



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès immédiat

Caractérisation de l'intrusion saline aux droits de zones dites « sensibles » sur le territoire de Mayotte

Rapport final

BRGM/RP-72035-FR

Version initiale du 13 avril 2023

Étude réalisée dans le cadre des projets de recherche
Urban Stephan, L'hotelier Anaïs, Castillo Christelle, Gal Frédéric, Baltassat Jean-Michel, Raingeard Anne

Vérificateur :

Nom : Bertrand Aunay

Fonction : Chef de projet

Date : 29/07/2022

Signature :

Approbateur :

Nom : Caroline Prognon

Fonction : Directeur régional
DAT/OMR/MAY/MDZ

Date :

Signature :

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

Contact : qualite@brgm.fr



Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu.

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur et/ou les termes de la convention.

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMqFcU6Ctg> ou par ce code :



Mots clés : Aquifères volcaniques, intrusion saline, captages sensibles, eaux souterraines, géologie, géophysique, hydrogéologie, géochimie, Bandrélé, Mronabéja-Mbouini, Mréréni-Chirongui, Mtsangamouji, Mohogoni, Méresse, Bouyouni, Kawéni, Mayotte.

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

Urban Stephan, L'hotelier Anaïs, Castillo Christelle, Gal Frédéric, Baltassat Jean-Michel, Raingard Anne (2023) – Caractérisation de l'intrusion saline aux droits de zones dites « sensibles » sur le territoire de Mayotte. Rapport final Vinitiale. BRGM/RP-72035-FR, 218 p.

© BRGM, 2023, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
IM003-MT008-P2-20/01/2022

Synthèse

Suite à la crise sécheresse ayant touché l'île de Mayotte fin 2016 - début 2017, un plan d'urgence Eau-Mayotte a été élaboré. Il a été mené par la Préfecture et par l'ensemble des acteurs du bassin. Un travail sur le potentiel d'exploitation de la ressource en eau souterraine et l'optimisation des forages existants a ainsi été réalisé par le BRGM, les Eaux de Mayotte (ex SIEAM puis SMEAM), la SMAE et la DEAL aboutissant à la mise en évidence que les débits de certains (5) forages pourraient être augmentés (BRGM/RP-66317-FR), soulageant la tension sur l'approvisionnement en eau potable à court terme.

Un point de vigilance a toutefois été émis sur le risque d'intrusion saline au droit des forages de Kawéni Lajolie et Bouyouni au vu de leur position géographique à proximité du littoral et des données historiques de suivi de la conductivité électrique. En effet, la DEAL a alerté depuis plusieurs années les acteurs du bassin sur la potentielle contamination irréversible de la ressource en eau par des intrusions salines liée à une surexploitation de ces ouvrages.

Ainsi, afin d'augmenter les débits d'exploitation de ces forages, tout en maîtrisant la potentielle dégradation de la ressource en eau souterraine, la DEAL et le SIEAM, ont sollicité le BRGM pour réaliser une étude sur le risque d'intrusion saline au droit des forages AEP de Kawéni Lajolie et Bouyouni, en priorité car les plus sensibles. Six autres secteurs présentant des risques potentiels d'intrusion saline et nécessitant une acquisition de connaissances sont également concernés par la présente étude : Méresse, Mohogoni, Mtsangamouji, Mréréni - Chirongui, Mronabéja / Mbouini et Bandrélé.

Sur les 8 zones dites « sensibles » à l'intrusion saline, plusieurs méthodes complémentaires ont été menées, notamment au cours d'une campagne d'acquisition de données de terrain qui s'est tenue en octobre 2021 :

- Diagrapie physico-chimique dans les ouvrages non exploités ou piézomètres ;
- Analyses chimique et isotopique ;
- Retraitement des données géophysiques aéroportées ;
- Acquisition de nouvelles tomographies de résistivité au sol.

Les mesures et analyses physico-chimiques et isotopiques n'ont pas montré d'indice d'intrusion saline au droit des forages échantillonnés et/ou des piézomètres situés à proximité lorsque cela était possible. Les interprétations réalisées se basent donc principalement sur les données géophysiques, et plus particulièrement sur les données AEM aéroportées retraitées, car elles identifient assez clairement l'approfondissement de conducteurs depuis la mer vers les terres (interprétés comme des intrusions salines).

En conséquence des recommandations pour la surveillance ont été émises. Elles se déclinent en trois types d'action :

- Un renforcement du suivi géochimique au droit des ouvrages exploités et si possible des ouvrages existants à proximité (conductivité électrique de l'eau, teneurs en sodium et sulfates) ;
- La création d'ouvrage de surveillance en aval hydraulique de celui ou ceux exploités dans la zone lorsque les informations disponibles et les données interprétées permettent de localiser certains secteurs à risques ;
- Un suivi géochimique durant la foration et des pompages d'essais pour les futurs ouvrages de captage d'eau prévu par la 6ème campagne (FZ1, FZ2, FZ6 et FZ7).

Seul le premier type d'action est prévu pour les 8 zones sensibles. Le détail des recommandations est donné dans les sous-chapitres "Conclusion et recommandations" de chaque zone et est repris de manière synthétique dans le Tableau 14 en conclusion (chapitre 5)

Enfin, il est nécessaire de rappeler que des phénomènes de salinisation peuvent se produire, sans qu'il n'ait été possible de les anticiper dans la présente étude, notamment du fait de la complexité hydrogéologique des aquifères exploités. Ainsi, la présente étude propose un niveau minimum de vigilance qui doit s'accompagner d'une exploitation raisonnée¹ des captages.

¹ Une exploitation raisonnée est une manière d'exploiter la ressource en eau souterraine afin d'optimiser la quantité extraite sans qu'il y ait risques d'impact négatif (entrée d'intrusion saline, mise en péril de l'ouvrage, sur exploitation de la capacité de l'aquifère)

Sommaire

1. Introduction	15
1.1. Contexte de la ressource en eau potable à Mayotte.....	15
1.2. L'intrusion saline en contexte insulaire	16
1.3. Objectifs et moyens de la présente étude.....	17
2. Mayotte : généralités	19
2.1. Géologie.....	19
2.2. Climat.....	24
2.3. Hydrographie.....	26
2.4. Hydrogéologie.....	26
2.4.1. <i>Modèle conceptuel de Mayotte</i>	26
2.4.2. <i>Les types d'aquifères à Mayotte</i>	27
3. Présentation de l'approche pluridisciplinaire et méthodologie.....	31
3.1. Choix des sites de la présente étude.....	31
3.2. Consistance des investigations	34
3.3. Méthodes géochimiques utilisées : mesures in-situ	36
3.3.1. <i>Diagraphies physico-chimiques</i>	36
3.3.2. <i>Prélèvements d'eau</i>	37
3.4. Retraitement des données géophysiques aéroportées et methodologie de reperege de l'intrusion	39
3.5. Principes d'interprétation des tomographies de résistivité électrique (TRE).....	40
4. Résultats géochimiques	43
4.1.1. <i>Diagraphies physico-chimiques</i>	43
4.1.2. <i>Prélèvements d'eau</i>	56
5. Interprétation des résultats	76
5.1. Secteur Centre-Sud de Mayotte	76
5.1.1. <i>Caractéristiques hydrogéologiques du secteur Centre-Sud</i>	76
5.1.2. <i>Zone de Bandrélé</i>	77
5.1.3. <i>Zone de Mronabéja – Mbouini</i>	85
5.1.4. <i>Zone de Mréréni – Chirongui</i>	102
5.2. Secteur Nord de Mayotte	113
5.2.1. <i>Caractéristiques hydrogéologiques du secteur Nord</i>	113
5.2.2. <i>Zone de Mtsangamouji</i>	114
5.2.3. <i>Zone de Mohogoni</i>	124
5.2.4. <i>Zone de Méresse</i>	137
5.2.5. <i>Zone de Bouyouni</i>	148
5.2.6. <i>Zone de Kawéni</i>	156
6. Conclusion générale et recommandations.....	173
7. Bibliographie	179
8. Annexes	185
8.1. Les investigations par d'électromagnetisme aéroporté.....	185
8.1.1. <i>Principe de mesure</i>	185
8.1.2. <i>Description des données électromagnétiques aéroportées sur les secteurs d'intérêt</i> 186	
8.2. Les investigations par tomographie de résistivité électrique au sol.....	193
8.2.1. <i>Sélection des sites pour les investigations par tomographie électrique au sol</i> ...	193
8.2.2. <i>Moyens mobilisés</i>	196

8.2.3.	<i>Calendrier et conditions d'exécution</i>	196
8.2.4.	<i>Mise en œuvre</i>	197
8.2.5.	<i>Travaux réalisés</i>	197
8.2.6.	<i>Paramètres d'acquisition</i>	198
8.2.7.	<i>Positionnement des mesures</i>	198
8.2.8.	<i>Traitement des données</i>	199
8.2.9.	<i>Inversion/modélisation</i>	200
8.2.10.	<i>Synthèses des observations par TRE</i>	200
8.3.	Principes des tomographies de résistivité électrique	202
8.3.1.	<i>Principe de la méthode</i>	202
8.3.2.	<i>Dispositifs d'électrodes / configurations d'acquisition</i>	203
8.3.3.	<i>Construction d'une pseudo-section de résistivité apparente</i>	205
8.3.4.	<i>Traitement et inversion des données</i>	206
8.3.5.	<i>Applications</i>	207
8.4.	Annexe physico-chimiques	208
8.4.1.	<i>Paramètres mesurés sur le terrain</i>	208
8.4.2.	<i>Analyses chimiques (éléments majeurs et traces)</i>	212

Liste des figures

Figure 1 : Schéma conceptuel de l'interface eau douce – eau salée (Ghyben-Herzberg)	16
Figure 2 : Modèle volcano-structural de l'île (BRGM/RP-61803-FR).....	21
Figure 3 : Localisation des zones d'études des précédents projets de caractérisation hydrogéologique des secteurs Centre et Sud (BRGM/RP-61575-FR), Nord-Ouest (BRGM/RP-59550-FR) et Nord-Est (BRGM/RP-56600-FR)	23
Figure 4 : Moyenne annuelle des cumuls pluviométriques – Période 1981-2010 (Source : Météo-France – Edition du 23/02/2016).....	25
Figure 5 : Modèle conceptuel d'une île volcanique à basalte complexe à l'échelle de l'île (Lachassagne et al., 2014)	27
Figure 6 : Modèles conceptuels des principaux aquifères observés à Mayotte (Vittecoq et al., 2014).....	29
Figure 7 : Schéma hydrogéologique conceptuel des paléovallées.....	30
Figure 8 : Localisation des secteurs sensibles à prospecter en zone nord.....	33
Figure 9 : Localisation des secteurs sensibles à prospecter en zones centre et sud.	33
Figure 10 : Aperçu des investigations de terrain : à gauche, sonde de diagraphie physico-chimique ; à droite, pompage en cours de réalisation avec pompe immergée	36
Figure 11 : Mesure des paramètres physico-chimiques sur un forage équipé, par dérivation installée sur un point de piquage. Les flacons de prélèvement et le nécessaire de filtration sont également identifiés.	38
Figure 12 : Exemple de profil AEM sur lequel une deuxième intrusion saline, plus en surface, a dû être pointée manuellement.	39
Figure 13 : Piézomètre de M'Ronabéja : diagraphie physico-chimique avant pompage (trait plein) et après pompage (tirets) ; la profondeur de pompage est indiquée par la flèche rouge.	45
Figure 14 : Piézomètre de Mréréni-Chirongui : diagraphie physico-chimique avant pompage (trait plein) et après pompage (tirets) ; la profondeur de pompage est indiquée par la flèche rouge.	47
Figure 15 : Forage de Bandrélé Dagoni : diagraphie physico-chimique avant pompage (AV - trait plein) et après pompage (AP - tirets) ; la profondeur de pompage est indiquée par les flèches rouges.	50
Figure 16 : Piézomètre de Kawéni : diagraphie physico-chimique avant pompage (trait plein) et après pompage (tirets) ; la profondeur de pompage est indiquée par la flèche rouge.....	52
Figure 17 : Diagraphies (conductivité électrique, éventuellement température) pratiquées en 2002-2003 et en 2014, suite à la réalisation de nouveaux forages (BRGM/RP-51603-FR ; BRGM/RP-51969-FR ; BRGM/RP-52481-FR ; BRGM/RP-63351-FR). Les profondeurs de pompage, lorsque connues, sont indiquées par une flèche rouge.	55
Figure 18 : Profondeur de l'eau dans les ouvrages de Kawéni (12307X0011) et Mronabéja (12316X0031/MRO1) lors de l'échantillonnage (novembre 2021) et comparaison aux niveaux antérieurs.	56
Figure 19 : Comparaison des mesures de novembre 2021 avec les mesures antérieures (données ADES https://ades.eaufrance.fr/ et données issues de rapports BRGM).....	60
Figure 20 : Diagramme de Piper, mesures de novembre 2021 et mesures antérieures (données ADES https://ades.eaufrance.fr/ et données issues de rapports BRGM).	62

Figure 21 : Diagramme de Schoeller, prélèvements de novembre 2021.	63
Figure 22 : Evolution des concentrations en cations et en silice : données de novembre 2021 et données antérieures (données ADES https://ades.eaufrance.fr/ et données issues de rapports BRGM).....	65
Figure 23 : Evolution des concentrations en anions : données de novembre 2021 et données antérieures (données ADES https://ades.eaufrance.fr/ et données issues de rapports BRGM).66	66
Figure 24 : Evolution des concentrations en éléments traces – 1 : données de novembre 2021 et données antérieures (données ADES https://ades.eaufrance.fr/ et données issues de rapports BRGM).....	68
Figure 25 : Evolution des concentrations en éléments traces – 2 : données de novembre 2021 et données antérieures (données ADES https://ades.eaufrance.fr/ et données issues de rapports BRGM).....	69
Figure 26 : Relation Na-Cl : données de novembre 2021 (contours épais) et données antérieures (données ADES https://ades.eaufrance.fr/ et données issues de rapports BRGM).	71
Figure 27 : Relation Ca-SO ₄ : données de novembre 2021 (contours épais) et données antérieures (données ADES https://ades.eaufrance.fr/ et données issues de rapports BRGM).71	71
Figure 28 : Relation Ca-Mg : données de novembre 2021 (contours épais) et données antérieures (données ADES https://ades.eaufrance.fr/ et données issues de rapports BRGM).	72
Figure 29 : Relation Ca-HCO ₃ : données de novembre 2021 (contours épais) et données antérieures (données ADES https://ades.eaufrance.fr/ et données issues de rapports BRGM).72	72
Figure 30 : Relation B-Cl : données de novembre 2021 (contours épais) et données antérieures (données ADES https://ades.eaufrance.fr/ et données issues de rapports BRGM).	73
Figure 31 : Relation Br-Cl : données de novembre 2021 (contours épais) et données antérieures (données ADES https://ades.eaufrance.fr/ et données issues de rapports BRGM).	73
Figure 32 : Relation δ ¹¹ B en fonction du rapport B/Cl (d'après Kloppmann et al., 2011).....	75
Figure 33 : Localisation des entités hydrogéologiques du secteur Centre-Sud (partie Centre-Sud de la carte du BRGM/RP-61757-FR).....	76
Figure 34 : Carte de la zone de Bandré avec le seul ouvrage connu (12313X033/BAND ouvrage réhabilité en 2018)	77
Figure 35 : Coupe AEM interprétée sur le secteur de Chirongui passant par le forage de Bandré (BRGM/RP-61757-FR).....	80
Figure 36 : Profil AEM sur lequel est représenté le pointé semi-automatique de l'intrusion saline grâce à un seuil à 4 Ohm.m (en bleu ciel) et un seuil à 8 Ohm.m (en vert). Exagération verticale 1.2.	82
Figure 37 : Localisation en altitude de l'intrusion saline « principale » (pas la plus proche de la surface) pointée automatiquement sur les données AEM dans le secteur de Bandré.	83
Figure 38 : Coupe de résistivité interprétée et sa localisation (BRGM/RP-53119-FR, profil A) .	84
Figure 39 : Carte de localisation de la zone d'étude de Mronabéja - Mbouini.....	85
Figure 40 : Chronique piézométrique du forage de Mronabéja (12316X0032/MRONAB).....	87
Figure 41 : Chronique piézométrique de l'ouvrage 12316X0031/MRO1.....	87
Figure 42 : 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 (x 2 l'échelle horizontale) (source : BRGM/RP-62825-FR).	88

Figure 43 : Localisation de la paléovallée R3 sur fond cartographique IGN (source : BRGM/RP-62825-FR).....	89
Figure 44 : Piézomètre de M'Ronabéja : diagraphie physico-chimique avant pompage (trait plein) et après pompage (tirets) ; la profondeur de pompage est indiquée par la flèche rouge.	92
Figure 45 : Profils AEM et leurs localisations sur lesquels sont représentés le pointé semi-automatique de l'intrusion saline « principale » et « secondaire » (en couleurs plus foncées) grâce à un seuil à 4 Ohm.m (en bleu) et un seuil à 8 Ohm.m (en vert). Exagération verticale 1.2. La profondeur prévisionnelle des forages Fz1 et Fz2 d'environ 100 m est indiquée par un tiret noir.	93
Figure 46 : Localisation en altitude de l'intrusion saline « principale » (pas la plus proche de la surface) pointée automatiquement sur les données AEM dans le secteur de Mronabeja.	94
Figure 47 : Localisation des investigations géophysiques et cartographie des intrusions salées définies selon les résultats AEM.....	95
Figure 48 : Carte de localisation de la zone d'étude de Mréréni-Chirongui.	103
Figure 49 : emprise du bassin d'alimentation de captage du 12312X0035/MRERE2 (source : BRGM/RP-57624-FR)	106
Figure 50 : Profils AEM et leurs localisations. Exagération verticale 1.2.	109
Figure 51 : Localisation en altitude de l'intrusion saline pointée automatiquement sur les données AEM dans le secteur de Miréréni.....	110
Figure 52 : Cartographie des systèmes hydrogéologiques du Nord-Ouest de Mayotte (source : BRGM/RP-59550-FR)	113
Figure 53 : Localisation du secteur d'étude en aval du bassin versant du Mroni Andrianabe..	115
Figure 54 : Coupe lithostratigraphique et technique de Mtsangamouji F1.....	116
Figure 55 : Coupe lithostratigraphique et technique de Mtsangamouji F2.....	117
Figure 56 : Chronique de la conductivité dans le captage Mtsangamouji F1 (12306X0017/MTSAN1).	118
Figure 57 : Profil TDEM interprété de Mtsangamouji 4 (BRGM/RP-59550-FR).....	119
Figure 58 : Profil AEM (et sa localisation) sur lequel est représenté le pointé semi-automatique de l'intrusion saline grâce à un seuil à 4 Ohm.m (en bleu) et un seuil à 8 Ohm.m (en vert). Exagération verticale 1.2.	121
Figure 59 : Localisation en altitude de l'intrusion saline « principale » (pas la plus proche de la surface) pointée automatiquement sur les données AEM dans le secteur de Mtsangamouji. .	122
Figure 60 : Bassin versant total du Mro Maré ; localisation des captages AEP de Mohogoni, et de la retenue collinaire	124
Figure 61 : Localisation des captages AEP Mohogoni F1 et F2 sur fond de carte géologique vectorisée (1/30 000) et fond de carte IGN.....	125
Figure 62 : Comparaison des logs géologiques des captages AEP Mohogoni F1 et F2	127
Figure 63 : Chronique d'exploitation mensuelle des ouvrages AEP Mohogoni F1 et F2 (source : SMAE Mayotte, mise en forme : BRGM)	128
Figure 64 : Schéma hydrogéologique conceptuel des paléovallées enterrées - BRGM/RP-61757-FR	129

Figure 65 : Profil AEM (et sa localisation) sur lequel est représenté le pointé semi-automatique de l'intrusion saline grâce à un seuil à 4 Ohm.m (en bleu) et un seuil à 8 Ohm.m (en vert). Exagération verticale 2.....	130
Figure 66 : Localisation en altitude de l'intrusion saline pointée automatiquement sur les données AEM dans le secteur de Mohogoni.	131
Figure 67 : Localisation des investigations géophysiques et cartographie des intrusions salées définies selon les résultats AEM	132
Figure 68 : Bassin versant du Mro Oua Méresse avec les localisations du captage AEP (« Bouyouni Méresse » 12306X0046/BOUY) et du site de forage FZ6.....	137
Figure 69 : Profils TDEM interprétés pour le secteur du Mro Oua Méresse et Mro Oua Bouyouni (source : BRGM/RP-59550-FR)	139
Figure 70 : Conductivité mesurée dans l'ouvrage 12306X0046/BOUY d'octobre 2009 à septembre 2020 (source : base de données ADES)	140
Figure 71 : Profil AEM (et sa localisation) sur lequel est représenté le pointé semi-automatique de l'intrusion saline « principale » grâce à un seuil à 4 Ohm.m (en bleu) et un seuil à 8 Ohm.m (en vert). Exagération verticale 1.2.	141
Figure 72 : Localisation en altitude de l'intrusion saline pointée automatiquement sur les données AEM dans le secteur de Méresse.	142
Figure 73 : Localisation des investigations géophysiques et cartographie des intrusions salées définies selon les résultats AEM.	144
Figure 74 : Bassin versant du Mro Oua Bouyouni avec les localisations de l'ouvrage AEP « Bouyouni Bouyouni » (12306X0024/BOUY), du piézomètre « Digo » (12306X0053/PZ5) et du futur site FZ7'	148
Figure 75 : Profil AEM (et sa localisation) sur lequel est représenté le pointé semi-automatique de l'intrusion saline grâce à un seuil à 4 Ohm.m (en bleu) et un seuil à 8 Ohm.m (en vert). Exagération verticale 1.2. Profondeur du futur forage indiquée par un trait noir.	152
Figure 76 : Localisation en altitude de l'intrusion saline pointée automatiquement sur les données AEM dans le secteur de Bouyouni.	152
Figure 77 : Localisation du bassin versant topographique de Kawéni et des trois captages AEP	156
Figure 78 : Coupe lithologique synthétique passant par les captages Kawéni F2 (12307X0014) et F1(12307X0013) et un ouvrage plus au sud (source : BRGM/RP-56773-FR)	158
Figure 79 : Coupe synthétique passant par Kaoué 3 et en direction de la dépression de Kawéni au Sud-Est (source : BRGM/RP-56773-FR).....	159
Figure 80 : Coupe lithologique de la dépression de Kawéni (source : BRGM/RP-53161-FR) ..	161
Figure 81 : Carte piézométrique (carte du haut) et mesure de conductivité (carte du bas) de mars 2004 dans la dépression de Kawéni	162
Figure 82 : Mesures de conductivité aux ouvrages AEP de Kawéni F1, F2 et 3 10" (Kaoué 3) depuis janvier 2007 (source : BRGM/RP-56773-FR).....	163
Figure 83 : Profil AEM P67 (et sa localisation) sur lequel est représenté le pointé semi-automatique de l'intrusion saline grâce à un seuil à 4 Ohm.m (en bleu) et un seuil à 8 Ohm.m (en vert). Exagération verticale 1.2. La profondeur du forage est indiquée par un trait noir.	166
Figure 84 : Localisation en altitude de l'intrusion saline pointée automatiquement sur les données AEM dans le secteur de Kawéni.	166

Figure 85 : Localisation des investigations géophysiques et cartographie des intrusions salées définies selon les résultats AEM.....	168
Figure 86 : Vues du système SkyTEM® ; (a) arrière et (b) avant de la boucle émettrice et (c) en plein vol.....	186
Figure 87 : Localisation des données de géophysique aéroportée retraitées par le BRGM dans le cadre de cette étude sur fond topo IGN.....	190
Figure 88 : Exemple de sondages de résistivité obtenus après inversion. La profondeur d'investigation de la méthode EM est représentée par un masque blanc, et la zone de confiance réduite est représentée par une tranche en légère transparence.....	192
Figure 89 : Principe de la mesure en courant électrique continu.....	202
Figure 90 : Disposition générale d'électrodes où A et B sont les électrodes de courant, M et N, les électrodes de potentiel ($0 < \theta, \Phi < \pi$)	203
Figure 91 : Configuration dipôle-dipôle	204
Figure 92 : Configuration de Schlumberger	204
Figure 93 : Configuration dipôle-dipôle	204
Figure 94 : Configuration Wenner.....	205
Figure 95 : Principe de construction d'une pseudo-section pour un dispositif Wenner.....	205
Figure 96 : Résultats complets (en images) d'une inversion. En haut la pseudo-section de résistivité apparente mesurées. En bas, le modèle de résistivité issu de l'inversion. Au centre, la pseudo-section de résistivité calculée sur la base du modèle de résistivité. L'erreur (RMS) constitue la différence entre les deux premières pseudo-sections (ici 4.4%).	206
Figure 97 : Résultat de l'inversion de la Figure 96 avec la topographie.	207

Liste des planches de figures géophysiques

Planche 1 : Zone de Mronabeja - Intrusions salines interprétées à partir de l'imagerie TRE (P1-2017 et P10, en haut) et comparées à l'imagerie AEM (en bas). Les isocontours 10 et 20 Ohm.m définis par TRE sont superposés à l'imagerie AEM pour comparaison.	97
Planche 2 : Zone de Bouini - Intrusions salines interprétées à partir de l'imagerie TRE (P1-2017 et P10, en haut) et comparées à l'imagerie AEM (en bas). Les isocontours 10 et 20 Ohm.m définis par TRE sont superposés à l'imagerie AEM pour comparaison.....	99
Planche 3 : Zone de Mohogoni - Intrusions salines interprétées à partir de l'imagerie TRE (P2010, P8, en bas) et comparées à l'imagerie AEM (en haut). Les isocontours 10 et 20 Ohm.m définis par TRE sont superposés à l'imagerie AEM pour comparaison.....	134
Planche 4 : Zone de Méresse - Intrusions salines interprétées à partir de l'imagerie TRE (P2001, P6-2017 et P5, en haut) et comparées à l'imagerie AEM (en bas). Les isocontours 10 et 20 Ohm.m définis par TRE sont superposés à l'imagerie AEM pour comparaison.	145
Planche 5 : Site de Bouyouni - Intrusions salines interprétées à partir de l'imagerie TRE (P4, en haut) et comparées à l'imagerie AEM et au profil TRE de 2001 (en bas). Les isocontours 10 et 20 Ohm.m définis par TRE sont superposés à l'imagerie AEM pour comparaison.	154
Planche 6 : Site de Kaweni - Intrusions salines interprétées à partir de l'imagerie TRE (PA et PB de 2004, P1 et P3, en haut) et comparées à l'imagerie AEM (en bas). Les isocontours 10 Ohm.m définis par TRE sont superposés à l'imagerie AEM pour comparaison.	169

Liste des tableaux

Tableau 1 : Récapitulatif des forages présents sur les secteurs d'étude avec leur altitude, leur profondeur atteinte et la distance à la cote	32
Tableau 2 : Synthèse des investigations prévues (orange) et réellement menées (noir) par secteur – F indiquant un forage ; Pz un piézomètre et Abn pour abandonné.....	35
Tableau 3 : Valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques déduites des diagraphies en écoulement naturel, pour les 4 ouvrages ayant fait l'objet d'acquisitions.	53
Tableau 4 : Paramètres physico-chimiques mesurés lors des acquisitions sur site (P : prélevé ; PA : prélevé et analysé).	58
Tableau 5 : Rapports isotopiques en oxygène et hydrogène.	74
Tableau 6 : Rapports isotopiques en bore.	75
Tableau 7 : Lithologie du forage de Bandrélé-Dagoni (12313X0033/BAND).....	78
Tableau 8 : Débits exploitables calculés en fonction ou non de la prise en compte d'un biseau salé proposés en 2018	79
Tableau 9 : Lithologie du forage de Mronabéja (12316X0032/MRONAB)	86
Tableau 10 : Lithologie du forage 12312X0035/MRERE2.....	104
Tableau 11 : Principales informations concernant les trois captages AEP de Kawéni	157
Tableau 12 : Bilan estimatif de l'exploitation des bassins d'alimentation des trois captages ...	160
Tableau 13 : Récapitulatif des résultats obtenus par différentes méthodes pour chaque secteur permettant une première approche du risque d'intrusion saline.....	175
Tableau 14 : Tableau récapitulatif des conclusions et recommandations pour le suivi des intrusions salines détectées	178
Tableau 15 : Paramètres pris en compte pour le choix des profils à réaliser. Les sites non retenus sont surlignés en bistre.....	195
Tableau 16 : Caractéristiques des profils réalisés.....	198
Tableau 17 : Paramètres de traitement et d'inversion des tomographies.....	199
Tableau 18 : Synthèse des observations par tomographie de résistivité électrique et recommandations.....	201

1. Introduction

1.1. CONTEXTE DE LA RESSOURCE EN EAU POTABLE A MAYOTTE

La ressource en eau destinée à la consommation humaine à Mayotte provient des captages en rivière, des deux retenues collinaires, des forages d'eau souterraine et du dessalement sur Petite-Terre. Un tiers de la ressource provient des forages.

Au vu de l'évolution de la démographie du territoire, la demande en eau destinée à la consommation humaine est en constante augmentation afin d'alimenter toute la population de Mayotte (demande future estimée entre 84 000 m³/j et 98 000 m³/j à l'horizon 2050 (Egis, phase 4 du Schéma Directeur de l'Eau Destinée à la Consommation Humaine –SDEDCH-, 2021)). Actuellement, les infrastructures présentent sur le territoire ne permettent pas d'approvisionner en eau potable toute la population toute l'année. Ainsi, lorsque la ressource et/ou les capacités de traitement diminuent à la fin de la saison sèche (octobre-novembre) ; un système de tours d'eau est déployé à l'échelle de l'île pendant plusieurs mois.

L'optimisation des ouvrages de production d'eau destinée à la consommation humaine et la création de nouvelle ressource sont des projets en cours ou en réflexion à ce jour.

Un premier travail sur le potentiel d'exploitation de la ressource en eau souterraine et l'optimisation des forages existants a ainsi été réalisé par le BRGM, le SIEAM (désormais SMEAM), la Société Mahoraise des Eaux (SMAE) et la DEAL (Mauduit et Pucel-Bastie, 2017 et BRGM/RP-66317-FR).

Cette étude a notamment mis en évidence que les débits pouvaient être augmentés, soulageant la tension sur la ressource en eau potable à court terme sur 3 forages : Bouyouni-Bouyouni (12306X0024/BOUY), Kawéni Lajolie (12307X0021/KAOUÉ3) et Béja (12306X0014). Un changement de pompe dans ces forages permettrait les augmentations de débit suivantes :

- Bouyouni-Bouyouni : en 2017, un dégoulotage² de l'ouvrage a été estimé possible afin de passer de 32 m³/h à 41 m³/h, soit une augmentation de 28%. A ce jour, le forage de Bouyouni-Bouyouni est exploité à un débit de 36 m³/h à raison de 22h/24 ;
- Kawéni Lajolie : augmentation du débit d'exploitation de 31 à 50 m³/h, soit une hausse de 61%. A ce jour, le débit d'exploitation est fixé à 31 m³/h, 20h/24.
- Béja : le débit d'exploitation pourrait être doublé, passant de 30 à 60 m³/h. Actuellement ce captage est exploité à un débit de 30 m³/h, 19h/24 environ.

Les volumes mobilisables supplémentaires seraient donc de 2 660 m³/sem (380 m³/j) pour le forage de Kawéni Lajolie, 1 386 m³/sem (198 m³/j) pour Bouyouni, et de 3 990 m³/sem (570 m³/j) pour Béja. Au total, on aurait donc 8 036 m³/sem ; soit 1 148 m³/j en plus, représentant 1,4 % à 1,2 % de la demande future estimée entre 84 000 m³/j et 98 000 m³/j à l'horizon 2050 (Egis, phase 4 du Schéma Directeur de l'Eau Destinée à la Consommation Humaine –SDEDCH-, 2021). Au vu de la tension lors de la saison sèche, toutes les ressources complémentaires à apporter à son importance pour la population.

² Un dégoulotage est une opération consistant en l'abaissement de la pompe dans un forage afin d'optimiser son exploitation.

Un point de vigilance a toutefois été levé sur le risque d'intrusion saline au droit des forages de Kawéni Lajolie et Bouyouuni. En effet, au vu de leur position géographique à proximité du littoral et des données historiques de suivi de la conductivité électrique, la DEAL a alerté depuis plusieurs années les acteurs du bassin sur la potentielle contamination irréversible de la ressource en eau par des intrusions salines liées à une surexploitation de ces ouvrages.

1.2. L'INTRUSION SALINE EN CONTEXTE INSULAIRE

En contexte littoral, en raison de la présence d'eau de mer, une zone de contact se forme entre l'eau douce contenue dans les formations aquifères et l'eau de mer sous-jacente de densité plus importante : il s'agit de l'interface eau douce – eau salée (Figure 1).

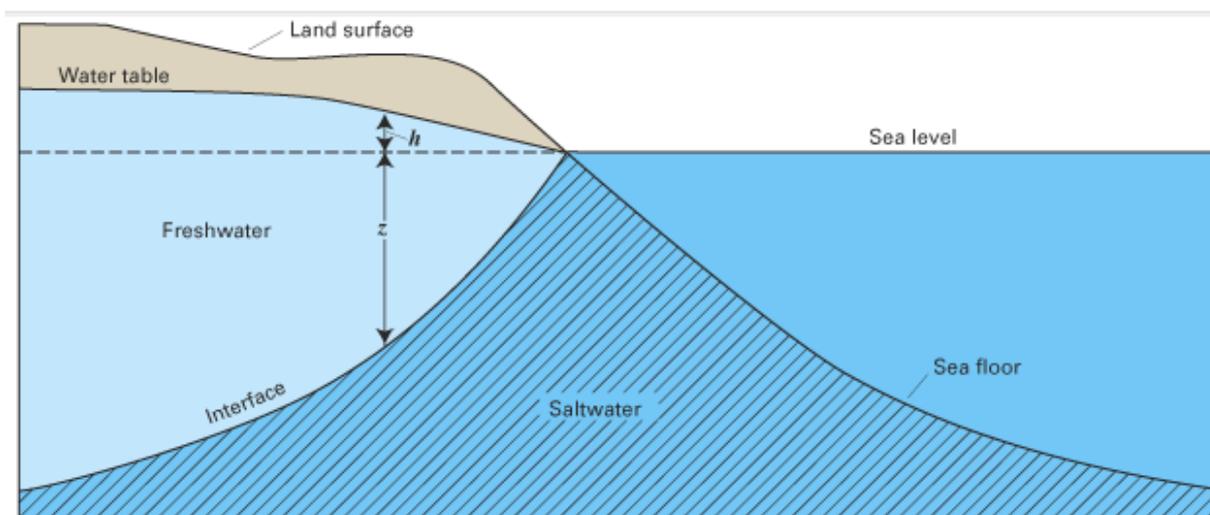


Figure 1 : Schéma conceptuel de l'interface eau douce – eau salée (Ghyben-Herzberg)

Sous l'action du gradient de densité et, en considérant que le niveau piézométrique s'élève vers l'intérieur des terres, l'eau salée pénètre vers l'intérieur des terres sous la forme d'un « biseau » sous l'eau douce ; on parle de biseau salé. Les différents schémas conceptuels existants (Ghyben-Herzberg, Glover, Cooper, Luszczynsky...) permettent de calculer la profondeur théorique de l'interface eau douce – eau salée pour des systèmes homogènes. Dans la réalité, et *a fortiori* dans le cas des aquifères fissurés et fracturés de Mayotte, cette interface est plus complexe. La distribution spatiale de la perméabilité, les conditions aux limites et l'altération peuvent impacter significativement sa position, sa nature, son évolution au cours du temps, etc.

Les différents schémas conceptuels nommés ci-dessus n'existent, généralement, pas dans la réalité et forment donc des premières approximations pour la compréhension et la localisation du biseau salé. En effet, ces schémas peuvent être modifiés par différentes conditions naturelles (BRGM/RR-38847-FR) :

- Une structure géologique complexe du réservoir : variations d'épaisseur, plissements, failles, etc. ;
- L'hétérogénéité de la lithologie qui peut entraîner de très importants contrastes dans les valeurs des paramètres hydrodynamiques ;
- Une forte influence des marées induisant un développement de la zone de transition à salinité variable ;
- De fortes variations du débit des fleuves côtiers entraînant des fluctuations sur les charges d'eau douce et également une extension de la zone de transition ;

- De fortes variations de recharge par les pluies littorales entraînant le même phénomène précédent.

Ces différents phénomènes coexistent la plupart du temps pouvant provoquer des discontinuités dans la forme et l'extension de l'intrusion de l'eau salée.

Les aquifères côtiers sont plus ou moins sensibles (en fonction de leur structure, géométrie et hétérogénéités) aux intrusions salines en conditions naturelles et sous influence anthropique, sur le littoral ou dans l'environnement des cours d'eau envahis par l'eau salée (BRGM/RP-60828-FR).

La connaissance du risque d'intrusion saline est essentielle à la définition de l'état quantitatif et qualitatif des masses d'eau souterraine mahoraises. Le contexte géologique complexe de Mayotte engendre que la structure des aquifères et leur hydrodynamisme sont à ce jour peu connus. Par ailleurs, dans un contexte de changement global, l'augmentation des pressions anthropiques sur le littoral (du fait du développement économique...) et la remontée du niveau océanique accroissent encore le risque d'une amplification des phénomènes d'intrusion saline.

Enfin, l'activité sismo-volcanique (vidange d'une chambre magmatique), qui perdure à l'est de l'île depuis mai 2018, a conduit à une subsidence moyenne de 12 cm de l'île de Mayotte en 1,5 an. Il est ainsi pertinent d'envisager que cette situation exceptionnelle pourrait accentuer le risque d'intrusion saline dans les aquifères côtiers mahorais.

1.3. OBJECTIFS ET MOYENS DE LA PRESENTE ETUDE

L'objectif de cette présente étude est d'identifier/vérifier les potentielles intrusions salines qui pourraient exister et d'appréhender le risque de ce phénomène au droit des forages d'eau destinée à la consommation humaine et d'adapter en conséquence leur exploitation.

A l'origine de cette étude, l'objectif était d'augmenter les débits d'exploitation de ces forages tout en préservant la ressource. La DEAL et le SIEAM, devenu SMEAM et désormais Eaux de Mayotte, ont sollicité le BRGM pour réaliser une étude sur le risque d'intrusion saline au droit de huit secteurs jugés sensibles aux intrusions salines où des forages sont en exploitation ou sont en projet présentant des risques potentiels d'intrusion saline et nécessitant une acquisition de connaissances seront également prospectés

Afin de mener cette étude sur le risque d'intrusion saline, les objectifs et méthodes utilisées ont été les suivants :

Objectifs de l'étude	Méthodes employées
Progresser dans la connaissance de la position de l'interface eau douce – eau salée par des observations de terrain	Méthodes géophysiques par : <ul style="list-style-type: none">• du retraitement des données d'électromagnétisme aéroporté• et une campagne de tomographie de résistivité au sol fin 2021
Identifier l'origine de la salinisation des ouvrages ; celle-ci pouvant être d'origines océanique, minéralogique ou anthropique (return-flow ou eaux usées), ou résultant d'une relation nappe-rivière	Prélèvements d'eau au droit des forages en exploitation sur les zones d'intérêt ou, à défaut, pompage sur des piézomètres de la zone et analyser la chimie de l'eau (Na, Cl ou Br, marqueurs d'intrusion) et les isotopes (de la molécule d'eau, B, Sr, Li)
Localiser la ou les interfaces eau douce – eau salée sur les ouvrages et zones considérées comme « à risque d'intrusion »	des prélèvements d'eau au droit des forages en exploitation avec des analyses physico-chimiques et réalisation de diagraphies physico-chimiques

Tous ces travaux ont permis de proposer une surveillance du phénomène d'intrusion saline au droit des forages AEP et/ou des investigations complémentaires à l'aval des ouvrages sur les zones les plus sensibles.

2. Mayotte : généralités

2.1. GEOLOGIE

Mayotte se situe dans l'Océan Indien, entre l'Equateur et le tropique du Capricorne. C'est une île volcanique posée sur le plancher océanique du Sud du bassin de Somalie entre l'Afrique et Madagascar. Mayotte appartient à l'archipel des Comores composé de quatre îles : Grande Comore, Mohéli, Anjouan et Mayotte.

La superficie de Mayotte est de 374 km² et comprend deux îles principales : Grande Terre (362 km²) et Petite Terre (12 km²), entourées de 26 îlots.

Cet ensemble est ceinturé par une barrière récifale de 160 km de long, isolant un lagon de 1100 km² environ. La barrière récifale commence à s'édifier il y a environ 1,5 Ma avec une accélération de la construction il y a 125 000 ans.

La géologie de Mayotte est caractérisée par deux éléments :

- La quasi-ubiquité des formations volcaniques, majoritairement constituées de laves de type basaltique (les formations sédimentaires sont limitées au récif et à quelques plaines côtières) ;
- La profonde altération qui affecte la majorité d'entre elles.

La structure de l'île est expliquée par deux théories majeures : un vaste volcan bouclier dont le centre, maintenant effondré, se situerait à l'Ouest de Mayotte ou une possible chaîne de plus petits volcans coalescents. En tout état de cause, Mayotte semble être le résultat d'une évolution volcanologique en quatre phases principales (Nougier et al., 1986 ; et BRGM/RP-61803-FR) (Figure 2) :

- Phase nommée « Gilbert » : Un bouclier primitif (ou des volcans coalescents), généralisé à l'ensemble de l'île, dont les coulées de base subaériennes sont datées d'environ 8 Ma (l'âge du volcanisme initial étant estimé entre 10 et 15 Ma). Les dernières éruptions de cette phase consistent en des coulées plus différenciées (néphélinites) mises en place au sein de paléo-vallées (3,25 Ma) ;
- Phase « Gauss » : Des laves plus différenciées se sont ensuite épanchées. Ce sont essentiellement des dômes et écoulements phonolitiques, dans le centre et le Sud de l'île, mises en place entre 3,3 et 2,5 Ma, avec une dernière période éruptive vers 1,5 Ma ;
- Phase « Matuyama » : Le volcanisme basaltique et basanitique du Nord-Ouest est daté aux alentours de 2 Ma. Ces coulées nappent les reliefs de l'extrémité nord-ouest de l'île jusqu'à la baie de Longoni, à partir d'un centre d'émission situé probablement en mer. Suit la mise en place du massif du M'Tsapéré avec son cortège de phonolites intrusives (1,5 à 1,8 Ma), puis de coulées dans des paléovallées (1,4 à 1,5 Ma) ;
- Phase « Brunhes » : Une phase trachytique et basaltique très récente avec des structures de type maar bien préservées, en particulier sur la Petite Terre et au Nord de Mamoudzou.

L'île a ensuite été soumise, depuis 1 à 1,5 Ma, à une subsidence d'au moins 70 m qui explique la présence du récif frangeant. Cette barrière récifale est interrompue par quelques passes qui coïncident généralement avec le réseau hydrographique des périodes glaciaires de l'Holocène (par exemple, la passe en « S » est la trace d'un ancien méandre de rivière (Stieltjes, 1988)). Les plaines sédimentaires côtières actuelles correspondent principalement au comblement récent de vallées entaillées à cette période. Les formations volcaniques sont profondément affectées par les processus d'altération, d'origine climatique et fumerolienne. Les premiers processus d'altération concernent essentiellement les formations les plus anciennes (antérieures à 3,5 Ma ?) qu'ils affectent sur plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur (Ben Youssouf, 1992 ; Stieltjes, 1988). C'est principalement au sein de ces formations que se développent des badlands (padzas en mahorais), sous l'effet de la déforestation sur fortes pentes. Les seconds sont essentiellement développés autour de quelques intrusions de phonolites.

En 2004, dans sa thèse sur l'évolution volcano-structurale de l'île, Debeuf distingue trois complexes volcaniques identifiés sur des critères structuraux, pétrographiques, géochimiques et géochronologiques :

- Le complexe du Sud, daté de 10 Ma à 1,95 Ma, qui est caractérisé par une morphologie de reliefs anciens. Ce complexe est constitué de basanites, néphélinites et phonolites formant une lignée géochimique fortement sous-saturée en silice, s'étendant au sud de la ligne Sada-Tsoundzou ;
- Le complexe du Nord ; daté de 8 Ma à 3,8 Ma apparaissant avec une morphologie plus récente marquée par des reliefs escarpés. Ce complexe représente la période de construction d'un volcan bouclier septentrional. La présence quasi exclusive de magmas basiques est caractéristique de cette zone ;
- Le complexe Nord-Est datant de 4,4 Ma à moins de 0,15 Ma est marqué par des reliefs jeunes délimitant deux massifs : le Digo et le Mtsapéré. Ce complexe représente la phase post-érosionnelle du volcanisme septentrional et comporte des basaltes, des basanites, en grande partie des téphrites et des phonolites. Ces types de laves, avec celles du Nord, définissent une seconde lignée évolutive moyennement saturée en silice. Ce volcanisme se termine par des manifestations phréatomagmatiques à Kawéni et Kavani mais également en Petite-Terre où les produits ponceux de ce volcanisme composent l'île.

Quatre barrières montagneuses organisent le relief de Grande Terre :

- Les crêtes du Nord qui culminent avec le mont Dziani Bolé (472 m) ;
- Le massif du centre depuis le mont Mtsapéré (572 m) jusqu'au mont Combani (481 m) ;
- Le massif du Bénara (660 m) ;
- Le mont Choungui (594 m) au Sud.

L'activité sismo-volcanique (vidange d'une chambre magmatique) qui perdure à 15 km et 50 km à l'est de l'île depuis mai 2018, a conduit à une subsidence moyenne de 12 cm de l'île de Mayotte en 1,5 an (Gargani, 2023). Avant la crise sismique, le taux moyen de subsidence de l'archipel de Mayotte est évalué entre 0,13 et 0,25 mm/an, d'après des datations de récifs (Camoïn et al., 2004) ; soit au moins 70 m depuis 1,5 Ma (Lachassagne et al., 2014).

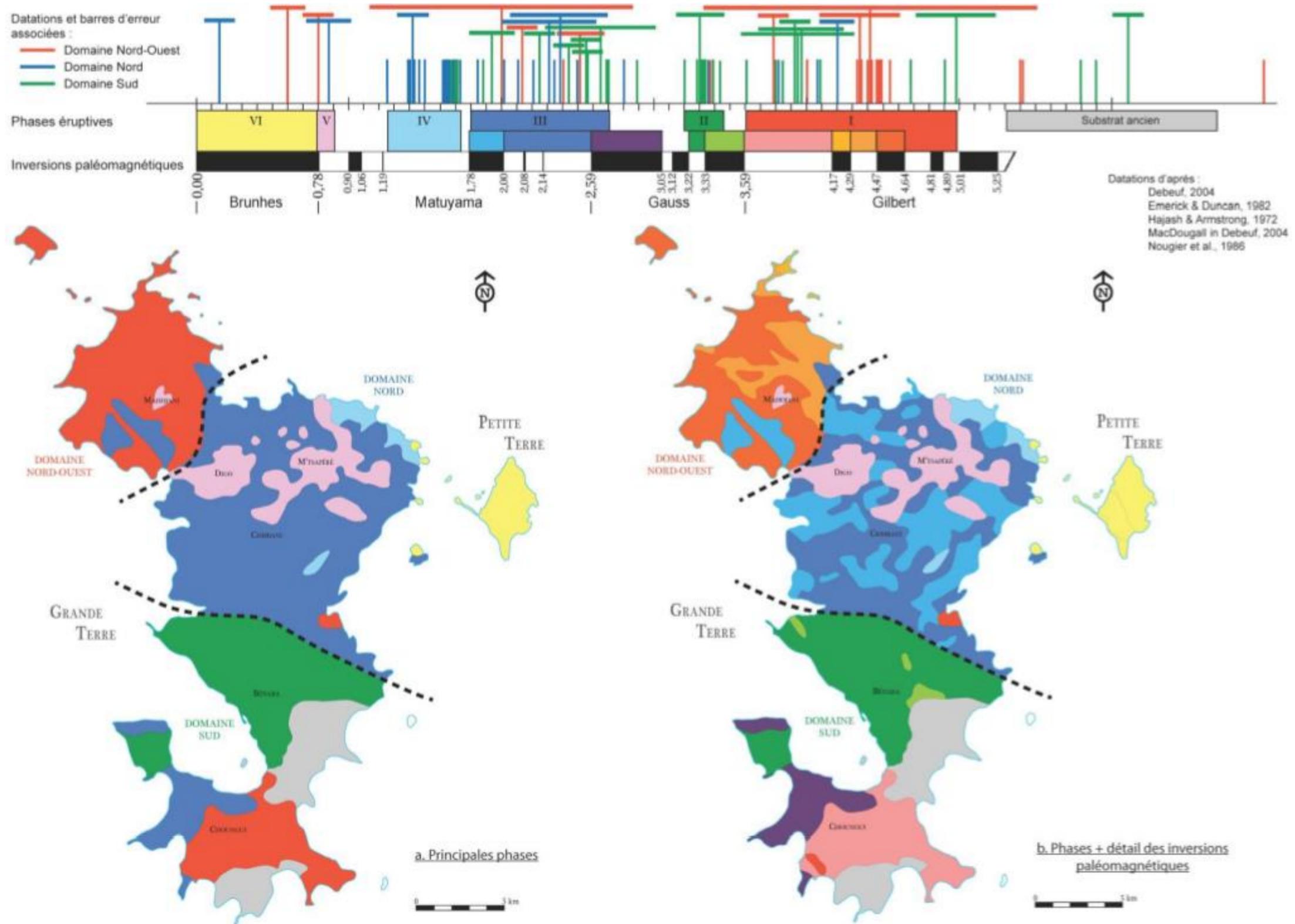


Figure 2 : Modèle volcano-structural de l'île (BRGM/RP-61803-FR)

Cette étude a été découpée en 2 secteurs (Figure 3) :

- Secteur Nord de Mayotte : regroupant les zone d'étude des projets antérieurs Nord-Ouest et Nord-Est ;
- Secteurs Centre et Sud de Mayotte.

La mise en place des formations volcaniques dans le nord de l'île est plus récente qu'au sud.

La géologie de Mayotte est caractérisée par deux éléments clés. Le premier est la quasi-omniprésence de formations volcaniques, majoritairement constituées de laves de type basaltique. Le second est une altération importante, ayant affecté les formations volcaniques jusqu'à plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, qui marque fortement le paysage de l'île. Les formations sédimentaires sont limitées au récif et à quelques plaines côtières.

Le programme CORDET (Ballestracci et al., 1985) dont les conclusions sont reprises et critiquées dans le rapport BRGM/87-REU-11 a permis l'identification d'une structure simple à 4 horizons par magnéto-tellurisme (A.M.T.) pour l'édifice volcanique mahorais :

- Un horizon superficiel d'altération, perméable et meuble (2 ohm.m) ;
- Un horizon basaltique avec des percolations de fluides dans la fracturation (200 à 400 ohm.m) ;
- Un milieu induré ou altéré incliné vers la mer et saturé en eau correspondant plus ou moins à la nappe de base de 30 à 120 mètres d'épaisseur (5 à 10 ohm.m) ;
- Un bouclier géologique primitif sain (> 5 000 ohm.m).



Figure 3 : Localisation des zones d'études des précédents projets de caractérisation hydrogéologique des secteurs Centre et Sud (BRGM/RP-61575-FR), Nord-Ouest (BRGM/RP-59550-FR) et Nord-Est (BRGM/RP-56600-FR)

2.2. CLIMAT

Ce chapitre reprend les données consultables sur le site de [Météo-France de Mayotte](#).

Le climat à Mayotte est de type tropical humide insulaire caractérisé par de faibles variations de température journalières et annuelles et d'importantes précipitations (plus de 1 500 mm par an en moyenne sur l'île selon Météo-France). Ce type de climat favorise l'altération qui affecte profondément les formations volcaniques en les transformant au fur et à mesure en latérites.

Les deux principaux régimes de vents de l'île sont le vent de mousson (chaud et humide, de nord à nord-ouest en été austral) et l'alizé engendré par l'anticyclone des Mascareignes³ (frais et sec, de sud-est en hiver austral).

La météorologie locale est fortement influencée par le relief (côte au vent à l'est, côte sous le vent à l'ouest, altitude, exposition, etc.), avec deux saisons marquées :

- La saison des pluies : une saison chaude et pluvieuse appelée aussi l'été austral ou « kashkazini » qui s'étend de décembre à mars. L'humidité s'élève à 85% en journée et dépasse les 95% la nuit. Le vent d'orientation Nord à Nord-Ouest est chargé d'humidité qui est déposée sous forme de pluie orographique ;
- La saison sèche appelée également hiver austral ou « kusini » de juin à septembre, correspond à des vents (alizés) d'orientation Sud-Est. Les zones côtières de l'Est et du Sud subissent l'influence desséchante de ces alizés de juillet à septembre et sont ainsi les zones les plus sèches de Mayotte.

Ces deux saisons sont séparées par deux intersaisons :

- L'intersaison du « Matulahi » (vent du sud-est) d'avril à mai correspondant aux « pluies d'ambrevades »
- L'intersaison du « Mnyombeni » (vents du nord-est) d'octobre à novembre correspondant à la saison des « pluies des mangues ».

Les températures moyennes annuelles sont comprises entre 21 et 32°C et varient peu au cours des saisons. En saison sèche et fraîche, les températures peuvent descendre jusqu'à 10°C en altitude, à l'intérieur de l'île.

Météo-France Mayotte sur son site indique que si les températures se distinguent par leur faible amplitude journalière et annuelle, ainsi que par leur répartition spatiale homogène, les précipitations s'apprécient par une disparité géographique prononcée. En effet, malgré la petite taille de l'île, les pluies qui tombent dans le centre et le Nord-Ouest de Grande-Terre (environ 1 700 mm par an) sont supérieures à celles que reçoit le Sud (1 100 mm) (Figure 4). Cela s'explique en grande partie par le vent de nord qui amène sur l'île un air humide et chaud pendant l'été austral. Les flancs des monts exposés à ce flux de nord connaissent alors par effet orographique des précipitations accentuées.

³ L'anticyclone des Mascareignes désigne une région subtropicale dans l'océan Indien au large de Madagascar et au sud-est de l'archipel du même nom où se trouve une large zone de haute pression atmosphérique. La position de l'anticyclone des Mascareignes a un impact sur la pluviométrie et le déplacement des cyclones tropicaux dans l'océan Indien.

En saison chaude et pluvieuse, les précipitations mensuelles atteignent en moyenne 200 à 300 mm selon les régions, alors qu'en saison sèche elles peinent à dépasser 20 à 30 mm par mois. Même si au cœur de la saison des pluies les précipitations peuvent facilement atteindre 100 mm en quelques heures, elles ne persistent pas et c'est plutôt le soleil qui prédomine sur l'île.

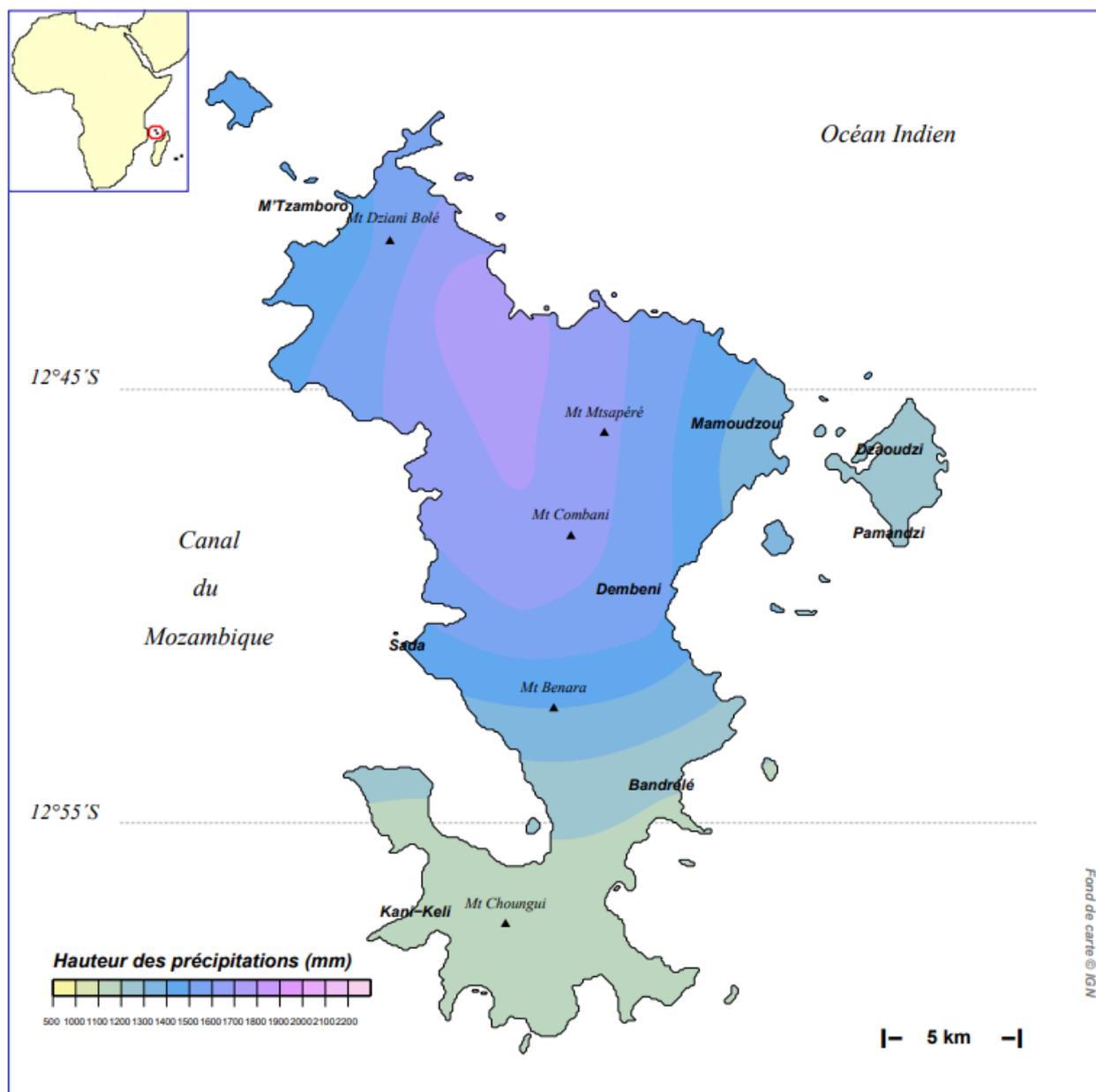


Figure 4 : Moyenne annuelle des cumuls pluviométriques – Période 1981-2010 (Source : [METEO-France – Edition du 23/02/2016](#)).

2.3. HYDROGRAPHIE

Le réseau hydrographique est composé de nombreuses ravines et d'une vingtaine de rivières pérennes. Le débit des rivières, étroitement lié aux précipitations est très variable dans le temps (variations inter-annuelles et intra-annuelles) et dans l'espace (relief, vents). Les étiages, de septembre à novembre, sont sévères (débits très faibles (jusqu'à 30 L/s, Eberschweiler, 1986 et SIE976 station de jaugeage de la Mapouera, 2023)) voire nuls dans les rivières du sud). En saison des pluies, le niveau d'eau peut monter très rapidement, les rivières atteignent des débits très importants durant et/ou directement après un épisode pluvieux (temps de réponse court, entre 3h et 6h de l'amont à l'aval).

Le réseau hydrographique pérenne de Mayotte présente une répartition hétérogène. L'essentiel des cours d'eau pérennes se situe dans le Nord et au centre de l'île (90%). Ils présentent des débits d'étiage faibles (< 30 L/s), du fait de la taille des bassins versants (entre 2 et 20 km², IRSTEA, 2020) et de la durée de la période sèche. Dans le Sud de l'île, la plupart des cours d'eau est à sec en période sèche.

L'érosion régressive a découpé les massifs montagneux de Mayotte en un grand nombre de bassins versants de faible taille, moins de 25 km², avec des pentes de versants généralement comprises entre 5 et 35 %.

2.4. HYDROGEOLOGIE

2.4.1. Modèle conceptuel de Mayotte

L'île de Mayotte possède une structure géologique et hydrogéologique complexe liée aux différentes phases d'éruption volcanique, érosion et d'altération. En effet, il n'existe pas d'aquifère continu à Mayotte mais plutôt des successions d'aquifère perché discontinu séparés par des aquicludes⁴ et des aquitards⁵ (Figure 5). Ces aquifères sont petits, compartimentés dont le risque de salinisation est faible et affecte seulement les aquifères côtiers (Lachassagne et al., 2014).

⁴ Un aquiclude est un corps (couche, massif) de roches saturées, très faiblement conducteur d'eau souterraine, dans lequel le captage de quantités d'eau appréciables n'est pas possible dans des conditions économiques acceptables (Castany G. et Margat J., Dictionnaire français d'hydrogéologie, 1974)

⁵ Un aquitard est une formation semi-perméable qui participe au drainage vertical des formations encaissantes supposées plus perméables.

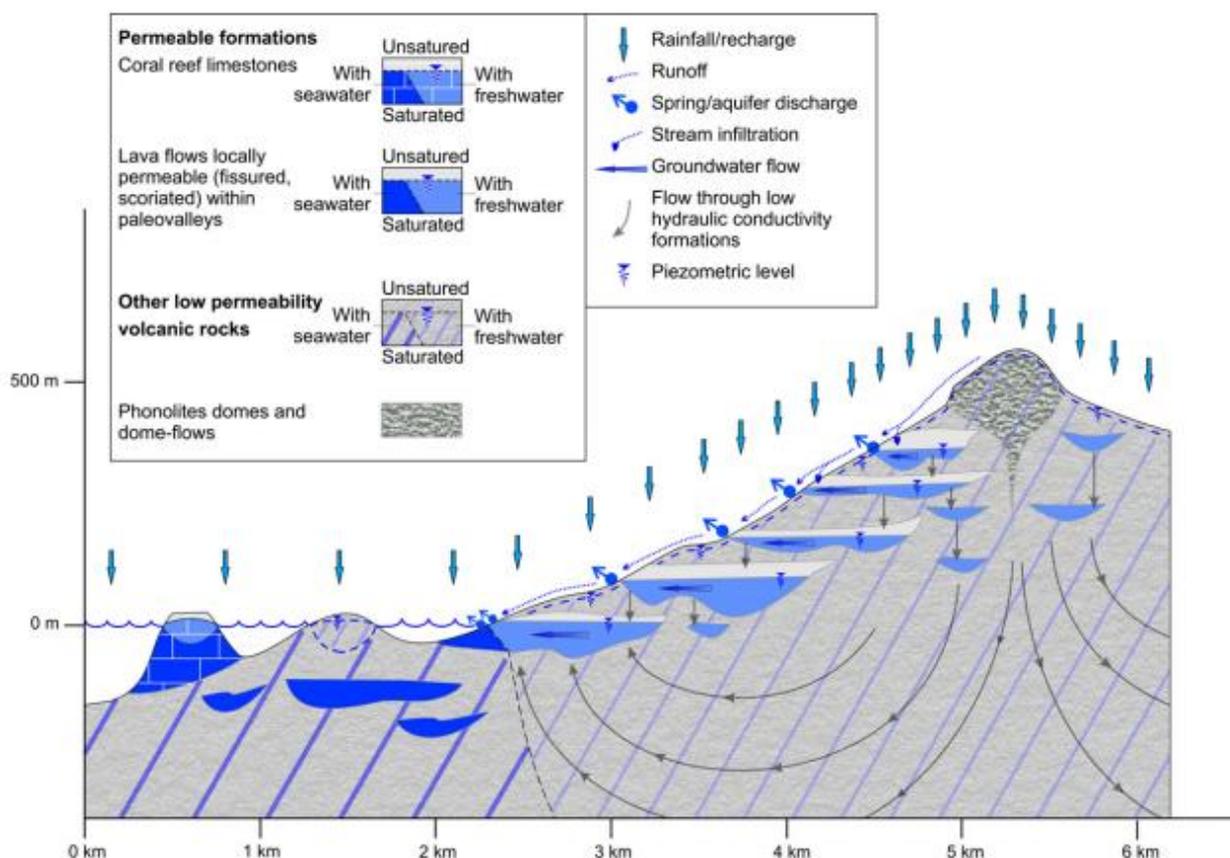


Figure 5 : Modèle conceptuel d'une île volcanique à basalte complexe à l'échelle de l'île (Lachassagne et al., 2014)

2.4.2. Les types d'aquifères à Mayotte

Cinq types d'aquifère sont observés à Mayotte (Vittecoq et al., 2014) :

- Aquifère basaltique faiblement altéré surmontant des basaltes vieux et altérés (Figure 6, I)

Ce système est composé de deux grands ensembles (BRGM/RP-61757-FR) :

- La partie supérieure, plus jeune, est composée de formations volcaniques récentes constituant un ensemble multicouche semi-perméable,
- Le soubassement volcano-détritique ancien, plus altéré, jouant le rôle d'aquiclude.

Ce système se caractérise par ses très fortes pentes plongeant directement vers la mer. La recharge ne peut donc se produire que dans les parties les plus élevées où la pente se radoucit. Les écoulements souterrains rejoignant directement le lagon, seules de rares résurgences sont observables sur les pentes à la faveur de talweg incisés.

- Aquifère perché épais (Figure 6, II)

Ce système est caractérisé par la présence de nappes perchées au sein de laves massives fissurées et fracturées s'étant mises en place sur un substratum peu perméable à imperméable, constitué par des laves anciennes altérées (BRGM/RP-61757-FR).

Ce système est composé de deux grands ensembles :

- La partie supérieure, plus jeune, correspond à un ensemble multicouche semi-perméable où se distinguent d'épaisses structures homogènes supposées d'origine lavique séparées par de plus fines intercalations attribuées à des paléosurfaces d'altération ou des dépôts volcano-détritiques,
- Le soubassement volcano-détritique ancien, plus altéré, jouant le rôle d'aquiclude.

Les formations volcaniques les plus jeunes forment un large massif recevant une part importante des précipitations. Les écoulements à l'intérieur du massif sont conditionnés par des formations moins perméables jouant le rôle de limite étanche. Ces intercalations permettent la naissance de source dans les parties hautes alimentant les rivières pérennes.

Ce type de système, que l'on retrouve au niveau des crêtes du Bénara et sur les principaux reliefs du Sud (Mlima Choungui, Mlima Choungui Keli, Ngoujou & Boungoudravani, ...), n'est pas soumis au risque d'intrusion saline car il est déconnecté du littoral.

- Le système d'aquifère volcano-sédimentaire (Figure 6, III)

Ce système est composé de trois ensembles (BRGM/RP-61757-FR) :

- Comme pour les précédents, des formations volcaniques récentes occupent la partie sommitale formant les reliefs,
- Cette dernière repose sur d'épais dépôts d'origine volcano-détritique formant un ensemble multicouche semi-perméable très compartimenté,
- Le soubassement volcano-détritique ancien, plus altéré, jouant le rôle d'aquiclude.

Les massifs volcaniques les plus jeunes jouent le rôle de petits aquifères alimentant les rivières pérennes. Il est également possible qu'ils alimentent les horizons aquifères inférieurs appartenant aux dépôts volcano-sédimentaires. Les écoulements au sein de cet ensemble hétérogène sont encore mal appréhendés mais des aquifères ont été reconnus en forage et une vidange de ces structures en mer est supposée.

Ces systèmes sont notamment présents entre Combani et Kahani. Les dépôts volcano-sédimentaires issus du démantèlement des anciens édifices se sont mis en place sur un substratum peu perméable à imperméable constitué par les laves altérées anciennes du bouclier ancien. Les paramètres hydrodynamiques de ces systèmes sont hétérogènes, du fait de la diversité des dépôts.

- Aquifère volcanique surfacique surmontant d'anciennes coulées altérées (Figure 6, IV).

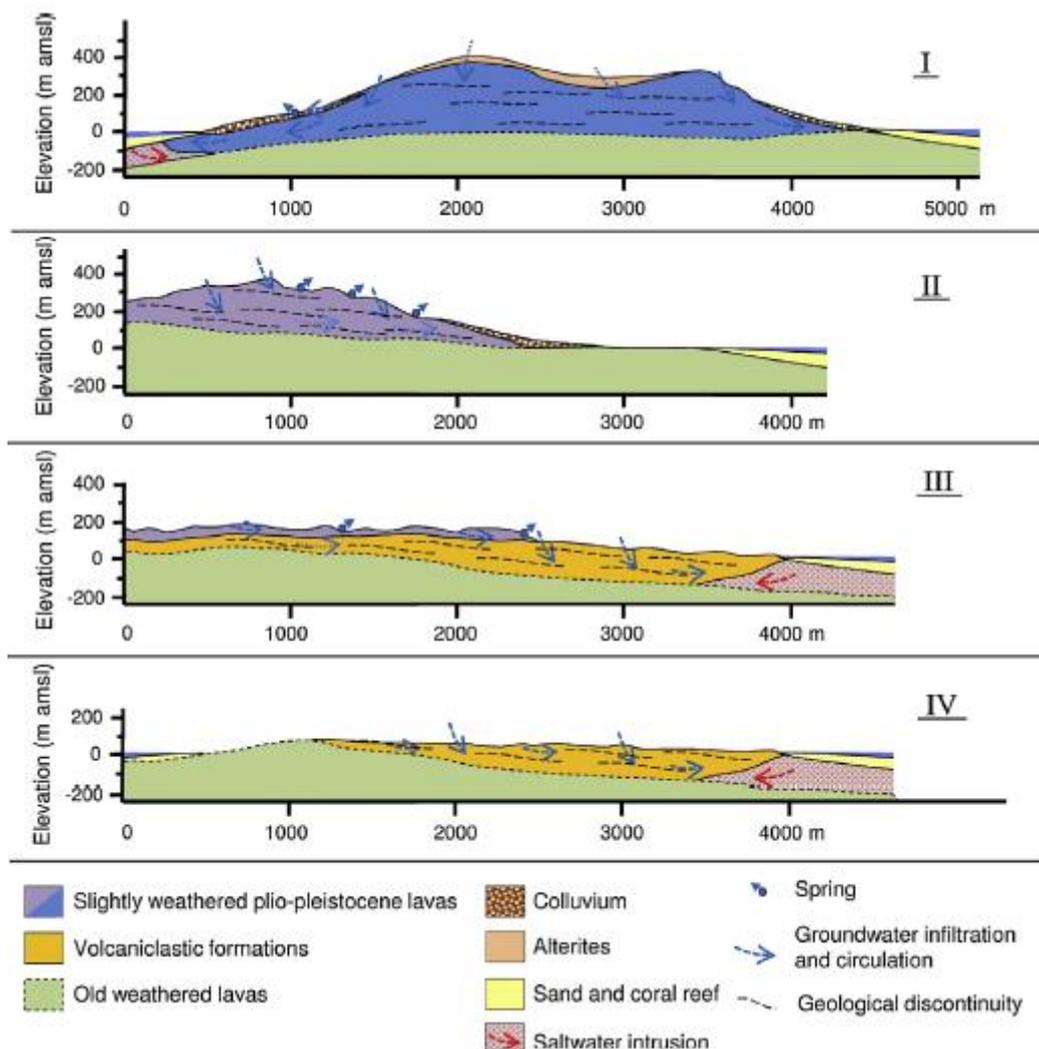


Figure 6 : Modèles conceptuels des principaux aquifères observés à Mayotte (Vittecoq et al., 2014)

- Le système d'aquifère des paléovallées

Les systèmes de paléovallées correspondent à des séries basaltiques venues comblées d'anciennes vallées incisées lors d'épisodes éruptifs. Ce système est composé de trois ensembles :

- Des massifs volcaniques interstratifiés occupent la partie sommitale formant les reliefs,
- Sous une couverture volcano-sédimentaire peu perméable, un second ensemble de formation lavique multicouche semi-perméable constitue le système aquifère,
- Le soubassement volcano-détritique ancien, plus altéré, jouant le rôle d'aquiclude.

Les massifs volcaniques les plus récents jouent le rôle de petits aquifères alimentant les rivières pérennes. Une partie des précipitations est également captée par les formations laviques sous-jacentes alimentant des aquifères captifs.

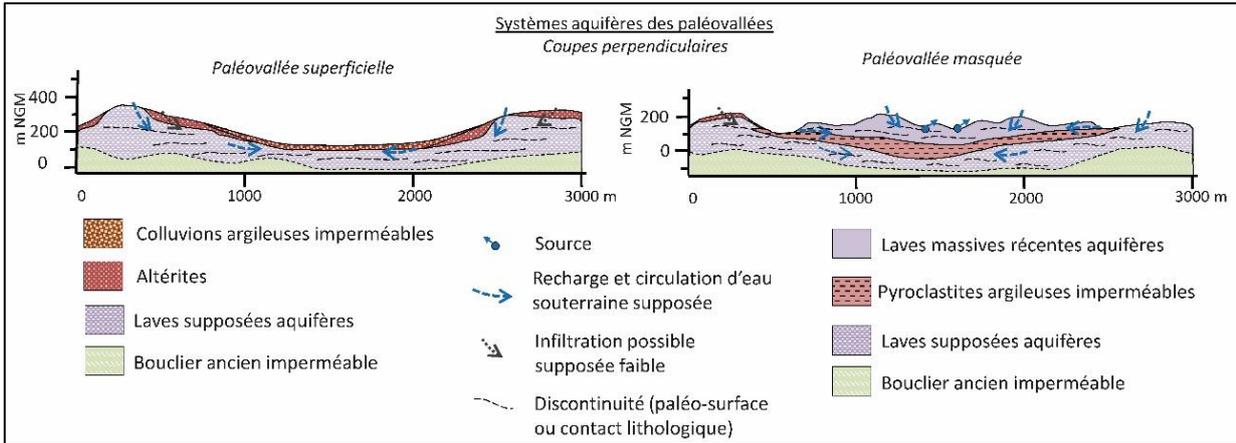


Figure 7 : Schéma hydrogéologique conceptuel des paléovallées

3. Présentation de l'approche pluridisciplinaire et méthodologie

3.1. CHOIX DES SITES DE LA PRESENTE ETUDE

Au vu du contexte mahorais, 8 secteurs d'étude ont été choisis :

- Les secteurs des forages EDCH de Kawéni Lajolie et de Bouyouni où il est proposé d'augmenter le débit ;
- Les secteurs de Mronabéja – Mbouini, Mtsangamouji, Méresse et Bandrélé car ce sont des secteurs sélectionnés pour l'implantation de nouveaux forages dans le cadre de la 6^{ème} campagne de forage ;
- Le secteur de Miréréni-Chirongui (également nommé Mréréni dans le présent rapport) car un forage a été réhabilité et mis en exploitation en 2022) ;
- Le secteur de Mohogoni où deux forages sont en exploitation et dans la plaine alluviale.

Sur tous ces sites, il sera tenté de localiser l'interface eau douce / eau salée, si les données le permettent. Leur sélection s'appuie sur de précédentes études citées au cas par cas dans les paragraphes suivants et des données chimiques illustrant de potentielles invasions marines :

- Le secteur du forage AEP de Méresse (12306X0046/BOUY) (zone nord - Figure 8) est situé sur une zone où une intrusion saline a été partiellement localisée à l'aval lors d'études géophysiques antérieures (BRGM/RP-59550-FR) ; le forage pourrait être potentiellement atteint si un futur forage AEP situé plus en amont venait à être exploité ;
- Le secteur de Mohogoni (zone nord - Figure 8) : d'anciennes données de prospections géophysiques (BRGM/RP-59550-FR) laissent supposer la présence d'une intrusion saline au droit du village de Dzoumogné. Les deux forages AEP de Mohogoni (12302X0025/MOHOG et 12302X0101/MOHOF2) ont vu récemment leurs débits d'exploitation augmenter au-delà des préconisations, et ce en raison de différents problèmes liés à l'exploitation d'autres ressources en eau. Il convient donc de s'assurer que l'équilibre eau douce - eau salée ne soit pas perturbé par cette augmentation de débit, au droit des forages ;
- Le secteur de Mtsangamouji (zone nord - Figure 8) : le forage AEP de Mtsangamouji, « artésien » (12306X0017/MTSAN1), est suivi dans le cadre du contrôle de surveillance (RCS) DCE des masses d'eau souterraine. Celui-ci présente depuis quelques années une physico-chimie particulière pouvant être en relation avec une influence marine ou une relation nappe-rivière. De plus, la 6^{ème} campagne de forage programmée en 2023 prévoit un site d'implantation en amont des deux forages actuellement exploités (12306X0017/MTSAN1 et 12306X0016/MTSAN2) ;
- Le secteur de Bandrélé (zone sud - Figure 9) : cette zone a fait l'objet en 2004 d'une première étude d'identification du biseau salé (BRGM/RP-53119-FR). Celle-ci préconisait d'améliorer les connaissances sur la structure et le fonctionnement de l'aquifère afin de sécuriser son exploitation. Un forage abandonné (Bandrélé-Dagoni 12313X0033/BAND) a fait l'objet d'un diagnostic/nettoyage en vue de son exploitation qui, à l'issue des pompages d'essai et de l'analyse de première adduction réalisés en 2019, il a été décidé de ne pas le mettre en exploitation. De plus, un site d'implantation a été choisi sur cette zone dans le cadre de la 6^{ème} campagne de forage AEP ;
- Les alluvions de Mréréni-Chirongui (zone sud - Figure 9) : à l'instar du forage de Bandrélé-Dagoni, un forage abandonné qui a été réhabilité (12312X0035/MRERE2) et a été équipé pour son exploitation en 2022. Toutefois, certains experts locaux révèlent que

l'exploitation de cet ouvrage a été prématurément interrompue « pour cause de biseau salé ». A ce jour, aucun document papier ou numérique ne permet de documenter ces dires ;

- Le secteur de Mronabéja - Mbouini (zone sud - Figure 9) : suivi dans le cadre du RCS DCE, le forage AEP de Mronabéja (12316X0032/MRONAB) présente un faciès hydrogéochimique atypique (forte minéralisation) nécessitant un complément d'acquisition de données afin de définir l'origine de cette minéralisation. De plus, nous nous intéresserons à la zone du futur forage AEP (6^{ème} campagne) situé à Mbouini.

La forme et l'extension du biseau salé sont régis par des lois d'équilibre hydrodynamiques et par des phénomènes de diffusion (BRGM/RP-38847-FR). L'exploitation des aquifères influant sur la position et la forme de la zone de contact, la distance de l'aquifère capté à la mer ainsi que l'altitude ont été compilées pour chaque forage de l'étude dans le Tableau 1.

Secteur	Forage existant	Altitude (mNGM)	Profondeur atteinte (mNGM)	Distance à la mer (m)
Méresse	12306X0046/BOUY	26	- 56	880
Mohogoni	12302X0025/MOHOG	11	- 31,5	530
	12302X0101/MOHOF2	10	- 69,7	600
Mtsangamouji	12306X0017/MTSAN1	50	- 31	1400
Bandrélé	12313X0033/BAND	18,1	- 61,9	605
Mréréni-Chirongui	12312X0035/MRERE2	15	- 55	940
Mronabéja - Mbouini	12316X0032/MRONAB	7	- 63	360
Kawéni	12307X0021/KAOUÉ3	21	- 40	1300
Bouyouni	12306X0024/BOUY	48	- 76	1500

Tableau 1 : Récapitulatif des forages présents sur les secteurs d'étude avec leur altitude, leur profondeur atteinte et la distance à la cote



Figure 8 : Localisation des secteurs sensibles à prospecter en zone nord.

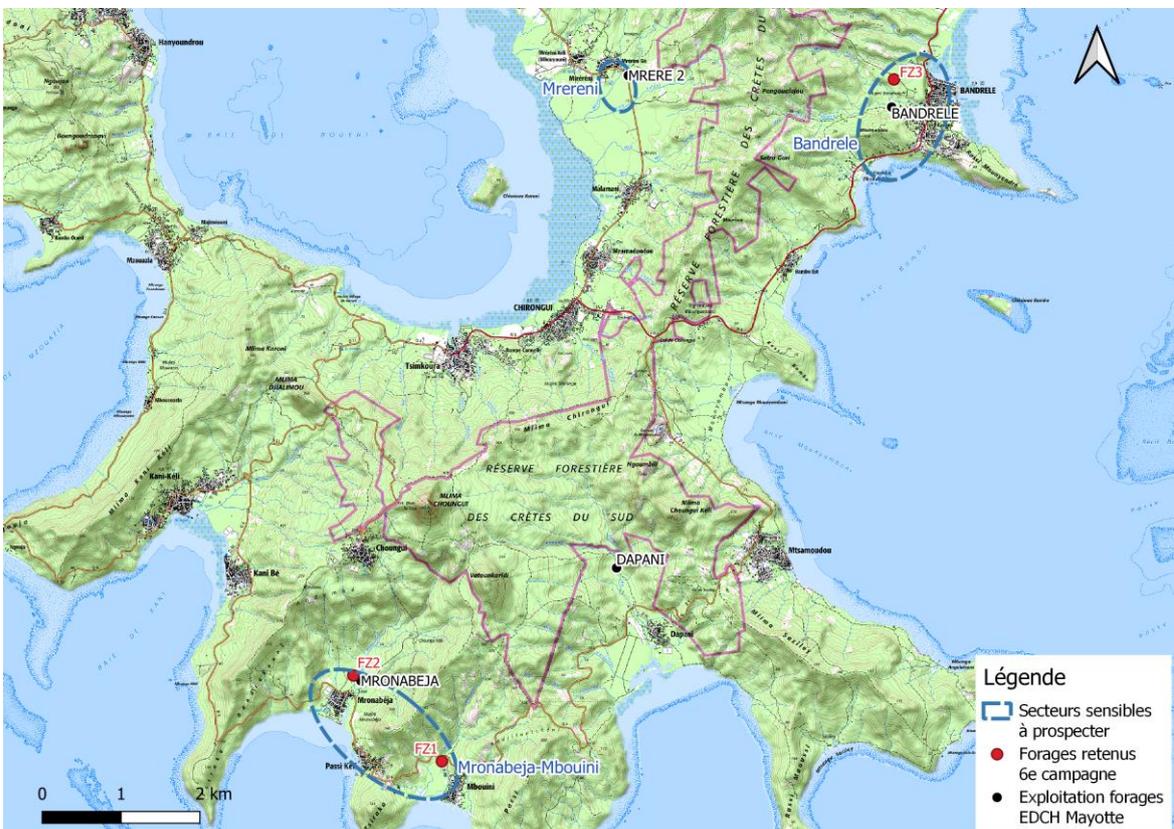


Figure 9 : Localisation des secteurs sensibles à prospecter en zones centre et sud.

3.2. CONSISTANCE DES INVESTIGATIONS

Afin de considérer l'ensemble des processus complexes liés à la structure et l'évolution du phénomène d'intrusion saline en domaine volcanique, il est nécessaire d'appliquer une approche pluridisciplinaire qui permet d'appréhender cette complexité en mettant en œuvre : une synthèse des données disponibles, ainsi qu'une acquisition et une interprétation de données géochimiques et géophysiques (tomographie électrique et électromagnétisme aéroporté AEM).

L'ensemble de programme se décompose en quatre tâches principales :

- (1) synthèse et interprétation des données hydrogéologiques et hydrochimiques existantes ;
- (2) exploitation des données AEM (levé géophysique de 2010) ;
- (3) caractérisation spatiale de l'invasion salée au droit des forages par panneaux électriques ;
- (4) diagraphies physico-chimiques (incluant la conductivité électrique) + analyses chimiques et isotopiques en forage. La méthodologie employée est détaillée au paragraphe 3.3. Les investigations visent à déterminer si une influence, ou la présence, d'eaux salées peut être détectée dans les ouvrages échantillonnés.

Cette étude a vocation à caractériser l'intrusion saline et proposer des pistes pour minimiser les risques de salinisation des aquifères.

L'ensemble du programme technique, se basant sur des approches pluridisciplinaires, ne s'étend pas à toutes les zones sélectionnées et présentées sur les Figure 8 et figure 9. En effet, le programme est établi selon les spécificités et caractéristiques des ouvrages, leur accessibilité et leur localisation. Ainsi, les ouvrages exploités par le SIEAM et la SMAE ne permettent pas, par exemple, la réalisation de diagraphies physico-chimiques. Il n'est pas prévu non plus d'analyses chimiques et isotopiques sur tous les sites.

La tomographie électrique n'a pas été réalisée sur 3 secteurs pour différentes raisons :

- Le secteur de Mtsangamouji : L'examen préliminaire des résultats AEM a montré un qu'au niveau des forages il n'existait pas d'indice d'intrusion saline dans la limite de l'investigation géophysique soit jusqu'à 100-150 m de profondeur. La zone d'intérêt (autour des forages existants) est par ailleurs fortement urbanisée, avec plusieurs canalisations souterraines métalliques. Dans ces conditions, les interférences attendues de ces infrastructures métalliques, conductrices sur les résultats TRE ont conduit à abandonner les investigations TRE sur ce site.
- Le secteur de Miréni-Chirongui, noté Mréni dans le Tableau 2 ci-dessous : ce secteur présente un terrain conducteur jusqu'à environ 50-100 m de profondeur. Les investigations TRE réalisées dans à proximité en 2016 (BRGM/RP-66923-FR) confirment la présence de ces terrains conducteurs que l'on ne peut a priori pas distinguer des intrusions salines. Dans ces conditions de nouvelles investigations TRE n'apporteraient pas d'informations supplémentaires par rapport aux données AEM.
- Le secteur de Bandrélé : le profil se situait au niveau de nombreuses clôtures, limitant l'accès et compliquant significativement le déploiement des équipements sur 1km.

Ainsi, ces trois secteurs n'ont pas fait l'objet de tomographie électrique. Le tableau 2 synthétise les interventions initialement prévues et celles réalisées par secteur dans le cadre de l'étude.

Secteur \ Tache	Retraitement des données AEM	Tomographie électrique	Diagraphie physico-chimique		Chimie		Isotopie	
			F	Pz	F	Pz	F	Pz
Mohogoni	X	X			X			
Méresse	X	X			X			
Bouyouni	X	X			X		X	
Kawéni	X	X		X	X	X	X	X
Mtsangamouji	X	X			X			
Mréréni	X	X		X		X		
Bandrélé	X	X	X (Abn)		X			
Mronabeja	X	X		X	X	X		

Tableau 2 : Synthèse des investigations prévues (orange) et réellement menées (noir) par secteur – F indiquant un forage ; Pz un piézomètre et Abn pour abandonné.

3.3. METHODES GEOCHIMIQUES UTILISEES : MESURES IN-SITU

En préalable, on rappelle que :

- Les informations des diagraphies physico-chimiques ne sont considérées que dans la partie crépinée des ouvrages, le renouvellement de l'eau dans le tube plein (en sommet de forage) pouvant être très aléatoire voire inexistant ;
- Les débits, et donc les volumes d'eau pompés avec des pompes submersibles, sont très inférieurs à ceux que l'on peut attendre sur un ouvrage équipé d'une pompe à demeure. Ici, les débits de pompage pour les ouvrages non équipés de pompe étaient voisins de 2 m³/h. De plus, le pompage est opéré sur une courte durée. On ne peut donc pas présager de ce qui se passerait si l'ouvrage était exploité en continu avec une pompe de débit beaucoup plus élevé. On peut juste déterminer si un petit pompage engendre, ou non, des modifications dans la colonne d'eau du forage.

3.3.1. Diagraphies physico-chimiques

Sur les 8 secteurs d'étude, 3 piézomètres et un forage abandonné ont permis le passage d'équipement dans le forage. Ces ouvrages non équipés ont fait l'objet d'une caractérisation par diagraphie physico-chimique, à la descente, d'abord en écoulement naturel (sans pompage), puis immédiatement après la réalisation d'un pompage dans la colonne d'eau, à une ou deux profondeurs différentes. La seconde diagraphie (après pompage d'environ 2 m³/h) est destinée à évaluer l'impact du pompage sur la structure de la colonne d'eau.

Les diagraphies physico-chimiques ont été opérées avec une sonde Idronaut 303Plus (Figure 10), équipée de capteurs de température, pression, conductivité électrique, pH, potentiel redox et oxygène dissous. Les variations de ces paramètres sont mesurées toutes les secondes. Les vitesses de descente (descente opérée manuellement) constatées sur site sont entre 4,6 et 5,7 m à la minute. Compte-tenu du temps de réponse des capteurs (au maximum de 3 secondes), la localisation des changements de paramètre se fait avec une précision verticale de 20 à 30 cm.



Diagraphie physico-chimique



Pompage

Figure 10 : Aperçu des investigations de terrain : à gauche, sonde de diagraphie physico-chimique ; à droite, pompage en cours de réalisation avec pompe immergée

3.3.2. Prélèvements d'eau

Le [guide Aquaref relatif aux opérations d'échantillonnage en eau souterraine dans le cadre des programmes de surveillance DCE](#) recommande de prélever après la purge de l'ouvrage. Le critère principal de fin de purge est la stabilisation des paramètres physico-chimiques de terrain (pH, température, conductivité, oxydo-réduction et O₂ dissous). Il est demandé, par défaut, de respecter au minimum le renouvellement de 2 à 3 fois la colonne d'eau dans l'ouvrage pour les ouvrages sans pompe à demeure. Pour les ouvrages EDCH, il faut veiller à purger tout le système de robinetterie.

Sur les dix ouvrages échantillonnés, six étaient équipés d'une pompe installée à demeure dans le forage. Les prélèvements ont donc été effectués en faisant circuler l'eau par le point de piquage (ici robinet de prélèvement) présent sur la canalisation d'exhaure, en tête du forage, avec la pompe en marche, afin de créer une circulation d'eau dans la canalisation (Figure 11). Conformément aux recommandations Aquaref, les paramètres physico-chimiques ont été suivis pendant 15 minutes, afin de vérifier la stabilité de ces paramètres, avant de réaliser le prélèvement. Les paramètres ont été vérifiés à l'issue des prélèvements, afin de s'assurer qu'il n'y a pas eu de changement durant la phase de prélèvement. On notera enfin que la majorité des points de piquage sont soit constitués par des robinets en laiton, matériau qui n'est pas adapté pour la recherche d'éléments métalliques en traces (contamination possible), soit par un acier indéterminé (non inox) et pouvant comprendre des connecteurs en acier standard, rouillé, ce qui n'est pas non plus conseillé pour la recherche d'éléments métalliques en traces.

Lorsque les ouvrages n'étaient pas équipés d'une pompe en place, alors une pompe immergée (Grundfos MP1) a été descendue dans la colonne d'eau, au niveau de la crépine. Sur les 4 ouvrages pompés, trois avaient un tubage de diamètre 80 mm, le dernier ayant un diamètre de 226 mm. Pour les 3 ouvrages à tube de faible diamètre, un pompage à environ 2 m³/h permet de purger 3 fois le volume de la colonne d'eau (0,2 à 0,3 m³) en 20 à 25 minutes, et de vérifier en parallèle la stabilisation des paramètres physico-chimiques. On respecte alors sans difficulté les deux critères recommandés par les bonnes pratiques. Pour l'ouvrage de plus gros diamètre (Bandréle Dagoni, 12313X0033/BAND), le volume de la colonne d'eau (2,4 m³) aurait nécessité plusieurs heures de pompage pour être renouvelé 3 fois. Par ailleurs, sur la base des informations données par la diagraphie, on a choisi de prélever à 2 profondeurs dans cet ouvrage. On a donc choisi de ne respecter que le critère de stabilisation des paramètres pour réaliser le prélèvement, et de prélever sous débit de pompage réduit (1 m³/h) le 1^{er} horizon, afin de ne pas déstructurer la colonne d'eau.

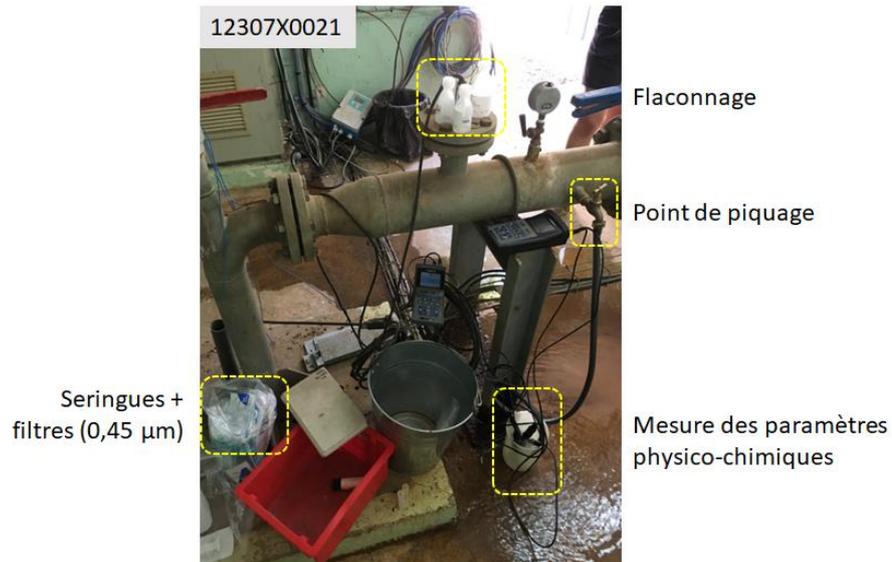


Figure 11 : Mesure des paramètres physico-chimiques sur un forage équipé, par dérivation installée sur un point de piquage. Les flacons de prélèvement et le nécessaire de filtration sont également identifiés.

3.4. RETRAITEMENT DES DONNEES GEOPHYSIQUES AEROPORTEES ET METHODOLOGIE DE REPERAGE DE L'INTRUSION

Les données d'électromagnétisme aéroporté (« Airborne ElectroMagnetism » en anglais, AEM) ont été acquises en 2010 par l'entreprise SkyTEM, sous maîtrise d'œuvre du BRGM. Afin d'obtenir des résistivités électriques les plus justes, résolues et profondes possibles, un retraitement spécifique sur les secteurs ciblés a été réalisé dans le cadre de cette étude. Les données, leur acquisition et leur traitement sont présentées au paragraphe 8.1 en annexe.

L'électromagnétisme aéroporté est particulièrement sensible aux variations de salinité de l'eau. La cartographie des résistivités permet ainsi d'imager la salinisation des aquifères côtiers. On peut pointer l'interface eau douce / eau salée sur les profils de résistivité et ainsi définir la géométrie et l'étendue de l'intrusion. À la Réunion, les confrontations géophysique/log de conductivité électrique de l'ensemble du réseau RIS de l'Office de l'eau [BOURHANE et al., 2016], ont permis de définir un seuil de résistivité de 10 $\Omega.m$ à partir duquel l'aquifère est saturé par de l'eau de mer, et cela pour tous types de contextes géologiques. Dans des contextes plus conducteurs, un seuil légèrement plus bas semble correspondre : le seuil de 4 Ohm.m a été retenu à Marie-Galante et Grande-Terre en Guadeloupe (BRGM/RP-66915-FR et BRGM/RP-65123-FR) ; celui de 2 Ohm.m a été retenu sur des secteurs alluvionnaires et 6 Ohm.m utilisé sur des secteurs calcaires en Martinique (BRGM/RP-60828-FR);

Nous avons dans un premier temps pointé deux seuils : 4 et 8 Ohm.m, l'un étant plus restrictif et l'autre plus prudent. A noter qu'il peut exister une zone de mélange eau douce – eau salée. Le pointé automatique de ces deux seuils (puis correction manuelle de quelques points aberrants) a permis de donner une première idée de la géométrie de l'intrusion saline.

Pour ces deux seuils, la même méthodologie a été utilisée :

- Pointé automatique de la première fois qu'on dépasse ce seuil de résistivité, en partant de la limite de la profondeur d'investigation (du fond).
- Corrections manuelles
 - o En retirant les pointés isolés et trop proches de la profondeur d'investigation ;
 - o En retirant les points qui remontent en altitude alors que l'on rentre dans les terres ;
 - o En pointant les limites d'un deuxième niveau d'intrusion quand c'est nécessaire (lorsque l'eau de mer pénètre dans différentes couches aquifères, donnant l'impression sur les données AEM d'avoir deux intrusions salines, une peu profonde et une profonde) Un exemple est présenté sur la Figure 12.

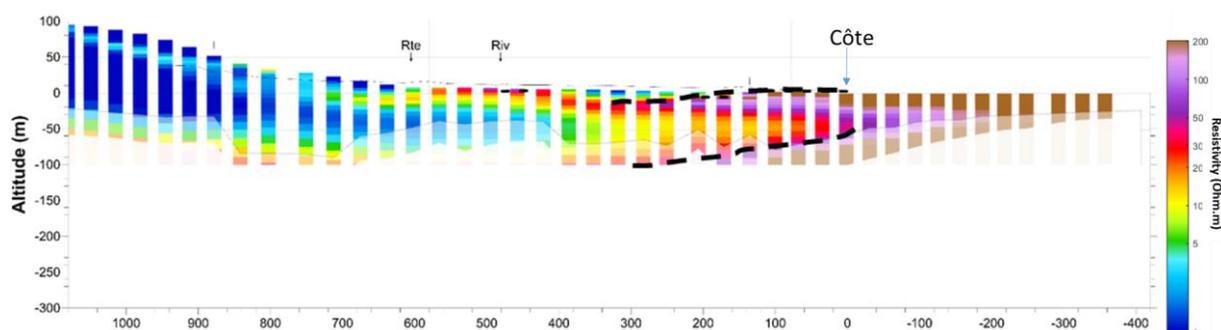


Figure 12 : Exemple de profil AEM sur lequel une deuxième intrusion saline, plus en surface, a dû être pointée manuellement.

Sur le profil AEM, le conducteur est à la limite de la profondeur d'investigation. Le résultat présenté a deux seuils de profondeur d'investigation :

- Un représenté par un masque blanc opaque, masquant les données en lesquelles il ne faut pas faire confiance,
- Un avec un masque blanc semi-opaque, correspondant aux données pour lesquelles la confiance est réduite. Là, par exemple, on sait qu'on a un corps conducteur en profondeur, cependant, le fait qu'on atteigne exactement 4 Ohm.m est plus incertain.

3.5. PRINCIPES D'INTERPRETATION DES TOMOGRAPHIES DE RESISTIVITE ELECTRIQUE (TRE)

Les intrusions salées se marquent en imagerie par Tomographie de Résistivité Electrique, TRE au sol comme en AEM par des anomalies conductrices (faible résistivité) dues à l'effet de la résistivité des eaux marines ($\rho_w=0.3$ Ohm.m environ) et des eaux saumâtres (0.3 Ohm.m $< \rho_w$ <résistivité de l'aquifère) sur la résistivité de formation, ρ selon la loi d'Archie simple, (Archie, 1941), telle que :

$$\rho = F \rho_w \quad \text{avec } \rho = \text{résistivité de la formation, } F = \text{facteur de formation} = a \varphi^m,$$

avec m et a , les paramètres caractéristiques de la formation, et φ la porosité remplie par l'eau de formation.

Dans le cas d'une composante argileuse de la formation, la relation est plus complexe et peut être décrite sous la forme (Waxman & Smit, 1968) :

$$1/\rho = 1/(F \cdot \rho_w) + 1/\rho_s, \quad \text{avec, } \rho_s = \text{résistivité de surface (surtout liée aux argiles).}$$

Dans le cas de formation non argileuse, les résistivités imagées par TRE peuvent être interprétées directement en terme d'intrusion salée. En présence d'argile, qui est une composante importante des profils d'altération comme à Mayotte, l'interprétation n'est pas univoque. Autrement et simplement dit, une même unité conductrice imagée par géophysique peut correspondre soit à une intrusion salée, soit à une formation argileuse sans qu'il ne soit possible de discriminer les deux interprétations possibles à partir des seules données ou résultats géophysiques.

Dans le cadre de notre étude et en l'absence de forage de calibration, l'interprétation des imageries TRE est manuelle et essentiellement qualitative. Elle repose sur les principes suivants :

- L'intrusion salée est définie et tracée depuis la zone marine sur la base de l'imagerie AEM qui couvre le domaine marin et terrestre. Les critères de résistivité définissant l'intrusion saline en TRE ont été définis qualitativement en accord avec l'imagerie AEM suivant les isocontours 10 et 20 Ohm.m. Bien que les deux méthodes reposent sur le même paramètre de résistivité électrique, les procédés de mesure et les traitements appliqués, jusqu'à l'obtention du résultat sous forme d'imagerie de résistivité, transforment l'information de façon que les résistivités obtenues par chaque méthode ne sont pas toujours directement comparables. Aussi les résultats présentés pour chaque méthode utilisent des échelles différentes. Les critères numériques de définition des unités attribuables aux intrusions salées sont aussi différents pour chacune des deux méthodes. Les échelles et critères retenus apparaissent toutefois, qualitativement, comme

permettant la comparaison la plus aisée entre les résultats des deux méthodes et la définition la plus fiable des intrusions salées ;

- Suivant les principes généraux des intrusions salées dont une expression simplifiée est donnée par le modèle de Ghyben-Herzberg, l'interprétation de l'imagerie de résistivité considère les contours des unités conductrices définies par les indicateurs numériques précités s'approfondissant progressivement à mesure que l'altitude augmente et que l'on s'éloigne du rivage ;
- Suivant le même principe, les contours des unités conductrices attribuables aux intrusions salées ne peuvent recouper le 0 altimétrique, sauf à faire appel à des intrusions marines occasionnelles, quelques mètres au-dessus du 0 altimétrique. Les contours s'établissant au-dessus du 0 altimétrique ne sont *a priori* pas retenus comme des intrusions plausibles ;
- Des isocontours de résistivité faible « remontant l'altimétrie » avec les critères numériques précités peuvent toutefois être interprétés comme des secteurs influencés par une composante océanique (embruns, sédiments salés, submersion marine, etc..). Dans ces cas, des processus d'invasion plus complexes ne peuvent-être exclus tel que des invasions se produisant latéralement (par rapport à la direction du profil) le long des rivières et des sédiments perméables qui y seraient associés.

4. Résultats géochimiques

4.1.1. Diagraphies physico-chimiques

a) Piézomètre de M'Ronabéja

Les diagraphies réalisées dans le piézomètre 12316X0031/MRO1 sont reportées dans la figure 44, et comparées avec une diagraphie de conductivité électrique réalisée en 1991, environ 1 an après la réalisation du forage (Mauroux, 1992). Aucune précision n'est donnée quant au référentiel d'expression de la conductivité électrique (normalisée à 25°C ou exprimée à la température du fluide). En conséquence, si ces mesures sont exprimées à la température de l'eau (entre 26 et 27°C), alors la valeur à 25°C sera légèrement inférieure : par exemple, une mesure de 500 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à 26°C donnera une valeur de 490 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à 25°C, et une mesure à 27°C donnera une valeur de 481 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à 25°C.

On rappelle par ailleurs que les profils n'ont de signification que dans la zone crépinée, là où une circulation d'eau est possible. Dans le tube plein, il n'y a pas de circulation d'eau possible (hormis éventuellement par convection thermique) et l'eau qui est présente n'est jamais renouvelée, et peut donc évoluer. Les commentaires suivants peuvent être faits :

- Profil de température :
 - Tout au sommet de la colonne d'eau, la température est influencée par la température externe (forçage thermique lié au tubage) ;
 - Ensuite décroissance de la température jusqu'à 25 m de profondeur, y compris en sommet de crépine (entre 15 et 25 m de profondeur) ;
 - On identifie ensuite 3 paliers de hausse rapide en température (25-28 m, 32-35 m et 40-42 m), entre lesquels la température varie très peu ;
 - Vers la base de la crépine, la température augmente à nouveau nettement ;
 - Ce profil peu linéaire peut suggérer l'existence de 3 zones de circulation d'eau au sein de l'aquifère, respectivement entre 28 et 32 m, 35 et 40 m puis 42 et 47 m, zones dans lesquelles la circulation permet une homogénéisation en température de l'eau.
 - Le pompage, pratiqué à 43 m de profondeur, donc dans une zone potentiellement productrice, induit une légère baisse de température en dessous de 25 m de profondeur (-0,1 à -0,2°C) et le contraire plus haut. Pour cette évolution en sommet de colonne d'eau, le passage de la sonde puis la descente et le retrait de la pompe peuvent expliquer ce changement, si on suppose une absence quasi-totale de production d'eau (on mélange alors des eaux par le passage des outils). En dessous de 25 m, le profil de température reste assez structuré (on peut toujours identifier des paliers de température, surtout vers 40 m de profondeur), ce qui indique que le pompage pratiqué à 43 m ne sollicite pas les horizons entre 30 et 40 m, et par conséquent que la productivité de l'horizon profond (42-47 m) est nettement supérieure à la capacité de pompage de la pompe utilisée.
- Profil de conductivité électrique :
 - Au contraire de la température, ce profil est invariant du haut en bas de la colonne d'eau, que l'on regarde le profil avant ou après le pompage. Les effets de brassage sont donc uniquement des effets thermiques, et n'ont pas d'impact sur la structure chimique de la colonne d'eau. Par ailleurs, s'il existe bien plusieurs horizons productifs, ils ne se distinguent pas chimiquement. Un seul prélèvement doit donc suffire à caractériser l'aquifère au droit de ce forage.

- Une question peut venir en lien avec la forte augmentation de conductivité tout au fond du forage. On soulignera que :
 - Cette augmentation se voyait déjà sur le profil de 1991, qui par ailleurs affiche des conductivités électriques nettement plus basses que celles mesurées actuellement, mais tout aussi peu variables entre 5 et 50 m de profondeur.
 - L'évolution entre 1991 et 2021 compare une donnée acquise très peu de temps après la réalisation du forage et une donnée acquise après une longue période d'écoulement naturel : il n'est pas possible de déterminer si la hausse de conductivité électrique constatée est uniquement liée à l'évolution du forage et de l'écoulement au sein de celui-ci, ou si la hausse de conductivité reflète une évolution de chimie de manière globale au sein de l'aquifère. Cette dernière hypothèse est sans doute difficile à affirmer, car cela supposerait que tous les horizons producteurs soient impactés de manière identique par cette évolution. On penchera donc plutôt pour une évolution liée à l'écoulement dans un forage au cours de son vieillissement.
 - Faire un lien avec une augmentation de conductivité liée à une présence plus importante d'eau plus conductrice (plus salée ?) en base d'ouvrage paraît très aléatoire. En effet, il est beaucoup plus probable que cette augmentation soit uniquement liée à la pénétration dans les sédiments qui ont décanté, avec le temps, au fond de l'ouvrage. On retrouve d'ailleurs ce phénomène dans les autres forages. D'autre part, les autres paramètres connaissent également des évolutions soudaines, liées à l'obturation des parties des capteurs (pH, redox notamment).
- Profil de pH : tout comme le profil de conductivité électrique, le profil de pH est invariant dans la colonne d'eau, ce qui renforce le constat d'homogénéité chimique au sein des niveaux aquifères captés. Le pH est proche de la neutralité.
- Profil de potentiel redox (Eh) : on considère ici les mesures de potentiel redox exprimées en référence au potentiel standard de l'électrode hydrogène (ESH). Le potentiel est légèrement oxydant, ce qui est conforme à la présence résiduelle d'oxygène dissous dans l'eau, et sa valeur varie peu dans la colonne d'eau, compte tenu des incertitudes liées à la mesure de ce paramètre (± 10 mV dans le meilleur des cas, ± 50 mV dans le pire des cas).
- Profil d'oxygène dissous : la concentration en oxygène dissous (ou sa saturation) est faible, homogène tout au long de la crépine, le passage tube plein – crépine étant marqué par un petit épaulement, indiquant bien que l'eau dans le tube plein n'est pas renouvelée (valeurs plus basses que dans la crépine).

Hormis une certaine variabilité pour le profil de température, tous les autres paramètres sont invariants dans la colonne d'eau, indiquant la présence d'une masse d'eau homogène, et justifiant la réalisation d'un seul prélèvement dans cet ouvrage. Par rapport à la profondeur de l'ouvrage telle qu'indiquée par la coupe technique (56 m), on constate un comblement de quelques mètres en base d'ouvrage. Pour des ouvrages à crépine longue, ce qui est le cas ici, il peut être indiqué de pratiquer des pompages à plusieurs profondeurs lorsque des hétérogénéités physico-chimiques sont relevées. Ici, la seule indication que l'on ait est celle fournie par les mesures de températures, qui suggèrent la présence de 3 horizons producteurs.

Afin de prendre également en compte les bonnes pratiques d'approfondissement d'une pompe dans un ouvrage, qui recommandent de la placer dans le tiers inférieur de la colonne d'eau, voire, mieux encore, de la crépine, on choisit donc de pratiquer le pompage à 43 m de profondeur (tiers inférieur de la crépine et au sein d'un horizon producteur) pour avoir une bonne représentativité de l'échantillonnage. Enfin, l'ensemble des paramètres mesurés n'indiquent pas la présence d'une eau plus fortement minéralisée et de pH alcalin (l'eau de mer a un pH > 8 et une conductivité électrique > 50 000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$).

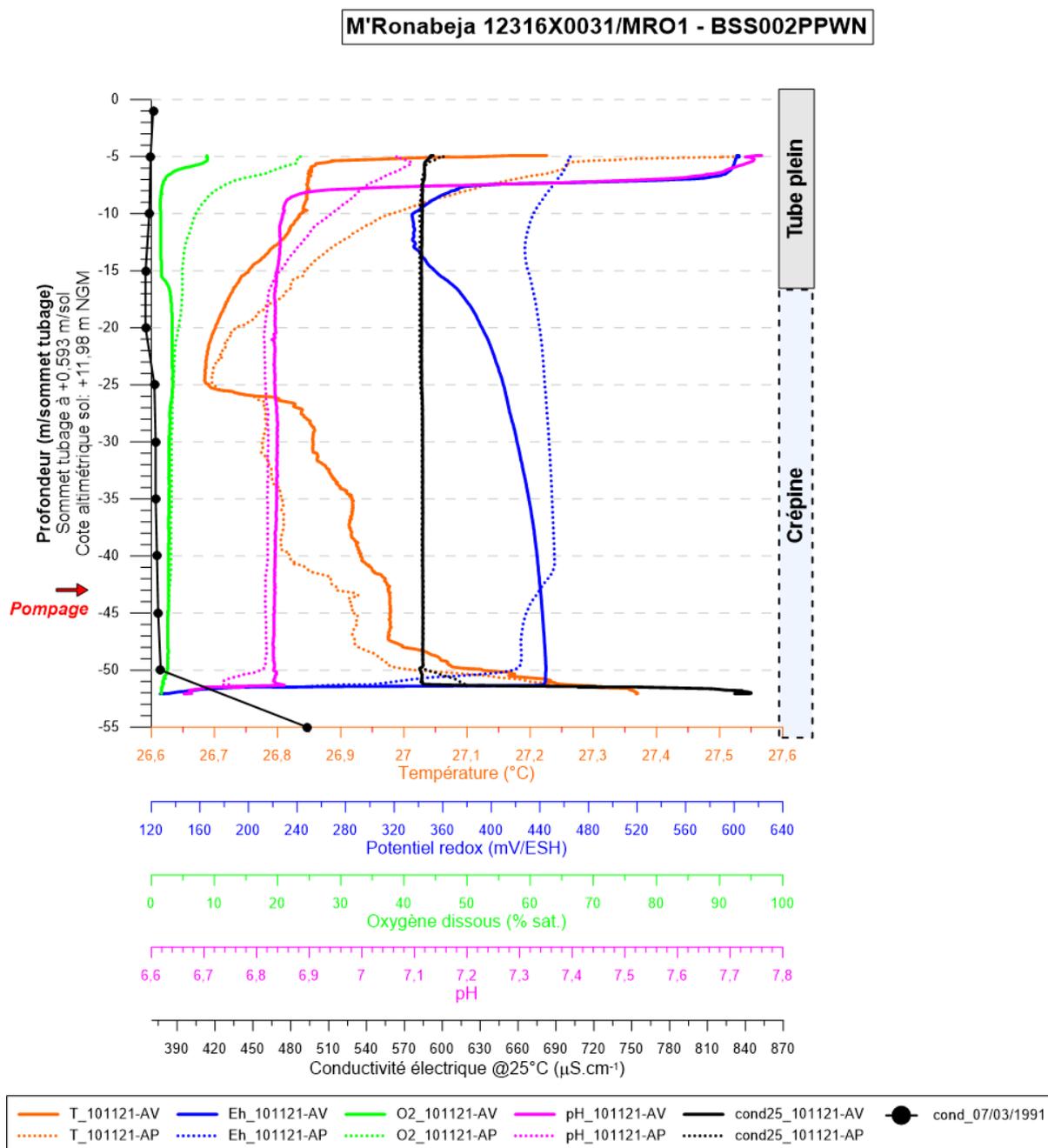


Figure 13 : Piézomètre de M'Ronabeja : diagraphie physico-chimique avant pompage (trait plein) et après pompage (tirets) ; la profondeur de pompage est indiquée par la flèche rouge.

b) Piézomètre de Mréréni-Chirongui

Les diagraphies réalisées dans le piézomètre 12312X0035/MRERE2 sont reportées dans la Figure 14, et comparées avec une diagraphie de conductivité électrique réalisée en 2002, environ 2 ans après la réalisation du forage (BRGM/RP-51603-FR). Cette dernière semblant limitée à la partie supérieure du forage (tube plein), elle n'est pas considérée plus avant et citée uniquement pour mémoire. Par contre, les investigations menées en 2002, à l'issue de la réalisation du forage, ont permis d'identifier deux zones de production d'eau, de 80 m³/h entre 54 et 60 m et de 25 m³/h entre 44 et 47,5 m.

Les diagraphies de 2021 apportent les informations suivantes :

- Profil de température :
 - o La température augmente de manière assez régulière entre 5 et 59 m de profondeur, avec un gradient très faible (de l'ordre de +0,25°C/100 m). Ceci ne permet pas d'individualiser des zones préférentielles de production de manière nette. Par contre, entre 59 et 60 m de profondeur, la température augmente fortement (+0,25°C), ce qui pourrait indiquer la présence d'une masse d'eau différente, plus chaude, en base d'ouvrage.
 - o Après pompage à 44 m de profondeur, le profil reste assez similaire, avec une remontée de la zone plus « chaude », ce qui pourrait indiquer que la production d'eau se fait plutôt via les niveaux profonds. Ceci est conforme aux conclusions des études faites en 2002 (BRGM/RP-51603-FR).
- Profil de conductivité électrique : le profil est très homogène du haut en bas de la colonne d'eau, l'augmentation constatée en base d'ouvrage étant liée à la pénétration dans les dépôts sédimentés en base d'ouvrage. Dans le détail, on peut néanmoins mettre en évidence une très légère inflexion à 59 m de profondeur, dans la zone de forte augmentation de la température. La hausse est toutefois très faible (quelques $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) et donc d'importance toute relative.
- Profil de pH : le profil de pH avant pompage est vertical, il n'y a donc pas de variabilité spatiale, et les valeurs indiquent la présence d'eau légèrement acide. Après pompage, il semblerait que l'eau à 44 m de profondeur ait un pH encore très légèrement plus acide, mais la variation mesurée est inférieure à l'incertitude de mesure ($\pm 0,1$ unité pH).
- Profil de potentiel redox : le potentiel redox en écoulement naturel est légèrement oxydant, ce qui est conforme à la présence résiduelle d'oxygène dissous dans l'eau, et sa valeur varie peu dans la colonne d'eau (on note toutefois un changement de pente vers 59 m de profondeur). Après pompage, l'allure du profil de potentiel redox diffère, mais, dans la partie crépinée, les valeurs restent globalement similaires (compte tenu de l'incertitude de mesure).
- Profil d'oxygène dissous : il reste quelques pourcents d'oxygène dissous dans le forage lorsque la mesure est faite avant pompage, avec une très légère diminution vers 59 m. Le pompage semble drainer des eaux plus riches en oxygène dissous, ce qui pourrait indiquer un faible écoulement dans le piézomètre lorsque celui-ci n'est pas sollicité par pompage. Sur la base du profil acquis après pompage, on pourrait proposer que les eaux sont plutôt produites entre 55 et 60 m de profondeur (puis drainées vers le haut par effet du pompage vers 44 m). Ceci indique que la majorité de la production se fait en base de forage, conformément aux données rapportées dans le rapport BRGM/RP-51603-FR.

Hormis de légères variations, les paramètres physico-chimiques varient peu dans la colonne d'eau, et les informations, en écoulement naturel, manquent pour déterminer la profondeur d'implantation de la pompe. Compte tenu des capacités de la pompe utilisée (longueur du câble d'alimentation de 50 m), il n'est pas possible de prétendre descendre vers 59 m de profondeur, là où quelques légères variations sont détectées. En conséquence, une profondeur de pompage de 44 m a été retenue, correspondant au sommet de la 1^{ère} zone de production d'eau dans l'ouvrage (BRGM/RP-51603-FR). On précisera que les profondeurs de déploiement de la pompe ont été déterminées sur la base des diagraphies de 2021, et comparées aux données antérieures à l'issue de la campagne de terrain.

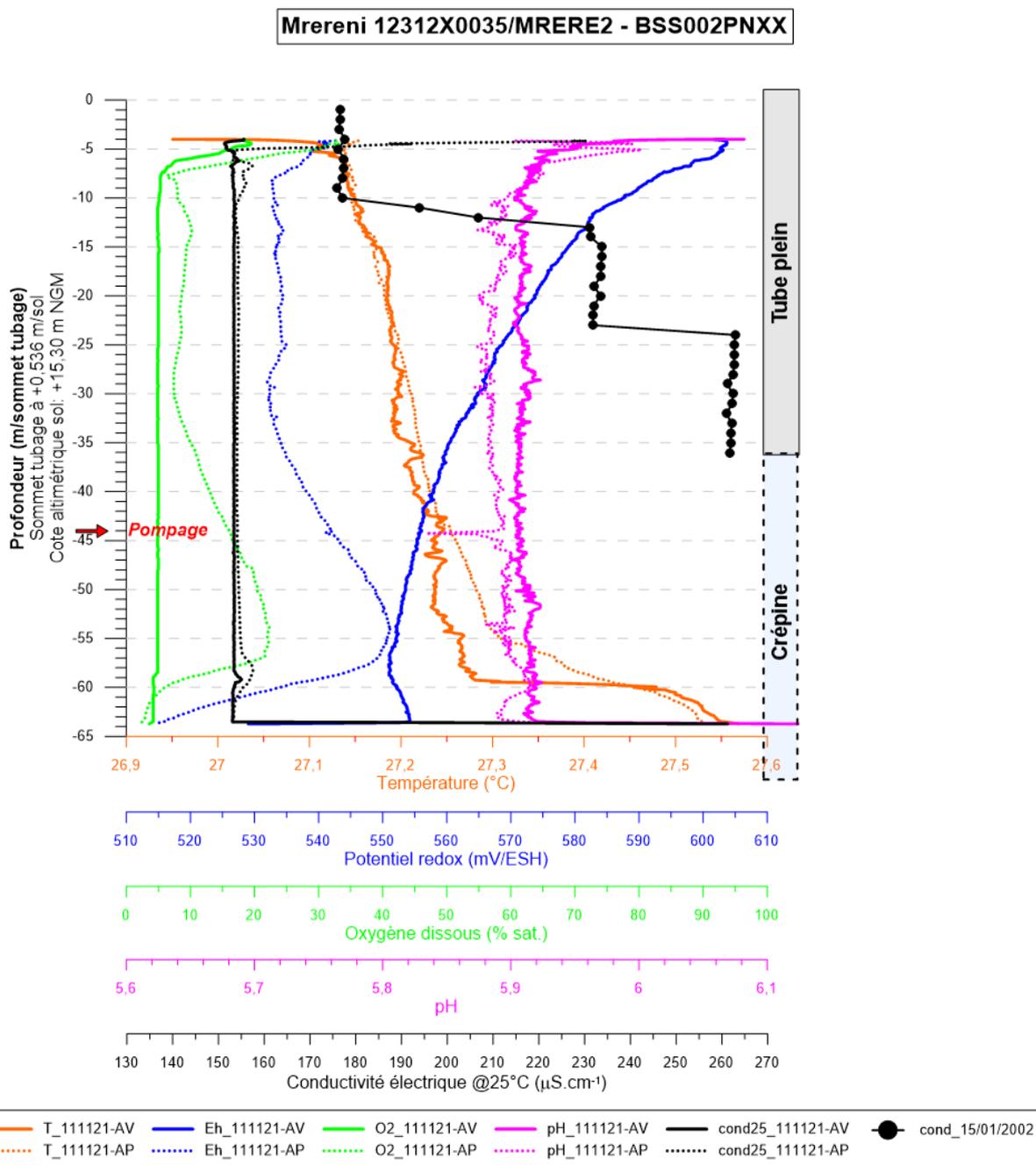


Figure 14 : Piézomètre de Mréreni-Chirongui : diagraphie physico-chimique avant pompage (trait plein) et après pompage (tirets) ; la profondeur de pompage est indiquée par la flèche rouge.

c) Forage de Bandré

Les diagraphies réalisées dans le forage 12313X0033/BAND sont reportées dans la Figure 15, et comparées à deux diagraphies de conductivité électrique réalisées en 2002, juste après la réalisation du forage (Jossot et al., 2003 – diagraphie du 03/12/02, réalisée après développement, et diagraphie du 18/12/02, réalisée après développement). Ces investigations ont permis d'identifier plusieurs zones de production d'eau, autour de 25 m (7 m³/h), 36 m (4 m³/h), 46 m (2 m³/h) et 61 m (2 m³/h).

Les commentaires suivants peuvent être faits :

- Profil de température : celui-ci est assez variable et permet de distinguer :
 - o Des zones à augmentation linéaire de la température (gradient de 1 à 1,6°C/100 m), respectivement entre 30 et 35 m de profondeur et entre 46 m et le fond de l'ouvrage.
 - o Des zones sans gradient, donc indicatrices de mouvements d'eau qui permettent une homogénéisation de la température, en sommet de crépine (entre 22 et 28 m) puis entre 36 et 46 m de profondeur.
 - o Après pompage, le profil de température est assez peu perturbé, les zones de production identifiées avant pompage étant toujours visibles.
- Profil de conductivité électrique : l'ouvrage de Bandré Dagoni est le seul présentant des variations dans le profil de conductivité électrique. On distingue :
 - o Quelques variations à la base du tube plein, entre 17 et 22 m de profondeur, ce qui peut être le signe de quelques mouvements convectifs dans cette section, et donc de la proximité d'un niveau aquifère en sommet de crépine.
 - o Un niveau de conductivité stable entre 24,5 et 29 m de profondeur.
 - o Une hausse de conductivité entre 29 et 38 m de profondeur, amenant à une valeur maximale vers 36 m de profondeur (amplitude de variation toutefois très limitée : +1,2%).
 - o Ensuite, un retour à la valeur mesurée entre 24,5 et 29 m de profondeur jusqu'en base d'ouvrage, avec une très subtile variation vers 46-47 m.
 - o En combinant ces informations avec celles de température, on peut proposer l'existence de venues d'eau entre 25 et 29 m, entre 38 et 45-46 m, et, sur la base de la seule conductivité, autour de 36 m. Ces profondeurs se comparent assez favorablement à celles rapportées par Jossot et al. (2003).
 - o Après pompage, le profil de conductivité présente des valeurs basses vers 24-25 m de profondeur, les pompages à 36 et 46 m de profondeur ayant aussi eu tendance à drainer des eaux très légèrement moins conductrices, le pic de conductivité vers 36 m étant donc lissé. Aucun changement n'est constaté plus en profondeur, suggérant que la production d'eau en basse d'ouvrage est faible.
 - o Les profils de conductivité électrique réalisés en 2002 donnaient des valeurs bien supérieures pour ce paramètre, et suggéraient que la conductivité était moins élevée dans la moitié supérieure de la crépine, et un peu plus élevée dans la moitié inférieure. Aucune de ces caractéristiques n'a été retrouvée en 2021.
- Profil de pH :
 - o Les valeurs en sommet de tubage témoignent d'une interaction de l'eau avec ce tubage, et la nette baisse constatée entre 17 et 20 m de profondeur indique que les phénomènes convectifs susmentionnés dans le tube plein concernent les

quelques derniers mètres de ce tube (le profil d'oxygène dissous fournit la même information).

- Le pH connaît une légère augmentation entre 22 et 40 m de profondeur (+0,15 unité), la valeur étant ensuite stable et très légèrement acide.
- Hormis la possibilité pour l'horizon vers 25 m d'avoir un pH très légèrement plus acide que les niveaux plus profonds, il n'existe pas d'hétérogénéité significative dans la colonne d'eau.
- Profil de potentiel redox : le profil avant pompage est assez peu informatif, hormis qu'il indique la présence d'eau contenant encore de l'oxygène dissous. Le profil après pompage est invariant dans la crépine, avec des valeurs plus élevées, montrant l'incertitude qui peut être attachée aux mesures de ce paramètre.
- Profil d'oxygène dissous : il reste quelques pourcents d'oxygène dissous dans la colonne d'eau lorsque la mesure est faite avant pompage, et celui-ci n'a aucune influence. La seule déflexion visible est liée au brassage entraîné par le passage d'outils dans le tube plein, qui perturbe le profil d'équilibre.

Comme visible sur la Figure 15, deux profondeurs de pompage ont été choisies, afin d'essayer de caractériser la très légère différence de conductivité électrique qui était visible en écoulement naturel, mais que le pompage semble avoir pratiquement gommée. Il ne semble pas possible de mettre en évidence, en résultat du pompage, le drainage d'eau de chimisme différent de celui qui prévaut en écoulement naturel, et ce tant en pH qu'en conductivité électrique.

Bandrelé Dagoni 12313X0033/BAND - BSS002PPKZ

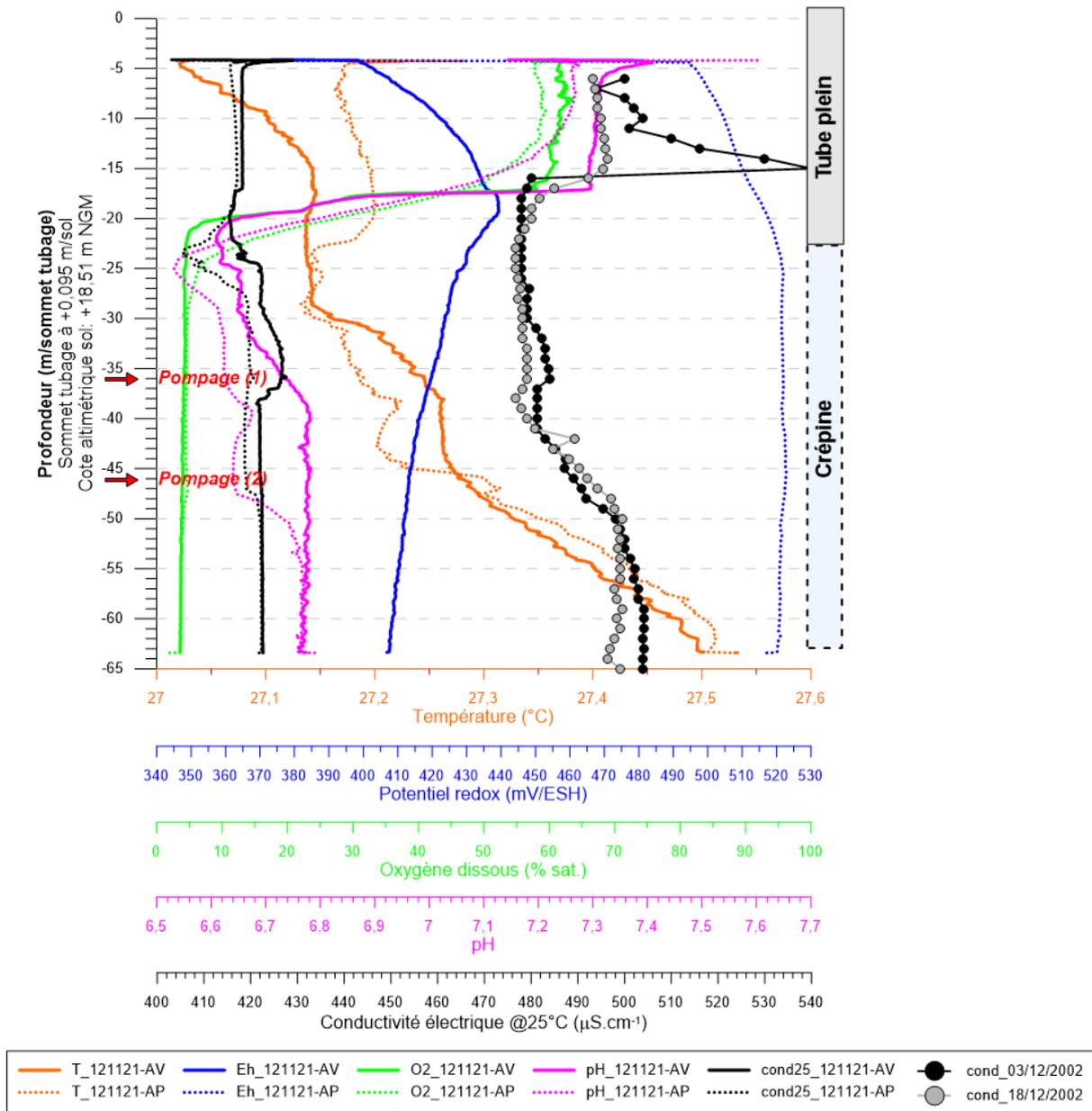


Figure 15 : Forage de Bandrelé Dagoni : diagraphie physico-chimique avant pompage (AV - trait plein) et après pompage (AP - tirets) ; la profondeur de pompage est indiquée par les flèches rouges.

d) Piézomètre de Kawéni

Les diagraphies réalisées dans le forage 12307X0011 sont reportées dans la Figure 16 (deux diagraphies avant pompage et une diagraphie après pompage), et comparées à trois diagraphies de conductivité électrique réalisées en 1990, juste après la réalisation du forage (03/03/1990) puis 1 et 4 mois après (Mauroux, 1992). Il ressort :

- Profil de température :
 - Les profils de température en écoulement naturel sont très semblables à quelques jours d'intervalle. La température n'augmente quasiment pas avec la profondeur, ce qui pourrait suggérer que la production d'eau est homogène, mais sans doute assez faible, sur toute la hauteur crépinée. En l'absence d'informations sur la productivité de l'ouvrage, cette hypothèse ne peut pas être discutée.
 - Aux alentours de 34 m de profondeur, on remarque une très légère anomalie thermique négative (de l'ordre de 0,01°C).
 - Après pompage, une nette anomalie thermique est présente en sommet de crépine, avec un pic vers 22 m de profondeur (+0,2°C). Aucun autre paramètre n'étant affecté, il est difficile d'expliquer cette présence d'eau plus chaude. A tout le moins, elle ne se différencie pas par son chimisme.
 - Les données antérieures de conductivité électrique montraient parfois une variabilité un peu plus forte de ce paramètre en fonction de la profondeur, mais elles mettaient surtout en évidence une très forte variabilité de ce paramètre d'une acquisition à l'autre. Les mesures de 2021 sont celles qui donnent la plus forte valeur pour la conductivité, mais on ne peut pas déterminer, sur la base de la connaissance antérieure, si cette hausse apparente est le fruit d'une tendance de long terme, ou si elle reflète uniquement une variabilité de court terme, par exemple saisonnière. Les données des analyses chimiques (on ne dispose que d'une seule analyse antérieure référencée) ne permettent pas non plus de statuer.
- Profil de conductivité électrique : hormis le net changement au passage tube plein – crépine, qui indique qu'il n'y a pas de convection dans le tube plein, le profil de conductivité est rectiligne. Après pompage, il n'apparaît pas non plus de net changement. La légère diminution de conductivité en sommet de crépine peut être liée au passage d'outils dans un contexte de faible productivité.
- Profil de pH : le pH admet également une très faible variabilité dans la colonne d'eau, et se classe dans une gamme très légèrement acide. Une légère dérive du paramètre existe en sommet de crépine, après pompage, mais dans un ordre de grandeur similaire à celui de l'incertitude de mesure (0,1 unité).
- Profil de potentiel redox : le potentiel redox est positif, variable d'une mesure à l'autre, et globalement invariant sur la verticale. Sa valeur suggère que l'eau n'est pas totalement dépourvue d'oxygène dissous.
- Profil d'oxygène dissous : ce paramètre est lui aussi invariant sur la verticale, et sa valeur est très reproductible d'une diagraphie à l'autre. Par rapport aux autres acquisitions, la concentration en oxygène dissous est nettement plus élevée, ce qui indique un temps de trajet souterrain plus court, ou une interaction avec une eau plus riche en oxygène.

Compte tenu de la faible variabilité des paramètres dans la colonne d'eau, on a donc choisi de se placer dans le tiers inférieur de la crépine, à 40 m de profondeur, pour pratiquer le pompage et faire les prélèvements. Le pompage n'engendre pas le drainage d'eau plus minéralisée en profondeur. Une incertitude subsiste quant au drainage d'une eau plus chaude en sommet de crépine, dont l'origine ne peut être déterminée, mais qui n'est pas plus minéralisée. Enfin, l'origine

de la variabilité temporelle de la conductivité électrique ne peut pas non plus être cernée, et ne peut donc pas non plus être reliée à l'éventuelle présence d'une eau plus salée.

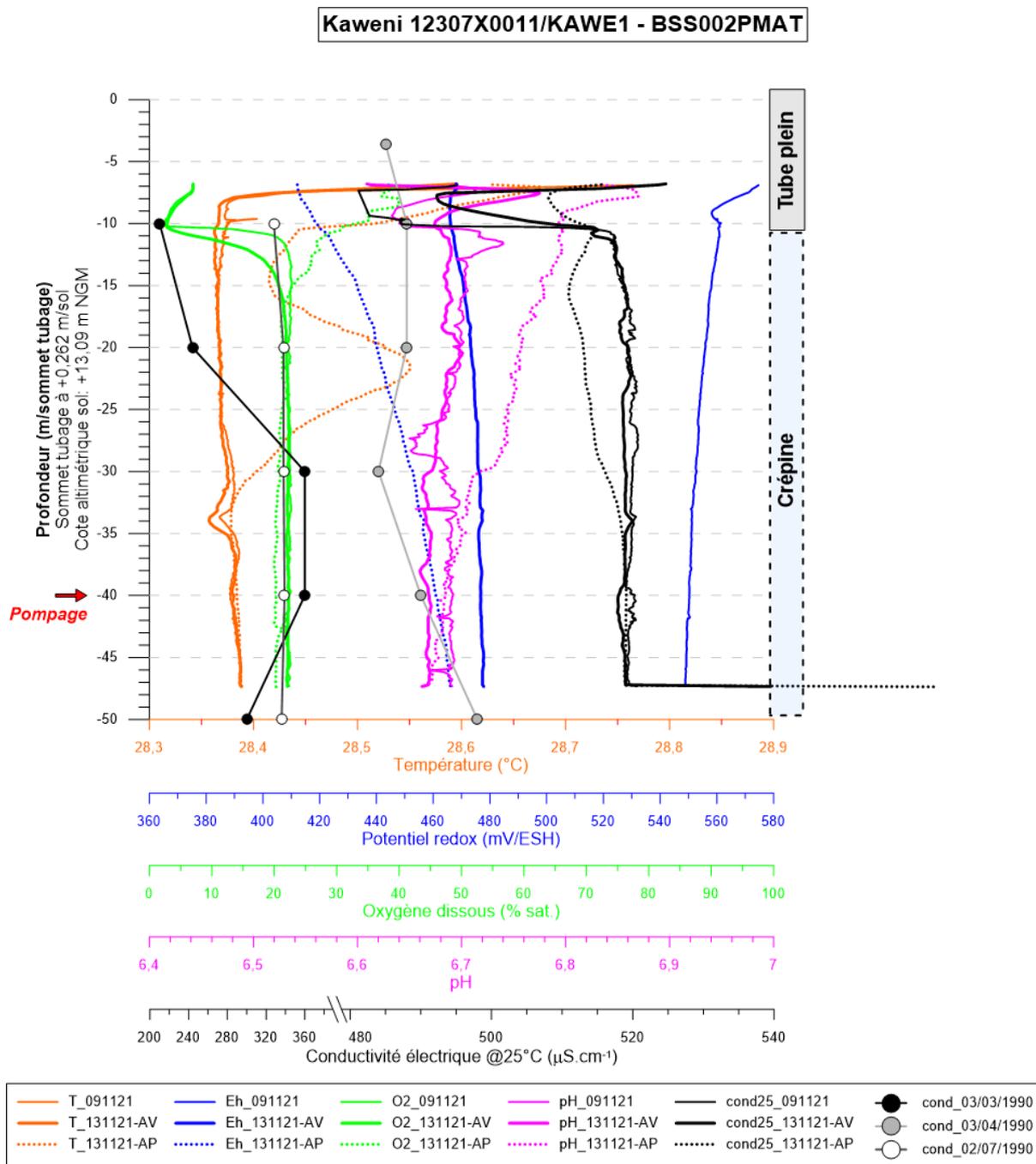


Figure 16 : Piézomètre de Kawéni : diagraphie physico-chimique avant pompage (trait plein) et après pompage (tirets) ; la profondeur de pompage est indiquée par la flèche rouge.

e) Paramètres physico-chimiques moyens issus des diagraphies

Compte-tenu de la faible variabilité physico-chimique relevée lors des diagraphies, des valeurs moyennes, éventuellement des plages de variation (si nécessaire), des paramètres sont proposées (Tableau 3). Ce tableau permet de déterminer des températures assez homogènes, proches de 27°C, sauf à Kawéni, où elles sont supérieures d'un degré. La conductivité électrique est assez variable, vraisemblablement en lien avec des degrés d'interaction eau-roche différents. Le pH est toujours inférieur à 7. Le potentiel redox est toujours positif, en lien avec des concentrations en oxygène dissous qui ne sont pas nulles, ce qui indique que les circulations souterraines sont relativement rapides.

Ouvrage	Température (°C)	Conductivité électrique ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ @25°C)	pH	O ₂ dissous (% sat.)	Potentiel redox (mV, ESH)
M'Ronabéja 12316X0031/MRO1	26,7 à 27,3	585	6,84	2,6 à 3,3	+400 à +440
Mréréni 12312X0035/MRERE2	27,2 à 27,5	155	5,91	5	+550 à +560
Bandrélé Dagoni 2313X0033	27,1 à 27,5	418 à 426	6,64 à 6,78	4 à 5	+400 à +430
Kawéni 12307X0011	28,36 à 28,38	520	6,68	22	+470 à +480

Tableau 3 : Valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques déduites des diagraphies en écoulement naturel, pour les 4 ouvrages ayant fait l'objet d'acquisitions.

f) Diagraphies physico-chimiques antérieures dans les ouvrages en exploitation

Les ouvrages en exploitation, équipés de pompes à demeure, n'ont pas fait l'objet de diagraphies, pour des raisons pratiques (pas de descente d'outil dans un ouvrage où des dispositifs sont déjà présents pour éviter de bloquer la sonde de diagraphie) et de sécurité (risque d'entraînement de la sonde ou de son câble, par aspiration, lorsque la pompe à demeure est en fonctionnement).

On ne peut donc se référer qu'aux données antérieures, synthétisées dans la Figure 17, et qui renvoient pour l'essentiel à des mesures faites peu de temps après la réalisation des forages, il y a entre 10 et 20 ans. Or, comme les investigations récentes ont pu le montrer, il est plus que probable d'observer des différences avec un tel écart temporel. Néanmoins, ces données antérieures indiquent des valeurs de conductivité électrique qui sont totalement comparables à celles trouvées en 2021. Dans certains ouvrages (12302X0101/MOHOF2 – Mohogoni F2 ; 12306X0016/MTSAN2 – M'Tsangamouji F2 ; 12306X0046/BOUY Bouyouni Méresse), la conductivité électrique semble ne pas varier avec la profondeur, même si la productivité peut se faire à plusieurs profondeurs (Mohogoni F2, Bouyouni Méresse). Dans d'autres ouvrages, une certaine variabilité peut être mise en évidence (12306X0024/BOUY Bouyouni ;

12316X0032/MRONAB M'Ronabéja), possiblement en lien avec l'existence de différents horizons producteurs (BRGM/RP-51603-FR).

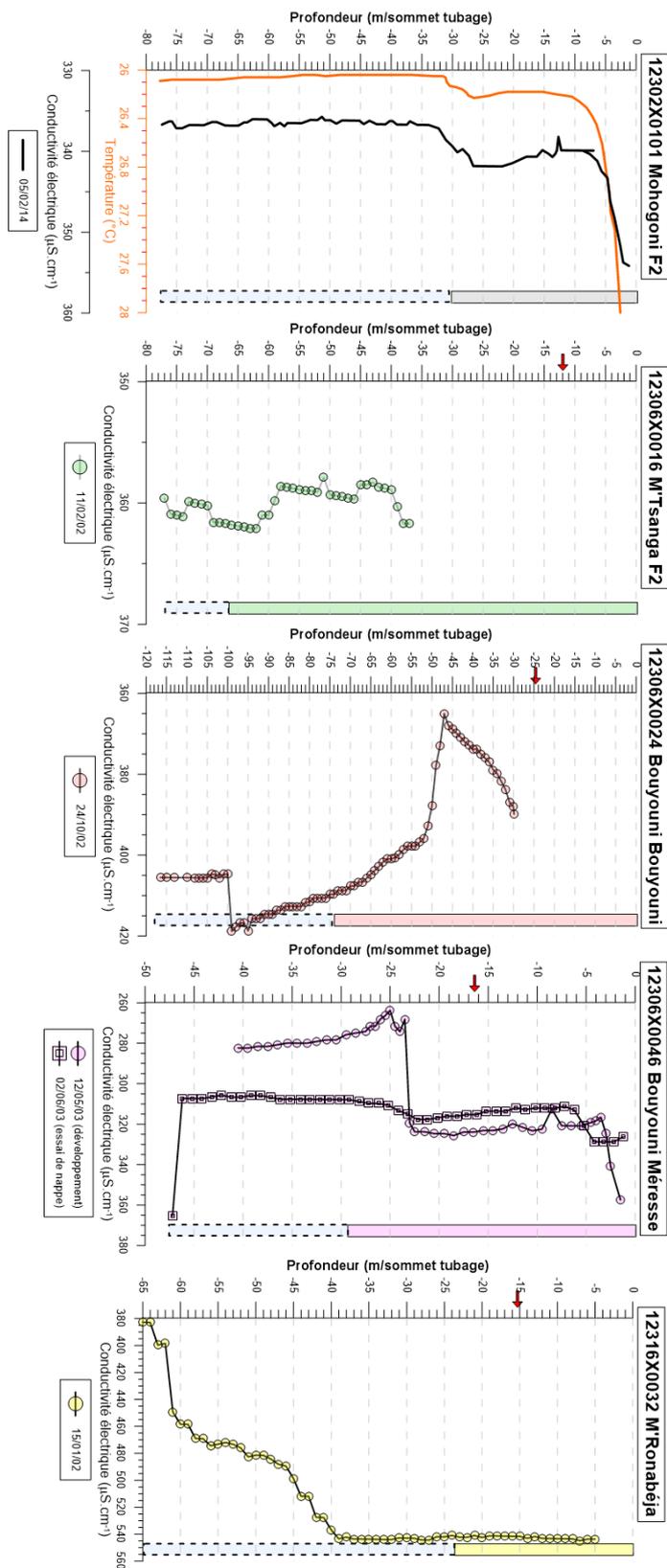


Figure 17 : Diagraphies (conductivité électrique, éventuellement température) pratiquées en 2002-2003 et en 2014, suite à la réalisation de nouveaux forages (BRGM/RP-51603-FR ; BRGM/RP-51969-FR ; BRGM/RP-52481-FR ; BRGM/RP-63351-FR). Les profondeurs de pompage, lorsque connues, sont indiquées par une flèche rouge.

4.1.2. Prélèvements d'eau

Sur les douze ouvrages sélectionnés (Tableau 4), neuf ont fait l'objet d'une caractérisation de leur composition chimique (éléments majeurs et traces) et deux (12307X0021 – Kawéni Lajolie ; 12313X0033/BAND – Bandrélé 46 m de profondeur) des rapports isotopiques de l'eau ($\delta^{18}\text{O}$ et δD) et du bore ($\delta^{11}\text{B}$). Les analyses n'ont pas été faites sur: 12302X0025/MOHOG – Mohogoni F1 ; 12306X0017/MTSAN1 – M'Tsangamouji F1 ; 12313X0033/BAND – Bandrélé 35 m de profondeur ; 12316X0031/MRO1 – M'Ronabéja piézomètre.

La campagne de prélèvement a été réalisée en période de basses eaux (Figure 18) afin de maximiser l'effet potentiel de drainage d'une masse d'eau salinisée. On remarquera que l'ouvrage de Mronabéja a une cote piézométrique parmi les plus basses sur 10 ans, alors que l'ouvrage de Kawéni est plutôt dans la moyenne haute des côtes sur 10 ans.

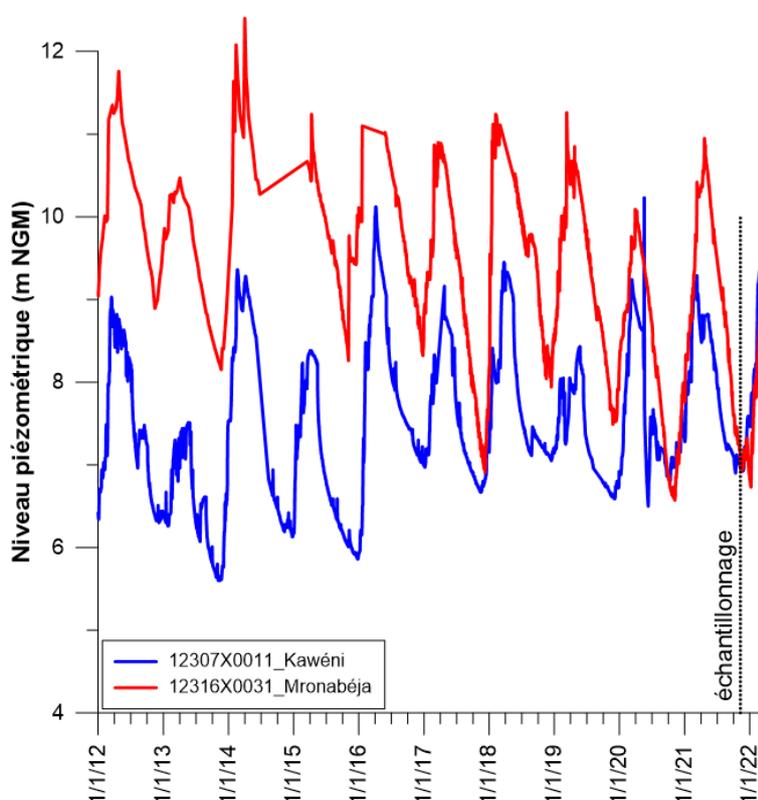


Figure 18: Profondeur de l'eau dans les ouvrages de Kawéni (12307X0011) et Mronabéja (12316X0031/MRO1) lors de l'échantillonnage (novembre 2021) et comparaison aux niveaux antérieurs.

a) *Paramètres physico-chimiques*

Les paramètres physico-chimiques finaux sont rapportés dans le tableau 4 ; les suivis préalables aux prélèvements sont rapportés en annexe. Pour quatre ouvrages (12307X0011 – Kawéni ; 12312X0033/MRE1 – Mréréni ; 12313X0033/BAND – Bandréli Dagoni ; 12316X0031/MRO1 – M'Ronabéja), on dispose d'une comparaison avec les mesures par diagraphie (Tableau 3) :

- Données de température : elles sont supérieures de +0,2 à +0,3°C lorsque la température est mesurée à l'exhaure du pompage. Il s'agit d'un effet classique de léger réchauffement lié au processus de pompage (chauffe du corps de pompe).
- Données de conductivité électrique : les mesures en surface sont supérieures de 1 à 2% ; il s'agit ici de la précision analytique liée à ce type de mesure. On relève le même type d'écart lorsque les prélèvements ont été faits sur des forages équipés, en comparant la mesure faite lors des prélèvements à celle issue du monitoring de conductivité opéré sur les forages (voir annexe ; un point, 12302X0025/MOHOG – Mohogoni F1 fait exception, la donnée de monitoring étant sans doute surévaluée).
- Données de pH : un écart de 0,1 à 0,2 unité est noté, les mesures faites à l'exhaure du pompage étant un peu plus basses. Il peut s'agir d'un léger écart consécutif au brassage de l'eau lors du pompage, mais plus vraisemblablement cet écart représente l'incertitude analytique (la mesure est donnée à $\pm 0,1$ unité pH).
- Données de potentiel redox : les écarts sont importants (+50 à +140 mV lorsque la mesure est effectuée in-situ). Toutefois, la reproductibilité des données en diagraphie peut souffrir d'une incertitude aussi élevée. L'important est que toutes les mesures pointent vers des eaux encore légèrement oxygénées.
- Données d'oxygène dissous : les mesures en surface sont légèrement supérieures aux mesures en forage, ce qui peut provenir d'un écart lié à la technique de mesure (mesure électrochimique lors des diagraphies, mesure optique en suivi de pompage), de petits écarts étant relevés lors d'essais d'intercomparaison entre ces méthodes. Une mesure fait exception, celle faite à Mréréni. Ici, la mesure en pompage est bien plus élevée que celle faite dans la colonne d'eau. Cette mesure en surface n'est pas à retenir, elle résulte certainement d'un biais méthodologique lors de sa mise en œuvre. Pour compléter, quelques mesures opérées sur les forages équipés, notamment M'Tsangamouji F2, renvoient des valeurs très élevées. Celles-ci résultent d'un couplage entre le tuyau de prélèvement et le point de piquage non optimal, amenant à une oxygénation artificielle de l'eau. Cet artefact de mesure n'influence pas les autres déterminations, et n'a pas d'impact sur les mesures ultérieures en laboratoire (les échantillons sont conditionnés immédiatement sur le terrain).

Caractérisation de l'intrusion saline aux droits de zones dites « sensibles » sur le territoire de Mayotte

Ouvrage	Equipé	Date	Heure	T (°C)	EC (µS/cm à 25°C)	pH	O ₂ (% sat.)	O ₂ (ppm)	Eh (mV NHE)	Chimie	Isotopie
Mohogoni 12302X0025/MOHOG	O	09/11/2021	10:55	27,7	323	7,08	28,6	2,24	290	P	
Mohogoni F2 12302X0101/MOHOF2	O	09/11/2021	11:35	27,1	339	7,25	3,1	0,25	380	PA	
M'Tsangamouji F2 12306X0016/MTSAN2	O	08/11/2021	10:20	28,5	365	8,04	94,7	7,3	440	PA	
M'Tsangamouji F1 12306X0017/MTSAN1	O	08/11/2021	11:05	28,2	265	8,53	0,7	0,06	330	P	
Bouyouni 12306X0024/BOUY	O	09/11/2021	09:15	27,9	322	7,67	28,2	2,2	390	PA	P
Bouyouni Méresse 12306X0046/BOUY	O	09/11/2021	10:15	28,1	245	7,24	48,9	3,83	425	PA	
Kawéni Piézo 12307X0011/KAWE1	N	13/11/2021	09:05	28,7	530	6,61	25	1,94	410	PA	P
Kawéni Lajolie 12307X0021/KAQUE3	O	08/11/2021	14:20	28,7	466	6,73	39	3,01	290	PA	PA
Mréréni Piézo 12312X0033/MRE1	N	11/11/2021	12:10	27,7	162,2	5,68	22,7	1,78	410	PA	
Bandréle Dagoni (35 m) 12313X0033/BAND	N	12/11/2021	12:25	27,5	439	6,63	6,4	0,5	380	P	
Bandréle Dagoni (46 m) 12313X0033/BAND	N	12/11/2021	13:40	27,6	435	6,36	5,7	0,44	360	PA	PA
M'Ronabéja Piézo 12316X0031/MRO1	N	10/11/2021	14:45	27,2	605	6,73	3	0,23	280	P	
MRonabéja 12316X0032/MRONAB	O	10/11/2021	10:00	27,6	687	6,72	3,6	0,29	435	PA	

Tableau 4 : Paramètres physico-chimiques mesurés lors des acquisitions sur site (P : prélevé ; PA : prélevé et analysé).

Les mesures physico-chimiques réalisées à l'exhaure des pompages (pompe à demeure ou pompe déployée pour le prélèvement) renvoient des caractéristiques semblables à celles déterminées lors des diagraphies physico-chimiques (pour les 4 ouvrages concernés) et à celles des mesures antérieures (Figure 19) :

- Les températures sont tout à fait conformes aux moyennes de long terme pour chaque ouvrage (entre 27 et 29°C).
- Les conductivités électriques sont nettement plus contrastées d'un ouvrage à l'autre, quelques tendances pourraient se dessiner :
 - o La plus nette, sur 10 ans, en faisant l'hypothèse que toutes les données bancarisées sont bien des données exprimées à 25°C, concerne l'ouvrage 12316X0032/MRONAB de M'Ronabéja AEP, pour lequel il semble que la conductivité augmente progressivement (+80 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ sur la période, pour une conductivité de départ proche de 600 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$).
 - o Pour d'autres ouvrages (Mohogoni F1 12302X0025/MOHOG et F2 12302X0101 ; 12306X0016/MTSAN2 – M'Tsangamouji F2 ; 12307X0011/KAWE1 – Kawéni piézo), les chroniques de mesure sont beaucoup moins fournies, et les hausses de conductivité qui peuvent être apparentes sont donc plus spéculatives (on ne sait pas si dans le passé les conductivités n'ont pas atteint des valeurs similaires à celles mesurées en novembre 2021).
- Les valeurs de pH, considérées pour chaque ouvrage, sont dans la gamme de variation déjà connue, mais souvent dans la partie basse de la gamme, voire, comme pour l'ouvrage 12306X0046/BOUY (Bouyouni Méresse), semblent connaître une baisse relative de leur pH au cours du temps. On remarquera que les piézomètres non équipés ont tendance à avoir des pH inférieurs à ceux des ouvrages en exploitation. L'ouvrage 12306X0017/MTSAN1 (M'Tsangamouji F1) se distingue de tous les autres ouvrages, avec un pH élevé, voisin de 8,5.
- Les potentiels redox, bien que fort variables lors de la mesure (cf. supra), font ressortir une assez belle constance temporelle. Une forte hausse peut être remarquée aux alentours de 2016 : il n'existe pas d'explication évidente pour ce phénomène, qui semble général, sauf à proposer que les valeurs antérieures à 2016 sont des valeurs brutes (mesure lue sur site) et que les valeurs postérieures à 2016 sont des valeurs corrigées (rapportées à l'électrode standard hydrogène). En effet, un écart de +200 à +220 mV est à lui seul imputable à cette correction.
- Les concentrations en oxygène dissous sont assez variables dans le temps, mais les mesures de novembre 2021 s'inscrivent cependant dans la continuité des mesures antérieures. En 2018, on remarque une forte baisse, assez généralisée, des valeurs, particulièrement pour 12306X0017/MTSAN1 (M'Tsangamouji F1), 12307X0021/KAOUÉ3 (Kawéni Lajolie) et 12316X0032/MRONAB (M'Ronabéja AEP). Ici, ce peut être le résultat d'une modification du point de piquage ou d'un changement de complétion de l'ouvrage, qui amène à une bien meilleure préservation de l'eau d'un contact avec l'atmosphère lors des mesures. Pour 12306X0046/BOUY (Bouyouni Méresse), ce phénomène est moins prégnant.

Caractérisation de l'intrusion saline aux droits de zones dites « sensibles » sur le territoire de Mayotte

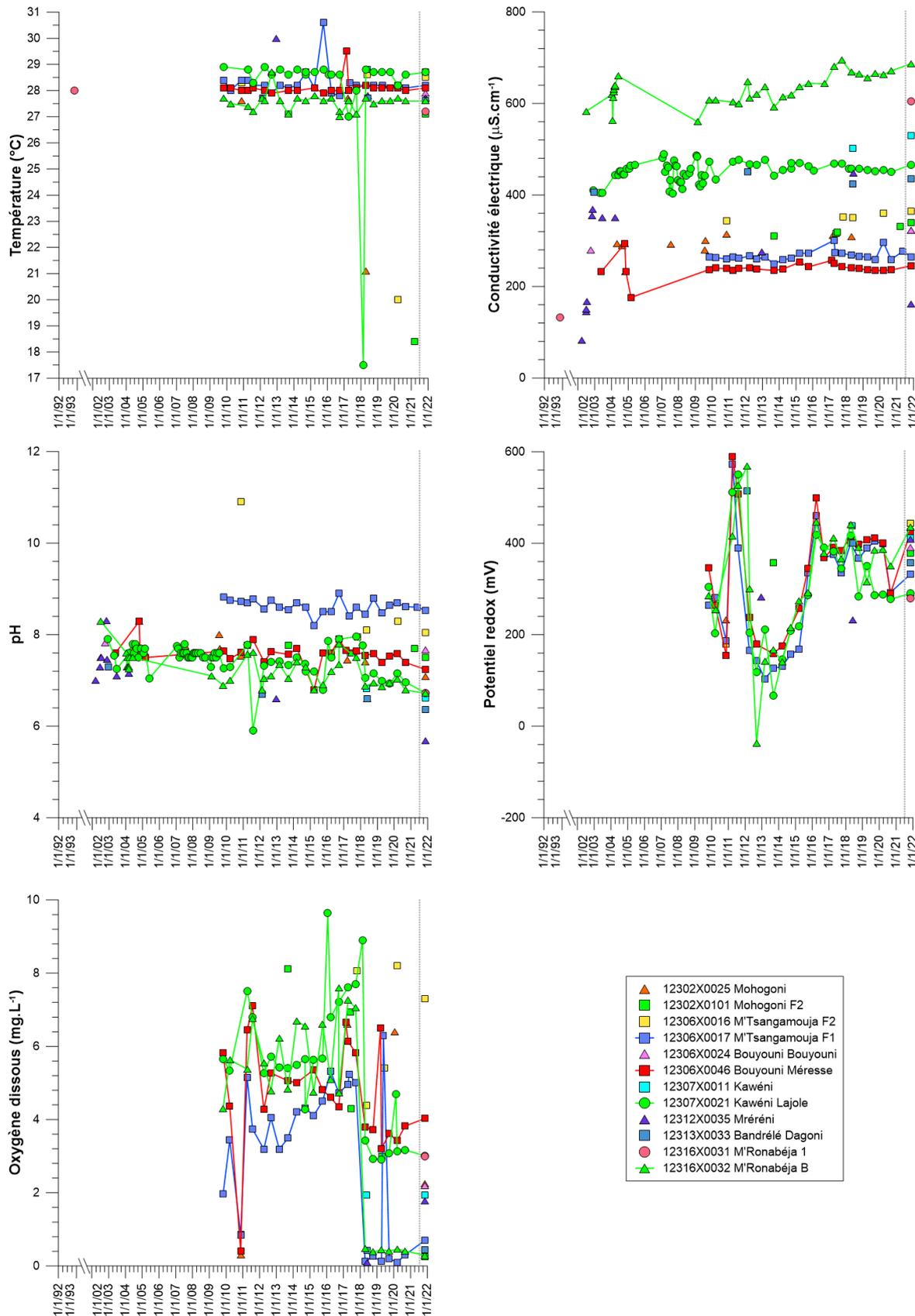


Figure 19 : Comparaison des mesures de novembre 2021 avec les mesures antérieures (données ADES <https://ades.eaufrance.fr/> et données issues de rapports BRGM).

b) Chimie des éléments majeurs

Les analyses chimiques nouvellement acquises sont comparées aux données antérieures dans un diagramme de Piper (Figure 20). Un diagramme de Piper ne permettant pas de mettre facilement en évidence les variations de concentration pour un élément donné, on le complète avec un diagramme de Schoeller (Figure 21). Ce dernier utilise uniquement les nouvelles données de 2021. Aucune déviation notable n'existe dans le jeu de données, et l'on rejoint les conclusions déjà exposées antérieurement (Malard et Winckel, 2008 ; Kloppmann et al., 2010) :

- La majorité des ouvrages ont un faciès bicarbonaté calcique et magnésien, typique d'eaux douces, sans toutefois qu'un cation soit dominant. A l'inverse, les bicarbonates sont toujours l'anion dominant.
- Seul le forage 12306X0017/MTSAN1 (M'Tsangamouji F1) présente un faciès chimique différent, toujours bicarbonaté, mais avec sodium et potassium qui sont les cations dominant. Cet ouvrage n'a pas fait l'objet d'une analyse en 2021, mais les paramètres physico-chimiques mesurés sur le terrain ne présentant pas de changement par rapport aux données antérieures, on peut supposer que son chimisme ne varie pas non plus.
- On ne met pas en évidence de point se déplaçant vers un pôle plus chloruré ou sulfaté, ce qui pourrait traduire la présence, lors du pompage, d'une composante salée.
- On rappelle enfin que les pompages réalisés sur les ouvrages non équipés ne sollicitent que très peu l'aquifère (faible débit sur une courte durée), par rapport à ce que peut engendrer un pompage sur un ouvrage équipé (débit beaucoup plus important) ou un essai de nappe (tel qu'on peut le réaliser après la réalisation d'un forage).

Sur la base des données acquises fin 2021, il ne semble donc pas que des ouvrages drainent de manière active des eaux plus salinisées – ce qui ne veut en aucun cas dire que cette possibilité n'existe pas, soit dans le futur (en restant dans les utilisations actuelles des ouvrages), soit en résultat d'une sollicitation plus importante de certains ouvrages (équipés ou non).

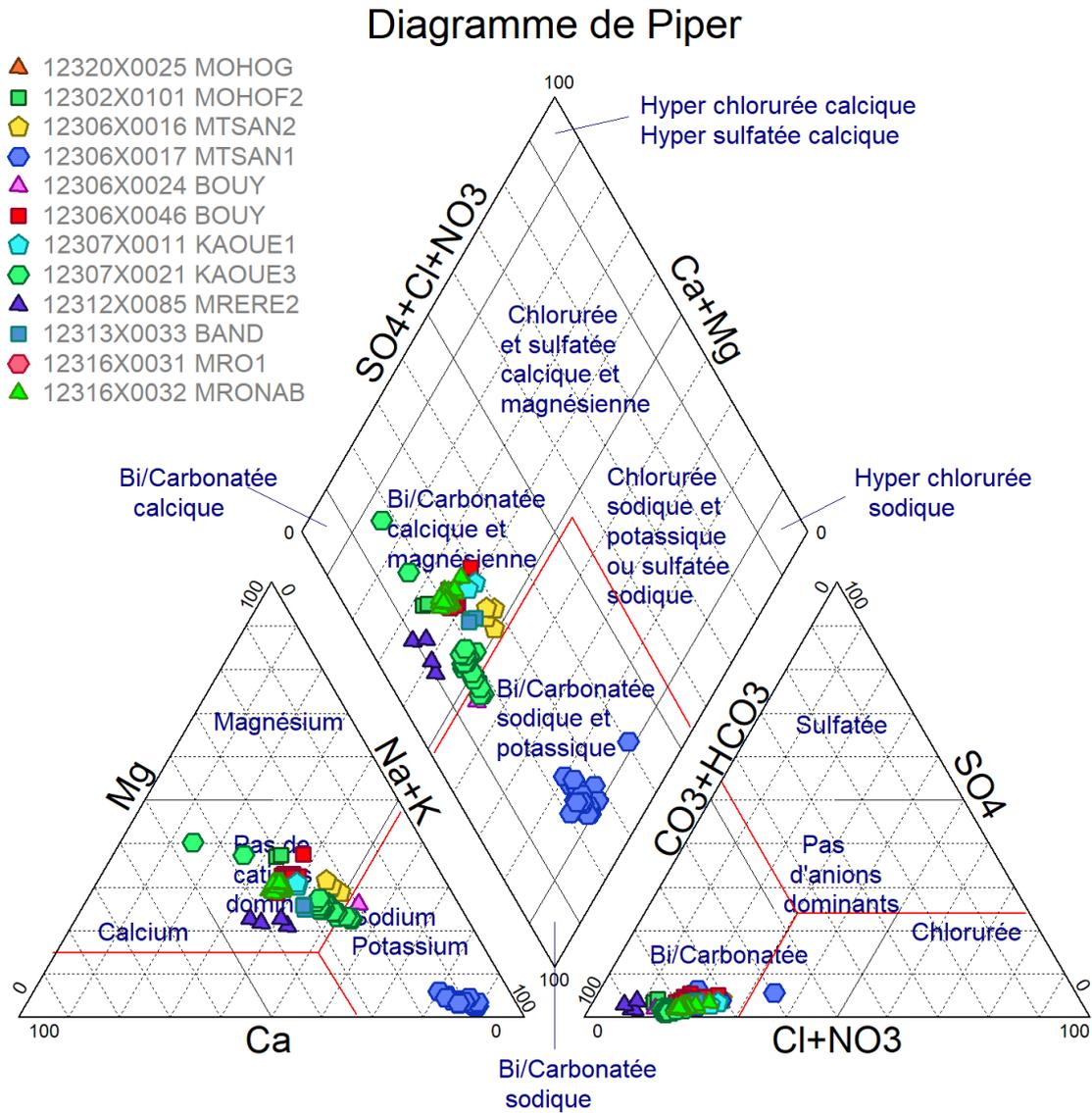


Figure 20 : Diagramme de Piper, mesures de novembre 2021 et mesures antérieures (données ADES <https://ades.eaufrance.fr/> et données issues de rapports BRGM).

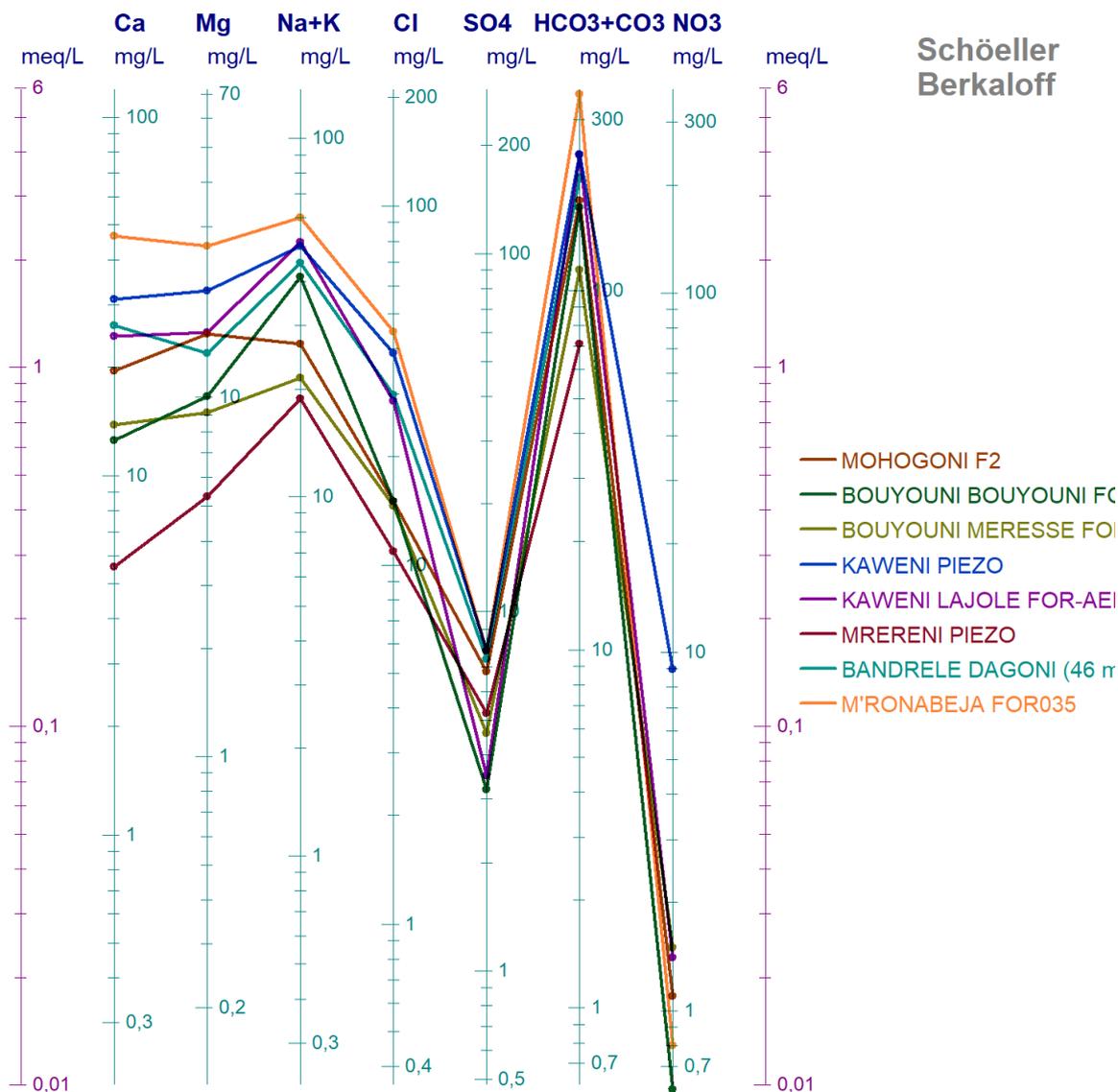


Figure 21 : Diagramme de Schoeller, prélèvements de novembre 2021.

Les évolutions temporelles du chimisme des eaux (éléments majeurs) sont présentées en figure 22 (cations) et figure 23 (anions).

Pour les ouvrages (équipés) bénéficiant de chroniques ADES régulières, les prélèvements de novembre 2021 ne se distinguent pas par un comportement spécifique : les mesures restent dans la gamme des chroniques sur 10 ans. Cela ne signifie pas pour autant qu'il ne soit pas possible d'identifier de légères tendances à la hausse, comme par exemple en Mg et HCO₃ pour 12316X0032/MRONAB – M'Ronabéja AEP, ou encore une phase d'augmentation (jusqu'en 2016) puis de baisse de concentration, en Ca et Cl, toujours pour ce même ouvrage. Pour l'ouvrage 12307X0021 – Kawéni Lajolie, il semble exister une légère tendance à l'augmentation en Cl, mais pas en Na. Pour l'ouvrage 12313X0033/BAND – Bandréle Dagoni, on relève d'importantes fluctuations des concentrations en SO₄.

Pour les ouvrages non équipés, les mesures sont beaucoup moins fréquentes, et vouloir discerner des tendances n'est pas envisageable. On remarquera cependant que les données de novembre 2021 sont semblables aux données antérieures, sauf pour l'ouvrage 12312X0033/MRE1 – Mréréni, pour lequel toutes les concentrations sont inférieures, conséquence directe d'une conductivité électrique très faible (Figure 19). Pour l'ouvrage 12306X0016/MTSAN2 – M'Tsangamouji F2, les concentrations en NO_3 semblent plus élevées en 2021 que précédemment, et on constate par ailleurs que le piézomètre de Kawéni (12307X0011/KAWÉ1) est le plus impacté par la présence de nitrates.

Les chroniques en éléments majeurs ne permettent pas de mettre en évidence de net changement entre 2021 et les années antérieures, pour le moins pour ce qui concernerait un drainage direct d'eaux salinisées. En particulier, les chlorinités, même pour l'ouvrage le plus riche (12316X0032/MRONAB – M'Ronabéja), sont toujours inférieures à 60 mg.L^{-1} et n'indiquent pas de contamination significative par une intrusion marine (Kloppmann et al., 2010 ; ces auteurs définissent par ailleurs un seuil de 100 mg.L^{-1} en moyenne pluriannuelle comme révélateur d'une salinisation).

Caractérisation de l'intrusion saline aux droits de zones dites « sensibles » sur le territoire de Mayotte

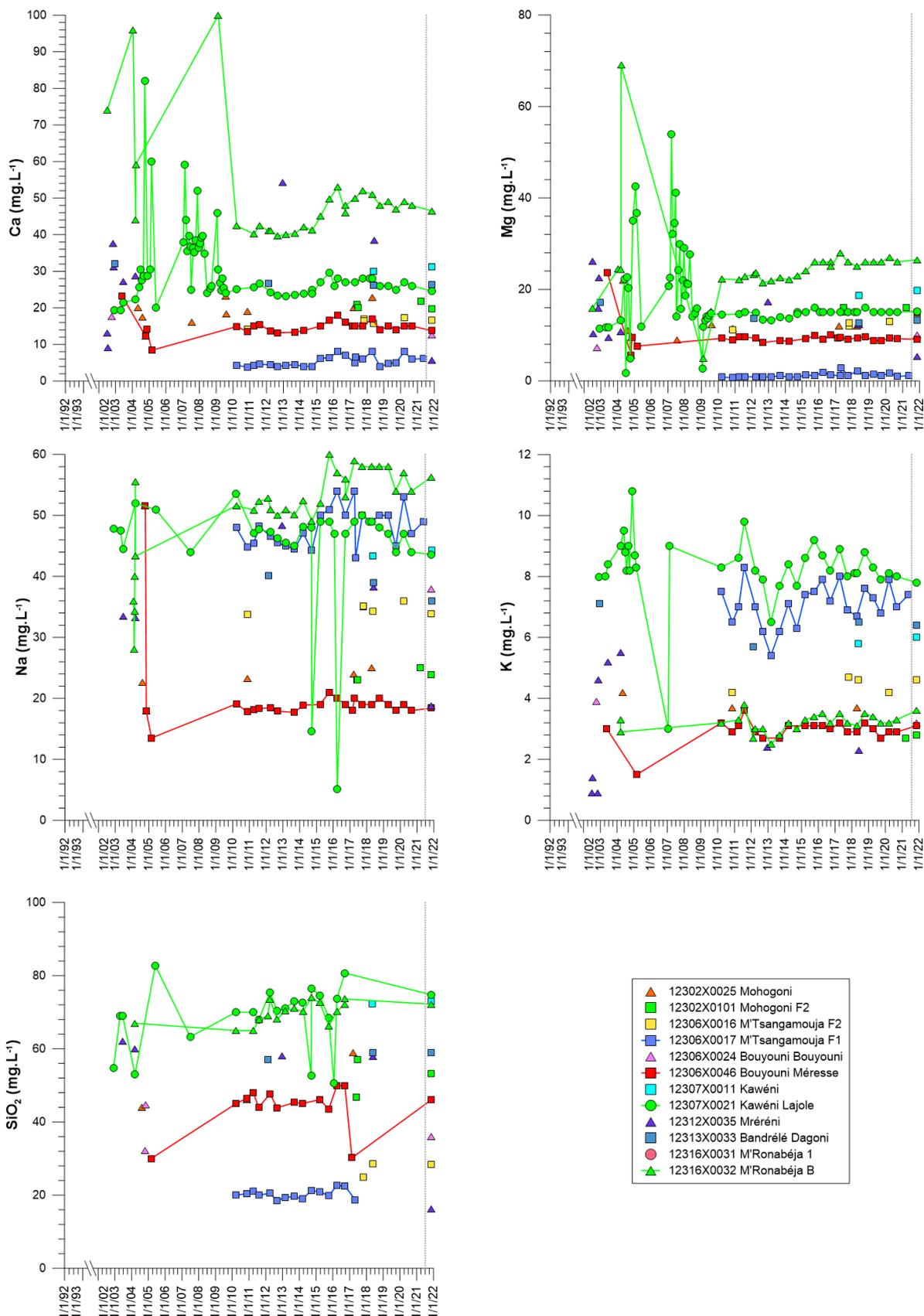


Figure 22 : Evolution des concentrations en cations et en silice : données de novembre 2021 et données antérieures (données ADES <https://ades.eafrance.fr/> et données issues de rapports BRGM).

Caractérisation de l'intrusion saline aux droits de zones dites « sensibles » sur le territoire de Mayotte

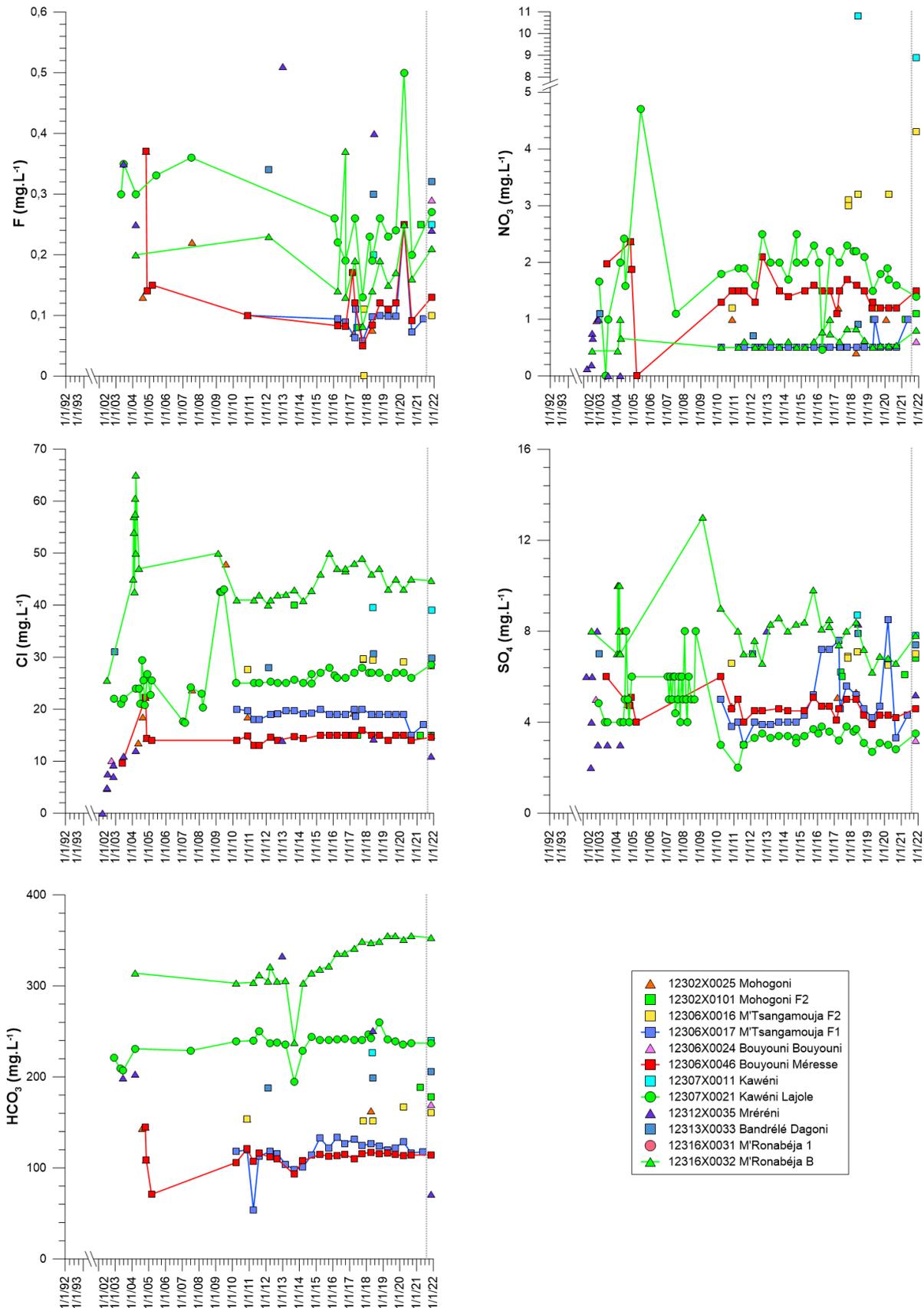


Figure 23 : Evolution des concentrations en anions : données de novembre 2021 et données antérieures (données ADES <https://ades.eaufrance.fr/> et données issues de rapports BRGM).

c) Chimie des éléments traces

Les données sur les éléments en trace sont beaucoup moins abondantes, hormis celle pour Fe et Mn, ce qui est aisément concevable dans un contexte d'utilisation de l'eau à des fins d'alimentation en eau potable (Figure 24 et Figure 25). Parmi les éléments d'intérêt tout particulier dans un contexte de salinisation potentielle, on mentionnera B et Br. Pour le bore, les mesures de novembre 2021 sont encore une fois totalement comparables avec les données antérieures. Pour les bromures, on aurait plutôt tendance à mesurer des concentrations inférieures, mais on dispose au mieux de 2 données antérieures, et en conclure sur une tendance ne peut raisonnablement être fait. Pour les éléments en trace, il ne semble donc pas non plus exister de preuve tangible d'une salinisation effective des masses d'eau captées par les ouvrages, pour le moins dans le périmètre immédiat des forages, dans la zone d'appel sollicitée lors des pompages.

Caractérisation de l'intrusion saline aux droits de zones dites « sensibles » sur le territoire de Mayotte

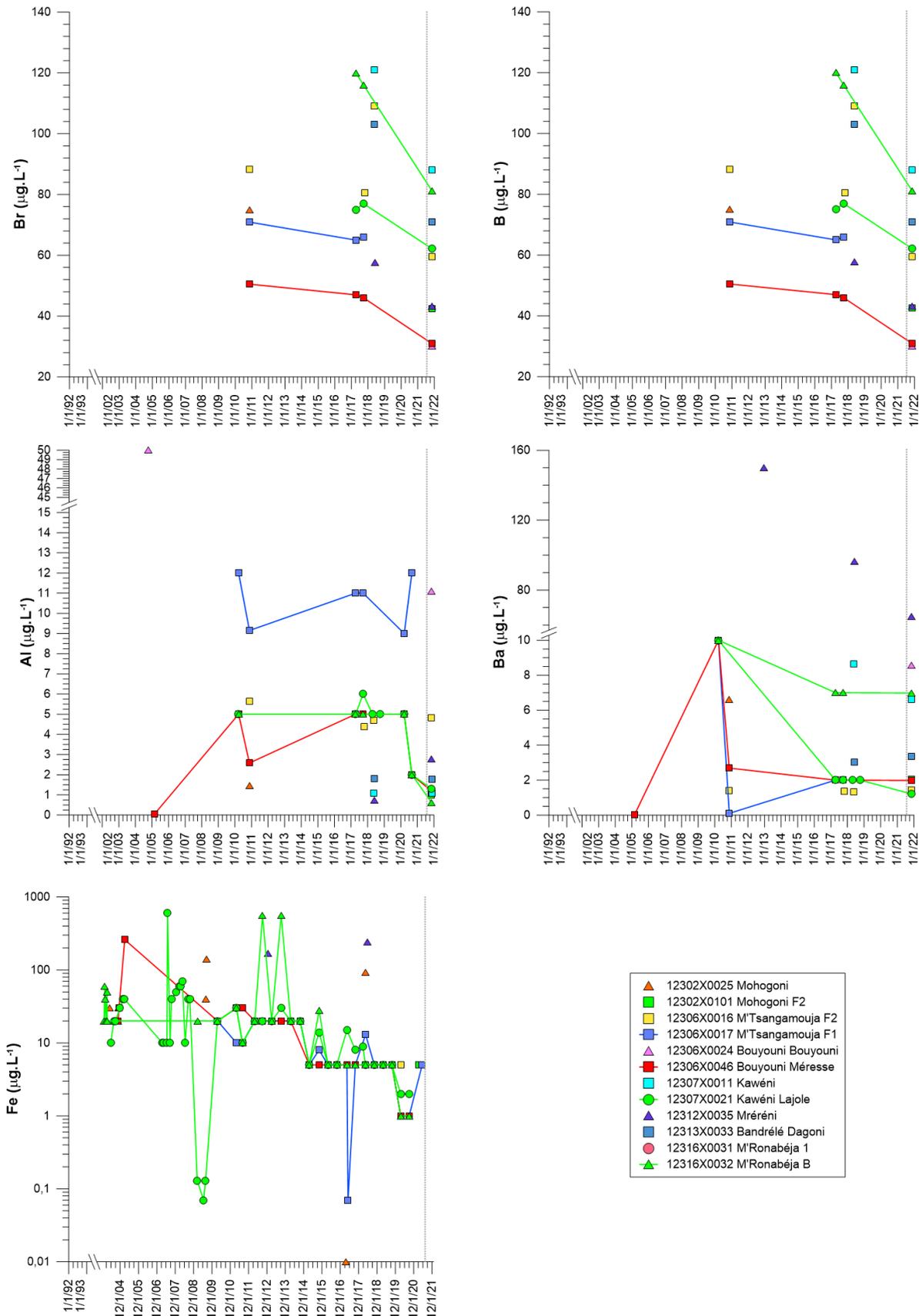


Figure 24 : Evolution des concentrations en éléments traces – 1 : données de novembre 2021 et données antérieures (données ADES <https://ades.eaufrance.fr/> et données issues de rapports BRGM).

Caractérisation de l'intrusion saline aux droits de zones dites « sensibles » sur le territoire de Mayotte

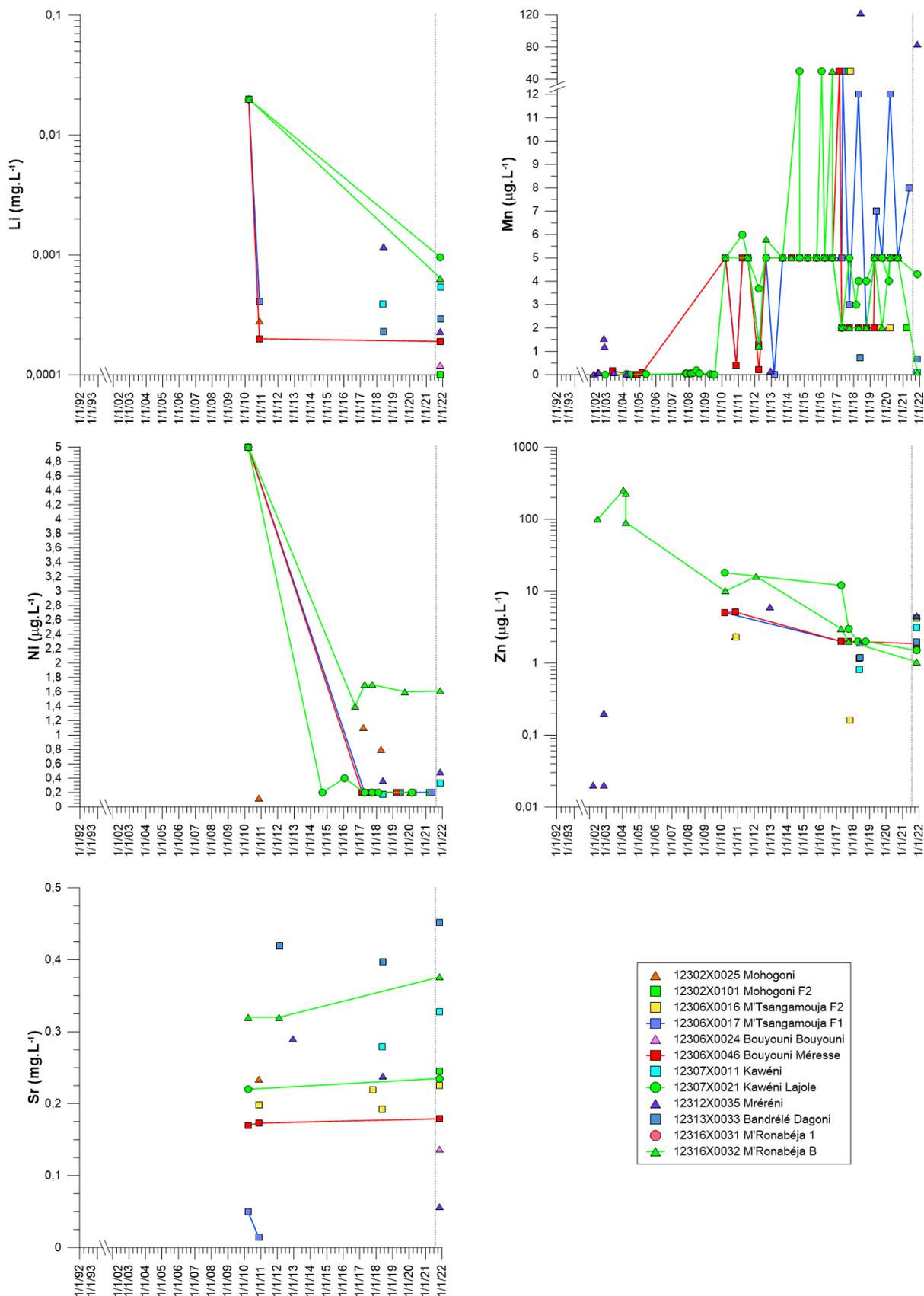


Figure 25 : Evolution des concentrations en éléments traces – 2 : données de novembre 2021 et données antérieures (données ADES <https://ades.eaufrance.fr/> et données issues de rapports BRGM).

d) Relations entre éléments

Pour compléter l'examen des chroniques, il convient de déterminer quelques relations entre éléments, afin de déterminer si une influence marine peut exister, sans toutefois connaître de variabilité temporelle. Les rapports entre éléments en solution permettent d'identifier les phases minérales qui contrôlent la composition des eaux. L'alignement du rapport élémentaire d'une eau sur la droite stœchiométrique (rapport 1:1 entre deux éléments) de dissolution d'une phase minérale suggère que la chimie de la solution est contrôlée par la dissolution de cette phase minérale. L'alignement des rapports élémentaires sur la droite reliant l'origine du graphique avec le point de concentration stœchiométrique dans l'eau de mer suggèrera quant à lui une conservation du rapport d'abondance entre les espèces ou un mélange entre une eau peu minéralisée et une eau d'origine marine ou saumâtre. Pour ce faire, on va donc souvent étudier la distribution de certains éléments dits non conservatifs (Na, Ca) avec un élément réputé conservatif (Cl ; on suppose qu'une fois en solution, sa concentration n'évolue qu'à la faveur de mélanges). De plus, dans le cas de Mayotte, l'origine des chlorures ne peut être que marine (pas de formations de type évaporitique avec halite NaCl ; Malard et Winckel, 2008).

La relation entre Na et Cl est présentée en figure 26. Hormis quelques points (12307X0021/KAOUÉ3 – Kawéni Lajolie⁶ ; 12316X0032/MRONAB – M'Ronabéja B⁷), qui sont proches de la droite de dissolution de la halite (NaCl)⁸, tous les points, y compris ceux de novembre 2021, sont éloignés de cette droite et, a fortiori, de la droite de mélange avec l'eau de mer. Les points s'écartant donc nettement de la droite de dilution par l'eau de mer, on confirme que la présence d'une telle eau (eau de mer ou eau saumâtre) n'est pas encore détectée aux forages investigués. L'enrichissement en Na provient de phénomènes d'interactions eau – roche volcanique (Malard et Winckel, 2008). Par ailleurs, il ne semble pas y avoir de phénomène important de perte en Na et d'enrichissement en Ca suite à des échanges cationiques avec des argiles (Kloppmann et al., 2011). L'absence de relation avec d'autres éléments abondants dans l'eau de mer, comme les sulfates (Figure 27), pointe toujours sur une absence de pénétration du biseau d'eau salée au niveau des crépines des différents ouvrages investigués. On note l'existence d'une relation quasi-équimolaire entre Ca et Mg (Figure 28), ce qui là encore renvoie sur des phénomènes d'acquisition de minéralisation par interaction eau-roche plutôt que par mélange entre une eau douce et une eau plus salée. Enfin, en lien avec la nature bicarbonatée des eaux, on note une belle relation linéaire, à l'échelle de l'île, entre Ca et HCO₃ (Figure 29), la teneur en bicarbonate étant acquise d'abord lors de la phase d'infiltration (interaction avec le CO₂ du sol) puis lors du trajet souterrain de l'eau par interaction avec la matrice rocheuse.

Les données sur le bore, qui peut être assimilé à un élément à comportement conservatif en l'absence d'interactions fortes avec des argiles (Kloppmann et al., 2011), s'écartent également de la relation stœchiométrique dans l'eau de mer (Figure 30), et montrent un enrichissement relatif en bore. La relation entre bromures et Cl (Figure 31) suggère quant à elle que tant les eaux conservent un rapport d'abondance de type eau de mer, les concentrations en ces deux éléments étant principalement acquises lors de l'évaporation de l'eau (de mer), leur chute sous forme de précipitation puis leur trajet souterrain n'affectant que peu ce rapport d'abondance.

⁶ Pour cet ouvrage, les analyses anormales proviennent de la banque de données ADES ; il peut s'agir d'une erreur de report de la valeur lors du renseignement de la base de données, l'écart avec les autres données étant vraiment important.

⁷ Pour cet ouvrage, les analyses datent de février-mars 2004, au début de l'exploitation de l'ouvrage, lorsque celui-ci l'était ; Malard, 2009. De telles analyses ne sont ensuite plus jamais rapportées.

⁸ Une telle contribution n'est pas envisageable, cf. supra.

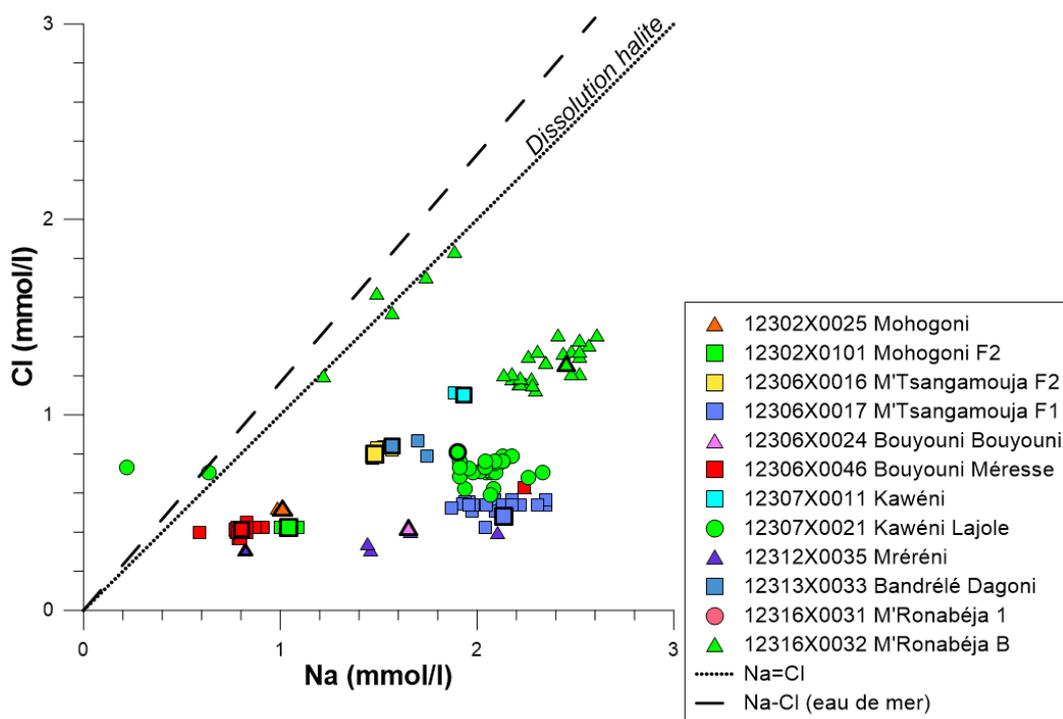


Figure 26 : Relation Na-Cl : données de novembre 2021 (contours épais) et données antérieures (données ADES <https://ades.eaufrance.fr/> et données issues de rapports BRGM).

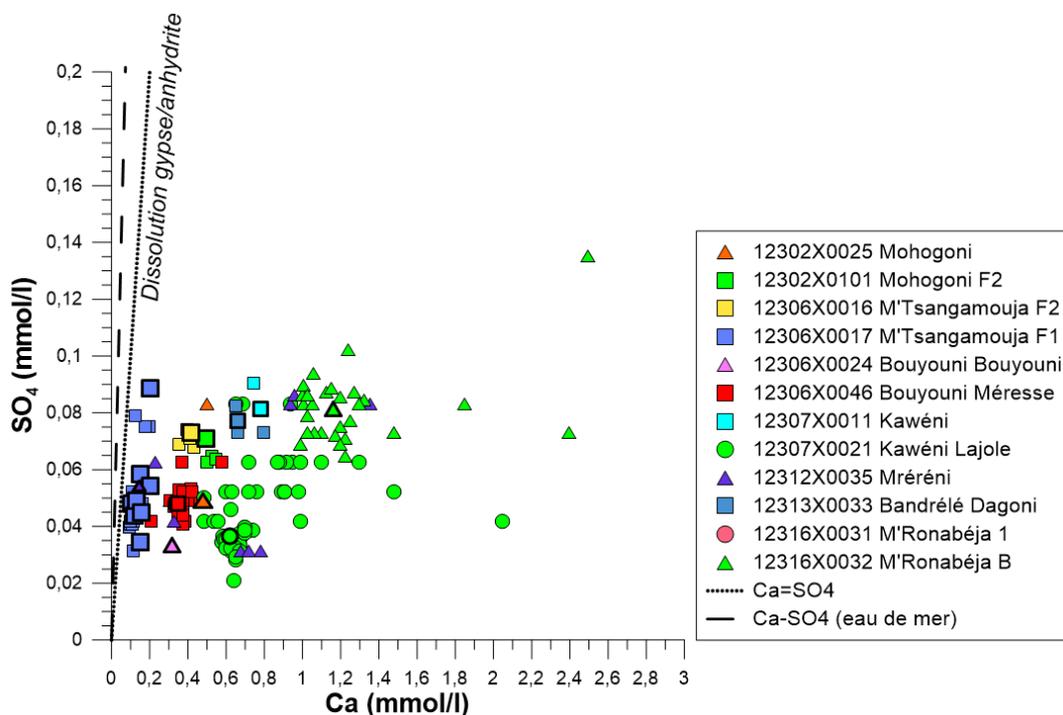


Figure 27 : Relation Ca-SO₄ : données de novembre 2021 (contours épais) et données antérieures (données ADES <https://ades.eaufrance.fr/> et données issues de rapports BRGM).

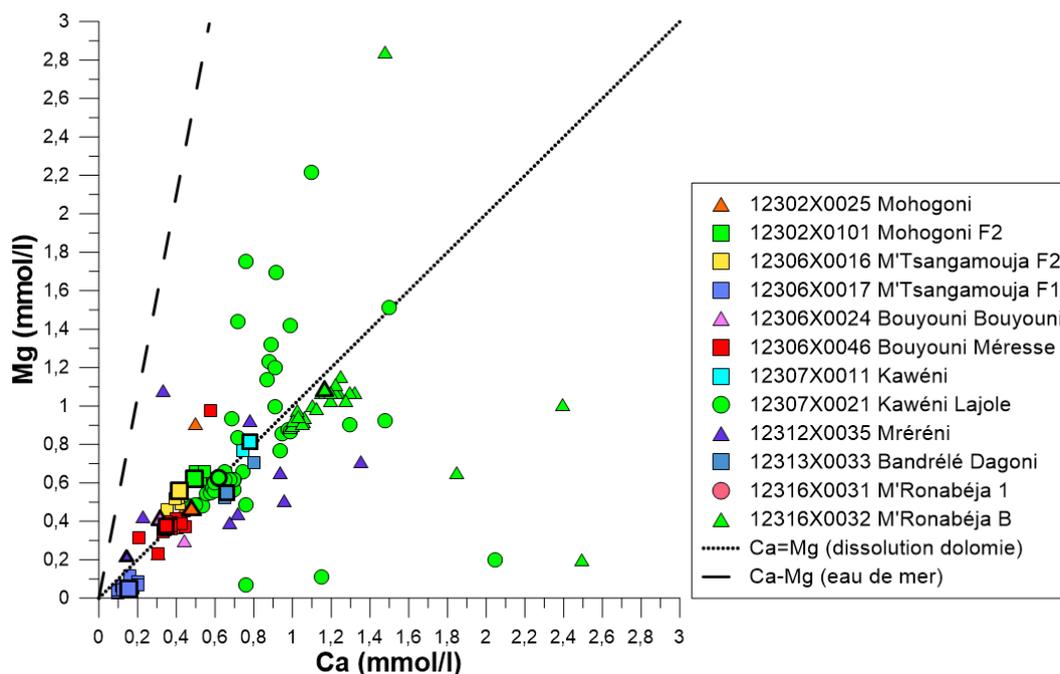


Figure 28 : Relation Ca-Mg : données de novembre 2021 (contours épais) et données antérieures (données ADES <https://ades.eaufrance.fr/> et données issues de rapports BRGM).

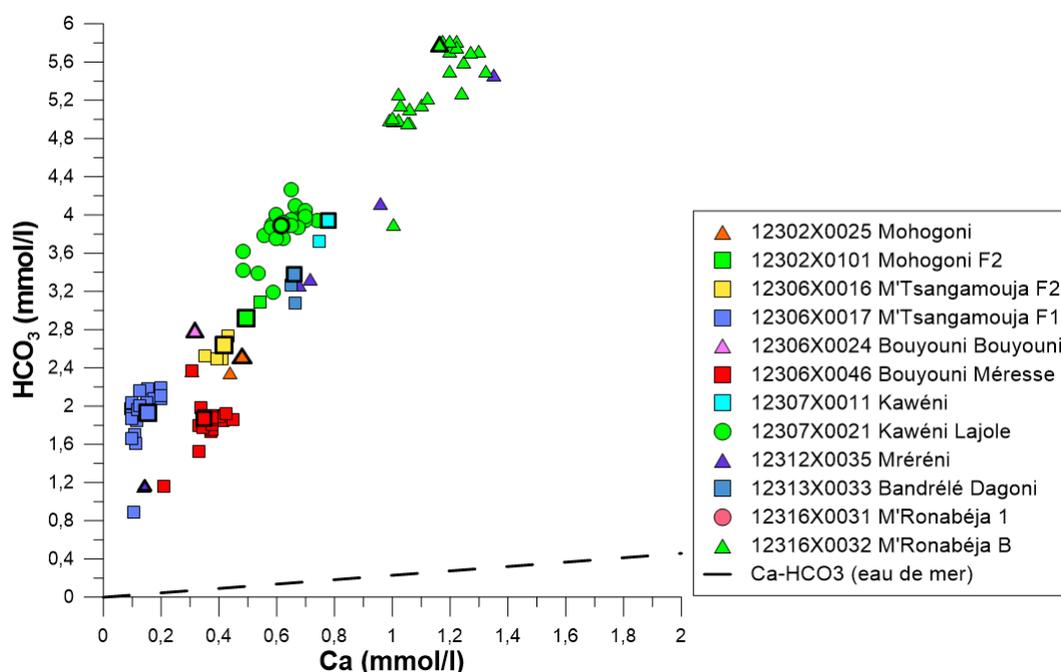


Figure 29 : Relation Ca-HCO₃ : données de novembre 2021 (contours épais) et données antérieures (données ADES <https://ades.eaufrance.fr/> et données issues de rapports BRGM).

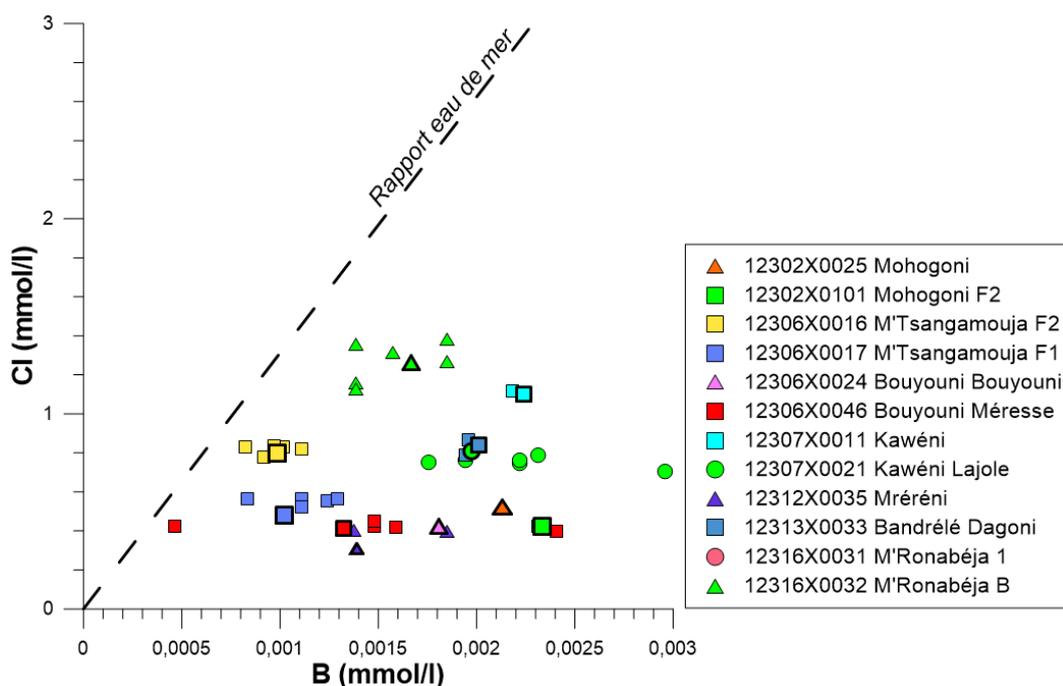


Figure 30 : Relation B-Cl : données de novembre 2021 (contours épais) et données antérieures (données ADES <https://ades.eaufrance.fr/> et données issues de rapports BRGM).

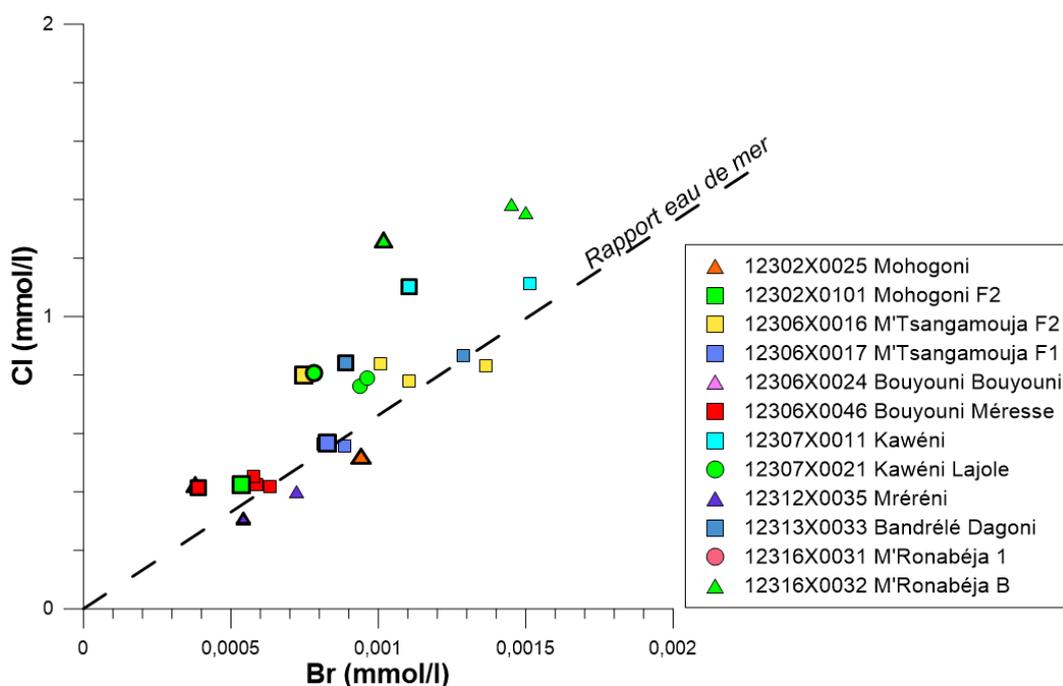


Figure 31 : Relation Br-Cl : données de novembre 2021 (contours épais) et données antérieures (données ADES <https://ades.eaufrance.fr/> et données issues de rapports BRGM).

e) *Isotopie*

Seuls deux échantillons ont fait l'objet d'une détermination des rapports isotopiques de l'eau ($\delta^{18}\text{O}$ et δD , soit l'abondance $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ – ou $^2\text{H}/^1\text{H}$ – de l'échantillon normalisé à la valeur moyenne de l'abondance $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ – ou $^2\text{H}/^1\text{H}$ – de l'eau de mer, fixée à 0‰) et du bore ($^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$).

Les rapports isotopiques pour la molécule d'eau sont donnés dans le tableau 5. Bien que situés dans des zones géographiques différentes, les 2 ouvrages ont exactement la même signature isotopique. Cette signature diffère de celle de l'eau de mer, et admet des valeurs relativement peu négatives, qui sont tout à fait compatibles avec la signature isotopique de précipitations condensées dans un nuage et obéissant aux règles de fractionnement isotopique telles que décrites par un modèle de Rayleigh (par ex. Couchoud, 2008). Bien qu'il existe un très léger écart par rapport au rapport isotopique théorique de l'hydrogène en application de la relation $\delta\text{D} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 10$ (droite des eaux météoriques mondiale), calculée à l'échelle du globe, mais l'on sait que cette relation peut admettre des variations locales, et un écart de 3‰ n'est pas assez significatif pour essayer de discerner l'existence d'autres phénomènes (comme par exemple une modification des rapports suite à une ré-évaporation partielle lors de la pluie ou lors de la percolation de l'eau en surface du sol). En conséquence, si l'influence d'une eau marine non évaporée (rapport proche de 0‰) ne peut être totalement exclue, elle n'est en tout cas pas identifiable sur la base de ces mesures, et l'hypothèse la plus vraisemblable est celle de l'infiltration d'une eau de pluie qui acquiert progressivement une minéralisation lors de son cheminement souterrain.

Ouvrage	Date	$\delta^{18}\text{O}$ (‰ VSMOW)	δD (‰ VSMOW)
Kawéni Lajolie 12307X0021/KAOUÉ3	08/11/21	-4,0 ± 0,1	-19,0 ± 1
Bandrélé Dagoni 12313X0033/BAND	12/11/21	-4,0 ± 0,1	-19,0 ± 1

Tableau 5 : Rapports isotopiques en oxygène et hydrogène.

Les rapports isotopiques en bore sont présentés dans le tableau 6. Deux valeurs sont données pour chaque prélèvement, et reflètent les incertitudes de mesures. Les deux ouvrages ont cette fois des rapports différents. Le rapport pour le forage 12307X0021/KAOUÉ3 – Kawéni Lajolie est de +40‰, soit le rapport isotopique en bore de l'eau de mer (Figure 32 ; le rapport B/Cl pour Kawéni Lajolie est de 0,00243). On a donc ici conservation du rapport isotopique initial (celui de l'eau lors de son évaporation ; il n'y a pas d'effet d'évaporation pour le bore ; cf. Kloppmann et al., 2011). Pour le forage 12313X0033/BAND – Bandrélé Dagoni, le rapport isotopique est de +52‰ (le rapport B/Cl est de 0,00239). On est ici dans un cas d'indétermination : il est peu vraisemblable, surtout en considérant les rapports isotopiques mesurés sur l'eau, que le rapport isotopique du bore varie de manière importante dans l'eau de mer. On ne peut guère non plus invoquer de phénomène d'évaporation d'eau de mer, la minéralisation de Bandrélé étant inférieure à celle de Kawéni (Tableau 4). Reste l'hypothèse d'une influence d'une intrusion saline, qui se ferait uniquement sentir par le rapport isotopique en bore, mais pas par le rapport d'abondance B/Cl (Figure 30) ou d'autres marqueurs, ce qui est difficile à concevoir.

Ouvrage	Date	$\delta^{11}\text{B}$ (‰)	Incertitude (‰)
Kawéni Lajolie 12307X0021	08/11/21	40,14	0,07
		40,41	0,06
Bandrélé Dagoni 12313X0033/BAND	12/11/21	51,72	0,05
		52,15	0,07

Tableau 6 : Rapports isotopiques en bore.

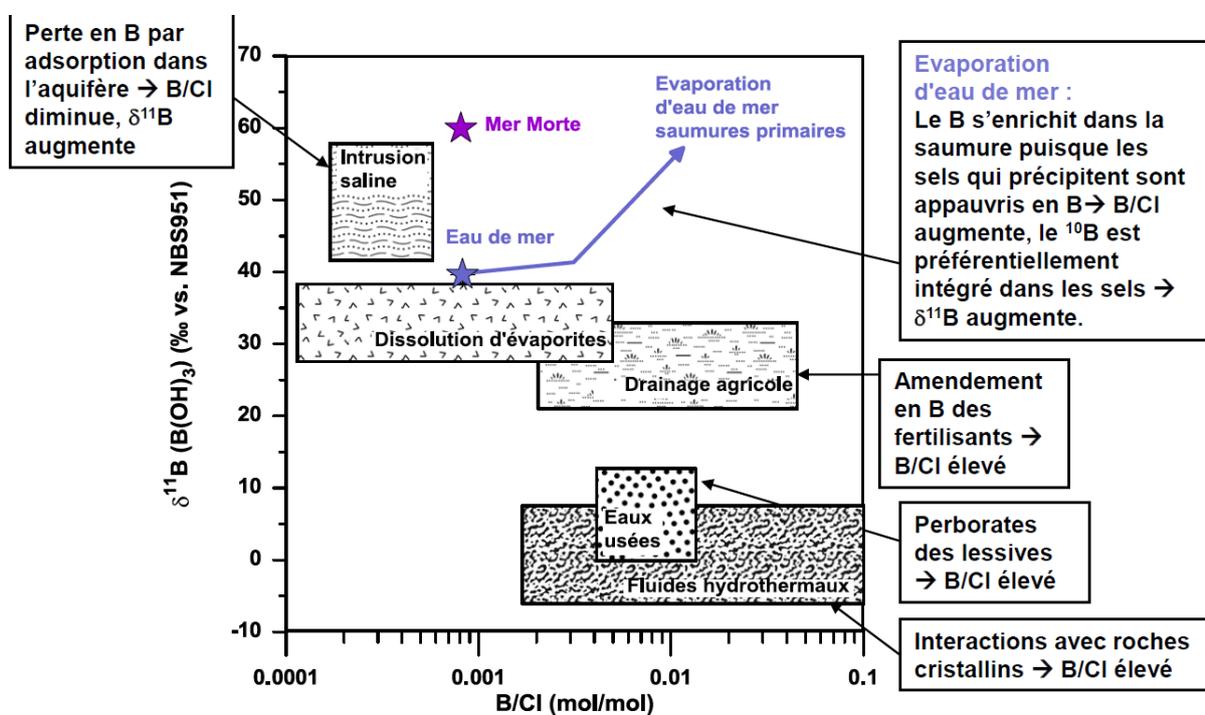


Figure 32 : Relation $\delta^{11}\text{B}$ en fonction du rapport B/Cl (d'après Kloppmann et al., 2011).

5. Interprétation des résultats

5.1. SECTEUR CENTRE-SUD DE MAYOTTE

5.1.1. Caractéristiques hydrogéologiques du secteur Centre-Sud

Le rapport d'étude BRGM/RP-61757-FR propose à partir de la synthèse et de l'interprétation des données disponibles de regrouper le fonctionnement hydrogéologique des systèmes aquifères du Centre-Sud selon trois schémas conceptuels :

- Les systèmes aquifères perchés,
- Les systèmes aquifères volcano-sédimentaires,
- Les paléovallées enterrées.

La répartition géographique de ces systèmes est donnée figure 33.

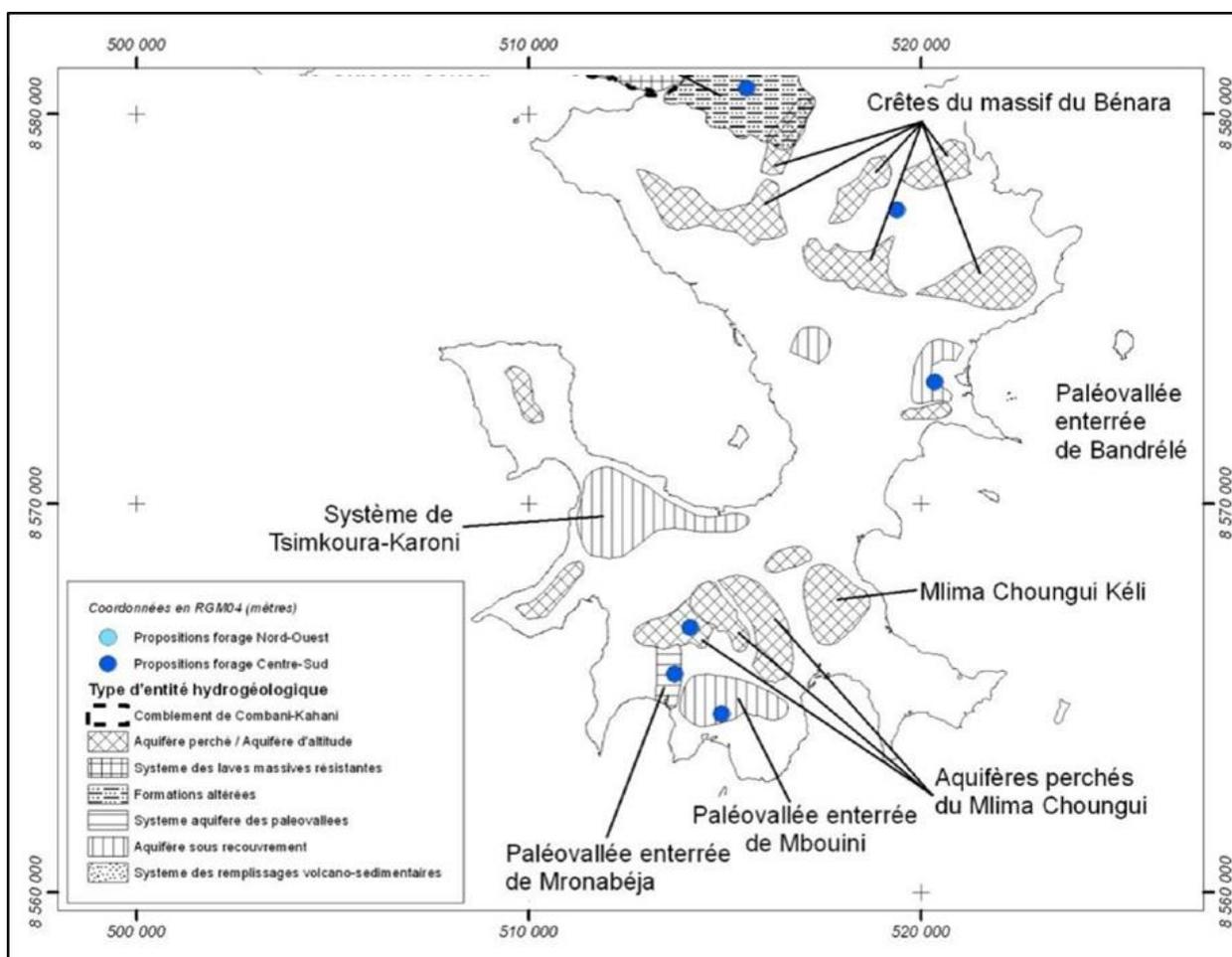


Figure 33 : Localisation des entités hydrogéologiques du secteur Centre-Sud (partie Centre-Sud de la carte du BRGM/RP-61757-FR)

5.1.2. Zone de Bandré

a) Contexte géographique

La zone de Bandré se situe au sud-est de l'île de Grande Terre (Figure 34). Elle s'étend du Mro Oua Banano (au nord) à Musicale Plage (au sud) et s'articule autour de la commune de Bandré, du Mtsatoundou (108 mNGM) et du Rassi Mounyendré (80 mNGM) et est, ainsi, légèrement vallonnée.



Figure 34 : Carte de la zone de Bandré avec le seul ouvrage connu (12313X033/BAND ouvrage réhabilité en 2018)

Plusieurs ravines entaillent la zone de Bandré. Aucun cours d'eau pérenne n'y a été observé. Lors des observations hydrogéologiques de juillet 2001, le débit de la ravine était de 5 l/mn directement à l'aval de la prise d'eau et seulement de l'ordre de 1 l/mn (écoulement discontinu) sous 30 m NGM. Aucune source n'a été recensée sur ce secteur (BRGM/RP-51498-FR).

b) Contexte hydrogéologique et risque d'intrusion saline

Le forage de **Bandré-Dagoni (12313X0033/BAND)** a été implanté en rive droite du Mro Oua Dagoni en 2002 (BRGM/RP-51498-FR). Jamais raccordé, ce forage a été fermé par la DEAL en 2015, diagnostiqué par un passage caméra en 2017 (BRGM/RP-67116-FR) puis réhabilité en août 2019 (BRGM/RP-69504-FR).

Le forage de Bandré-Dagoni fait 80 m de profondeur. Il a recoupé les formations géologiques énumérées dans le tableau 7.

Profondeur (m)		Altitude (mNGM)		Formation
de	à	de	à	
0	6	18,1	12,1	colluvions et/ou alluvions limoneuses
6	16	12,1	2,1	isaltérites
16	19	2,1	- 0,9	brèches pyroclastiques indurées et altérées
19	22	- 0,9	- 3,9	coulée de lave sub-aphyrique
22	26	- 3,9	- 7,9	brèches pyroclastiques indurées, altérées à peu altérées
26	41	- 7,9	- 22,9	laves vacuolaires massives et niveaux scoriacés
41	52	- 22,9	- 33,9	brèches pyroclastiques remaniées, indurées, saines
52	55	- 33,9	- 36,9	laves vacuolaires
55	80	- 36,9	- 61,9	brèches pyroclastiques remaniées

Tableau 7 : Lithologie du forage de Bandrélé-Dagoni (12313X0033/BAND).

Le forage de Bandrélé-Dagoni recoupe donc une série de coulées de lave et de brèches pyroclastiques altérées jusqu'à une trentaine de mètres de profondeur. Cette succession repose sur des pyroclastites remaniées indurées.

Lors de sa réalisation, les principales venues d'eau ont été observées :

- dans la zone de transition brèches pyroclastiques/coulées de lave vacuolaire (25 m de profondeur ; - 6,9 mNGM), probablement au niveau de la partie scoriacée constituant le toit d'une coulée ;
- au sein d'un niveau scoriacé situé à la transition entre deux coulées (36 m de profondeur ; - 17,9 mNGM) ;
- au sein de brèches pyroclastiques remaniées, indurées et saines (46 et 61 m de profondeur ; respectivement - 27,9 et - 42,9 mNGM).

Le niveau piézométrique mesuré au cours de la foration est resté stable autour de -4,5 m de profondeur (13,5 mNGM, BRGM/RP-52104-FR). Les niveaux perméables recoupés sont donc captifs à semi-captifs. Le forage a été équipé en ouvrage d'exploitation avec une crépine allant de 22 à 62,25 m de profondeur ; soit de - 3,9 mNGM à - 44,15 mNGM.

Plusieurs pompages d'essai ont été menés sur le forage de Bandrélé-Dagoni (BRGM/RP-69504-FR) suite à son implantation et à sa réhabilitation : en décembre 2002, août 2003 (BRGM/RP-52104-FR) et août 2019. Les données issues des pompages d'essais anciens de 2002-2003 ont été réinterprétées et comparées à celles de 2019. Le diagnostic ainsi mené montre que l'ouvrage est implanté dans un aquifère multicouche dont il capte la partie inférieure.

Il montre, par ailleurs, que l'aquifère capté a une transmissivité de 6.10^{-4} m²/s, et est limité dans l'espace : deux limites étanches parallèles ont été identifiées et correspondent vraisemblablement à l'extension latérale des coulées de lave aquifères interceptées par l'ouvrage. La largeur de cet ensemble de coulées est évaluée à environ 150 m, moyennant une valeur d'emménagement de 8.10^{-3} . L'aquifère capté apparaît, en outre, soumis à un effet de drainage de l'aquifère de surface (alluvions/colluvions) au travers d'une éponte (isaltérites) peu perméable (5.10^{-7} m/s pour une épaisseur unitaire). L'emménagement de l'aquifère de surface

est évalué à 0,015, suggérant un aquifère libre. Sa transmissivité n'a pas pu être estimée avec précision (de l'ordre de 10^{-4} m²/s).

Une évaluation des débits exploitables a été menée à la suite de ces travaux (BRGM/RP-69504-FR). Ces débits ont été calculés en considérant deux conditions de niveau maximum admissible (soit ne devant pas être atteints pendant l'exploitation) définis en fonction de la prise en compte ou non d'un biseau salé (Tableau 8).

	Sans prise en compte du biseau salé	Avec prise en compte du biseau salé
Niveau maximal admissible	-22 m/sol (soit -4 m NGM) <u>Critère</u> : non dénoisement de la pompe et des crépines.	+1 m NGM
1 an de pompage 24h/24	6-7 m ³ /h	4-5 m ³ /h
3 mois de pompage 24h/24	11 m ³ /h	8 m ³ /h

Tableau 8 : Débits exploitables calculés en fonction ou non de la prise en compte d'un biseau salé proposés en 2018

Sur cette base, il est préconisé dans ce même rapport d'exploiter le forage de Bandrélé-Dagoni de manière saisonnière comme suit :

- Position de la pompe : - 30 m/sol
- Niveau maximal admissible : - 22 m/sol (toit des crépines) sans prendre en compte le risque d'intrusion saline
- Débit : 8 à 11 m³/h pour 3 mois de pompage en 20h/24 (un pompage en 20h/24 est préconisé pour un bon fonctionnement de la pompe).

Il est précisé, en 2018, que le débit proposé (entre 8 et 11 m³/h ; 20h/24 pendant 3 mois) permettra un démarrage de l'exploitation de manière raisonnée et pourra être réévalué à la baisse ou à la hausse en fonction des suivis menés durant la première année d'exploitation. **Ce forage n'a jamais été mis en exploitation.**

D'après les reconnaissances de terrain menés sur le secteur dans les années 2000 (BRGM/RP-51498-FR, BRGM/RP-52104-FR et BRGM/RP-53119-FR), **une paléovallée majeure**, creusée dans les coulées à olivine et comblée par une série de laves plus récentes à pyroxène (coulées de lave et pyroclastite), constituerait, du SE vers le NW, le Rassi Mounyendré et le relief de Mtsatoundou. La rive droite de cette paléovallée affleurerait en fenêtre dans la vallée du Mro oua Dagoni entre les cotes 30 et 50 m NGM environ et les faciès d'altération des coulées de lave à olivine auraient été érodés sur les flancs et au fond de cette paléovallée.

Dans cette interprétation, le niveau R2 résistant serait représentatif de l'aquifère capté par le forage de Bandrélé-Dagoni, associé à une paléovallée enterrée.

D'après les sondages électriques implantés sur la zone entre 2001 et 2003, l'aquifère capté serait concerné par des eaux salées vers la côte Est.

La coupe géophysique réalisée à partir des données AEM datant de 2010 (Figure 35) montre une interprétation géophysique passant par l'ouvrage en direction de la côte Sud-Est. Le traitement des données AEM effectué lors de la rédaction du rapport BRGM/RP-61575-FR de 2013 semblait ne pas mettre en évidence une intrusion saline.

Les traitements appliqués à la donnée brute de géophysique héliportée évoluant, une nouvelle coupe a été éditée pour le présent rapport et les analyses seront abordées dans le sous chapitre d).

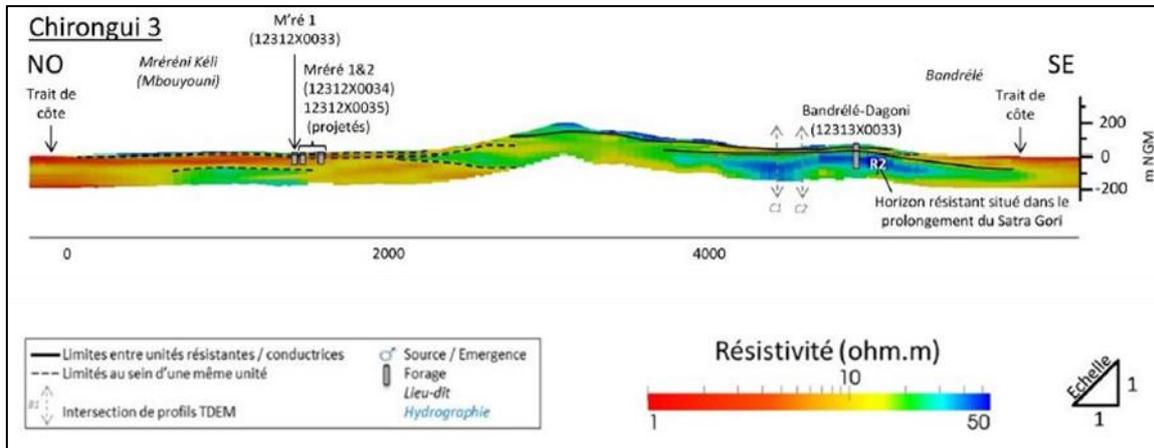


Figure 35 : Coupe AEM interprétée sur le secteur de Chirongui passant par le forage de Bandré (BRGM/RP-61757-FR)

c) Interprétation des résultats géochimiques

Les informations issues de la diagraphie physico-chimique réalisée sur l'ouvrage 12313X0033/BAND sont détaillées dans la section 4.1.1c), et comparées, le cas échéant, avec des diagraphies réalisées antérieurement. On reprend ici les points essentiels.

Des quatre ouvrages investigués, celui de Bandré-Dagoni est le forage qui présente le plus de variabilité des profils des paramètres physico-chimiques, tant en écoulement naturel, qu'après sollicitation par pompage, fût-elle limitée. On sait par ailleurs (Jossot et al., 2003) que cet ouvrage comprend de multiples zones de production d'eau, la moitié de la production se faisant autour de 25 m, des horizons plus profonds (36, 46, et 61 m) apportant des contributions de plus en plus réduites.

Les profils de température, particulièrement celui réalisé à l'issue du pompage, permettent d'identifier certains de ces horizons. La conductivité électrique en écoulement naturel n'est pas totalement homogène sur la verticale, de même que le pH : en conséquence, on a choisi de pomper à 2 profondeurs distinctes pour essayer de caractériser un horizon un peu plus minéralisé et un peu plus acide (vers 36 m de profondeur) et un horizon plus profond, un peu moins minéralisé et un peu moins acide (vers 46 m de profondeur). Toutefois, le pompage (3,5 m³ pompés au total) gomme pratiquement l'intégralité de cette faible variabilité de conductivité, et fait apparaître un pH légèrement plus acide. Il ne semble donc pas possible de mettre en évidence, en résultat du pompage, le drainage d'une eau de chimisme différent de celui qui prévaut en écoulement naturel. On notera également que le profil de l'oxygène dissous ne varie pas en réponse au pompage, et ne présente pas non plus de variation verticale en écoulement naturel. Enfin, comme cela est exposé dans la section 4.1.1, on ne se réfère que peu aux mesures de potentiel redox, eu égard à la variabilité inhérente à la mesure de ce paramètre.

En termes d'évolution temporelle des paramètres physico-chimiques (section 4.1.2a), assez peu de données sont disponibles pour cet ouvrage⁹. Il n'est pas possible de mettre en évidence de tendance d'évolution de la conductivité électrique, qui est proche de 440 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (une valeur similaire est rapportée en 2012), ou en pH, proche de 6,4 (les valeurs antérieures sont proches de 6,6).

En termes de chimie des éléments dissous (section 4.1.2b), les eaux de Bandrélé-Dagoni ont un faciès bicarbonaté sans qu'un cation domine vraiment (faciès proche de la limite entre pôle calcique magnésien et sodique potassique), ce type de faciès chimique étant fréquent pour les eaux souterraines de Mayotte, comme déjà relevés par des études antérieures (Malard et Winckel, 2008 ; Kloppmann et al., 2010). Si l'on s'intéresse plus spécifiquement à des marqueurs de salinisation (voir aussi section 4.1.2d), les concentrations en Na auraient tendance à légèrement décroître entre 2010 et 2021, celles en Cl ou en SO_4 à rester dans la gamme de variation antérieurement constatée. On peut porter un même constat avec les éléments en trace (section 4.1.2c), notamment avec B et Br, même si les données disponibles sont généralement encore plus parcellaires.

En termes d'isotopie (section 4.1.2e), les rapports isotopiques mesurés sur la molécule d'eau (rapports des isotopes stables de l'oxygène et de l'hydrogène) pointent vers une origine météorique, donc vers une eau souterraine issue de l'infiltration d'eau de pluie dans la zone de recharge, sans indice net d'un mélange avec une eau de mer ou une eau salée résultant de l'évaporation de l'eau de mer. Le rapport isotopique en bore est toutefois un élément qui peut amener à nuancer le constat posé avec les isotopes stables de la molécule d'eau. En effet, le rapport mesuré a une valeur qui n'est plus directement celle de l'eau de mer (qui constitue la source initiale des pluies, qui résultent de la condensation d'une eau de mer évaporée pour former des nuages) – le bore ne fractionnant pas lors d'une évaporation – mais l'attribution de l'origine de ce rapport pour Bandrélé-Dagoni ne peut être déterminée catégoriquement. On ne peut cependant totalement exclure la possibilité d'une influence saline dans l'acquisition du rapport isotopique en bore, mais aucun autre marqueur, tant isotopique que chimique, ne permet de soutenir cette hypothèse.

En résumé, il n'existe pas d'indice net permettant de mettre en évidence une variation de concentration indicatrice du drainage d'une eau de minéralisation différente, même si un doute subsiste avec le bore. Il faut aussi rappeler que ce forage n'est pas utilisé et que le pompage pratiqué n'a extrait que quelques m^3 d'eau. On ne peut donc pas présager des évolutions qui pourraient se faire si l'ouvrage était sollicité à un débit bien supérieur et sur des durées bien plus longues (par exemple, dérive des concentrations en Na, Cl ou B, qui pourraient étayer le constat posé avec les isotopes du bore).

d) Interprétation des résultats géophysiques

Le premier jet d'interprétation, réalisé à partir des données AEM seules, a permis de dégager quelques tendances à partir d'un pointé automatique de deux seuils de résistivité différents : 4 et 8 Ohm.m par la méthode présentée au paragraphe 3.4. La Figure 36 présente un exemple de ce pointé en coupe, sur un profil EM.

⁹ On précise qu'on ne considère les données que depuis 2010, même si quelques données peuvent exister depuis 1992-1993, mais plus fréquemment depuis 2002. Pour les données les plus anciennes, parfois acquises juste après la réalisation du forage, une variabilité parfois importante peut être constatée (on citera par exemple le cas de l'ouvrage 12307X0021 de Kawéni Lajolie), et on préfère donc focaliser l'interprétation sur des chroniques moins bruitées.

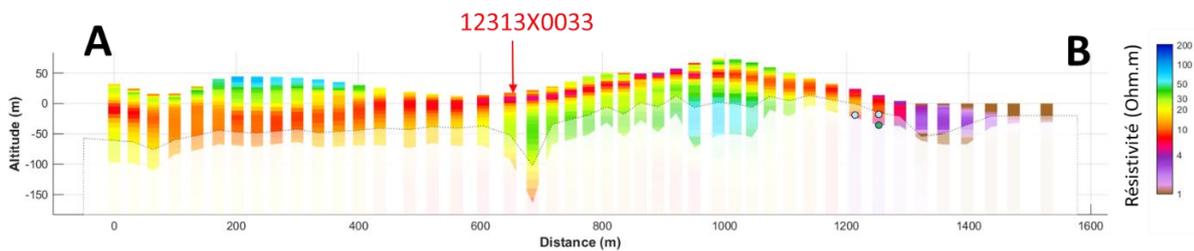
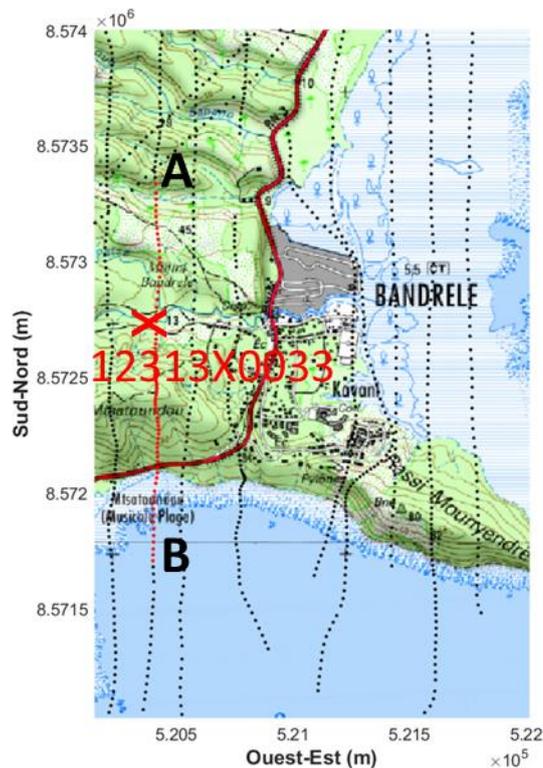


Figure 36 : Profil AEM sur lequel est représenté le pointé semi-automatique de l'intrusion saline grâce à un seuil à 4 Ohm.m (en bleu ciel) et un seuil à 8 Ohm.m (en vert). Exagération verticale 1.2.

On peut aussi visualiser le résultat en cartographie de l'altitude du toit de l'invasion, c'est-à-dire de l'altitude à partir de laquelle on rencontre l'invasion pour la première fois. Comme expliqué précédemment, nous avons travaillé avec deux seuils de résistivité différents : 4 et 8 Ohm.m, 4 étant plus proche de l'invasion à proprement parler et 8 comprenant une zone de mélange eau douce – eau salée et étant donc plus sécuritaire. La Figure 37 présente cette cartographie. Les points noirs correspondent aux points de données AEM, recouverts par des points de couleur représentant l'altitude de l'intrusion. S'il n'y a pas de point de couleur c'est que le seuil de résistivité n'a pas été rencontrée sur les données AEM. Cela peut être expliqué par l'absence de l'intrusion saline, ou par une profondeur d'investigation de la géophysique insuffisante à cet endroit pour atteindre l'intrusion (investigation réduite à cause du ratio signal sur bruit insuffisant ou intrusion trop profonde pour la méthode).

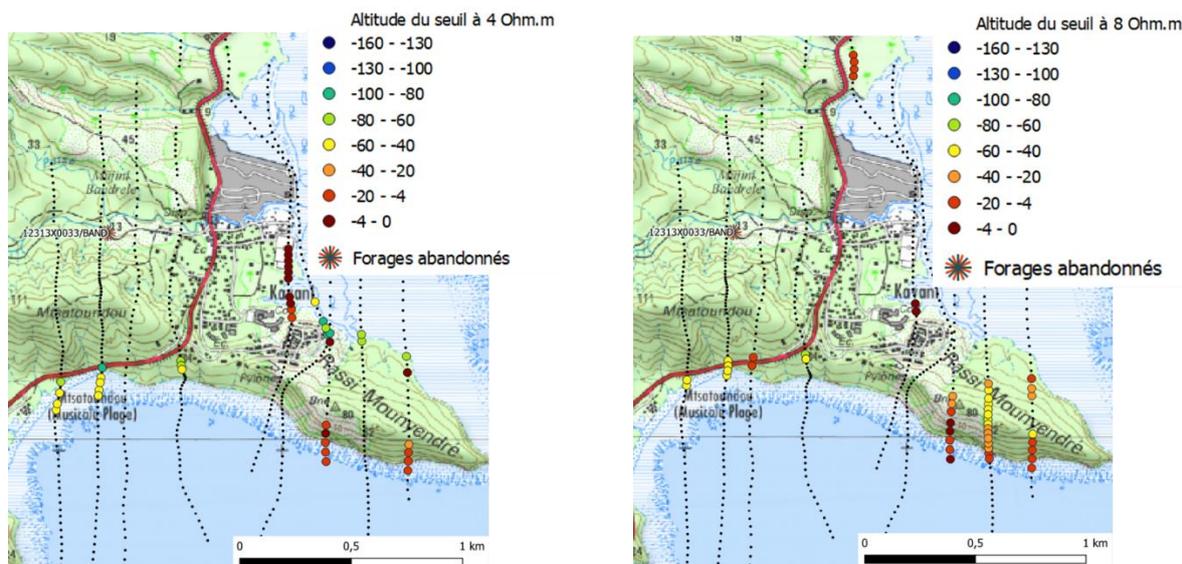


Figure 37 : Localisation en altitude de l'intrusion saline « principale » (pas la plus proche de la surface) pointée automatiquement sur les données AEM dans le secteur de Bandrélé.

La pénétration de l'intrusion saline depuis l'océan en direction de l'intérieur de l'île est peu marquée et il semblerait que celle-ci soit absente ou sous la profondeur d'investigation à part au niveau de la pointe Rassi Mounyendré (Figure 37).

Certaines études précédentes présentent des profils électriques (BRGM/RP-53119-FR, profil A) sur lesquels, dans cette même zone, on voit un corps résistant (autour de 30-40 Ohm.m) commençant à -100 m NGM. Or, à cet endroit-là, l'AEM image un corps conducteur autour de 4-5 Ohm.m. La Figure 38 représente ce profil A qui intercepte le profil AEM de la Figure 38 à la distance de 500m.

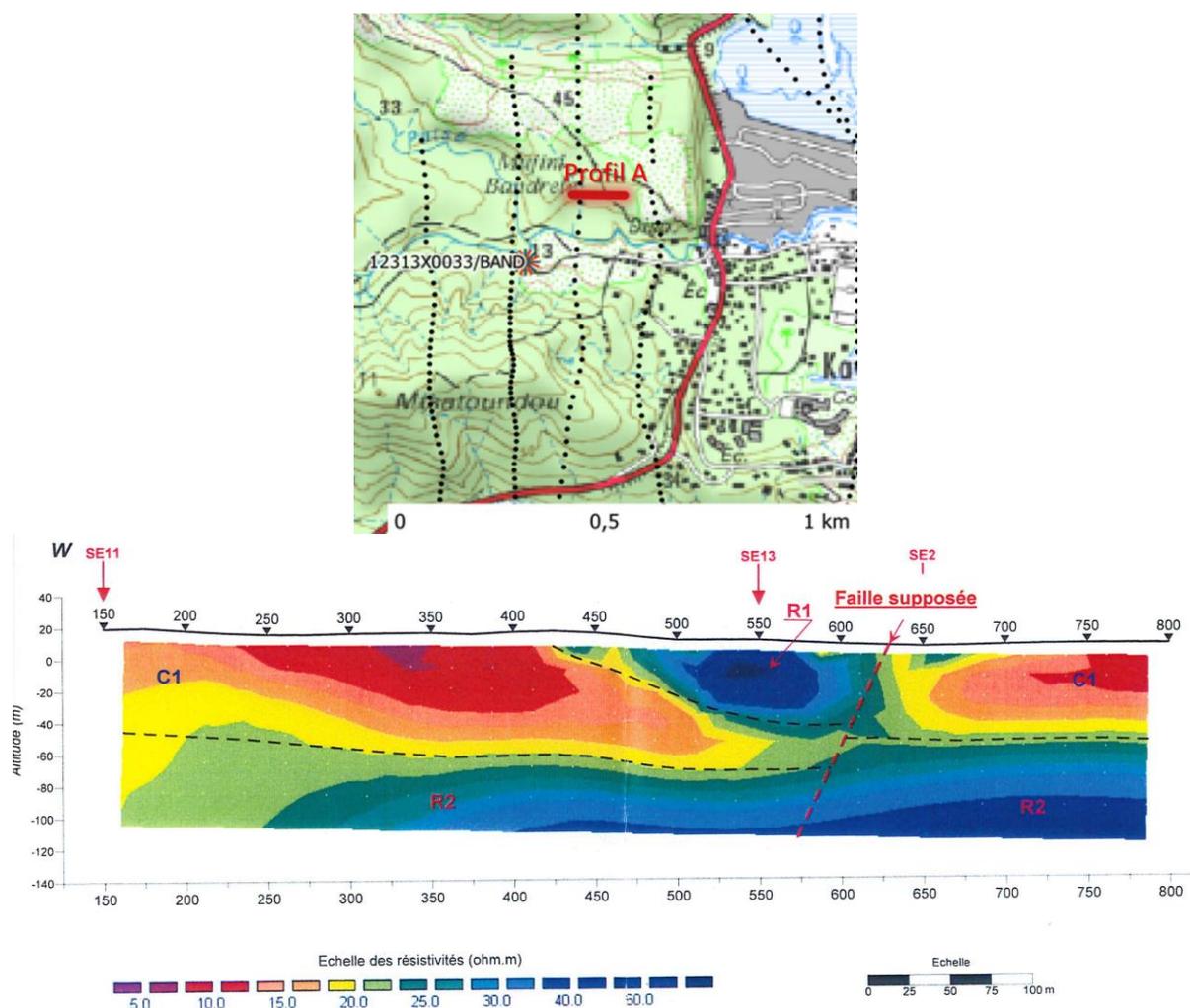


Figure 38 : Coupe de résistivité interprétée et sa localisation (BRGM/RP-53119-FR, profil A)

L'AEM et les profils TRE sont tous les deux cohérents pour dire que l'intrusion saline n'est pas présente dans la limite de la profondeur d'investigation des méthodes, au niveau du forage de Bandré.

e) Conclusion et recommandations

Le forage de **Bandré-Dagoni (12313X0033/BAND)** capte une paléovallée qui s'étend sur plus d'un kilomètre de direction Ouest/Nord-Ouest depuis la côte. D'un point de vue géochimique, les résultats obtenus ne présentent aucun indice pouvant conclure à une intrusion saline influençant le forage. Les investigations géophysiques et leur nouvelle interprétation ne décèlent pas non plus d'intrusion saline à proximité des ouvrages.

Néanmoins, au vu du contexte insulaire de Mayotte et de la faible distance à la côte du forage situé dans une paléovallée ainsi que des données AEM sur un peu plus de 100 m de profondeur, il serait recommandé d'assurer un suivi continu de la conductivité électrique au droit du forage si celui-ci est mis en exploitation. En effet, la mise en place d'un pompage pourrait mobiliser une intrusion saline qui serait à une profondeur supérieure à celles investiguées dans cette présente étude.

5.1.3. Zone de Mronabéja – Mbouini

a) Contexte géographique

La zone de Mronabéja-Mbouini se situe au sud de l'île de Grande-Terre sur la commune de Kani-Kéli. Elle s'étend sur les bassins versants du Mroni Antanana et du Mroni Bérambo (Figure 39).

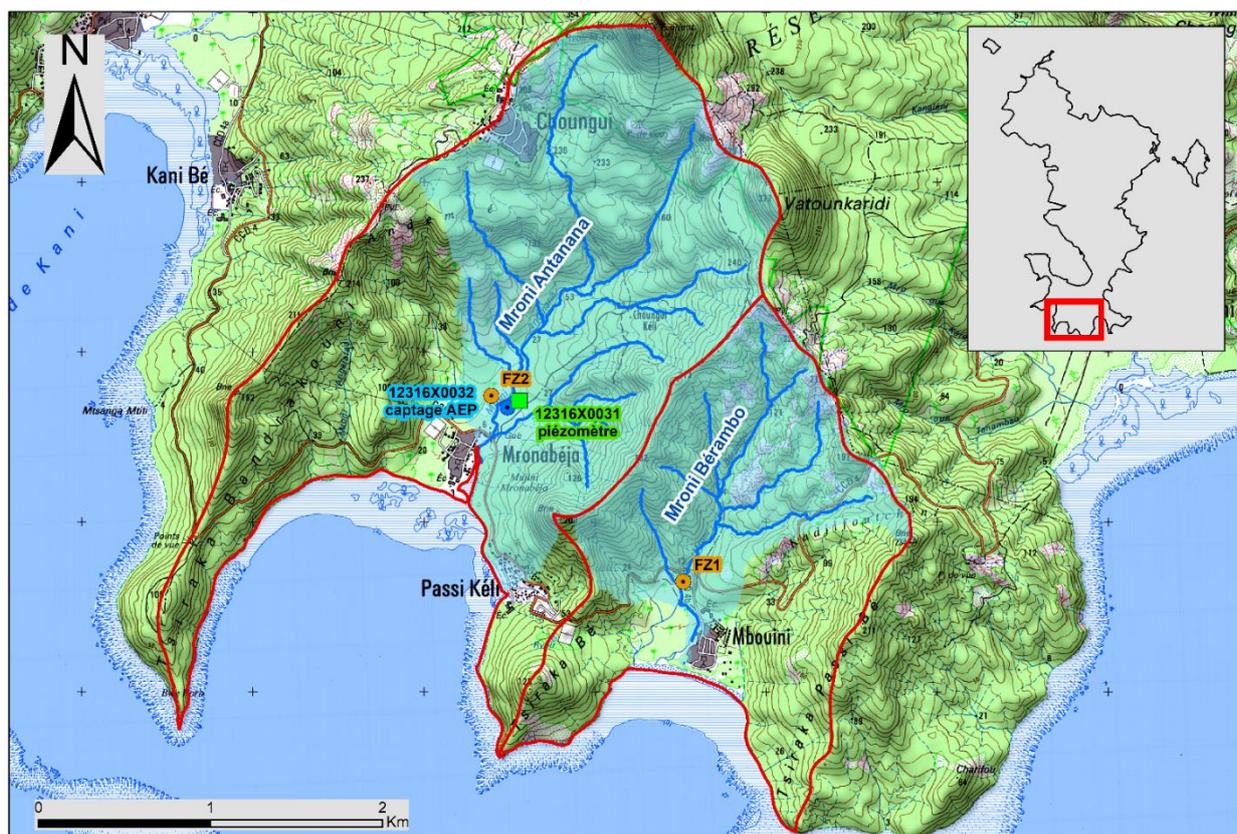


Figure 39 : Carte de localisation de la zone d'étude de Mronabéja - Mbouini

Un captage AEP (12316X0032/MRONAB) et un piézomètre (12316X0031/MRO1) sont implantés en rive gauche du Mroni Antanana et distants de 80 mètres. Deux sites de forage (FZ1 et FZ2) pour deux nouveaux captages AEP ont été retenus (BRGM/RP-63837-FR). Le site FZ2 se situe à l'ouest du captage AEP existant de Mronabéja et le site FZ1, dans la vallée voisine en rive droite du Mroni Bérambo. Les bassins versants spécifiques des deux cours d'eau intermittents sont visualisés par une surface de couleur bleu pâle sur la carte. Ils s'intègrent dans deux bassins versants plus globaux (limites tracées en rouge) qui suivent les principales crêtes. Le sommet du Mlima Choungui (593 mNGM) constitue le point le plus élevé, en limite nord du bassin versant du Mroni Antanana.

Le risque d'intrusion saline pour le captage AEP en exploitation et celui pour les deux futurs captages AEP au droit des sites FZ1 et FZ2 sont les objets d'étude de cette zone.

b) Contexte hydrogéologique et risque d'intrusion saline

L'ouvrage AEP 12316X0032/MRONAB a été réalisé durant la campagne de forage de 1999-2000 (BRGM/RP-50428-FR). Il est implanté à proximité du village de Mronabéja, à moins de 600 m du lagon et à une altitude de 7 m NGM. Il fait 70 m de profondeur (- 63 m NGM). Il a recoupé les formations géologiques décrites dans le Tableau 9.

Profondeur (m)		Altitude (mNGM)		Formation
de	à	de	à	
0	3	7	4	cedres argileuses brunes
3	28,5	4	- 21,5	alluvions fluviales composés de galets et de blocs polygéniques dans une matrice sablo-limoneuse
28,5	44	- 21,5	- 37	basalte riche en olivine
44	47,5	- 37	- 40,5	lave fissurée aphyrique
47,5	54,5	- 40,5	- 47,5	lave différenciée à minéraux clairs et amphibole
54,5	59	- 47,5	- 52	lave sombre, fissurée, aphyrique
59	60	- 52	- 53	niveau de recuit verdâtre
60	70	- 53	- 63	lave sombre, scoriacée, à minéraux clairs dont la base présente une texture de recuit (paléosurface)

Tableau 9 : Lithologie du forage de Mronabéja (12316X0032/MRONAB)

Deux principales arrivées d'eau (10 m³/h chacune) ont été observées :

- La première dans la partie supérieure de la coulée de lave la plus superficielle (entre 28,5 et 33 m de profondeur ; soit entre - 21,5 mNGM et - 26 mNGM) ;
- La seconde au niveau de la partie fissurée de l'une des coulées sous-jacentes (entre 46 et 48 m de profondeur ; soit entre - 39 mNGM et - 41 mNGM).

Les autres horizons ne montrent que des productivités modérées. Il faut néanmoins noter que, bien qu'elle soit très faible (de l'ordre de 1-2 m³/h), la productivité des formations alluviales n'est pas nulle. Ainsi, l'aquifère serait constitué par :

- Une alternance de coulées basaltiques dans sa partie inférieure (entre 28,5 et 70 m de profondeur), avec une perméabilité restreinte à deux niveaux principaux d'une épaisseur de quelques mètres chacun.
- Des alluvions dans sa partie supérieure (de 3 à 28,5 m de profondeur), qui peuvent éventuellement jouer un rôle capacitif vis-à-vis des laves sous-jacentes.

Il est considéré comme captif. Plusieurs pompages d'essais ont été réalisés sur le captage de Mronabéja entre 2000 et 2004. Ils ont permis de calculer une transmissivité de $5,5 \cdot 10^{-4}$ m²/s, un coefficient d'emmagasinement de $1,9 \cdot 10^{-3}$ et de mettre en évidence la présence d'une limite alimentée (relation avec le Mroni Antanana ou drainage verticale ?) et d'une limite étanche (compartmentation de l'aquifère ?). Associés à des simulations à long terme, ils ont en outre permis de déterminer un débit d'exploitation prévisionnel de 25 m³/h, 20h/24h (BRGM/RP-50428-FR), revu en 2004 à un débit entre 5,1 et 6,75 m³/h en exploitation annuelle (BRGM/RP-52810-FR).

Le forage a été équipé en ouvrage d'exploitation et a été mis en service pour la première fois en 2004. Il est exploité à un débit moyen de 8,8 m³/h depuis 2017.

Les niveaux piézométriques de l'ouvrage sont suivis depuis 2017 au moyen d'une mesure manuelle tous les 10 jours environ (Figure 40).

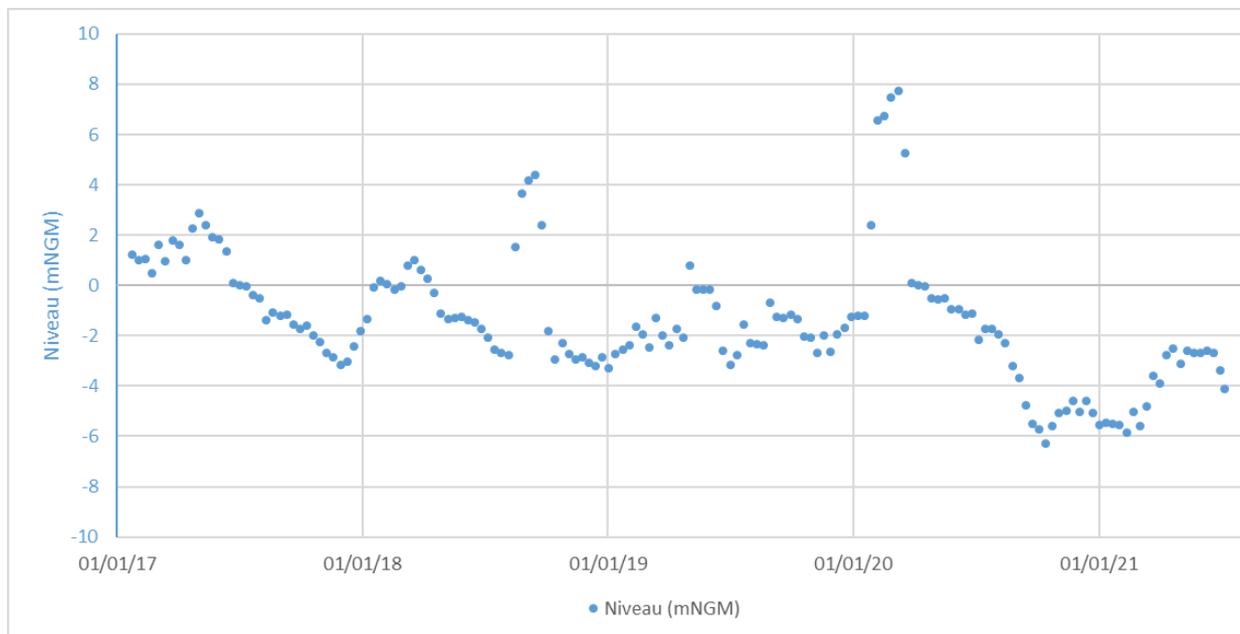


Figure 40 : Chronique piézométrique du forage de Mronabéja (12316X0032/MRONAB)

En fin de travaux de forage, la cote piézométrique mesurée était de 4 m NGM (01/07/2000). De 2017 à 2021, on observe des variations plus ou moins cycliques. Une tendance à la baisse semble s'esquisser sur la période d'observation 1992-2022. Cela se confirme avec une diminution de la recharge depuis le début des années 2010 (Figure 41).

Le forage 12316X0031/MRO1 a été réalisé durant la première campagne de forage de reconnaissance de Mayotte en 1990-1991 (BRGM/RR-35165-FR). Il s'agit d'un forage de petit diamètre situé à une altitude de 11,34 m NGM à moins de 700 m du lagon. Il fait 56 m de profondeur (-45 m NGM). Il recoupe, au moins dans sa partie supérieure, des formations géologiques similaires au forage de Mronabéja (12316X0032/MRONAB).

Le forage a rencontré vers 20 m de profondeur une nappe captive dont le niveau statique est proche du sol, voire susceptible d'affleurer en période de hautes eaux. Il a été aménagé en piézomètre en 1992. Sa chronique piézométrique est présentée en figure 41.

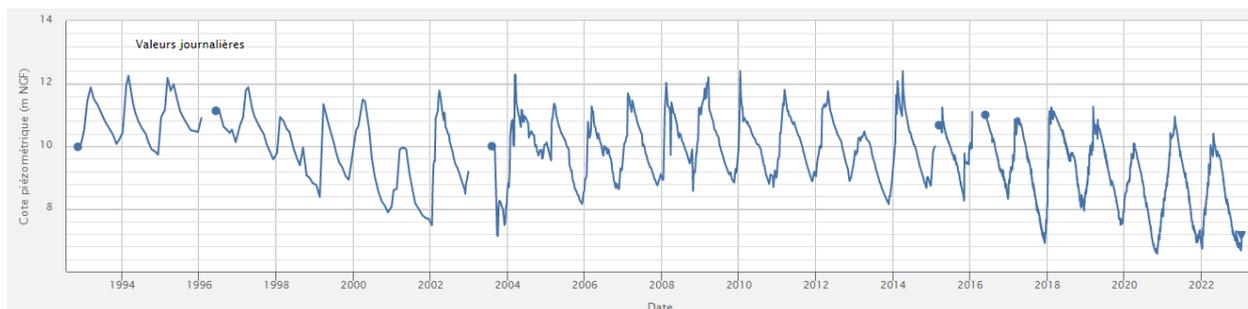


Figure 41 : Chronique piézométrique de l'ouvrage 12316X0031/MRO1

Les niveaux mesurés se caractérisent par des cycles annuels réguliers fluctuant entre 7 à 10 mNGM en basses eaux (novembre/décembre) et 11 à 12,5 m NGM en hautes eaux (février à avril). Les variations annuelles du niveau piézométrique sont généralement de l'ordre de 4 m.

En ce qui concerne l'alimentation de l'aquifère capté, la présence quasi généralisée d'un horizon altéré est a priori un inconvénient pour l'infiltration d'eau de surface vers les eaux souterraines. Toutefois, l'argilisation de cet horizon n'est pas systématique. En effet, les allotérites (stade ultime de l'altération de nature argileuse) ont presque entièrement été décapées par l'érosion. Le profil d'altération se compose donc principalement de saprolites qui sont plutôt de nature sablo-argileuse et peuvent ainsi permettre le stockage d'une certaine quantité d'eau. On peut alors proposer l'hypothèse, comme cela a été évoqué précédemment pour le captage AEP 12316X0030, que l'exploitation d'un horizon fissuré sous-jacent puisse, dans certaines conditions, drainer l'eau stockée dans les horizons altérés sus-jacents.

D'après le rapport BRGM/RP-61757-FR, basé sur la corrélation de données géologiques et géophysique, l'aquifère capté par les deux ouvrages serait celui d'une paléovallée enterrée (voir schéma conceptuel de la figure 64) et serait constitué, à l'instar de l'hydrogéologie du captage AEP 12316X0032/MRONAB, de laves fracturées et fissurées recouvertes par une trentaine de mètres de formations alluvionnaires.

La corrélation entre ces niveaux de laves et une gamme de résistivité précise issue des interprétations géophysiques a permis de produire une illustration de l'extension possible de cet aquifère (Figure 42).

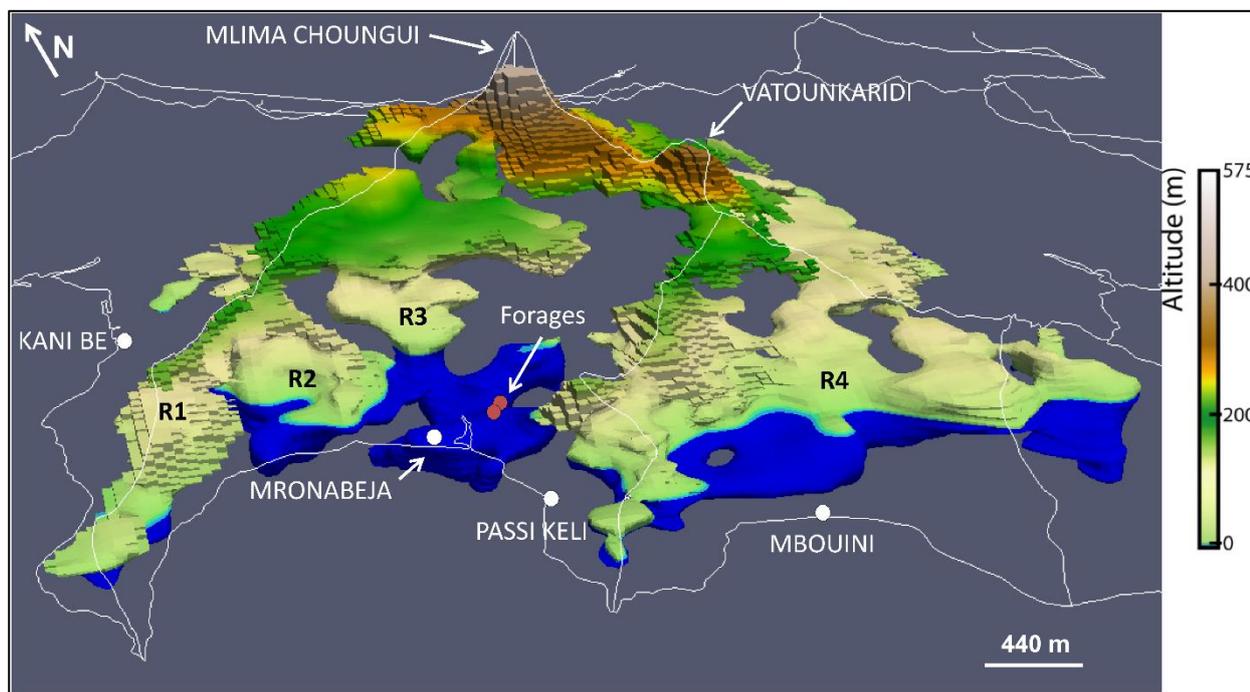


Figure 42 : Représentation en 3D et en fonction de l'altitude de l'extension de l'objet résistant recoupé par les forages de Mronabéja. L'échelle verticale est exagérée (x 2 l'échelle horizontale) (source : BRGM/RP-62825-FR).

L'objet résistant R3 issu de l'interprétation géophysique est caractérisé selon son altitude ; la plage bleue foncée indique la partie aquifère située sous le niveau marin et captée par l'ouvrage AEP et le piézomètre.

L'extension de la paléovallée caractérisée par l'objet R4 couvre le bassin versant du Mroni Bérambo où se situe le site du futur forage FZ1 (Figure 39). Par similitude avec l'aquifère de Mronabéja, ce système serait constitué de laves fracturées et fissurées, recouvertes par quelques dizaines de mètres d'épaisseur d'alluvions ou d'altérites (BRGM/RP-61757-FR).

La figure 43 donne l'extension en surface de la paléovallée associée à l'objet résistant R3 sur un fond IGN.



Figure 43 : Localisation de la paléovallée R3 sur fond cartographique IGN (source : BRGM/RP-62825-FR)

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 jusqu'à la côte où elle occupe la totalité du débouché littoral du Mroni Antanana et se trouve sous le niveau marin. Elle s'étend ainsi sur deux bassins versants de surface : celui du Mroni Antanana et celui du Mroni Djalimou (à l'Ouest). De fait son extension diffère nettement de l'extension superficielle du bassin versant du Mroni Antanana.

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

Dans le cas de la paléovallée associée au bassin versant du Mroni Antanana comme pour celle associée au bassin versant du Mroni Bérambo, l'écoulement des eaux souterraines est estimé vers le sud avec un exutoire probable dans le lagon.

c) *Interprétation des résultats géochimiques*

Les informations issues de la diagraphie physico-chimique réalisée sur l'ouvrage 12316X0031/MRO1 sont détaillées dans la section 4.1.1a).

Les profils de conductivité électrique, de pH et d'oxygène dissous sont verticaux, que l'on considère ces profils en écoulement naturel (avant pompage) ou juste après l'action de pompage (volume pompé : environ 1m³). Un petit pompage ne modifie donc pas la structure que l'on peut déterminer en écoulement naturel, en particulier, il n'y a pas d'indice d'appel d'une masse d'eau plus minéralisée ou de pH élevé (plus alcalin), comme pourrait l'être une masse d'eau salinisée. L'aquifère produit donc une eau de chimisme homogène le long de la partie crépinée. Le profil de température, qui montre quelques variations en fonction de la profondeur, suggère que la production d'eau se fait par 3 horizons distincts. Pour le prélèvement, la pompe a été positionnée à 43 m de profondeur, au sein de l'un de ces horizons.

Deux ouvrages ont été échantillonnés à Mronabéja (12316X0031/MRO1 et 12316X0032/MRONAB), seul le second ayant fait l'objet d'analyses chimiques au laboratoire. Pour cet ouvrage (12316X0032/MRONAB), qui est exploité, on dispose donc d'une chronique complète depuis 2009 (et de données antérieures sur certains paramètres), ce qui permet de suivre les tendances d'évolution tant des paramètres physico-chimiques que des concentrations en éléments dissous. Pour l'autre ouvrage (12316X0031/MRO1), on manque d'une base de comparaison. On utilise donc principalement les données de 12316X0032/MRONAB dans ce qui suit.

En termes d'évolution temporelle des paramètres physico-chimiques (section 4.1.2a), la conductivité électrique de 12316X0032/MRONAB évolue entre 600 et 700 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ sur 10-12 ans (690 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ mesurés en novembre 2021), selon une tendance globalement haussière (les valeurs les plus fortes ont été mesurées en 2017). Une valeur inférieure (605 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) a été mesurée pour l'ouvrage 12316X0031/MRO1. Pour 12316X0032/MRONAB, on remarque également que les mesures de pH, et d'oxygène dissous, sont assez fortement variables dans le temps, avec notamment des valeurs élevées entre 2016 et 2018 (le pH approchait 8, l'eau était fortement oxygénée), et ont depuis nettement chuté, pour revenir à 6,7 et quelques pourcents de saturation respectivement. Le débit de production n'ayant pas été modifié depuis 2018, une seule hypothèse peut expliquer de telles variations : une reprise de l'ouvrage (changement du tubage – on sait *a minima* que le groupe de pompage a été changé) ; une corrosion du tubage pouvant amener à la dérive de certains paramètres.

En termes de chimie des éléments dissous (section 4.1.2b), les eaux de Mronabéja ont le faciès bicarbonaté calcique magnésien typique des eaux souterraines de Mayotte, même si la minéralisation totale de l'eau est assez élevée. Ce sont les concentrations en Ca et Mg, et en HCO_3 et Cl qui distinguent les eaux de Mronabéja des autres eaux souterraines échantillonnées. On remarque une hausse assez franche en 2015-2016 pour ces paramètres, qui s'annule ensuite, sauf pour Mg et HCO_3 , dont les concentrations continuent d'augmenter. On n'identifie pas de dérive vers un pôle plus Na-Cl, qui serait un marqueur clair de salinisation. Hormis quelques points (voir section 4.1.2d), prélevés au tout début de l'exploitation du forage, les rapports Na/Cl restent voisins de ceux des autres points de prélèvements, en restant marqués par un excès en Na par rapport aux concentrations en Cl, l'excès en Na étant attribué aux interactions avec les formations volcaniques (Malard et Winckel, 2008). Les données des éléments en trace (section 4.1.2c), beaucoup plus parcellaires, n'apportent guère de contraintes supplémentaires.

Les ouvrages de Mronabéja n'ont pas fait l'objet de prélèvements pour des mesures isotopiques.

En résumé, on peut déterminer, a minima pour l'ouvrage exploité 12316X0032/MRONAB, une hausse régulière de la conductivité électrique, notamment liée à une hausse régulière des concentrations en Mg et HCO_3 , les évolutions de Ca et Cl étant plus erratiques. Si les concentrations en Cl sont assez élevées, elles ne connaissent pas de hausse depuis 2015-2016, mais plutôt une fluctuation entre 40 et 50 mg.L^{-1} . Dans les conditions d'utilisation actuelle du forage, **une variation de concentration indicatrice du drainage d'une eau saline ne peut pas être mise en évidence de manière certaine**, mais il semble que l'on sollicite des horizons avec une minéralisation Mg- HCO_3 plus affirmée qu'au début de l'exploitation de l'ouvrage.

M'Ronabeja 12316X0031/MRO1 - BSS002PPWN

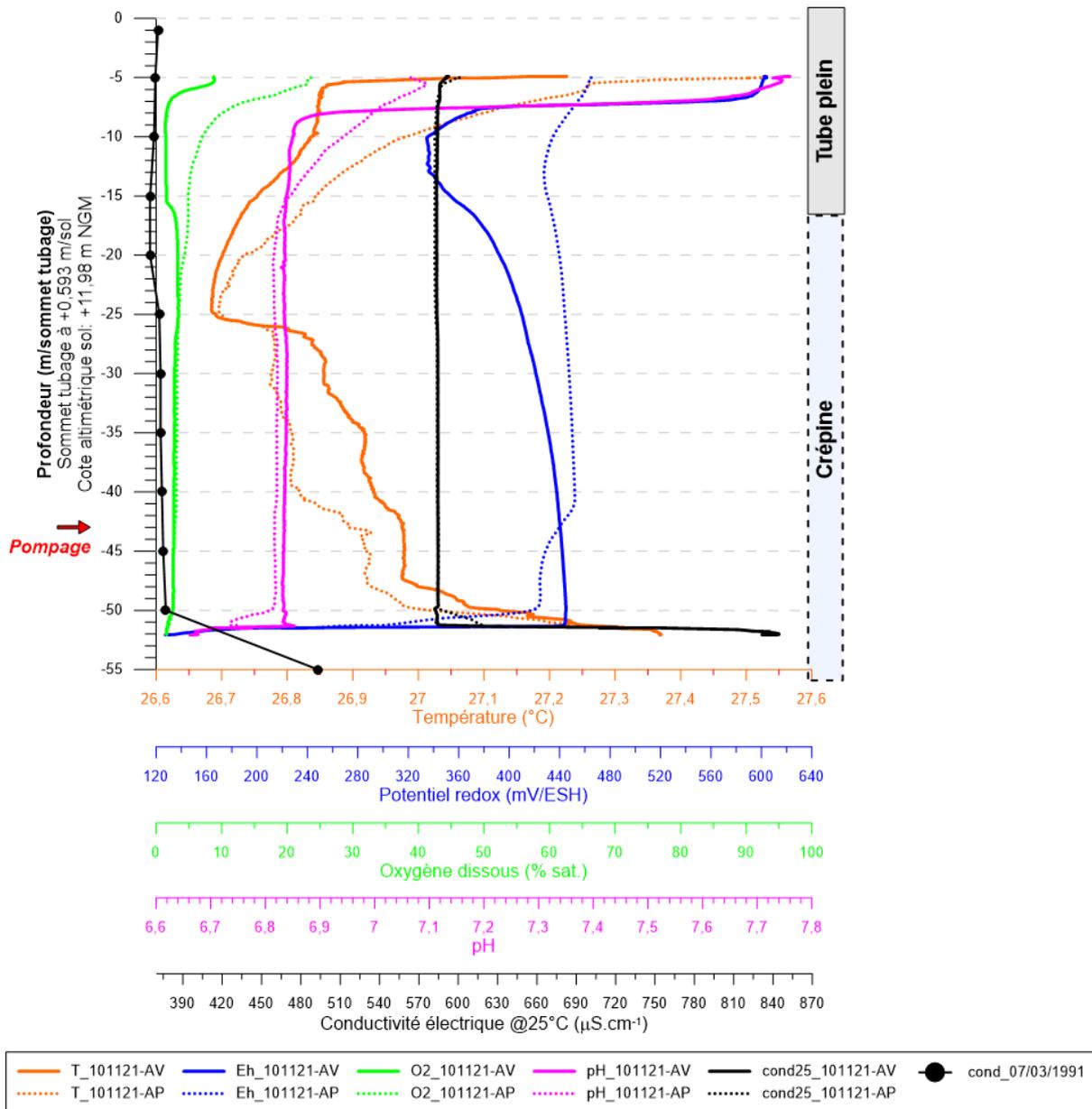


Figure 44 : Piézomètre de M'Ronabéja : diagraphie physico-chimique avant pompage (trait plein) et après pompage (tirets) ; la profondeur de pompage est indiquée par la flèche rouge.

d) Interprétation des résultats géophysiques

L'intrusion saline a été identifiée sur les profils AEM par la méthode présentée au paragraphe 3.4. La figure 45 présente un exemple de ce pointé en coupe, sur un profil EM. On y voit en particulier le passage proche du forage retenu FZ1 (donnée AEM espacée de 8 m du forage). Malheureusement, la profondeur d'investigation (masque blanc sur la figure) à cet endroit est réduite par la présence de bruit anthropique ou un vol de l'hélicoptère un peu plus haut. Cependant, par continuité latérale on peut supposer qu'on atteint les 4 Ohm.m autour de -100 m NGM, soit environ 110 m de profondeur. En limite de profondeur d'investigation, comme

ici, on ne fait pas confiance aux données sous le masque blanc, mais les données sous le masque semi-opaque nous indique une tendance sur laquelle on peut s'appuyer. Il existe bien un conducteur autour de 110 m de profondeur, en revanche sa valeur de résistivité est moins certaine et pourrait atteindre les 8 Ohm.m plutôt que 4 Ohm.m.

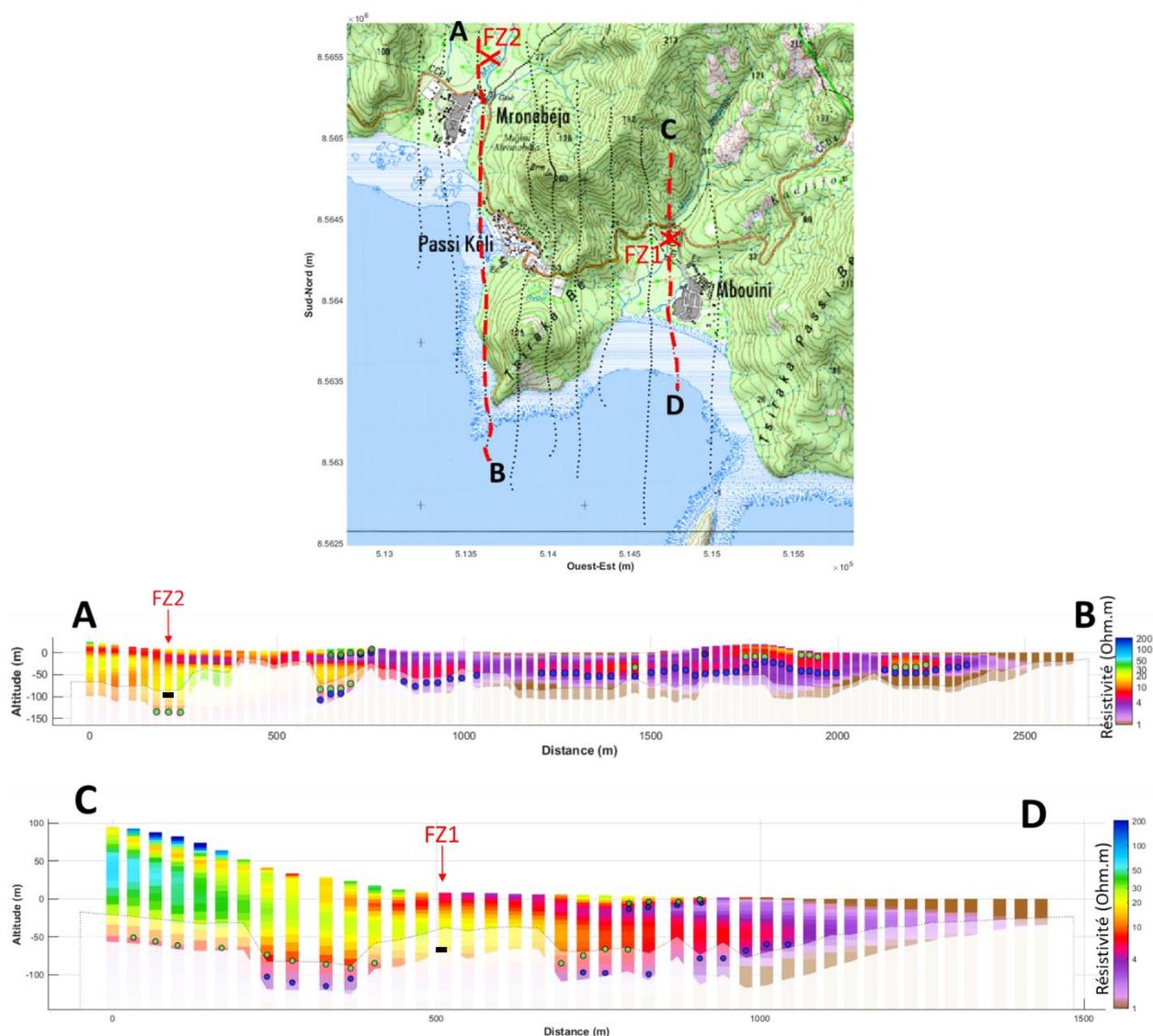
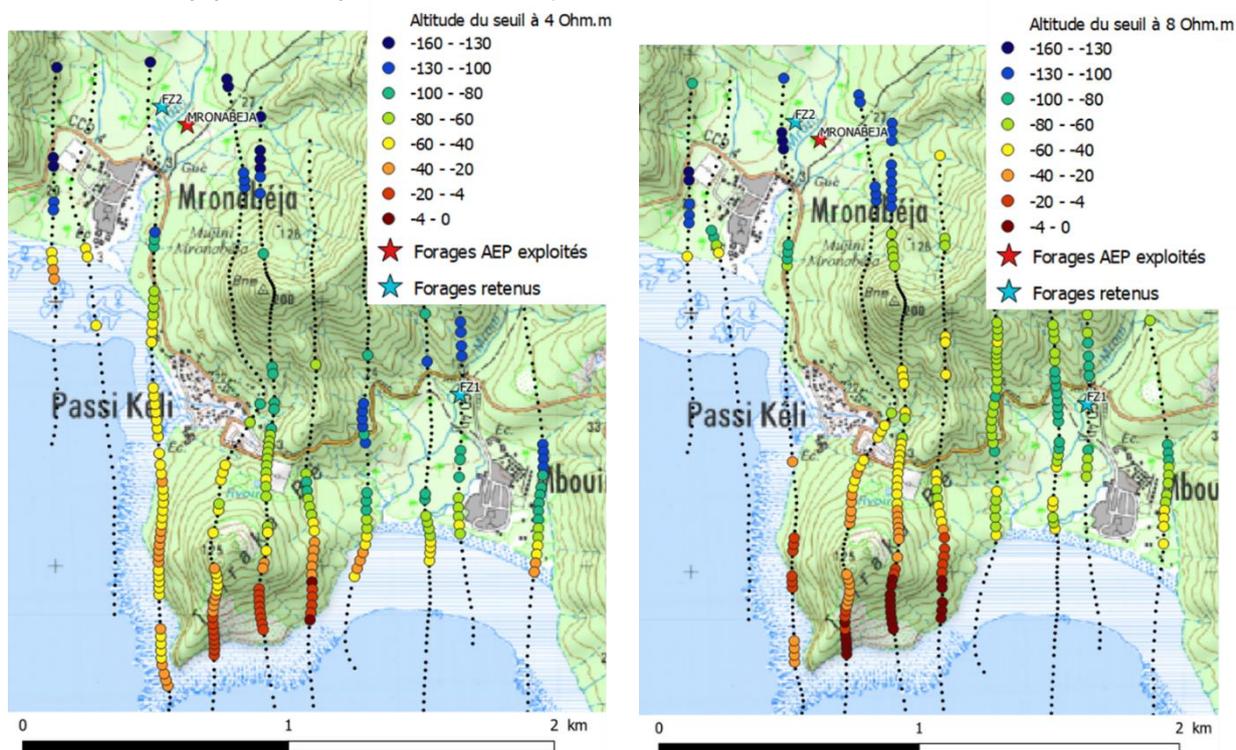


Figure 45 : Profils AEM et leurs localisations sur lesquels sont représentés le pointé semi-automatique de l'intrusion saline « principale » et « secondaire » (en couleurs plus foncées) grâce à un seuil à 4 Ohm.m (en bleu) et un seuil à 8 Ohm.m (en vert). Exagération verticale 1.2. La profondeur prévisionnelle des forages Fz1 et Fz2 d'environ 100 m est indiquée par un tiret noir.

On peut aussi visualiser le résultat en cartographie de l'altitude du toit de l'invasion, c'est-à-dire de l'altitude à partir de laquelle on rencontre l'invasion pour la première fois. Comme expliqué précédemment, nous avons travaillé avec deux seuils de résistivité différents : 4 et 8 Ohm.m, 4 étant plus proche de l'invasion à proprement parler et 8 comprenant une zone de mélange eau douce – eau salée et étant donc plus sécuritaire. La figure 46 présente cette cartographie. Les points noirs correspondent aux points de données AEM, recouverts par des points de couleur représentant l'altitude de l'intrusion. S'il n'y a pas de point de couleur c'est que le seuil de résistivité n'a pas été rencontré sur les données AEM. Cela peut être expliqué par l'absence de l'intrusion saline, ou par une profondeur d'investigation de la géophysique insuffisante à cet

endroit pour atteindre l'intrusion (investigation réduite à cause du ratio signal sur bruit insuffisant ou intrusion trop profonde pour la méthode).



On voit qu'à l'Est, dans la zone de Mbouini, plutôt plane et à basse altitude, l'intrusion semble présente, descendant à une centaine de mètres de profondeur autour de FZ1. Une intrusion plus en surface est également présente en très proche surface et sera présentée face aux profils ERT. Dans la zone de Mronabeja, au Sud de la route il existe une intrusion surfacique, mais qui semble ne pas dépasser la route. L'intrusion « principale » semble, elle, atteindre au niveau du FZ2, une profondeur de plus de 130 m.

- **Résultats TRE comparés au résultats AEM sur la zone de Mronabéja**

Le profil P7 reprend globalement l'investigation du profil P2 de 2017 (BRGM/RP-67169-FR) en l'approfondissant. L'objectif est de vérifier la présence d'un conducteur profond pouvant confirmer les rares et incertains indices d'intrusion saline fournis par l'AEM entre 100 et 150 m de profondeur (Figure 47).

Le seul indice d'intrusion salée du profil P7 (Planche 1) est observé entre les distances 0 et 220 m au niveau du 0 altimétrique en accord avec le profil P2 de 2017 et en continuité de la cartographie AEM qui trace un conducteur de résistivité inférieure à 8 Ohm.m depuis le rivage au sud (P17 AEM, Planche 1). Sur le profil P7, le résistif R1 ($30 < \rho < 100$ Ohm.m) sous-jacent à C1 apparaît dessiner avec fidélité le toit des basaltes fissurés et scoriacés qui constituent l'aquifère capté dans les forages à partir des altitudes -10 à -25 m NGM (Planche 1). Ces résistivités relativement élevées traduisent un milieu a priori non marqué par les intrusions salées. Ces dernières paraissent correspondre aux niveaux supérieurs parfois sablo-graveleux ou scoriacés (perméables) et se confondent, dans le même conducteur C1, avec les limons et altérites, a priori peu perméables.

Par ailleurs, la couche conductrice C2, qui présente des résistivités similaires à C1 mais qui se développe au-dessus du 0 altimétrique est ainsi attribuée à des altérites.

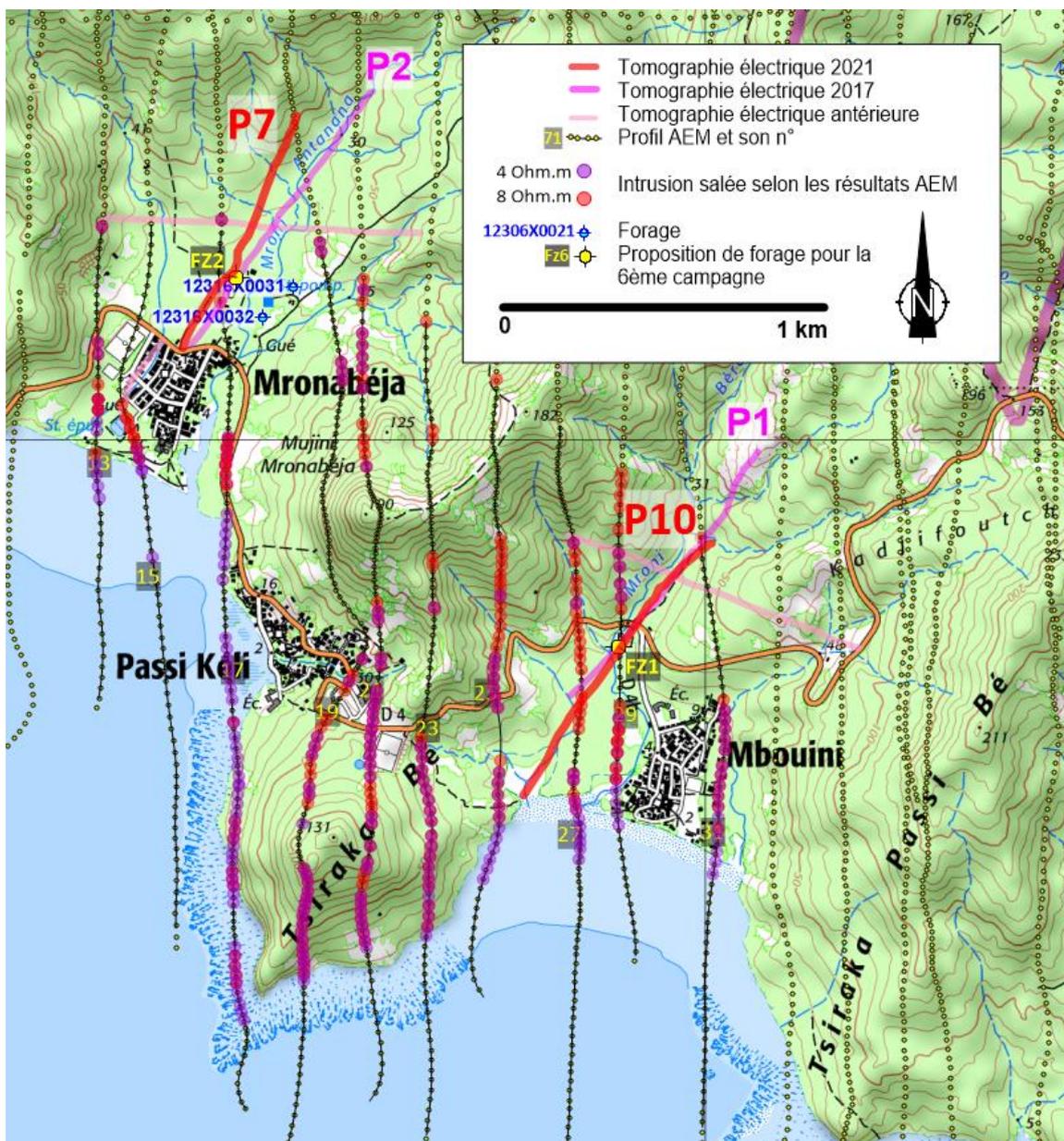


Figure 47 : Localisation des investigations géophysiques et cartographie des intrusions salées définies selon les résultats AEM

Les niveaux productifs des forages 12316X0031/MRO1 et 12316X0032/MRONAB semblent être plus ou moins directement en relation avec l'intrusion salée indiquée par le conducteur C2. Le site du forage envisagé dans la sixième campagne, FZ2 est soumis aux mêmes conditions. Par ailleurs, il est possible que la zone R1' moins résistante dans le substrat, soit aussi l'indice d'une intrusion latérale et plus profonde.

La tomographie P7 ne montre pas d'indice d'intrusion saline en profondeur comme cela pouvait être suspecté à partir de quelques indices issus des profils AEM.

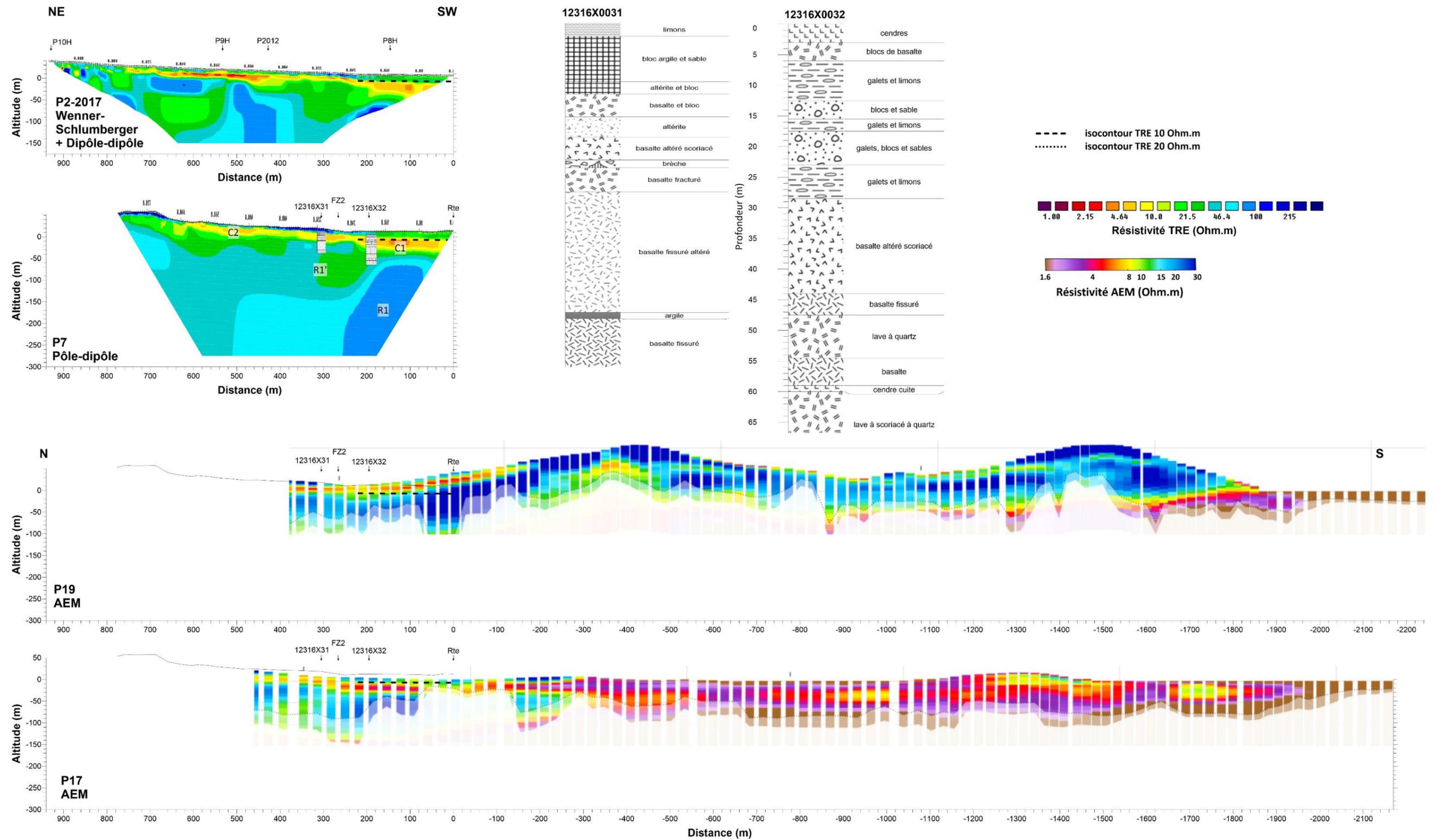


Planche 1 : Zone de Mronabeja - Intrusions salines interprétées à partir de l'imagerie TRE (P1-2017 et P10, en haut) et comparées à l'imagerie AEM (en bas). Les isocontours 10 et 20 Ohm.m définis par TRE sont superposés à l'imagerie AEM pour comparaison.

- **Résultats TRE comparés au résultats AEM sur la zone de Mbouini**

Le profil P10 répète le profil P1 de 2017 (BRGM/RP-67169-FR) dans sa partie aval, le prolonge jusqu'au rivage et approfondit son investigation. De la même manière que pour la zone de Mronabéja, il s'agit de confirmer les rares et incertains indices fournis par l'AEM entre 100 et 150 m de profondeur (Figure 47).

Contrairement à Mronabéja, des conducteurs profonds (C2) sont observés sur P10 entre les altitudes -200 et -250 m NGM (Planche 2). Localisés et intercalés avec des compartiments plus résistants, ils constituent des indices de possibles intrusions profondes et latérales à la faveur de formations localement plus perméables. Il n'y a pas là de cohérence avec les intrusions proposées à partir des résultats AEM situées 150 m plus haut en altitude. En effet, la tomographie de résistivité électrique est une méthode permettant d'aller plus en profondeur que l'AEM, a contrario, certaines couches de faible épaisseur sont occultées. La méthode aéroportée mais bien en évidence les couches conductrices. Ainsi, l'AEM et le TRE ne mettent pas en évidence les même couches conductrices profondes (100-150 m pour l'AEM , supérieure à 250 m pour le TRE).

Le conducteur C1 est en revanche dans une configuration proche de l'indice C1 observé sur Mronabéja. Identifié depuis le rivage (Planche 2) et en accord avec l'imagerie AEM des profils P29 et P27, il s'approfondit localement à -2 m (C1') et retrouve une expression plus superficielle (0 m) quand le profil recoupe la rivière (C1''). Cette disposition observée sur P7 mais également sur P29 AEM est une illustration d'une intrusion favorisée par la rivière.

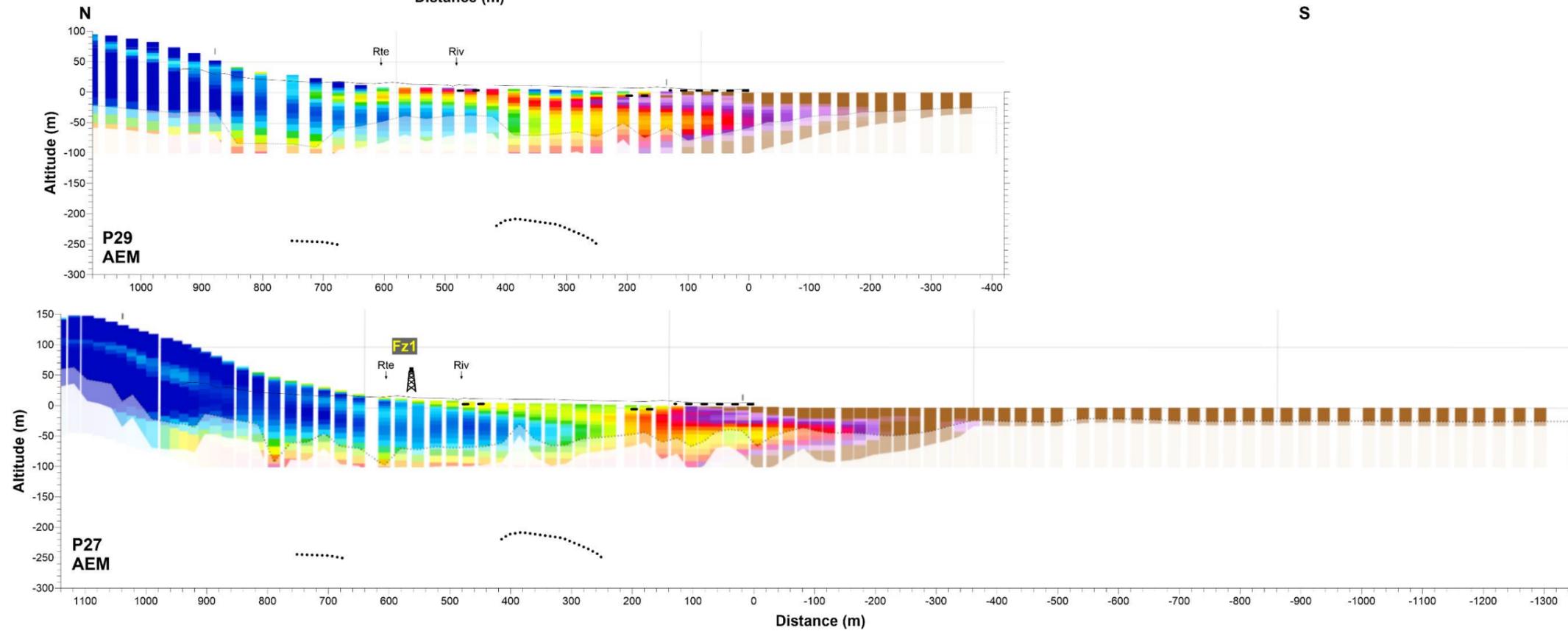
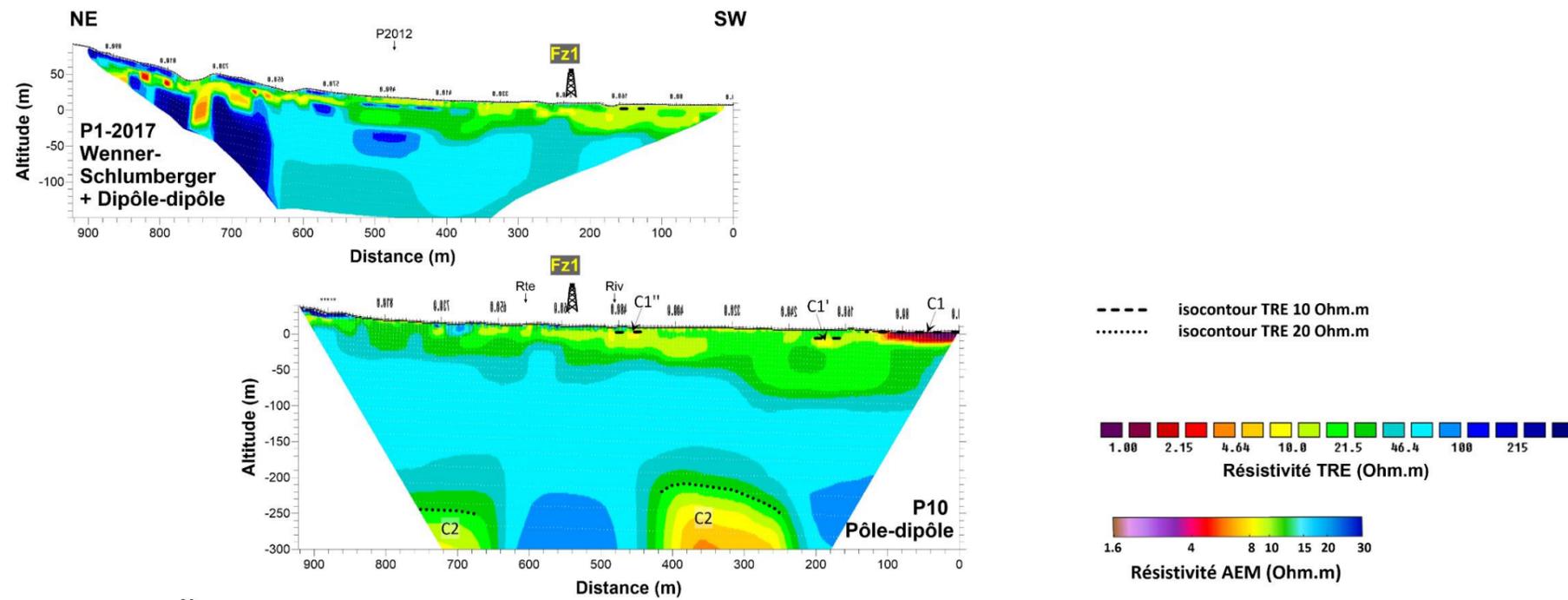


Planche 2 : Zone de Bouini - Intrusions salines interprétées à partir de l'imagerie TRE (P1-2017 et P10, en haut) et comparées à l'imagerie AEM (en bas). Les isocontours 10 et 20 Ohm.m définis par TRE sont superposés à l'imagerie AEM pour comparaison.

Selon ces imageries de résistivités, on peut s'attendre à ce que le site de forage envisagé pour la sixième campagne, Fz1 soit influencé par l'intrusion saline C1" (cf. Planche 2) selon un scénario proche de ce qui existe avec les forages de Mronabéja.

Les résistivités du conducteur C1" (5-15 Ohm.m) dans la zone de Fz1 sont plus élevées que sur Mronabéja (3-7 Ohm.m) indiquant par là une intrusion moins marquée mais qui pourrait évoluer lors de l'exploitation.

Dans ces conditions, il pourrait être judicieux de réexaminer l'alternative d'implantation du futur forage sur un site plus en altitude (proposition en deuxième priorité du rapport BRGM/RP-67169-FR, près de 300 en amont de Fz1) et dans un environnement de résistivités sensiblement plus élevées (15-30 Ohm.m pour la couverture).

e) Conclusion et recommandations

L'ouvrage AEP 12316X0032/MRONAB et le piézomètre 12316X0031/MRO1 captent une paléovallée comblée par des laves fissurées, recouvertes par des altérites et des alluvions. Selon les investigations géochimiques, dans les conditions d'utilisation actuelle du forage, une variation de concentration indicatrice du drainage d'une eau saline ne peut pas être mise en évidence de manière certaine, mais il semble que l'on sollicite des horizons avec une minéralisation plus forte qu'au début de l'exploitation de l'ouvrage. En revanche, l'interprétation des résultats géophysiques permet de suivre depuis la côte la présence probable d'une intrusion saline qui s'approfondit progressivement. Ce constat est valable pour les ouvrages existants implantés dans la vallée du Mroni Antanana (et pour le site du futur forage FZ2 à proximité) comme pour le site FZ1 implanté dans la vallée du Mroni Bérambo.

Le risque d'intrusion saline peut provenir de différentes directions qu'il n'est pas possible de hiérarchiser. Cette absence actuelle de précision rend inadéquat l'implantation d'ouvrages supplémentaires pour une surveillance fiable.

Ainsi, il serait préconisé d'établir un protocole de surveillance de l'intrusion saline de façon graduelle, à savoir :

1/ Assurer un suivi régulier de la conductivité électrique de l'eau :

- au droit du forage, en continu si l'ouvrage est télégéré ou a minima une fois par mois par lecture de la mesure et de vérifier la dérive de la sonde par des prélèvements mensuels, actuellement réalisés tous les mois par l'exploitant dans le cadre de l'auto-surveillance ;
- sur le piézomètre, deux fois par an de ce même paramètre sur toute la colonne d'eau via une sonde manuelle.

2/ Déterminer un seuil de variabilité naturelle de la conductivité au-delà duquel il serait nécessaire de :

3/ Effectuer un diagnostic sur site du chlore et des sulfates à l'aide de kits photométriques ; cela permettra une quantification des premiers paramètres indiquant une intrusion saline.

4/ Faire des prélèvements d'eau brute en suivant les protocoles des laboratoires (échantillonnage, conservation, transport, etc.) pour confirmer la présence d'intrusion saline dans le cas où, après plusieurs quantifications par des kits photométriques, les concentrations en chlore et sulfates s'avéraient en hausse comparées aux données historiques.

Lorsque la présence d'intrusion saline est confirmée, les actions de gestion devront être mises en œuvre (diminution du débit / volume pompé).

De plus, pour les futurs forages EDCH FZ1 et FZ2 prévu à la 6^{ème} campagne de forage, il serait judicieux, dès leur réalisation, de réaliser un suivi géochimique.

5.1.4. Zone de Mréréni – Chirongui

a) Contexte géographique

La zone de Mréréni-Chirongui se situe au sud-ouest de l'île de Grande Terre sur la commune de Chirongui. Les cours d'eau Mroni Bé et Mroni Kaféni s'y écoulent du nord-est au sud-ouest pour confluer avant de rejoindre le lagon dans la baie de Bouéni. Le bassin versant global pour les deux cours d'eau est représenté en couleur bleu pâle sur la carte (Figure 48).

Les trois ouvrages principaux du secteur sont :

- L'ouvrage 12312X0033/MRE1 qui a été implanté suite à la campagne de reconnaissance et d'exploitation des eaux souterraines de 1990-1991 (BRGM/RR-35165-FR) et qui est suivi par la DEAL comme piézomètre depuis 1992 ;
- L'ouvrage 12312X0034/MRERE1 qui a été foré lors de la campagne de reconnaissance et d'exploitation des eaux souterraines de 1999-2000 (BRGM/RP-50428-FR) dont la tête a été scellée par un bloque béton afin d'éviter toute intrusion. Il n'a donc pas fait partie des ouvrages servant à l'étude ;
- L'ouvrage 12312X0035/MRERE2 qui a été foré lors de la campagne de reconnaissance et d'exploitation des eaux souterraines de 1999-2000 (BRGM/RP-50428-FR). Il n'a pas été exploité en raison de teneurs élevées en manganèse nécessitant l'ajout d'une unité de traitement. Néanmoins, il a été réhabilité en mai 2018 en vue de sa mise en exploitation en 2022 (BRGM/RP-69504-FR). Lors de notre campagne de géochimie en octobre 2021, le forage n'était donc pas en exploitation.

12312X0033/MRE1 et 12312X0035/MRERE2 sont distants de 30 m seulement et 12312X0034/MRERE1 se situe à environ 120 m en amont des deux premiers.

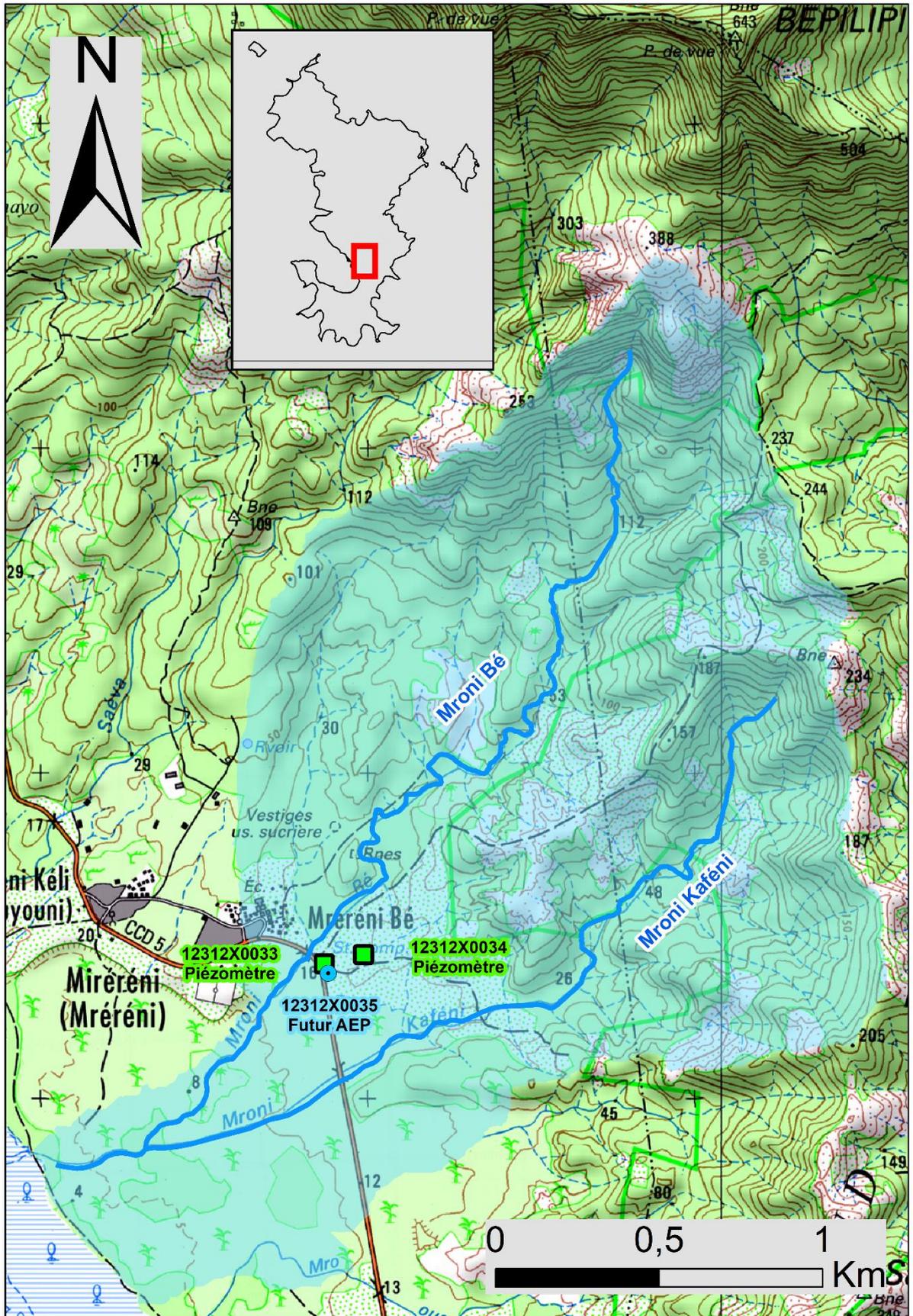


Figure 48 : Carte de localisation de la zone d'étude de Mréréni-Chirongui.

b) Contexte hydrogéologique et risque d'intrusion saline

Les formations décrites le long des trois forages présentent une similitude dans leur succession : des alluvions, colluvions ou limon argileux et des altérites sont d'abord traversés. Ensuite viennent pour 12312X0034/MRERE1 et 12312X0035/MRERE2 des couches de cendre indurée et de brèches explosives et enfin ce qui constitue la majeure partie des coupes lithologiques, des couches basaltiques plus ou moins altérées ou fissurées.

A l'échelle du bassin versant, plus de 95% de la surface est occupée par des formations superficielles : des colluvions, des alluvions indifférenciées dans le lit des cours d'eau et sur la plaine littorale, des allotérites et des isaltérites. Le reste du secteur (< 5%) est constitué de phonolites (aux pieds du Mlima Bépilipili).

Dans le cas de l'ouvrage 12312X0035/MRERE2 exploité pour de l'eau destinée à la consommation humaine, les formations rencontrées sont décrites dans le tableau 10.

Profondeur (m)		Altitude (mNGM)		Formation
de	à	de	à	
0	6	15	9	alluvions argileuses
6	9	9	6	cendre indurée à débris rocheux altérés
9	14	6	1	brèche explosive sableuse riche en blocs
14	40	1	- 25	basalte riche en pyroxène
40	47,5	- 25	- 32,5	basalte fissuré à olivine et pyroxène
47,5	50,5	- 32,5	- 35,5	basalte fissuré à olivine
50,5	54	- 35,5	- 39	basalte à pyroxène et olivine, scoriacé
54	70	- 39	- 55	basalte riche en pyroxène et zéolitisé

Tableau 10 : Lithologie du forage 12312X0035/MRERE2

Dans cet ouvrage, les venues d'eau rencontrées s'échelonnent de 35 à 70 m de profondeur ; soit à une altitude de - 20 m NGM à - 55 m NGM avec une zone très productive de 54 à 60 m (de - 39 m NGM à - 45 m NGM) (80 m³/h environ) qui correspond à la partie fissurée et/ou fracturée de la coulée la plus profonde (- 39 m NGM à - 55 m NGM). L'aquifère, dont le niveau piézométrique se situait autour de - 5 m/sol (environ 10 m NGM) au cours des travaux de foration est constitué d'une alternance de coulées fissurées séparées par des inter-lits scoriacés et se situe sous une couverture peu perméable formée par les alluvions et des dépôts pyroclastiques argileux (BRGM/RP-50428-FR).

Un diagnostic mené ultérieurement (BRGM/RP-69504-FR) confirma que l'ouvrage intercepte une zone très productive (*a priori* située entre - 39 m NGM et - 45 m NGM) au sein d'un aquifère multicouche. Il montra, par ailleurs, que la zone très perméable mesure environ 70 m x 70 m (~ 4900 m²) et présente une transmissivité de $4,2 \cdot 10^{-4}$ m²/s et un emmagasinement de $6 \cdot 10^{-4}$. L'aquifère capté apparaît, en outre, soumis à un effet de drainance des formations altérées de surface au travers d'une éponte semi-perméable ($2,3 \cdot 10^{-9}$ m/s pour une épaisseur unitaire). L'emmagasinement de ces formations de surface est évalué à 0,02. Leur transmissivité n'a pas pu être estimée.

À la suite de ce diagnostic, le débit exploitable a été estimé, en considérant une condition de niveau maximum (non dénoiement des crépines et de la pompe), à 50 m³/h ; 20h/24 à raison de 365 j/an. Le débit préconisé permettra un démarrage d'exploitation de manière raisonnée et pourra être réévalué à la baisse ou à la hausse en fonction des suivis menés durant la première année d'exploitation. Il n'a pas été tenu compte lors de cette évaluation du risque d'intrusion saline. Dans un précédent rapport BRGM/RP-51603-FR, ce risque a été pris en compte pour recommander un débit d'exploitation de 22 à 31 m³/h maximum.

Les essais effectués sur les deux autres ouvrages 12312X0033/MRE1 et 12312X0034/MRERE1 ont abouti, dans les deux cas, à une estimation de faible productivité ce qui a conduit à leur utilisation comme piézomètre. Leurs chroniques piézométriques ont été étudiées dans le cadre de la délimitation de l'aire d'alimentation du futur captage 12312X0035/MRERE2 (BRGM/RP-57624-FR). Il en ressort que :

- Les niveaux aquifères de ces deux ouvrages seraient hydrauliquement connectés ;
- La recharge de la nappe se ferait en deux phases successives : une faible remontée piézométrique entre novembre et décembre, puis une remontée plus franche à partir du mois de janvier ;
- La réponse de la nappe aux pluies est rapide et sa réactivité importante, ce qui témoigne d'une limite d'alimentation qui peut être liée au cours d'eau ou éventuellement à un effet capacitif à associer aux formations alluviales d'un système aquifère et relativement perméable.

L'aire d'alimentation estimée du captage 12312X0035/MRERE2 comprend :

- La partie amont du bassin versant englobant le Mroni Bé et le Mroni Kaféni ;
- La zone d'appel du captage en fonctionnement.

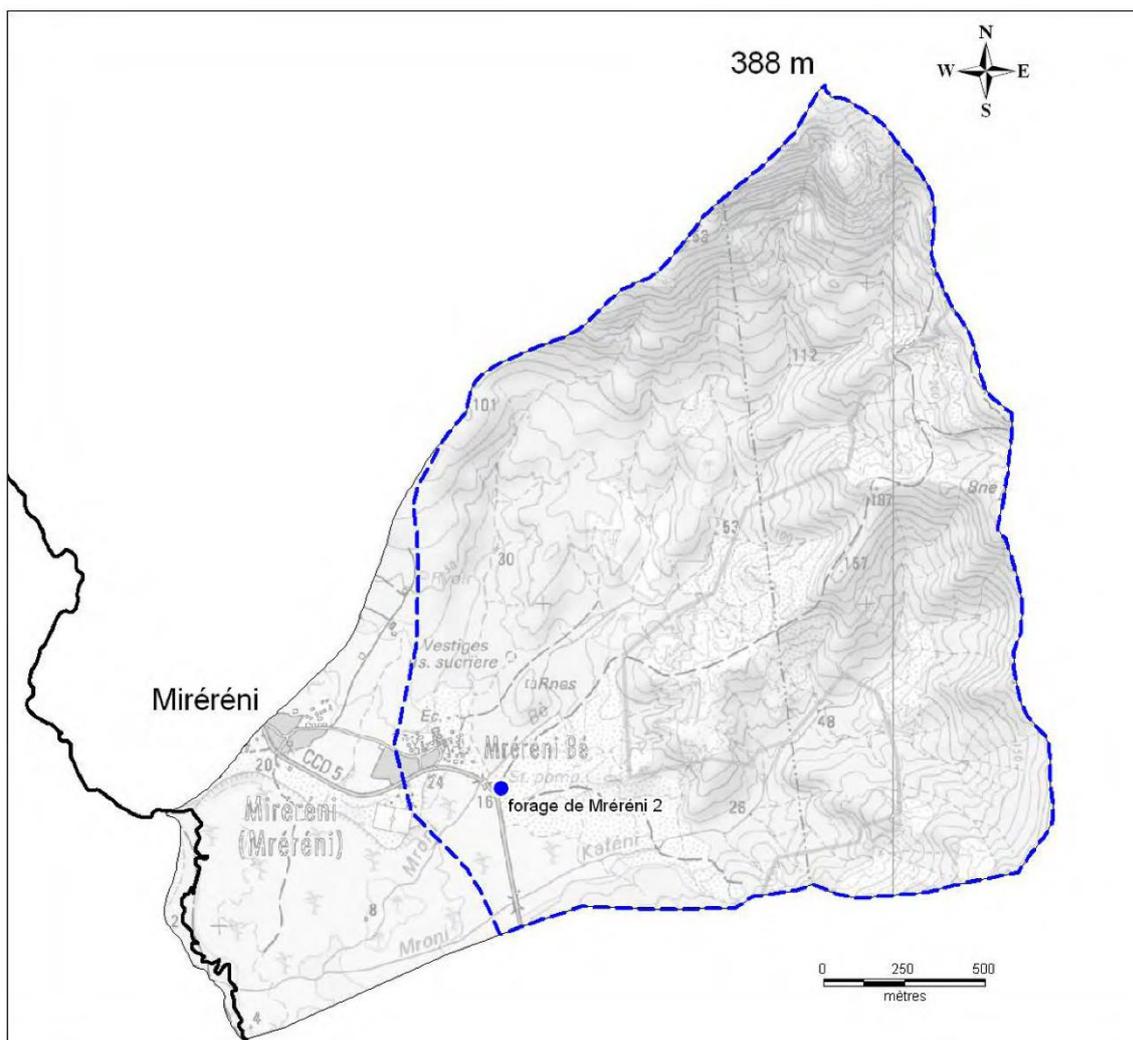


Figure 49 : emprise du bassin d'alimentation de captage du 12312X0035/MRERE2 (source : BRGM/RP-57624-FR)

La surface du bassin d'alimentation du captage ainsi délimitée (Figure 49) est de 3,7 km² pour un périmètre de 7,8 km, ce qui correspond à environ 82 % de la superficie totale du bassin versant.

D'un point de vue géophysique, la zone est caractérisée par des résistivités globalement faibles (< 15 ohm.m). Il est ainsi difficile d'interpréter de très faibles résistivités observées en bord de littoral comme de possibles intrusions salines, comme cela a pu être fait sur d'autres zones d'étude. Le futur captage 12312X0035/MRERE2 n'en reste pas moins proche de la côte. Cette possibilité doit donc être considérée de près. Il est important de noter toutefois qu'aucun des rapports consultés ne fait état d'une intrusion saline avérée.

c) Interprétation des résultats géochimiques

Les informations issues de la diagrapie physico-chimique réalisée sur l'ouvrage 12312X0035/MRERE2 sont détaillées ci-dessous.

Comme pour l'ouvrage précédent, les paramètres pH et conductivité électrique ne varient pas selon la verticale et ne se distinguent pas par un changement entre écoulement naturel et écoulement suite à production. Des variations sont décelées, suite au pompage (1,1 m³ pompés), pour les paramètres oxygène dissous et potentiel redox. En lien avec les informations collectées lors de la réalisation de l'ouvrage (BRGM/RP-51603-FR), on peut donc supposer que la majorité de la production d'eau se fait par les horizons profonds (55-60 m), un pompage vers 44 m collectant certes l'eau produite entre 44 et 47 m (1^{er} horizon producteur), mais appelant aussi, par drainance, l'eau produite par l'horizon profond. Si les eaux produites par l'horizon profond paraissent moins appauvries en oxygène dissous, ce qui peut être indicateur d'un temps de transit souterrain plus court, elles ne se distinguent cependant pas par leur minéralisation ou leur pH, tout du moins lorsque le pompage est court et de faible ampleur. On signalera enfin l'existence d'un fort gradient thermique vers 60 m de profondeur, qui coïncide avec un tout petit pic de conductivité électrique (quelques $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, dans l'incertitude instrumentale mais néanmoins significatif au regard de la non-variabilité du signal à profondeur plus faible). Nos capacités de pompage ne permettaient pas d'investiguer à cette profondeur, mais il serait intéressant de solliciter spécifiquement cet horizon, sur une durée plus longue, pour déterminer le comportement de cette anomalie de conductivité.

On dispose d'assez peu d'informations pour déterminer les évolutions temporelles des paramètres physico-chimiques (section 4.1.2a) et de la chimie (sections 4.1.2b), 4.1.2c) et 4.1.2d), les mesures les plus fréquentes datant de 2003-2004. Les données de conductivité électrique suggèrent que cet ouvrage peut connaître d'importantes variations pour ce paramètre, les mesures de novembre 2021 amenant à une mesure dans la gamme basse, proche de 160 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Les mesures disponibles pour le pH sont également fort variables, et la mesure de 2021 est la plus basse (pH de 5,7). Conséquence de ces mesures, la minéralisation ressort très basse, même si le faciès demeure inchangé (bicarbonaté calcique magnésien). Tous les éléments voient leurs concentrations chuter (seuls K et SO₄ échappent à cette règle), en proportion de leur abondance. Na et Cl sont donc affectés, et affichent des valeurs parmi les plus basses, respectivement proches de 20 mg.L⁻¹ et de 15 mg.L⁻¹ (valeurs voisines de celles de l'ouvrage de Bouyouni Méresse 12306X0046/BOUY).

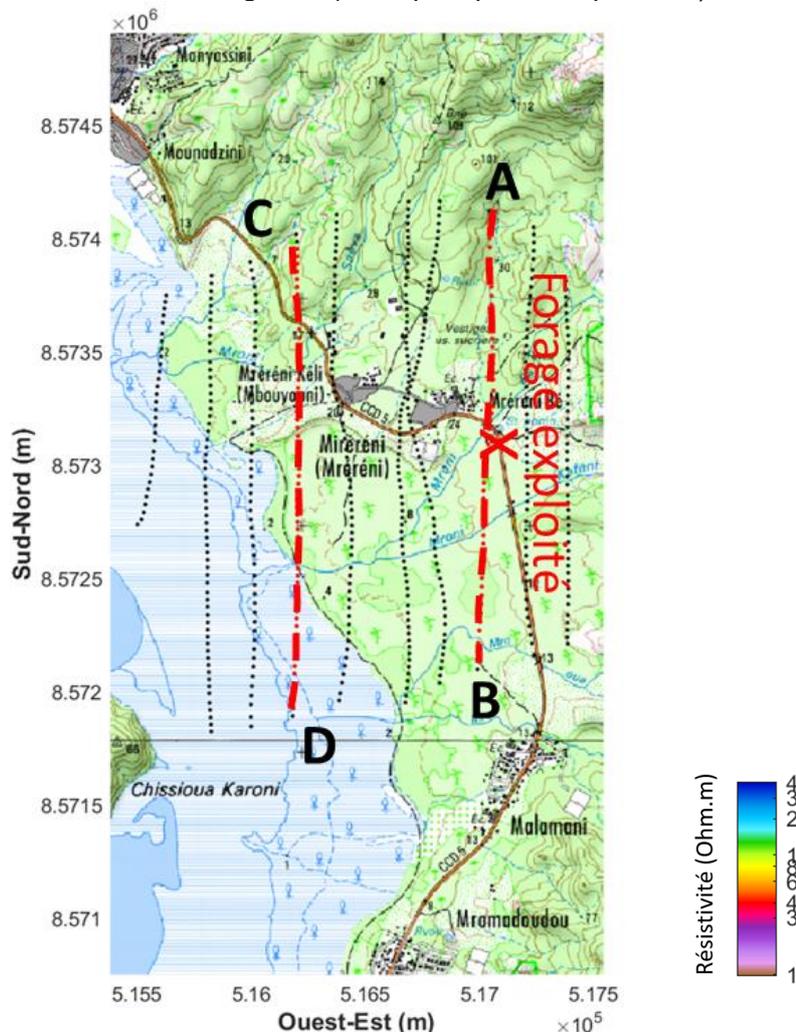
Si l'arrêt d'exploitation de ce forage de Mréréni-Chirongui est rapportée comme conséquence de la présence d'un biseau d'eau salée, force est de constater, sur la base de la diagrapie et de la légère sollicitation de l'aquifère par pompage, qu'il n'existe pas d'éléments permettant de mettre en évidence le drainage d'eau plus minéralisée en conséquence du pompage. Comme déjà signalé, il faut cependant bien considérer que la sollicitation de l'ouvrage a été très limitée, et qu'un pompage prolongé à fort débit pourrait amener à modifier ce constat. On peut juste dire, **qu'en conditions d'écoulement naturel, on ne trouve pas d'indice de salinisation dans cet ouvrage.**

d) Interprétation des résultats géophysiques

Le secteur de Mréréni - Chirongui possède la particularité d'avoir une couche très conductrice (autour de 4 Ohm.m) à moins de 20m de profondeur sur le profil ici présenté, qui suit la topographie et descend jusqu'à la mer (probablement une coulée de lave ancienne altérée,

fracturée). Il est donc impossible de différencier l'intrusion saline de cette couche en utilisant un seuil à 4 ou 8 Ohm.m sur ce secteur.

Nous avons donc utilisé deux approches : celle de conserver les seuils à 4 et 8 Ohm.m mais de stopper le pointer lorsque ce seuil monte au-dessus du niveau de la mer, car nous savons que l'intrusion ne remonte pas au-delà. Nous avons ensuite décidé d'utiliser un seuil plus restrictif à 3 Ohm.m : choix pragmatique supposant que l'intrusion saline devrait diminuer la résistivité de la couche à 4 Ohm.m dans laquelle elle s'insère. C'est-à-dire que sur chaque sondage de résistivité, partant de la surface, on pointe la première fois où l'on rencontre la valeur de 3 Ohm.m à condition d'avoir toujours été supérieur à 3 Ohm.m avant. Après le pointé automatique, on retire les points aberrants isolés, ainsi que ceux qui semblent faire remonter l'intrusion en altitude alors que l'on s'éloigne de la mer. La figure 50 présente deux profils AEM dans le secteur. L'échelle de couleur n'est pas la même que sur les autres profils de ce rapport. Un des profils (CD) atteint la mer et montre la continuité du conducteur dans les terres en profondeur, cette géométrie rappelle celle d'une intrusion saline. L'autre (AB) montre la localisation du forage exploité sur le profil. Avec une intrusion saline à 3 Ohm.m, on ne semble pas être concerné au niveau du forage, ou sous la profondeur d'investigation (donc plus profond que 70m).



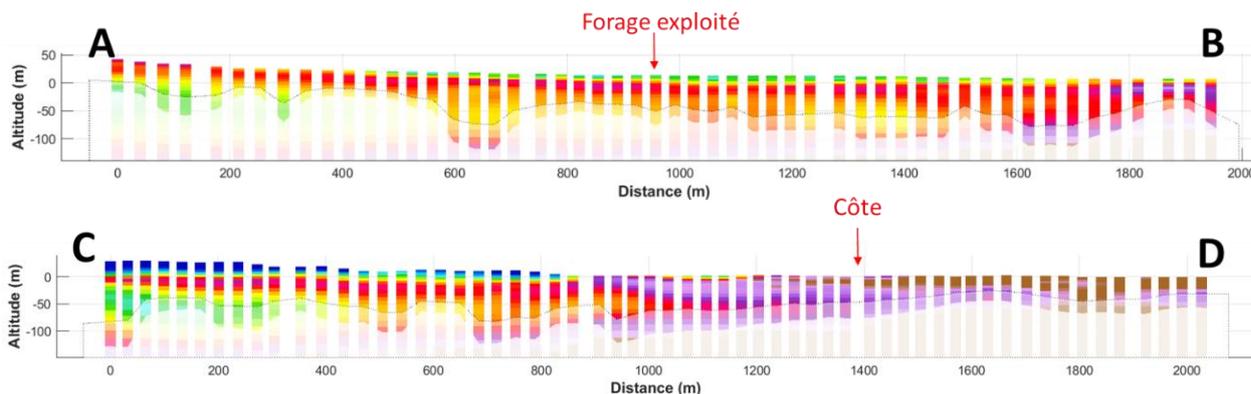


Figure 50 : Profils AEM et leurs localisations. Exagération verticale 1.2.

On peut aussi visualiser le résultat en cartographie de l'altitude du toit de l'invasion, c'est-à-dire de l'altitude à partir de laquelle on rencontre l'invasion pour la première fois. Comme expliqué précédemment, nous avons travaillé avec un seuil de résistivité à 3 Ohm.m. La figure 51 présente cette cartographie. Les points noirs correspondent points de données AEM, recouverts par des points de couleur représentant l'altitude de l'intrusion. S'il n'y a pas de point de couleur, c'est que le seuil de résistivité n'a pas été rencontré sur les données AEM. Cela peut être expliqué par l'absence de l'intrusion saline, ou par une profondeur d'investigation de la géophysique insuffisante à cet endroit pour atteindre l'intrusion (investigation réduite à cause du ratio signal sur bruit insuffisant ou intrusion trop profonde pour la méthode).

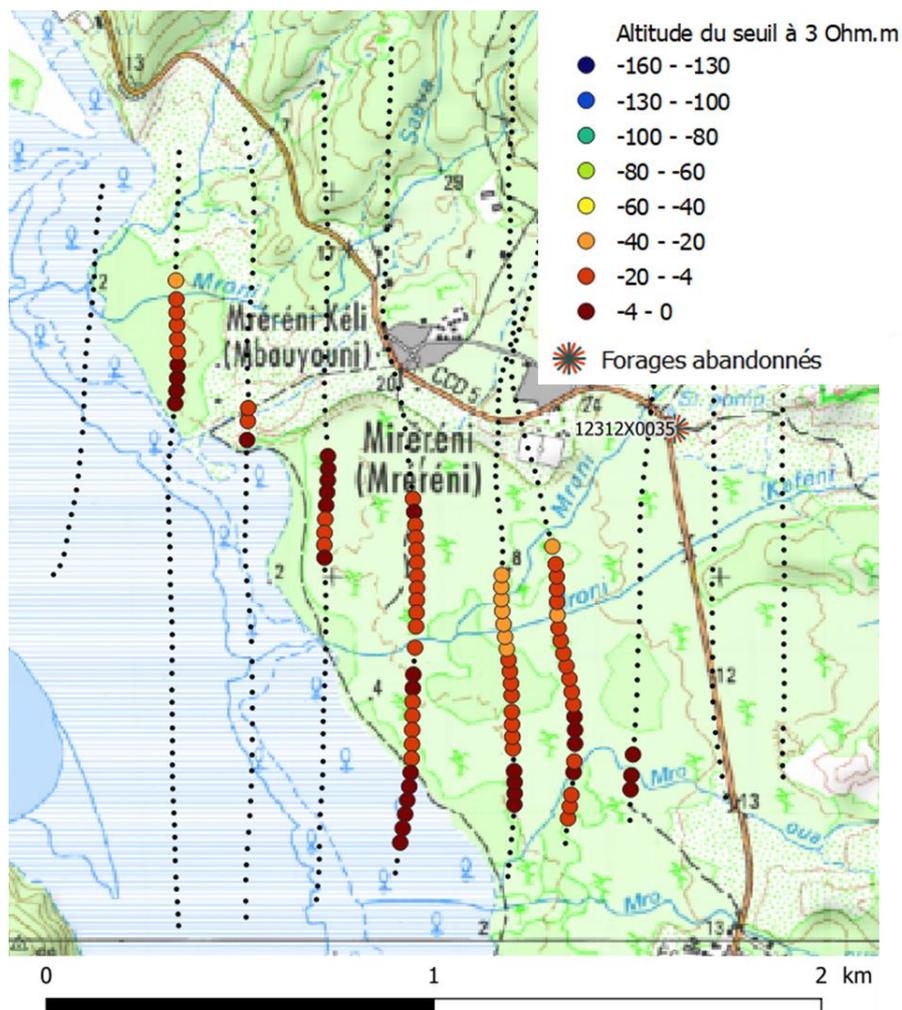


Figure 51 : Localisation en altitude de l'intrusion saline pointée automatiquement sur les données AEM dans le secteur de Miréréni.

La pénétration de l'intrusion saline est difficile à analyser dans ce secteur à cause de la couche conductrice en proche surface.

e) Conclusion et recommandations

Le captage AEP intercepte une zone très productive au sein d'un aquifère multicouche. D'un point de vue géochimique, les investigations ne décèlent pas d'indice de salinisation dans cet ouvrage.

Selon les résultats géophysiques, l'horizon aquifère comme tout le secteur est très conducteur. Dans ces conditions, une intrusion saline est donc difficilement discernable par rapport à un environnement géologique non envahi qui est caractérisé par des résistivités similaires. Il est donc recommandé, dans ce cas, d'effectuer des suivis physico-chimiques de l'eau captée. Les préconisations suivantes sont classées de façon graduelle, à savoir :

1/ Assurer un suivi régulier de la conductivité électrique de l'eau :

- au droit du forage, en continu si l'ouvrage est télégréré ou a minima une fois par mois par lecture de la mesure et de vérifier la dérive de la sonde par des prélèvements mensuels, actuellement réalisés tous les mois par l'exploitant dans le cadre de l'auto-surveillance ;
- sur le piézomètre, deux fois par an de ce même paramètre sur toute la colonne d'eau via une sonde manuelle.

2/ Déterminer un seuil de variabilité naturelle de la conductivité au-delà duquel il serait nécessaire de :

3/ Effectuer un diagnostic sur site du chlore et des sulfates à l'aide de kits photométriques ; cela permettra une quantification des premiers paramètres indiquant une intrusion saline.

4/ Faire des prélèvements d'eau brute en suivant les protocoles des laboratoires (échantillonnage, conservation, transport, etc.) pour confirmer la présence d'intrusion saline dans le cas où, après plusieurs quantifications par des kits photométriques, les concentrations en chlore et sulfates s'avéraient en hausse comparées aux données historiques.

Lorsque la présence d'intrusion saline est confirmée, les actions de gestion devront être mises en œuvre (diminution du débit / volume pompé).

5.2. SECTEUR NORD DE MAYOTTE

5.2.1. Caractéristiques hydrogéologiques du secteur Nord

Le rapport d'étude BRGM/RP-59550-FR propose à partir de la synthèse et de l'interprétation des données disponibles de regrouper le fonctionnement hydrogéologique des systèmes aquifères du Nord-ouest selon quatre schémas conceptuels :

- Les systèmes aquifères des massifs du Nord-Ouest
- Le système des nappes d'altitude reposant sur un substratum imperméable
- Le système mutli-couche des dépôts volcano-sédimentaires et des nappes d'altitudes peu épaisses
- Systèmes aquifères des paléovallées

La répartition géographique de ces systèmes est donnée par la figure 52.

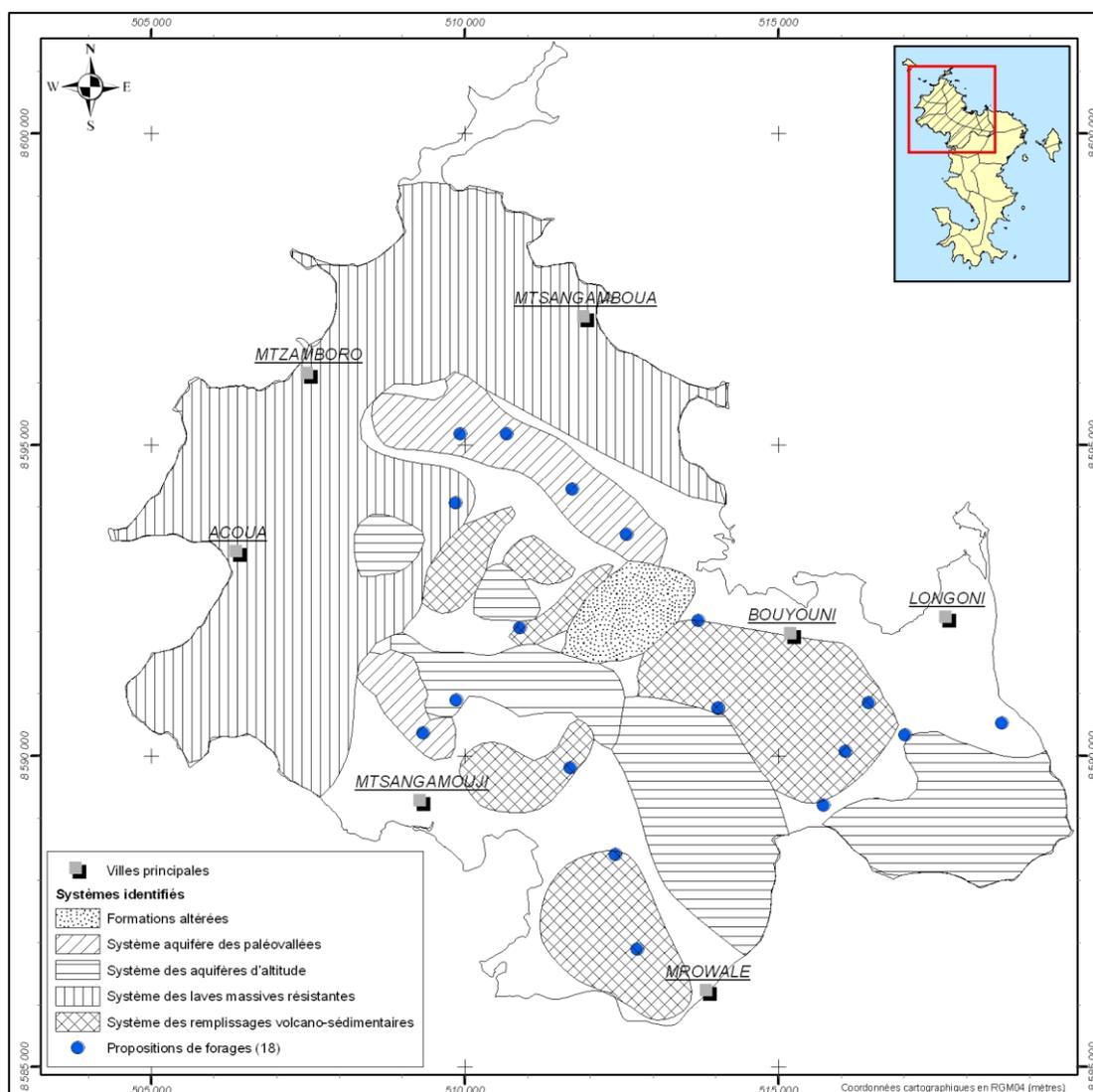


Figure 52 : Cartographie des systèmes hydrogéologiques du Nord-Ouest de Mayotte (source : BRGM/RP-59550-FR)

5.2.2. Zone de Mtsangamouji

a) Contexte géographique

La zone de Mtsangamouji se situe au nord-ouest de Grande-Terre, au nord de la commune de Mtsangamouji. Celui-ci s'étend sur le bassin versant du Mroni Andrianabé dont l'axe majeur est orienté nord-sud (Figure 53). La surface du bassin versant est représentée en couleur bleu pâle sur la carte.

Le Mroni Andrianabé prend sa source dans la réserve forestière des crêtes du nord au droit du mont Maéva Ranou à 363 m d'altitude, longe au sud le village de M'tsangamouji avant de rejoindre le lagon dans la baie de Soulou. La surface de son bassin versant est de 3.5 km², le périmètre de 11.5 km pour une longueur de 5.6 km et une largeur de 1.1 km en moyenne. Près de 80 % de la surface du bassin versant est comprise entre 0 et 200 m d'altitude. Le fond de la vallée du Mro Oua Andrianabé est relativement plat, et seule la partie amont présente des pentes plus élevées. Les zones de fortes pentes sont localisées principalement en amont du bassin versant topographique et en rive gauche du cours d'eau.

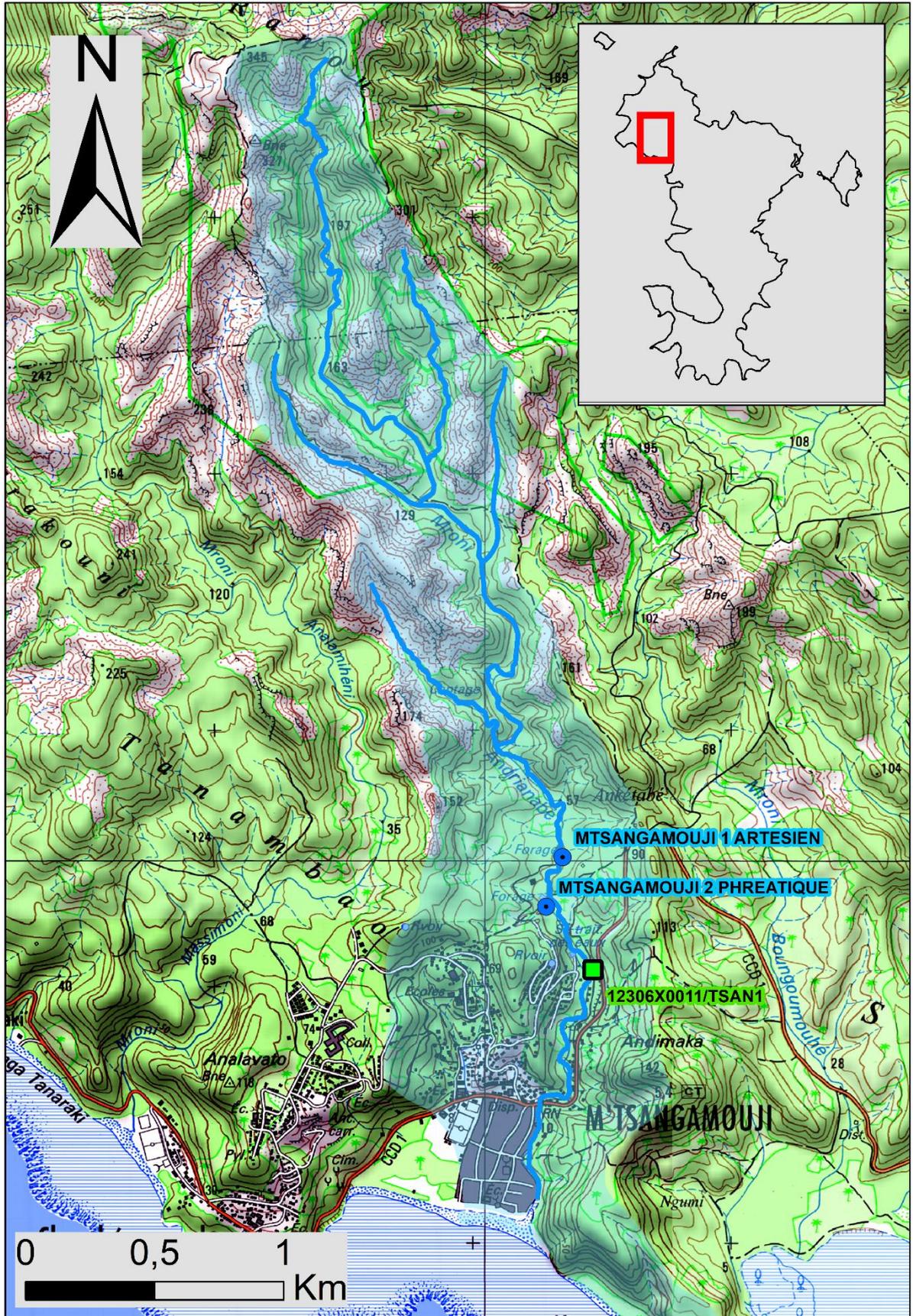


Figure 53 : Localisation du secteur d'étude en aval du bassin versant du Mroni Andrianabe

b) Contexte hydrogéologique et risque d'intrusion saline

Deux ouvrages situés dans la partie basse du bassin versant du Mroni Andrianabé et au nord du village M'tsangamouji sont des captages AEP.

Le premier, Mtsangamouji F1 (12306X0017/MTSAN1) a été réalisé en 2000. Il recoupe des formations typiques d'un remplissage de paléovallée située à -32 m NGM. Ce remplissage est constitué par une épaisse coulée de basalte (39 m) peu altérée, recouverte par des cendres et des pyroclastites, témoins d'un épisode explosif final (Figure 54).

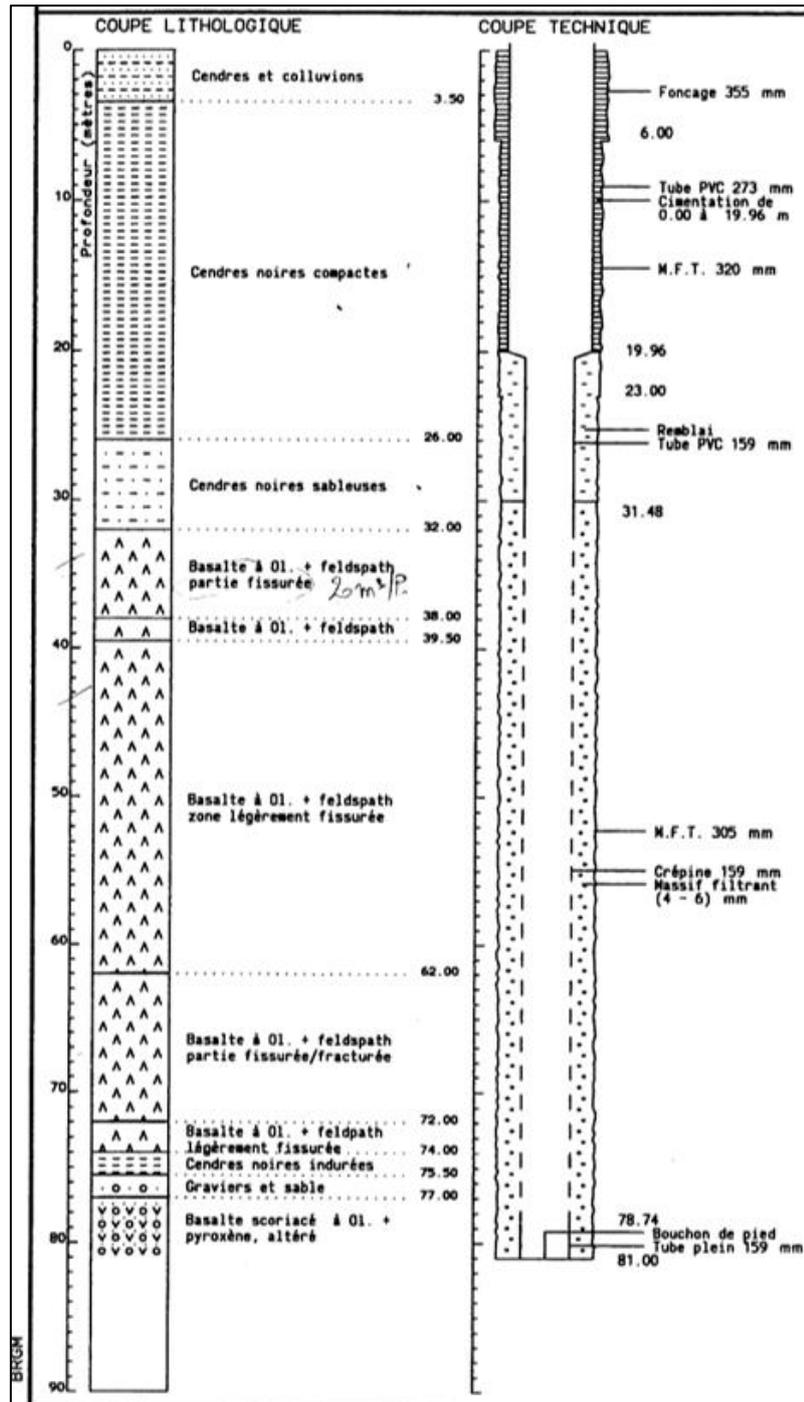


Figure 54 : Coupe lithostratigraphique et technique de Mtsangamouji F1

Il capte des venues d'eau situées exclusivement au niveau de la coulée de basalte sain entre 66 et 70 m de profondeur (entre - 16 m NGM et - 20 m NGM). Surmontée par des dépôts pyroclastiques peu perméables, la nappe est captive et artésienne.

Le second forage, Mtsangamouji F2 (12306X0016/MTSAN2) a également été réalisé en 2000. Il ne recoupe que des formations basaltiques (série de base ou série différenciée à feldspaths) sur 80 m (Figure 55).

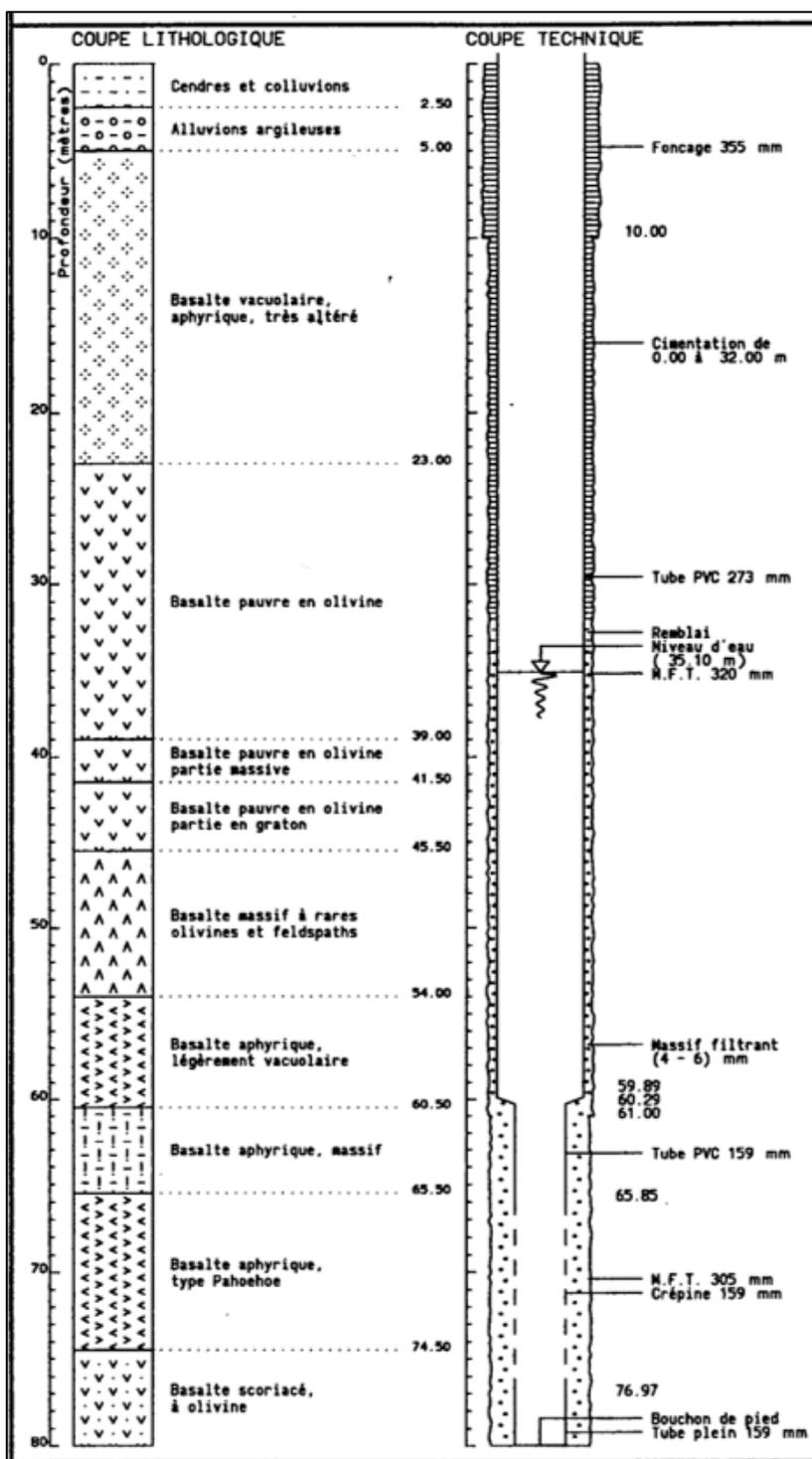


Figure 55 : Coupe lithostratigraphique et technique de Mtsangamouji F2.

Il capte des venues d'eau situées uniquement dans une partie profonde (de 66 à 74,5 m. de prof.) de la formation basaltique. A la différence de Mtsangamouji F1, il s'agit ici d'une nappe libre.

Les débits d'exploitation recommandés pour Mtsangamouji F1 et F2 sont respectivement de 60 et 50 m³/h pour chacun (BRGM/RP-51603-FR).

En ce qui concerne l'aquifère capté par Mtsangamouji F2, les modélisations réalisées dans l'étude pour la réévaluation des débits d'exploitation (BRGM/RP-56438-FR) montrent que :

- Cet aquifère est fermé (une limite étanche au moins – BRGM/RP-50428-FR) d'une superficie utile de l'ordre de 1,7 km² ;
- L'aquifère se recharge par les précipitations efficaces (16 % des pluies s'infiltrent) ;
- Une limite d'approvisionnement en provenance du cours d'eau à proximité du puits existe ;
- Celui-ci présente une surverse par débordement à l'état naturel.

Cependant, la modélisation suggère que l'aquifère déborde peu, voire pas du tout lorsqu'il est exploité. Ainsi, et compte tenu de la gamme de rabattement observée, il est probable que l'aquifère soit exploité selon un régime assez proche de son potentiel maximal (à ce moment-là, le débit moyen annuel est d'environ 30 m³/h soit environ 0,2 Mm³/an).

Une modélisation similaire n'a pas pu être réalisée dans le cas de Mtsangamouji F1 du fait de la forte imprécision des données collectées. Néanmoins, il existe un suivi qualitatif de l'ouvrage qui donne pour la conductivité la chronique de la Figure 56.

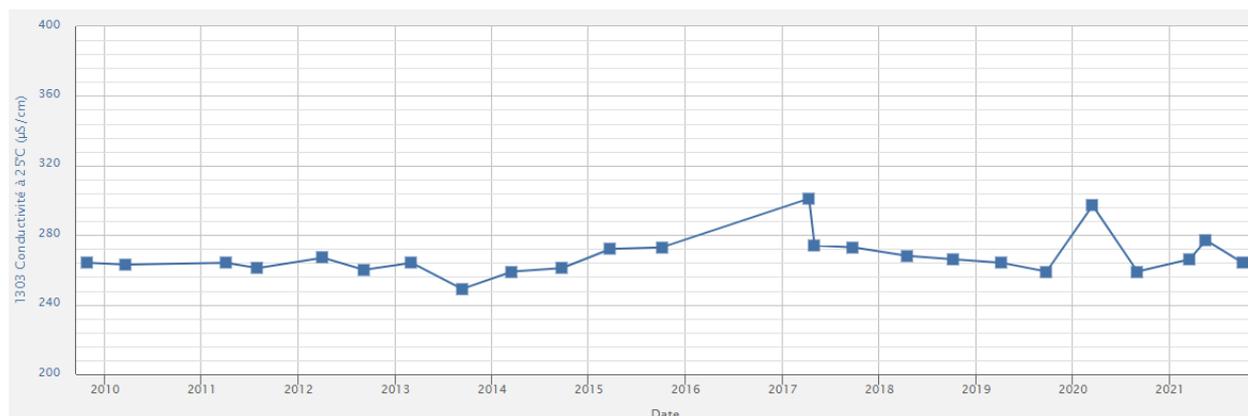


Figure 56 : Chronique de la conductivité dans le captage Mtsangamouji F1 (12306X0017/MTSAN1).

Celle-ci-présente, pour la période représentée (2009 – 2021), quelques variations. Entre mi-2013 et 2017, la variation est notable avec 249 µS/cm, le 10/09/2013 et 301 µS/cm le 11/04/2017. Ces deux valeurs correspondent respectivement au minimum et au maximum des valeurs de la chronique.

A l'échelle de la zone, l'étude sur les caractéristiques hydrogéologiques menée au nord-ouest de Mayotte note que les forages Mtsangamouji F1 et F2, même s'ils sont tous les deux productifs avec des transmissivités similaires, présentent néanmoins quelques différences, le premier étant artésien alors que le niveau d'eau dans le second, situé 200 m en aval, est à 30 m sous le niveau du sol (18 m NGM). Les analyses chimiques confirment également que les venues d'eau captées par ces deux forages, même si elles sont situées approximativement aux mêmes cotes (60 à 75 m NGM), ne sont pas de même nature chimique.

Cette même étude conclut en ce qui concerne le secteur de Mtsangamouji par la description d'un système mettant en évidence la présence de trois ensembles aquifères et d'un niveau *a priori* imperméable.

- Le premier système aquifère correspond à la nappe d'altitude située dans les laves récentes (saines et fissurées/fracturées) dans la partie amont du bassin versant de l'Andrianabé. Cette nappe alimente des sources pérennes qui donnent naissance à l'Andrianabé ;
- Le second système aquifère correspond au remplissage volcano-détritique ayant comblé une dépression d'orientation NW-SE. Cet aquifère serait capté par le forage de Mtsangamouji F1 ;
- Un horizon considéré comme peu perméable voire imperméable, correspondant à des dépôts de pyroclastites, influence les écoulements de surface et souterrains. Celui-ci recoupe les trois bassins versants de la Massimoni, de l'Andrianabé et de la Bougoumouhé, avec une forme en V qui pourrait correspondre au remplissage d'un fond de vallée peu marquée, dont le centre serait au niveau de l'Andrianabé. Il est probable que les eaux ruisselant dans la Massimoni et la Bougoumouhé s'infiltrent au contact avec cet horizon, expliquant ainsi les débits élevés observés dans l'Andrianabé ;
- Enfin, un système aquifère associé aux laves de résistivités comprises entre 25 et 35 ohm.m (gamme de résistivité de couleur verte dans la Figure 57, atteinte par le forage Mtsangamouji F2) et incisée par la dépression d'orientation NW-SE, qui pourraient alimenter le forage de Mtsangamouji F2. Cet horizon serait également présent sous la crête en amont de Tanaraki, mais aucune donnée ne permet actuellement de caractériser son potentiel aquifère.

La coupe géophysique qui passe par les deux ouvrages pour atteindre la côte (orientation Nord-Est / Sud-Ouest aboutit à l'interprétation de la figure 57.

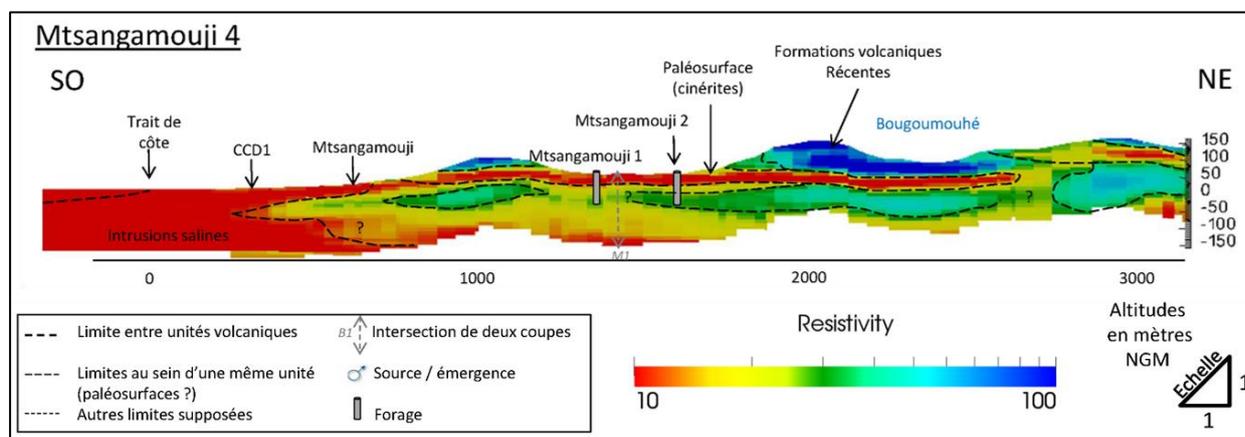


Figure 57 : Profil TDEM interprété de Mtsangamouji 4 (BRGM/RP-59550-FR)

L'ensemble de ces informations montre donc que même à petite échelle (les deux captages distants d'environ 200 m), la situation hydrogéologique reste complexe. Aucun élément direct ne montre la proximité d'une intrusion saline, mais seules de nouvelles données ou de nouveaux forages pourront cerner de façon fiables la situation hydrogéologique actuelle pour les captages respectifs et les risques futurs d'intrusion salines. Enfin, étant donné que l'ouvrage Mtsangamouji F2 capte un aquifère correspondant au comblement d'une dépression d'orientation Nord-Ouest / Sud Est, c'est-à-dire approximativement perpendiculaire à la coupe de la figure 57, il n'est pas sûr que le lien de cet aquifère à la côte suive la direction de surface du Mroni Andrianabé.

c) *Interprétation des résultats géochimiques*

Aucune diagraphie n'a été faite sur les 2 forages de Mtsangamouji (12306X0016/MTSAN2 et 12306X0017/MTSAN1), ceux-ci étant des AEP en exploitation. Les analyses chimiques ont été faites sur l'ouvrage 12306X0016/MTSAN2 (forage F2, Figure 8 et Figure 9). On dispose de données antérieures pour les 2 ouvrages, et particulièrement pour le forage F1 (12306X0017/MTSAN1) depuis 2009 (Figure 56).

La conductivité électrique est différente entre les 2 ouvrages, F1 étant moins minéralisé que F2 (section 4.1.2a) ; mesures de novembre 2021 : 265 et 365 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ respectivement). Ces conductivités apparaissent assez stables dans le temps, même si les quelques données pour F2 pourraient suggérer une très légère tendance haussière. Les valeurs de pH sont élevées, supérieures ou égales à 8 (8 pour F2 et 8,5 pour F1 en fin 2021)¹⁰. Ici encore, il semble difficile d'affirmer que des tendances temporelles existent, on interprètera la chronique comme reflétant des variations entre 8 et 9, ces valeurs étant plutôt élevées en contexte volcanique. Comme pour les ouvrages de Mronabéja, on remarquera un abattement drastique des teneurs en oxygène dissous à compter de 2018, ce qui peut correspondre à une reprise de l'ouvrage ou, plus simplement, à la mise en place d'un dispositif pour le prélèvement (point de piquage) qui permet de bien mieux s'affranchir d'un contact avec l'atmosphère).

En termes de chimie des éléments dissous (section 4.1.2b), les eaux de F2 ont le faciès bicarbonaté calcique magnésien typique des eaux souterraines de Mayotte, alors que les eaux de F1 ont un faciès bicarbonaté sodique-potassique. Ces dernières n'ont pas fait l'objet d'une analyse en novembre 2021. Comme pour les données physico-chimiques, il ne semble guère possible de mettre en évidence de tendance nette pour F1 ou pour F2. Les concentrations en Na évoluent autour de 50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (F1) et 35 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (F2), les concentrations en Cl sont stables, autour de 30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ pour F2, voire diminuent légèrement pour F1 (inférieures à 20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). L'évolution la plus notable serait, pour F2, la hausse des concentrations en NO_3 , ce qui renverrait plutôt à une interaction avec des eaux d'infiltration récentes qu'à une interaction avec des eaux plus salées (section 4.1.2d).

Les ouvrages de Mtsangamouji n'ont pas fait l'objet de prélèvements pour mesures isotopiques.

En résumé, on ne met pas en évidence de fort changement en chimie pour l'ouvrage F2 (il faudrait toutefois suivre de manière régulière la conductivité pour s'en assurer). En outre, il ne semble pas que l'ouvrage F1, de minéralisation différente, connaisse de changements notables (en tout cas, les paramètres physico-chimiques ne le reflètent pas). Bien que les ouvrages aient des chimismes différents, **il ne semble pas qu'ils soient affectés par des interactions avec des eaux à composante salée**. Leur pH élevé pourrait révéler une sensibilité à l'infiltration d'eaux de surface, un indice pouvant être la hausse des nitrates dans le forage F2.

d) *Interprétation des résultats géophysiques*

Le premier jet d'interprétation, réalisé à partir des données AEM seules, a permis de dégager quelques tendances à partir d'un pointé automatique de deux seuils de résistivité différents : 4 et 8 Ohm.m par la méthode présentée au paragraphe 3.4. La figure 58 présente un exemple de ce pointé en coupe, sur un profil AEM.

¹⁰ Une mesure pour F2 en 2010 renvoie un pH de 11, cette valeur est erronée ou elle est acquise juste après la réalisation du forage (développement de l'ouvrage non fait, et donc présence de résidus de forage, comme par exemple eau de cimentation, à pH très basique).

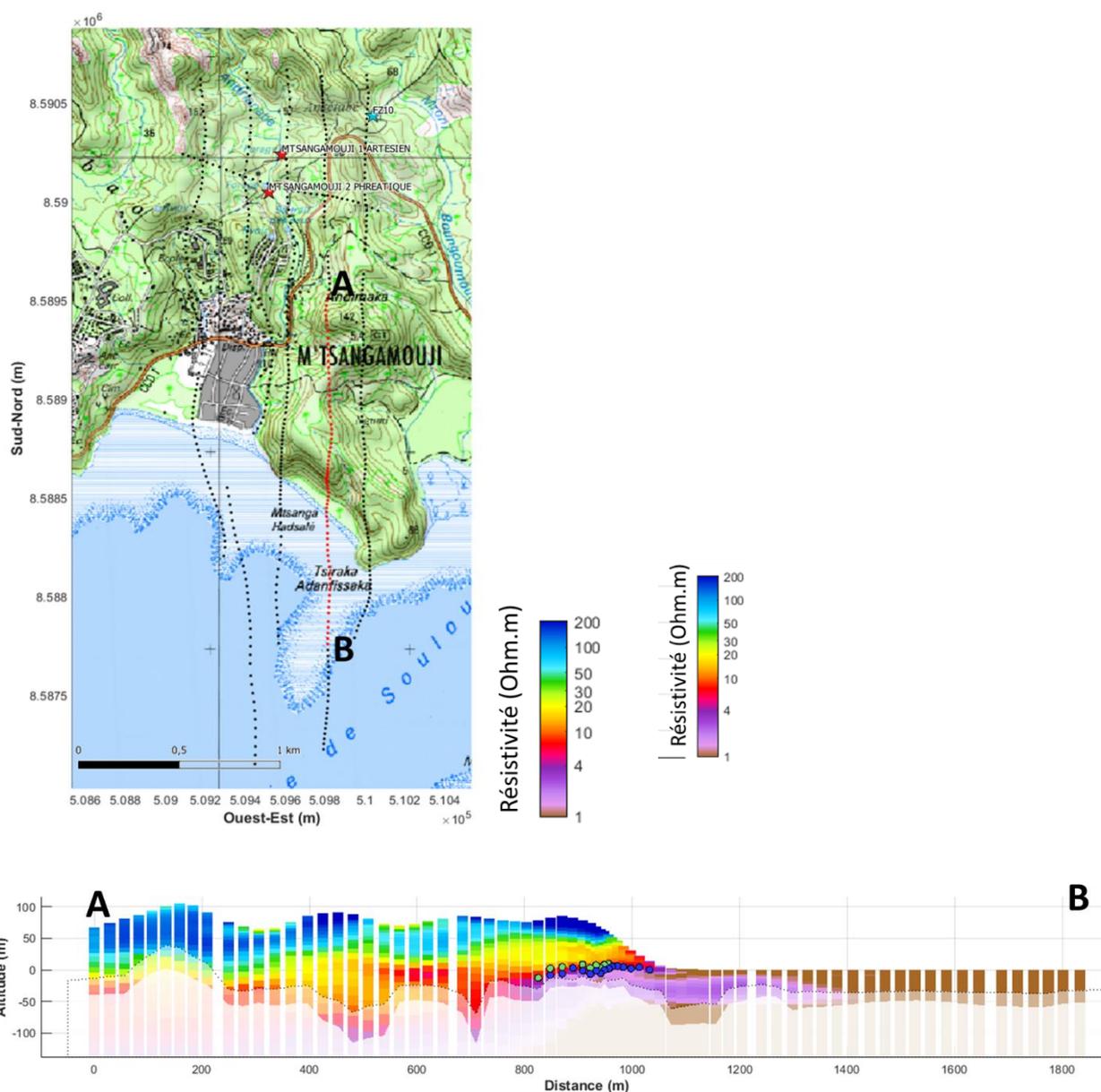


Figure 58 : Profil AEM (et sa localisation) sur lequel est représenté le pointé semi-automatique de l'intrusion saline grâce à un seuil à 4 Ohm.m (en bleu) et un seuil à 8 Ohm.m (en vert). Exagération verticale 1.2.

On peut aussi visualiser le résultat en cartographie de l'altitude du toit de l'invasion, c'est-à-dire de l'altitude à partir de laquelle on rencontre l'invasion pour la première fois. Comme expliqué précédemment, nous avons travaillé avec deux seuils de résistivité différents : 4 et 8 Ohm.m, 4 étant plus proche de l'invasion à proprement parler et 8 comprenant une zone de mélange eau douce – eau salée et étant donc plus sécuritaire. La figure 59 présente cette cartographie.

Les points noirs correspondent aux points de données AEM, recouverts par des points de couleur représentant l'altitude de l'intrusion. S'il n'y a pas de point de couleur c'est que le seuil de résistivité n'a pas été rencontrée sur les données AEM. Cela peut être expliqué par l'absence de l'intrusion saline, ou par une profondeur d'investigation de la géophysique insuffisante à cet endroit pour atteindre l'intrusion (investigation réduite à cause du ratio signal sur bruit insuffisant ou intrusion trop profonde pour la méthode).

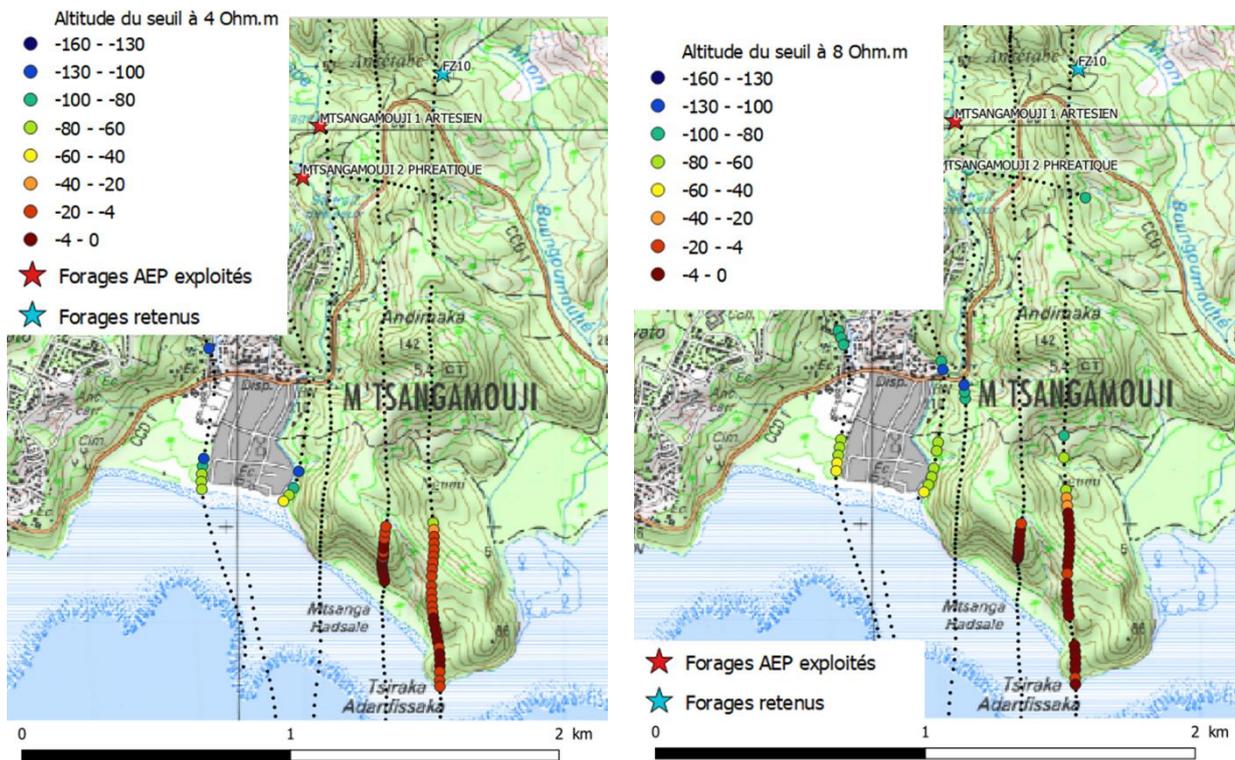


Figure 59 : Localisation en altitude de l'intrusion saline « principale » (pas la plus proche de la surface) pointée automatiquement sur les données AEM dans le secteur de Mtsangamouji.

Il est donc possible de visualiser la pénétration de l'intrusion saline depuis l'océan en direction de l'intérieur de l'île. On voit cependant qu'elle s'arrête (ou devient trop profonde pour être visible à l'AEM) assez rapidement. Le forage retenu FZ10 et les forages exploités Mtsangamouji 1 et 2 semblent éloignés de l'intrusion.

e) Conclusion et recommandations

Les ouvrages Mtsangamouji 1 et 2 captent, bien que distants de moins de 300 mètres des aquifères très différents, l'un captif (artésien au droit de Mtsangamouji 1), l'autre libre (au droit de Mtsangamouji 2). Le contexte hydrogéologique du secteur est donc hétérogène dès une petite échelle. Aucune investigation géochimique récente n'a été effectuée. Néanmoins, selon l'analyse des résultats passés, il ne semble pas que les ouvrages soient affectés par des interactions avec des eaux salées.

Les investigations géophysiques et leur interprétation ne décèlent pas d'intrusion saline à proximité des ouvrages.

Dans ce cas, il serait préconisé de suivre la conductivité électrique au droit des deux forages d'exploitation via la sonde de suivi installée dans les deux forages. Ce suivi, effectué par l'exploitant est actuellement en continu pour les forages télégérés et assuré une fois par mois par un prélèvement d'eau brute et analysé dans leur laboratoire pour tous les forages.

Toutefois, s'il s'avérait que la tendance de la conductivité est à la hausse, il faudrait mettre en place des prélèvements supplémentaires comme ceux préconisés pour les forages de Mronabéja et Mtsangamouji.

5.2.3. Zone de Mohogoni

a) Contexte géographique

Le bassin versant du Mro Oua Maré est situé dans la partie Nord-ouest de Grande-Terre, à cheval sur la commune de Bandraboua à l'Est et la commune de M'tsamboro à l'ouest. L'axe majeur du bassin versant est orienté NW-SE et l'exutoire verse dans le lagon côté Nord à hauteur du village de Dzoumogné (Figure 60).

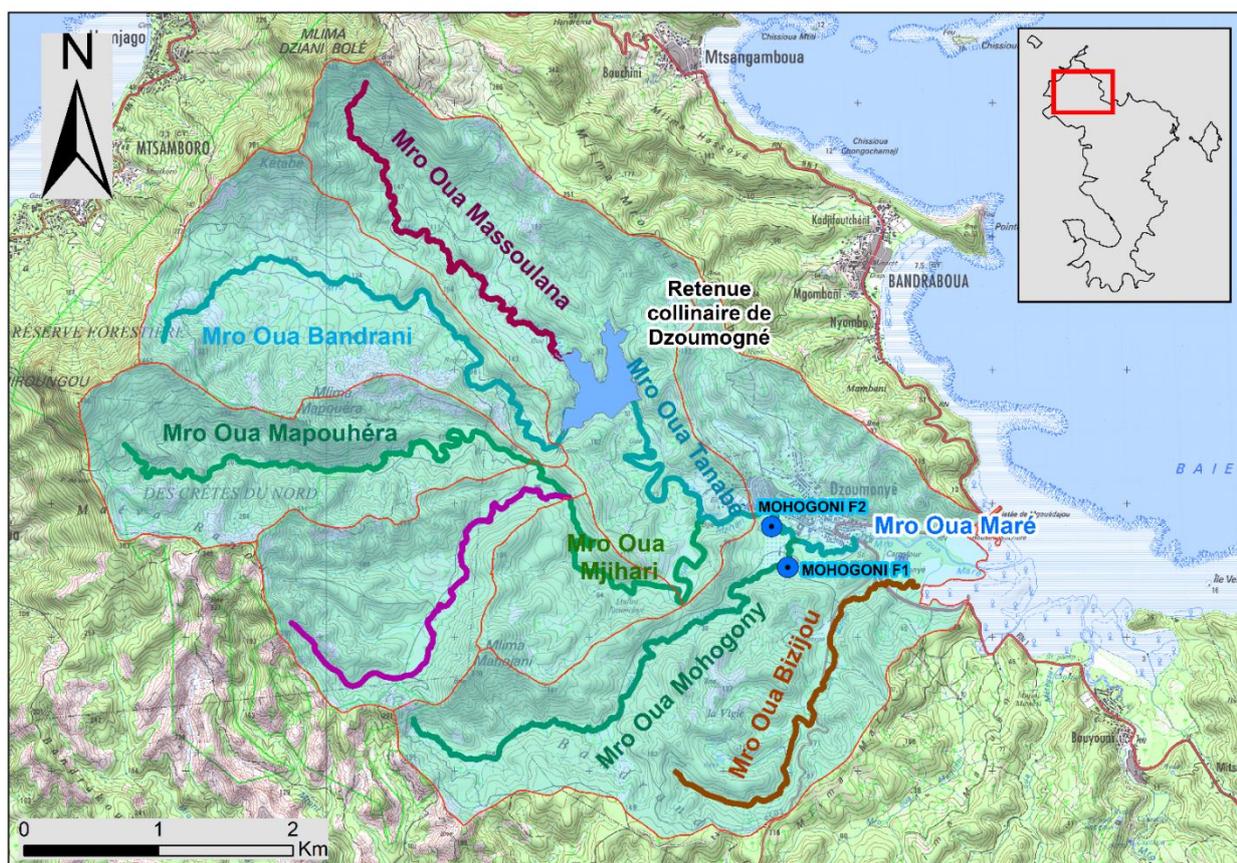


Figure 60 : Bassin versant total du Mro Maré ; localisation des captages AEP de Mohogoni, et de la retenue collinaire

Du fait de la compacité du bassin versant, le cours d'eau principal n'est en fait que l'association de plusieurs affluents de taille comparable : le Mro Oua Massoulana, le Mro Oua Bandrani, le Mro Oua Mapouéra, le Mro Oua Mouhogoni et le Mro Oua Bizouji. Le Mro Oua Tanabé et le Mro Oua Mjihari correspondent plutôt à des tronçons de cours d'eau qu'à des rivières à part entière. Le cours d'eau situé entre le Mro Oua Mapouéra et le Mro Oua Mjihari (tracé violet dans la figure) ne porte pas de nom sur la carte. Le cours d'eau désigné Mro Oua Maré prend son appellation qu'à partir de la dernière confluence, c'est-à-dire à l'altitude de 8 m NGM à moins de deux kilomètres de son débouché sur l'océan.

La surface du bassin dans son intégralité (couleur bleu pâle sur la carte) est de 22,7 km² pour un périmètre de 21,8 km. De forme compacte, sa longueur (6,3 km) est du même ordre que sa largeur maximum (4 km). Son altitude maximum est de 472 m.

b) Contexte hydrogéologique et risque d'intrusion saline

Sur la carte de la figure 61 sont positionnés les deux captages AEP actuellement en fonction : Mohogoni F1 (12302X0025/MOHOG) et Mohogoni F2 (12302X0101/MOHOF2).

Mohogoni F1 a été foré en 2004 en rive droite du Mro Oua Mjihari. Mohogoni F2 a été foré en 2013 en rive droite du Mro Oua Mohogoni. Ils sont tous deux situés à l'extrême aval du réseau hydrographique, peu avant la confluence des deux rivières à proximité du village de Dzoumogné. Les deux ouvrages ne sont distants que d'environ 400 m.

Selon la carte géologique vectorisée actuelle au 1/30 000, les deux forages sont positionnés sur des formations superficielles (Figure 61).

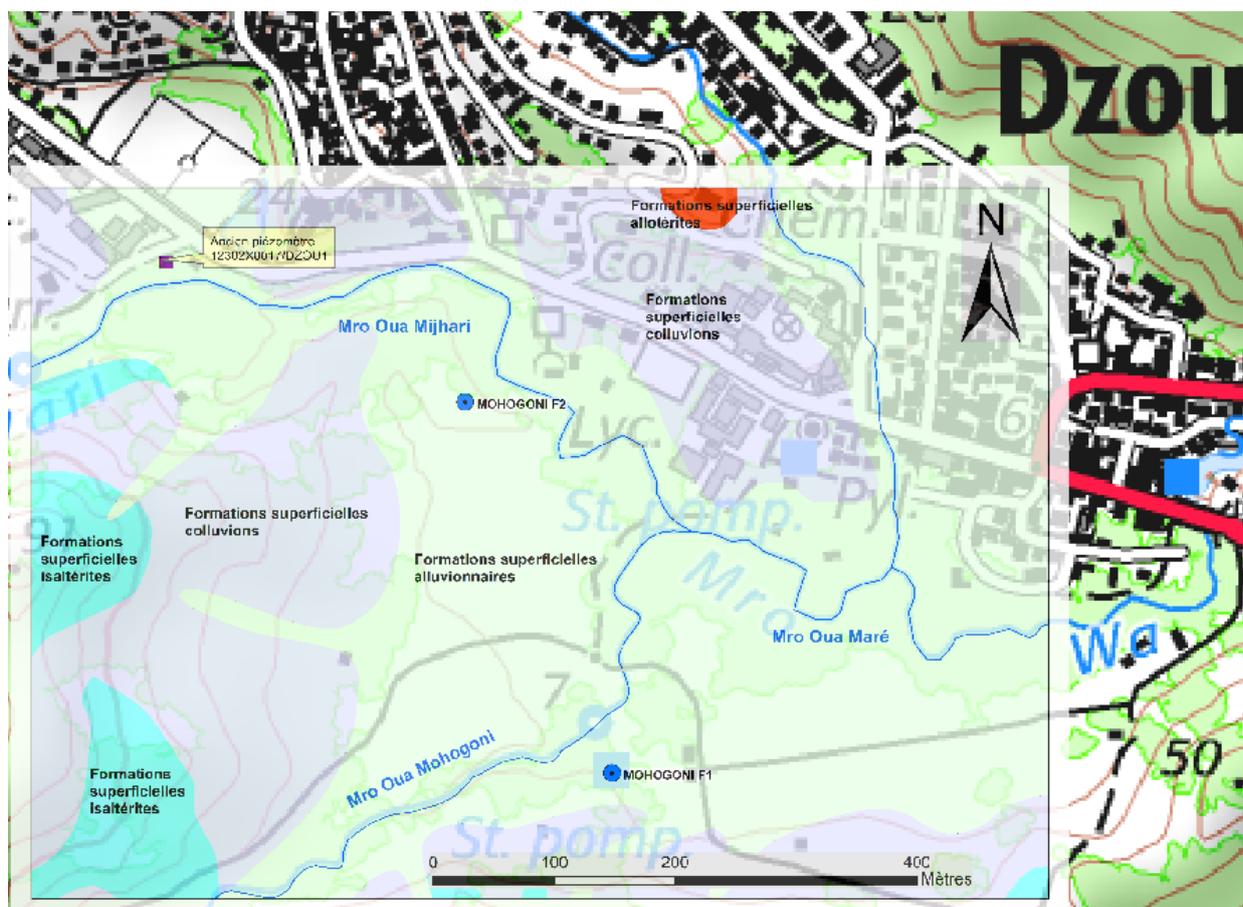


Figure 61 : Localisation des captages AEP Mohogoni F1 et F2 sur fond de carte géologique vectorisée (1/30 000) et fond de carte IGN

Ces formations superficielles se retrouvent dans les logs géologiques des deux ouvrages. Dans les deux cas des formations volcaniques plus ou moins altérés succèdent en profondeur à ces formations superficielles (Figure 62). D'un point de vue hydrogéologique, ces formations superficielles sont considérées comme peu perméables.

Un ancien piézomètre (12302X0017/DZOU1) situé en amont présente un log géologique similaire aux deux captages. Il a été foré en 1990 mais aucune chronique piézométrique n'est disponible.

Pour Mohogoni F1, les principales venues d'eau ont été observées dans les brèches volcaniques qui constituent la base de la coulée de basalte identifiée entre 16 et 22 m de profondeur (entre - 5 m NGM et - 11 m NGM), ainsi qu'au sein des graviers de basalte et coquilles identifiés entre 25 et 30 m de profondeur (entre - 14 m NGM et - 19 m NGM) et à la base des basaltes identifiés entre 30 et 34,5 m de profondeur (entre - 19 m NGM et - 23,5 m NGM).

Pour Mohogoni F2, les principales venues d'eau ont été observées entre 41 et 48 m de profondeur (entre - 30 m NGM et - 37 m NGM) au sein des basaltes massifs (80 % de la production de l'ouvrage).

Lors des forages et des pompages d'essais, l'aquifère rencontré fut interprété comme captif et légèrement artésien (BRGM/RP-57622-FR pour Mohogoni F1 et BRGM/RP-63351-FR pour Mohogoni F2). Lors des pompages d'essais sur Mohogoni F2 une connexion hydrogéologique entre les deux captages a été constaté.

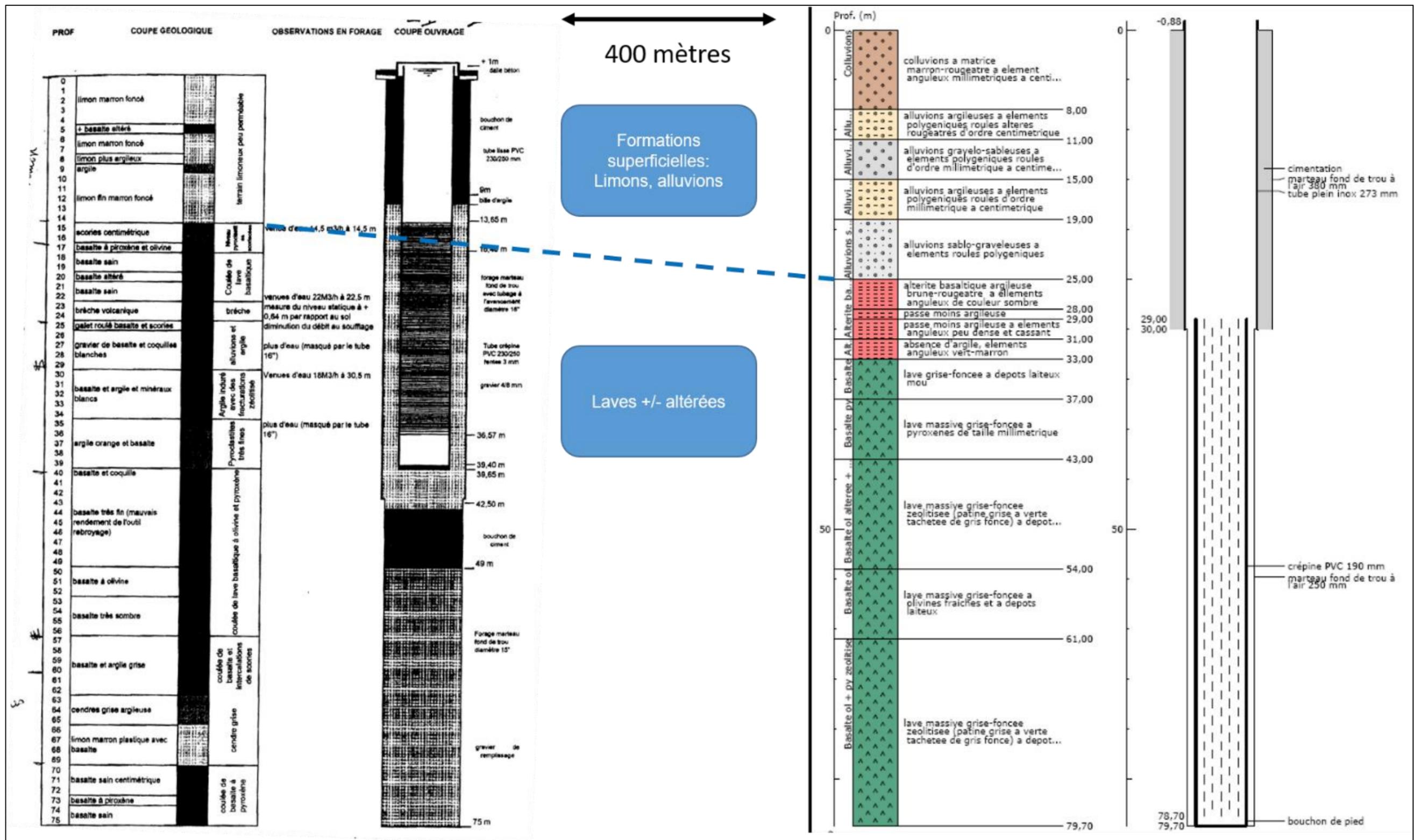


Figure 62 : Comparaison des logs géologiques des captages AEP Mohogoni F1 et F2

La chronique d'exploitation disponible des deux captages est reproduite dans la figure 63.

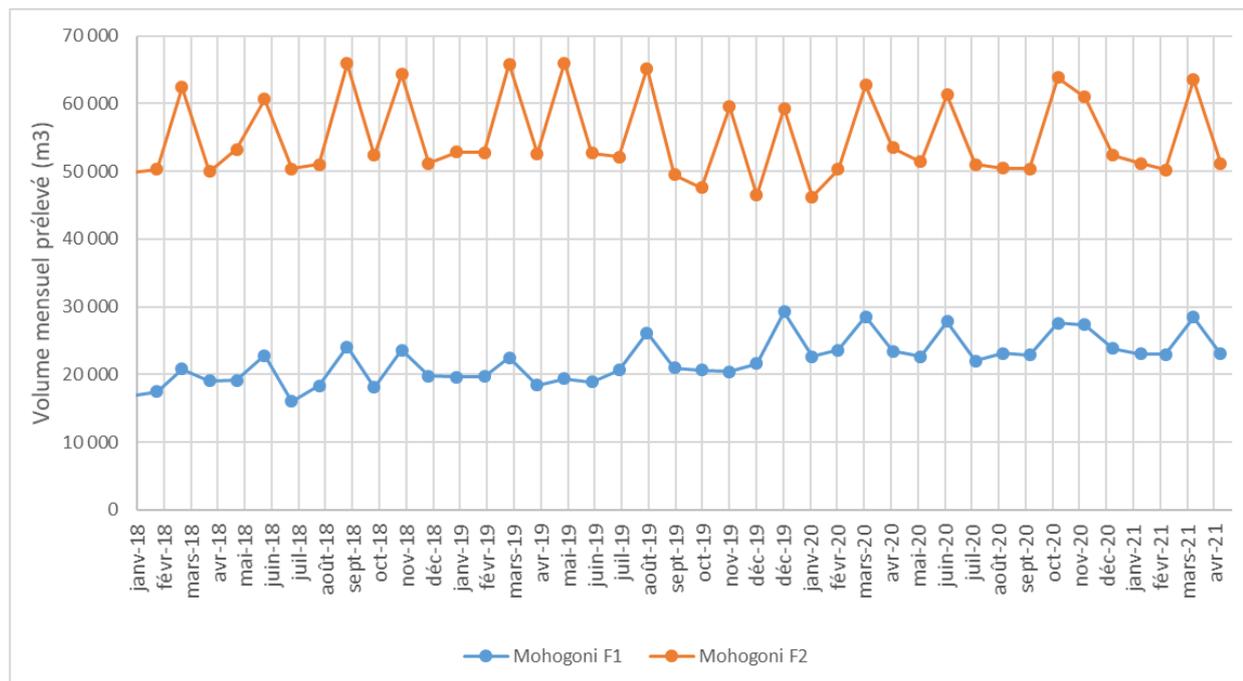


Figure 63 : Chronique d'exploitation mensuelle des ouvrages AEP Mohogoni F1 et F2 (source : SMAE Mayotte, mise en forme : BRGM)

Les volumes réellement exploités sont au-dessus des préconisations issues des rapports BRGM/RP-57622-FR (captage F1) et BRGM/RP-63351-FR (captages F1 et F2), notamment pour Mohogoni F2 (plus de 50 000 m³ par mois au lieu de 27 000 m³ préconisé).

Cette surexploitation par rapport aux préconisations interpelle quant au risque d'intrusions salines.

La géométrie du sous-sol a pu être approchée avec les données AEM, employées en parallèle des données géologique et hydrogéologique. Le modèle conceptuel, issu de ces données, propose deux paléovallées comblées par des formations volcaniques et superficielles :

- Une paléovallée en amont de la retenue collinaire de Dzoumogné (« paléovallée superficielle ») caractérisée par un aquifère de subsurface ;
- Une paléovallée dans la partie aval du bassin versant (« paléovallée masquée »), caractérisée par un aquifère profond.

Dans les deux cas, la succession des entités hydrogéologiques est décrite comme suit :

- Sous une couverture volcano-sédimentaire peu perméable (pyroclastites fines), un second ensemble de formation lavique multicouche semi-perméable constitue le système aquifère ;
- Le soubassement volcano-détritique ancien, plus altéré, jouant le rôle d'aquiclude.

La Figure 64 présentent les schémas conceptuels de ces deux paléovallées comblées.

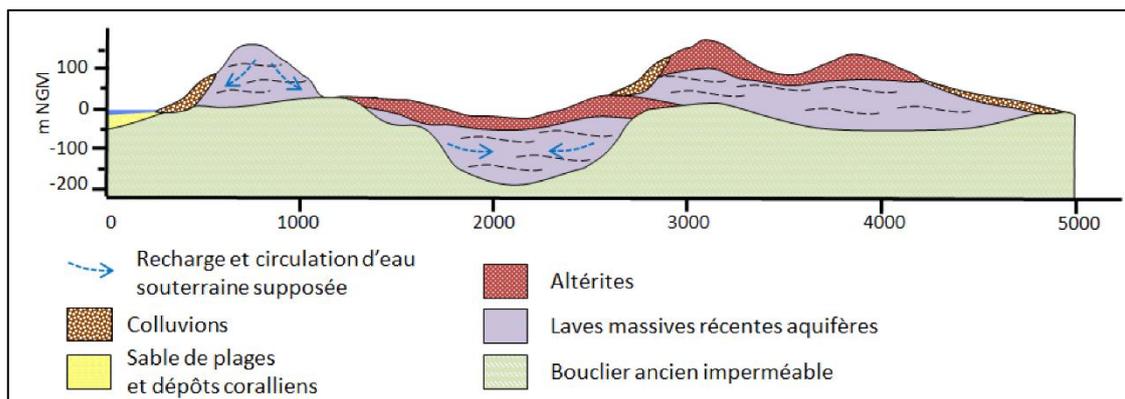


Figure 64 : Schéma hydrogéologique conceptuel des paléovallées enterrées - BRGM/RP-61757-FR

Les deux ouvrages Mohogoni F1 et F2 captent selon ce modèle conceptuel l'aquifère profond de la paléovallée aval. Sa zone d'alimentation est en amont de l'aire de captage. L'extension totale de l'aquifère et l'étendue de sa zone d'alimentation restent indéfinies. Il n'est donc pas possible d'évaluer les ressources en eaux disponibles et l'impact des captages en activité.

Il n'y a pas d'information ou de mesure par le passé qui indiquent une éventuelle intrusion saline à proximité de la zone de captage qui englobe Mohogoni F1 et F2.

c) Interprétation des résultats géochimiques

Aucune diagraphie n'a été faite sur les 2 forages de Mohogoni (12302X0025/MOHOG et 12302X0101/MOHOF2), ceux-ci étant des forages en exploitation. Les analyses chimiques ont été faites sur l'ouvrage 12302X0101/MOHOF2. Pour ces 2 ouvrages, on ne dispose que de quelques données antérieures.

Les paramètres physico-chimiques (section 4.1.2a) font ressortir des pH légèrement supérieurs à 7, les mesures de fin 2021 ayant tendance à être plus basses que les mesures antérieures. La conductivité électrique est assez basse ($320\text{-}340 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), et une très légère tendance à l'augmentation dans le temps pourrait exister, surtout pour 12302X0025/MOHOG (passage de 290 à $320 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ entre 2004 et 2021).

Le faciès des eaux est toujours bicarbonaté calcique magnésien (section 4.1.2b), les teneurs en Na sont basses, tout comme celles en Cl. Les mesures 2021 en Na et Cl, tout comme celles de SO_4 , sont un peu supérieures aux mesures antérieures, mais il est difficile d'essayer d'y déceler une tendance à l'augmentation. Les concentrations en bore pour F2 ne varient pratiquement pas (section 4.1.2c). Le rapport d'abondance entre Na et Cl marque toujours un enrichissement en Na (section 4.1.2d).

L'exploitation du forage Mohogoni F1 respecte les préconisations de la DAF. Par contre, le forage de Mohogoni F2 est exploité à $80 \text{ m}^3/\text{h}$ au lieu des $60 \text{ m}^3/\text{h}$ préconisé depuis sa mise en exploitation fin 2016. Pour autant, **il ne semble pas que cela ait, en tout cas à la date des prélèvements pour réaliser les analyses chimiques, entraîné de modification notable de la chimie de l'eau pompée.** Cela ne veut pas dire que des changements ne peuvent pas intervenir ultérieurement.

d) *Interprétation des résultats géophysiques*

Le premier jet d'interprétation réalisé à partir des données AEM seules a permis de dégager quelques tendances à partir d'un pointé automatique de deux seuils de résistivité différents : 4 et 8 Ohm.m par la méthode présentée au paragraphe 3.4. La figure 65 présente un exemple de ce pointé en coupe, sur un profil EM. On voit que l'intrusion s'approfondit rapidement plus bas que la profondeur d'investigation de l'AEM.

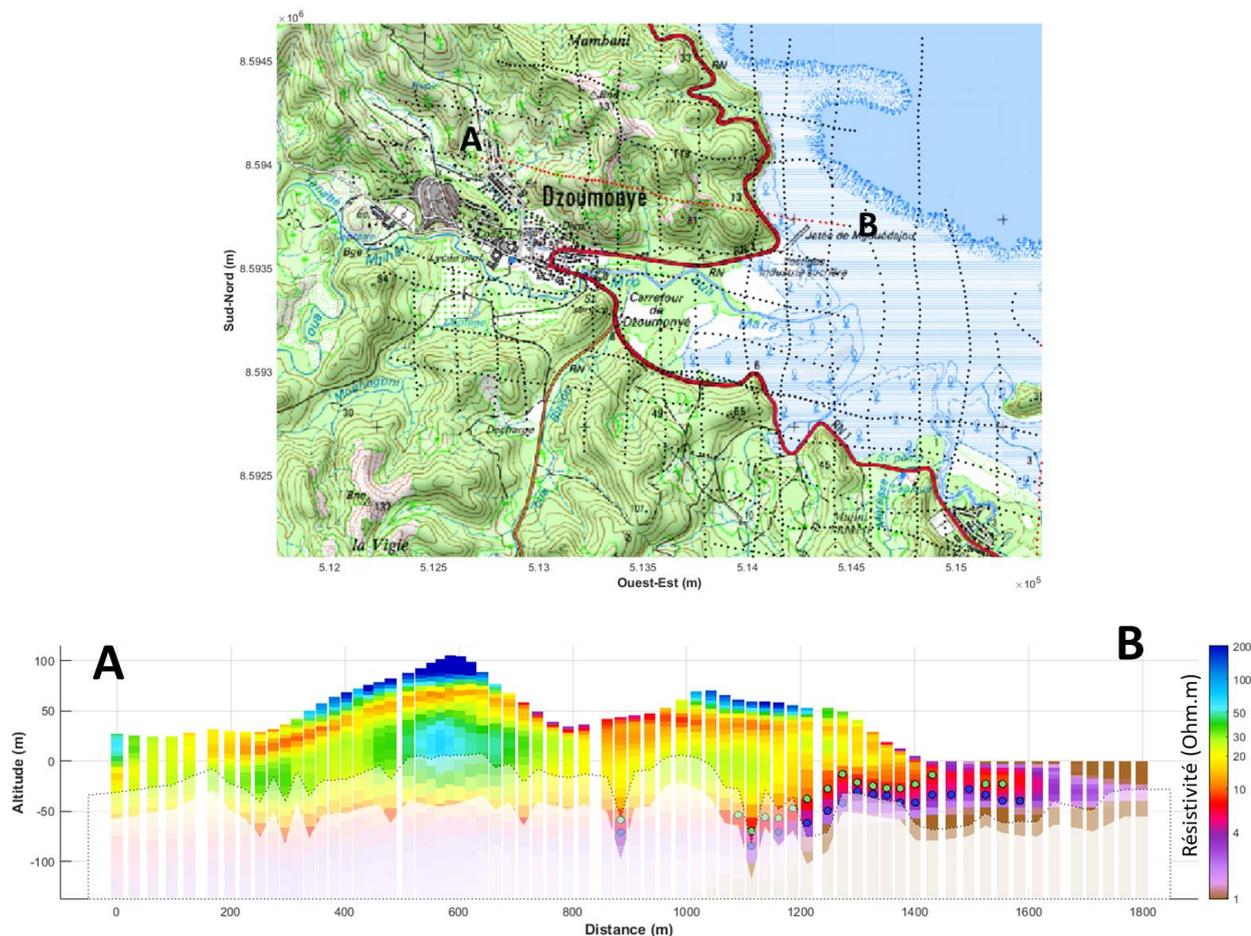


Figure 65 : Profil AEM (et sa localisation) sur lequel est représenté le pointé semi-automatique de l'intrusion saline grâce à un seuil à 4 Ohm.m (en bleu) et un seuil à 8 Ohm.m (en vert). Exagération verticale 2.

On peut aussi visualiser le résultat en cartographie d'altitude du toit de l'invasion, c'est-à-dire de l'altitude à partir de laquelle on rencontre l'invasion pour la première fois. Comme expliqué précédemment, nous avons travaillé avec deux seuils de résistivité différents : 4 et 8 Ohm.m, 4 étant plus proche de l'invasion à proprement parler et 8 comprenant une zone de mélange eau douce – eau salée et étant donc plus sécuritaire. La figure 66 présente cette cartographie. Les points noirs correspondent points de données AEM, recouverts par des points de couleur représentant l'altitude de l'intrusion. S'il n'y a pas de point de couleur c'est que le seuil de résistivité n'a pas été rencontrée sur les données AEM. Cela peut être expliqué par l'absence de l'intrusion saline, ou par une profondeur d'investigation de la géophysique insuffisante à cet endroit pour atteindre l'intrusion (investigation réduite à cause du ratio signal sur bruit insuffisant ou intrusion trop profonde pour la méthode).

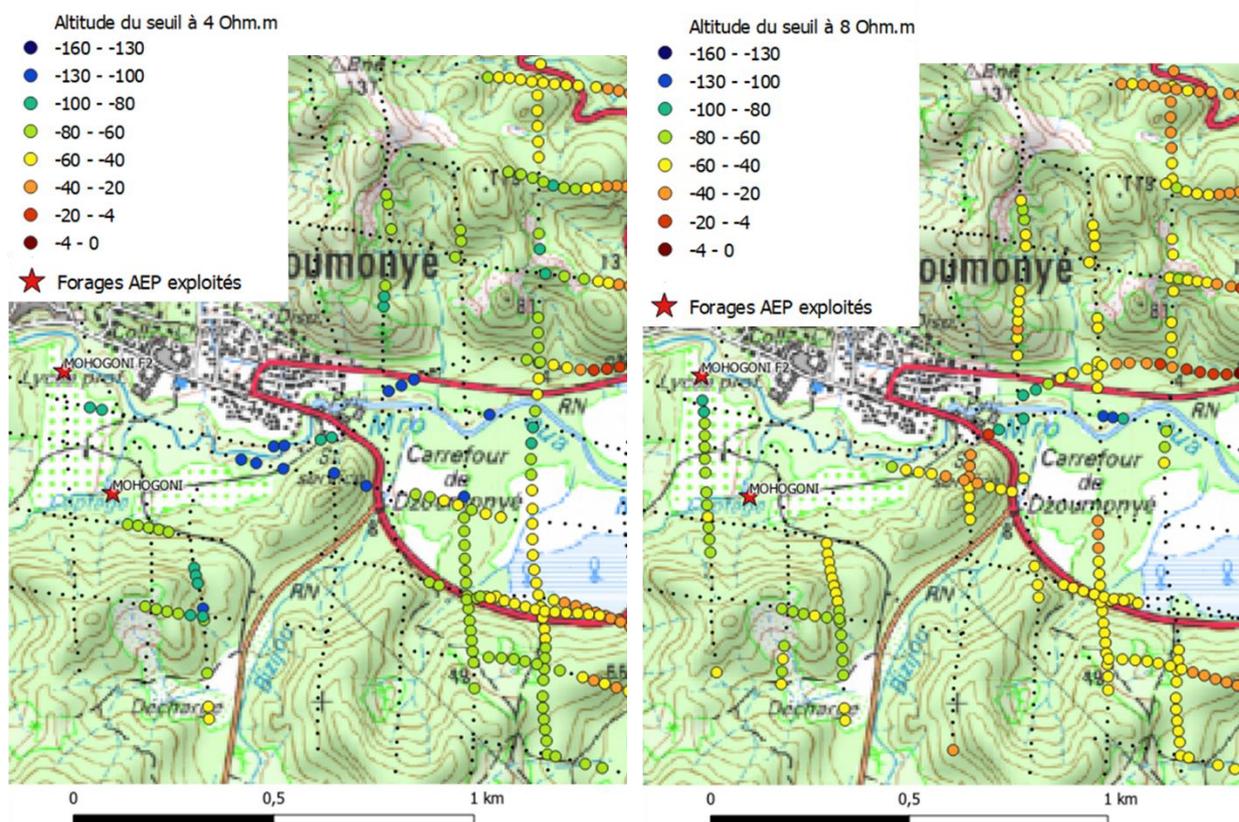


Figure 66 : Localisation en altitude de l'intrusion saline pointée automatiquement sur les données AEM dans le secteur de Mohogoni.

- **Résultats TRE comparés au résultats AEM sur la zone de Mohogoni**

Les investigations par TRE au sol ont été réalisées selon un profil submérien (P8) s'étendant de la rivière Tanabé Mijhari au nord et recoupant la rivière Mohogoni à proximité du forage 12302X0025/MOHOG. Ces investigations s'appliquent donc en particulier à l'environnement de ce dernier forage bien que des informations puissent contribuer à mieux cerner le contexte du forage 12302X0021 dans la vallée de Tanabé Mijhari (Figure 67). La tomographie P8 reprend le tracé du profil de 2010 (BRGM/RP-59550-FR) et approfondi son investigation.

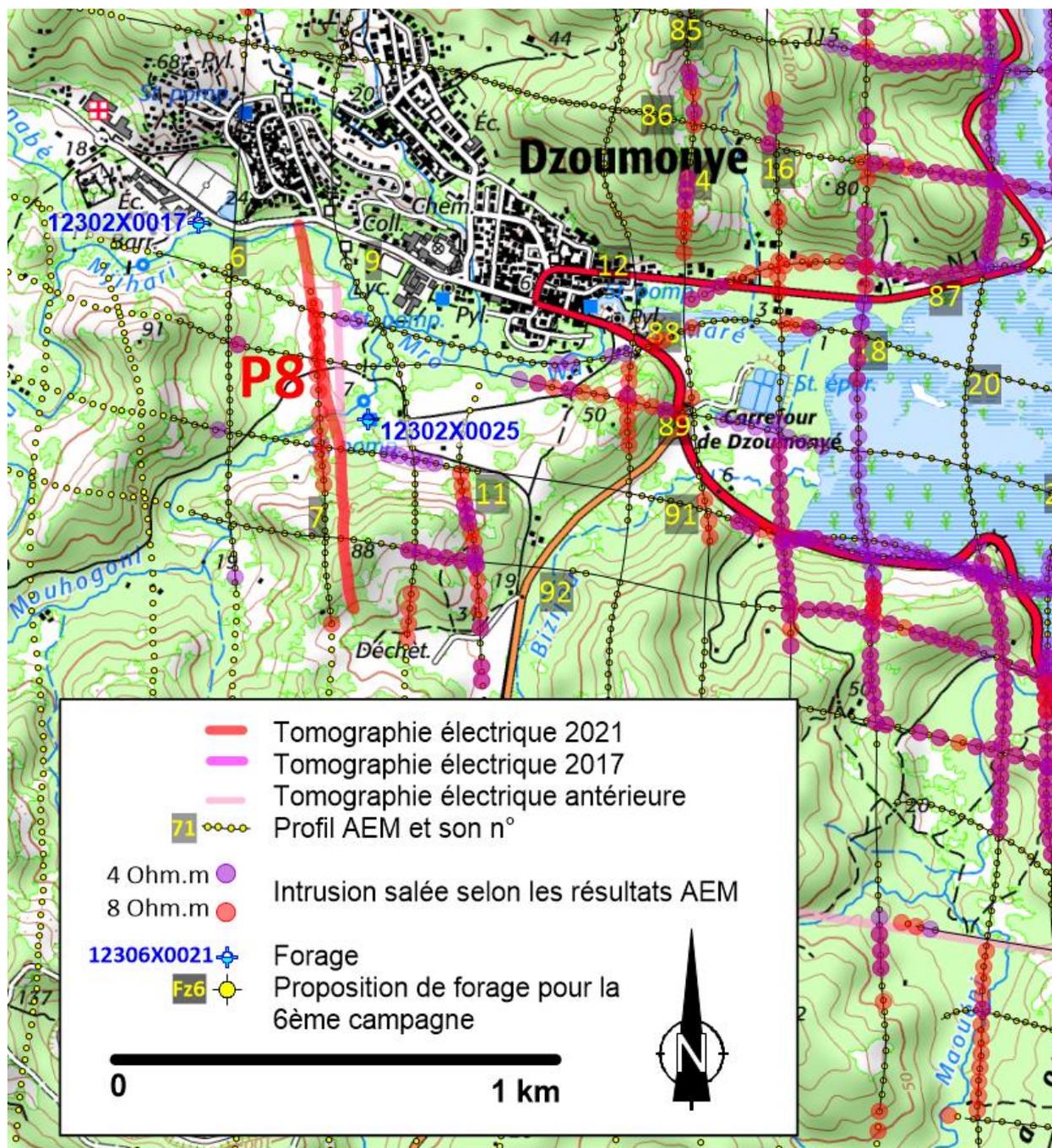


Figure 67 : Localisation des investigations géophysiques et cartographie des intrusions salées définies selon les résultats AEM

Une intrusion potentielle profonde (C2) est imagée sur le profil P8 vers 125 m de profondeur (Planche 3). Elle apparaît plus profonde que ce que montre les profils AEM P88 et P7 qui montrent un conducteur profond vers 50 à 70 m de profondeur. Des investigations géophysiques supplémentaires sont recommandées pour préciser la géométrie de ce conducteur. Le profil P8 (Planche 3) montre une couche plus ou moins conductrice C1, C1' qui constitue un indice d'intrusion saline qui s'établirait entre 15 et 40 m de profondeur soit dans les séries de basalte altéré et d'alluvions rencontrées dans le forage 12302X0025/MOHOG. Cette couche conductrice est cohérente avec l'imagerie AEM du profil P7 au moins en partie ; cette dernière montrant une épaisseur de conducteur sensiblement plus réduite (1 m environ).

Cette intrusion saline pourrait être en relation avec l'intrusion que le profil AEM P88 suit depuis le rivage à l'est par une couche conductrice superficielle quasi continue qui ondule (au gré des rapprochements avec la rivière ?) entre 0 et -10 m d'altitude et qui s'affine en deçà de la distance 700 m (P88 AEM, Planche 3).

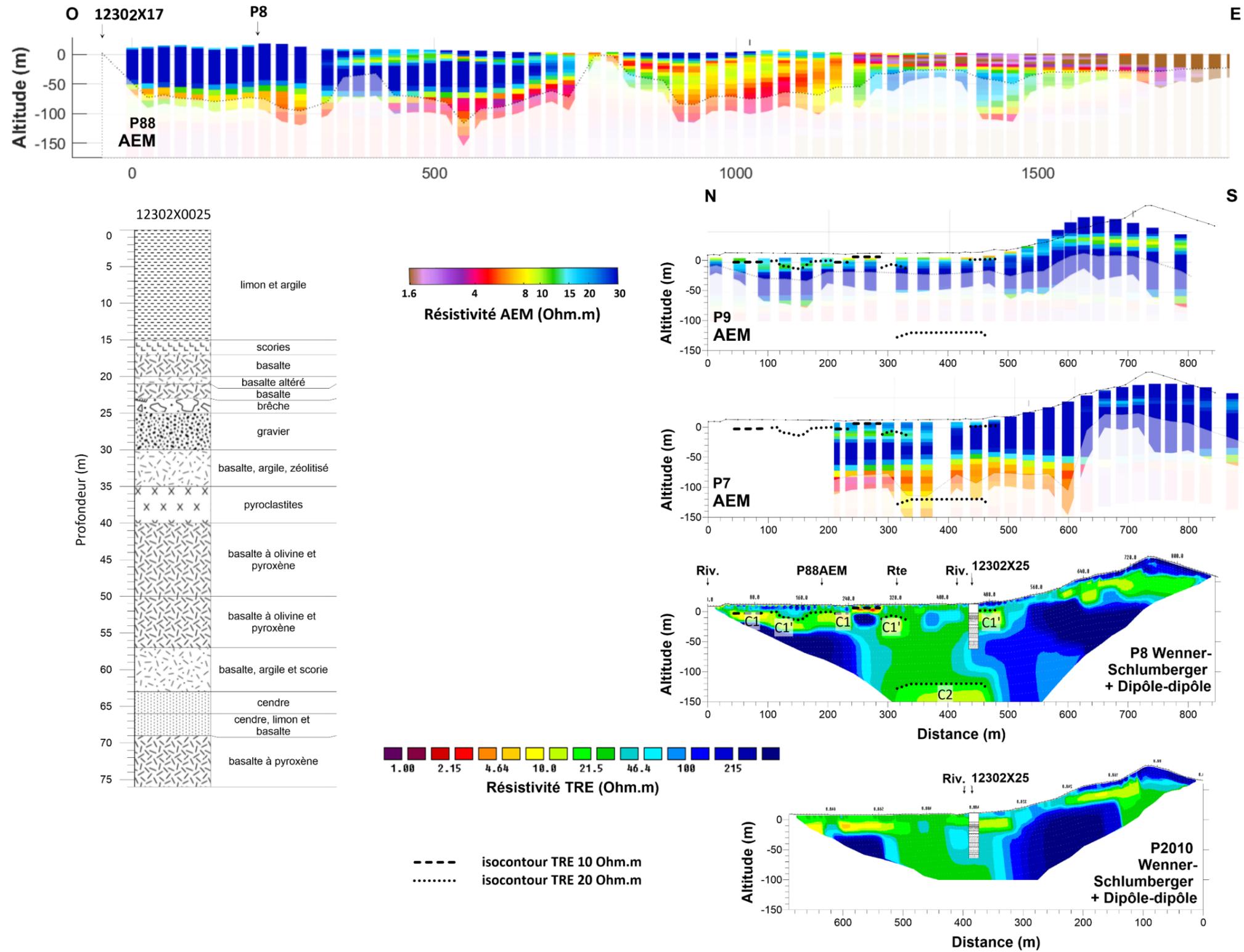


Planche 3 : Zone de Mohogoni - Intrusions salines interprétées à partir de l'imagerie TRE (P2010, P8, en bas) et comparées à l'imagerie AEM (en haut). Les isocontours 10 et 20 Ohm.m définis par TRE sont superposés à l'imagerie AEM pour comparaison.

e) *Conclusion et recommandations*

Les deux ouvrages Mohogoni F1 et F2 captent l'aquifère profond à l'aval d'un système de deux paléovallées. Les volumes pompés aux deux captages dépassent actuellement les préconisations émises lors de la création des forages respectivement en 2006 et 2013. Il existe donc un risque de surexploitation et d'intrusion saline.

D'un point de vue géochimique, bien que le débit d'exploitation de Mohogoni F2 ne respecte pas l'arrêté de prélèvement (exploité à 80 m³/h au lieu de 60 m³/h), il ne semble pas que cela ait, en tout cas à la date des prélèvements pour les analyses chimiques, entraîné de modification notable de la chimie de l'eau pompée. Cela ne veut cependant pas dire que des changements ne peuvent pas intervenir dans le futur.

Les résultats et interprétations géophysiques permettent d'avancer l'hypothèse d'une ou plusieurs intrusions salines à proximité des forages. Ces intrusions salines probables peuvent atteindre les captages selon différentes directions.

Pour ce secteur différentes préconisations, utilisant différentes méthodes sont émises :

- Méthodes géophysiques

Un suivi géoélectrique est recommandé pour préciser la nature et l'ampleur des invasions salées potentielles associées aux conducteurs C1, C1' ainsi que leur évolution en cours d'exploitation ou si le débit de pompage devait être augmenté.

Le but de cette méthode est de placer une ligne de tomographie de résistivité électrique entre le forage et le littoral et d'acquérir de la donnée avant le pompage au droit du forage et pendant le pompage afin d'évaluer l'impact des pompages sur l'intrusion saline. Cela nécessiterait donc de laisser le dispositif sur plusieurs jours et d'avoir des périodes sans pompage pour avoir un état initial au repos et des périodes de forage en pompage. Ce type de protocole peut être compliqué à mettre en place à Mayotte car la tension sur la ressource en eau ne permet pas de laisser un forage au repos plusieurs heures par jour sans qu'il n'y ait des conséquences pour la population.

- Méthodes géochimiques

La principale intrusion saline semble être localisée dans la vallée de la Mro Oua Maré. L'implantation d'un ouvrage de surveillance, en aval des deux forages en exploitation Mohogoni F1 et F2 dans la vallée, serait judicieuse.

Il serait préconisé d'établir un protocole de surveillance de l'intrusion saline de façon graduelle, à savoir :

1/ Assurer un suivi régulier de la conductivité électrique de l'eau :

- au droit du forage, en continu si l'ouvrage est télégréré ou a minima une fois par mois par lecture de la mesure et de vérifier la dérive de la sonde par des prélèvements mensuels, actuellement réalisés tous les mois par l'exploitant dans le cadre de l'auto-surveillance ;
- sur le piézomètre, deux fois par an de ce même paramètre sur toute la colonne d'eau via une sonde manuelle.

2/ Déterminer un seuil de variabilité naturelle de la conductivité au-delà duquel il serait nécessaire de :

3/ Effectuer un diagnostic sur site du chlore et des sulfates à l'aide de kits photométriques ; cela permettra une quantification des premiers paramètres indiquant une intrusion saline.

4/ Faire des prélèvements d'eau brute en suivant les protocoles des laboratoires (échantillonnage, conservation, transport, etc.) pour confirmer la présence d'intrusion saline dans le cas où, après plusieurs quantifications par des kits photométriques, les concentrations en chlore et sulfates s'avéraient en hausse comparées aux données historiques.

Dans le cas où ces futures mesures montraient une aggravation progressive de la situation, une nouvelle campagne géophysique serait réalisée pour caractériser l'évolution du toit de l'intrusion saline. En cas d'aggravation avérée, des actions de protection devront être mises en œuvre.

5.2.4. Zone de Méresse

a) Contexte géographique

Le bassin versant de la Mro oua Méresse (Figure 68) se situe sur la commune de Bandraboua au Nord de l'île de Grande-Terre. Le Mro oua Méresse est un petit cours d'eau peu développé, court et alimenté par un seul affluent en rive gauche. S'écoulant du Sud vers le Nord sur les formations de basalte indifférencié du Digo, il reste rectiligne, encaissé au fond d'une vallée. Ce bassin versant est jointif à celui du Oua Mro Bouyouni situé à l'est.

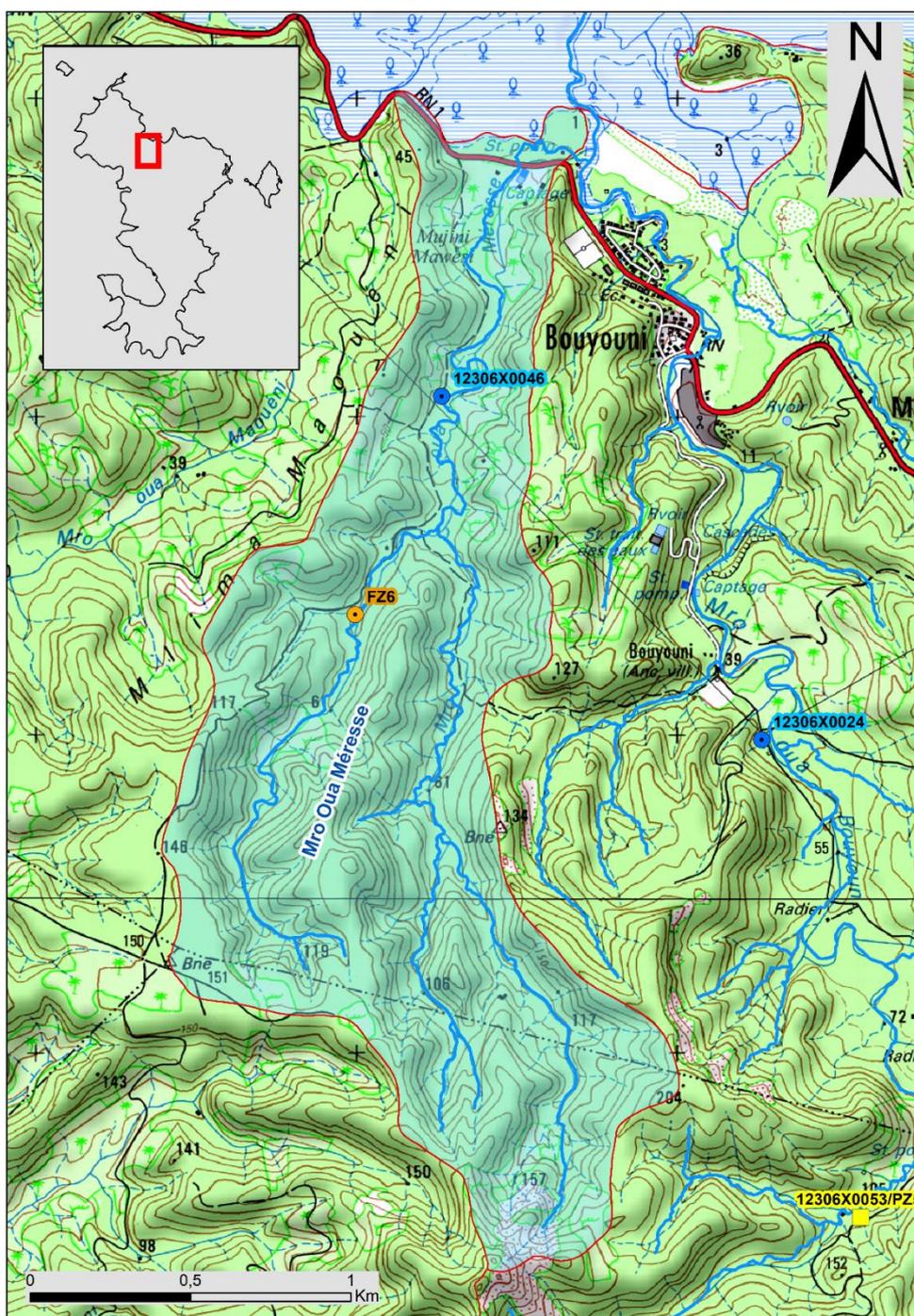


Figure 68 : Bassin versant du Mro Oua Méresse avec les localisations du captage AEP (« Bouyouni Méresse » 12306X0046/BOUY) et du site de forage FZ6

La surface du bassin versant (couleur bleu pâle sur la carte) est de 2,7 km² pour un périmètre de 10 km. Tout en longueur, le bassin du Mro Oua Méresse mesure 3,5 km sur 0,9 km en moyenne. L'amont du bassin versant atteint l'altitude de 250 m NGM (le point le plus haut se situe sur le massif du Mlima Digo). La distance entre l'extrême amont du cours d'eau et l'embouchure est de 4,4 km.

b) Contexte hydrogéologique et risque d'intrusion saline

L'ouvrage AEP 12306X0046/BOUY atteint une profondeur de 80 m et traverse de 25 à 46 m de profondeur (de 1 m NGM à - 20 m NGM) une coulée basaltique fissurée dans laquelle se situent les venues d'eau. Il est équipé d'une crépine allant de 29,5 à 46,75 m de profondeur (- 3,5 m NGM à - 20,75 m NGM). La gamme de débit d'exploitation recommandée était de 12 à 20 m³/h (BRGM/RP-52481-FR). Depuis 2008, le débit de production est entre 7 et 13 m³/h (environ 2 000 m³ par semaine). La charge hydraulique au sein de l'ouvrage est plus élevée que la surface libre du cours d'eau de la ravine au droit du forage. Ce constat ainsi qu'une comparaison entre chroniques piézométriques et pluviométrique et une analyse chimique amènent (BRGM/RP-57110-FR) à caractériser cet aquifère comme captif à semi-captif avec une zone de recharge située très en amont.

La corrélation des données géologiques du forage avec le profil géophysique ayant amené au choix de son emplacement (méthode par panneaux électriques, campagne de géophysique de 2001 – 2002, BRGM/RP-51498-FR) montre que l'aquifère basaltique capté coïncide avec une gamme de résistivité de 12 à 30 ohm.m bien délimitée sur le profil. Celle-ci correspondrait à une coulée de lave d'orientation est-ouest, autrement dit perpendiculaire à la direction sud-nord de la vallée. L'extension latérale de cette coulée serait d'environ 70 m. Il s'agit d'un diagnostic similaire à celui du forage EDCH Bouyouni (12306X0024/BOUY,5.2.5b) à la différence qu'ici c'est la formation basaltique non altérée qui participent à la productivité de l'ouvrage et non une formation sous-jacente.

A l'échelle du secteur, délimité au Sud, à l'Ouest et à l'Est par les massifs du Nord-Ouest, du Digo et du Mtsapéré et par la côte au Nord, l'aquifère capté s'intègre à un ensemble multicouche semi-perméable qui se décline par la succession de phase de remplissage et d'arrêt de la dépression du Digo (voir interprétation des profils géophysiques du secteur, BRGM/RP-59550-FR). Bien qu'il n'existe pas d'autres informations hydrogéologiques directes, on peut estimer que l'hétérogénéité des formations qui ont participé au comblement de paléovallées se traduit par une variabilité des capacités aquifères (verticalement et latéralement).

A l'échelle du captage, il est notable que le pompage d'essai (70 heures) n'indique aucune limite étanche à proximité et que l'influence sur la piézométrie du captage 1230X0024/BOUY (situé dans la vallée voisine et distant de seulement 1,5 km) ne soit pas discernable (BRGM/RP-52481-FR).

En conséquence, les limites de l'aquifère ne sont pas connues (aucune limite atteinte). Tout au plus, il est possible de considérer que l'ensemble des eaux souterraines s'écoule vers la mer comme le décrit le schéma conceptuel de la Figure 6, schéma IV.

Le schéma s'apparente bien à l'interprétation géophysique de même orientation présenté dans le rapport BRGM/RP-59550-FR (Figure 69, profil médian Bouyouni-Méresse). Au niveau des embouchures de la Bouyouni et de la Méresse, des intrusions salines sont suspectées sur quelques centaines de mètre dans les terres.

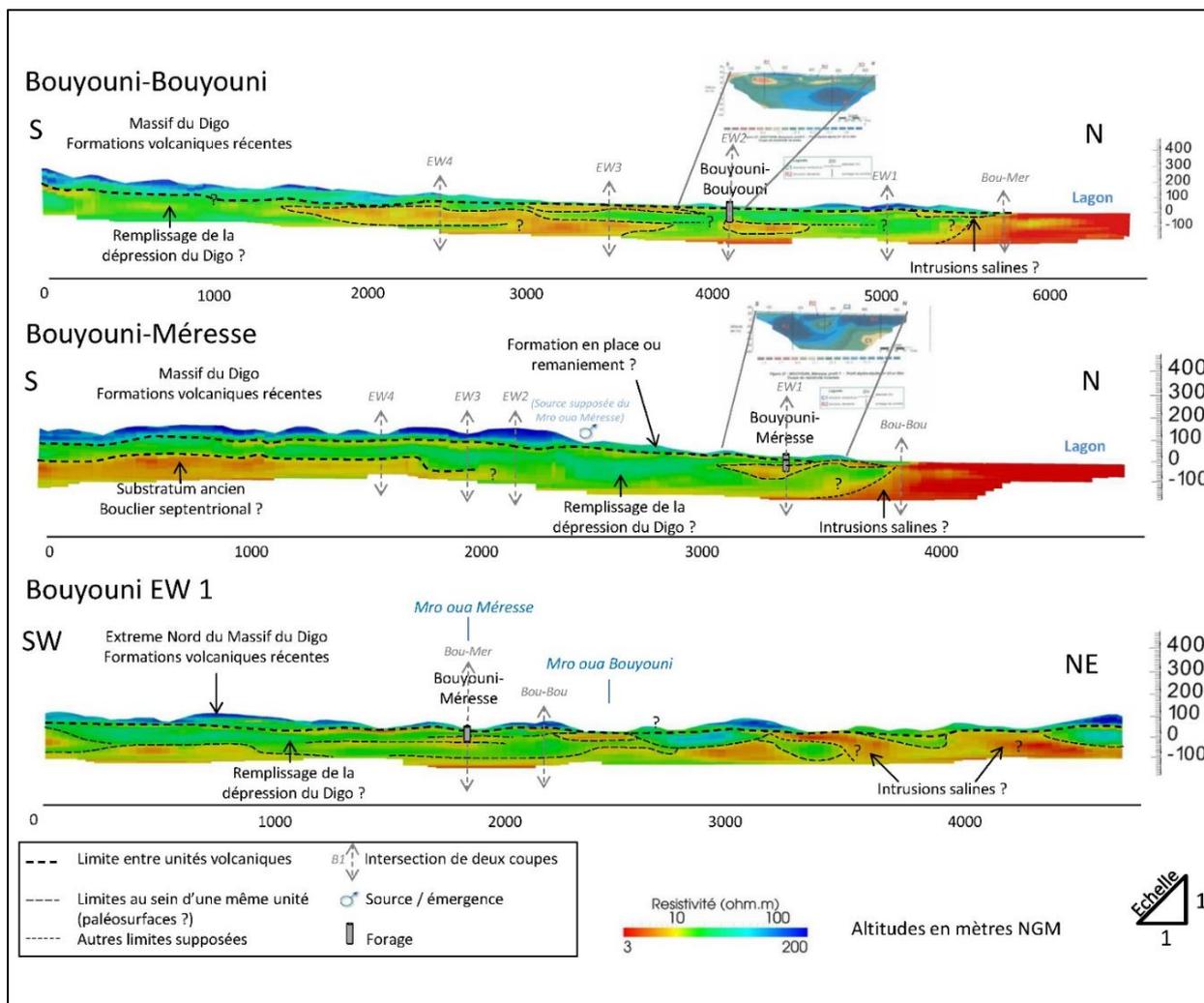


Figure 69 : Profils TDEM interprétés pour le secteur du Mro Oua Méresse et Mro Oua Bouyouni (source : BRGM/RP-59550-FR)

c) Interprétation des résultats géochimiques

Aucune diagraphie n'a été faite sur le forage de Méresse (12306X0046/BOUY), celui-ci étant en exploitation. Par contre, on dispose d'une chronique chimique depuis 2009 (et de quelques données antérieures).

Le forage de Méresse est l'un de ceux ayant une minéralisation faible, avec une conductivité proche de $240 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (section 4.1.2a). Cette valeur est mesurée avec une grande constance depuis 2009 (Figure 70). Le pH est légèrement supérieur à 7, et une baisse relative (0,2 à 0,3 unité) semble exister depuis 2016.

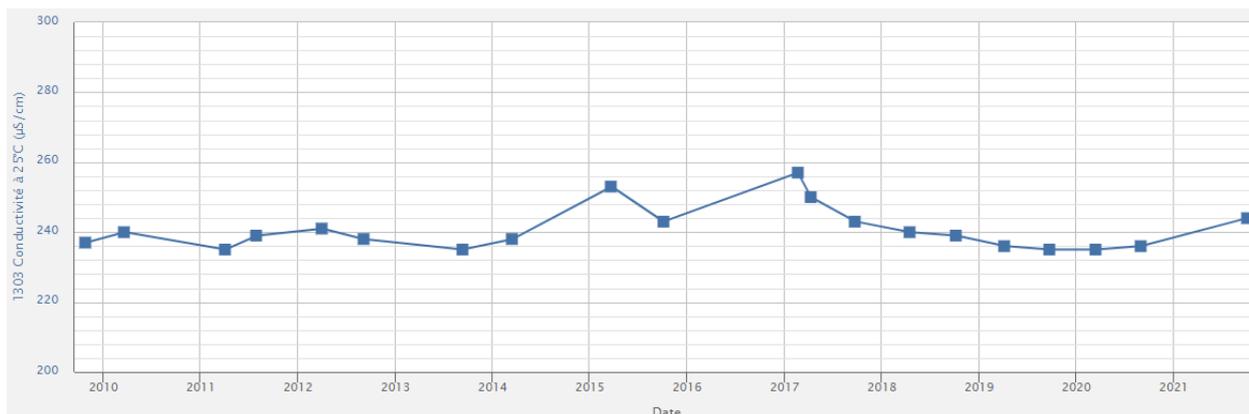


Figure 70 : Conductivité mesurée dans l'ouvrage 12306X0046/BOUY d'octobre 2009 à septembre 2020 (source : base de données ADES)

Le faciès de l'eau est bicarbonaté calcique magnésien (section 4.1.2b), et les teneurs en éléments majeurs évoluent dans des gammes d'amplitude réduites, avec parfois des cycles de légère hausse, suivis d'un retour à la valeur anté-cycle (par exemple pour Ca). Les concentrations mesurées fin 2021 sont des concentrations correspondant aux valeurs moyennes de long terme. Aucune déviation particulière n'est à noter pour Na ou Cl (section 4.1.2d).

En conséquence, il n'existe actuellement pas de preuve géochimique d'une intrusion saline drainée dans les conditions d'exploitation du forage.

d) Interprétation des résultats géophysiques

Le premier jet d'interprétation, réalisé à partir des données AEM seules, a permis de dégager quelques tendances à partir d'un pointé automatique de deux seuils de résistivité différents : 4 et 8 Ohm.m. La figure 71 présente un exemple de ce pointé en coupe, sur un profil EM. On voit que l'intrusion s'approfondit rapidement plus bas que la profondeur d'investigation de l'AEM. Certains points à 8 Ohm.m persistent à plus de 600 m de la côte, cependant ils sont à une altitude plus haute que ceux plus proches de la côte. Il semble peu probable qu'ils soient dus à de l'intrusion saline, qui ne fait théoriquement que s'approfondir en s'éloignant de la côte.

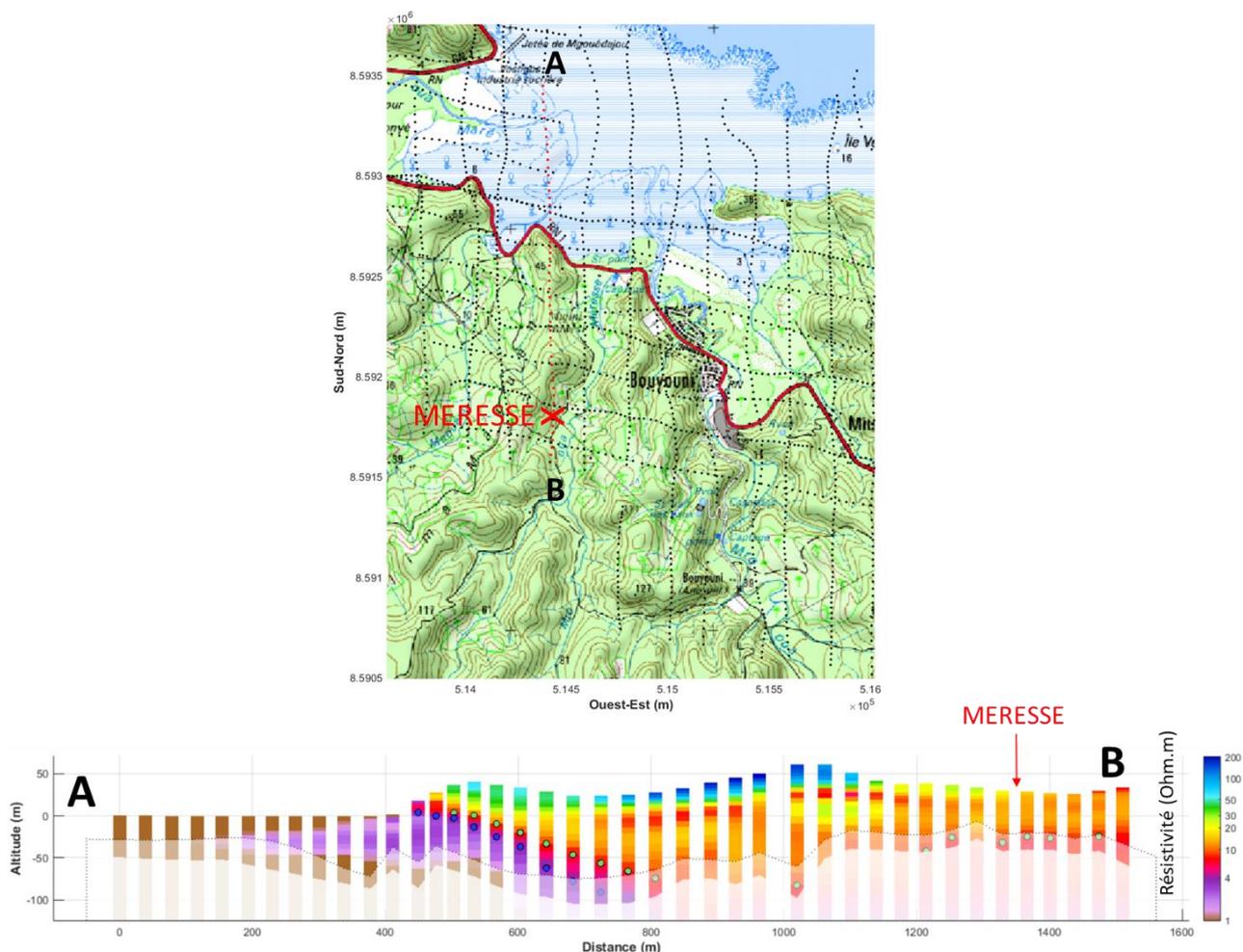


Figure 71 : Profil AEM (et sa localisation) sur lequel est représenté le pointé semi-automatique de l'intrusion saline « principale » grâce à un seuil à 4 Ohm.m (en bleu) et un seuil à 8 Ohm.m (en vert). Exagération verticale 1.2.

On peut aussi visualiser le résultat en cartographie d'altitude du toit de l'invasion, c'est-à-dire de l'altitude à partir de laquelle on rencontre l'invasion pour la première fois. Comme expliqué précédemment, nous avons travaillé avec deux seuils de résistivité différents : 4 et 8 Ohm.m, 4 étant plus proche de l'invasion à proprement parler et 8 comprenant une zone de mélange eau douce – eau salée et étant donc plus sécuritaire. La figure 72 présente cette cartographie. Les points noirs correspondent points de données AEM, recouverts par des points de couleur représentant l'altitude de l'intrusion. S'il n'y a pas de point de couleur c'est que le seuil de résistivité n'a pas été rencontrée sur les données AEM. Cela peut être expliqué par l'absence de l'intrusion saline, ou par une profondeur d'investigation de la géophysique insuffisante à cet endroit pour atteindre l'intrusion (investigation réduite à cause du ratio signal sur bruit insuffisant ou intrusion trop profonde pour la méthode).

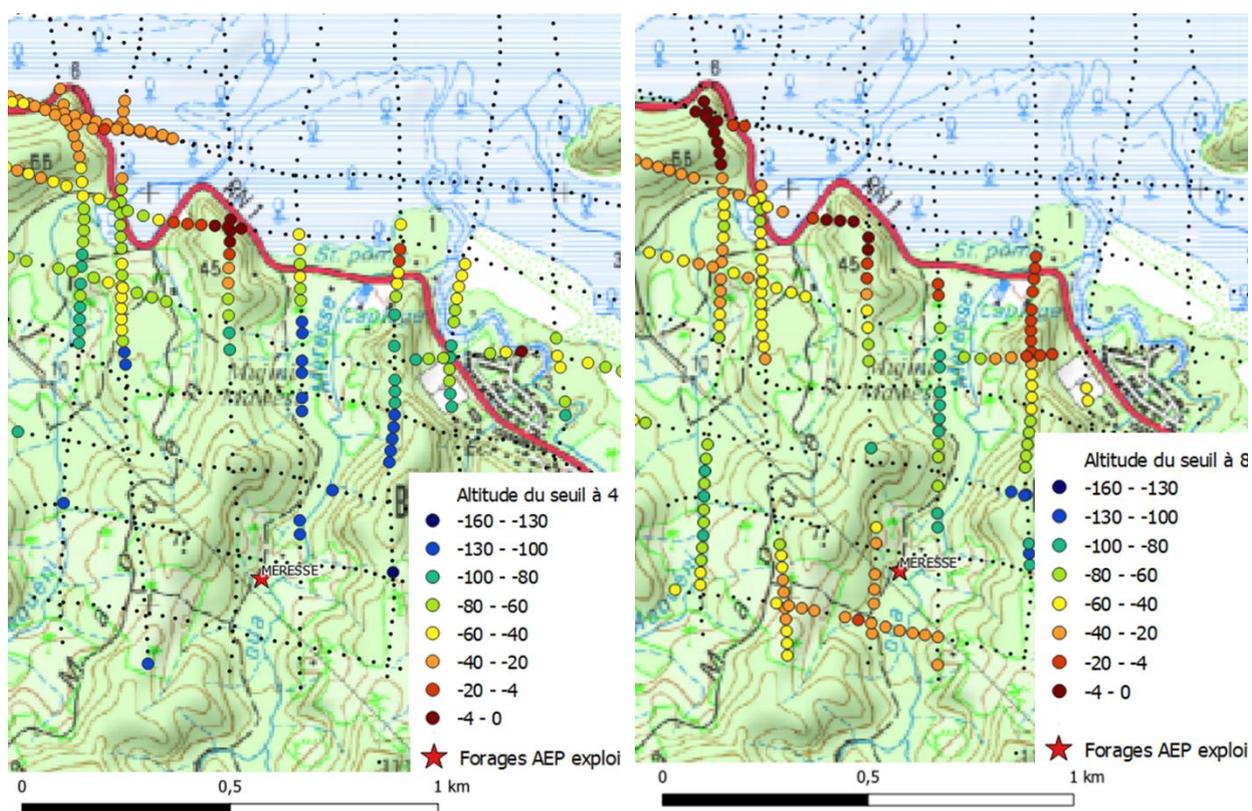


Figure 72 : Localisation en altitude de l'intrusion saline pointée automatiquement sur les données AEM dans le secteur de Méresse.

Ces cartes montrent une remontée du corps conducteur à 8 Ohm.m, à peu près après avoir passé au Sud de la ligne électrique orientée Nord-Ouest / Sud-Est. Ces points à l'Ouest et au Sud du forage Méresse sont donc peu probablement dus à une invasion salée, mais plutôt dus à une lithologie ou une altération.

- **Résultats TRE comparés au résultats AEM sur la zone de Méresse**

Les sites sensibles de Méresse sont le forage 12306X0046/BOUY déjà en exploitation (Figure 73) et le forage Fz6 envisagé dans le cadre de la 6^{ème} campagne de forage d'exploration, à venir (cf. Figure 73 et Planche 4).

Les investigations par TRE au sol ont été réalisées selon un profil submériidien (P5) dans la vallée de la Méresse au niveau du forage 12306X0046/BOUY. Pour des raisons de difficultés d'accès, le profil n'a pas pu être implanté au droit du forage et a été reporté rive droite de la Méresse. L'objectif est de préciser la possibilité d'une intrusion salée au niveau du forage 12306X0046/BOUY.

On considère que l'intrusion salée, globalement, pénètre le sous-sol, à terre, d'une part i) en s'approfondissant progressivement sous la charge de la nappe d'eau douce et d'autre part ii) plus superficiellement, le long de la vallée où la charge est a priori plus faible. Dans ce sens, le profil P5 est bien adapté pour imaginer une éventuelle invasion salée pénétrant depuis le rivage nord, préférentiellement le long de la vallée de la Méresse, vers le forage 12306X0046/BOUY. Toutefois des invasions salées progressant selon un schéma plus complexe et notamment le long d'aquifères alluviaux depuis la rivière Méresse vers le forage 12306X0046/BOUY ne seraient, à l'évidence, pas imagées par le profil P5.

On considère aussi a priori que la menace sur le site prévisionnel de forage Fz6 situé plus en amont et en altitude est a priori moindre que sur 12306X0046/BOUY et que les enseignements attendus au niveau de ce dernier serviront à traiter le cas de Fz6.

Les résultats de la TRE du profil P5 ainsi que des profils antérieurs de 2001 (BRGM/RP-51498-FR) et 2017 (BRGM/RP-67169-FR) sont présentés sur la planche 4 en regard d'une sélection de profils AEM significatifs et des logs lithologiques du forage.

Le long du profil P5, on observe au toit du conducteur C2 un isocontour 10 Ohm.m quasi-affleurant au nord et s'approfondissant significativement au-delà de la distance 240 m, en direction du sud, sous une unité résistante R1 englobant les formations aquifères exploitées par le forage 12306X0046/BOUY. Cet isocontour est suivi jusqu'à la distance 480 m et jusqu'à -60 m d'altitude. Il est interprété comme la marque possible d'une invasion salée qui menacerait le site du forage du fait de sa profondeur correspondant aux profondeurs des formations sollicitées par le forage.

Un deuxième isocontour à 10 Ohm.m se développe au toit du conducteur C3, à proximité du 0 altimétrique entre les abscisses 480 et 520 m. Il coïncide avec le toit de l'aquifère défini en forage et pourrait correspondre, du fait de son isolement dans l'environnement résistant R1, à une intrusion latérale favorisée par la rivière et les potentiels alluvions perméables associées. Ainsi il menacerait directement l'aquifère exploité.

Ces deux contours sont cohérents avec les observations faites sur la tomographie de 2001 (Planche 4). Si l'on s'en tient aux résistivités imagées en 2001 et 2021, on peut soupçonner une diminution de la résistivité de l'eau de formation et en conséquence une intrusion plus marquée. Toutefois, les différences de localisation et de dispositifs utilisés pour les deux profils pourraient aussi expliquer, en partie du moins, ces variations de résistivité.

Ces contours sont cohérents avec l'imagerie AEM à quelques mètres près entre les distances 0 et 200 m (cf. P26 et P28 AEM, Planche 4). En revanche, on ne retrouve pas de cohérence quand le conducteur C2 s'approfondit au-delà de 240 m de profondeur. Ces écarts entre les résultats des deux imageries peuvent avoir différentes causes liées à des effets 2D voire 3D plus ou moins bien résolus par les inversions appliquées ou des artefacts d'inversion.

Un troisième isocontour à 10 Ohm.m est relevé, au toit du conducteur C1, en profondeur (-150 à -200 m d'altitude) entre les distances 100 et 240 m sur P5 (Planche 4). Il peut imager le toit d'une deuxième invasion plus profonde à la faveur d'une formation perméable considérant que l'unité R1 intercalée serait imperméable. Ce conducteur apparaît beaucoup plus profond en TRE qu'en AEM (-70 m d'altitude). Pour ce cas, on donnera la préférence à la détermination par TRE considérant que l'image de ce conducteur en AEM est à la limite de la profondeur d'investigation AEM à cet endroit.

Au-delà de la distance 700 m, les investigations sont plus éparées. On note toutefois les conducteurs C4 qui sont observés en limite d'investigation sur les profils TRE P5, P6-2017 et P2001 avec une certaine cohérence entre 20 et 70 m de profondeur. Leur attribution à de potentielles invasions salées est moins assurée que les précédentes étant donné le manque de continuité de ces observations et le défaut de continuité avec les observations aval.

Au niveau de la proposition de forage Fz6, les conducteurs C5 sont relevés du fait de leur résistivité inférieure à 10 Ohm.m. Toutefois, l'allure complexe de la signature géophysique observée pourrait être la marque d'effets 3D mal résolus, associés au conducteur qui se développe entre 0 et 50 m d'altitude en deçà de la distance 300 m (P6-2017, Planche 4). Sauf

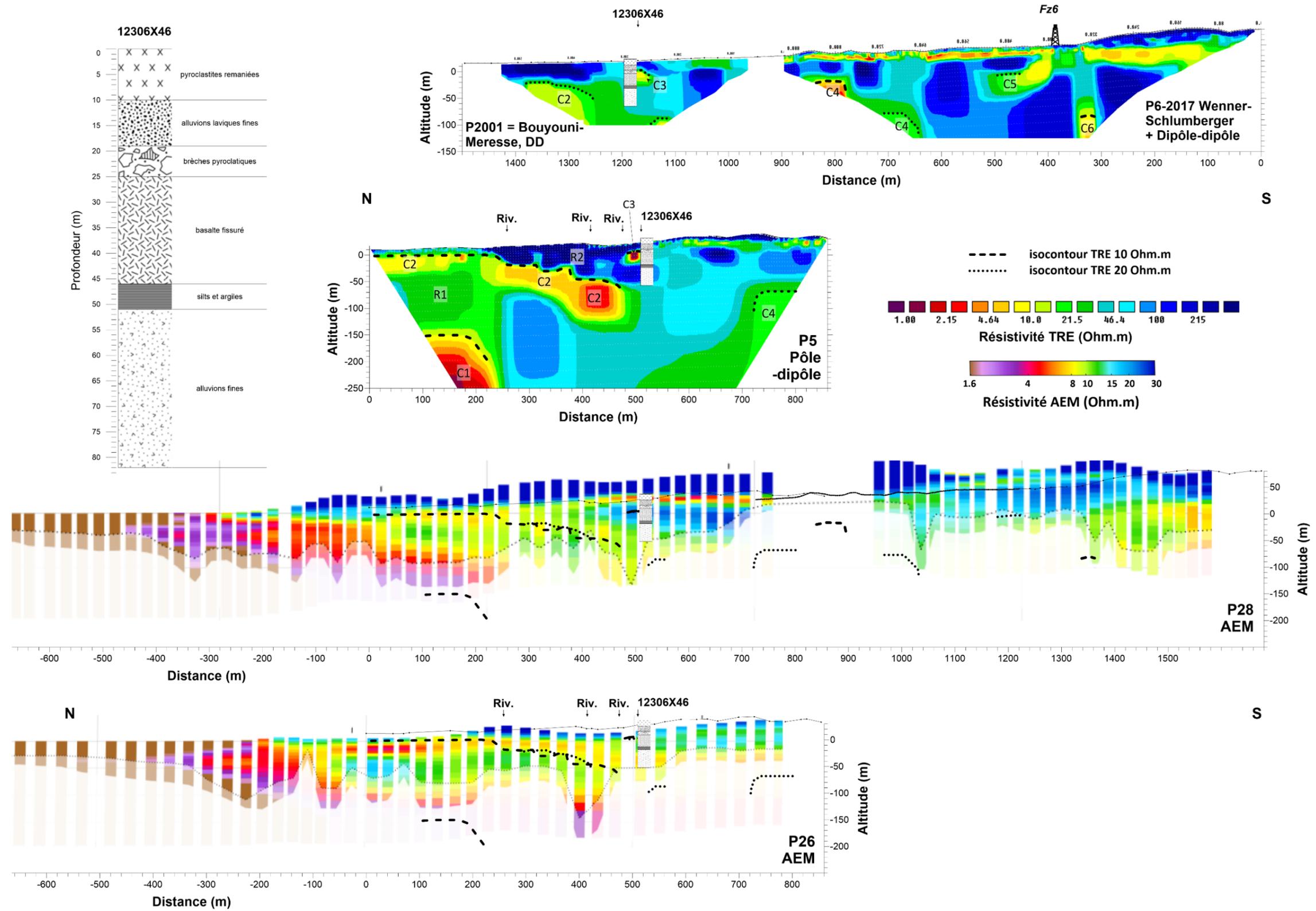


Planche 4 : Zone de Méresse - Intrusions salines interprétées à partir de l'imagerie TRE (P2001, P6-2017 et P5, en haut) et comparées à l'imagerie AEM (en bas). Les isocontours 10 et 20 Ohm.m définis par TRE sont superposés à l'imagerie AEM pour comparaison.

Les potentielles intrusions salées C2 et C3 sont situées à une distance inférieure à 50 m de l'aquifère exploité dans 12306X0046/BOUY. Toutefois l'interprétation des conducteurs dans le contexte de Mayotte n'est pas univoque. On peut envisager que des séries volcaniques très altérées soient la cause de ces conducteurs, sans nécessairement faire appel à une intrusion d'eau salée. Pour assurer que ces conducteurs correspondent effectivement à des intrusions salées, des investigations complémentaires sont nécessaires.

Un suivi temporel par tomographie électrique de ces conducteurs peut être envisagé. Une diminution des résistivités en profondeur est attendue en réponse à la diminution de charge de l'aquifère, consécutive à un pompage par exemple. Si des pompages d'essai sont prévus pour tester la possibilité d'augmenter la productivité de ce forage, un suivi géoélectrique de la distribution de résistivité en profondeur pourrait être mis en place et serait à même de confirmer le caractère d'intrusion salée de ces conducteurs.

e) *Conclusion et recommandations*

L'ouvrage AEP 12306X0046/BOUY capte l'aquifère d'une paléovallée dont le comblement est composé de formations hétérogènes de dimensions variables. Les caractéristiques hydrogéologiques attendues de ce système aquifère sont donc variables latéralement comme verticalement.

Aucune investigation géochimique récente n'a été faite sur l'ouvrage. L'interprétation des données disponibles en hydrochimie conclut qu'il n'existe pas d'indices d'intrusion saline actuellement dans les conditions d'exploitation du forage.

En revanche, l'ensemble des profils géophysiques qui quadrillent le secteur montre la présence d'un niveau conducteur qui se suit depuis la cote au nord vers l'intérieur en s'approfondissant. Il y a donc une forte probabilité que le toit de ce conducteur caractérise la limite supérieure d'une intrusion saline provenant du milieu marin. Cette intrusion saline est identifiée à proximité du captage.

Afin de suivre l'évolution de la progression de l'intrusion saline, il serait recommandé d'utiliser plusieurs méthodes de surveillance :

- Méthodes géophysiques

Il serait judicieux d'implanter un ouvrage de surveillance, un qualitomètre en aval hydraulique du forage d'exploitation, le long de la vallée de la Méresse et suivant le profil géophysique P5. Cet ouvrage permettra d'effectuer des suivis de certains paramètres géochimiques caractéristiques d'une intrusion saline. Un protocole en différentes étapes et selon l'aggravation des signes d'intrusion saline peut être proposé comme suit :

1/ Assurer un suivi régulier de la conductivité électrique de l'eau :

- au droit du forage, en continu si l'ouvrage est télégréé ou a minima une fois par mois par lecture de la mesure et de vérifier la dérive de la sonde par des prélèvements mensuels, actuellement réalisés tous les mois par l'exploitant dans le cadre de l'auto-surveillance ;
- sur le piézomètre, deux fois par an de ce même paramètre sur toute la colonne d'eau via une sonde manuelle.

2/ Déterminer un seuil de variabilité naturelle de la conductivité au-delà duquel il serait nécessaire de :

3/ Effectuer un diagnostic sur site du chlore et des sulfates à l'aide de kits photométriques ; cela permettra une quantification des premiers paramètres indiquant une intrusion saline.

4/ Faire des prélèvements d'eau brute en suivant les protocoles des laboratoires (échantillonnage, conservation, transport, etc.) pour confirmer la présence d'intrusion saline dans le cas où, après plusieurs quantifications par des kits photométriques, les concentrations en chlore et sulfates s'avéraient en hausse comparées aux données historiques.

- Méthodes géophysiques

Dans le cas où les futures mesures géochimiques montraient une aggravation progressive de la situation, une nouvelle campagne géophysique serait réalisée pour caractériser l'évolution du toit de l'intrusion saline. En cas d'aggravation avérée, des actions de protection devront être mises en œuvre.

Le site de forage FZ6 situé à plus de 500 mètres en amont serait a priori moins sensible à une intrusion saline. Néanmoins, il devra faire l'objet dès sa réalisation d'un suivi géochimique.

5.2.5. Zone de Bouyouni

a) Contexte géographique

Le bassin versant du Mro Oua Bouyouni s'étend du massif de M'tsapéré jusqu'au village de Bouyouni au nord en passant par le sommet du Mlima Digo (Figure 74). Le cours d'eau se jette dans le lagon après avoir traversé une mince étendue de mangrove qui se développe en aval du village. Le bassin versant est jointif à celui du Oua Mro Méresse situé à l'ouest.

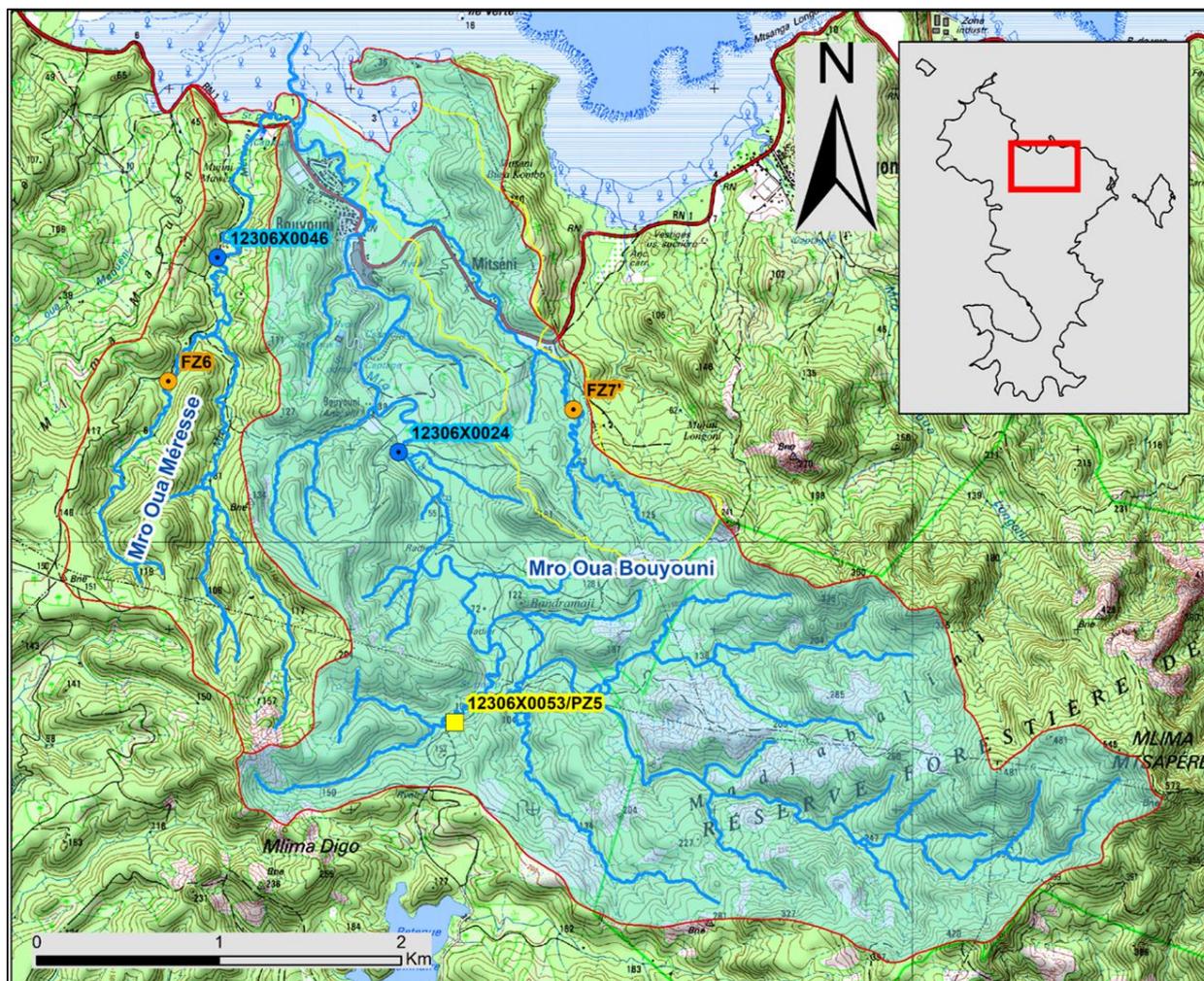


Figure 74 : Bassin versant du Mro Oua Bouyouni avec les localisations de l'ouvrage AEP « Bouyouni » (12306X0024/BOUY), du piézomètre « Digo » (12306X0053/PZ5) et du futur site FZ7'

De forme allongée, le bassin versant (couleur bleu pâle sur la carte) a une surface de 9,7 km², un périmètre 19,5 km pour une longueur de 6 km et une largeur de 2 km. La distance entre l'extrême amont du cours d'eau et l'embouchure est de 10 km.

b) Contexte hydrogéologique et risque d'intrusion saline

Le bassin versant de la Bouyouni abrite deux ouvrages qui captent l'eau du cours d'eau et un ouvrage qui capte un aquifère (12306X0024/BOUY). A ces ouvrages s'ajoute le piézomètre Digo (12306X0053/PZ5) situé dans la partie sud-ouest du bassin versant. Celui-ci ne remplit qu'une fonction de mesure quantitative (réseau DCE) pour une faible portion amont du bassin versant (environ 0,7 km²).

Dans le contexte d'une évaluation de possibles intrusions salines dans les eaux souterraines, seul le forage EDCH 12306X0024/BOUY sera pris en considération ici.

L'ouvrage recoupe entre 0 et 6 m de profondeur (entre 48 m NGM et 42 m NGM) des colluvions/alluvions, entre 6 et 60 m (entre 42 m NGM et - 12 m NGM) des coulées de laves saines à très altérées imperméables, entre 60 et 75 m (entre - 12 m NGM et - 27 m NGM) une coulée de lave mésocrate saine et de 75 à 124 m (entre - 27 m NGM et - 76 m NGM) des horizons de tufs pyroclastiques indurés.

Les venues d'eau rencontrées se situent principalement au sein du niveau scoriacé à la base de la coulée saine à 75 m de profondeur (- 27 m NGM) et au sein des pyroclastites remaniées à 99, 102 et 109 m de profondeur (soit - 51 m NGM ; - 54 m NGM et - 61 m NGM). Le niveau piézométrique, à la réception des travaux en septembre 2002 (BRGM/RP-51969-FR), se situait vers 29,5 m de profondeur, soit à une altitude de 18,5 m NGM. Aucune relation hydraulique n'est décelable entre la nappe et le Mro Oua Bouyouni dont la surface libre au droit du forage est à l'altitude de 40 - 45 m NGM, soit plus de 20 m supérieure à celle de la nappe. L'aquifère capté par le forage de Bouyouni est semi-captif à captif, la couverture de l'aquifère étant assurée par les 60 m de profils d'altération de faible perméabilité.

Le débit d'exploitation recommandé (BRGM/RP-51969-FR) était de 21 à 35 m³/h. En 2017, un dégoulottage de l'ouvrage a été estimé possible afin de passer à 41 m³/h. A ce jour, le forage de Bouyouni-Bouyouni est exploité à un débit de 36 m³/h à raison de 22h/24.

La confrontation des données géologiques du forage avec le profil géophysique ayant amené au choix de son emplacement (méthode par panneaux électriques, campagne de géophysique de 2001 – 2002, BRGM/RP 51498-FR) ; elle permet d'établir les corrélations suivantes :

1. Les formations conductrices (résistivités de l'ordre de 10 Ohm.m), mise en évidence par la géophysique jusqu'à une trentaine de mètres de profondeur coïncident relativement bien avec les terrains les plus altérés (allotérites) ;
2. Les formations résistantes (plus de 80 Ohm.m) correspondent sans ambiguïté aux laves saines recoupées entre 60 et 75 m de profondeur (entre - 12 m NGM et - 27 m NGM) ;
3. La transition allotérites – laves saines montre un bon parallélisme avec l'augmentation progressive de résistivité observée au sein de la partie supérieure du profil géophysique ;
4. La transition laves saines – tufs pyroclastiques indurés sous-jacents ne se marque pas par un contraste significatif de résistivité. Tout au plus note-t-on une diminution progressive de la résistivité à partir de 75 - 80 m de profondeur (soit - 27 m NGM et - 32 m NGM) qui pourrait être liée à cette transition (40 Ohm.m vers 130 m de profondeur ; - 92 m NGM).

Selon le rapport BRGM/RP-51969-FR, les laves saines présenteraient une extension limitée de part et d'autre du forage le long du profil géophysique. La coulée de lave saine recoupée par le forage aurait donc une orientation transverse par rapport au profil. Il s'agit d'un diagnostic similaire à celui de l'ouvrage AEP Méresse (12306X0046/BOUY, 5.2.5b) à la différence qu'ici c'est la formation sous-jacente, c'est-à-dire les tufs pyroclastiques indurés qui participent majoritairement (75 %) à la productivité de l'ouvrage.

A l'échelle du secteur, délimité au Sud, à l'Ouest et à l'Est par les massifs du Nord-Ouest, du Digo et du Mtsapéré et par la côte au Nord, l'aquifère capté s'intègre à un ensemble multicouche semi-perméable qui se décline par la succession de phase de remplissage et d'arrêt de la dépression du Digo (voir interprétation des profils géophysiques du secteur, rapport BRGM/RP-59550-FR). Bien qu'il n'existe pas d'autres informations hydrogéologiques directes hormis celle du piézomètre Digo (12306X0024/PZ5) situé bien en amont du captage, on peut estimer que l'hétérogénéité des formations qui ont participé au comblement de paléovallées se traduit par une variabilité des capacités aquifères (verticalement et latéralement).

A l'échelle du captage, trois hypothèses ont été émises à l'issue des pompages d'essais sans qu'une limite étanche n'ait pu être décelée au bout de 72,5 heures de pompage de longue durée.

En conséquence, il n'est pas possible de connaître les limites de l'aquifère. Il est possible de considérer que l'ensemble des eaux souterraines s'écoule vers la côte comme le décrit le schéma conceptuel de la Figure 6 ; schéma IV tiré du rapport BRGM/RP-59550-FR.

Le schéma s'apparente bien à l'interprétation géophysique de même orientation présenté dans le rapport BRGM/RP-59550-FR (Figure 12, profil haut Bouyouni-Bouyouni).

Il n'existe pas de chronique de conductivité disponible pour l'ouvrage. Concernant sa zone d'alimentation, l'étude des corrélations entre sa chronique piézométrique et la chronique des précipitations mesurés à la station de Bandraziana nord ainsi que d'autres aspects hydrogéologiques propres à l'ouvrage (BRGM/RP-57108-FR et BRGM/RP-56438-FR) aboutissent aux conclusions suivantes :

- L'aquifère est relativement bien développé en termes de fonctionnement comme en témoigne l'allure lissée de la courbe piézométrique caractéristique d'un aquifère captif tamponné ;
- L'alimentation de l'aquifère est opérée bien en amont de la zone de captage.

c) Interprétation des résultats géochimiques

Aucune diagraphie n'a été faite sur le forage de Bouyouni-Bouyouni (12306X0024/BOUY), celui-ci étant en exploitation. On ne dispose pas d'une chronique chimique pour cet ouvrage (uniquement quelques données de 2002).

Cet ouvrage a une conductivité électrique un peu supérieure à celle de l'ouvrage de Méresse (section 4.1.2a). Le pH est également légèrement supérieur (7,6). On constatera une faible variabilité de ces paramètres par rapport à la mesure de 2014.

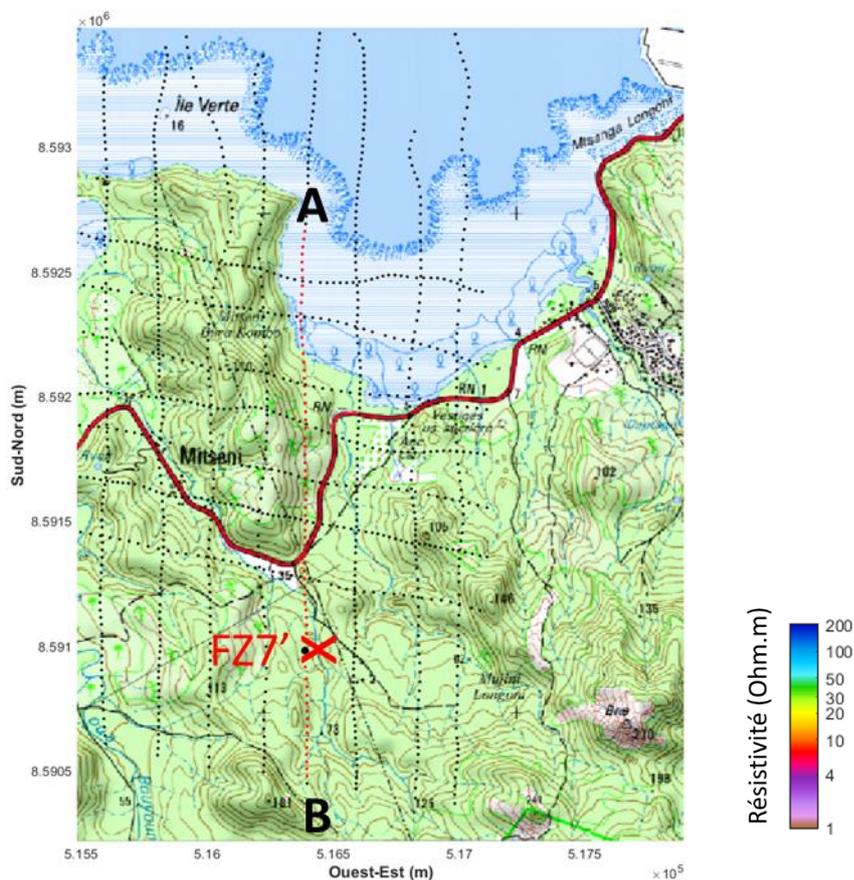
Le faciès de l'eau est bicarbonaté sans cation dominant (section 4.1.2b). Les teneurs en éléments majeurs rapportées en 2004 étant très variables (Na : de 18 à 51 mg.L⁻¹ ; Cl : de 10 à 22 mg.L⁻¹), on peut juste signaler que les concentrations mesurées fin 2021 correspondent à la moyenne sur les données de 2004. On notera également que les rapports d'abondance entre Na et Cl ne sont pas modifiés, même si les concentrations en chaque élément sont variables (section 4.1.2d).

Le jeu de données étant très parcellaire pour cet ouvrage, il est difficile d'être conclusif. On signalera donc que, **dans les conditions actuelles d'exploitation du forage, on ne trouve pas d'indice direct de la présence d'une eau salinisée, mais que cette situation peut évoluer**, et qu'un suivi plus régulier devrait être opéré pour s'assurer qu'il n'existe pas de tendance haussière sur certains paramètres (conductivité, teneurs en Cl, SO₄ et Na). Cela pourrait aussi permettre de comprendre pourquoi des mesures très variables ont été trouvées en 2004.

d) *Interprétation des résultats géophysiques*

• **Résultats de l'AEM**

L'intrusion salée a été clairement identifiée sur les profils AEM par la méthode présentée au paragraphe 3.4. La figure 75 présente un exemple de ce pointé en coupe, sur un profil EM. On voit que l'intrusion s'approfondit rapidement plus bas que la profondeur d'investigation de l'AEM. Le seuil à 8 Ohm.m remonte en s'éloignant de la côte, il faut donc se reposer plus sur le seuil à 4 Ohm.m.



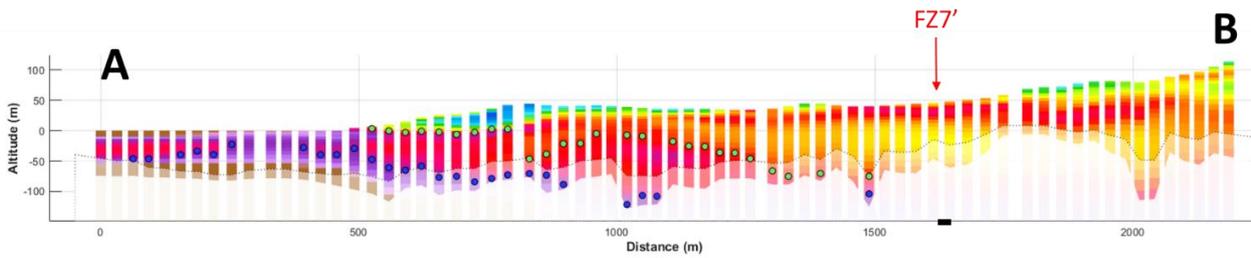


Figure 75 : Profil AEM (et sa localisation) sur lequel est représenté le pointé semi-automatique de l'intrusion saline grâce à un seuil à 4 Ohm.m (en bleu) et un seuil à 8 Ohm.m (en vert). Exagération verticale 1.2. Profondeur du futur forage indiquée par un trait noir.

On peut aussi visualiser le résultat en cartographie d'altitude du toit de l'invasion, c'est-à-dire de l'altitude à partir de laquelle on rencontre l'invasion pour la première fois. Comme expliqué précédemment, nous avons travaillé avec deux seuils de résistivité différents : 4 et 8 Ohm.m, 4 étant plus proche de l'invasion à proprement parler et 8 comprenant une zone de mélange eau douce – eau salée et étant donc plus sécuritaire. La figure 76 présente cette cartographie. Les points noirs correspondent points de données AEM, recouverts par des points de couleur représentant l'altitude de l'intrusion. S'il n'y a pas de point de couleur c'est que le seuil de résistivité n'a pas été rencontrée sur les données AEM. Cela peut être expliqué par l'absence de l'intrusion saline, ou par une profondeur d'investigation de la géophysique insuffisante à cet endroit pour atteindre l'intrusion (investigation réduite à cause du ratio signal sur bruit insuffisant ou intrusion trop profonde pour la méthode).

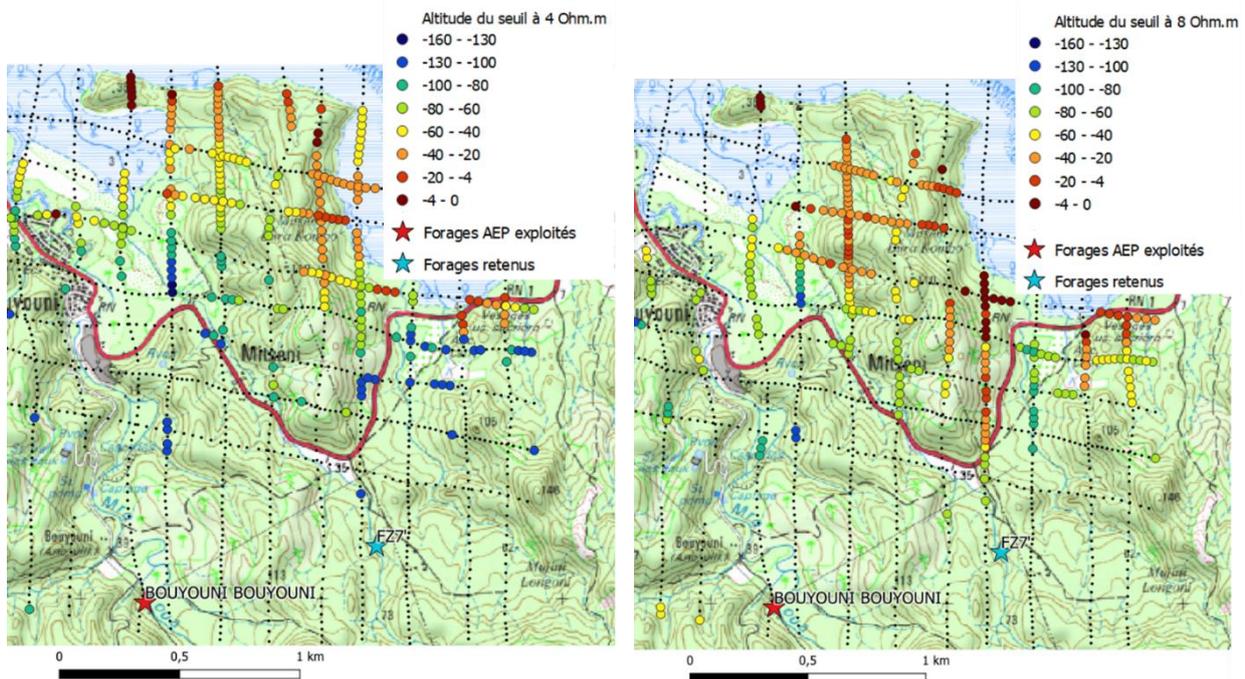


Figure 76 : Localisation en altitude de l'intrusion saline pointée automatiquement sur les données AEM dans le secteur de Bouyouni.

- **Résultats TRE comparés au résultats AEM sur la zone de Bouyouni**

Les investigations par TRE au sol ont été réalisées selon un profil submérien (P4) dans la vallée de la Bouyouni, rive droite, au niveau et en face du forage 12306X0024/BOUY et d'une ancienne tomographie réalisée en 2001 (BRGM/RP-51498-FR) qui sont rive gauche (Figure 73).

Deux isocontours à 10 Ohm.m sont relevés au toit des conducteurs C1 et C2, sur le profil P4 pour les distances 250 et 350 m (Planche 5). Ils sont séparés par un compartiment résistant (20-45 Ohm.m). Ces isocontours ne trouvent pas de correspondance sur le profil AEM P36 et la correspondance possible avec le profil AEM P33 est incertaine car ce dernier est en limite de profondeur d'investigation (Planche 5). Reportés sur le profil dipôle-dipôle de 2001, ces isocontours correspondent à une unité résistante centrée sur la coulée basaltique observée en forage (Planche 5).

La faible cohérence entre l'imagerie des différents profils quelques soient les méthodes géophysiques considérées, indique une structure du sous-sol complexe que les investigations géophysiques disponibles peinent à résoudre.

Les conducteurs C1 et C2 ont leur toit près de 0 m d'altitude alors que le rivage est à plus de 1500 m au nord et que l'intrusion définie par AEM s'arrête 700 m au nord (à -50 m d'altitude). Dans ces conditions les conducteurs C1 et C2 ne sont pas retenus comme des intrusions plausibles.

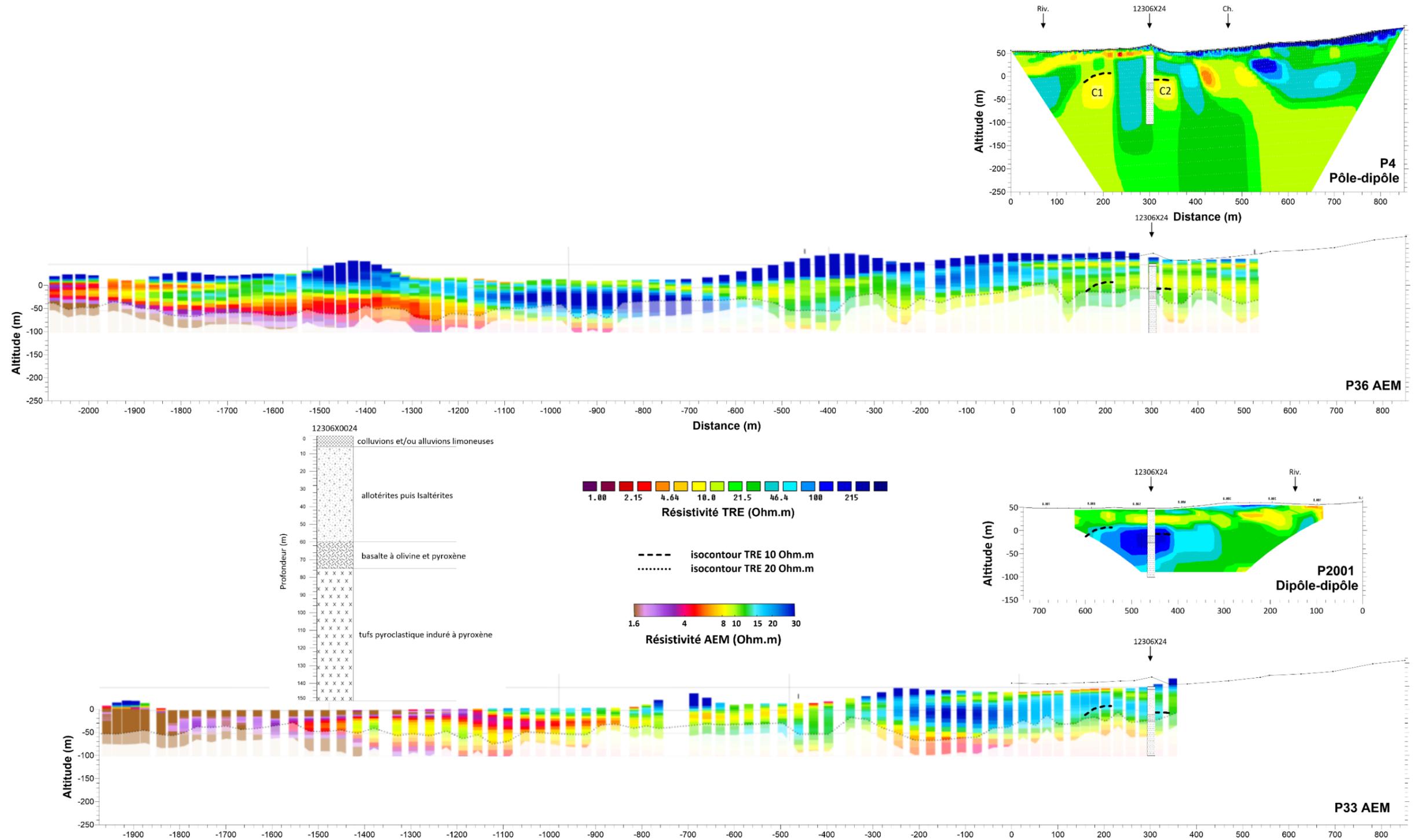


Planche 5 : Site de Bouyouni - Intrusions salines interprétées à partir de l'imagerie TRE (P4, en haut) et comparées à l'imagerie AEM et au profil TRE de 2001 (en bas). Les isocontours 10 et 20 Ohm.m définis par TRE sont superposés à l'imagerie AEM pour comparaison.

e) *Conclusion et recommandations*

L'ouvrage AEP 12306X0024/BOUY capte l'aquifère d'une paléovallée dont le comblement est composé de formations hétérogènes de dimensions variables. Les caractéristiques hydrogéologiques attendues de ce système aquifère sont donc variables latéralement comme verticalement.

Aucune investigation géochimique récente n'a été faite sur l'ouvrage. L'interprétation des données disponibles conclut qu'il n'existe pas de preuve d'intrusion saline, à l'heure actuelle et dans les conditions d'exploitation du forage.

Les investigations géophysiques et leurs interprétations indiquent la présence probable d'une intrusion saline provenant de la côte au nord, mais qui ne semble pas approcher le captage. Il en va de même pour le site FZ7 pour un futur forage situé dans la vallée voisine.

Au vu de la complexité du sous-sol, les méthodes de surveillance géophysiques ne semblent pas judicieuses. Une surveillance par un protocole reposant exclusivement sur l'acquisition de données géochimiques est proposée selon plusieurs étapes :

1/ Assurer un suivi régulier de la conductivité électrique de l'eau au droit du forage, en continu si l'ouvrage est télégéré ou a minima une fois par mois par lecture de la mesure et de vérifier la dérive de la sonde par des prélèvements mensuels, actuellement réalisés tous les mois par l'exploitant dans le cadre de l'auto-surveillance.

2/ Déterminer un seuil de variabilité naturelle de la conductivité au-delà duquel il serait nécessaire de :

3/ Effectuer un diagnostic sur site du chlore et des sulfates à l'aide de kits photométriques ; cela permettra une quantification des premiers paramètres indiquant une intrusion saline.

4/ Faire des prélèvements d'eau brute en suivant les protocoles des laboratoires (échantillonnage, conservation, transport, etc.) pour confirmer la présence d'intrusion saline dans le cas où, après plusieurs quantifications par des kits photométriques, les concentrations en chlore et sulfates s'avéraient en hausse comparées aux données historiques.

Il est à noter que, dans ce secteur, aucun piézomètre n'est situé en aval du forage pouvant servir à faire des profils de conductivité électrique permettant d'observer la remontée potentielle du toit du biseau salé.

5.2.6. Zone de Kawéni

a) Contexte géographique

Le secteur d'étude se situe en Grande Terre dans le nord-est de l'île de Mayotte. Le bassin se développe en amont du village de Kawéni dans la commune de Mamoudzou. La figure 77 situe la zone et présente quelques caractéristiques générales.

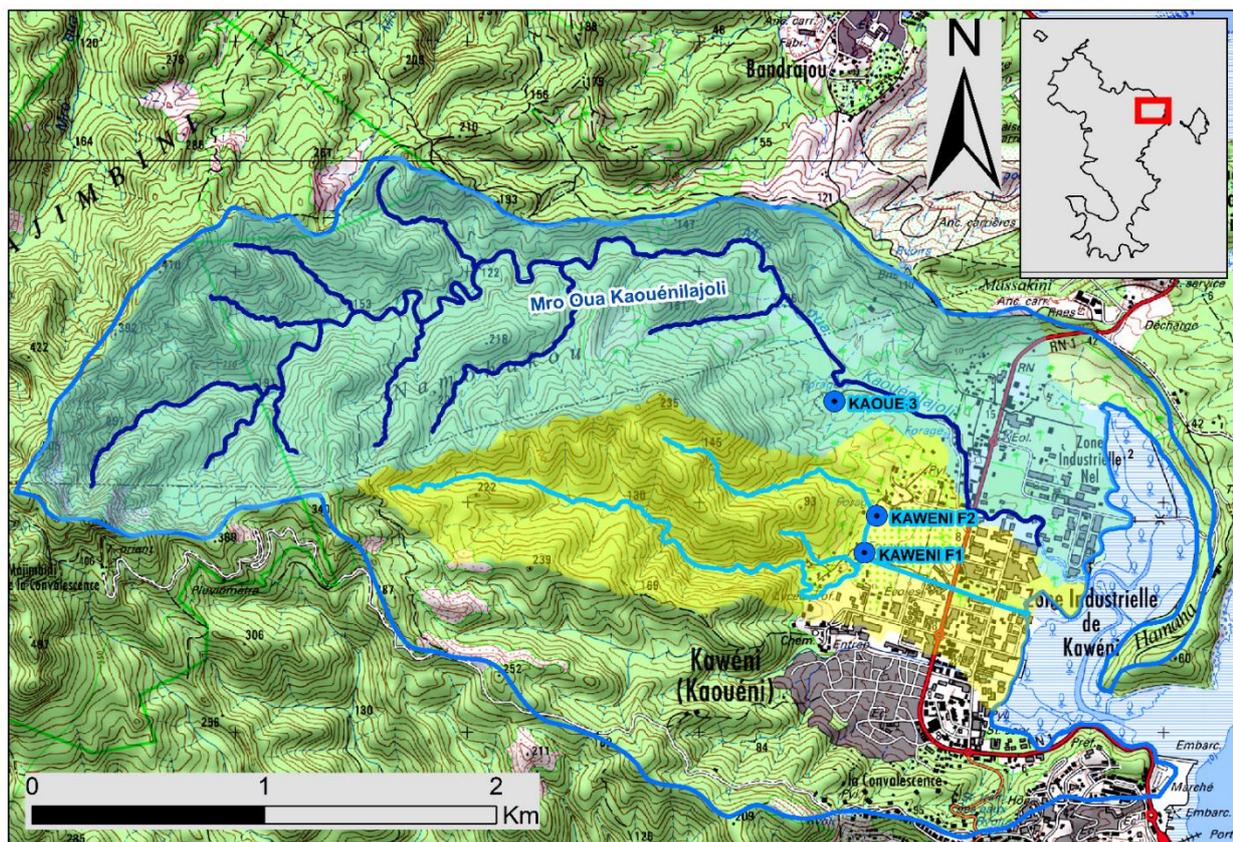


Figure 77 : Localisation du bassin versant topographique de Kawéni et des trois captages AEP

Le bassin versant de la dépression de Kawéni s'étend d'un relief situé à l'est du sommet du Mlima M'tsapéré (513 m NGM) jusqu'à la mangrove de Kawéni où il rejoint le lagon. Il se situe à cheval sur les communes de Mamoudzou au sud et de Kounkou au nord. La surface du bassin versant qui englobe tous les cours d'eau débouchant dans la baie est de 8,8 km²; son périmètre est de 18,4 km pour une longueur de 4,7 km et une largeur maximale de 2,5 km. Environ 93 % de la surface du bassin versant est comprise entre 0 et 300 m d'altitude. La surface du bassin versant du Mro Oua Kaouénilajoli est de couleur bleu pâle sur la carte et la surface du bassin versant qui regroupe deux ravines au sud du Mro Oua Kaouénilajoli est de couleur jaune pâle.

b) Contexte hydrogéologique et risque d'intrusion saline

Comme indiqué sur la carte de la figure 77, trois ouvrages captent les eaux souterraines dans la zone de Kawéni à des fins d'alimentation en eau potable des populations. Ils sont localisés dans la dépression de Kawéni pour deux d'entre eux (Kawéni F1 12307X0013/F1 et Kawéni F2, 12307X0014/F2), le troisième étant situé à l'embouchure de la ravine de Kaouénilajoli (Kawéni

Lajolie, 12307X0021/KAOUÉ3). Les principales informations et caractéristiques concernant ces ouvrages sont présentées dans le tableau 11.

Code BSS	Désignation	Référence rapport	Campagne d'exploration et de forage	Profondeur (m) Altitude (mNGM)	Exploitation AEP	Formation Aquifère	Perméabilité moyenne (m/s) ou transmissivité (m ² /s)
12307X0013	Kawéni F1	91 REU 14	1990/91	39 m - 26 mNGM	15m ³ /h A partir de 1991	Aquifère captif : basalte altéré (de 18 à 25 m. de prof.) et sables gris/noir (de 25 à 39 m. de prof.)	Transmissivité évaluée à 2,6 10 ⁻³ m ² /s
12307X0014	Kawéni F2	91 REU 14	1990/91	40 m - 25 mNGM	12m ³ /h A partir de 1991	Aquifère captif : sables limoneux (de 26 à 37 m. de prof) et basalte altéré de 37 à 40 m. de prof.)	Transmissivité évaluée à 2,1 10 ⁻³ m ² /s
12307X0021	Kaoué3 10" ou Kawéni 3 ou forage Kawéni Lajolie	RP-50428-FR	1999/2000	61 - 40 mNGM	30m ³ /h A partir de 2004	Pyroclatistes (scories et lapillis)	Transmissivité évaluée à 1,4 10 ⁻³ m ² /s

Tableau 11 : Principales informations concernant les trois captages AEP de Kawéni

A la différence des autres zones d'étude du rapport, il existe plusieurs dizaines d'ouvrage autour de la baie qui ont servi à la réalisation de cartes piézométrique et de conductivité (BRGM/RP-53161-FR et BRGM/RP-54082-FR). La figure 81 (carte du bas) en montre une partie.

Selon le rapport BRGM/RP-57620-FR, les bassins versants amont associés aux zones d'appel des captages en exploitation constituent les bassins d'alimentation respectifs des captages.

Les deux premiers ouvrages AEP réalisés, Kawéni F1 et F2 se situent au débouché de deux ravines occupées par de petits cours d'eau intermittents, en bordure ouest de la dépression de Kawéni.

Selon le rapport BRGM/RP-56773-FR, les analyses des cuttings et les coupes géologiques permettent de retenir les éléments suivants :

- Kawéni F1 : recouvrement important de limons argileux (18 m) surmontant un niveau de basaltes altérés (7 m) puis présence de formations alluvionnaires de sables gris noir (17 m) ;
- Kawéni F2 : les limons argileux (26 m) surmontent des alluvions sableuses, limoneuses (11 m), basaltes altérés en profondeur ;

Comme indiqués dans le tableau 11, ce sont les formations sous les limons argileux qui sont aquifères. Dans les deux cas, il s'agit d'aquifère captif.

Le rapport BRGM/RP-56773-FR propose sur la base des données lithologiques la coupe de la figure 78.

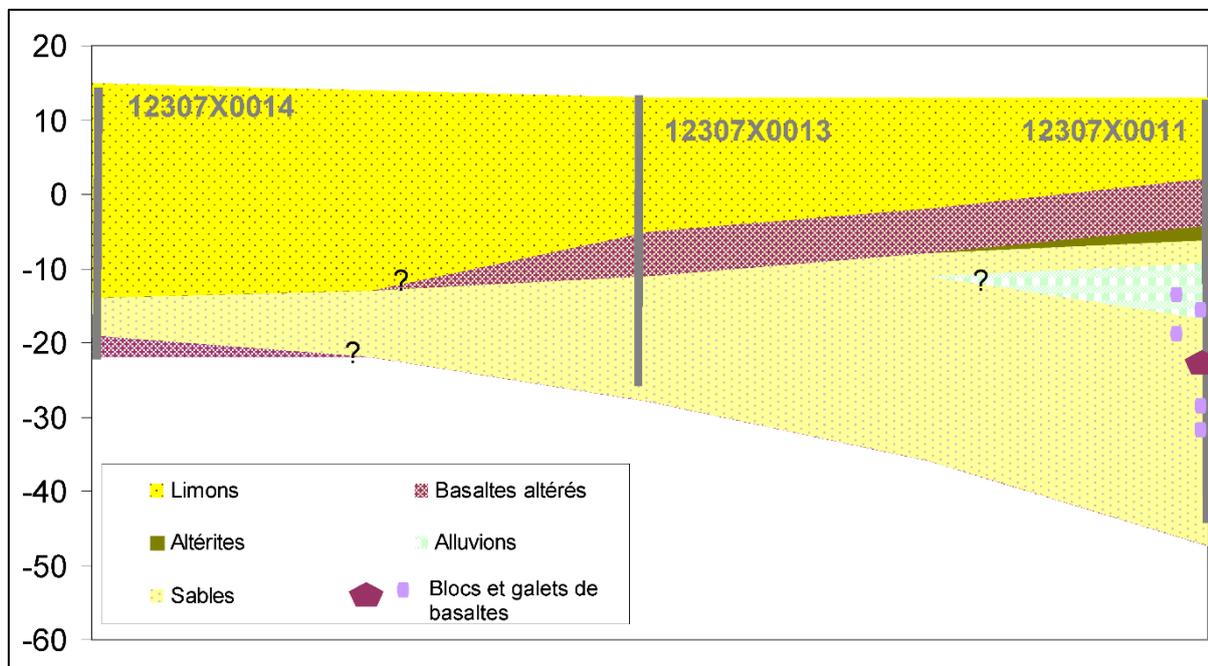


Figure 78 : Coupe lithologique synthétique passant par les captages Kawéni F2 (12307X0014) et F1(12307X0013) et un ouvrage plus au sud (source : BRGM/RP-56773-FR)

Les forages, localisés en bordures de la dépression de Kawéni, présentent une variabilité lithologique latérale et verticale. La présence en surface de limons et argiles d'altération (plusieurs mètres d'épaisseur), est un argument favorable à la limitation des risques de pollution directe par infiltration.

L'ouvrage plus récent Kawéni Lajolie se situe dans la vallée du Mro Oua Kaouénilajoli, au nord de la zone d'étude. Le rapport BRGM/RP-50428-FR décrit sa coupe lithologique comme suit :

- 0 - 8 m : Cendres fines riches en minéraux libres (quartz), lapilli et petites ponces ;
- 8 - 20 m : Cendres sableuses à fragments rocheux altérés et petites ponces,
- 20 - 40,5 m : Basalte sombre, à olivine, altéré et scoriacé en surface (sur quelques mètres). On peut noter des niveaux fissures entre 34 et 40 m ;
- 40,5 - 61 m : Basalte sombre, à olivine et pyroxène, mis en place en contexte aérien et montrant des niveaux fissures entre 47 et 61 m.

La coupe met en évidence un épisode explosif récent relativement violent qui s'est traduit par la mise en place d'un dépôt pyroclastique ponceux d'une puissance de 20 m. Ces formations reposent sur un socle basaltique (situé autour de 0 m NGM) constituée d'une accumulation de coulées de lave. L'altération de la coulée de basalte à olivine suggère une période d'érosion de plusieurs milliers à une dizaine de milliers d'années, précédant la phase éruptive.

La coulée inférieure contribue très significativement au débit du forage. Il est très probable que les laves sus-jacentes soient également productives (niveaux fissures entre 34 et 40 m et surface scoriacée). Les pyroclastites superficielles doivent a priori présenter une perméabilité médiocre.

Elles peuvent donc, au mieux jouer un rôle capacitif. Le niveau piézométrique dans le forage se situait lors des pompages d'essai à 11,26 m de profondeur. Les pompages d'essai, ainsi que des simulations à long terme ont permis d'établir un débit d'exploitation prévisionnel de 30 m³/h.

Le rapport BRGM/RP-50428-FR de l'année 2000 conclut à la possibilité d'éléments limitant les risques d'intrusion saline :

- La géométrie des formations aquifères et l'existence ou non de « barrières » peu perméables à l'aval de la zone des forages, tant au sein du substratum volcanique perméable (compartimentage lithologique et/ou structural) qu'au sein des formations sédimentaires et volcaniques sus-jacentes (géométrie des formations peu perméables : argiles de mangrove, pyroclastites, etc.) ;
- Les gradients piézométriques relativement élevés mesurés entre les forages aval et la mer (environ 8‰) suggèrent l'existence de telles barrières si l'on fait l'hypothèse (à vérifier) que le niveau moyen des mers correspond bien au 0 m NGM cartographique.

Le rapport BRGM/RP-56773-FR propose sur la base de corrélations entre données lithologiques et résultats géophysiques la coupe de la Figure 79

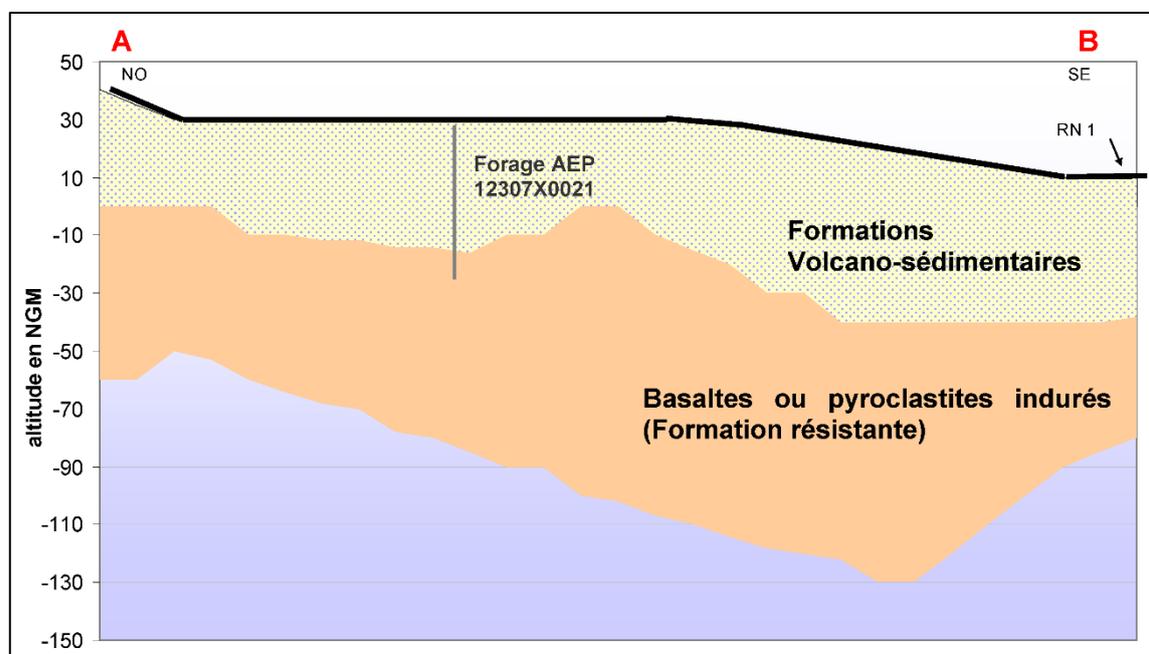


Figure 79 : Coupe synthétique passant par Kaoué 3 et en direction de la dépression de Kawéni au Sud-Est (source : BRGM/RP-56773-FR)

Selon le rapport, l'examen de la coupe et des cartes du toit et du mur de la formation résistante (basaltes ou pyroclastites indurés, zone aquifère captée par Kawéni Lajolie) montre une géométrie particulière de ce corps résistant. La formation - d'une épaisseur variable de 30 à 100 m maximum - est de surface très irrégulière, grossièrement inclinée dans le sens NO-SE (en suivant l'axe de la Kaouénilajoli) et semble remonter à l'endroit où la vallée s'évase, c'est-à-dire à son débouché dans la dépression de Kawéni. Cette formation repose sur une unité plus ancienne de nature inconnue jouant le rôle de substratum imperméable (socle local appartenant vraisemblablement aux unités volcaniques de l'édifice septentrional plus ancien).

Les bassins d'alimentation des trois captages Kawéni F1 et F2 et Kawéni Lajolie sont étudiés dans le rapport RP-57620-FR de l'année 2009. Ces bassins d'alimentation des trois captages prennent en compte les bassins versants amont des cours d'eau proches qui se déversent dans la dépression de Kawéni ainsi que les zones d'appel des ouvrages lorsqu'ils sont en fonction.

L'analyse développée dans le rapport débouche sur l'estimation de la part de la ressource en eau souterraine renouvelée qui est captée par les ouvrages. Pour cela, la pluie efficace pour chacun des bassins d'alimentation les forages AEP est estimée. Elle caractérise la recharge annuelle de ces bassins. D'autre part, les volumes annuels moyens extraits (caractérisés par les débits moyens annuels) sont calculés à partir des chroniques d'exploitation des trois captages durant la période 2006 – 2009. Le tableau 12 présente les résultats.

Ouvrage	Cours d'eau amont	BV amont+ Zone d'appel de l'ouvrage (km ²)	Débit horaire moyenné sur l'année (m ³ /h)	% de la pluie efficace
Kawéni F1	Ravine Kawéni « collègue »	0,99	13,4	20
Kawéni F2	Ravine Kawéni « la poste »	0,30	10,4	50 - 60
Kawéni Lajolie	Mro Kaouénilajoli Oua	3,65	14,5	5

Tableau 12 : Bilan estimatif de l'exploitation des bassins d'alimentation des trois captages

Alors que la part d'exploitation du captage Kaoué 3 reste faible par rapport au volume de renouvellement (pluie efficace) de son bassin d'alimentation estimée, celles de Kawéni F1 et F2 atteignent des ordres de grandeur significatifs. Ainsi, des augmentations d'exploitation sont dans ce cas, susceptibles de provoquer un abaissement de la nappe et des intrusions salines.

Selon le même rapport BRGM/RP-57620-FR, les zones d'appel théorique des captages Kawéni F1 et F2 se superposent. Cela amène à supposer une influence réciproque des captages et à considérer un bassin d'alimentation commun aux deux captages englobant la partie amont des bassins versant et une partie aval de la dépression de Kawéni. Aussi il faudrait donc peut-être envisager un bassin d'alimentation commun aux deux captages distants d'environ 170 m.

Les trois bassins versant débouchent sur la dépression de Kawéni résultant d'un évènement volcano – hydrogéologique particulier : un volcanisme daté autour de 500 000 ans a provoqué au contact d'eaux souterraines des explosions phréto-magmatiques violentes. Il en est résulté la formation d'un cratère (maar) formant la dépression circulaire de Kawéni, comblée ensuite par des dépôts pyroclastiques. La coupe de la Figure 80 expose la structure générale géologique de la situation actuelle.

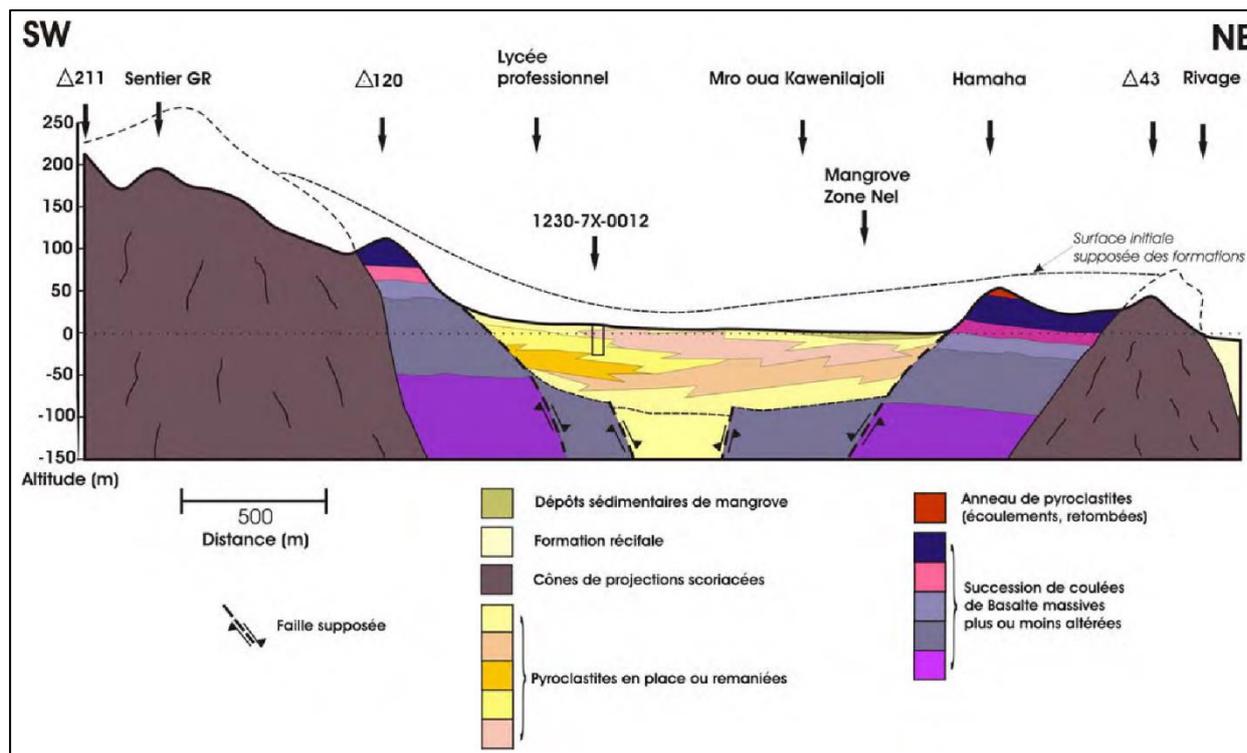


Figure 80 : Coupe lithologique de la dépression de Kawéni (source : BRGM/RP-53161-FR)

Dans cette zone côtière de basse altitude, de nombreux points d'eau exploitent les ressources en eau contenues au sein des formations pyroclastiques comblant le cratère d'origine. Les captages Kawéni F1 et F2 bien que censés essentiellement exploiter des bassins versants amonts y sont implantés en bordure.

De fait, cette structure dans laquelle débouchent les trois bassins versants auxquels sont associés les captages AEP a fait l'objet de campagnes piézométriques et de conductivité (BRGM/RP-53161-FR) dont quelques résultats sont présentés dans la figure 81.

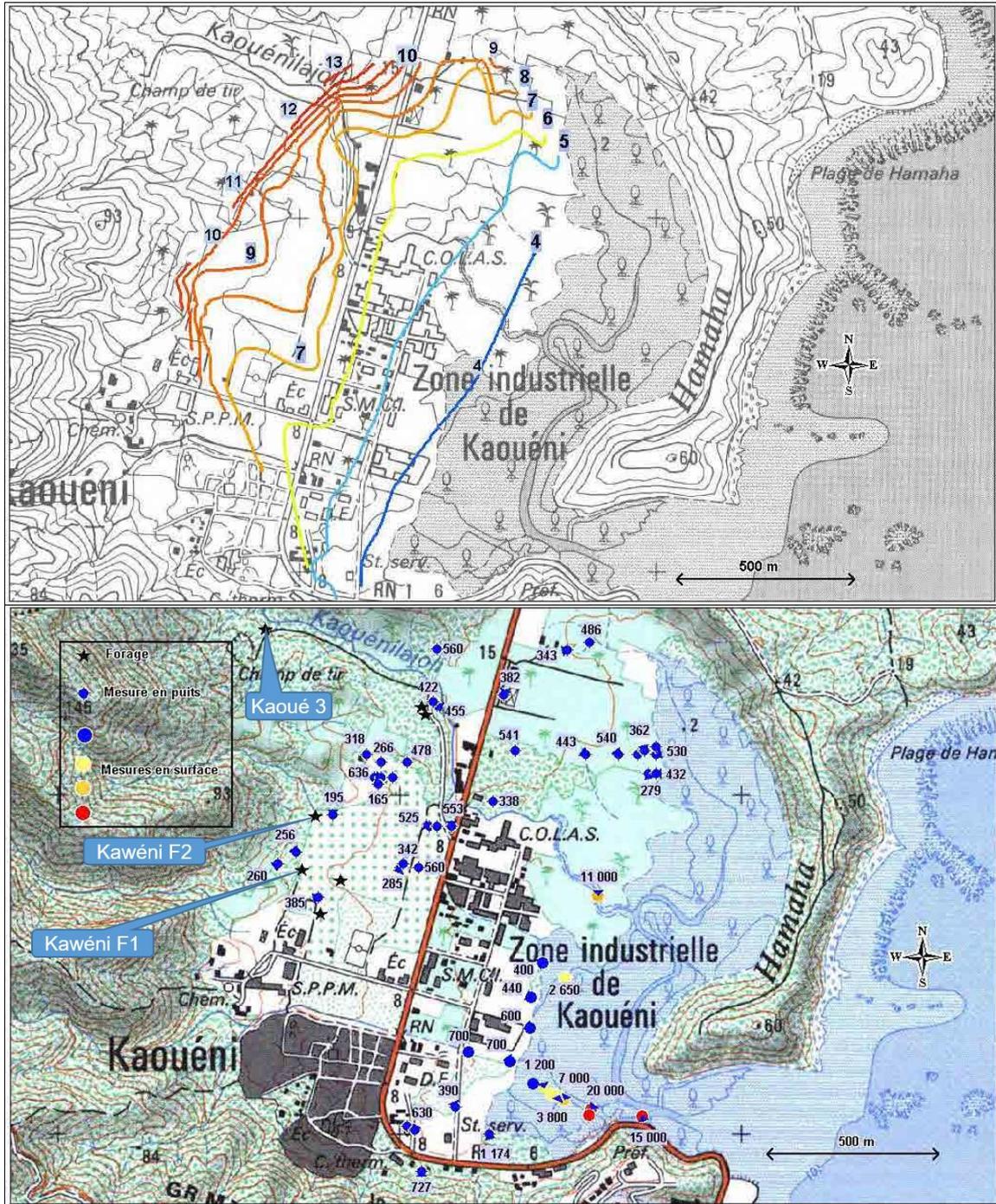


Figure 81 : Carte piézométrique (carte du haut) et mesure de conductivité (carte du bas) de mars 2004 dans la dépression de Kawéni

La carte piézométrique a été établie sur la base de mesures piézométriques dans 38 ouvrages. Les lignes d'isovaleurs sont exprimées en cote NGM. En l'absence de nivellement des ouvrages (cotes déduites du Modèle Numérique de Terrain) une incertitude importante existe sur l'altitude au sol au droit des ouvrages. Néanmoins, l'allure générale indique clairement un écoulement des eaux souterraines vers la zone de mangrove et l'océan.

La carte de conductivité récapitule les mesures de conductivité des 38 ouvrages auxquelles s'ajoutent d'autres de surface. Les résultats s'échelonnent de 165 à 1 174 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Selon le rapport, la tendance déjà observée d'une augmentation de la conductivité en direction de l'Est (Eberschweiller, 1986) semble se confirmer bien qu'une variabilité importante des mesures soit observée, aussi bien en partie Ouest (de 165 à 636 $\mu\text{S}/\text{cm}$) qu'en partie Est (de 279 à 540 $\mu\text{S}/\text{cm}$ par exemple au Nord-Est). C'est le secteur Sud-Est de la dépression qui présente la conductivité la plus élevée (> 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Les conductivités mesurées à proximité des captages Kawéni F1 et F2 varient de 195 à 385 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Le rapport BRGM/RP-56773-FR de l'année 2008 expose et commente une chronique de conductivité des trois ouvrages AEP (Figure 82).

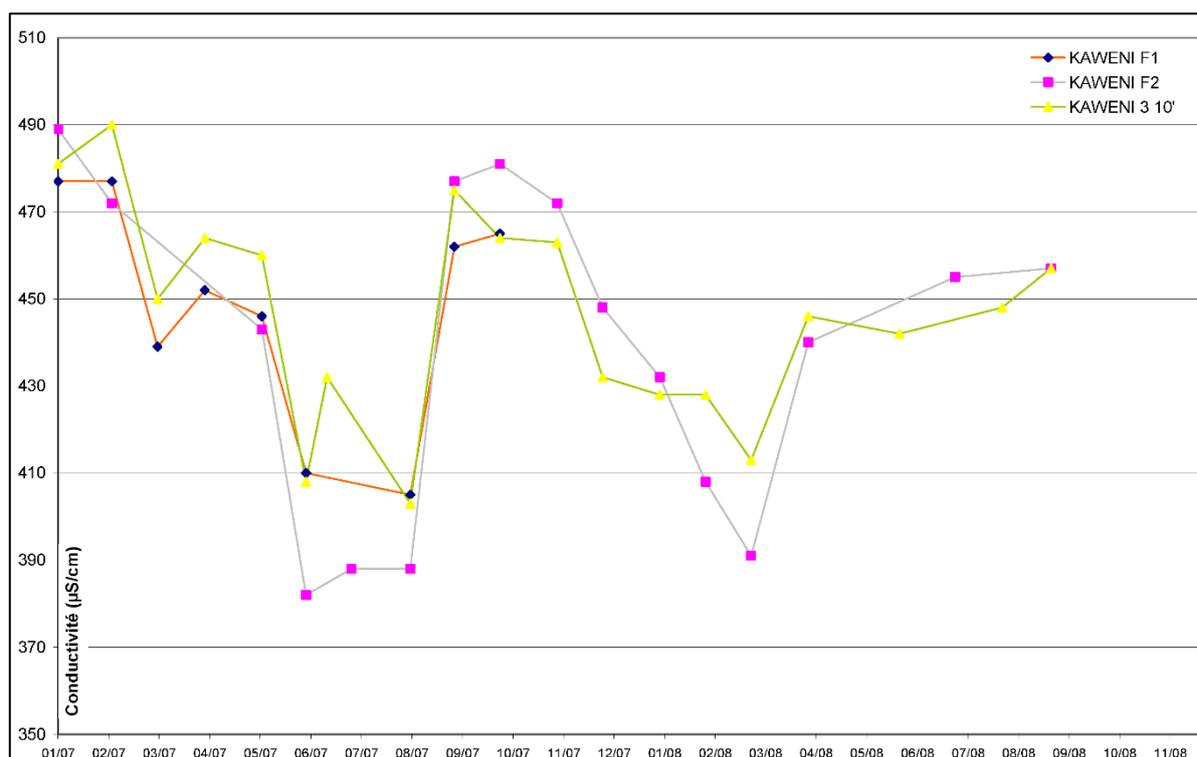


Figure 82 : Mesures de conductivité aux ouvrages AEP de Kawéni F1, F2 et 3 10'' (Kaoué 3) depuis janvier 2007 (source : BRGM/RP-56773-FR)

Les chroniques de conductivité mesurées montrent des cyclicités visiblement annuelles dans un premier temps. Les fluctuations montrent des périodes de signal faible (entre 380 et 410 $\mu\text{S}/\text{cm}$) en saison humide et des périodes de signal fort en saison sèche (entre 460 et 490 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Selon le rapport, cette baisse de signal en saison humide correspond à l'alimentation de l'aquifère par des eaux jeunes et peu chargées (phénomène de dilution de la nappe). A l'inverse, en saison sèche, le rabattement des niveaux piézométriques dus au déficit d'alimentation et aux prélèvements par les pompes induit à la fois une minéralisation des eaux (temps de résidence des eaux et interactions eau/roche plus long) et un effet sensible des eaux marines qui investiraient la nappe de Kawéni en saison sèche en réponse à l'appel créé par les prélèvements. Toutefois, il est délicat de mettre en évidence cette intrusion d'eau marine, de la quantifier et d'en mesurer les effets.

Le rapport conclut que depuis début 2007, les fluctuations de ces conductivités ne traduisent pas de tendance significative à la hausse (que ce soient les valeurs moyennes, basses ou hautes).

Ainsi, s'il est question d'une influence d'intrusion d'eaux marines dans la nappe, il semble que celle-ci n'ait pas progressée depuis le début 2007.

Ces informations recueillies en 2008 nécessitent évidemment une actualisation pour juger de la tendance actuelle.

c) Interprétation des résultats géochimiques

Les informations issues des diagraphies physico-chimiques réalisées sur l'ouvrage 12307X0011/KAWE1 (piézomètre) sont détaillées dans la section 4.1.1d) (2 diagraphies en écoulement naturel à quelques jours d'intervalle, 1 diagraphie après pompage).

Les mesures en écoulement naturel sont très comparables et renvoient une quasi-invariance des paramètres le long de la verticale (en tenant compte de l'incertitude instrumentale). Une très légère anomalie négative de température existe vers 34 m de profondeur en écoulement naturel, mais elle est résorbée par pompage. En l'absence d'informations sur la productivité de l'ouvrage, et avec l'impossibilité d'utiliser nos mesures pour essayer de déterminer s'il existe des horizons producteurs préférentiels ou si toute la zone crépinée contribue à la production d'eau, on a choisi de pratiquer le pompage dans le tiers inférieur de la crépine, à 40 m de profondeur. Le pompage n'engendre pas le drainage d'une eau plus minéralisée en profondeur. Toutefois, une anomalie positive en température est identifiée aux alentours de 22-23 m de profondeur, suite au pompage. Son origine est indéterminée, elle pourrait résulter du drainage d'une masse d'eau plus chaude en sommet de crépine, mais cet horizon ne semble pas marqué par une minéralisation différente, tout du moins dans les conditions de durée de pompage et de volume d'eau produit (1,4 m³).

Deux ouvrages ont été échantillonnés à Kawéni (12307X0011/KAWE1, piézomètre et 12307X0021/KAOUÉ3, forage AEP), et on fait l'objet de mesures de laboratoire, et de mesures isotopiques pour le forage AEP. Si très peu de données sont disponibles pour le piézomètre, on dispose de chroniques depuis 2009, voire 2002 pour certains paramètres, pour le forage AEP.

En termes d'évolution temporelle des paramètres physico-chimiques (section 4.1.2a), la conductivité électrique de 12307X0021/KAOUÉ3 évolue entre 400 et 500 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ sur le long terme, avec d'importantes variations en 2007-2010, variations qui s'estompent ensuite pour se stabiliser autour d'une moyenne de 450 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ($\pm 20 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). On mesure ainsi 465 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ en novembre 2021. La conductivité est plus élevée au piézomètre (530 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), et supérieure aux déterminations antérieures. Les valeurs de pH connaissent également de nettes variations sur une longue durée, avec des valeurs fréquemment entre 7,5 et 8 entre 2002 et 2018, et devenant neutres voire très légèrement acides ensuite (6,7 mesuré fin 2021).

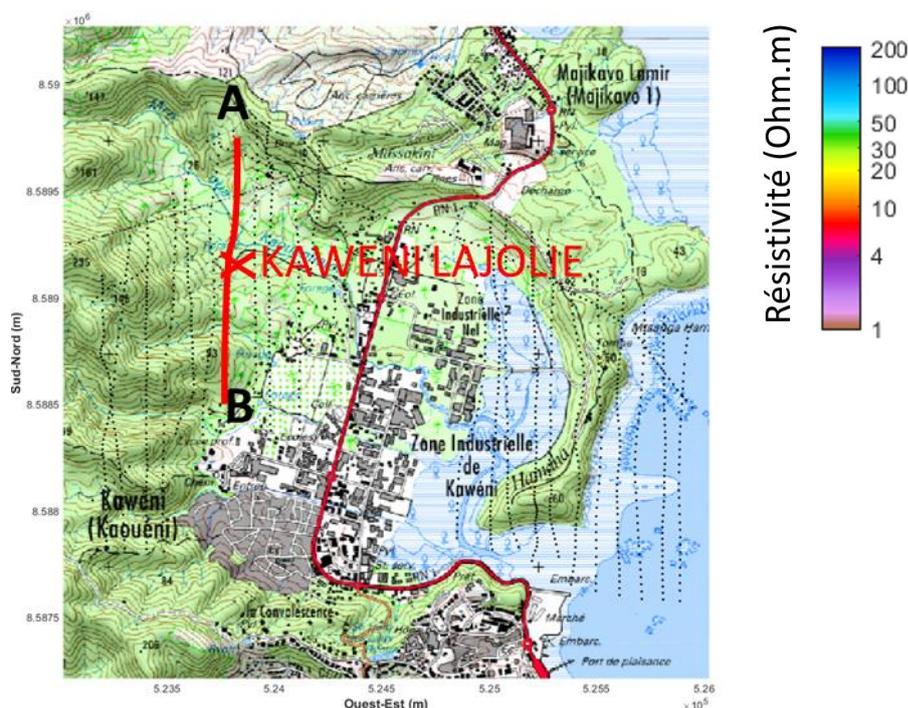
En termes de chimie des éléments dissous (section 4.1.2b), les eaux de Kawéni sont de faciès bicarbonaté sans cation dominant. Conformément aux données de conductivité électrique, on retrouve une forte variabilité des concentrations en éléments dissous entre 2007 et 2010, et particulièrement pour Ca et Mg. Cette forte variabilité s'estompe ensuite, et les mesures de fin 2021 sont tout à fait conformes à la moyenne sur 10 ans pour Ca, Mg, SO₄ ou HCO₃. Pour Na et K, la valeur est un peu plus basse que la moyenne, la situation étant inverse pour Cl. Ce comportement opposé de Na et Cl n'est guère en faveur de la présence actuelle d'une eau saline au droit de la crépine du forage (voir aussi section 4.1.2d). Les données des éléments en trace (section 4.1.2c) n'apportent pas de contraintes supplémentaires.

En termes d'isotopie (section 4.1.2e), pour l'ouvrage 12307X0021/KAOUÉ3, les rapports isotopiques mesurés sur la molécule d'eau (rapports des isotopes stables de l'oxygène et de l'hydrogène) pointent vers une origine météorique, donc vers une eau souterraine issue de l'infiltration d'eau de pluie dans la zone de recharge, sans indice net d'un mélange avec une eau de mer ou une eau salée résultant de l'évaporation de l'eau de mer. Le rapport isotopique en bore est similaire à celui de l'eau de mer, on a donc conservation du rapport isotopique initial suite à l'évaporation de cette eau pour produire ultérieurement des précipitations.

En résumé, **il n'existe pas d'indice indiscutable permettant de mettre en évidence une variation de concentration indicatrice du drainage d'une eau plus saline**, mais il faudrait cependant s'assurer que la conductivité électrique au piézomètre ne s'inscrit pas dans une tendance haussière, ce qui ne peut pas être déterminé sur la base des données disponibles. De surcroît, le pompage pratiqué au piézomètre n'est en rien comparable au débit d'exploitation du forage AEP, et une sollicitation de plus longue durée du piézomètre permettrait sans doute d'apporter des informations complémentaires.

d) Interprétation des résultats géophysiques

Le premier jet d'interprétation réalisé à partir des données AEM seules a permis de dégager quelques tendances à partir d'un pointé automatique de deux seuils de résistivité différente : 4 et 8 Ohm.m par la méthode présentée au paragraphe 3.4. La figure 71 présente un exemple de ce pointé en coupe, sur un profil EM.



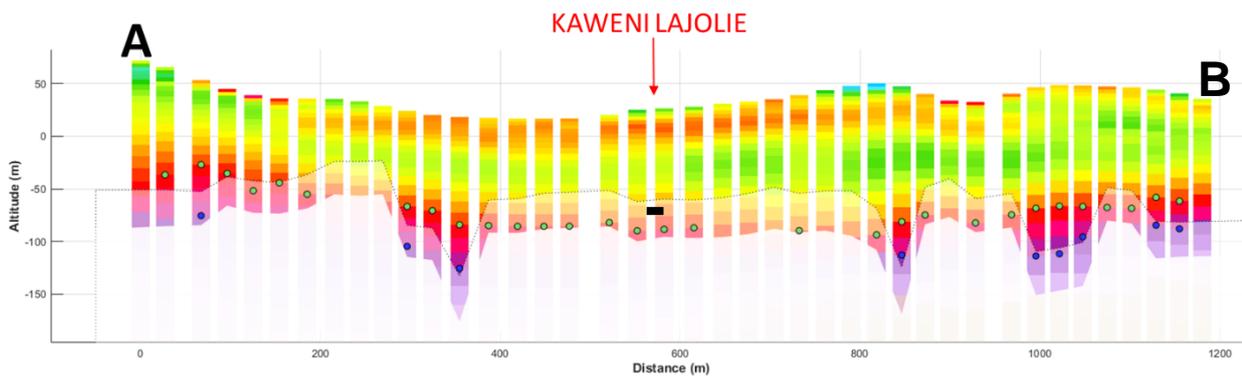


Figure 83 : Profil AEM P67 (et sa localisation) sur lequel est représenté le pointé semi-automatique de l'intrusion saline grâce à un seuil à 4 Ohm.m (en bleu) et un seuil à 8 Ohm.m (en vert). Exagération verticale 1.2. La profondeur du forage est indiquée par un trait noir.

On peut aussi visualiser le résultat en cartographie de l'altitude du toit de l'invasion, c'est-à-dire de l'altitude à partir de laquelle on rencontrait l'invasion pour la première fois. Comme expliqué précédemment, nous avons travaillé avec deux seuils de résistivité différents : 4 et 8 Ohm.m, 4 étant plus proche de l'invasion à proprement parler et 8 comprenant une zone de mélange eau douce – eau salée et étant donc plus sécuritaire. La figure 84 présente cette cartographie. Les points noirs correspondent points de données AEM, recouverts par des points de couleur représentant la profondeur de l'intrusion. S'il n'y a pas de point de couleur c'est que le seuil de résistivité n'a pas été rencontrée sur les données AEM. Cela peut être expliqué par l'absence de l'intrusion saline, ou par une profondeur d'investigation de la géophysique insuffisante à cet endroit pour atteindre l'intrusion (investigation réduite à cause du ratio signal sur bruit insuffisant ou intrusion trop profonde pour la méthode).

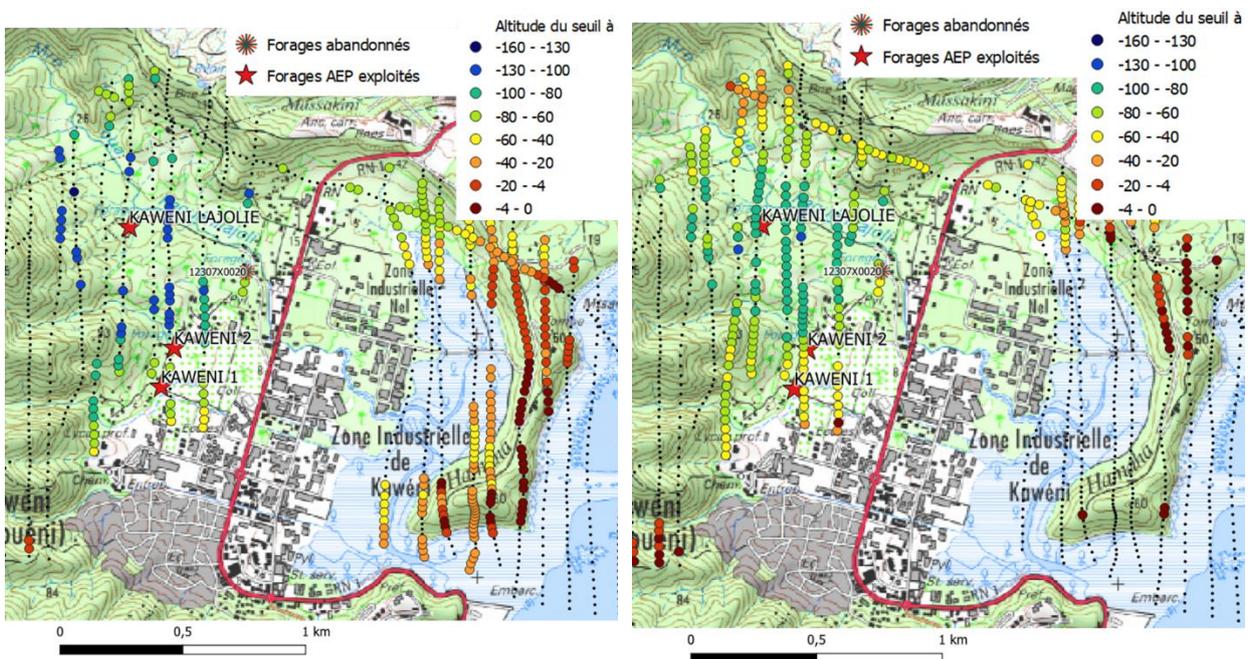


Figure 84 : Localisation en altitude de l'intrusion saline pointée automatiquement sur les données AEM dans le secteur de Kaweni.

- **Résultats TRE comparés au résultats AEM sur la zone de Mohogoni**

Les profils TRE réalisés sur la zone de Kaweni (Figure 85) visent à mieux cerner une éventuelle intrusion saline en particulier autour du forage AEP Kawéni Lajolie 12307X0021 (profil P1) et à vérifier une éventuelle évolution de l'intrusion saline (profil P3) par rapport aux investigations de 2004.

Le profil P3 reprend le tracé quasiment exact du profil PA de 2004 (BRGM/RP-53161-FR). Les deux profils montrent une distribution de résistivité semblable avec un conducteur C1 que l'on peut attribuer avec une bonne assurance à une intrusion salée que l'on suit depuis la zone de Mangrove à l'est en accord avec le profil AEM P99 (Planche 6).

L'absence de la couverture résistante R1 sur le profil PA2004 est dû à la résolution inférieure du dispositif de mesure utilisé en 2004 (espacement de 25 m entre électrode) par rapport à 2021 (espacement de 10 m). La différence de résistivité du résistif profond entre 2004 et 2021 peut également avoir son origine dans la différence de configuration de mesure. On considère en conséquence qu'il n'y a pas d'évolution significative des résistivités entre 2004 et 2021.

Le profil P1 montre un indice d'intrusion saline profond (altitudes de -75 à -100 m, Planche 6) en bon accord avec les indices révélés par les profils AEM P67 et P69. Nonobstant, les possibles effets des configurations de mesure différentes, le profil PB de 2004 définit un conducteur C2 similaire. On peut donc conclure qu'il n'y a pas non plus ici d'évolution significatives des résistivités entre 2004 et 2021.

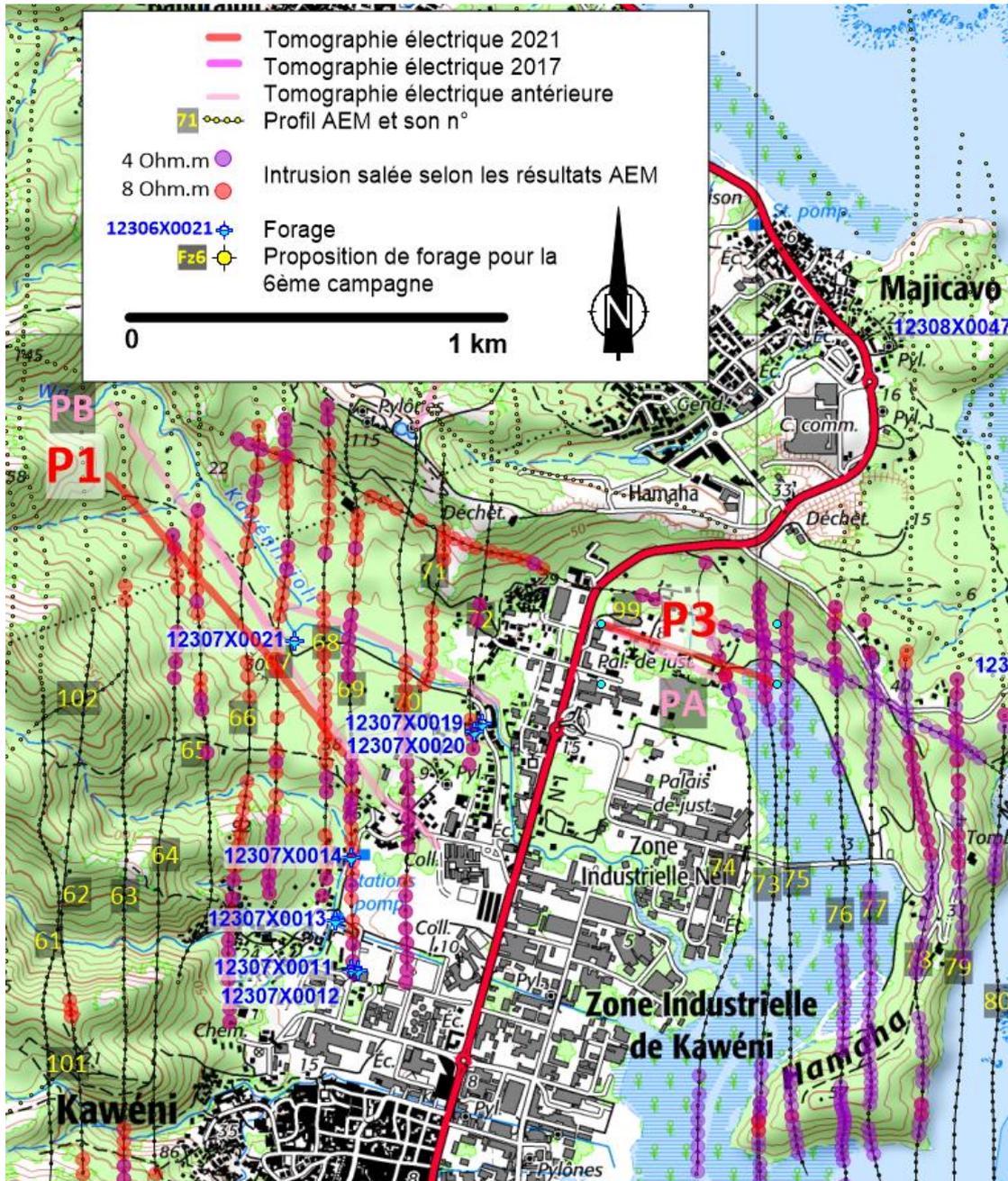


Figure 85 : Localisation des investigations géophysiques et cartographie des intrusions salées définies selon les résultats AEM

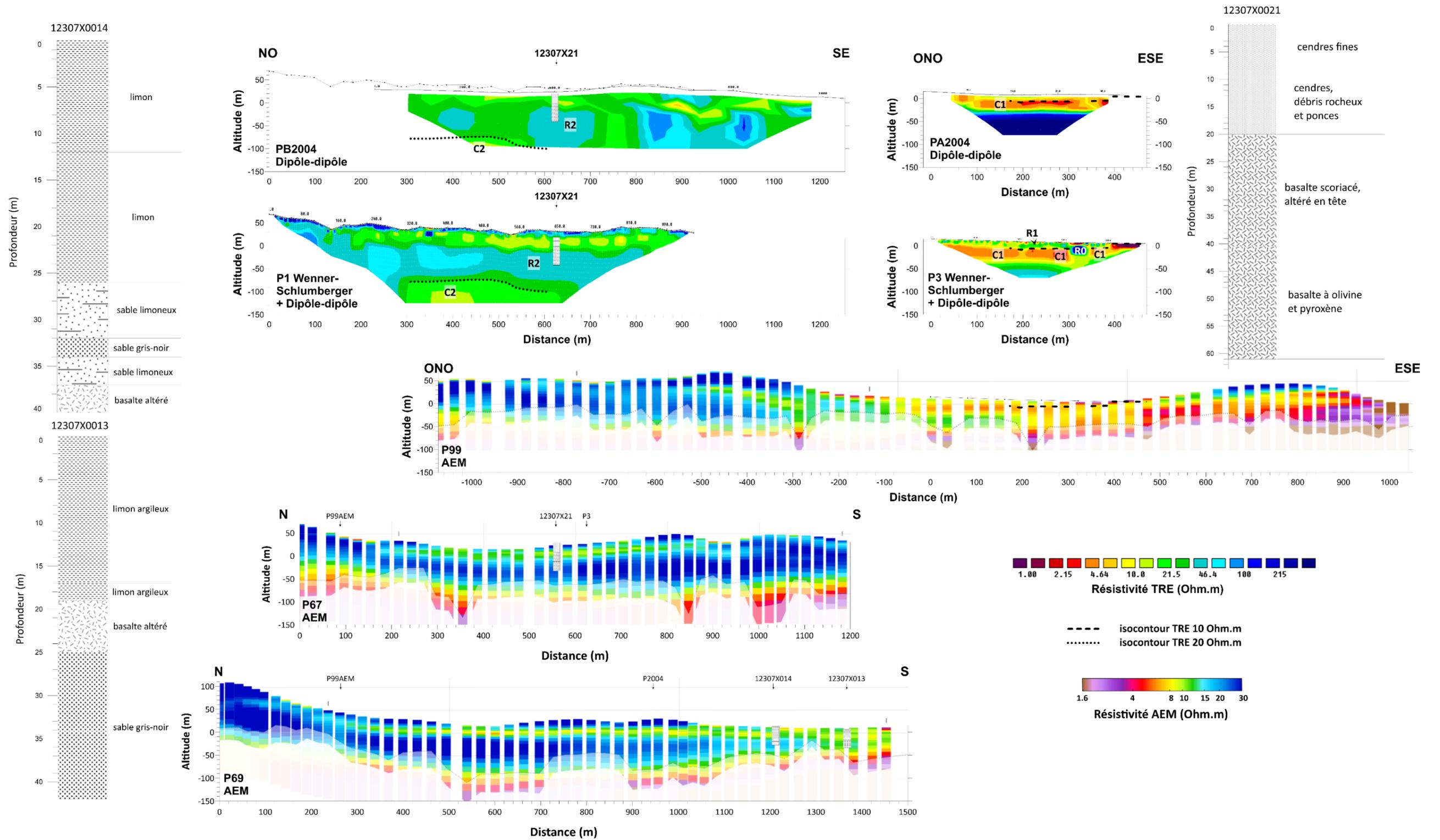


Planche 6 : Site de Kaweni - Intrusions salines interprétées à partir de l'imagerie TRE (PA et PB de 2004, P1 et P3, en haut) et comparées à l'imagerie AEM (en bas). Les isocontours 10 Ohm.m définis par TRE sont superposés à l'imagerie AEM pour comparaison.

e) Conclusion et recommandations

Les précédentes études hydrogéologiques (notamment les cartographies de la conductivité dans la baie de Kawéni) indiquent bien la présence de salinité plus ou moins élevée (Figure 81) s'atténuant vers les bords de la dépression de Kawéni. En revanche, les investigations géochimiques dans les forages de Kawéni Lajolie (12307X0021/KAOUÉ3) et le piézomètre 12307X0011/KAWE1 (à proximité sud des captages Kawé F1 et F2) ne révèlent aucune variation qui pourrait caractériser une intrusion saline.

L'ensemble des profils géophysiques qui quadrillent le secteur montre la présence d'un niveau conducteur qui se suit depuis la côte jusqu'en bordure de la dépression de Kawéni en s'approfondissant. Il y a donc une forte probabilité que le toit de ce conducteur caractérise la limite supérieure d'une intrusion saline provenant du milieu marin. Au droit du captage Kawéni Lajolie (12307X0021/KAOUÉ3), cette limite se situe à une cinquantaine de mètres à partir du fond du forage.

Pour ce qui est des captages Kawéni F1 (12307X0013/F1) et F2 (12307X0014/F2) dont les fonds atteignent respectivement les altitudes négatives de - 27 et - 25 m NGM, cette limite se situe selon les hypothèses présentées dans la figure 84 entre les altitudes négatives de - 40 et - 80 m NGM.

De plus, lors du début de l'étude, le forage de Kaoué 2 (12307X0020/KAOUÉ2) n'était pas en exploitation. Désormais, ce forage est en exploitation de manière continue, il convient donc de l'ajouter au protocole de surveillance de l'intrusion saline qui se déclinerait en plusieurs étapes comme suit :

1/ Assurer un suivi régulier de la conductivité électrique de l'eau :

- au droit des 4 forages EDCH dans la dépression de Kawéni, en continu si l'ouvrage est télégéré ou a minima une fois par mois par lecture de la mesure et de vérifier la dérive de la sonde par des prélèvements mensuels, actuellement réalisés tous les mois par l'exploitant dans le cadre de l'auto-surveillance ;
- sur le piézomètre (12307X0011/KAWE1), deux fois par an sur toute la colonne d'eau via une sonde manuelle.

2/ Déterminer un seuil de variabilité naturelle de la conductivité au-delà duquel il serait nécessaire de :

3/ Effectuer un diagnostic sur site du chlore et des sulfates à l'aide de kits photométriques ; cela permettra une quantification des premiers paramètres indiquant une intrusion saline.

4/ Faire des prélèvements d'eau brute en suivant les protocoles des laboratoires (échantillonnage, conservation, transport, etc.) pour confirmer la présence d'intrusion saline dans le cas où, après plusieurs quantifications par des kits photométriques, les concentrations en chlore et sulfates s'avéraient en hausse comparées aux données historiques.

Dans la mesure où plusieurs autres ouvrages accessibles existent dans ce secteur, il conviendrait d'y effectuer également un log de conductivité sur chacun d'eux. L'ensemble des données acquises permettrait de produire une cartographie spatiale sommaire du toit de l'intrusion avec son évolution dans le temps. Cette carte s'appuierait uniquement sur le paramètre conductivité électrique. Ceci serait une première approche cartographique.

Dans le cas où ces futures mesures montraient une aggravation progressive de la situation, une nouvelle campagne géophysique serait réalisée pour caractériser l'évolution du toit de l'intrusion saline. En cas d'aggravation avérée, des actions de protection devront être mises en œuvre.

6. Conclusion générale et recommandations

De manière générale, la forme et l'extension des intrusions sont régies par des lois et des schémas hydrodynamiques qui ne correspondent pas aux simples théories utilisées en tant que guides dans un contexte naturel souvent plus complexe (BRGM/RR-38847-FR) comme c'est le cas à Mayotte avec des aquifères compartimentés et dont les limites sont mal connues.

La localisation effective d'une intrusion saline peut se faire uniquement par des méthodes de terrain. Pour ce projet, les méthodes utilisées ont été :

- Des prospections de géophysique de surface (panneaux électriques) ;
- Le retraitement des données AEM (levé géophysique aéroporté de 2010) ;
- Des diagraphies physico-chimiques (incluant la conductivité électrique) ;
- L'analyse des évolutions temporelles d'hydrochimie et de conductivité électrique ;
- Des analyses chimiques et isotopiques en forage.

8 secteurs ont été investigués dans le cadre de cette étude afin de détecter et cartographier l'intrusion saline au droit et à proximité des forages en exploitation :

- Bandrélé (forage abandonné 12313X0033/BAND),
- Mronabéja et Mbouini (forage de M'Ronabéja 12316X0032/MRONAB),
- Mréréni-Chirongui (forage 12312X0035/MRERE2),
- Mtsangamouji (12306X0016/MTSAN2 et 12306X0017/MTSAN1),
- Mohogoni (forages F1 12302X0025/MOHOG et F2 12302X0101/MOHOF2),
- Méresse (forage 12306X0046/BOUY),
- Bouyouni (forage 12306X0024/BOUY),
- et Kawéni (forages 12307X0013/F1, 12307X0014/F2 et 12307X0021/KAQUE3).

Sur ces 8 secteurs, les mesures et analyses physico-chimiques et isotopiques n'ont pas montré de signe d'intrusion saline au droit des forages échantillonnés et/ou des piézomètres situés à proximité lorsque cela était possible. Les interprétations réalisées se basent donc principalement sur les données géophysiques. Le Tableau 13 récapitule les résultats obtenus par chaque méthode utilisées permettant de conclure à la présence ou non d'une intrusion saline.

La notion de risque d'intrusion saline est avancée dans cette étude selon 4 classes :

- Risque faible : intrusion déterminée par au moins une des méthodes et à plusieurs dizaines de mètres en profondeur et à une distance de plusieurs centaines de mètres d'un ouvrage en exploitation ;
- Risque moyen : intrusion déterminée par 2 méthodes avec des profondeurs du toit de l'intrusion à plus de 50 m du fond de l'ouvrage et à moins de 100 m d'un ouvrage exploité ;
- Risque avéré : intrusion déterminée au moins par 2 méthodes au droit du forage avec des horizons identifiés comme potentiels intrusions salines en partie recoupée par le forage ;
- Pas de risque : aucune méthode a conclu à un potentiel indice d'intrusion.

Secteur	Contexte géographique	Type aquifère	Exploité	Résultats géochimiques permettant d'indiquer une intrusion saline			Résultats AEM et TRE anté-2022	Résultats AEM	Résultats TRE 2022	Sensibilité à l'intrusion saline
				Isotope	Chimie	Diagraphie				
Bandrélé	Forage dans la vallée de la Mro Oua Dagoni	Paléovallée	NON	Indéterminé	NON	NON	Pas d'intrusion saline dans la limite d'investigation de la méthode	Pas d'intrusion saline dans la limite d'investigation de la méthode		Pas de risque immédiat
Mronabéja-Mbouini	- Forage de Mronabéja dans la vallée du Mroni Antanana - Futur forage de Mbouini dans la vallée du Mroni Bérambo	Paléovallée	OUI		NON mais eau plus minéralisée qu'au début de l'exploitation (analyses de 2002)	NON		- Futur forage de Mronabéja : intrusion à -150 mNGM - Futur forage de Mbouini : intrusion potentielle entre -50 mNGM et -100 mNGM	Présence d'un conducteur profond entre 100 et 150 m de profondeur	Risque faible à moyen
Mréréni-Chirongui	Forage dans la vallée du Mroni Bé	Vallée de comblement sédimentaire	OUI		NON	NON	Pas d'intrusion saline dans la limite d'investigation de la méthode mais une interprétation des données difficiles	Impossible à déterminer car couche géologique très conductrice		Risque difficile à déterminer
Mtsangamouji	Forage dans la vallée du Mro Oua Andrianabé	Forage F1 : Remplissage de paléovallée Forage F2 : Remplissage volcano-détritique	OUI		NON		Pas d'intrusion saline dans la limite d'investigation de la méthode	Forage situé à plus de 1000m de distance de l'intrusion saline et intrusion supposée très profonde (>100 m)		Risque faible
Mohogoni	Forages dans la vallée du Mro Oua Maré	Formations superficielles	OUI		NON		Possibles intrusion saline dans la vallée de la Maré	Au niveau des forages, intrusion saline entre -60 et -100 mNGM	Au niveau du forage 12302X0025/MOHOG, présence d'un conducteur entre 15 et 40 m de profondeur (-4 mNGM et -30 mNGM)	Risque avéré pour le forage 12302X0025
Méresse	Forages actuel et futur dans la vallée du Mro Oua Méresse	Coulée basaltique fissurée	OUI		NON		Intrusion à l'embouchure	Au niveau du forage, intrusion entre -80 et -100mNGM	Un conducteur pouvant être assimilé à l'intrusion saline à une distance de 50 m en aval du forage actuel	Risque moyen pour le forage exploité Risque faible pour le futur forage
Bouyouni	Forages actuel et futur dans la vallée du Mro Oua Bouyouni	Comblement de paléovallée	OUI		NON		Intrusion à l'embouchure	Au niveau du futur forage, potentielle intrusion saline entre -60 et -130 mNGM	Pas d'indicateur d'intrusion saline	Risque faible pour le forage actuel et pour le futur forage
Kawéni	Forages dans la dépression de Kawéni	Formations limoneuses, comblement de la dépression de Kawéni	OUI	Eau d'origine météorique, issue de l'infiltration d'eau de pluie	NON	Pas d'indice d'intrusion		Toit de l'intrusion saline entre -60 mNGM et -130 mNGM	Intrusion profonde entre -75 mNGM et -100 mNGM	Risque faible

Tableau 13 : Récapitulatif des résultats obtenus par différentes méthodes pour chaque secteur permettant une première approche du risque d'intrusion saline

Ainsi, un seul secteur a été défini avec un risque avéré, il s'agit du secteur de Mohogoni avec un conducteur identifié et recoupé par le forage.

De manière générale, pour tous les ouvrages exploités dans les zones investiguées, il a été recommandé d'effectuer un suivi de la conductivité électrique de l'eau à l'aide d'une sonde immergée dans l'ouvrage exploité et dont l'exploitant assure l'auto-surveillance. Il est donc recommandé de récupérer une fois par mois au minimum la donnée mesurée par la sonde pour les forages non télégerés ou de suivre en continu la conductivité pour les forages télégerés. Les données devront être vérifiées par des prélèvements d'eau brute, prélèvements déjà effectués tous les mois par l'exploitant.

Ce suivi du paramètre in situ est une première étape. En effet, il serait judicieux de définir un seuil au-delà duquel des analyses de quelques paramètres supplémentaires, indicateurs d'une eau saumâtre, via des kits photométriques devront être réalisés. Enfin, si après plusieurs analyses via les kits semblent confirmer une possible intrusion, des échantillons d'eau devront être envoyés en laboratoire pour des analyses complètes. Ces échantillons devront être prélevés, conservés et acheminés au laboratoire selon les bonnes pratiques en vigueur.

De plus, dans le cas où des ouvrages (piézomètres) se situent en aval du forage en exploitation et que celui-ci est accessible, une digraphie de conductivité est préconisée deux fois par an pour constater l'avancée potentielle de l'intrusion.

Pour les secteurs où le risque a été déterminé moyen à avéré, de nouveaux profils de tomographies de résistivité (en pompage et hors pompage) sont recommandées pour estimer l'influence du pompage sur le toit de l'intrusion.

Enfin, pour ces mêmes secteurs avec un risque moyen à avéré, dans le cas où aucun ouvrage de surveillance n'existe en complément des forages, il serait recommandé d'en implanter au moins un par secteur.

Toutes les recommandations pour la surveillance de l'intrusion saline ont été émises selon les risques identifiés et regroupées dans le Tableau 14.

Pour les secteurs de Mronabéja - Mbouini, Méresse et Bouyouni, où l'intrusion a été jugée proche des futurs forages d'eau destinée à la consommation humaine de la 6^{ème} campagne FZ1, FZ2, FZ6 et FZ7, il est recommandé un suivi renforcé *a minima* de la conductivité lors de la foration des ouvrages. Ce suivi n'est pas initialement prévu au cahier des charges de l'entreprise de forage.

L'ensemble de ces mesures de surveillance permettra de proposer des adaptations sur les modalités d'exploitation d'un ouvrage si des indices d'intrusion d'eau salée venaient à être mis en évidence afin d'exploiter la ressource souterraine de façon raisonnée en limitant l'impact sur la qualité des eaux produites.

Caractérisation de l'intrusion saline aux droits de zones dites « sensibles » sur le territoire de Mayotte

Secteur	Contexte géographique	Type aquifère	Exploité	Sensibilité à l'intrusion saline	Recommandations		
					Géochimiques	Géophysiques	Création d'ouvrage de surveillance pour la géochimie
Bandrélé	Forage dans la vallée de la Mro Oua Dagoni	Paléovallée	NON	Pas de risque immédiat	Suivi de la conductivité si exploité	NON	NON
Mronabéja-Mbouini	- Forage de Mronabéja dans la vallée du Mroni Antanana - Futur forage de Mbouini dans la vallée du Mroni Bérambo	Paléovallée	OUI	Risque moyen	Tout le protocole potentiellement	NON	NON car ouvrage existant
Mréréni-Chirongui	Forage dans la vallée du Mroni Bé	Vallée de comblement sédimentaire	OUI	Risque difficile à déterminer	Tout le protocole potentiellement	NON	NON car ouvrage existant
Mtsangamouji	Forage dans la vallé du Mro Oua Andrianabé	Forage F1 : Remplissage de paléovallée Forage F2 : Remplissage volcano-détritique	OUI	Risque faible	Suivi de la conductivité au droit des deux forages exploités	NON	NON
Mohogoni	Forages dans la vallé du Mro Oua Maré	Formations superficielles	OUI	Risque avéré pour le forage 12302X0025	Tout le protocole potentiellement	OUI TRE de nouveau	OUI
Méresse	Forages actuel et futur dans la vallée du Mro Oua Méresse	Coulée basaltique fissurée	OUI	Risque moyen pour le forage exploité Risque faible pour le futur forage	Tout le protocole potentiellement	OUI TRE de nouveau	OUI
Bouyouni	Forages actuel et futur dans la vallée du Mro Oua Bouyouni	Comblement de paléovallée	OUI	Risque faible pour le forage actuel et pour le futur forage	Tout le protocole potentiellement	NON	NON
Kawéni	Forages dans la dépression de Kawéni	Formations limoneuses, comblement de la dépression de Kawéni	OUI	Risque faible	Tout le protocole potentiellement	NON	NON

Tableau 14 : Tableau récapitulatif des conclusions et recommandations pour le suivi des intrusions salines détectées

7. Bibliographie

Archie, G.E. (1942) The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics. Transactions of the AIME, 146, 54-62.

Ballestracci et al., 1985 - Intermediate tectonic pattern and hydrodynamic process deduced from audiomagnetotelluric investigations on the volcanic island of Mayotte (Comores archipelago). Tectonophysics 115.

Baltassat J-M, Maurice B., Reninger P-A Dectot G. Eddam, S. ; Parizot M. (2017) – Tomographies de résistivité électrique appliquée à l'implantation de forages AEP sur 10 sites à Mayotte. Rapport final. BRGM/RP-67169-FR, 71 p., 32 ill., 4 tabl., 14 ann. <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-67169-FR.pdf>

J-M. Baltassat, P-A. Reninger et B. Maurice, avec la collaboration de M. Parizot. 2017. Tomographies de résistivité électrique appliquées à l'implantation de forages agricoles sur onze sites de Mayotte. Rapport final. BRGM/RP-66923-FR, 234 p., 30 ill., 3 tabl., 10 ann.

Benard, B. ; Parizot, Manuel (2016) - Exploitation de la ressource en eau souterraine pour l'alimentation en eau potable à Mayotte – Etat des lieux et pistes d'amélioration – Rapport final. BRGM/RP-66317-FR, 148 p., <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-66317-FR.pdf>

Ben Youssouf A.-A., 1992 – L'évolution géomorphologique des édifices volcaniques de Mayotte (Archipel des Comores, Océan Indien), in Rythmes morphogéniques en domaine volcanique. Exemples du Massif central français et de quelques régions volcaniques de comparaison, edited by T.J.-C. Lageat Yannick, pp. 181-190, CERAMAC (Clermont-Ferrand). Colloque AGF, Clermont-Ferrand.

Bonnier J., Jossot O., Lachassagne P., Mouron R., 2003, Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte - Campagne 2001-2003, Rapport BRGM/RP-52481-FR, <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-52481-FR.pdf>

Bourhane et al., 2016 Mise en place d'un réseau de suivi des intrusions salines dans les aquifères côtiers de La Réunion (Rapport Office de l'Eau Réunion).

Camoin G.F., Montaggion L.F., Braithwaite C.J.R., 2004, Late glacial to post glacial sea levels in the Western Indian Ocean

Castillo, Christelle ; Vernoux, Jean-François ; Vittecoq, Benoît ; Deparis, Jacques (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., 4 ann., <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-62825-FR.pdf>

Couchoud, I., 2008. Les isotopes stables de l'oxygène et du carbone dans les spéléothèmes : des archives paléoenvironnementales. Quaternaire. <https://doi.org/10.4000/quaternaire.4532>

Coulomb R., 2014, Mise en évidence de nouvelles ressources en eau souterraine à Mayotte. 5ème campagne de forages. Forage de Mohogoni F2 - 12302X0101. Rapport de fin de travaux et demande de prélèvement. Rapport BRGM/RP-63351-FR, <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-63351-FR.pdf>

Coulomb R., Parizot M. (2014) – Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines de Mayotte – 6^{ème} campagne de forage de Mayotte. Propositions d'implantations. Rapport final. BRGM/RP-63837-FR, 82 p., 27 ill., 11 tbl., 3 ann., 1 CD., <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-63837-FR.pdf>

Daessle M., Verrez P., 1987 – Mise en valeur du potentiel en eau souterraine dans le Sud de l'île de Mayotte. Reconnaissance géophysique et hydrogéologique. BRGM/87 REU 11

Daum J.R., avec la collaboration de BAKALOWICZ M., CHERYL., LONGJN G., (1996) -Méthodes et moyens de contrôle des biseaux salés dans les aquifères littoraux. Rap. BRGM RR-38847-FR, 77p., 27 fig., 5 tabl.

Debeuf D., 2004 – Etude de l'évolution volcano-structurale et magmatique de Mayotte (Archipel des Comores, Océan Indien) – Thèse de 3^{ème} cycle de l'Université de La Réunion, 277 p.

Dörfliger N. ; Dumon. A. ; Aunay B. ; Picot G. ; Moynot C. ; Bollard M. (2011) - Influence de la montée du niveau de la mer sur le biseau salin des aquifères côtiers des DROM/COM. Rapport final. BRGM/RP-60828-FR, 285 p., 23 ann., <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-60828-FR.pdf>

Ducieux, Laure ; Reninger, Pierre-Alexandre ; Lacaze T. ; Feret J. (2018) - Cartographie de l'interface eau douce – eau salée de Marie-Galante, Guadeloupe. Rapport final. BRGM/RP-66915-FR, 97 p., 1 ann., <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-66915-FR.pdf>

Eberschweiler, C. (1986). Etude hydrologique, hydrochimique et géochimie isotopique d'une île volcanique sous climat tropical humide : Mayotte. Thèse de Doctorat. Université de Paris Sud, centre d'Orsay.

EGIS, Schéma Directeur de l'Eau Destinée à la Consommation Humaine – Phase 4 : Analyse détaillée et proposition d'un programme pluriannuel d'investissement, 18 octobre 2021

Eucher G. ; Miehé J.-M. ; Mouron R. (2005) - Modalités d'exploitation et de protection de l'aquifère de Kawéni : Rapport d'année 2. BRGM/RP-54082-FR, 63 p. 20 fig., <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-54082-FR.pdf>

Gargani Julien, Relative sea level and coastal vertical movements in relation with volcano-tectonic processes in Mayotte, 2023

Guilbert.M. ; Dewandel B. ; Lachassagne P. ; Malard A. (2008) - Protection optimisation de la ressource en eau souterraine à Mayotte. Année 4 Valorisation des données d'exploitation des forages de Kwalé 1 (1230-7X-0022) et de Mitsangamouji 2 (1230-6X-0016). Rapport final. BRGM/RP-56438-FR, 100 p., <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-56438-FR.pdf>

IRSTEA – Pierre Nicolle, Actualisation des valeurs de seuils sécheresse – Rapport final, février 2020.

Jaouën T., Vittecoq B., Lions J., Castillo C., Deparis J., Baltassat J.M., François B., Pinson S., Gourcy L., Winckel A., et Allier D. (2012) Caractérisation hydrogéologique du potentiel en eau souterraine de Mayotte – Secteur 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. 320 p., 148 ill. et 8 ann. <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-61757-FR.pdf>

Jossot O., Lachassagne P., Maurillon N., Mouron R., 2003, Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte (campagne 2001-2003) - Forage de Bandrélé-Dagoni (1231-3X-0033) - Compte-rendu des travaux - Principaux résultats géologiques et hydrogéologiques, rapport BRGM/RP-52104-FR, <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-52104-FR.pdf>

Jaouën, Timothée ; Vittecoq, Benoît ; Castillo, Christelle ; Deparis, Jacques ; Lions, Julie ; Mathieu, Francis ; Gourcy, Laurence ; Allier, Delphine ; Pinson, Stéphanie (2013) - Caractérisation hydrogéologique du potentiel en eau souterraine de Mayotte - Secteur Centre et Sud. Rapport final. BRGM/RP-61757-FR, 320 p., 8 ann., <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-61757-FR.pdf>

Jourdain T., Lachassagne P., Lebon D., Miehé J.M., Mouron R. (2002) - Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte campagne 2001-2002 - Synthèse des résultats des reconnaissances géologiques, hydrogéologiques, géophysiques et radon - Propositions d'implantation des sondages de reconnaissance - Rap. BRGM/RP-51498-FR- 2002 MAY 01, 115 p., 33 fig., 6 tab., 4 ann., <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-51498-FR.pdf>

Kloppmann W., Bourhane A., Schomburgk S., 2010, Salinisation des masses d'eaux en France métropolitaine et dans l'Outre-mer, rapport BRGM/RP-59496-FR, <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-59496-FR.pdf>

Kloppmann W., Bourhane A., Asfirane F., 2011, Méthodologie de diagnostic de l'origine de la salinité des masses d'eau. Emploi des outils géochimiques, isotopiques et géophysiques, rapport BRGM/RP-600026-FR, <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-60026-FR.pdf>

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, <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-504283-FR.pdf>

Lachassagne P., Ladouche B., Petit V., avec la collaboration de Jourdain Th. et Mouron R., 2002, Protection et optimisation de la ressource en eau souterraine à Mayotte. Réévaluation des débits d'exploitation des forages de 1999-2000, sur la base d'observations complémentaires réalisées en 2000-2001, rapport BRGM/RP-51603-FR, <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-51603-FR.pdf>

Lachassagne P., Maurillon N., Mouron R., 2002, Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte (campagne 2001-2003). Forage de Bouyouni-Bouyouni (1230-6X-0024). Compte-rendu des travaux - Principaux résultats géologiques et hydrogéologiques. Rapport BRGM/RP-51969-FR, <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-51969-FR.pdf>

Lachassagne P., Aunay B., Frissant N., Guilbert M., Malard A., High-resolution conceptual hydrogeological model of complex basaltic volcanic islands : a Mayotte, Comoros, case study, Terra Nova, 2014

Loke, M.H., 2022. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys (Revision date: 10th Januray 2022). 236 p. (www.geoelectrical.com).

Malard, Arnaud ; VAUDOUR.K. ; Winckel, Anne (2008) - Modalités d'exploitation et de protection de l'aquifère de Kawéni - Année 3 : rapport final. BRGM/RP-56773-FR, 111 p., <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-56773-FR.pdf>

Malard A., Winckel A., 2008, Définition des réseaux de surveillance DCE de la qualité des eaux souterraines, de surface et côtières de Mayotte, rapport BRGM/RP-56774-FR, <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-56774-FR.pdf>

Malard, Arnaud ; Aunay, Bertrand ; Vernoux, Jean-François ; Mardhel, Vincent (2009) - Etude des bassins d'alimentation des 3 captages du bassin versant du Mro Oua Bouyouuni- Mayotte (délimitation, vulnérabilité, pressions). Rapport final. BRGM/RP-57108-FR, 100 p., 4 ann., <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-57108-FR.pdf>

Malard, Arnaud ; Aunay, Bertrand ; Vernoux, Jean-François ; Mardhel, Vincent (2009) - Etude des bassins d'alimentation des 2 captages du bassin versant du Mro Oua Méresse- Mayotte (délimitation, vulnérabilité, pressions). Rapport final. BRGM/RP-57110-FR, 80 p., 4 ann., <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-57110-FR.pdf>

Malard, Arnaud ; Brugeron, Alexandre ; Mougin, Bruno ; Wuilleumier, Arnaud (2009) - Etude des bassins d'alimentation des 3 captages du bassin versant du Mro Oua Marè - Mayotte. Rapport final. BRGM/RP-57622-FR, 136 p., 4 ann., <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-57622-FR.pdf>

Malard A., avec la collaboration de Brugeron A., Mougin B., Wuilleumier A., 2009, Etude du bassin d'alimentation du forage de M'Ronabéja 2 (12316X0032/MRONAB) - Bassin versant du Mroni Antanana - Mayotte, rapport BRGM/RP-57623-FR, <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-57623-FR.pdf>

Mauduit Caroline et Pucel-Bastié Simon, Note d'optimisation de la gestion des forages existants – DEAL – 21/06/2017

Mauroux B., 1992, Programme des forages de reconnaissance des eaux souterraines à Mayotte, rapport BRGM/RR-35165-FR, <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RR-35165-FR.pdf>

Mougin, Bruno ; Malard, Arnaud ; Brugeron, Alexandre (2009) - Etude et délimitation du bassin d'alimentation du forage de M'réréni (12312X0035/Mréré2) - bassin versant du Mroni Bè. Mayotte. Rapport final. BRGM/RP-57624-FR, 78 p., 2 ann., <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-57624-FR.pdf>

Nehlig, Pierre ; Lacquement, Frédéric ; Bernard, Julien ; Caroff, Martial ; Deparis, Jacques ; Jaouën, Timothée ; Aziliz Pelleter, Anne ; Perrin, Jose ; Prognon, Caroline ; Vittecoq, Benoît (2013) - Notice de la Carte géologique de Mayotte. BRGM/RP-61803-FR, 135 p., 1 ann., <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-61803-FR.pdf>

Nougier et al., 1986 – The Comores archipelago in the western Indian Ocean : volcanology, geochronology and geodynamic setting. Journal of African Earth Sciences, vol. 5.2, pp. 135-145.

Parizot, Manuel ; Joseph, Bernard (2017) - Compte-rendu des inspections vidéos des forages TSARARANO1/123130021, MRERE2/12312X0035, BANDRELE/12313X0033 et KAOUE2/12307X0020. BRGM/RP-67116-FR, 47 p., <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-67116-FR.pdf>

Pucel-Bastie S. « Crise de l'eau à Mayotte : Comment s'en sortir ? » Rapport de stage – DEAL – 2017

Reninger P.A., Ducreux L., Legendre Y., Deparis J., (2015) Caractérisation de l'interface eau douce – eau salée dans les plateaux du nord de Grande-Terre (Guadeloupe) par utilisation des données QuadEM, Rapport final. BRGM/RP-65123-FR, 45 p.

Ratsimihara, Tatiana ; Dewandel, Benoit ; Serniguet, Helena (2019) - Diagnostic des forages de Kawéni (12307X0020/KAOUÉ2), Bandrélé-Dagoni (12313X0033/BAND) et Mréréni (12312X0035/MRERE2) par interprétation de pompages d'essai. Rapport final. BRGM/RP-69504-FR, 61 p., 3 ann. <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-69504-FR.pdf>

Stieltjes L., 1987 – Mayotte, volcan bouclier du plan de l'Océan Indien Occidental (archipel des Comores). Rapport BRGM/87-REU-42. 56p.

Stieltjes L., Hydrogéologie de l'île volcanique océanique de Mayotte (archipel des Comores, océan Indien occidental), 1988 dans l'ouvrage Hydrogéologie 1988 N°2

Stieltjes L., Cantagrel J.-M., Nougier J., Vatim-Perignon N., Wqtelet P., 1988 – Carte géologique de France. Mayotte (Archipel des Comores). Echelle : 1/50 000, Collectivité Territoriale de Mayotte, BRGM, Orléans.

Seaton William J., Thomas J. Burbey (2002), Evaluation of two-dimensional resistivity methods in a fractured crystalline-rock terrane Journal of Applied Geophysics 51 (2002) 21– 41

Vittecoq B., Deparis J., Violette S., Jaouën T., Lacquement F., Influence of successive phases of volcanic construction and erosion on Mayotte Island's hydrogeological functioning as determined from a helicopter-borne resistivity survey correlated with borehole geological and permeability data, 2013

Waxman, M. H., and L. J. M. Smits, Electrical conductivities in oilbearing shaly sands, Soc. Pet. Eng. J., 8, 107-122, 1968.

Wuilleumier A., Lachassagne P. (2004) – Réévaluation du potentiel d'exploitation du forage de Mronabéja (12316X0032) sur la base des données acquises lors des pompages réalisés par la DAF en juillet et août 2003 – Recommandations – Rapport BRGM/RP-52810-FR, 17p., 4 fig., 4 ann., <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-52810-FR.pdf>

Wuilleumier, Arnaud ; Mathieu, Francis ; JOSSOT.O. ; EUCHER.G. (2004) - Identification de l'état initial du biseau salé au forage de Bandrélé-Dagoni (1231-3X-0033). BRGM/RP-53119-FR, 40 p., <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-53119-FR.pdf>

Wuilleumier A., Mathieu F., Jossot O., Eucher G. (2004) - Modalités d'exploitation et de protection de l'aquifère de Kawéni – Année 1 - BRGM/RP-53161-FR, 168 p., 19 ill., 6 tab., 14 ann., <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-53161-FR.pdf>

Wuilleumier, Arnaud ; Malard, Arnaud ; Brugeron, Alexandre ; Mougin, Bruno (2009) - Etude des bassins d'alimentation des forages de Kawéni - bassin versant du Mro Oua Kaouénilajoli - Mayotte. Rapport final. BRGM/RP-57620-FR, 140 p., 5 ann., <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-57620-FR.pdf>

8. Annexes

8.1. LES INVESTIGATIONS PAR D'ELECTROMAGNETISME AEROPORTE

8.1.1. Principe de mesure

La théorie de l'électromagnétisme (EM) appliquée à la géophysique est documentée dans différents ouvrages tels que Ward et Hohmann (1988) et Nabighian et Macnae (1991).

Les grands principes de l'EM se basent sur les équations de Maxwell (19^e siècle), et plus particulièrement sur celles du domaine diffusif (i.e. les courants de conduction dominant) dans le cas d'un levé EM en domaine temporel. Ces équations permettent d'expliquer la diffusion des courants dans le sous-sol suite à une excitation externe ; diffusion qui dépendra, au premier ordre, de la conductivité/résistivité électrique du milieu, qui sera donc le paramètre imagé.

Le système de mesure utilisé est le système SkyTEM® (<http://skytem.com>). Il est composé d'une boucle émettrice, qui permet l'excitation du sous-sol et d'une boucle réceptrice, pour mesurer la réponse du sous-sol. Il comporte également, un générateur, comme source d'énergie, ainsi que différents instruments de navigation tels que GPS, inclinomètres et altimètres laser afin de positionner à tout moment la mesure dans l'espace (Figure 87). On note également la présence d'un magnétomètre, enregistrant le champ magnétique naturel, à l'avant du système ; les mesures magnétiques n'ont pas été utilisées dans la présente étude et ne sont donc pas discutées plus en détail. La particularité du système SkyTEM® est d'émettre deux moments magnétiques différents (fonction du nombre de tours, de l'aire de la boucle d'émission et de l'intensité du courant injecté) : un moment, dit faible, qui assure une résolution en proche surface (dans la gamme ~0-50 m) et un moment, dit fort, fournissant une information à des profondeurs plus importantes. Ces deux moments sont regroupés dans un même point de mesure (un sondage électromagnétique) et sont interprétés conjointement.

Lors d'une mesure EM, un courant d'une intensité donnée est injecté dans la boucle émettrice afin de créer un champ magnétique, dit primaire (d'après l'équation de Maxwell Ampère). Ce même courant est ensuite coupé le plus nettement possible, entraînant alors une variation du champ primaire. Celle-ci se traduit par l'induction de courants de Foucault dans le sous-sol (d'après l'équation de Maxwell Faraday), créant, à leur tour, un champ magnétique, dit secondaire, et mesuré au niveau de la boucle réceptrice. Les courants se dissipent dans le sous-sol avec le temps (effet Joule), la donnée recueillie informera sur la décroissance du champ secondaire en fonction du temps, celle-ci étant directement liée à la conductivité du milieu. La profondeur d'investigation de la méthode, de l'ordre de 250 m en moyenne dans le cadre de la mission menée à Mayotte, dépend de l'intensité du courant injecté, de l'aire de la boucle d'émission, du niveau de bruit de la mesure ainsi que de la conductivité du sous-sol.

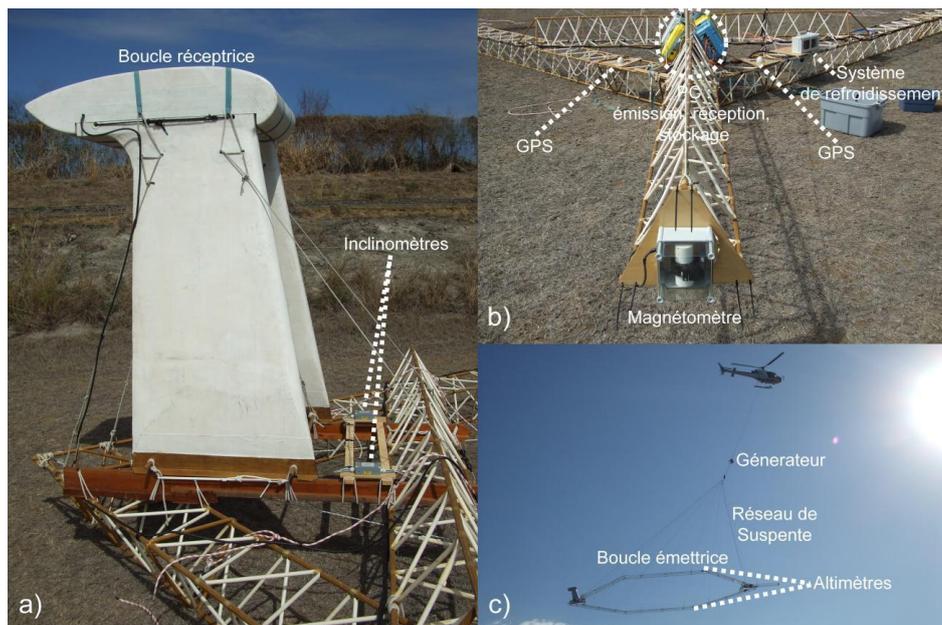


Figure 86 : Vues du système SkyTEM® ; (a) arrière et (b) avant de la boucle émettrice et (c) en plein vol

8.1.2. Description des données électromagnétiques aéroportées sur les secteurs d'intérêt

a) Acquisition de données

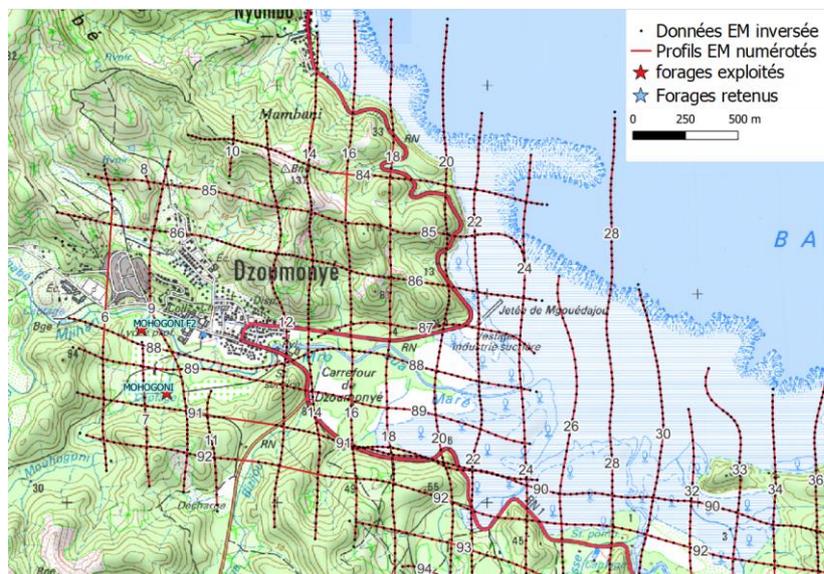
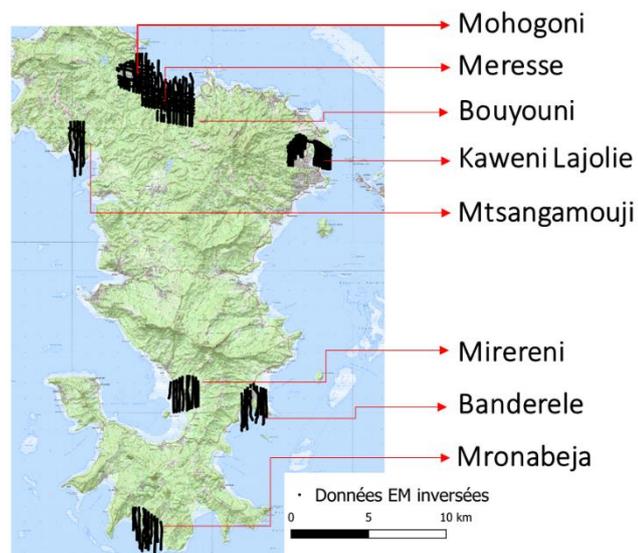
Le levé électromagnétique aéroporté (« Airborn, ElectroMagnetism » en anglais), AEM de l'île de Mayotte, effectué par l'université d'Aarhus en partenariat avec le BRGM, s'est déroulé du 06 octobre au 10 novembre 2010. Il comprend 3000 km sous la forme de lignes de vol nord-sud espacées de 200m. Des zones d'intérêt pour les risques naturels ou l'hydrogéologie ont également fait l'objet d'une densification. Celle-ci a consisté soit en l'acquisition de données supplémentaires selon une direction différente, soit en un resserrement local des lignes de vol. Lors d'un vol, la mesure est prise sans discontinuer et à pas régulier, ce qui, dans le cas du levé de l'île de Mayotte, représente en moyenne un point de donnée tous les 30 m environ, suivant les lignes de vol.

b) Retraitement des données

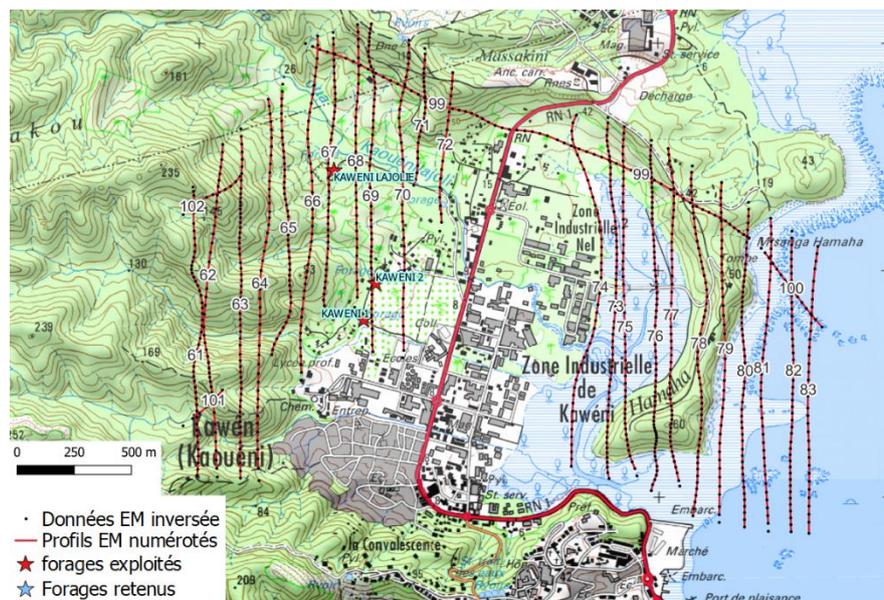
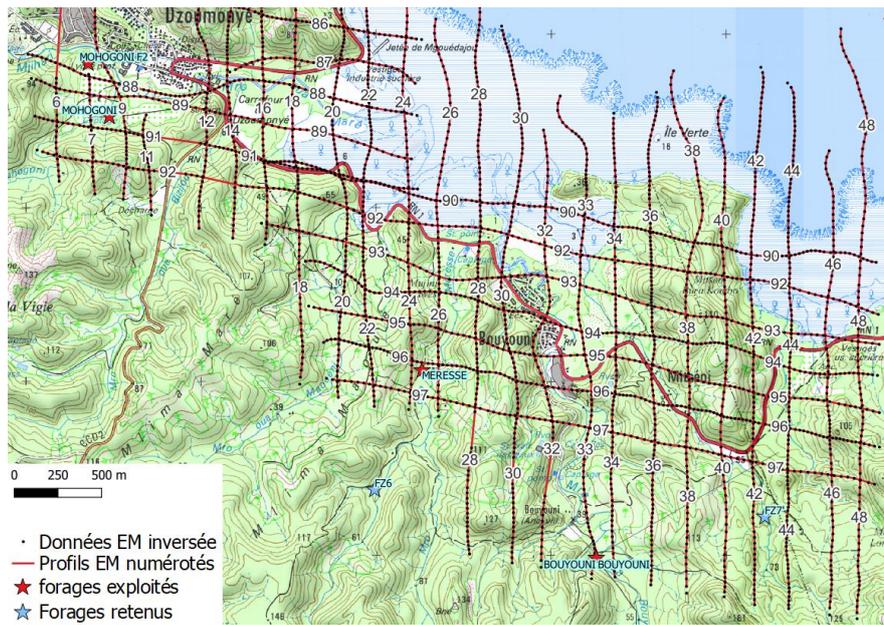
Les données acquises dans le secteur étudié ont été retraitées dans le cadre de ce projet afin d'optimiser l'imagerie. Un traitement basé sur l'utilisation de la décomposition en valeurs singulières a été utilisé (Reninger et al., 2020). Ce traitement permet de « débruiter » le jeu de données tout en conservant la donnée aussi brute que possible. Nous récupérons également toute donnée exploitable, non acquise sur les lignes de vols mais provenant des différents allers-retours de l'hélicoptère sur la zone. Ce traitement est complété par une édition manuelle afin de supprimer le bruit et de conserver le maximum de données exploitables.

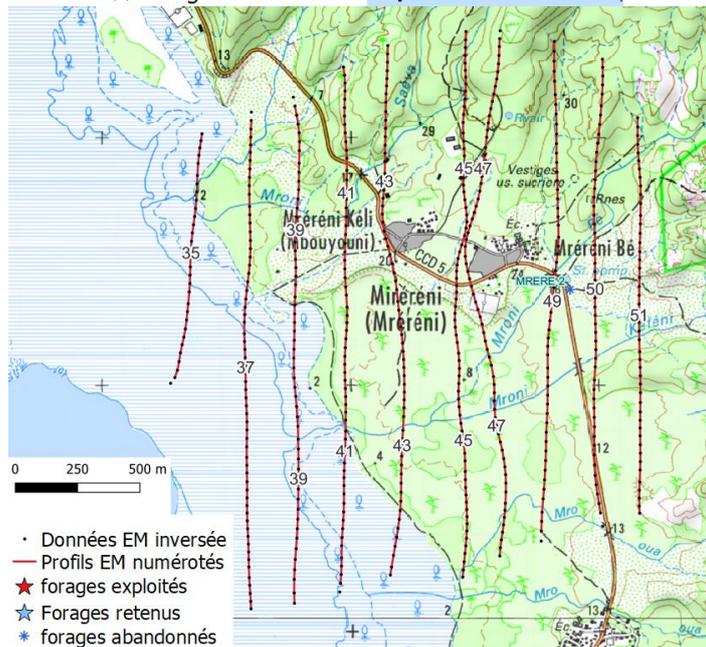
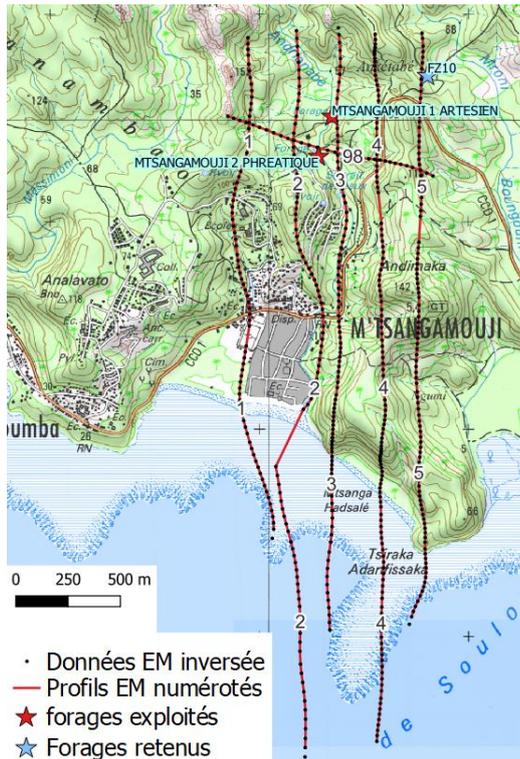
La Figure 87 localise les données qui ont été retraitées et analysées dans le cadre de cette étude.

Caractérisation de l'intrusion saline aux droits de zones dites « sensibles » sur le territoire de Mayotte



Caractérisation de l'intrusion saline aux droits de zones dites « sensibles » sur le territoire de Mayotte





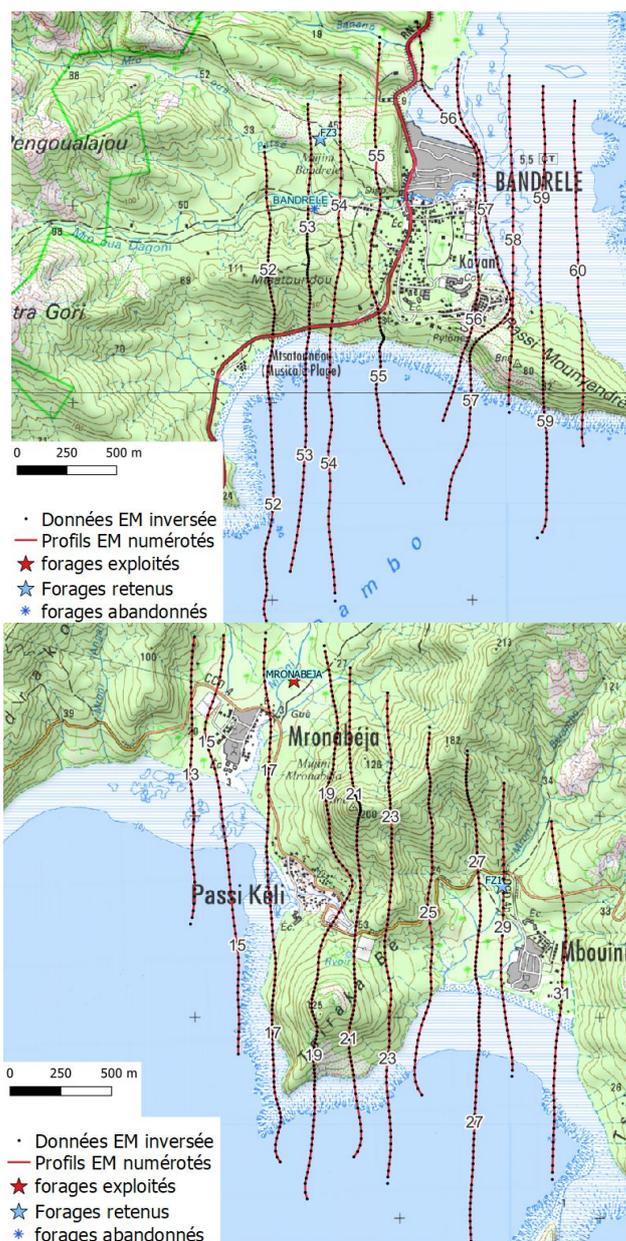


Figure 87 : Localisation des données de géophysique aéroportée retraitées par le BRGM dans le cadre de cette étude sur fond topo IGN.

- Prétraitement des données

Le but du pré-traitement est de préparer les données à l'inversion et de les adapter à l'algorithme utilisé. En pratique, le traitement des données acquises comprend plusieurs étapes:

- Le traitement des données de navigation (GPS, d'altitude et d'attitude de la boucle);
- Le filtrage des données TDEM (Time Domain ElectroMagnetic) ;
- L'édition manuelle des données TDEM.

Le traitement des données de navigations a été précédemment évoqué, les deux autres étapes sont des traitements réalisés dans ce secteur spécifiquement pour cette étude.

La mesure EM est extrêmement sensible aux champs EM « ambiants » aussi bien naturels qu'artificiels, ces derniers induisant un bruit sur la donnée. Comme source naturelle de bruit, on peut citer les « spherics », ondes EM issues de l'activité orageuse, se propageant dans l'ionosphère; les sources artificielles de bruit comprennent, quant à elles, toutes installations humaines interagissant avec ou produisant un champ électromagnétique. Afin de garder uniquement les mesures fiables, il est donc nécessaire de les filtrer dans le but de « débruiter » le jeu de données. Le traitement appliqué par le BRGM est basé sur l'utilisation de la décomposition en valeurs singulières (Reninger et al., 2011, 2015). Certains bruits persistent car ils sont très difficiles à détecter au moyen de procédures numériques: une édition manuelle des données TDEM a donc complété les précédents traitements. Une inspection systématique des décroissances mesurées et leur édition manuelle ont été réalisées par le BRGM sur la zone d'étude. Cela permet également de récupérer davantage de données par rapport au traitement réalisé par le prestataire à la fin de l'acquisition en 2010.

- Inversion et préparation des données

Le principe de l'inversion en géophysique est de retrouver les propriétés physiques du sous-sol à l'origine des différents signaux mesurés (i.e. ici les décroissances EM), affectés par les caractéristiques de celui-ci. Pour ce faire, il est nécessaire de trouver le modèle schématisant le sous-sol qui minimise la différence entre les données mesurées et celles prédites par la théorie ; celui-ci est obtenu par itération de modélisations EM et comparaisons à la donnée mesurée. Les modèles pris en considération à cette étape permettent donc d'imager les contrastes de résistivité dans le sous-sol.

Dans le cadre de cette étude, l'inversion utilisée considère des modèles 1D (selon la profondeur) constitués de n couches, chacune caractérisée par une épaisseur et une résistivité. L'inversion, dite « Smooth », a été réalisée avec le logiciel Aarhus Workench en considérant 30 couches entre 0 et 400 m de profondeur ; l'épaisseur des couches augmentant de façon logarithmique avec la profondeur et la couche la plus fine ayant une épaisseur de 3 m. Seule la résistivité peut varier pendant le processus d'inversion. Ce type d'inversion a l'avantage d'être moins dépendant des a priori définis pour initialiser le calcul (i.e. reflétant notre appréhension de la géologie), mais il a le désavantage d'imager des variations lissées de la résistivité selon la profondeur. Afin de stabiliser le processus, des contraintes spatiales entre les différentes couches des différents modèles sont également appliquées lors de l'inversion (cf. Spatially Constrained Inversion ; Viezzoli et al., 2008). A la fin de cette inversion, la profondeur d'investigation de chaque mesure est également évaluée afin de calculer une limite basse (hypothèse pessimiste ; profondeur d'investigation la plus faible) et une limite haute (hypothèse optimiste ; profondeur d'investigation la plus importante). A l'issue de l'étape d'inversion, nous obtenons donc, à l'emplacement de chaque mesure, un modèle 1D constitué de 30 couches et défini par 30 épaisseurs et résistivités sensé rendre compte des contrastes de résistivité existants en subsurface.

La Figure 88 présente un exemple de modèle obtenu par inversion, la coloration étant directement liée à la valeur de résistivité en Ohm.m.

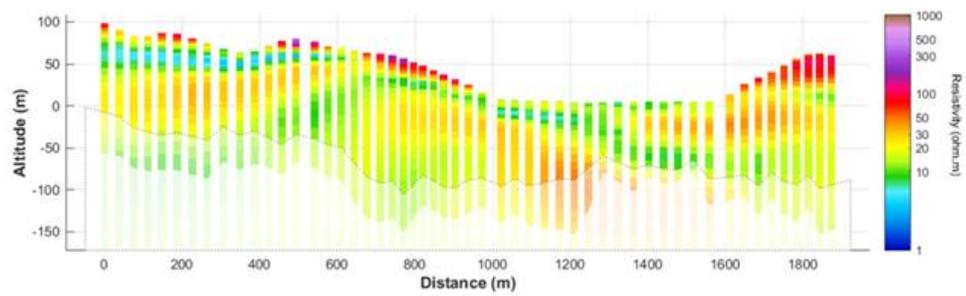


Figure 88 : Exemple de sondages de résistivité obtenus après inversion. La profondeur d'investigation de la méthode EM est représentée par un masque blanc, et la zone de confiance réduite est représentée par une tranche en légère transparence.

8.2. LES INVESTIGATIONS PAR TOMOGRAPHIE DE RESISTIVITE ELECTRIQUE AU SOL

En milieu volcanique, les aquifères sont discontinus et les intrusions salées, contraintes par les structures géologiques de caractéristiques hydrodynamiques variables, sont complexes.

L'objectif des Tomographies de Résistivité Electrique, TRE au sol est de contribuer à préciser la cartographie en profondeur de l'interface eau douce-eau salée en prenant mieux en compte la complexité des géométries souterraines que ne le fait l'AEM et en se plaçant au plus près des forages en exploitation ou prévus pour être exploités. Ainsi, ces investigations seront réalisées au plus près des forages (dans les limites des contraintes de terrain) et permettent de faire la liaison avec les profils AEM qui peuvent être situés à plus de 200 m des forages. Elles ont été réalisées à l'étiage pour avoir l'intrusion la plus importante.

La méthode de prospection par panneaux électriques est une méthode géophysique visant à imager les variations de résistivité en profondeur et le long d'un profil. Elle réalise à la fois une investigation en profondeur comme un sondage électrique et une investigation en profil comme un traîné électrique (cf. les principes de la méthode TRE en 7.4). Le résultat produit est la distribution des résistivités électriques en profondeur dans un panneau vertical sous le profil de mesure. Comme pour l'AEM, la résistivité électrique rend compte de la nature des roches, de la présence d'argile, de la présence de fluides ainsi que de leur minéralisation.

Après traitement des données, les résultats seront présentés sous forme d'une coupe montrant la distribution des résistivités calculées le long du profil en fonction de la profondeur.

8.2.1. Sélection des sites pour les investigations par tomographie électrique au sol

Après synthèse des données hydrogéologiques de chaque site et réinterprétation des données AEM et sur la base de ces résultats, sept profils sur cinq sites parmi les huit sites d'origine ont été sélectionnés selon les critères suivants :

- Sensibilité des sites à l'invasion salée d'après la synthèse hydrogéologique,
- Cartographie des invasions salées selon les résultats de la réinterprétation des données AEM,
- Priorité des sites pour l'alimentation en eau potable,
- Faisabilité terrain des mesures par tomographie de résistivité électrique.

Caractérisation de l'intrusion saline aux droits de zones dites « sensibles » sur le territoire de Mayotte

Sites	Probabilité d'invasion salée d'après AEM au niveau des forages	Altitude (m)	Conductivité eau de forage (µs/cm)	Forage	Altitude objectif (forage, m)	Priorité end user	Objectifs géophysique sol
Bouyouni Mitseni	Faible	<-100-150	/	Fz7 6ème campagne		2	
Bouyouni Bouyouni	Faible	<-100-150	?	12306X0024 exploité		2	vérifier présence invasion au-delà de -100 et -150 m
Bouyouni Méresse	Faible	<-100-150	270	12306X0046 exploité, FZ6 6ème campagne		3	vérifier présence invasion au-delà de -100 et -150 m
Mohogoni	Possible	-50 à -100	?	12307X025 exploité	30-80	6	vérifier présence invasion entre -100 et -150 m
M'Tsangamouji	improbable, trop profond	<-100-150	240-300	exploité	30-80	4	Interférences attendues des réseaux enterrés conducteurs ; résultats attendus peu significatifs p/r aux résultats AEM
Mirereni	possible mais non prouvée, terrain conducteur jusque vers 50-100 m de profondeur avec pendage vers l'océan	-20	275	exploité	50-60	7	application improbable car le conducteur incliné vers la mer correspond probablement à un niveau altéré ; pas de résultats attendus compte-tenu de l'imagerie AEM déjà disponible
Mronabeja	probable à 500 m du rivage, dans la vallée	-10 à -20	647				confirmer l'invasion par répétition mesure à marée haute/basse ?
	possible en profondeur	-100 à -150	647	12318X031 exploité + Fz2 6ème campagne	23-56	5	vérifier présence invasion au-delà de -100 et -150 m
Mbouini	faible à 200 m de la côte	<-20	/				
	possible en profondeur	-100	/	Fz1 6ème campagne		9	vérifier présence invasion entre -100 et -150 m
Kaweni	pas d'info au-dessous de l'altitude -100 m	-100 ?	400-500	exploité	5-30 ?	1	Profil B 2004 : vérifier présence conducteur entre -100 et -150 m ; répétitions A et C

Tableau 15 : Paramètres pris en compte pour le choix des profils à réaliser. Les sites non retenus sont surlignés en bistre.

8.2.2. Moyens mobilisés

a) Personnel

L'équipe d'intervention géophysique était composée de :

- 1 ingénieur géophysicien spécialiste des méthodes électriques : J-M Baltassat, assisté puis remplacé par L. Sadeski, ingénieure géophysicienne,
- 1 technicienne géosciences : N. Hueber.

Ils étaient assistés par 3 manœuvres locaux, employés intérimaires.

Les travaux préalables de débroussaillage ont été réalisés par l'antenne BRGM de Mayotte sous la responsabilité de Tatiana Ratsimihara, L. Sadeski et N. Hueber avec deux ou trois manœuvres locaux.

b) Matériel

L'acquisition des panneaux électriques a été réalisée à l'aide d'un résistivimètre Syscal-Pro (Iris Instruments, France) connecté à 12 flûtes de 8 électrodes, soit 96 électrodes métalliques régulièrement espacées de 10 mètres sur 950 m. L'énergie permettant d'alimenter l'injecteur de courant provenait d'une batterie externe (12V, 70 Ah). L'espacement inter-électrodes de 10 m a été choisi afin d'assurer à la fois une résolution acceptable des terrains de surface, et l'obtention d'une profondeur d'investigation maximale d'environ 150 m à 300 m selon les configurations de mesure.

Le matériel utilisé comprend :

- 1 Résistivimètre SYSCAL Pro (convertisseur interne DC/DC de 250 W),
- 12 flûtes de 8 traces, intertrace de 10 m,
- 96 électrodes,
- 96 cordons,
- 6 massettes,
- 2 batteries de voiture 70 Ah,
- 10 connecteurs de flûtes,
- 1 GPS différentiel Trimble GEOXH7000,
- 2 véhicules tout terrain.

8.2.3. Calendrier et conditions d'exécution

L'opération a été réalisée en période de pandémie de COVID19 avec son lot d'impondérable. Ainsi la livraison du matériel géophysique expédié depuis la France a été retardée de 6 jours après que les colis ont été déchargés une première fois pour donner la priorité à un fret de matériel médical, suite à cet incident les colis ont été égarés puis une fois retrouvés ont dû laisser la priorité à un fret de matériel de la gendarmerie.

Suite à ce retard, les travaux ont été réalisés dans un délai très contraint et étaient rendus difficiles par les conditions d'accès dans des terrains parfois escarpés qui ont conduit à de longues journées de travail.

La météo était favorable, avec quelques précipitations éparses certains jours.

8.2.4. Mise en œuvre

a) Mise en place des électrodes sur les panneaux électriques

La mise en place des électrodes n'a pas présenté de difficulté majeure avec des résistances de prise¹¹ le plus souvent peu élevées, généralement comprises entre 0.3 et 3 kOhm.

b) Configurations d'acquisition des tomographies électriques

Une configuration d'acquisition est une manière d'agencer géométriquement les électrodes de courant et de potentiel en surface. Il en existe plusieurs, chacune présentant des avantages et des inconvénients, notamment en ce qui concerne l'amplitude du signal, la profondeur d'investigation et la résolution.

La configuration dipôle-dipôle (DD) offre une bonne résolution des terrains de sub-surface et des discontinuités verticales. Elle est moins sensible aux effets latéraux que le dispositif Wenner-Schlumberger. En revanche, le rapport signal/bruit décroît rapidement en fonction de la longueur du dispositif et donc de la profondeur d'investigation. Pour les sites les plus conducteurs recouverts par des terrains de surface résistants (limitant le courant d'émission), la profondeur d'investigation est inférieure à celle du dispositif Wenner-Schlumberger

La configuration Wenner-Schlumberger (WS) est beaucoup plus intégrante et, de ce fait, plus sensible aux effets latéraux. La résolution des horizons de sub-surface est sensiblement plus faible et celle des structures en général, plus globale. Son intérêt majeur est la profondeur d'investigation atteinte (de l'ordre de 150m pour un dispositif de 950 m de long dans les conditions favorables) grâce à un meilleur rapport signal/bruit. Nous avons utilisé lors de cette étude, un dispositif Wenner-Schlumberger réciproque (WSR) qui est équivalent au Wenner-Schlumberger classique mais permet d'optimiser les séquences de mesure en utilisant les dix canaux d'acquisition du Syscal Pro et ainsi réduire le temps d'acquisition d'au moins moitié.

La configuration Pôle-dipôle (PD) allie une bonne résolution des structures et une profondeur d'acquisition importante. Un des pôles d'injection est rejeté à « l'infini » soit en réalité à une distance telle que son influence sur le champ électrique mesuré soit négligeable. Dans cette configuration, l'amplitude du signal mesuré est amplifié par rapport au Wenner-Schlumberger et la profondeur d'investigation est augmentée pour atteindre près de 300 m pour un dispositif de 950 m de long.

8.2.5. Travaux réalisés

Les caractéristiques des profils TRE réalisés sont rassemblées dans le Tableau 16. Les profils de Mohangani et Kaweni ont été réalisés en configuration Wenner-Schlumberger et dipôle-dipôle (WS+DD) pour une profondeur d'investigation maximale de près de 150 m.

¹¹ La résistance de prise est la résistance (R) des terrains (effet majoritaire à proximité de l'implantation de l'électrode) selon la loi d'Ohm ($U=RI$) ; quand la résistance augmente, l'intensité, I transmise dans le sol diminue et le signal mesuré diminue en proportion. Pour compenser, on peut augmenter la tension, U mais dans les limites de performance de l'équipement utilisé.

Pour les sites de Mronabeja, Mbouini, Méresse et Bouyouni, où l'objectif de l'investigation est de vérifier la présence de l'intrusion salée au-delà de 100-150 m de profondeur et étant donné la priorité donnée à ces sites, la configuration pôle-dipôle (PD) a été appliquée de manière à augmenter l'investigation en profondeur.

D'après Loke (2018), si l'électrode lointaine est à plus de 5 fois le plus grand espacement entre émission et réception (C1-P1, cf. 7.3.) alors l'erreur causée en ne tenant pas compte de la position de l'électrode C2 est inférieure à 5%. Considérant que les plus grands espacements utilisés dans notre cas atteignent 700 m, l'électrode lointaine devrait être éloignée à plus de 3500 m du centre du dispositif de mesure. Comme nos distance d'éloignement sont inférieures à cette valeur, nous avons tester l'effet produit sur le résultat en inversant les données en considérant l'électrode à l'infini et à sa distance réelle. Les résultats des deux inversions sont semblables dans tous les cas et on considère que seule la profondeur d'investigation est affectée et peut être estimée comme limitée à un maximum de 250 m.

Site	Profils 2021	Longueur (m)	Configuration de quadripôle	Distance horizontale à l'électrode lointaine p/r au centre du profil (m)
Kaweni	P1	950	WS+DD	
Kaweni	P3	470	WS+DD	
Bouyouni	P4	870	PD	2350
Méresse	P5	870	PD	2650
Mronabeja	P7	790	PD	2250
Mohogoni	P8	870	WS+DD	
Mbouini	P10	950	PD	3010

Tableau 16 : Caractéristiques des profils réalisés.

8.2.6. Paramètres d'acquisition

Sur tous les panneaux électriques et pour l'ensemble des configurations, les paramètres d'acquisition ont été les suivants :

- Durée des créneaux d'injection : 0.5 s
- Nombre de cycle de mesures : 3 à 6 (3 si $Q < 0.5\%$, 6 si $Q > 0.5\%$) pour les configurations Wenner-Schlumberger et dipôle-dipôle
- Seuil de Déviation standard : $Q = 0.5\%$
- Voltage d'injection : 400 V.

8.2.7. Positionnement des mesures

Les profils de mesures sont localisés grâce à un levé DGPS avec un GPS Trimble Geo7X associé à une antenne externe de type Tornado. Ce récepteur permet de capter les satellites GPS ainsi que les satellites GLONASS (en moyenne entre 13 et 18 satellites, dans les conditions favorables). Les valeurs obtenues sont corrigées en post-traitement, à l'aide des éphémérides IGN de la station MAYG (Annexe 12). Ce post-traitement permet d'aboutir à une précision en X, Y de l'ordre de 10 cm (dans les conditions optimales d'utilisation).

La précision sur les levés altimétriques (Z) est fonction de la couverture végétale et du relief. Certains profils présentent une couverture végétale importante qui a pu gêner les mesures DGPS. Certaines valeurs de Z qui paraissent aberrantes par rapport au reste du profil sont écartées.

8.2.8. Traitement des données

Le filtrage des données a été réalisé grâce au logiciel X2IPI de l'Université de Moscou après export du fichier de données au format .txt en sortie de Prosys.

Pour le WSR, le filtrage a été réalisé selon le paramètre de qualité, Q et le niveau de voltage, V tels que $Q < 5\%$: les mesures en dehors de ces critères sont rejetées. La procédure est ensuite complétée par une édition manuelle conduisant à éliminer les points aberrant résiduels. Les profils P3 n'a pas été filtré et le profil P8 n'a eu besoin que d'une édition manuelle limitée des points aberrants. Les mesures WSR sont globalement de très bonne qualité avec un taux de conservation des mesures après filtrage compris entre 95 et 100 %.

Les configurations DD sont beaucoup plus affectées par le bruit (du fait d'une atténuation plus forte du signal en profondeur dans cette configuration) et le filtrage, réalisé selon les paramètres $Q < 5\%$ et $V > 0.3$ mV, est un plus sévère que celui appliqué pour le WSR. Les taux de conservation sont compris entre 75 et 83 %.

Les tomographies PD ont été filtrées selon le paramètre de qualité, Q ($Q < 10$ pour P4) et/ou le niveau de voltage, V ($V > 0.15-0.2$ mV pour P4 et P5). Les profils P7 et P10 n'ont subi qu'une édition annuelle. Les taux de conservation sont très élevés (97 à 100%).

Les données sont de bonnes qualités et les résultats d'inversion peuvent être considérés comme fiables.

Tomographie	Dispositif quadripôle	% de mesures conservées après filtrage WSR/DD	Coefficient d'ajustement du résultat d'inversion (%)
P1	WSR+DD	95/75	3.3/ 7
P3	WSR+DD	100/83	7.6/ 7
P4	PDP	97	8.5
P5	PDP	99	4.1
P7	PDP	99	1.9
P8	WSR+DD	100/80	6.4
P10	PDP	99	2.0

Tableau 17 : Paramètres de traitement et d'inversion des tomographies

8.2.9. Inversion/modélisation

Les paramètres utilisés pour l'inversion des données de tomographie avec le logiciel RES2DINV64 sont listés dans l'Annexe 13. Les inversions ont été réalisées en mode « blocky » (Loke 2001, correspond au paramètre « Robust » dans le logiciel RES2DINV) qui est particulièrement adapté pour bien résoudre les limites entre faciès de résistivités contrastées telles qu'attendues entre coulées basaltiques massives peu altérées et les séries volcaniques plus ou moins altérées. Le mode « blocky » permet une définition plus précise des interfaces entre les compartiments de résistivités contrastés tout en offrant une régularisation bien adaptée aux niveaux de bruit élevés ou aux outliers (Loke et al. 2022, Seaton et Burbey 2002). Les artefacts 3D dus à la complexité du milieu volcanique (limite de coulée, etc ...) sont en effet susceptibles de générer des outliers qui seront mieux traités par l'inversion 2D en mode « blocky ».

Les coefficients d'ajustement ou RMS, exprimé en pourcentage (entre la réponse du modèle calculé en résultat d'inversion et les valeurs mesurées), sont généralement compris entre 1.6 et 4.9 pour les configurations WSR indiquant ainsi une bonne qualité de donnée en accord avec les taux élevés de conservation de mesure. Les profils P4 et P5 font exception avec des valeurs à 8.5 et 10.6 dues à un faible niveau de signal imputable aux résistances de prises élevées. Les coefficients d'ajustement de 4.3 à 10.5 obtenus généralement en dipôle-dipôle rendent compte de la qualité des données résiduelles après filtrage. Les valeurs plus élevées ont les mêmes causes qu'en WSR.

Les résultats d'inversion présentés dans l'Annexes 8 montrent les variations de résistivité en pleine échelle. Une même échelle de couleur (limitée entre 2 et 1000 Ohm.m) qui permet une comparaison aisée des résultats des différentes tomographies a été appliquée à l'ensemble des tomographies présentées dans le chapitre résultat. Cette gamme qui également été utilisée dans le rapport de 2016 pour la CAPAM (BRGM/RP-66923-FR couvre l'ensemble des variations observées sur les différentes tomographies et permet une imagerie adaptée aux différentes conditions de l'île.

La bonne qualité globale des données et les bons indicateurs d'inversion permettent de présenter des résultats fiables des tomographies réalisées sur tous les sites.

8.2.10. Synthèses des observations par TRE

Les observations réalisées par TRE sont synthétisées dans le Tableau 18.

Caractérisation de l'intrusion saline aux droits de zones dites « sensibles » sur le territoire de Mayotte

Site	Profil	Altitude. de l'invasion salée potentielle (m)	Unité de résistivité	Résistivité TRE (Ohm.m)	Résistivité AEM (Ohm.m)	Résistivité (Ohm.m) /conductivité (µS/cm) de l'eau de formation	Forage / prof. aquifère	Distance à l'invasion potentielle /aquifère (m)	Evolution de l'invasion potentielle	Recommandations / Remarques
Kaweni	P1	-100 à -75 m	C2	10-20	2-10	22 / 450	12307X0021/ 20-60 m	50 m	Pas d'évolution notable entre 2004 et 2021	Suivi dynamique de l'imagerie de résistivité pendant pompage d'essai ?
Bouyouni-Bouyouni	P4	/	/	/	/		12306X0024 /	/	/	Pas d'intrusion saline identifiée
Bouyouni Méresse	P5	0 à -60	C2	2-20	/	42 / 240	12306X0046 / 25-80 m	30-50	Diminution de la résistivité entre 2001 et 2021 (à confirmer)	Suivi dynamique de l'imagerie de résistivité pendant pompage d'essai
Bouyouni Méresse	P5	0 à 5	C3	2	/	42 / 240	12306X0046/ 25-80 m	0	Diminution de la résistivité entre 2001 et 2021 (à confirmer)	Suivi dynamique de l'imagerie de résistivité pendant pompage d'essai
Bouyouni Méresse	P5	-150	C1	3	4	42 / 240	12306X0046/ 25-80 m	320	/	/
Mronabeja	P7	0	C1	3-7	2-6	15 / 650	12316X0031-32 /	0	Pas d'évolution notable entre 2017 et 2021	Suivi dynamique de l'imagerie de résistivité pendant l'exploitation et pompage d'essais
Mohogoni	P8					30 / 330	12306X0025	0	Pas d'évolution notable entre 2017 et 2021	
MBouini	P10	0	C1	1-3	1-3	/	Proposition de forage Fz1-1	0	Pas d'évolution notable entre 2017 et 2021	Suivi dynamique de l'imagerie de résistivité pendant l'exploitation et pompage d'essais
MBouini	P10	200-250	C2	5-20	/	/	/	/	/	Suivi dynamique de l'imagerie de résistivité pendant pompage d'essai ?

Tableau 18 : Synthèse des observations par tomographie de résistivité électrique et recommandations

8.3. PRINCIPES DES TOMOGRAPHIES DE RESISTIVITE ELECTRIQUE

8.3.1. Principe de la méthode

La tomographie de résistivité électrique (ERT pour Electrical Resistivity Tomography en anglais) est une méthode géophysique permettant d'obtenir la distribution de la résistivité électrique des matériaux (roches ou structures) en profondeur (2D et 3D selon le dispositif d'acquisition mis en place et les procédés d'inversion/modélisation appliqué) à partir de mesures de potentiel électrique en surface. Les termes « panneau électrique » ou « tomographie électrique » sont utilisés pour qualifier une prospection électrique (initialement basée sur quatre électrodes) automatisée le long d'un profil multi-électrodes (2D) ou sur une surface (3D). Ce type d'acquisition présente l'avantage de fournir des résultats fiables en 2D ou 3D, et d'être rapidement mis en œuvre.

Le principe de base de la prospection électrique est d'injecter dans le sol un courant électrique d'intensité I entre deux électrodes A et B et de mesurer la différence de potentiel ΔV induite entre une autre paire d'électrodes M et N (Figure 89).

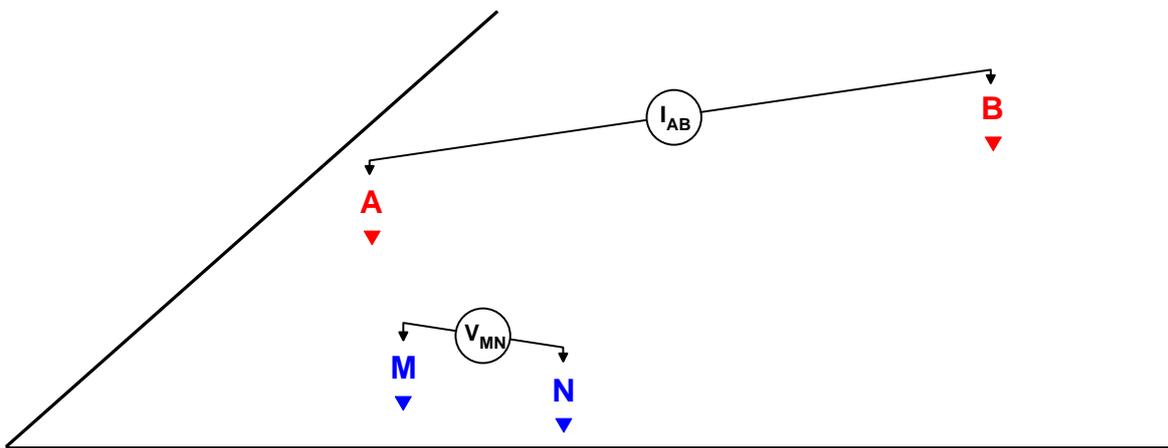


Figure 89 : Principe de la mesure en courant électrique continu

A partir de la valeur du courant injecté I , de la mesure de la différence de potentiel ΔV et de l'écartement entre les différentes électrodes, on peut déterminer la **résistivité électrique apparente** du sous-sol sur base de la loi d'Ohm :

$$\rho_{app} = K \times \frac{\Delta V}{I}$$

où K est un facteur dépendant de la géométrie du dispositif de mesure (Figure 90) :

$$K = 2\pi \times \left[\frac{1}{r_{11}} - \frac{1}{r_{12}} - \frac{1}{r_{21}} + \frac{1}{r_{22}} \right]^{-1}$$

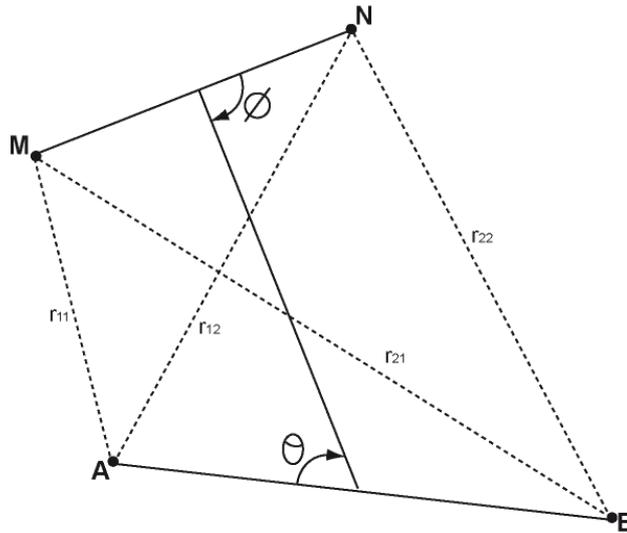


Figure 90 : Disposition générale d'électrodes où A et B sont les électrodes de courant, M et N, les électrodes de potentiel ($0 < \theta, \Phi < \pi$)

La résistivité apparente d'un terrain hétérogène correspond à la résistivité d'un terrain homogène qui, pour une configuration identique des électrodes et un même courant injecté, donnerait la même mesure ΔV . Elle est fonction de la résistivité, de la géométrie des diverses couches et de la disposition des électrodes. Il existe plusieurs dispositifs d'électrodes utilisés en pratique : Schlumberger, Wenner, dipôle-dipôle, pôle-pôle, etc.

8.3.2. Dispositifs d'électrodes / configurations d'acquisition

Une configuration d'acquisition est une manière d'agencer géométriquement les électrodes de courant (AB) et de potentiel (MN) (soit les quadripôles ABMN) en surface. Il en existe plusieurs, chacune présentant avantages et inconvénients. Les différences majeures entre ces configurations sont la distribution des lignes de courant électrique dans le sol et donc la forme des équipotentielles en surface ainsi que la valeur du coefficient géométrique K qui conditionnera les valeurs du courant minimal I à injecter pour mesurer un potentiel électrique minimal U fiable. Selon les équipements utilisés, certains dispositifs sont également plus rapides (dipôle-dipôle) à acquérir que d'autres (Schlumberger) grâce à des acquisitions multi-voies (plusieurs mesures de ΔV pour une injection de courant).

Pour la configuration Wenner, par exemple, la profondeur d'investigation est estimée égale à la moitié du plus grand écartement utilisé entre deux électrodes successives mais elle peut varier suivant la nature des terrains et leur résistivité. L'écartement entre électrodes détermine donc la profondeur d'investigation ainsi que les résolutions horizontale et verticale. Par rapport aux autres configurations, le dispositif Wenner rend les structures plus facilement reconnaissables sur la pseudo-section.

D'une manière générale, la mise en œuvre d'au moins deux configurations d'électrodes permet dans la plupart des contextes de mieux appréhender la géométrie des différents corps en présence. Ci-dessous sont présentées trois configurations souvent mises en œuvre avec les équipements automatisés actuels.

Le dispositif dipôle-dipôle donne une très bonne résolution des terrains de subsurface et pour les discontinuités verticales. Dans cette configuration, le rapport signal/bruit décroît rapidement et la profondeur d'investigation se réduit également (Figure 91).

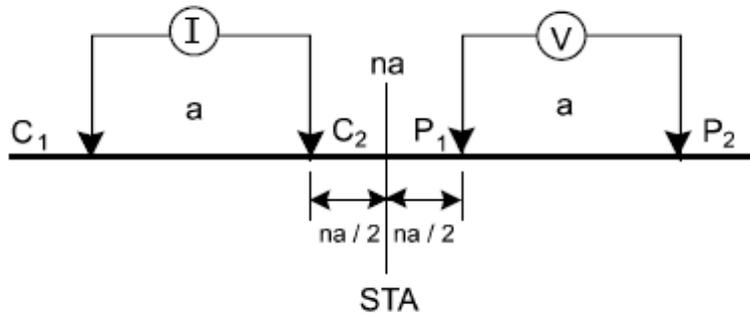


Figure 91 : Configuration dipôle-dipôle

Le dispositif Schlumberger est plus intégrant et, de ce fait, plus sensible aux effets latéraux par rapport au profil de mesure. La résolution au niveau des horizons de sub-surface est moins bonne et celle des structures plus globale. Son intérêt majeur est la profondeur d'investigation atteinte (de l'ordre de 80m pour un dispositif de 500 m de long) grâce à un meilleur rapport signal/bruit (Figure 92).

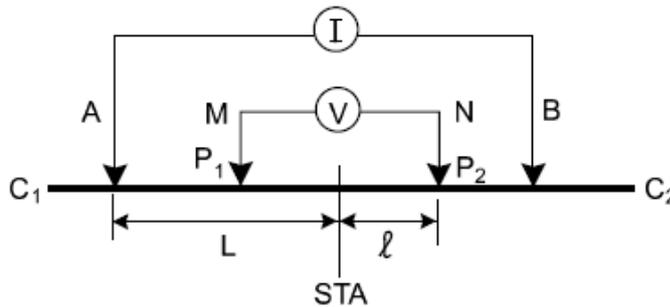


Figure 92 : Configuration de Schlumberger

Le dispositif pôle-dipôle (Figure 93) allie une bonne résolution avec une bonne profondeur d'investigation. Il nécessite néanmoins de mettre en place et maintenir une électrode lointaine (au moins 5 à 10 fois le plus grand écartement).

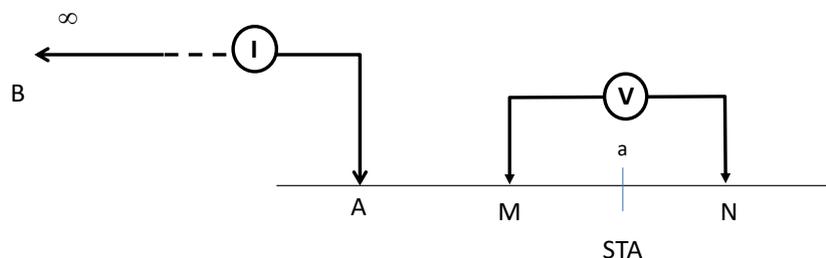


Figure 93 : Configuration dipôle-dipôle

Le dispositif Wenner est un dispositif présentant la particularité d'avoir trois espacements identiques entre les quatre électrodes. Avec ce dispositif, les résistivités apparentes sont moins affectées par les variations latérales superficielles (Figure 94).

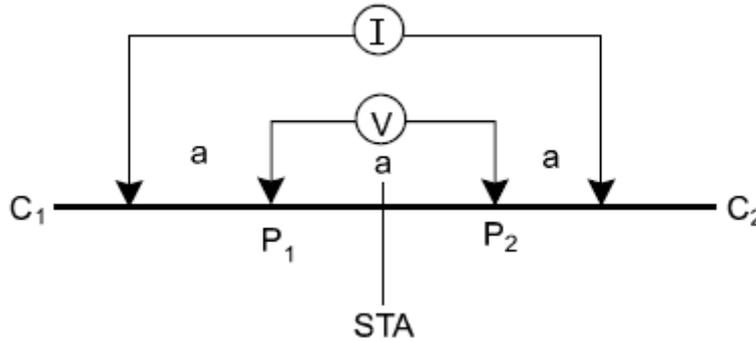


Figure 94 : Configuration Wenner

8.3.3. Construction d'une pseudo-section de résistivité apparente

Après filtrage des données brutes de résistivité apparente (mesurées sur le terrain) sur la base de critère de qualité, de courant émis ou de potentiel mesuré (logiciels Iris Instruments et X2ipi), celles-ci sont agencées de manière à obtenir une coupe (pseudo-section) de résistivité apparente du sous-sol. Cette dernière est construite (automatiquement) en reportant la valeur de la résistivité apparente mesurée au centre du dispositif et à une pseudo-profondeur dépendant de l'écartement entre les électrodes. Cette représentation conduit à une image pour laquelle les valeurs de résistivité (puisqu'apparentes) et celles de profondeur ne sont pas correctes (Figure 95).

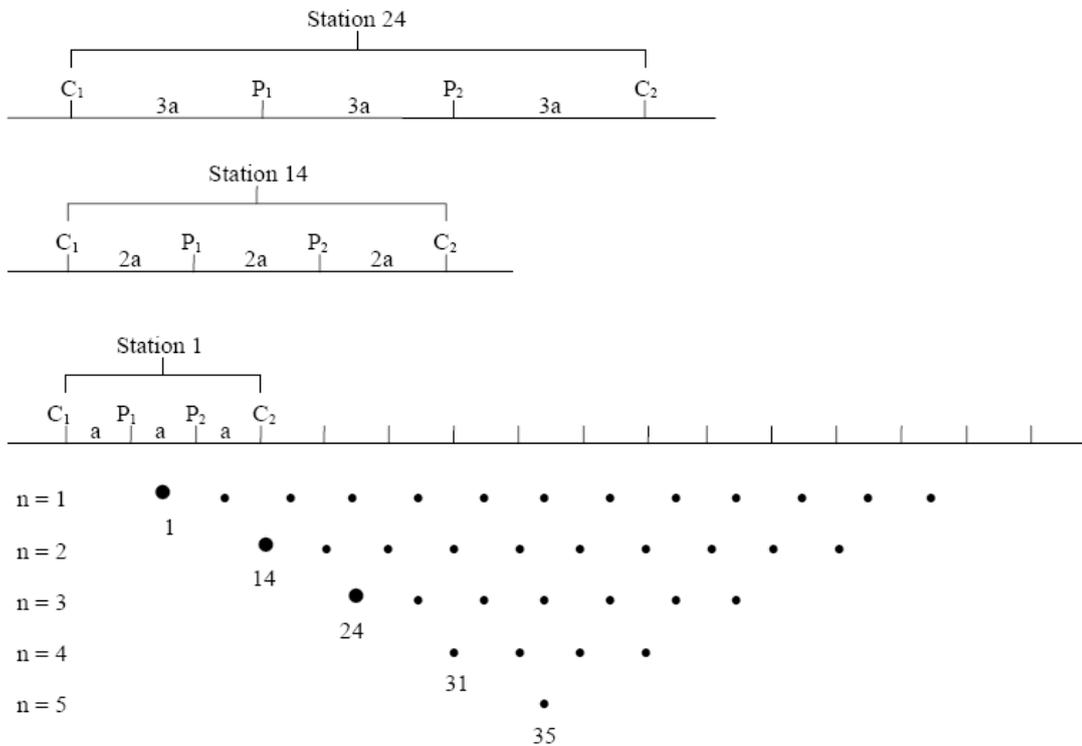


Figure 95 : Principe de construction d'une pseudo-section pour un dispositif Wenner

8.3.4. Traitement et inversion des données

Afin d'obtenir une image quantitative représentant les variations de résistivité réelle (et non apparente) en fonction de la vraie profondeur, il est nécessaire d'inverser la pseudo-section (Figure 96). Cette étape est réalisée à l'aide du logiciel Res2DInv (Loke & Barker). Cette inversion des données est réalisée suivant un processus itératif qui tente de minimiser l'écart entre la pseudo-section de résistivités apparentes mesurées et une pseudo-section recalculée à partir d'un modèle de résistivité électrique. Ce modèle est modifié à chaque itération jusqu'à ce que les données mesurées et calculées atteignent une concordance acceptable ou jusqu'à ce qu'aucune nouvelle amélioration ne soit possible. Afin de prendre en compte les morphologies rencontrées, la topographie de chaque profil est incluse lors de l'inversion (Figure 96).

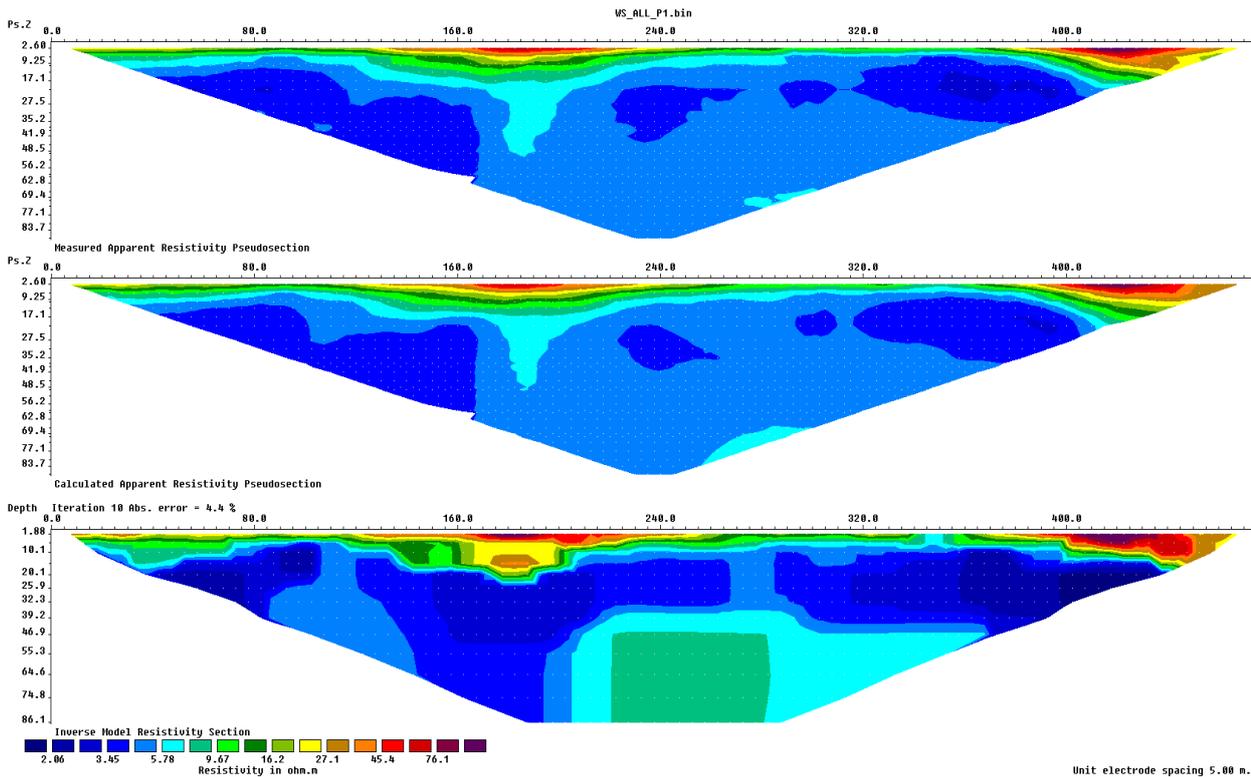


Figure 96 : Résultats complets (en images) d'une inversion. En haut la pseudo-section de résistivité apparente mesurées. En bas, le modèle de résistivité issu de l'inversion. Au centre, la pseudo-section de résistivité calculée sur la base du modèle de résistivité. L'erreur (RMS) constitue la différence entre les deux premières pseudo-sections (ici 4.4%).

La pseudosection de résistivité « vraie » (illustration du bas de l'Figure 96), résultat de l'inversion, sera ensuite utilisée pour l'interprétation. Elle fournit des informations quantitatives permettant de caractériser l'origine des différentes anomalies mises en évidence : résistivité, géométrie des horizons, profondeur, pendage. Les résultats de l'inversion sont présentés sous forme d'une coupe (section) semblable à celle de résistivité apparente présentant la distribution des résistivités calculées le long du profil en fonction de la profondeur. Cela pour les différentes configurations d'acquisition choisies.

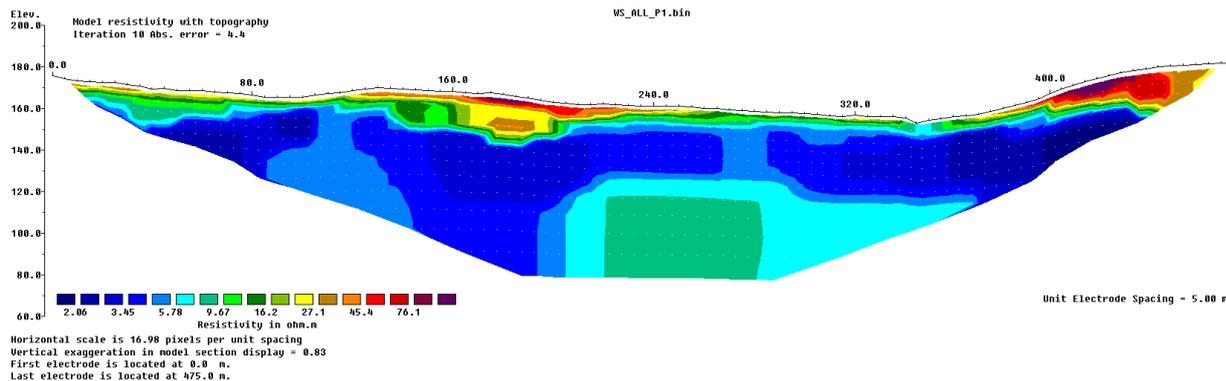


Figure 97 : Résultat de l'inversion de la Figure 96 avec la topographie.

Pour chaque cas, des paramètres d'inversion sont choisis de manière à optimiser la réponse du modèle en incluant une information « à priori ».

Quelles que soient les performances des algorithmes de convergence, en l'absence d'étalonnage (résistivité étalonnée, profondeur des interfaces géoélectriques) les paramètres fournis par l'inversion ne sont pas définis de manière univoque (il y a plusieurs solutions satisfaisant au même jeu de données) et sont soumis à des principes d'équivalence. Cette indétermination ne peut être évaluée qu'en testant différentes solutions ou en contraignant l'inversion au moyen de paramètres (résistivités, épaisseurs, profondeurs) obtenus par d'autres moyens (autre méthode géophysique, diagraphies, forages, observations de terrain).

8.3.5. Applications

La tomographie électrique s'applique d'une manière générale à caractériser les milieux présentant un contraste de résistivité par rapport à leur environnement dans les limites de la résolution de la méthode. La résistivité du sous-sol dépend de sa teneur en fluide, de la résistivité de ce fluide et de sa minéralogie (en particulier de sa teneur en argile). Le paramètre résistivité est ainsi généralement un bon descripteur de la géologie et un bon indicateur des propriétés hydrogéologiques du sous-sol.

La tomographie électrique proche surface (< 100m) s'applique globalement à toutes les sciences environnementales dans des domaines divers et variés.

- Hydrogéologie (géométrie et qualité des aquifères), profondeur du substratum, identification d'invasions salines en milieu côtier
- Géologie : identification de contact géologique ou tectonique
- Environnement : suivi de panache de contamination dans le sol ou dans un aquifère
- Risques naturels : délimitation de la base de glissements de terrain
- Dans le domaine minier (souvent associée à des mesures de polarisation provoquée (PP)), pour mettre en évidence des corps minéralisés
- En archéologie pour l'identification de structures enterrées
- Risques naturels : recherche de cavité en proche surface
- Géotechnique : qualité de fondations
- Volcanologie : identification des zones de fortes altérations hydrothermal

8.4. ANNEXE PHYSICO-CHIMIQUES

8.4.1. Paramètres mesurés sur le terrain

Les paramètres finaux (à stabilité) sont ceux indiqués en rouge.

Ouvrage	Date	Heure	T (°C)	Cond25 (µS/cm)	pH	O ₂ (%)	O ₂ (ppm)	Eh (mV, C/A/T ESH)	Prélév. O/D et 11B	Prélév. C/A/T	Prélév. O/D et 11B	Débit pompe (m ³ /h)	Vol. eau forage (m ³)	Vol. eau pompe (m ³)	N ₂ O ₄ / repère (m)	Remarques	
MITSANGA F2 12306X0016	08/11/2021	10:00															Forage relancé par l'exploitant (arrêt depuis 30 min.) robinet acier zingué (?) + raccord en acier rouillé
		10:05	28.5	356	8.06	102.1	7.86	475									
		10:10	28.5	358	8.06	107.9	8.24	459									
		10:15	28.5	363	8.04	118.7	9.18	452									
		10:20	28.5	365	8.04	116.8	9.01	444	X								
MITSANGA F1 12306X0017	08/11/2021	10:35	28.5	364	8.01	94.7	7.3	429									fin prélèvement
		10:50	28.3	265	8.58	1.4	0.11	412									en marche continue
		10:55	28.2	265	8.5	1.1	0.08	375									robinet acier zingué (?) + raccord en acier rouillé
		11:00	28.2	265	8.5	1	0.08	351									
		11:05	28.2	265	8.53	0.7	0.06	332	X								fin prélèvement
KAWENI Forage 12307X0021	08/11/2021	11:15	28.2	265	8.51	1.1	0.09	312									en marche continue; valeur monito Endress-Hauser: 28.4°C et 470 µS à 25°C)
		14:05	28.8	467	6.84	39.3	3.02	407									robinet laiton
		14:10	28.7	467	6.81	38.9	2.99	298									
		14:15	28.7	466	6.73	38.9	2.99	289									
		14:20	28.7	466	6.73	39	3.01	290	X								
BOUYOUNI BOUYOUNI FOR082 12306X0024	09/11/2021	14:38	28.7	466	6.77	39.1	3	287									fin prélèvement
		09:00	27.8	321	7.64	29.1	2.27	393				30					pas d'adaptateur tuyau: attention mesures O2!
		09:05	27.8	321	7.65	31.8	2.47	392									Piquage semble OK
		09:10	27.9	322	7.66	28.4	2.22	391									cond = 312 µS sur le monitoring
		09:15	27.9	322	7.67	28.2	2.2	390	X			X					pas de mesure après prélèvement (pas d'adaptateur tuyau)
BOUYOUNI MERESSE 12306X0046	09/11/2021	09:55	28.2	244	7.24	49.9	3.86	427				12.5					robinet laiton
		10:00	28.1	244	7.22	49.2	3.84	428									
		10:05	28.1	245	7.24	51.5	4.03	425	X								pas de mesure après prélèvement (pas d'adaptateur tuyau)
		10:15	28.1	243	7.31	48.9	3.83	425									
		10:40	27.7	324	7.11	32.6	2.56	320				35					robinet laiton; cond = 416 µS sur monitoring
MOHOGONI FOR066 12302X0025	09/11/2021	10:45	27.7	324	7.09	30.9	2.43	281									
		10:50	27.7	324	7.07	29	2.28	283									entrée d'air sur tuyau donc O2 surestimé
		10:55	27.7	323	7.08	28.6	2.24	292	X								fin prélèvement
		11:03	27.7	323	7.04	32.4	2.56	303									robinet laiton
		11:20	27.1	340	7.28	3.3	0.26	375				75					
MOHOGONI F2 12302X0101	09/11/2021	11:25	27.1	342	7.27	3.2	0.25	378									
		11:30	27.1	339	7.25	3.1	0.25	378									
		11:35	27.1	339	7.25	3.1	0.25	378	X								pas de mesure après prélèvement





Ouvrage	Date	Heure	T (°C)	Cond25 (µS/cm)	pH	O ₂ (%)	O ₂ (ppm)	Eh (mV, C/A/T ESH)	Prélév. C/A/T	Prélév. O/D et ¹⁵ B	Débit pomp (m ³ /h)	Vol. eau forage (m ³)	Vol. eau pompé (m ³)	N _{15m} / repère (m)	Remarques		
M'RONABEJA 12316X0032	10/11/2021	09:45	27.6	689	6.72	3.7	0.29	436		10					robinet acier zingué?		
		09:50	27.6	689	6.74	3.7	0.3	436							cond = 684 µS sur monitoring		
		09:55	27.6	688	6.72	3.7	0.29	436									
		10:00	27.6	687	6.72	3.6	0.29	435	X								
		10:06	27.6	689	6.69	3.8	0.3	433								fin prélèvement	
0.256																	
M'RONABEJA PIEZO 12316X0031	10/11/2021	10:45								2.25		0.19	0.19	4.89	repère = haut tubage. Diagraphie MAYOTTE002		
		14:20													pompe à 43 m / haut tube (400 Hz)		
		14:25													5.26		
MIRERENI PIEZO 12312X0035	11/11/2021	14:35	27.2	605	6.75	2.9	0.23	292							0.56		
		14:40	27.2	607	6.73	2.9	0.23	285							0.75		
		14:45	27.2	605	6.73	3	0.23	279	X						0.94	déclenchement prélèvement	
		15:35														diagraphie MAYOTTE003	
		09:40									2.20		0.332	0.332	4.01	diagraphie MAYOTTE005	
BANDRELE DAGONI 12313X0033	12/11/2021	11:40													pompe à 44 m / top forage (400 Hz)		
		11:48													4.77		
		11:55	27.6	161.9	5.68	18.1	1.41	455							0.29		
		12:00	27.6	162.3	5.66	18.3	1.43	434							0.55		
		12:05	27.6	162.6	5.65	20.9	1.65	422							0.73		
		12:10	27.7	162.2	5.68	22.7	1.78	409	X						0.91	déclenchement prélèvement	
		13:15														diagraphie MAYOTTE006	
		10:05														4.09	
		10:15														4.18	réf = sommet tubage PVC
		12:00									1.06					diagraphie MAYOTTE007	
12:10	27.5	442	6.53	5.9	0.47	453							0.18	pompe à 35m/ top forage (200 Hz)			
12:15	27.6	441	6.53	5.8	0.45	415							0.26				
12:20	27.5	440	6.59	5.9	0.46	396							0.35				
12:25	27.5	439	6.63	6.4	0.5	382	X						0.44	déclenchement prélèvement			
12:31	27.5	437	6.62	7	0.55	376							0.55	fin pompage à 35 m			
12:40										2.18				4.485	pompe à 46m/ top forage (400 Hz)		
12:45	27.7	438	6.54	5.9	0.47	373							0.18	4.7			
12:50	27.7	437	6.49	5	0.39	361							0.36	4.76			
12:55	27.7	438	6.45	5.3	0.41	360							0.55	4.79			
13:00	27.7	438	6.42	6	0.47	358							0.73	4.81			
13:10	27.6	438	6.43	6.1	0.48	357							1.09	4.83			
13:20	27.6	436	6.4	5.5	0.44	356							1.45	4.85			
13:30	27.6	435	6.37	5.7	0.44	356							1.82	4.87			
13:40	27.6	435	6.36	5.7	0.44	358	X		X				2.18	4.88	déclenchement prélèvement		
14:00	27.6	435	6.4	6.6	0.51	361							2.91	4.88	fin pompage		
14:35														4.24	diagraphie MAYOTTE008		

Ouvrage	Date	Heure	T (°C)	Cond25 (µS/cm)	pH	O ₂ (%)	O ₂ (ppm)	Eh (mV, C/A/T ESH)	Prélév. O/D et ¹¹ B	Prélév. C/A/T	Débit pomp (m ³ /h)	Vol. eau forage (m ³)	Vol. eau pompé (m ³)	N _{stab} / repère (m)	Remarques
		07:50										0.216		6.81	
		08:00													diagraphie MAYOTTE009
		08:30									1.66				pompage à 40m / haut tubage (300 Hz)
		08:35	28.8	536	6.62	27.5	2.13	452					0.14	6.97	
		08:40	28.8	533	6.58	25.6	1.98	450					0.28	6.98	
		08:45	28.8	531	6.63	25.2	1.95	445					0.42	6.99	
	13/11/2021	08:50	28.8	531	6.62	25	1.93	436					0.55	6.99	
		08:55	28.7	531	6.61	25.1	1.94	425					0.69	6.99	
		09:00	28.7	530	6.61	25.1	1.94	418					0.83	6.99	
		09:05	28.7	530	6.61	25	1.94	412	X	X			0.97	6.99	déclenchement prélèvement
		09:20	28.9	529	6.66	26.2	2.01	384					1.38		fin pompage
		09:55												6.8	diagraphie MAYOTTE010

8.4.2. Analyses chimiques (éléments majeurs et traces)

Analyses antérieures (les références sont indiquées) et analyses de novembre 2021 (en rouge).

Caractérisation de l'intrusion saline aux droits de zones dites « sensibles » sur le territoire de Mayotte

N° BSS	source	Date	Al (µg/L)	Ba (µg/L)	B (µg/L)	Br (µg/L)	Ca (mg/L)	Cl (mg/L)	Cond (µS/cm à 25°C)	Cu (µg/L)	Fe (µg/L)	F (mg/L)	HCO ₃ (mg/L)	Li (mg/L)	Mg (mg/L)	Mn (µg/L)	Ni (µg/L)	NO ₃ (mg/L)	PO ₄ (mg/L)	O ₂ dissous (mg/L)	K (mg/L)	pH	Redox (mV, normalement ESH)	SiO ₂ (mg/L)	Na (mg/L)	Sr (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	T (°C)	Zn (µg/L)			
12302X0025_MOHOG	RP-57622-FR	07/05/04					20	13.5	294	30	0.13	143.47			22.03				0.36	4.2	7.69			43.91	22.65		8					
12302X0025_MOHOG	RP-57622-FR	15/08/04					17.52	18.52	289	20	0.13	143.47			11				0.23		7.77							4.77				
12302X0025_MOHOG	RP-57622-FR	23/07/07					16	23.7	292	10	0.22				8.9				0.37		7.75											
12302X0025_MOHOG	RP-57622-FR	30/07/09					23.2	47.9	279	40					15.2					8												
12302X0025_MOHOG	RP-57622-FR	13/08/09					18.4		300	140										7.7												
12302X0025_MOHOG	RP-59550-FR	15/11/10	1.45	6.62	23	75	19.1	18.5	315	0.22	<0.02	0.1	154	0.0003	11.4	<0.1	0.12	1	0.3	0.31	3.7	7.53	232	46.1	23.2	0.234	4.7	27.6	2.34			
12302X0025_MOHOG	ADES	20/03/17					20	19.2	312	0.01	0.07				12	5	1.1	1.2	6.6		7.44			59	24	5.1	27.7					
12302X0025_MOHOG	ADES	17/04/18					22.8	19	309	93	0.076	163.1			12	2	0.8	0.4			3.7	7.4				25	5.3	21.1				
12302X0025_MOHOG	ADES	21/01/20													2	0.2	1			6.4												
12302X0101_MOHOF2	RP-63351-FR	05/09/13					39.99		310										8.11		7.77		357.4							27.1		
12302X0101_MOHOF2	ADES	29/05/17					21	15	316	0	0.08				15	50	0.2	0.5	6.93		7.6			46.8	23	7.6	6.2					
12302X0101_MOHOF2	ADES	20/06/17					20	15	319	0	0.08				16	50	0.2	0.5	4.29		7.6			57.1	23	6						
12302X0101_MOHOF2	ADES	16/04/19													2	0.2	1		3													
12302X0101_MOHOF2	ADES	16/03/21					21.8	15	331	5	0.25	188.4			16	2	0.2	1			2.7	7.7				25	6.1	18.4				
12302X0101_MOHOF2	BRGM 2021	09/11/21	1	2.05	25.2	42.5	19.7	15	339	0.81	<0.1	178	0.0001	15.1	11.2	<0.1	1.2	<0.1	0.29	2.8	7.5	378	53.2	23.9	0.245	6.8	27.1	4.16				
12306X0016_MITSAN2	RP-59550-FR	16/11/10	5.63	1.41	9.94	88.2	14.1	27.6	343	<0.1	<20	0.1	154	<0.0001	11.2	<0.1	1.2	<0.1	8.06	4.2	10.9	180		33.8	0.198	6.6	28.3	2.31				
12306X0016_MITSAN2	ADES	24/10/17					17	29.5	352	0	0.11				12	50	0.2	3.1	8.06		7.95					35	6.9					
12306X0016_MITSAN2	ADES	18/06/19													2	0.2	1.2	5.4														
12306X0016_MITSAN2	ADES	17/03/20					17.3	29	360	5	0.25	166.8			13	2	0.2	3.2	8.2		4.2	8.3			36	35.1	0.219	6.8	6.5	20	0.16	
12306X0016_MITSAN2	RP-68526-FR	25/10/17	4.37	1.36	10.5	80.5	16.4	29.7	351	0.19	0.0001	152	12.7		12.6			3	4.38	4.6	8.1	406.7	24.9	34.3	0.192	7.1	28.6	1.16				
12306X0016_MITSAN2	RP-68526-FR	17/05/18	4.7	1.32	8.89	109	15.8	29.4	351						12.6			3.2	15.2	4.6	8.1	406.7	28.5	34.3	0.192	7.1	28.6	1.16				
12306X0016_MITSAN2	BRGM 2021	08/11/21	4.81	1.45	10.6	59.5	16.6	28.3	365	0.1	161				13.5			4.3	7.3	4.6	8.04	444	28.4	35.9	0.225	7	28.5	1.52				
12306X0017_MITSAN1	ADES	28/10/09							264										1.96		8.82		264									
12306X0017_MITSAN1	ADES	23/03/10	12	10	12	70.9	3.8	19.7	260	0.11	<20	0.1	120	0.0004	0.7	0.4	<0.1	<0.5	0.15	3.44	7.5	8.75	281	20	48	0.05	5	28	5			
12306X0017_MITSAN1	RP-59550-FR	16/11/10	9.15	0.1	13.4	70.9	3.8	19.7	260	0.11	<20	0.1	120	0.0004	0.7	0.4	<0.1	<0.5	<0.1	0.84	6.5	8.72	187	20.4	44.8	0.0138	3.8	28.4	<0.5			
12306X0017_MITSAN1	ADES	04/04/11					4.2	18	264	10	54				8	5	0.5	5.4		5.14	7	8.7	573	21	45.4	4	28.4					
12306X0017_MITSAN1	ADES	01/08/11					4.6	18	261	10	113				9	5	0.5	3.74		3.89	8.3	8.78	389	20	48.2	3	28.2					
12306X0017_MITSAN1	ADES	03/04/12					4.4	19	267	20	118				9	1.29		0.5	3.19		7	8.56	165	20.5	46.6	4	28.2					
12306X0017_MITSAN1	ADES	04/09/12					4	19.1	260	20	115.9				8	5	0.5	0.5	4.05		6.2	8.75	143	18.5	45.5	3.9	27.9					
12306X0017_MITSAN1	ADES	04/03/13					4.3	19.7	264	20	104				9	0.01		0.5	3.19		5.4	8.604	103.3	19.4	45	3.9	28.2					
12306X0017_MITSAN1	ADES	10/09/13					4.5	19.7	249	20	98				11	5	0.5	0.5	3.49		6.2	8.55	126.2	19.6	44.5	4	28.1					
12306X0017_MITSAN1	ADES	18/03/14					4	19.1	259	20	101				8	5	0.5	0.5	4.2		7.1	8.7	131.4	19	47.1	4	28.2					
12306X0017_MITSAN1	ADES	22/09/14					4	19.2	261	20	114				8	5	0.5	0.5	4.31		6.3	8.6	157	21.3	44.3	4	28.7					
12306X0017_MITSAN1	ADES	24/03/15					6.2	20	272	5	133				13	5	0.5	0.5	4.11		7.4	8.2	168	20.9	50	8.2	4.3	28.1				
12306X0017_MITSAN1	ADES	05/10/15					6.4	19	273	8	121.9				11	5	0.5	0.5	4.5		7.5	8.5	335	19.89	51	5.2	30.6					
12306X0017_MITSAN1	ADES	29/03/16					8	19	273	5	0.094	133.7			19	5	0.5	0.5	5.32		7.9	8.5	460	22.62	54	7.2	27.9					
12306X0017_MITSAN1	ADES	20/09/16					7	19	301	0.2	0.089	127			13	5	0.5	0.5	0.1		4.73	7.2	368	22.54	50	7.2	27.8					
12306X0017_MITSAN1	ADES	11/04/17	11	2	9	65	5	20	301	0.2	0.089	127			11	5	0.2	0.5	0.044		5.24	8	375.3	54	7.6	28	2					
12306X0017_MITSAN1	ADES	02/05/17					6.5	18.6	274	0.07	0.11				2.8	50	0.2	0.5	5.24		8.4			18.7	43	4.6	28.3					
12306X0017_MITSAN1	ADES	25/09/17					6	20	273	0.2	0.058	124.4			12	3	0.2	0.5	0.046		6.9	8.6	335.6	50	5.6	28.2	2					
12306X0017_MITSAN1	ADES	17/04/18					8	19	268	13	0.097	126.9			12	12		0.5	0.052		6.7	8.444	399.9	49	5.2	28.2						
12306X0017_MITSAN1	ADES	09/10/18					4	19	266	5	0.1	124.2			1.1	2		0.5	0.056		7.6	8.79	366.7601	50	4.6	28.2						
12306X0017_MITSAN1	ADES	09/04/19					4.7	19	264	5	0.098	119.9			1.5	5		0.5	0.052		7.3	8.47	389.1	50	4.2	28.2						
12306X0017_MITSAN1	ADES	21/05/19													7	0.2	1		6.3													
12306X0017_MITSAN1	ADES	24/09/19					5	19	259	5	0.098	122			1.1	5		0.5	0.053		6.8	8.64	404.4	45	4.7	28.1						
12306X0017_MITSAN1	ADES	16/03/20	9				8	19	297	1	0.25	128.8			1.7	12		0.5	0.049		7.9	8.693	398.5	53	8.5	28.2						
12306X0017_MITSAN1	ADES	01/09/20	12				6	15	259	1	0.072	116.6			1	5		0.5	0.053		0.3	7	292.6	47	3.3	28.1						
12306X0017_MITSAN1	ADES	18/05/21					6.1	17	277	5	0.094	117.7			1.1	8	0.2	1			7.4	8.6			49	4.3	12.7					
12306X0024_BOUY	RP-51969-FR	03/10/02					17.6	10.1	279	50	30				7.3	3290		0.968	0.14		3.9	7.82										
12306X0024_BOUY	RP-57108-FR	14/10/04	50				12.23	22.3	294	20	0.37	144.69			5.64			2.36	0.15		8.29			32.19	51.54	4.72						
12306X0024_BOUY	RP-57108-FR	03/11/04					14.13	14.39	233	30	0.14	108.94			9.55			1.88	0.26			7.56			44.73	17.88	5.08					
12306X0024_BOUY	BRGM 2021	09/11/21	11.1	8.56	19.5	30.1	12.6	15	322	0.29	170	0.0001	10.1				0.6	0.19	2.2		3.2	7.67	390	36	37.9	0.137	3.2	27.9				

Caractérisation de l'intrusion saline aux droits de zones dites « sensibles » sur le territoire de Mayotte

N° BSS	source	Date	Al (µg/L)	Ba (µg/L)	B (µg/L)	Br (µg/L)	Ca (mg/L)	Cl (mg/L)	Cond(µS/cm à 25°C)	Cu (µg/L)	Fe (µg/L)	F (mg/L)	HCO ₃ (mg/L)	Li (mg/L)	Mg (µg/L)	Mn (µg/L)	Ni (µg/L)	NO ₃ (mg/L)	PO ₄ (mg/L)	O ₂ dissous (mg/L)	K (mg/L)	pH	Redox (mV, normalement ESH)	SiO ₂ (mg/L)	Na (mg/L)	Sr (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	T (°C)	Zn (µg/L)	
12306X0046_BOUY	RP-52481-FR	23/05/03					23.2	9.6	232	10	20	0.37	144.69	23.7	0.15			1.98	0.26		3	7.6								
12306X0046_BOUY	RP-57110-FR	18/10/04					12.23	22.3	294	20	30	0.14	108.94	5.64	0			2.36	0.15			8.29			51.54					
12306X0046_BOUY	RP-57110-FR	08/11/04					14.13	14.39	233	30	30	0.14	108.94	9.55	0			1.88	0.26			7.56			17.88					
12306X0046_BOUY	RP-57110-FR	01/03/05	0.062	0.023	0.02		8.4	14	176	260	260	0.15	71	7.6	0.078			0			1.5	7.5			30	13.5				
12306X0046_BOUY	ADES	28/10/09							237											5.82										
12306X0046_BOUY	ADES	23/03/10	5	10	26		14.9	14	240	5	20	0.1	106	0.02	9.3	5	5	1.3	0.29	4.36		7.64	346		45	19.1	0.17		28.1	
12306X0046_BOUY	RP-59550-FR	15/11/10	2.58	2.69	17.2	50.5	13.5	14.8	239	0.39	<20	0.1	121	0.0002	8.9	0.4	<0.1	1.5	0.3	0.41		3.2	264		46.5	17.8	0.173	4.6	28	5.09
12306X0046_BOUY	ADES	04/04/11					15	13	235	30	30	0.1	107	9.6	5			1.5		6.44		3.1	589		48	18.1				
12306X0046_BOUY	ADES	01/08/11					15.4	13	239	30	30	0.1	116	9.6	5			1.5		7.1		3.6	508		44	18.3				
12306X0046_BOUY	ADES	03/04/12					13.7	14.6	241	20	20	0.1	112	9.3	0.21			1.3		4.27		2.9	237.7		47.7	18.5				
12306X0046_BOUY	ADES	04/09/12					13.2	14	238	20	20	0.1	109.8	8.4	5			2.1		5.27		2.7	179		43.9	17.9				
12306X0046_BOUY	ADES	10/09/13					13.3	14.7	235	20	20	0.1	93	8.8	5			2.1		5.06		2.7	158.7		45.3	17.7				
12306X0046_BOUY	ADES	18/03/14					13.8	14.3	238	20	20	0.1	108	8.7	5			1.4		5		3.1	176		45.1	18.9				
12306X0046_BOUY	ADES	24/03/15					15	15	253	5	5	0.083	114.7	9.2	5			1.5		5.36		3.1	257		46.1	19				
12306X0046_BOUY	ADES	05/10/15					16.6	15	243	5	5	0.083	113.5	9.9	5			1.6		4.81		3.1	345		43.49	21				
12306X0046_BOUY	ADES	29/03/16					18	15	243	5	5	0.083	113.5	9.9	5			1.5		4.6		3.1	499		49.97	20				
12306X0046_BOUY	ADES	20/09/16					16	15	257	5	5	0.082	115	10	5			1.5		0.3		3	368		49.9	19				
12306X0046_BOUY	ADES	20/02/17			5		15	15	257	0	0	0.17	114.4	9.4	50	0.2		1.1		6.65		3.2	391.3		30.2	18				
12306X0046_BOUY	ADES	11/04/17	5	2	16	47	15	15	250	0.3	5	0.12	110	9.5	2	0.2		1.5	0.256	6.14		3.2	391.3		30.2	18				
12306X0046_BOUY	ADES	25/09/17	5	2	16	46	15	16	243	0.3	5	0.05	115.9	9.1	2	0.2		1.7	0.281	5.82		2.9	383.3		30.2	18				
12306X0046_BOUY	ADES	01/09/20					17	15	240	5	5	0.084	117.1	9.4	2			1.6		3.79		2.9	413.6		46	18.4	0.179	4.6	28.1	1.86
12306X0046_BOUY	BRGM 2021	09/11/21	1.18	1.98	14.3	30.96	13.8	14.6	245	0.32	1	0.13	114	0.0002	9.1			1.5	0.29	4.03		3.1	425		46	18.4	0.179	4.6	28.1	1.86
12307X0011_KAOUEI	RP-68526-FR	16/05/18	1.08	8.66	23.6	121	29.9	39.5	502	0.2	227	0.0004	18.6	0.17	10.8	0.17	10.8	0.6	1.94		5.8	6.82	438		72.3	43.3	0.279	8.7	28.8	0.82
12307X0011_KAOUEI	BRGM 2021	13/11/21	1.08	6.61	24.2	88	31.1	39	530	0.25	240	0.0005	19.8	0.12	0.33	8.9	0.54	1.94		6	6.61	412		73	44.3	0.328	7.8	28.7	3.12	
12307X0021_KAOUEI	RP-56773-FR	03/12/02					19.43	22.02	410	10	10	0.3	220.9	11.41	0			1.66		6.5		7.99	7.9		54.8	47.88				
12307X0021_KAOUEI	RP-56773-FR	25/04/03					19.3	21	405	0	0	0.3	209	11.7	0			0		0.2		8	7.55		69	47.5				
12307X0021_KAOUEI	RP-56773-FR	19/06/03					21.4	22	404	90	90	0.35	207	11.7	0			1	0.25			8.4	7.25		69	44.5				
12307X0021_KAOUEI	RP-56773-FR	15/03/04					22.3	24	444	0	0	0.3	231	13.2	0.017			2	0.2			9	7.6		53	52				
12307X0021_KAOUEI	RP-56773-FR	26/05/04					25.6	24	443	10	10	0.3	231	22.27	0.003			2.42	0.28			9.5	7.8		53	52				
12307X0021_KAOUEI	RP-56773-FR	28/06/04					30.4	21	452	10	10	0.3	231	17.1	0.003			1.58				8.8	7.6		53	52				
12307X0021_KAOUEI	RP-56773-FR	28/07/04					27.6	29.4	452	20	20	0.3	231	22.7	0.003			1.58				8.2	7.8		53	52				
12307X0021_KAOUEI	RP-56773-FR	30/08/04					28.8	25.5	445	20	20	0.3	231	20.32	0.003			1.58				9	7.7		53	52				
12307X0021_KAOUEI	RP-56773-FR	28/09/04					82	20.8	445	49	49	0.3	231	20.32	0.003			1.58				8.2	7.5		53	52				
12307X0021_KAOUEI	RP-56773-FR	25/11/04					28.8	26.8	458	30	30	0.3	231	35	0.015			1.58				10.8	7.7		53	52				
12307X0021_KAOUEI	RP-56773-FR	25/01/05					30.4	22.8	458	40	40	0.3	231	42.6	0.015			1.58				8.7	7.6		53	52				
12307X0021_KAOUEI	RP-56773-FR	22/02/05					60	25.5	464	40	40	0.331	231	36.7	0.015			1.58				8.3	7.7		53	52				
12307X0021_KAOUEI	RP-56773-FR	30/05/05					20	25.5	466	0	0	0.331	231	11.8	0.015			1.58				7.05			82.8	51				
12307X0021_KAOUEI	RP-56773-FR	18/01/07					38	17.6	481	0	0	0.331	231	20.8	0.015			1.58				3	7.75		82.8	51				
12307X0021_KAOUEI	RP-56773-FR	20/02/07					59.2	17.4	490	10	10	0.331	231	22.5	0.015			1.58				9	7.7		82.8	51				
12307X0021_KAOUEI	RP-56773-FR	20/03/07					44	44	490	10	10	0.331	231	53.9	0.015			1.58				7.6			82.8	51				
12307X0021_KAOUEI	RP-56773-FR	18/04/07					35.6	46.4	464	10	10	0.331	231	32.1	0.015			1.58				7.6			82.8	51				
12307X0021_KAOUEI	RP-56773-FR	23/05/07					39.6	46.0	460	10	10	0.331	231	34.52	0.015			1.58				7.6			82.8	51				
12307X0021_KAOUEI	RP-56773-FR	19/06/07					36.8	40.8	408	10	10	0.331	231	41.13	0.015			1.58				7.6			82.8	51				
12307X0021_KAOUEI	RP-56773-FR	02/07/07					25	24.2	432	600	600	0.36	229	14	14			1.1	0.21			7.6			63.26	44				
12307X0021_KAOUEI	RP-56773-FR	22/08/07					36.4	40.3	403	10	10	0.331	231	24.2	0.015			1.58				7.6			82.8	51				
12307X0021_KAOUEI	RP-56773-FR	18/09/07					35.2	40.3	475	40	40	0.331	231	29.9	0.015			1.58				7.5			82.8	51				
12307X0021_KAOUEI	RP-56773-FR	16/10/07					38.4	46.4	464	40																				

Caractérisation de l'intrusion saline aux droits de zones dites « sensibles » sur le territoire de Mayotte

N° BSS	source	Date	Al (µg/L)	Ba (µg/L)	B (µg/L)	Br (µg/L)	Ca (mg/L)	Cl (mg/L)	Cond (µS/cm à 25°C)	Cu (µg/L)	Fe (µg/L)	F (mg/L)	HCO ₃ (mg/L)	Li (mg/L)	Mg (mg/L)	Mn (µg/L)	Ni (µg/L)	NO ₃ (mg/L)	PO ₄ (mg/L)	O ₂ dissous (mg/L)	K (mg/L)	pH	Redox (mV, normalement ESH)	SiO ₂ (mg/L)	Na (mg/L)	Sr (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	T (°C)	Zn (µg/L)	
12307X0021_KAOUE3	RP-56773-FR	20/11/07					52	463							22	0.06						7.5								
12307X0021_KAOUE3	RP-56773-FR	18/12/07					36.4	432			50				29.1							7.5			70	53.6	0.22	3	28.9	18
12307X0021_KAOUE3	RP-56773-FR	22/01/08					37.6	428			30				18.6							7.6			70	47.1		2	28.8	
12307X0021_KAOUE3	RP-56773-FR	19/02/08					39.2	428			60				21.3							7.6			68	47.7		3	28.3	
12307X0021_KAOUE3	RP-56773-FR	18/03/08					39.6	413			60				21.1							7.6			75.5	47.3		3.3	28.9	
12307X0021_KAOUE3	RP-56773-FR	22/04/08					34.8	446			70				27.7	0.07						7.6			70.4	46.3		3.5	28.6	
12307X0021_KAOUE3	RP-56773-FR	17/06/08					24	442			10				14	0.18						7.6			71.1	45.5		3.3	28.8	
12307X0021_KAOUE3	RP-56773-FR	19/08/08					25.2	448			40				14.7	0.06						7.5			66.4	45		3.4	28.6	
12307X0021_KAOUE3	RP-56773-FR	18/09/08					26	457			40				15.9							7.5			72.7	48.1		3.4	28.8	
12307X0021_KAOUE3	RP-57620-FR	22/01/09					46	486							2.7							7.3			52.6	48		3.3	28.6	
12307X0021_KAOUE3	RP-57620-FR	12/02/09					30.4	484			0.13				11.8							7.5			76.5	14.6		3.1	28.7	
12307X0021_KAOUE3	RP-57620-FR	24/03/09					26.8	422	0.08						13.2							7.5			74.6	49		3.4	28.7	
12307X0021_KAOUE3	RP-57620-FR	22/04/09					24.8	418							14	0.03						7.6			68.52	49		3.7	28.8	
12307X0021_KAOUE3	RP-57620-FR	14/05/09					28	443	0.22						13.7							7.5			50.6	47		3.5	28.6	
12307X0021_KAOUE3	RP-57620-FR	19/06/09					25.4	425			0.07				14.3	0.01						7.6			73.72	5.1		3.8	28.6	
12307X0021_KAOUE3	RP-57620-FR	28/07/09					24	442			0.2				14.7	0.01						7.6			80.71	47		3.6	28.6	
12307X0021_KAOUE3	RP-57620-FR	30/10/09						472														7.6			50.6	47		3.5	28.6	
12307X0021_KAOUE3	ADES	21/03/10	5	10	32		25.1	25		5	20				239	0.02	1.8	1.8	0.26		5.65	8.3	7.29	304	70	53.6	0.22	3	28.9	
12307X0021_KAOUE3	ADES	04/04/11					25.6	25		472	30				240	14.6	6	1.9	4.28		5.34	8.6	7.78	203	76.5	14.6		3.1	28.7	
12307X0021_KAOUE3	ADES	01/08/11					26.6	25		477	10				250	15	5	1.9	2.403		7.51	9.8	5.91	511	70	47.1		2	28.8	
12307X0021_KAOUE3	ADES	03/04/12					24.3	25.3		467	20				237	14.9	3.7	1.6	2.37		6.79	8.2	7.32	204	68	47.7		3	28.3	
12307X0021_KAOUE3	ADES	04/09/12					23.4	25.1		465	20				237.9	13.4	5	2.5	2.37		5.26	8.2	7.32	204	75.5	47.3		3.3	28.9	
12307X0021_KAOUE3	ADES	04/03/13					23.2	25		477	20				236	13.3		2	2.113		5.42	6.5	7.415	118	70.4	46.3		3.5	28.6	
12307X0021_KAOUE3	ADES	10/09/13					23.5	25.7		442	30				195	13.9	5	2	7.33		5.4	7.7	7.33	66.4	73	45		3.4	28.6	
12307X0021_KAOUE3	ADES	18/03/14					23.9	25		455	20				229	13.6		1.7	2.29		5.5	8.4	7.5	146	72.7	48.1		3.4	28.8	
12307X0021_KAOUE3	ADES	16/09/14				19	25	26.7		457	0				15	50	0.2	2.5		5.65	8.7	7.37	304	52.6	48		3.3	28.6		
12307X0021_KAOUE3	ADES	22/09/14					23.9	24.9		470	40				244	14.6	5	2	7.7		5.64	8.6	7.2	209	76.5	14.6		3.1	28.7	
12307X0021_KAOUE3	ADES	24/03/15					27	27		470	5				240.3	15	5	2	2.403		5.67	9.2	6.8	286	74.6	49		3.4	28.7	
12307X0021_KAOUE3	ADES	05/10/15					29.7	28		463	14				240.6	16	5	2.3	2.406		9.64	7.7	7.86	383	68.52	49		3.7	28.8	
12307X0021_KAOUE3	ADES	25/01/16				24	26	26.5		453	0	0.26			15	50	0.4	2		9.64	7.61	8.9	383	50.6	47		3.5	28.6		
12307X0021_KAOUE3	ADES	29/03/16					28	26		453	5				241.6	15	5	0.46	0.297		7.7	8	7.96	345.2	80.71	47		3.6	28.6	
12307X0021_KAOUE3	ADES	20/09/16					27	26		469	0.2				242	15	5	2.2	0.35		7.21	8.2	7.9	391	73.72	5.1		3.8	28.6	
12307X0021_KAOUE3	ADES	11/04/17	5	2	21	75	27	27		469	15				240.8	15	2	0.2	0.369		7.61	8.9	7.96	383	80.71	47		3.2	27	12
12307X0021_KAOUE3	ADES	25/09/17	6	2	25	77	28	28		468	0.6				240.3	15	5	0.2	0.374		7.7	8	7.96	345.2	80.71	47		3.6	28.6	
12307X0021_KAOUE3	ADES	20/02/18					28	27		457	9				246.9	15	3	0.2	2.2		8.9	8.1	7.76	383	73.72	5.1		3.8	28.6	
12307X0021_KAOUE3	ADES	17/04/18	5	2	24		28	27		458	0.2				242.8	15	4	0.2	0.386		8.9	8.1	7.057	417.3	74.6	49		3.6	17.5	
12307X0021_KAOUE3	ADES	09/10/18	5	2			26	27		457	0.2				260.1	16	4	2.1	0.416		2.93	8.8	7.15	284.303	74.6	49		3.7	28.8	
12307X0021_KAOUE3	ADES	09/04/19					26	26		455	5				241	15	5	1.5	0.402		2.91	8.3	6.99	350.4	74.6	49		3.1	28.7	
12307X0021_KAOUE3	ADES	24/09/19					25	27		452	5				239.1	15	5	1.8	0.423		3.08	7.9	6.93	286	74.6	49		2.7	28.7	
12307X0021_KAOUE3	ADES	18/02/20	23				25	27		452	5				239.1	15	4	0.2	1.9		4.7	7.9	6.93	286	74.6	49		3.1	28.7	
12307X0021_KAOUE3	ADES	16/03/20					27	27		454	2				235.9	15	5	1.7	0.401		3.14	8.1	7.158	287.6	74.6	49		3	28.2	
12307X0021_KAOUE3	ADES	01/09/20	2				26	26		450	2				237.4	15	5	1.6	0.428		3.17	8	6.965	277.6	74.6	49		2.8	28.6	
12307X0021_KAOUE3	BRGM 2021	08/11/21	1.3	1.21	21.3	62.2	24.6	28.6	466	0.3		0.27	237	0.001	15.2	4.3	0.12	1.4	0.46	3.01	7.8	6.73	290	74.8	43.6	0.235	3.5	28.7	1.5	
12312X0035_MIRERE2	RP-57624-FR	19/03/02					0	463			150					0.02						7						6	0.02	
12312X0035_MIRERE2	RP-57624-FR	25/06/02					4.7	145		0.24	10					0.08		0.19				7.3						2	0	
12312X0035_MIRERE2	RP-57624-FR	03/07/02					13.2	4.9		151	0				26.2	0.12		0.75				7.5						4	0	
12312X0035_MIRERE2	RP-57624-FR	16/07/02					9.2	7.5		167	0				10.3	0.07		0.66				7.5						6	0	
12312X0035_MIRERE2	RP-57624-FR	08/11/02					37.6	7.1		355	0.21				15.9	1.55		1				8.31						8	0.2	
12312X0035_MIRERE2	RP-57624-FR	20/11/02					31.2	9.3		369	0				22.5	1.2		1				4.6	7.46					3	0.02	
12312X0035_MIRERE2	RP-57624-FR	19/06/03					27.1	11		350	0				199	0.95	0.083					5.2	7.1					3	0	
12312X0035_MIRERE2	RP-57624-FR	15/03/04					28.7	12		351	0				203	10.7	0.014					5.5	7.15					8	0	
12312X0035_MIRERE2	RP-61757-FR	15/12/12	<5	150	20	<5	54.2	14		275	<5				333	<0.02	0.158					2.4	6.6					3	0	
12312X0035_MIRERE2	RP-68526-FR	29/05/18	0.75	96.5	14.9	57.7	38.4	14.2		448	243				251	0.0012	12.3	0.36				2.3	6.6					8.3	27.8	1.89
12312X0035_MIRERE2	BRGM 2021	11/11/21	2.78	64.9	15	43.2	5.6	10.9	162	0.24	71	0.0002	5.3	83.8	0.49	0.13	1.78	0.48	0.1	1.78	0.48	2.3	5.68	409	16.2	18.8	0.057	5.2	27.7	4.5



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Centre scientifique et technique

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



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Direction régionale Mayotte

Immeuble Jacaranda – Lot les 3 vallées – Les Hauts Vallons
363
97646 Mamoudzou – Cedex – Mayotte, France
Tél. : 02 69 61 28 13

www.brgm.fr