

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

Année 3

Rapport final

BRGM/RP-56773-FR
Décembre 2008



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

Année 3

Rapport final

BRGM/RP 56773-FR
Décembre 2008

A. Malard, K. Vaudour, A. Winckel

Vérificateur :

Nom : V.Petit
Date : 01/12/2008

Approbateur :

Nom : P.Puvilland
Date : 04/12/2008

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, vulnérabilité, Kawéni, Kaouénilajoli, Mayotte, Comores, France

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

Malard A., Vaudour K., Winckel A. (2008) – Modalités d'exploitation et de protection de l'aquifère de Kawéni – Année 3 – BRGM/RP-56773-FR, 116 p., 33 ill., 7 ann.

© BRGM, 2007, 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 » a débuté en 2003, et ce pour une durée prévisionnelle de 3 ans¹. Le projet a fait l'objet de deux rapports d'avancement parus respectivement en 2004 et 2005 et concernant les années 1 et 2 (rapports BRGM/RP-53161-FR et 54082-FR).

Selon le cahier des charges initial, les objectifs généraux 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 reconnaisances géologiques réalisées en mars 2004 ont permis d'acquérir de précieuses informations géologiques 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 (absence de nivellement des puits oblige) 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 du biseau salé 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...);
- 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

En année 3, une synthèse et une actualisation des informations collectées en années 1 et 2 ainsi que de nouveaux éléments, non pris en compte dans le cahier des charges initial, ont permis de répondre à la majorité des objectifs fixés en intégrant un volet qualitatif non abordé jusqu'alors. Cette caractérisation physico-chimique de la ressource en eau s'appuie sur pas moins de 120 analyses multi-paramètres et permet d'avancer dans le domaine de l'hydrochimie. Les résultats des travaux sont les suivants :

- Un modèle géologique « préalable » a été réalisé ainsi qu'un modèle hydrogéologique mettant en évidence un aquifère potentiel profond
- Les jaugeages réalisés lors de cette étude et les observations de terrain réalisées dans la rivière de Kaouénilajoli ont permis de confirmer les mécanismes envisagés de recharge de l'aquifère et de déterminer une zone d'infiltration préférentielle sur une distance de 350 m environ.
- Une diminution des niveaux piézométriques de l'aquifère volcano-sédimentaire a été mise en évidence. Cette baisse est probablement consécutive à l'exploitation des forages AEP mais peut être également expliquée ou amplifiée par d'autres facteurs conditionnant la recharge (raccourcissement de la saison humide) et dans une moindre mesure par l'abaissement du niveau de base à savoir le niveau marin en régression dans cette partie du globe en réponse aux changements climatiques modernes (hypothèse à vérifier).
- Les examens hydrochimiques des forages F1, F2 et Kawéni 3 10'' ont montré que la mise en exploitation de la zone a conduit à une homogénéisation probable des eaux mais ne montrent pas de contamination significative de la nappe par intrusion des eaux marines.
- L'étude de vulnérabilité de la zone d'étude a permis de mettre en évidence une dégradation de la rivière, notamment dans sa partie aval (dégradation physique et pollution). Les activités en présence (activités artisanales, agricoles et industrielles) et les pratiques actuelles de la population de Kawéni (décharges sauvages sur les berges en pente de la rivière, nettoyage dans la rivière, absence d'assainissement) traduisent la présence et l'usage de nombreux polluants entraînant de réels risques de pollution et de dégradation de la rivière de la Kaouénilajoli

Ces résultats suggèrent la nécessité d'une poursuite d'étude et d'une surveillance des paramètres qui contraignent l'aquifère à savoir (i) quantifier dans la limite des données historiques disponibles les processus de recharge, transfert et vidange de l'aquifère (ii) comprendre l'évolution qualitative et quantitative de la ressource (iii) préciser le modèle géologique et mettre en œuvre un modèle numérique de fonctionnement de l'aquifère dont le développement pourra – à long terme – s'avérer précieux en termes de prédiction et de gestion de l'évolution de la ressource en eau souterraine.

Sommaire

1. Introduction	9
2. Synthèse des données existantes	11
2.1. LES FORAGES DE KAWENI, UNE SOURCE CAPITALE D'INFORMATIONS	11
2.2. LE MODELE GEOLOGIQUE CONCEPTUEL DE LA DEPRESSION DE KAWENI.....	14
2.2.1. Données géologiques / lithologiques disponibles	14
2.2.2. Données géophysiques	17
2.3. IMPLICATIONS HYDROGEOLOGIQUES D'UNE GEOLOGIE COMPLEXE....	24
3. Eléments de caractérisation de la nappe de Kawéni.....	27
3.1. CARACTERISATION HYDROCHIMIQUE DE L'AQUIFERE.....	27
3.1.1. Etude de la qualité des eaux des forages	27
3.1.2. Conclusions générales sur la caractérisation physico-chimique des eaux souterraines de Kawéni	43
3.2. EVOLUTION QUANTITATIVE DE LA NAPPE	45
3.2.1. Evolution de la pluviométrie depuis 1993	45
3.2.2. Examen de la chronique piézométrique de l'ouvrage de Kawéni 1 8''	46
3.3. MODALITES DE RECHARGE DE L'AQUIFERE.....	51
3.3.1. Des variations annuelles conditionnées exclusivement par les précipitations en saison des pluies.....	51
3.3.2. La rivière de Kaouénilajoli, alimentation supposée principale de l'aquifère de Kawéni.....	53
3.4. LE LAGON, LIMITE AVAL DE L'AQUIFERE DE KAWENI.....	60
3.4.1. Examen des chroniques marines	60
3.4.2. La conductivité de la nappe de Kawéni, un indicateur de la proximité du milieu marin ?	62
4. Un aquifère vulnérable qu'il convient de protéger	67
4.1. INDUSTRIES, COMMERCES ET ACTIVITES DE SERVICE	67
4.2. LA RIVIERE DE KAOUENILAJOLI, VULNERABLE ET TRES EXPOSEE.....	69

5. Programme d'étude pour l'année 2009	71
5.1. QUANTIFICATION DE LA RESSOURCE ET DE SES MECANISMES	71
5.2. MESURE ET COMPREHENSION DE L'EVOLUTION DE LA RESSOURCE EN QUANTITE ET QUALITE	72
5.3. MODELISATION DE L'EVOLUTION DE LA RESSOURCE (POST 2009)	72
6. Conclusion.....	73
7. Bibliographie	75

Liste des illustrations

Illustration 1 : Localisation des forages et piézomètres de la zone de Kawéni (campagnes de foration 1990 et 2000).....	11
Illustration 2 : Les 7 ouvrages de Kawéni et leur utilisation.....	12
Illustration 3 : Chronique piézométrique de Kawéni 1 10" de 2002 à aujourd'hui.....	13
Illustration 4 : Chronique piézométrique de Kawéni 1 8" de 1993 à aujourd'hui.....	13
Illustration 5 : Coupe lithologique synthétique passant par les forages 14, 13 et 11	15
Illustration 6 : Modèle géoélectrique synthétique propre aux campagnes	17
Illustration 7 : Localisation des panneaux et sondages électriques (source rapport BRGM/RP-53161-FR).....	18
Illustration 8 : Tableau récapitulatif des informations apportées par les profils géophysiques.....	19
Illustration 9 : Isohypses du toit de la formation résistante et trace de la coupe en rouge (AB=1260 m). Le quadrillage est de 100 m de coté	20
Illustration 10: Isohypses du mur de la formation résistante. Le quadrillage est de 100 m de coté	21
Illustration 11 : Coupe synthétique de la formation résistante	22
Illustration 12: Formations aquifères rencontrées par les forages de Kawéni	25
Illustration 13 : forages à l'origine des analyses.....	27
Illustration 14 : nombre d'analyse des paramètres majeurs.....	29
Illustration 15 : vérification de la balance ionique des analyses.....	34
Illustration 16 : représentation du faciès chimique des eaux par diagramme de Piper.....	35
Illustration 17 : Diagramme chlorure/sodium des eaux souterraines de Kawéni	36
Illustration 18 : liste des hydrocarbures polycycliques aromatiques recherchés dans les eaux souterraines de kawéni entre 2003 et 2004 par le CRECEP	41

Illustration 19 : liste des produits phytosanitaires recherchés dans les eaux souterraines de Kawéni entre 2003 et 2004 par le CRECEP	42
Illustration 20 : Cumul des précipitations en saison humide et en saison sèche enregistrées à la station pluviométrique de Mamoudzou pour les années 1993 et 1994 et de la Convalescence entre 1995 et 2006. Les années sèches de 2002 et de 2004 n'ont pas été représentées en raison de lacunes de données trop importantes.	45
Illustration 21 : Chronique piézométrique de Kawéni 1 8" de 1993 à aujourd'hui. Variations piézométriques en m NGM.	47
Illustration 22 : Amplitudes annuelles de la recharge et de la vidange de l'aquifère au droit du forage de Kawéni 1 8"	48
Illustration 23 : Variations piézométriques annuelles de l'ouvrage de Kawéni 1 8"	50
Illustration 24 : Comportement hydrologique annuelle schématique de l'aquifère de Kawéni.....	50
Illustration 25 : Influence des précipitations sur l'amplitude de la recharge(en bleue) et de la vidange (en orange) de l'aquifère de Kawéni au droit du piézomètre de Kawéni 1 8".....	51
Illustration 26 : Influence simple de la durée de tarissement de l'aquifère sur l'amplitude des vidanges. Il est important de noter que le point à l'extrémité gauche a un poids très fort dans la régression. La qualité de cette dernière doit être moindre.	52
Illustration 27 : La rivière de Kaouénilajoli	53
Illustration 28 : Profil topographique du lit mineur de la rivière Kaouénilajoli. Les différentes sections correspondent à des changements lithologiques (cf. carte lithologique en Annexe 1). La disposition des unités lithologiques est ici schématique et ne doit pas être interprétée en profondeur.....	55
Illustration 29 : La localisation des zones d'infiltration est dépendante du régime hydrologique de la rivière au moment de la reconnaissance.....	59
Illustration 30 : Chroniques des fluctuations marines enregistrées à Dzaoudzi depuis 1993 à nos jours. La chronique piézométrique de Kawéni 1 8" est superposée.....	61
Illustration 31 : Comparaison des niveaux statistiques marins enregistrés à Dzaoudzi entre la période 1993/2000 et 2000/2008	62
Illustration 32 : Mesures de conductivité aux ouvrages AEP de Kawéni F1, F2 depuis 1992 et 3 10" depuis 2002	63
Illustration 33 : Mesures de conductivité aux ouvrages AEP de Kawéni F1, F2 et 3 10" depuis janvier 2007	64

Liste des annexes

Annexe 1	Carte lithologique de la dépression de Kawéni	77
Annexe 2	Eléments du modèle géologique 3D du secteur de Kawéni	81
Annexe 3	Récapitulatif des analyses physico-chimiques des ouvrages d'eau souterraine de Kaouénilajoli	87
Annexe 4	Observations des sorties de reconnaissance des 22 et 25 novembre 2008 dans la Kaouénilajoli.....	91
Annexe 5	Variation du niveau moyen des mers.....	99
Annexe 6	Jaugeages de la rivière Kaouénilajoli.....	103
Annexe 7	Inventaires des données disponibles	109

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 rapports des années 1 et 2 sont parus respectivement en 2004 et 2005. Le présent rapport de « l'année 3 » vient clôturer le programme d'étude. Ce rapport souffre d'un retard important en raison (i) des profondes modifications qui ont affecté la zone d'étude et ont contraint de réviser le cahier des charges initiales et (ii) des difficultés et des retards dans les concertations entre les partenaires qui ont aussi eu pour conséquence le ralentissement voire l'arrêt temporaire du programme d'étude.

Ce rapport final présente non seulement une synthèse des travaux et rapports précédents mais apporte également une mise à jour des informations de 2003/2004 (informations géologiques par le biais d'autres études réalisés dans le secteur de Kawéni, informations hydrogéologiques par le biais du suivi des piézomètres d'études, etc.) ainsi que des éléments nouveaux permettant à la fois de répondre à la majorité des objectifs fixés dans le cahier des charges³ initial ainsi que des volets alternatifs qui n'ont pas été envisagés lors de sa signature.

Conformément au cahier des charges, la présente étude apporte les éléments relatifs à :

- la confrontation, la synthèse et la mise à jour des informations géologiques, géophysiques, géomorphologiques, hydrologiques et hydrogéologiques disponibles sur la zone d'étude ;
- l'établissement d'un modèle géométrique conceptuel géologique « 3D » de la structure du ou des aquifère(s) et de son (leur) encaissant;
- l'établissement d'un modèle conceptuel préliminaire du fonctionnement hydrogéologique du (des) aquifères ;
- l'évolution tendancielle du potentiel en eau souterraine, tant en quantité qu'en qualité et à des recommandations d'études et de monitoring complémentaire dans le but de pérenniser la ressource exploitée.

Il est à noter que certains travaux initialement prévus n'ont pas pu être réalisés et ce, pour les raisons suivantes :

- l'instrumentation de l'aquifère et du bassin versant : sur les 4 ouvrages non exploités disponibles dans la dépression de Kawéni, 3 ouvrages, devenus

³ Cahier des charges prévisionnel sur 3 ans (programmation initiale de Service Public du BRGM 2002, 2003 et 2004) signé le 05/01/2004

- hors d'usage au cours de l'étude (vandalisme, inaccessibilité, recouvrement) n'ont pu être équipés d'un dispositif de suivi piézométrique ;
- le suivi d'une durée de 18 mois des niveaux piézométriques : en ce qui concerne les ouvrages équipés. Ce suivi n'a pas été réalisé en raison de l'absence de nivellement (initialement prévu en début d'étude et dont la charge revenait à la Collectivité Départementale de Mayotte). L'incertitude de l'altitude du sol (de l'ordre du mètre) est bien supérieure à celle liée à la mesure ;
- suivi de nappe lors de l'exploitation de nouveaux forages : au cours de l'étude, le forage de Kawéni 3 10" a été mis en exploitation (2004). Et pour les raisons expliquées précédemment, il n'a pas été possible de suivre l'influence de sa mise en exploitation sur le parc de piézomètres de Kawéni.

Les volets alternatifs abordés dans la présente étude et non prévus au cahier des charges initial sont les suivants :

- l'étude des modalités de recharge de l'aquifère par l'observation naturaliste et la réalisation de jaugeages au sel de la rivière de la Kaouénilajoli ;
- l'analyse précise de la chronique piézométrique de l'ouvrage de Kawéni 1 8", à savoir l'unique chronique disponible dont les mesures sont à jour afin d'approcher les fonctionnements hydrogéologiques de la nappe et d'interpréter les évolutions tendanciennes ;
- la caractérisation hydrochimique de l'aquifère : examen et interprétation des analyses physico-chimiques (SIEAM, SOGEA, DASS) disponibles sur les 3 forages en exploitation ;
- l'étude des variations marines de Mayotte ;
- les compléments d'informations sur les risques potentiels de pollution de la nappe.

Cependant, des précautions doivent être prises quand aux résultats présentés. Ceux-ci sont limités aux données disponibles lors de l'étude :

- le nombre limité d'ouvrages dans la dépression de Kawéni : seulement 7 (dont 3 hors d'usage), tous situés en amont de la zone ;
- il n'existe qu'une seule chronique piézométrique exploitable en ce qui concerne la nappe profonde ;
- l'absence de nivellement des forages et des puits peut - dans certains cas - induire une imprécision conséquente sur la mesure (de l'ordre du mètre) ;
- l'évolution urbaine, artisanale et industrielle de la zone industrielle de Kawéni n'est pas toujours ordonnée et rend le recensement des risques difficiles et probablement non exhaustif.

Une compilation des données existantes et des compléments d'étude permettront donc dans un premier temps de présenter un état des lieux des connaissances géologiques et hydrogéologiques acquises jusqu'alors dans la dépression de Kawéni et dans un second temps de caractériser la nappe de Kawéni en terme de géométrie, fonctionnement, qualité, disponibilité et vulnérabilité. Enfin, un programme d'études complémentaires sera proposé en vue de préciser les modalités d'exploitation et de protection de l'aquifère de Kawéni.

2. Synthèse des données existantes

Cette synthèse des données a été réalisée à partir des rapports des années 1 et 2 (BRGM/ RP-54082-FR et BRGM/ RP-53161) et du rapport BRGM/RP-56600-FR de caractérisation des masses d'eau souterraine à Mayotte (réalisation septembre 2008). Ces données sont notamment issues :

- des forages et puits implantés dans la dépression de Kawéni ;
- des cartographies disponibles : cartographies lithologiques, cartographies piézométriques ;
- des données géophysiques et hydrogéologiques disponibles sur la zone d'étude ;

2.1. LES FORAGES DE KAWENI, UNE SOURCE CAPITALE D'INFORMATIONS

Lors des campagnes de foration de 1990 et 2000, 4 forages et 3 piézomètres ont été réalisés dans la dépression de Kawéni (Illustration 1 et Illustration 2). Il est important de préciser que des opérations de nivellement n'ont pas été effectuées sur tous les ouvrages et qu'en leur absence, une cote approximative (sur la base du MNT⁴) leur a été attribuée.

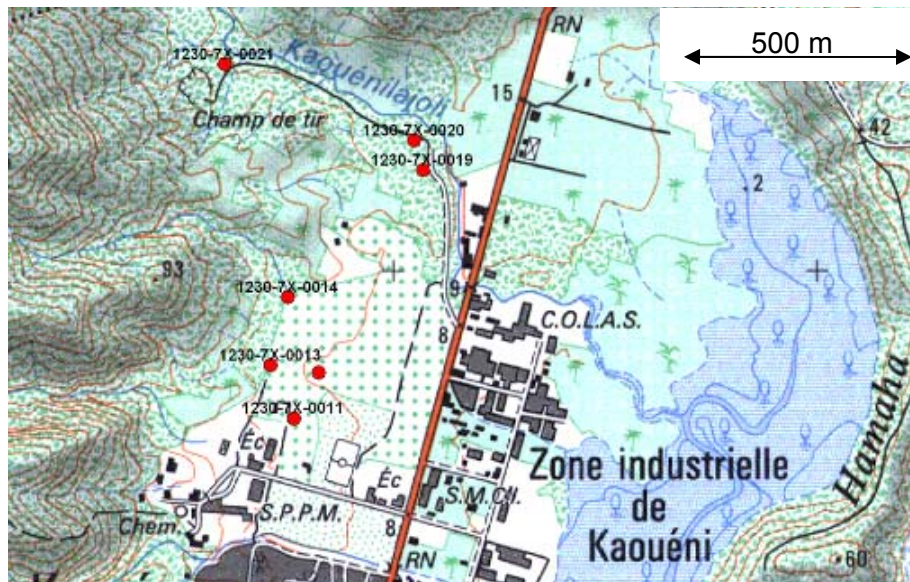


Illustration 1 : Localisation des forages et piézomètres de la zone de Kawéni (campagnes de foration 1990 et 2000)

⁴ Modèle Numérique de Terrain

En 2008, 3 forages sur les 4 sont exploités par la SOGEA pour l'alimentation du réseau AEP. L'aquifère de Kawéni fournit en moyenne 60 m³/h ce qui le place parmi les ressources stratégiques les plus importantes de l'île.

Code BSS	Désignation	Campagne	Profondeur (m)	Utilisation	Référence rapport
12307X0013	Kawéni F1	1990/1991	42	Exploité AEP 15 m ³ /h	91 REU 14
12307X0014	Kawéni F2	1990/1991	40	Exploité AEP 12 m ³ /h	91 REU 14
12307X0011	Kawéni 1 8" Kawe 1	1990/1991	50	Piézomètre BRGM	R35165 REU 4S 92
12307X0012	Kawéni 2 8" Kawe 2	1990/1991	31	Piézomètre hors d'usage	R35165 REU 4S 92
12307X0019	Kawéni 1 10" Kawéni aval	1999/2000	47	Piézomètre hors d'usage	RP-50428-FR
12307X0020	Kawéni 2 10" Kawéni aval	1999/2000	51	Forage hors d'usage	RP-50428-FR
12307X0021	Kawéni 3 10" Kawéni amont	1999/2000	61	Exploité AEP 30 m ³ /h	RP-50428-FR

Illustration 2 : Les 7 ouvrages de Kawéni et leur utilisation

Le piézomètre Kawéni 1 8" fait l'objet d'un suivi manuel par la DAF⁵ depuis 1993 et d'acquisitions automatiques réalisées par le BRGM depuis juin 2008. Les niveaux piézométriques de l'aquifère sont également suivi de manière épisodique (difficultés d'accès à la parcelle) par la DAF au niveau du forage de Kawéni 1 10". Les chroniques sont présentées en Illustration 3 et Illustration 4.

⁵ Direction de l'Agriculture et de la Forêt de Mayotte

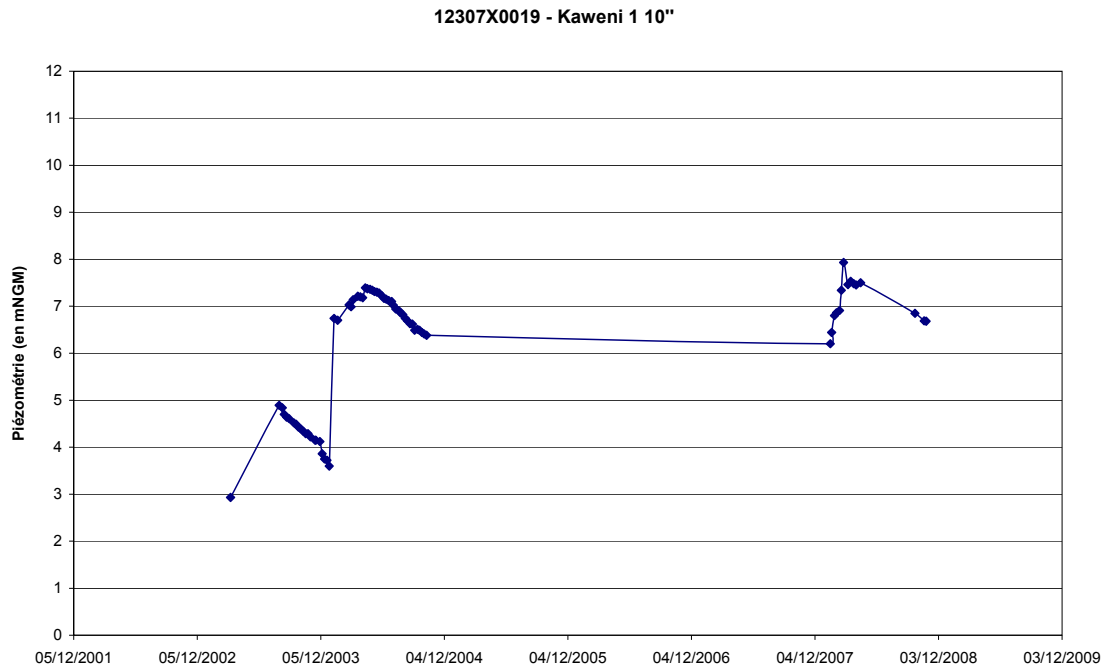


Illustration 3 : Chronique piézométrique de Kawéni 1 10" de 2002 à aujourd'hui

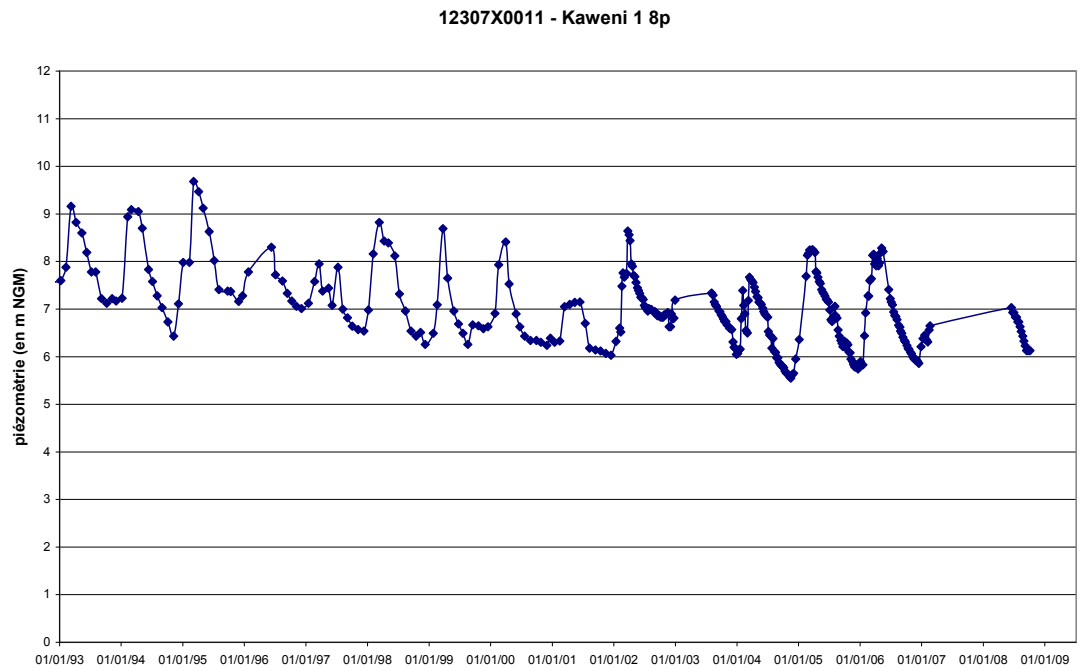


Illustration 4 : Chronique piézométrique de Kawéni 1 8" de 1993 à aujourd'hui

A la lecture des deux chroniques, seule celle de Kawéni 1 8'' est exploitable à des fins hydrogéologique compte tenu de l'historique important et du suivi assidu. Néanmoins, dans le détail, il est possible que certaines valeurs de la chronique soient douteuses en raison des nombreux changements des opérateurs et du mode opératoire depuis 1993. L'examen de cette chronique est présenté en 3.2.2.

La chronique du piézomètre de Kawéni 1 10' ne sera pas exploitée dans la présente étude compte tenu des lacunes trop importantes.

2.2. LE MODELE GEOLOGIQUE CONCEPTUEL DE LA DEPRESSION DE KAWENI

2.2.1. Données géologiques / lithologiques disponibles

En année 1, la réinterprétation des cuttings des ouvrages 1237X0020 et 1237X0021 et les prospections de terrain ont permis de réviser la structure géologique du site et de proposer une histoire géologique générale du secteur de Kawéni (rapport BRGM/RP-53161-FR, p23).

Les analyses des cuttings et les coupes géologiques nous permettent de retenir les éléments suivants :

- forage 1237X0013 (F1) : recouvrement important de limons argileux (18 m) surmontant un niveau de basaltes altérés (7 m) puis présence de formations alluvionnaires de sables gris noir (17 m) ;

- forage 1237X0014 (F2) : les limons argileux (26 m) surmontent des alluvions sableuses, limoneuses (11 m), basaltes altérés en profondeur ;

- forages 1237X0011 et 1237X0012 : les formations traversées sont constituées de limons, d'altérites, de basaltes altérés et de formations alluvionnaires ;

Une coupe lithologique interprétative passant par les forages 14, 13 puis 11 a été réalisée en Illustration 5. Ces forages, localisés en bordures du maar⁶, présentent une variabilité lithologique latérale et verticale. La présence en surface de limons et argiles d'altération (plusieurs mètres d'épaisseur), mise en évidence dans ces 4 logs, est un argument favorable à la limitation des risques de pollution directe par infiltration dans cette zone du cratère.

⁶ Maar : cratère d'explosion en forme de cuvette large de quelques dizaines à quelques centaines de mètres, entouré d'un rempart mince de débris volcaniques (tufs, ponces, cendres....)

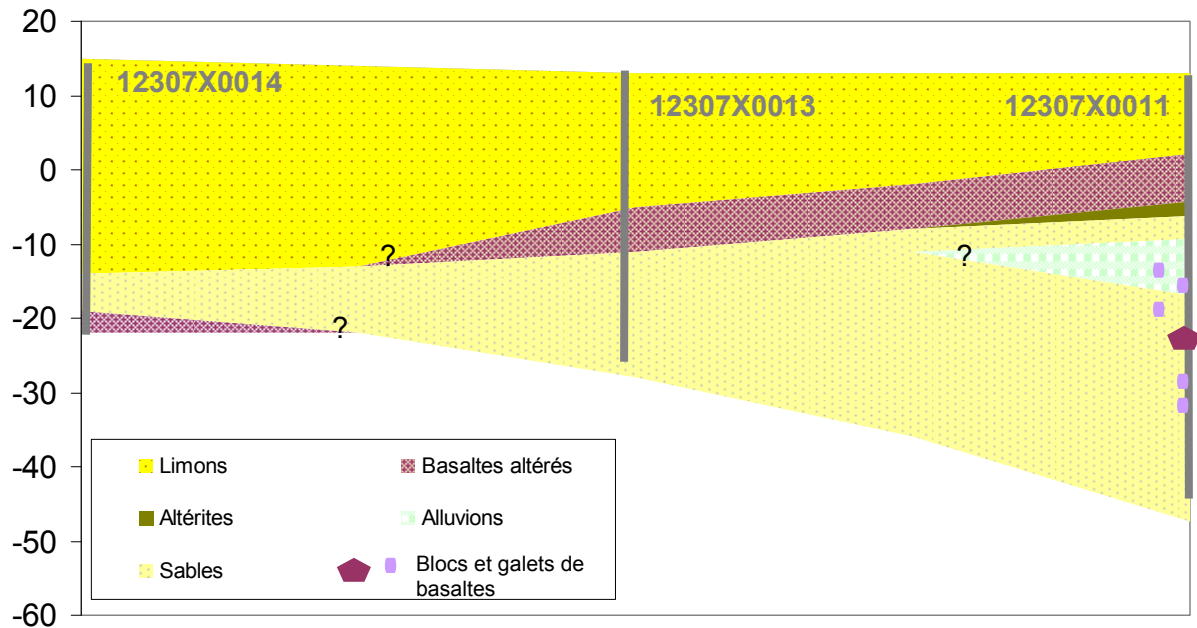


Illustration 5 : Coupe lithologique synthétique passant par les forages 14, 13 et 11

- forages 1237X0019, 1237X0020 et 1237X0021 : d'après les logs des forages 1237X0020 et 1237X0019, localisés en aval de la rivière de la Kaouénilajoli, on distingue à partir d'une trentaine de mètres de profondeur une unité pyroclastique⁷ (cendres et lapilli) surmontée de dépôts sédimentaires d'origine alluviale d'environ 25 mètres d'épaisseur (absence d'indice de niveau marin tels que des coraux) marquant une période de calme volcanique. Enfin, est présente en surface (environ sur les 7 premiers mètres) une unité de cendres et brèches cendreuses. Il est à noter qu'on ne retrouve pas ces dépôts alluviaux (certainement en raison de la pente) et de cendres dans le forage 1237X0021 situé plus en amont dans la rivière. En effet, on observe sur les 40 premiers mètres une succession de lapilli et scories⁸ à matrice cendreuse, puis sans matrice en deça.

De manière générale, des formations sédimentaires ont été recoupées par ces forages. Il s'agit exclusivement de formations alluviales dont la nature des matériaux est souvent due au remaniement des pyroclastites et cendres, au sein desquelles aucun indice de niveau mis en place en contexte marin n'a été mis en évidence dans

⁷ Pyroclastique : se rapporte à toute lave résultant de la fragmentation du magma lors d'une éruption explosive. On distingue par ordre croissant de diamètre des particules : les poussières (<0,2 mm), les cendres (de 0,2 à 2 mm), les lapilli (de 2 à 64 mm) et les blocs.

⁸ Scorie : fragment de lave à surface irrégulière plus ou moins rugueuse dont les bulles ou vacuoles correspondent aux vides provoqués par le dégazage du magma. On distingue les scories de projection qui sont des pyroclastites (lapilli, blocs) éjectées lors d'une éruption explosive, des scories de progression formées par fragmentation du magma, à la base et au sommet des coulées de lave.

cette partie amont du cratère. Par ailleurs, il apparaît que les dépôts de l'intérieur de la cuvette formée par l'explosion hydromagmatique de Kawéni sont composés, sur une puissance minimale de 60 mètres, de pyroclastites en place ou remaniés à granulométrie variable (sables fins, sables grossiers, graviers). Celles-ci sont parfois remaniées par le cours d'eau, particulièrement en bordure de la Kaouénilajoli et reprises dans les formations alluviales.

A la lecture de la carte lithologique (projet « Synthèse hydrogéologique du Nord-Est de Mayotte. Caractérisation des masses d'eau souterraine des secteurs de Petite Terre et de Tsoundzou-Koungou » RP-56600-FR) présentée en Annexe 1 et réalisée sur la base de résultats géophysiques, de relevés de terrain et de coupes de forages, il est possible d'illustrer les phénomènes géologiques suivants.

- i. Le substratum a été simplement mis en évidence par le biais des profils géophysiques (§ 2.2.2) mais n'a jamais été rencontré en surface. Les travaux géologiques précédents semblent rattacher cette formation ancienne à l'édifice volcanique septentrional qui marque le substratum du nord de l'île mais dont on ne sait finalement que peu de choses, si ce n'est que cette formation semble très altérée, ce qui rend sa détermination difficile.
- ii. Les unités surmontant le substratum (socle rocheux sain de forte résistivité) du cratère de Kawéni sont identifiées comme étant des basaltes de faciès β_2 , rencontrées en amont du cratère, et s'enfonçant progressivement par le jeu des failles bordières (il est important de noter que l'existence de ces dernières est fortement supposée mais non encore réellement démontrée). La nature de ce basalte et sa géométrie n'étant pas encore tout à fait confirmées, il est possible qu'une partie de cette structure soit en réalité formée par des pyroclastites indurées (Illustration 11).
- iii. En recouvrement de ces unités viennent se déposer des scories, attribuées au volcanisme récent du M'Tsapéré ainsi que des pyroclastites dont l'origine est liée aux explosions phréato-magmatiques violentes responsables de la formation de la dépression circulaire de Kawéni. Ces dépôts se retrouvent dans la dépression de Kawéni (dépôts pyroclastiques en place ou remaniés) ainsi qu'à la périphérie sud mais essentiellement nord et nord-est de la dépression (dépôts pyroclastiques en forme de croissant issus de retombées et de déferlantes qui dévalent les pentes du cratère ainsi formé). Le style géologique du cratère de Kawéni met bien en évidence l'important remplissage volcano-sédimentaire tardif du cratère qui constitue la formation aquifère la plus intéressante du secteur. Cette formation aquifère peut être assimilée à un milieu poreux bien que dans le détail, les horizons soient très hétérogènes.
- iv. En amont de la dépression (dans la partie ouest essentiellement) le style géologique fait apparaître un enchevêtrement de coulées basaltiques comblant des paléovallées. Le substratum identifié est le basalte de faciès β_2 . Il est entaillé par de profondes paléovallées qui ont été comblées par des coulées basaltiques de faciès β_3 . Par la suite, des coulées de trachyandésite viennent combler les paléovallées entaillées dans les formations sous-jacentes. Jusqu'à

présent, ce type de coulée n'a été identifié que dans le secteur amont du cratère de Kawéni. Des coulées de téphrites et de basaltes récents (faciès ankaramites) viennent en recouvrement des formations sous-jacentes.

- v. Le cours d'eau de la Kaouénilajoli entaille l'ensemble des formations et déposent des alluvions plus ou moins hétérogènes.
- vi. Au centre et à l'est de la dépression, des formations sédimentaires de mangrove et de plage se déposent au gré des marées.

2.2.2. Données géophysiques

La localisation des travaux géophysiques (4 panneaux et 18 sondages électriques) réalisés sur le secteur de Kawéni est rappelée sur l'illustration 7 et en Annexe 1. Ils permettent de mettre en évidence un certain nombre de structures géoélectriques dont les plus résistantes constituent les objectifs prioritaires pour la recherche de ressource en eau. Il est à noter que les terrains superficiels montrent une variabilité latérale de résistivité, cohérente avec la variabilité de faciès des différents horizons que l'on peut observer. En effet, les premiers terrains superficiels rencontrés peuvent correspondre à des dépôts fluviaux (profil C localisé le long de la rivière) ou bien marins, comme on peut le supposer au niveau du profil A - localisé à proximité de la mangrove - et qui présente un horizon de surface très conducteur (5 ohm.m), les sables et limons ayant une résistivité plus élevée.

L'illustration 6 présente la correspondance entre la lithologie rencontrée et les gammes de résistivités mesurées lors de la campagne géophysique réalisée en 2003 dans le secteur de Kawéni. Il est important de préciser que cette échelle n'a qu'une valeur locale et qu'il est délicat de l'appliquer sur d'autres secteurs de l'île.

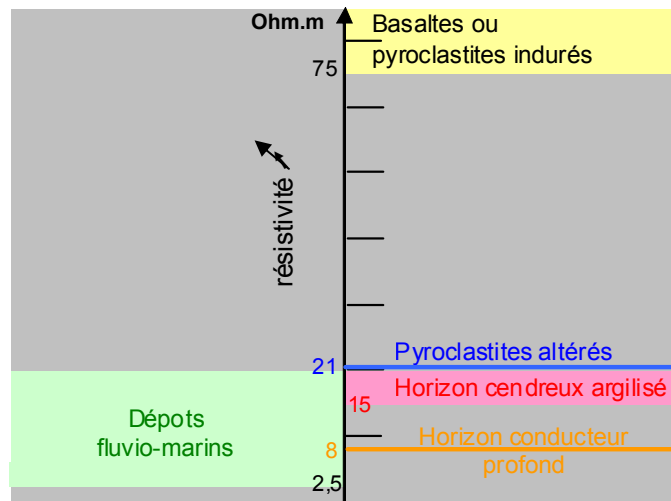


Illustration 6 : Modèle géoélectrique synthétique propre aux campagnes géophysiques réalisées en 2003 à Kawéni

Le modèle géoélectrique par ordre croissant de profondeur est le suivant :

- i. Sédiments fluvio-marins (de 2.5 à 20 ohm.m): Il peut s'agir de formations sédimentaires récentes parfois à dominante alluviale parfois à dominante palustre (mangrove).
- ii. Horizon cendreux argilisé localisé sur le flanc ouest du cratère (forages 1237X0020 et 1237X0019), résistivité comprise entre 15 et 20 ohm.m.
- iii. Formation conductrice de surface : Il s'agit de pyroclastites altérées présentant une résistivité de l'ordre de 21 ohm.m. Cette unité est présente de manière discontinue au niveau du profil B.

Les méthodes électriques ne permettent pas de distinguer clairement ces formations les unes des autres. L'épaisseur de ces unités conductrices est croissante vers le centre du cratère (50 m profil A, 25-30 m profil C). Elle est présente de manière discontinue au niveau du profil B. Les résistivités sont de plus en plus faibles en direction de la mangrove. Les formations correspondent d'avantage à des dépôts pyroclastiques altérés en amont du cratère et à des dépôts fluvio-marins (résistivité plus faible) dans la partie plus centrale de la dépression.

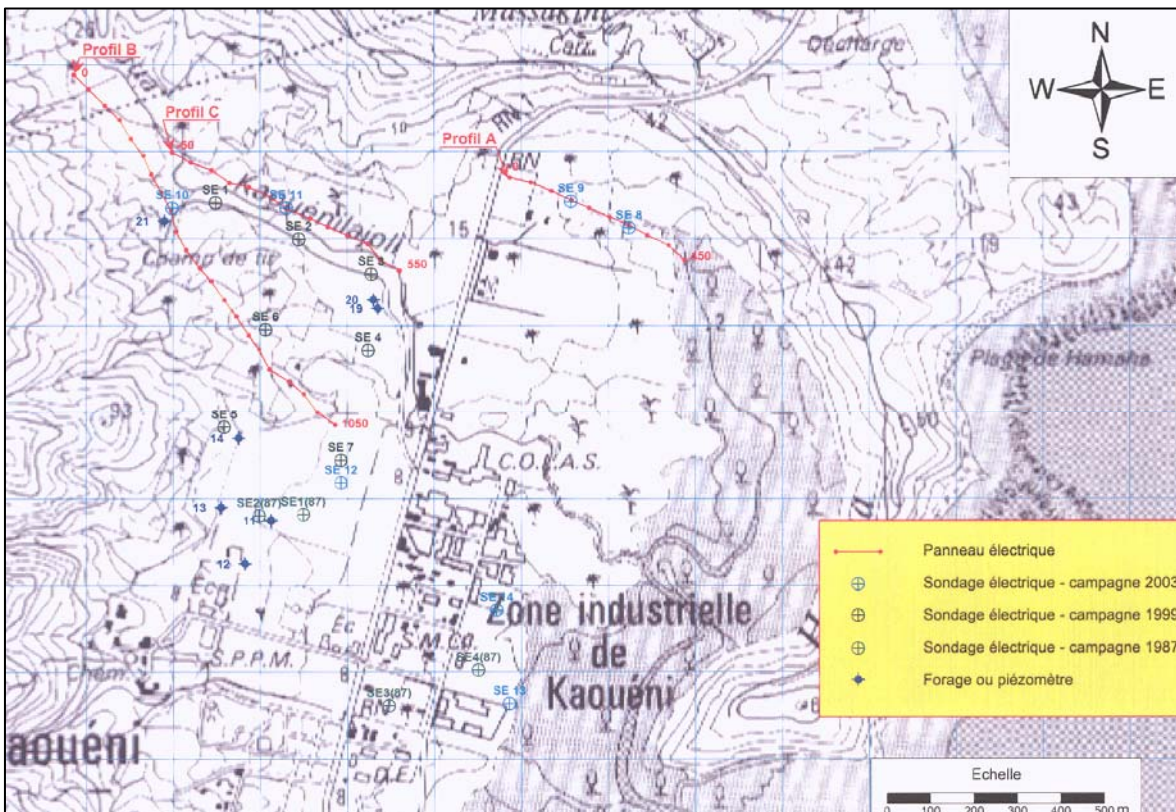


Illustration 7 : Localisation des panneaux et sondages électriques (source rapport BRGM/RP-53161-FR)

- iv. Formation résistante de l'ordre de 75 ohm.m pouvant correspondre à des basaltes β_2 (identifiés en amont) ou à des pyroclastites indurées et fissurées (comme recoupée par le forage 21) ou au deux, dont l'épaisseur varie de 30 m à 100 m de l'amont vers l'aval du profil B avec un pendage apparent vers le SE. Son épaisseur est également relativement importante (70 à 80 m) au niveau du profil C et semble augmenter vers le centre du cratère de Kawéni. Cette structure est pseudo-tabulaire au niveau des profils A et C et sans discontinuités ni en amont ni en aval. Par ailleurs, la limite inférieure de cette unité au niveau du profil A et C n'a pas été atteinte.
- v. Formation conductrice profonde de 8 ohm.m (substratum conducteur) de nature inconnue et présente au niveau du profil P2 et en partie amont du profil B à partir de 70 m de profondeur.

La synthèse des informations fournies par les profils géophysiques est reportée dans le tableau suivant (Illustration 8). Les coupes de résistivités sont consultables dans les rapports BRGM/RP-56600-FR et BRGM/RP-56161-FR.

	Profil P2	Profil B	Profil C	Profil A
Localisation	vallée de la Kaouénilajoli amont	Kawéni amont	vallée de la Kaouénilajoli aval	dépression de Kawéni
Formations				
Epaisseur des formations volcano-sédimentaires conductrices de surface (pyroclastites altérés, dépôts fluvio-marins)	Jusqu'à 30 m (altitude de 30 à 0 m)	Jusqu'à 30 m (épisode) (altitude de 20 à -10 m)	Jusqu'à 30 m (altitude de 10 à -20 m)	Jusqu'à 50 m (altitude de 10 à -40 m)
Epaisseur des formations résistantes (pyroclastites indurés et basaltes sains)	60m (altitude de 0 à -60 m en aval)	De 30 à 100 m de l'amont vers l'aval (altitude de -20 m à ...)	80 m (altitude de -20 à -100 m)	> 45 m (altitude de -40 à -90 m)
Substratum volcanique plus ancien, horizon conducteur	A partir d'une altitude de -80 m	A partir d'une altitude de -70 m en amont seulement	?	?

Illustration 8 : Tableau récapitulatif des informations apportées par les profils géophysiques

Une représentation spatiale du toit et du mur de la formation résistante a pu être réalisée à partir des sondages électriques. En effet, lors de ces investigations, le toit de l'horizon résistant profond (8 ohm.m) a été atteint à certains endroits. Une interpolation de ces valeurs de résistivités (Illustrations 9 et 10) a donc été réalisée à partir du logiciel QuickGridMaker® de Perspective Edge Software. Une représentation 3D de cette structure est donnée en Annexe 2.

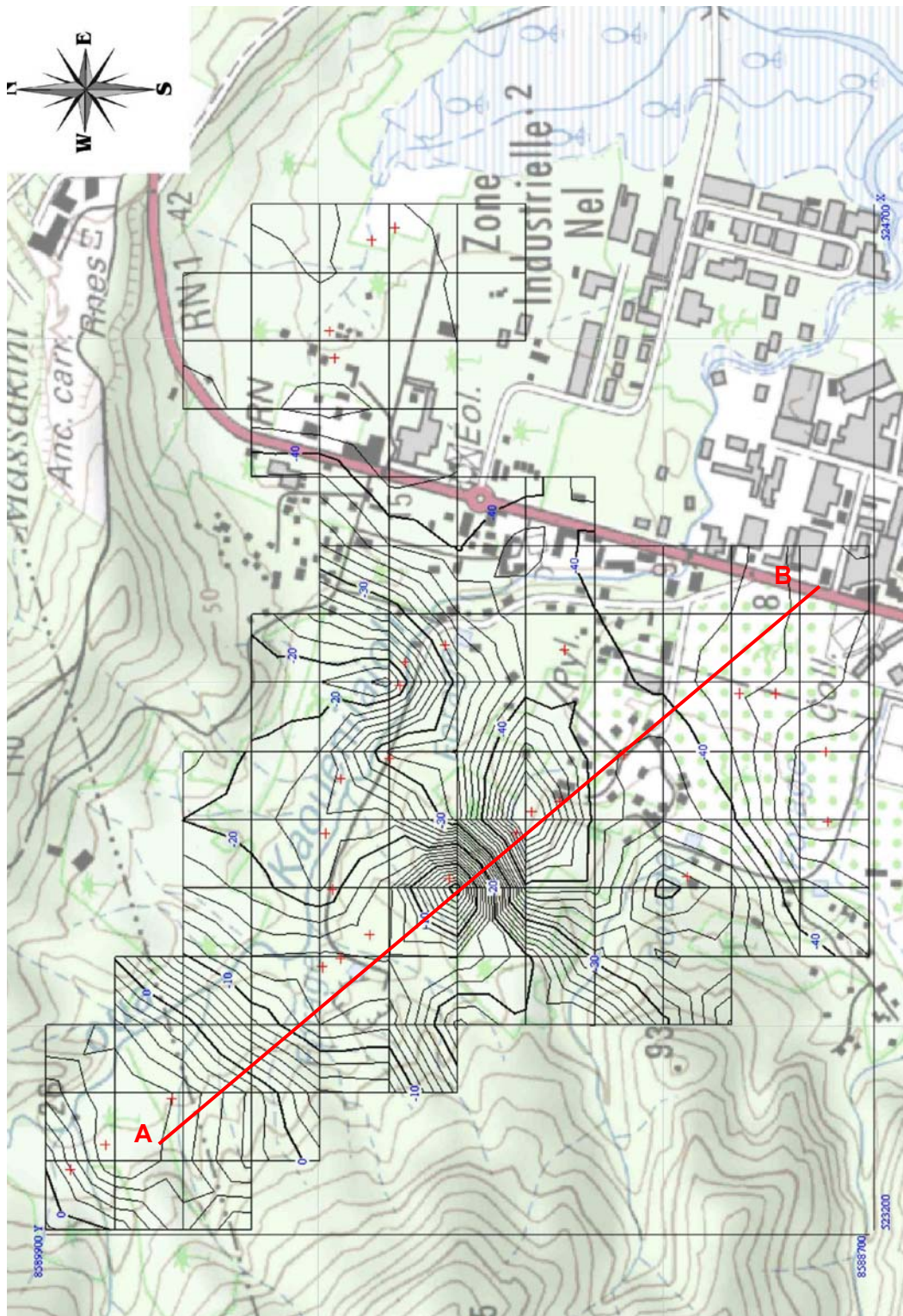


Illustration 9 : Isohypses du toit de la formation résistante et trace de la coupe en rouge (AB=1260 m). Le quadrillage est de 100 m de coté

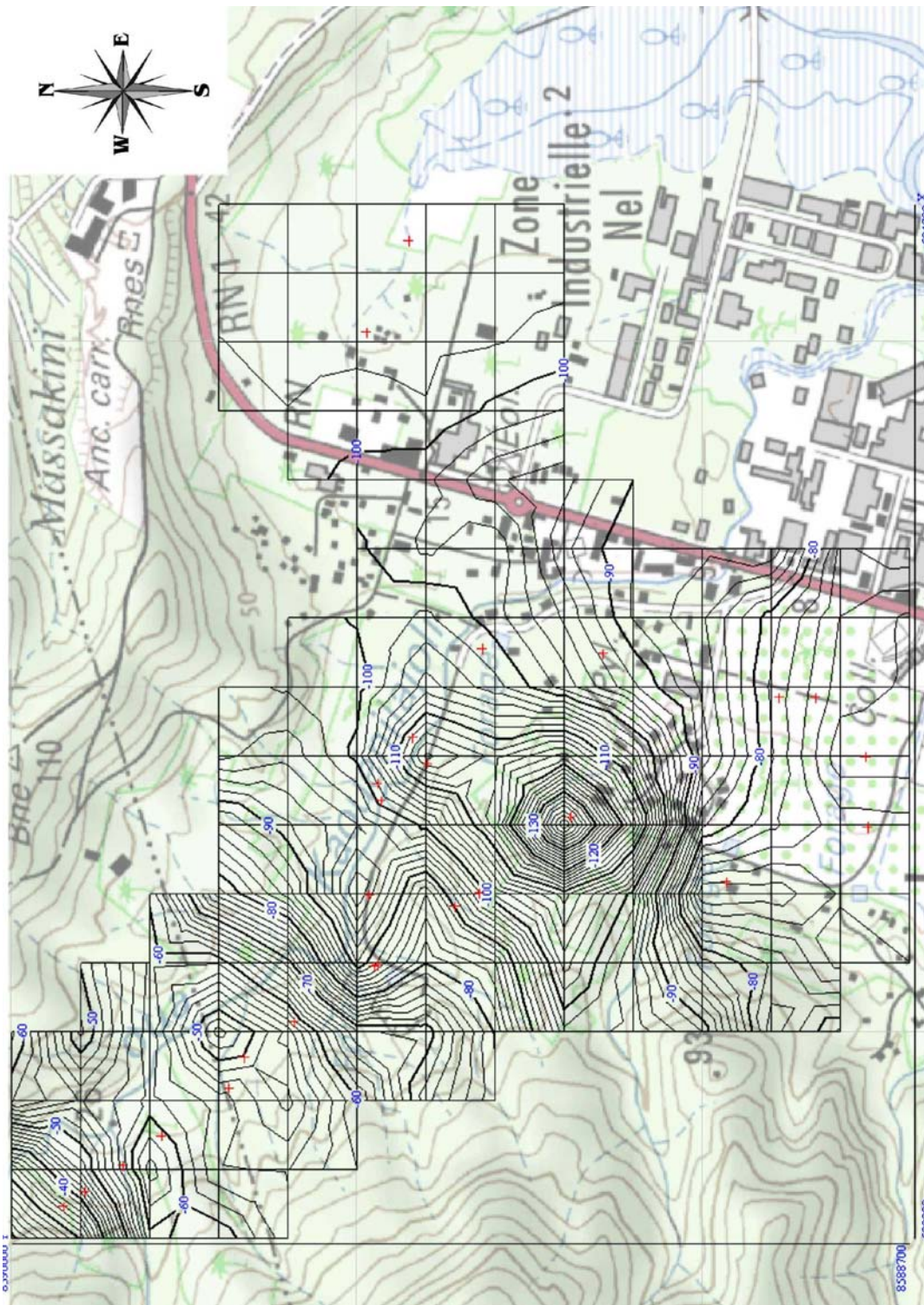


Illustration 10: Isohypes du mur de la formation résistante. Le quadrillage est de 100 m de côté

Une coupe lithologique synthétique a été réalisée selon l'axe NO-SE (axe AB en Illustration 9) juste au sud de la rivière de la Kaouénilajoli (Illustration 11).

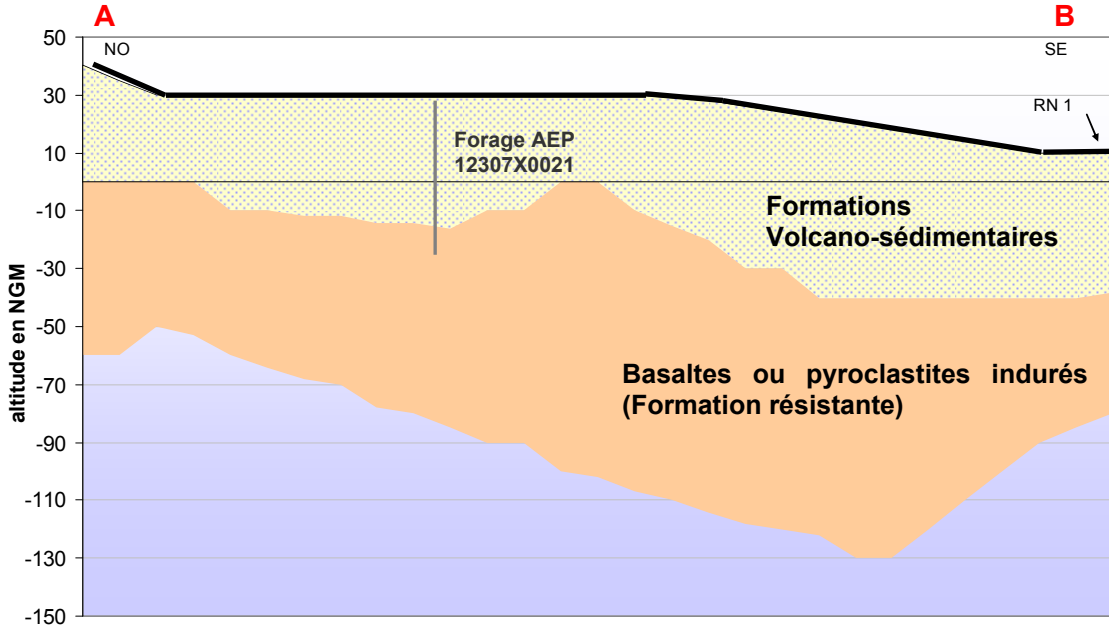


Illustration 11 : Coupe synthétique de la formation résistante

L'examen de la coupe et des cartes du toit et du mur de la formation résistante montre une géométrie particulière de ce corps résistant. La formation - d'une épaisseur variable de 30 à 100 m maximum - est de surface très irrégulière, grossièrement inclinée dans le sens NO SE (en suivant l'axe de la Kaouénilajoli) et semble remonter à l'endroit où la vallée s'évase, c'est-à-dire au contact du cratère. Cette formation repose sur une unité plus ancienne de nature inconnue et très conductrice (mise en évidence par une résistivité de 8 ohm.m) jouant le rôle de substratum imperméable (socle local appartenant vraisemblablement aux unités volcaniques de l'édifice septentrional plus ancien comme indiqué plus haut).

La morphologie générale en 3D du mur de la formation est très irrégulière et laisse apparaître une marque en cuvette avec un fond estimé à -130 ou -135 m NGM. La remontée du mur au contact du cratère implique par conséquent la remontée du socle vers -70 m NGM derrière le collège de Kawéni.

Cette morphologie en cuvette du mur de la formation résistante est probablement d'origine volcanique et peut être attribuée soit à un mini-cône d'explosion phréato-magmatique soit à la subsidence tectonique des unités volcaniques en bord du maar sous le jeu des failles bordières lors de l'activité phréato-magmatique du maar principal.

En ce qui concerne le toit de cette formation, il semblerait que la pente générale soit moins prononcée en direction du SE (de 0 m NGM à -35 m NGM à l'entrée dans le

cratère) et présente en 3D de petites extrusions qui accentue l'irrégularité de sa surface.

La formation de surface (pyroclastites et formations sédimentaires) présente une épaisseur croissante d'ouest en est.

Par ailleurs, aucun sondage électrique n'a atteint l'interface eau douce/eau salée. Cependant, les sondages situés à proximité de la mangrove montrent que l'invasion marine serait située en dessous de la cote – 80 NGM. Cette analyse géophysique ne permet pas de définir un état initial de la position et de la géométrie de l'interface eau douce / eau salée.

Suite à cette première campagne d'analyses géophysiques, des forages de reconnaissance afin de préciser la géométrie des aquifères, la nature des unités (notamment celles de surface) et un programme de mesure en vue de surveiller l'évolution de l'interface eau douce / eau salée avaient été proposés. Ces ouvrages n'ont à ce jour pas pu être réalisés. En année 2, les reconnaissances géophysiques ont donc été renouvelées (A et C) afin de confirmer la géométrie des différents aquifères et de détecter une éventuelle variation de l'interface eau douce/eau salée.

La répétition de ces investigations a permis de mettre en évidence des variations significatives de résistivité. Sur le profil situé dans l'axe de la dépression de Kawéni (A) et sur le sondage SE09, une augmentation des résistivités a été observée dans les sédiments fluvio-marins entre 15 et 60 m de profondeur (réponse éventuelle d'une diminution de la saturation en eau). Au-delà de cette profondeur, une légère baisse des résistivités au niveau des basaltes ou pyroclastites indurées a pu être observée. Ces baisses de résistivités ont été nettement mises en évidence en aval du profil C, à plus de 95 m de profondeur. Cette évolution pourrait être la réponse à une invasion d'eau salée qui serait plus marquée sur le profil C en raison de sa localisation dans l'axe de la vallée de la Kaouénilajoli, mais pourrait aussi être une conséquence des régimes hydrogéologiques affectant la minéralisation de l'eau (§ 3.4.2). Une précision importante à apporter est qu'entre ces 2 campagnes de travaux géophysiques un nouveau forage AEP a été mis en exploitation (1237X0021). Les résultats observés sont donc peut être la réponse à une avancée du biseau salé consécutive à l'exploitation accrue de l'aquifère de Kawéni. Afin de préciser l'avancée du biseau d'eau salé et de surveiller les éventuelles intrusions, il est indispensable de constituer un réseau de suivi des variations piézométriques et de conductivités. Ce réseau constituera un vrai système d'alerte en cas d'invasion saline et permettra ainsi de protéger les ouvrages AEP plus en amont.

2.3. IMPLICATIONS HYDROGEOLOGIQUES D'UNE GEOLOGIE COMPLEXE

On remarque qu'en ce qui concerne le cratère de Kawéni, l'hydrosystème souterrain se limite aux bordures du cratère. Les caractéristiques hydrogéologiques sont intéressantes : les forages d'exploitation sont localisés dans les alluvions (de matériaux de nature volcanique) dont la productivité varie entre 15 et 30 m³/h environ pour des profondeurs captées comprises entre 10 et 60 mètres (rapport BRGM/RP-56600-FR).

Les formations aquifères correspondent principalement aux terrains volcano-sédimentaires qui comblent l'essentiel de la dépression de Kawéni (Illustration 12). Bien que productive au point de vue hydrogéologique, cette zone est exposée à la proximité des eaux salées de la mangrove d'une part et d'autre part au développement de la zone industrielle de Kawéni.

Au regard des données de forages et des campagnes géophysiques réalisées en années 1 et 2 (§ 2.2.2), un modèle relativement simple de la structure hydrogéologique de la dépression de Kawéni peut être établi. La succession des niveaux les plus récents aux plus anciens peut être résumée de la manière suivante :

1. Formations sédimentaires de type mangrove ou alluvions, recouvrant l'aquifère volcano-sédimentaire sous-jacent, pouvant jouer le rôle de semi-perméable mais pouvant le cas échéant présenter des petites nappes superficielles de maigre intérêt. Les endroits où l'aquifère n'est pas couvert par ces formations sédimentaires auraient manifestement une vulnérabilité plus marquée et sont donc plus sensibles aux éventuels risques de pollution par infiltration directe.
2. Aquifères volcano-sédimentaires : sédiments actuels et sédiments plus anciens d'origine pyroclastique qui comblent la dépression. Les transmissivités de ces unités sont de l'ordre de 2 à 7.10⁻³ m²/s, valeurs sensiblement plus élevées que celles rencontrées communément dans les autres aquifères de l'île (de 10⁻⁴ à 10⁻³ m²/s en moyenne). Le mur de ces formations est situé à une profondeur d'environ 30 mètres à l'ouest de la dépression. Il est bien plus profond au centre de la dépression (50 m de profondeur).
3. Aquifère potentiel profond de basaltes ou pyroclastites indurées : une première représentation spatiale du toit de cette unité sous-jacent aux formations volcano-sédimentaires a été réalisée. L'épaisseur de ces formations varie de 30 à plus de 100 mètres. Aucun forage si ce n'est le 12307X0021 n'a encore recoupé ces formations qui présentent un potentiel aquifère à déterminer. Les arguments géophysiques et la géométrie de cette formation laisse penser que le potentiel hydrogéologique existe, mais tant que la lithologie exacte n'a pas été précisée, il est délicat d'estimer le potentiel au sens de l'exploitation.
4. Les formations du « substratum conducteur profond » de nature indéterminée : elles jouent probablement le rôle d'imperméable, sans exclure localement la présence de niveaux perméables en leur sein. La caractérisation de ces

formations (paramètres hydrodynamiques et géométrie) ne constitue pas un enjeu majeur dans le cadre de l'exploitation et de la protection de la ressource en eau souterraine de Kawéni dans la mesure où elles semblent se situer à des profondeurs importantes (altitudes inférieures à -100 m NGM) en partie aval du système.

Code BSS	Désignation	Formations aquifères	Perméabilités moyennes (m/s)
12307X0013	F1 (42 m)	Aquifère captif de basaltes (de -5 à -12 NGM) et sables gris noir (de -12 à -27 NGM)	
12307X0014	F2 (40m)	Aquifère captif : crépine de 3 à -22 NGM : limons (de 3 à -13 NGM) et sables limoneux (de -13 à -22 NGM)	
12307X0011	Kawéni 1 8'' (50 m)	Aquifère captif : basaltes altérés (de -2 à -4,4 NGM) et sables et alluvions (de -6,4 à -37 NGM)	2.05.10 ⁻⁵ (à 27 m) 2.95 10 ⁻⁵ (à 34 m) 4.1.10 ⁻⁵ (à 41 m)
12307X0012	Kawéni 2 8'' (31 m)	Aquifère captif : crépine de 0 à -19,6 NGM Alluvions (de -3,6 à -6,1) et sables (de -6,7 à -19,6 NGM)	2.35.10 ⁻⁵ (à 17 m) 3.9 10 ⁻⁵ (à 21m) 2.7 10 ⁻⁵ (à 31m)
12307X0019	Kawéni 1 10'' Kawéni aval	Alluvions et laves basaltiques scoriacées	
12307X0020	Kawéni 2 10'' Kawéni aval	Alluvions et pyroclastites (scories et lapillis)	
12307X0021	Kawéni 3 10'' Kawéni amont	pyroclastites (scories et lapillis)	

Illustration 12: Formations aquifères rencontrées par les forages de Kawéni

3. Eléments de caractérisation de la nappe de Kawéni

3.1. CARACTERISATION HYDROCHIMIQUE DE L'AQUIFERE

3.1.1. Etude de la qualité des eaux des forages

Seuls les 3 forages de Kawéni figurant dans le tableau ci-dessous (Illustration 13) présentent des données chimiques. 120 analyses se répartissent sur ces 3 forages entre novembre 1992 et juillet 2008.

Indice BSS	Site	Date minimale analyse	Date maximale analyse	Nombre d'analyses
12307X0013/F1	KAWENI F1	18/11/1992	18/09/2008	61
12307X0014/F2	KAWENI F2	18/11/1992	18/09/2008	26
12307X0021/KAQUE3	KAWENI 3 10'	08/04/1993	18/09/2008	33

Illustration 13 : forages à l'origine des analyses

Le nombre de paramètres mesurés par prélèvement varie entre 2 et 87.

Les analyses ont plusieurs sources différentes qui n'ont pas toujours pu être identifiées clairement. En effet, pour certaines, nous avons des bordereaux d'analyses, mais parfois, les données utilisées dans ce rapport sont extraites de thèse ou de rapports antérieures. D'une part les laboratoires d'analyse ne sont pas toujours connus et dans ce cas, des informations telles que les méthodes utilisées et les seuils de quantification par exemple peuvent manquer. De plus, les analyses ne sont pas homogènes entre elles. Cette forte disparité des origines et des contenus des analyses a rendu assez complexe l'interprétation des données.

Les analyses disponibles proviennent des laboratoires suivants :

- Centre de Recherche d'Expertise et de Contrôle des Eaux de Paris (CRECEP ; 7 analyses)
- Laboratoire départemental d'épidémiologie du milieu (Réunion ; 2)
- SOGEA (81)
- SIEAM (15)
- Origine inconnue (15).

a) Paramètres physico-chimiques des eaux

- **Température des eaux**

Seules 4 données de température des eaux sont disponibles. Celles-ci varient entre 28 et 29°C.

- **Conductivité des eaux**

La conductivité électrique de l'eau représente sa capacité à conduire le courant électrique. Elle est directement proportionnelle à la quantité d'ions dissous dans l'eau et traduit donc la minéralisation de l'eau. Plus la conductivité est élevée et plus la minéralisation des eaux est importante.

La conductivité des eaux a été mesurée 120 fois. Elle varie entre 181 et 636 $\mu\text{S/cm}$, avec une moyenne de 440 $\mu\text{S/cm}$. Ces valeurs situent les eaux souterraines de Mayotte dans la gamme des eaux faiblement à peu minéralisées.

Pour le forage de Kawéni 3 10' (12307X0021/KAOUÉ3), mis à part la valeur de conductivité mesurée en 1993 (181 $\mu\text{S/cm}$), ce paramètre varie assez peu entre 404 et 490 $\mu\text{S/cm}$ au cours des 33 analyses réalisées entre 2002 et 2008, avec une moyenne de 437 $\mu\text{S/cm}$.

Pour le forage de Kawéni F1 (12307X0013/F1), mis à part les valeurs mesurées en 1992 (262 $\mu\text{S/cm}$) et 1993 (636 $\mu\text{S/cm}$), les conductivités sont relativement homogènes et varient entre 422 et 477 $\mu\text{S/cm}$ avec une moyenne à 448 $\mu\text{S/cm}$ et ce sur 61 prélèvements (entre 2001 et 2008).

Enfin, le forage de Kawéni F2 (12307X0014/F2) semble montrer une variabilité pour ce paramètre plus importante. Si l'on exclut la valeur mesurée en 1992 (569 $\mu\text{S/cm}$), ce paramètre évolue entre 199 et 489 $\mu\text{S/cm}$ avec une moyenne de 425 $\mu\text{S/cm}$ (sur 26 analyses entre 2002 et 2008).

- **pH des eaux**

Le pH a été mesuré à 118 reprises au cours des différentes analyses. Il varie entre 6,4 (pH acide) et 8,3, avec une moyenne générale de 7,5, qui est également celle observée sur chaque forage individuellement.

b) Paramètres majeurs et faciès chimique des eaux

Le tableau ci-dessous présente le nombre d'analyses pour chacun des paramètres majeurs, ainsi que les valeurs minimales, maximales et moyennes.

	Cl	HC03	S04	N03	Ca	Mg	Na	K
Nombre de données	73	10	108	44	106	105	11	57
valeur minimale (mg/l)	5,6	62,0	3,0	0,0	9,9	1,7	18,4	1,1
valeur maximale (mg/l)	56,8	231,0	15,0	18,4	63,2	53,9	55,0	10,8
moyenne (mg/l)	27,4	189,1	6,8	3,9	31,6	22,8	43,2	6,8

Illustration 14 : nombre d'analyse des paramètres majeurs

• Chlorures

La présence de chlorures dans les eaux souterraines peut avoir de multiples origines, à savoir :

- interactions eau-roche : certaines roches ignées et volcaniques contiennent des minéraux riches en chlorures. Des apports de chlorures par les inclusions fluides de certains minéraux rencontrés en milieu volcanique ont également été observés. De même, un contact avec des formations évaporitiques de type halite (NaCl) peut également être à l'origine de l'acquisition de teneurs en chlorures. Cette hypothèse peut être exclue puisque qu'on ne trouve pas de formations évaporitiques à Mayotte
- aérosols contenus dans les eaux de pluie,
- apport anthropique par les fertilisants minéraux qui peuvent présenter de fortes teneurs en chlorures,
- intrusion d'un biseau salé : phénomène pouvant se produire dans les aquifères littoraux,
- contact avec des eaux connées⁹.

Les eaux des forages de Kawéni montrent des teneurs en chlorures variant entre 5,6 et 56,8 mg/l, avec une moyenne de 27,4 mg/l. Ces teneurs sont relativement faibles au regard des teneurs classiquement rencontrées dans les eaux souterraines. Néanmoins, avec les résultats actuels, il semble difficile de trancher entre les autres origines possibles, qui de plus peuvent se cumuler. L'analyse des bromures pourrait être utile pour préciser l'origine des chlorures sur la base de l'étude des rapports Br/Cl.

L'analyse des teneurs en chlorures par forage montre que, bien que la teneur moyenne soit relativement proche (entre 22,4 et 29,7 mg/l), la variabilité de ce paramètre est assez différente. En effet, alors que sur le forage 3 10'', les teneurs varient peu entre

⁹ Eau emprisonnée dans les interstices d'une roche sédimentaire à l'époque de sa formation

15 et 29,4 mg/l, elles sont un peu plus variables sur le forage F2 (entre 12,4 et 42,5 mg/l). Enfin, sur le forage F1, la variabilité est la plus importante avec des teneurs évoluant entre 5,6 et 56,8 mg/l.

- **Bicarbonates**

La principale origine des bicarbonates dans les eaux est la dissolution des minéraux carbonatés combiné à l'action du CO₂ des eaux météoriques et du sol. En zone de socle et en milieu volcanique, les valeurs classiquement observées sont de l'ordre de 50 à 200 mg/l.

Les teneurs en bicarbonates dans les eaux souterraines de Kawéni varient entre 62 et 231 mg/l, avec une moyenne de 189 mg/l.

Alors que les forages F1 et 3 10" présentent des teneurs en bicarbonates relativement homogènes (respectivement entre 209 et 213 mg/l et entre 207 et 231 mg/l), elles sont très variables pour le forage F2 :

- 221,7 mg/l en mars 2002,
- 88 mg/l en juin 2003,
- 62 mg/l en mars 2004.

- **Sulfates**

La présence de sulfates dans les eaux souterraines peut avoir plusieurs origines :

- dissolution de formations évaporitiques contenant du gypse et/ou de l'anhydrite. Les teneurs en sulfates peuvent alors être très élevées et atteindre quelques centaines, voire quelques milliers de milligrammes par litre,
- oxydation de minéraux riches en soufre telle que la pyrite ou la marcassite. Les teneurs mesurées dans les eaux souterraines atteignent alors au maximum quelques dizaines de milligrammes par litre,
- oxydation de sulfures dans les précipitations atmosphérique (phénomène des pluies acides),
- utilisation d'engrais,
- oxydation des sulfures métalliques émis lors des phases volcaniques fumérolliennes.

Les teneurs en sulfates mesurées sont relativement faibles et varient peu, entre 3 et 15 mg/l avec une moyenne de 6,8 mg/l.

Les teneurs en sulfates observées sur les forages de Kawéni varient d'environ 10 mg/l pour les forages F1 et F2 avec des moyennes respectivement de 7,5 et 7,1 mg/l. Le

forage 3 10' quant à lui présente des teneurs encore plus homogènes et plus faibles variant entre 4 et 8 mg/l avec une moyenne de 5,3 mg/l.

- **Nitrates**

L'ion nitrate (NO_3^-) est la forme la plus oxydée de l'azote. Les sources naturelles de nitrates sont principalement les pluies et les interactions avec le sol et la végétation. Les teneurs en nitrates dans les eaux naturelles dépendent de nombreux processus biogéochimiques qui constituent le cycle de l'azote. A l'état naturel, les concentrations en nitrates sont faibles (quelques mg/l au maximum). On admet généralement qu'une teneur supérieure à 10 mg/l traduit un apport anthropique. Les sources anthropiques de nitrates sont nombreuses et sont essentiellement liées au lessivage des engrais et aux rejets domestiques et industriels.

Les teneurs en nitrates dans les eaux des forages de Kawéni varient entre 0,1 et 18,4 mg/l avec une moyenne de 3,8 mg/l. Les teneurs les plus faibles sont enregistrées sur le forage de Kawéni 3 10'' (moyenne de 1,8 mg/l) et sur le forage F1 (moyenne de 3,5 mg/l). Le forage Kawéni F2 présente des teneurs plus élevées, atteignant jusqu'à 18,4 mg/l avec une moyenne de 8,9 mg/l.

Les forages se situent dans une zone industrielle et commerciale très urbanisée. Ceci pourrait laisser supposer que les nitrates sont plus d'origine domestique et/ou industrielle qu'agricole. Néanmoins, quelques « champs » (tomates, salades, patates douces) se situent en amont des captages. Il s'agit principalement d'exploitations clandestines utilisant des engrais de nature et d'origine inconnues. Les données disponibles actuellement ne permettent pas de trancher entre ces deux origines possibles, qui peuvent également coexister.

Toutefois, l'analyse des teneurs en nitrates de 13 forages de Mayotte situés en zone agricole et ayant des données qualité, montre que celles-ci ne dépassent pas 2,4 mg/l et sont même fréquemment inférieures au seuil de quantification de cet élément. Ces faibles teneurs (très inférieures à la norme de potabilité de 50 mg/l) sont cohérentes avec les pratiques agricoles de Mayotte où l'utilisation d'engrais reste très modérée (cf. rapport BRGM/RP-56774-FR).

- **Calcium**

Le calcium est principalement présent dans les roches carbonatées mais se rencontre aussi dans un grand nombre de minéraux constitutifs des roches volcaniques tels que les clinopyroxènes calciques ou les minéraux de la série isomorphe albite-anorthite.

Les teneurs en calcium dans les eaux des forages de Kawéni varient entre 9,9 et 63,2 mg/l avec une moyenne de 31,6 mg/l.

Les teneurs moyennes en calcium des eaux souterraines de Kawéni sont relativement homogènes sur les 3 forages étudiés (entre 30,4 et 33,5 mg/l). En revanche, les gammes de variation diffèrent. Le forage F2 présente une large gamme de variation des teneurs en calcium puisque celles-ci évoluent entre 9,9 et 63,2 mg/l. Pour le forage

3 10', elles varient entre 19,3 et 60 mg/l et enfin pour le forage F1, la gamme de variation se situe entre 14 et 44,8 mg/l.

- **Magnésium**

Le magnésium est présent dans de nombreux minéraux constitutifs des roches volcaniques. Les équilibres naturels qui contrôlent les teneurs en magnésium dans les eaux souterraines sont complexes. De nombreuses réactions d'échanges cationiques, d'adsorption et de désorption (sur des minéraux argileux) influencent la mise en solution du magnésium dans le milieu souterrain. Dans les roches ignées, les roches volcaniques et les roches d'altération contenant de l'argile, la mise en solution du magnésium est plus difficile que dans les roches carbonatées. Ainsi les teneurs types du fond géochimique de Mayotte pourraient être au maximum de quelques dizaines de mg/l.

Les teneurs en magnésium oscillent entre 1,7 et 53,9 mg/l avec une moyenne de 22,8 mg/l.

Les teneurs moyennes en magnésium des eaux des trois forages sont peu différentes, tout comme pour le calcium (entre 20,2 et 24,4 mg/l). Les gammes de variation en revanche diffèrent un peu. Les forages F1 et F2 ont des gammes de variation proches (respectivement entre 4,7 et 44 mg/l et entre 7 et 35 mg/l). Le forage 3 10' est celui qui présente la plus grande gamme de variation (entre 1,7 et 53,9 mg/l).

- **Sodium**

Le sodium est présent dans de nombreux minéraux constitutifs des roches volcaniques, les feldspaths sodiques étant parmi les plus importants. Dans les eaux souterraines, il est soumis aux mêmes types de phénomènes d'adsorption/désorption que le calcium et le magnésium. En l'absence de roches évaporitiques, les fonds géochimiques couramment rencontrés en contexte volcanique et de socle en métropole montrent des teneurs comprises entre quelques milligramme par litre et quelques dizaines de milligramme par litre.

Les teneurs en sodium des eaux souterraines de Kawéni varient entre 18,4 et 55,0 mg/l avec une moyenne de 43,2 mg/l.

Peu de données sur les teneurs en sodium sont disponibles sur les 3 points (entre 2 et 6). Néanmoins, il semblerait que l'eau du forage F1 soit la plus sodique et celle du forage F2, la moins sodique.

- **Potassium**

Le potassium est principalement présent dans les roches ignées (dont les roches volcaniques, essentiellement sous forme d'orthose) et les argiles. D'une manière générale, les eaux présentent rarement des teneurs en potassium supérieures à 10 mg/l.

Les teneurs en potassium des eaux souterraines de Kawéni varient entre 1,1 et 10,8 mg/l avec une moyenne de 6,8 mg/l.

Les variations entre les 3 forages des teneurs en potassium sont faibles :

- entre 3,0 et 10,8 mg/l (moyenne de 8,3 mg/l) pour le forage 3 10",
- entre 1,1 et 8,6 mg/l (moyenne de 6,7 mg/l) pour le forage F1,
- entre 2,6 et 7,6 mg/l (moyenne de 5,3 mg/l) pour le forage F2.

• **Détermination du faciès chimique des eaux souterraines**

La représentation la plus appropriée pour déterminer le faciès chimique des eaux est le diagramme de Piper. Il permet une représentation des anions et des cations sur deux triangles spécifiques dont les côtés témoignent des teneurs relatives en chacun des ions majeurs par rapport au total de ces ions (cations pour le triangle de gauche, anions pour le triangle de droite). La position relative d'un résultat analytique sur chacun de ces deux triangles permet de préciser en premier lieu la dominance anionique et cationique. A ces deux triangles est associé un losange sur lequel est reportée l'intersection des deux lignes issues des points identifiés sur chaque triangle. Ce point représente l'analyse globale de l'échantillon, sa position relative permet de préciser le faciès chimique de l'eau concernée

Afin de déterminer le faciès chimique des eaux, il est impératif d'avoir des teneurs de tous les ions majeurs, à savoir :

- pour les cations : calcium, magnésium, sodium et potassium
- pour les anions : bicarbonates, chlorures, sulfates et nitrates.

Parmi les 61 analyses disponibles, seules 9 sont complètes au niveau des ions majeurs.

Afin de s'assurer de fiabilité des analyses chimiques, la balance ionique a été calculée pour toutes les analyses. La balance ionique est calculée par différence (en pourcentage) entre les ions de charge positive (cations) et les ions de charge négative (anions). cette théorie physique se base sur le principe de l'électro neutralité des eaux, c'est-à-dire l'égalité entre la somme des cations et la somme des anions.

Le calcul de la balance inique se fait grâce à la formule suivante :

$$\text{Balance ionique} = 100 \times \frac{\sum \text{cations} - \sum \text{anions}}{\sum \text{cations} + \sum \text{anions}}$$

où les sommes des anions et des cations sont exprimées en meq/l.

Lorsque plusieurs analyses étaient disponibles sur un point (6 points), toutes les analyses ont été retenues, à l'exception de celles qui présentaient une balance ionique supérieure à 10 %.

La fiabilité de l'analyse au regard de la balance ionique est considérée comme :

- excellente pour une balance entre -1 et + 1 %
- acceptable pour une balance entre -5 et + 5 %
- médiocre pour une balance entre -10 et + 10 %
- mauvaise pour des balances inférieures à -10 % et supérieures à + 10 %.

Code BSS	DATE	balance ionique (%)
12307X0013/F1	19/06/2003	1
12307X0013/F1	15/03/2004	1
12307X0014/F2	03/12/2002	-4
12307X0014/F2	19/06/2003	0
12307X0014/F2	15/03/2004	-2
12307X0021/KAQUE3	03/12/2002	1
12307X0021/KAQUE3	25/04/2003	-2
12307X0021/KAQUE3	19/06/2003	1
12307X0021/KAQUE3	15/03/2004	1

Illustration 15 : vérification de la balance ionique des analyses

Toutes les analyses présentent des balances ioniques comprises entre -4 et +1 %, elles peuvent donc être considérées comme fiables.

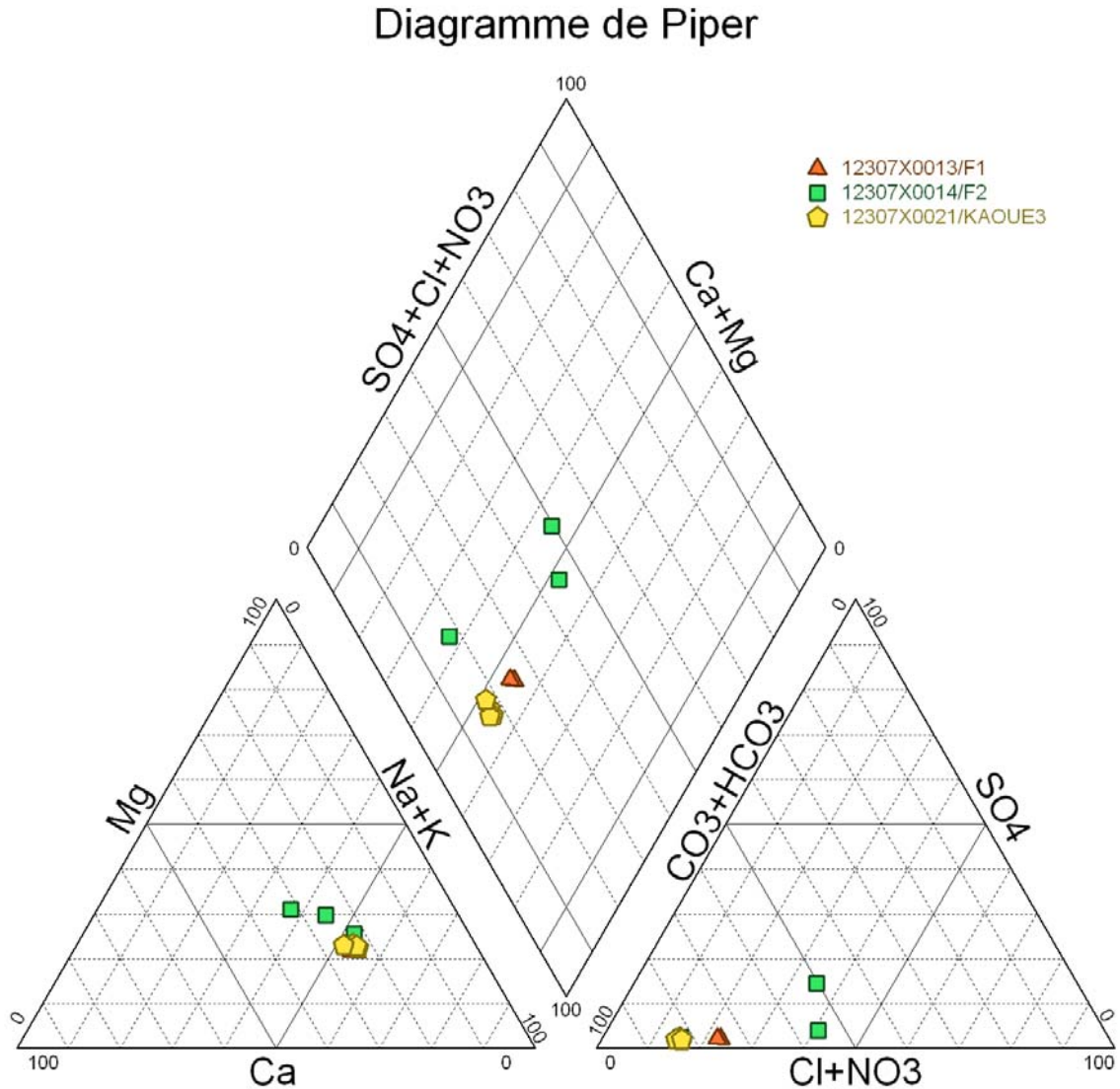


Illustration 16 : représentation du faciès chimique des eaux par diagramme de Piper

A l'exception de l'analyse de l'eau du forage de Kawéni F2 du mois de décembre 2002, toutes les autres eaux présentent une composition en cations proche, majoritairement sodique (entre 41 et 51 % de Na⁺). Pour le point cité précédemment en revanche, la composition en cations est mixte (environ 31 % de Ca²⁺, Mg²⁺ et Na⁺).

Au niveau des anions, les points évoluent d'un faciès principalement bicarbonaté (analyses du forage Kawéni 3 10'' et analyse de décembre 2002 du forage Kawéni F2 ; environ 83 % de HCO₃⁻) vers un faciès bicarbonaté à tendance chloruré (forage Kawéni F2 ; entre 50 et 55 % de HCO₃⁻, entre 26 et 32 % de Cl⁻ et entre 4 et 14 % de SO₄²⁻).

Les eaux du forage Kawéni 3 10'' ont donc un faciès bicarbonaté sodique, tout comme celles du forage de Kawéni F1. Les trois analyses réalisées sur les eaux du forage Kawéni F2 quant à elles présentent des variations importantes entre un faciès bicarbonaté calcique sodique magnésien en décembre 2002 et un faciès bicarbonaté à tendance chlorurée sodique en juin 2003 et mars 2004. Les différences observées pourraient être liées à des mélanges en parts variables au cours de l'année avec d'autres eaux, chimiquement différentes. Néanmoins, le faible nombre de données ne permet pas de confirmer ou d'infirmer cette hypothèse.

c) Relations inter-éléments

Diagramme Chlorure-Sodium

Le chlorure des eaux de pluie est d'origine marine exclusivement dans la mesure où aucun affleurement de roches salines de type évaporitique ne peut produire des aérosols continentaux susceptibles d'apporter une contribution Cl à la pluie. De même, l'absence de ce type de dépôt ne permet pas d'apport de chlorure aux eaux en dehors de celui provenant des apports de la pluie. Le chlorure est donc un élément de référence et il est possible de comparer les autres éléments chimiques à ce dernier.

Les ions chlorure et sodium sont les ions majoritaires dans l'eau de mer et donc de l'eau de pluie.

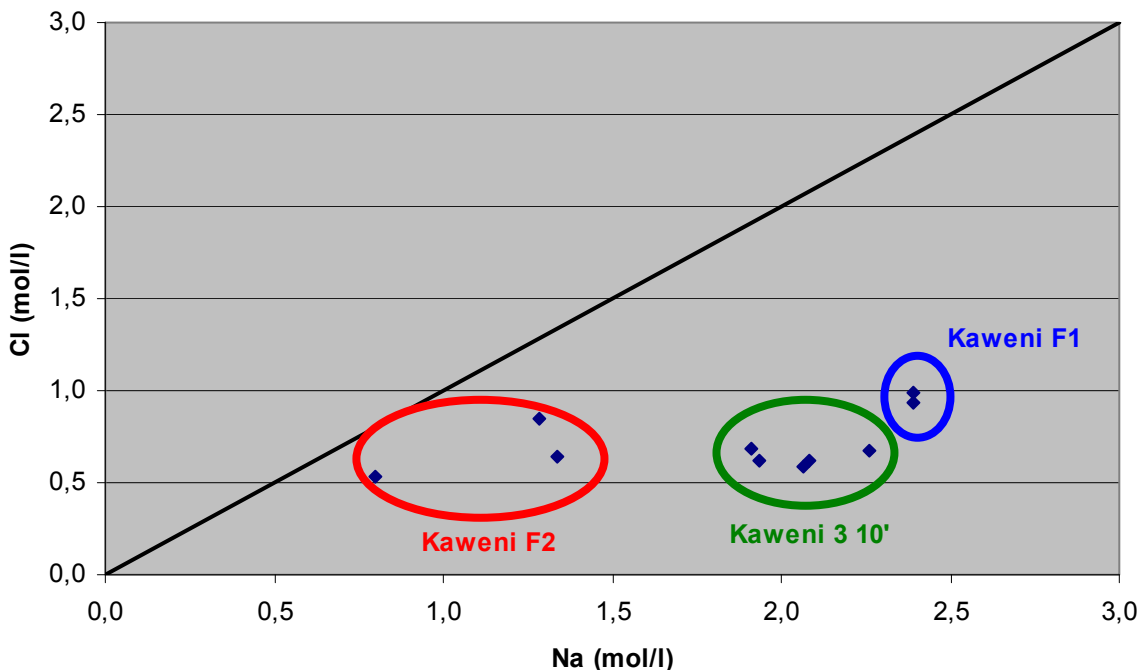


Illustration 17 : Diagramme chlorure/sodium des eaux souterraines de Kawéni

La figure ci-dessus (Illustration 17) présente la relation entre Na et Cl, la droite de pente 1 représentant la droite de dilution de l'eau de mer.

Les eaux des forages de Kawéni présentent toutes un enrichissement plus ou moins important en Na qu'il est possible de relier à des processus d'interaction eau-roche (les roches volcaniques étant riches en sodium). Cet enrichissement semble être relativement faible pour le forage de Kawéni F2 et s'accroître pour le forage 3 10". Enfin, il est le plus important sur le forage F1.

En revanche, aucun enrichissement net en chlorures n'est visible, un apport anthropique de cet élément peut donc a priori être écarté, ce qui est cohérent avec les faibles teneurs en nitrates observées.

En l'absence d'échantillons d'eau de pluie pour l'île de Mayotte (qui se situent en général sur la droite de dilution de l'eau de mer), il est difficile de trancher quant à l'origine des ions Na et Cl dans les eaux souterraines entre l'eau de mer et l'eau de pluie pour ces points situés à environ 1500 m de l'océan.

d) Composés azotés et phosphorés

L'eau d'une nappe contient naturellement peu de composés azotés. Ceux-ci, provenant de la décomposition de la matière organique vivante par les micro-organismes, sont minéralisés en azote gazeux ou restent en faible quantité dans le sol. C'est l'augmentation artificielle de la quantité d'azote combiné disponible dans le sol qui crée un déséquilibre entre l'apport et la consommation et qui produit un excès d'azote qui est finalement entraîné vers la nappe. Cet azote se trouve sous la forme nitrates (NO_3^-), ammonium (NH_4^+) ou plus rarement en fonction des conditions redox nitrites (NO_2^-).

En ce qui concerne les nitrates, les apports anthropiques étant relativement faibles à Mayotte, ceux-ci ont été traités avec les ions majeurs auxquels ils appartiennent également (cf. § -b)).

- **Ammonium**

Les teneurs en ammonium ont été analysées 115 fois. Elles se sont révélées supérieures au seuil de quantification à 55 reprises. Elles varient entre 0,01 et 0,43 mg/l, avec une valeur moyenne de 0,08 mg/l.

- **Nitrites**

Les teneurs en nitrites ont été mesurées à 13 reprises. Elles en se sont jamais révélées être supérieures au seuil de quantification de cet élément qui est de 0,05 mg/l.

- **Orthophosphates**

Les teneurs en orthophosphates ont été recherchées à 28 reprises sur les eaux souterraines de Kawéni. Elles varient entre 0,2 et 1,5 mg/l avec une valeur moyenne de 0,9 mg/l.

e) Minéralisation et salinité

- **Silice**

Les teneurs en silice ont été recherchées à 10 reprises sur les eaux des forages de Kawéni. Elles oscillent entre 30 et 82,8 mg/l avec une valeur moyenne de 59,3 mg/l.

f) Eléments indésirables

- **Aluminium (Al)**

L'aluminium est relativement abondant dans les roches ignées. Il entre dans la composition des basaltes sous forme de feldspaths, d'amphiboles et d'hornblendes.

L'aluminium a été recherché à 45 reprises (11 fois sur les eaux du forage Kawéni 3 10'', 22 fois pour Kawéni F1 et 12 fois pour Kawéni F2). Il n'a été observé que 2 fois sur les eaux du forage Kawéni 3 10'' (40 µg/l en décembre 2002 et 90 µg/l en juin 2003) et trois fois sur celles du forage Kawéni F2 (50 µg/l en décembre 2002, 1220 µg/l en juin 2003 et 1075 µg/l en mars 2004). Ces deux dernières teneurs qui dépassent 1000 µg/l sont très élevées par rapport aux teneurs couramment rencontrées dans les eaux souterraines en contexte volcanique. De plus, elles sont fortement différentes de toutes les autres données disponibles aussi bien sur ce forage que sur les deux autres forages de Kawéni.

- **Bore (B)**

Seule une analyse a été réalisée sur les eaux du forage Kawéni 3 10'' en mai 2005 en ce qui concerne le bore. La teneur en cet élément s'est révélée inférieure au seuil de quantification.

- **Cuivre (Cu)**

Les teneurs en cuivre ont été analysées à 81 reprises (32 fois sur les eaux du forage Kawéni 3 10'', 41 fois pour Kawéni F1 et 8 fois pour Kawéni F2). Cet élément a été observé 10 fois sur les eaux du forage Kawéni F1 (entre 10 et 160 µg/l) et trois fois sur celles du forage Kawéni F2 (entre 9 et 70 µg/l).

- **Fer (Fe)**

Dans les roches ignées, le fer est présent dans les pyroxènes, les amphiboles, la magnétite et surtout dans l'olivine dont le pôle ferreux est la fayalite.

Les teneurs en fer ont été analysées à 117 reprises et ont été quantifiables 77 fois. Les teneurs mesurées varient entre 0,01 et 0,6 mg/l, avec une valeur moyenne de 0,10 mg/l. Seule l'analyse du 19 juin 2003 sur les eaux du forage de Kawéni F2 montre une teneur particulièrement élevée de 7,85 mg/l.

Néanmoins, ces résultats sont à prendre avec précaution puisque nous ne savons pas si les analyses ont été réalisées sur eau brute ou sur eau filtrée, et donc si les valeurs représentent les teneurs en fer total ou en fer dissous.

- **Fluor (F)**

Les teneurs en fluor ont été recherchées à 9 reprises et quantifiées à chaque fois. Elles varient entre 0,25 et 0,36 mg/l avec une valeur moyenne de 0,31 mg/l.

- **Manganèse (Mn)**

Les basaltes sont les laves les plus pauvres en silice (%en poids) mais par conséquent les plus riches en FeO et MnO

La présence de manganèse dans les eaux a été recherchée à plus de 100 reprises. Elles se sont révélées supérieures au seuil de quantification 36 fois, les teneurs varient entre 3 et 1 300 µg/l, avec une moyenne de 200 µg/l.

Origine du Mn dans les amphiboles, les olivines (tephroite)

Néanmoins, ces résultats sont à prendre avec précaution puisque nous ne savons pas si les analyses ont été réalisées sur eau brute ou sur eau filtrée.

- **Zinc (Zn)**

Les teneurs en zinc ont été analysées à 79 reprises (20 fois sur les eaux du forage Kawéni 3 10", 43 fois pour Kawéni F1 et 16 fois pour Kawéni F2). Cet élément a été observé 2 fois sur les eaux du forage de Kawéni 3 10" (entre 45 et 135 µg/l), 13 fois sur celles du forage Kawéni F1 (entre 10 et 150 µg/l) et trois fois sur celles du forage Kawéni F2 (entre 30 et 115 µg/l).

g) Eléments toxiques

- **Arsenic (As)**

Les teneurs en arsenic ont été mesurées à 7 reprises, entre 2 et 3 fois par forage. Elles se sont à chaque fois révélées inférieures au seuil de quantification de cet élément qui est de 5 µg/l.

- **Cadmium (Cd)**

Les teneurs en cadmium ont été recherchées à 7 reprises. Elles se sont à chaque fois révélées inférieures au seuil de quantification de cet élément qui est de 0,5 µg/l.

- **Chrome (Cr)**

Le chrome a été recherché à 7 reprises dans les eaux de forages de Kawéni. Seules les deux analyses réalisées sur les eaux du forage de Kawéni F2 en juin 2003 et mars 2004 ont montré des teneurs de 15 µg/l, supérieures au seuil de quantification (2,5 µg/l).

- **Cyanures (CN)**

Les teneurs en cyanures ont été recherchées à 7 reprises sur les eaux des forages de Kawéni. Elles se sont à chaque fois révélées inférieures au seuil de quantification de cet élément qui est de 5 µg/l.

- **Mercure (Hg)**

Les teneurs en mercure ont été recherchées à 7 reprises. Elles se sont à chaque fois révélées inférieures au seuil de quantification de cet élément qui est de 2,5 µg/l.

- **Plomb (Pb)**

La teneur en plomb n'a été mesurée qu'une fois en juin 2003 sur les eaux du forage de Kawéni F2 et était de 40 µg/l.

- **Sélénium (Se)**

Les teneurs en sélénium ont été recherchées à 7 reprises. Elles ne se jamais révélées supérieures au seuil de quantification de cet élément qui est de 2 µg/l.

h) Hydrocarbures aromatiques polycycliques

15 hydrocarbures aromatiques polycycliques ont été recherchés au cours de certaines analyses réalisées entre 2003 et 2004.

Les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) sont générés lors de la pyrolyse ou de la combustion incomplète de matières organiques. Ces procédés comprennent l'incinération des déchets agricoles, la combustion du bois, du charbon ou des ordures ménagères mais également le fonctionnement des moteurs à essence ou des moteurs diesels. Les HAPs sont rarement présents à très fortes concentrations dans l'environnement et leur particularité est surtout d'être présents sous forme de mélanges plus ou moins complexes. Les HAPs sont biodégradés dans les couches superficielles du sol. Les rejets dans l'environnement sont principalement atmosphériques. Les HAP sont généralement associés à des particules, surtout les plus fines, mais peuvent également être présents dans la phase gazeuse. La présence des HAPs dans les eaux de surface, puis dans les eaux souterraines provient du dépôt de particules en suspension dans l'atmosphère, des rejets de lixiviation des aires de stockage de charbon, des effluents des usines de traitement du bois et autres industries, de l'utilisation de composts et de fertilisants.

Le tableau ci-dessous donne la liste des 15 hydrocarbures polycycliques aromatiques qui ont été recherchés au cours des 7 analyses réalisées entre 2003 et 2004 par le Centre de Recherche d'Expertise et de Contrôle des Eaux de Paris (3 analyses sur le forage Kawéni 3 10'' et 2 analyses pour les forages Kawéni F1 et F2).

methyl(2)-naphthalene	phénanthrène	anthracène	fluoranthène	pyrène
methyl(2)-fluoranthène	benzo(1,2)-fluorene	benzo(a)-anthracene	chrysene	benzo(3,4)-fluoranthene
benzo(11,12)-fluoranthene	benzo(3,4)-pyrene	dibenzo(ah)-anthracene	benzo(1,12)perylene	indeno(1,2,3-cd)-pyrene

Illustration 18 : liste des hydrocarbures polycycliques aromatiques recherchés dans les eaux souterraines de kawéni entre 2003 et 2004 par le CRECEP

Parmi ces 15 paramètres, neuf n'ont pas été observés dans les eaux au cours des différentes analyses.

Pour les six autres paramètres, des valeurs au dessus du seuil de quantification (0,01 µg/l) ont observées à une ou deux reprises (fluoranthène et pyrène) au cours des analyses réalisées sur les eaux prélevées le 15 mars 2004 pour le forage 12307X0013/F1 et le 19 juin 2003 sur le forage 12307X0014/F2.

Code BSS du forage	Date	fluoranthène (µg/l)	pyrène (µg/l)	benzo(1,2)-fluorene (µg/l)	benzo(a)-anthracene (µg/l)	chrysene (µg/l)	benzo(3,4)-pyrene (µg/l)
12307X0013/F1	15/03/2004	0,042	0,060	<0,010	0,014	0,031	0,017
12307X0014/F2	19/06/2003	0,084	0,120	0,039	<0,010	<0,010	<0,010

Ces deux forages sont situés dans une zone industrielle et commerciale très urbanisée.

i) Phytosanitaires

23 produits phytosanitaires ont été recherchés au cours des 7 analyses réalisées par le CRECEP. Il s'agit principalement d'insecticides et d'herbicides. Pour ces paramètres, aucune teneur supérieure aux seuils de quantification respectifs des différents produits n'a été observée.

Néanmoins, ces résultats sont à prendre avec précaution car peu de molécules ont été recherchées. De plus, si l'on compare les listes des produits phytosanitaires utilisés à Mayotte fournies par la DDASS, par la DAF de Mayotte et par la centrale d'achat des intrants agricoles, il apparait que seuls le DDT, l'hexachlorocyclohexane gamma (ou lindane) et le malathion sont recherchés parmi toutes les substances utilisées actuellement.

Aldrine	Atrazine	Déséthyl- atrazine (Atrazine)	Cyanazine	Dieldrine	DDDop' ⁽¹⁾ (DDTop')	DDDpp' ⁽¹⁾ (DDTpp')	DDEop' ⁽²⁾ (DDTop')
DDEpp' ⁽²⁾ (DDTpp')	DDTop' ⁽³⁾	DDTpp' ⁽³⁾	Heptachlore	Heptachlore époxyde (Heptachlore)	Hexachloro- benzène	Hexachloro- cyclohexane alpha	Hexachloro- cyclohexane gamma
Malathion	Parathion	Prométryne	Propazine	Simazine	Terbuthylazine	Trifluraline	
		herbicide	insecticide	fongicide	métabolite (molécule initiale)		

(1) : dichlorodiphényldichloroéthane

(2) : dichlorodiphényldichloroéthylène

(3) : dichlorodiphényltrichloroéthane

Illustration 19 : liste des produits phytosanitaires recherchés dans les eaux souterraines de Kawéni entre 2003 et 2004 par le CRECEP

j) Micropolluants organiques

- **PCB : PolyChloroBiphényles**

7 polychlorobiphényles ont été recherchés à 7 reprises (PCB 28, 52, 101, 118, 138, 153 et 180). Aucune teneur supérieure au seuil de quantification (0,014 µg/l) n'a été enregistrée.

- **COHV : Composés Organo-Halogénés Volatils**

12 composés organo-halogénés volatils ont été recherchés au cours de 7 analyses. Aucune teneur supérieure aux seuils de quantification respectifs des différents produits n'a été notée.

dichloro(1,1) éthylène	dichloro- methane	dichloro(1,2) éthylène	chloroforme	trichloro(1,1,1)é- thane	tetrachlorure de carbone
trichlor- éthylène	dichlorobromo- méthane	tétrachloro- éthylène	monochloro- dibromométhane	dibromo(1,2)- éthane	bromoforme

k) Bactériologie

Des paramètres bactériologiques ont été recherchés au cours de 7 analyses.

Seule l'analyse du 15 mars 2004 réalisée sur le forage 12307X0013/F1 a montré la présence de coliformes (35) et de streptocoques (1).

Or, la présence de paramètres microbiologiques est un signe de vulnérabilité des eaux souterraines aux pollutions d'origine anthropiques. Les coliformes sont les plus fréquemment recensés dans les eaux des sources et des forages de Mayotte. Les coliformes fécaux (ou thermotolérants) sont un sous-groupe des coliformes totaux. Leur intérêt est leur survie dans l'environnement est généralement équivalente à celle des bactéries pathogènes et que leur densité est généralement équivalente au degré de pollution produite par les matières fécales.

Il semble donc que les eaux des forages de Kawéni, pourtant situés en zone fortement urbanisée, sont relativement bien protégées des risques de pollutions par les matières fécales.

3.1.2. Conclusions générales sur la caractérisation physico-chimique des eaux souterraines de Kawéni

L'analyse des données de la qualité des eaux de Kawéni, ainsi que leur interprétation, sur la base des connaissances actuelles, sont assez complexes du fait de la disparité des analyses, tant sur leur origine que sur leur contenu.

Quelques traits ou signatures semblent néanmoins ressortir. D'une manière générale, bien que les points soient relativement proches géographiquement (en particulier les forages F1 et F2), des différences de faciès chimiques et donc de compositions chimiques sont visibles, même si elles ne sont pas très importantes.

Ainsi, alors que les eaux des forages 3 10'' et F1 sont bicarbonatées sodique, celles du forage F2 présentent un faciès sensiblement différent et qui de plus évolue dans le temps entre bicarbonaté calcique sodique magnésien (2002) et bicarbonaté à tendance chlorurée sodique (2003 et 2004).

L'analyse de l'évolution de la conductivité et des éléments majeurs révèle que la composition chimique du forage 3 10'' est relativement stable dans le temps, avec souvent des teneurs plus faibles que celles des autres forages. Sur le forage F1, les teneurs de certains éléments varient plus, comme les sulfates, le calcium ou encore les chlorures. Par ailleurs, les teneurs en ce dernier sont plus élevées sur ce forage, de même que les teneurs en sodium. Enfin, le forage F2 est celui sur lequel la plus grande variabilité est notée, en particulier pour la conductivité, les bicarbonates et le calcium. Ce forage est celui pour lequel les eaux sont les plus riches en nitrates, dont l'origine est probablement domestique et/ou urbaine.

Concernant les éléments indésirables et les éléments toxiques, le forage F2 est le seul qui –visiblement - a présenté à deux reprises des teneurs élevées en fer et en aluminium.

Des hydrocarbures aromatiques polycycliques ont été recherchés sur les 3 forages et certains ont été observés sur les forages F1 et F2, respectivement en 2004 et 2003. La présence de ces éléments met en évidence une certaine vulnérabilité des eaux souterraines du secteur vis-à-vis des pollutions.

Concernant les produits phytosanitaires (herbicides et insecticides), les produits recherchés lors des analyses ne correspondent que partiellement aux produits réellement en circulation à Mayotte. Dans ces conditions, l'absence de produit phytosanitaire constatée dans les analyses ne constitue qu'un résultat partiel.

Au niveau bactériologique, les résultats obtenus sur les forages de Kawéni sont plutôt positif puisqu'une seule analyse réalisée en 2004 sur le forage F1 a montré la présence de paramètres bactériologiques (coliformes et streptocoques). Néanmoins, seules 7 analyses bactériologiques ont été réalisées. De plus, ce sont des indicateurs de l'existence d'une pollution d'origine fécale qui peut être très localisée et très ponctuelle, le temps de survie des bactéries dans l'eau étant relativement faible. Leur présence peut résulter d'une mauvaise protection du forage au niveau même de celui-ci. Néanmoins, avec le peu de données disponibles, il est difficile de conclure sur ce point.

3.2. EVOLUTION QUANTITATIVE DE LA NAPPE

3.2.1. Evolution de la pluviométrie depuis 1993

Les précipitations qui sont considérées dans la suite de l'étude sont celles enregistrées par la DAF à la station de la Convalescence depuis le 1^{er} janvier 1995 (cette station est considérée comme étant la plus proche du site d'étude et la plus représentative des conditions pluviométriques régnantes dans la zone d'alimentation de l'aquifère, à savoir les hauts du bassin versant). Pour les années antérieures (1993 et 94) seront considérées - par défaut - les précipitations enregistrées par Météo France à la station de Mamoudzou.

Les chroniques sont présentées ci-dessous (Illustration 20) :

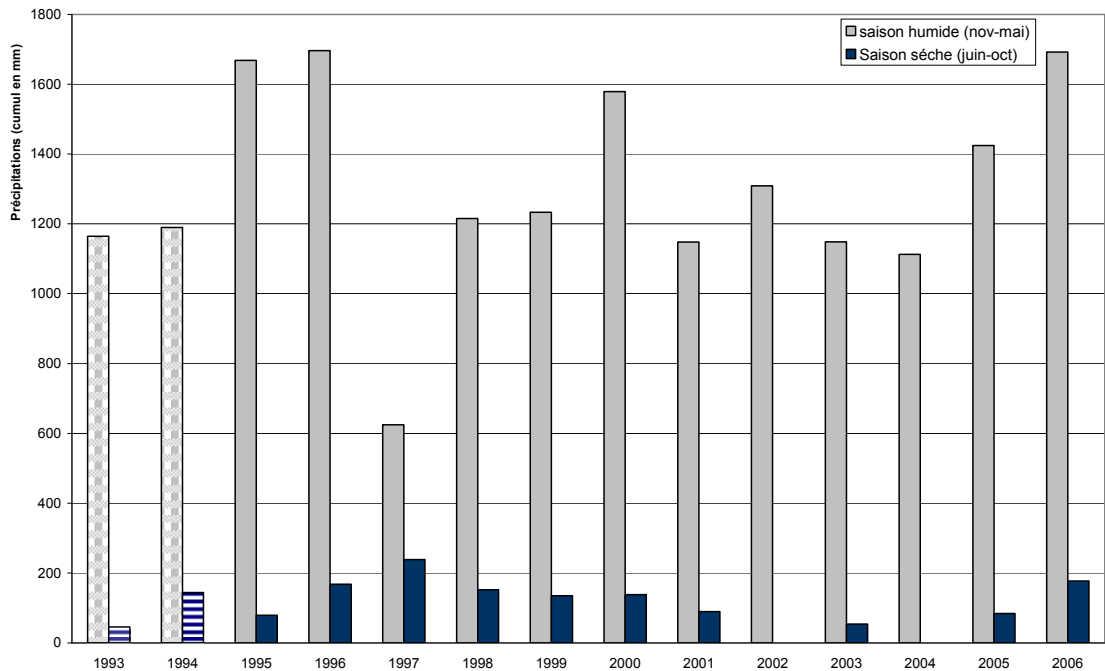


Illustration 20 : Cumul des précipitations en saison humide et en saison sèche enregistrées à la station pluviométrique de Mamoudzou pour les années 1993 et 1994 et de la Convalescence entre 1995 et 2006. Les années sèches de 2002 et de 2004 n'ont pas été représentées en raison de lacunes de données trop importantes.

L'analyse de l'évolution des précipitations de 1993 à 2006 renseigne les éléments suivants :

- le cumul des précipitations en saison humide (de novembre de l'année passée à mai) se situe dans une fourchette de valeurs entre 600 et 1600 mm avec une moyenne autour de 1200 mm ;

- le cumul des précipitations en saison sèche (de juin à octobre) est très fréquemment situé sous la barre des 200 mm, avec une moyenne autour de 110 mm. Il est fréquent de voir des mois sans précipitations ou des saisons sèches où le cumul se compose simplement d'une ou plusieurs fortes averses épisodique(s).

En ce qui concerne l'évolution des précipitations depuis 1993, il semblerait qu'il n'y ait pas de tendance particulière à la hausse ou à la baisse, si ce n'est que :

- de 1996 à 2000, les saisons sèches montrent des cumuls de précipitations relativement élevées par comparaison avec les autres années de la chronique (autour de 170 mm en moyenne) ;
- 1997 montre un déficit de précipitation certain en saison humide (cumul des précipitations = 624 mm) ;
- 2001, 2002, 2003 et 2004 semblent être des années de déficit. Sur 4 ans, les saisons humide et sèche montrent des cumuls de précipitations respectivement faibles (inférieur à 1200 mm en saison humide et inférieur à 100 mm en saison sèche) ;
- depuis 2005, les saisons sèches et humides sont de plus en plus arrosées.

3.2.2. Examen de la chronique piézométrique de l'ouvrage de Kawéni 1 8''

En l'absence de chronique supplémentaire, la chronique piézométrique de l'ouvrage de Kawéni 1 8'' est considérée comme la plus représentative de l'aquifère, et ce pour plusieurs raisons :

- Techniques : cet ouvrage est l'un des plus profonds de la zone d'étude (Illustration 21). Il est crépiné sur plus de 40 m. L'épaisseur de l'horizon ainsi capté est donc suffisamment grande pour représenter l'aquifère dans sa quasi-totalité ;
- Historiques : le suivi piézométrique de l'ouvrage Kawéni 1 8'' a débuté en 1993, et malgré quelques lacunes de données, la chronique figure parmi les plus longues enregistrées à Mayotte. Elle permet d'analyser les variations hydrogéologiques de l'aquifère sur l'intervalle des 15 dernières années.

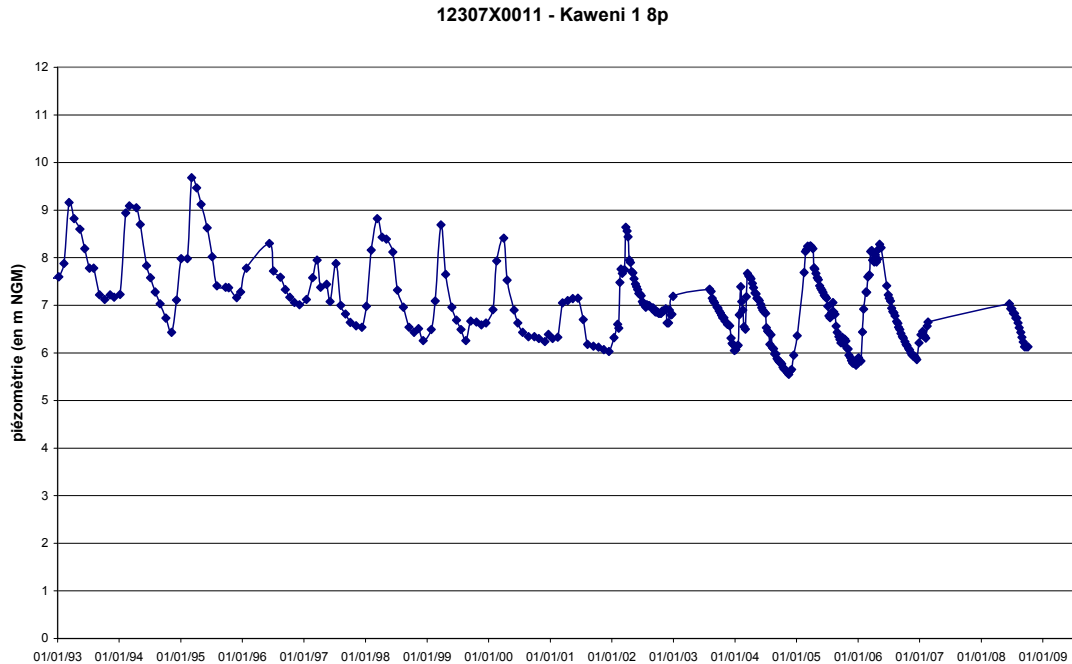


Illustration 21 : Chronique piézométrique de Kawéni 1 8'' de 1993 à aujourd'hui. Variations piézométriques en m NGM.

Depuis 1993, les relevés des niveaux piézométriques s'organisent de la manière suivante :

- manuellement à hauteur d'une mesure par mois entre 1993 et 2002 ;
- manuellement à hauteur d'une mesure par semaine environ à partir de 2002 ;
- en continu toutes les heures depuis juin 2008. Une mesure manuelle de contrôle est réalisée tous les 3 mois environ.

Les lacunes de données apparaissent quant à elles :

- entre janvier et juin 1996 (6 mois de lacune) ;
- entre décembre et aout 2003 (8 mois de lacune) ;
- entre février 2007 et juin 2008 (15 mois de lacune).

A la lecture de la chronique piézométrique de Kawéni 1 8", il est possible de renseigner les éléments ci-dessous¹⁰.

- i. **Les cycles hydrologiques** de l'aquifère ont une variation de type sinusoïdale. La recharge de l'aquifère se déroule en moyenne entre les mois de janvier et avril (Illustration 23 et Illustration 24) tandis que la vidange de l'aquifère se déroule entre avril et décembre. De manière générale, la recharge de l'aquifère s'opère de manière plus rapide que sa vidange. Les pentes de remontée annuelle du niveau piézométrique ont une progression de l'ordre de 5 cm/jour. La courbe de tarissement annuelle de l'aquifère présente une forme exponentielle classique avec diminution de la vitesse de tarissement au fur et à mesure de la vidange (2 cm/jour en début de tarissement, entre avril et juin puis 1 cm/jour entre septembre et novembre).
- ii. **L'amplitude des variations piézométriques annuelles** à cet endroit de l'aquifère est en moyenne de 2 m à 2,5 m entre la saison humide et la saison sèche. Cette amplitude est variable d'une année sur l'autre en raison de l'importance de la recharge (Illustration 22). Ainsi les années 1995 et 2005 figurent parmi les années à recharge importante (2,7 et 3,25 m) alors que les années 1997 et 2001 montrent des amplitudes de recharge très faibles (inférieures au mètre). Au regard des Illustration 20 et Illustration 21, la valeur de la recharge de l'aquifère en 2001 semble bien faible au vu des précipitations en saison humide contrairement à la valeur de 1997 plus cohérente au vu du déficit de précipitations cette année là. La valeur de la recharge de 2001 est signalée en rouge dans le tableau (Illustration 22) et ne sera pas prise en considération dans les calculs ultérieurs.

Années	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06
Amplitude Recharge (en m)		1,97	3,25		0,94	2,28	2,43	2,15	0,91	2,61		1,62	2,7	2,54
Amplitude Vidange (en m)	2,04	2,66	2,52	1,29	1,41	2,56	2,43	2,17	1,12	2,01		2,12	2,51	2,42

Illustration 22 : Amplitudes annuelles de la recharge et de la vidange de l'aquifère au droit du forage de Kawéni 1 8"

- iii. **L'évolution tendancielle des variations piézométriques annuelles de 1993 à aujourd'hui** traduit à la fois une baisse des niveaux moyens, des niveaux en hautes eaux et en basses eaux (Illustration 21).

¹⁰ La description des variations piézométriques de l'ouvrage a déjà fait l'objet d'un chapitre dans le rapport BGRM/RP-53161-FR, page 45

- évolution des niveaux piézométriques en basses eaux : de 1993 à 1997, les niveaux piézométriques en fin de phases de vidange de l'aquifère ne passaient pas sous l'altitude des 7 m NGM (excepté en 1994). Entre 1997 et 2001 les niveaux se situent entre 6 et 7 m NGM. Depuis 2001, ces niveaux sont inférieurs à 6 m NGM ;
- évolution des niveaux piézométriques en hautes eaux : ils sont supérieur à 9 m NGM jusqu'en 1995. Entre 1998 et 2002 la hauteur maximale atteinte par les niveaux piézométriques se situe entre 8,5 et 9 m NGM. Enfin, depuis 2003, les niveaux piézométriques de l'aquifère sont inférieur à 8,5 m NGM ;
- évolution des niveaux piézométriques moyens annuels (pris arbitrairement comme étant le niveau à mi pente de la phase de tarissement) : ils sont en diminution graduelle depuis 1993 (8,5 m NGM en moyenne entre 1993 et 1997, 7 m NGM entre 1997 et 2002 et 6,5 m NGM en moyenne depuis 2003).

Il est intéressant de noter que la baisse des niveaux piézométriques est plus prononcée pour les niveaux en basses eaux que ceux des hautes eaux. Cette observation traduit le fait que l'aquifère se vidange davantage qu'avant en saison sèche et ne traduit vraisemblablement pas un déficit de recharge comme cause exclusive de cette baisse. Il est alors possible d'envisager trois facteurs susceptibles d'être responsables de cette baisse : (i) l'impact des prélèvements hydrauliques par les forages F1, F2 et Kawéni 3 10". Il faut rappeler ici que les prélèvements de la nappe à hauteur de 30 m³/h entre 1990 et 2002 ont été augmentés à 60 m³/h lors de la mise en service du forage de Kawéni 3 10" en 2004, (ii) le raccourcissement de la saison humide et par conséquent l'allongement des saisons sèches peut aussi être invoqué (§ 3.3.1) pour expliquer cette baisse et enfin (iii) l'augmentation des paramètres de drainance de l'aquifère qui conduit à un meilleur transfert de la nappe vers son exutoire et se traduit par des variations piézométriques plus faibles en amplitude, ce qui peut être rattacher à une éventuelle baisse du niveau de base (ici la mer en sortie de mangrove), bien qu'il faille toute prudence garder car : les niveaux moyens de la mer n'ont guère baisser que de quelques centimètres (cf. § 3.4.1) et si influence il y a, elle n'est peut être pas encore mesurable au jour d'aujourd'hui.

Il est à noter qu'en raison de l'augmentation de la fréquence de mesures de la piézométrie, la diminution des niveaux enregistrés ne peut être un artefact. Par ailleurs, il est probable qu'en raison d'une fréquence de mesures plus espacée entre 1993 et 2002, des niveaux plus hauts en hautes eaux n'aient pu être enregistrés. A l'inverse, les niveaux plus bas enregistrés en période de basses eaux semblent être ceux réellement atteint et ce, compte tenu de la phase de stabilisation plus longue des niveaux en basses eaux.

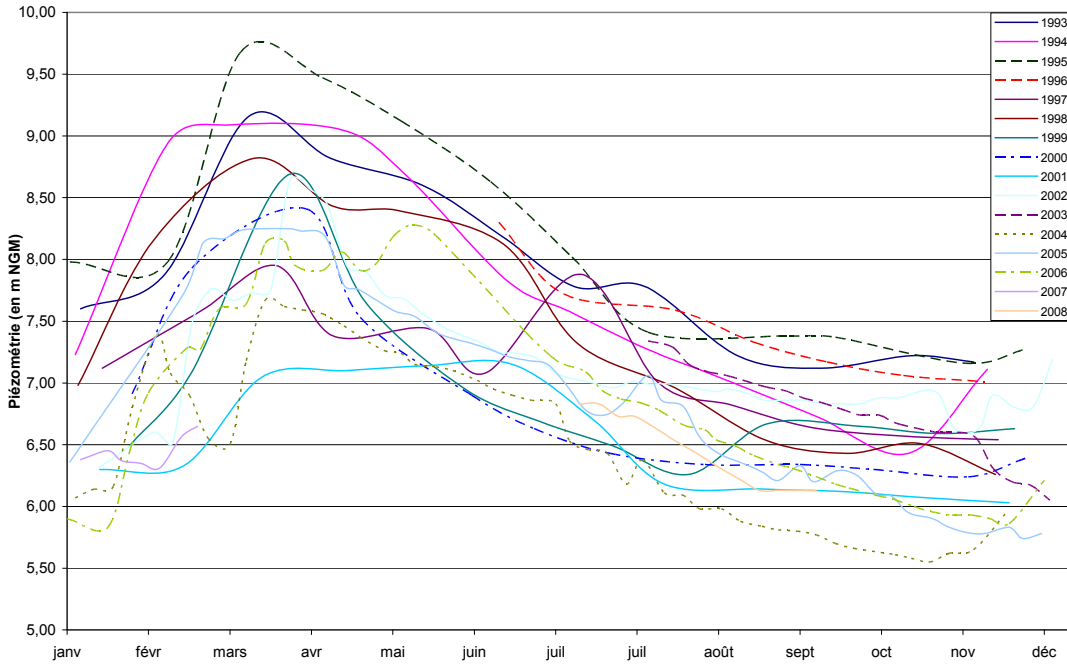


Illustration 23 : Variations piézométriques annuelles de l'ouvrage de Kawéni 1 8''.

Sur la base des observations précédentes et l'examen de l'illustration 23, il est possible de synthétiser le comportement hydrologique annuel du piézomètre de Kawéni 1 8'' depuis 1993 que l'on considérera comme celles la nappe entière, tant dans ses périodes de recharge que de vidange.

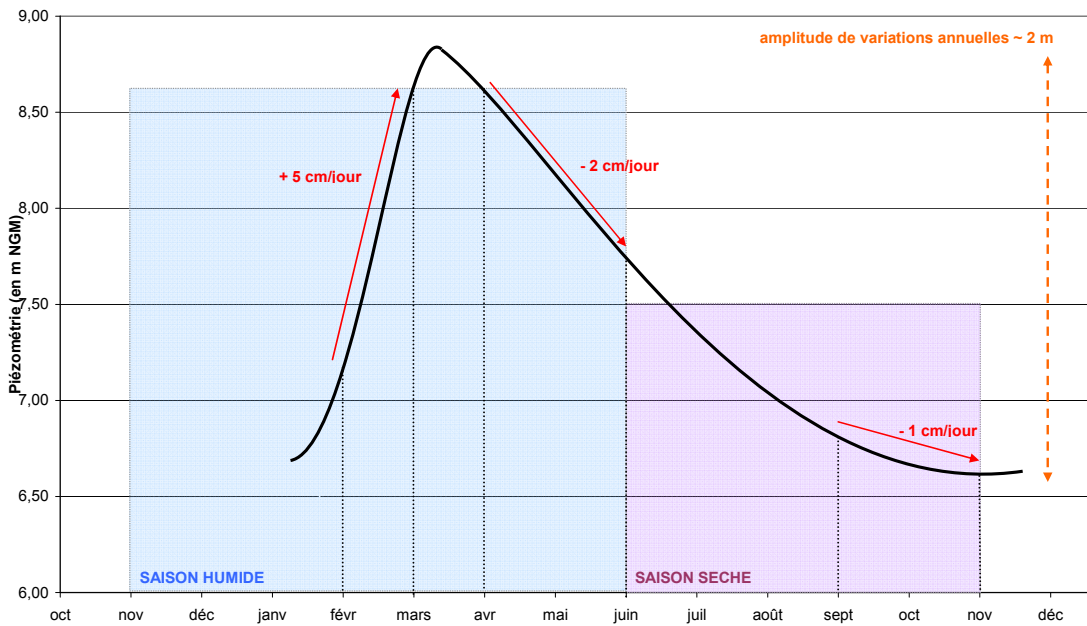


Illustration 24 : Comportement hydrologique annuelle schématique de l'aquifère de Kawéni.

3.3. MODALITES DE RECHARGE DE L'AQUIFERE

3.3.1. Des variations annuelles conditionnées exclusivement par les précipitations en saison des pluies

La mise en relation des amplitudes annuelles de recharge et de vidange de l'aquifère de Kawéni 1 8'' avec les cumuls de précipitations enregistrées en saison des pluies et en saison sèche respectives permet de dresser le graphique suivant (Illustration 25).

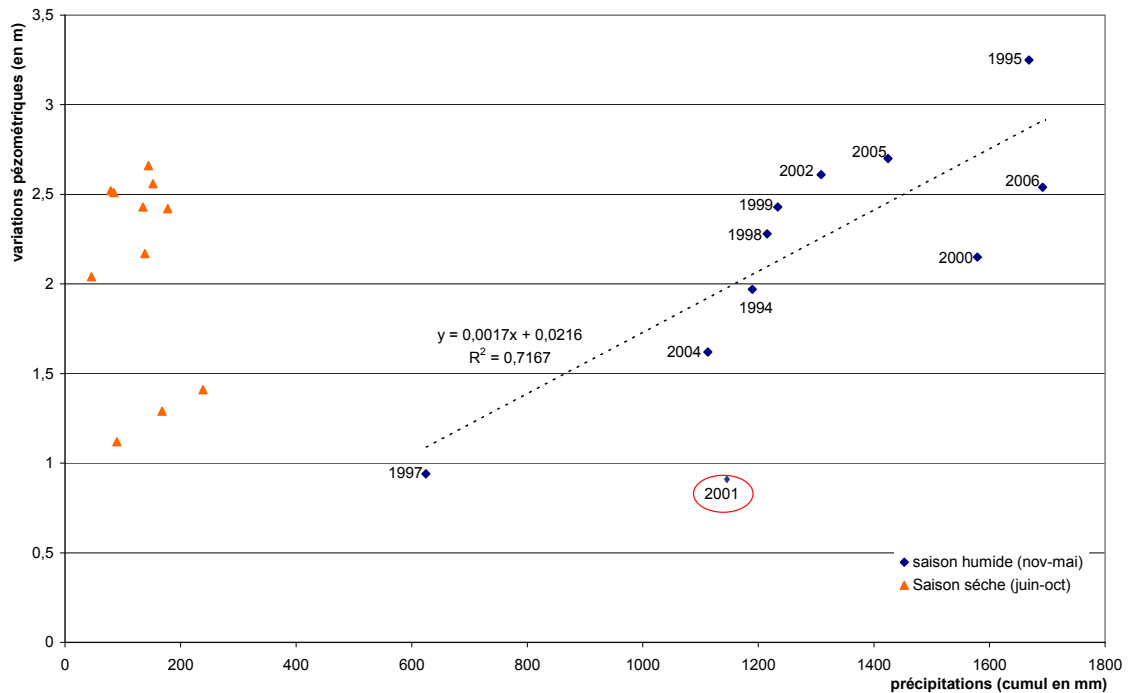


Illustration 25 : Influence des précipitations sur l'amplitude de la recharge(en bleue) et de la vidange (en orange) de l'aquifère de Kawéni au droit du piézomètre de Kawéni 1 8''

La corrélation simple entre le cumul des précipitations sur une saison et l'amplitude des recharges/vidanges montrent :

- i. Une relation linéaire en ce qui concerne le cumul des précipitations en saison des pluies et la recharge de l'aquifère entre 1997 et 2006. La qualité de la régression ($R^2=0,7167$) bien que faible traduit une relation étroite entre précipitations et recharges (la qualité des données peut être discutée pour la démonstration exclusive de ce phénomène). Comme indiqué précédemment, la valeur de l'amplitude de la recharge de 2001 n'est pas intégrée dans la corrélation car trop faible au regard des précipitations. Il est maintenant certain que l'enregistrement de la piézométrie a été défectueux pendant cette saison.
- ii. une relation nulle en ce qui concerne l'importance des précipitations en saison sèche et l'amplitude du tarissement. Instinctivement, il aurait été convenant de

penser que lors des saisons sèches ayant fait l'objet d'une pluviométrie élevée, le tarissement se voyait diminuer en raison des apports d'eau substantiels. Manifestement, les précipitations en saison sèche n'ont aucune influence sur les variations piézométriques de l'aquifère de Kawéni. Cette analyse rejoint l'observation (Eberschweiler 1986) selon laquelle les eaux météoriques en saison sèche s'évaporent directement ou ruissellent mais ne s'infiltrent qu'en proportion minime.

Plusieurs hypothèses peuvent expliquer les variations d'amplitude observées en saison sèche d'une année sur l'autre :

- **la durée du tarissement** : la vitesse de vidange de l'aquifère étant constante, l'amplitude des tarissements est donc uniquement dépendante de la durée du tarissement (Illustration 26) entre deux cycles de recharge ;

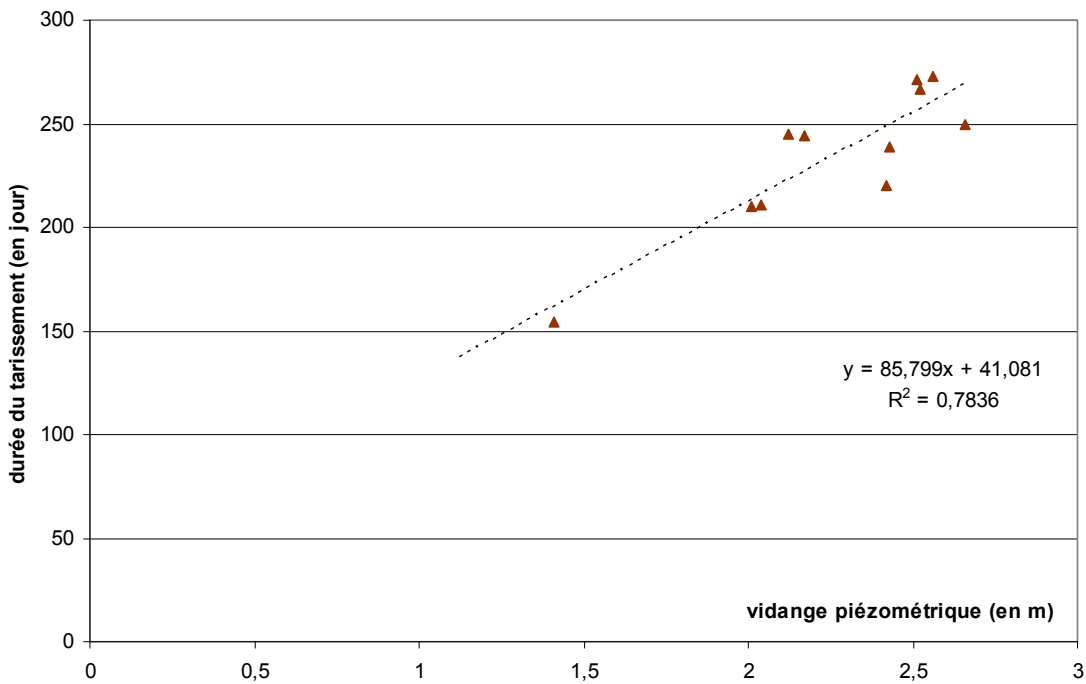


Illustration 26 : Influence simple de la durée de tarissement de l'aquifère sur l'amplitude des vidanges. Il est important de noter que le point à l'extrémité gauche a un poids très fort dans la régression. La qualité de cette dernière doit être moindre.

- **l'intensité des prélèvements** : la vidange de l'aquifère est conditionnée - et sa vitesse de vidange régulée - par les prélèvements considérés dans ce cas comme le paramètre de vidange le plus déterminant.

3.3.2. La rivière de Kaouénilajoli, alimentation supposée principale de l'aquifère de Kawéni

a) Observations morphologiques et hydrologiques

La rivière de Kaouénilajoli est le cours d'eau principal drainant le bassin versant qui s'étale en amont de la dépression – des contreforts Est du massif du M'tsapéré jusqu'au centre de la dépression où le cours d'eau se jette dans la mangrove de Kawéni (Illustration 27). Les débits de la Kaouénilajoli ne sont pas suivis et n'ont jamais été mesurés auparavant, si bien qu'il est impossible de discuter de son hydrodynamisme. Néanmoins, il est probable que ce cours d'eau fournisse une part importante de l'alimentation en eau de l'aquifère sous jacent dans sa partie aval par infiltration au fond du lit mineur comme cela a été remarqué sur d'autres cours d'eau de l'île (exemple de la Kwalé).

Si cette hypothèse s'avère validée, il faudra de toute évidence procéder à une protection renforcée du cours d'eau vis-à-vis des pollutions ménagères, industrielles, des dégradations morphologiques et autres pressions de type agricole et/ou urbain dont on sait la zone sujette.

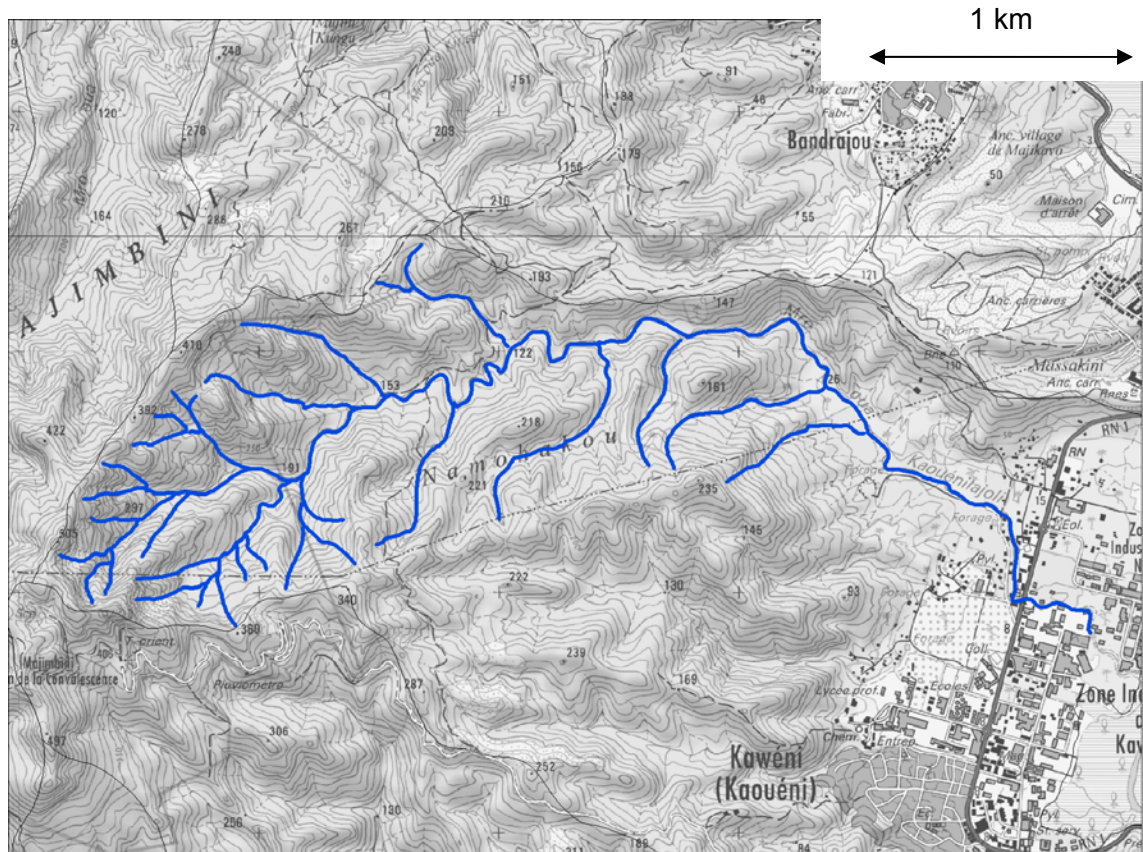


Illustration 27 : La rivière de Kaouénilajoli

Le bassin versant de la Kaouénilajoli est estimé à 5 km². Ce cours d'eau n'est pas pérenne et obéit à un régime torrentiel.

Son profil (Illustration 28) renseigne les éléments suivants :

- la longueur du cours d'eau est de 6200 m, ce qui le place parmi les cours d'eau les plus longs de Mayotte ;
- le dénivelé total du cours d'eau est de 450 m ;
- la pente moyenne est de 7%.
- dans le détail, il est possible de décomposer le cours d'eau en 4 sections de morphologie distinctes qui correspondent en réalité à des changements lithologiques (carte lithologique en Annexe 1). Cette décomposition permettra de distinguer les comportements hydrologiques d'une section à l'autre, comportements contrôlés en grande partie par le profil topographique du lit mineur et la nature géologique de l'encaissant :
 - une section haute (1) à pente raide entre 450 et 180 m NGM qui marque le parcours du cours d'eau sur les flancs du M'tsapéré (pente de 20%). La configuration est de type ravine encaissée dans les phonolithes et téphrites du M'tsapéré, avec écoulement rapide ; érosion et transport importants (débit solide fort) ;
 - une section médiane (2) entre 180 et 90 m NGM marqué par un adoucissement de la pente vers une valeur autour de 4 %. Le cours d'eau récupère une vallée « perchée » intermédiaire encaissée majoritairement dans des basaltes à olivine de type β_3 et sa compétence diminue (chute des vitesses, stagnation possible localement au sein de coudes, etc). L'adjonction d'autres affluents (Illustration 27) permet l'augmentation significative des débits ;
 - une brève section (3) avec redressement de la pente entre 90 et 50 m NGM (pente de 10 %) qui marque une rupture entre la vallée intermédiaire et la vallée basse ou plaine alluviale de la dépression. Sur l'illustration 27, il est possible de localiser la rupture au niveau du méandre concave en rive droite situé sous le « Mro » de « Mro Oua Kaouénilajoli », c'est-à-dire à l'endroit même où la vallée commence à s'évaser en rejoignant la dépression. Le changement lithologique associé à cette rupture est le passage sur une coulée de basalte altéré à pyroxène de type β_2 . Cette rupture a pour conséquence l'augmentation significative de la compétence du cours d'eau au travers de cette section (augmentation des vitesses, de l'érosion et du transport solide). De nombreux blocs remplissent le lit du cours d'eau, ils sont pluri-métriques au contact β_2 / β_3 (souvent 5 m de côté) et leur taille diminue au fur et à mesure de la circulation du cours

d'eau. Le lit du cours d'eau a un aspect très torrentiel et il est délicat d'identifier des sections canalisantes ;

- une section basse à pente très douce (4) qui marque l'entrée du cours d'eau dans la dépression de Kawéni (pente de 2%). Le cours d'eau s'encaisse dans les formations de pyroclastites (talus entre 1 et 3 m) et sa compétence ralentit une fois de plus par diminution des vitesses et évasement du lit mineur. Au contact $\beta 2$ / pyroclastites, la taille des blocs qui remplissent le lit du cours a très nettement diminué (pluri-décimétriques au maximum) ;

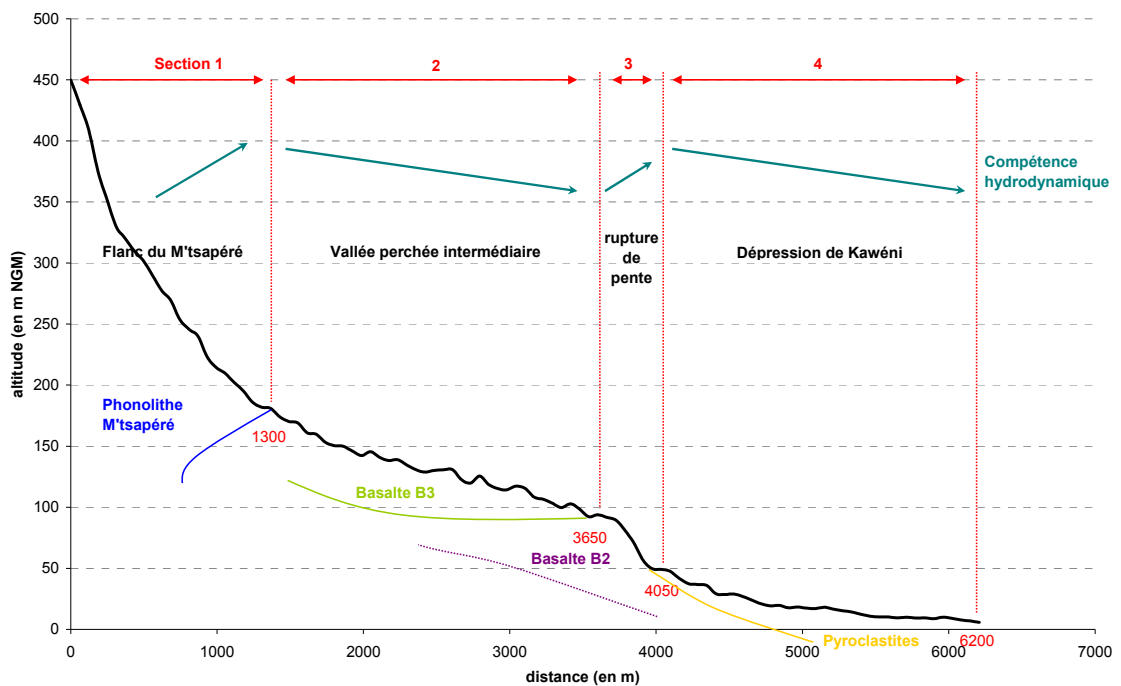


Illustration 28 : Profil topographique du lit mineur de la rivière Kaouénilajoli. Les différentes sections correspondent à des changements lithologiques (cf. carte lithologique en Annexe 1). La disposition des unités lithologiques est ici schématique et ne doit pas être interprétée en profondeur.

A l'examen de ce profil en long du lit mineur, il est possible de distinguer les sections qui pourraient favoriser l'infiltration (= sections à compétence moindre du cours d'eau de type (2) et (4) et à lithologie propice à l'infiltration) et les sections à circulation préférentielle voire à exfiltration (sections (1) et (3)).

Les sorties de reconnaissance du cours d'eau de la Kaouénilajoli (entre la RN et le point coté 50 m NGM) du 22 & 25 novembre 2008 ont permis (i) de dresser une liste d'observations conséquentes à la fois sur la morphologie de la rivière, son fonctionnement hydrologique et sa vulnérabilité (Annexe 4) et (ii) d'estimer ou de jauger le débit de la rivière en différentes sections.

L'objectif principal des reconnaissances était de vérifier ou non l'hypothèse selon laquelle des infiltrations dans le lit du cours d'eau étaient susceptibles de se produire et de participer à l'alimentation des systèmes aquifères sous-jacents, et de déterminer, si cette hypothèse est confirmée, les mécanismes et les zones d'infiltration.

Les observations des sorties de reconnaissance sont consignées en détail en Annexe 4. On notera que les conditions pluvieuses de la journée du 22 novembre ont permis de faire d'intéressantes observations hydrodynamiques et les conditions sèches de la journée du 25 novembre ont permis de vérifier et d'affiner les conclusions de la sortie précédente.

On retiendra principalement des deux sorties, les observations suivantes :

- la rivière de la Kaouénilajoli est soumise, dans sa partie aval (sous 25 m NGM environ) à une dégradation et une pollution très importante dont les conséquences sur la qualité des eaux sont évidentes. De nombreux déchets ménagers et végétaux sont jetés dans le lit de la rivière (la nature de ces déchets est retranscrite au § 4.2), les talus s'érodent très rapidement du fait de l'aménagement sauvage, de la présence des zébus dans les pentes, et de la déforestation des abords pour faire place aux bangas. Il n'est pas rare de voir aussi des activités de lessive dans les zones amont du cours d'eau vers 40 m NGM (point 18) et plus haut encore.
- La dégradation des talus a pour conséquence conjointe d'intensifier le charriage par les ravines bordant la Kaouénilajoli. A plusieurs endroits, il est possible de voir que les ravines ont des fonctionnements hydrologiques sur-amplifiés comparativement à la rivière principale avec : présence d'un éventail de déjection qui obstrue le cours d'eau, d'effondrements des berges qui rétrécissent la section du lit, présence d'embâcles... Il est important de souligner que l'accélération des ravinements et des érosions de berges ont pour conséquence directe d'obstruer le cours d'eau, d'en changer localement les pentes, voire de tapisser le fond du lit mineur de matériaux fins et imperméables (type argile, matière organique compacte...) et donc de réduire les infiltrations potentielles si celles-ci sont mises en évidence... Directement c'est l'alimentation de la nappe sous-jacente qui est menacée.
- Plusieurs puits ont été creusés dans le lit ou en bordure du lit du cours d'eau de manière à créer des réserves temporaires d'eau (à des fins d'utilisation pour la lessive mais aussi pour l'agriculture ou les zébus). Ces puisards ont pour conséquence directe de capturer une partie des écoulements superficiels et d'en favoriser l'infiltration vers les horizons sous-jacents (sorte de structures drainantes).
- La morphologie du lit mineur est assez irrégulière et fait état de mini-bassins dépressionnaires qui ne sont pas communicants (des bourrelets de lit mineur constituent des obstacles à la progression de l'eau). Par conséquent, ces mini-bassins sont souvent raccordés à des ravines affluentes et la dynamique en contexte pluvieux montre que ces bassins doivent préalablement se remplir par

le jeu des affluents, gonfler et se mettre en communication qu'au-delà d'une certaine intensité hydrologique. Ce n'était pas le cas lors de nos observations et bien qu'il ait plu pendant plus de 3h, aucun de ces bassins n'ont été mis en communication mais sont restés stagnants pendant les précipitations et se sont vraisemblablement infiltrés par la suite, au tarissement des ravines affluentes.

- Comme soupçonné en début de paragraphe, **la rivière de la Kaouénilajoli s'infiltré sur une portion définie localisée en aval du contact lithologique entre les basaltes $\beta 2$ et les formations volcano-sédimentaires** ici à dominante pyroclastique. Les mesures de débits réalisées en amont (3.3.2.b) et l'absence de tout écoulement en aval de cette portion nous confortent dans nos hypothèses d'une alimentation des systèmes aquifères directement par infiltration de la Kaouénilajoli avec des modalités qu'il conviendra de préciser sur plusieurs cycles hydrologiques au moyen de suivis et d'études supplémentaires. Il faut cependant noter que ces infiltrations se produisent en amont des zones de décharges de déchets et de dégradation du cours d'eau, ce qui laisse supposer une contamination moindre des eaux qui s'infiltrent.

b) Campagne de jaugeage de la Kaouénilajoli et mise en évidence des infiltrations

Dans le but de mettre en évidence des infiltrations potentielles de la rivière en direction de la nappe sous-jacente, des jaugeages ont été effectués lors de la sortie du 22 novembre le long du cours d'eau afin de distinguer d'éventuelles variabilités spatiales de débit qu'il faudra par la suite interpréter en termes d'infiltration une fois les autres variables écartées (intensité de la pluie, fiabilité des méthodes de jaugeage, absence de prélèvement, etc.).

Le domaine d'application du jaugeage ainsi que son mode opératoire sont présentés en annexe 6. Cette méthode dite « au sel » a été testée lors de l'étude et il s'avère qu'elle peut être considérée comme la plus adéquate à mettre en œuvre dans le contexte mahorais – lors de suivis ponctuels - et ce, pour les raisons suivantes :

- morphologie du lit mineur très hétérogène, section mouillée < à 5 m et profondeur <1 m. De nombreux galets et autres irrégularités tapissent le lit mineur et accentuent cette turbulence ;
- régime du cours d'eau turbulent dont l'avantage principal est de brasser le nuage de sel et d'en favoriser sa dispersion, de sorte que la concentration est très rapidement homogène sur une petite distance lors du passage ;
- débit très largement inférieur à 3 m³/s ;
- température de l'eau à 25 °C optimisant la dissolution du sel et la mesure de la conductivité.

Les conditions météorologiques pluvieuses de la journée du 22 novembre 2008 ont permis de faire des mesures et des observations relativement fiables de débits compte tenu des conditions et de l'hydromorphologie de la rivière.

Un débit de 10,6 l/s a été déterminé par jaugeage au sel au point « 15 » de coordonnées $X_{523265} / Y_{8590046}$ (carte en Annexe 4).

Cependant, l'intégralité de la masse de sel de départ (515 g) n'a pas été retrouvée (486 g) suite au jaugeage. Seule 95 % de la masse de sel semble avoir été récupérée, bien qu'il soit difficile d'en être certain. En effet l'augmentation sensible de 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ du signal de base de la rivière montre qu'il y a vraisemblablement eu une petite fluctuation dans la nature des eaux pendant le jaugeage. Cette fluctuation a été considérée comme linéaire lors des calculs, ce qui n'est peut être pas le cas en réalité et par conséquent il est possible qu'une partie du sel manquant ait été comptabilisé comme étant le signal de base.

Toutefois la prise en compte de ces 5 % de sel manquant n'a pas d'impact conséquent sur la mesure de débit.

Un jaugeage manuel, afin de vérifier l'ordre de grandeur de cette valeur a été effectué à l'aide d'un récipient de 80 l et d'un chronomètre. Un débit de 12,4 l/s a été mesuré une centaine de mètres en amont du point « 15 », au point « 16 » de coordonnées $X_{523245} / Y_{8590117}$ (carte en Annexe 4). Cette mesure confirme l'ordre de grandeur du débit jaugé au sel au point « 15 », la différence entre les deux mesures est faible et peut avoir plusieurs explications :

- la différence de méthodes de jaugeage (le jaugeage au récipient implique nécessairement que le cours d'eau soit bien canalisé, ce qu'il fut difficile de vérifier lors de la mesure) ;
- Il s'est écoulé environ 10 min entre les deux mesures, ce qui est un laps de temps suffisant pour que les débits varient sensiblement dans cette partie de la rivière ;
- le débit le plus fort a été mesuré en amont ce qui peut laisser croire (supposition sans plus) que la différence s'est infiltrée entre les deux points de jaugeage.

Quoi qu'il en soit, la présence de pertes par infiltration dans le lit mineur de la Kaouénilajoli est avérée et est de l'ordre de 10 l/s.

Ces pertes ont été localisées le 22 novembre le long d'une section de la rivière se développant à moins d'une centaine de mètres en amont du point « 17 » qui semble marquer une limite d'infiltration au-delà de laquelle il n'y a plus d'écoulement apparent. Les coordonnées de ce point sont $X_{523583} / Y_{8589610}$ entre les altitudes 20 et 30 m NGM (carte en Annexe 4 et carte lithologique en Annexe 1). Il est difficile d'être plus précis quant à la localisation de ces pertes, tant le lit du cours d'eau est irrégulier et recouvert de feuilles. Cela étant, ces pertes ne sont pas diffuses car le débit semble avoir été conservé jusqu'à sa circulation sur cette section.

Lors de la sortie du 25 novembre, les débits de la rivière étant beaucoup plus faibles, il n'a pas été possible d'effectuer des jaugeages, ni par la méthode « au sel », ni à l'aide du récipient et du chronomètre. Les débits ont simplement été estimés de visu. Ces faibles débits ont rendu possible l'identification d'un point d'infiltration plus en amont du point « 17 », peu avant le contact entre les basaltes $\beta 2$ et les pyroclastites (environ au point « 13 » de coordonnées $X_{523597} / Y_{8589634}$).

A l'aide des observations faites lors des deux sorties, il est possible d'étaler au minimum la zone d'infiltration entre le point « 13 » et le point « 17 », soit une distance approximative de 350 m. Il convient de nuancer cette distance car elle est difficile à mettre en évidence. Il serait nécessaire de répéter les observations lors de conditions hydrologiques différentes afin de mieux préciser cette extension (Illustration 29).

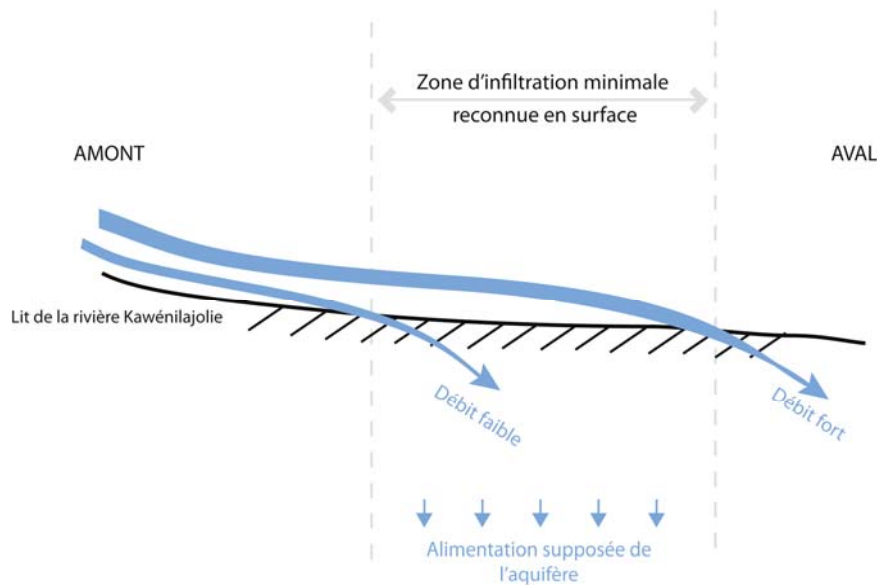


Illustration 29 : La localisation des zones d'infiltration est dépendante du régime hydrologique de la rivière au moment de la reconnaissance.

Il s'agit alors de préciser si ces infiltrations alimentent la nappe ou si simplement elles s'écoulent dans les formations alluviales de la rivière c'est-à-dire en subsurface (composées ici de formations pyroclastiques remaniées et de blocs de basaltes décimétriques tout au plus) et résurgent par endroit. Cette observation a été faite en aval du point d'infiltration, notamment grâce aux puits qui jalonnent le lit mineur à cet endroit. Il est possible d'y faire ces deux observations (Annexe 4) :

Primo, entre l'aller et le retour de la reconnaissance du 22 novembre, soit en l'espace de 4h pendant lesquelles il a majoritairement plu, les puits montraient un niveau d'eau plus élevé au retour.

Secundo, la coupe franche des parois de ces puits ne laisse pas apparaître de sections mouillées qui expliqueraient leur remplissage par alimentation via les formations alluviales de subsurface de la rivière. Il est davantage probable que ces

puits se soient remplis directement par la surface, soit à la manière d'un pluviomètre, soit par contribution des micros rigoles qui en entaillent les flancs. La présence de ces puits est donc capitale dans la compréhension de l'hydrofonctionnement de la rivière. Ils montrent que les infiltrations opérées plus haut ne transitent pas dans les formations alluviales de subsurface. Par conséquent, il est peu probable que ces eaux résurgent en un endroit donné de la rivière.

Ces infiltrations transitent donc en profondeur vers des horizons aquifères qu'il conviendra d'identifier. Il sera par ailleurs très intéressant de quantifier ces infiltrations sur un cycle hydrologique et de les mettre en relation avec les volumes qui transitent dans la nappe de Kawéni afin de distinguer - si elles existent - des alimentations supplémentaires de la nappe.

3.4. LE LAGON, LIMITE AVAL DE L'AQUIFERE DE KAWENI

3.4.1. Examen des chroniques marines

Les données sur les altitudes des niveaux d'eaux marins ont été récoltées auprès du SHOM¹¹. Ces chroniques marines sont exprimées en Cote Marine (CM), cote de référence dans le domaine maritime qu'il convient de raccorder au niveau NGM (0 m CM = -1,78 NGM).

L'analyse de l'évolution des altitudes du niveau marin depuis 1993 jusqu'en 2008 (Illustration 30) nous permet d'en déduire les éléments suivants :

- le niveau moyen de la mer entre 1993 et 2008 s'établit à 0,22 m NGM ;
- l'altitude maximum atteinte lors des marées hautes est de 2,37 m NGM (novembre 2002), le niveau moyen des marées hautes étant de 1,37 m NGM ;
- l'altitude minimum atteinte lors des marées basses est de -1,76 m NGM, le niveau moyen des marées basses étant de -0,92 m NGM ;

L'amplitude maximum sur la période considérée a été atteinte en octobre 2006 avec 4,09 m de marnage. L'amplitude moyenne est de 2,29 m. Compte tenu de l'amplitude de la marée à Mayotte, les courants de marées sont importants et jouent certainement un rôle au niveau des aquifères côtiers.

On remarque, d'après la chronique, que le niveau moyen de la mer reste constant depuis 1993. Cependant, les niveaux extrêmes et moyens atteints lors des marées hautes et des marées basses ont tendance à diminuer (Illustration 31) de quelques centimètres. Ces observations sont en cohérence avec celles réalisées par le satellite Topex-Poseidon sur la période 1993-2000. En effet, d'après celui-ci, le niveau marin a tendance à diminuer de 0 et -5 mm/an dans cette partie du globe (Annexe 5).

¹¹ Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

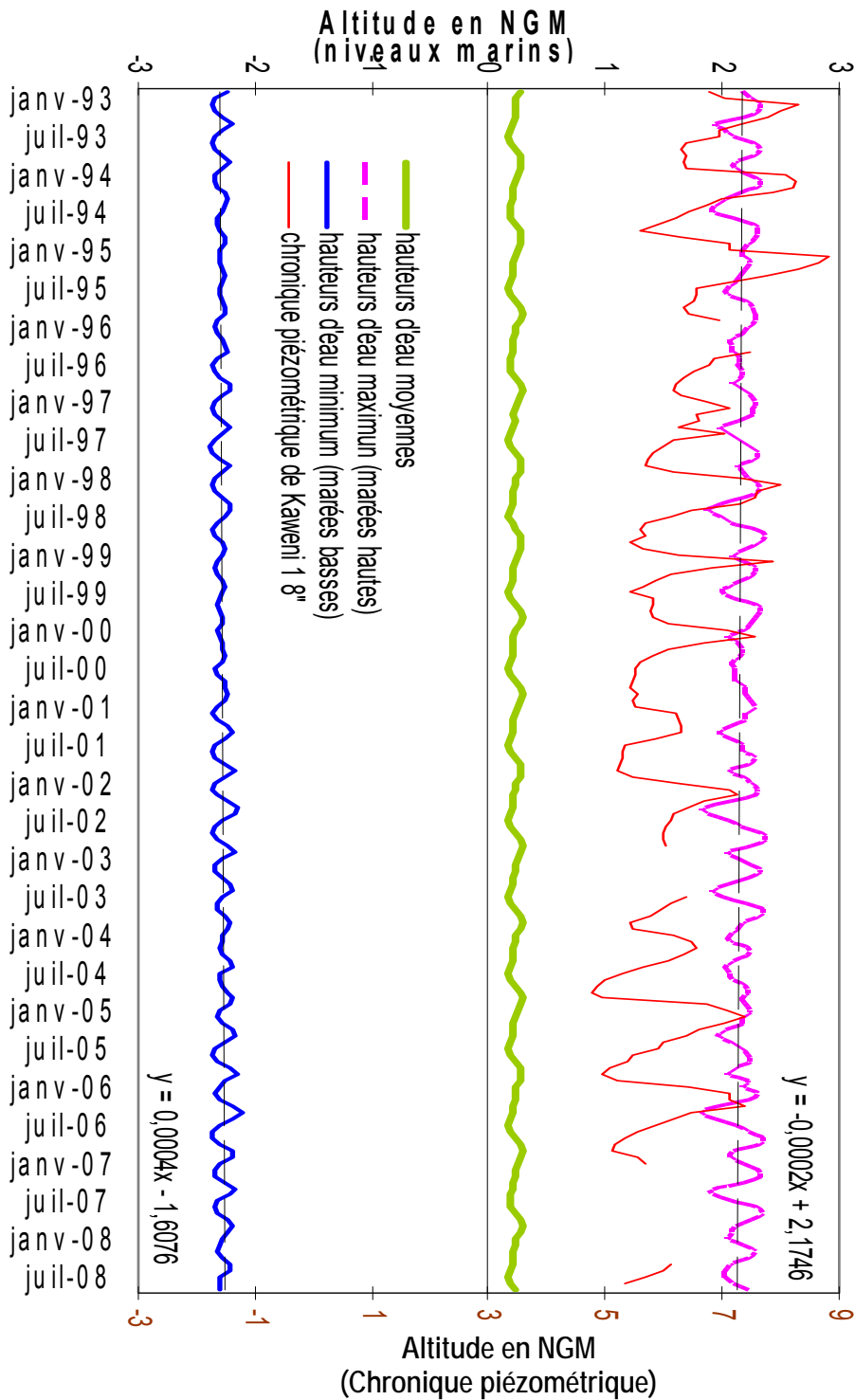


Illustration 30 : Chroniques des fluctuations marines enregistrées à Dzaoudzi depuis 1993 à nos jours. La chronique piézométrique de Kawéni 1 8'' est superposée

		Période 1993-2000	Période 2000-2008
		Altitude en NGM	Altitude en NGM
Marée haute	Niveau max	2,17	2,14
	Niveau min	0,59	0,50
	Niveau moyen	1,39	1,35
Marée basse	Niveau max	-0,17	-0,12
	Niveau min	-1,59	-1,55
	Niveau moyen	-0,94	-0,90
Niveau moyen marin		0,22	0,22
Marnage moyen		2,33	2,25
Niveau piézométrique moyen		6,70	5,96

Illustration 31 : Comparaison des niveaux statistiques marins enregistrés à Dzaoudzi entre la période 1993/2000 et 2000/2008

La chronique piézométrique de l'ouvrage 12307X0011 a été ajoutée à l'illustration 30 afin de mettre en évidence d'éventuelles relations entre l'évolution du niveau piézométrique et celle des niveaux marins. Le toit moyen de la nappe a diminué de 10 % entre les périodes 1993-2000 et 2000-2008, le niveau d'eau moyen des marées hautes à quand à lui également diminué (-3%).

Des précautions doivent être prises quand à ces observations et à une éventuelle relation entre l'évolution du toit de la nappe et celle du niveau marin. Il n'est pas à exclure que l'abaissement du niveau de la nappe de Kawéni soit en partie dû à la diminution du niveau de base qui s'opère actuellement dans cette partie du globe. Mais d'autres facteurs tels que l'intensité des prélèvements et les modalités de recharge permettent davantage d'expliquer cette tendance. Cependant, à long terme, il est possible d'émettre l'hypothèse selon laquelle les changements climatiques, responsables de la diminution du niveau de base dans cette région du monde, pourraient avoir un impact sur le niveau piézométrique.

Par ailleurs, il serait probablement possible d'observer des fluctuations piézométriques journalières du niveau de la nappe en réponse à la marée océanique à partir d'enregistrements simultanés de la marée et des fluctuations piézométriques. Ces données (non disponibles à ce jour) permettraient de mieux cerner les relations qui lient ces deux hydrosystèmes.

3.4.2. La conductivité de la nappe de Kawéni, un indicateur de la proximité du milieu marin ?

Bien que les chroniques ne soient pas régulières et que certaines valeurs ne soient pas vérifiées (notamment les premières pour lesquelles il est possible d'émettre certaines réserves), l'examen des fluctuations des conductivités (Illustration 32)

mesurées aux forages F1, F2 et 3 10" (dont les valeurs ont déjà fait l'objet d'une analyse dans le § 3.1) permet de faire les observations suivantes :

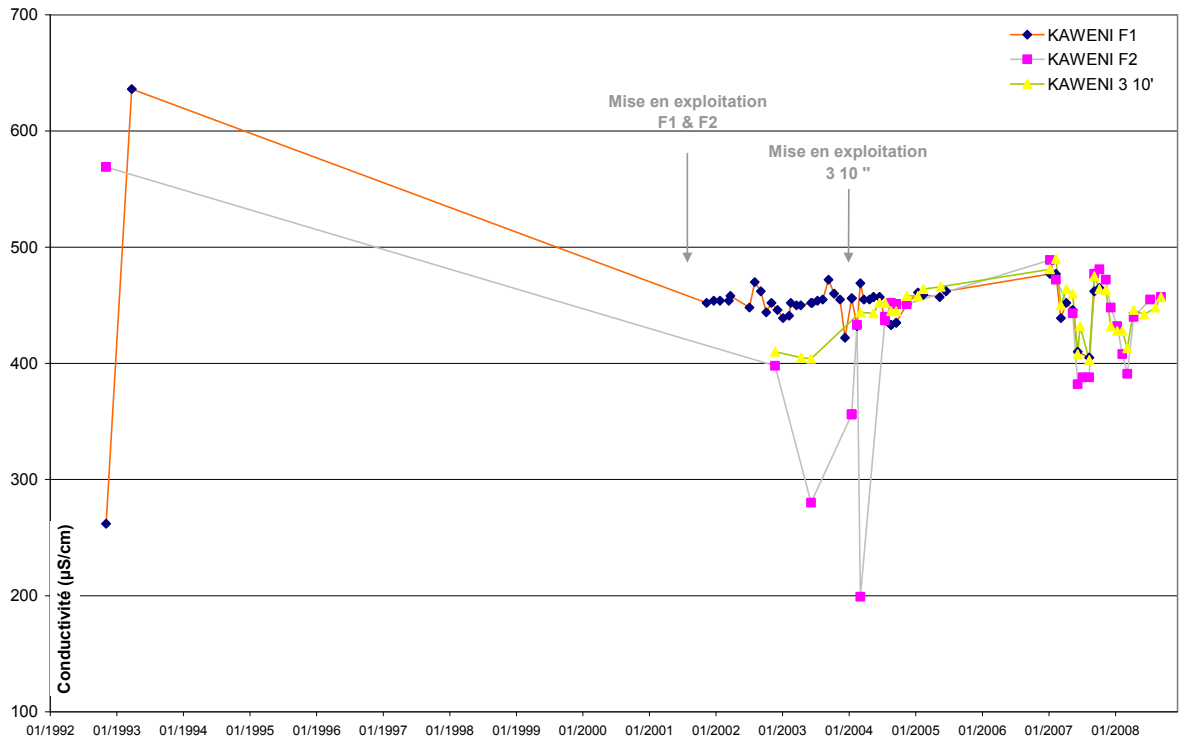


Illustration 32 : Mesures de conductivité aux ouvrages AEP de Kawéni F1, F2 depuis 1992 et 3 10" depuis 2002

- i. Les 3 chroniques ont un profil divergent au début de leur suivi et semblent aujourd'hui converger vers des valeurs et des variations proches. Dans le détail, si l'on se penche sur les chroniques F1 & F2 entre 2001 et 2004, on observe des divergences assez nettes et marquées dans les fluctuations ainsi que dans les gammes de valeur. Le forage F2 montre des valeurs de conductivité plus faibles que F1 mais des fluctuations plus importantes. Aujourd'hui, les valeurs et variations de conductivité des forages F1 & F2 sont quasiment identiques. En ce qui concerne le forage 3 10", les variations et valeurs de conductivité avant sa mise en exploitation (plus tardive, en 2004) suivent elles aussi des fluctuations différentes de celles des forages F1 & F2. Depuis la mise en exploitation de cet ouvrage, ces fluctuations deviennent identiques en valeurs et en variations à celles des forages F1 & F2. Ainsi la mise en exploitation du parc de forages AEP F1, F2 et 3 10" a visiblement eu pour conséquence l'homogénéisation des signaux de conductivité dans les 3 ouvrages (signaux qui auparavant suivaient des fluctuations différentes). Il est possible d'introduire alors l'hypothèse selon laquelle la mise en exploitation de

ces forages a eu pour effet : (i) de purger les horizons aquifères d'eaux connées et (ii) d'en homogénéiser les eaux...

- ii. Aujourd'hui, les chroniques de conductivité mesurées montrent des cyclicités visiblement annuelles dans un premier temps (Illustration 33). Les fluctuations montrent des périodes de signal faible (entre 380 et 410 $\mu\text{S}/\text{cm}$) en saison humide et des périodes de signal fort en saison sèche (entre 460 et 490 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Cette cyclicité n'existait vraisemblablement pas avant 2004, 2005 ou 2006, soit avant la mise en exploitation de l'ouvrage 3 10'' ou alors son amplitude était moindre (il est possible de voir des oscillations sur la chronique du forage F1) et/ou le suivi n'était pas assez régulier pour la mettre en évidence. Par ailleurs, l'absence de chroniques piézométriques dans le secteur entre janvier 2007 et juin 2008 (Illustration 4) empêche toute corrélation entre les variations piézométriques de la nappe et les fluctuations de conductivité associées.

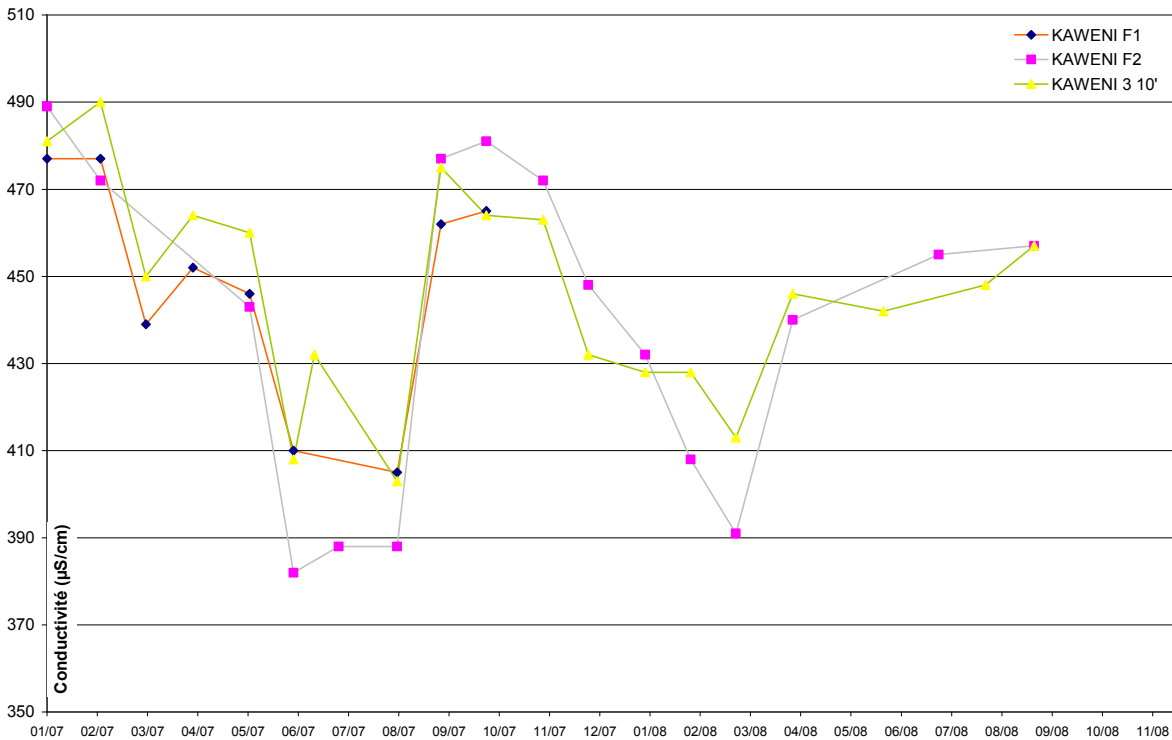


Illustration 33 : Mesures de conductivité aux ouvrages AEP de Kawéni F1, F2 et 3 10'' depuis janvier 2007

En toute logique, cette baisse de signal en saison humide correspond à l'alimentation de l'aquifère par des eaux jeunes et peu chargées (phénomène de dilution de la nappe). A l'inverse, en saison sèche, le rabattement des niveaux piézométriques dus (i) au déficit d'alimentation et (ii) aux prélèvements par les pompes (§ 3.2.2) induit à la fois (i) une minéralisation des eaux (temps de résidence des eaux et interactions eau/roche plus long) et (ii) un effet sensible des eaux marines qui investiraient la nappe

de Kawéni en saison sèche en réponse à l'appel créés par les prélèvements. Toutefois, et en relation avec l'examen hydrochimique énoncé plus haut (cf. § 3.1) il est encore aujourd'hui délicat de mettre en évidence cette intrusion d'eau marine, de la quantifier et d'en mesurer les effets.

Cependant - et c'est important de le remarquer - depuis début 2007 les fluctuations de ces conductivités ne traduisent pas de tendance significative à la hausse (que ce soient les valeurs moyennes, basses ou hautes). Ainsi, s'il est question d'une influence d'intrusion d'eaux marines dans la nappe, il semble que celle-ci n'ait pas progressé depuis le début 2007.

En mars 2004, et septembre 2004 (cf. rapports BRGM/RP-53161-FR et BRGM/RP-54082-FR), des inventaires des points d'eau présents dans la dépression de Kawéni ont été réalisés en vue d'établir des cartes piézométriques de hautes eaux et basses eaux et d'effectuer des mesures de conductivités. 38 puits ont été identifiés dans la dépression de Kawéni, 16 étant munis d'une véritable margelle (tubes métalliques buses, ouvrages maçonnés...) Six mois plus tard, seuls 23 puits ont pu être retrouvés (dont ceux équipés d'une margelle). Cependant, 39 nouveaux ouvrages ont été recensés dont un avec une margelle cimenté. Des indices BSS ont été attribués aux 17 puits équipés, les 60 autres ayant une pérennité incertaine. Cet inventaire n'a pas été actualisé en 2008 pour plusieurs raisons :

- absence de nivellement engendrant une incertitude (de l'ordre du mètre) sur la valeur de l'altitude du sol au droit de chaque puits ;
- évolution anarchique du nombre de puits (création et remblaiement de puits difficilement contrôlable) ;
- incertitudes sur les valeurs des mesures effectuées étant donné l'impossibilité de purger les puits ;
- Et surtout l'absence d'informations sur la nature de ces puits, leur profondeur et leur usage...

Des mesures de conductivités ont été réalisées en mars 2004 lors de l'inventaire des points d'eau. Elles ont été complétées par des mesures de surface. Les mesures, réalisés sans pompage préalable sont très variables (de 165 à 1174 $\mu\text{S}/\text{cm}$) ce qui nous conduit à émettre des réserves certaines quant à la pertinence de ces mesures. Néanmoins, il apparaît grossièrement que ces conductivités augmentent en bordure de mangrove et que les valeurs les plus élevées ont été relevées dans le secteur sud-est de la dépression.

D'autres mesures ont été réalisées en période de vives eaux afin de délimiter la remontée de l'invasion saline dans les ravines de la dépression de Kawéni. Ces mesures ont fait apparaître une faible remontée des eaux salées dans les ravines. A l'aval de la rivière de la Kaouénilajoli (début est de la zone Industrielle de Kawéni), à marée basse, la conductivité s'élevait à 11 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, elle est supérieure à 20 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à marée haute. Cette valeur diminue très rapidement à juste à l'amont de ce point et n'est plus que de 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à marée haute (à partir de l'entreprise COLAS).

Ces observations nous amènent à la conclusion suivante à laquelle il sera difficile d'apporter des éléments supplémentaires avec les informations dont nous disposons à l'heure actuelle. Bien qu'il y'ait des fluctuations évidentes de conductivité des eaux souterraines (nappe de Kawéni utilisée pour l'AEP et nappe superficielle) et des hausses en saison sèche, il est pour l'instant délicat d'incriminer les intrusions d'eau marine. Cela dit, des piézomètres de monitoring de conductivité placés en aval et en amont des forages de production AEP seraient une aide certaine pour la compréhension de ces variations et de leur origine.

4. Un aquifère vulnérable qu'il convient de protéger

4.1. INDUSTRIES, COMMERCES ET ACTIVITES DE SERVICE

Les activités artisanales et industrielles présentant un risque potentiel de pollution ont été recensées en 2004 (annexe 3 du rapport BRGM/ RP-540826-FR). Une cinquantaine de sites ont été identifiés sur la dépression de Kawéni. Ils sont pour la plupart situés entre la RN1 et la mangrove, dans la partie est de la dépression, à l'aval des forages exploités. Actuellement, aucun de ces sites ne présente un danger de pollution directe pour ces ouvrages, bien qu'il soit difficile de se prononcer sur l'état qualitatif de la nappe au droit de ces installations.

Les principales activités et sources potentielles de pollution identifiées sont les suivantes :

- garages automobiles, entreprises d'entretien mécanique et stations services (17) : les stockages d'huiles usagées, huiles de vidange et d'hydrocarbures ;
- dépôts de liquides inflammables (7) ;
- entreprises de traitement du bois (6) ;
- entreprises de peintures, de détergents (3) ;
- décharges et dépôts divers (3) auxquels il faut ajouter les décharges sauvages (chiffre inconnu).

Actuellement, aucun site n'est soumis à la réglementation ICPE. Il s'agit principalement d'entreprises et ateliers de petite taille utilisant ou stockant de petites quantités de produits potentiellement polluants. Ces produits sont souvent utilisés sans réelles précautions prises vis-à-vis de l'environnement et il s'avère que quelques incidents se sont déjà produits. On peut citer par exemple le cas d'une pollution engendrée par la surverse d'une fosse de stockage d'huiles de vidange lors d'un épisode pluvieux.

Des informations complémentaires ont été récoltées en 2008 (informations orales DRIRE) sur certaines activités et le devenir de certains polluants potentiels :

- les entreprises de fabrication de matelas mousse utilisent du TDI (Toluène diisocyanate). Cette substance chimique a une durée éphémère dans l'eau (hydrolyse rapide), les sols humides et les sédiments mais le risque potentiel de pollution n'est pas à exclure ;

- Une filière de récupération des huiles usagés (ADEME) et de vidanges (STAR), est mise en place. Cependant, il est supposé qu'un certain nombre de garages (les plus petits mais aussi les plus nombreux) n'y ont pas recours ;
- Les transformateurs contenant du PCB ont été identifiés et stockés en dehors de la dépression de Kawéni. La réglementation (Code de l'environnement) impose que d'ici 2010 tous les transformateurs dont la concentration en PCB dépasse les 500 ppm soient éliminés. Cependant, les concentrations de PCB mesurées actuellement dans cette zone laissent envisager une éventuelle pollution historique ou le simple fait qu'il existe encore quelques transformateurs non déclarés présents sur la zone d'étude.
- les dépôts sauvages de batteries automobiles existants actuellement dans la zone d'étude font l'objet de procédures d'exportation vers la métropole

Au regard des démarches actuellement mises en œuvre afin d'éliminer des sources de pollution (transformateurs et les batteries), et du faible développement envisagé de grosses unités de production (informations orales DRIRE), les sources potentielles de pollution sont principalement les petites activités et essentiellement les garages automobiles. Il faudra être vigilant par la suite quand à l'extension de ce type d'activité qui va de paire avec celle des zones urbaines non contrôlées et rapide à Kawéni.

La pollution diffuse générée par les activités automobiles a une incidence sur la qualité des eaux souterraines comme en témoigne les concentrations de HAP retrouvées dans les captages d'alimentation en eau potable (3.1).

Cependant, le risque de pollution engendré par la zone industrielle de Kawéni vis-à-vis des eaux souterraines reste actuellement difficile à évaluer et ce, pour plusieurs raisons :

- insuffisance d'informations quand à l'ensemble des activités présentes sur la zone d'étude : aucune activité déclarée ou autorisée actuellement, aucun suivi réalisé ;
- méconnaissance des types et des quantités de produits utilisés ;
- extension rapide et non contrôlée des activités artisanales à Kawéni.

En ce qui concerne les garages, afin de minimiser les risques de rejets directs au milieu naturel d'huiles ou d'hydrocarbures, il faudrait s'assurer que les professionnels disposent de cuves étanches (voir de bacs de rétention) et aient connaissance de la collecte d'huile mise à leur disposition.

Bien que les forages actuellement exploités pour l'alimentation en eau potable soient localisés en amont de la zone d'activité et que par conséquent le risque de pollution directe en amont est faible, il est indispensable de contrôler davantage les activités polluantes afin de préserver la qualité de la nappe.

4.2. LA RIVIERE DE KAOUENILAJOLI, VULNERABLE ET TRES EXPOSEE

La pollution urbaine touche fortement la partie aval de la rivière de la Kaouénilajoli. La dispersion de l'habitat dans ce secteur facilite la dégradation de l'eau par (i) l'apport dans la rivière de nombreux déchets, dont certains sont hautement polluants, (ii) l'apport de phosphates et nitrates dus au nettoyage (lessive, la vaisselle) directement réalisé dans la rivière et (iii) l'apport supposé de pesticides. De plus, les habitations localisées aux abords de la rivière ne sont pas raccordées à un système d'assainissement. Les polluants susceptibles d'être retrouvés dans le milieu sont les suivants :

- i. Les décharges sauvages sont situées dans le lit de la rivière ou en haut des talus (Annexe 4). La composition de ces déchets est très hétéroclite avec des risques de contenir des métaux lourds et d'autres substances polluantes. Les eaux de lixiviation de cette décharge gagnent directement la rivière contaminant ainsi les eaux et les surfaces d'infiltration. Il existe donc des risques de pollution des eaux souterraines par la percolation des eaux de lixiviats au travers du sol et de la zone non saturée et saturée de l'aquifère. Les métaux sont des éléments qui retiennent notre attention car ils sont présents dans de nombreux déchets mis en décharge (boîtes métalliques, batteries de voiture, carcasses de voiture, composants électroménager et électroniques ; etc.). Le **plomb**, tout comme le **zinc**, est très peu mobile et facilement adsorbé sur les composants minéraux (argiles) et organiques ce qui limite les risques de pollution pour les eaux souterraines. Le **cuivre** migre peu du fait de sa forte tendance à s'adsorber, mais cette tendance peut s'inverser en milieu très acide (ce qui n'est pas le cas ici). Quant au **chrome**, sa solubilité est faible vis-à-vis des phénomènes de lessivage du sol sauf en conditions oxydantes ou il migre rapidement. En ce qui concerne l'**aluminium**, au-delà d'un pH 8 (c'est le cas des eaux dans la zone d'étude), une partie des hydroxydes d'aluminium est soluble (sous forme d'aluminates) et donc mobiles. Pour le **bore**, en pH basique, sa mobilité et donc les risques infiltration sont diminués.
- ii. L'apport de matières phosphatées et azotées conduit bien souvent à l'eutrophisation des eaux superficielles, notamment dans cette partie de la rivière où l'eau a tendance à stagner ou à s'écouler très lentement. En effet, une surproduction de végétaux a été observée en aval de la rivière sous le pont de la RN (plantes grasses, lentilles d'eau, etc.). Les nitrates sont très solubles dans l'eau et s'infiltrent facilement dans le sol pour atteindre les niveaux aquifères. Les phosphates sont moins bien solubles et ont tendance à s'accumuler dans le sol.
- iii. Les parcelles agricoles localisées à proximité du cours d'eau laissent supposer la présence de produits phytosanitaires dans le milieu naturel. Cependant, aucune information n'a pu être collectée quand aux pratiques agricoles actuelles

Les activités en présence et les pratiques actuelles de la population de Kawéni entraînent de réels risques de pollution et de dégradation de la rivière de la Kaouenilajoli dont les modalités qui sont complexes et propre à chaque polluant sont très mal connues. Il peut donc être envisagé que la qualité de la nappe est mise en péril. On remarque que les pressions sont essentiellement exercées sur une portion du cours d'eau localisée en amont de la zone principale d'infiltration (3.3.2.b) et que les polluants en présence (notamment les métaux) bien qu'ils soient loin d'être tous identifiés, ne sont pas tous mobilisables (stockage dans les sédiments du lit de la rivière). Cependant, il est à noter que l'existence de zones d'infiltration dans ces zones vulnérables est également soupçonnée (petits bassins individuels).

5. Programme d'étude pour l'année 2009

Les résultats du programme d'étude mené depuis 2003 sur les modalités d'exploitation et de protection de l'aquifère de Kawéni ont principalement permis de comprendre les implications de la géologie du cratère sur les fonctionnements hydrogéologiques de la nappe utilisée pour l'alimentation en eau potable. Mais ces résultats ont aussi permis d'identifier les nombreux risques auxquels l'aquifère est soumis. Il en émerge alors la nécessité d'une poursuite d'étude et d'une surveillance des paramètres qui contraignent l'aquifère. Comme indiqué en introduction (§ 1), certains volets du cahier des charges établi en 2005 sont aujourd'hui obsolètes du fait des évolutions et modifications profondes de la zone de Kawéni (perte de nombreux points d'eau, que ce soit des forages de la nappe profonde, ou des points d'eau de la nappe superficielle, mise en exploitation d'un forage supplémentaire...).

L'importance stratégique de la ressource en eau souterraine à Kawéni nous a conduit à mettre en œuvre un programme de poursuite d'étude sur l'année 2009, programme adapté aux évolutions et modifications de la zone de Kawéni et qui prend en compte les résultats du présent rapport. Ce programme comprendrait les 2 premiers volets ci-dessous (cf. § 5.1 et 5.2) qu'il est important de développer afin de mieux cerner les évolutions de l'aquifère de Kawéni et de proposer des recommandations d'usage nécessaires à la pérennité de la ressource. Il est important de rappeler que ces études ne seront que plus pertinentes si des moyens conséquents sont mis en place en termes de monitoring et de surveillance.

5.1. QUANTIFICATION DE LA RESSOURCE ET DE SES MECANISMES

Les mécanismes de recharge de l'aquifère étant identifiés, le programme d'étude proposé vise à quantifier dans la limite des données historiques disponibles les processus de recharge, transfert et vidange de l'aquifère, au moyen des travaux suivants :

- jaugeage de la Kaouénilajoli, suivi des débits et quantification des pertes par infiltration au cours d'une année hydrologique (principalement en saison des pluies) ;
- suivi piézométrique hautes eaux et basses eaux sur les ouvrages disponibles et mise en relation avec les infiltrations ;
- étude statistique de la pluviométrie et de ses implications en termes de recharge, et ce en fonction (i) des quantités de précipitations et (ii) des saisons ;

5.2. MESURE ET COMPREHENSION DE L'EVOLUTION DE LA RESSOURCE EN QUANTITE ET QUALITE

Le présent rapport fait état d'une évolution tendancielle à la baisse des niveaux piézométriques moyens de l'aquifère ainsi que des risques relatifs à la qualité des eaux souterraines. Le programme d'étude proposé devra :

- analyser, sur la base des données disponibles, l'ensemble des facteurs pouvant conduire à la régression de ces niveaux et dans la mesure du possible déterminer leur part respective dans cette évolution (déficit des précipitations, surexploitation, régression marine) afin d'adapter les stratégies de précaution qui s'imposent ;
- préciser l'état physico-chimique de la nappe à travers les analyses réalisées en 2009 sur les ouvrages exploités ;
- surveiller l'influence des eaux marines sur l'état de la nappe, à la fois en termes quantitatif et qualitatif (analyse des mesures de conductivité en continu au niveau des forages exploités et - sous réserve – monitoring en continu de la conductivité au piézomètre de Kawéni 1 8'')
- assurer un suivi hydrologique de l'impact des pompages (sur les ouvrages disponibles) dans le but de vérifier la tenue ou l'évolution des paramètres hydrodynamiques de la nappe depuis sa mise en exploitation. Cette opération permettra de disposer d'éléments significatifs d'une évolution ou non du potentiel aquifère. Après consultation auprès du SIEAM, il est possible de réguler les régimes de pompage, voire même de stopper un ou plusieurs ouvrages afin de mener ces opérations de suivi.

5.3. MODELISATION DE L'EVOLUTION DE LA RESSOURCE (POST 2009)

Lorsque les volets précédents auront été traités et dans le cas où (i) ils ont pu apporter des résultats conséquents, et (ii) les données physiques disponibles sont jugées suffisantes, il pourra être mis sur pied un modèle numérique de fonctionnement de l'aquifère. Il conviendra alors de compléter le modèle géologique existant afin de bien contraindre les géométries de la nappe.

Les résultats de ce modèle seront bien évidemment à nuancer dans la première année en raison du recul historique trop faible et des données somme toute peu précises (faible précision du MNT par exemple mais dont on peut espérer une amélioration). Mais il faut noter que sa construction constitue un pas en avant dans la compréhension du système aquifère de Kawéni. Il s'agirait du premier modèle de ce type réalisé à Mayotte qui pourrait être complété au fur et à mesure des années et donc s'améliorer en termes de prédiction, voire de gestion.

Toutefois, la mise en place d'un tel outil nécessite obligatoirement le nivellement des ouvrages de mesure - à savoir les forages d'exploitation et piézomètres - dont la Collectivité Départementale de Mayotte devait assurer la prise en charge en 2003.

6. Conclusion

Au regard de cette démonstration, il est important de retenir que la situation de l'aquifère de Kawéni est complexe.

D'un coté, il faut noter l'importance de la ressource en eau exploitée à l'échelle de l'île (près de 60 m³/h soit plus de 1000 m³/jour). Cette ressource est non seulement importante mais difficilement remplaçable à l'heure actuelle.

D'un autre coté, il faut noter que (i) le développement de la zone industrielle de Kawéni, (ii) la pression urbaine, artisanale et agricole, (iii) la proximité des eaux marines et (iv) l'influence supposée des pompages ont un impact conséquent à la fois sur la quantité et la qualité de cette ressource.

De ce fait, il est nécessaire de mettre en œuvre les méthodes et moyens disponibles afin de préserver cette ressource et de l'exploiter à bon escient.

La finalité de ce rapport final 2008 est triple. Non seulement, le rapport propose une synthèse des études antérieures relatives à l'aquifère mais apporte des éléments de réponse à la problématique de départ. Ces éléments permettent d'avancer dans la compréhension du système aquifère. Enfin, ce rapport fait état d'outils développés pour l'étude (création du modèle géologique 3D) de méthodes développées pour l'étude (jaugeage au sel) ainsi que d'une proposition de programme de poursuite d'étude au regard des arguments évoqués plus haut.

En ce qui concerne les éléments de réponse à la problématique de départ, cette étude a permis d'avancer sur les points suivants ;

- a. **Le modèle géologique de l'aquifère**, à savoir la précision des géométries de la structure profonde qui conditionnent vraisemblablement le réservoir de la nappe de Kawéni ;
- b. **Le modèle hydrogéologique** et la mise en évidence d'un aquifère potentiel profond (dont les indices géophysiques et les géométries sont propices à la création d'un réservoir), mais dont la géologie et les propriétés hydrodynamiques ne sont pas précisées et restent capitales pour déterminer le potentiel en termes d'exploitation. Le comportement de l'aquifère volcano-sédimentaire a été décrit, notamment ses modalités de recharge lors des cycles hydrogéologiques. L'évolution tendancielle des niveaux aquifères traduit une baisse progressive dont les raisons ne sont pas encore fixées (exploitation AEP, abaissement du niveau de base, raccourcissement de la saison humide). Les modalités de recharge de l'aquifère ont été mise en évidence via l'infiltration de la rivière Kaouénilajoli au contact des formations de pyroclastites. De manière qualitative il est possible d'apprécier aujourd'hui le fonctionnement de la nappe.

- c. **La composition hydrochimique**, la qualité des eaux de la nappe ainsi que de l'évolution de ses paramètres de conductivité ont été décrites. Ces études montrent qu'à l'origine les eaux exploitées par les différents forages avaient des signatures hydrochimiques différentes qui laissaient supposer soit la sollicitation d'eaux connées soit des différences d'alimentation. La mise en exploitation de la zone conduit à une homogénéisation probable des eaux mais ne montrent pas de contamination significative de la nappe par intrusion des eaux marines.
- d. **La vulnérabilité de la zone d'étude**. La dégradation de la rivière est un fait, notamment dans sa partie aval (dégradation physique et pollution) et conduit manifestement à l'obstruction du cours d'eau ce qui n'est pas sans risque sur la réduction des infiltrations mais aussi sur le stockage des polluants sur cette surface d'infiltration et donc la contamination des eaux qui y transitent. Par ailleurs, le contingent d'activités artisanales, agricoles et industrielles de la ZI de Kawéni implique la présence et l'usage de nombreux déchets et polluants dans des conditions qui ne sont pas toujours connues et maîtrisées. Il est important de noter que, malgré tout, ces infiltrations s'opèrent en amont des zones principales de pollution et de dégradation mais n'empêchent en rien une contamination des captages comme l'a mis en évidence l'analyse de HAP dans les forages F1 et F2 Il y'a urgence à connaître et à maîtriser les pratiques à risque dans la dépression de Kawéni.

En ce qui concerne le programme de poursuite d'étude, il devra être mis en application en 2009 et s'accompagner d'une surveillance permanente des paramètres contraignant l'évolution des niveaux de la nappe (monitoring à l'aide des sondages comme préconisé dans le rapport d'Année 2, la nécessité de ces sondages est renforcée à la lecture de ce rapport) afin de disposer des données et éléments nécessaires à la compréhension de cette évolution. Ce programme d'étude implique la concertation active entre les différents partenaires (CDM, SIEAM, SOGEA, DAF et DRIRE) et leurs responsabilités respectives.

7. Bibliographie

Annuaire DAF de 1993 à 2006

Eberschweiller C. (1986) – Etude hydrologique, hydrochimique et géochimie isotopique d'une île volcanique sous climat tropical humide – Mayotte. Thèse de 3e cycle. Université Paris 6.

Définition des réseaux de surveillance DCE de la qualité des eaux de surface, eaux souterraines et côtières de Mayotte – Rapport BRGM/RP-56774-FR, à paraître en 2009.

Foucault A., Raoult J.F.(2000), Dictionnaire de Géologie. DUNOD 5^{ème} édition

Euher 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.

Wuilleumier A., Mathieu F., Jossot O., Euher 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.

Guilbert M., Aunay B., Lachassagne P., Malard A., Mathieu F. (2008) – Synthèse hydrogéologique du Nord-Est de Mayotte. Caractérisation des masses d'eau souterraine des secteurs de Petite-Terre et de Tsoundzou-Koungou – Rapport BRGM/RP-56600-FR, 79 p., 29 ill. et 8 ann.

J. Lapègue (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 de doctorat, Université de la Réunion.

Liste des pesticides utilisés par les sociétés de désinsectisation. Source DASS – Mayotte 2006.

Liste pesticides utilisés Mayotte – Comores - Madagascar. Source DAF

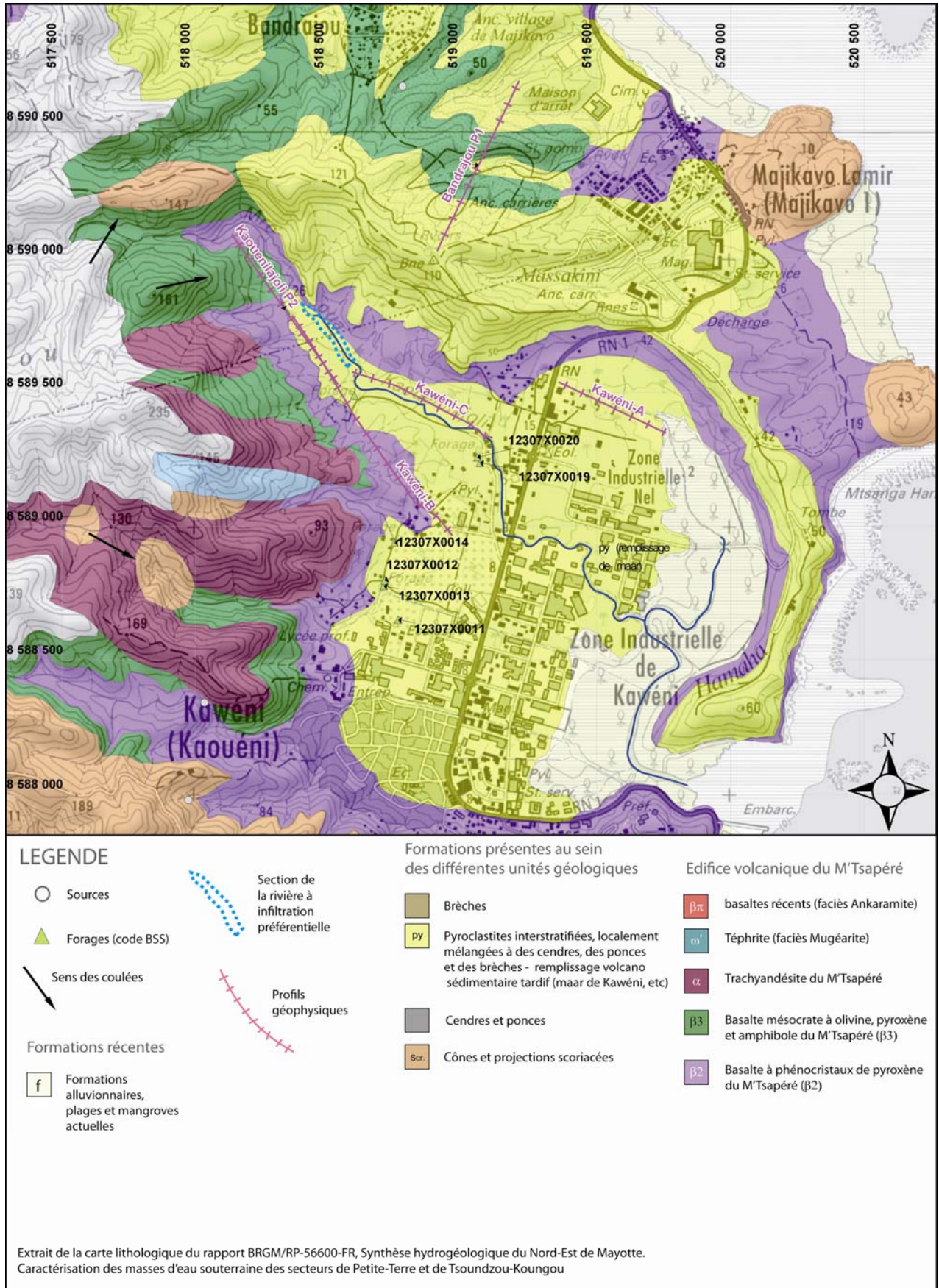
Liste des produits phytosanitaires généralement utilisés aux Comores. Source des données : Centrale d'achat d'intrants agricoles.

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

Niveaux d'eau de la mer. Document à l'attention des membres du Conseil d'Hygiène de la CDM. Document DAF – MAYOTTE OCT.

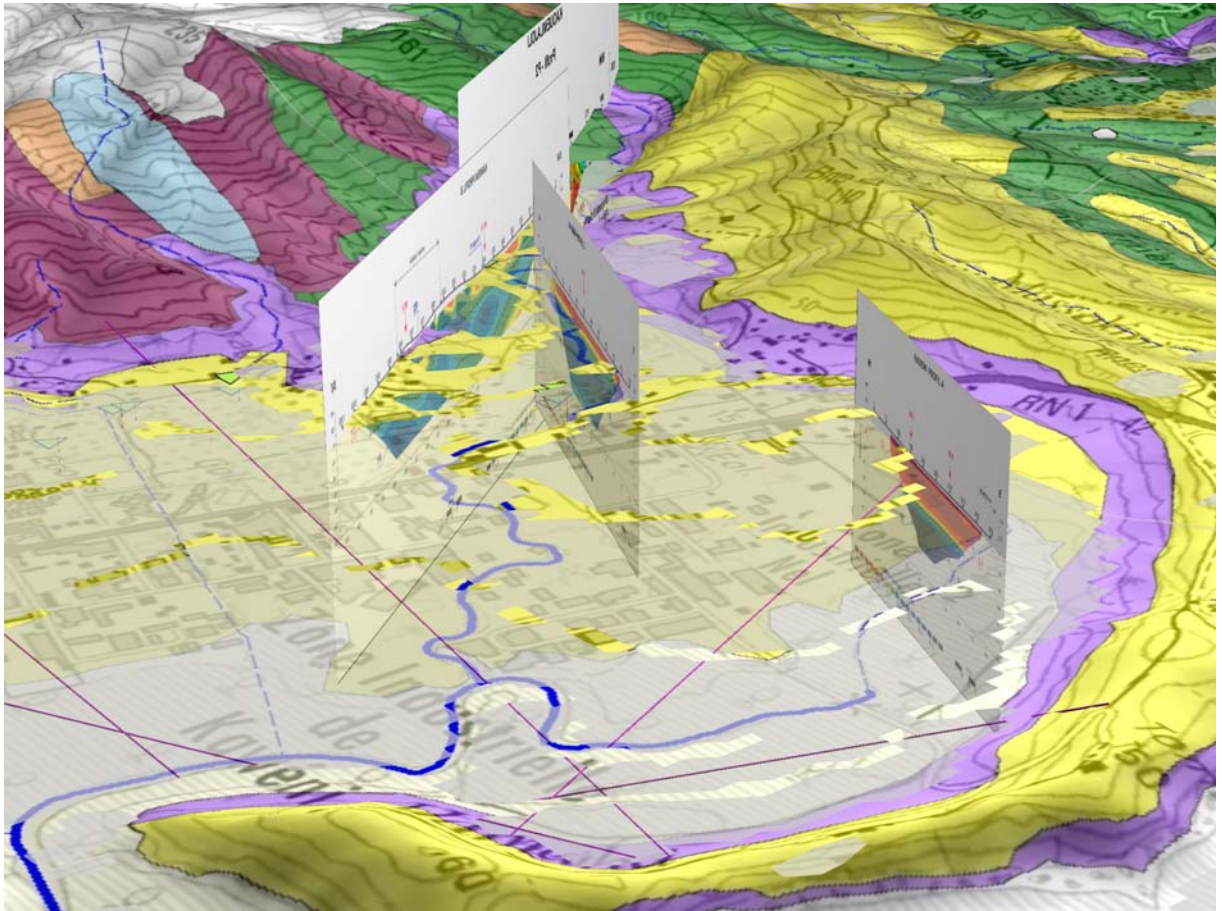
Annexe 1

Carte lithologique de la dépression de Kawéni

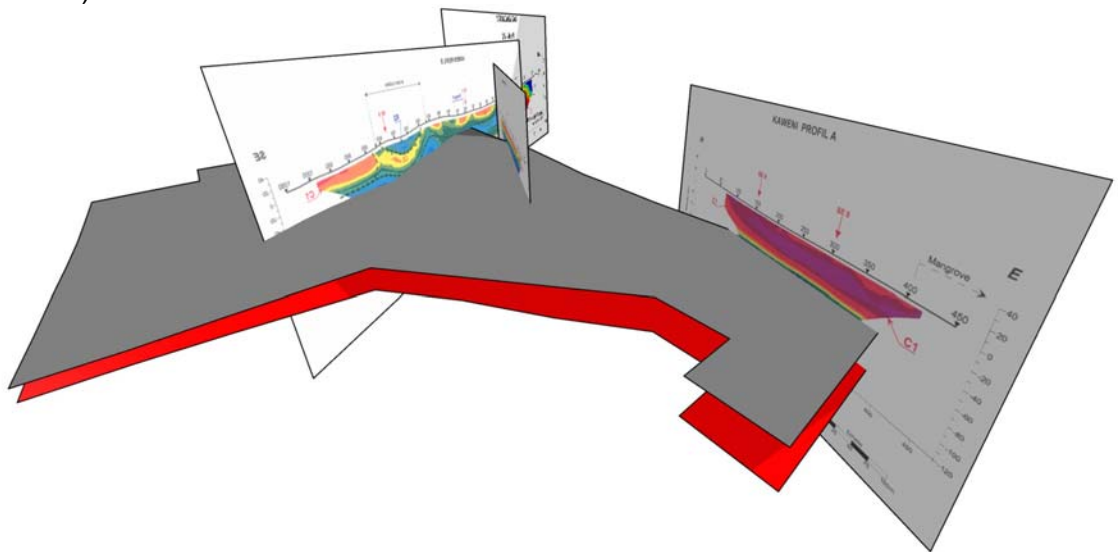


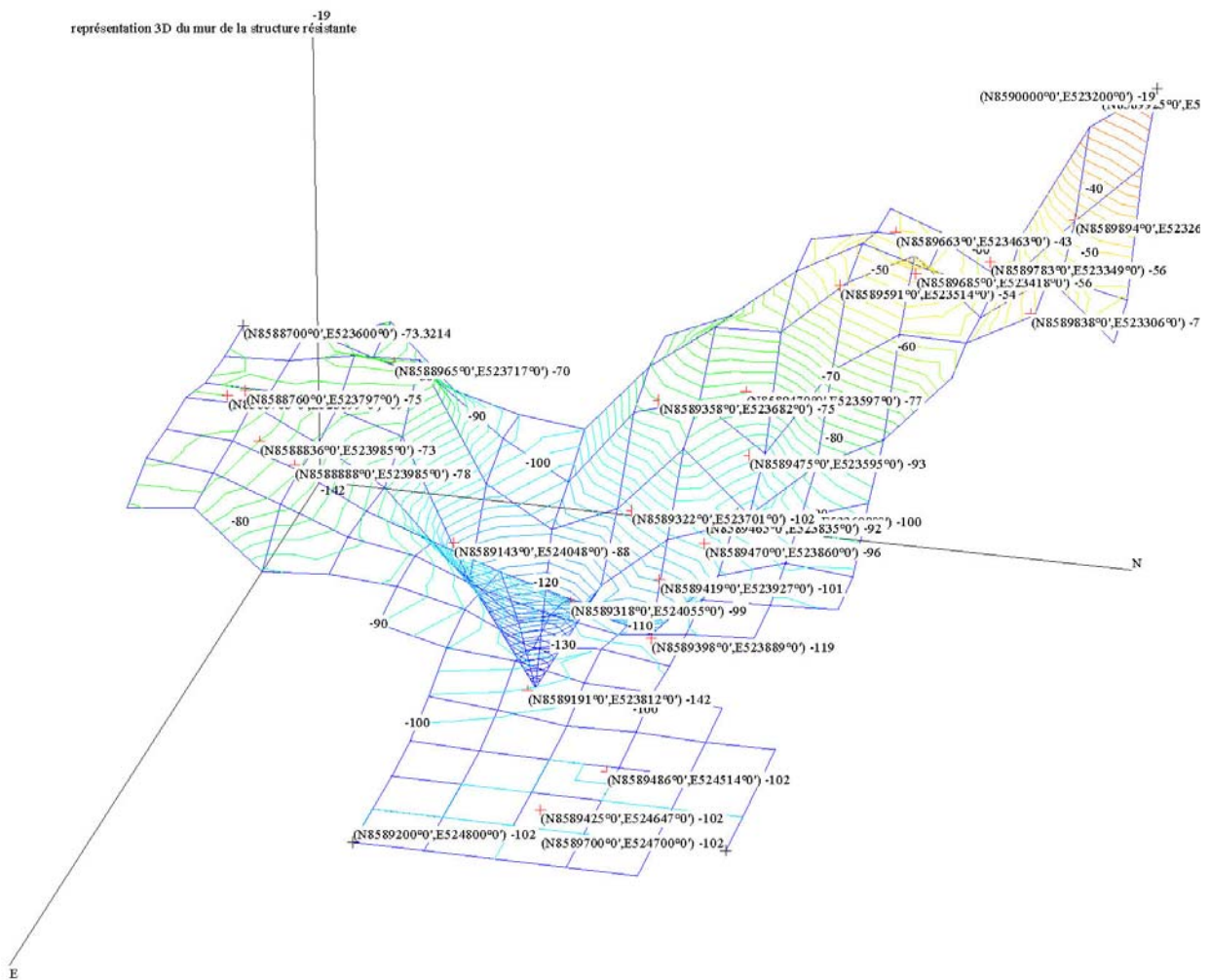
Annexe 2

Éléments du modèle géologique 3D du secteur de Kawéni

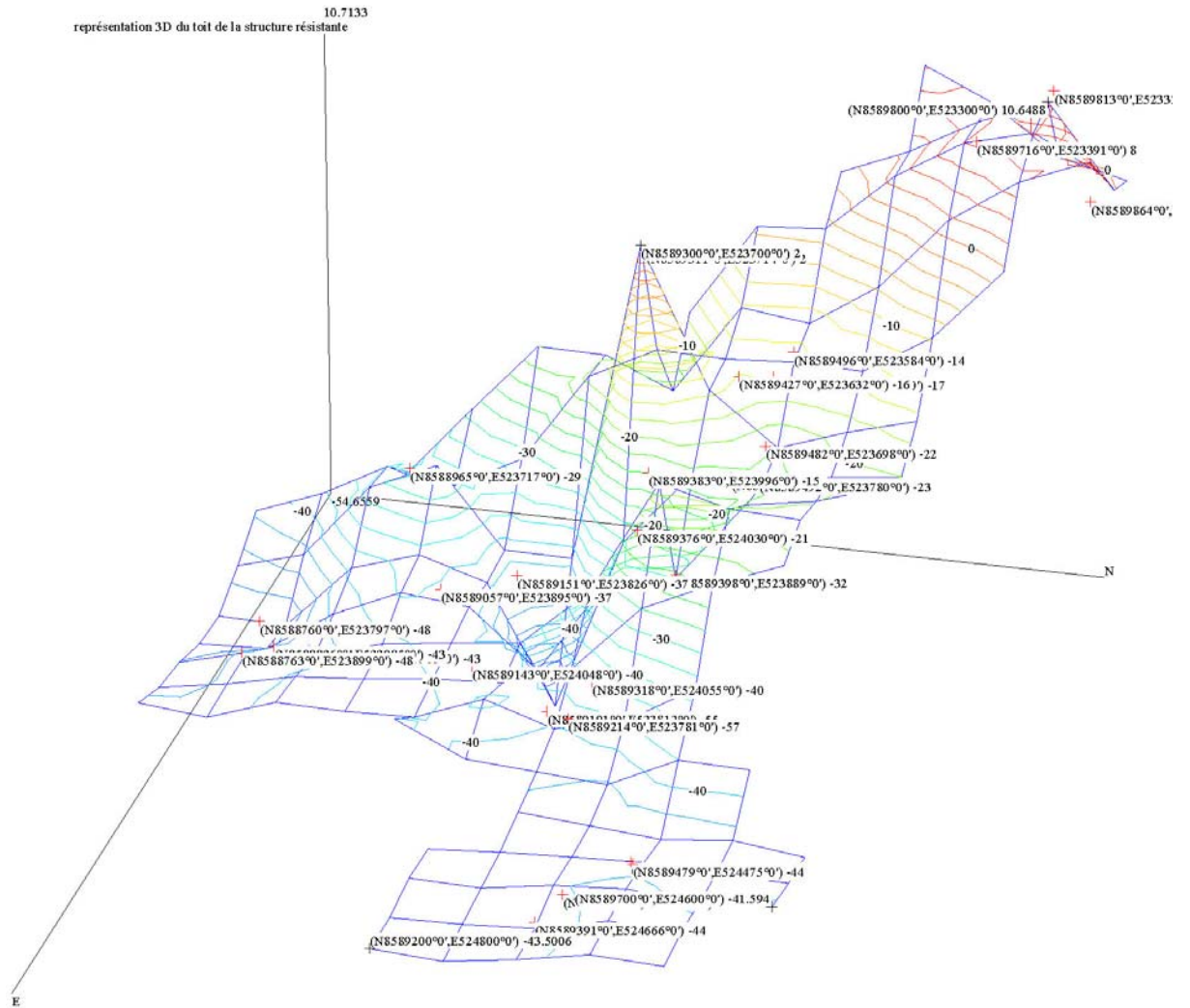


La construction du modèle 3D et l'ajout des profils géophysiques permet de mieux appréhender et contraindre la géométrie des structures géologiques. Ci dessus les profils géophysiques réalisés dans l'axe de la rivière de la Kaouénilajoli ont permis de dessiner la structure résistante, comme illustrée ci-dessous (sans exagération verticale).





Représentation 3D du mur de la structure résistante repérée en profondeur par les profils géophysiques et les profils électriques. Extrapolation des points à l'aide du logiciel de Perspective Edge Software®. L'exagération verticale est de 5



Représentation 3D du toit de la structure résistante repérée en profondeur par les profils géophysiques et les profils électriques. Extrapolation des points à l'aide du logiciel de Perspective Edge Software®. L'exagération verticale est de 5.

Annexe 3

Récapitulatif des analyses physico-chimiques des ouvrages d'eau souterraine de Kaouénilajoli

Annexe 4

Observations des sorties de reconnaissance des 22 et 25 novembre 2008 dans la Kaouénilajoli

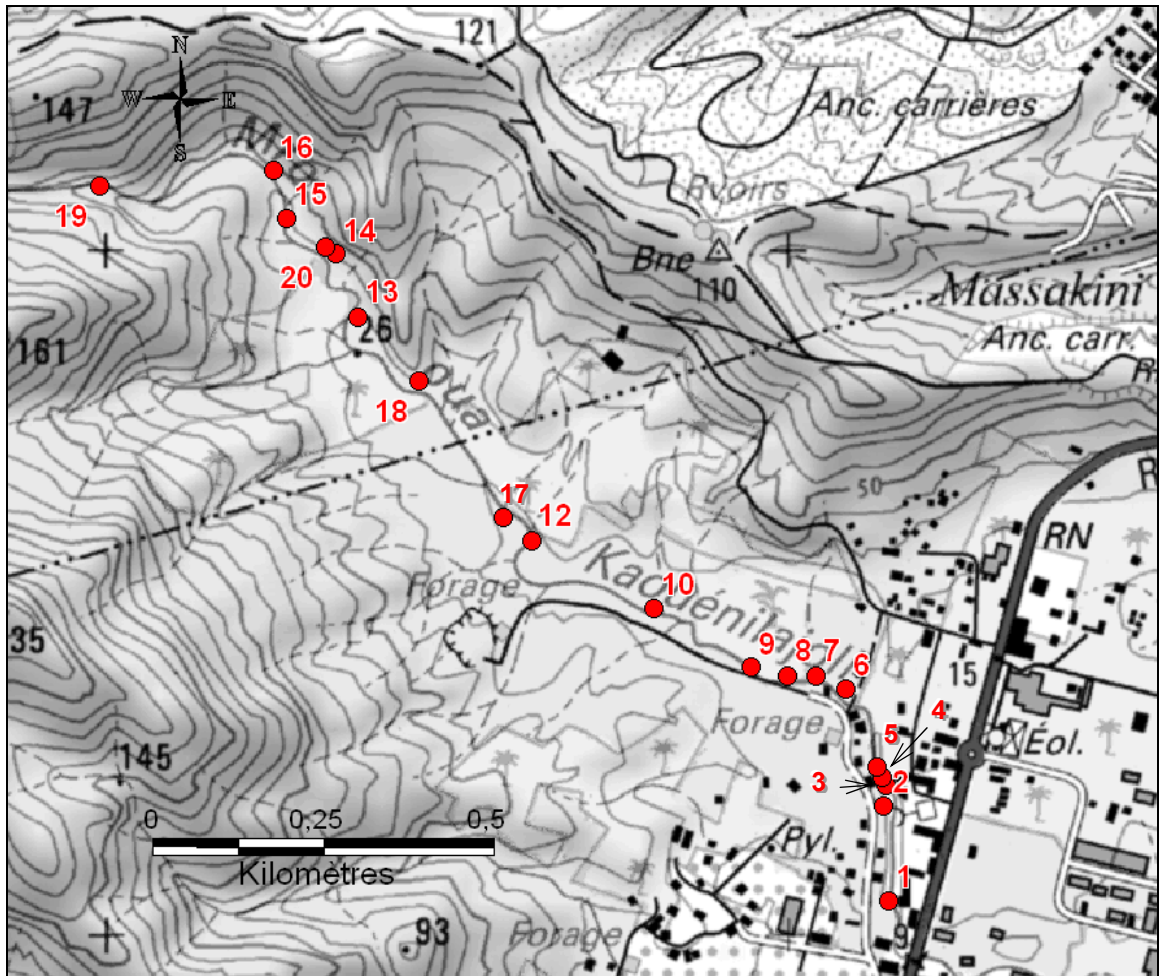


Figure 1: Localisation des points d'observation, sorties terrain des 22 et 25 novembre 2008

Sortie du 22 novembre 2008

12h00. Début de pluie légère sur Kawéni.

12h40 pont de la RN1. Le débit observé sous le pont de la RN est inférieur à 5 l/s. la pluie devient plus intense

Point 1 : on peut noter la présence en rive droite d'un tuyau certainement d'évacuation d'eaux pluviales débitant un débit entre 0,5 et 1 l/s. Le cours d'eau est stagnant à cet endroit, le débit est toujours nul.

Point 2 : rétrécissement du cours d'eau du à l'effondrement d'une des berges. Le débit de rivière est quasiment nul (Figure 2).



Figure 2 : Point 2, débit de la rivière quasi-nul (22-11-2008)

Point 3 : présence d'un ouvrage hydraulique en rive gauche (débit d'environ 0,5 l/s) ;

Point 4 : on n'observe aucun écoulement dans le cours d'eau mais une suite de petits bassins d'eau stagnante ;

Point 5 : présence d'un tuyau d'évacuation en rive droite (débit faible de 0,1 à 0,5 l/s) ;

Point 6 : présence d'un puits ou d'une citerne (a) en bordure du lit mineur du cours d'eau. Le niveau d'eau est environ 1 m sous le niveau du cours d'eau (Figure 3). Cet ouvrage est utilisé par la population pour la lessive (il est important de rappeler que la lessive est traditionnellement effectuée dans la rivière même, y compris le jour de notre passage). Nombreuses arrivées d'eau depuis les bangas¹² (ravinelements avec débit de quelques l/s) ;



Figure 3 : Puits (a) localisé au point 6 dans le lit de la rivière

¹² Les bangas sont les habitats sommaires de tôles, bois et terre, très répandus à Mayotte

Point 7 : second puits ou citerne (b) en rive droite du lit mineur. Le niveau d'eau dans l'ouvrage est égal ou légèrement inférieur au niveau du cours d'eau (Figure 4). Le cours d'eau est à sec en amont de l'ouvrage. A cet endroit, une ravine en rive gauche alimente intégralement le cours d'eau 10 m en aval de l'ouvrage et crée par la même un éventail de déjection qui vient combler le lit de la Kaouénilajoli (preuve que l'environnement ou la compétence du cours d'eau à cet endroit a été modifié de telle façon que les affluents viennent charrier des matériaux directement dans le lit mineur et en obstrue le parcours en créant des zones de diffluence).



Figure 4 : Puits (b) localisé au point 7 en rive droite de la rivière

Point 8 : une décharge sauvage en rive droite. Les déchets sont jetés directement le long de la berge et se répandent dans le lit mineur du cours d'eau. Un examen rapide de la nature des déchets laisse entrevoir d'anciennes batteries plomb ouvertes, des carcasses automobiles, des produits ménagers, des pièces mécaniques et visiblement électroniques aussi. Cette pollution n'est pas sans conséquence sur la qualité des eaux (cf. § 4.2 et Figure 5).



Figure 5 : Décharge sauvage (point 8) dans la rivière

Point 10 : un puits (1) a été creusé à cet endroit. Il est à sec lors de l'aller (Figure 6). La coupe du puisard montre une épaisseur importante de pyroclastites et de cendres et quelques blocs de basaltes roulés. Les dépôts semblent plus grossiers à la base.



Figure 6 : Puisards (1) et (2) localisés aux points 9 et 10 dans la rivière

Point 11 : un second puits (2) a été rencontré. Il était à sec lors du premier passage puis un niveau d'eau à -3 m par rapport au lit mineur du cours d'eau a été observé après la pluie (Figure 6).

Point 12 : un troisième puits (c) est présent dans le lit du cours d'eau. Son niveau d'eau est égal à celui de la rivière dont le débit à ce moment de la journée avoisinait 2 à 3 l/s.

Point 13 : on note la présence d'un affluent en rive droite au débit plus important que celui de la rivière. Un prélèvement d'eau a été réalisé à cet endroit. (l'eau sert d'étalon pour la réalisation de la courbe de correspondance conductivité/concentration des jaugeages au sel) ;

Point 14 : observation du contact entre les basaltes $\beta 2$ et le basalte sains $\beta 3$;

Point 15 : emplacement du jaugeage au sel réalisé le 22 novembre. Le cours d'eau est relativement encaissé à cet endroit, et exerce une forte érosion (chute de 2 blocs en une heure) des berges ;

Point 16 : jaugeage réalisé à l'aide d'un chrono et d'un contenant de 30 L. Le débit est d'environ 4,6 l/s, à environ 100 m en amont du jaugeage au sel (16h10). Il n'y a pas d'arrivée d'eau significative entre les 2 points ;

Point 17 : (16h40) Depuis l'amont de la rivière (point 16) jusqu'à ce point, le débit de la Kaouénilajoli est de l'ordre de 5 à 10 l/s. Il est conservé tout au long de cette portion où l'eau circule à travers les blocs de basaltes sains qui constituent le lit du cours d'eau (présence de nombreux feuillages). La section de la rivière au point 17 s'élargit, et le débit y est quasiment nul. Il y a à cet endroit un changement de lithologie notable. Cet

endroit marque le début d'une zone d'infiltration. Il est important de noter que le débit est supposé stable depuis 14h environ...

Le lit du cours d'eau est à sec depuis ce point 17 jusqu'au pont de la RN (17h). On retrouve sous le pont le même débit qu'au départ (12h40), de quelques l/s et visiblement assuré par l'ouvrage hydraulique d'évacuation des eaux pluviales de la RN (qui se jette 10 mètres en amont du pont en RG).

Sortie du 25 novembre 2008

14h30 : départ au niveau du point 12. Aucune précipitation depuis la sortie du 22 novembre (soit 3 jours) pluie légère sur Kawéni

Amont du point 12 : le lit de la rivière est à sec contrairement à la sortie du 22 novembre où il s'élevait à 2 ou 3 l/s ;

Point 18 : (16h40) depuis le départ de la sortie, une série de petites flaques d'eau stagnante, vraisemblablement en communication mais sans circulation apparente ont été observées. Il est à noter que certains de ces bassins servent à la lessive. La présence de ces bassins dans la zone supposée d'infiltration laisse penser que la ou les zones d'infiltration ne sont pas forcément continues.

50 m en amont du point 18 : une très légère circulation d'eau a pu être observée. Le débit de la rivière n'est pas nul mais très faible, l'eau circule manifestement à travers les galets et feuillages qui jonchent le sol.

Point 20 (≈ point 14) : le contact entre les basaltes β_2 , β_3 et les formations pyroclastites est mis en évidence. La petite cascade montre un débit d'environ 1 l/s qu'il est difficile de retrouver en aval du bassin.

Point 15 (15h06) : il n'y pas de circulation apparente au niveau du point de jaugeage du 22 novembre. Le lit de la rivière est à sec à cet endroit. En revanche, la circulation reprend (débit ~1 l/s) 5 m en aval du jaugeage très exactement. La conductivité à cet endroit est de 202 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

80 m en amont du point 15 (15h09) : un écoulement apparent est observé 80 m en amont du point de jaugeage au sel. La mesure de la conductivité au point 16 donne également 202 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ces valeurs identiques montrent que l'eau circule une fois de plus entre les galets et dans les 1^{ères} tranches alluviales entre le point 16 et 15.

Point 19 (15h32) : Cet endroit (cascade) marque la limite lithologique entre le β_2 et le β_3 en position supérieur (Figure 7). Le débit est toujours de 1 l/s. Cette observation confirme qu'il n'y a pas d'infiltration lors de la circulation sur le β_2 . La conductivité est de 195 $\mu\text{S}/\text{cm}$.



Figure 7 : Les basaltes $\beta 3$ (point 19)

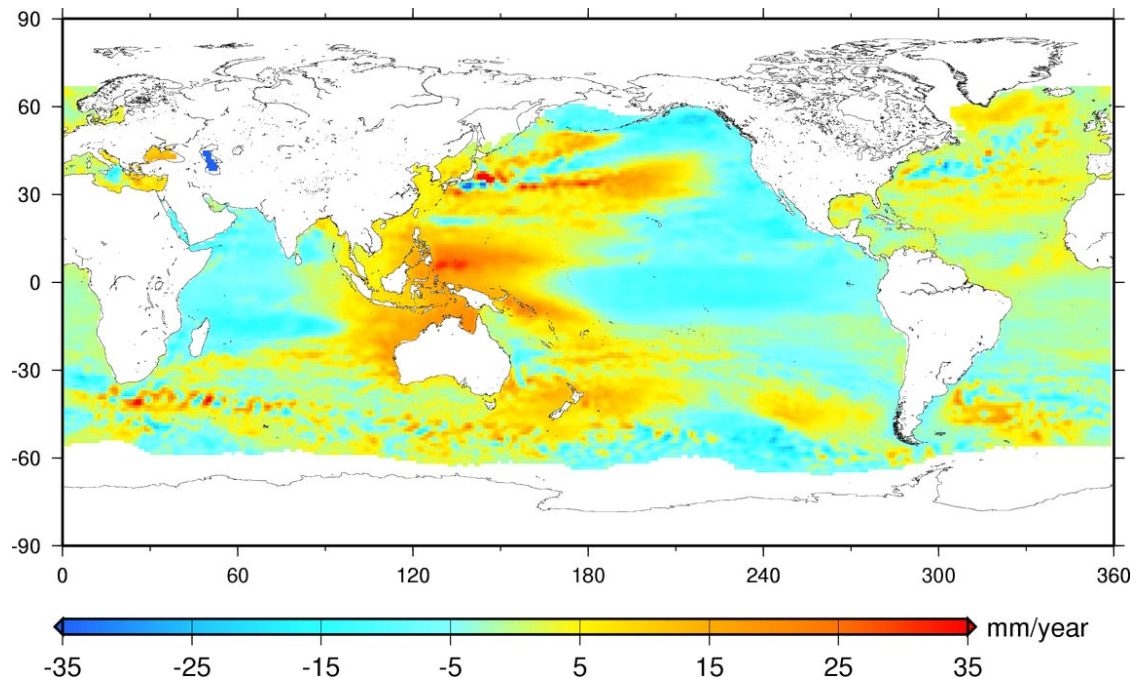
Point 20 (16h14) : les mesures de conductivité de l'eau au départ de sa circulation sur la lithologie du B2 (point 19) et à la sortie de sa circulation (point 20) donnent des valeurs identiques ($195 \mu\text{S}/\text{cm}$). Les débits étant identiques, il est vraisemblable qu'il y ait une conservation quasi totale de la quantité d'eau lors de sa circulation sur le B2.

Localisation de la zone d'infiltration : il est délicat de définir avec précision l'entrée dans la zone d'infiltration supposée. Les chances sont fortes pour que cette zone débute en aval du contact entre les basaltes $\beta 2$ et les pyroclastites (point 20) et s'étalent jusqu'au point 17 (400 m). Des indices de végétation (notamment une barre de méandre à végétation grasse dans le lit du ruisseau) semblent marquer une limite plus ou moins franche avec la zone d'infiltration. En aval il n'existe aucun indice de type végétal qui puisse attester d'une humidité résiduelle dans la 1^{ère} tranche alluviale.

Annexe 5

Variation du niveau moyen des mers

L'élévation du niveau des océans est loin d'être uniforme. Si dans certaines régions océaniques, la mer a effectivement monté comme dans le Pacifique ouest et l'est de l'Océan Indien (jusqu'à 20 mm/an), dans d'autres elle a baissé d'une quantité équivalente (Pacifique est, ouest de l'Océan Indien). Ces "dérives" régionales sont observées par le satellite TOPEX/POSEIDON depuis 1993.



Carte des vitesses de variation du niveau de la mer entre 1993 et 2001, observées par le satellite altimétrique Topex/Poseidon

Sur une échelle des temps correspondant au siècle les phénomènes responsables des variations du niveau moyen global de la mer sont :

- Les variations de température et de salinité entraînent des variations de densité de l'eau modifiant le volume des eaux océaniques ;
- des changements du contenu des masses d'eau océaniques causés par les échanges d'eau avec les autres réservoirs de surface du globe (atmosphère, eaux continentales, calottes glaciaires polaires).

Sites Internet à consulter pour plus d'informations :

<http://www.legos.obs-mip.fr/fr/>

http://www.lucieberger.org/svt/SVT%20en%20T%20S/WEB_Tspe/1_Climat/1_Ni_mer.html

Annexe 6

Jaugeages de la rivière Kaouénilajoli

1- Principe du jaugeage au sel

Le principe consiste à déterminer le débit d'un cours d'eau à partir de l'injection d'une masse de sel dans rivièrre de la Kaouénilajoli et du suivi de l'évolution des conductivités du nuage de sel en aval du point d'injection.

2 – Domaine d'application de la technique du jaugeage au sel

Le domaine d'application de cette méthode est le suivant (source : Office fédéral des eaux et de la géologie, Bern) :

Paramètres	Valeurs
Profondeur du cours d'eau	< 1 m
Largeur de la surface de l'eau	de 0,3 à 5 m
Vitesse d'écoulement	de 0,6 à 4 m/s
Débits	< 3 m ³ /s

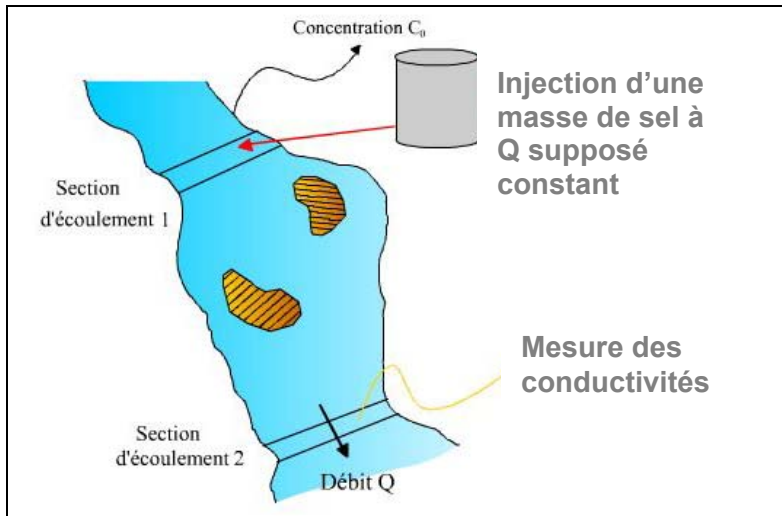
Cette méthode est adaptée aux petits cours d'eau aux écoulements turbulents, c'est le cas de la Kaouénilajoli. Ce jaugeage suppose aussi un régime permanent de la rivière, une conservation de la masse du traceur et un bon mélange. La température des eaux superficielles de Mayotte étant de 25 °C représente un avantage étant donné que les cristaux de sel sont mieux dissous lorsque la température de l'eau est élevée.

3 – Mode opératoire

a) Choix du point de mesure

Le jaugeage doit être réalisé sur une section de la rivière présentant des écoulements turbulents et un régime permanent (Q constant). La figure ci-dessous illustre le mode opératoire à suivre (Source EPFL¹³).

¹³ Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

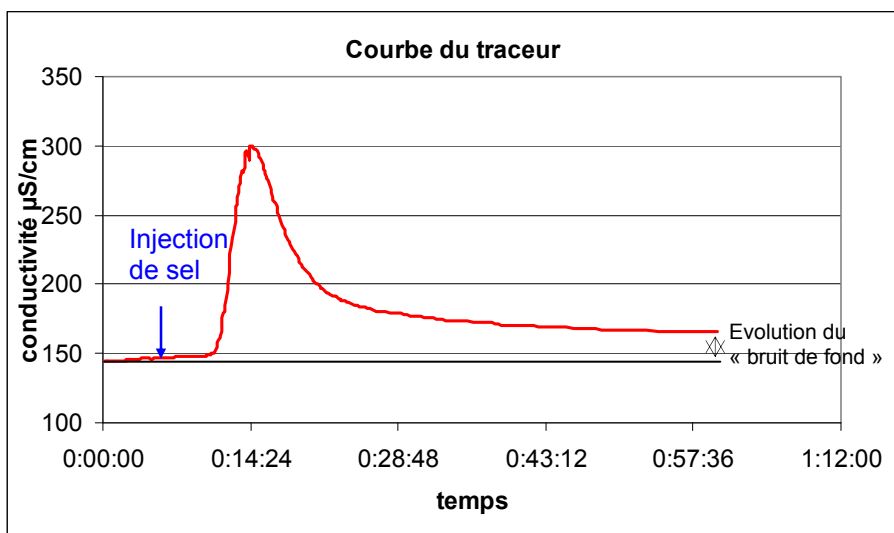


b) Evaluation du « bruit de fond » de l'environnement

La valeur de la conductivité de l'écoulement sur lequel on va effectuer le jaugeage chimique est mesurée en un point avant et après le jaugeage afin de détecter d'éventuelles variations du « bruit de fond » au cours du jaugeage.

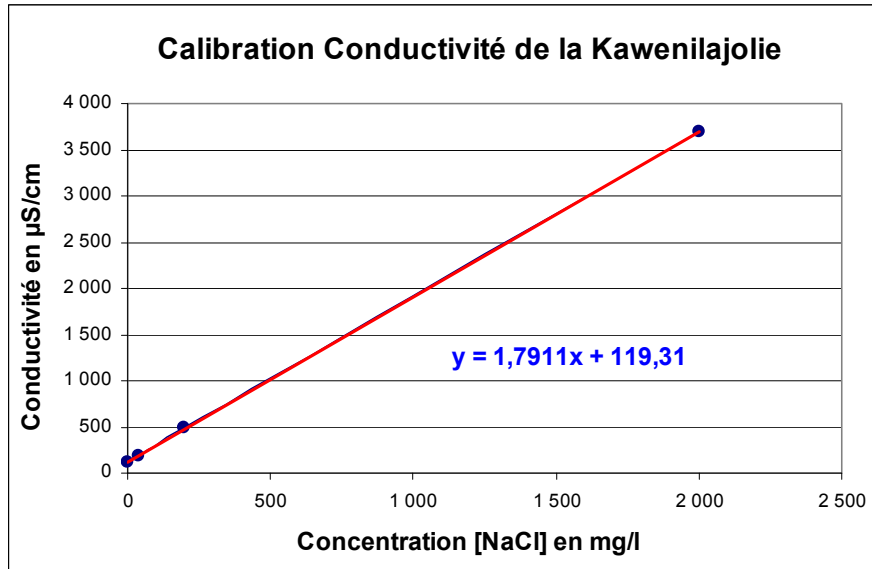
c) Mesures des conductivités

Une masse de sel est injectée en un point du cours d'eau. En aval de la zone de mélange, à une distance suffisamment grande pour que le mélange s'opère efficacement, une sonde conductimétrique mesure l'évolution temporelle de la conductivité au cours du passage du nuage de sel.

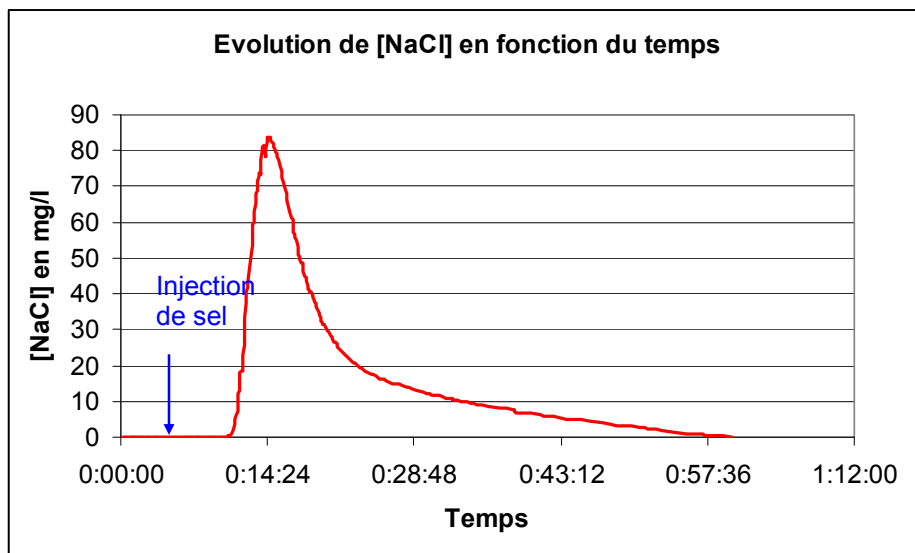


d) Courbe d'étalonnage

Une relation pseudo-linéaire existe entre la conductivité de l'eau et sa concentration en sel dissous. Un échantillon d'eau a été prélevé avant le jaugeage afin de déterminer en laboratoire cette relation. La courbe de tarage obtenue est la suivante :



Un coefficient de conversion de 1,79 a été déterminé. Il suffit alors de multiplier les conductivités mesurées (et corrigées) par ce coefficient pour obtenir la concentration en NaCl ($[NaCl]_t = k * (Cond_t - Cond_{bruit\ de\ fond})$). On peut ainsi tracer la courbe de restitution du jaugeage :



e) Calcul du débit

Le débit est alors obtenu en divisant ma masse de sel injecté par l'intégration des concentrations au cours du temps. L'intégration a été réalisée selon la méthode de la moyennes des $Y = \Sigma (\frac{1}{2}) * (f(x)1 + f(x)2) * (x2 - x1)$.

Masse de sel injecté (g)	515
Coef k	1,79
Intégration des [NaCl] (g)	486
Pourcentage de restitution	95%
Débit (l/s)	10,6

Annexe 7

Inventaires des données disponibles

Types de données	Documents disponibles	références
Données générales	Carte scannée de la carte IGN au 1/25000 de Mayotte	BRGM/RP-53161-FR
Données pluviométriques	Modèle Numérique de Terrain (50 m)	BRGM/RP-53161-FR
Données marines	Données pluviométriques mensuelles de 1951 à 2001 : Station de Mamoudzou	BRGM/RP-56773-FR
	Données pluviométriques de 1995 à 2006 : Station de la Convalescence	BRGM/RP-56773-FR
	Chroniques des fluctuations marines enregistrées à Dzaoudzi depuis 1993 à 2008.	BRGM/RP-53161-FR
	Délimitation de la marée haute du 19 avril 2004	BRGM/RP-56600-FR
	Carte lithologique	BRGM/RP-53161-FR
Données géologiques	Coupes lithologiques et techniques des forages (12307X0011, 12307X0012, 12307X0013, 12307X0014, 12307X0019, 12307X0020, 12307X0021)	BRGM/RP-53161-FR
	Description d'affleurements géologiques	BRGM/RP-54082-FR
	Profils Géophysiques 2003 A, B, C	BRGM/RP-56600-FR
	Profils Géophysiques 2005 A, B, C	BRGM/RP-53161-FR
	Profils Géophysiques 2007 P2	BRGM/RP-56773-FR
	Sondages électriques : 18	BRGM/RP-53161-FR
	Eléments du modèle géologique 3D du secteur de Kawéni	BRGM/RP-56773-FR
	Carte de l'altitude du toit et du mur de la formation résistante	BRGM/RP-56773-FR
	Représentation 3D du toit et du mur de la structure résistante	BRGM/RP-56773-FR
Données hydrogéologiques	Inventaire des points d'eau mars 2004	BRGM/RP-53161-FR
	Inventaire des points d'eau septembre 2004	BRGM/RP-54082-FR
	Chronique piézométrique de Kawéni 1 10" de 2002 à 2008	BRGM/RP-56773-FR
	Chronique piézométrique de Kawéni 1 8" de 1993 à 2008	BRGM/RP-56773-FR
	Carte piézométrique indicative de la nappe superficielle de la dépression de Kawéni (mars 2004)	BRGM/RP-53161-FR
	Carte piézométrique indicative de la nappe superficielle de la dépression de Kawéni (septembre 2004)	BRGM/RP-54082-FR
Données hydrologiques	Profil topographique du lit mineur de la rivière Kaouénilajoli	BRGM/RP-56773-FR
	Jaugeage de la rivière de la Kaouénilajoli	BRGM/RP-56773-FR
Données qualité	Conductivités des eaux des puits recensés en mars 2004	BRGM/RP-53161-FR
	Conductivités des eaux des puits recensés en septembre 2004	BRGM/RP-54082-FR
	Analyses physico-chimiques des ouvrages F1 F2 et Kawéni 3 10"	BRGM/RP-56773-FR
Vulnérabilité	Inventaire des activités industrielles et artisanales	BRGM/RP-54082-FR
	Inventaire des pressions localisées aux abords de la Kaouénilajoli	BRGM/RP-56773-FR

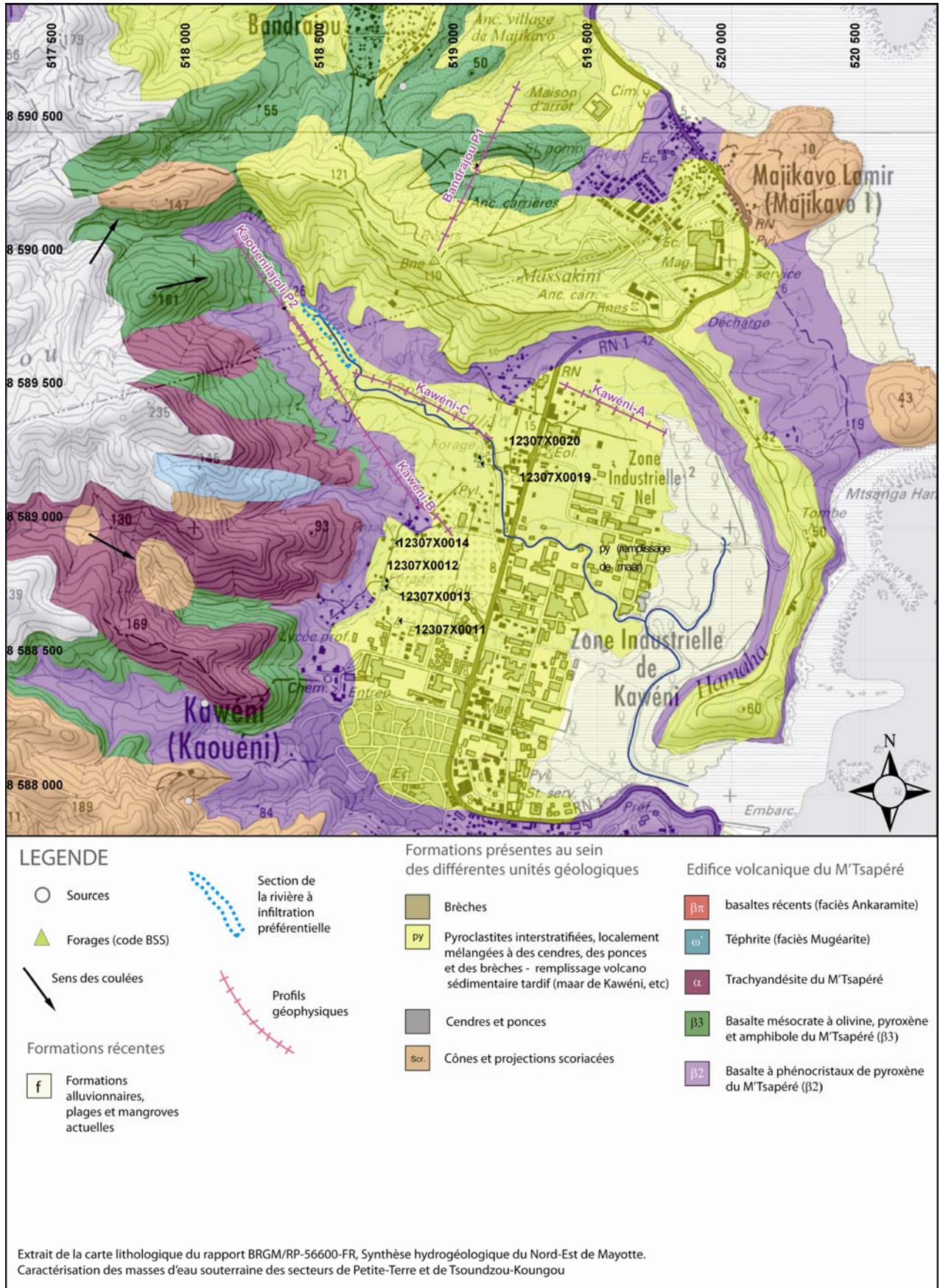


Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional de Mayotte
9, centre Amatoula, Z.I. de Kawéni
BP 1398
97600 – Mamoudzou France
Tél. : 02 69 61 28 13

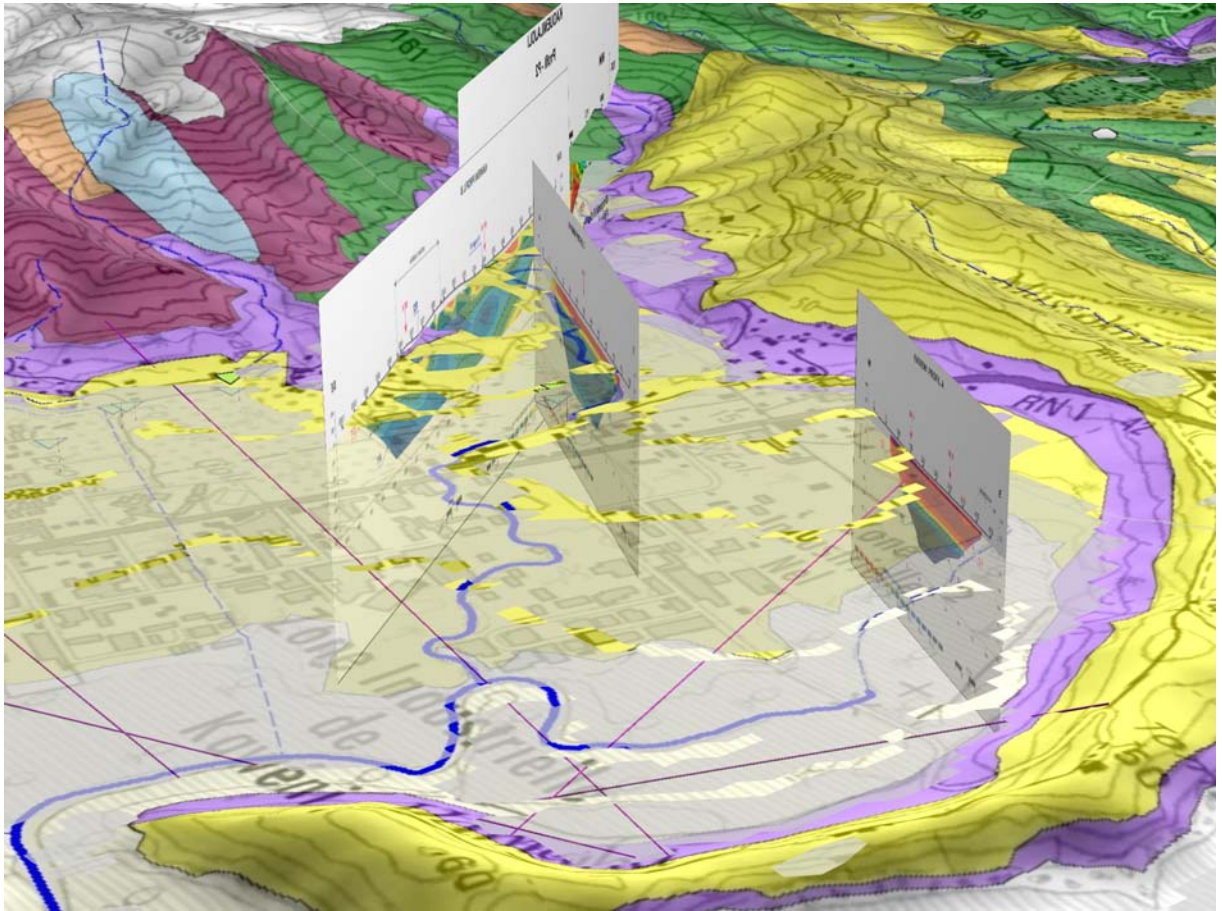
Annexe 1

Carte lithologique de la dépression de Kawéni

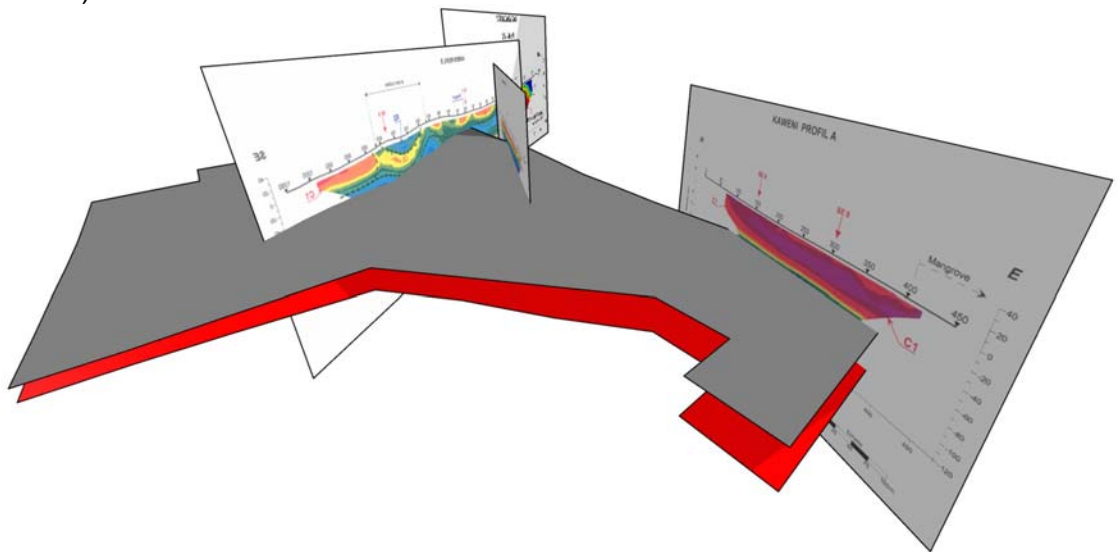


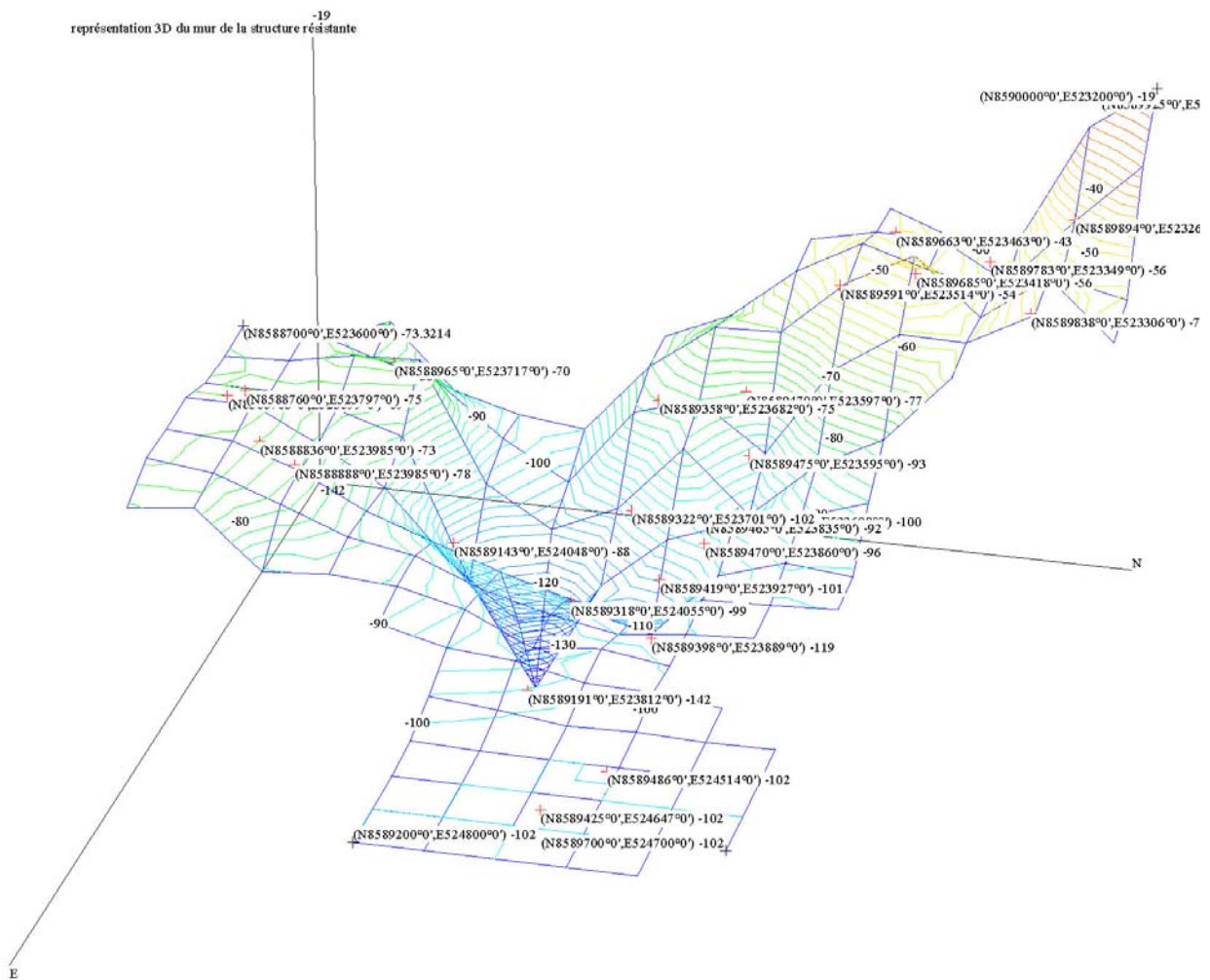
Annexe 2

Éléments du modèle géologique 3D du secteur de Kawéni

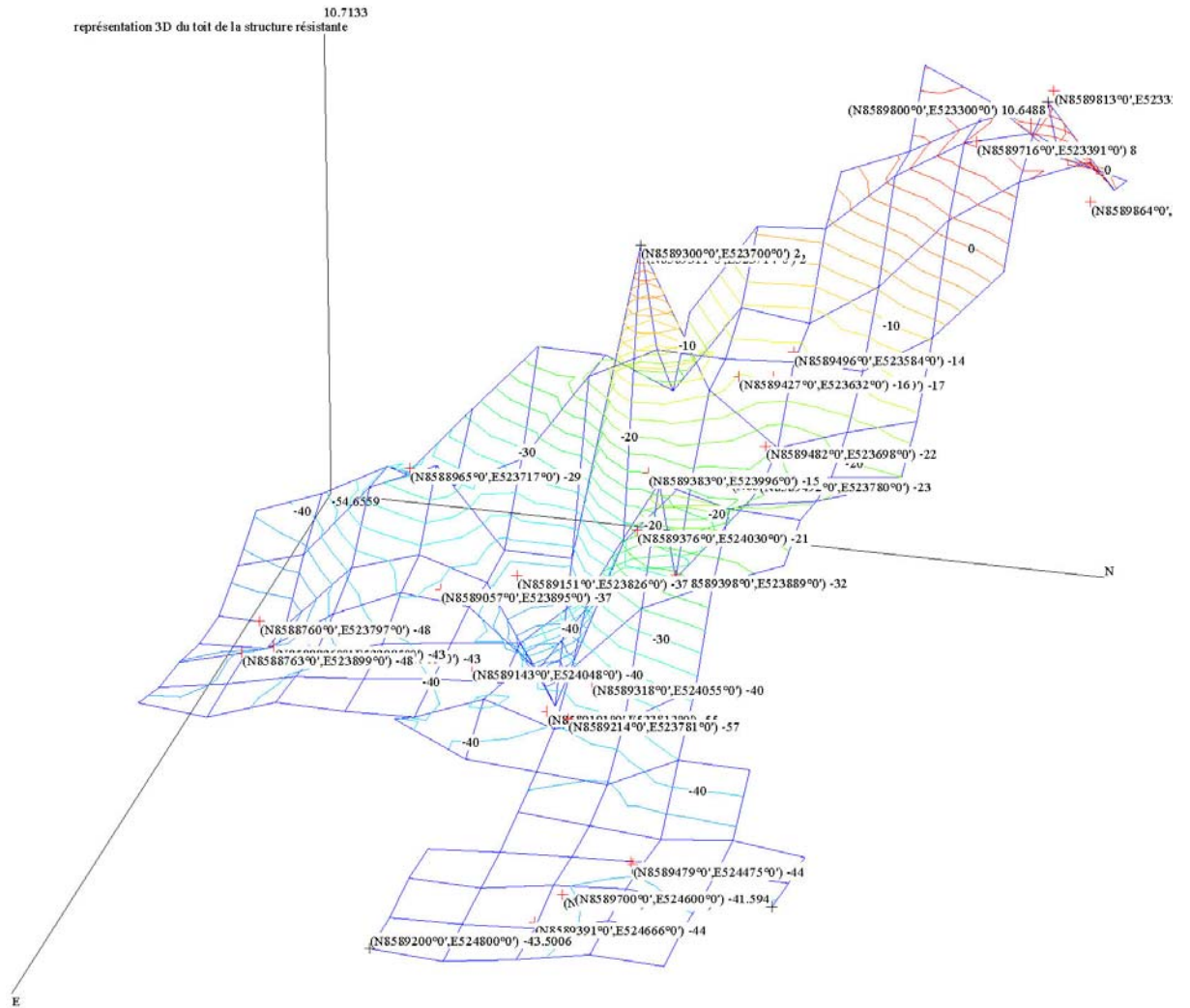


La construction du modèle 3D et l'ajout des profils géophysiques permet de mieux appréhender et contraindre la géométrie des structures géologiques. Ci dessus les profils géophysiques réalisés dans l'axe de la rivière de la Kaouénilajoli ont permis de dessiner la structure résistante, comme illustrée ci-dessous (sans exagération verticale).





Représentation 3D du mur de la structure résistante repérée en profondeur par les profils géophysiques et les profils électriques. Extrapolation des points à l'aide du logiciel de Perspective Edge Software®. L'exagération verticale est de 5



Représentation 3D du toit de la structure résistante repérée en profondeur par les profils géophysiques et les profils électriques. Extrapolation des points à l'aide du logiciel de Perspective Edge Software®. L'exagération verticale est de 5.

Annexe 3

Récapitulatif des analyses physico-chimiques des ouvrages d'eau souterraine de Kaouénilajoli

Annexe 4

Observations des sorties de reconnaissance des 22 et 25 novembre 2008 dans la Kaouénilajoli

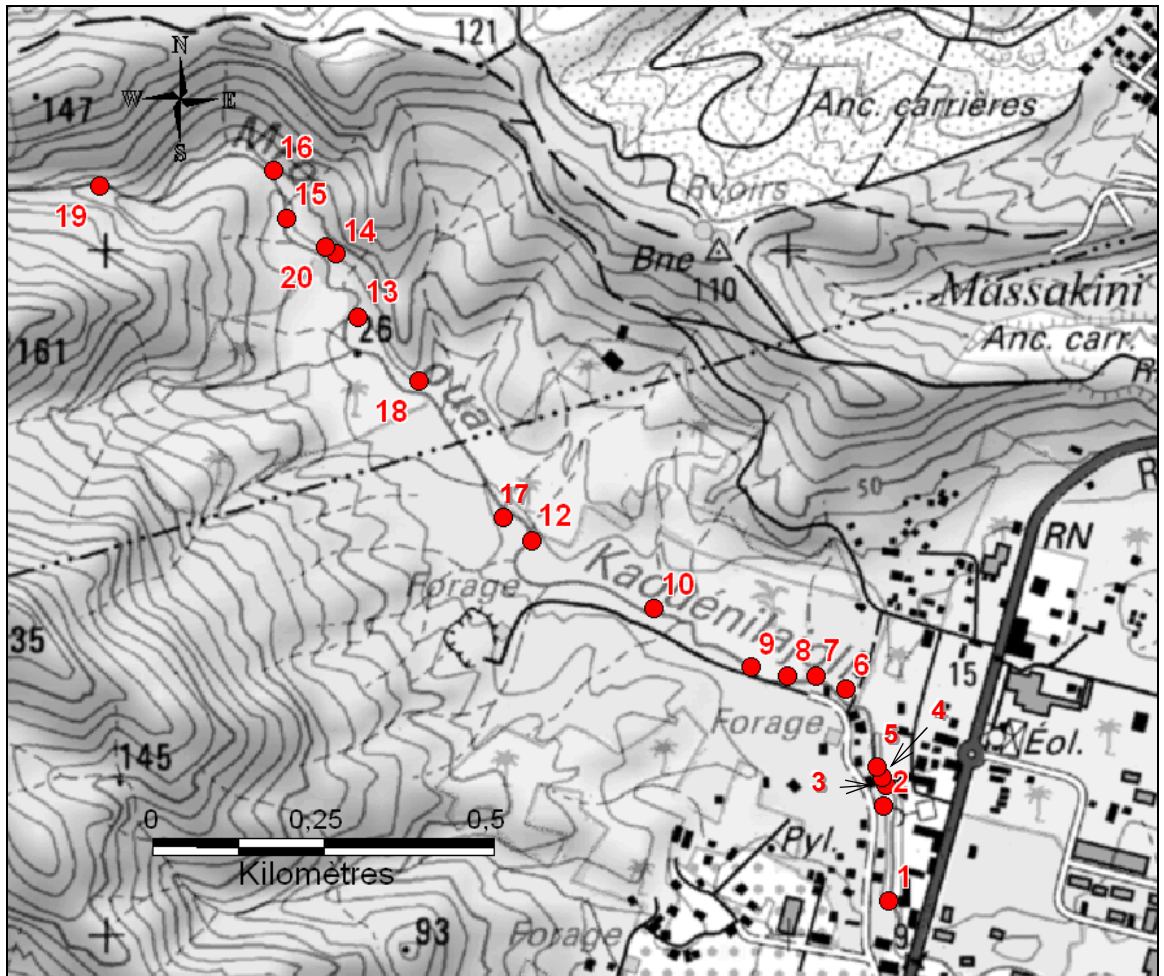


Figure 1: Localisation des points d'observation, sorties terrain des 22 et 25 novembre 2008

Sortie du 22 novembre 2008

12h00. Début de pluie légère sur Kawéni.

12h40 pont de la RN1. Le débit observé sous le pont de la RN est inférieur à 5 l/s. la pluie devient plus intense

Point 1 : on peut noter la présence en rive droite d'un tuyau certainement d'évacuation d'eaux pluviales débitant un débit entre 0,5 et 1 l/s. Le cours d'eau est stagnant à cet endroit, le débit est toujours nul.

Point 2 : rétrécissement du cours d'eau du à l'effondrement d'une des berges. Le débit de rivière est quasiment nul (Figure 2).



Figure 2 : Point 2, débit de la rivière quasi-nul (22-11-2008)

Point 3 : présence d'un ouvrage hydraulique en rive gauche (débit d'environ 0,5 l/s) ;

Point 4 : on n'observe aucun écoulement dans le cours d'eau mais une suite de petits bassins d'eau stagnante ;

Point 5 : présence d'un tuyau d'évacuation en rive droite (débit faible de 0,1 à 0,5 l/s) ;

Point 6 : présence d'un puits ou d'une citerne (a) en bordure du lit mineur du cours d'eau. Le niveau d'eau est environ 1 m sous le niveau du cours d'eau (Figure 3). Cet ouvrage est utilisé par la population pour la lessive (il est important de rappeler que la lessive est traditionnellement effectuée dans la rivière même, y compris le jour de notre passage). Nombreuses arrivées d'eau depuis les bangas¹² (ravine avec débit de quelques l/s) ;



Figure 3 : Puits (a) localisé au point 6 dans le lit de la rivière

¹² Les bangas sont les habitats sommaires de tôles, bois et terre, très répandus à Mayotte

Point 7 : second puits ou citerne (b) en rive droite du lit mineur. Le niveau d'eau dans l'ouvrage est égal ou légèrement inférieur au niveau du cours d'eau (Figure 4). Le cours d'eau est à sec en amont de l'ouvrage. A cet endroit, une ravine en rive gauche alimente intégralement le cours d'eau 10 m en aval de l'ouvrage et crée par la même un éventail de déjection qui vient combler le lit de la Kaouénilajoli (preuve que l'environnement ou la compétence du cours d'eau à cet endroit a été modifié de telle façon que les affluents viennent charrier des matériaux directement dans le lit mineur et en obstrue le parcours en créant des zones de diffluence).



Figure 4 : Puits (b) localisé au point 7 en rive droite de la rivière

Point 8 : une décharge sauvage en rive droite. Les déchets sont jetés directement le long de la berge et se répandent dans le lit mineur du cours d'eau. Un examen rapide de la nature des déchets laisse entrevoir d'anciennes batteries plomb ouvertes, des carcasses automobiles, des produits ménagers, des pièces mécaniques et visiblement électroniques aussi. Cette pollution n'est pas sans conséquence sur la qualité des eaux (cf. § 4.2 et Figure 5).



Figure 5 : Décharge sauvage (point 8) dans la rivière

Point 10 : un puits (1) a été creusé à cet endroit. Il est à sec lors de l'aller (Figure 6). La coupe du puisard montre une épaisseur importante de pyroclastites et de cendres et quelques blocs de basaltes roulés. Les dépôts semblent plus grossiers à la base.



Figure 6 : Puisards (1) et (2) localisés aux points 9 et 10 dans la rivière

Point 11 : un second puits (2) a été rencontré. Il était à sec lors du premier passage puis un niveau d'eau à -3 m par rapport au lit mineur du cours d'eau a été observé après la pluie (Figure 6).

Point 12 : un troisième puits (c) est présent dans le lit du cours d'eau. Son niveau d'eau est égal à celui de la rivière dont le débit à ce moment de la journée avoisinait 2 à 3 l/s.

Point 13 : on note la présence d'un affluent en rive droite au débit plus important que celui de la rivière. Un prélèvement d'eau a été réalisé à cet endroit. (l'eau sert d'étalon pour la réalisation de la courbe de correspondance conductivité/concentration des jaugeages au sel) ;

Point 14 : observation du contact entre les basaltes $\beta 2$ et le basalte sains $\beta 3$;

Point 15 : emplacement du jaugeage au sel réalisé le 22 novembre. Le cours d'eau est relativement encaissé à cet endroit, et exerce une forte érosion (chute de 2 blocs en une heure) des berges ;

Point 16 : jaugeage réalisé à l'aide d'un chrono et d'un contenant de 30 L. Le débit est d'environ 4,6 l/s, à environ 100 m en amont du jaugeage au sel (16h10). Il n'y a pas d'arrivée d'eau significative entre les 2 points ;

Point 17 : (16h40) Depuis l'amont de la rivière (point 16) jusqu'à ce point, le débit de la Kaouénilajoli est de l'ordre de 5 à 10 l/s. Il est conservé tout au long de cette portion où l'eau circule à travers les blocs de basaltes sains qui constituent le lit du cours d'eau (présence de nombreux feuillages). La section de la rivière au point 17 s'élargit, et le débit y est quasiment nul. Il y a à cet endroit un changement de lithologie notable. Cet

endroit marque le début d'une zone d'infiltration. Il est important de noter que le débit est supposé stable depuis 14h environ...

Le lit du cours d'eau est à sec depuis ce point 17 jusqu'au pont de la RN (17h). On retrouve sous le pont le même débit qu'au départ (12h40), de quelques l/s et visiblement assuré par l'ouvrage hydraulique d'évacuation des eaux pluviales de la RN (qui se jette 10 mètres en amont du pont en RG).

Sortie du 25 novembre 2008

14h30 : départ au niveau du point 12. Aucune précipitation depuis la sortie du 22 novembre (soit 3 jours) pluie légère sur Kawéni

Amont du point 12 : le lit de la rivière est à sec contrairement à la sortie du 22 novembre où il s'élevait à 2 ou 3 l/s ;

Point 18 : (16h40) depuis le départ de la sortie, une série de petites flaques d'eau stagnante, vraisemblablement en communication mais sans circulation apparente ont été observées. Il est à noter que certains de ces bassins servent à la lessive. La présence de ces bassins dans la zone supposée d'infiltration laisse penser que la ou les zones d'infiltration ne sont pas forcément continues.

50 m en amont du point 18 : une très légère circulation d'eau a pu être observée. Le débit de la rivière n'est pas nul mais très faible, l'eau circule manifestement à travers les galets et feuillages qui jonchent le sol.

Point 20 (≈ point 14) : le contact entre les basaltes β_2 , β_3 et les formations pyroclastites est mis en évidence. La petite cascade montre un débit d'environ 1 l/s qu'il est difficile de retrouver en aval du bassin.

Point 15 (15h06) : il n'y pas de circulation apparente au niveau du point de jaugeage du 22 novembre. Le lit de la rivière est à sec à cet endroit. En revanche, la circulation reprend (débit ~1 l/s) 5 m en aval du jaugeage très exactement. La conductivité à cet endroit est de 202 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

80 m en amont du point 15 (15h09) : un écoulement apparent est observé 80 m en amont du point de jaugeage au sel. La mesure de la conductivité au point 16 donne également 202 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ces valeurs identiques montrent que l'eau circule une fois de plus entre les galets et dans les 1^{ères} tranches alluviales entre le point 16 et 15.

Point 19 (15h32) : Cet endroit (cascade) marque la limite lithologique entre le β_2 et le β_3 en position supérieur (Figure 7). Le débit est toujours de 1 l/s. Cette observation confirme qu'il n'y a pas d'infiltration lors de la circulation sur le β_2 . La conductivité est de 195 $\mu\text{S}/\text{cm}$.



Figure 7 : Les basaltes $\beta 3$ (point 19)

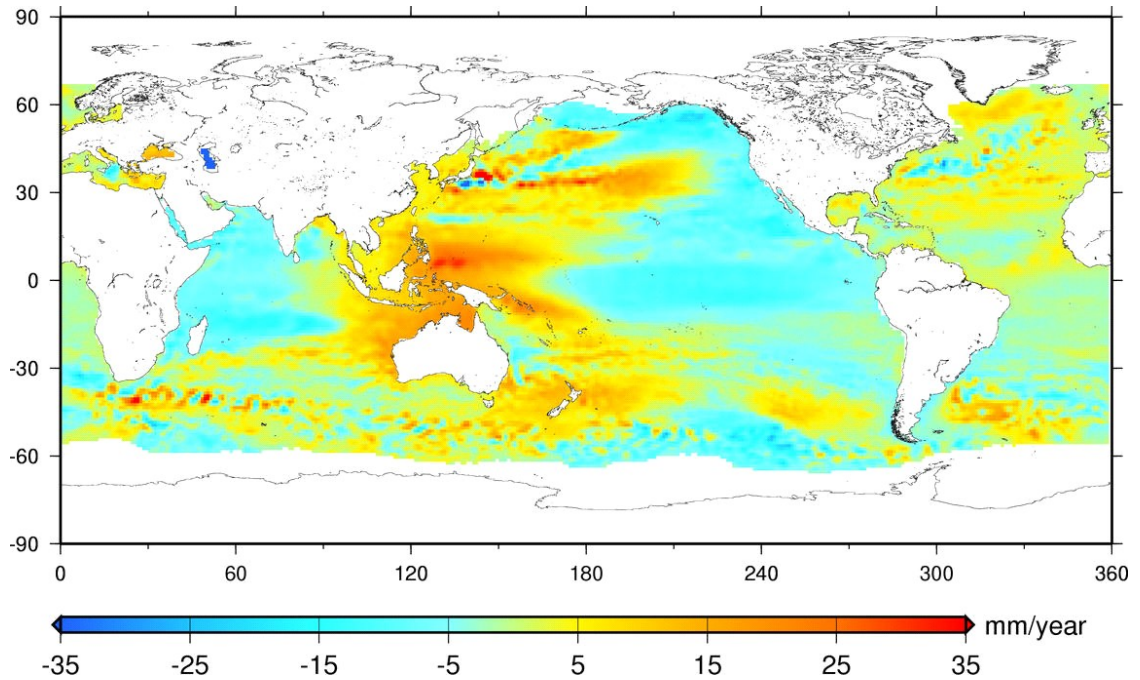
Point 20 (16h14) : les mesures de conductivité de l'eau au départ de sa circulation sur la lithologie du B2 (point 19) et à la sortie de sa circulation (point 20) donnent des valeurs identiques ($195 \mu\text{S}/\text{cm}$). Les débits étant identiques, il est vraisemblable qu'il y ait une conservation quasi totale de la quantité d'eau lors de sa circulation sur le B2.

Localisation de la zone d'infiltration : il est délicat de définir avec précision l'entrée dans la zone d'infiltration supposée. Les chances sont fortes pour que cette zone débute en aval du contact entre les basaltes $\beta 2$ et les pyroclastites (point 20) et s'étalent jusqu'au point 17 (400 m). Des indices de végétation (notamment une barre de méandre à végétation grasse dans le lit du ruisseau) semblent marquer une limite plus ou moins franche avec la zone d'infiltration. En aval il n'existe aucun indice de type végétal qui puisse attester d'une humidité résiduelle dans la 1^{ère} tranche alluviale.

Annexe 5

Variation du niveau moyen des mers

L'élévation du niveau des océans est loin d'être uniforme. Si dans certaines régions océaniques, la mer a effectivement monté comme dans le Pacifique ouest et l'est de l'Océan Indien (jusqu'à 20 mm/an), dans d'autres elle a baissé d'une quantité équivalente (Pacifique est, ouest de l'Océan Indien). Ces "dérives" régionales sont observées par le satellite TOPEX/POSEIDON depuis 1993.



Carte des vitesses de variation du niveau de la mer entre 1993 et 2001, observées par le satellite altimétrique Topex/Poseidon

Sur une échelle des temps correspondant au siècle les phénomènes responsables des variations du niveau moyen global de la mer sont :

- Les variations de température et de salinité entraînent des variations de densité de l'eau modifiant le volume des eaux océaniques ;
- des changements du contenu des masses d'eau océaniques causés par les échanges d'eau avec les autres réservoirs de surface du globe (atmosphère, eaux continentales, calottes glaciaires polaires).

Sites Internet à consulter pour plus d'informations :

<http://www.legos.obs-mip.fr/fr/>

http://www.lucieberger.org/svt/SVT%20en%20T%20S/WEB_Tspe/1_Climat/1_Ni_mer.html

Annexe 6

Jaugeages de la rivière Kaouénilajoli

1- Principe du jaugeage au sel

Le principe consiste à déterminer le débit d'un cours d'eau à partir de l'injection d'une masse de sel dans rivière de la Kaouénilajoli et du suivi de l'évolution des conductivités du nuage de sel en aval du point d'injection.

2 – Domaine d'application de la technique du jaugeage au sel

Le domaine d'application de cette méthode est le suivant (source : Office fédéral des eaux et de la géologie, Bern) :

Paramètres	Valeurs
Profondeur du cours d'eau	< 1 m
Largeur de la surface de l'eau	de 0,3 à 5 m
Vitesse d'écoulement	de 0,6 à 4 m/s
Débits	< 3 m ³ /s

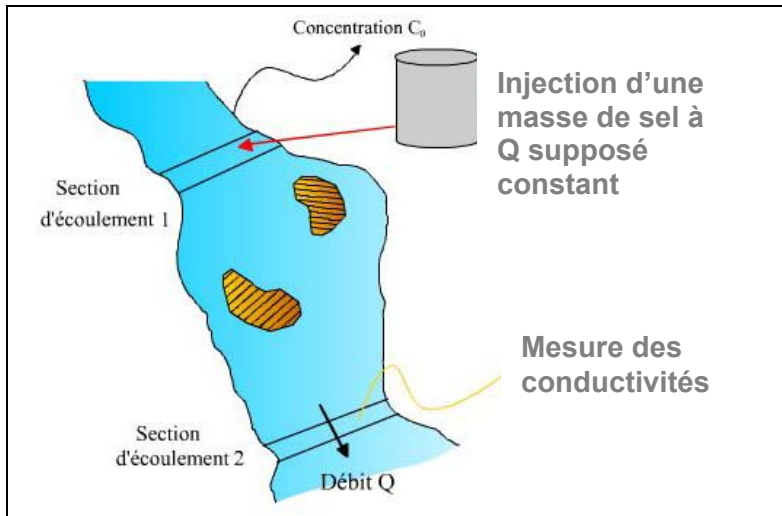
Cette méthode est adaptée aux petits cours d'eau aux écoulements turbulents, c'est le cas de la Kaouénilajoli. Ce jaugeage suppose aussi un régime permanent de la rivière, une conservation de la masse du traceur et un bon mélange. La température des eaux superficielles de Mayotte étant de 25 °C représente un avantage étant donné que les cristaux de sel sont mieux dissous lorsque la température de l'eau est élevée.

3 – Mode opératoire

a) Choix du point de mesure

Le jaugeage doit être réalisé sur une section de la rivière présentant des écoulements turbulents et un régime permanent (Q constant). La figure ci-dessous illustre le mode opératoire à suivre (Source EPFL¹³).

¹³ Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

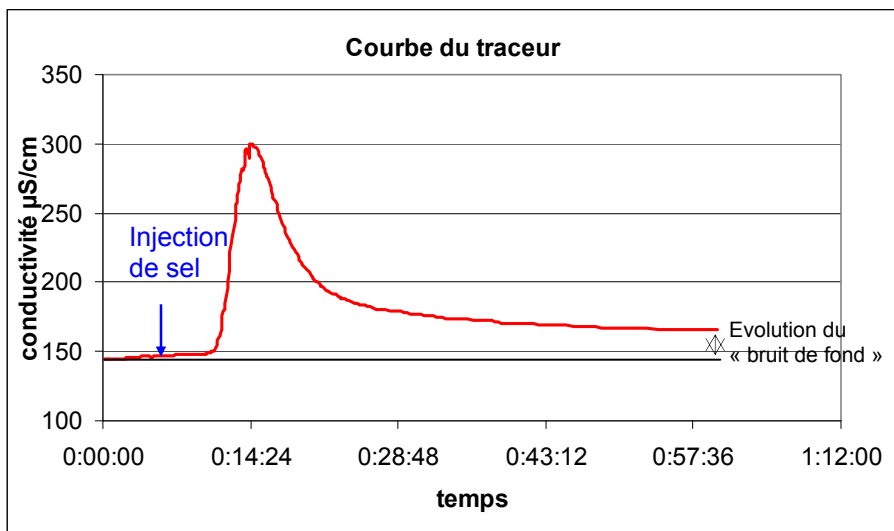


b) Evaluation du « bruit de fond » de l'environnement

La valeur de la conductivité de l'écoulement sur lequel on va effectuer le jaugeage chimique est mesurée en un point avant et après le jaugeage afin de détecter d'éventuelles variations du « bruit de fond » au cours du jaugeage.

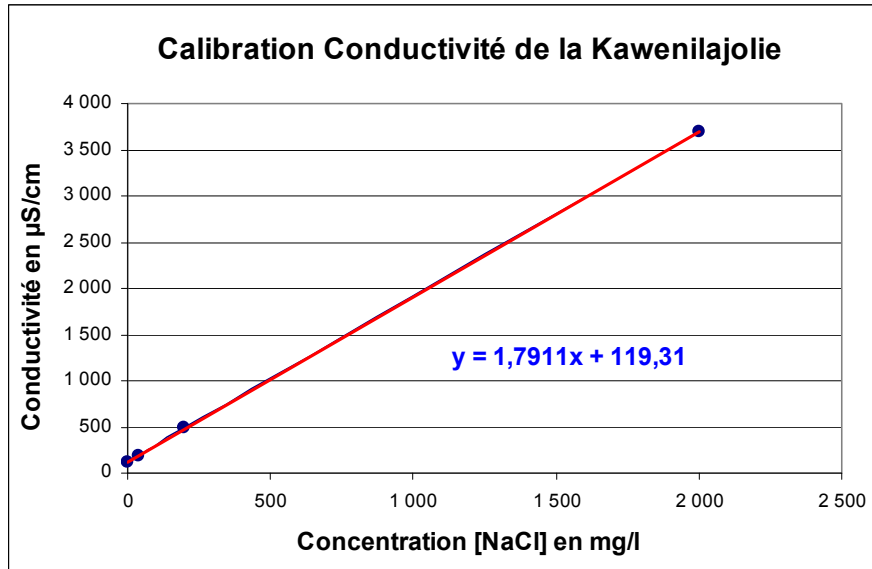
c) Mesures des conductivités

Une masse de sel est injectée en un point du cours d'eau. En aval de la zone de mélange, à une distance suffisamment grande pour que le mélange s'opère efficacement, une sonde conductimétrique mesure l'évolution temporelle de la conductivité au cours du passage du nuage de sel.

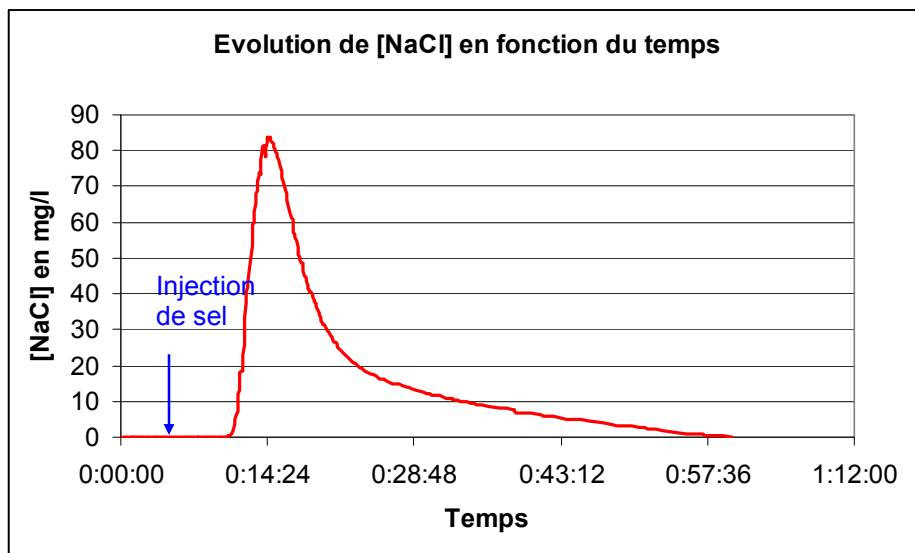


d) Courbe d'étalonnage

Une relation pseudo-linéaire existe entre la conductivité de l'eau et sa concentration en sel dissous. Un échantillon d'eau a été prélevé avant le jaugeage afin de déterminer en laboratoire cette relation. La courbe de tarage obtenue est la suivante :



Un coefficient de conversion de 1,79 a été déterminé. Il suffit alors de multiplier les conductivités mesurées (et corrigées) par ce coefficient pour obtenir la concentration en NaCl ($[NaCl]_t = k * (Cond_t - Cond_{bruit\ de\ fond})$). On peut ainsi tracer la courbe de restitution du jaugeage :



e) Calcul du débit

Le débit est alors obtenu en divisant ma masse de sel injecté par l'intégration des concentrations au cours du temps. L'intégration a été réalisée selon la méthode de la moyennes des $Y = \sum (\frac{1}{2}) * (f(x)1 + f(x)2) * (x2 - x1)$.

Masse de sel injecté (g)	515
Coef k	1,79
Intégration des [NaCl] (g)	486
Pourcentage de restitution	95%
Débit (l/s)	10,6

Annexe 7

Inventaires des données disponibles

Types de données	Documents disponibles	références
Données générales	Carte scannée de la carte IGN au 1/25000 de Mayotte	BRGM/RP-53161-FR
Données pluviométriques	Modèle Numérique de Terrain (50 m)	BRGM/RP-53161-FR
Données marines	Données pluviométriques mensuelles de 1951 à 2001 : Station de Mamoudzou	BRGM/RP-56773-FR
	Données pluviométriques de 1995 à 2006 : Station de la Convalescence	BRGM/RP-56773-FR
	Chroniques des fluctuations marines enregistrées à Dzaoudzi depuis 1993 à 2008.	BRGM/RP-53161-FR
	Délimitation de la marée haute du 19 avril 2004	BRGM/RP-56600-FR
	Carte lithologique	BRGM/RP-53161-FR
Données géologiques	Coupes lithologiques et techniques des forages (12307X0011, 12307X0012, 12307X0013, 12307X0014, 12307X0019, 12307X0020, 12307X0021)	BRGM/RP-53161-FR
	Description d'affleurements géologiques	BRGM/RP-54082-FR
	Profils Géophysiques 2003 A, B, C	BRGM/RP-56600-FR
	Profils Géophysiques 2005 A, B, C	BRGM/RP-53161-FR
	Profils Géophysiques 2007 P2	BRGM/RP-56773-FR
	Sondages électriques : 18	BRGM/RP-53161-FR
	Eléments du modèle géologique 3D du secteur de Kawéni	BRGM/RP-56773-FR
	Carte de l'altitude du toit et du mur de la formation résistante	BRGM/RP-56773-FR
	Représentation 3D du toit et du mur de la structure résistante	BRGM/RP-56773-FR
Données hydrogéologiques	Inventaire des points d'eau mars 2004	BRGM/RP-53161-FR
	Inventaire des points d'eau septembre 2004	BRGM/RP-54082-FR
	Chronique piézométrique de Kawéni 1 10" de 2002 à 2008	BRGM/RP-56773-FR
	Chronique piézométrique de Kawéni 1 8" de 1993 à 2008	BRGM/RP-56773-FR
	Carte piézométrique indicative de la nappe superficielle de la dépression de Kawéni (mars 2004)	BRGM/RP-53161-FR
	Carte piézométrique indicative de la nappe superficielle de la dépression de Kawéni (septembre 2004)	BRGM/RP-54082-FR
Données hydrologiques	Profil topographique du lit mineur de la rivière Kaouénilajoli	BRGM/RP-56773-FR
	Jaugeage de la rivière de la Kaouénilajoli	BRGM/RP-56773-FR
Données qualité	Conductivités des eaux des puits recensés en mars 2004	BRGM/RP-53161-FR
	Conductivités des eaux des puits recensés en septembre 2004	BRGM/RP-54082-FR
	Analyses physico-chimiques des ouvrages F1 F2 et Kawéni 3 10"	BRGM/RP-56773-FR
Vulnérabilité	Inventaire des activités industrielles et artisanales	BRGM/RP-54082-FR
	Inventaire des pressions localisées aux abords de la Kaouénilajoli	BRGM/RP-56773-FR