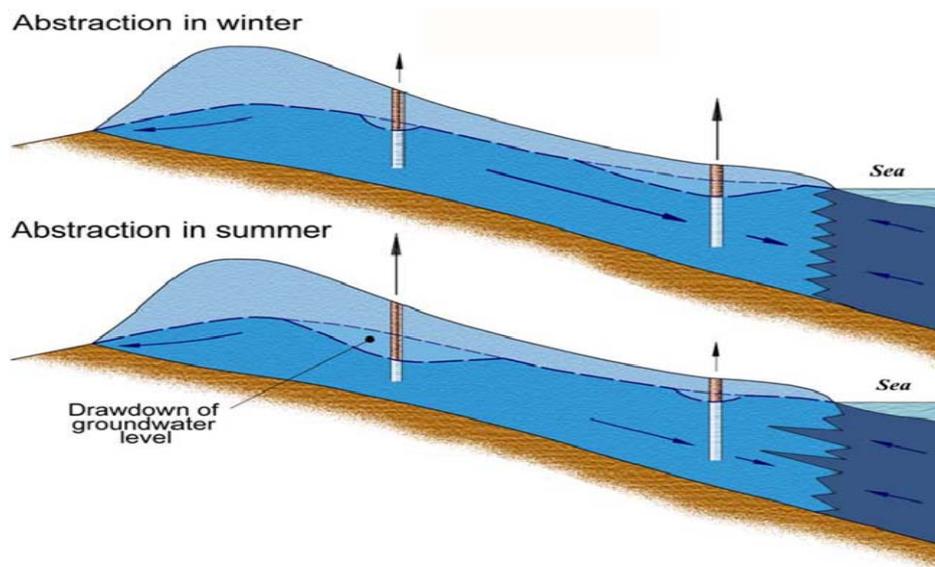


Illustration A5. Le pompage saisonnier (British Geological Survey. © NERC. All rights reserved [IPR/47-4]).

Une autre méthode de prévention de la salinisation et de protection des nappes côtières qui présentent un risque d'intrusion marine serait l'adoption d'un système d'exploitation adéquat. Ce système veillerait à ce que le volume annuel prélevé de la nappe soit inférieur à la recharge total.

Les dépressions des niveaux piézométriques peuvent en effet entraîner un avancement du biseau salé.

La position des pompes ou des crépines et le débit de pompage doit être bien étudié. Étant donné les conditions climatiques et les exploitations intensives, la mise en place d'un réseau de surveillance du niveau de la nappe et de la salinité est nécessaire.

b) La recharge artificielle

La recharge artificielle consiste en une réalimentation intentionnelle (par opposition à une réalimentation naturelle ou accidentelle) d'une réserve souterraine par l'acheminement d'eaux de surface. Il existe cinq techniques courantes pour procéder à la recharge artificielle d'un bassin hydrogéologique : l'épandage d'eau, les fosses de recharge, les puits de recharge, la recharge induite qui consiste à pomper de l'eau à partir de puits voisins des réserves de surface de manière à induire une augmentation de l'appel des eaux vers le puits (IDRC¹).

Face à une intrusion marine déclarée, les méthodes de lutte recommandées consistent à une réduction du pompage d'eau souterraine dans les zones sensibles, un arrêt du fonctionnement des forages qui captent l'interface eau douce - eau salée et une réalimentation artificielle de la nappe. Cette méthode est parfois coûteuse et demande des connaissances précises sur les paramètres hydrologiques et hydrogéologiques de la zone concernée.

Enfin, on peut avoir recours à la mise en place des barrières hydrauliques (la recharge de la nappe avec de l'eau douce le long de la côte sur les zones proches de la mer ou le pompage des eaux salées de l'aquifère, ou encore une combinaison des deux méthodes, cf. le cas du Conté d'Orange U.S, synthèse Wuilleumier A. et al., 2008, rapport BRGM/RP-55063-FR).

VI. CONCLUSION

Le phénomène d'intrusion marine demeure une problématique universelle et constitue une menace sérieuse pour les réserves en eau douce souterraine des zones côtières. De plus, il s'avère que les activités anthropiques sont en partie responsables de cette pollution saline, notamment par le biais de pompage excessif en zone littorale surpeuplée et particulièrement en saison estivale. Cette forte demande de la ressource provoque un rabattement de la nappe et engendre une perturbation au niveau de l'interface eau douce - eau salée.

A terme, cette sollicitation excessive des réserves de l'aquifère accentue l'avancée des eaux marines vers le continent. L'exploitation dans ce type de zone doit donc être contrôlée de près, de façon à éviter la contamination et l'extension de la pollution. Il est ainsi indispensable de proposer des périmètres de protection pour les aquifères côtiers et plus particulièrement en pays semi-aride à aride où les ressources en eau sont limitées.

Enfin, l'utilisation des eaux contaminées par l'invasion marine pour l'irrigation pourrait engendrer des problèmes de salinisation des sols et avoir des répercussions dramatiques pour les populations. L'utilisation d'outils de gestion adaptés au contexte et la conscientisation des populations sont deux éléments à mettre en application.



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

Service géologique régional de Mayotte”
9, centre Amatoula, Z.I. de Kawéni
BP 363
97600 – Mamoudzou France
Tél. : 02 69 61 28 13