

Actualisation de la méthodologie de délimitation des Aires d'Alimentation des Captages (AAC) d'eau souterraine de Mayotte

hib-: d7-hia

.89 3740,46 -625.5

Rapport final

BRGM/RP-62709-FR Août 2013





Actualisation de la méthodologie de délimitation des Aires d'Alimentation des Captages (AAC) d'eau souterraine de Mayotte

Rapport final

BRGM/RP-62709-FR

Août 2013

Étude réalisée dans le cadre des projets d'Appui aux Politiques Publiques du BRGM 2013-MAY-50

C. CASTILLO et T. JAOUEN Avec la collaboration de JF. VERNOUX

Vérificateur :

Nom : Alexandre BRUGERON

Date : 03/09/2013

Signature :

Approbateur :

Nom : Pascal PUVILLAND

Date : 03/12/2013

Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.



Mots-clés : bassin d'alimentation de captage, aire d'alimentation de captage, aquifères volcaniques, Mayotte, Comores, France

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

CASTILLO C., JAOUEN T., VERNOUX JF. (2013) – Actualisation de la méthodologie de délimitation des aires d'alimentation des captages d'eau souterraine de Mayotte. Rapport final. BRGM/RP-62709-FR, 80p., 46 ill., 1 ann.

© BRGM, 2013, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Ce travail de mise à jour de la méthodologie de définition des Aires d'Alimentation de Captage (AAC) s'inscrit dans le cadre de la « Convention cadre SIEAM/BRGM 2012 – 2016 signée le 11/03/2011, convention qui a pour objectif d'améliorer les connaissances sur le fonctionnement hydrogéologique de l'île de Mayotte afin, in fine, de fournir au SIEAM un outil de gestion intégrée de la ressource en eau adapté au contexte mahorais.

L'AAC est un dispositif de protection de la ressource en eau mis en œuvre en réponse aux exigences de la Directive Cadre sur l'Eau et né de la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques du 30 décembre 2006. Cet outil vient en complément des périmètres de protection des captages d'eau potable, dont la vocation première est de lutter contre les pollutions chroniques et accidentelles. L'AAC vise quant à elle à protéger des captages d'eau potable contre des pollutions diffuses.

La singularité du contexte hydrogéologique de Mayotte, essentiellement composée de formations volcaniques anciennes et altérées, ne permet pas d'y appliquer les méthodologies développées en métropole adaptées aux milieux discontinus. Ainsi, une première méthodologie de délimitation des Bassins d'Alimentation de Captage (BAC)¹ avait été définie en 2009 pour le contexte mahorais (Malard *et al.*, 2009, BRGM/RP-57299-FR). Depuis, de nouvelles données ont été acquises. Une campagne de géophysique héliportée TDEM (Time Domain Electro-Magnetic, modèle électromagnétique 3D), a notamment été réalisée en fin d'année 2010 dans le cadre de la carte géologique de Mayotte (projet GéoMayotte) ce qui a permis de mieux contraindre la structure des formations géologiques. De plus, les prospections de terrain réalisées dans le cadre des projets de caractérisation hydrogéologique du Nord-Est (2008), du Nord-Ouest (2011) et du Centre-Sud (2012 - 2013) ont permis d'améliorer la compréhension du fonctionnement hydrogéologique de Mayotte. Enfin, une nouvelle carte géologique est disponible, dans sa version provisoire, depuis mars 2013.

Ces données acquises depuis 2009 sont fondamentales pour l'élaboration de modèles hydrogéologiques conceptuels permettant d'expliquer le fonctionnement des hydrosystèmes : contexte d'émergence, réseau hydrographique, répartition de la ressource en eau souterraine, etc. En comparaison avec la situation anté-2009, l'infrastructure géologique de l'île et son évolution volcanostructurale sont désormais beaucoup mieux appréhendées. L'intérêt de ces données et des exemples de leur utilisation ont également été compilés dans ce rapport.

L'expérience a montré que la simplicité de mise en œuvre des données TDEM n'impose que quelques précautions et limites à leur utilisation. Les résultats jusqu'à présent obtenus encouragent l'utilisation de ce jeu de données qui sera certainement retravaillé à l'avenir (inversion 2D le long de lignes de vols, par exemple) voire complété par des mesures géophysiques complémentaires (RMP : Résonance Magnétique des Protons). Les récents résultats de la 5^{ème} campagne de forage montrent également de très bons résultats pour une utilisation prédictive de ces données (taux de réussite des forages de 75% en août 2013).

La méthodologie de délimitation des aires d'alimentation des captages d'eau souterraine de Mayotte a ainsi pu être enrichie d'approches complémentaires. Afin de faciliter la mise en œuvre de cette méthodologie, un arbre de décision reprenant le cheminement à suivre est

¹ AAC et BAC sont deux termes équivalents. Le terme « aire d'alimentation » sera privilégié afin d'éviter toute confusion avec le terme de « bassin versant ».

proposé et explicité sur deux exemples concrets : les forages de Mronabéja 2 (12316X0032) et de Gouloué F3 (12307X0568).

L'utilisation de ces nouvelles données est néanmoins limitée par les caractéristiques des formations volcaniques de l'île qui sont susceptibles de présenter une grande homogénéité à l'échelle du massif mais des variations latérales importantes à l'échelle de l'affleurement. Cet effet d'échelle est d'autant plus difficile à appréhender qu'il affecte directement les propriétés hydrauliques du sous-sol : présence d'inter-coulées peu perméables, de paléosols/niveaux altérés, de dépôts de volcanoclastites, etc. Ces propriétés hydrauliques du sous-sol ne sont d'ailleurs retranscrites ni via la carte géologique ni via les données TDEM. Par exemple, le degré d'altération ou de zéolitisation d'un corps lavique peut engendrer de fortes variabilités de ses propriétés mécaniques et hydrauliques.

Une méthodologie pour l'étude des aires d'alimentation des captages d'eau superficielle est déjà en cours de préparation à l'échelle nationale, sous la direction de l'IRSTEA (ex-CEMAGREF). Cette partie ne sera donc pas traitée dans cette étude.

Sommaire

1. Introduction	9
2. Concepts et terminologie	11
2.1. NOTION DE BASSIN VERSANT	11
2.2. NOTION DE BASSIN D'ALIMENTATION D'UN CAPTAGE	11
2.3. NOTION D'AIRE D'ALIMENTATION D'UN CAPTAGE	14
3. Données acquises depuis 2009 et état des connaissances sur le fonctionne hydrogéologique de Mayotte	ement 15
3.1. DONNEES ACQUISES DEPUIS 2009	15
3.2. GEOMAYOTTE : CARTOGRAPHIE GEOLOGIQUE DE MAYOTTE	15
 3.3. GEOMAYOTTE : MODELE 3D ELECTROMAGNETIQUE (TDEM) 3.3.1. Méthode / principe 3.3.2. Conditions et limites d'utilisation 3.3.3. Exemples d'applications 	18 18 20 22
 3.4. CARACTERISATION HYDROGEOLOGIQUE DU POTENTIEL EN EAU SO DE MAYOTTE 3.4.1.Méthodologie / objectifs	UTERRAINE 29 29 30
3.5. ETAT DES CONNAISSANCES SUR LE FONCTIONNEMENT HYDROGEO DE MAYOTTE	LOGIQUE 32
4. Démarche proposée	37
4.1. PHASE 1 : ETUDE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE DU CAPTAG SON BASSIN VERSANT	6E ET DE 37
 4.2. PHASE 2 : DELIMITATION DE L'AAC 4.2.1. Présentation de la méthode de délimitation actuellement en cours à M 39 	39 ayotte
4.2.2. Apport de la récente campagne de géophysique aéroportée	39
4.3. PHASE 3 : VERIFICATION DE LA COHERENCE DE L'AAC AVEC LE DEB 44	IT PRELEVE
5. Application au captage de Mronabéja 2	47
6. Application au captage de Gouloué F3	65
7. Conclusion et perspectives	77

8. E	bliographie	79
------	-------------	----

Liste des illustrations

Illustration 1 - Définition du bassin d'alimentation du captage (Bussard, 2005)
Illustration 2 – Bassin hydrogéologique et bassin d'alimentation du captage dans un cas simple de nappe libre
Illustration 3 – Exemple de bassin d'alimentation pour une nappe captive
Illustration 4 – Aperçu de la carte géologique de Mayotte au 1/25 000 (carte : Lacquement et al., 2013 ; notice Nehlig et al., 2013, BRGM/RP-61803-FR)
Illustration 5 - Schéma du principe d'induction électromagnétique dans le sol (Chouteau & Giroux, 2005)
Illustration 6 - Processus de traitement des sondages TDEM : a) acquisition des données, b) signal enregistré, c) inversion des données, d) représentation 3D de la résistivité du sous sol
Illustration 7 - Lignes de vol (traits noirs) sur l'ile de Mayotte tracées sur la carte de résistivité pour la profondeur 0-5 m
Illustration 8 - Gammes de résistivité (ohm.m) de différentes formations géologiques (Reynolds, 1996)
Illustration 9 - Comparaison des coupes géologiques des forages et des sondages TDEM 23
Illustration 10 – Exemples de coupes de résistivités interprétées sur le secteur de Combani (Nehlig et al., 2013, d'après Jaouën et al., 2013, BRGM/RP-61757-FR)
Illustration 11 - Cartographie basée sur la campagne aéroportée des roches dont a) la résistivité est supérieure à 120 ohm.m et la profondeur est supérieure à 10 m et b) la résistivité est comprise entre 100 et 200 ohm.m et la profondeur est inférieure à 10 m. Le code de couleur est fonction de la profondeur des massifs de roche sous la surface topographie (Nehlig et al., 2013).
Illustration 12 - Comparaison entre les valeurs de résistivités obtenues par les acquisitions de géophysiques aéroportées (résistivité TDEM) et les méthodes sols de la campagne de caractérisation hydrogéologique du secteur Nord-Ouest de Mayotte, respectivement pour les acquisitions de type Wenner-Schlumberger, Wenner et Dipôle- Dipôle. L'échelle de couleur est fonction de la profondeur de la mesure.26
Illustration 13 - Comparaison du panneau électrique de Vatounkaridi avec les sondages TDEM situés à proximité (distance comprise entre 7 et 249 m ; espacement moyen de 55 m) (Jaouën et al., 2013, BRGM/RP-61757-FR)
Illustration 14 - Comparaison du panneau électrique de Bandrélé avec les sondages TDEM situés à proximité (distance comprise entre 7 et 249 m ;espacement moyen de 55 m) (Jaouën et al., 2013, BRGM/RP-61757-FR)
Illustration 15 – Exemple d'un ensemble volcanique homogène à grande échelle : le massif du Digo (Jaouën et al., 2012, BRGM/RP-59550-FR)
Illustration 16 – Exemple d'un secteur très altéré, apparaissant comme très homogène à grande échelle : l'isthme Sud de Mayotte (Jaouën et al., 2013, BRGM/RP-61757-FR).29
Illustration 17 - Comparaison des coupes géologiques des forages et des sondages TDEM 29
Illustration 18 - Localisation des entités hydrogéologiques et des propositions de forage pour les secteurs Nord-Ouest et Centre-Sud de Mayotte

Illustration 19	 Ø – Carte de la répartition des sources et des forages (AEP et piézomètres) de Mayotte. 33
Illustration 20	 Graphique de la cote piézométrique moyenne interannuelle en fonction de l'altitude des ouvrages piézométriques
Illustration 21	 Diagramme binaire de l'altitude du point de prélèvement en fonction de la concentration en silice par rapport aux âges estimés des eaux pour les secteurs Centre et Sud de Mayotte
Illustration 22	2 - Tableau récapitulatif des points à traiter lors de l'étude géologique et hydrogéologique
Illustration 23	 3 - Logigramme expliquant comment utiliser les données TDEM dans une démarche de délimitation d'AAC
Illustration 24	 Tableau récapitulatif des principales informations récoltées au cours de l'étude géologique et hydrogéologique du captage de Mronabéja 2 et de son bassin versant (Phase 1 de la démarche de délimitation proposée)
Illustration 25	 Données de sondages EM acquises sur le secteur sud de l'île de Mayotte (zoom sur les BV des Mroni Djalimou, Antanana et Bérambo). Les limites des BV sont représentés en blanc.
Illustration 26	6 - Coupes géologiques simplifiées et profils de résistivités EM associés
Illustration 27	7 - Coupe NO-SE passant par le forage de Mronabéja 2
Illustration 28	3 - Quelques coupes TDEM réalisées sur le secteur du Mroni Antanana afin de comprendre la structure et l'extension des formations en présence
Illustration 29	9 - Quelques coupes TDEM réalisées sur le secteur du Mroni Antanana (vue de face). 54
Illustration 30	 Représentation en 3D de l'extension de l'objet résistant recoupé par les forages de Mronabéja. L'échelle verticale est exagérée (x2 l'échelle horizontale).L'échelle de résistivité est celle utilisée pour tout le secteur sud de l'île et définie plus haut.55
Illustration 31	 Représentation en 3D et en fonction de l'altitude de l'extension de l'objet résistant recoupé par les forages de Mronabéja. L'échelle verticale est exagérée (x2 l'échelle horizontale). Les structures figurées en bleu se situent sous le niveau marin. 56
Illustration 32	2 - Localisation de la paléovallée R3 sur fond cartographique IGN
Illustration 33	3 - Localisation des cours d'eau du bassin du Mroni Antanana et extension de la paléovallée R3
Illustration 34	 Projection en surface de la portion de nappe alimentant le captage de Mronabéja 2. 60
Illustration 35	5 - Aire d'alimentation proposée pour le captage de Mronabéja 2
Illustration 36	6 - Aire d'alimentation du captage de Mronabéja 2 - Comparaison entre le tracé retenu en 2009 et celui proposé suite à cette étude
Illustration 37	 7 - Données de sondages TDEM acquises sur le secteur Nord-Est de l'île de Mayotte (du Nord au Sud, zoom sur les BV de la Kawénilajolie, de la Majimbini, de la Doujani et de la Gouloué). Les limites des BV sont représentés en bleu
Illustration 38	 3 - Log volcanostratigraphique et résistivités des formations pour le secteur de Gouloué ; en grisé : formations recoupées par les forages de Gouloué ; en blanc : les formations interprétées par la géologie et la géomorphologie
Illustration 39	9 - Coupe de résistivité TDEM longitudinale interprétée
Illustration 40) - Vue 3D des coupes TDEM transversales et longitudinales passant par le forage de Gouloué F3

Illustration 41 -	Vue du secteur de Gouloué pour une résistivité comprise entre 12 et 120 ohm.m et une profondeur d'investigation de 10 à 200 mètres
Illustration 42 -	Vue du secteur de Gouloué pour une résistivité comprise entre 70 et 100 ohm.m et une profondeur d'investigation de 10 à 200 mètres
Illustration 43 -	Délimitation de l'aire d'alimentation du captage de Gouloué F3 (12307X0568).76
Illustration 44 -	Comparaison de la coupe géologique du forage de Gouloué 1 (12307X0045) et du sondage TDEM le plus proche
Illustration 45 -	Comparaison de la coupe géologique du forage de Gouloué 2 (12307X0054) et du sondage TDEM le plus proche
Illustration 46 -	Comparaison de la coupe géologique du forage de Gouloué F3 (12307X0568) et du sondage TDEM le plus proche

Liste des annexes

1. Introduction

L'Aire d'Alimentation de Captage (AAC) est un dispositif de protection de la ressource en eau mis en œuvre en réponse aux exigences de la Directive Cadre sur l'Eau et né de la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques du 30 décembre 2006. Cet outil vient en complément des périmètres de protection des captages d'eau potable, dont la vocation première est de lutter contre les pollutions chroniques et accidentelles. L'AAC vise quant à lui à protéger des captages d'eau potable contre des pollutions diffuses.

Département français depuis 2011, l'île de Mayotte connait une croissance démographique forte et un développement important. Avec 570 habitants par km², c'est le département Français le plus densément peuplé après ceux de l'Ile-de-France et il est marqué, depuis plusieurs décennies, par une augmentation régulière et importante du nombre d'habitants (212 600 habitants en 2012). Sa population a ainsi triplé depuis 1987.

L'alimentation en eau potable représente la principale pression sur les ressources en eau. Aucune industrie consommatrice d'eau n'est présente sur l'île et les pratiques agricoles, essentiellement vivrières, sont exclusivement extensives. La production actuelle est de 8,2 millions de m³ par an, ce qui correspond à une consommation d'environ 105 l/j/hab. en 2012 dont plus de 70 % est apporté par les eaux superficielles (2 retenues collinaires et 15 prises d'eau), 20 % par les eaux souterraines (16 forages et 2 drains horizontaux) et moins de 10 % par le dessalement de l'eau de mer (1 usine).

Plusieurs facteurs laissent imaginer une persistance de l'augmentation de la consommation en eau au cours des prochaines années : une forte croissance démographique (natalité et immigration), l'accession de la population à un niveau de vie plus élevé ou encore la modification des pratiques agricoles liées à la professionnalisation de la filière au détriment des pratiques vivrières traditionnelles.

Dans ce contexte insulaire tropical avec une saisonnalité très marquée, la pression sur une ressource en eau souterraine d'ores-et-déjà fragile tend à s'accroitre rapidement. C'est pourquoi la délimitation d'aires d'alimentation des captages destinés à l'alimentation en eau potable participe à la mise en place de bonnes pratiques de gestion et de protection de la ressource.

La singularité du contexte hydrogéologique de Mayotte, essentiellement composé de formations volcaniques anciennes et altérées, ne permet pas d'y appliquer les méthodologies développées en métropole adaptées aux milieux discontinus. Ainsi, une première méthodologie de délimitation des Bassins d'Alimentation de Captage (BAC) avait été définie en 2009 pour le contexte mahorais (Malard *et al.*, 2009, BRGM/RP-57299-FR). Depuis, de nouvelles données ont été acquises. Une campagne de géophysique TDEM héliportée (modèle électromagnétique 3D), réalisée en fin d'année 2010 dans le cadre de la carte géologique de Mayotte (projet GéoMayotte) a permis de mieux contraindre la structure des formations géologiques. De plus, les prospections de terrain réalisées dans le cadre des projets de caractérisation hydrogéologique du Nord-Est (2008), du Nord-Ouest (2011) et du Centre-Sud (2012 - 2013) ont permis d'améliorer la compréhension du fonctionnement hydrogéologique de Mayotte. Enfin, une nouvelle carte géologique est disponible depuis mars 2013, dans sa version provisoire.

Ce rapport vise à intégrer ces nouvelles données dans la méthodologie de délimitation des AAC d'eau souterraine mais aussi à mettre en avant les limites de ces méthodes et les précautions d'emploi.

Une méthodologie pour l'étude des aires d'alimentation des captages d'eau superficielle est déjà en cours de préparation à l'échelle nationale, sous la direction de l'IRSTEA (ex-CEMAGREF). Cette partie ne sera donc pas traitée dans cette étude.

2. Concepts et terminologie

Les éléments de ce chapitre sont repris du rapport BRGM/RP-55332-FR (Vernoux *et al.*, 2007, BRGM/RP-55874-FR) auquel le lecteur pourra se référer pour plus de détails.

2.1. NOTION DE BASSIN VERSANT

Le bassin versant (BV) hydrogéologique d'un aquifère ou bassin versant souterrain est la partie d'un aquifère dans laquelle les eaux souterraines s'écoulent vers un même exutoire ou groupe d'exutoires. Il est délimité par une ligne de partage des eaux souterraines qui, à l'encontre de celle des BV de surface (ou hydrologique) peut-être migrante. Le BV hydrogéologique est l'homologue souterrain du BV hydrologique. Lorsque l'aquifère est en partie alimenté par l'infiltration d'un cours d'eau, seuls les secteurs du BV de ce cours d'eau qui participent à l'alimentation de l'aquifère par infiltration directe des eaux météoriques ou après un court ruissellement diffus sont considérés dans le bassin hydrogéologique.

2.2. NOTION DE BASSIN D'ALIMENTATION D'UN CAPTAGE

Dans un bassin versant souterrain, on peut définir une **portion de la nappe d'eau souterraine** alimentant le captage ; elle représente l'ensemble des particules d'eau situé en un endroit quelconque de la <u>zone saturée</u> qui termineront leur course dans le captage (premier schéma de l'Illustration 1)



Illustration 1 - Définition du bassin d'alimentation du captage (Bussard, 2005).

Le **bassin d'alimentation d'un captage (BAC)** est le lieu des points de la <u>surface du sol</u> qui contribuent à l'alimentation du captage (second schéma de l'Illustration 1). Dans les cas simples, le bassin d'alimentation concerne un seul aquifère et correspond à la projection en surface de la portion de nappe alimentant le captage. C'est ce que montre le premier schéma

de l'Illustration 2, en considérant la surface située entre la crête topographique et la crête piézométrique comme parfaitement infiltrante (100% de la pluie efficace s'infiltre). Si cette surface était parfaitement imperméable (100% de la pluie efficace ruisselle), le bassin d'alimentation du captage serait plus réduit et à l'inverse le bassin d'alimentation de la source serait plus étendue (second schéma). Dans la pratique une surface étant rarement totalement ruisselante ou infiltrante, la zone située entre la crête topographique et la crête piézométrique devrait être prise en compte pour les deux bassins, les deux BAC ayant alors une partie commune.

Dans des cas plus complexes le bassin hydrogéologique peut prendre en compte plusieurs aquifères interconnectés. Le bassin d'alimentation du captage est toujours compris à l'intérieur du bassin hydrogéologique de l'aquifère principal mais il peut alors s'étendre au-delà de l'extension structurale de l'aquifère principal.

Le bassin d'alimentation d'un captage qui, rappelons-le, est le secteur en surface qui participe à l'alimentation du captage par l'infiltration directe des eaux ou par l'infiltration de cours d'eau, suit généralement la projection verticale de la portion de la nappe qui alimente le captage, mais il peut en différer par ajout ou retrait de zones en surface.

Dans le cas d'une couverture imperméable, il peut arriver qu'une zone à proximité du captage ne participe pas à son alimentation. Elle ne fait donc pas partie du bassin d'alimentation. A l'inverse les zones attenantes (versants en bordure) caractérisées par des écoulements de subsurface ou par du ruissellement diffus s'infiltrant en partie, participent à l'alimentation du captage.

La notion de bassin d'alimentation est ainsi étendue par rapport à son acception classique en intégrant les zones de bordures qui contribuent à l'apport de l'eau météorique sur les aires de recharge de l'aquifère.

A l'inverse, le BAC peut être de dimension plus réduite si la nappe est captive ou libre mais sous recouvrement argileux (Illustration 3). Ces deux cas de figure sont liés à la présence d'une couche imperméable isolant l'aquifère considéré, soit de la surface du sol, soit d'une nappe sus-jacente. Une formation n'étant jamais totalement imperméable, il convient de définir précisément cette notion : une couche sera définie comme imperméable lorsque sa perméabilité sera inférieure à 10⁻⁹ m/s (norme utilisée pour les Centre d'Enfouissement Technique CET).



Illustration 2 – Bassin hydrogéologique et bassin d'alimentation du captage dans un cas simple de nappe libre.



2.3. NOTION D'AIRE D'ALIMENTATION D'UN CAPTAGE

La synthèse bibliographique réalisée en préalable à la définition du guide méthodologique national de délimitation des BAC (rapport BRGM/RP-55332-FR, Vernoux *et al.*, 2007b) a montré la diversité des définitions données à la notion « d'aire d'alimentation des captages ». Ces diverses définitions renvoient généralement à une notion topographique de surface en rapport avec l'alimentation d'un captage.

Le dispositif réglementaire, issu de l'article 21 de la loi sur l'eau, invoque, sans la définir, la notion d'aire d'alimentation des captages (AAC). Il vise néanmoins la protection de l'ensemble des captages d'eau potable, que ceux-ci correspondent à des captages d'eaux souterraines (forage et source) ou à des captages d'eaux superficielles. Cette définition de l'AAC correspond à celle donnée plus haut pour le BAC. En fait, le terme d'AAC est généralement utilisé pour tous les types de captages tandis que le terme de BAC est souvent réservé à l'usage des captages d'eau souterraine, même si la notion demeure équivalente.

Dans les chapitres qui suivent, seul le terme d'AAC sera employé et, ceci, pour tous les types de captages confondus.

3. Données acquises depuis 2009 et état des connaissances sur le fonctionnement hydrogéologique de Mayotte

3.1. DONNEES ACQUISES DEPUIS 2009

La mise en place progressive du droit commun et les projets d'aménagement structurants (ressources naturelles et matériaux, logement, gestion des risques naturels, réseaux de communications, etc.) nécessitent l'acquisition de connaissances fondamentales sur le soussol.

C'est dans ce cadre qu'a été réalisée, entre 2010 et 2013, la cartographie géologique de l'île à l'échelle 1/25 000 (Nehlig *et al.*, 2013, BRGM/RP-61803-FR). Elle constitue un élément structurant important pour la connaissance du sous-sol mahorais grâce à la combinaison inédite de levés géologiques sur le terrain et de géophysique héliportée, réalisés sur l'ensemble de l'île. Sa réalisation a été rendue possible grâce à un cofinancement à parts égales du Contrat de Projet État-Département 2008/2014 et des crédits de recherche du BRGM.

En parallèle, deux études pour la caractérisation hydrogéologique du potentiel en eau souterraine de Mayotte ont été financées par le SIEAM, l'ONEMA et le BRGM : en 2010-2011, pour le secteur Nord-Ouest (Jaouen *et al.*, 2012, BRGM/RP-59550-FR) et en 2011-2012 pour le secteur Centre-Sud (Jaouen *et al.*, 2013. BRGM/RP-61757-FR). Ces travaux s'inscrivent dans la droite ligne de l'étude réalisée en 2007-2008 sur le tiers Nord-Est de l'île (Guilbert *et al.*, 2008, BRGM/RP-56600-FR). Ces projets de caractérisation hydrogéologique avaient pour objectif d'améliorer les connaissances en vue d'une exploitation durable de la ressource, en adéquation avec les orientations du programme de mesure du SDAGE 2010-2015 de Mayotte. La poursuite de ces projets se concrétise aujourd'hui par la réalisation de campagnes de forages qui participeront à l'amélioration de la connaissance du fonctionnement hydrogéologique ainsi qu'à la sécurisation de l'approvisionnement en eau de l'île.

3.2. GEOMAYOTTE : CARTOGRAPHIE GEOLOGIQUE DE MAYOTTE

Les conditions d'établissement de la carte géologique sont présentées dans la notice associée (Nehlig *et al.*, 2013, BRGM/RP-61803-FR). Seuls les aspects principaux seront rappelés cidessous.

Pour rappel, cette cartographie s'est appuyée sur :

- une synthèse des cartographies et descriptions géologiques antérieures dont celles de Stieltjes *et al.* (1988), de Debeuf (2004) mais également celles issues des reconnaissances pour l'hydrogéologie, les risques naturels et les matériaux, et consignées dans les rapports du BRGM,
- des levés de terrain combinant observations d'affleurements, levés de coupes, interprétations de photographies aériennes, observations paysagères, géomorphologie, etc.
- l'utilisation des données de mesures électromagnétiques et magnétiques,
- l'échantillonnage pour analyses géochimiques de roches,

- l'analyse du Modèle Numérique de Terrain (IGN, 2008) à maille de 1 m de côté et permettant de mettre en évidence ou de confirmer la géométrie des coulées et celle des planèzes reliques.

Les levés de terrain ont été réalisés au 1/10 000 pour former une cartographie finale au 1/25 000. La carte géologique est limitée par la laisse des plus hautes mers c'est-à-dire le niveau 0 du Nivellement Général de Mayotte. Les formations littorales de l'estran n'ont donc pas été cartographiées. Compte tenu des besoins des donneurs d'ordre du projet, la cartographie géologique réalisée a privilégié la représentation des formations superficielles (cf. Illustration 4) car ces dernières jouent un rôle prépondérant dans les mécanismes d'infiltration et de protection des aquifères.

Ces travaux ont montré que l'enchevêtrement de coulées ayant donné naissance à Mayotte est complexe et polyphasé : les coulées se sont mises en place au sein de paléovallées, lors de phases éruptives différentes et espacées dans le temps. La forte variabilité spatiale qui en résulte ne permet pas la représentation de coulées individuelles à l'échelle de la carte. Cependant, les sens d'écoulement des coulées de lave ont quelquefois pu être indiqués sur la carte. Ils peuvent souvent être déduits de l'examen du modèle de résistivité 3D de l'île issu des données TDEM présentées dans le chapitre suivant.



Illustration 4 – Aperçu de la carte géologique de Mayotte au 1/25 000 (carte : Lacquement et al., 2013 ; notice Nehlig et al., 2013, BRGM/RP-61803-FR).

3.3. GEOMAYOTTE : MODELE 3D ELECTROMAGNETIQUE (TDEM)

3.3.1. Méthode / principe

Dans le cadre de la mise à jour de la carte géologique de Mayotte, une campagne de prospection géophysique héliportée (TDEM : Time Domain Electro-Magnetic) a été réalisée en octobre 2010 par les équipes danoises de l'Université d'Aarhus et de la Société SkyTEM. Cette campagne de géophysique a été mise en œuvre afin de caractériser les variations de résistivité pour une profondeur pouvant atteindre 300 m. L'intérêt de la géophysique héliportée est de pouvoir couvrir de façon homogène dans un temps restreint un grand secteur d'étude.

La méthode SkyTem (Sørensen and Auken, 2004) est un système électromagnétique temporel où une boucle émettrice induit des courants électriques dans le sol (cf. Illustration 5). Les courants de sub-surface sont diffusés dans le sol en fonction des conductivités des matériaux rencontrés. Une bobine réceptrice mesure la dérivée première en fonction du champ magnétique induit par ces courants de sub-surface.



Illustration 5 - Schéma du principe d'induction électromagnétique dans le sol (Chouteau & Giroux, 2005).

Cette induction est produite par la coupure brusque d'un champ magnétique statique établi en surface grâce à une boucle dans laquelle un courant électrique circule (cf. Illustration 6a). La différence de flux crée une induction dans le sol, sous forme de boucle de courant qui crée à son tour un champ secondaire (cf. Illustration 6b) par une boucle réceptrice.

La courbe de décroissance du champ secondaire est inversée pour reconstituer la variation de la résistivité en fonction de la profondeur (cf. Illustration 6c). L'hypothèse prise lors de cette étape est celle d'un terrain stratifié horizontalement (situation 1D). Un modèle 2D et/ou 3D de résistivité peut être réalisé (cf. Illustration 6d) en interpolant entre les sondages TDEM.

Le modèle de résistivité est soumis à des règles d'équivalence et de suppression en fonction de la profondeur (analogue à celles connues pour l'électrique) ce qui fait qu'une inversion n'est jamais unique et réclame souvent une connaissance à priori sur la profondeur ou sur la résistivité des terrains qui peuvent être connus par une autre méthode (i.e. forages, diagraphies,...).



Illustration 6 - Processus de traitement des sondages TDEM : a) acquisition des données, b) signal enregistré, c) inversion des données, d) représentation 3D de la résistivité du sous sol.

Un linéaire de 3 000 km de données TDEM SkyTem a été acquis en un mois à Mayotte. Les acquisitions géophysiques ont été réalisées sur les deux îles principales de Mayotte avec un espacement de base de 200 m et 400 m entre ligne de vol en fonction de l'intérêt de la zone (Figure 19), resserré à 100 m sur Petite Terre. Les zones urbaines n'ont pas été survolées. Le plan de vol et la localisation des mesures ont été reportés dans le système géodésique UTM38S/WGS 84. Dans ce système, les lignes de vol ont une orientation Nord-Sud. La garde au sol, qui dépend de la topographie, est continuellement mesurée par les altimètres laser ; elle varie de 30 à 50 m pour les zones non forestières et augmente, pour des raisons de sécurité, lorsque l'hélicoptère passe au-dessus d'arbres. Enfin, la vitesse de vol varie de 45 à 90 km/h pour l'ensemble de l'acquisition.



profondeur 0-5 m.

3.3.2. Conditions et limites d'utilisation

La bonne exploitation des données TDEM est soumise à quelques conditions et limites d'utilisation :

- La densité de sondage TDEM et/ou la distance entre un sondage TDEM et un point de calage doivent être cohérentes avec l'objet géologique étudié,
- Le modèle 3D étant issu d'une inversion de chaque sondage en 1D puis d'une interpolation entre ces sondages, les discontinuités sub-horizontales (toit/mur de formations volcaniques, paléo-surfaces, etc.) sont surreprésentées par rapport aux discontinuités sub-verticales (failles, paléo-reliefs escarpés, filons/dykes, etc.),
- Même si la profondeur d'investigation atteint plus de 300 mètres, la précision du modèle est optimale pour les horizons les plus superficiels (150-200 mètres),
- l'échelle de résistivité doit être adaptée aux gammes de résistivité observées sur la zone d'étude tout en prenant en compte que cette méthode est plus sensible aux formations conductrices et que les variations observées au-dessus de quelques centaines d'ohm.m ne sont plus significatives,
- Le calage des données TDEM avec des observations directes (carte géologique, coupe géologique, venue d'eau à l'avancement, etc.) est une prérogative absolue à toute interprétation. En effet, la résistivité mesurée par cette méthode correspond à la résultante de nombreux facteurs et l'interprétation de la résistivité n'est jamais aisée et univoque (cf. Illustration 8). Cette résistivité varie en fonction de nombreux paramètres :
 - o la nature de la « roche mère »,
 - o le degré d'altération (teneur en argile minéralogique),
 - la porosité et la nature du fluide occupant les pores (air, eau douce, eau salée, etc.),
 - la profondeur d'investigation et la résistivité des matériaux sus-jacents et adjacents,
 - les perturbations naturelles ou anthropiques (champs électromagnétiques parasites, précisions des instruments de mesure, etc.)



Illustration 8 - Gammes de résistivité (ohm.m) de différentes formations géologiques (Reynolds, 1996).

Il est important de souligner que les données TDEM n'imagent pas les propriétés hydrauliques du sous-sol. Par conséquent, elles ne peuvent pas rendre compte des

écoulements souterrains, des variations latérales et verticales de transmissivités susceptibles de compartimenter un aquifère ou au contraire de mettre en relation plusieurs entités hydrogéologiques.

3.3.3. Exemples d'applications

A. Champ d'application des données TDEM

Les données TDEM présentent un intérêt indéniable pour une meilleure compréhension de la géométrie des entités géologiques. Néanmoins, toute interprétation de ces données doit impérativement considérer les limites de la méthode énoncées ci-dessus (cf. §3.3.2.).

Les informations géologiques directes (forages, affleurements, etc.) uniquement ponctuelles et l'ubiquité des formations superficielles (colluvions, altérites, etc.) rendent difficile la compréhension de l'infrastructure géologique de l'île. Les données électromagnétiques fournissent une information essentielle sur l'architecture géologique jusqu'à une profondeur d'environ 200 m. De plus, le modèle étant acquis, son utilisation sur un secteur d'étude donné s'avère simple et rapide, facilitée par la possibilité de visualiser les sondages TDEM, de réaliser des coupes au sein du modèle 3D ou d'isoler des volumes d'isovaleurs.

Ces données, très précieuses pour le développement de l'île, sont d'ores et déjà utilisées pour la cartographie géologique (Nehlig *et al.*, 2013 ; Lacquement *et al.*, 2013), les ressources en eau souterraine (Vittecoq *et al.*, 2011, BRGM/RP-60035-FR ; Jaouën *et al.*, 2012, BRGM/RP-59550-FR ; Jaouën *et al.*, 2013, BRGM/RP-61757-FR), la localisation du biseau salé, la gestion des risques naturels (Deparis et Tardy, 2013, à paraître), la recherche de matériaux et l'aménagement du territoire.

B. Comparaison sondage TDEM - forage

Le calage des données TDEM avec des observations géologiques de terrain est essentiel pour une bonne interprétation à petite échelle. Il a ainsi été possible de déterminer des classes de résistivités pour les matériaux rencontrés couramment sur le terrain :

-	allotérites :	100 à 200 ohm.m ;
-	laves différenciées (téphrite, phonolite, trachyte) :	> 120 ohm.m ;
-	formations volcanosédimentaires (alluvions anciennes) :	< 14 ohm.m ;
-	laves peu différenciées (basaltes s.l.) +/- altérées :	12 à 120 ohm.m.
-	intrusion saline :	< 5 ohm.m.

Les variations latérales pouvant être brutales, la prise en compte de la distance entre le point de calage et le sondage TDEM le plus proche est impérative.



Illustration 9 - Comparaison des coupes géologiques des forages et des sondages TDEM.

C. Interprétation de coupes de résistivité

Les projets de caractérisation hydrogéologique des secteurs Nord-Ouest (Jaouën *et al.*, 2012, BRGM/RP-59550-FR) et Centre-Sud (Jaouën *et al.*, 2013, BRGM/RP-61757-FR) de Mayotte ont largement exploité les données TDEM et, en particulier, l'interprétation des coupes de résistivité, afin de comprendre la structure du sous-sol. Sur l'exemple suivant (cf. Illustration 10) pris sur le secteur de Combani-Kahani, les sources apparaissent au niveau de discontinuités géo-électriques et les relations géométriques entre les massifs sont marquées par la présence d'entités plus conductrices (formations détritiques).



Illustration 10 – Exemples de coupes de résistivités interprétées sur le secteur de Combani (Nehlig et al., 2013, d'après Jaouën et al., 2013, BRGM/RP-61757-FR).

D. Interprétation d'isovaleurs de résistivité

A Mayotte, les corrélations entre la résistivité TDEM et les affleurements géologiques ont montré que les allotérites ont des résistivités comprises entre 100 et 200 ohm.m et que les

roches indurées (type phonolite) ont souvent des résistivités supérieures à 120 ohm.m. Les données TDEM permettent ainsi d'imager facilement l'extension de phonolites sous couverture (cf. Illustration 11a) et des allotérites (cf. Illustration 11b).



Illustration 11 - Cartographie basée sur la campagne aéroportée des roches dont a) la résistivité est supérieure à 120 ohm.m et la profondeur est supérieure à 10 m et b) la résistivité est comprise entre 100 et 200 ohm.m et la profondeur est inférieure à 10 m. Le code de couleur est fonction de la profondeur des massifs de roche sous la surface topographie (Nehlig et al., 2013).

E. Comparaison avec les données de tomographie électrique

Dans le cadre des projets de caractérisation hydrogéologique (Jaouën *et al.*, 2012, BRGM/RP-59550-FR ; Jaouën *et al.*, 2013, BRGM/RP-61757-FR), des comparaisons entre les résultats de la méthode TDEM et les profils de tomographie électrique antérieurs ont été réalisés. Globalement, il existe une bonne corrélation entre ces deux méthodes et elles apparaissent complémentaires. Le pas d'acquisition plus resserré et le stacking de la méthode électrique permettent d'obtenir une meilleure résolution le long d'un profil alors que les données TDEM permettent une visualisation de la structure géo-électrique d'un secteur plus étendu. L'étendue de mesure des valeurs de résistivité est plus importante pour les tomographies électriques (de 0 à 500 ohm.m) que pour les sondages TDEM (de 0 à 200 ohm.m). En effet, cette dernière méthode est moins sensible pour imager les fortes valeurs de résistivités (Telford *et al.*, 1990). L'Illustration 12 confirme la convergence de ces deux méthodes. Les Illustration 13 et Illustration 14 présentent la superposition de profils de tomographie électrique et de sondages TDEM.



Illustration 12 - Comparaison entre les valeurs de résistivités obtenues par les acquisitions de géophysiques aéroportées (résistivité TDEM) et les méthodes sols de la campagne de caractérisation hydrogéologique du secteur Nord-Ouest de Mayotte, respectivement pour les acquisitions de type Wenner-Schlumberger, Wenner et Dipôle- Dipôle. L'échelle de couleur est fonction de la profondeur de la mesure.



Illustration 13 - Comparaison du panneau électrique de Vatounkaridi avec les sondages TDEM situés à proximité (distance comprise entre 7 et 249 m ; espacement moyen de 55 m) (Jaouën et al., 2013, BRGM/RP-61757-FR).



Illustration 14 - Comparaison du panneau électrique de Bandrélé avec les sondages TDEM situés à proximité (distance comprise entre 7 et 249 m ;espacement moyen de 55 m) (Jaouën et al., 2013, BRGM/RP-61757-FR).

F. Exemples de limites d'utilisation

Le modèle 3D TDEM apparaît cependant limité pour imager des ensembles très homogènes à grande échelle mais présentant néanmoins de fortes hétérogénéités locales. En effet, ce dernier tend à lisser ces variations de petite longueur d'onde.

Les travaux d'interprétation menés pour le massif du Digo illustre bien ce cas de figure : situé sur la zone de coalescence entre les massifs du Nord-Ouest et du Mtsapéré, les

différents dépôts associés au massif du Digo (coulées de laves, volcanoclastites, dépôts volcanosédimentaires, etc.) apparaissent comme un ensemble très homogène.



Illustration 15 – Exemple d'un ensemble volcanique homogène à grande échelle : le massif du Digo (Jaouën et al., 2012, BRGM/RP-59550-FR).

De même, les secteurs les plus anciens et donc les plus altérés, même s'ils sont constitués de tous types de formations issues de l'activité volcanique de l'île (coulées de lave, volcanoclastites, dyke, necks, dépôts volcanosédimentaires, etc.), peuvent apparaître très homogènes en terme de propriétés électromagnétiques comme le montre le cas de l'isthme Sud de Mayotte (cf. Illustration 16).



Illustration 16 – Exemple d'un secteur très altéré, apparaissant comme très homogène à grande échelle : l'isthme Sud de Mayotte (Jaouën et al., 2013, BRGM/RP-61757-FR).

Localement, la corrélation entre les points de calage géologique et les sondages TDEM disponibles n'est pas suffisamment bonne. De même, l'interprétation du profil de résistivité n'est pas aisée.



¹²³¹²X0032 – Poroani 1 12312X0030 – Kahani 1 12306X0010 – Combani 2 Illustration 17 - Comparaison des coupes géologiques des forages et des sondages TDEM.

3.4. CARACTERISATION HYDROGEOLOGIQUE DU POTENTIEL EN EAU SOUTERRAINE DE MAYOTTE

3.4.1. Méthodologie / objectifs

Le premier objectif de ces études étaient de construire des modèles hydrogéologiques conceptuels, à savoir, des représentations schématiques des relations entre la nature et la structure des formations et la circulation des eaux. Leur deuxième objectif était d'orienter les prochains programmes de forages de reconnaissance et d'exploitation des ressources en eau souterraine.

Ces études comprenaient le programme suivant, structuré en quatre phases :

- phase 1 : une synthèse des données existantes et la réalisation d'une campagne de reconnaissance hydrogéologique de terrain et de prélèvements pour l'analyse du fond géochimique des eaux ;
- phase 2 : l'élaboration de modèles conceptuels par entité hydrogéologique ;
- phase 3 : l'interprétation des données du TDEM et la réalisation d'une campagne de prospection géophysique au sol (tomographie électrique) pour valider ou faire évoluer les modèles conceptuels ;
- phase 4 : la validation des modèles conceptuels et la caractérisation du fonctionnement hydrogéologique.

3.4.2. Résultats

Ces études ont permis d'améliorer la compréhension du fonctionnement hydrogéologique de Mayotte (cf. §3.5). Une première délimitation cartographique des entités hydrogéologiques, des schémas conceptuels et 27 futurs sites de forages ont ainsi pu être proposés.



Illustration 18 - Localisation des entités hydrogéologiques et des propositions de forage pour les secteurs Nord-Ouest et Centre-Sud de Mayotte.

3.5. ETAT DES CONNAISSANCES SUR LE FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE DE MAYOTTE

La répartition spatiale des sources et les forages (cf. Illustration 19) met en évidence la présence d'eau souterraine du niveau de la mer jusqu'à des altitudes d'au moins 300 m NGM. Cependant, cette répartition n'est pas homogène, la densité des points d'eau étant plus importante dans le Nord et le Centre de l'île que dans le Sud. Les niveaux piézométriques mesurés en forage suivent la topographie générale de l'île (cf. Illustration 20), et plusieurs nappes perchées ont pu être mises en évidence (Crêtes du Bénara, Massif du Mtsapéré, Mont Combani, etc.). L'existence d'une nappe de base, telle que supposée par Stieltjes *et al.* (1988) n'a pas été confirmée.



Illustration 19 – Carte de la répartition des sources et des forages (AEP et piézomètres) de Mayotte.



Illustration 20 – Graphique de la cote piézométrique moyenne interannuelle en fonction de l'altitude des ouvrages piézométriques.

L'étude des données de forage a montré que les venues d'eau sont les plus importantes au niveau des discontinuités (inter-coulées, paléo-surfaces, etc.). Dans l'ensemble, les gammes de transmissivité observées sont comprises entre 5.10⁻³ et 10⁻⁵ m²/s et varient en fonction de nombreux paramètres : nature de la roche, degré d'altération, zéolitisation, fissuration/fracturation...

Ainsi, dans leur globalité, les aquifères de Mayotte sont :

- **multicouches**, composés d'alternance de formations à porosité de fracture (laves et certaines volcanoclastites) et de formations à porosité d'interstice (altérites, formations volcanosédimentaires et volcanoclastites),
- **semi-captifs** sous une couverture d'altérites ou de formations moins perméables (laves massives, pyroclastites, etc.),
- **discontinus et compartimentés** car inféodés aux géométries des dépôts volcaniques polyphasés et des paléo-surfaces d'altération structurant l'île.

Les eaux souterraines présentent des minéralisations variables induisant des conductivités généralement comprises entre 100 et 700 μ S/cm avec une valeur moyenne de l'ordre de 300 μ S/cm. Très localement, les conductivités atteignent des valeurs importantes, supérieures à 1 000 μ S/cm qui sont liées à des interactions eau/roche plus importantes ou à l'intrusion d'eau saline pour les points proches des côtes . Les eaux souterraines présentent des faciès bicarbonaté-sodi-calcique montrant plusieurs pôles d'enrichissement en fonction des caractéristiques de l'aquifère : météorique océanique, basaltique à phonolitique ou hydrothermal. Les eaux souterraines sont quasi exemptes de trace de pollution.

Les datations basées sur l'analyse des CFC et des SF6 ont montré des temps de résidence pouvant dépasser la cinquantaine d'années. Ces âges sont anti-corrélés avec l'altitude (cf. Illustration 21) attestant de circulations profondes au cœur des massifs.


Illustration 21 - Diagramme binaire de l'altitude du point de prélèvement en fonction de la concentration en silice par rapport aux âges estimés des eaux pour les secteurs Centre et Sud de Mayotte.

À l'échelle de l'île, trois fonctionnements hydrogéologiques distincts ont été mis en évidence :

- Les laves massives (téphrites, phonolites, etc.) formant les crêtes résiduelles (crêtes du Nord, Choungui, crêtes du Mont Combani) sont généralement peu aquifères et dépourvues de cours d'eau pérennes mais incisées par de nombreuses ravines.
- 2) À l'inverse, les massifs du Bénara, du Digo où alternent coulées de laves et intercoulées (pyroclastites, brèches de progression, dépôts volcano-sédimentaires, paléosol, etc.) témoignent d'un potentiel aquifère bien plus intéressant de par la présence de sources de déversement au contact de formations peu perméables qui alimentent de nombreux cours d'eau pérennes. Même si elle en est un équivalent, la moitié de l'île située au Sud du Bénara présente un degré d'altération beaucoup plus important et les reliefs ne correspondent plus qu'aux crêtes résiduelles préservées de l'altération. Les propriétés hydrauliques des roches y sont donc très réduites.
- 3) Enfin, les anciennes cuvettes volcano-sédimentaires comme celle de Combani-Kahani, comblées par des apports volcaniques, volcano-détritiques voire sédimentaires, forment des ensembles particulièrement hétérogènes mais localement exploitables pour l'alimentation en eau. Le niveau de base actuel des cours d'eau est contrôlé par la présence de formations anciennes très altérées et globalement imperméables.

4. Démarche proposée

La démarche proposée est schématisée comme suit :

Phase 1 : Etude géologique et hydrogéologique du captage et de son bassin versant
Phase 2 : Délimitation de l'AAC
Phase 3 : Vérification de la cohérence de l'AAC avec le débit prélevé

Les étapes de cette démarche sont détaillées dans les paragraphes suivants. Des exemples de sa mise en œuvre sur deux captages tests (Mronabéja 2 et Gouloué F3) sont présentés dans les chapitres suivants.

4.1. PHASE 1 : ETUDE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE DU CAPTAGE ET DE SON BASSIN VERSANT

L'étude géologique et hydrogéologique du bassin versant sert de base à la délimitation de l'AAC. C'est lors de cette étude que les données nécessaires à la compréhension du fonctionnement de l'aquifère capté sont acquises.

Dans le détail, cette étude préalable doit permettre de répondre aux questions suivantes :

- Où se situe le captage ? Dans quel secteur de l'île (Nord, Sud...) ? Quelles sont les limites de son BV hydrologique ? S'agit-il d'un BV plutôt infiltrant ou ruisselant ? Quelles sont les différentes formations géologiques en présence ? Comment se structurent-elles ? Quelles sont les ressources en eau potentielles (bilan hydrologique) ?

- Quel est l'état du captage (problème de conception, de colmatage, etc.)?

- Quel est le niveau aquifère capté ? Est-il libre, semi-captif ou captif ? Quelles sont ces propriétés hydrodynamiques (T, S, débit prélevable, ...) ? Quelles sont les propriétés hydrodynamiques des autres formations recoupées ? Des phénomènes de drainance peuventils se produire et alimenter l'aquifère capté ?

- En cas de présence d'un ou plusieurs autres ouvrage(s) (piézomètre et puits), existe-til des relations hydrauliques entre ce ou ces ouvrage(s) et le puits capté ? (continuité hydraulique).

- En cas de présence d'un cours d'eau permanent ou temporaire, quelle est la nature de la relation entre ce cours d'eau et l'aquifère capté ? (alimentation réciproque ?).

Le tableau suivant (Illustration 22) présente de façon synthétique tous les points à traiter et les éléments à prendre en compte lors de l'étude géologique et hydrogéologique.

	Objectif	Tâche à réaliser
		Donnees a utiliser (a minima)
	Etablir le cadre	Carte IGN
Contexte géographique et géologique du	captage	MNT (altitude, pente,)
	Etablir le contexte géologique du bassin hydrologique	Carte géologique (lithologie, structure)
captage		Informations géologiques issues des reconnaissances de terrain
		Données de forages et de sondages (BSS)
	Estimer la ressource en eau souterraine du bassin hydrologique	Bilan hydrologique Pluie, ETP, RU et % ruissellement
		Inventaires des captages, des sources et des cours d'eau
		Données BSS, informations issues d'essais de pompage, données d'exploitation (débit prélevé), données hydrométriques (mesurées par les stations et/ou lors des reconnaissances de terrain)
Contexte hydrogéologique du captage	Définir les caractéristiques de l'aquifère capté (lithologie, type, paramètres hydrodynamiques , limites etc.)	Inventaires des venues d'eau à l'avancement Coupe géologique du forage Résultats de pompage d'essai Informations issues des diagnostics menés sur le captage (but : savoir notamment si les propriétés hydrodynamiques issues des essais menés sur le captage sont bien caractéristiques de l'aquifère exploité) Informations issues des campagnes de géophysiques sols et TDEM (structure et résistivité de l'aquifère)
	Définir les conditions de recharge de la nappe captée	Etude des fluctuations piézométriques (dynamique HE/BE) (informations à croiser avec les données pluviométriques) Etude des relations nappe-rivière (croiser les informations piézométriques avec les données hydrométriques et les informations issues des campagnes hydrogéochimiques)

Illustration 22 - Tableau récapitulatif des points à traiter lors de l'étude géologique et hydrogéologique.

4.2. PHASE 2 : DELIMITATION DE L'AAC

4.2.1. Présentation de la méthode de délimitation actuellement en cours à Mayotte

La méthode de délimitation des AAC appliquée jusqu'alors à Mayotte a été définie par le BRGM en 2009 (Malard et al., 2009, BRGM/RP-57299-FR). Elle fait suite à la rédaction en 2007 d'un guide méthodologique national (Vernoux et al., 2007), dont elle s'inspire. Elle s'en inspire seulement, car aucune des bases méthodologiques développées dans ce quide ne porte spécifiquement sur les aquifères en contexte volcanique ancien et très altéré comme c'est le cas à Mayotte. De plus, l'absence, l'insuffisance ou la mauvaise qualité des connaissances du milieu et des données quantitatives (données hydrologiques, piézométriques, géologiques, topographiques) de l'époque rendaient difficilement applicables les méthodologies validées en contexte discontinu fissuré - contexte qui se rapproche le plus des milieux volcaniques insulaires jeunes. En effet, en 2009, la structure des unités géologiques qui conditionnent le développement spatial des aquifères est largement méconnue. Les investigations des aquifères mahorais sont récentes (les premiers forages ont été réalisés en 1990-1991) et, à ce titre, de nombreux secteurs n'ont pas encore fait l'objet d'études ou alors partiellement (Malard et al., 2009, BRGM/RP-57299-FR). Par ailleurs, il n'existe pas de cartes piézométriques permettant de représenter les écoulements souterrains. Il est donc impossible de cartographier l'extension des aquifères et de délimiter un BV hydrogéologique. Toutefois, il est déjà établi que :

- les unités aquifères de Mayotte sont pour la plupart d'extension réduite, souvent inférieure au BV du cours d'eau principal qui passe à proximité du captage,

- il existe une corrélation entre l'altitude et la cote piézométrique, qui tend à suggérer que BV souterrain et BV de surface sont relativement corrélés. Il est entendu que ces corrélations ne sont valides que sur des extensions réduites compte tenu du compartimentage des aquifères.

- les écoulements souterrains sont contrôlés par le relief actuel et l'orientation des épanchements volcaniques anciens.

- la localisation exacte des zones de recharge n'est pas bien connue, bien qu'il semble que les cours d'eau puissent constituer au moins localement des sites préférentiels d'infiltration.

Compte tenu de ces aspects et à défaut d'informations plus détaillées, il a été décidé lors de cette première approche méthodologique que la délimitation des AAC à Mayotte se ferait en suivant les contours du ou des bassins versants de surface qui participent à l'alimentation des captages par infiltration des cours d'eau.

4.2.2. Apport de la récente campagne de géophysique aéroportée

Depuis la définition de cette première méthodologie de délimitation des AAC en 2009, plusieurs campagnes d'acquisition de données ont été menées à Mayotte dont celles des données TDEM. Ces dernières permettent de mieux décrire et comprendre le sous-sol. Elles permettent notamment de mieux contraindre la géométrie des unités géologiques, et ceci sur des étendues géographiques importantes (à l'échelle de l'île). Ces caractéristiques en font un outil très intéressant pour la délimitation des AAC. En effet, comme indiqué ci-dessus, avant les études de « caractérisation hydrogéologique » intégrant les données TDEM (Jaouen *et al.*, 2012 et 2013), la géométrie des aquifères de Mayotte était très mal connue.

Il est néanmoins important de noter que les données TDEM ne peuvent pas être interprétées sans information de calage (carte géologique, forages etc.). Leur bonne exploitation est ainsi soumise à quelques règles. C'est la raison pour laquelle ce chapitre méthodologique s'articule

autour d'un logigramme intitulé « Utilisation des acquisitions TDEM dans le cadre d'une délimitation d'AAC » (Illustration 23). Comme son nom l'indique, ce logigramme donne la démarche à suivre, les questions à se poser et les opérations minimales à réaliser pour pouvoir utiliser au mieux ce type de donnée dans le cadre d'une délimitation d'AAC.

A. Présentation générale du logigramme

Ce logigramme:

- indique en titre, l'objectif principal
- puis décline :
 - sous forme de carré bleu avec coins arrondis, les principales questions binaires (« oui » ou « non ») permettant d'enchaîner le déroulement logique de la démarche,
 - o sous forme de carré bleu pâle, la dénomination de l'étape à réaliser,
 - o sous forme de carré rouge, des conseils ou remarques sur l'étape en cours.

Des commentaires sont fournis dans les paragraphes qui suivent afin de préciser le contenu et les objets des différentes cases de ce logigramme.

Actualisation de la méthodologie de délimitation des Aires d'Alimentation des Captages d'eau souterraine de Mayotte



Actualisation de la méthodologie de délimitation des Aires d'Alimentation des Captages d'eau souterraine de Mayotte



Illustration 23 - Logigramme expliquant comment utiliser les données TDEM dans une démarche de délimitation d'AAC.

B. Détails sur la démarche

« De la résistivité à la formation »

A ce stade, la démarche proposée nécessite peu de données géologiques et hydrogéologiques complémentaires en dehors des observations faites lors de la foration du captage étudié et des ouvrages à proximité quand ils existent (coupe géologique et venues d'eau à l'avancement). Il est également important de noter que, malgré les apparences, la démarche ne se concentre pas uniquement sur le niveau aquifère. L'EM offrant une image 3D du sous-sol, il est en effet important de s'intéresser <u>dès ce stade</u> aux formations encaissantes afin de caractériser leur géométrie. Par exemple, dans le cas d'une nappe sous recouvrement imperméable², il peut être essentiel de récupérer l'extension de ce recouvrement de la même manière que pour le niveau aquifère (c.-à-d. : en identifiant sa résistivité, en l'isolant puis en l'exportant vers un SIG ; cf. le logigramme). Dans ce cas, il est en effet possible qu'une zone à proximité du captage ne participe pas à son alimentation. Elle ne fait donc pas partie de l'AAC et doit donc être retirée (cf. § 2 et Illustration 3).

Cette étape d'analyse des données TDEM est déterminante pour la suite de la démarche. En effet, s'il apparaît dès lors que les acquisitions TDEM sont difficilement exploitables et ne calent pas avec les observations locales (carte géologique, forage(s)), <u>il ne faudra pas les utiliser par la suite</u>. Dans ce cas, il faudra directement passer à l'étape suivante qui vise à délimiter la PNAC.

« De la formation à la PNAC » (ou délimitation de la PNAC)

Comme définie § 2, la PNAC représente l'ensemble des particules d'eau situées en un endroit quelconque de la zone saturée qui termineront leur course dans le captage. Les données TDEM ne permettent pas, à elles seules, de rendre compte des écoulements souterrains. Il est donc clair <u>qu'à ce stade la démarche nécessite l'utilisation de données hydrogéologiques</u> <u>complémentaires</u> et, notamment, de données piézométriques. Il n'existe pas, actuellement, de cartes piézométriques sur l'île de Mayotte. Toutefois, comme précisé plus haut (§ 4.2.1), il semblerait que le niveau piézométrique et l'altitude du sol suivent une relation linéaire. Ce schéma d'écoulement général « <u>dans le sens des plus grandes pentes</u> » sera reconsidéré le cas échéant <u>si des éléments de connaissance supplémentaires permettent d'envisager des écoulements selon des directions différentes (ex. présence d'une barrière hydraulique).</u>

Il est clair que la continuité des niveaux piézométriques peut facilement être remise en cause en milieu volcanique, du fait notamment de l'hétérogénéité des lithologies et de l'altération des roches. C'est pourquoi toutes les informations hydrogéologiques collectées au cours de la phase de synthèse préliminaire § 4.1 devront être considérées afin de contraindre au mieux ce point (résultats des essais de pompage, de traçage etc.). Les informations acquises lors des campagnes de tomographie électrique (méthode plus sensible aux variations latérales que l'EM) pourront s'avérer également utiles pour localiser des discontinuités « subverticales » non observées avec l'EM et pouvant constituer des barrières hydrauliques (à confirmer par des informations hydrogéologiques). <u>A défaut de connaissance discriminante, la continuité</u> hydraulique sera supposée.

² Rappel : une couche est considérée imperméable lorsque sa perméabilité est inférieure à 10⁻⁹ m/s.

« De la PNAC à l'AAC »

Les formations affleurantes sont généralement altérées à Mayotte. Les aquifères sont ainsi généralement situés sous plusieurs mètres voire dizaines de mètres de formations superficielles (altérite, alluvions, colluvions etc.). Ce recouvrement n'est cependant pas pour autant toujours imperméable (au sens K<10⁻⁹ m/s). En effet, des phénomènes de drainance verticale sont suspectés en plusieurs points de l'île, comme par exemple sur le site de Mronabéja (cf. les résultats des essais de pompage menés sur ce forage en 2000, BRGM/RP-50428-FR). Dans ce cas, tous les points de la surface du sol situés au droit de la PNAC participent à l'alimentation du captage par infiltration directe des eaux météoriques. L'AAC correspondante sera donc <u>a minima égale à la projection en surface de la PNAC</u>. Le cas échéant, il faudra ajouter à cela la participation des cours d'eau venant de l'amont, des versants imperméables attenants par ruissellement et d'autres bassins versants souterrains (exemple d'une source qui alimente une rivière qui par infiltration alimente un aquifère sous-jacent).

C. Remarque importante

Les données TDEM ne sont qu'un outil parmi d'autres pour délimiter les AAC. Elles doivent être calées avec des observations directes (carte géologique, données de forage, etc.) pour pouvoir être interprétées. Même avec cela, elles peuvent s'avérer difficilement exploitables voire même inutilisables dans le cadre d'une délimitation d'AAC. Dans ce cas et à défaut de données hydrogéologiques supplémentaires et surtout contradictoires, la méthodologie proposée en 2009 par le BRGM sera appliquée. A savoir que la délimitation de l'AAC du captage étudié suivra le contour du ou des bassins versants de surface qui participent à l'alimentation des captages par infiltration des cours d'eau. C'est ce qu'explique la partie droite du logigramme amenant à la case orange « L'AAC sera prise égale au BV topographique ».

4.3. PHASE 3 : VERIFICATION DE LA COHERENCE DE L'AAC AVEC LE DEBIT PRELEVE

Le tracé des AAC d'eau souterraine est la concordance de deux paramètres : les limites structurales du bassin et la surface nécessaire à son alimentation. La délimitation d'un bassin d'alimentation de captage ne sera validée que si la surface conscrite est considérée comme suffisante pour subvenir à l'alimentation du captage. La superficie obtenue sera donc comparée avec la superficie théorique de l'AAC dont le calcul est présenté ci-dessous.

La superficie S (en m²) d'une AAC peut être approchée à l'aide du calcul du bilan hydrologique annuel. Il s'agit dans un premier temps de déterminer la lame d'eau infiltrée I (l=infiltration efficace en mm) sur la base de l'estimation des précipitations annuelles P (en mm), de l'évapotranspiration ETP (en mm) et du ruissellement R (en mm). La superficie théorique de l'AAC est alors déterminée par le rapport du débit annuel du captage Q_{annuel} (en m³/an) par la lame d'eau infiltrée I (en m/an), soit : S = Qannuel/I.

Par contre, il est important de noter que ce calcul ne tient pas compte :

- des alimentations par infiltration des cours d'eau,
- de la participation par ruissellement des versants imperméables,
- des infiltrations favorisées par les objets de type retenues collinaires, étangs, zones humides, etc.
- des alimentations par participation d'autres BV souterrains.

La superficie ainsi calculée correspond, simplement, à la surface participant à l'alimentation du captage par infiltration directe des précipitations. En conséquence, elle doit être considérée comme une superficie « minimale » d'alimentation dépendant du volume prélevé.

Par ailleurs, certains termes du bilan hydrologique comme la RU_{max} et le % de ruissellement ne sont pas connus avec précision à Mayotte. La superficie obtenue doit donc, de plus, être considérée comme un ordre de grandeur.

5. Application au captage de Mronabéja 2

Extrait du rapport Castillo et al., 2013, BRGM/RP-62825-FR.

Phase 1 : Etude géologique et hydrogéologique du captage et de son bassin versant

Les informations récoltées au cours de cette étape préliminaire à toute délimitation d'AAC sont résumées dans l'Illustration 24.

	Objectif	Tâche à réaliser Données à utiliser (a minima)	Information obtenue
ographique et géologique du captage	tablir le cadre ographique du captage	Carte IGN MNT (altitude, pente,)	Le forage de Mronabéja 2 se situe au sud de Mayotte dans le bassin versant du Mroni Antanana. Le bassin versant du Mroni Antanana se développe sur 3,7 km² depuis le massif du Choungui (594 m NGF) jusqu'aux plaines
	дé Ш		alluviales côtières. Il présente un relief étagé et est <i>a priori</i> essentiellement ruisselant.
	exte géologique du Iydrologique	Carte géologique (lithologie, structure)	une altération intense. 90% de la surface est occupée par des formations superficielles (alluvions, colluvions, altérites sablo-argileuses et dépôts d'écroulements). Les 10% restants correspondent aux massifs phonolitiques du Choungui, du Vatounkaridi et du Mujini Mronabéja.
exte g	e conte assin h	Informations géologiques issues des reconnaissances de terrain	Des basaltes ont été identifiés à l'affleurement dans les cours d'eau ou à proximité.
Conte	Etablir le ba	Données de forages et de sondages (BSS)	Le forage de Mronabéja 2 recoupe des basaltes scoriacés/fissurés sur plus de 40 m, après avoir rencontré des formations superficielles (essentiellement alluviales) sur près de 30 m.
Contexte hydrogéologique du captage	Estimer la ressource en eau souterraine du bassin hydrologique	Bilan hydrologique Pluie, ETP, RU et % ruissellement	La part d'eau participant à la recharge ne devrait pas excéder 14% du module pluviométrique, soit 147 mm/an.
		Inventaires des captages, des sources et des cours d'eau Données BSS, informations issues d'essais de pompage, données d'exploitation (débit prélevé), données hydrométriques (mesurées par les stations et/ou lors des reconnaissances de terrain)	Lorsqu'il n'est pas à sec, le Mroni Antanana présente un débit de quelques l/s en étiage. Quelques sources (débit<3 l/s) ont été recensées en amont du Mroni Antanana entre 100 et 200 m NGM. Elles proviennent a priori des massifs phonolitiques du Choungui et du Vatounkaridi. Les principales venues d'eau observées en forages proviennent de niveaux basaltiques scoriacés et fissurés qui présentent des perméabilités relativement bonnes à l'échelle de Mayotte (de l'ordre de 10 ⁻⁴ m/s). Les débits exploitables ne devraient cependant pas dépasser la petite dizaine de m ³ /h. Le bassin est peu étendu (3,7 km ²), se situe dans un secteur peu arrosé et les aquifères sont probablement compartimentés. En résumé, le potentiel hydrogéologique du bassin est <i>a priori</i> très modeste à l'échelle de Mayotte.

Définir les caractéristiques de l'aquifère capté (lithologie, type, paramètres hydrodynamiques, limites etc.)	Inventaires des venues d'eau à l'avancement Coupe géologique du forage Résultats de pompage d'essai Informations issues des diagnostics menés sur le captage (but : savoir notamment si les propriétés hydrodynamiques issues des essais menés sur le captage sont bien caractéristiques de l'aquifère exploité) Informations issues des campagnes de géophysiques sols et TDEM (structure et résistivité de l'aquifère)	Les principales venues d'eau du captage de Mronabéja ont été observées au sein de niveaux basaltiques scoriacés (entre 28,5 et 33 m) et fissurés (entre 46 et 48 m). Des pompages d'essai ont permis de calculer une transmissivité de l'ordre de 10 ⁻⁴ -10 ⁻³ m/s et un coefficient d'emmagasinement de 1,9.10 ⁻³ (valeurs relativement bonnes dans le contexte de Mayotte). Ils ont également permis d'identifier une limite étanche et une limite alimentée (drainance verticale ou perte directe du Mroni ou de l'un de ses affluents). Le captage de Mronabéja 2 est probablement colmaté de nos jours. Les informations issues des pompages d'essai post-2000 ne sont donc pas représentatives de l'aquifère exploité. Il en est de même pour le débit actuellement exploité, d'autant plus que le captage de Mronabéja n'est utilisé qu'en cas de secours et dans un souci d'entretien de l'ouvrage. L'aquifère exploité présente une structure en paléovallée qui s'étend sur 2,8 km ² du mont Choungui jusqu'à la côte. Sa résistivité est comprise entre 30 et 80 ohm.m. Les limites EW de la paléovallée (également bien identifiée par la géophysique sol) expliquent surement la limite étanche observée lors des pompages d'essai.
Définir les conditions de recharge de la nappe captée	Etude des fluctuations piézométriques (dynamique HE/BE) (informations à croiser avec les données pluviométriques) Etude des relations nappe-rivière (croiser les informations piézométriques avec les données hydrométriques et les informations issues des campagnes hydrogéochimiques)	La nappe exploitée est une nappe captive à cycle annuel. Compte-tenu des informations disponibles (notamment en débit), il est actuellement difficile de conclure quant à une relation nappe-rivière. Elle est supposée au moins localement.

Illustration 24 – Tableau récapitulatif des principales informations récoltées au cours de l'étude géologique et hydrogéologique du captage de Mronabéja 2 et de son bassin versant (Phase 1 de la démarche de délimitation proposée).

Phase 2 : Délimitation de l'AAC

« De la résistivité à la formation »

Définir une échelle de résistivité adaptée au secteur étudié

Le captage de Mronabéja 2 se situe au sud de l'île de Mayotte sur la commune de Kani Kéli. L'échelle de résistivité utilisée pour le secteur sud (cf. Illustration 25) est une échelle logarithmique pour laquelle les formations de résistivité supérieure à 50 ohm.m sont figurées en bleu foncé. L'Illustration 25 présente une partie des données de sondages électromagnétiques acquises dans la partie sud de l'île de Mayotte (commune de Kani Kéli).



Illustration 25 - Données de sondages EM acquises sur le secteur sud de l'île de Mayotte (zoom sur les BV des Mroni Djalimou, Antanana et Bérambo). Les limites des BV sont représentés en blanc.



L'Illustration 26 montre la corrélation entre les coupes géologiques simplifiées des forages de Mronabéja 1 et 2 et les données du sondage TDEM le plus proche (distance de l'ordre de 100 m).



Illustration 26 - Coupes géologiques simplifiées et profils de résistivités EM associés.

Le passage des formations superficielles aux basaltes plus sains est clairement imagé par le TDEM pour le forage Mronabéja 1 (F1), vers 23 m de profondeur. En effet, au-delà des 7 premiers mètres, la résistivité des formations superficielles (basaltes altérés inclus) est globalement inférieure à 8 ohm.m tandis que la résistivité des basaltes sains (observés au-delà de 23 m de profondeur) est globalement de l'ordre de 25 ohm.m. Ce passage est moins clair pour le forage Mronabéja 2 (F2). Au-delà des 12 premiers mètres, la résistivité des formations superficielles (essentiellement alluviales) est également inférieure à 8 ohm.m. Par contre, la résistivité des basaltes sous-jacents n'est pas uniforme contrairement à ce qui est observé pour Mronabéja 1 ; mais, augmente progressivement de 9 à 50 ohm.m avec la profondeur. Dans les deux cas, les formations superficielles sont plus résistantes dans les premiers mètres (jusqu'à 25 ohm.m). Ceci peut surement s'expliquer par des compositions minéralogiques ou des degrés d'altération différents.

Existe-t-il une formation d'une résistivité donnée (ou gamme de résistivité) pouvant correspondre à la formation captée au droit du forage ?

Le passage des formations superficielles aux basaltes plus sains n'étant pas clairement imagé par le TDEM pour le forage Mronabéja 2, une série de coupes passant par le forage et le piézomètre de Mronabéja a été réalisé, afin de déterminer de manière plus certaine la résistivité de la formation captée.

La première coupe réalisée dans l'axe des forages de Mronabéja est donnée Illustration 27. Elle met en évidence plusieurs horizons résistants (résistivités comprises entre 30 et 95 ohm.m) interprétés comme des laves saines et fissurées. Un de ces horizons (R3) a été recoupé par les forages de Mronabéja sur plusieurs mètres. Les formations décrites correspondent à des laves saines, fissurées et aquifères (perméabilités comprises entre 10⁻⁴ et 10⁻³ m/s).



Illustration 27 - Coupe NO-SE passant par le forage de Mronabéja 2.



L'horizon R3 correspond *a priori* à la formation captée (au moins en partie) par les forages de Mronabéja. Il présente des résistivités comprises entre 30 et 80 ohm.m.



D'autres coupes ont été réalisées, ensuite, afin de mettre en évidence la structure et l'extension des horizons résistants observés et notamment de l'horizon aquifère R3. Quatre de ces coupes sont illustrées Illustration 28 et Illustration 29.



Illustration 28 - Quelques coupes TDEM réalisées sur le secteur du Mroni Antanana afin de comprendre la structure et l'extension des formations en présence.

On peut ainsi constater que trois des horizons résistants identifiés préalablement (R2, R3 et R4) présentent une structure de type paléovallée (en forme d'auge ou de fond de bateau). Ces trois paléovallées s'étendent de l'amont (massif du Choungui, massif du Vatounkaridi) vers la côte. Elles sont surmontées par une formation conductrice (résistivités inférieures à 15 ohm.m), mesurant jusqu'à 30 mètres d'épaisseur. Cette formation a été recoupée sur toute sa hauteur par les forages de Mronabéja et correspond aux formations superficielles et aux laves altérées décrites plus haut. Les autres horizons résistants observés (dont R1) correspondent aux laves saines, massives, localement phonolitiques (Choungui, Vatounkaridi et Mujini M'ronabéja) présentes au niveau des sommets.



Illustration 29 - Quelques coupes TDEM réalisées sur le secteur du Mroni Antanana (vue de face).

L'Illustration 30 donne l'extension en 3D de l'objet résistant recoupé par les forages de Mronabéja. Cette figure a été obtenue à l'aide du logiciel de visualisation Paraview® en n'imageant que les structures présentes au-delà de la tranche 0-10 m de profondeur et dont la résistivité est supérieure ou égale à 30 ohm.m. Cette valeur limite de résistivité (30 ohm.m) a été choisie car les objets résistants (dont la paléovallée R3) observés dans le secteur du Mroni Antanana et les BV adjacents (Mroni Djalimou et Bérambo) et interprétés comme des laves saines présentent, dans l'ensemble, des résistivités supérieures ou égales à 30 ohm.m. Les formations résistantes observées dans la tranche de profondeur 0 et 10 m ne sont pas imagées car elles correspondent a priori à des formations très altérées et/ou très argileuses (cf. le contexte géologique du bassin résumé Illustration 24).



Illustration 30 - Représentation en 3D de l'extension de l'objet résistant recoupé par les forages de Mronabéja. L'échelle verticale est exagérée (x2 l'échelle horizontale).L'échelle de résistivité est celle utilisée pour tout le secteur sud de l'île et définie plus haut.

L'Illustration 31 image ces mêmes structures résistantes (résistivités supérieures ou égales à 30 ohm.m) en fonction de l'altitude. Les structures figurées en bleu se situent sous le niveau marin.



Illustration 31 - Représentation en 3D et en fonction de l'altitude de l'extension de l'objet résistant recoupé par les forages de Mronabéja. L'échelle verticale est exagérée (x2 l'échelle horizontale). Les structures figurées en bleu se situent sous le niveau marin.

L'Illustration 32 donne l'extension en surface de la paléovallée R3 sur un fond IGN.



Illustration 32 - Localisation de la paléovallée R3 sur fond cartographique IGN.

On peut ainsi clairement constater que la paléovallée R3 s'étend sur près de 2,8 km² depuis le village de Choungui à environ 250 mètres d'altitude (jaune orangé) jusqu'à la côte où elle occupe la totalité du débouché littoral du Mroni Antanana et se trouve sous le niveau marin (bleu). Elle s'étend ainsi sur deux bassins versants de surface : le BV du Mroni Antanana (largement étudié ici) et le BV du Mroni Djalimou (à l'Ouest). En outre, cette paléovallée se distingue des paléovallées adjacentes R2 et R4 de par la présence de formations conductrices

probablement plus altérées et moins perméables³. Ceci est nettement visible sur la coupe SE1 (Illustration 27).

Au niveau du forage de Mronabéja 2, la paléovallée R3 fait jusqu'à 150 mètres d'épaisseur et 850 mètres de large. Sa plus grande longueur avoisinerait les 2 km.

« De la formation à la PNAC »

Délimiter la Portion de Nappe Alimentant le Captage (PNAC)

Le secteur du Mroni Antanana compte trois principaux comblements de paléovallées. Les paléovallées sont, *a priori*, des axes d'écoulement préférentiels à Mayotte. Il est ainsi convenu que la direction et le sens des écoulements souterrains sont contrôlés sur le secteur étudié par la géométrie des paléovallées en présence, depuis les reliefs vers les points bas. Ce schéma d'écoulement général « dans le sens des plus grandes pentes » n'est pas remis en cause ici car il manque encore des éléments de connaissance permettant d'envisager des écoulements selon des directions différentes.

La continuité des niveaux piézométriques n'est pas certaine le long des coulées en paléovallée. Comme précisé précédemment, celle-ci peut d'ailleurs être remise en cause en raison de la forte hétérogénéité spatiale, probable, des formations volcaniques en présence (lithologie, fracturation, altération, structuration interne, etc.). Toutefois, ne disposant pas d'informations permettant d'infirmer l'hypothèse, la continuité hydraulique est supposée le long des paléovallées identifiées.

Les écoulements souterrains en jeu au sein de la paléovallée R3 seraient ainsi essentiellement orientés NNE-SSW du Mont Choungui à la bande d'altitude 150-250 m NGF située au pied du Mont Choungui, puis NNW-SSE jusqu'au village de Mronabéja et ses forages. Cette direction d'écoulement concorde avec celle des eaux de surface (cf. orientation des affluents rive droite du Mroni Antanana situé au droit de la coulée R3, Illustration 33).

³ Cette considération est appuyée par les observations hydrogéologiques menées sur le forage Mronabéja 2 qui font état d'une limite étanche (§ 3.5. du rapport Mronabéja 2).



Illustration 33 - Localisation des cours d'eau du bassin du Mroni Antanana et extension de la paléovallée R3.

Par ailleurs, la paléovallée R3 est supposée hydrauliquement indépendante de ces voisines ; notamment en raison des observations hydrogéologiques menées sur le forage Mronabéja 2 qui font état de la présence d'une limite étanche.

L'Illustration 34 donne la projection en surface de la PNAC de Mronabéja 2 suite aux considérations précédentes (écoulement dans le sens des plus grandes pentes et continuité hydraulique).



Illustration 34 - Projection en surface de la portion de nappe alimentant le captage de Mronabéja 2.

La limite aval de la PNAC de Mronabéja a été définie à l'aide du calcul du rayon d'influence du forage de Mronabéja. Ce calcul est détaillé dans le précédent rapport de délimitation de l'AAC de Mronabéja (BRGM/RP-57623-FR). Le lecteur pourra s'y référer pour plus de détails.

« De la PNAC à l'AAC »

90% de la surface du secteur du Mroni Antanana est occupée par des formations superficielles La paléovallée R3 est ainsi surmontée d'une épaisse couche de formations superficielles (jusqu'à 30 mètres localement) sur la quasi-totalité de sa superficie (cf. coupes AAC1, AAC2 et SE1, Illustration 27 à Illustration 29). Néanmoins, au regard de la nature plutôt sablo-argileuse de ces formations et des observations hydrogéologiques menées sur le forage Mronabéja 2 (cf. § 3.5 du rapport de Mronabéja 2 – phénomène de drainance verticale suspecté), il est convenu qu'elles participent à l'alimentation de la nappe. <u>L'AAC est donc *a minima* égale à la projection en surface de la PNAC</u> (Illustration 34).

Par ailleurs, compte tenu de nos connaissances actuelles sur les échanges nappe-rivière (cf. § 3.7 et § 4.1.1. du rapport Mronabéja 2)⁴, la participation des eaux de surface dans l'alimentation de la nappe captée par le forage Mronabéja 2, par infiltration dans le lit des cours d'eau, ne peut pas être exclue, notamment lorsqu'elles circulent directement au droit de la paléovallée supposée aquifère (cas des affluents rive-droite et du débouché littoral du Mroni Antanana, Illustration 33). De ce fait, la <u>délimitation retenue</u> pour l'AAC du forage de Mronabéja 2 <u>est le résultat de la combinaison entre la projection en surface de la portion de nappe alimentant a priori ce forage (Illustration 34) et son BV hydrologique.</u>

L'Illustration 35 présente la délimitation proposée pour l'AAC de Mronabéja 2. L'Illustration 36 offre une comparaison entre cette proposition de délimitation et la surface retenue lors de la précédente étude de délimitation d'AAC sur le secteur du Mroni Antanana (BRGM/RP-57623-FR).

⁴ Rappelons ici que les données de débits de rivière disponibles à Mayotte sont incomplètes (pas de temps de mesure trop important, débit de crue non mesuré et prélèvements/rejets non inventoriés).



Illustration 35 - Aire d'alimentation proposée pour le captage de Mronabéja 2.



Illustration 36 - Aire d'alimentation du captage de Mronabéja 2 - Comparaison entre le tracé retenu en 2009 et celui proposé suite à cette étude.

Ainsi délimité, l'AAC de Mronabéja présente une surface d'environ 4,2 km². Ses limites débutent 50 m en aval du forage dans le lit du Mroni Antanana. Elles remontent vers l'est en direction du Mujini Mronabéja, où elles épousent les limites du BV de surface du Mroni Antanana pour atteindre le Mont Choungui. Vers l'ouest, elles remontent en direction du village de Choungui puis du Mlima Choungui en suivant la projection en surface de la PNAC. L'AAC ainsi délimitée présente une surface 1,18 fois plus grande que la superficie retenue lors du précédent travail de délimitation (BRGM/RP-57623-FR) mené sans les données TDEM en autres. Pour rappel,

l'AAC retenue en 2009 a été définie en suivant les contours du BV de surface du captage de Mronabéja. Elle est donc incluse dans la nouvelle délimitation proposée (Illustration 36)

Phase 3 : Vérification de la cohérence de l'AAC avec le débit prélevé

La superficie de l'AAC ainsi délimitée (d'environ 4,2 km²) est cohérente avec les estimations faites par le calcul du bilan hydrologique (de 1,33 km² pour une RU de 50 mm et de 1,66 km² pour une RU de 100 mm). Rappelons que la superficie théorique ainsi calculée correspond simplement à la surface participant à l'alimentation directe du captage par infiltration directe des précipitations, soit à la projection en surface de la PNAC. Pour information la projection en surface de la PNAC de Mronabéja 2 est de 1,8 km², ce qui correspond bien à ces estimations théoriques.

6. Application au captage de Gouloué F3

Extrait du rapport Jaouën et al., 2013, BRGM/RP-62826-FR.

Phase 1 : Etude géologique et hydrogéologique du captage et de son bassin versant

Les informations récoltées au cours de cette étape préliminaire à toute délimitation d'AAC sont résumées dans le tableau suivant.

	Objectif	Tâche à réaliser Données à utiliser (<i>a minima</i>)	Information obtenue
	e aptage		Le forage de Gouloué F3 se situe au Nord-Est de Mayotte, sur les contreforts du massif du Mtsapéré, dans le bassin versant de la Gouloué.
Contexte géographique et géologique du captage	Etablir le cadr géographique du ca	Carte IGN MNT (altitude, pente,)	La surface du bassin versant de la Gouloué avoisine 7,1 km ² depuis le massif du Mtsapéré (572 m NGM) jusqu'à la mer. Le bassin versant de la Gouloué est le plus méridional d'une série de quatre bassins versants allongés selon une direction NW-SE, séparés par des crêtes étroites et incisant la pente externe du massif du Mtsapéré. Les coteaux sont fortement pentés
	Etablir le contexte géologique du bassin hydrologique	Carte géologique (lithologie, structure)	La base du Mtsapéré est composée d'une succession de basalte à olivine et pyroxène ou subaphyrique au sein desquels s'intercalent des niveaux scoriacés et des volcanoclastites (des cinérites aux tuffs à lapilis).
			Les vallées incisant ce substratum décrit ont été comblées par une phase d'activité plus récente du Mtsapéré caractérisée par l'émission de formations laviques plus différenciées (basaltes ankaramitiques, présence d'amphiboles). En position sommitale sur le massif du Mtsapéré, d'épaisses coulées ou dômes- coulées de phonolites arment les reliefs (par exemple : carrière de Chaouéni). Ces laves massives sont inter-stratifiées de cinérites.
			Bien que le massif du Mtsapéré soit l'un des plus récents de l'île (< 2 Ma), des altérites masquent la roche saine à l'exception des à-pics et des fonds de vallées.
		Informations géologiques issues des reconnaissances de terrain	La succession géologique de la carte géologique (cf. ci-dessus) a été confirmée par les observations de terrain.
		Données de forages et de sondages (BSS)	Le forage de Gouloué F3 recoupe des basaltes massifs sur 45 m, puis des basaltes vacuolaires sur 11 m, puis une alternance de laves et de pyroclastites jusqu'à 90 m et des formations détritiques jusqu'à 110 m.
			La même succession lithologique a été observée pour les forages de Gouloué 1 & 2 sans toutefois atteindre les formations volcano- détritiques situées sous la cote -70 m NGM.
Contexte hydrogéologique du cantade	Estimer la ressource en eau souterraine du bassin hydrologique	Bilan hydrologique Pluie, ETP, RU et % ruissellement	La part d'eau participant à la recharge ne devrait pas excéder 11% du module pluviométrique, soit 155 mm/an. PNAC estimée à 2,28 km².
		Inventaires des captages, des sources et des cours d'eau Données BSS, informations issues d'essais de pompage, données	En plus du forage de Gouloué F3 (12307X0568), objet de cette étude, deux autres forages AEP et une prise d'eau en rivière sont

	d'exploitation (débit prélevé), données hydrométriques (mesurées par les stations et/ou lors des reconnaissances de terrain)	présents dans cette vallée : Gouloué 1 (12307X0045) foré en 2002 qui sera prochainement mis en exploitation à un débit de 11 m ³ /h ; Gouloué 2 (12307X0053) foré en 2003 qui sera aussi mis en exploitation prochainement à un débit de 21 m ³ /h ; la prise d'eau de surface de Gouloué amont (12307X0143) dont les prélèvements annuels s'élèvent à 300 000 ⁵ m ³ .
Définir les caractéristiques de l'aquifère capté (lithologie, type, paramètres hydrodynamiques, limites etc.)	Inventaires des venues d'eau à l'avancement Coupe géologique du forage Résultats d'essais de pompage Informations issues des diagnostics menés sur le captage (but : savoir notamment si les propriétés hydrodynamiques issues des essais menés sur le captage sont bien caractéristiques de l'aquifère exploité) Informations issues des campagnes de géophysiques sols et TDEM (structure et résistivité de l'aquifère)	 Les forages de Gouloué 1, 2 et F3 recoupent les formations laviques et volcanoclastiques formant les unités de base du Mtsapéré (2,59 à 1,78 Ma). Les venues d'eau captées se situent au sein d'horizons laviques, scoriacés ou vacuolaires, localisés au niveau des intercoulées. Sur les trois forages, l'aquifère recoupé est captif : sous 30 mètres d'altérites pour les forages de Gouloué 1 et F3 et sous une 50^{aine} de mètres de lave saine à olivine et pyroxène pour le forage de Gouloué 2. Les transmissivités obtenues à la suite des essais longue durée (72h) sur chacun de ces forages sont comprises entre 1.10⁻⁴ et 2,3.10⁻⁴ m²/s. Ces essais ont également mis en avant une continuité hydraulique entre Gouloué 1 et Gouloué 2. Il existe bien une corrélation entre la géologie et les données géophysiques TDEM et une interprétation cohérente avec l'évolution volcanostructurale de l'île est possible. Cependant, il est difficile d'isoler la formation identifiée comme productive.
Définir les conditions de recharge de la nappe captée	Etude des fluctuations piézométriques (dynamique HE/BE) (informations à croiser avec les données pluviométriques) Etude des relations nappe-rivière (croiser les informations piézométriques avec les données hydrométriques et les informations issues des campagnes hydrogéochimiques)	La nappe exploitée est une nappe captive à cycle annuel. Il est actuellement difficile de conclure quant à relation nappe-rivière

⁵ Aucun compteur volumétrique n'est installé sur cette prise d'eau. Cette estimation correspond à 35% de la somme des volumes prélevés par les captages de surface Kwalé Haut et Bas et de Gouloué enregistrés à la station de Mamoudzou. Estimation fournie par la SOGEA, le 9 juillet 2013.

Phase 2 : Délimitation de l'AAC

« De la résistivité à la formation »

Définir une échelle de résistivité adaptée au secteur étudié

Le forage de Gouloué F3 se situe au Nord-Est de l'île de Mayotte, sur les flancs du massif du Mtsapéré, dans la commune de Mamoudzou. L'échelle de résistivité utilisée pour ce secteur (cf. Illustration 37) est une échelle logarithmique pour laquelle les formations de résistivité supérieure à 100 ohm.m sont figurées en bleu foncé. Afin d'imager au mieux les formations argilisées et les intrusions salines, la borne inférieure de cette échelle a été prise à 1 ohm.m



Illustration 37 - Données de sondages TDEM acquises sur le secteur Nord-Est de l'île de Mayotte (du Nord au Sud, zoom sur les BV de la Kawénilajolie, de la Majimbini, de la Doujani et de la Gouloué). Les limites des BV sont représentés en bleu.



L'Annexe 1 (cf. Illustration 44, Illustration 45 et

Illustration 46) montre la corrélation entre les coupes géologiques simplifiées des forages de Gouloué 1, 2 et F3 et les données du sondage TDEM le plus proche (distance inférieure 24 m). La même succession lithologique est globalement observée dans les trois forages ce qui a permis la constitution d'un log volcanostratigraphique (cf. Illustration 38) pour le secteur de Gouloué. Celui-ci a été complété par le croisement des données géologiques (carte géologique, géomorphologie) et les données géophysiques TDEM. L'ossature du massif du Mtsapéré apparaît très homogène, sans discontinuité majeure visible.

Formations	Résistivité (ohm.m)	Caractéristiques hydrauliques
Allotérites	> 30*	Bonne perméabilité d'interstice et faiblement capacitif (faible teneur en argile minéralogique)
Altérites	10-12 à 50*	Perméabilité d'interstice variable et capacitif dépendant de la teneur en argile minéralogique variable
Phonolites	100 à 200	Inconnues
Laves massives saines	50 à 120	Perméabilité de fissure hétérogène accompagnée d'une porosité d'interstice variable en fonction de la proportion de vacuoles ou de scories
Alternances laves / volcanoclastites	10-12 à 50	Perméabilité de fissure hétérogène accompagnée d'une porosité d'interstice variable
Alluvions anciennes	< 10-12	Perméabilité d'interstice variable en fonction de la granulométrie des dépôts (argiles, limons, sables, graviers ou blocs).

(*) très variable en fonction de la roche mère

Illustration 38 - Log volcanostratigraphique et résistivités des formations pour le secteur de Gouloué ; en grisé : formations recoupées par les forages de Gouloué ; en blanc : les formations interprétées par la géologie et la géomorphologie.




Illustration 40 - Vue 3D des coupes TDEM transversales et longitudinales passant par le forage de Gouloué F3.

Existe-t-il une formation d'une résistivité donnée (ou gamme de résistivité) pouvant correspondre à la formation captée au droit du forage ?

Les formations productives recoupées en forage montrent des gammes de résistivité allant de 10 à 120 ohm.m. Cette gamme de résistivité est beaucoup trop étendue pour pouvoir y identifier des géométries particulières (cf. Illustration 41).



Illustration 41 - Vue du secteur de Gouloué pour une résistivité comprise entre 12 et 120 ohm.m et une profondeur d'investigation de 10 à 200 mètres.

En ciblant plus particulièrement des intervalles de résistivités plus restreints, il apparaît que les contrastes de résistivités sont faibles et les variations continues.

L'Illustration 42 permet de visualiser les formations de résistivité comprise entre 70 et 100 ohm.m pour des profondeurs d'investigation de 10 à 200 mètres. Elle permet de mettre en évidence une apparente discontinuité géo-électrique entre les forages de Gouloué 1, 2 et F3 alors que ceux-ci recoupent la même formation géologique. A l'inverse, elle met en avant une continuité géo-électrique entre les formations recoupées par le forage F3 avec les formations armant les crêtes Nord et Sud du bassin versant.



Illustration 42 - Vue du secteur de Gouloué pour une résistivité comprise entre 70 et 100 ohm.m et une profondeur d'investigation de 10 à 200 mètres.

Il existe bien une corrélation entre la géologie et les données géophysiques TDEM et une interprétation cohérente avec l'évolution volcanostructurale de l'île est possible. Cependant, il est difficile d'isoler la formation identifiée comme productive. Si le mur de celle-ci est bien délimité par une entité très résistante (formations volcano-détritiques anciennes sur l'Illustration 39), les contacts avec les formations adjacentes et sus-jacentes ne sont pas marqués en géophysique TDEM. Cela est cohérent avec la construction progressive du massif du Mtsapéré depuis 1,8 Ma au sein duquel seules de petites paléosurfaces marquées par des dépôts volcanoclastiques ou des profils d'altération ont été identifiées. Les hétérogénéités observées à l'échelle de l'affleurement ne se traduisent pas par des structures géo-électriques de grande amplitude. De plus, les propriétés hydrodynamiques de ces hétérogénéités lithologiques sont fluctuantes en fonction de la nature du matériau, de son degré d'altération, de la géométrie, etc.

Existe-t-il des données hydrogéologiques supplémentaires ?

Il n'existe aucune donnée hydrogéologique permettant de préciser les relations nappe-rivière ou les modalités d'écoulement et de recharge de la nappe.

« De la PNAC à l'AAC »

L'AAC sera prise égale au <u>BV topographique</u>

En soi, l'homogénéité globale du massif du Mtsapéré tend à considérer les caractéristiques hydrogéologiques du secteur de Gouloué comme homogènes. En d'autres termes, cela revient à considérer que :

- tout le secteur d'étude est constitué d'un ensemble multicouche de petits aquifères compartimentés séparés par des épontes moins perméables (paléosol, volcanoclastites, laves massives...);
- les écoulements suivent l'orientation générale de la pente, elle-même très proche de l'orientation structurale du massif du Mtsapéré ;
- les rivières, incisant la topographie actuelle, drainent en partie les écoulements souterrains sans toutefois que des échanges nappe-rivière ne soient avérés ;
- les aquifères s'écoulent en partie vers la mer ;
- les crêtes topographiques constituent également des crêtes piézométriques.

L'aire d'alimentation du captage de Gouloué F3 (12307X0568) sera donc délimitée selon la même logique que les aires d'alimentation des forages de Gouloué 1 & 2 (Malard *et al.*, 2009, BRGM/RP-57109-FR), en se basant sur le bassin versant topographique. Cette approche paraît être la plus sécuritaire et la plus simple tout en restant pertinente compte tenu des données disponibles. La limite aval sera contrainte par le contact entre les formations anciennes altérées et les formations aquifères recoupées par le forage (cf. Illustration 39). En effet, ces formations anciennes n'étant pas affectées par l'intrusion saline, celles-ci sont supposées peu transmissives. L'aire d'alimentation du forage de Gouloué F3 (12307X0568) représente une surface de 5,97 km² pour un périmètre de 13,25 km² (cf. Illustration 43). La PNAC est estimée à 2,28 km².



Illustration 43 – Délimitation de l'aire d'alimentation du captage de Gouloué F3 (12307X0568).

7. Conclusion et perspectives

Les données acquises depuis 2009 sont un atout certain pour la compréhension des hydrosystèmes mahorais. En comparaison avec la situation anté-2009, l'infrastructure géologique de l'île et son évolution volcanostructurale sont beaucoup mieux appréhendées. Cette donnée est fondamentale pour l'élaboration de modèles hydrogéologiques conceptuels permettant d'expliquer le fonctionnement des hydrosystèmes : contexte d'émergence, réseau hydrographique, répartition de la ressource en eau souterraine, etc. L'intérêt de ces données et des exemples de leur utilisation ont également été compilées dans ce rapport.

L'expérience a montré que la simplicité de mise en œuvre des données TDEM n'impose que quelques précautions et limites à leur utilisation. Les résultats jusqu'à présent obtenus encouragent l'utilisation de ce jeu de données qui pourra bénéficier d'améliorations à l'avenir (inversion 2D le long de lignes de vols, par exemple) voire être complété par des mesures géophysiques complémentaires (RMP). Les récents résultats de la 5^{ème} campagne de forages montrent également de très bons résultats pour une utilisation prédictive de ces données (taux de réussite des forages de 75% en août 2013).

La méthodologie de délimitation des aires d'alimentation des captages d'eau souterraine de Mayotte a ainsi pu être enrichie d'approches complémentaires. Afin de faciliter la mise en œuvre de cette méthodologie, un arbre de décision reprenant le cheminement à suivre est proposé et explicité sur deux exemples concrets : les forages de Mronabéja 2 (12316X0032) et de Gouloué F3 (12307X0568).

Néanmoins, l'utilisation de ces nouveaux jeux de données est également limitée par l'hétérogénéité des formations volcaniques susceptibles de présenter une grande homogénéité à l'échelle du massif mais des variations latérales rapides à l'échelle de l'affleurement. Cet effet d'échelle est d'autant plus difficile à appréhender qu'elle affecte directement les propriétés hydrauliques du sous-sol : présence d'inter-coulées peu perméables, de paléosols/niveau altéré, de dépôts de volcanoclastites, etc. Enfin, ces propriétés hydrauliques du sous-sol ne sont pas retranscrites ni via la carte géologique ni via les données TDEM. Par exemple, le degré d'altération ou de zéolitisation d'un corps lavique peut engendrer de fortes variabilités de ses propriétés mécaniques et hydrauliques.

C'est pourquoi, afin d'améliorer la connaissance de la structure du sous-sol et de ses propriétés, les campagnes de forage de reconnaissance pour la recherche et l'exploitation des eaux souterraines doivent être maintenues et identifiées comme une perspective d'amélioration.

Une autre perspective d'amélioration concerne l'établissement d'un bilan hydrologique robuste et spatialisé qui permettrait de mieux appréhender la répartition des écoulements entre le milieu superficiel (ruissellement et évapotranspiration) et le milieu souterrain. L'acquisition de données hydrométriques et météorologiques précises (ETP et pluviométrie), à un pas de temps suffisamment resserré pour prendre en compte les évènements ponctuels et intégrant de longues périodes doit être un objectif à long terme. Les formations superficielles, contrôlant *pro parte* l'infiltration et la captivité des aquifères, sont à présent cartographiées de manière homogène sur l'intégralité du territoire. La caractérisation des propriétés hydrauliques de ces formations pourraient compléter cette approche.

Enfin, l'absence de données complémentaires d'hydrogéochimie, de datation, etc. pourraient être palliée à l'avenir par les travaux de thèse en cours (R.-A. Puyraveau, 2012-2014, BRGM-CEREGE). A ce sujet, il est intéressant de noter la publication par le BRGM en 2011 d'un guide

sur l'utilisation des outils isotopiques dans le cadre d'une délimitation d'AAC (Gourcy et Giraud-Petelet, 2011, BRGM/RP-59729-FR).

8. Bibliographie

Bussard T. (2005) – Méthodologie de dimensionnement des zones de protection des captages d'eaux souterraines contre les polluants chimiques persistants. Thèse de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. 162 p.

Castany G., Margat J. (1977) – Dictionnaire français d'hydrogéologie. Editions du BRGM, 248 p.

Castillo C. avec la collaboration de Jaouën T., Vernoux J.F., Vittecoq B et Deparis J. (2013) – Mise à jour de la délimitation de l'aire d'alimentation du captage de Mronabéja 2 (1231-6X-0032/MRONAB). Rapport final BRGM/RP-62825-FR, 71 p., 40 fig., 6 tabl., 4 ann.

Chouteau M., et Giroux B. (2005) - Méthodes électromagnétiques – notes de cours, École Polytechnique de Montréal.

Debeuf D. (2004) - Étude de l'évolution volcano-structurale et magmatique de Mayotte (Archipel des Comores, Océan Indien) - Thèse de 3ème cycle de l'Université de la Réunion, 277 p.

Gourcy L., Giraud-Petelet E. (2011) – Utilisation des outils isotopiques pour la délimitation des aires d'alimentation des captages destinés à l'alimentation en eau potable. Rapport BRGM/RP-59729-FR, 69 p., 22 ill.

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.

Jaouën T., Vittecoq B., Lions J., Castillo C., Deparis J., Baltassat JM., François B., Pinson S., Gourcy L., Winckel A. et Allier D. (2012) - Caractérisation hydrogéologique du potentiel en eau souterraine de Mayotte – Secteurs Nord-Ouest. Rapport final BRGM/RP-59550-FR. 424 p., 258 ill., 7 ann.

Jaouën T., Vittecoq B., Castillo C., Deparis J., Lions J. avec la collaboration de Gourcy L., Allier D. et Pinson S. (2013) - Caractérisation hydrogéologique du potentiel en eau souterraine de Mayotte – Secteurs Centre et Sud. Rapport final BRGM/RP-61757-FR.

Jaouën T. avec la collaboration de Castillo C (2013) – Délimitation de l'aire d'alimentation du captage de Gouloué F3 (12307X0568). Rapport final. BRGM/RP-62826-FR, 48 p., 38 ill., 3 ann.

Lachassagne P., Cruchet M., Daesslé M., Lebon D. (2000) - Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte. Campagne prioritaire d'études et de forages de reconnaissance / d'exploitation (juin 1999 - octobre 2000). Compte-rendu des travaux et principaux résultats géologiques et hydrogéologiques. Rapport BRGM/RP-50428-FR - 2000 SGR/MAY 33, 20 p., 2 fig., 4 tabl., 14 ann.

Lacquement F., Nehlig P., Bernard J. (2013) – Carte géologique de Mayotte à 1/30 000, BRGM/RP-61803-FR.

Lapègue, J. (1999) - Aspects quantitatifs et qualitatifs de la pluviométrie dans deux enjeux majeurs de la problématique de l'eau à Mayotte : la ressource hydrique et l'assainissement

pluvial et l'érosion. Thèse de Doctorat. Laboratoire des Sciences de la Terre. Université de la Réunion.

Malard A. avec la collaboration de **B. Aunay, J.F. Vernoux** et **V. Mardhel** (2009) – Définition d'une méthodologie commune aux études des bassins d'alimentation de captages à Mayotte. Principes de délimitation des bassins et de caractérisation de la vulnérabilité des captages – BRGM/RP-57299-FR, 146 p., 34 ill., 12 tab., 5 eq, 6 ann.

Malard A. avec la collaboration de Brugeron A., Mougin B., et Wuilleumier A. (2009) - Etude du bassin d'alimentation du forage de Mronabéja 2 (12316X0032/MRONAB) - bassin versant du Mroni Antanana – Mayotte – BRGM/RP-57623-FR. 76 p., 20 ill., 10 tab., 2 ann.

Malard A. avec la collaboration de **B. Aunay, J.F. Vernoux et V. Mardhel** (2009) - Etude des bassins d'alimentation des 3 captages du bassin versant du Mro Oua Gouloué – Mayotte (délimitation, vulnérabilité, pressions) – BRGM/RP-57109-FR, 94 p., 19 ill., 10 tab., 4 ann.

Nehlig P., Lacquement F., Bernard J., Caroff M., Deparis J., Jaouen T., Pelleter A.-A., Perrin J., Prognon C., Vittecoq B. (2013) – Notice de la carte géologique de Mayotte, BRGM/RP-61803-FR, 135 p., 45 ill., 1 ann.

Reynolds J.M., 1997, An introduction to applied and environmental geophysics. Wiley.

Sørensen K.I., Auken E., Thomsen P. (2000) - TDEM in groundwater mapping – a continuous approach, Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, Environmental and Engineering Geophysical Society, Proceeding.

Stieltjes L, Cantagrel J.M, Nougier J., Vatin-Perignon N., Watelet P. (1988) - Carte géologique de Mayotte (Archipel des Comores). Echelle : 1/50 000, Collectivité Départementale de Mayotte. Editions du BRGM.

Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R. E. 1990. Applied geophysics. Cambridge University Press.

Vernoux J.F., Wuilleumier A., Dörfliger N. (2007) - Délimitation des bassins d'alimentation des captages et de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses. Guide méthodologique, rapport BRGM/RP-55874-FR, 75 pages, 14 illustrations.

Annexe 1

Comparaison des coupes géologiques des forages de Gouloué et des sondages TDEM les plus proches



Illustration 44 - Comparaison de la coupe géologique du forage de Gouloué 1 (12307X0045) et du sondage TDEM le plus proche.



Illustration 45 - Comparaison de la coupe géologique du forage de Gouloué 2 (12307X0054) et du sondage TDEM le plus proche.



Illustration 46 - Comparaison de la coupe géologique du forage de Gouloué F3 (12307X0568) et du sondage TDEM le plus proche.



Centre scientifique et technique 3, avenue Claude-Guillemin BP 36009 45060 – Orléans Cedex 2 – France Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr Direction Régionale de Mayotte 9, centre Amatoula B.P. 363 – Z.I. Kawéni 97600 – Mamoudzou – France Tél. : 02 69 61 28 13