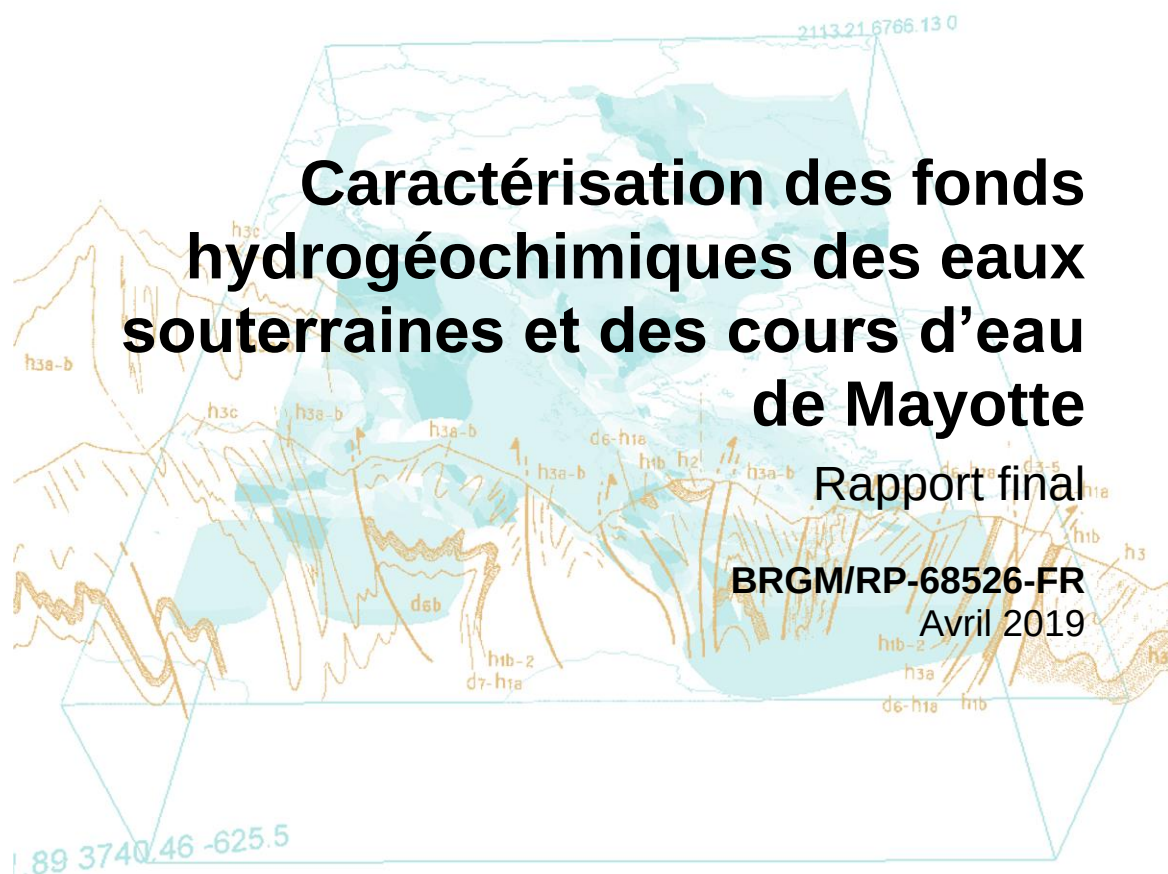




Caractérisation des fonds hydrogéochimiques des eaux souterraines et des cours d'eau de Mayotte

Rapport final

BRGM/RP-68526-FR
Avril 2019

Étude réalisée dans le cadre de la convention ONEMA-BRGM 2016-2018

E. Malcuit, H. Serniguet, S. Eddam, T. Ratsimihara, L. Gourcy

Vérificateur :

Nom : C. Auterives

Fonction : Hydrogéologue

Date : le 10-05-2019

Signature :



Approbateur :

Nom : F. Tronel

Fonction : Directeur régional

Date : 24-05-2019

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.
Contact : qualite@brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots-clés : Mayotte, fond hydrogéochimique, paramètres physico-chimiques, éléments majeurs, éléments traces, masse d'eau souterraine, masse d'eau – cours d'eau, faciès hydrochimique, Directive Cadre sur l'Eau, concentration de référence, valeur seuil, Norme de Qualité Environnementale, statistique descriptive, datation CFC-SF₆, AQUAREF.

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

Malcuit E., Serniguet H., Eddam S., Ratsimihara T., Gourcy L. (2019) – Caractérisation des fonds hydrogéochimiques des eaux souterraines et des cours d'eau de Mayotte. Rapport final. BRGM/RP-68526-FR, 192 p., 75 ill., 61 tabl.

Synthèse

Mayotte connaît une forte croissance démographique depuis 2007 (2,7 % de rythme annuel moyen) sur une superficie limitée. Cette augmentation importante de population couplée au développement économique de l'île constitue une pression significative et peut ainsi avoir un impact plus ou moins fort sur les ressources en eau.

Dans le cadre de la mise en application de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE 2000/60/CE), par l'intermédiaire du Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) et du Programme de Mesures (PDM), des réseaux de surveillance qualité ont vu le jour depuis 2012 sur l'ensemble du bassin de Mayotte. Cependant, et malgré des pressions de plus en plus fortes sur les ressources en eau destinées à l'alimentation en eau potable (AEP), l'étude du fond hydrogéochimique naturel des eaux n'avait pas encore été réalisée. Les différents cycles de surveillance de la DCE permettent, entre autres, l'analyse d'un nombre important d'éléments dissous dans les eaux. Certains éléments chimiques, notamment les éléments traces, peuvent être à la fois naturellement présents dans les milieux aquatiques et potentiellement rejetés par les activités humaines. Compte-tenu de la variabilité des contextes climatiques, lithologiques, hydrogéologiques et hydrothermaux, il était délicat mais primordial de délimiter précisément les zones à risque de fond hydrogéochimique élevé à Mayotte. La caractérisation des fonds hydrogéochimiques est en effet nécessaire pour distinguer les éléments majeurs et traces naturellement présents dans le milieu de ceux résultant d'une activité anthropique. Cette détermination est également indispensable pour l'évaluation de l'état des masses d'eau souterraine et superficielle lors de l'état des lieux.

Dans le cadre d'une convention de partenariat avec l'AFB sur la période 2016-2018, le BRGM a entrepris l'étude visant à caractériser les fonds hydrogéochimiques des eaux souterraines et des cours d'eau de Mayotte.

Le présent rapport constitue le rapport final de cette étude. Les actions menées au titre de la convention AFB 2017/2018 s'articulant autour de 3 activités principales sont les suivantes :

- Activité 1 (2017) : Synthèse et valorisation des données disponibles relatives à la physico-chimie des eaux souterraines et superficielles ;
- Activité 2 (2017/2018) : Définition et mise en œuvre d'une campagne d'échantillonnage dans les cours d'eau et les eaux souterraines de Mayotte en période de basses eaux et de hautes eaux ;
- Activité 3 (2018) : Analyse et interprétations des données ; détermination des faciès hydrochimiques, délimitation des zones à risque de fond hydrogéochimique élevé, détermination des concentrations de référence et recommandations pour les valeurs seuils.

Ce rapport illustre dans un premier temps le travail d'inventaire et de synthèse des données disponibles et exploitables, puis la réalisation de deux campagnes complémentaires spécifiques à cette étude, réalisées en basses eaux 2017 et en hautes eaux 2018, soit une cinquantaine de points d'eau prélevés en dehors de toute influence anthropique, afin de compléter les données et informations disponibles.

S'en est suivi un travail d'analyse et d'interprétation des données historiques et des données des campagnes complémentaires ; afin d'identifier les faciès hydrochimiques des eaux souterraines et superficielles de Mayotte et les zones à risque de fond hydrogéochimique élevé.

Les eaux souterraines de la Grande Terre de Mayotte ont un faciès hydrochimique majoritairement de type bicarbonaté-calcique. Certains points d'eau du Massif de Digo (MG004) se distinguent avec un faciès bicarbonaté-sodique ou chloruré-sodique. Les eaux de Petite Terre forment quant à elles un pôle stable de faciès bicarbonaté-sodique. Les eaux de surface ont une signature hydrochimique proche des eaux souterraines, avec principalement des eaux de type bicarbonaté-calcique.

Dans le cadre de cette étude des fonds hydrogéochimiques de Mayotte, les entités de fonds hydrogéochimiques sont les masses d'eau souterraines et les masses d'eau - cours d'eau. Le travail de délimitation des zones à risque de fond hydrogéochimique élevé a donc été réalisé à la masse d'eau. En zones littorales, l'influence des intrusions salines sur le fond hydrogéochimique est souvent identifiée, ceci n'est pas forcément le cas pour les îles de Mayotte, notamment pour la Grande Terre. En contexte volcanique, le fond hydrogéochimique est généralement élevé en fer, manganèse et parfois aluminium selon le type de formations volcaniques et leur degré d'altération, sachant que ces éléments sont principalement mobilisés sous formes colloïdales. Il a effectivement été mis en évidence pour la plupart des masses d'eau un risque de fond hydrogéochimique élevé en fer et en manganèse. Les données des deux campagnes complémentaires n'ont pas confirmé le risque de fond hydrogéochimique élevé en aluminium. Pour les zones volcaniques, des phénomènes hydrothermaux peuvent également être fréquents et localement des zones à risque de fond hydrogéochimique élevé ont pu être délimitées pour les éléments associés comme le fluor ou l'arsenic. Pour Mayotte, les eaux souterraines prélevées à Petite Terre forment le pôle hydrothermal, un fond hydrogéochimique élevé en fluor, sodium et potassium a été mis en évidence. Par ailleurs, pour les eaux souterraines et superficielles de Mayotte, un risque de fond hydrogéochimique élevé en orthophosphate a été mis en évidence, avec un indice de confiance élevé à faible suivant les masses d'eau. Cette étude a aussi permis de détecter une zone à risque de fond hydrogéochimique élevée en mercure, localisée dans le sud du Complexe Sud (MG005). Le tableau suivant synthétise les risques identifiés de fond hydrogéochimique élevé par masse d'eau souterraine.

Eaux souterraines		Fond hydrogéochimique élevé et niveaux de confiance		
Code MESO	Nom MESO	Elevé	Moyen	Faible
MG001	Complexe du Nord		Mn	Fe, PO ₄
MG002	Massif du Mtsapere		PO ₄	NH ₄ , Mn
MG003	Petite Terre	Na, F	PO ₄	K
MG004	Massif du Digo	Fe, Mn		K, PO ₄
MG005	Complexe du Sud	Mn Hg (loc)	PO ₄	Al, K
MG006	Alluvions de Kaweni	Mn, Fe	PO ₄	NH ₄ , Al

Tableau récapitulatif des zones à risque de fond hydrogéochimique élevé, avec niveau de confiance, par masse d'eau souterraine de Mayotte.

Pour déterminer les concentrations de référence, les résultats du travail d'interprétation des éléments majeurs s'est poursuivi avec des analyses de statistique descriptive ; au vu des résultats le percentile 75 a été choisi pour déterminer les concentrations de référence.

Pour les masses d'eau souterraine, les concentrations de référence ont donc été déterminées pour les éléments majeurs, les éléments traces indésirables, les éléments traces toxiques, le fer, le manganèse et les orthophosphates. Des propositions de valeurs seuils ont également été faites pour l'ensemble de ces éléments par masses d'eau souterraine.

Concentrations de référence - Eaux souterraines

Paramètres		Unité	Complexe du Nord MG001-ESO	Massif du Mtsapere MG002-ESO	Petite Terre MG003-ESO	Massif du Digo MG004-ESO	Complexe du Sud MG005-ESO	Alluvions de Kaweni MG006-ESO
Aluminium	Al	µg/L	7,2	2,1	31,2	47,8	3,4	16,4
Antimoine	Sb	µg/L	<LQ	0,64	<LQ	0,65	<LQ	<LQ
Baryum	Ba	µg/L	29	14	45	18	53	7
Bore	B	µg/L	23	17	587	38	21	28
Fer	Fe	mg/L	0,02	0,01	0,07	0,67	0,12	0,31
Fluorure	F	mg/L	0,3	0,2	29,0	0,1	0,3	0,2
Manganèse	Mn	µg/L	32	3	13	142	100	64
Sélénium	Se	µg/L	0,4	0,7	0,1	1,3	0,7	0,9
Arsenic	As	µg/L	0,44	0,70	7,65	0,96	0,18	0,78
Cadmium	Cd	µg/L	0,10	0,13	0,39	0,07	0,13	0,11
Chrome	Cr	µg/L	1,66	1,49	0,12	0,96	0,75	1,33
Cuivre	Cu	µg/L	0,53	1,23	0,19	1,16	0,23	3,79
Mercurure	Hg	µg/L	<LQ	0,03	<LQ	0,03	0,03	0,03
Nickel	Ni	µg/L	0,75	0,74	0,22	4,35	0,33	0,14
Plomb	Pb	µg/L	0,03	0,69	<LQ	0,69	<LQ	0,77
Zinc	Zn	µg/L	1,5	11,9	0,9	3,4	1,9	28,7
Chlorure	Cl	mg/L	27	13	80	67	36	34
Nitrate	NO ₃	mg/L	2,0	1,0	1,1	1,4	0,8	6,7
Orthophosphate	PO ₄	mg/L	0,3	0,5	0,6	0,2	0,6	0,5
Sulfate	SO ₄	mg/L	6	3	37	7	7	7
Ammonium	NH ₄	mg/L	0,2	0,1	0,2	0,3	0,1	0,1
Sodium	Na	mg/L	38	20	396	100	57	42

Concentrations de référence déterminées pour les masses d'eau souterraine de Mayotte (les valeurs en rouge correspondent à des concentrations de référence supérieures aux valeurs seuils nationales).

Pour les masses d'eau - cours d'eau, les paramètres physico-chimiques généraux (NH₄, NO₃, NO₂ et PO₄), les substances prioritaires de l'état chimique (Cd, Hg, Ni, Pb) et les polluants spécifiques non synthétiques de l'état écologique (As, Cr, Cu, Zn) ont été pris en compte ; seuls les orthophosphates présentent des concentrations élevées nécessitant la détermination de concentrations de référence par masses d'eau - cours d'eau. Les propositions de concentration de référence en orthophosphate pour 16 des 26 masses d'eau - cours d'eau de Mayotte sont présentées dans le tableau ci-après. Pour les zones à risque de fond hydrogéochimique élevé en PO₄, il est donc conseillé de prendre en compte les concentrations de référence proposées et les normes de qualité environnementale (NQE), notamment pour les masses d'eau cours d'eau de la Rivière Orovéni en amont du barrage de Combani (FRMR14) et de la Rivière Bé (FRMR25) qui ont des concentrations de référence proposées supérieures à la NQE pour les orthophosphates (> 0,5 mg/L).

Masse d'eau - Cours d'eau	Paramètres	Unité	Proposition - Concentration de référence
FRMR02	PO ₄ (Orthophosphate)	mg/L	0,13
FRMR03	PO ₄ (Orthophosphate)	mg/L	0,34
FRMR04	PO ₄ (Orthophosphate)	mg/L	0,41
FRMR08	PO ₄ (Orthophosphate)	mg/L	0,30
FRMR11	PO ₄ (Orthophosphate)	mg/L	0,40
FRMR12	PO ₄ (Orthophosphate)	mg/L	0,41
FRMR13	PO ₄ (Orthophosphate)	mg/L	0,18
FRMR14	PO ₄ (Orthophosphate)	mg/L	0,53
FRMR15	PO ₄ (Orthophosphate)	mg/L	0,06
FRMR16	PO ₄ (Orthophosphate)	mg/L	0,06
FRMR19	PO ₄ (Orthophosphate)	mg/L	0,35
FRMR20	PO ₄ (Orthophosphate)	mg/L	0,20
FRMR21	PO ₄ (Orthophosphate)	mg/L	0,36
FRMR22	PO ₄ (Orthophosphate)	mg/L	0,33
FRMR25	PO ₄ (Orthophosphate)	mg/L	0,64
FRMR26	PO ₄ (Orthophosphate)	mg/L	0,40

Propositions de concentration de référence pour les orthophosphates, pour 16 des 26 masses d'eau – cours d'eau de Mayotte (en rouge les 2 concentrations supérieures à la NQE).

Sommaire

1. Introduction	19
1.1. DEFINITION DU FOND HYDROGEOCHIMIQUE	19
1.2. GEOLOGIE	19
1.3. CLIMAT	28
1.4. HYDROLOGIE ET HYDROGEOLOGIE	30
Hydrologie.....	30
Hydrogéologie.....	31
Masses d'eau de Mayotte	31
1.5. CONTEXTE REGLEMENTAIRE	33
1.6. CONTEXTE ET OBJECTIF DE L'ETUDE	36
2. Synthèse et valorisation des données historiques relatives à la physico-chimie des eaux souterraines et des cours d'eau	37
2.1. LES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES CONSULTEES	37
2.2. LA BASE DE DONNEES	38
2.3. LES DONNEES BRUTES.....	39
Les points d'eau souterraine (ESO).....	39
Les points d'eau de surface (ESU)	44
Occupation des sols	46
Localisation des points d'eau en fonction de la géologie.....	46
3. Analyse des données historiques	49
3.1. BASE DE DONNEES ET QUALITE DES DONNEES	49
Vérification et correction des données.....	49
Vérification des balances ioniques des analyses disponibles	49
3.2. RESULTATS DES DONNEES HISTORIQUES.....	50
Paramètres physico-chimiques <i>in situ</i>	50
Eléments majeurs	55
Faciès hydrochimiques des eaux souterraines (ESO) et de surface (ESU)	56
Représentation cartographique de quelques éléments majeurs	59
Relations inter-éléments : diagrammes binaires.....	60
Eléments traces	64
3.3. SYNTHESE DES STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES DONNEES HISTORIQUES PAR MASSES D'EAU.....	72

Eaux souterraines	72
Eaux de surface - Cours d'eau	78
3.4. CONCLUSIONS INTERMEDIAIRES DES DONNEES HISTORIQUES.....	80
4. Campagnes d'échantillonnage complémentaire.....	83
4.1. OBJECTIF	83
4.2. MATERIEL ET METHODES	83
4.3. POINTS DE PRELEVEMENT	86
4.4. CAMPAGNE DE TERRAIN EN PERIODE DE BASSES EAUX 2017.....	88
Préparation de la campagne de terrain	88
Déroulement de la campagne de terrain et moyens humains	89
Points de suivi sélectionnés	90
Réalisation de la campagne de terrain	93
4.5. CAMPAGNE DE TERRAIN EN PERIODE DE HAUTES EAUX 2018.....	94
Préparation de la campagne de terrain	94
Réalisation de la campagne de terrain	98
4.6. CARACTERISATIONS GEOLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES DES POINTS D'EAU SOUTERRAINE ET SUPERFICIELLE DES DEUX NOUVELLES CAMPAGNES	107
Points d'eau de surface, cours d'eau (ESU)	107
Points d'eau souterraine (ESO).....	112
5. Résultats des deux nouvelles campagnes d'acquisition de données.....	117
5.1. PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES <i>IN SITU</i>	117
5.2. VERIFICATION DES BALANCES IONIQUES DES ANALYSES.....	117
5.3. RESULTATS ANALYTIQUES ET LIMITES DE QUANTIFICATION	118
5.4. COMPOSITION CHIMIQUE D'EAU DE PLUIE.....	120
5.5. ELEMENTS MAJEURS.....	121
TDS et conductivité électrique.....	121
Résultats d'analyses	121
5.6. FACIES HYDROCHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES ET DE SURFACE PRELEVEES LORS DES CAMPAGNES HE 2017 ET BE 2018.....	123
5.7. RELATIONS INTER-ELEMENTS : DIAGRAMMES BINAIRES	129
5.8. ELEMENTS TRACES	137

5.9. TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNEES DES DEUX CAMPAGNES COMPLEMENTAIRES.....	141
Zoom sur les éléments majeurs et traces indiquant des concentrations supérieures aux normes de potabilité	141
Statistiques descriptives des données des deux nouvelles campagnes par masse d'eau souterraine.....	143
5.10. RISQUES DE FOND HYDROCHIMIQUE ELEVE IDENTIFIES D'APRES LES DEUX CAMPAGNES COMPLEMENTAIRES.....	149
6. Données complémentaires prises en compte	151
6.1. DONNEES - EAUX SOUTERRAINES (ESO).....	151
6.2. DONNEES - EAUX SUPERFICELLES (ESU)	152
7. Datation des eaux par analyses CFC-SF6.....	155
7.1. PRESENTATION GENERALE	155
Différentes méthodes de datation.....	155
Les CFC.....	155
Le SF ₆	157
Méthode d'échantillonnage et de prélèvement	157
Facteurs influençant la détermination des âges apparents	158
Modèles de calcul	160
7.2. RESULTATS DES CFC-SF6 POUR LES EAUX SOUTERRAINES DE MAYOTTE	161
Compilation des résultats des analyses CFC et SF ₆	161
Estimation des temps de résidence des eaux et âges relatifs	162
8. Zones à risque de fond hydrogéochimique élevé, concentrations de référence, valeurs seuils des masses d'eau souterraine	165
8.1. METHODOLOGIE	165
8.2. DELIMITATION DES ZONES A RISQUE DE FOND HYDROGEOCHIMIQUE ELEVE	167
Rappel réglementaire	167
Éléments majeurs	167
Fer et manganèse.....	167
Orthophosphate	171
Éléments traces indésirables.....	172
Éléments traces toxiques.....	174
Zones à risque de fond hydrogéochimique élevé pour les masses d'eau souterraine	178
8.3. DETERMINATION DES CONCENTRATIONS DE REFERENCE.....	180
Méthodologie	180

Concentrations de référence pour les masses d'eau souterraine	180
8.4. RECOMMANDATIONS POUR LES VALEURS SEUILS POUR LES MASSES D'EAU SOUTERRAINE	181
Méthodologie	181
Propositions de valeurs seuils par masse d'eau souterraine	181
9. Zones à risque de fond hydrogéochimique élevé, concentrations de référence des masses d'eau – cours d'eau.....	183
9.1. LES MASSES D'EAU – COURS D'EAU	183
9.2. DELIMITATION DES ZONES A RISQUE DE FOND HYDROGEOCHIMIQUE ELEVE	184
Résultats des données historiques	184
Résultats des données des campagnes complémentaires	187
Zones à risque de fond hydrogéochimique élevé pour les masses d'eau – cours d'eau	188
9.3. CONCENTRATIONS DE REFERENCE POUR LES MASSES D'EAU - COURS D'EAU	188
Rappel réglementaire	188
Propositions de concentrations de référence pour les eaux de surface (ESU) - Cours d'eau de Mayotte.....	189
10. Conclusions	191
11. Bibliographie	193

Liste des illustrations

Illustration 1 : Carte géologique de Mayotte au 1/30 000 (Lacquement et al., 2013).	21
Illustration 2 : Légende de la carte géologique de Mayotte au 1/30 000 (Lacquement et al. 2013).	23
Illustration 3 : (a) Carte géologique simplifiée de Mayotte (Puyraveau et al., 2014, d'après Lacquement et al., 2013) ; (b) Carte bathymétrique (Audru et al., 2006).....	24
Illustration 4 : Modèle volcano-structural de l'île (Vittecoq et al., 2014 ; d'après Lacquement et al., 2013).....	25
Illustration 5 : Nomenclature des laves basées sur leur composition chimique en éléments alcalins (Na ₂ O + K ₂ O) en fonction de leur teneur en silice (SiO ₂) : (a) Diagramme de TAS (Total Alkali versus Silica) de Le Maitre et al. (2002) , avec les données reportées issues de Debeuf (2004) et Pelleter (2012) ; (b) Diagramme de TAS de Mayotte (Pelleter et al., 2014).	26
Illustration 6 : Extrait de Pelleter et al. (2014) : c) Schéma géologique de Mayotte, basé sur Debeuf (2004) et Nehlig et al. (2013) ; d) Schéma volcanique de Petite Terre.	27
Illustration 7 : Carte du cumul annuel moyen des précipitations calculé sur la période 1981-2010 (Météo France).	29
Illustration 8 : Evolution mensuelle de la pluviométrie moyenne au nord et au sud de Mayotte (Puyraveau, 2016, d'après les données de Jaouën et al., 2012).	30
Illustration 9 : Carte des masses d'eau souterraine de Mayotte.	32
Illustration 10 : Carte de localisation des points d'eau souterraine issus d'ADES en fonction des masses d'eau souterraine de Mayotte.....	41
Illustration 11 : Localisation des points d'eau souterraine avec des données physico-chimiques disponibles sur la période 1983-2016.....	43
Illustration 12 : Localisation des points d'eau superficielle (ESU) historiques en fonction des 26 masses d'eau - cours d'eau de Mayotte et du réseau hydrographique de la BD Carthage de Mayotte.	45
Illustration 13 : Localisation des points d'eau souterraine (ESO) et de surface (ESU) sur fond de la carte géologique de Mayotte (Lacquement et al., 2013).	46
Illustration 14 : Conductivités mesurées in situ sur les points d'eau souterraine et superficielle (1983- 2016).....	53
Illustration 15 : pH des eaux souterraines et des eaux superficielles (1983-2016).....	54
Illustration 16 : Conductivité vs. TDS des eaux souterraines de Mayotte.....	55
Illustration 17 : Diagramme de Piper regroupant les analyses d'eaux souterraines (ESO) de Mayotte, en fonction des masses d'eau souterraine.	57
Illustration 18 : (a) Diagramme de Piper regroupant les analyses d'eaux souterraines (ESU) de Mayotte ; (b) Diagramme de Piper regroupant les analyses d'eaux souterraines (ESO) de Mayotte, en fonction des masses d'eau souterraine et les eaux superficielles (ESU).	58
Illustration 19 : Concentrations en sulfates (mg/L) dans les eaux souterraines et superficielles (1983- 2016).....	59
Illustration 20 : Diagramme Na vs Cl (mmol.L ⁻¹) des points d'eau souterraine (ESO) de Mayotte, en fonction des masses d'eau souterraine	60
Illustration 21 : Diagramme Na vs. SiO ₂ (mmol.L ⁻¹) des eaux souterraines (ESO) de Mayotte, en fonction des masses d'eau souterraine.	61

Illustration 22 : Diagrammes des eaux souterraines (ESO) de Mayotte, en fonction des masses d'eau souterraine : (a) Ca vs. HCO_3 , (b) Ca vs. SO_4 , (c) Ca+Mg vs. Na + K, (d) Ca/Mg vs. Na/Cl, (e) Ca/Na vs. Ca/Mg	63
Illustration 23 : Concentrations en aluminium ($\mu\text{g/L}$) dans les eaux souterraines et superficielles (1983-2016).....	67
Illustration 24 : Concentrations en fluorures ($\mu\text{g/L}$) dans les eaux souterraines et superficielles (1983-2016).....	68
Illustration 25 : Concentrations en fer ($\mu\text{g/L}$) dans les eaux souterraines et superficielles (1983-2016).	70
Illustration 26 : Concentrations en manganèse ($\mu\text{g/L}$) dans les eaux souterraines et superficielles (1983-2016).....	71
Illustration 27 : Vérification du matériel de suivi des paramètres physico-chimiques à l'aide de solutions tampons.	85
Illustration 28 : Echantillonnage sur site lors de la campagne de hautes eaux 2018.	85
Illustration 29 : Localisation des points de prélèvement sélectionnés pour les campagnes de terrain complémentaires.....	88
Illustration 30 : Localisation des points d'eau souterraine (ESO) et de surface (ESU) suivis lors de la campagne de Basses Eaux (BE) 2017 ; avec représentation des masses d'eau souterraine, du réseau hydrographique de la BD Carthage et des points d'eau de la base de données (1983-2016).....	92
Illustration 31 : Conditions de prélèvements des échantillons d'eau (à gauche : ESU et à droite : ESO) lors de la campagne de Basses Eaux 2017.	93
Illustration 32 : A gauche : exemple de conditions d'accès aux points d'eau ; à droite : influence anthropique (lessives dans les cours d'eau) sur la qualité des eaux des cours d'eau.	94
Illustration 33 : Plan de prélèvements initial. Les jours d'interventions sont numérotés de 1 à 10.	98
Illustration 34 : Exemple d'une source avec une forte activité bactérienne.	99
Illustration 35 : Suivi des paramètres physico-chimiques in situ sur un forage AEP avant prélèvement.	99
Illustration 36 : Matériel utilisé pour le prélèvement des CFC et SF_6	100
Illustration 37 : Conditions d'accès au piézomètre de Dzoumogné difficile d'accès.	100
Illustration 38 : Réalisation du pompage et conditionnement sur le piézomètre de Dzoumogné.	101
Illustration 39 : Localisation des points d'eau ESU et de leur bassin versant correspondant, sur fond de la carte géologique de Mayotte (Lacquement et al., 2013).	109
Illustration 40 : Exemple de localisation de 4 points d'eau ESU, des formations géologiques lessivées sur leur bassin versant.....	110
Illustration 41 : Localisation des points d'eau souterraine (ESO).....	112
Illustration 42 : Coupe technique et géologique du forage de Mrereni 2 - Poroani (12312X0035/MRERE2) sur la commune de Chirongui.....	113
Illustration 43 : Paramètres physico-chimiques in situ des deux campagnes d'échantillonnage complémentaire, avec distinction des campagnes BE 2017 et HE 2018, des MESO.	117
Illustration 44 : Liste des deux sources indiquant une balance ionique mauvaise.....	117
Illustration 45 : Paramètres analysés au laboratoire, méthodes d'analyse et limites de quantification associées.	119

Illustration 46 : Compositions chimiques de l'eau de pluie à Mayotte en saison des pluies 2018.	120
Illustration 47 : Synthèse de compositions chimiques d'eaux de pluie d'origine côtière dans un contexte insulaire dans la littérature (Brenot et al., 2008).	120
Illustration 48 : Conductivité vs. TDS des eaux des deux nouvelles campagnes d'échantillonnage de Mayotte.	121
Illustration 49 : Diagramme de Piper des eaux prélevées lors des deux campagnes de hautes eaux 2017 et de basses eaux 2018.	123
Illustration 50 : Localisation des points d'eau ESO et ESU, prélevés en BE 2017 et HE 2018, avec leur faciès hydrochimique, en fonction des MESO de Mayotte.	124
Illustration 51 : Diagramme de Piper des eaux souterraines (ESO) prélevées lors des deux campagnes de hautes eaux 2017 et de basses eaux 2018, en fonction de leur appartenance aux masses d'eau souterraine de Mayotte.	125
Illustration 52 : Diagramme de Piper des eaux superficielles (ESU) prélevées lors des deux campagnes de hautes eaux 2017 et de basses eaux 2018.	126
Illustration 53 : Diagrammes Na vs Cl (mmol.L ⁻¹) des points d'eau souterraine (ESO) et des eaux des cours d'eau (ESU) de Mayotte, en fonction des masses d'eau souterraine, Campagne BE 2017 et HE 2018.	130
Illustration 54 : Diagrammes SiO ₂ vs Na + K (mmol.L ⁻¹) des points d'eau souterraine (ESO) et des eaux des cours d'eau (ESU) de Mayotte, en fonction des masses d'eau souterraine, Campagne BE 2017 et HE 2018.	131
Illustration 55 : Diagrammes Na + K (mmol.L ⁻¹) vs. Distance au trait de côte et Cl (mmol.L ⁻¹) vs. Distance au trait de côte des points d'eau souterraine (ESO) et des eaux des cours d'eau (ESU) de Mayotte, en fonction des masses d'eau souterraine, Campagne BE 2017 et HE 2018.	134
Illustration 56 : Diagrammes des eaux souterraines (ESO) et des cours d'eau (ESU) de Mayotte, campagnes BE 2017 et HE 2018, en fonction des masses d'eau souterraine: (a) Ca vs. HCO ₃ , (b) Ca vs. SO ₄ , (c) Ca+Mg vs. Na + K, (d) Ca/Mg vs. Na/Cl, (e) Ca/Na vs. Ca/Mg.	136
Illustration 57 : Box plots des éléments majeurs et traces ayant des valeurs supérieures aux normes de potabilité (valeurs seuils).	142
Illustration 58 : Conditionnement des échantillons d'eau prélevés en fonction des éléments analysés aux laboratoires (extrait de Puyraveau, 2016).	151
Illustration 59 : Méthodes analytiques, laboratoires d'analyses pour les échantillons de Puyraveau (2016).	152
Illustration 60 : Localisation des points d'eau ESU et ESO, avec données physico-chimiques extraites des travaux de thèse de Puyraveau, 2016.	153
Illustration 61 : Echelle de datation pour quelques éléments radioactifs et gazeux.	155
Illustration 62 : Chronique des concentrations dans l'air des CFC et SF ₆ (Mace Head).	156
Illustration 63 : Schéma du système de prélèvement de l'eau pour analyses de CFC et SF ₆ a) récipient en métal, b) tuyau de prélèvement, c) flacon de verre, d) bouchon de verre, e) clip métallique pour bloquer le bouchon, f) récipient métallique, g) couvercle du récipient métallique, h) bloqueur couvercle métallique.	158
Illustration 64 : Tableau récapitulatif des méthodes d'analyses pour datation par CFC-SF ₆ .	158
Illustration 65 : Schéma des modèles d'écoulement type piston, exponentiel et mélange binaire.	161
Illustration 66 : Méthodologie employée pour l'étude du fond hydrogéochimique.	165
Illustration 67 : Carte des concentrations en fer dans les eaux souterraines de Mayotte.	168

Illustration 68 : Carte des concentrations en manganèse dans les eaux souterraines de Mayotte.	169
Illustration 69 : Carte des concentrations en orthophosphate dans les eaux souterraines de Mayotte.	170
Illustration 70 : Carte des concentrations en mercure (Hg), BE 2017 et HE 2018.....	176
Illustration 71 : Masses d'eau souterraine et risques de fond hydrogéochimique élevé (la couleur du texte indique l'indice de confiance : rouge : élevé, vert : moyen, bleu : faible).179	
Illustration 72 : Schéma explicatif pour proposer de nouvelles valeurs seuils en fonction du fond hydrogéochimique (concentration de référence), d'après Scheidleder, 2012. 181	
Illustration 73 : Opération de brossage dans le forage de Kaweni 2 (à droite).	199
Illustration 74 : Opérations de brossage et d'air-lift dans le forage de Bandré-Dagoni.....	200
Illustration 75 : Opération de brossage dans le forage de Mréréni 2.	201

Liste des tableaux

Tableau 1 : Compositions typiques des roches mahoraises les plus courantes (basalte et phonolite) en % de poids d'oxydes (Puyraveau, 2016).	28
Tableau 2 : Masses d'eau souterraine de Mayotte (d'après le SDAGE 2016 - 2021).	31
Tableau 3 : Masses d'eau de surface de Mayotte et objectif d'états écologique, chimique et environnemental (d'après SDAGE 2016 - 2021).	33
Tableau 4 : Rappel des normes de potabilité (arrêté du 11 janvier 2007), de valeurs seuils (arrêté du 2 juillet 2012, du 28 juin 2016, circulaire du 23 octobre 2012) et des normes de qualité environnementales (arrêté du 27 juillet 2015 modifiant l'arrêté du 25 janvier 2010) pour les éléments d'intérêt pour les études de fond hydrogéochimique. 35	
Tableau 5 : Origine, nombre et période d'acquisition des données physico-chimiques des points d'eau souterraine (ESO) et de surface (ESU) de la base de données.....	38
Tableau 6 : Liste des points d'eau souterraine ayant des données physico-chimiques bancarisées dans ADES sur la période 2009-2016.	40
Tableau 7 : Liste des points d'eau souterraine avec des données physico-chimiques disponibles sur la période 1983-2016.	42
Tableau 8 : Liste des points d'eau de surface avec des données physico-chimiques disponibles sur la période 1983-2016.	44
Tableau 9 : Exemples de valeurs de LQ/2 retenues pour étude du fond hydrogéochimique en France métropolitaine.....	49
Tableau 10 : Paramètres physico-chimiques in situ, issus d'ADES (2009-2016).	51
Tableau 11 : Paramètres physico-chimiques in situ des eaux souterraines, issus de la base de données « fond hydrogéochimique », ayant des balances ioniques correctes (1983- 2016).	51
Tableau 12 : Paramètres physico-chimiques in situ des eaux de surface, issus de la base de données « fond hydrogéochimique », ayant des balances ioniques correctes (1983- 2016).	52
Tableau 13 : Composition en éléments majeurs des eaux souterraines (ESO) et des eaux de surface, issue de la base de données ADES (2009-2016) et de la base de données compilées pour la caractérisation des fonds hydrogéochimiques de Mayotte (1983- 2016).	56
Tableau 14 : Concentrations en éléments traces, issues d'ADES (2009-2016).	65

Tableau 15 : Concentrations en éléments traces des eaux souterraines, issues de la base de données « fond hydrogéochimique » (1983-2016).....	65
Tableau 16 : Concentrations en éléments traces des eaux superficielles, issues de la base de données « fond hydrogéochimique » (1983-2016).....	66
Tableau 17 : Statistiques descriptives des données physico-chimiques historiques de la MESO MG001	72
Tableau 18 : Statistiques descriptives des données physico-chimiques historiques de la MESO MG002	73
Tableau 19 : Statistiques descriptives des données physico-chimiques historiques de la MESO MG003	74
Tableau 20 : Statistiques descriptives des données physico-chimiques historiques de la MESO MG004	75
Tableau 21 : Statistiques descriptives des données physico-chimiques historiques de la MESO MG005	76
Tableau 22 : Statistiques descriptives des données physico-chimiques historiques de la MESO MG006	77
Tableau 23 : Liste des masses d'eau – cours d'eau ayant suffisamment de données pour l'analyse statistique descriptive	78
Tableau 24 : Statistiques descriptives des éléments physico-chimiques généraux pour les données historiques des masses d'eau – cours d'eau de Mayotte ayant suffisamment de données.	79
Tableau 25 : Conditionnement des échantillons selon le type d'éléments à analyser.....	86
Tableau 26 : Liste des points d'eau souterraine (ESO) et de surface (ESU) sélectionnés et échantillonnés lors de la campagne de terrain en période de basses eaux 2017.91	
Tableau 27 : Liste des points d'eau souterraine prélevés de la campagne de terrain en période de hautes eaux 2018.	95
Tableau 28 : Caractéristiques techniques des piézomètres et forages AEP prélevés	103
Tableau 29 : Mesures physicochimiques <i>in situ</i> et observations de terrain de la campagne de hautes eaux 2018.	105
Tableau 30 : Points d'eau de surface – Cours d'eau prélevés.....	108
Tableau 31 : Points d'eau présentés sur Illustration 40 avec la description géologique à l'affleurement et les formations géologiques composant le bassin versant.	111
Tableau 32 : Descriptif des points d'eau souterraine prélevés.	115
Tableau 33 : Résultats d'analyses des éléments majeurs pour les deux nouvelles campagnes d'échantillonnage, résultats globaux, par campagne (BE 2017 et HE 2018) et par masse d'eau.....	122
Tableau 34 : Faciès hydrochimiques de l'ensemble des points d'eau échantillonnés lors des deux nouvelles campagnes en BE 2017 et HE 2018.	128
Tableau 35 : Résultats d'analyses des éléments traces pour les deux nouvelles campagnes d'échantillonnage, résultats globaux, par campagne et par masse d'eau.....	139
Tableau 36 : Statistique descriptive des éléments à concentrations élevées pour les deux campagnes BE 2017 et BE 2018.	141
Tableau 37 : Répartition des points d'eau échantillonnés en BE 2017 et HE 2018, ESO et ESU, en fonction des masses d'eau souterraine (MESO).	143
Tableau 38 : Lien entre les prélèvements en cours d'eau et les masses d'eau souterraine correspondantes, avec le nombre de points échantillonnés par MESO.....	143

Tableau 39 : Description statistique des résultats d'analyses BE 2017- HE 2018 pour les points ESO de MG001.	144
Tableau 40 : Description statistique des résultats d'analyses BE 2017-HE 2018 pour les points ESU de MG001.	144
Tableau 41 : Description statistique des résultats d'analyses BE 2017 - HE 2018 pour les points ESO de MG002.....	145
Tableau 42 : Description statistique des résultats d'analyses BE 2017 - HE 2018 pour les points ESU de MG002.	145
Tableau 43 : Description statistique des résultats d'analyses BE 2017-HE 2018 pour les points ESO de MG003.	146
Tableau 44 : Description statistique des résultats d'analyses BE 2017-HE 2018 pour les points ESO de MG004.	147
Tableau 45 : Description statistique des résultats d'analyses BE 2017-HE 2018 pour les points ESU de MG004.	147
Tableau 46 : Description statistique des résultats d'analyses BE 2017-HE 2018 pour les points ESO de MG005.	148
Tableau 47 : Description statistique des résultats d'analyses BE 2017-HE 2018 pour les points ESU de MG005.	148
Tableau 48 : Description statistique des résultats d'analyses BE 2017-HE 2018 pour les points ESO de MG006.	149
Tableau 49 : Risques de fond hydrochimique élevé identifiés d'après les données des deux campagnes complémentaires réalisées en basses eaux 2017 et hautes eaux 2018, en fonction des masses d'eau souterraine de Mayotte.	149
Tableau 50 : Résultats d'analyses des CFC en pmol/L (10^{-12}) et SF ₆ en fmol/L (10^{-15}) de l'ensemble des analyses CFC-SF ₆ réalisées sur les eaux souterraines de Mayotte.....	162
Tableau 51 : Synthèse des âges apparents calculés pour les eaux souterraines de Mayotte, selon les 3 modèles (EM : modèle exponentiel ; BM : mélange binaire ; PF : piston flow modèle).	163
Tableau 52 : Tableau récapitulatif des zones à risque de fond hydrogéochimique élevé, avec niveau de confiance, par masse d'eau souterraine de Mayotte.	178
Tableau 53 : Concentrations de référence déterminées pour masses d'eau souterraine de Mayotte.	180
Tableau 54 : Propositions de valeurs seuils en fonction des concentrations de référence déterminées, par élément et par masse d'eau souterraine de Mayotte.	182
Tableau 55 : Liste des Mases d'eau – Cours d'eau de Mayotte.	183
Tableau 56 : Normes de Qualité Environnementale des 8 éléments traces toxiques (arrêté du 27 juillet 2015) – normes en vigueur depuis le 22 décembre 2015 (moyennes annuelles pour les eaux de surface intérieures sauf *). Pour le cadmium valeur de classe d'eau 2 (suivant la dureté de l'eau, 40-50 mg de CaCO ₃).	184
Tableau 57 : Statistique descriptive des éléments pris en compte pour les eaux de surface, exemple de la masse d'eau – cours d'eau FRMR03.....	185
Tableau 58 : Statistiques descriptives des concentrations des éléments physico-chimiques généraux pour 16 masses d'eau - cours d'eau de Mayotte ; données historiques.	187
Tableau 59 : Risques de fond hydrochimique élevé identifiés pour les eaux de surface, d'après les données des deux campagnes complémentaires réalisées en basses eaux 2017 et hautes eaux 2018, en fonction des masses d'eau souterraine de Mayotte. ...	188

Tableau 60 : Rappel des éléments physico-chimiques généraux ; des substances prioritaires et des substances spécifiques à suivre pour les masses d'eau – cours d'eau, avec leur NQE.	189
---	-----

Tableau 61 : Propositions de concentration de référence pour 16 des 26 masses d'eau – cours d'eau de Mayotte (en rouge les 2 concentrations supérieures à la NQE).....	190
--	-----

1. Introduction

1.1. DEFINITION DU FOND HYDROGEOCHIMIQUE

La concentration d'un élément majeur ou trace, issu d'un matériau naturellement présent dans un milieu et résultant uniquement de son histoire géologique, est appelée **fond hydrogéochimique naturel**. Mayotte étant une île volcanique, son histoire géologique peut expliquer des concentrations relativement élevées de certains éléments de manière naturelle dans les eaux de surface ou souterraines.

La caractérisation des fonds hydrogéochimiques naturels est d'évaluer les teneurs en éléments (majeurs et traces) en dehors de toute perturbation anthropique dans le but de distinguer la contribution d'origine naturelle et la contribution anthropique aux concentrations mesurées.

1.2. GEOLOGIE

Mayotte est une île volcanique posée sur le plancher océanique du sud du bassin de Somalie entre l'Afrique et Madagascar. La géologie de Mayotte est constituée principalement de formations volcaniques. L'île est entourée du plus vaste lagon fermé de l'Océan indien, délimité par une barrière récifale entrecoupée de quelques passes (Illustration 1).

La nouvelle carte géologique de 2013 à l'échelle 1/30 000 a amélioré la connaissance du sous-sol mahorais (Lacquement et al. 2013). Elle est présentée Illustration 1 et sa légende agrandie Illustration 2.

Les principales lithologies observées sur le terrain sont des empilements de coulées de basalte, de néphélinite et de téphrite, des dômes phonolitiques et des dépôts pyroclastiques (Nehlig et al. 2013 ; Lacquement et al., 2013).

De plus, afin de mieux appréhender la structure et la géologie de Mayotte, une carte géologique simplifiée (Puyraveau et al., 2014) et une carte bathymétrique sont également présentées sur l'illustration 3. Enfin, un modèle volcano-structural de Mayotte permet, d'après le travail de Lacquement et al. (2013), de mieux appréhender les différentes phases de mise en place de Mayotte.

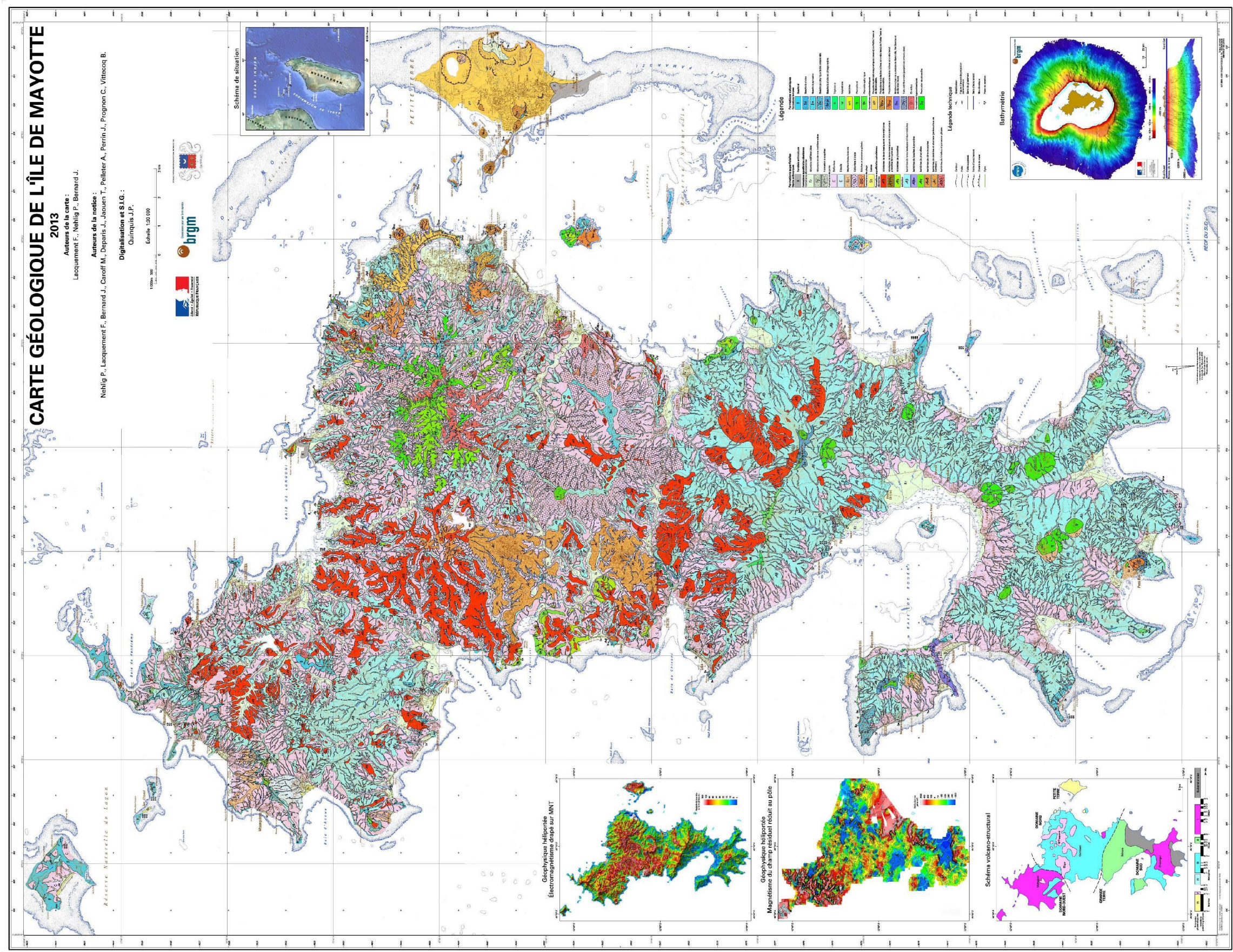


Illustration 1 : Carte géologique de Mayotte au 1/30 000 (Lacquement et al., 2013).

Légende

Formations superficielles

Dépôts anthropiques

X	Remblais anthropiques
---	-----------------------

Formations superficielles allochtones

Formations alluvionnaires

Fz	Alluvions indifférenciées
Fy	Alluvions anciennes indifférenciées

Formations de pente

C	Colluvions
E	Éboulis
Ec	Dépôts d'éroulements
Cb	Colluvions à blocs
BG	Brèches et panneaux glissés

Formations de plage

Sb	Sables
----	--------

Formations superficielles autochtones

Allotérites

Aβ	Allotérites de laves basiques et intermédiaires
Aβpx	Allotérites de laves basiques et intermédiaires à grenailles ferrugineuses
Aφ	Allotérites de phonolites

Isaltérites

Aβ	Isaltérites de laves basiques et intermédiaires
Aβpx	Isaltérites de basaltes à pyroxène
Aφ	Isaltérites de phonolites
Ascβ	Isaltérites de cônes de scories
Ac	Isaltérites de cinérites et alluvions (paléosurface de Combani)
ABG	Isaltérites de brèches et panneaux glissés

Formations volcaniques

Formations laviques

β	Basalte sl
βol	Basalte à olivine
βpx	Basalte à pyroxène
βπ	Basalte porphyrique faciès ankaramite
βol-px	Basalte à olivine et clinopyroxène
ε	Téphrite sl
ω	Néphéline
ω3	Ménilite
φ	Phonolite sl
φa	Phonolite aphyrique

Formations volcanoclastiques

trP	Projections phréatomagmatiques (maars) de Petite Terre et de Mamoudzou
² Brsc	Projections scoriacées (cônes stromboliens) de Petite Terre et de Mamoudzou
¹ Brsc	Projections scoriacées (cônes stromboliens)
Brē	Brèches riches en cumulats de Bandré, îlot Bambo et de Bambo Ouest
Tfs	Tufs indifférenciés (projections intercoulees)
Ci	Cinérites

Formations hypovolcaniques

Dφ	Protrusion de phonolite
----	-------------------------

Légende technique

	Contour		Stratification
	Faille		Figure d'impact de projection pyroclastique
	Faille supposée		Sens de glissement
	Niche d'arrachement		Sens d'écoulement
	Cratère de maar		Bloc
	Dyke		Point d'analyse géochronologique

Illustration 2 : Légende de la carte géologique de Mayotte au 1/30 000 (Lacquement et al. 2013).

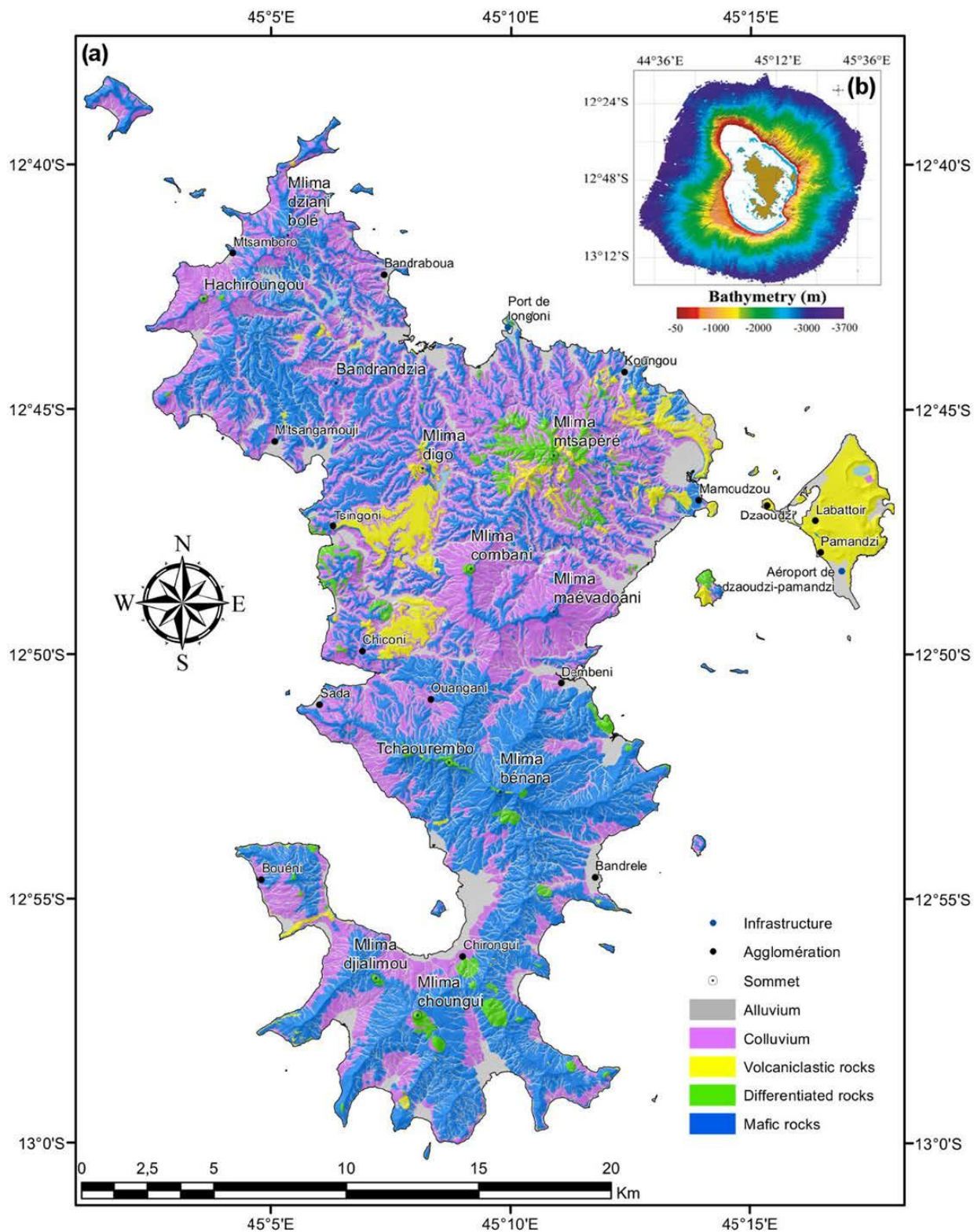


Illustration 3 : (a) Carte géologique simplifiée de Mayotte (Puyraveau et al., 2014, d'après Lacquement et al., 2013) ; (b) Carte bathymétrique (Audru et al., 2006).

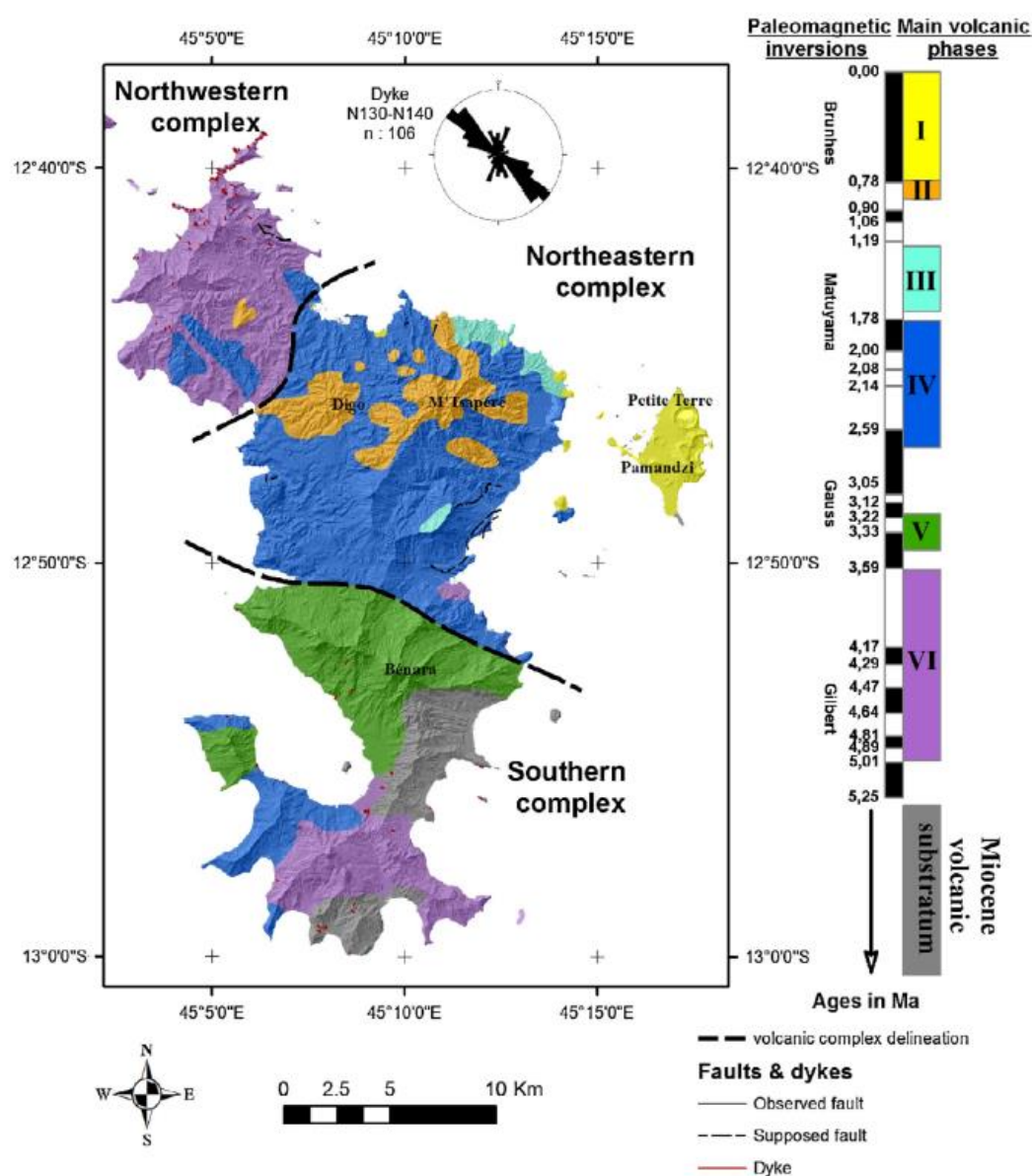


Illustration 4 : Modèle volcano-structural de l'île (Vittecoq et al., 2014 ; d'après Lacquement et al., 2013).

D'après Puyraveau (2016) : « Les laves basaltiques et basanitiques sont généralement très fluides, microlitiques porphyriques à olivine, pyroxène ou les deux. Bien qu'elles soient très riches en phénocristaux d'olivine (souvent iddingsitisées par altération) et/ou de pyroxènes, elles s'écoulent facilement et tendent à former des coulées peu épaisses se mettant en place au sein de creux topographiques (paléo-vallées) (Nehlig et al., 2013). Le domaine du Nord montre une prédominance de laves à phénocristaux d'olivine par rapport aux laves à pyroxène tandis que les laves du Sud sont majoritairement des basanites à clinopyroxène (Debeuf, 2004) ».

Les diagrammes de TAS (Total Alkali versus Silica), représentés sur l'illustration 5 mettent en évidence la différence de composition entre les laves du nord et du sud de l'île de Mayotte. Les travaux de Pelleter et al. (2014) distinguent les laves de Petite Terre, du nord-ouest, du centre-nord et du sud.

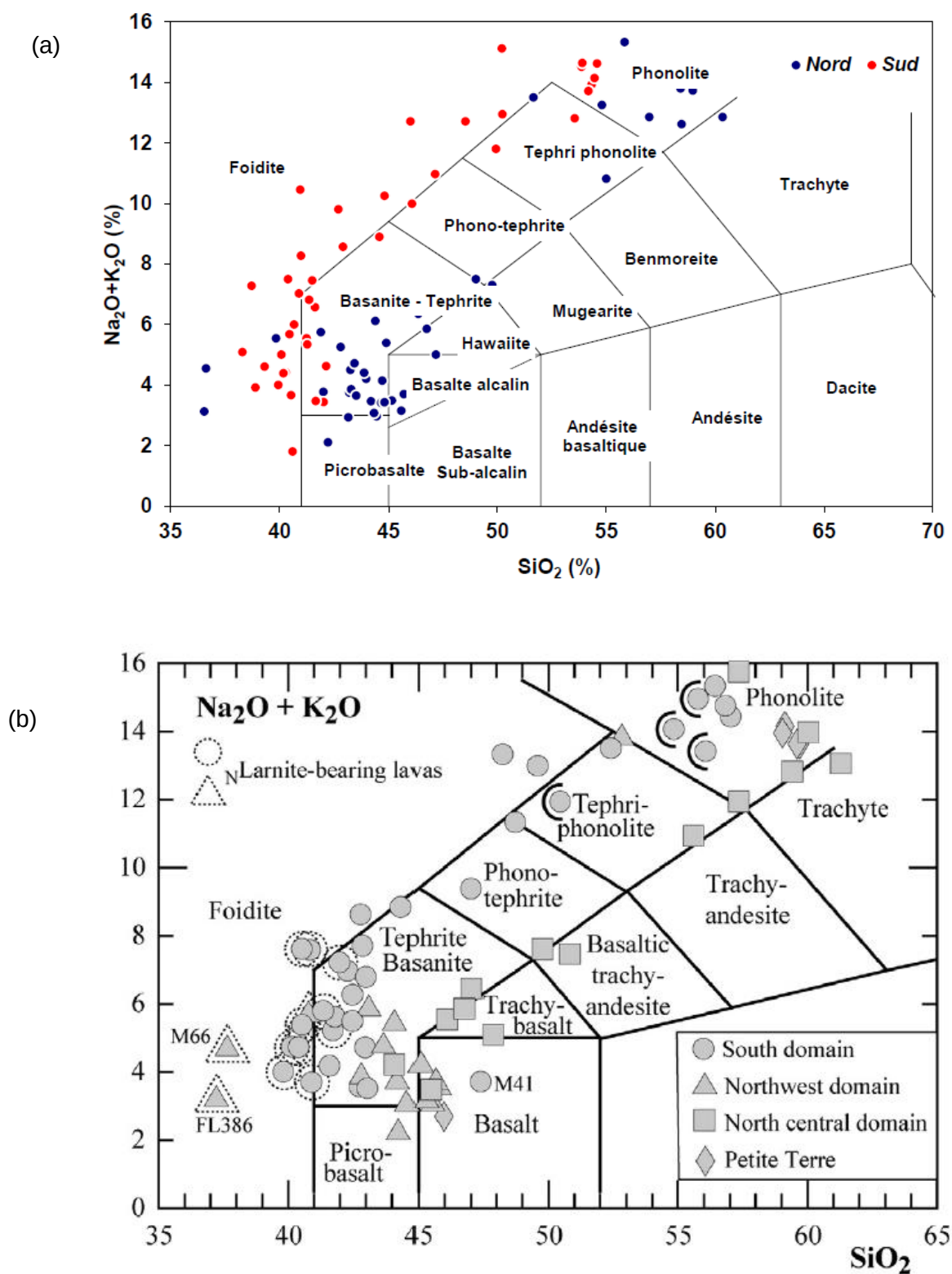


Illustration 5 : Nomenclature des laves basées sur leur composition chimique en éléments alcalins ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) en fonction de leur teneur en silice (SiO_2) : (a) Diagramme de TAS (Total Alkali versus Silica) de Le Maître et al. (2002) , avec les données reportées issues de Debeuf (2004) et Pelleter (2012) ; (b) Diagramme de TAS de Mayotte (Pelleter et al., 2014).

Les phonolites sont présents sur l'ensemble de Mayotte. Ils sont présentés sur l'illustration 6. Ces laves visqueuses sont très riches en silice. La plupart des phonolites ont une texture microlitique fluidale à la mésostase constituée de baguettes de feldspaths potassiques, de néphélines, d'augites aegyriniques et d'oxydes (Puyraveau, 2016).

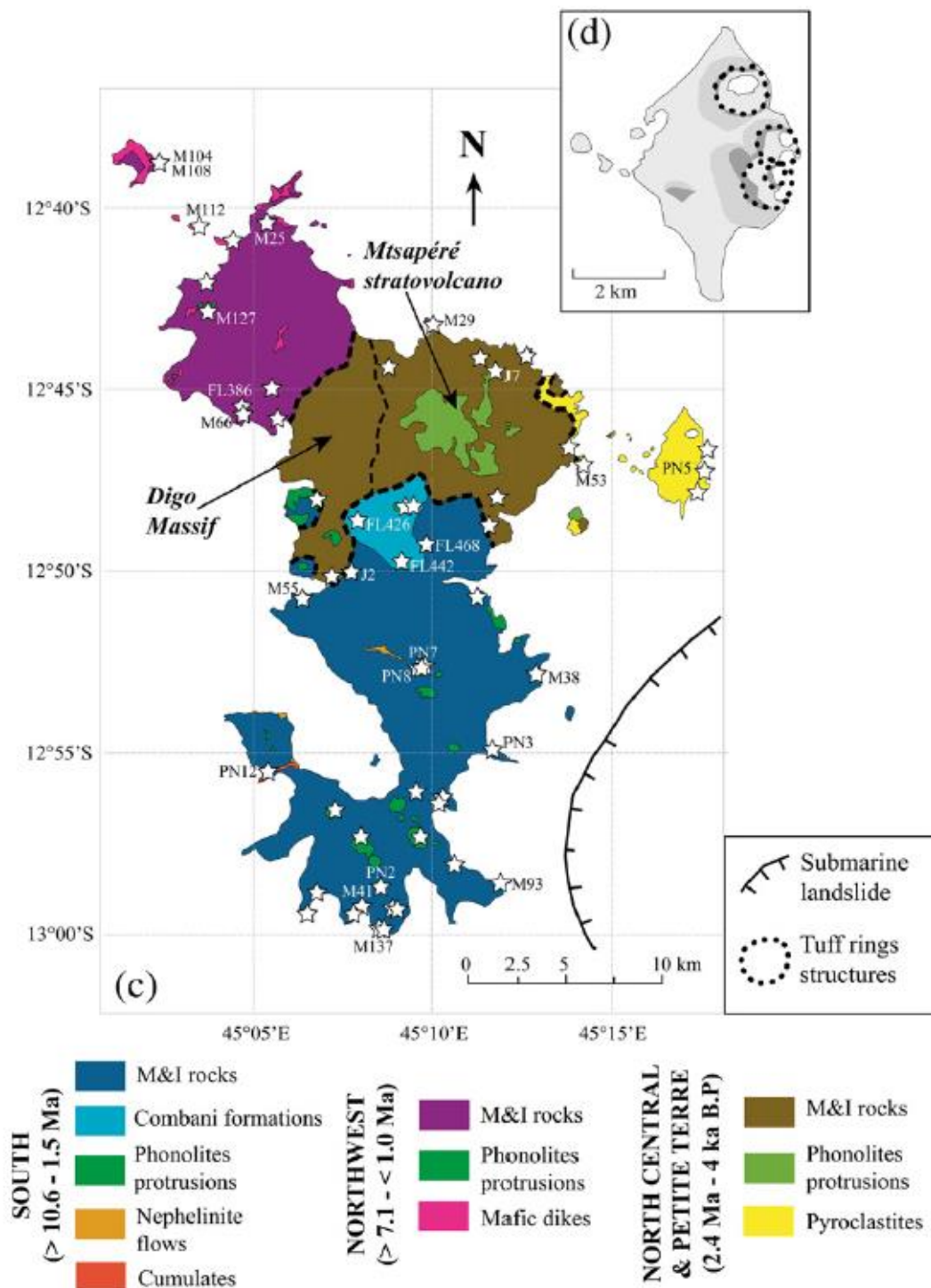


Illustration 6 : Extrait de Pelleter et al. (2014) : c) Schéma géologique de Mayotte, basé sur Debeuf (2004) et Nehlig et al. (2013) ; d) Schéma volcanique de Petite Terre.

Les compositions des roches mahoraises les plus courantes (basalte et phonolitique) sont décrites dans le tableau ci-dessous.

Sample	SiO ₂ wt%oxi	Al ₂ O ₃ wt%oxi	Fe ₂ O ₃ ^T wt%oxi	MnO wt%oxi	MgO wt%oxi	CaO wt%oxi	Na ₂ O wt%oxi	K ₂ O wt%oxi	TiO ₂ wt%oxi	P ₂ O ₅ wt%oxi
Phonolite (DOU 16)	58.6	15.0	3.4	0.12	0.2	0.8	5.9	5.6	0.4	0.04
Basalte (Basanite DAP 1)	39.3	7.7	8.4	0.20	8.4	8.2	2.0	0.6	3.1	0.44

Tableau 1 : Compositions typiques des roches mahoraises les plus courantes (basalte et phonolite) en % de poids d'oxydes (Puyraveau, 2016).

1.3. CLIMAT

Le climat de Mayotte est de type tropical humide insulaire avec deux saisons marquées (Lapègue, 1999) : la saison des pluies (novembre à avril) aussi appelée été austral et la saison sèche (mai à novembre). La saisonnalité est d'une cyclicité assez régulière et de brèves intersaisons assurent la transition.

Lors de la saison sèche, les vents, alizés soufflent du sud-est, asséchant les zones côtières du sud et de l'est de juillet à septembre et maintenant les sommets dans une humidité atmosphérique permanente.

Lors de la saison des pluies, les vents nord à nord-ouest sont chargés d'humidité, la saison est donc marquée par des pluies orographiques qui peuvent être intenses. Les précipitations sont principalement conditionnées par le relief (Eberscheiler, 1986 ; Lapègue, 1999), avec des précipitations interannuelles comprises entre 1 000 et 1 200 mm dans le sud et entre 1 500 et 2 000 mm dans le nord (Illustration 7). L'évolution mensuelle de la pluviométrie moyenne au nord et au sud de Mayotte est présentée Illustration 8.

Les températures moyennes annuelles fluctuent entre 21 et 28°C sur la côte ; elles diminuent avec l'altitude. Le gradient thermique est de -0.8°C/100 m (Lapègue, 1999).

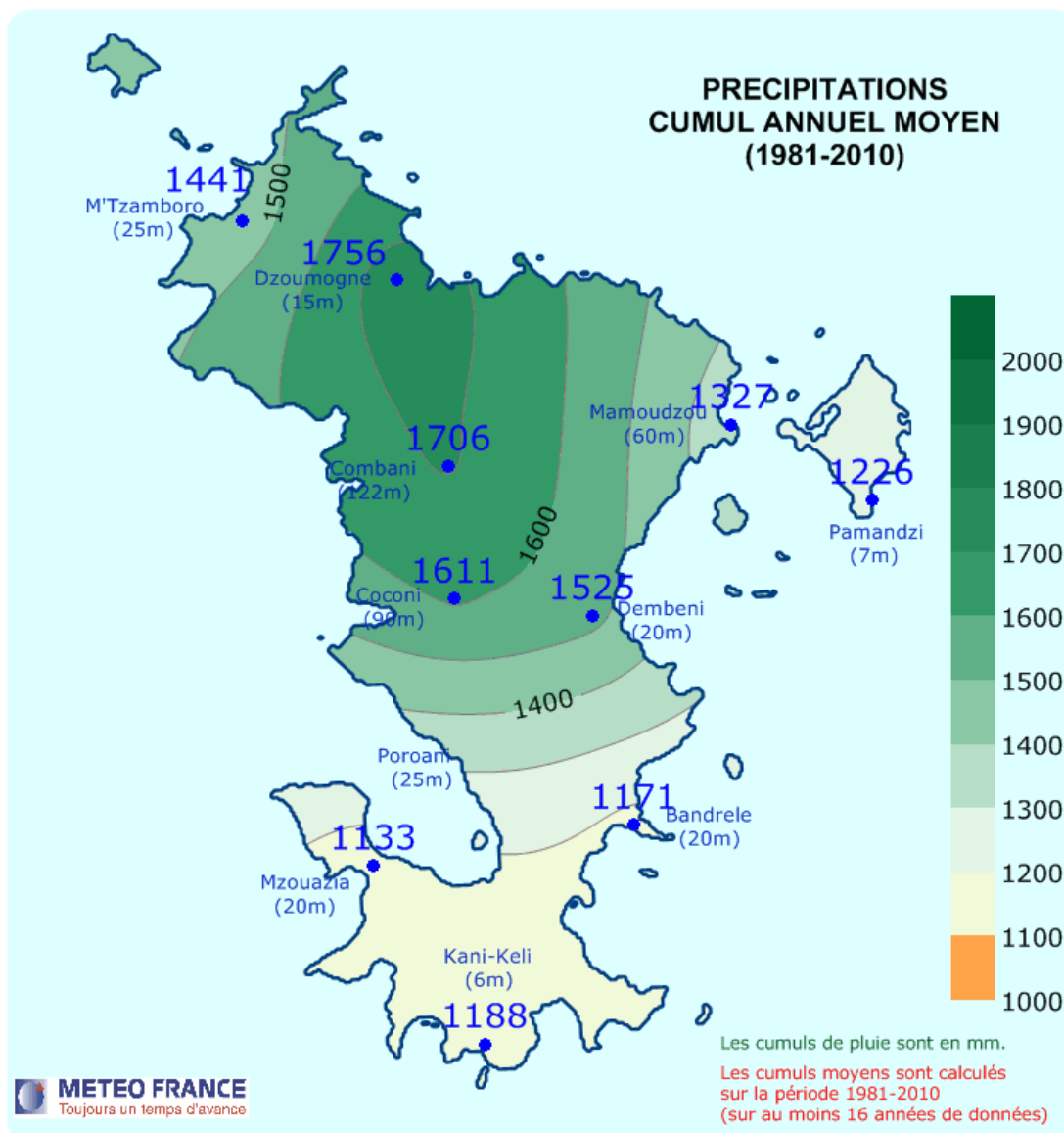


Illustration 7 : Carte du cumul annuel moyen des précipitations calculé sur la période 1981-2010 (Météo France).

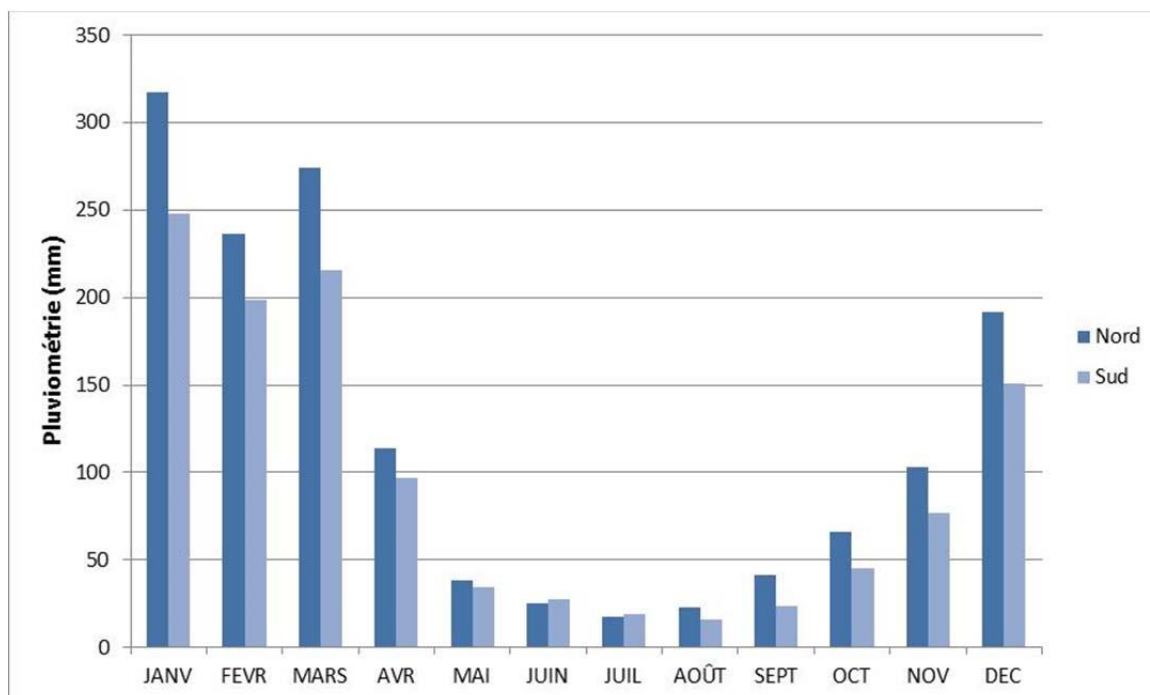


Illustration 8 : Evolution mensuelle de la pluviométrie moyenne au nord et au sud de Mayotte (Puyraveau, 2016, d'après les données de Jaouën et al., 2012).

1.4. HYDROLOGIE ET HYDROGEOLOGIE

Hydrologie

Mayotte est caractérisée par un réseau hydrographique composé de nombreux cours d'eau intermittents et d'une vingtaine de rivières pérennes présentant une très grande variabilité des débits (débits très faibles en dehors des épisodes pluvieux). Le caractère saisonnier des écoulements est très marqué.

Lors des épisodes pluvieux, les variations de régime sont très importantes et rapides, avec des écoulements souvent de type torrentiel (Nehlig et al., 2013). Cette dynamique torrentielle peut engendrer des difficultés en termes d'aménagement et de gestion de la qualité des eaux destinées à l'AEP.

Les rivières de Mayotte sont soumises à d'importantes pressions, quantitatives pour l'AEP et l'agriculture, et qualitatives liées aux pratiques traditionnelles (lessives en rivières) ou à la gestion des rejets et des déchets.

Deux plans d'eau naturels existent à Mayotte ; le lac naturel Dziani Dzaha de Petite Terre et le Dziani Karihani. Ce dernier est un lac d'eau douce d'une surface de 5 ha en saison des pluies qui se réduit à 0,25 ha en fin de saison sèche.

De plus, les retenues collinaires de Combani et Dzoumogné ont été construites pour l'alimentation en eau de la population. La retenue collinaire de Combani mise en œuvre en 1997 permet le stockage d'environ 1,5 million de m³ d'eau. Une seconde retenue collinaire a été réalisée en 2001 sur le site de Dzoumogné, pour une capacité de 2 millions de m³. Afin de renforcer les structures d'approvisionnement en eau, un projet de nouvelle retenue est à l'étude sur le bassin versant de l'Ourévénî dans le centre ouest de Mayotte.

Depuis 2013, le bassin versant mahorais est couvert par le référentiel hydrographique BD Carthage. Il permet d'avoir une meilleure connaissance des caractéristiques hydrographiques concernant les cours d'eau, les plans d'eau et les bassins versants de Mayotte.

Hydrogéologie

Des études récentes, en plus du travail de la carte géologique au 1/30 000 de Mayotte ont permis de mieux caractériser les ressources en eau souterraine (Guilbert et al. 2008 ; Jaouën et al., 2011, 2012, 2013).

La majorité des aquifères est de type semi-captif à captif. La variabilité latérale et verticale des formations géologiques et la variation des caractéristiques hydrodynamiques entraînent un compartimentage des aquifères.

A l'échelle de l'île, trois fonctionnements hydrogéologiques ont été mis en évidence (Nehlig et al., 2013) :

- les laves massives qui forment des crêtes résiduelles, elles sont peu aquifères et dépourvues de cours d'eau pérennes ;
- les massifs où alternent coulées de laves et inter-coulées (pyroclastiques, brèches de progression, dépôts volcano-sédimentaires, paléosol, etc) ont un potentiel aquifère, mise en évidence par la présence de sources de déversement, au contact de formations peu perméables, qui alimentent des cours d'eau pérennes ;
- les anciennes cuvettes volcano-sédimentaires comblées par des apports volcaniques, volcano-détritiques voire sédimentaires, forment des ensembles hétérogènes mais localement exploitables pour l'alimentation en eau.

Masses d'eau de Mayotte

a) Les masses d'eau souterraine

Suite à l'amélioration de la connaissance géologique et hydrogéologique, le découpage et la numérotation des masses d'eau souterraine ont été modifiés. La nouvelle numérotation des masses d'eau est présentée dans le tableau ci-après.

Ancienne numérotation		Nouvelle numérotation	
FRMO01	Complexe Nord	FRMG001	Volcanisme du Complexe Nord
FRMO02C	Digo	FRMG004	Volcanisme du massif du Digo
FRMO03	Complexe sud	FRMG005	Volcanisme du Complexe Sud
FRMO02B	Petite Terre	FRMG003	Volcanisme de Petite Terre
FRMO02A	Mtsapéré	FRMG002	Volcanisme du massif du Mtsapere
FRMO04	Alluvions	FRMG006	Alluvions de Kawéni

Tableau 2 : Masses d'eau souterraine de Mayotte (d'après le SDAGE 2016 - 2021¹).

Les masses d'eau souterraine de Mayotte sont présentées sur l'illustration 9.

¹ SDAGE 2016-2021 Mayotte (révision V2.2, novembre 2015)

<http://www.mayotte.pref.gouv.fr/content/download/5118/43221/file/SDAGE%202016-2021.pdf>



Illustration 9 : Carte des masses d'eau souterraine de Mayotte.

b) Les masses d'eau de surface

L'unité de surveillance et de gestion des eaux de surface au titre de la DCE est la masse d'eau de surface. Les masses d'eaux superficielles de Mayotte comportent 26 cours d'eau et 17 masses d'eau côtières.

Eaux superficielles	Nombre de masses d'eau par catégorie	Objectif d'état écologique				Objectif d'état chimique		Objectif d'état environnemental			
		Bon état 2021	Report de délai bon état écologique 2027	Report de délai bon état écologique 2033	Report au titre de l'Intérêt Général Majeur	Objectif de bon état chimique 2021	Report de délai bon état chimique 2027	Objectif de bon état environnemental 2021	Report de délai bon état environnemental 2027	Report de délai bon état environnemental 2033	Report au titre de l'Intérêt Général Majeur
Cours d'eau	26										
Naturels	26	11	14		1	25	1	11	14		1
Eaux côtières	17										
Eaux littorales	9		7	2		9			7	2	
Eaux du large et lagon	8	8				8		8			
Synthèse eaux superficielles	43	19	21	2	1	42	1	19	21	2	1

Tableau 3 : Masses d'eau de surface de Mayotte et objectif d'états écologique, chimique et environnemental (d'après SDAGE 2016 - 2021).

• Cours d'eau

Les masses d'eau cours d'eau n'englobent pas totalement l'ensemble du réseau hydrographique de Mayotte. La BD Carthage à Mayotte qui a été mise en place en 2013 est plus complète dans sa prise en compte du réseau hydrographique. Afin de localiser les points d'eau de surface de cette étude, les deux tracés (Masses d'eau - Cours d'eau et BD Carthage) seront représentés.

• Masses d'eaux côtières

Les masses d'eau côtières ne seront pas représentées dans cette étude de caractérisation des fonds hydrogéochimiques des cours d'eau et des eaux souterraines de Mayotte.

1.5. CONTEXTE REGLEMENTAIRE

Le 12 août 2013 a été publiée la directive 2013/39/UE modifiant les directives 2000/60/CE (Directive Cadre sur l'Eau) et 2008/105/CE (établissant des normes de qualité environnementale (NQE)) dans le domaine de l'eau, modifiant et abrogeant les directives du Conseil 82/176/CEE, 85/513/CEE, 84/156/CEE, 84/491/CEE, 86/280/CEE et modifiant la directive 2000/60/CE).

La Directive Cadre européenne sur l'Eau vise à atteindre ou à restaurer le bon état des cours d'eau d'ici 2021 voire 2027. Pour évaluer le bon état, la réglementation a été transposée en droit français par les principaux arrêtés suivants :

- Arrêté du 23 juin 2016 modifiant l'arrêté du 25 janvier 2010 relatif aux méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique, de l'état chimique et du potentiel écologique des eaux de surface pris en application des articles R. 212-10, R. 212-11 et R. 212-18 du code de l'environnement ;
- Arrêté du 7 août 2015 modifiant l'arrêté du 25 janvier 2010 établissant le programme de surveillance de l'état des eaux en application de l'article R. 212-22 du code de l'environnement ;
- Arrêté du 2 juillet 2012 portant modification de l'arrêté du 17 décembre 2008 établissant les critères d'évaluation et les modalités de détermination de l'état des eaux souterraines et des tendances significatives et durables de dégradation de l'état chimique des eaux souterraines.

Le tableau ci-après rappelle les valeurs guides pour les eaux souterraines et les eaux de surface. Il est intéressant de souligner que pour des éléments tels que le zinc et le cuivre, il existe un écart significatif entre les valeurs appliquées aux eaux souterraines (norme de potabilité et valeurs seuils) et les eaux de surface (NQE). Ces valeurs soulignent l'importance de définir au mieux les

concentrations naturelles pour ces éléments car dans certains contextes des concentrations naturelles pourront être proches voire supérieures à ces valeurs guides. Ceci prend toute son importance lorsque les eaux souterraines alimentent les cours d'eau.

La DCE et la circulaire du 23 octobre 2013 relative à *l'application de l'arrêté du 17 décembre 2008 établissant les critères d'évaluation et les modalités de détermination de l'état des eaux souterraines et des tendances significatives et durables de dégradation de l'état chimique des eaux souterraines* soulignent que « les masses d'eau souterraine pouvant être hétérogènes tant du point de vue des écoulements souterrains que des pressions, l'état de chaque sous-bassin ou unité d'une même masse d'eau peut être très variable. La DCE ne visant d'ailleurs qu'à donner une image globale de l'état des eaux souterraines, il est parfaitement possible que quelques sous-bassins soient en mauvais état et que l'ensemble de la masse d'eau reste en bon état ».

Ce constat est primordial pour l'évaluation de l'état des masses d'eau et en particulier pour la prise en compte des fonds hydrogéochimiques qui n'échappent pas au constat d'hétérogénéité. Il est ainsi délicat de définir pour chaque paramètre une valeur de fond hydrogéochimique pour l'ensemble de la masse d'eau. Il est en revanche souhaitable de connaître les gammes de concentrations et les valeurs moyennes pour guider, accompagner, justifier l'évaluation de l'état chimique d'une masse d'eau.

Le fond hydrogéochimique peut être associé à d'autres éléments non utilisés dans le cadre de l'évaluation de l'état des masses d'eau de surface au titre de la DCE ; il est intéressant de les caractériser, notamment dans le cas de l'utilisation de la ressource pour l'usage « alimentation en eau potable » (AEP) , c'est pourquoi , les éléments traces tels que les éléments considérés comme toxiques ou indésirables par la directive « Eau potable » 98/60/CE et par son décret d'application en droit français (n°1220 du 20 décembre 2001) sont considérés, à savoir : arsenic, baryum, bore, fluor, cadmium, chrome, mercure, cuivre, nickel, plomb, zinc, antimoine, sélénium, aluminium, le fer et le manganèse. De plus, pour les éléments ne disposant pas de limite de qualité, ni de NQE, comme le sodium, les chlorures et les sulfates, les références de qualité, définies dans l'annexe II-B de l'arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation, ont donc été prises en compte (Tableau 4).

	Norme de potabilité (µg/L)	Valeurs seuils (µg/L)	Norme de Qualité Environnementale (NQE) Moyenne annuelle (µg/L)
Aluminium	200	200	Pas de valeur
Ammonium	0,1 (mg/L) et 0,5 (mg/L) si origine naturelle	0,5 (mg/L)	0,5 (mg/L)
Antimoine	5	5	Pas de valeur
Arsenic	10	10	0,83
Baryum	700	700	Pas de valeur
Bore	1000	1000	Pas de valeur
Cadmium	5	5	De ≤ 0,08 à 0,25 (par classes)
Chrome	50	50	3,4
Chlorure	250 (mg/L)	250 (mg/L)	Pas de valeur
Cuivre	2000	2000	1
Fer	200	200	Pas de valeur
Fluorure	1,5 (mg/L)	1,5 (mg/L)	Pas de valeur
Manganèse	50	50	Pas de valeur
Mercure	1	1	0,07
Nickel	20	20	4
Nitrate	50 (mg/L)	50 (mg/L)	50 (mg/L)
Phosphore total	Non défini pour les eaux souterraines	0,5 (orthophosphate, mg/L)	0,2 (mg/L)
Plomb	10	10	1,2
Sélénium	10	10	Pas de valeur
Sulfate	250 (mg/L)	250 (mg/L)	Pas de valeur
Zinc	5 000	5 000	7,8

Tableau 4 : Rappel des normes de potabilité (arrêté du 11 janvier 2007), de valeurs seuils (arrêté du 2 juillet 2012, du 28 juin 2016, circulaire du 23 octobre 2012) et des normes de qualité environnementales (arrêté du 27 juillet 2015 modifiant l'arrêté du 25 janvier 2010) pour les éléments d'intérêt pour les études de fond hydrogéochimique.

1.6. CONTEXTE ET OBJECTIF DE L'ETUDE

Mayotte connaît une forte croissance démographique depuis 2007 (2,7 % de rythme annuel moyen) sur une superficie limitée. Cette augmentation importante de population couplée au développement économique de l'île constitue une pression significative et peut ainsi avoir un impact plus ou moins fort sur les ressources en eau.

Dans le cadre de la mise en application de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE), par l'intermédiaire du Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) et du Programme de Mesures (PDM), des réseaux de surveillance qualité ont vu le jour depuis l'année 2012 sur l'ensemble du bassin de Mayotte. Cependant, et malgré des pressions de plus en plus fortes sur les ressources en eau destinées à l'alimentation en eau potable (AEP), l'étude du fond hydrogéochimique naturel des eaux n'a pas encore été réalisée sur le bassin hydrographique de Mayotte.

Les différents cycles de surveillance de la DCE permettent, entre autres, l'analyse d'un nombre important d'éléments dissous dans les eaux. Toutefois certains éléments chimiques, notamment les éléments traces, peuvent être à la fois naturellement présents dans les milieux aquatiques et potentiellement rejetés par les activités humaines. Compte-tenu de la variabilité des contextes climatiques, lithologiques, hydrothermaux et hydrogéologiques, il est délicat mais primordial de délimiter précisément les zones à risque de fond hydrogéochimique en l'état actuel ; cette détermination est également indispensable pour l'évaluation de l'état des masses d'eau souterraine et superficielle qui sera prochainement réalisé lors de l'état des lieux prévu en 2019.

Dans le cadre d'une convention de partenariat avec l'AFB sur la période 2016-2018, le BRGM a entrepris l'étude visant à caractériser les fonds hydrogéochimiques des eaux souterraines et des cours d'eau du bassin hydrographique de Mayotte.

Les objectifs de cette étude sont :

- de mieux contraindre l'estimation du fond hydrogéochimique pour l'ensemble des éléments traces à risque de fond hydrogéochimique élevé (Fe, Mn) ou pour lesquels trop peu de données de qualité sont disponibles ;
- de compléter la connaissance de la qualité des masses d'eau continentales acquise dans le cadre de la surveillance DCE en déterminant les concentrations de référence pour les eaux souterraines et superficielles.

Le présent rapport constitue le rapport final de cette étude.

Suite au travail de synthèse, puis d'analyse et d'interprétation des données historiques et des données des campagnes complémentaires spécifiques à cette étude, les zones à risques de fond hydrogéochimique élevé sont identifiées ; puis des propositions de concentrations de référence par masses d'eau sont établies et enfin des valeurs seuils de bon état chimique des eaux souterraines sont proposées par masses d'eau souterraine.

2. Synthèse et valorisation des données historiques relatives à la physico-chimie des eaux souterraines et des cours d'eau

2.1. LES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES CONSULTEES

L'objectif de la synthèse bibliographique est de parcourir tous les projets et études réalisés sur Mayotte susceptibles de contenir des données physico-chimiques des eaux souterraines et des cours d'eau afin d'en proposer une compilation.

A ce jour, les données préexistantes proviennent essentiellement :

- du Réseau de Contrôle et de Surveillance (RCS) des masses d'eau au titre de la DCE avec 6 campagnes par an pour les nutriments (P, N, Si, DCO, DBO5) sur 2 points de cours d'eau et 2 campagnes par an portant principalement sur les éléments majeurs sur 7 points d'eau souterraine ;
- des analyses complètes type « code de la santé publique » pour l'ensemble des captages AEP de Mayotte sur une campagne, avec analyse des éléments majeurs et micropolluants ;
- des analyses réalisées dans le cadre du développement de bioindicateurs macro-invertébrés et diatomées à Mayotte (consortium ONEMA-INRA-MNHN-IRSTEA-ASCONIT) ;
- de quelques analyses ponctuelles sur les captages/forages réalisées dans le cadre du contrôle sanitaire (Agence Régionale de Santé) ou de la veille environnementale ;
- la caractérisation hydrogéochimique des secteurs nord-ouest (Jaouën et al., 2012) et centre sud (Jaouën et al., 2013) portant sur environ 50 points, avec des analyses des éléments majeurs et traces, ainsi que des données de datation CFC/SF6.

Les données antérieures au programme de surveillance de la qualité des eaux à Mayotte sont peu nombreuses, fragmentées, mal renseignées et réparties de manière hétérogène à l'échelle de l'île. Une synthèse et une compilation de ces données avaient déjà été établies lors de la définition des Réseaux de Contrôle et de Surveillance de la qualité des eaux lors de l'état des lieux des masses d'eaux au titre de la DCE (Malard et Winckel, 2008). Les analyses provenaient alors :

- des suivis réguliers assurés par la SMAE (Ex SOGEA) ou la DDASS (Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales) pour le compte du SIEAM (Syndicat Intercommunal d'Eau et d'Assainissement de Mayotte) sur les eaux brutes des points du réseau de distribution (prises d'eau en rivière et forages) ;
- des analyses annuelles réalisées par la DAF (Direction de l'Agriculture et de la Forêt) sur une soixantaine de sites pour les eaux de surface et souterraines ;
- des campagnes d'analyses réalisées par la DDASS sur des points particuliers (retenues collinaires, plans d'eau, etc.) ;

- de campagnes d'analyses mandatées ou réalisées par l'Office International de l'Eau sur les eaux brutes souterraines et de surface en 2003 et 2004 (forages et captages) ;
- du Centre de Recherche d'Expertise et de Contrôle des Eaux de Paris (CRECEP) ;
- du Laboratoire départemental d'épidémiologie du milieu de la Réunion ;
- d'analyses ponctuelles réalisées lors d'études particulières (travaux universitaires de thèses, contamination soupçonnée d'une ressource, création d'un forage, etc.) ;
- de sources inconnues (d'après Malard et Winckel, 2008).

2.2. LA BASE DE DONNEES

Les données d'analyses physico-chimiques recensées couvrent la période 1983-2016. Le tableau ci-après récapitule les références, le nombre d'analyses concernant des points d'eau souterraine (ESO) ou d'eau de surface (ESU) et la période de prélèvements et d'analyses.

Références	Nombre d'analyses ESO	Nombre d'analyses ESU	Période d'analyses
Caractérisations hydrogéologiques Nord-Ouest et Centre-Sud de Mayotte (Jaouën et al., 2012 ; Jaouën et al., 2013)	27	15	2010-2012
RCS DCE de Mayotte (BRGM)	101	673	2008-2016
Développement de bioindicateurs à Mayotte	-	166	2014-2015
Source Massimoni (Lebon et Lachassagne, 2001)	1	0	2000
SOGEA	140	-	2008-2011
SIEAM	62	16	2002-2007
DASS	15	20	1998-2008
DAF	22	25	1993-2004
CRECEP	24	18	2003-2005
Laboratoire de la Réunion	6	-	2000-2004
Lapègue (1999)	-	9	1994
Eberschweiler (1986)	9	6	1983
CARSO	-	1	2004
Inconnues (Définition RCS DCE, d'après Malard et Winckel, 2008)	55	40	1992-2008
TOTAL	462	989	1983-2016

Tableau 5 : Origine, nombre et période d'acquisition des données physico-chimiques des points d'eau souterraine (ESO) et de surface (ESU) de la base de données.

La base de données physico-chimiques comporte :

- les caractéristiques des points de prélèvements (code BSS/ESU, nom de la station, commune, coordonnées GPS) et de la campagne de prélèvement (date et heure si précisées) ;
- les mesures physico-chimiques *in situ* : température, pH, conductivité, potentiel d'oxydoréduction, oxygène dissous ;
- les paramètres généraux : turbidité, matières en suspension, carbone organique dissous, etc ;
- les concentrations en éléments majeurs dont Ca, Mg, Na, K, HCO₃, Cl, SO₄ et SiO₂ ;
- les concentrations en éléments traces dont Al, Fe, Mn, F, B, Ba, Pb, Zn ;
- la présence ou non de micropolluants organiques, phytosanitaires et bactéries dans les eaux ;
- les données de datation et remarques sur les points de prélèvements ;
- l'auteur du prélèvement et la référence du document ou de l'organisme à l'origine de la donnée.

De plus, les caractéristiques techniques et hydrogéologiques des différents points de prélèvements ont été prises en compte. Les données géologiques et hydrogéologiques disponibles pour les forages, piézomètres et les sources ont également été collectées ainsi que les caractéristiques des points de prélèvements cours d'eau pour les eaux de surface.

2.3. LES DONNEES BRUTES

Les points d'eau souterraine (ESO)

a) Points d'eau souterraine avec des données physico-chimiques extraites d'ADES

Les données physico-chimiques disponibles dans la base ADES ont été consultées et extraites (22/03/2018) ; elles couvrent la période 2009-2016.

Dix-sept points d'eau souterraine (forages AEP, drain AEP, sources, piézomètres) dans ADES comportent des données d'analyses physico-chimiques bancarisées. Ils sont présentés dans le tableau ci-après en fonction de la masse d'eau souterraine à laquelle ils sont rattachés et localisés sur l'illustration 1. Toutes les masses d'eau sont représentées a minima avec un point d'eau.

Code Masse d'eau	Nom Masse d'eau	Commune	Code BSS	Type
MG001	Volcanisme du complexe Nord	BANDRABOUA	12302X0025/MOHOG	Forage AEP
MG001	Volcanisme du complexe Nord	M'ITSANGAMOUI	12306X0017/MTSAN1	Forage AEP
MG002	Volcanisme du massif du Mtsapere	TSINGONI	12306X0008/HY	Drain AEP
MG002	Volcanisme du massif du Mtsapere	TSINGONI	12306X0038/COMB	Forage AEP
MG002	Volcanisme du massif du Mtsapere	TSINGONI	12306X0047/COMB	Forage AEP
MG002	Volcanisme du massif du Mtsapere	MAMOUDZOU	12307X0022/KOUAL1	Forage AEP
MG002	Volcanisme du massif du Mtsapere	MAMOUDZOU	12307X0100/KWALE3	Forage AEP
MG002	Volcanisme du massif du Mtsapere	KOUNGOU	12307X0115/IBS	Forage industriel
MG003	Volcanisme de Petite Terre	DZAOUZI	12308X0086/PZ4	Piezometre
MG004	Volcanisme du massif du Digo	BANDRABOUA	12306X0046/BOUY	Forage AEP
MG004	Volcanisme du massif du Digo	TSINGONI	12306X0048/OURO01	Forage AEP
MG005	Volcanisme du Complexe Sud	DEMBENI	12313X0007/HY	Source
MG005	Volcanisme du Complexe Sud	DEMBENI	12313X0021/TSARA1	Piezometre
MG005	Volcanisme du Complexe Sud	KANI-KELI	12316X0032/MRONAB	Forage AEP
MG006	Alluvions de Kawéni	MAMOUDZOU	12307X0013/F1	Forage AEP
MG006	Alluvions de Kawéni	MAMOUDZOU	12307X0014/F2	Forage AEP
MG006	Alluvions de Kawéni	MAMOUDZOU	12307X0021/KAQUE3	Forage AEP

Tableau 6 : Liste des points d'eau souterraine ayant des données physico-chimiques bancarisées dans ADES sur la période 2009-2016.

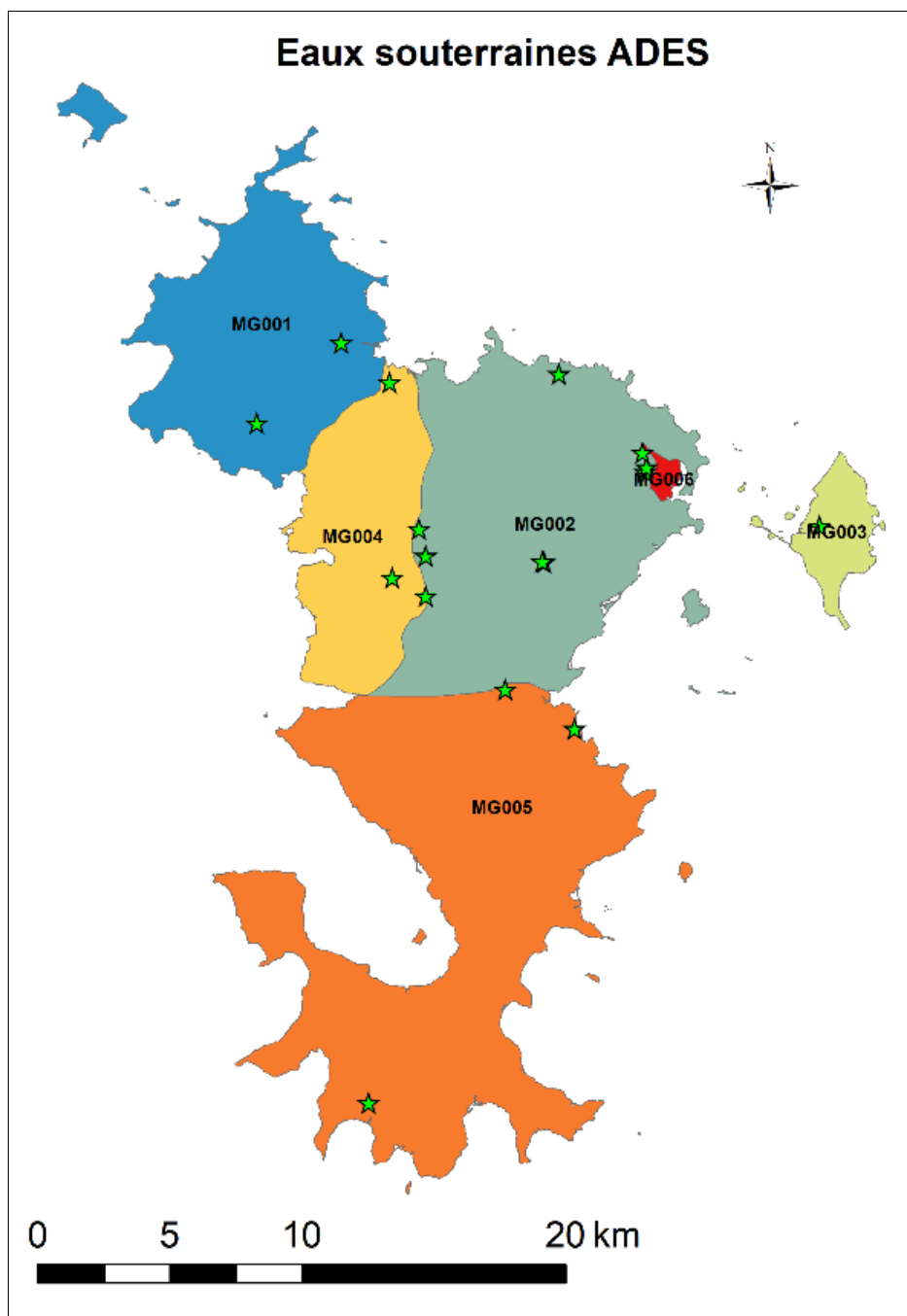


Illustration 10 : Carte de localisation des points d'eau souterraine issus d'ADES en fonction des masses d'eau souterraine de Mayotte.

b) Points d'eau souterraine (ESO) de la base de données

L'ensemble des points d'eau souterraine, disposant de données physico-chimiques disponibles sur la période 1983-2016, collectés lors de cette phase 1 de l'étude sont listés dans le Tableau 7. Ils sont localisés sur l'illustration 11, en fonction des masses d'eau souterraine. Ils sont classés en fonction du type de points d'eau : forage, drain, piézomètre ou source.

Code Masse d'eau	Nom Masse d'eau	Nouveau BSS	Ancien BSS	Commune	Type
MG001	Volcanisme du Complexe Nord	ANDRE10		M'Tsangamouji	Source
MG001	Volcanisme du Complexe Nord	BSS002PLGY	12301X0001/C	Acoua	Forage
MG001	Volcanisme du Complexe Nord	BSS002PLHM	12301X0016/HY	Acoua	Source
MG001	Volcanisme du Complexe Nord	BSS002PLNA	12302X0017/DZOU1	Bandraboua	Piezometre
MG001	Volcanisme du Complexe Nord	BSS002PLNJ	12302X0025/MOHOG	Bandraboua	Forage
MG001	Volcanisme du Complexe Nord	BSS002PLNK	12302X0026/PZ1	Mtsamboro	Piezometre
MG001	Volcanisme du Complexe Nord	BSS002PLRW	12305X0001/MTSA	M'Tsangamouji	Source
MG001	Volcanisme du Complexe Nord	BSS002PLTE	12306X0011/TSAN1	M'Tsangamouji	Piezometre
MG001	Volcanisme du Complexe Nord	BSS002PLTK	12306X0016/MTSAN2	M'Tsangamouji	Forage
MG001	Volcanisme du Complexe Nord	BSS002PLTL	12306X0017/MTSAN1	M'Tsangamouji	Forage
MG001	Volcanisme du Complexe Nord	MAPWF30		Bandraboua	Source
MG001	Volcanisme du Complexe Nord	MOHOE10		Bandraboua	Source
MG002	Volcanisme du massif du Mtsapere	BSS002PLRX	12305X0002/HY	M'Tsangamouji	Source
MG002	Volcanisme du massif du Mtsapere	BSS002PLTB	12306X0008/HY	Tsingoni	Drain
MG002	Volcanisme du massif du Mtsapere	BSS002PLUH	12306X0038/COMB	Tsingoni	Forage
MG002	Volcanisme du massif du Mtsapere	BSS002PLUS	12306X0047/COMB	Ouangani	Forage
MG002	Volcanisme du massif du Mtsapere	BSS002PLUY	12306X0053/PZ5	Tsingoni	Piezometre
MG002	Volcanisme du massif du Mtsapere	BSS002PMBE	12307X0022/KOUAL1	Mamoudzou	Forage
MG002	Volcanisme du massif du Mtsapere	BSS002PMCD	12307X0045/GOUL	Mamoudzou	Forage
MG002	Volcanisme du massif du Mtsapere	BSS002PMCM	12307X0053/GOUF4D	Mamoudzou	Forage
MG002	Volcanisme du massif du Mtsapere	BSS002PMEL	12307X0100/KWALE3	Mamoudzou	Forage
MG002	Volcanisme du massif du Mtsapere	BSS002PMFB	12307X0115/IBS	Koungou	Forage
MG002	Volcanisme du massif du Mtsapere	BSS002PMFC	12307X0116/LONTRI	Koungou	Piezometre
MG002	Volcanisme du massif du Mtsapere	BSS002PMFU	12307X0133/HY	Koungou	Source
MG002	Volcanisme du massif du Mtsapere	BSS002PMGA	12307X0139/SOURCE	Mamoudzou	Source
MG002	Volcanisme du massif du Mtsapere	BSS002PMGG	12307X0145/KWALHA	Mamoudzou	Source
MG002	Volcanisme du massif du Mtsapere	BSS002PMGH	12307X0146/KWALBA	Mamoudzou	Source
MG002	Volcanisme du massif du Mtsapere	BSS002PPJT	12313X0002/HY	Dembeni	Piezometre
MG002	Volcanisme du massif du Mtsapere	CAVAE10		Mamoudzou	Source
MG002	Volcanisme du massif du Mtsapere	KWALS10		Mamoudzou	Source
MG003	Volcanisme de Petite Terre	BSS002PNKM	12308X0038/PAMA1	Pamandzi	Piezometre
MG003	Volcanisme de Petite Terre	BSS002PNKN	12308X0039/PAMA2	Dzaoudzi	Piezometre
MG003	Volcanisme de Petite Terre	BSS002PNML	12308X0086/PZ4	Pamandzi	Piezometre
MG004	Volcanisme du massif du Digo	BSS002PLTC	12306X0009/COMB1	Tsingoni	Piezometre
MG004	Volcanisme du massif du Digo	BSS002PLTD	12306X0010/COMB2	Tsingoni	Piezometre
MG004	Volcanisme du massif du Digo	BSS002PLTF	12306X0012/OURO02	Tsingoni	Piezometre
MG004	Volcanisme du massif du Digo	BSS002PLTG	12306X0013/TSIN1	Tsingoni	Piezometre
MG004	Volcanisme du massif du Digo	BSS002PLTH	12306X0014/BEJA1	M'Tsangamouji	Forage
MG004	Volcanisme du massif du Digo	BSS002PLTJ	12306X0015/BEJA2	M'Tsangamouji	Piezometre
MG004	Volcanisme du massif du Digo	BSS002PLTT	12306X0024/BOUY	Bandraboua	Forage
MG004	Volcanisme du massif du Digo	BSS002PLUR	12306X0046/BOUY	Bandraboua	Forage
MG004	Volcanisme du massif du Digo	BSS002PLUT	12306X0048/OURO01	Tsingoni	Forage
MG004	Volcanisme du massif du Digo	BSS002PNWN	12312X0002/HY	Chiconi	Source
MG004	Volcanisme du massif du Digo	BSS002PNXS	12312X0030/KAHA1	Ouangani	Piezometre
MG004	Volcanisme du massif du Digo	BSS002PNXT	12312X0031/KAHA2	Ouangani	Piezometre
MG004	Volcanisme du massif du Digo	CHIRS10		Tsingoni	Source
MG004	Volcanisme du massif du Digo	WALE510		Tsingoni	Source
MG005	Volcanisme du Complexe Sud	BSS002PNWT	12312X0007/HY	Sada	Source
MG005	Volcanisme du Complexe Sud	BSS002PNXU	12312X0032/PORO1	Chirongui	Piezometre
MG005	Volcanisme du Complexe Sud	BSS002PNXV	12312X0033/MRE1	Chirongui	Piezometre
MG005	Volcanisme du Complexe Sud	BSS002PNXW	12312X0034/MRERE1	Tsingoni	Piezometre
MG005	Volcanisme du Complexe Sud	BSS002PNXX	12312X0035/MRERE2	Chirongui	Forage
MG005	Volcanisme du Complexe Sud	BSS002PNYJ	12312X0050/PORO	Chirongui	Piezometre
MG005	Volcanisme du Complexe Sud	BSS002PPJY	12313X0007/HY	Dembeni	Source
MG005	Volcanisme du Complexe Sud	BSS002PPKA	12313X0009/HY	Dembeni	Source
MG005	Volcanisme du Complexe Sud	BSS002PPKJ	12313X0018/DEMB1	Dembeni	Piezometre
MG005	Volcanisme du Complexe Sud	BSS002PPKL	12313X0020/HANJ1	Dembeni	Piezometre
MG005	Volcanisme du Complexe Sud	BSS002PPKL	12313X0020/HANJ1	Dembeni	Piezometre
MG005	Volcanisme du Complexe Sud	BSS002PPKL	12313X0020/HANJ1	Dembeni	Piezometre
MG005	Volcanisme du Complexe Sud	BSS002PPKM	12313X0021/TSARA1	Dembeni	Piezometre
MG005	Volcanisme du Complexe Sud	BSS002PPKN	12313X0022/TSARA2	Dembeni	Piezometre
MG005	Volcanisme du Complexe Sud	BSS002PPKX	12313X0031/HAN2	Dembeni	Piezometre
MG005	Volcanisme du Complexe Sud	BSS002PPKZ	12313X0033/BAND	Bandrele	Piezometre
MG005	Volcanisme du Complexe Sud	BSS002PPPLA	12313X0034/DEMHAU	Dembeni	Piezometre
MG005	Volcanisme du Complexe Sud	BSS002PPVQ	12316X0006/HY	Chiconi	Source
MG005	Volcanisme du Complexe Sud	BSS002PPWN	12316X0031/MRO1	Kani Keli	Piezometre
MG005	Volcanisme du Complexe Sud	BSS002PPWP	12316X0032/MRONAB	Kani-Keli	Forage
MG005	Volcanisme du Complexe Sud	BSS002PPWU	12316X0037/PZ2	Kani Keli	Piezometre
MG005	Volcanisme du Complexe Sud	BSS002PPWV	12316X0038/PZ3	Chirongui	Piezometre
MG005	Volcanisme du Complexe Sud	CHEIS10		Sada	Source
MG005	Volcanisme du Complexe Sud	DAPAS10		Chirongui	Source
MG005	Volcanisme du Complexe Sud	DEMBS10		Dembeni	Source
MG005	Volcanisme du Complexe Sud	DJALIS10		Kani-Keli	Source
MG005	Volcanisme du Complexe Sud	POROS10		Chirongui	Source
MG006	Alluvions de Kaweni	BSS002PMAV	12307X0013/F1	Mamoudzou	Forage
MG006	Alluvions de Kaweni	BSS002PMAW	12307X0014/F2	Mamoudzou	Forage
MG006	Alluvions de Kaweni	BSS002PMBD	12307X0021/KAQUE3	Mamoudzou	Forage

Tableau 7 : Liste des points d'eau souterraine avec des données physico-chimiques disponibles sur la période 1983-2016.

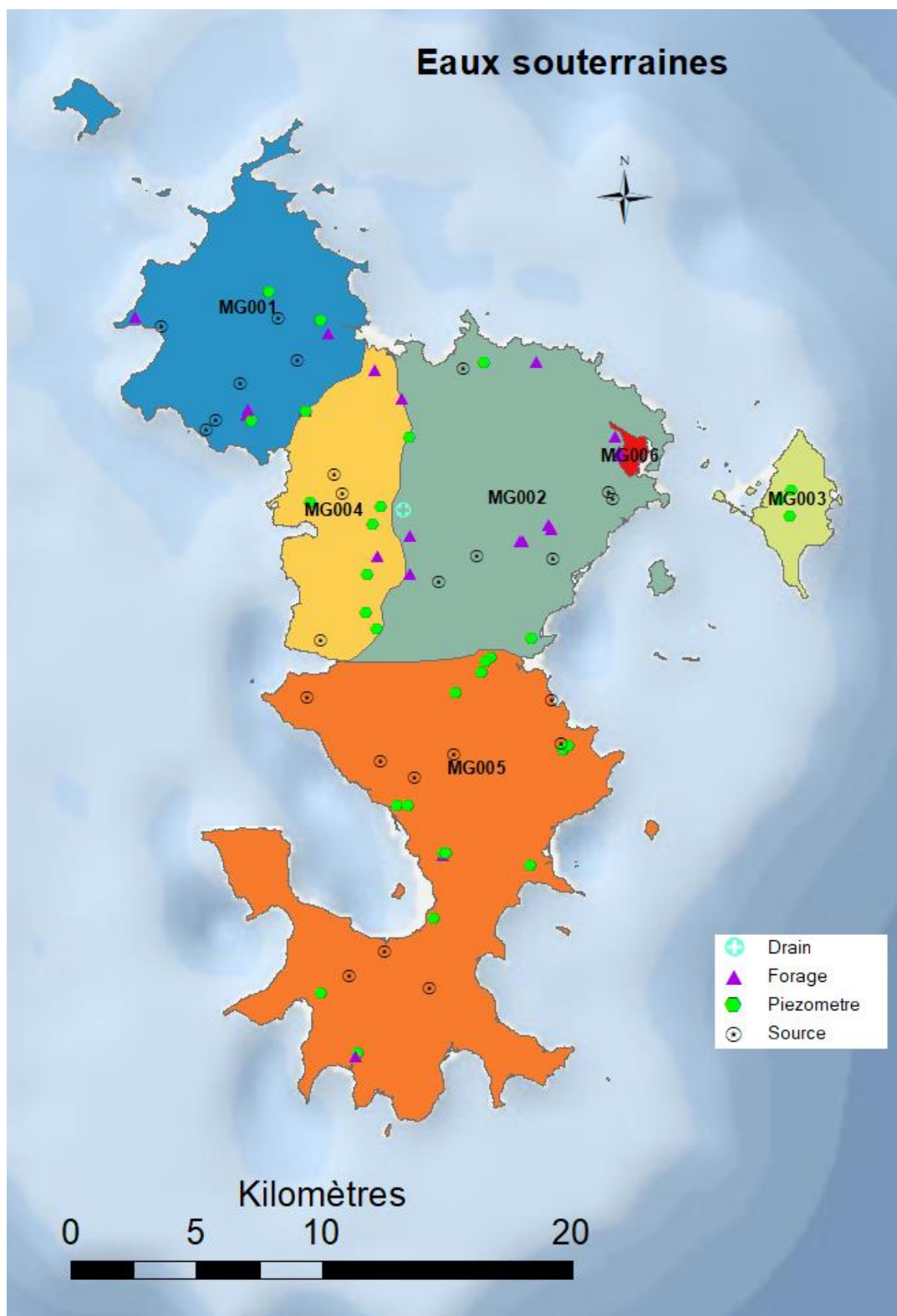


Illustration 11 : Localisation des points d'eau souterraine avec des données physico-chimiques disponibles sur la période 1983-2016.

Les points d'eau de surface (ESU)

L'ensemble des données concernant les eaux superficielles ont été compilées. Les points d'eau de surface disposant d'analyses physico-chimiques sont listés dans le tableau ci-après. Les points d'eau sont identifiés en fonction de leur appartenance à un secteur géographique de l'île (Nord-Ouest, Nord-Est, Centre-Sud). Les points sont localisés sur l'illustration 12 en fonction des masses d'eau - cours d'eau et en fonction du réseau hydrographique de la BD Carthage de Mayotte.

Commune	Nouveau Code station	Nouveau Nom Station	Secteur
Bandrele	BANAE10	Banano amont	CS
Bandrele	DAGOE20	Dagoni inter	CS
Bandrele	DAPAE31	Dapani aval 1	CS
Bandrele	DAPAE32	Dapani aval 2	CS
Chiconi	CHICE30	Chiconi aval	CS
Chiconi	OUROE20	Ouroveni captage	CS
Chiconi	OUROF20	Ouroveni affluent inter	CS
Chirongui	DAPAE20	Dapani amont	CS
Chirongui	POROE20	Poroani inter	CS
Chirongui	POROF20	Poroani affluent	CS
Dembeni	DARIE30	Darini aval	CS
Dembeni	SONGE30	Songaro Mbili aval	CS
Dembeni	HAJAE10	Hajangoua amont	CS
Dembeni	SALIE20	Salimbe inter	CS
Dembeni	DEMBE12	Dembeni amont 2	CS
Dembeni	HJAF30	Hajangoua affluent	CS
Dembeni	SALIF30	Salimbe affluent	CS
Dembeni	DEMBE30	Dembeni aval	CS
Dembeni	DEMBE11	Dembeni amont 1	CS
Dembeni	DEMBE20	Dembeni inter	CS
Kani-Keli	ANTAE12	Antanana amont 2	CS
Kani-Keli	DJALIE30	Djalimou aval	CS
Kani-Keli	ANTAE11	Antanana amont 1	CS
Kani-Keli	DJALIE10	Djalimou amont	CS
Ouangani	COCOE20	Coconi inter	CS
Ouangani	COCOF20	Coconi affluent inter	CS
Ouangani	OUAGE10	Ouangani amont	CS
Ouangani	COCOE30	Coconi aval	CS
Ouangani	GOMEE20	Gomeni inter	CS
Ouangani	OUAGE30	Ouangani aval	CS
Ouangani	OUAGE20	Ouangani inter	CS
Sada	CHEIE30	M'tsangachehi aval	CS
Tsingoni	COMBE12	Combani amont 2	CS
Tsingoni	COMBR10	Combani retenue amont	CS
Tsingoni	COMBE11	Combani amont 1	CS
Tsingoni	OUROE21	Ouroveni inter 1	CS
Tsingoni	OUROE22	Ouroveni inter 2	CS
Tsingoni	OUROE30	Ouroveni aval	CS
Tsingoni	OUROE10	Ouroveni amont	CS
Tsingoni	CHAJE20	Chajou inter	CS
Tsingoni	CHAJE30	Chajou aval	CS
Tsingoni	COMBE30	Combani aval	CS
Tsingoni	COMBR30	Combani retenue aval	CS
Koungou	LONGE22	Longoni inter 2	NE
Koungou	LONGE21	Longoni inter 1	NE
Koungou	LONGC20	Longoni captage	NE
Koungou	MGOME30	Mgombani aval	NE
Koungou	LONGE31	Longoni aval 1	NE
Koungou	LONGE10	Longoni amont	NE
Koungou	KANGE20	Kangani inter	NE
Koungou	LONGE32	Longoni aval 2	NE
Koungou	KIRIE30	Kirisoni aval	NE

Commune	Nouveau Code station	Nouveau Nom Station	Secteur
Mamoudzou	MAJIE31	Majimbini aval 1	NE
Mamoudzou	GOULE22	Gouloue inter 2	NE
Mamoudzou	GOULE21	Gouloue inter 1	NE
Mamoudzou	GOULC10	Gouloue captage amont	NE
Mamoudzou	KWALE30	Kwale aval	NE
Mamoudzou	KWALE21	Kwale inter 1	NE
Mamoudzou	KWALE22	Kwale inter 2	NE
Mamoudzou	KWALE12	Kwale amont 2	NE
Mamoudzou	KWALC10	Kwale captage amont	NE
Mamoudzou	MAJIE32	Majimbini aval 2	NE
Mamoudzou	GOULE30	Gouloue aval	NE
Mamoudzou	DOUJE30	Doujani aval	NE
Mamoudzou	KAWEE30	Kaweni aval	NE
Mamoudzou	MAJIE10	Majimbini amont	NE
Mamoudzou	KWALE11	Kwale amont 1	NE
Mamoudzou	KWALC30	Kwale captage aval	NE
Acoua	ACOF20	Acoua	NO
Bandraboua	DZOUR20	Dzoumogne retenue	NO
Bandraboua	MAREE10	Mare amont	NO
Bandraboua	DZOU30	Dzoumogne captage	NO
Bandraboua	BOUYE30	Bouyouni aval	NO
Bandraboua	BOUYE21	Bouyouni inter 1	NO
Bandraboua	BOUYE22	Bouyouni inter 2	NO
Bandraboua	BOUYC20	Bouyouni captage	NO
Bandraboua	MAREE30	Mare aval	NO
Bandraboua	MAPWE30	Mapouera aval	NO
Bandraboua	MOHOE20	Mouhogni inter	NO
Bandraboua	MJIAE30	Mjihari aval	NO
Bandraboua	MOHOE30	Mouhogni aval	NO
Bandraboua	MOHOC30	Mouhogni captage	NO
Bandraboua	BOUYE23	Bouyouni inter 3	NO
Bandraboua	MOUEE30	Moueni aval	NO
Bandraboua	MEREC30	Meresse captage	NO
M'Tsangamouji	ANDRE21	Andrianabe inter 1	NO
M'Tsangamouji	BATIF10	Batirini affluent amont	NO
M'Tsangamouji	ANDRE32	Andrianabe aval 2	NO
M'Tsangamouji	BATIE30	Batirini aval	NO
M'Tsangamouji	BOUGE10	Boungoumouhe amont	NO
M'Tsangamouji	ANDRE31	Andrianabe aval 1	NO
M'Tsangamouji	ANDRE22	Andrianabe inter 2	NO
M'Tsangamouji	BOUGE20	Boungoumouhe inter	NO
M'Tsangamouji	BATIF30	Batirini affluent aval	NO
M'Tsangamouji	MASIF20	Massimoni affluent	NO
M'Tsangamouji	BEJAE20	Beja inter	NO
Tsingoni	BOUYE10	Bouyouni amont	NO
Tsingoni	CHIRE31	Chiririni aval 1	NO
Tsingoni	WALEC20	Wale captage	NO
Tsingoni	WALEF20	Hachenoua puits	NO
Tsingoni	WALEE30	Wale aval	NO
Tsingoni	CHIRE10	Chiririni amont	NO
Tsingoni	WALEF32	Wale affluent 2	NO
Tsingoni	WALEF31	Wale affluent 1	NO
Tsingoni	CHIRE32	Chiririni aval 2	NO
Tsingoni	MABOF20	Maboungani affluent	NO

Tableau 8 : Liste des points d'eau de surface avec des données physico-chimiques disponibles sur la période 1983-2016.

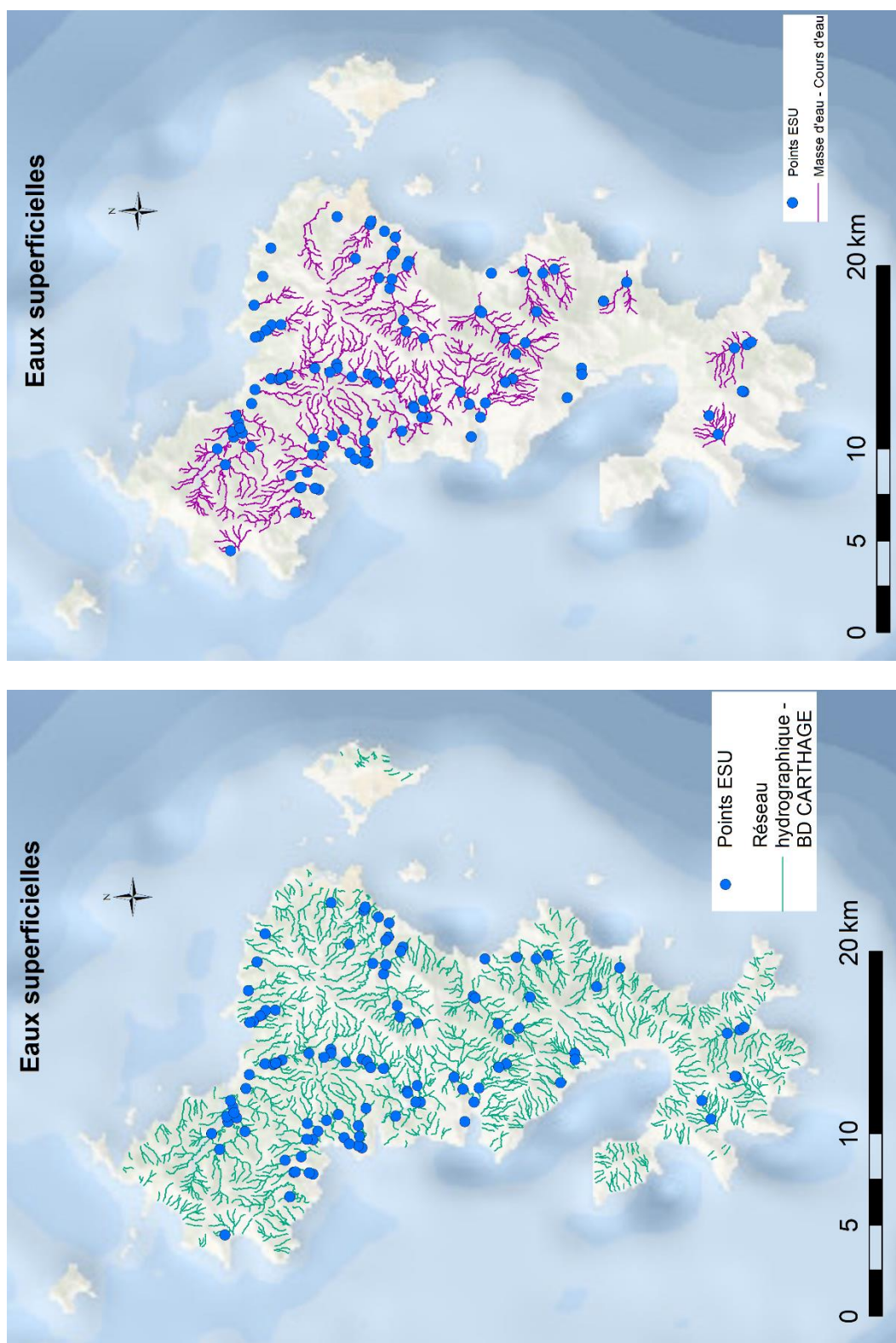


Illustration 12 : Localisation des points d'eau superficielle (ESU) historiques en fonction des 26 masses d'eau - cours d'eau de Mayotte et du réseau hydrographique de la BD Carthage de Mayotte.

Occupation des sols

L'occupation des sols sur le territoire de Mayotte est documentée par la carte Corine Land Cover (2012 ; 2006 révisée) et le registre parcellaire graphique (RPG) également disponible depuis 2014. Ces données seront utilisées en phase 2, afin de caractériser le fond hydrogéochimique de Mayotte.

Localisation des points d'eau en fonction de la géologie

L'ensemble des points d'eau souterraine (ESO) et d'eau de surface (ESU) compilés lors de la phase 1 de cette étude ont été localisés sur la carte géologique au 1/30 000 de Mayotte (Lacquement, 2013).

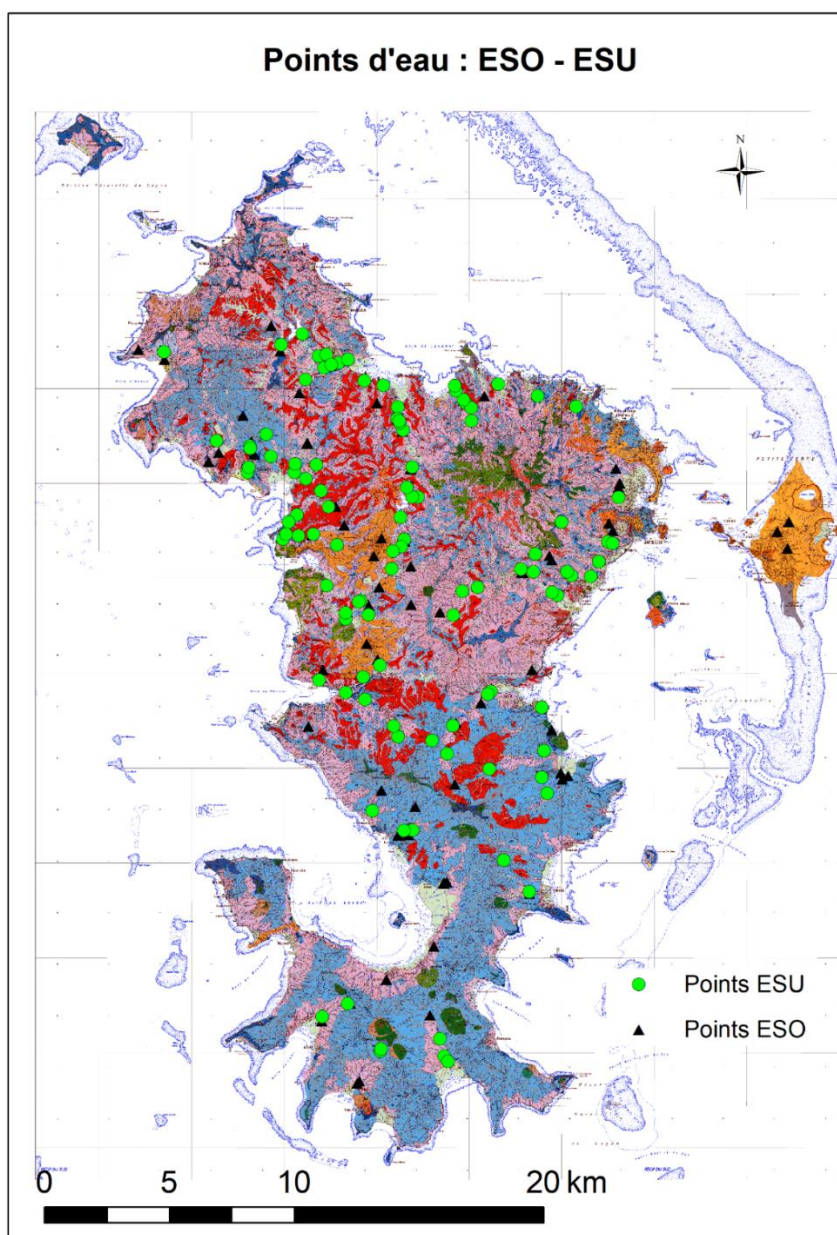


Illustration 13 : Localisation des points d'eau souterraine (ESO) et de surface (ESU) sur fond de la carte géologique de Mayotte (Lacquement et al., 2013).

D'après leur répartition sur l'ensemble de l'île (Illustration 13), l'objectif de pouvoir disposer d'un panel représentatif de points d'eau souterraine et de surface non influencés par une activité anthropique, afin de pouvoir dresser une cartographie des fonds hydrogéochimiques de Mayotte semble bien se présenter.

De plus, ces données historiques seront complétées par les données des deux campagnes complémentaires d'échantillonnage, pour analyses physico-chimiques *in situ*, échantillonnages et analyses au laboratoire en période de basses eaux 2017 et de hautes eaux 2018. Ces campagnes d'acquisition de données supplémentaires pour caractériser le fond hydrogéochimique de Mayotte répondent à une méthodologie appropriée ; les points sélectionnés pour les eaux superficielles et les eaux souterraines sont choisis en dehors de zone sous influence de pollution(s) anthropique(s). Pour les prélèvements dans les cours d'eau, une attention particulière sera portée lors du repérage et des prélèvements afin de s'affranchir de tout risque de contamination due aux lessives dans les cours d'eau.

3. Analyse des données historiques

3.1. BASE DE DONNEES ET QUALITE DES DONNEES

Vérification et correction des données

Les données brutes existantes ont fait l'objet d'un premier traitement; compte-tenu de l'hétérogénéité des données en fonction de leur origine. Les données d'analyses aberrantes ou fausses ont donc été corrigées et/ou éliminées.

Une vérification a été réalisée afin de corriger les éventuelles erreurs de saisie, notamment des erreurs d'unités (facteur x 1000) fréquentes pour les concentrations des éléments traces. Les unités ont également été homogénéisées. Toutes les concentrations en éléments majeurs sont reportées en mg/L et celles des éléments traces en µg/L.

Généralement, lorsque les concentrations mesurées pour un paramètre sont inférieures à sa limite de quantification (<LQ), la valeur de la concentration prise en compte est celle de la limite de quantification divisée par deux (LQ/2). Les données de la base de données couvrent la période 1983-2016 avec des LQ qui évoluent dans le temps, suivant la méthode d'analyse utilisée. Or certaines données présentent des LQ trop élevées pour la définition du fond hydrogéochimique ; ces données ont donc été retirées du jeu de données.

Le tableau ci-après présente à titre informatif des valeurs de LQ/2 retenues pour les principaux paramètres étudiés pour l'étude du fond hydrogéochimique en France métropolitaine.

Code Paramètre	Paramètre	LQ/2 max retenue (µg/l)	Code Paramètre	Paramètre	LQ/2 max retenue (µg/l)
1370	Aluminium	2	1386	Nickel	2
1335	Ammonium (en NH4)	-	1433	PO4	-
1369	Arsenic	1	1385	Sélénium	0,5
1396	Baryum	2	1338	SO4	-
1362	Bore	2	1383	Zinc	2
1337	Cl	-	1382	Plomb	0,5
1392	Cuivre	10	1376	Antimoine	0,25
1393	Fer total	5	1388	Cadmium	0,5
1391	Fluorures	25	1387	Hg	0,5
1394	Manganèse	2	1389	Chrome	2
1379	Cobalt	2			

Tableau 9 : Exemples de valeurs de LQ/2 retenues pour étude du fond hydrogéochimique en France métropolitaine.

Vérification des balances ioniques des analyses disponibles

Afin notamment de s'assurer de la qualité d'une analyse physico-chimique réalisée au laboratoire, il est nécessaire de calculer la balance ionique de l'analyse ; afin d'éviter toute erreur d'analyse,

ou de s'assurer de toute absence d'un ou plusieurs éléments majeurs dans la composition géochimique d'une eau.

Que ce soit pour les données concernant les eaux souterraines ou les eaux superficielles compilées pour Mayotte, un grand nombre d'analyses géochimiques pour une date donnée sont incomplètes. En effet, les paramètres physico-chimiques *in situ*, les éléments majeurs et les éléments traces n'ont pas été systématiquement mesurés ou analysés.

Le panel représentatif des éléments majeurs n'étant pas systématiquement présent, il n'est pas possible de déterminer pour l'ensemble des analyses géochimiques de la base de données leur balance ionique. Les calculs de balance ionique n'ont donc pu être réalisés que pour les analyses complètes. Cette première constatation par rapport à l'ensemble du jeu de données met en avant le besoin de disposer d'analyses complètes et fiables afin de pouvoir déterminer le fond hydrogéochimique de Mayotte.

La balance ionique a donc été calculée pour toutes les analyses à partir de la formule suivante :

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

Les sommes sont exprimées en meq.L⁻¹.

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

- excellente pour une balance entre - 1 et + 1 % ;
- acceptable pour une balance entre - 5 et + 5 % ;
- médiocre pour une balance entre - 10 et + 10 % ;
- mauvaise pour une balance inférieure à - 10 et supérieure à + 10 %.

Une analyse géochimique n'a été retenue que si sa balance ionique était comprise entre -10 et 10 %.

Par ailleurs, le traitement des données est volontairement restreint pour ne pas niveler artificiellement la variabilité des valeurs rencontrées, qui est porteuse de sens en termes de fonds hydrogéochimiques (Brenot et al., 2007).

3.2. RESULTATS DES DONNEES HISTORIQUES

Les données issues de la base ADES ont été comparées aux données compilées dans la base de données physico-chimiques disponibles.

Paramètres physico-chimiques *in situ*

a) Données issues d'ADES

Les données physico-chimiques issues d'ADES pour la période 2009-2016 ne concernent que les eaux souterraines de Mayotte.

Le nombre d'analyses physico-chimiques *in situ* varie suivant le paramètre mesuré, entre 89 à 106 analyses.

Le pH des eaux souterraines est compris entre 5,5 et 8,9 ; une température variant de 25,6°C à 30,6°C. Les eaux sont dans l'ensemble relativement peu minéralisées, avec une valeur moyenne de conductivité électrique de 440 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 25°C ; quelques points ont des eaux beaucoup plus minéralisées ; leurs valeurs de conductivité peuvent atteindre 2 190 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La teneur en oxygène dissous dans les eaux souterraines est normalement faible ; certaines valeurs peuvent être relativement plus élevées du fait notamment de la configuration des points de prélèvement.

Données ESO ADES 2009-2016	pH	Température (°C)	Conductivité à 25°C ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Eh (mV)	Oxygène dissous (mg/L)
Code sandre	1302	1301	1303	1330	1311
Nombre de données	106	105	89	96	103
Valeur min	5,5	25,6	125	-112	0,1
Valeur moyenne	7,4	27,8	440	276	4,7
Valeur médiane	7,4	27,9	337	268	5,0
Valeur max	8,9	30,6	2 190	628	9,6
Ecart-type	0,8	0,8	400	146	2,2

Tableau 10 : Paramètres physico-chimiques *in situ*, issus d'ADES (2009-2016).

b) Données des points d'eau souterraine (ESO) de Mayotte

Les paramètres physico-chimiques *in situ* des données disponibles pour les eaux souterraines sur la période 1983-2016, ayant une balance ionique comprise entre -10 et 10 % sont décrits dans le tableau ci-après.

Le nombre de données disponibles est plus important que celui de la base ADES, avec près de 50 % de données en plus pour le pH, 70 % en plus pour la conductivité. Le nombre d'analyses disponibles varie suivant le paramètre mesuré.

Données ESO 1983 - 2016	pH	Température (°C)	Conductivité à 25°C ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Conductivité à 20°C ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Eh (mV)	Oxygène dissous (mg/L)
Nombre de données	156	121	151	5	109	107
Valeur min	5,5	19,6	63	251	-136	0,1
Valeur moyenne	7,4	27,3	366	322	209	3,9
Valeur médiane	7,5	27,7	350	278	213	4,5
Valeur max	8,9	30,6	2 050	405	413	8,1
Ecart-type	0,8	1,9	267	56	96	2,5

Tableau 11 : Paramètres physico-chimiques *in situ* des eaux souterraines, issus de la base de données « fond hydrogéochimique », ayant des balances ioniques correctes (1983-2016).

Les valeurs pour les mesures de pH sont identiques à celles issues de ADES. Les données de température indiquent une plus grande gamme de valeurs, avec une valeur minimale de 19,6°C.

Les valeurs de conductivités à 25 °C indiquent également une plus large gamme avec des valeurs comprises entre 63 à 2 050 $\mu\text{S/cm}$. Le potentiel d'oxydo-réduction (données brutes) montre des valeurs proches de celles d'ADES. Les valeurs pour l'oxygène dissous sont similaires à celles issues d'ADES.

c) Données des points d'eau de surface (ESU) de Mayotte

Les paramètres physico-chimiques *in situ* des données disponibles pour les cours d'eau sur la période 1983-2016, ayant une balance ionique comprise entre -10 et 10 % sont décrits dans le tableau ci-après.

Globalement, les eaux de surface bénéficient d'un plus grand nombre d'analyses que les eaux souterraines, avec près de 30 % d'analyses pour le pH et près de 75% d'analyses en plus pour le potentiel d'oxydo-réduction ou l'oxygène dissous.

La valeur minimale du pH est moins acide que celle des eaux souterraines. Les données de température et de potentiel d'oxydo-réduction sont proches. Les valeurs de conductivité des eaux de surface sont globalement comprises entre 60 et 400 $\mu\text{S/cm}$. Une seule valeur extrême est à noter avec 13 920 $\mu\text{S/cm}$; il correspond à un point d'eau cours d'eau « Marée aval », influencé par la marée, où vraisemblablement le signal de l'eau de mer est légèrement dilué. Les données d'oxygène dissous indiquent des eaux superficielles un peu plus oxygénées.

Données ESU 1983 - 2016	pH	Température (°C)	Conductivité à 25°C ($\mu\text{S/cm}$)	Conductivité à 20°C ($\mu\text{S/cm}$)	Eh (mV)	Oxygène dissous (mg/L)
Nombre de données	209	206	227	3	190	188
Valeur min	6,2	19,8	62	109	-185	0,2
Valeur moyenne	7,6	25,2	285	175	172	6,5
Valeur médiane	7,6	25,5	200	188	183	7,3
Valeur max	8,5	31,0	13 920	227	368	8,5
Ecart-type	0,4	1,8	915	49	96	1,9

Tableau 12 : Paramètres physico-chimiques *in situ* des eaux de surface, issus de la base de données « fond hydrogéochimique », ayant des balances ioniques correctes (1983-2016).

d) Représentation cartographique des mesures de conductivité et du pH

Les valeurs de conductivité (à 20 ou 25°C) sur la période 1983-2016 sont comprise entre 60 et 600 $\mu\text{S/cm}$. Leur répartition spatiale sur Mayotte est présenté sur l'illustration 14.

Trois points d'eau souterraine et un point d'eau cours d'eau se distinguent :

- le point d'eau cours d'eau de « Marée aval » sur la commune de Bandraboua, qui correspond vraisemblablement à une dilution d'eau de mer (13 920 $\mu\text{S/cm}$) ;
- le piézomètre du gymnase ([12308X0086/PZ4](#)) sur la commune de Pamandzi sur Petite Terre ; qui enregistre la valeur maximale (2 190 $\mu\text{S/cm}$) pour les eaux souterraines de Mayotte ;
- le piézomètre ([12316X0038/PZ3](#)) du dispensaire de Mramadoudou sur la commune de Chirongui (1 471 $\mu\text{S/cm}$) ;
- le piézomètre ([12313X0034/DEMHAU](#)) de Dembeni Haut (1 098 $\mu\text{S/cm}$).

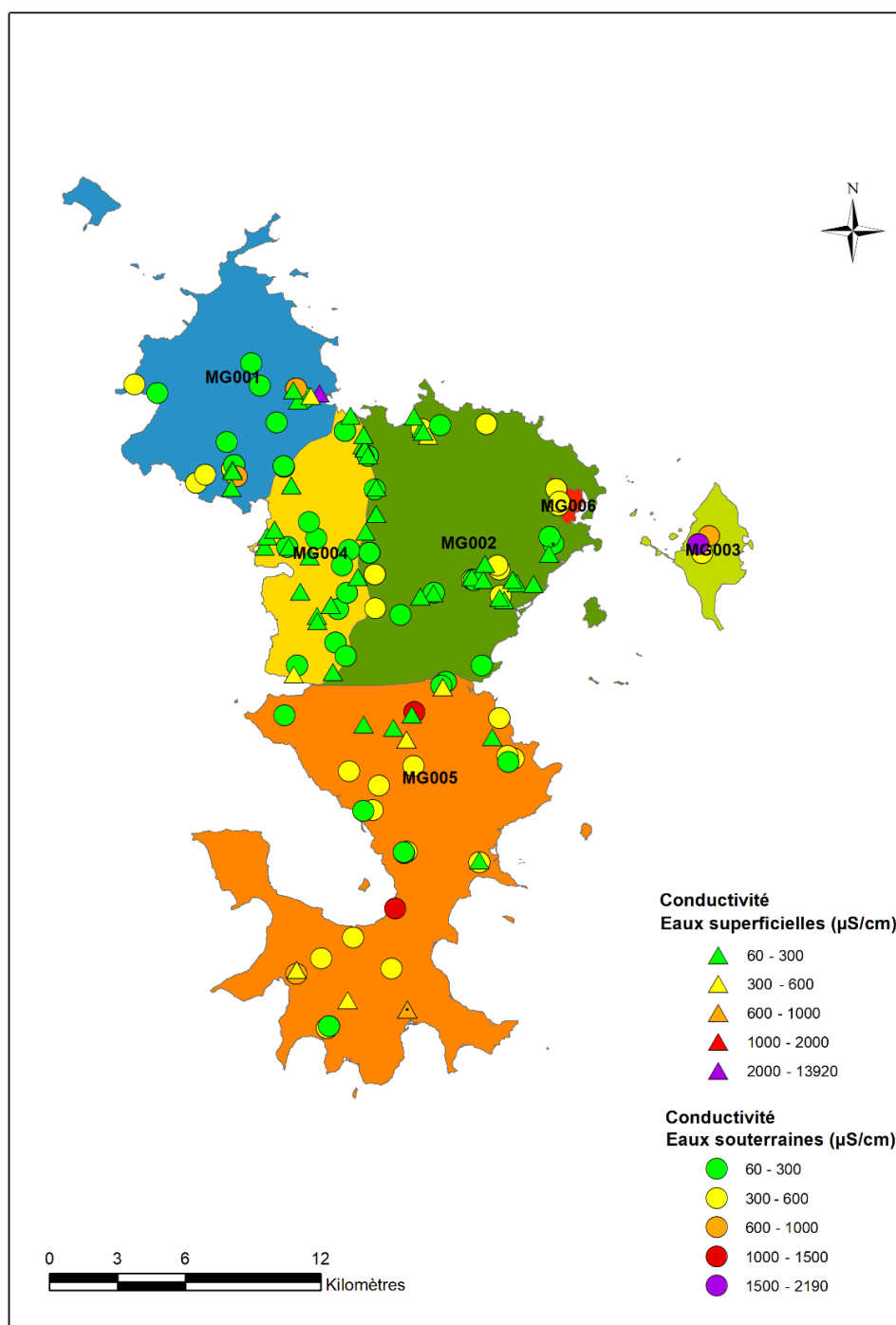


Illustration 14 : Conductivités mesurées in situ sur les points d'eau souterraine et superficielle (1983-2016).

Les valeurs de pH pour les eaux souterraines et superficielles sur la période 1983-2016 sont globalement proche de 7,5. Leur répartition spatiale sur Mayotte est présenté sur l'illustration 15.

Les valeurs les plus faibles de pH ont été mesurées pour les eaux souterraines sur la commune de Ouangani, qui appartient la masse d'eau Massif du Digo (MG004). Le piézomètre de Kahani 1 (12312X0030/KAHA1) enregistre la valeur la plus faible de pH avec 5,2.

Les valeurs maximales, quant à elles, ont été mesurées sur la masse d'eau du volcanisme Complexe Nord (MG001), avec le piézomètre de Mtsangamouji 1 (amont) (12306X0017/MTSAN1) sur la commune de M'Tsangamouji, avec plusieurs valeurs supérieures à 8,5, dont la valeur maximale de 8,9 ; mais aussi sur la masse d'eau du Complexe Sud (MG005) où des sources enregistrent des valeurs de pH de 8,7 sur les communes de Dembeni et de Sada.

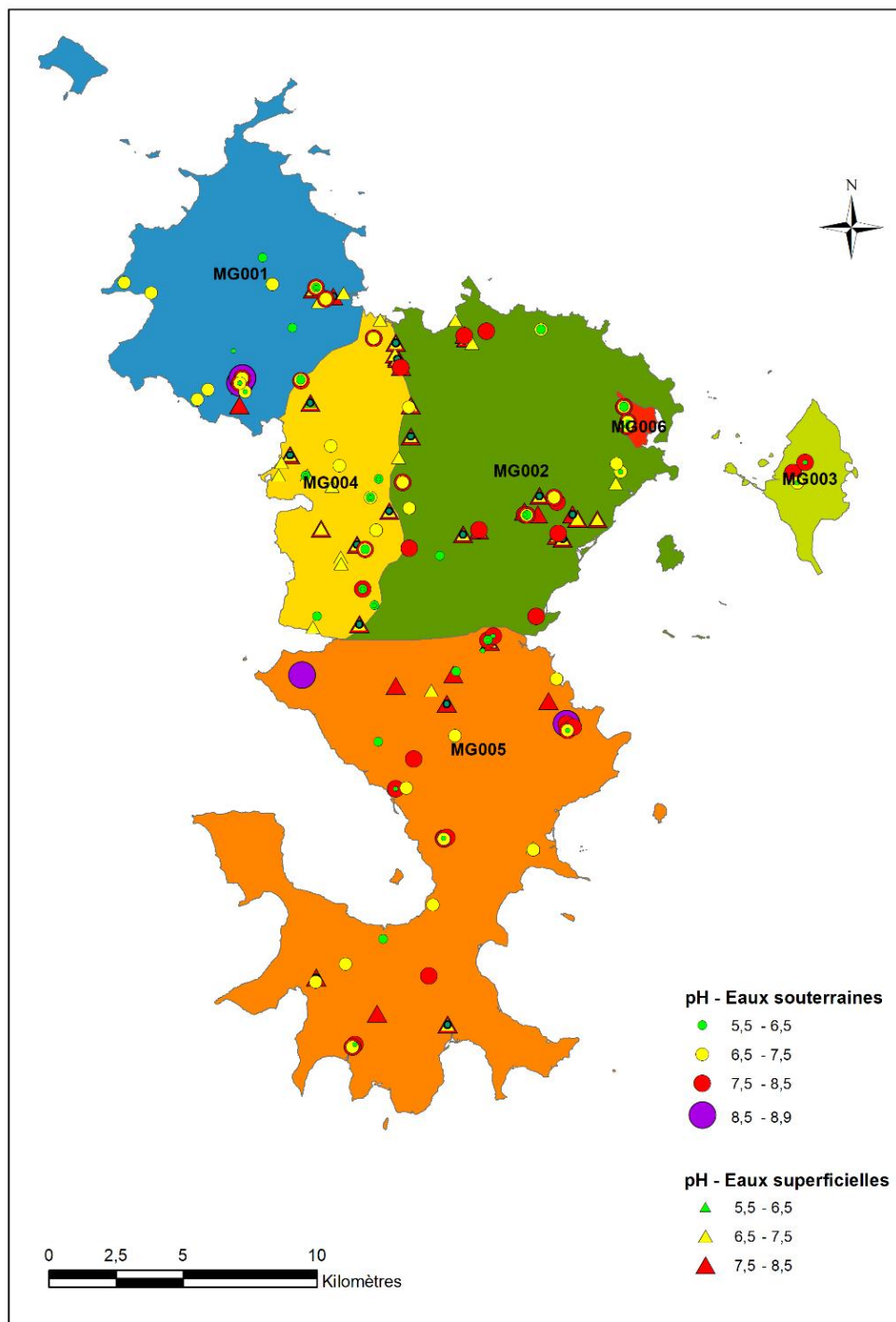


Illustration 15 : pH des eaux souterraines et des eaux superficielles (1983-2016).

Eléments majeurs

Les données des eaux souterraines ont été identifiées en fonction de la masses d'eau souterraine à laquelle elle appartiennent. Pour l'ensemble des graphiques suivants, les données sont présentées en fonction de leur appartenance à une masse d'eau.

a) TDS et conductivité électrique

La somme des éléments dissous (Total Dissolve Solid : TDS) a été calculée pour l'ensemble des analyses géochimiques ayant une balance ionique correcte.

Le TDS a été comparé aux mesures de conductivité mesurées sur le terrain.

La régression linéaire sur le graphique ci-après met en avant la bonne corrélation entre les données TDS et conductivité ; validant ainsi d'une seconde manière le jeu de données eaux souterraines.

Ce graphique met aussi en avant la différence entre les eaux souterraines à forte minéralisation de Petite Terre et les eaux souterraines de Grande Terre, qui sont globalement moins minéralisées.

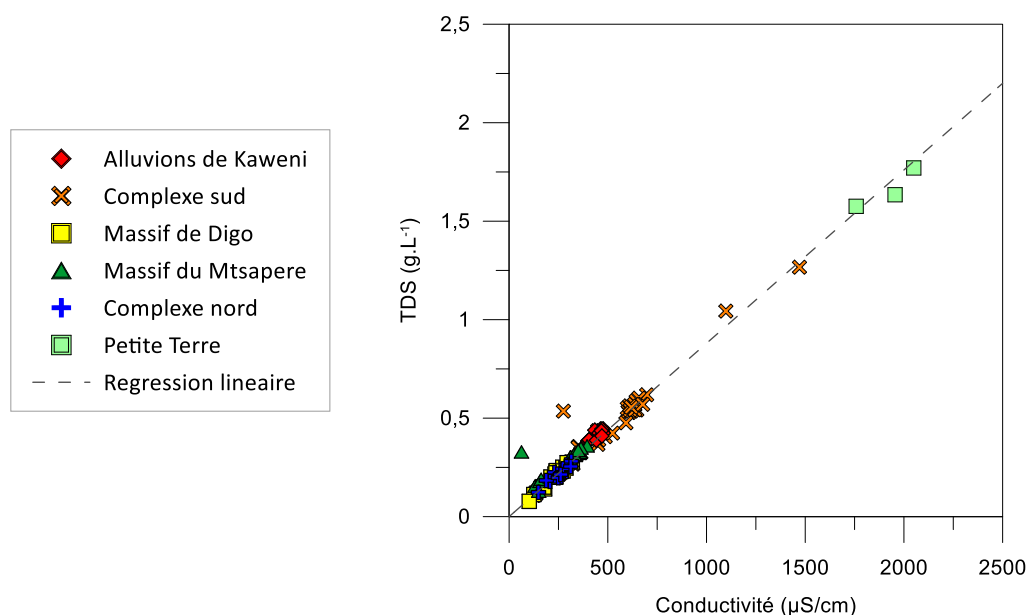


Illustration 16 : Conductivité vs. TDS des eaux souterraines de Mayotte.

b) Tableaux récapitulatifs des éléments majeurs des eaux de Mayotte

Les compositions en éléments majeurs des eaux souterraines et des cours d'eau sont présentées dans l'illustration ci-après.

Données ADES ESO 2009 - 2016	NO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	PO ₄ ³⁻ (mg/L)	P _{tot} (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)
Nombre de données	56	86	18	35	81	89	89	82	89	89	89
Valeur min	0,5	1,8	0,03	0,01	37,0	6,0	5,1	1,0	0,8	3,0	17,0
Valeur moyenne	1,6	6,2	0,4	0,1	208,5	27,8	53,5	5,1	12,5	20,3	49,3
Valeur médiane	1,5	4,0	0,3	0,1	177,0	19,0	44,8	3,2	13,6	21,1	54,2
Valeur max	6,2	47,0	1,4	0,6	1000,0	180,0	540,0	26,3	26,0	53,0	80,7
Ecart-type	1,1	7,8	0,3	0,1	182,1	29,5	95,8	4,5	7,8	12,6	20,2

Données ESO 1983 - 2016	NO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	PO ₄ ³⁻ (mg/L)	P _{tot} (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)
Nombre de données	92	146	65	55	147	153	147	140	148	148	133
Valeur min	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	13,0	6,0	6,0	<LQ	0,2	1,6	9,7
Valeur moyenne	1,6	6,7	0,5	0,2	193,5	23,7	44,8	4,7	11,4	19,0	47,7
Valeur médiane	1,0	6,0	0,4	0,2	162,0	19,0	22,7	3,5	15,0	23,3	48,0
Valeur max	14,0	137,0	4,6	1,5	1000,0	180,0	483,0	26,3	43,4	106,0	95,0
Ecart-type	1,7	12,2	0,8	0,3	155,9	21,9	75,0	3,9	7,5	13,9	19,4

Données ESU 1983 - 2016	NO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	PO ₄ ³⁻ (mg/L)	P _{tot} (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	SiO ₂ (mg/L)
Nombre de données	48	210	167	165	226	229	229	222	229	229	191
Valeur min	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	30,0	6,1	4,1	<LQ	3,1	4,3	9,2
Valeur moyenne	1,6	6,2	0,3	0,1	108,1	37,5	27,8	3,1	10,6	14,8	30,8
Valeur médiane	1,3	2,3	0,2	0,1	96,0	13,0	14,3	2,5	8,4	12,7	33,3
Valeur max	11,2	686,8	1,8	1,0	329,4	4827,0	2262,0	90,4	289,6	112,4	57,0
Ecart-type	1,7	47,2	0,2	0,1	56,8	317,8	148,6	6,1	19,0	10,1	10,2

Tableau 13 : Composition en éléments majeurs des eaux souterraines (ESO) et des eaux de surface, issue de la base de données ADES (2009-2016) et de la base de données compilées pour la caractérisation des fonds hydrogéochimiques de Mayotte (1983-2016).

Faciès hydrochimiques des eaux souterraines (ESO) et de surface (ESU)

Les données géochimiques de la base de données ont permis pour les analyses ayant une balance ionique correcte de déterminer le faciès hydrochimique des eaux souterraines et de surface de Mayotte en les positionnant dans le diagramme de Piper.

Trois diagrammes de Piper distincts sont présentés ci-après :

- un diagramme de Piper regroupant les eaux souterraines (ESO) de Mayotte, distinguées en fonction de leur appartenance à une masse d'eau souterraine (Illustration 17) ;
- un diagramme de Piper regroupant les eaux de surface (ESU) (Illustration 18) ;
- un diagramme de Piper regroupant les analyses disponibles (ESO + ESU) (Illustration 18).

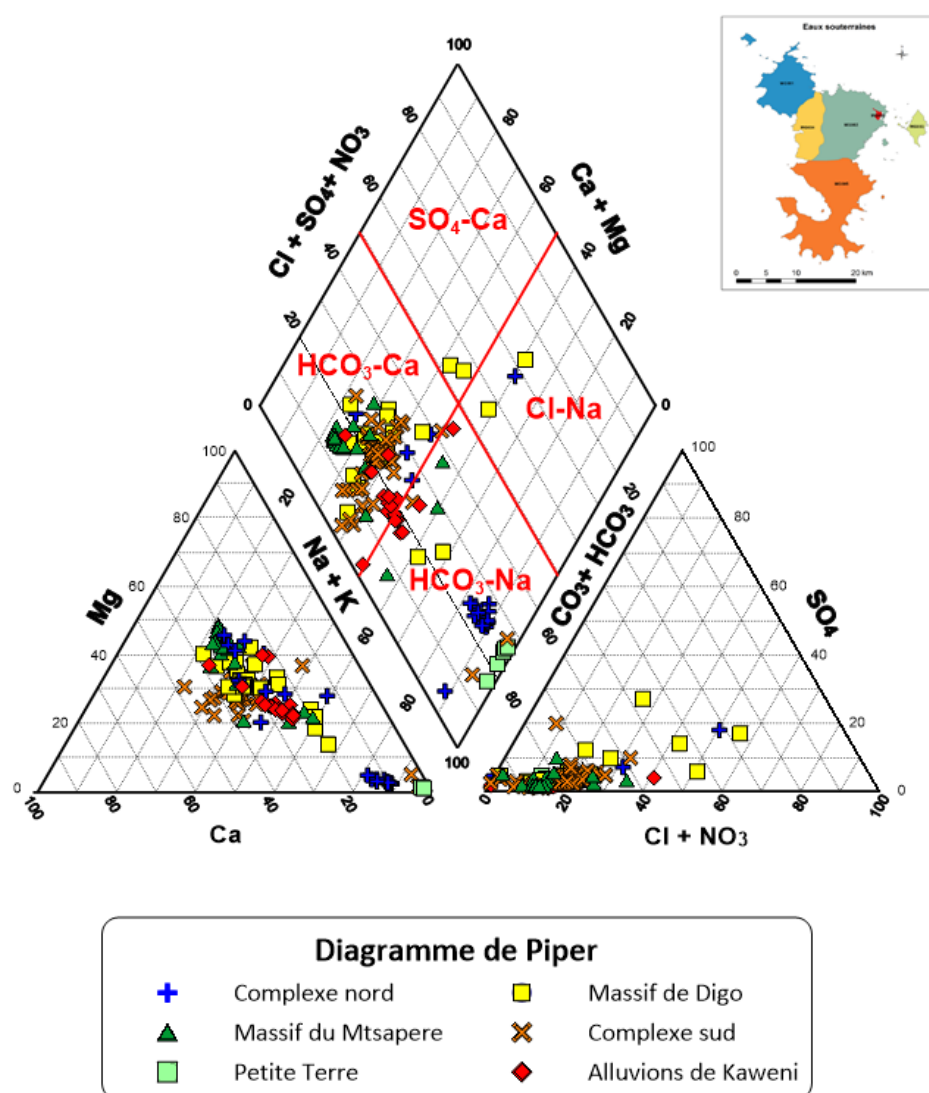


Illustration 17 : Diagramme de Piper regroupant les analyses d'eaux souterraines (ESO) de Mayotte, en fonction des masses d'eau souterraine.

Les faciès hydrochimiques des eaux souterraines sont majoritairement de type bicarbonaté-calcique et dans une moindre mesure de type bicarbonaté-sodique (Illustration 17).

Les eaux souterraines issues du volcanisme de Petite Terre se distinguent par leur faciès bicarbonaté-sodique. Les eaux du volcanisme du Complexe nord peuvent être à la fois de type bicarbonaté-sodique et de type bicarbonaté-calcique. Quelques points du volcanisme du massif de Digo indiquent un faciès chloruré-sodique et sulfaté-calcique.

Les eaux de surface de Mayotte ont comme faciès majoritaire le type bicarbonaté-calcique (Illustration 18). Quelques eaux sont de type bicarbonaté-sodique. Les eaux de surface ont un faciès hydrochimique proche des eaux souterraines. Les eaux souterraines indiquent une plus grande variabilité, notamment avec les eaux du volcanisme de Petite Terre, du volcanisme du Complexe nord et celle du volcanisme du Massif de Digo.

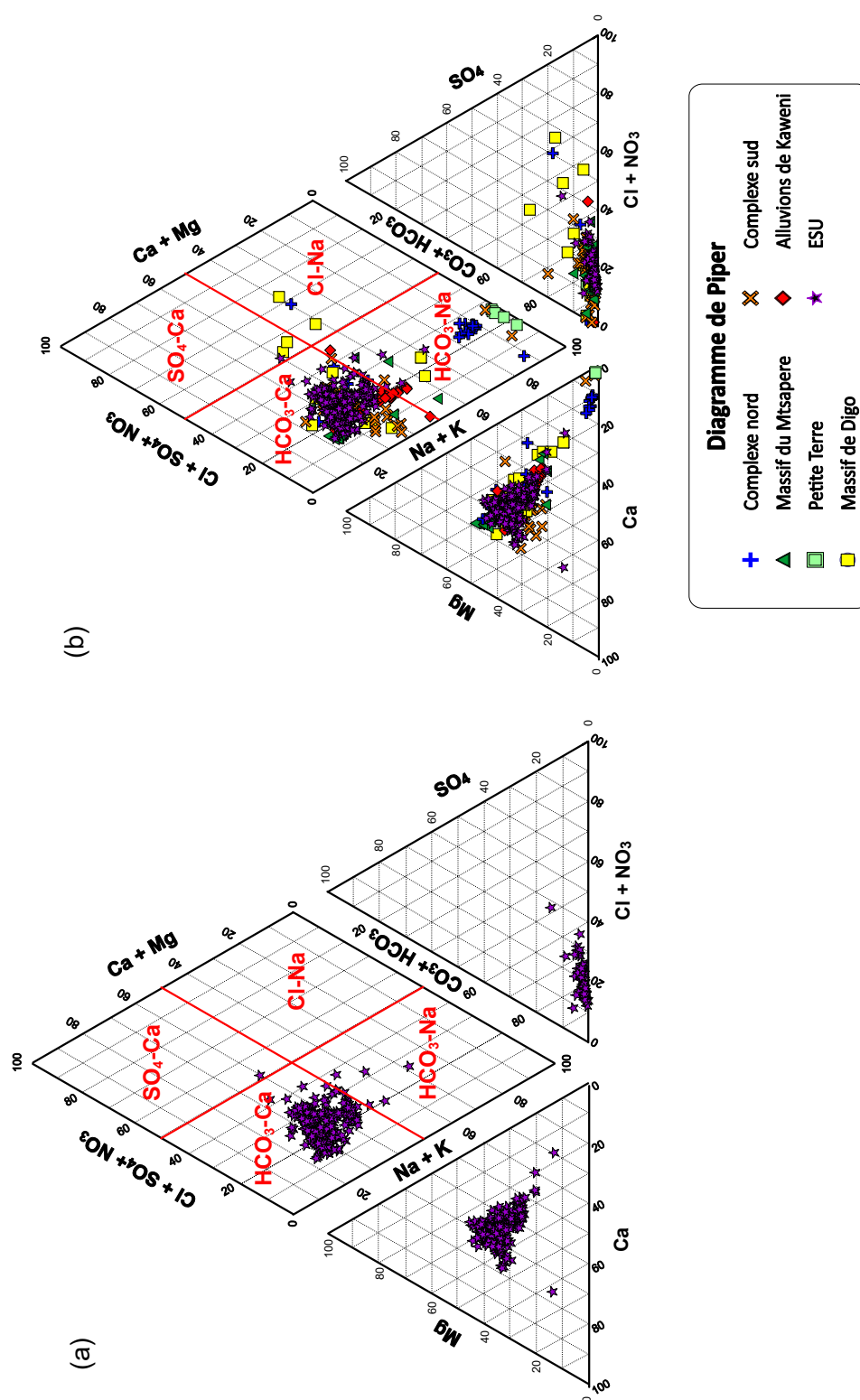


Illustration 18 : (a) Diagramme de Piper regroupant les analyses d'eaux souterraines (ESU) de Mayotte ;
(b) Diagramme de Piper regroupant les analyses d'eaux souterraines (ESO) de Mayotte, en fonction des masses d'eau souterraine et les eaux superficielles (ESU).

Représentation cartographique de quelques éléments majeurs

Les concentrations en sulfates sont relativement faibles, inférieures à 10 mg/L. Deux points se distinguent, le point d'eau cours d'eau Marée aval sur la commune de Bandraboua et le piézomètre (12316X0038/PZ3) du Dispensaire Mramadoudou sur la commune de Chirongui. Le point d'eau Marée aval, avec la concentration maximale enregistrée en sulfates (686,8 mg/L) correspond à un point d'eau influencé par la marée, qui représente de l'eau de mer diluée. Le piézomètre du Dispensaire Mramadoudou sur la commune de Chirongui correspond la valeur maximale en sulfates pour les eaux souterraines avec 137 mg/L.

La répartition spatiale des concentrations en sulfates pour les eaux souterraines et superficielles est présentée sur l'illustration 19.

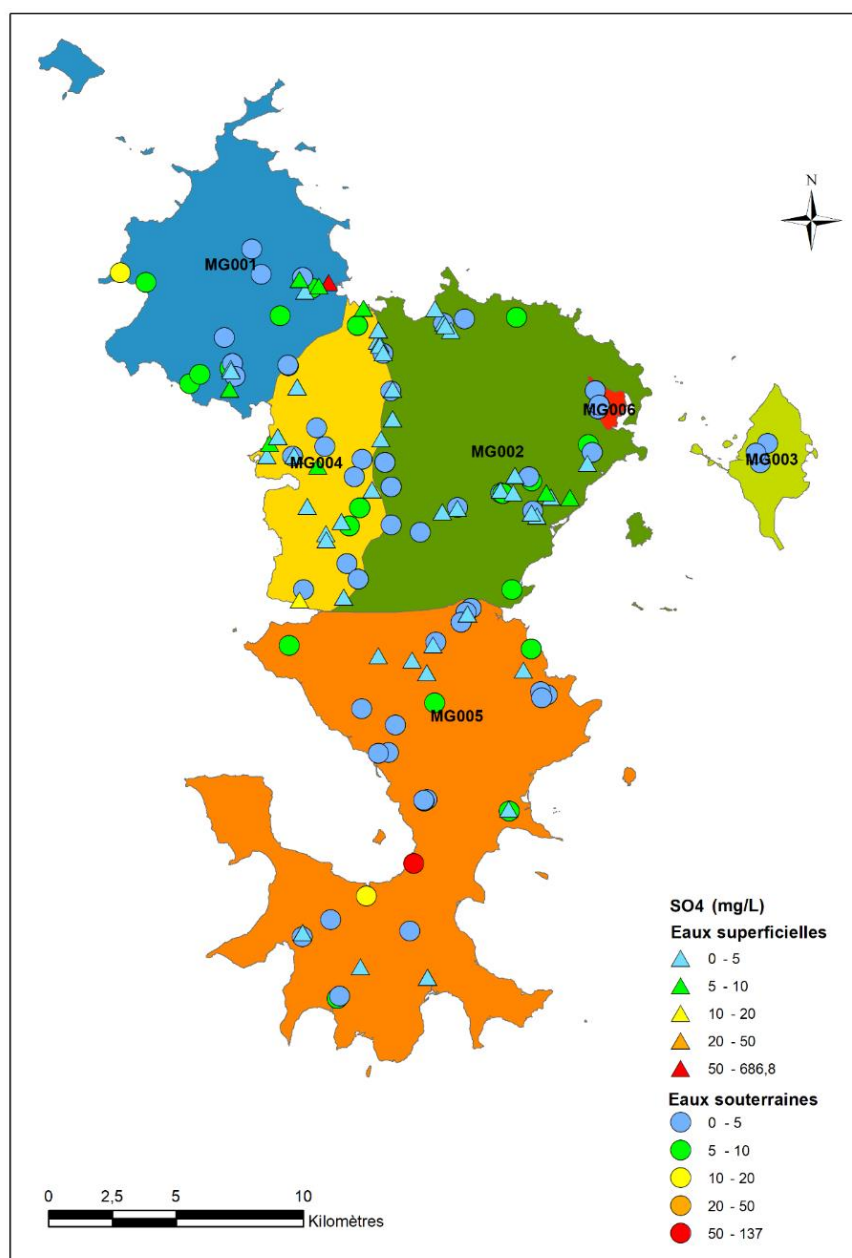


Illustration 19 : Concentrations en sulfates (mg/L) dans les eaux souterraines et superficielles (1983-2016).

Les concentrations en nitrate sont généralement faibles (< 2 mg/L), sauf pour le forage de Kaweni F2 (12307X0014/F2) situé dans les alluvions de Kaweni, où elles atteignent les concentrations maximales pour les points d'eau souterraine avec des valeurs comprises entre 10 et 15 mg/L. Pour les eaux de surface, la valeur maximale ne dépasse pas 11,2 mg/L, mesurée en cours d'eau sur la commune de Chiconi.

Les concentrations en orthophosphate pour les eaux souterraines et superficielles sont relativement faibles ($< 0,5$ mg/L). Deux points d'eau souterraine atteignent des valeurs proches de 4,5 mg/L, il s'agit du piézomètre du Dispensaire Mramadoudou (12316X0038/PZ3) avec une valeur de 4,6 mg/L et du piézomètre de Hajangua 1 – Dembeni (12313X0020/HANJ1) avec une valeur de 4,6 mg/L. Un risque de contamination d'origine anthropique du piézomètre du Dispensaire de Mramadoudou n'est pas à écarter, ce piézomètre n'est malheureusement plus accessible pour vérifier cette valeur ; par contre la concentration élevée en orthophosphate du piézomètre Hajangua 1 – Dembeni sera validée lors de la campagne d'échantillonnage réalisée en hautes eaux 2018. Pour les eaux superficielles, les concentrations en orthophosphate ne dépassent pas 1,8 mg/L.

Relations inter-éléments : diagrammes binaires

• Diagramme Na vs.Cl

L'ensemble des eaux souterraines de Mayotte montrent un enrichissement en Na par rapport à la droite de dilution de l'eau de mer (Illustration 20). Cet enrichissement en Na provient probablement de processus d'interactions eau-roche.

Les eaux souterraines de la masse d'eau du volcanisme de Petite Terre se distinguent nettement des autres. Elles sont plus minéralisées et surtout nettement plus enrichies en Na.

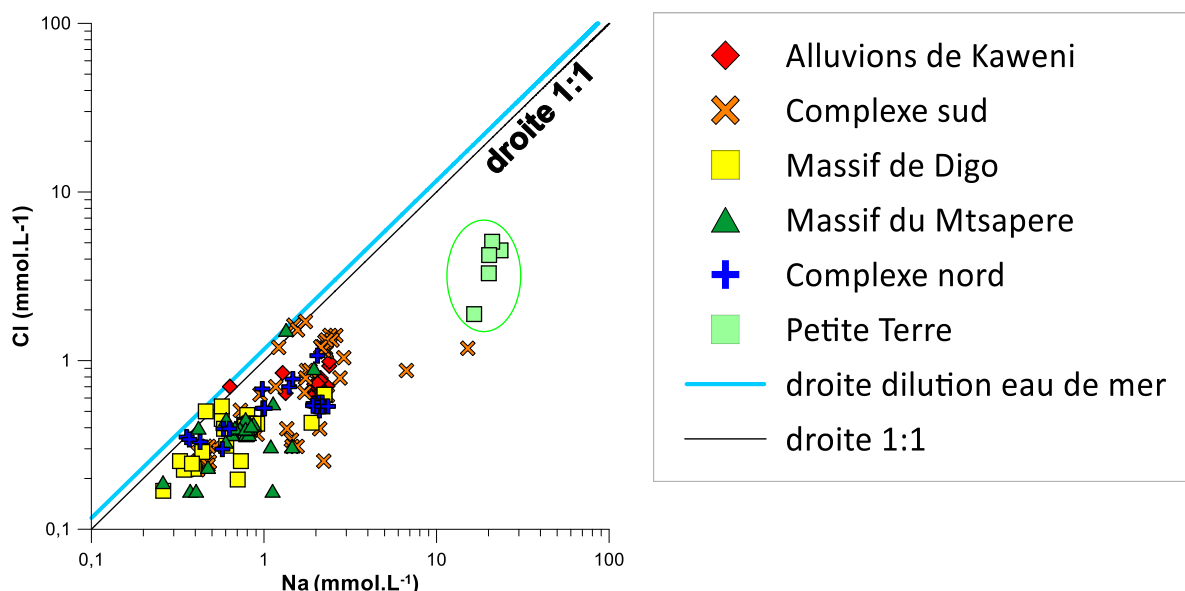


Illustration 20 : Diagramme Na vs Cl (mmol.L^{-1}) des points d'eau souterraine (ESO) de Mayotte, en fonction des masses d'eau souterraine

• Diagramme Na vs.SiO₂

L'illustration 21 met en avant que mise à part les eaux du volcanisme de Petite Terre, la majorité des autres eaux de Mayotte sont alignées sur une droite de pente 1-1. De plus, un classement apparaît selon les masses d'eau souterraine, des moins aux plus concentrées en silice : le Massif de Digo, le Complexe Nord, le Massif du Mtsapere, le Complexe Sud et les Alluvions de Kaweni.

Le diagramme Na vs SiO₂ (Illustration 21) met aussi en avant la forte concentration en sodium des eaux de Petite Terre, ainsi que leur faible teneur en silice. Les eaux de Petite Terre se distinguent donc par leur chimie particulière ; celle-ci est certainement due notamment au contexte géologique et hydrothermal de Petite Terre.

Deux points du Complexe Sud se distinguent par leur chimie particulière, le piézomètre du Dispensaire Mramadoudou (12316X0038/PZ3) avec une concentration en Na de 15,17 mmol/L (349 mg/L) et en SiO₂ de 1,46 mmol/L (88 mg/L) et le piézomètre d'Hajangua 1 – Dembeni (12313X0020/HANJ1) avec 6,70 mmol/L (154 mg/L) de Na et 0,95 mmol/L (57 mg/L) de SiO₂.

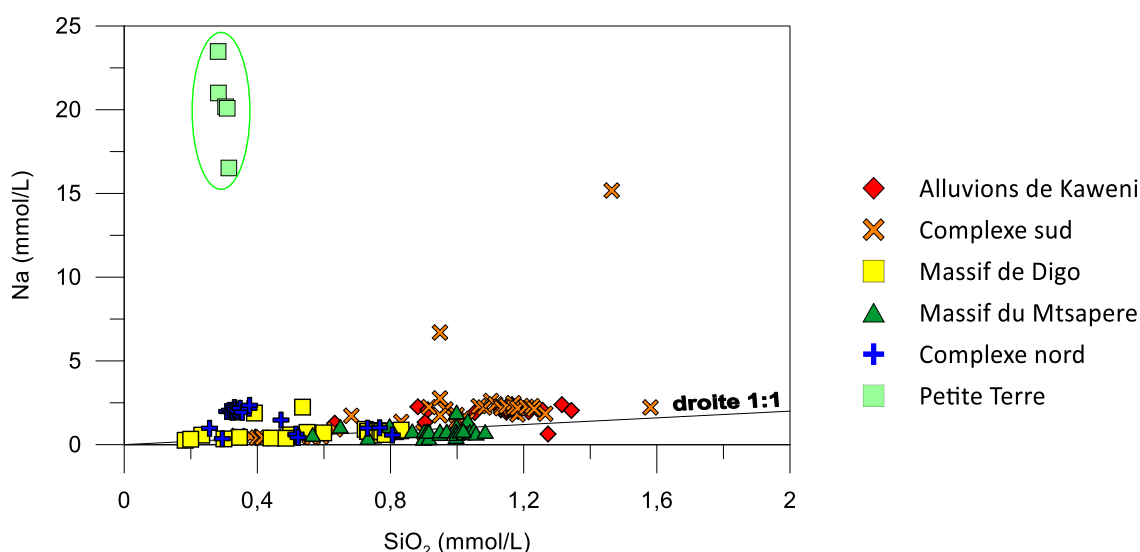


Illustration 21 : Diagramme Na vs. SiO₂ (mmol.L⁻¹) des eaux souterraines (ESO) de Mayotte, en fonction des masses d'eau souterraine.

Diagrammes Ca vs. HCO₃ et SO₄ vs. Ca

Le diagramme Ca vs. HCO₃ (Illustration 22 a) met en avant que la majorité des eaux de Mayotte ont un ratio Ca/HCO₃ proche ; avec des concentrations plus ou moins concentrées en Na et HCO₃ ; mises à part les eaux de Petite terre qui sont plus riches en HCO₃ que les autres eaux de la Grande Terre. Cet alignement des eaux sur le diagramme Ca vs. HCO₃ est intéressant à prendre en compte pour caractériser les eaux souterraines de l'île et l'acquisition de leur chimie.

Le diagramme Ca vs. SO₄ (Illustration 22 b) indique que les eaux souterraines sont plus enrichies en sodium qu'en sulfate à l'exception des eaux souterraines du volcanisme de Petite Terre. Les eaux souterraines semblent se regrouper par pôle en fonction de leur appartenance à une masse d'eau souterraine ; en reprenant le classement mis en évidence précédemment.

Certaines eaux souterraines du Complexe Sud tendent à se rapprocher du pôle de Petite Terre, on peut supposer une influence d'un pôle hydrothermal dans la chimie de ces eaux, mais ceci mérite d'être confirmé par d'autres éléments majeurs, traces et isotopes.

- Diagrammes (Ca + Mg) vs. (Na +K) ; Ca/Mg vs. Na/Cl ; Ca/Na vs. Ca/Mg

Le diagramme (Ca + Mg) vs. (Na +K) (Illustration 22 c) met en avant l'alignement de la majorité des points d'eau souterraine sur une droite de pente 1 :1. Le pôle des eaux de Petite Terre est bien identifié. Les deux points particuliers du volcanisme du Complexe sud identifié précédemment se situent entre ces deux pôles.

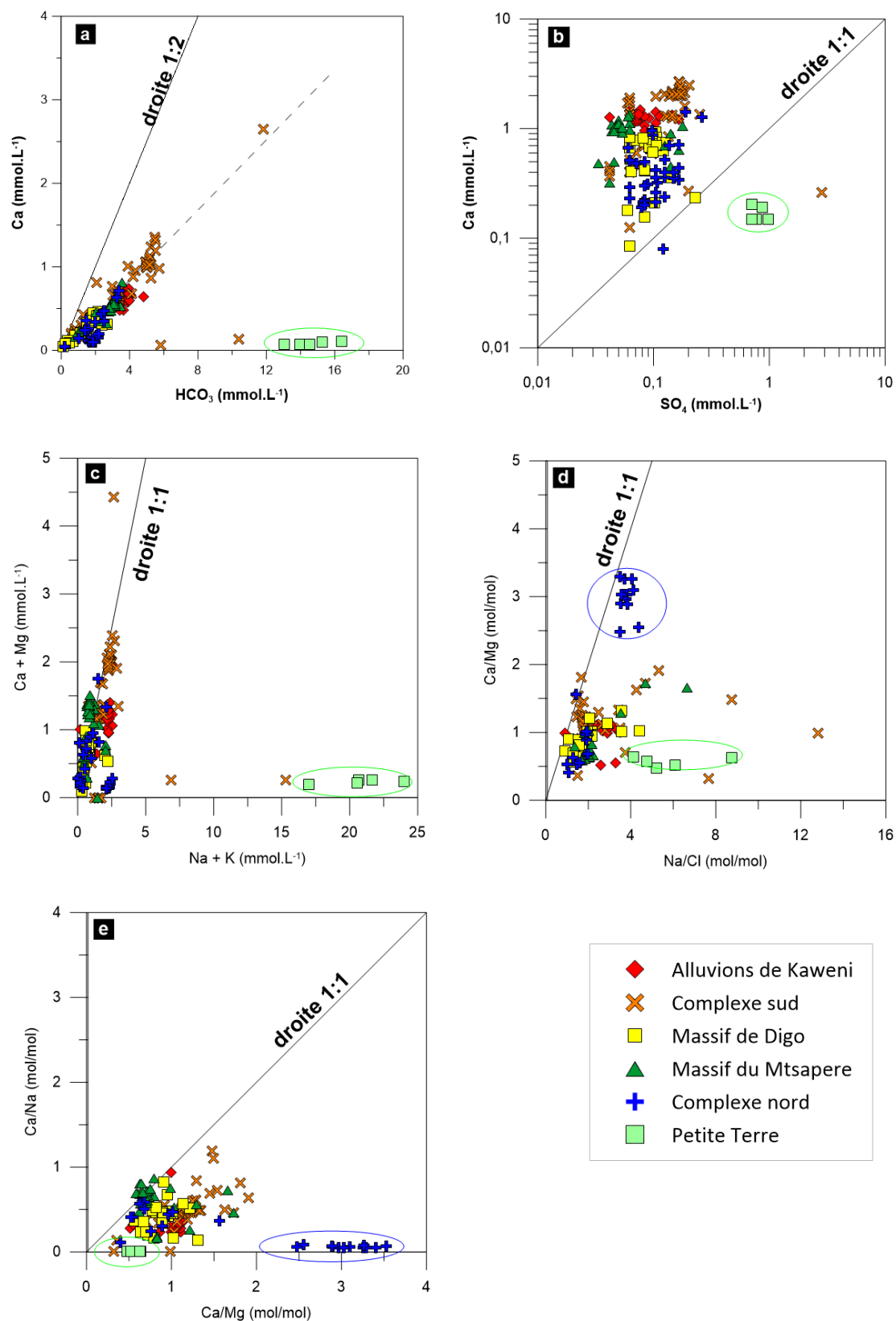


Illustration 22 : Diagrammes des eaux souterraines (ESO) de Mayotte, en fonction des masses d'eau souterraine : (a) Ca vs. HCO₃, (b) Ca vs. SO₄, (c) Ca+Mg vs. Na + K, (d) Ca/Mg vs. Na/Cl, (e) Ca/Na vs. Ca/Mg.

Le diagramme Ca/Mg vs. Na/Cl (Illustration 22 d) permet de distinguer les eaux du volcanisme du Complexe nord qui ont un ratio Ca/Mg plus élevé.

Le diagramme Ca/Na vs. Ca/Mg (Illustration 22 e) met aussi en avant les eaux du volcanisme du Complexe nord, avec un ratio Ca/Na faible et un ratio Ca/Mg élevé. D'après les données d'Eberschweiler (1986) sur les ratios mesurés dans les différents types de roches volcaniques drainées par les eaux à Mayotte (repris également par Jaouën et al. 2012), les eaux souterraines du volcanisme du Complexe nord doivent leurs ratios Ca/Na et Ca/Mg à la signature géochimique de phonolite et les eaux du volcanisme de Petite Terre quant à elles sont proches d'un pôle « eau de mer » pour leurs ratios Ca/Na et Ca/Mg.

Eléments traces

Pour les données d'analyses des éléments traces pour les eaux souterraines et les eaux superficielles, les limites de quantification (LQ) ont été prises en compte. Dans les calculs de minimum, moyenne, médiane, maximum, écart-type, les valeurs de LQ/2 ont été appliquées. Lorsque les données disponibles pour un élément ne comportent que des valeurs inférieures à la limite de quantification, seule cette valeur de LQ est mentionnée.

De plus, pour chaque tableau, les valeurs guides pour les eaux souterraines et les eaux de surface ont été indiquées. Il est intéressant de souligner par exemple que pour des éléments tels que le zinc et le cuivre, il existe un écart significatif entre les valeurs appliquées aux eaux souterraines (norme de potabilité et valeurs seuils) et les eaux de surface (NQE).

Dans les tableaux de données présentés, un distinguo est fait entre les éléments traces qui ont une NQE et les autres.

La liste des éléments traces ayant une NQE pour les eaux de surface est la suivante : Arsenic (As), Cadmium (Cd), Chrome (Cr), Cuivre (Cu), Nickel (Ni), Mercure (Hg), Plomb (Pb), Zinc (Zn).

a) Données issues d'ADES

Les données des concentrations en éléments traces issues d'ADES pour la période 2009-2016 sont présentées dans le Tableau 14. Elles ne concernent que les eaux souterraines de Mayotte.

Données ESO ADES 2009-2016	Ag (µg/L)	Al (µg/L)	B (µg/L)	Ba (µg/L)	Be (µg/L)	Co (µg/L)	F (µg/L)	Fe (µg/L)	Li (µg/L)	Mn (µg/L)	Sb (µg/L)	Se (µg/L)	Sr (µg/L)
Norme de potabilité		200	1000	700			1500	200		50	5	10	
Valeurs seuils		200	1000	700			1500	200		50	5	10	
Nombre de données	10	10	23	10	10	10	29	84	10	84	10	23	10
Valeur min	<1,0	<5,0	<10,0	<10,0	<1,0	<5,0	82	<5,0	<20	<5,0	<5,0	0,1	<0,05
Valeur moyenne		4,6	52,5	20,5			1 943,1	18,0		9,3		1,3	0,2
Valeur médiane		2,5	16,0	5,0			190,0	10,0		2,5		1,5	0,2
Valeur max		12,0	710,0	75,0			29 000,0	560,0		127,0		2,5	0,4
Ecart-type		3,3	151,1	25,2			6 409,3	61,8		18,0		1,2	0,1

Données ESO ADES 2009-2016	As (µg/L)	Cd (µg/L)	Cr (µg/L)	Cu (µg/L)	Ni (µg/L)	Hg (µg/L)	Pb (µg/L)	Zn (µg/L)	
Norme de potabilité	10	5	50	2000	20	1	10	5 000	
Valeurs seuils	10	5	50	2000	20	1	10	5 000	
Norme de Qualité Environnementale (NQE)	0,83	De ≤ 0,08 à 0,25 (par classes)		3,4	1,0	4,0	0,07	1,2	7,8
Nombre de données	23	23	10	10	23	10	10	10	
Valeur min	<0,2	<0,2 ou <1	<5,0	<5,0	<0,2	<0,1	<5,0	<5,0	
Valeur moyenne	1,40	0,3			1,5			6,5	
Valeur médiane	1,55	0,3			2,0			3,8	
Valeur max	2,50	0,5			2,5			18,0	
Ecart-type	1,11	0,2			1,1			5,2	

Tableau 14 : Concentrations en éléments traces, issues d'ADES (2009-2016).

Les valeurs maximales du F, Fe, Mn dépassent les valeurs seuils (normes de potabilité) ; ainsi que la valeur moyenne pour le F. Les concentrations des autres éléments traces sont inférieures aux valeurs seuils et normes de potabilité.

b) Données des points d'eau souterraine (ESO) de Mayotte

Les données « eaux souterraines » disponibles sur la période 1983-2016 pour les concentrations en éléments traces sont présentées dans le Tableau 15.

Données ESO 1983 - 2016	Ag (µg/L)	Al (µg/L)	B (µg/L)	Ba (µg/L)	Be (µg/L)	Br (µg/L)	Co (µg/L)	F (µg/L)	Fe (µg/L)	Li (µg/L)	Mn (µg/L)	Sb (µg/L)	Se (µg/L)	Sr (µg/L)
Norme de potabilité		200	1000	700				1500	200		50	5	10	
Valeurs seuils		200	1000	700				1500	200		50	5	10	
Nombre de données	24	56	54	53	13	36	49	85	147	49	127	49	65	54
Valeur min	0,1	1,4	5,0	0,1	0,1	2,5	0,03	1,2	2,5	0,1	0,2	0,03	0,1	13,8
Valeur moyenne	33,8	39,1	51,5	35,8	0,5	22,2	2,0	1 069,7	195,5	7,0	38,5	1,7	1,6	216,7
Valeur médiane	0,5	3,8	19,0	8,2	0,5	2,5	2,5	150,0	10,0	10,0	2,5	2,5	2,5	202,5
Valeur max	352,0	1 120,0	710,0	330,0	0,5	88,2	7,6	29 000,0	8 800,0	10,0	800,0	2,5	2,5	740,0
Ecart-type	87,2	151,4	130,2	60,8	0,1	26,9	1,3	4 579,8	979,5	4,5	106,9	1,1	1,0	139,8

Données ESO 1983 - 2016								
	As (µg/L)	Cd (µg/L)	Cr (µg/L)	Cu (µg/L)	Ni (µg/L)	Hg (µg/L)	Pb (µg/L)	Zn (µg/L)
Norme de potabilité	10	5	50	2000	20	1	10	5 000
Valeurs seuils	10	5	50	2000	20	1	10	5 000
Norme de Qualité Environnementale (NQE)	0,83	De ≤ 0,08 à 0,25 (par classes)	3,4	1,0	4,0	0,07	1,2	7,8
Nombre de données	66	29	65	55	52	29	54	53
Valeur min	0,03	0,05	0,1	0,1	0,1	0,1	0,03	0,25
Valeur moyenne	1,95	0,35	2,0	4,3	2,4	0,5	2,5	28,2
Valeur médiane	2,50	0,25	2,5	2,5	2,5	0,1	2,5	2,5
Valeur max	2,50	0,50	15,0	90,0	9,0	1,3	40,0	412,0
Ecart-type	1,01	0,13	1,8	12,1	1,9	0,6	5,3	70,5

Tableau 15 : Concentrations en éléments traces des eaux souterraines, issues de la base de données « fond hydrogéochimique » (1983-2016).

Les valeurs maximales de Al, F, Fe, Mn, Pb dépassent les valeurs seuils et normes de potabilité. Les concentrations des autres éléments traces sont inférieures aux valeurs seuils et normes de potabilité.

c) Données des points d'eau de surface (ESU) de Mayotte

Les données « eaux superficielles » disponibles sur la période 1983-2016 pour les concentrations en éléments traces sont présentées dans le Tableau 16.

Données ESU 1983 - 2016	Ag (µg/L)	Al (µg/L)	B (µg/L)	Ba (µg/L)	Be (µg/L)	Br (µg/L)	Co (µg/L)	F (µg/L)	Fe (µg/L)	Li (µg/L)	Mn (µg/L)	Sb (µg/L)	Se (µg/L)	Sr (µg/L)
Norme de potabilité		200	1000	700				1500	200		50	5	10	
Valeurs seuils		200	1000	700				1500	200		50	5	10	
Nombre de données	13	32	32	32	13	4	17	70	78	17	35	17	32	17
Valeur min	<1	8,3	5,0	5,0	<1	2,5	<0,05	50,0	10,0	0,4	0,8	0,0	0,1	70,0
Valeur moyenne		256,6	23,6	29,4		29,4	2,2	155,9	335,7	8,9	98,0	2,2	1,6	146,9
Valeur médiane		91,5	19,0	27,5		16,3	2,5	130,0	270,0	10,0	55,0	2,5	1,0	130,0
Valeur max		1 700,0	100,0	81,0		82,6	2,5	670,0	1 960,0	10,0	630,0	2,5	2,5	220,0
Ecart-type		416,3	19,9	18,1		32,7	0,7	107,3	292,3	3,1	127,8	0,7	0,8	53,3

Données ESU 1983 - 2016	As (µg/L)	Cd (µg/L)	Cr (µg/L)	Cu (µg/L)	Ni (µg/L)	Hg (µg/L)	Pb (µg/L)	Zn (µg/L)
Norme de potabilité	10	5	50	2000	20	1	10	5 000
Valeurs seuils	10	5	50	2000	20	1	10	5 000
Norme de Qualité Environnementale (NQE)	0,83	De ≤ 0,08 à 0,25 (par classes)		3,4	1,0	4,0	0,07	7,8
Nombre de données	52	48	51	52	41	48	51	51
Valeur min	0,03	0,01	0,1	<5	0,4	<0,025	0,025	<0,5
Valeur moyenne	1,48	0,71	1,5	5,6	1,7	0,043	1,2	5,0
Valeur médiane	2,50	0,25	1,3	2,3	1,6	0,041	1,5	2,5
Valeur max	2,50	2,50	3,0	25,0	6,0	0,069	2,5	22,2
Ecart-type	1,19	1,04	0,8	8,9	1,1	0,018	1,0	5,5

Tableau 16 : Concentrations en éléments traces des eaux superficielles, issues de la base de données « fond hydrogéochimique » (1983-2016).

Les valeurs moyennes et maximales des éléments Al, Fe, Mn dépassent les valeurs seuils et normes de potabilité. Ces éléments Fe, Mn et Al sont très sensibles aux conditions d'oxydo-réduction et de turbidité.

Les concentrations des éléments traces avec NQE sont inférieures aux NQE, valeurs seuils et normes de potabilité.

d) Représentation cartographique des éléments traces supérieures aux valeurs seuils

Dans ce chapitre ne sont abordés que les éléments traces pour lesquels les concentrations dépassent soit les valeurs seuils / normes de potabilité, soit les NQE. Il s'agit des éléments suivants : Al, F, Fe, Mn, Pb.

- **Aluminium**

Les eaux souterraines et superficielles de Mayotte ont globalement des concentrations en aluminium inférieures à 100 µg/L sur la période 1983-2016 (Illustration 23).

Des dépassements de la valeur seuil / norme de potabilité de 200 µg/L sont constatés sur la période 1983-2016 pour 3 analyses de points d'eau souterraine et 9 analyses de points d'eau cours d'eau. Ils sont visibles sur l'illustration 23. Un distinguo a été fait entre les points d'eau qui ont enregistré une concentration en aluminium comprise entre 200 et 1 000 µg/L et ceux qui ont une concentration supérieure à 1 000 µg/L.

Pour les eaux superficielles, la valeur maximale (1 700 µg/L) a été enregistrée à la fois pour le point d'eau cours d'eau Andrianabe inter 1 sur la commune de M'Tsangamouji (masse d'eau -

cours d'eau FRMR08) et pour le point d'eau cours d'eau Antanana amont 2 sur la commune de Kani-Keli (masse d'eau - cours d'eau FRMR26).

Pour les eaux souterraines, la valeur maximale (1 120 µg/l) a été enregistrée pour le forage Kaweni F2 (12307X0014/F2) sur la commune de Mamoudzou, sur la masse d'eau des Alluvions de Kaweni (MG006).

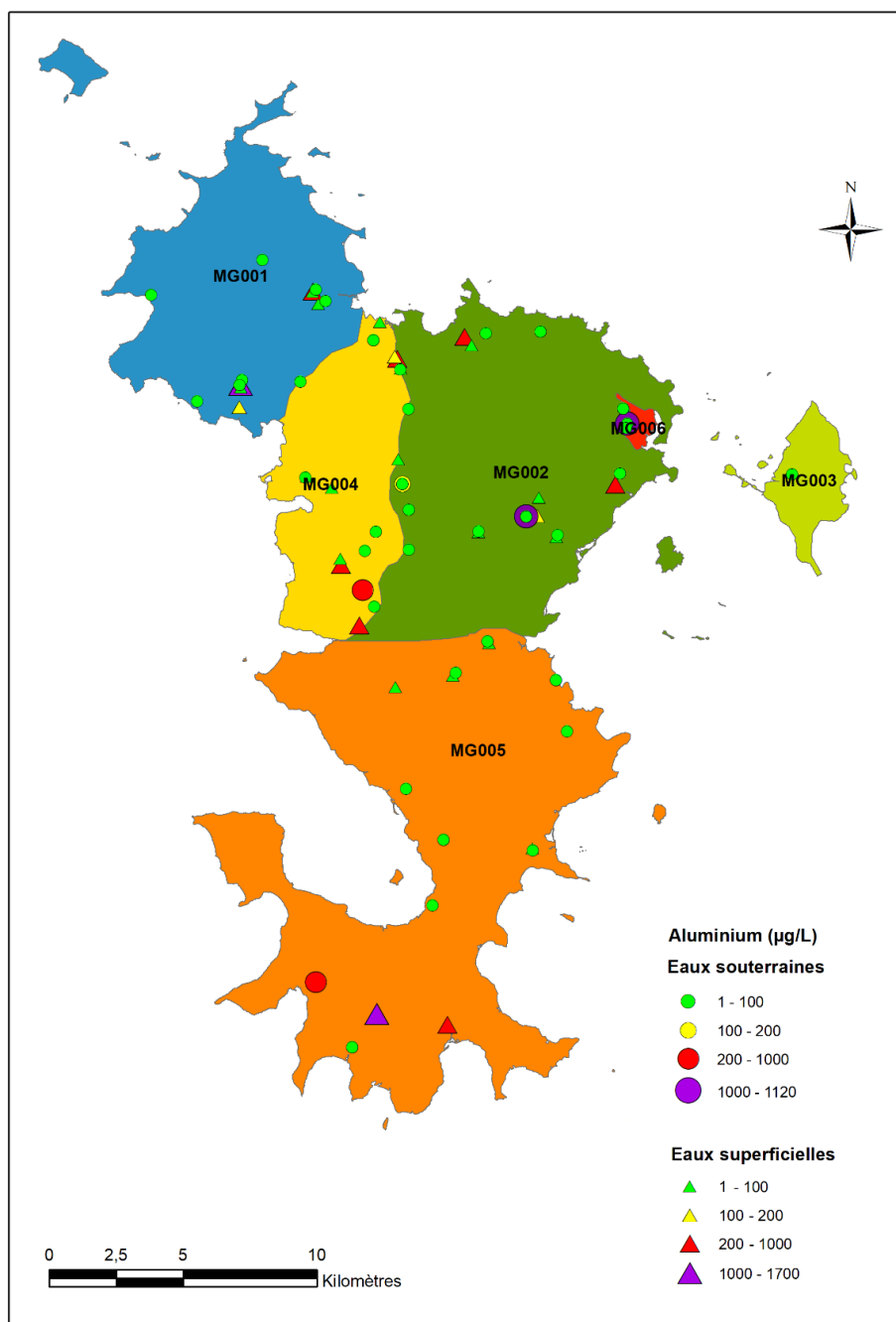


Illustration 23 : Concentrations en aluminium (µg/L) dans les eaux souterraines et superficielles (1983-2016).

• Fluorures

Les eaux souterraines et superficielles de Mayotte ont globalement toutes des concentrations en fluorures inférieures à la valeur seuil / norme de potabilité de 1 500 µg/L (Illustration 24).

Seul le dépassement constaté, avec des valeurs 15 à 20 fois supérieures à la norme, concerne les analyses d'eau du piézomètre Gymnase (12308X0086/PZ4) sur la commune de Pamandzi à Petite terre (MG003), où la concentration maximale enregistrée sur la période 1983-2016 atteint 29 000 µg/L.

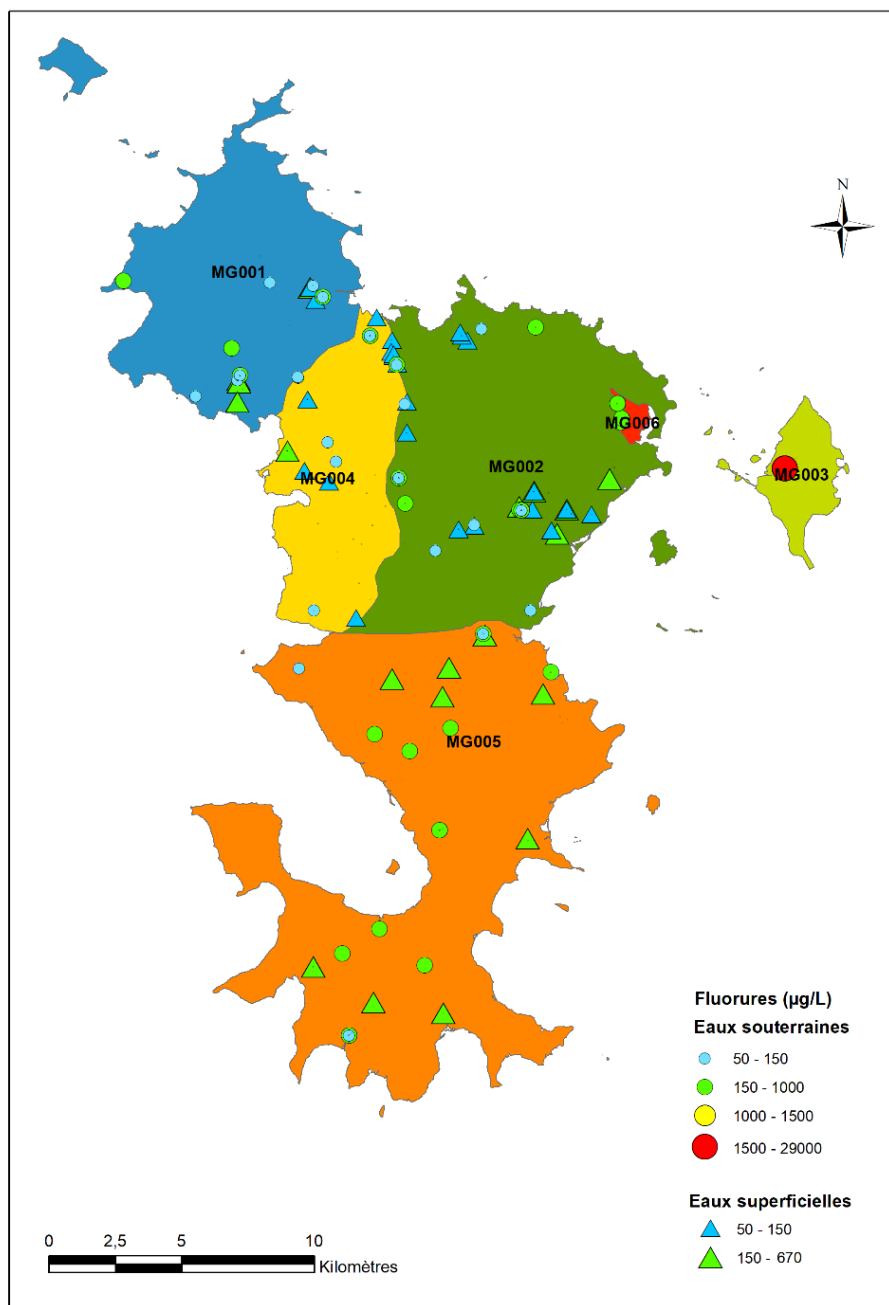


Illustration 24 : Concentrations en fluorures (µg/L) dans les eaux souterraines et superficielles (1983-2016).

- **Fer**

Pour les eaux superficielles, les concentrations en fer enregistrées sur la période 1983-2016 sont majoritairement inférieures à 200 µg/L, valeur seuil / norme de potabilité du fer. Les points d'eau cours d'eau ayant des analyses avec une concentration comprise entre 200 à 1 000 µg/L sont réparties sur la Grande Terre (Illustration 25), notamment sur les masses d'eau des volcanismes du Massif du Mtsapere (MG002) et du Massif de Digo (MG004).

Trois analyses ont une concentration supérieure à 1 000 µg/L. Il s'agit de trois captages d'eau de surface, dont deux (Wale captage et Ouroveni captage) sont positionnés sur la masse d'eau souterraine du volcanisme du Massif de Digo (MG004) et un (Dzoumogne captage) sur la masse d'eau du volcanisme du complexe Nord (MG001). La concentration maximale, avec 1 960 µg/L, a été mesurée sur l'eau du captage d'Ouroveni.

Pour les eaux souterraines, les concentrations en fer enregistrées sur la période 1983-2016 sont majoritairement inférieures à 100 µg/L. Elles sont donc inférieures à la valeur seuil/norme de potabilité fixée à 200 µg/L. Néanmoins, 20 analyses ont une concentration comprise entre 200 à 1 000 µg/L ; elles sont réparties sur l'ensemble de Grande Terre. Quatre analyses ont quant à elles des concentrations en fer supérieures à 1 000 µg/L ; elles concernent :

- le forage (12306X0014/BEJA1) appartenant au Massif de Digo (MG004) avec la concentration maximale de 8 800 µg/L ;
- le forage de Kaweni F2 (12307X0014/F2) situé dans les alluvions de Kaweni (MG006) avec la concentration maximale de 7 850 µg/L ;
- le piézomètre (12302X0017/DZOU1) et Mouhogoni source appartenant au volcanisme du Complexe Nord (MG001), avec respectivement une concentration de 1 100 µg/L et 1 464 µg/L.

- **Manganèse**

Pour la période 1983-2016, la majorité des points d'eau souterraine ont des concentrations en manganèse inférieures à 50 µg/L, qui est la valeur seuil / norme de potabilité.

Les points d'eau superficielle ont des concentrations en manganèse plus importantes. Globalement, leur concentration en Mn est inférieure à 100 µg/L. Ces dépassements de la valeur seuil sont constatés sur l'ensemble de la Grande Terre (Illustration 26).

Les valeurs maximales en manganèse correspondent notamment à des points d'eau appartenant à la masse d'eau du volcanisme Complexe Nord (MG001).

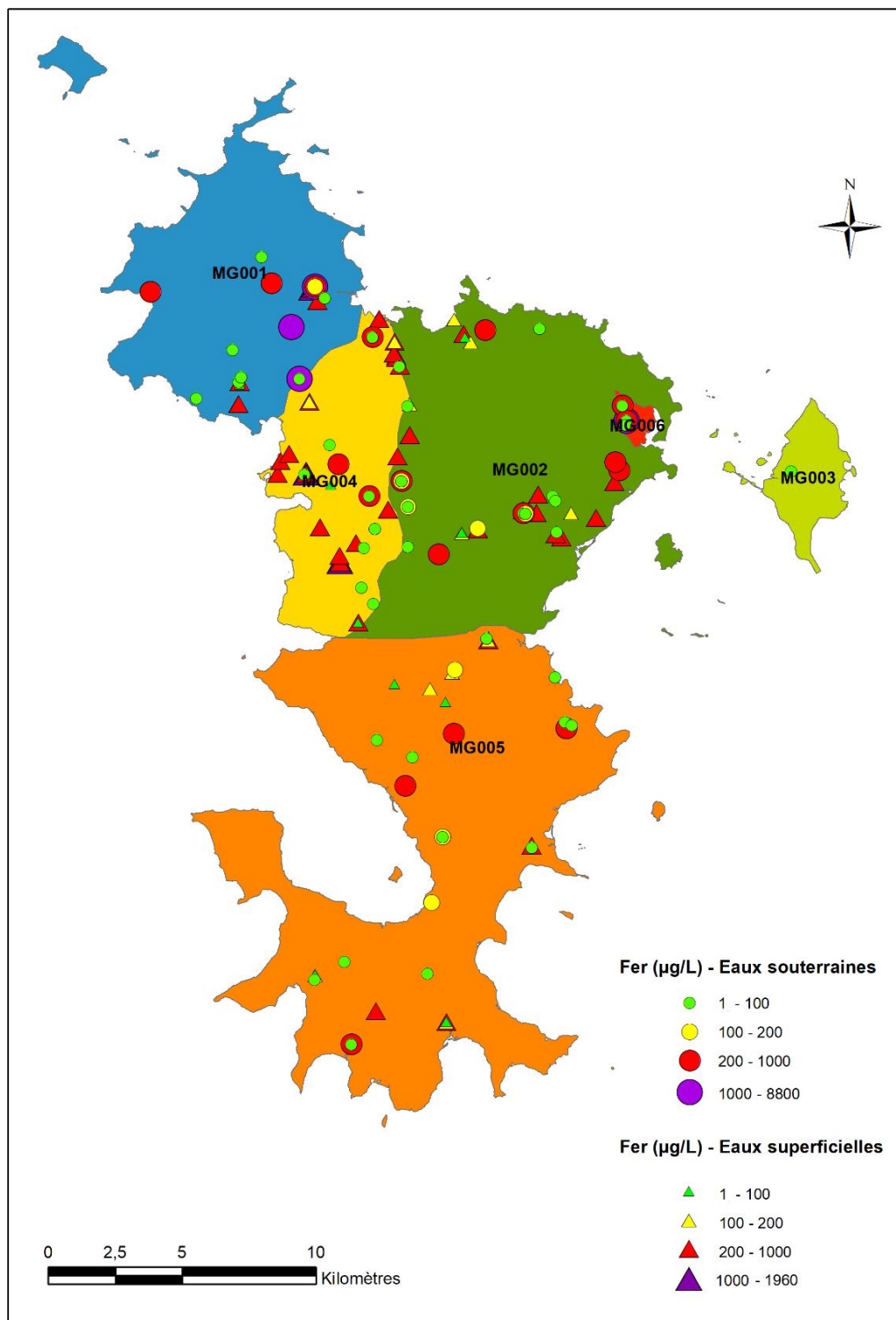


Illustration 25 : Concentrations en fer (µg/L) dans les eaux souterraines et superficielles (1983-2016).

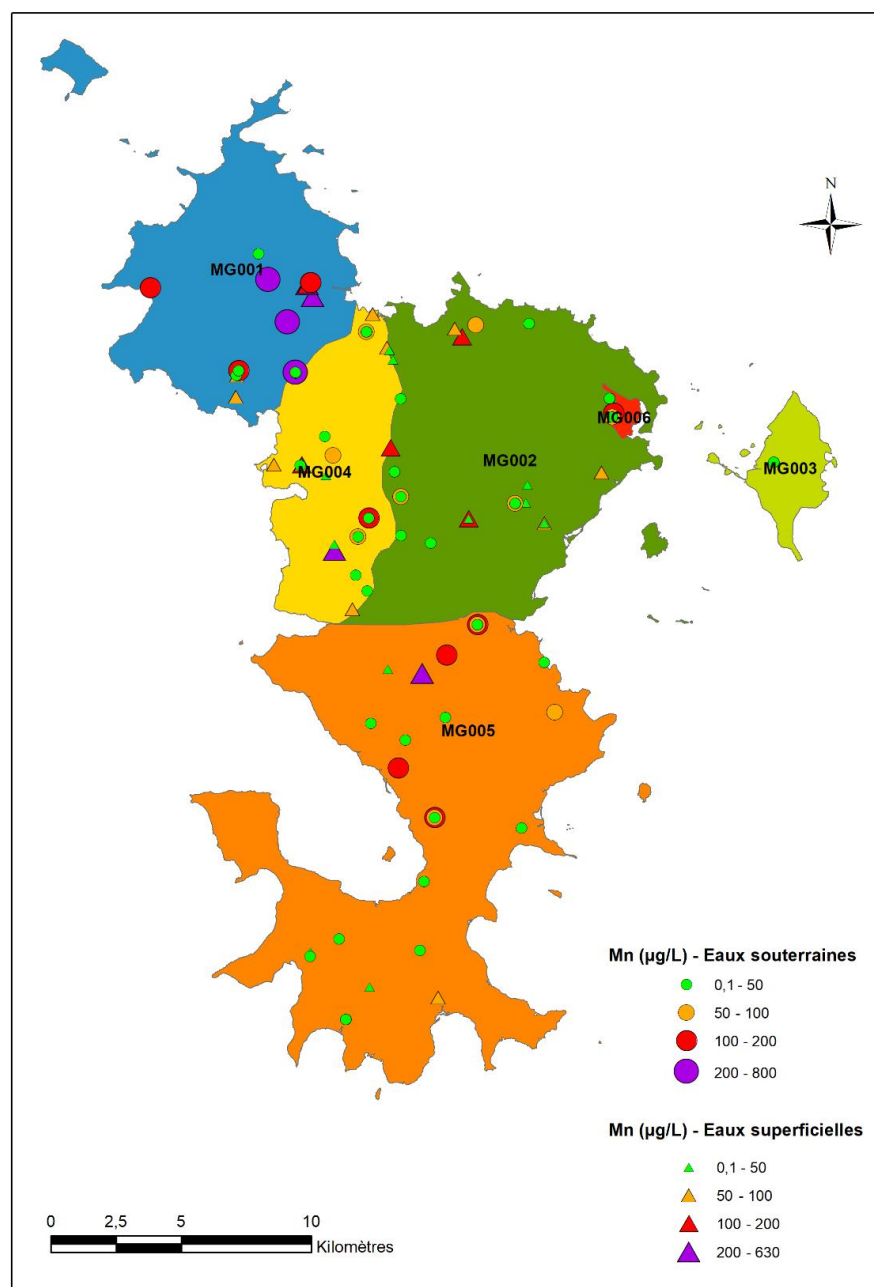


Illustration 26 : Concentrations en manganèse (µg/L) dans les eaux souterraines et superficielles (1983-2016).

• Plomb

Sur la période 1983-2016, les points d'eau souterraine et superficielle de Mayotte ont des concentrations en plomb inférieures ou égales à 3 µg/L, ce qui est inférieur à la valeur seuil/norme de potabilité fixée à 10 µg/L.

Un seul dépassement a été constaté pour le forage de Kaweni F2 (12307X0014/F2), situé à Mamoudzou dans les Alluvions de Kaweni (MG006), avec une valeur maximale de 40 µg/L mesurée en 2003. Cette valeur importante en plomb coïncide également avec des concentrations maximales en aluminium et en fer ; compte tenu du contexte de cet ouvrage, il est possible de supposer une contamination locale en 2003, due à pollution d'origine anthropique.

3.3. SYNTHÈSE DES STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES DONNÉES HISTORIQUES PAR MASSES D'EAU

Eaux souterraines

Les tableaux récapitulatifs des statistiques descriptives des données historiques sont présentés ci-après pour les eaux souterraines de Mayotte par masse d'eau souterraine.

Pour rappel, les données historiques peuvent comporter une influence anthropique, c'est pourquoi des « **risques possibles** » de fond hydrogéochimique élevé ont été identifiés. Ces résultats seront pris en compte avec les résultats des deux nouvelles campagnes pour établir les risques de fond hydrogéochimiques élevé ainsi que proposer des valeurs pour les concentrations de référence par masses d'eau.

a) Volcanisme du Complexe Nord (MG001)

Données historiques	Paramètres	Unité	Normes de potabilité	Valeurs seuils	Normes de Qualité Environnementale (NQE)	Nombre d'analyses	Minimum	Maximum	1st Quartile	Médiane	3rd Quartile	Moyenne	Ecart-type
MG001	T (°C)	°C				34	23,6	30,6	27,0	28,0	28,2	27,5	1,4
MG001	pH	-	≥4,5 et ≤9			34	5,9	8,9	7,6	8,5	8,6	8,1	0,9
MG001	Conductivité à 25°C	µS/cm				34	97	380	253	257	267	257	54
MG001	Eh NHE	mV				34	270	538	335	367	390	377	62
MG001	O2 dissous	mg/L				34	0,2	5,3	0,8	3,3	4,1	2,6	1,8
MG001	COD	mg/L				34	0,3	5,3	0,7	1,1	2,3	1,9	2,3
MG001	NO3 (Nitrates)	mg/L	50			34	0,1	6,2	0,3	0,3	0,4	0,8	1,4
MG001	SO4 (Sulfates)	mg/L	250			34	2,9	12,5	4,0	4,9	6,0	5,2	2,0
MG001	PO4 (Orthophosphates)	mg/L	0,5		0,5	34	0,2	0,8	0,2	0,5	0,5	0,4	0,2
MG001	HCO3 (Bicarbonates)	mg/L				34	11,0	198,3	84,0	114,0	127,0	98,7	50,1
MG001	Cl (Chlorures)	mg/L	250			34	1,6	38,0	14,0	19,0	19,2	16,7	7,7
MG001	Na (Sodium)	mg/L	200			34	5,0	54,0	13,4	33,8	46,6	31,1	17,3
MG001	NH4 (Ammonium)	mg/L	0,5	0,5	0,5	34	0,1	0,9	0,3	0,4	0,6	0,4	0,2
MG001	K (Potassium)	mg/L	12			34	0,7	9,6	3,7	6,5	7,5	5,7	2,5
MG001	Mg (Magnesium)	mg/L	50			34	0,2	25,4	0,9	1,3	8,7	4,7	5,9
MG001	Ca (Calcium)	mg/L				34	1,3	28,5	4,3	6,3	9,3	8,3	6,4
MG001	SiO2 (Silice)	mg/L				34	2,0	48,4	12,6	19,6	29,7	20,8	13,8
MG001	Ag	µg/L				34	0,50	352,00	4,87	14,01	104,28	95,13	171,48
MG001	Al	µg/L	200	200	pas de valeur	34	1,44	85,00	5,00	5,64	15,50	17,21	25,05
MG001	As	µg/L	10	10	0,83	34	0,03	2,50	0,07	0,14	1,42	0,76	1,12
MG001	B	µg/L	1000	1000	pas de valeur	34	9,94	200,00	14,80	21,65	37,20	40,74	57,06
MG001	Ba	µg/L	700	700	pas de valeur	34	0,10	330,00	2,31	7,39	72,30	70,33	113,31
MG001	Be	µg/L				34	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG001	Cd	µg/L	5	5	de ≤ 0,08 à 0,25 (par classes)	34	0,25	0,50	0,25	0,25	0,38	0,33	0,14
MG001	Co	µg/L	20			34	0,03	7,62	0,03	0,03	2,50	1,46	2,55
MG001	Cr	µg/L	50	50	3,4	34	0,05	2,56	0,30	0,68	1,59	1,05	0,94
MG001	Cu	µg/L	2000	2000	1	34	0,05	10,00	0,13	0,41	1,57	1,63	3,06
MG001	F	µg/L	1500	1500		34	50,0	360,0	91,5	100,0	150,0	126,9	78,7
MG001	Fe	µg/L	200	200	pas de valeur	34	2,5	1464,0	10,0	10,0	45,0	166,0	375,8
MG001	Hg	ng/L	1000	1000	70	34	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG001	Li	µg/L				34	0,05	10,00	0,18	0,28	0,41	1,34	3,25
MG001	Mn	µg/L	50	50		34	0,4	751,0	2,5	2,5	123,0	89,4	179,5
MG001	Ni	µg/L	20	20	4	34	0,05	6,61	0,05	0,34	2,50	1,75	2,63
MG001	Pb	µg/L	10	10	1,2	34	0,03	2,50	0,03	0,03	0,05	0,31	0,82
MG001	Sr	µg/L				34	13,80	270,00	35,43	108,25	187,75	120,16	93,11
MG001	Zn	µg/L	5000	5000	7,8	34	0,25	80,00	1,45	2,31	2,50	8,91	23,59
MG001	Br	µg/L				34	23,00	88,20	37,93	58,95	77,98	57,71	25,71
MG001	Sb	µg/L	5	5	pas de valeur	34	0,03	2,50	0,03	0,03	0,03	0,30	0,83
MG001	Se	µg/L	10	10	pas de valeur	34	0,05	2,50	0,09	0,19	0,90	0,56	0,75

Tableau 17 : Statistiques descriptives des données physico-chimiques historiques de la MESO MG001

Risque possible de fond hydrogéochimique élevé pour : Fe, Mn, PO₄, NH₄.

b) Volcanisme du Massif du Mtsapere (MG002)

Données historiques	Paramètres	Unité	Normes de Qualité Environnemen- tale (NQE)										
			Normes de potabilité	Valeurs seuils		Nombre d'analyses	Minimum	Maximum	1st Quartile	Médiane	3rd Quartile	Moyenne	Ecart-type
MG002	T (°C)	°C	≥4,5 et ≤9			29	19,6	27,9	26,3	26,7	27,0	26,2	2,0
MG002	pH	-				29	6,3	8,3	7,1	7,4	7,6	7,3	0,5
MG002	Conductivité à 25°C	µS/cm				29	63	395	224	335	350	287	96
MG002	Eh NHE	mV				29	323	618	400	450	521	465	80
MG002	O2 dissous	mg/L				29	0,5	8,1	4,5	5,5	6,9	5,5	1,9
MG002	COD	mg/L	50			29	0,3	1,4	0,8	1,0	1,1	0,9	0,5
MG002	NO3 (Nitrates)	mg/L				29	0,1	2,7	0,6	0,8	1,0	0,9	0,5
MG002	SO4 (Sulfates)	mg/L				29	1,0	8,6	2,0	2,3	3,0	2,9	2,2
MG002	Ca (Calcium)	mg/L				29	1,0	32,6	9,5	21,2	22,0	16,9	9,0
MG002	Mg (Magnesium)	mg/L				50	29	2,0	21,0	6,7	11,8	18,4	12,2
MG002	Na (Sodium)	mg/L	200			29	1,9	44,8	13,9	18,0	19,0	17,0	9,0
MG002	K (Potassium)	mg/L	12			29	1,4	8,5	2,2	2,4	3,2	2,9	1,5
MG002	HCO3 (Bicarbonates)	mg/L	250			29	5,0	218,0	88,0	173,0	187,5	140,6	67,0
MG002	Cl (Chlorures)	mg/L				29	6,0	53,7	12,5	14,1	15,0	14,9	9,1
MG002	NH4 (Ammonium)	mg/L	0,5			0,5	0,5	29	0,1	0,5	0,3	0,3	0,2
MG002	PO4 (Orthophosphates)	mg/L	0,5			29	0,2	1,4	0,3	0,5	0,7	0,6	0,3
MG002	SiO2 (Silice)	mg/L	200			29	6,0	65,2	46,0	55,0	61,3	48,5	19,4
MG002	Al	µg/L	200	200	pas de valeur	29	1,35	71,00	2,50	2,50	3,13	10,02	20,19
MG002	Ag	µg/L	10	10	0,83	29	0,50	50,00	0,50	0,50	0,50	10,40	22,14
MG002	As	µg/L				29	0,03	2,50	2,50	2,50	2,50	2,09	0,96
MG002	B	µg/L	1000	1000	pas de valeur	29	5,00	45,00	5,00	14,00	22,48	16,00	12,92
MG002	Ba	µg/L	700	700	pas de valeur	29	1,15	37,00	5,00	5,00	16,40	12,44	13,65
MG002	Be	µg/L				29	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG002	Br	µg/L				29	2,50	54,00	2,50	2,50	31,10	18,52	23,38
MG002	Cd	µg/L	5	5	de ≤ 0,08 à 0,25 (oar	29	0,25	0,50	0,25	0,50	0,50	0,39	0,13
MG002	Co	µg/L	20	50	3,4	29	0,03	2,50	2,50	2,50	2,50	1,95	1,09
MG002	Cr	µg/L	50			29	0,22	2,50	1,25	2,50	2,50	1,91	0,79
MG002	Cu	µg/L	2000	2000	1	29	0,05	15,00	2,50	2,50	2,50	4,34	5,36
MG002	F	µg/L	1500	1500	pas de valeur	29	91,0	660,0	100,0	145,0	215,0	197,6	146,9
MG002	Fe	µg/L	200	200		29	2,5	380,0	10,0	10,0	10,0	44,4	91,4
MG002	Hg	ng/L	1000	1000	70	29	0,05	1,25	0,05	0,05	0,10	0,24	0,45
MG002	Li	µg/L	50	50		29	0,12	10,00	10,00	10,00	10,00	7,82	4,32
MG002	Mn	µg/L				29	0,47	83,00	2,50	2,50	2,50	13,26	24,70
MG002	Ni	µg/L	20	20	4	29	0,20	9,00	2,50	2,50	2,50	3,16	2,74
MG002	Pb	µg/L	10	10	1,2	29	0,03	2,50	1,50	2,50	2,50	1,87	0,99
MG002	Sb	µg/L	5	5	pas de valeur	29	0,03	2,50	2,50	2,50	2,50	1,95	1,09
MG002	Se	µg/L	10	10	pas de valeur	29	0,05	2,50	1,00	2,50	2,50	1,74	0,98
MG002	Sr	µg/L	5000	5000	7,8	29	110,00	506,00	150,00	170,00	230,00	209,91	111,62
MG002	Zn	µg/L				29	0,25	412,00	2,50	2,50	41,00	57,55	121,15

Tableau 18 : Statistiques descriptives des données physico-chimiques historiques de la MESO MG002

Risque possible de fond hydrogéochimique élevé pour : Fe, Mn, PO₄, NH₄

c) Volcanisme de Petite Terre (MG003)

Données historiques	Paramètres	Unité	Normes de potabilité	Valeurs seuils	Normes de Qualité Environnementale (NQE)	Nombre d'analyses	Minimum	Maximum	1st Quartile	Médiane	3rd Quartile	Moyenne	Ecart-type
MG003	T (°C)	°C	≥4,5 et ≤9			4	28,2	28,8	28,4	28,6	28,7	28,5	0,3
MG003	pH	-				4	8,2	8,5	8,3	8,4	8,5	8,4	0,2
MG003	Conductivité à 25°C	µS/cm				4	1758	2050	1857	1955	2003	1921	149
MG003	Eh NHE	mV				4	24	375	248	346	371	273	167
MG003	O2 dissous	mg/L				4	0,9	4,8	1,4	1,6	2,4	2,2	1,7
MG003	COD	mg/L				4							
MG003	NO3 (Nitrates)	mg/L				4	0,3	0,9	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3
MG003	SO4 (Sulfates)	mg/L				4	34,0	42,0	34,0	35,5	38,3	36,8	3,8
MG003	Ca (Calcium)	mg/L				4	3,0	4,1	3,0	3,4	3,9	3,5	0,6
MG003	Mg (Magnésium)	mg/L				4	2,9	4,0	3,4	3,7	3,9	3,6	0,5
MG003	Na (Sodium)	mg/L	200			4	38,0	483,0	356,0	463,0	468,8	361,8	216,0
MG003	K (Potassium)	mg/L	12			4	2,0	26,3	14,0	18,5	20,8	16,3	10,2
MG003	HCO3 (Bicarbonates)	mg/L				4	1,0	932,1	596,5	840,5	897,5	653,5	438,7
MG003	Cl (Chlorures)	mg/L	250			4	15,0	117,0	17,3	42,5	79,5	54,3	48,1
MG003	NH4 (Ammonium)	mg/L	0,5	0,5	0,5	4	0,1	0,7	0,2	0,3	0,4	0,3	0,3
MG003	PO4 (Orthophosphates)	mg/L	0,5			4	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG003	SiO2 (Silice)	mg/L				4	17,0	18,9	18,0	18,4	18,7	18,2	0,8
MG003	Al	µg/L	200	200	pas de valeur	4	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG003	Ag	µg/L				4	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG003	As	µg/L	10	10	0,83	4	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG003	B	µg/L	1000	1000	pas de valeur	4	710,00	710,00	710,00	710,00	710,00	710,00	
MG003	Ba	µg/L	700	700	pas de valeur	4	59,00	59,00	59,00	59,00	59,00	59,00	
MG003	Be	µg/L				4	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG003	Br	µg/L				4							
MG003	Cd	µg/L	5	5	de ≤ 0,08 à 0,25 (par classes)	4	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG003	Co	µg/L	20			4	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG003	Cr	µg/L	50	50	3,4	4	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG003	Cu	µg/L	2000	2000	1	4	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG003	F	µg/L	1500	1500		4	21400	29000	22700	24000	26500	24800	3863
MG003	Fe	µg/L	200	200	pas de valeur	4	2,50	10,00	2,50	4,25	7,00	5,25	3,57
MG003	Hg	ng/L	1000	1000	70	4	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG003	Li	µg/L				4	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG003	Mn	µg/L	50	50		4	2,50	9,00	6,63	8,00	8,25	6,88	2,95
MG003	Ni	µg/L	20	20	4	4	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG003	Pb	µg/L	10	10	1,2	4	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG003	Sb	µg/L	5	5	pas de valeur	4	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG003	Se	µg/L	10	10	pas de valeur	4	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG003	Sr	µg/L				4	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG003	Zn	µg/L	5000	5000	7,8	4	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	

Tableau 19 : Statistiques descriptives des données physico-chimiques historiques de la MESO MG003

Risque possible de fond hydrogéochimique élevé pour : F, Na, K, NH₄

d) Volcanisme du Massif du Digo (MG004)

Données historiques	Paramètres	Unité	Normes de Qualité Environnementale (NQE)			Nombre d'analyses	Minimum	Maximum	1st Quartile	Médiane	3rd Quartile	Moyenne	Ecart-type
			Normes de potabilité	Valeurs seuils									
MG004	T (°C)	°C				32	24,6	29,0	27,5	28,0	28,0	27,6	0,9
MG004	pH	-	≥4,5 et ≤9			32	5,5	8,3	6,8	7,5	7,6	7,2	0,7
MG004	Conductivité à 25°C	µS/cm				32	80	450	196	238	248	226	75
MG004	Eh NHE	mV				32	243	594	376	450	497	440	95
MG004	O2 dissous	mg/L				32	0,4	7,9	1,1	4,5	5,1	3,8	2,3
MG004	COD	mg/L				32	0,3	1,0	0,5	0,7	0,9	0,7	0,4
MG004	NO3 (Nitrates)	mg/L	50			32	0,3	2,4	0,7	1,5	1,6	1,3	0,6
MG004	SO4 (Sulfates)	mg/L	250			32	2,9	12,2	4,0	4,6	5,0	5,0	2,0
MG004	Ca (Calcium)	mg/L				32	3,1	27,3	11,3	13,7	15,5	12,9	5,0
MG004	Mg (Magnesium)	mg/L	50			32	1,4	16,2	5,9	8,9	9,6	8,0	3,0
MG004	Na (Sodium)	mg/L	200			32	1,1	66,7	13,1	17,8	18,9	19,2	14,5
MG004	K (Potassium)	mg/L	12			32	0,4	5,4	2,1	2,8	3,1	2,6	1,2
MG004	HCO3 (Bicarbonates)	mg/L				32	16,0	164,0	24,8	102,5	117,3	81,7	49,6
MG004	Cl (Chlorures)	mg/L	250			32	1,2	36,9	12,5	14,4	15,1	14,3	5,9
MG004	NH4 (Ammonium)	mg/L	0,5	0,5	0,5	32	0,1	0,5	0,3	0,3	0,3	0,2	0,1
MG004	PO4 (Orthophosphates)	mg/L	0,5			32	0,1	1,0	0,2	0,3	0,5	0,4	0,2
MG004	SiO2 (Silice)	mg/L				32	2,8	50,0	28,5	44,4	46,2	36,3	14,6
MG004	Al	µg/L	200	200	pas de valeur	32	1,43	62,00	2,50	2,54	19,32	15,53	22,54
MG004	Ag	µg/L				32	0,50	4,51	1,62	2,74	3,63	2,58	2,01
MG004	As	µg/L	10	10	0,83	32	0,03	2,50	0,06	2,50	2,50	1,63	1,22
MG004	B	µg/L	1000	1000	pas de valeur	32	5,00	26,00	14,50	17,80	20,08	16,24	6,45
MG004	Ba	µg/L	700	700	pas de valeur	32	2,69	23,00	5,00	5,90	12,70	9,34	6,03
MG004	Be	µg/L				32	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG004	Br	µg/L				32	2,50	51,90	2,50	31,55	38,05	25,86	20,89
MG004	Cd	µg/L	5	5	de ≤ 0,08 à 0,25 (par classes)	32	0,25	0,50	0,25	0,25	0,25	0,30	0,11
MG004	Co	µg/L	20			32	0,03	2,50	0,13	0,27	2,50	1,19	1,25
MG004	Cr	µg/L	50	50	3,4	32	0,05	2,50	0,69	1,25	2,50	1,41	0,91
MG004	Cu	µg/L	2000	2000	1	32	0,05	2,50	0,12	0,39	2,50	1,20	1,24
MG004	F	µg/L	1500	1500		32	25,0	730,0	100,0	105,0	152,5	168,0	159,1
MG004	Fe	µg/L	200	200	pas de valeur	32	2,5	8800,0	10,0	20,0	30,0	363,7	1657,7
MG004	Hg	ng/L	1000	1000	70	32	0,05	1,25	1,25	1,25	1,25	1,01	0,54
MG004	Li	µg/L				32	0,05	10,00	0,17	0,20	10,00	4,52	5,20
MG004	Mn	µg/L	50	50		32	0,20	800,00	2,50	2,50	11,00	48,80	159,53
MG004	Ni	µg/L	20	20	4	32	0,05	7,00	0,22	2,50	2,50	1,99	2,16
MG004	Pb	µg/L	10	10	1,2	32	0,03	2,50	0,05	0,09	2,50	1,14	1,29
MG004	Sb	µg/L	5	5	pas de valeur	32	0,03	2,50	0,03	0,07	2,50	1,13	1,30
MG004	Se	µg/L	10	10	pas de valeur	32	0,05	2,50	0,16	1,00	2,50	1,13	1,02
MG004	Sr	µg/L				32	25,00	211,00	99,55	144,00	172,25	133,66	63,63
MG004	Zn	µg/L	5000	5000	7,8	32	0,25	5,62	1,62	2,50	5,02	2,96	2,04

Tableau 20 : Statistiques descriptives des données physico-chimiques historiques de la MESO MG004

Risque possible de fond hydrogéochimique élevé pour : Fe, Mn, PO₄, NH₄

e) Volcanisme du Complexe Sud (MG005)

Données historiques	Paramètres	Unité	Normes de potabilité	Valeurs seuils	Normes de Qualité Environnementale (NQE)	Nombre d'analyses	Minimum	Maximum	1st Quartile	Médiane	3rd Quartile	Moyenne	Ecart-type
MG005	T (°C)	°C	≥4,5 et ≤9			48	25,6	30,0	27,4	27,7	28,3	27,7	0,9
MG005	pH	-				48	5,5	8,7	6,4	7,0	7,3	6,9	0,7
MG005	Conductivité à 25°C	μS/cm				48	125	1471	288	558	630	481	267
MG005	Eh NHE	mV				48	68	545	349	426	495	405	118
MG005	O2 dissous	mg/L				48	0,1	7,3	0,5	4,3	5,5	3,3	2,6
MG005	COD	mg/L				48	0,3	1,2	0,8	1,0	1,1	0,9	0,3
MG005	NO3 (Nitrates)	mg/L				48	0,3	8,2	0,3	0,3	0,7	0,9	1,5
MG005	SO4 (Sulfates)	mg/L				48	1,0	137,0	3,0	6,4	8,0	8,1	19,2
MG005	Ca (Calcium)	mg/L				48	1,5	54,2	9,0	26,1	41,1	25,2	16,7
MG005	Mg (Magnesium)	mg/L				48	1,7	43,4	5,5	17,1	22,4	15,5	9,2
MG005	Na (Sodium)	mg/L				48	1,0	349,0	9,3	32,2	51,2	38,0	53,2
MG005	K (Potassium)	mg/L				48	1,0	17,7	2,1	3,1	3,5	3,4	2,6
MG005	HCO3 (Bicarbonates)	mg/L				48	1,0	721,0	34,8	80,9	314,0	172,1	168,6
MG005	Cl (Chlorures)	mg/L				48	1,1	57,5	9,0	18,2	41,7	23,7	16,8
MG005	NH4 (Ammonium)	mg/L	0,5	0,5	0,5	48	0,1	2,0	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
MG005	PO4 (Orthophosphates)	mg/L	0,5			48	0,2	4,6	0,4	0,6	0,7	0,9	1,1
MG005	SiO2 (Silice)	mg/L				48	2,6	95,0	24,8	56,0	67,8	46,0	26,6
MG005	Al	μg/L	200	200	pas de valeur	48	2,30	280,00	2,50	2,50	9,50	26,88	73,43
MG005	Ag	μg/L				48	0,50	65,00	0,50	2,75	7,50	11,25	22,10
MG005	As	μg/L	10	10	0,83	48	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG005	B	μg/L	1000	1000	pas de valeur	48	5,00	670,00	15,00	20,00	24,00	70,00	160,79
MG005	Ba	μg/L	700	700	pas de valeur	48	5,00	170,00	5,00	32,00	57,00	47,12	54,63
MG005	Be	μg/L				48	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG005	Br	μg/L				48	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG005	Cd	μg/L	5	5	de ≤ 0,08 à 0,25 (par classes)	48	0,25	0,50	0,25	0,50	0,50	0,39	0,13
MG005	Co	μg/L	20			48	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG005	Cr	μg/L	50	50	3,4	48	1,25	2,50	2,50	2,50	2,50	2,31	0,46
MG005	Cu	μg/L	2000	2000	1	48	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG005	F	μg/L	1500	1500		48	1,2	800,0	140,0	250,0	320,0	254,9	167,7
MG005	Fe	μg/L	200	200	pas de valeur	48	2,5	850,0	10,0	10,0	45,0	72,3	161,6
MG005	Hg	ng/L	1000	1000	70	48	0,05	1,25	0,05	0,05	1,25	0,56	0,64
MG005	Li	μg/L				48	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG005	Mn	μg/L	50	50		48	1,23	186,00	2,50	6,90	34,30	31,23	46,64
MG005	Ni	μg/L	20	20	4	48	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG005	Pb	μg/L	10	10	1,2	48	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG005	Sb	μg/L	5	5	pas de valeur	48	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG005	Se	μg/L	10	10	pas de valeur	48	1,00	2,50	2,50	2,50	2,50	2,28	0,55
MG005	Sr	μg/L				48	25,00	740,00	245,00	305,00	360,00	312,50	159,01
MG005	Zn	μg/L	5000	5000	7,8	48	2,50	230,00	2,50	2,50	4,25	19,23	58,42

Tableau 21 : Statistiques descriptives des données physico-chimiques historiques de la MESO MG005

Risque possible de fond hydrogéochimique élevé pour : Fe, Mn, PO₄, NH₄, Na, K, Al.

f) *Alluvions de Kaweni (MG006)*

Données historiques	Paramètres	Unité	Normes de potabilité	Valeurs seuils	Normes de Qualité Environnementale (NQE)	Nombre d'analyses	Minimum	Maximum	1st Quartile	Médiane	3rd Quartile	Moyenne	Ecart-type
MG006	T (°C)	°C				22	19,8	28,9	26,8	28,6	28,8	26,8	3,5
MG006	pH	-	≥4,5 et ≤9			22	5,9	8,7	7,3	7,4	7,8	7,4	0,5
MG006	Conductivité à 25°C	μS/cm				22	195	530	405	452	470	423	79
MG006	Eh NHE	mV				22	271	539	371	415	494	420	84
MG006	O2 dissous	mg/L				22	5,3	7,5	5,4	5,6	6,0	5,9	0,8
MG006	COD	mg/L				22	0,3	3,6	0,7	0,9	1,6	1,4	1,5
MG006	NO3 (Nitrates)	mg/L	50			22	0,6	14,0	1,6	1,9	2,2	2,5	2,8
MG006	SO4 (Sulfates)	mg/L	250			22	2,0	8,6	3,3	3,7	4,7	4,1	1,4
MG006	Ca (Calcium)	mg/L				22	11,9	34,5	22,3	24,3	26,0	24,0	4,5
MG006	Mg (Magnesium)	mg/L	50			22	8,3	29,9	12,2	14,0	15,0	14,3	4,0
MG006	Na (Sodium)	mg/L	200			22	3,7	55,0	44,1	47,1	48,0	39,7	16,8
MG006	K (Potassium)	mg/L	12			22	1,9	9,8	7,0	8,0	8,4	7,3	2,0
MG006	HCO3 (Bicarbonates)	mg/L				22	22,9	294,0	27,0	125,5	236,0	133,9	103,9
MG006	Cl (Chlorures)	mg/L	250			22	3,0	54,0	22,2	25,0	25,7	24,8	9,1
MG006	NH4 (Ammonium)	mg/L	0,5	0,5	0,5	22	0,1	0,6	0,3	0,3	0,4	0,3	0,1
MG006	PO4 (Orthophosphates)	mg/L	0,5			22	0,2	1,0	0,2	0,3	0,6	0,4	0,3
MG006	SiO2 (Silice)	mg/L				22	7,0	79,0	46,2	68,0	71,9	54,2	26,4
MG006	Al	μg/L	200	200	pas de valeur	22	2,50	1120,00	4,38	45,00	60,00	170,00	385,07
MG006	Ag	μg/L				22	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG006	As	μg/L	10	10	0,83	22	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG006	B	μg/L	1000	1000	pas de valeur	22	32,00	45,00	35,25	38,50	41,75	38,50	9,19
MG006	Ba	μg/L	700	700	pas de valeur	22	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG006	Be	μg/L				22	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG006	Br	μg/L				22	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG006	Cd	μg/L	5	5	de ≤ 0,08 à 0,25 (par classes)	22	0,25	0,50	0,25	0,25	0,44	0,33	0,13
MG006	Co	μg/L	20			22	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG006	Cr	μg/L	50	50	3,4	22	1,25	15,00	1,25	1,88	2,50	3,96	5,44
MG006	Cu	μg/L	2000	2000	1	22	1,50	90,00	2,50	2,50	15,00	22,30	38,25
MG006	F	μg/L	1500	1500		22	110,0	360,0	257,5	300,0	350,0	280,0	87,8
MG006	Fe	μg/L	200	200	pas de valeur	22	2,5	7850,0	10,0	10,0	45,0	515,2	1790,7
MG006	Hg	ng/L	1000	1000	70	22	0,05	1,25	0,06	0,10	0,10	0,28	0,48
MG006	Li	μg/L				22	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	0,00
MG006	Mn	μg/L	50	50		22	2,50	120,00	2,50	2,50	10,00	14,88	30,79
MG006	Ni	μg/L	20	20	4	22	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG006	Pb	μg/L	10	10	1,2	22	1,50	40,00	2,50	2,50	3,00	9,90	16,84
MG006	Sb	μg/L	5	5	pas de valeur	22	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG006	Se	μg/L	10	10	pas de valeur	22	1,00	2,50	1,00	1,00	2,13	1,50	0,77
MG006	Sr	μg/L				22	220,00	270,00	232,50	245,00	257,50	245,00	35,36
MG006	Zn	μg/L	5000	5000	7,8	22	2,50	150,00	23,50	42,50	112,50	65,08	62,07

Tableau 22 : Statistiques descriptives des données physico-chimiques historiques de la MESO MG006

Risque possible de fond hydrogéochimique élevé pour : Fe, Mn, PO₄, NH₄, Al

Concernant le plomb (Pb), la valeur maximale observée est a priori liée à une pollution anthropique ponctuelle.

Eaux de surface - Cours d'eau

Les données historiques disponibles pour les eaux de surface – cours d'eau, avec a minima 4 données par masse d'eau – cours d'eau, concernent seulement 15 des 26 masses d'eau – cours d'eau de Mayotte.

La liste des 15 masses d'eau – cours d'eau ayant suffisamment de données est présentée ci-après.

Code Masse d'eau - Cours d'eau	Nom de la masse d'eau - Cours d'eau
FRMR02	Rivière Maré en aval du barrage de Dzoumonyé
FRMR03	Rivière Bouyouni
FRMR04	Rivière Longoni
FRMR08	Rivière Adrianabé
FRMR11	Rivière Mroni Batirini
FRMR12	Rivière Chirini
FRMR13	Rivière Mrowalé
FRMR14	Rivière Orovéni en amont du barrage de Combani
FRMR15	Rivière Orovéni en aval du barrage de Combani
FRMR16	Rivière Coconi
FRMR19	Rivière Gouloué
FRMR20	Rivière Koualé
FRMR21	Rivière Dembéni
FRMR22	Rivière Hajangua
FRMR25	Rivière Bé (Dapani)
FRMR26	Rivière Djialimou

Tableau 23 : Liste des masses d'eau – cours d'eau ayant suffisamment de données pour l'analyse statistique descriptive

Les limites de quantification (LQ) des données historiques pour les substances prioritaires de l'état chimique (Cd, Ni, Pb) et les polluants spécifiques non synthétiques de l'état écologique (As, Cr, Cu, Zn) sont trop élevées, elles ne permettent pas de se prononcer. De plus, aucune analyse du mercure (Hg) n'est disponible dans les données historiques.

Concernant les nutriments – paramètres physico-chimiques généraux pour les cours d'eau, quelques dépassements sont observés pour NH_4 et NO_2 .

Les valeurs de nitrates (NO_3) sont faibles ; aucun dépassement ($< 50 \text{ mg/L}$) pour les masses d'eau - cours d'eau n'est observé.

Par contre des concentrations élevées sont observées en orthophosphate (PO_4), huit masses d'eau – cours d'eau sont concernées par ces dépassements ($> 0,5 \text{ mg/L}$), dont deux avec une valeur du percentile 75 supérieure à la NQE.

Eléments physico-chimiques généraux

COURS D EAU	Paramètres	Unité	Normes de Qualité Environnementale (NQE)	Nombre d'analyses	Minimum	Maximum	1st Quartile	Médiane	3rd Quartile	Moyenne	Ecart-type
FRMR02	NH4 (Ammonium)	mg/L	0,5	8	0,03	0,23	0,05	0,07	0,15	0,10	0,08
FRMR02	NO2 (Nitrites)	mg/L	0,3	8	0,01	0,36	0,03	0,03	0,09	0,09	0,13
FRMR02	NO3 (Nitrates)	mg/L	50	8	0,25	3,00	0,46	1,00	1,73	1,23	0,96
FRMR02	PO4 (Othophosphates)	mg/L	0,5	8	0,02	0,20	0,03	0,05	0,13	0,08	0,08
FRMR03	NH4 (Ammonium)	mg/L	0,5	29	0,03	14,00	0,03	0,03	0,03	0,53	2,59
FRMR03	NO2 (Nitrites)	mg/L	0,3	29	0,01	0,05	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
FRMR03	NO3 (Nitrates)	mg/L	50	29	0,10	1,00	0,25	0,25	0,25	0,34	0,24
FRMR03	PO4 (Othophosphates)	mg/L	0,5	29	0,05	1,80	0,11	0,19	0,34	0,31	0,39
FRMR04	NH4 (Ammonium)	mg/L	0,5	14	0,03	0,10	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
FRMR04	NO2 (Nitrites)	mg/L	0,3	14	0,01	0,03	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
FRMR04	NO3 (Nitrates)	mg/L	50	14	0,10	1,00	0,25	0,25	0,25	0,31	0,21
FRMR04	PO4 (Othophosphates)	mg/L	0,5	14	0,16	1,00	0,28	0,31	0,41	0,37	0,22
FRMR08	NH4 (Ammonium)	mg/L	0,5	4	0,03	0,19	0,07	0,11	0,15	0,11	0,12
FRMR08	NO2 (Nitrites)	mg/L	0,3	4	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
FRMR08	NO3 (Nitrates)	mg/L	50	4	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
FRMR08	PO4 (Othophosphates)	mg/L	0,5	4	0,22	0,32	0,25	0,27	0,30	0,27	0,07
FRMR11	NH4 (Ammonium)	mg/L	0,5	12	0,03	0,60	0,03	0,03	0,03	0,08	0,17
FRMR11	NO2 (Nitrites)	mg/L	0,3	12	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
FRMR11	NO3 (Nitrates)	mg/L	50	12	0,25	0,50	0,25	0,25	0,25	0,29	0,10
FRMR11	PO4 (Othophosphates)	mg/L	0,5	12	0,05	0,45	0,05	0,14	0,40	0,21	0,17
FRMR12	NH4 (Ammonium)	mg/L	0,5	14	0,03	0,50	0,03	0,03	0,06	0,08	0,13
FRMR12	NO2 (Nitrites)	mg/L	0,3	14	0,01	0,03	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
FRMR12	NO3 (Nitrates)	mg/L	50	14	0,25	0,50	0,25	0,25	0,36	0,31	0,11
FRMR12	PO4 (Othophosphates)	mg/L	0,5	14	0,03	1,20	0,05	0,30	0,41	0,37	0,33
FRMR13	NH4 (Ammonium)	mg/L	0,5	4	0,03	0,22	0,04	0,06	0,11	0,09	0,09
FRMR13	NO2 (Nitrites)	mg/L	0,3	4	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
FRMR13	NO3 (Nitrates)	mg/L	50	4	0,25	1,20	0,38	0,50	0,85	0,65	0,49
FRMR13	PO4 (Othophosphates)	mg/L	0,5	4	0,05	0,30	0,05	0,06	0,18	0,14	0,14
FRMR14	NH4 (Ammonium)	mg/L	0,5	6	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,00
FRMR14	NO2 (Nitrites)	mg/L	0,3	6	0,01	0,03	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
FRMR14	NO3 (Nitrates)	mg/L	50	6	0,25	1,00	0,25	0,25	0,44	0,42	0,30
FRMR14	PO4 (Othophosphates)	mg/L	0,5	6	0,14	0,60	0,17	0,41	0,53	0,37	0,21
FRMR15	NH4 (Ammonium)	mg/L	0,5	26	0,03	0,33	0,03	0,03	0,03	0,05	0,06
FRMR15	NO2 (Nitrites)	mg/L	0,3	26	0,01	0,09	0,01	0,02	0,03	0,02	0,02
FRMR15	NO3 (Nitrates)	mg/L	50	26	0,10	4,50	0,25	1,15	1,88	1,26	1,13
FRMR15	PO4 (Othophosphates)	mg/L	0,5	26	0,02	0,30	0,04	0,05	0,06	0,08	0,07
FRMR16	NH4 (Ammonium)	mg/L	0,5	14	0,03	0,17	0,03	0,03	0,09	0,06	0,06
FRMR16	NO2 (Nitrites)	mg/L	0,3	14	0,01	0,10	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02
FRMR16	NO3 (Nitrates)	mg/L	50	14	0,25	1,40	0,25	0,85	1,08	0,74	0,43
FRMR16	PO4 (Othophosphates)	mg/L	0,5	14	0,02	0,40	0,05	0,05	0,06	0,09	0,10
FRMR19	NH4 (Ammonium)	mg/L	0,5	22	0,03	0,17	0,03	0,03	0,03	0,05	0,05
FRMR19	NO2 (Nitrites)	mg/L	0,3	22	0,01	0,33	0,01	0,01	0,01	0,03	0,07
FRMR19	NO3 (Nitrates)	mg/L	50	22	0,25	4,94	0,25	0,25	0,50	0,75	1,20
FRMR19	PO4 (Othophosphates)	mg/L	0,5	22	0,04	0,63	0,16	0,21	0,35	0,28	0,19
FRMR20	NH4 (Ammonium)	mg/L	0,5	29	0,03	0,96	0,03	0,03	0,08	0,10	0,21
FRMR20	NO2 (Nitrites)	mg/L	0,3	29	0,01	0,04	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01
FRMR20	NO3 (Nitrates)	mg/L	50	29	0,25	3,09	0,25	0,25	0,50	0,51	0,61
FRMR20	PO4 (Othophosphates)	mg/L	0,5	29	0,05	0,30	0,11	0,18	0,20	0,17	0,07
FRMR21	NH4 (Ammonium)	mg/L	0,5	12	0,03	0,13	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
FRMR21	NO2 (Nitrites)	mg/L	0,3	12	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
FRMR21	NO3 (Nitrates)	mg/L	50	12	0,25	1,50	0,25	0,25	0,50	0,46	0,39
FRMR21	PO4 (Othophosphates)	mg/L	0,5	12	0,14	0,42	0,19	0,27	0,36	0,28	0,10
FRMR22	NH4 (Ammonium)	mg/L	0,5	10	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
FRMR22	NO2 (Nitrites)	mg/L	0,3	10	0,01	0,03	0,01	0,02	0,03	0,02	0,01
FRMR22	NO3 (Nitrates)	mg/L	50	10	0,25	0,50	0,25	0,25	0,25	0,28	0,08
FRMR22	PO4 (Othophosphates)	mg/L	0,5	10	0,10	0,60	0,20	0,30	0,33	0,28	0,14
FRMR25	NH4 (Ammonium)	mg/L	0,5	7	0,03	0,08	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
FRMR25	NO2 (Nitrites)	mg/L	0,3	7	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
FRMR25	NO3 (Nitrates)	mg/L	50	7	0,25	0,50	0,25	0,25	0,38	0,32	0,12
FRMR25	PO4 (Othophosphates)	mg/L	0,5	7	0,30	0,70	0,39	0,53	0,64	0,51	0,16
FRMR26	NH4 (Ammonium)	mg/L	0,5	14	0,03	0,09	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
FRMR26	NO2 (Nitrites)	mg/L	0,3	14	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
FRMR26	NO3 (Nitrates)	mg/L	50	14	0,25	0,50	0,25	0,25	0,25	0,27	0,07
FRMR26	PO4 (Othophosphates)	mg/L	0,5	14	0,20	0,50	0,28	0,31	0,40	0,34	0,10

Tableau 24 : Statistiques descriptives des éléments physico-chimiques généraux pour les données historiques des masses d'eau – cours d'eau de Mayotte ayant suffisamment de données.

3.4. CONCLUSIONS INTERMEDIAIRES DES DONNEES HISTORIQUES

Le travail sur la composition en éléments majeurs des eaux souterraines de Mayotte, en identifiant les eaux suivant leur appartenance aux différentes masses d'eau souterraine de Mayotte a permis de mettre en avant :

- que les eaux souterraines de Mayotte ont un faciès hydrochimique majoritairement de type bicarbonaté-calcique ; certaines eaux ont également un faciès de type bicarbonaté-sodique ;
- que les eaux de surface ont une signature géochimique proche des eaux souterraines, avec principalement des eaux de type bicarbonaté-calcique ;
- que les eaux souterraines ont une signature commune. L'alignement des points d'eau souterraine de Grande Terre sur le graphe Na vs. SiO_2 (Illustration 21) et (Ca + Mg) vs. (Na + K) (Illustration 22 c) met en avant des mécanismes communs dans l'acquisition de la chimie des eaux souterraines; avec des eaux plus ou moins enrichies en fonction de leur localisation géographique, de leur appartenance à une masse d'eau souterraine et probablement aussi en fonction de leur temps de séjour.
- des différences importantes dans la composition des eaux souterraines. Des pôles sont ainsi identifiés. Les eaux de Petite Terre se distinguent sur l'ensemble des graphes ; elles forment un pôle à elles-seules. On remarque aussi les eaux du volcanisme du Complexe Sud et du Complexe Nord qui elles aussi forment deux autres pôles.

Le travail d'inter-comparaison de la chimie des eaux souterraines classées par masses d'eau présente donc un intérêt certain. Il sera intéressant par la suite d'affiner ces résultats en fonction de la géologie, de la lithologie drainée ou captée en fonction des points d'eau.

De plus, la variabilité des concentrations et de la nature des éléments chimiques ne dépend pas de la campagne de prélèvement. Elle peut varier de manière identique en hautes eaux (HE) et basses eaux (BE), même si elle est plus souvent observée en période d'étiage du fait d'une moindre dilution des éléments dans les eaux.

Pour les points d'eau superficielle, la majorité des valeurs maximales et des grandes variabilités sont observées en aval des cours d'eau, notamment au niveau de la Mroni Bé de Dapani, Mro Oua Orouvénini à Chiconi, Mro Oua Gouloué et Mro Oua Kwalé au sud de Mamoudzou, Mroni Andrianabé à Mtsangamouji.

Certaines valeurs extrêmes peuvent être dues à une pollution d'origine anthropique ; pour les cours d'eau le risque d'une telle pollution est plus important à l'aval des cours d'eau qu'à l'amont. Les grandes variabilités quant à elles peuvent être induites par des pics de pollution mais aussi par l'ancienneté de certaines données, ce qui soulève la question de leur fiabilité et la différence des protocoles d'échantillonnage.

Pour les points d'eau souterraine, les pics de concentration et les grandes variabilités s'observent surtout au niveau du piézomètre du Gymnase ([12308X0086/PZ4](#)) sur Petite Terre, ainsi que des forages AEP Kaweni F1 ([12307X0013/F1](#)) et Kaweni F2 ([12307X0014/F2](#)) situés dans les Alluvions de Kaweni (MG006) sur la commune de Mamoudzou. Le piézomètre du Gymnase à Petite Terre est particulier, on peut supposer une influence d'eau hydrothermale dans sa composition géochimique. Les deux forages de Kaweni sont quant à eux, de par leur situation et le contexte hydrogéologique, a priori sensibles à des contaminations d'origine anthropique. Ces

trois points d'eau souterraine seront à inclure aux prochaines campagnes de prélèvements pour améliorer la compréhension de leur chimie particulière.

Le piézomètre de Dembeni Haut ([12313X0034/DEMHAU](#)) appartenant à la masse d'eau du Complexe Sud (MG005) présente des particularités en fer et en strontium, mais sur la période 1983-2016 une seule analyse est disponible.

Des risques possibles de fond hydrogéochimique élevé ont été identifiés à partir des données historiques. Ils concernent notamment le fer, le manganèse et les orthophosphates. Néanmoins, compte-tenu de la qualité des données historiques et de l'existence possible d'influence(s) anthropique(s) sur certains points d'eau, ces premiers résultats demandent à être complétés par les données des deux campagnes d'échantillonnage complémentaires réalisées en basses eaux 2017 et en hautes eaux 2018. Ces campagnes d'échantillonnage complémentaires répondent à une méthodologie spécifique développée pour l'étude des fonds hydrogéochimiques ; les points d'eau sélectionnés ne sont pas normalement influencés par des pollutions d'origine anthropique, afin de ne caractériser que la signature hydrogéochimique naturelle. Les prélèvements sont réalisés en respectant le protocole AQUAREF. De plus, pour les points d'eau superficielle sélectionnés, une attention particulière est portée lors du repérage et des prélèvements, afin de s'affranchir de tout risque de contamination, notamment due à des lessives réalisées dans les cours d'eau à Mayotte.

4. Campagnes d'échantillonnage complémentaire

4.1. OBJECTIF

Conformément aux prescriptions de la DCE et de sa directive fille, les valeurs seuils de bon état des eaux souterraines doivent être déterminées, en intégrant la connaissance des niveaux de référence naturels des eaux souterraines. Il en est de même pour les cours d'eau. Les normes de qualité environnementale doivent être adaptées aux concentrations de référence des milieux.

Les éléments dissous dans l'eau renseignent sur les processus de minéralisation des eaux et permettent la mise en évidence de leurs origines, comme les enrichissements naturels, anthropiques, hydrothermaux ou encore l'influence de la mer. Les terrains volcaniques représentent des contextes particuliers. Pour l'île volcanique de Mayotte, les principaux processus sont dus aux apports de l'eau de mer (embruns, présence d'un biseau salé, etc.), aux phénomènes d'interactions eau-roche (différentes lithologies), aux phénomènes de drainage pour les eaux de surface, aux apports d'éléments par hydrothermalisme ou circulation plus profonde, plus chaude et à des minéralisations secondaires.

Ce plan d'échantillonnage permettra de mieux caractériser, puis contraindre les valeurs seuils servant de référence pour les éléments traces, notamment les éléments traces métalliques (Al, Mn, Fe) à risque de fond hydrogéochimique élevé. En effet, à l'heure actuelle, compte-tenu de la variabilité du contexte climatique, géologique, lithologique, hydrogéologique, hydrothermal, il est délicat de délimiter précisément les zones à risque de fond hydrogéochimique.

A partir des données acquises lors des campagnes de prélèvement complémentaires, les concentrations naturelles et les conditions du milieu (notamment conditions d'oxydo-réduction) pourront être mieux caractérisées. Les résultats obtenus seront comparés aux résultats déjà disponibles et aux données géologiques et hydrogéologiques disponibles. Des gammes de concentrations de référence par type de contexte hydrogéologique et par type de masse d'eau de surface seront alors proposées. Ces dernières auront valeur de propositions pour la Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DEAL) qui pourra éventuellement définir de nouvelles valeurs seuils.

La meilleure compréhension des relations entre le contexte géologique et lithologique, les conditions physico-chimiques, les conditions climatiques et les concentrations en éléments majeurs et traces observées constituera un progrès déterminant pour améliorer le rapportage du district à la Commission Européenne mais également pour orienter l'implantation de nouveaux forages d'eau souterraine pour l'AEP.

4.2. MATERIEL ET METHODES

Deux campagnes d'échantillonnage complémentaires ont été programmées, avec une phase préliminaire de vérification d'accessibilité sur site avant chaque campagne. La recommandation minimale pour les eaux souterraines est de réaliser deux prélèvements par an afin d'apprécier l'effet du battement de la nappe : un en période de saison sèche et l'autre en saison des pluies. Le prélèvement en saison sèche reste le plus pertinent car il est plus représentatif des interactions eau-roche occurrentes. La plupart des aquifères de Mayotte étant captifs à semi-captifs, le prélèvement saisonnier sera privilégié pour minimiser la perte d'informations. Concernant les eaux de surface, les prélèvements en saison sèche sont préférés pour évaluer le fond hydrogéochimique. En période de saison des pluies, le signal est généralement dilué et un

lessivage superficiel important lors des crues peut entraîner une remobilisation des éléments traces provenant des aérosols marins (croûte de chlorures par exemple) accumulés dans les sols. C'est pourquoi la campagne de terrain en période de hautes eaux concernera principalement les eaux souterraines (sources, piézomètres, drains, forages).

Afin de garantir l'acquisition de données fiables et exploitables, les prélèvements seront réalisés selon les prescriptions du cahier des charges d'Aquaref pour le suivi des fonds hydrogéochimiques (Ghestem et al., 2008) et les préconisations du laboratoire du BRGM à Orléans.

La caractérisation du fond hydrogéochimique des eaux nécessite des analyses d'échantillons portant sur les éléments suivants :

- 5 paramètres physico-chimiques *in situ* : température, pH, conductivité, oxygène dissous (en % et en mg/L) et potentiel d'oxydo-réduction ;
- 14 éléments majeurs (mg/L) : Ca, Mg, Na, K, Cl, HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^- , PO_4^{3-} , NH_4^+ , SiO_2 , COD ;
- 20 éléments traces ($\mu\text{g/L}$) : Al, As, Ba, B, Br, Cd, Co, Cr, Cu, F, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Sr, Zn.

Selon la directive fille européenne 2008/105/EC sur les Normes de Qualité Environnementale (NQE) et la circulaire DCE 2007/23, il est recommandé de réaliser les analyses sur la fraction dissoute (filtrée à 0,45 μm) des eaux de surface prélevées. Il n'existe pas de recommandation quant à la réglementation pour les eaux souterraines, mais par analogie avec les eaux superficielles, les eaux prélevées en souterrain sont également filtrées à 0,45 μm .

Les éléments à analyser dans le cadre de l'étude du fond hydrogéochimique des eaux requièrent un échantillonnage et un conditionnement particulier suivant les analyses effectuées au laboratoire. Les conditionnements et mode de conservation sont décrits dans le Tableau 25. La congélation du flacon des composés azotés est réalisée le jour même du prélèvement. Les flacons des composés azotés sont transmis congelés au laboratoire.

L'estimation des fonds hydrogéochimiques nécessite de prendre d'importantes précautions durant l'échantillonnage afin d'éviter toute contamination (utilisation de gants et de filtres à usage unique). Il est recommandé d'utiliser un blanc de terrain comme échantillon de référence afin de permettre la détection d'éventuelles contaminations de l'échantillon à différents niveaux de la chaîne de mesure. Ce contrôle permet d'assurer que certaines sources d'erreurs lors de l'échantillonnage sont maîtrisées.

Les mesures physico-chimiques sont effectuées sur le terrain à l'aide de sondes multi-paramètres. Le matériel de suivi des paramètres physico-chimiques *in situ* est vérifié à l'aide de solutions tampons et étalonné si besoin. Les mesures physico-chimiques mesurées *in situ* portent sur 5 paramètres : la température, le pH, la conductivité, l'oxygène dissous et le potentiel d'oxydo-réduction. Lors des deux campagnes complémentaires à Mayotte, elles ont été réalisées avec le matériel suivant :

- 2 multi-paramètres 3420 (WTW) ;
- 1 sonde de pH SenTix 940 (WTW) ;
- 1 sonde de potentiel Redox BlueLine Rx IDS (SI Analytics) ;
- 1 sonde à oxygène FDO 925 (WTW) ;
- 1 sonde de conductivité TetraCon925 (WTW).



Illustration 27 : Vérification du matériel de suivi des paramètres physico-chimiques à l'aide de solutions tampons.

Pour le prélèvement, des récipients appropriés en plastique ou en téflon sont utilisés et spécialement nettoyés. Pendant les opérations de filtration, de préparation du flaconnage, de conditionnement, le port de gants jetables, non talqués est obligatoire (le port de gants non talqués permet de limiter la contamination par les mains). L'eau est prélevée à l'aide de seringues stériles et filtres de porosité nominale 0,45 μm à usage unique (Illustration 28). Avant chaque filtration et conditionnement, la seringue, le filtre et le flaconnage sont rincés 3 fois avec une aliquote de l'échantillon. Afin de vérifier l'absence de contamination du système, un blanc de terrain a été réalisé avec de l'eau milliQ.



Illustration 28 : Echantillonnage sur site lors de la campagne de hautes eaux 2018.

Les analyses en laboratoire sont réalisées par méthode ICP-MS (Spectrométrie de Masse à Plasma et à Couplage Inductif) avec des performances analytiques et des méthodes adaptées aux concentrations cibles. Les limites de quantification visées sont au moins inférieures au 1/3 de la norme de qualité de l'élément et si possible inférieures à 1/5 de celle-ci.

Paramètres	Nature	Flaconnage en PE (polyéthylène) ou verre	Stabilisation	Conservation
NH₄, NO₃, NO₂	Eau filtrée sur site à 0,45 µm, en limitant les contacts avec l'air	PE 50 ml	Pas d'agent de stabilisation	A congeler
COD	Eau filtrée sur site à 0,45 µm, en limitant les contacts avec l'air	Verre 100 ml	Acidification avec H ₂ SO ₄ pH < 2 (vérification pH avec bandelette pH)	A conserver à 4°C
Hg dissous	Eau filtrée sur site à 0,45 µm, en limitant les contacts avec l'air	PE 50 ml	Acidification avec HCl pH < 2 (vérification pH avec bandelette pH)	A conserver à 4°C
Anions (HCO₃/CO₃, Cl, F, PO₄, SO₄, Br)	Eau filtrée sur site à 0,45 µm, en limitant les contacts avec l'air	PE 100 ml	Pas d'agent de stabilisation	A conserver à 4°C
Cations (Ca, Fe, Mg, Na, K, Si) Métaux traces (Ag, Al, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Li, Mn, Ni, Pb, Sr, Zn, Sb, Se)	Eau filtrée sur site à 0,45 µm, en limitant les contacts avec l'air	PE 50 ml	Acidification avec HNO ₃ (vérification pH avec bandelette pH)	A conserver à 4°C

Tableau 25 : Conditionnement des échantillons selon le type d'éléments à analyser.

4.3. POINTS DE PRELEVEMENT

Les points de prélèvement adaptés à la caractérisation du fond hydrogéochimique doivent pouvoir répondre à l'ensemble des critères suivants :

- ne pas être influencés par toute pression anthropique ; c'est-à-dire qu'ils sont choisis dans des zones sans influence de pollution d'origine humaine. Par exemple, pour les prélèvements d'eau superficielle, compte tenu notamment de la problématique de lessives dans les cours d'eau à Mayotte, une attention particulière est portée lors du repérage et lors des prélèvements ESU, afin d'effectuer des prélèvements bien en amont, dans des zones exemptes de contamination.

Pour les prélèvements d'eau souterraine, les points d'eau (forages, piézomètres, sources) sont choisis en fonction de leur environnement et de leurs caractéristiques hydrogéologiques. De plus, lors des prélèvements, le protocole Aquaref (Ghestem et al, 2008 et 2017) est respecté, afin de garantir des échantillons représentatifs de l'eau de l'aquifère.

- être représentatifs des bassins versants ou des entités hydrogéologiques et des lithologies pour compléter le réseau DCE ;
- être répartis de façon le plus homogène possible sur le territoire de Mayotte.

La population est inégalement répartie sur Mayotte. Elle se concentre principalement sur la côte, surtout autour des centres urbains du nord-est (Mamoudzou, Kawéni, Koungou, Kangani,

Trévani), de Sada dans le sud et sur Petite Terre. Les points de prélèvement seront préférentiellement situés en amont de ces zones urbanisées.

Suite au travail de sélection, complété par des visites sur le terrain, trente- points d'eau répartis sur l'ensemble de l'île avaient été sélectionnés pour les campagnes d'échantillonnage complémentaire (Illustration 29). Ils comportaient 21 points d'eau souterraine (5 forages, 8 piézomètres et 8 sources) et 10 points en cours d'eau.

Les deux nouvelles campagnes d'acquisition de données ont été réalisées en période de basses eaux 2017 et hautes eaux 2018.

Parmi les forages retenus, certains de ces ouvrages devaient faire l'objet de travaux de réhabilitation afin de pouvoir palier aux besoins d'eau pour l'alimentation en eau potable à Mayotte. Les travaux de réhabilitation des forages retenus n'ont pas été réalisés à temps pour la campagne de terrain de basses eaux 2017, par contre ils ont pu être prélevés lors de la campagne de hautes eaux 2018.



Illustration 29 : Localisation des points de prélèvement sélectionnés pour les campagnes de terrain complémentaires.

4.4. CAMPAGNE DE TERRAIN EN PERIODE DE BASSES EAUX 2017

Préparation de la campagne de terrain

Pour la campagne de terrain en période de basses eaux 2017, il a été décidé d'échantillonner tous les points retenus dans le plan d'échantillonnage de la phase 1 (BRGM/RP-67461-FR), soit 31 points d'eau concernant à la fois les eaux souterraines (ESO) et les eaux de surface (ESU).

Aucune vérification préliminaire d'accessibilité aux sites n'a été menée avant la campagne de terrain par manque de temps. La validation des sites et de leur accessibilité a été effectuée le jour du prélèvement.

Les points d'eau à prélever étaient de natures différentes : piézomètres, forage AEP et sources pour les ESO, et cours d'eau pour les ESU.

Selon leur nature, le matériel nécessaire pour le pompage et le prélèvement était différent :

- Pour les **piézomètres**, une pompe immergée et un tuyau PVC de longueur adapté a été nécessaire pour prélever les eaux souterraines. Afin de limiter les coûts d'achat de matériels, le choix a été fait d'utiliser celui déjà présent au BRGM de Mayotte, soit une pompe électrique immergée twister 12V et une batterie 12 V. Seul le tuyau PVC a été acheté neuf (la caractérisation des fonds géochimiques nécessitant d'avoir un contenant propre) : un tuyau souple en PVC tuboclar transparent de 12 mm de diamètre et de 21 m de longueur.
- Pour les **forages AEP**, les prélèvements ont été réalisés directement au robinet dans la station de pompage. Aucun matériel particulier n'a donc été nécessaire.
- Pour les **sources** et les **cours d'eau**, les prélèvements ont été réalisés directement au niveau de l'écoulement. Aucun matériel particulier n'a donc été nécessaire.

Concernant l'ensemble des prélèvements (ESU et ESO), ces derniers ont été réalisés selon les prescriptions du cahier des charges Aquaref pour le suivi des fonds hydrogéochimiques et selon les préconisations du laboratoire du BRGM d'Orléans.

Afin de gagner du temps de trajet, les déplacements sur l'île ont été réfléchis et organisés en amont de la campagne, mais également en fonction de la disponibilité et des contraintes des agents sur place. La campagne a été organisée par type de point (d'abord les piézomètres nécessitant du matériel de pompage pour les prélèvements), puis par secteur.

Déroulement de la campagne de terrain et moyens humains

La campagne de terrain en Basses Eaux a été répartie sur 4 semaines, entre le 18 octobre et le 10 novembre 2017. Globalement les conditions météorologiques étaient constantes : temps humide et ensoleillé.

La majorité des prélèvements et les mesures physico-chimiques *in situ* ont été effectués par un hydrogéologue du BRGM Mayotte, accompagné d'un manoeuvre notamment pour des raisons de sécurité (terrain isolé et insécurité liée au contexte social local). Pour les prélèvements réalisés sur les forages en exploitation, un technicien de la SMAE² était également présent.

La campagne de terrain s'est déroulée en deux temps :

- Etape 1 : Pompage dans les piézomètres à l'aide d'une pompe immergée ; puis mesures des paramètres physico-chimiques *in situ* et prélèvements. Les prélèvements ont été effectués par deux hydrogéologues du BRGM Mayotte ;
- Etape 2 : Mesures des paramètres physico-chimiques *in situ* et prélèvements des autres points du plan d'échantillonnage comprenant les cours d'eau (ESU), les sources et les

² SMAE : Société Mahoraise des Eaux

forages AEP équipés (ESO), réalisés par un hydrogéologue du BRGM Mayotte et un manœuvre.

Points de suivi sélectionnés

La première campagne de terrain réalisée pour compléter la base de données afin de caractériser les fonds hydrogéochimiques de Mayotte a eu lieu en période de Basses Eaux 2017, lors de la saison sèche. Des analyses physico-chimiques *in situ* ont été réalisées, ainsi que des prélèvements pour analyses au laboratoire du BRGM Orléans.

Pour cette campagne réalisée en période de Basses Eaux, les points d'eau sélectionnés concernent à la fois les eaux souterraines (ESO) et les eaux de surface (ESU).

Parmi les 31 points d'eau sélectionnés, 26 points d'eau ont été prélevés lors de cette campagne réalisée en octobre – novembre 2017 ; en effet les travaux de réhabilitation n'ayant pas encore été réalisés au moment de la campagne de prélèvement, les futurs forages AEP n'ont pas pu être prélevés. Les points prélevés sont listés dans le tableau ci-après et présentés sur l'illustration 30.

ESO/ESU	Commune	Nom	Type
ESO	Tsingoni	Digo PZ5	Piézomètre
ESO	Mtsamboro	Dzoumogné	Piézomètre
ESO	Kani-Keli	Kani Keli 2	Piézomètre
ESO	Ouangani	Kahani 1	Piézomètre
ESO	Dembeni	La Bonne marée	Source
ESU	Dembeni	Hajangua Amont	Rivière
ESO	Dembeni	Salimbé résurgence	Source
ESO	Pamandzi	Gymnase Petite Terre	Piézomètre
ESU	Koungou	Longoni Amont	Rivière
ESU	Tsingoni	Walé Amont	Rivière
ESU	Acoua	Mapouera Amont	Rivière
ESO	Mtsangamouji	Andrianabe Emergence	Source
ESO	Mamoudzou	Gîte Mont Combani	Source
ESU	Chirongui	Kavani Amont	Rivière
ESO	Chirongui	Poroani Source	Source
ESO	Mamoudzou	Kwalé 3	Forage AEP
ESO	Mamoudzou	Gouloué 1 Amont	Forage AEP
ESO	Mtsangamouji	Mtsangamouji 2	Forage AEP
ESU	Mamoudzou	Gouloué Amont	Rivière
ESU	Tsingoni	Chirini Amont	Rivière
ESU	Ouangani	Ouangani Amont	Rivière
ESO	Chirongui	Dapani Source	Source
ESU	Kani-Keli	Antanana Amont	Rivière
ESO	Kani-Keli	Djalimou Amont	Source
ESO	Tsingoni	Combadrain	Source
ESO	Dembeni	Dembeni Emergence	Source

Tableau 26 : Liste des points d'eau souterraine (ESO) et de surface (ESU) sélectionnés et échantillonnés lors de la campagne de terrain en période de basses eaux 2017.

Eaux souterraines et superficielles

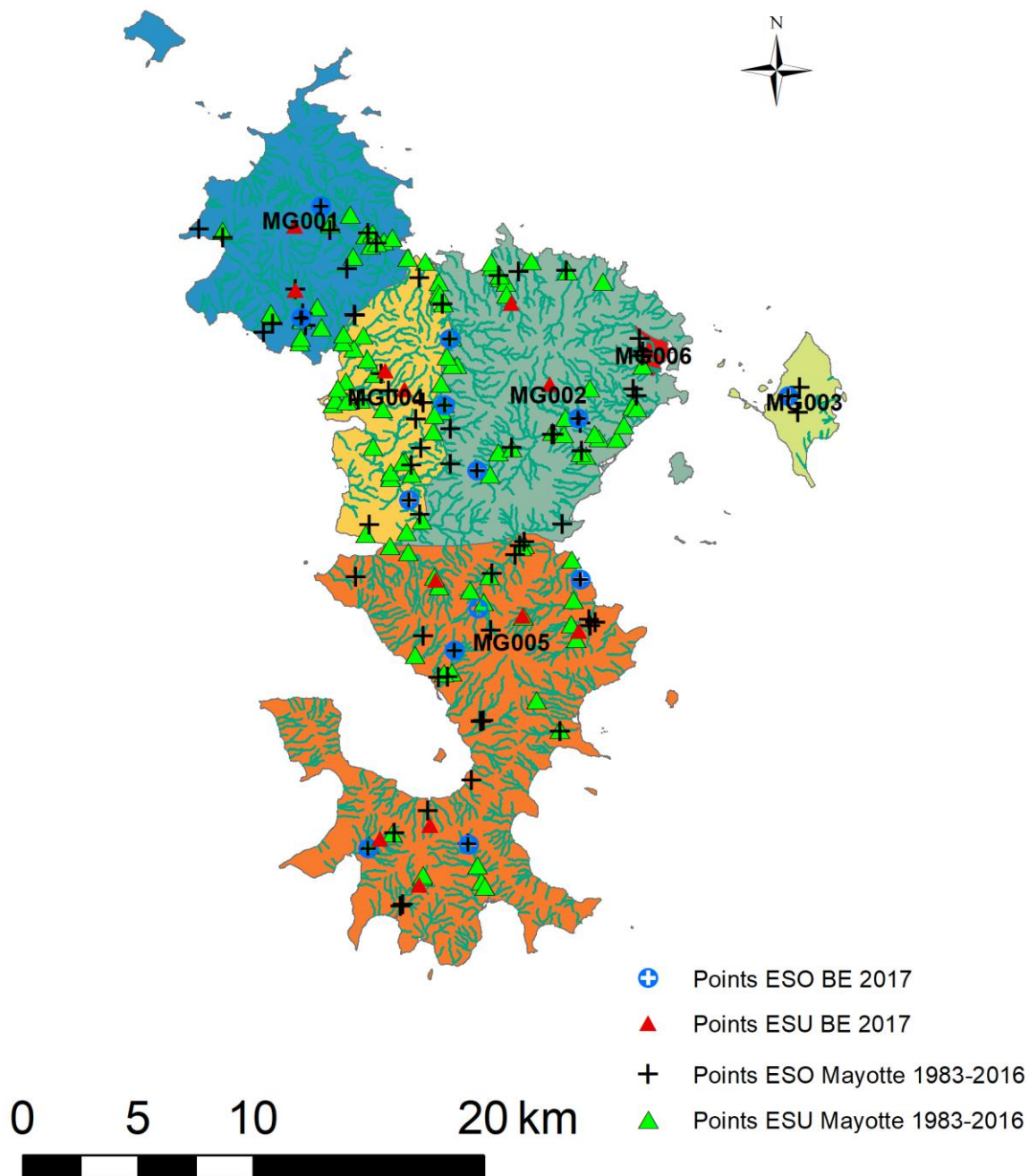


Illustration 30 : Localisation des points d'eau souterraine (ESO) et de surface (ESU) suivis lors de la campagne de Basses Eaux (BE) 2017 ; avec représentation des masses d'eau souterraine, du réseau hydrographique de la BD Carthage et des points d'eau de la base de données (1983-2016).

Réalisation de la campagne de terrain

a) Prélèvements

Le protocole concernant le flaconnage, le conditionnement et les précautions à prendre pour les échantillons (Illustration 31) selon le type d'éléments à analyser, a été respecté au plus près en fonction des contraintes locales (l'éloignement avec la métropole n'a pas permis une analyse rapide de l'échantillon par le laboratoire du BRGM d'Orléans). L'envoi des échantillons par glacière dès le remplissage de la glacière via Chronopost a été effectué au mieux, avec un envoi le 06/11/2017 et un envoi le 14/11/2017.



Illustration 31 : Conditions de prélèvements des échantillons d'eau (à gauche : ESU et à droite : ESO) lors de la campagne de Basses Eaux 2017.

b) Difficultés rencontrées

La vérification préliminaire de l'accessibilité des sites n'ayant pas été faite, la première difficulté rencontrée a été de trouver les sites de prélèvements non connus (Illustration 32), notamment pour les points en rivières et les sources. Ce qui a rendu plus complexe l'estimation des jours de terrain. En effet, certains points difficiles d'accès nécessitaient plusieurs heures de marche, comme pour la station Gouloué Amont ou la source du gîte du Mont-Combani. D'autres points nécessitaient un temps long de trajet sur pistes ou étaient géographiquement isolés, comme c'est le cas pour le point d'eau souterraine du piézomètre de Petite-Terre (besoin de prendre le bateau pour y accéder).

La seconde difficulté rencontrée était liée à la localisation des points eux-mêmes. La carte des points du plan prévisionnel d'échantillonnage a été réalisée suite à la compilation des données existantes. Seulement, sur le terrain, l'hydrogéologue du BRGM s'est trouvé contraint à plusieurs reprises de modifier la localisation du point à échantillonner en fonction des conditions du terrain. Cela a été le cas pour la majorité des points en amont des rivières ou pour certaines sources. En effet, la campagne de terrain s'est faite en période d'étiage et les cours d'eau n'étant la plupart du temps pas pérenne, le point « amont » d'une rivière ou la source du cours d'eau, initialement localisé sur la carte d'échantillonnage était à sec. Il a donc fallu échantillonner plus en aval que le point originellement prévu. Cela a été par exemple le cas pour Ouangani Amont, Antanana Amont ou Walé Amont.

Enfin, certains points du plan d'échantillonnage n'ont pas été prélevés, cela pour plusieurs raisons :

- **ESU** : les points de prélèvements de Chiroungui Amont et Mramadoudou Amont (au sud de l'île) n'ont pas été prélevés en raison de leur assec. Cependant, afin de ne pas perdre d'information dans ce secteur de l'île, il a été décidé de prélever le cours d'eau Mroni Kavani (secteur de Tsimkoura), en eau au moment de la tournée, même si ce cours d'eau n'était pas dans le plan prévisionnel d'échantillonnage. La station de Chiroungui Amont a donc été remplacée par le point Kavani Amont.
- **ESO** : les 3 forages de Bandrélé-Dagoni, Mrereni 2 et Kaweni 2 n'ont pas été prélevés. En cause, des opérations de réhabilitation de forage (nettoyage et essais de pompage) étaient en cours et les forages étaient alors inaccessibles. Le piézomètre d'Hajangua était obstrué par des racines à environ 1 m de profondeur, rendant impossible le passage de la pompe pour le prélèvement. Enfin, le piézomètre de Dembeni Haut (niveau statique à 24 m de profondeur au moment de la campagne de terrain) n'a pas été prélevé, car les caractéristiques de la pompe immergée utilisée ne permettaient pas de pomper au-delà de 20 m de profondeur.

26 points d'eau souterraine et de surface (cours d'eau) ont été prélevés lors de la campagne de Basses Eaux 2017.



Illustration 32 : A gauche : exemple de conditions d'accès aux points d'eau ; à droite : influence anthropique (lessives dans les cours d'eau) sur la qualité des eaux des cours d'eau.

4.5. CAMPAGNE DE TERRAIN EN PERIODE DE HAUTES EAUX 2018

Préparation de la campagne de terrain

a) Les points de prélèvements

Cette campagne de terrain réalisée en période de hautes eaux 2018 concerne les points d'eau souterraine (ESO). En effet, en période de hautes eaux, le signal chimique des points d'eau superficielle (ESU) peut être dilué, c'est pourquoi leur caractérisation hydrogéochimique s'effectue préférentiellement en période de basses eaux.

Les points d'eau retenus sont au nombre de 24, dont 22 font partie des points sélectionnés en Phase 1 de l'étude (Serniguet et al., 2018) et 2 points supplémentaires qui ont été rajoutés. La liste des points d'eau est présentée dans le Tableau 27.

Jour d'intervention programmé	Commune	Nom	Type	Prélèvement en basses eaux 2017
1	Mamoudzou	Kaweni 1	Piézomètre	
1	Mamoudzou	Kaweni 2	Futur forage AEP	
2	Mtsangamouji	Mtsangamouji 2	Forage AEP	x
2	Tsingoni	Digo PZ5	Piézomètre	x
3	Mtsamboro	Dzoumogné	Piézomètre	x
3	Mtsangamouji	Andrianabe Emergence	Source	x
4	Mamoudzou	Kwalé 3	Forage AEP	x
4	Mamoudzou	Gouloué 1	Forage AEP	x
4	Pamandzi	Gymnase Petite Terre	Piézomètre	x
5	Ouangani	Kahani 1	Piézomètre	x
5	Tsingoni	Combadrain	Source	x
5	Ouangani	Ouroveni F3	Forage AEP	
6	Dembeni	Dembeni Emergence	Source	x
6	Mamoudzou	Gîte Mont Combani	Source	x
6	Dembeni	Hajangua 1 – Dembeni	Piézomètre	
7	Dembeni	La Bonne marée	Source	x
7	Dembeni	Dembeni Haut	Piézomètre	
8	Dembeni	Salimbé résurgence	Source	x
8	Bandré	Bandrele Dagoni	Futur forage AEP	
9	Chirongui	Poroani source	Source	x
9	Chirongui	Mrereni 2 – Poroani	Futur forage AEP	
10	Chirongui	Dapani source	Source	x
10	Kani-Keli	Kani Keli 2	Piézomètre	x
10	Kani-Keli	Djalimou amont	Source	x

Tableau 27 : Liste des points d'eau souterraine prélevés de la campagne de terrain en période de hautes eaux 2018.

Cette campagne de terrain concerne donc :

- 17 points d'eau souterraine (forages AEP, piézomètres, sources et drains) prélevés en période de basses eaux 2017 (Tableau 27) ;
- 3 forages en phase de réhabilitation pour servir éventuellement à l'alimentation en eau potable (AEP), qui n'avaient pas pu être prélevés en période de basses eaux pour cause de retard dans les travaux de réhabilitation des ouvrages ;
- 2 piézomètres qui n'avaient pas pu être prélevés en période de basses eaux pour causes techniques (piézomètre de faible diamètre obstrué, pompe disponible non appropriée à l'ouvrage) ;
- le piézomètre de Kaweni 1, point d'eau rajouté pour améliorer la connaissance hydrogéochimique de la masse d'eau des alluvions de Kaweni ;
- le forage AEP d'Ouroveni F3, qui a présenté une minéralisation importante lors d'un contrôle sanitaire de l'ARS en septembre 2017 avec une conductivité supérieure à 1 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, une concentration en sodium supérieure à 200 mg/L et un rapport Na/Cl qui semble exclure l'hypothèse d'une intrusion saline. En plus des analyses physico-chimiques *in situ* et au laboratoire (éléments majeurs et traces), un prélèvement pour analyses CFC et SF6 a également été décidé pour ce forage.

b) Matériel et prévisions

Après un travail de sélection des points, une compilation de leurs caractéristiques hydrogéologiques et techniques (coupe géologique, niveau piézométrique, diamètre et profondeur du forage, diamètre du tubage de l'ouvrage, profondeur des crépines, lithologie

des aquifères captés, etc.) et logistiques (coordonnées géographiques, accessibilité, etc.) a été réalisée, afin de mettre en place la campagne de terrain.

Certains points d'eau étant isolés et/ou accessibles uniquement à pied, un manœuvre a été prévu par sécurité pour accompagner les agents BRGM et/ou pour aider au transport du matériel.

Pour procéder au prélèvement d'eau, les différents types de points d'eau souterraine n'impliquent pas la même organisation. Les sources et les forages AEP (équipés d'une pompe à demeure) ne nécessitent pas de matériel de pompage.

Par contre, les piézomètres nécessitent de mettre en place un matériel de pompage spécifique. Pour ce faire, le BRGM de Mayotte dispose de 2 types de pompes immergées :

- Deux pompes twister, qui permettent d'effectuer des prélèvements dans des piézomètres où le niveau d'eau est peu profond. Leur alimentation électrique est assurée par une batterie de 12 V. Suivant leurs caractéristiques techniques, leur débit est variable en fonction de la HMT (hauteur manométrique), il est compris entre 1 et 16 L/min. Elles permettent de remonter une hauteur manométrique maximale de 21 m (débit de 1 L/min). Ce sont donc de petites pompes, de faible diamètre, relativement faciles d'utilisation, idéales pour effectuer des prélèvements dans des ouvrages de petits diamètres, avec des niveaux piézométriques à une profondeur inférieure à 20 m, et pour lesquels le volume de la colonne d'eau à renouveler avant prélèvement n'est pas trop important.

Ces deux pompes ont été équipées d'un tuyau d'exhaure d'une longueur de 21 m (tubocclair Ø 12 mm).

- Une pompe immergée Grundfos MP1, qui permet d'effectuer des prélèvements dans des ouvrages de diamètres supérieurs à 50 mm, à des profondeurs pouvant atteindre 90 m. Cette pompe fonctionne en 220 V, elle nécessite donc une alimentation électrique en 220 V sur le terrain (groupe électrogène).

Elle est reliée à un transformateur, avec possibilité de faire varier la fréquence. Selon ses caractéristiques techniques, pour une fréquence maximale de 50 Hz, elle permet de remonter de l'eau jusqu'à une HMT maximale de 90 m (0,4 m³/h). Son débit maximal est de 2,4 m³/h. Les débits réels sur le terrain sont toujours moins importants à cause des pertes de charges.

Elle a été équipée d'un tuyau d'exhaure de 25 m de longueur (tricroclair de Ø 19 mm), les niveaux piézométriques sur Mayotte n'excédant généralement pas 21 m de profondeur. Néanmoins, le tuyau d'exhaure peut être prolongé au besoin.

Le choix de la pompe à utiliser a été décidé pour chaque point en fonction du diamètre du tubage de l'ouvrage, de la profondeur du niveau d'eau, de l'accessibilité du point et du temps de pompage nécessaire calculé en fonction de la colonne d'eau à renouveler. Selon les recommandations du guide AQUAREF sur les opérations d'échantillonnage en eau souterraine (Ghestem et al, 2017), le prélèvement doit être réalisé après une purge permettant de renouveler à minima 2-3 fois la colonne d'eau, mais aussi en fonction de la stabilité des paramètres physico-chimiques mesurés *in situ*. Ainsi, le temps de purge théorique a pu être calculé grâce aux niveaux piézométriques au repos relevés sur les différents piézomètres et en appliquant un débit théorique fidèle aux caractéristiques de chaque pompe.

La pompe Grundfos MP1 a été privilégiée pour les ouvrages possédant une colonne d'eau importante et/ou un niveau piézométrique à une profondeur supérieure à 20 m, tel que le piézomètre de Dembeni. Ce dernier n'avait pas pu être prélevé lors de la première campagne de basses eaux pour des raisons techniques. En avril 2018, son niveau piézométrique était

situé à une profondeur de 23,5 m. Il a donc été décidé de prélever ce point à l'aide de la pompe MP1 en rallongeant le tuyau d'exhaure.

Sur les forages possédant une colonne d'eau moindre et n'induisant pas de temps de pompage trop long, la pompe twister a été privilégiée, car sa mise en place est plus rapide et moins contraignante. Pour le piézomètre de Digo comportant un diamètre de tubage trop petit pour l'utilisation de la pompe MP1, mais nécessitant un temps de pompage relativement important, l'utilisation couplée des 2 pompes twister a été décidée.

c) Définition du planning

Initialement la campagne de prélèvements était prévue en avril 2018. Mais, en raison de la grève générale contre l'insécurité qui a paralysé Mayotte tout le mois de mars et jusqu'à mi-avril, elle a été décalée au mois de mai. Avant d'effectuer cette campagne, les niveaux piézométriques des ouvrages suivis par le BRGM à Mayotte ont été vérifiés avant la campagne. Il s'avère que suite à une saison des pluies 2018 particulièrement humide (l'île n'avait pas connu de telle saison des pluies depuis 15 ans), le mois de mai a concordé avec la période de très hautes eaux.

L'influence de la période de ramadan a été prise en compte dans le planning de la campagne terrain. En 2018, le ramadan a été célébré de la mi-mai à la mi-juin. Durant cette période de jeûne, la population mahoraise, majoritairement musulmane, ne travaille que le matin. Ce facteur a été pris en compte lors de la définition du planning : les prélèvements sur les forages en exploitation AEP qui devaient impliquer l'intervention d'un agent de la SMAE³ ont été programmés en matinée.

Le plan de prélèvements (Illustration 33) a donc été établi en prenant en compte différents facteurs afin d'optimiser au maximum la campagne de terrain :

- les temps théoriques d'intervention comprenant l'accessibilité au site (piste, barge, ouvrage dans un champ...), le temps de purge des piézomètres et le temps de prélèvement ;
- les contraintes locales culturelles (ramadan) et naturelles, la source de La Bonne Marée n'étant accessible qu'à marée basse ;
- les secteurs afin de regrouper si possible les points proches et d'optimiser les temps de trajet.

Un classeur de terrain « fond hydrogéochimique Mayotte » a été préparé afin de faciliter le déroulement de la campagne. Il comprend :

- les cartes de localisation et les photos de la campagne basses eaux des points ;
- le planning ;
- les caractéristiques et les coupes géologiques des ouvrages ;
- les fiches de prélèvements de terrain au format AQUAREF à compléter sur site ;
- les coordonnées des agents de la SMAE.

³ SMAE : Société Mahoraise des Eaux

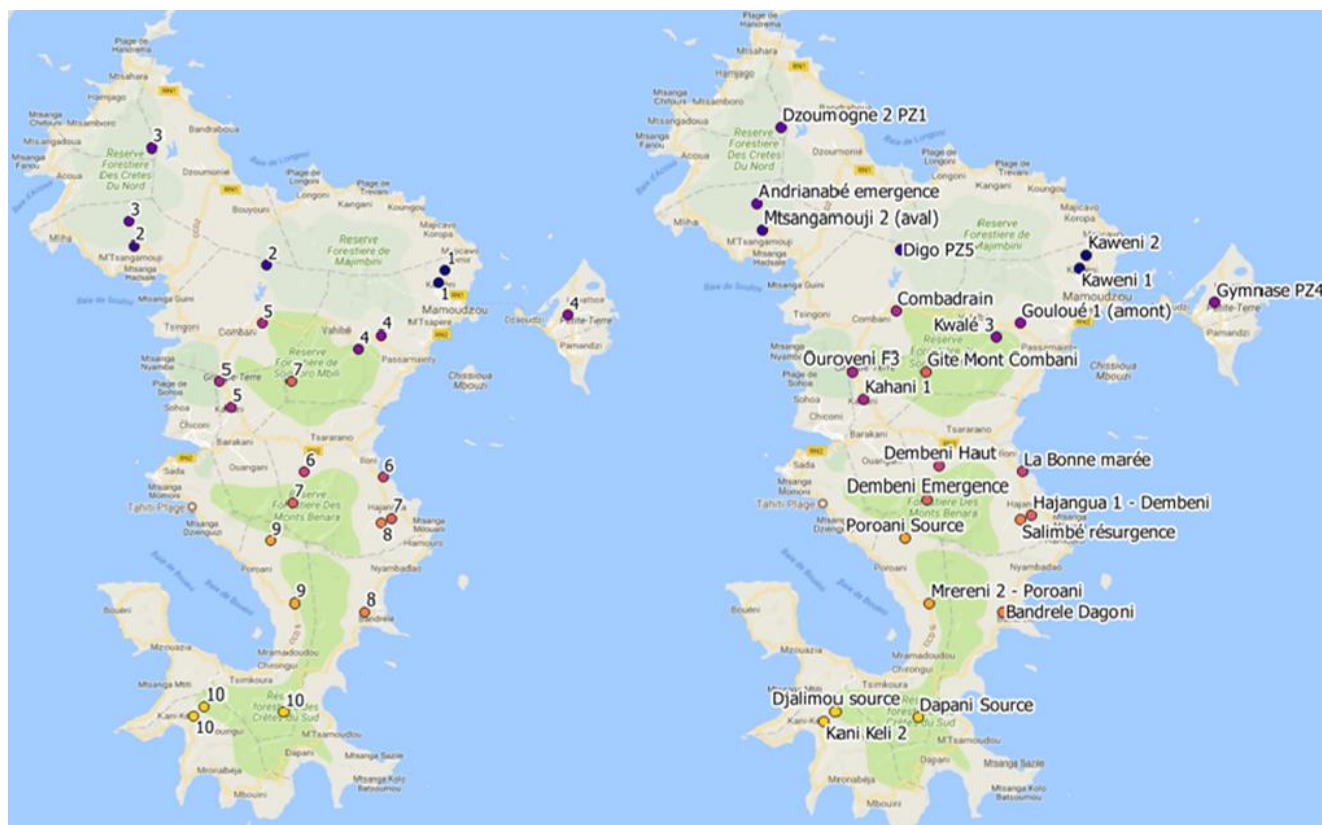


Illustration 33 : Plan de prélèvements initial. Les jours d'interventions sont numérotés de 1 à 10.

Réalisation de la campagne de terrain

La campagne de terrain s'est étalée sur 3 semaines du 16 au 30 mai 2018, 10 jours sur site ont été nécessaires pour effectuer l'ensemble des prélèvements, à ceci s'ajoute le temps de préparation, de gestion, de transport des échantillons, etc... Le protocole de prélèvement décrit précédemment a été respecté.

a) Sources et drain

Les sources et le drain de Combani-Miréréni ont été prélevés directement au niveau de l'écoulement. Sur les 9 sources prélevées lors de la campagne de basses eaux 2017, 3 points d'eau identifiés comme source (ESO) n'ont pas pu être prélevés comme tels, lors de cette campagne en période de hautes eaux. Il s'agit des points d'eau suivants : Andrianabe, Dembeni et Poroani. Ces points d'eau correspondaient en effet à des faibles écoulements d'eau retrouvés au sein du lit des cours d'eau à sec lors de la saison sèche. En période de hautes eaux, les débits des cours d'eau étant nettement plus importants, ces points d'eau retrouvés grâce à leur positionnement GPS et les photos et indications de la campagne précédente, correspondaient à des points ESU, c'est à dire des prélèvements d'eau superficielle en cours d'eau. Il a été alors recherché à proximité soit des sources, validées par leurs caractéristiques terrain, leur emplacement et les paramètres physico-chimiques mesurés *in situ*, soit des points d'eau ESU représentatifs d'eau de lessivage sur l'encaissant (les formations géologiques / pédologiques ont été observées et prises en compte).

Lors de cette campagne hautes eaux, un grand nombre de sources ayant une forte activité bactérienne ont été repérées sur le terrain. Un exemple est donné sur l'illustration 34.



Illustration 34 : Exemple d'une source avec une forte activité bactérienne.

b) Forages AEP

Les forages AEP possèdent une pompe à demeure. En arrivant sur site, des renseignements ont été pris auprès des agents de la SMAE, afin de s'assurer que les forages AEP étaient bien régulièrement utilisés et que leur colonne d'eau était régulièrement renouvelée. Les ouvrages AEP échantillonnés avaient tous été utilisés plusieurs heures pendant les dernières 24h.

Un tuyau en plastique relié au robinet de prélèvement sur la tête de forage a été mis en place à chaque fois, afin notamment d'éviter une oxygénation de l'eau. L'écoulement a eu lieu dans une bassine en plastique soigneusement rincée avant chaque prélèvement avec une aliquote de l'échantillon. Les prélèvements ont été réalisés suite à une purge moyenne de 20 minutes et après stabilisation des paramètres physico-chimiques *in situ* (Illustration 35).

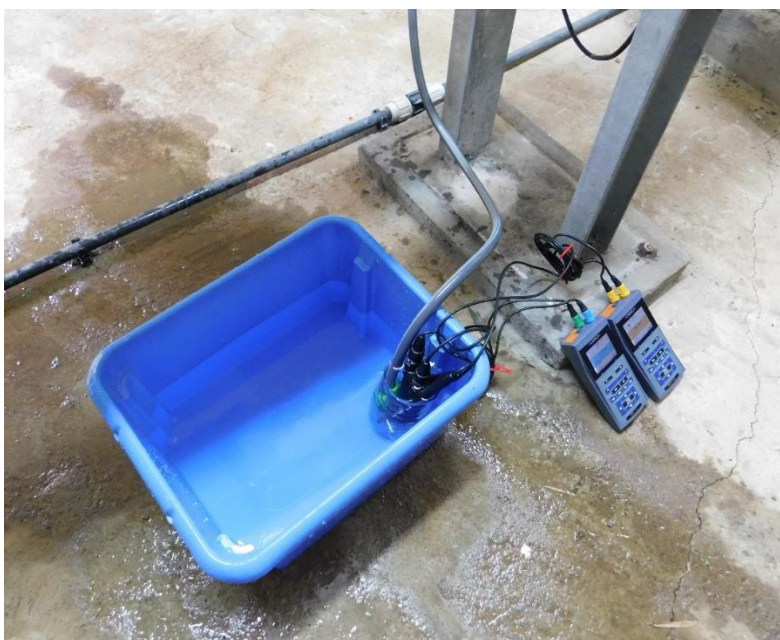


Illustration 35 : Suivi des paramètres physico-chimiques in situ sur un forage AEP avant prélèvement.

Le dispositif de prélèvement pour les analyses des CFC et SF6 (Illustration 36) est différent, afin d'être conforme aux préconisations de ce type de prélèvement (seau en métal et conditionnement spécifique).



Illustration 36 : Matériel utilisé pour le prélèvement des CFC et SF6

c) Piézomètres et forages en cours de réhabilitation pour l'AEP

Les piézomètres prélevés font partie du réseau de surveillance de l'état quantitatif des eaux souterraines de Mayotte (réseau référencé 1100000001 – RDESOUPMAYBRGM) et sont équipés de sondes d'acquisition du niveau piézométrique.

Certains piézomètres accessibles uniquement à pied sur la fin du trajet ont demandé la mise en place d'une logistique adaptée (Illustration 37).



Illustration 37 : Conditions d'accès au piézomètre de Dzoumogné difficile d'accès.

Les caractéristiques techniques des piézomètres et forages AEP prélevés sont indiquées dans le Tableau 28.

A l'arrivée sur site, le niveau statique est mesuré manuellement avec une sonde piézométrique et la valeur du capteur de pression *in situ* est vérifiée. La profondeur du forage est mesurée. Le matériel de suivi du niveau piézométrique est ensuite enlevé et celui de pompage installé (Illustration 38). La pompe est placée si possible au niveau des crépines de l'ouvrage.

Une fois le pompage lancé, une mesure de débit est réalisée 3 fois, afin d'établir une valeur moyenne et de déterminer le temps de purge nécessaire pour renouveler la colonne d'eau 3 fois. Les paramètres physico-chimiques *in situ* sont ensuite relevés régulièrement afin de

s'assurer de leur stabilité avant d'effectuer le prélèvement. Après un renouvellement minimum de 2 fois de la colonne d'eau et une stabilisation des paramètres physico-chimiques, le prélèvement est alors effectué.



Illustration 38 : Réalisation du pompage et conditionnement sur le piézomètre de Dzoumogné.

Lors des prélèvements effectués dans les forages en cours de réhabilitation pour l'AEP, le BRGM a été particulièrement vigilant afin de garantir des prélèvements représentatifs de l'aquifère. L'ensemble des opérations des travaux de réhabilitation de ces 3 forages ont donc été prises en compte lors de la campagne d'échantillonnage en hautes eaux 2018 ; les travaux de réhabilitation sont décrits en Annexe 1.

d) Eau de pluie

Le signal chimique de l'eau de pluie n'est pas connu à Mayotte. Elle a donc été prélevée 2 fois pour l'obtenir : lors d'un orage en mars en fin de saison des pluies, puis au cours d'une grosse pluie durant la campagne de terrain en mai 2018 (résultats analyse au Chapitre 5.4).

Ces deux prélèvements ont été réalisés au même endroit (un gîte de Passamainty) et selon les préconisations du laboratoire du BRGM à Orléans. Le conditionnement des échantillons est identique à celui décrit précédemment. Cependant, le signal de l'eau de pluie étant faible, l'eau n'est pas filtrée lors du prélèvement.

Les résultats des paramètres in situ de la campagne HE 2018 et les observations terrain sont indiquées dans le Tableau 29.

Ancien code BSS	Nouveau code BSS	Nom	Type	Point de suivi qualité DCE	Point de suivi quantité DCE	Profondeur forage (m)	Diamètre forage (mm)	Diamètre tubage (mm)	Profondeur crépine (m)	Année forage	Hauteur repère piezo ou tubage /sol (m)	Profondeur d'eau mesurée (m)	Niveau piezo (mNGM)	Date mesure piezo	Lithologie principale de l'aquifère	Typologie système aquifère	Caractère aquifère	Transmissivité aquifère (m²/s)
12307X0020/KAOUÉ2	BSS002PMBC	Kaweni 2	Futur AEP	non	non	51	254	254	11,63 - 48,03	2000	0,66				Alluvions et basalte scoriacé	Pyroclastites holocènes		7,00E-03
12307X0011/KAWÉ1	BSS002PMAT	Kaweni 1	Piézomètre	non	oui	50	140	80	10,5 - 50	1991	0,63	4,42	9,32	12/04/2018	Alluvions	Pyroclastites holocènes	Semi-captif	6,40E-04
12306X0016/MTSAN2	BSS002PLTK	Mtsangamouji 2 (aval)	Forage AEP	non		80	355 à 305	273 à 159	65,85 - 76,97	2000					Coulée de basalte massif et surtout niveau de basalte type Pahoehoe	Basaltes Mio- Pliocène		1,40E-03
12306X0053/PZ5	BSS002PLUY	Digo PZ5	Piézomètre	non	oui	60	250	150	24 - 60	2009	0,72	12,02	100,41	12/04/2018	Coulée de basalte et sable basaltique	Basaltes Mio- Pliocène	Dominante captive	
12302X0026/PZ1	BSS002PLNK	Dzoumogne 2 PZ1	Piézomètre	non	oui	55	240	190	20 - 52	2009	0,68	4,07	92,42	12/04/2018	Coulée de basalte et sable basaltique	Volcano- détritique Pliocène	Captif	
12307X0045/GOUL	BSS002PMCD	Gouloué 1 (amont)	Forage AEP	non		89	226	226	28,25 - 45,50	2002					Lave scoriacée	Basaltes Mio- Pliocène		1,00E-04
									62,75 - 68,50									
12308X0086/PZ4	BSS002PNML	Gymnase PZ4	Piézomètre	oui	oui	60	240	220	25-39	2009	0,71	19,7	1,92	16/04/2018	Ponces et sables basaltiques	Pyroclastites holocènes	Libre	
12307X0100/KWALÉ3	BSS002PMEL	Kwalé 3	Forage AEP	non		84	226	251	57,25 - 74,50	2004					Basalte scoriacé	Basaltes Mio- Pliocène		1,50E-02
12312X0030/KAHA1	BSS002PNXS	Kahani 1	Piézomètre	non	oui	45	168 à 116	80	8,5 - 45	1990	0,66	9,85	107,35	24/04/2018	Argile d'altération et altérite de basalte	Basaltes Mocène	Dominante captive	4,66E-04
12306X0183		Ouroveni F3	Forage AEP	non		87	380	270	46 - 77	2013					Basalte fissuré / vacuolaire altéré en profondeur		Captif	1,00E-03
12313X0020/HANJ1	BSS002PPKL	Hajangua 1 - Dembeni	Piézomètre	non	oui	30	116	80	12,5 - 30	1990	0,612	3,71	121,512	11/04/2018	Altérites de basalte et basalte altéré fracturé - basalte légèrement	Substratum ancien	Captif	7,20E-05
12313X0034/DEMHAU	BSS002PPLA	Dembeni Haut	Piézomètre	non	oui	86	226	251	33,4 - 77,38	2005	0,655	23,52	66,565	11/04/2018	Coulée de basalte et sable basaltique	Substratum ancien	Captif	
12313X0033/BAND	BSS002PPKZ	Bandrele Dagoni	Futur AEP	non	non	80	381	226	22 - 62,25	2002	0,855	4,66	14,295	19/12/2002	Lave vacuolaire et fissurée avec niveau scoriacé et brèche	Volcano- détritique Mocène		4,80E-04
12312X0035/MRERE2	BSS002PNXX	Mrereni 2 - Poroani	Futur AEP	non	non	70	273	273	35,64 - 69	2000	0,66	4,4	10,6	10/06/2000	Basaltes +/- altérés	Substratum ancien		5,15E-04
12316X0037/PZ2	BSS002PPWU	Kani Keli 2	Piézomètre	non	oui	58	152	150	36 - 52	2009	0,72	0,93	15,68	11/04/2018	Basaltes altérés intercalés de niveaux sableux	Substratum ancien	Semi-captif	3,15E-05

Tableau 28 : Caractéristiques techniques des piézomètres et forages AEP prélevés

Ancien code BSS	Nouveau code BSS	Cours d'eau	Nom	Commune	Type	X (m)	Y (m)	pH	T (°C)	Conductivité à 25°C (µS/cm)	Eh (mV)	Eh NHE (mV)	O2 dissous (mg/L)	O2 dissous (%)	Observations
12307X0011/KAW1	BSS002PMAT		Kaweni 1	Mamoudzou	Pézomètre	523976	8588387	6,82	28,8	502	234	438	1,94	25,2	Temps ensoleillé, nuageux.
															Léger dégazage : présence de petites bulles sur les sondes physico-chimiques et la paroi de la bassine.
12306X0053/PZ5	BSS002PLUY		Digo PZ5	Tsingoni	Pézomètre	515803	8589220	6,42	26,1	166	285	490,6	3,43	43	Temps ensoleillé. Piézomètre dans une bananeraie.
12302X0028/PZ1	BSS002PLNK		Dzoumogné	Misamboro	Pézomètre	510356	8594795	6	26,6	196,4	250	455,5	1,12	14,1	Temps ensoleillé. Piézomètre dans une bananeraie.
															Temps ensoleillé. Piézomètre dans une bananeraie.
12308X0086/PZ4	BSS002PMML		Gymnase Petite Terre	Pamanadzi	Pézomètre	530133	8586784	8,43	28,4	1510	69,2	273,5	0,19	2,5	Temps ensoleillé.
12312X0030/KAH1	BSS002PNVS		Kahani 1	Ouangani	Pézomètre	514079	8582432	4,76	27,1	70,3	329	534,4	3,84	48,9	Temps ensoleillé.
12313X0020/HAN1	BSS002PPKL		Hajarqua 1 - Dembeni	Dembeni	Pézomètre	521742	8577175	7,2	27,8	666	-155	49,7	0,01	0,1	La pompe ne peut pas descendre au-delà de 8,5 m : présence de saletés qui obstruent le tubage
12313X0034/DE14/H4U	BSS002PPLA		Dembeni Haut	Dembeni	Pézomètre	517572	8579362	6,4	27,7	1051	11	215,8	0,1	1,3	Temps ensoleillé/couvert. Présence de dépôts blancs au fond de la bassine. Piézomètre dans une bananeraie. 3 séismes ressentis (magnitude 5 environ) lors de la purge. Réalisation de blancs.
12316X0037/PZ2	BSS002PPWU		Kani Keli 2	Kani-Keli	Pézomètre	512332	8567780	7,1	28,3	632	124	328,4	0,16	2	Temps nuageux. Aquifère peu transmissif : il a fallu ajuster le niveau de la pompe par 2 fois et le débit de pompage.
															Temps ensoleillé et humide. Eau claire, limpide et sans odeurs.
12307X0020/KAOUE2	BSS002PMBC		Kaweni 2	Mamoudzou	Fuair AEP	524288	8588991	7,14	28,5	429	-56,9	147,3	0,76	9,4	Environnement sale : à l'extérieur de la station AEP se trouve une « mini-décharge ».
12313X0033/BAND	BSS002PPKZ		Bandrée Dagoni	Bandrée	Fuair AEP	520445	8572719	6,6	27,7	424	196	400,8	0,43	5,4	L'air lift réalisé 1 mois avant le prélèvement semble bien fait : eau propre dès le début du pompage.
12312X0035/MRE2	BSS002PNXX		Mereni 2 - Poroani	Chirongui	Fuair AEP	517108	8573121	6,6	27,8	448	28	232,7	0,1	1,2	Air-lift + surfilage début mai 2018. Stabilité des paramètres physicochimiques <i>in situ</i> après 2h de pompage. Prélèvement représentatif du réservoir.
12306X0016/MTSAN2	BSS002PLTK		Masangamouji 2	Masangamouji	Forage AEP	509488	8590111	8,1	28,6	351	203	408,7	4,38	56,8	Temps ensoleillé. Nappe phréatique. Le captage tourne régulièrement en appoint.
															D'un point de vue AEP, l'eau brute est prélevée sans traitement sur site : la chloration en usine.
															Temps nuageux. Léger dégazage observé. Le forage AEP tourne 13h/jour.
12307X0010/KVALE3	BSS002PMEL		Kvalé 3	Mamoudzou	Forage AEP	520135	8585209	7,33	27,1	337	232	438,6	3,04	38,3	D'un point de vue AEP, l'eau brute est prélevée sans traitement sur site : la chloration en usine.
															Temps ensoleillé, peu couvert. Le forage AEP tourne 15h/jour.
12307X0045/GOUL	BSS002PMCD		Gouloué 1 (Anonit)	Mamoudzou	Forage AEP	521228	8585856	7,16	27,5	426	281	486	2,63	31,5	D'un point de vue AEP, l'eau brute est prélevée sans traitement sur site : la chloration en usine.
12306X00183			Ouroveni F3	Ouangani	Forage AEP	513578	8583683	6,4	29,5	1605	20	223,5	0,01	0,1	Fonctionnement du forage AEP 19h/jour.
12306X0006/HY	BSS002PLTB		Combadrain	Tsingoni	Source	515579	8586417	6,7	25,5	161,3	278	484,4	6,98	86,6	Temps nuageux, pluie dans la nuit. Prélèvement au niveau du tuyau le plus petit tuyau avec le plus fort débit et en forage des paramètres physico-chimiques <i>in situ</i> .
		Mro Oua Kvalé	Gite Mont Combani	Mamoudzou	Source	516659	8583677	6,03	25	105	240	446,7	5,46	67	Source captée par le raiat brostier et le gîte du Mont Combani. Aménagement du site en aval de la source, petit bassin.
12313X0007/HY	BSS002PPJY		La Bonne marée	Dembeni	Source	521319	8579087	6,8	28	467	230	434,6	4,75	60,7	Source aménagée : présence d'un petit bassin et d'un tuyau au niveau de l'écoulement. Mesures physico-chimiques <i>in situ</i> réalisées en amont du tuyau PVC. Prélèvement au tuyau.
		Mro Oua Salimbé	Salimbé résurgence	Dembeni	Source	5211060	8576514	7,5	26,8	242	204	408,5	7,61	95,2	Seul en béton dans le cours d'eau, avec 2 prises d'eau aménagées (grille pour filtration grossière). Présence d'écrouvées dans le petit bassin.
		Mont Bé (Dapiani)	Dapiani Source	Chirongui	Source	516625	85678441	6,7	25,1	666	118	324,7	0,1	1,7	Viale source, représentative de la nappe
		Mont Djalimou	Djalimou Anonit (anc. Source)	Kani-Keli	Source	512030	8586267	6,6	24,9	410	-48	158,8	0,07	1	Débit faible.
															Viale source. Point en amont du point en période de basses eaux (trop d'eau)
															Temps ensoleillé, prélèvement sous couvert en fin d'après-midi.
		Monti Andrianabe	Andrianabe Emergence	Misangamouji	ESU	509073	8591688	7,33	25,2	153,9	139	346,1	6,49	80,3	Difficile d'accès : 1h de marche en GR avant de trouver le point.
															Source non trouvée et cours d'eau non à sec => point ESU
		Mto Oua Dembeni	Dembeni Emergence	Dembeni	ESU	517019	8577846	7,7	24,4	319	215	422,2	7,31	89,1	Prélèvement ESU : Cours d'eau sur l'encassant
		Mont Bé (Poroani)	Poroani Source	Chirongui	ESU	515981	8576108	8,3	24,3	351	230	437,2	7,99	97,3	Point ESU : cours d'eau (lit rivière à sec en amont en saison sèche)

Tableau 29 : Mesures physicochimiques *in situ* et observations de terrain de la campagne de hautes eaux 2018.

4.6. CARACTERISATIONS GEOLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES DES POINTS D'EAU SOUTERRAINE ET SUPERFICIELLE DES DEUX NOUVELLES CAMPAGNES

Un récapitulatif pour les points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU) des deux campagnes d'échantillonnage réalisées en période de basses eaux 2017 et hautes eaux 2018 est présenté ci-après. Il décrit de façon synthétique pour l'ensemble des points d'eau prélevés :

- Dénomination, localisation, coordonnées, type de points ;
- Codes masse d'eau, Nom Masse d'eau ;
- Informations géologiques et lithologiques ;
- Campagne de prélèvement (BE2017, HE 2018).

Les points d'eau ESO / ESU des campagnes BE 2017 – HE 2018 comportent :

- 12 Points ESU - Cours d'eau ;
- 25 Points ESO, répartis ainsi :
 - 4 Forages AEP ;
 - 9 Piézomètres ;
 - 9 Sources ;
 - 3 Forages futurs AEP.

Points d'eau de surface, cours d'eau (ESU)

Les points ESU prélevés sont listés dans le Tableau 30. Ils sont répartis sur la Grande Terre de Mayotte. Leur localisation et leur bassin versant correspondant figurent sur l'illustration 39.

Pour chaque point d'eau ESU, la géologie des formations lessivées a été prise en compte. Par exemple, sur l'illustration 40 (A et B), figurent 4 points d'eau prélevés et leur bassin versant correspondant. La résultante des formations géologiques lessivées est différente pour chaque point d'eau ESU. Le Tableau 31 indique pour chacun de ces 4 points d'eau - cours d'eau, présentés sur l'illustration 40 (A et B), la description géologique du point d'eau à l'affleurement et les formations géologiques à l'affleurement sur le bassin versant correspondant.

Nom de la station	Commune	Code ME Cours d'eau	Nom ME Cours d'eau	Cours d'Eau	MESO associée	Nom MESO associée	Type	ESU_ESO	Campagne	X (RGM04, m)	Y (RGM04, m)	Z (MNT, m)	Distance trait de côte (m)
Mapouera Amont	Acoua	FRMR02	Rivière Maré en aval du barrage de Dzoumonyé	Mro Wa Mapouera	MG001	Complexe du Nord	Cours d'eau	ESU	BE 2017	509251	8593985	165	2988
Andrianabe Emergence	Mtsa ngamouji	FRMR08	Rivière Andrianabe	Mroni Andrianabe	MG001	Complexe du Nord	Cours d'eau	ESU	HE 2018 BE 2017	509073	8591688	128	2661
Gouloue Amont	Mamoudzou	FRMR19	Rivière Gouloue	Mro Oua Gouloue	MG002	Massif du Mitsapere	Cours d'eau	ESU	BE 2017	520029	8587325	200	3416
Longoni Amont	Koungou	FRMR04	Rivière Longoni	Mro Oua Longoni	MG002	Massif du Mitsapere	Cours d'eau	ESU	BE 2017	518392	8590747	81	1863
Wale Amont	Tsingoni	FRMR13	Rivière Mrowale	Mrowale	MG004	Massif du Digo	Cours d'eau	ESU	BE 2017	513876	8587122	80	2194
Chirini Amont	Tsingoni	FRMR12	Rivière Chirini	Chirini	MG004	Massif du Digo	Cours d'eau	ESU	BE 2017	513073	8587902	67	1855
Ouangani Amont	Ouangani	FRMR16	Rivière Coconi	Mroni Rouaka	MG005	Complexe du Sud	Cours d'eau	ESU	BE 2017	515203	8579095	126	2531
Antanana Amont	Kani-Keli	-	Pas de cours d'eau associée	Mroni Antanana	MG005	Complexe du Sud	Cours d'eau	ESU	BE 2017	514495	8566284	106	1521
Kavani Amont	Chirongui	-	Pas de cours d'eau associée	Mroni Kavani	MG005	Complexe du Sud	Cours d'eau	ESU	BE 2017	514958	8568779	80	927
Dembeni Emergence	Dembeni	FRMR21	Rivière Dembeni	Mro Oua Dembeni	MG005	Complexe du Sud	Cours d'eau	ESU	HE 2018 BE 2017	517019	8577846	185	3465
Poroani Source	Chirongui	-	Pas de cours d'eau associée	Mroni Be (Poroani)	MG005	Complexe du Sud	Cours d'eau	ESU	HE 2018 BE 2017	515981	8576108	146	1449
Hajangua Amont	Dembeni	FRMR22	Rivière Hajangua	Mro Oua Hajangua	MG005	Complexe du Sud	Cours d'eau	ESU	BE 2017	518880	8577577	234	2846

Tableau 30 : Points d'eau de surface – Cours d'eau prélevés

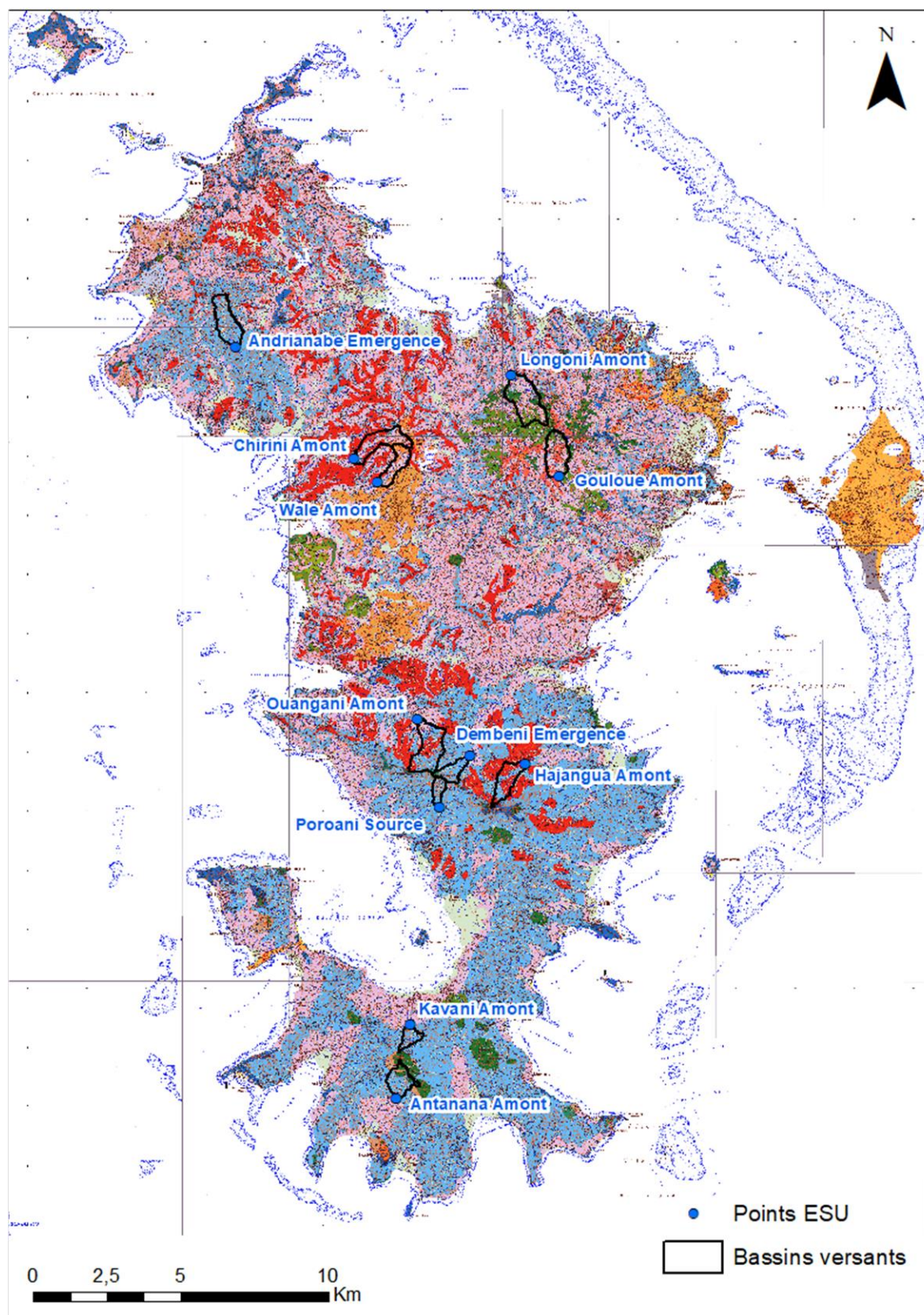


Illustration 39 : Localisation des points d'eau ESU et de leur bassin versant correspondant, sur fond de la carte géologique de Mayotte (Lacquement et al., 2013).

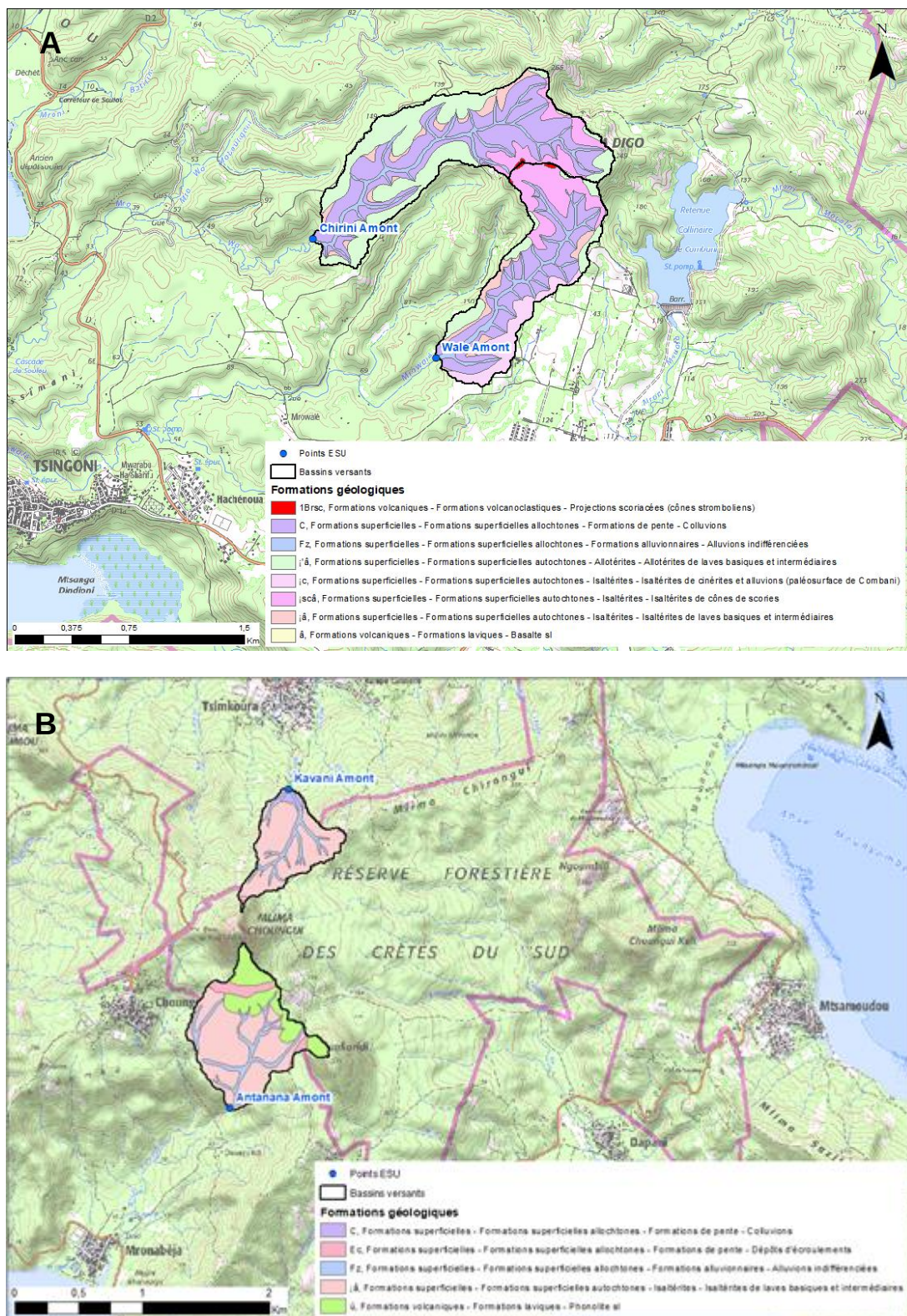


Illustration 40 : Exemple de localisation de 4 points d'eau ESU, des formations géologiques lessivées sur leur bassin versant

Nom point d'eau ESU	Description des formations géologiques
Wale Amont	<u>A l'affleurement</u> : Formations superficielles allochtones - Formations alluvionnaires - Alluvions indifférenciées ; <u>BV</u> : Formations superficielles autochtones - Isaltérites - Isaltérites de laves basiques et intermédiaires ; Isaltérites de cinérites et alluvions (paléosurface de Combani) ; Isaltérites de cônes de socries ; Allotérites - Allotérites de laves basiques et intermédiaires ; Formations volcaniques - Formations volcanoplastiques - Projections scoriacées (cônes stromboliens)
Chirini Amont	<u>A l'affleurement</u> : Formations superficielles allochtones - Formations de pente - Colluvions <u>BV</u> : Formations volcaniques - Formations volcanoplastiques - Projections scoriacées (cônes stromboliens) ; Formations superficielles autochtones - Isaltérites - Isaltérites de cônes de scories ; Isaltérites de laves basiques et intermédiaires ; Allotérites - Allotérites de laves basiques et intermédiaires
Antanana Amont	<u>A l'affleurement</u> : Formations superficielles allochtones - Formations alluvionnaires - Alluvions indifférenciées ; <u>BV</u> : Formations superficielles autochtones : Isaltérites - isaltérites de laves basiques et intermédiaires ; Formations volcaniques - Formations laviques - Phonolite
Kavani Amont	<u>A l'affleurement</u> : Formations superficielles allochtones - Formations de pente - Colluvions <u>BV</u> : Formations superficielles autochtones : Isaltérites - isaltérites de laves basiques et intermédiaires ; Formations volcaniques - Formations laviques - Phonolite

Tableau 31 : Points d'eau présentés sur Illustration 40 avec la description géologique à l'affleurement et les formations géologiques composant le bassin versant.

Points d'eau souterraine (ESO)

Les points d'eau souterraine prélevés en BE 2017 et/ou HE 2018 figurent sur l'illustration suivante. Les 6 MESO de Mayotte sont couvertes.

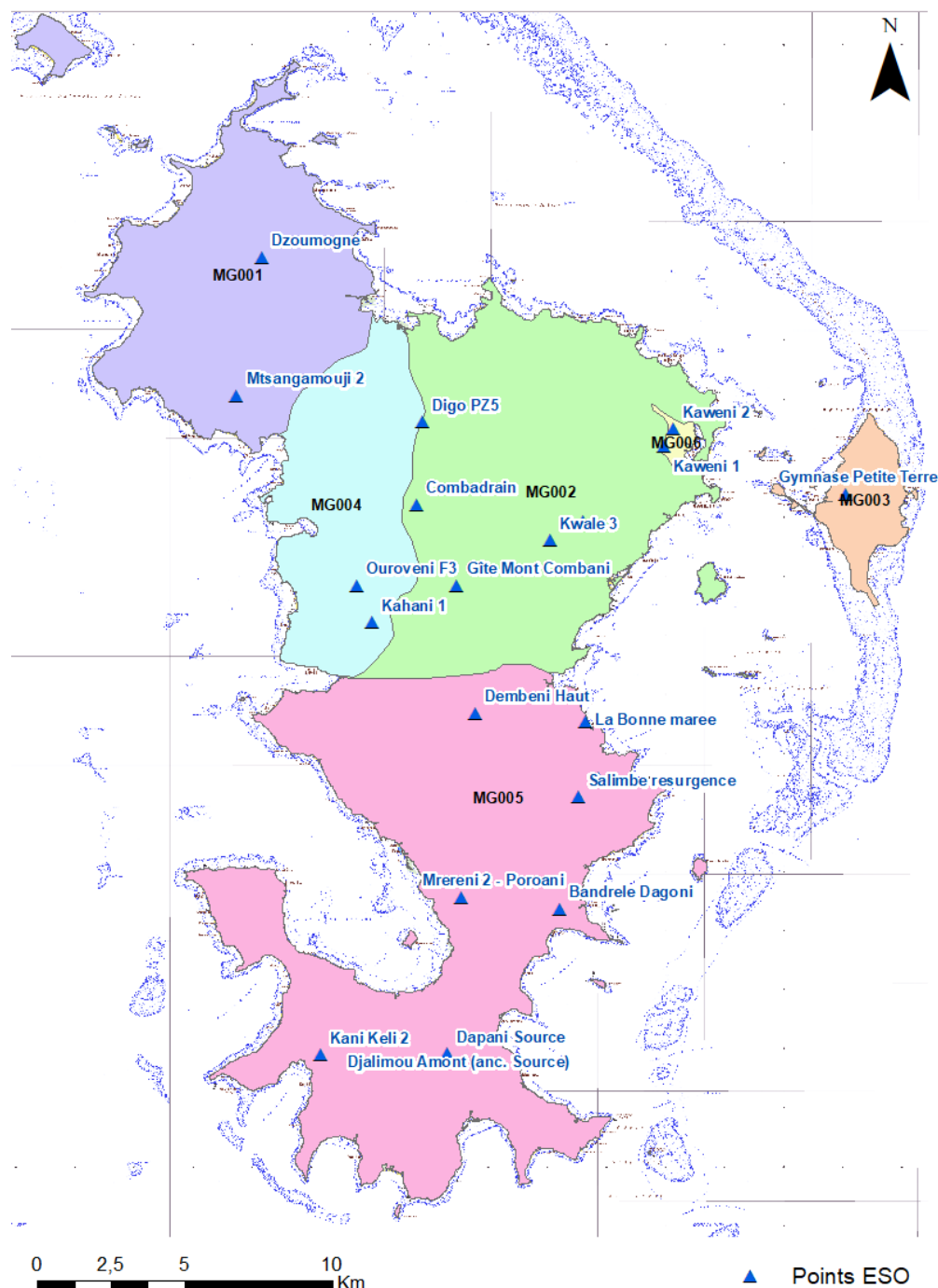


Illustration 41 : Localisation des points d'eau souterraine (ESO).

Pour chaque forage, piézomètre, les informations de leur coupe technique et géologique ont été prise en compte. Elles sont décrites dans le tableau récapitulatif ci-après (Tableau 32).

Un exemple de couple géologique et technique d'un forage prélevé figure ci-après.

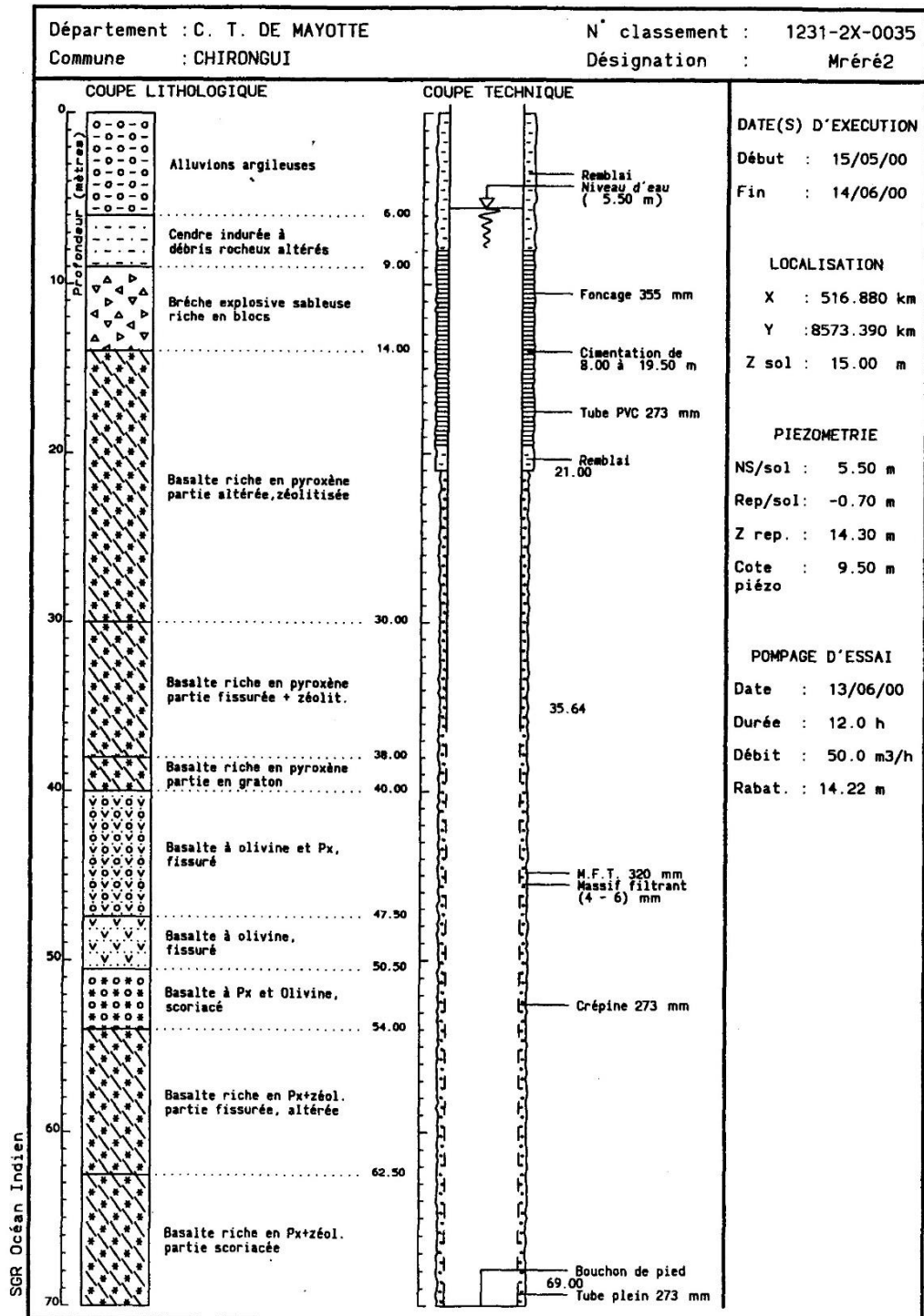


Illustration 42 : Coupe technique et géologique du forage de Mrereni 2 - Poroani (12312X0035/MRERE2) sur la commune de Chironqui.

Caractéristiques des points d'eau souterraine des deux campagnes complémentaires																								
Nouveau code BSS	Ancien code BSS	Nom	Nom de la station	Commune	MESO	Nom_MESO	Type	ESU_ESO	Campagne	X (RGM04, m)	Y (RGM04, m)	Z (MNT,m)	Distance trait de cote (m)	Profondeur du forage (m)	Diamètre du forage (mm)	Diamètre tubage (mm)	Profondeur des crépines (m)	Année du forage	Hauteur du repère/sol (m)	Transmissivité (m²/s)	Description des formations géologiques	Lithologie	Typologie du système aquifère	Caractère aquifère
	123060183	Ouroveni F3	Ouroveni F3	Ouangani	MG004	Massif du Digo	Forage AEP	ESO	HE 2018	513578	8583683	35	2029	87	380	270	46 - 77	2013		1,00E-03	A l'affleurement : Formations superficielles - Formations superficielles allochtones - Formations alluvionnaires - Alluvions indifférenciées ; Vraisemblablement capté : Formations superficielles autochtones : Isaltérites - isaltérites de laves basiques et intermédiaires ; Allotérites - Allotérites de laves basiques et intermédiaires	Isaltérites de basalte à pyroxène ; basalte verdâtre à amphiboles et pyroxènes		Captif
BSS002PMBC	12307X0020/KAUE2	Kaweni 2	Kaweni 2	Mamoudzou	MG006	Alluvions	Futur AEP	ESO	HE 2018	524288	8588991	10	599	51	254	254	11,63 - 48,03	2000	0,66	7,00E-03	A l'affleurement et vraisemblablement capté : Formations superficielles - Formations superficielles allochtones - Formations alluvionnaires - Alluvions indifférenciées	Gravier sableux jaunâtre ; galets roulés ; sables limonneux jaunâtre et grossier polygénique ; basalte scoriacé sombre à olvine	Pyroclastites holocenes	Semi-captif
BSS002PMAT	12307X0011/KAWE1	Kaweni 1	Kaweni 1	Mamoudzou	MG006	Alluvions	Piezometre	ESO	HE 2018	523976	8588387	12	703	50	140	80	10,5 - 50	1991	0,63	6,40E-04	A l'affleurement et vraisemblablement capté : Formations superficielles - Formations superficielles allochtones - Formations alluvionnaires - Alluvions indifférenciées	Blocs de basalte roulés/matrice argileuse ; basalte très altéré ; altérite ; sable fin marron ; alluvions et galets oxydés de basalte ; blocs de basalte sain ; sable rougeâtre avec galets de basalte ; sable brun foncé	Pyroclastites holocenes	libre ou semi-captif
BSS002PKKL	12313X0020/HANJ1	Hajangua 1 - Dembeni	Hajangua 1 - Dembeni	Dembeni	MG005	Complexe du Sud	Piezometre	ESO	HE 2018	521742	8577175	12	755	30	116	80	12,5 - 30	1990	0,612	7,20E-05	A l'affleurement : Formations superficielles - Formations superficielles allochtones - Formations alluvionnaires - Alluvions indifférenciées ; Vraisemblablement capté : Formations superficielles autochtones - Isaltérites - isaltérites de laves basiques et intermédiaires	Limon argileux à passages sableux ; alternance de niveaux de basalte fracturé et/ou altéré, d'argile d'altération et d'altérite	Substratum ancien	Captif
BSS002PPLA	12313X0034/DEMHAU	Dembeni Haut	Dembeni Haut	Dembeni	MG005	Complexe du Sud	Piezometre	ESO	HE 2018	517572	8579362	88	2267	86	226	251	33,4 - 77,38	2005	0,655		A l'affleurement : Formations superficielles allochtones - Formations de pente - Colluvions ; Vraisemblablement capté : Formations superficielles autochtones - Isaltérites - Isaltérites de laves basiques et intermédiaires ; Allotérites - Allotérites de laves basiques et intermédiaires	Basalte mésocrate ; coulée basaltique mélanocrate et néphéline à feldspath et pyroxène ; scories à feldspath et pyroxène ; basalte à pyroxène et néphéline altérée à calcite ; sables polygéniques à matrice cendreuse ; sables basaltiques noirs	Substratum ancien	Captif
BSS002PPKZ	12313X0033/BAND	Bandrele Dagoni	Bandrele Dagoni	Bandrele	MG005	Complexe du Sud	Futur AEP	ESO	HE 2018	520445	8572719	17	609	80	381	226	22 - 62,25	2002	0,855	4,80E-04	A l'affleurement : Formations superficielles - Formations superficielles allochtones - Formations alluvionnaires - Alluvions indifférenciées ; Vraisemblablement capté : Formations superficielles autochtones - Isaltérites - isaltérites de laves basiques et intermédiaires	Alternance de niveaux de breches pyroclastiques saines et remaniées et de coulées de lave vacuolaire et fissurée	Volcano-détritique Miocene	Captif ou semi-captif
BSS002PNXX	12312X0035/MRERE2	Mrereni 2 - Poroani	Mrereni 2 - Poroani	Chirongui	MG005	Complexe du Sud	Futur AEP	ESO	HE 2018	517108	8573121	14	947	70	273	273	35,64 - 69	2000	0,66	5,15E-04	A l'affleurement : Formations superficielles - Formations superficielles allochtones - Formations alluvionnaires - Alluvions indifférenciées	Alternance de coulées de basalte fissurées à olivine et pyroxène ou pyroxène et zéolithe séparées par des inter-lits scoriacés	Substratum ancien	hétérogène et compartimenté par des fractures hydrothermalisées , à dominante libre
BSS002PLTK	12306X0016/MTSAN2	Mtsangamouji 2 (aval)	Mtsangamouji 2	Mtsangamouji	MG001	Complexe du Nord	Forage AEP	ESO	HE 2018 BE 2017	509498	8590111	47	1207	80	355 a 305	273 a 159	65,85 - 76,97	2000		1,40E-03	A l'affleurement : Formations volcaniques - Formations volcanoclastiques - Cinerites Vraisemblablement capté : Formations superficielles autochtones - Isaltérites - isaltérites de laves basiques et intermédiaires	Basalte aphyrique type Pahoehoe ; basalte scoriacé à olivine	Basaltes Mio-Pliocene	compartimenté à dominante captive
BSS002PLUY	12306X0053/PZ5	Digo PZ5	Digo PZ5	Tsingoni	MG002	Massif du Mtsapere	Piezometre	ESO	HE 2018 BE 2017	515803	8589220	111	2895	60	250	150	24 - 60	2009	0,72		A l'affleurement : Formations superficielles - Formations superficielles allochtones - Formations alluvionnaires - Alluvions indifférenciées ; Vraisemblablement capté : Formations superficielles autochtones : Isaltérites - isaltérites de laves basiques et intermédiaires ; Isaltérites de cônes de scories ; Allotérites - Allotérites de laves basiques et intermédiaires	Sables basaltiques ; basaltes altérés à amphiboles ; basaltes scoriacés altérés à amphiboles ; basaltes noirs vacuolés à pyroxènes	Basaltes Mio-Pliocene	Dominante captive
BSS002PLNK	12302X0026/PZ1	Dzoumagne 2 PZ1	Dzoumagne	Mtsamboro	MG001	Complexe du Nord	Piezometre	ESO	HE 2018 BE 2017	510356	8594795	95	2670	55	240	190	20 - 52	2009	0,68		A l'affleurement : Formations superficielles - Formations superficielles allochtones - Formations alluvionnaires - Alluvions indifférenciées ; Vraisemblablement capté : Formations superficielles autochtones : Isaltérites - isaltérites de laves basiques et intermédiaires ; Allotérites - Allotérites de laves basiques et intermédiaires	Alternance de niveaux de sables basaltiques, de basaltes sains et fracturés et de scories saines	Volcano-détritique Pliocene	Captif
BSS002PMCD	12307X0045/GOUL	Gouloue 1 (amont)	Gouloue 1 (Amont)	Mamoudzou	MG002	Massif du Mtsapere	Forage AEP	ESO	HE 2018 BE 2017	521228	8585856	49	1614	89	226	226	28,25 - 45,50 62,75 - 68,50	2002		1,00E-04	2 venues d'eau : - Laves vacuolaires à scories ; tyf pyroclastique ; - Cendres volcaniques saines.	Basaltes Mio-Pliocene	Captif	
BSS002PNML	12308X0086/PZ4	Gymnase PZ4	Gymnase Petite Terre	Pamandzi	MG003	Petite Terre	Piezometre	ESO	HE 2018 BE 2017	530133	8586784	23	563	60	240	220	25-39	2009	0,71		Formations volcaniques - Formations volcanoclastiques - Projections pheatomagmatiques (maars) de Petite Terre et de Mamoudzou	Ponces altérées /argileuses ; ponces grises saines ; sables grossiers heterogenes (debris coralliens + pyroclastiques) ; argiles coquilles ; argiles rouges ; argiles brunes a pyroclastes et pyroclastes tres altérés.	Pyroclastites holocenes	Libre
BSS002PMEL	12307X0100/KWALE3	Kwale 3	Kwale 3	Mamoudzou	MG002	Massif du Mtsapere	Forage AEP	ESO	HE 2018 BE 2017	520135	8585209	45	1711	84	226	251	57,25 - 74,50	2004		1,50E-02	A l'affleurement : Formations superficielles - Formations superficielles allochtones - Formations alluvionnaires - Alluvions indifférenciées ; Vraisemblablement capté : Formations superficielles autochtones - Isaltérites - isaltérites de laves basiques et intermédiaires ; Allotérites - Allotérites de laves basiques et intermédiaires	Banc de coulée scoriacée ; niveaux alluvionnaires	Basaltes Mio-Pliocene	Captif
BSS002PNXS	12312X0030/KAHA1	Kahani 1	Kahani 1		MG004	Massif du Digo	Piezometre	ESO	HE 2018 BE 2017	514079	8582432	116	2050	45	168 a 116	80	8,5 - 45	1990	0,66	4,66E-04	A l'affleurement et vraisemblablement capté : Formations superficielles autochtones - Isaltérites - isaltérites de cinérites et alluvions (paléosurface de Comani)	Basalte fin zéolitisé, fracturé à olivine	Basaltes Miocene	Dominante captive
BSS002PLTB	12306X0008/HY	Combadrain	Combadrain	Tsingoni	MG002	Massif du Mtsapere	Source	ESO	HE 2018 BE 2017	515579	8586417	131	3439								A l'affleurement : Formations superficielles allochtones - Formations de pente - Colluvions ; Vraisemblablement capté : Formations superficielles autochtones - Isaltérites - isaltérites de phonolites ; isaltérites de laves basiques et intermédiaires ; Allotérites - Allotérites de laves basiques et intermédiaires			
KWALS		Gite Mont Comani	Gite Mont Comani	Mamoudzou	MG002	Massif du Mtsapere	Source	ESO	HE 2018 BE 2017	516959	8583677	261	3976								A l'affleurement : Formations superficielles allochtones - Formations de pente - Colluvions à blocs ; Vraisemblablement capté : Formations superficielles autochtones - Isaltérites - isaltérites de phonolites ; isaltérites de laves basiques et intermédiaires			
BSS002PPJY	12313X0007/HY	La Bonne maree	La Bonne maree	Dembeni	MG005	Complexe du Sud	Source	ESO	HE 2018 BE 2017	521319	8579087	20	29								A l'affleurement et vraisemblablement capté : Formations volcaniques - Formations laviques - Phonolite aphyrique			
		Salimbe resurgence	Salimbe resurgence	Dembeni	MG005	Complexe du Sud	Source	ESO	HE 2018 BE 2017	521060	8576514	49	1623								A l'affleurement : Formations superficielles - Formations superficielles allochtones - Formations alluvionnaires - Alluvions indifférenciées ; Vraisemblablement capté : Formations superficielles autochtones - Isaltérites - isaltérites de laves basiques et intermédiaires			
DAPAS10		Dapani Source	Dapani Source	Chirongui	MG005	Complexe du Sud	Source	ESO	HE 2018 BE 2017	516632	8567820	52	1788								A l'affleurement : Formations superficielles allochtones - Formations de pente - Colluvions ; Vraisemblablement capté : Formations superficielles autochtones - Isaltérites - isaltérites de laves basiques et intermédiaires ; Formations volcaniques - Formations laviques - Phonolite			
DJALIS10		Djalimou source	Djalimou Amont (anc. Source)	Kani-Keli	MG005	Complexe du Sud	Source	ESO	HE 2018 BE 2017	512930	8568267	87	1348								A l'affleurement : Formations superficielles - Formations superficielles allochtones - Formations alluvionnaires - Alluvions indifférenciées ; Vraisemblablement capté : Formations superficielles autochtones - Isaltérites - isaltérites de laves basiques et intermédiaires			
BSS002PPWU	12316X0037/PZ2	Kani Keli 2	Kani Keli 2	Kani-Keli	MG005	Complexe du Sud	Piezometre	ESO	HE 2018 BE 2017	512332	8567780	15	598	58	152	150	36 - 52	2009	0,72	3,15E-05	A l'affleurement et vraisemblablement capté : Formations superficielles allochtones - Formations de pente - Colluvions	Basaltes sains à olivine/pyroxène puis à olvine/feldspaths/zéolithisation ; sables argileux scoriacés ; argiles brunes scoriacées	Substratum ancien	Semi-captif

Tableau 32 : Descriptif des points d'eau souterraine prélevés.

5. Résultats des deux nouvelles campagnes d'acquisition de données

5.1. PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES *IN SITU*

Les résultats des mesures physico-chimiques réalisées *in situ* sont détaillés dans la tableau ci-dessous.

Nouvelles campagnes d'acquisition de données 2017 - 2018	Nombre de mesures	pH				Température (°C)				Conductivité à 25°C (µS/cm)				Potentiel d'oxydo-réduction (Eh NHE mV)				Oxygène dissous (mg/L)			
		Min	Moyenne	Max	Écartype	Min	Moyenne	Max	Écartype	Min	Moyenne	Max	Écartype	Min	Moyenne	Max	Écartype	Min	Moyenne	Max	Écartype
limite de potabilité		≥4,5 et ≤9																			
Tous les points d'eau	50	4,8	7,3	10,5	1,2	24,0	26,8	32,8	1,7	65	434	1605	350	-92	338	534	124	0,0	3,8	10,4	2,9
Par campagne d'échantillonnage																					
BE 2017	26	4,9	7,6	10,5	1,3	24,0	26,6	32,8	1,8	65	386	1586	304	-92	319	471	119	0,1	4,8	10,4	2,6
HE 2018	24	4,8	6,9	8,4	0,8	24,3	26,9	29,5	1,5	70	487	1605	387	50	358	534	125	0,0	2,9	8,0	2,8
Par masse d'eau souterraine																					
MG001 - Complexe du Nord	8	5,8	7,3	9,2	1,0	24,7	27,0	28,6	1,4	154	301	653	152	248	368	456	62	0,3	4,0	7,6	2,7
MG002 - Massif du Mtsapere	12	5,6	6,9	8,9	0,9	24,4	26,3	27,7	1,0	99	252	440	121	224	390	491	82	2,6	4,9	7,6	1,6
MG003 - Petite Terre	2	8,4	9,5	10,5	1,1	28,4	28,7	28,9	0,3	1510	1548	1586	38	-92	91	274	183	0,2	0,2	0,3	0,1
MG004 - Massif du Digo	5	4,8	6,1	8,7	1,4	26,0	27,2	29,5	1,2	65	414	1605	598	224	377	534	123	0,0	3,3	4,6	1,7
MG005 - Complexe du Sud	21	6,4	7,6	9,7	0,9	24,0	26,5	32,8	2,1	162	485	1051	205	50	315	457	116	0,0	4,0	10,4	3,4
MG006 - Alluvions de Kaweni	2	6,8	7,0	7,1	0,2	28,5	28,7	28,8	0,2	429	466	502	37	147	293	438	145	0,8	1,4	1,9	0,6

Illustration 43 : Paramètres physico-chimiques *in situ* des deux campagnes d'échantillonnage complémentaire, avec distinction des campagnes BE 2017 et HE 2018, des MESO.

Globalement, les valeurs *in situ* sont proches des valeurs historiques et peu de variations sont constatées entre les deux campagnes BE 2017 et HE 2018.

On note seulement pour le pH des variations un peu plus importantes en période de BE 2017. La valeur maximale de 10,5, enregistrée en BE 2017 sur le piézomètre du Gymnase PZ4 de Petite Terre, n'a pas été confirmée lors de la campagne de HE 2018, avec un pH tout de même basique de 8,4. Par contre, le pH basique constatée en BE 2017 sur le piézomètre de Mtsangamouji 2 (9,2) a été confirmée en HE 2018 avec un pH (8,1).

5.2. VERIFICATION DES BALANCES IONIQUES DES ANALYSES

La balance ionique a été calculée pour toutes les analyses.

La quasi-totalité des points d'eau prélevés indiquent un résultat de balance ionique comprise entre -5 et 5%.

Seules, deux analyses ont une balance ionique mauvaise, avec des valeurs < -20 %. Il s'agit de deux sources, une prélevée lors de la campagne de BE 2017 et l'autre pendant la campagne de hautes eaux 2018.

Nom de la station	Commune	Code ME	Nom Masse d'eau	Campagne
Djalimou Amont (anc. Source)	Kani-Keli	MG005	Complexe Sud	BE 2017
Combadrain	Tsingoni	MG002	Massif du Mtsapere	HE 2018

Illustration 44 : Liste des deux sources indiquant une balance ionique mauvaise.

Ces deux sources ont été prélevées à la fois lors de la campagne de BE 2017 et HE 2018. Leurs résultats de balance ionique ont été bon une fois sur 2.

Une comparaison rapide des résultats d'analyse au laboratoire de BE 2017 et HE 2018 met en avant :

- Un excès d'anions (HCO_3) lors de la campagne de HE 2018 pour la source de Combadrain, source captée et canalisée, prélevée en aval de la source. Cette valeur plus élevée en bicarbonates lors de la campagne de HE 2018 est pourtant confirmée par la mesure *in situ* du pH.
- Un déficit de cations lors du prélèvement en BE 2017 pour la source de Djalimou, par rapport aux résultats d'analyses de HE 2018.

Ces résultats d'analyses (majeurs et traces) seront tout de même pris en compte pour établir les valeurs de fond hydrogéochimique.

5.3. RESULTATS ANALYTIQUES ET LIMITES DE QUANTIFICATION

Les mesures réalisées *in situ* concernent les paramètres suivants : température, pH, conductivité électrique à 25°C, oxygène dissous et potentiel d'oxydo-réduction.

Les paramètres analysés au laboratoire et les limites de quantification (LQ) respectives des analyses réalisées à la Direction des Laboratoires du BRGM à Orléans sont récapitulés dans le tableau ci-après.

Afin d'atteindre des LQ les plus basses possibles, les analyses ont été réalisées par ICP-MS (spectrométrie de masse) pour tous les métaux sauf pour le mercure pour lequel une technique plus spécifique et plus sensible a été utilisée (Spectrométrie de Fluorescence Atomique).

Paramètres analysés		Méthode d'analyse	Limite de quantification(LQ)
Éléments majeurs	HCO ₃ / CO ₃	Alcalinité TA/TAC par potentiométrie selon NF EN 9963-1	10 mg.L ⁻¹
	Ca, Mg, Na, K, SiO ₂	ICP – Spectrométrie d'émission –selon NF EN ISO 11885	0.5 mg.L ⁻¹
	COD	Méthode par oxydation persulfate de sodium à chaud NF EN 1484	0.5 mg.L ⁻¹
	NO ₃ , SO ₄ , Cl	Chromatographie ionique selon NF EN ISO 10304-1	0.5 mg.L ⁻¹
	PO ₄	Analyses colorimétrique selon NF ISO 15923-1	0,05 mg.L ⁻¹
	NH ₄	Analyses colorimétrique selon NF ISO 15923-1	0,05 mg.L ⁻¹
	NO ₂	NF EN 26777	0.01 mg.L ⁻¹
Éléments traces	F	Chromatographie ionique selon NF EN ISO 10304-1	100 µg/L
	Fe	ICP – spectrométrie d'émission –selon NF EN ISO 11885	20 µg/L
	Br	ICP-MS selon NF EN ISO 17294-2	1 µg. L ⁻¹
	Cr, Cu Li, Mn, Ni, Sb, Se, Sr	ICP-MS selon NF EN ISO 17294-2	0.1 µg. L ⁻¹
	Al, B, Zn	ICP-MS selon NF EN ISO 17294-2	0.5 µg. L ⁻¹
	As, Ba, Co, Pb, Sb	ICP-MS selon NF EN ISO 17294-2	0.05 µg. L ⁻¹
	Ag, Be, Cd	ICP-MS selon NF EN ISO 17294-2	0.01 µg. L ⁻¹
	Hg	Spectrométrie de fluorescence atomique selon NF EN ISO 17852	0.015 µg. L ⁻¹

Illustration 45 : Paramètres analysés au laboratoire, méthodes d'analyse et limites de quantification associées.

5.4. COMPOSITION CHIMIQUE D'EAU DE PLUIE

Deux échantillons d'eau de pluie ont été collectés à Passamainty (commune de Mamoudzou) lors la saison des pluies 2018. Les résultats d'analyses sont présentés ci-dessous (Illustration 46).

Nom Station	Commune	Campagne	Date_Privt	Température °C	pH	Conductivité à 25°C µS/cm	Eh NHE mV	O2 dissous mg/L	O2 dissous %
Pluie - Passamainty	Mamoudzou	HE 2018	22/03/2018	-	-	-	-	-	-
Pluie - Passamainty	Mamoudzou	HE 2018	30/05/2018	23,8	7,8	2,9	443,6	8,44	100

Nom Station	Date_Privt	CO ₃ (Carbonates) mg/L	COD (C.org. dissous) mg/L	Ca (Calcium) mg/L	Cl (Chlorures) mg/L	F (Fluorures) mg/L	Fe (Fer) mg/L	HCO ₃ (Bicarbonates) mg/L	K (Potassium) mg/L	Mg (Magnésium) mg/L	NH ₄ (Ammonium) mg/L
Pluie - Passamainty	22/03/2018	< LQ	2,4	< LQ	3,3	< LQ	< LQ	< LQ	1,1	< LQ	0,7
Pluie - Passamainty	30/05/2018	< LQ	0,8	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0,1

Nom Station	Date_Privt	NO ₂ (Nitrites) mg/L	NO ₃ (Nitrates) mg/L	Na (Sodium) mg/L	PO ₄ (Orthophosphates) mg/L	SO ₄ (Sulfates) mg/L	SiO ₂ (Silice) mg/L
Pluie - Passamainty	22/03/2018	< LQ	< LQ	2,3	< LQ	0,5	< LQ
Pluie - Passamainty	30/05/2018	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ

Nom Station	Date_Privt	Ag (Argent) µg/L	Al (Aluminium) µg/L	As (Arsenic) µg/L	B (Bore) µg/L	Ba (Baryum) µg/L	Be (Béryllium) µg/L	Br (Brome) µg/L	Cd (Cadmium) µg/L	Co (Cobalt) µg/L	Cr (Chrome) µg/L
Pluie - Passamainty	22/03/2018	< LQ	9,63	0,22	4,02	0,75	< LQ	22,5	< LQ	0,43	0,11
Pluie - Passamainty	30/05/2018	< LQ	1,14	0,07	1,28	0,23	< LQ	6,6	< LQ	0,27	0,21

Nom Station	Date_Privt	Cu (Cuivre) µg/L	Hg (Mercure) µg/L	Li (Lithium) µg/L	Mn (Manganèse) µg/L	Ni (Nickel) µg/L	Pb (Plomb) µg/L	Sb (Antimoine) µg/L	Se (Sélénium) µg/L	Sr (Strontium) µg/L	Zn (Zinc) µg/L
Pluie - Passamainty	22/03/2018	0,65	< LQ	0,11	1,89	0,28	< LQ	< LQ	< LQ	2,56	37,5
Pluie - Passamainty	30/05/2018	0,23	< LQ	< LQ	0,82	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	2,07	84,5

Illustration 46 : Compositions chimiques de l'eau de pluie à Mayotte en saison des pluies 2018.

Ces deux prélèvements indiquent de légères variations entre eux ; ils sont proches des analyses récapitulées par Brenot et al., 2008 dans le rapport BRGM RP-55709-FR concernant les compositions d'eaux de pluie d'origine côtière dans un contexte insulaire (Illustration 47).

Zone géographique	Référence	Ca mg.L ⁻¹	Mg mg.L ⁻¹	Na mg.L ⁻¹	K mg.L ⁻¹	Cl mg.L ⁻¹	SO ₄ mg.L ⁻¹	HCO ₃ mg.L ⁻¹	NO ₃ mg.L ⁻¹	NH ₄ mg.L ⁻¹	Al µg.L ⁻¹	Ba µg.L ⁻¹	pH
Bermudes	Berner et Berner, 1987	2.91	-	7.23	0.36	12.41	2.12	-	0.1	0.1	-	-	-
Bermudes	Berner et Berner, 1987	0.19	0.41	3.38	0.17	6.2	1.74	-	0.34	0.04	-	-	4.8
Cayenne	Négrel et al., 1997	1.31	0.61	3.55	0.4	5.44	1.04	0.73	0	-	-	-	6.17
Cayenne	Négrel et al., 1997	0.33	0.68	3.93	1.14	6.95	0.17	3.93	0.19	-	-	-	6.4
Cayenne	Négrel et al., 1997	0.25	0.37	2.46	0.29	4.53	0.64	1.27	0.19	-	-	-	6.2
Cayenne	Négrel et al., 1997	0.67	0.42	2.61	0.74	7.36	1.12	1.32	0.22	-	-	-	6.12
Cayenne	Négrel et al., 1997	0.05	0.06	0.87	0.21	2.47	0.5	0.098	0.095	-	-	-	6.12
Cayenne	Négrel et al., 1997	0.05	0.05	0.34	0.06	1.06	0.26	0.68	0.22	-	-	-	5.74
Cayenne	Négrel et al., 1997	0.23	0	0.53	0.72	1.97	0.39	1.57	0.42	-	-	-	5.52
Cayenne	Négrel et al., 1997	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cayenne	Négrel et al., 1997	0.89	1.13	4.44	5.78	1.68	1.72	6.89	0.95	-	-	-	6.56
Cayenne	Négrel et al., 1997	0.15	0.18	2.4	1.77	6.5	1.04	3.33	0.23	-	-	-	6.03
Cayenne	Négrel et al., 1997	0.62	0.41	2.7	1.96	6.43	0.74	-	0.49	-	-	-	-
Cayenne	Négrel et al., 1997	0.53	0.04	1.64	2.43	4.34	-	-	-	-	-	-	-
Cayenne	Négrel et al., 1997	0.13	0.1	1.42	0.14	3.98	0.95	0.56	0.21	-	-	-	5.64
Cayenne	Négrel et al., 1997	0.24	0.04	0.61	0.13	1.68	0.2	-	10.92	-	-	-	3.91
Cayenne	Négrel et al., 1997	3.39	3.3	1.9	13.04	1.32	-	-	-	-	-	-	-
Guadeloupe	Rad et al., 2007	0.12	0.19	1.59	0.08	-	-	-	-	-	-	-	-
Guadeloupe	Rad et al., 2007	0.44	0.61	5.96	0.66	-	-	-	-	-	-	-	-
Guadeloupe	Rad et al., 2007	0.56	0.75	7.38	0.39	-	-	-	-	-	-	-	-
Guadeloupe	Rad et al., 2007	0.40	0.34	3.70	1.21	-	-	-	-	-	-	-	-
Guadeloupe	Rad et al., 2007	0.60	0.29	3.17	0.39	-	-	-	-	-	-	-	-
Azores	Louvat et Allègre, 1998	0.27	0.40	3.34	0.15	5.68	1.14	-	0.43	-	2.16	0.14	5.3
Azores	Louvat et Allègre, 1998	0.16	0.50	3.93	0.24	6.67	1.19	-	0.04	-	1.62	0.27	5.3
Azores	Louvat et Allègre, 1998	0.08	0.28	2.35	0.09	3.91	0.76	-	0.10	-	1.89	0.14	5.3
Min		0.05	0	0.34	0.06	1.06	0.17	0.098	0	0.04	1.62	0.14	
Max		3.39	3.3	7.383	13.04	12.41	2.12	6.89	10.92	0.1	2.16	0.27	
Moyenne		0.61	0.49	2.98	1.36	4.77	0.92	2.04	0.89	0.07	1.89	0.18	

Illustration 47 : Synthèse de compositions chimiques d'eaux de pluie d'origine côtière dans un contexte insulaire dans la littérature (Brenot et al., 2008).

5.5. ELEMENTS MAJEURS

L'ensemble des calculs effectués sur les résultats d'analyses prennent en compte les limites de quantification. Lorsque les concentrations mesurées pour un paramètre sont inférieures à sa limite de quantification ($<LQ$), la valeur de la concentration prise en compte est celle de la limite de quantification divisée par deux ($LQ/2$) (MEDDE, 2015).

TDS et conductivité électrique

La somme des éléments dissous (Total Dissolve Solid : TDS) a été calculée pour l'ensemble des analyses géochimiques.

Le TDS (en mg/L) a été comparé aux mesures de conductivité électrique ($\mu S/cm$) mesurées sur le terrain (Illustration 48). La régression linéaire sur le graphique ci-après met en avant la bonne corrélation entre les données TDS et conductivité ; validant ainsi d'une seconde manière le jeu de données eaux souterraines. Ce graphique met aussi en avant la différence entre les eaux souterraines à forte minéralisation de Petite Terre et les eaux souterraines de Grande Terre, qui sont globalement moins minéralisées.

Un point appartenant au Massif de Digo se distingue avec une minéralisation forte, dans la même gamme que les eaux de Petite Terre, il s'agit du forage de Ouroveni F3 sur la commune de Ouangani. Les eaux du Complexe Sud (MG005) viennent ensuite, comme cela avait été remarqué avec les données historiques.

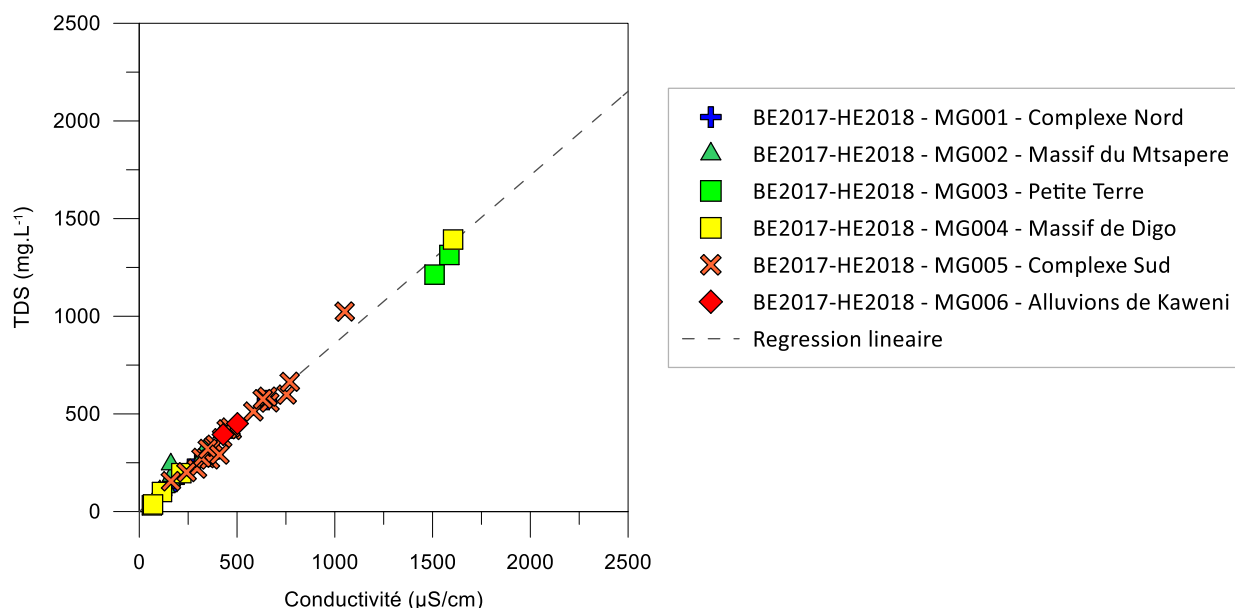


Illustration 48 : Conductivité vs. TDS des eaux des deux nouvelles campagnes d'échantillonnage de Mayotte.

Résultats d'analyses

Une description synthétique des concentrations en éléments majeurs des deux campagnes est présentée dans le Tableau 33. Elle permet de connaître les résultats pour l'ensemble des points par élément (min, max, moyenne, écart-type), afin de les comparer aux données historiques ; mais aussi de comparer les deux campagnes entre elles ou de comparer les masses d'eau entre elles.

Les données des quelques points ESU ont été prises en compte dans ces calculs, en partant du principe que les formations lessivées étaient vraisemblablement les mêmes dans le même secteur géographique.

Les normes de potabilité (valeurs seuils) sont indiquées dans le tableau récapitulatif (ex. : pour les nitrates : NP = 50 mg/L).

Pour les éléments majeurs, la majorité des concentrations observées sont inférieures aux normes de potabilité (valeurs seuils), si elles existent.

Seulement quelques valeurs élevées en Na et K sont observées en période de BE 2017 et HE 2018 ; elles concernent les masses d'eau de Petite Terre (MG003), du Massif de Digo (MG004) et du Complexe Sud (MG005). Ces concentrations peuvent dépasser les normes de potabilité et valeurs seuils.

Les eaux souterraines de Petite Terre (MG003), correspondant au piézomètre du Gymnase (12308X0086/PZ4) indiquent un fond hydrogéochimique élevé en Na et K, à mettre en relation avec un pôle hydrothermal.

Pour le Massif de Digo (MG004), un seul point d'eau prélevé en période de HE 2018 marque un pôle beaucoup plus riche en Na, il s'agit du forage de Ouroveni F3 (12306X0183).

Nouvelles campagnes d'acquisition de données 2017 - 2018	Nombre d'analyses	NO ₃ (mg/L) (NP: 50 mg/L)				SO ₄ (mg/L) (NP :250 mg/L)				HCO ₃ (mg/L)				Cl (mg/L) (NP: 250 mg/L)			
		Min	Moyenne	Max	Écartype	Min	Moyenne	Max	Écartype	Min	Moyenne	Max	Écartype	Min	Moyenne	Max	Écartype
Tous les points d'eau	50	0,3	1,0	10,8	1,7	0,7	5,0	37,2	6,6	5,0	219,2	794,0	186,9	6,8	25,9	155,4	24,7
Par campagne d'échantillonnage																	
BE 2017	26	0,3	0,7	4,7	1,0	0,7	4,4	37,2	6,8	5,0	190,9	794,0	160,7	6,8	22,3	84,1	17,2
HE 2018	24	0,3	1,3	10,8	2,2	1,4	5,6	33,2	6,3	5,0	249,8	791,0	207,4	7,6	29,8	155,4	30,3
Par masse d'eau souterraine																	
MG001 - Complexe du Nord	8	0,3	1,1	3,2	1,2	2,3	4,2	7,1	1,7	66,0	144,1	357,0	86,8	10,2	19,0	30,3	8,5
MG002 - Massif du Mtsapere	12	0,3	0,6	1,2	0,3	1,3	2,4	4,4	0,9	38,0	133,1	252,0	71,4	6,8	12,8	33,2	7,0
MG003 - Petite Terre	2	0,3	1,0	1,7	0,7	33,2	35,2	37,2	2,0	737,0	765,5	794,0	28,5	69,0	76,6	84,1	7,6
MG004 - Massif du Digo	5	0,3	0,8	1,5	0,5	2,2	4,6	10,2	2,9	5,0	191,2	791,0	302,2	7,0	38,9	155,4	58,3
MG005 - Complexe du Sud	21	0,3	0,8	4,7	1,3	0,7	3,8	8,7	2,6	67,0	251,4	708,0	139,8	11,0	27,3	60,7	13,0
MG006 - Alluvions de Kaweni	2	0,3	5,5	10,8	5,3	4,5	6,6	8,7	2,1	215,0	221,0	227,0	6,0	28,3	33,9	39,5	5,6

Nouvelles campagnes d'acquisition de données 2017 - 2018	Nombre d'analyses	K (mg/L) (NP : 12 mg/L)				Mg (mg/L) (NP : 50 mg/L)				Na (mg/L) (NP : 200 mg/L)				Ca (mg/L)			
		Min	Moyenne	Max	Écartype	Min	Moyenne	Max	Écartype	Min	Moyenne	Max	Écartype	Min	Moyenne	Max	Écartype
Tous les points d'eau	50	0,3	4,4	19,4	4,6	1,1	14,2	42,4	9,5	6,2	46,9	377,7	75,3	1,0	22,3	105,5	18,1
Par campagne d'échantillonnage																	
BE 2017	26	0,3	3,5	17,4	3,1	1,1	13,3	33,8	8,4	6,2	39,1	377,7	70,1	1,0	20,6	59,1	14,5
HE 2018	24	0,3	5,3	19,4	5,6	1,4	15,1	42,4	10,4	7,5	55,3	352,8	79,6	1,4	24,2	105,5	21,1
Par masse d'eau souterraine																	
MG001 - Complexe du Nord	8	0,3	2,5	4,7	1,7	8,9	12,9	21,0	3,9	9,7	24,9	70,3	19,8	6,7	16,2	38,3	9,0
MG002 - Massif du Mtsapere	12	0,3	2,5	5,0	1,4	3,1	12,8	31,0	9,1	7,8	15,9	35,2	7,8	4,3	15,4	28,0	7,4
MG003 - Petite Terre	2	17,4	18,4	19,4	1,0	2,3	2,4	2,4	0,1	352,8	365,3	377,7	12,5	2,2	2,4	2,5	0,1
MG004 - Massif du Digo	5	0,7	4,7	18,9	7,1	1,1	12,0	42,4	15,5	6,2	55,9	245,6	94,9	1,0	13,2	41,5	15,1
MG005 - Complexe du Sud	21	1,7	4,5	19,1	3,7	4,7	16,7	42,2	8,9	16,4	41,5	131,1	26,3	3,1	32,0	105,5	21,5
MG006 - Alluvions de Kaweni	2	5,8	6,8	7,7	1,0	16,6	17,6	18,6	1,0	30,5	36,9	43,3	6,4	28,2	29,1	29,9	0,9

Nouvelles campagnes d'acquisition de données 2017 - 2018	Nombre d'analyses	SiO ₂ (mg/L)				COD (mg/L)			
		Min	Moyenne	Max	Écartype	Min	Moyenne	Max	Écartype
Tous les points d'eau	50	2,9	43,7	106,3	20,8	0,3	1,3	5,2	1,0
Par campagne d'échantillonnage									
BE 2017	26	2,9	36,2	68,8	13,7	0,3	1,3	5,2	1,4
HE 2018	24	3,4	51,8	106,3	23,8	0,7	1,3	3,0	0,5
Par masse d'eau souterraine									
MG001 - Complexe du Nord	8	23,6	33,0	48,3	8,0	0,3	1,0	2,5	0,7
MG002 - Massif du Mtsapere	12	28,6	48,4	67,7	12,2	0,3	0,8	1,8	0,5
MG003 - Petite Terre	2	14,3	14,8	15,2	0,4	1,6	3,4	5,2	1,8
MG004 - Massif du Digo	5	2,9	34,8	106,3	38,2	0,3	0,8	1,7	0,6
MG005 - Complexe du Sud	21	22,7	47,2	98,4	18,1	0,3	1,6	5,0	1,0
MG006 - Alluvions de Kaweni	2	71,1	71,7	72,3	0,6	1,3	1,6	1,8	0,3

Tableau 33 : Résultats d'analyses des éléments majeurs pour les deux nouvelles campagnes d'échantillonnage, résultats globaux, par campagne (BE 2017 et HE 2018) et par masse d'eau.

5.6. FACIES HYDROCHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES ET DE SURFACE PRELEVEES LORS DES CAMPAGNES HE 2017 ET BE 2018

Les données géochimiques du jeu de données des nouvelles campagnes ont permis de déterminer le faciès hydrochimique des eaux souterraines et de surface de Mayotte en les positionnant dans le diagramme de Piper.

Trois diagrammes de Piper distincts sont présentés ci-après :

- un diagramme de Piper regroupant l'ensemble des données (ESO + ESU) (Illustration 49) ;
- un diagramme de Piper regroupant les eaux souterraines (ESO) de Mayotte, distinguées en fonction de leur appartenance à une masse d'eau souterraine (Illustration 51) ;
- un diagramme de Piper regroupant les eaux de surface (ESU), distinguées en fonction de leur localisation géographique par rapport aux masses d'eau souterraine (Illustration 52).

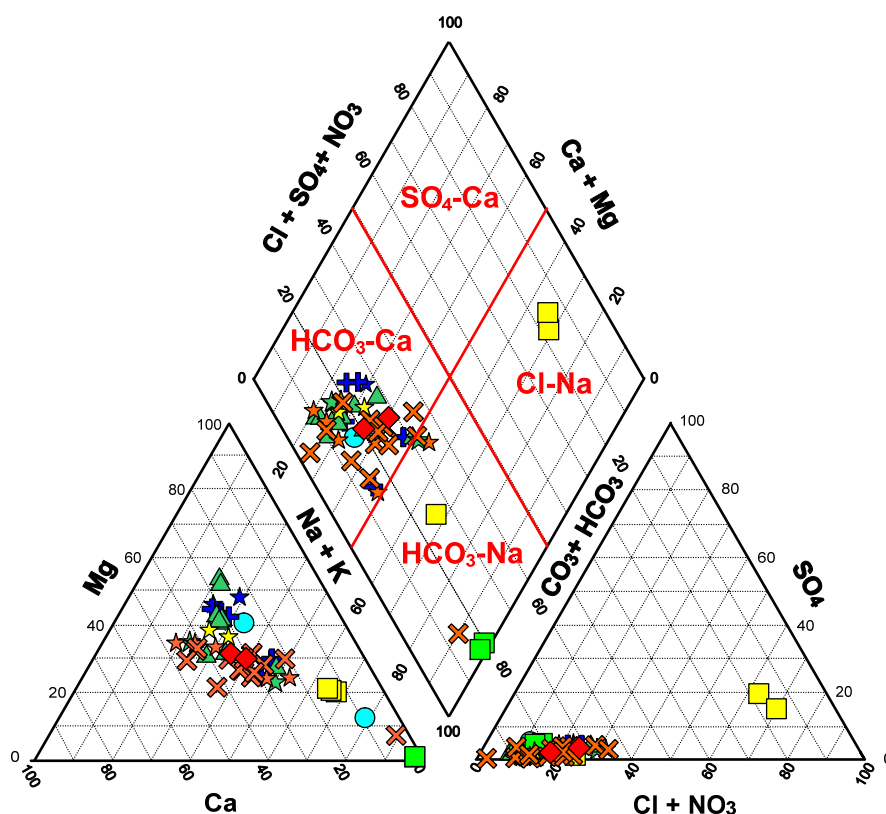


Diagramme de Piper

- | | | | |
|---|---|---|--|
| + | BE2017-HE2018 - MG001 - Complexe Nord - ESO | ★ | BE2017-HE2018 - MG001 - Complexe Nord - ESU |
| ▲ | BE2017-HE2018 - MG002 - Massif du Mtsapere - ESO | ★ | BE2017-HE2018 - MG002 - Massif du Mtsapere - ESU |
| ■ | BE2017-HE2018 - MG003 - Petite Terre - ESO | ★ | BE2017-HE2018 - MG004 - Massif de Digo - ESU |
| ■ | BE2017-HE2018 - MG004 - Massif de Digo - ESO | ★ | BE2017-HE2018 - MG005 - Complexe Sud - ESU |
| × | BE2017-HE2018 - MG005 - Complexe Sud - ESO | ● | HE2018 - Pluie |
| ◆ | BE2017-HE2018 - MG006 - Alluvions de Kaweni - ESO | | |

Illustration 49 : Diagramme de Piper des eaux prélevées lors des deux campagnes de hautes eaux 2017 et de basses eaux 2018.

Les faciès hydrochimiques des points d'eau des campagnes réalisées en basses eaux (BE) 2017 et hautes eaux (HE) 2018 sont localisés sur l'illustration suivante.

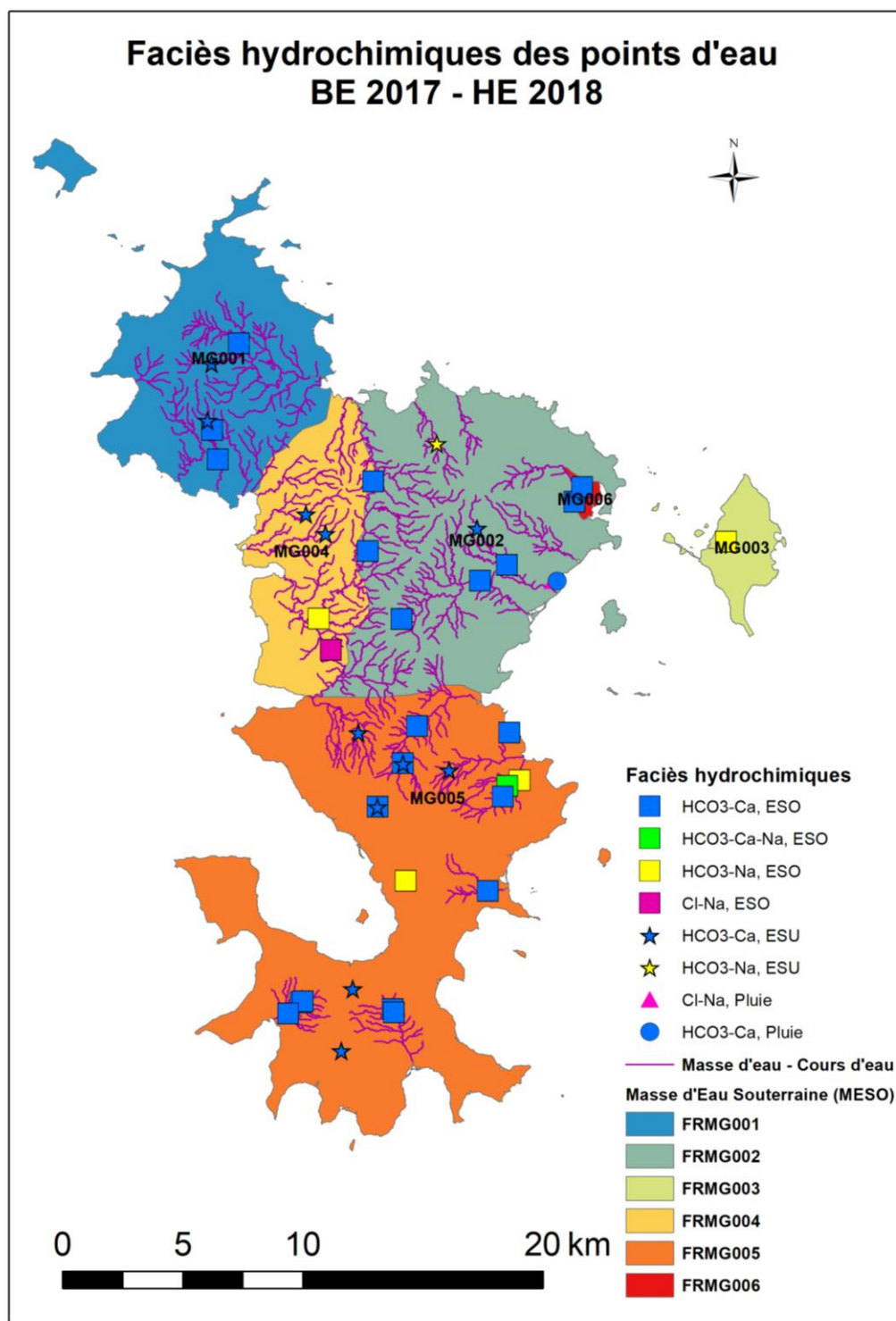


Illustration 50 : Localisation des points d'eau ESO et ESU, prélevés en BE 2017 et HE 2018, avec leur faciès hydrochimique, en fonction des MESO de Mayotte.

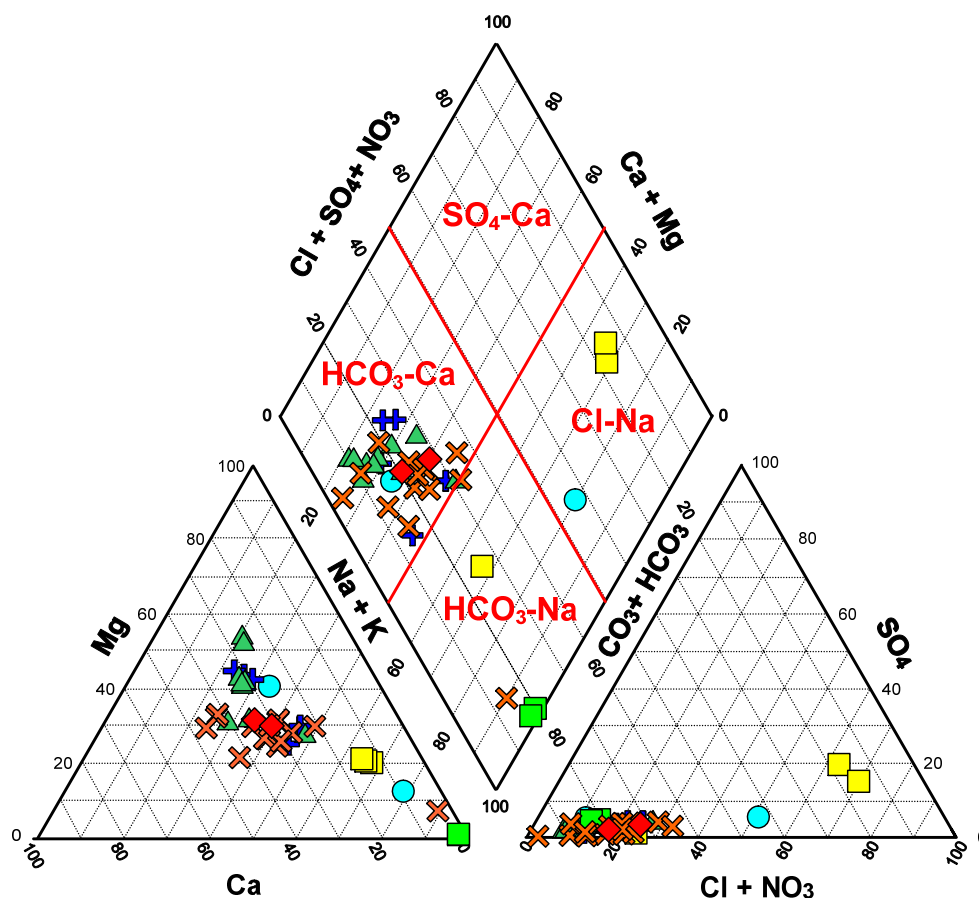


Diagramme de Piper

- + BE2017-HE2018 - MG001 - Complexe Nord - ESO
- ▲ BE2017-HE2018 - MG002 - Massif du Mtsapere - ESO
- BE2017-HE2018 - MG003 - Petite Terre - ESO
- BE2017-HE2018 - MG004 - Massif de Digo - ESO
- × BE2017-HE2018 - MG005 - Complexe Sud - ESO
- ◆ BE2017-HE2018 - MG006 - Alluvions de Kaweni - ESO
- HE2018 - Pluie

Illustration 51 : Diagramme de Piper des eaux souterraines (ESO) prélevées lors des deux campagnes de hautes eaux 2017 et de basses eaux 2018, en fonction de leur appartenance aux masses d'eau souterraine de Mayotte.

Les eaux souterraines appartenant au Complexe Nord (MG001), au Massif de Mtsapere (MG002), au Complexe sud (MG005) et aux alluvions de Kaweni (MG006) ont un faciès hydrochimique bicarbonaté calcique.

Les eaux souterraines du Massif de Digo (MG004) ont soit un faciès chloruré-sodique, soit un faciès bicarbonaté-sodique. Les eaux souterraines de Petite-Terre ont un faciès bicarbonaté-sodique.

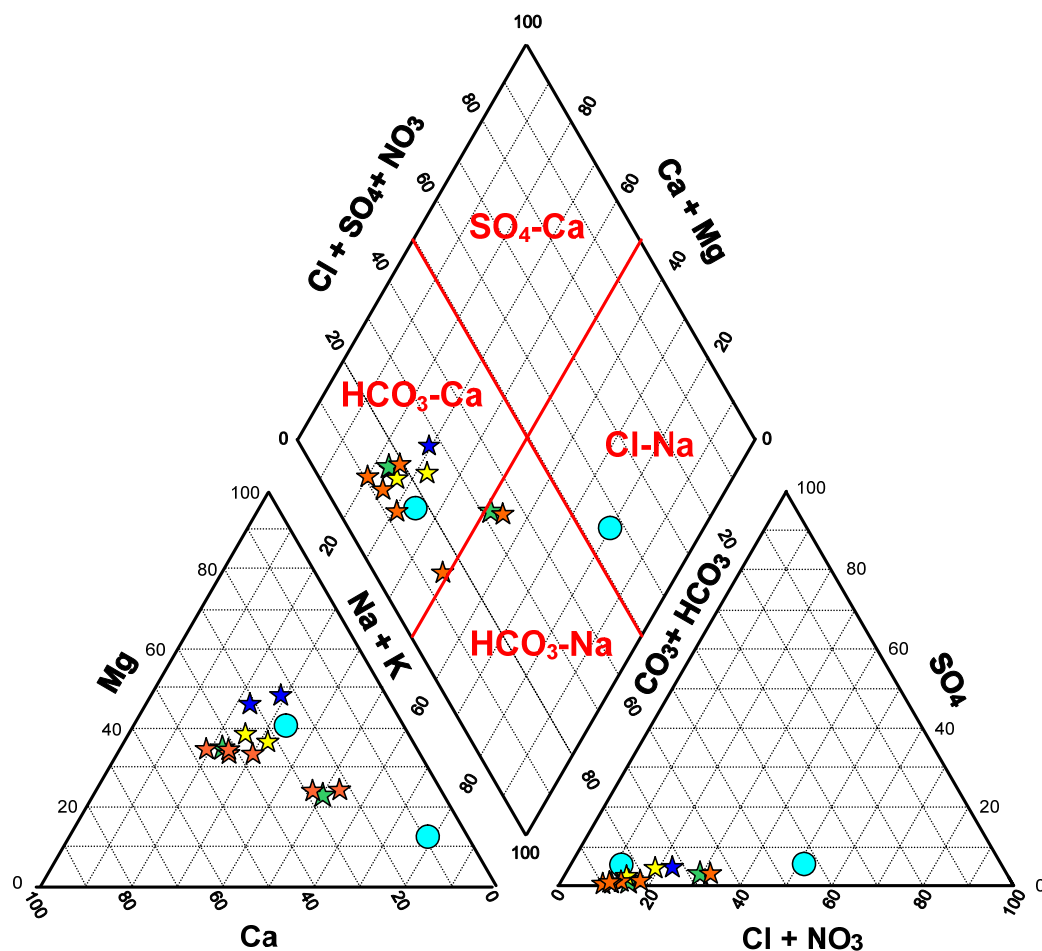


Diagramme de Piper

- ★ BE2017-HE2018 - MG001 - Complexe Nord - ESU
- ★ BE2017-HE2018 - MG002 - Massif du Mtsapere - ESU
- ★ BE2017-HE2018 - MG004 - Massif de Digo - ESU
- ★ BE2017-HE2018 - MG005 - Complexe Sud - ESU
- HE2018 - Pluie

Illustration 52 : Diagramme de Piper des eaux superficielles (ESU) prélevées lors des deux campagnes de hautes eaux 2017 et de basses eaux 2018.

Les eaux de surface – cours d'eau prélevées lors des campagnes de basses eaux 2017 et hautes eaux 2018 ont majoritairement un faciès bicarbonaté-calcique. Trois points peuvent être considérés comme ayant un faciès bicarbonaté-calcique-sodique ($\text{HCO}_3\text{-Ca-Na}$).

Deux échantillons d'eau de pluie ont été prélevés au même endroit (Mamoudzou – Passamainty) à deux dates différentes en 2018. Ils montrent une variabilité importante, passant d'un faciès bicarbonaté-calcique à un faciès chloruré sodique. Les eaux de pluie sont très faiblement minéralisées ; de faibles variations de concentrations peuvent expliquer cette variabilité.

Le faciès hydrochimique majoritaire des points d'eau échantillonnés lors des deux nouvelles campagnes d'échantillonnage est donc bicarbonaté-calcique.

Le tableau récapitulatif ci-après (Tableau 34) indiquent l'ensemble des faciès hydrochimiques pour les points d'eau prélevés lors des deux campagnes HE 2017 et BE 2018.

En comparant les résultats des deux campagnes BE 2017 et HE 2018, les faciès hydrochimiques des points d'eau prélevés lors des campagnes de BE 2017 et HE 2018 sont identiques. Seule différence constatée la source de Salimbé resurgence (MG005- Complexe sud) dont le faciès change légèrement passant de $\text{HCO}_3\text{-Ca-Na}$ à $\text{HCO}_3\text{-Ca}$.

Par rapport aux faciès hydrochimiques identifiés à partir des données historiques :

- les eaux souterraines du Complexe Nord (MG001) n'ont qu'un seul faciès hydrochimique lors des campagnes complémentaires, à savoir bicarbonaté-calcique. On ne retrouve donc pas un des deux pôles identifiés à partir des données historiques, à savoir le pôle bicarbonaté sodique ;
- les eaux souterraines du Massif de Mtsapere (MG002) ont uniquement un faciès bicarbonaté-calcique ; le faciès bicarbonaté sodique est absent pour les nouvelles campagnes BE 2017 et HE 2018 ;
- les eaux de Petite Terre (MG003) ont bien le même faciès ;
- les eaux souterraines du Massif de Digo (MG004) montrent une plus faible variabilité, le faciès sulfaté-calcique identifié à partir des données historique n'est pas retrouvé ;
- les eaux souterraines du Complexe Sud (MG005) ont bien les mêmes faciès, avec majoritairement un faciès bicarbonaté-calcique et quelques points avec un faciès bicarbonaté-sodique ;
- les eaux souterraines des Alluvions de Kaweni (MG006) ont un faciès uniquement bicarbonaté-calcique lors des campagnes BE 2017 et HE 2018 ; le faciès bicarbonaté-sodique n'est plus présent.

Nom de la station	Commune	Code Masse d'eau	Nom Masse d'eau	Type de points d'eau	ESO / ESU	Campagne d'échantillonnage	Faciès hydrochimique
Andrianabe Emergence	Mtsangamouji	MG001	Complexe du Nord	Source	ESO	BE 2017	HCO3-Ca
Andrianabe Emergence	Mtsangamouji	MG001	Complexe du Nord	Cours d'eau	ESU	HE 2018	HCO3-Ca
Dzoumogné	Mtsamboro	MG001	Complexe du Nord	Piézomètre	ESO	BE 2017	HCO3-Ca
Dzoumogné	Mtsamboro	MG001	Complexe du Nord	Piézomètre	ESO	HE 2018	HCO3-Ca
Kani Keli 2	Kani-Keli	MG001	Complexe du Nord	Piézomètre	ESO	BE 2017	HCO3-Ca
Mapouera Amont	Acoua	MG001	Complexe du Nord	Cours d'eau	ESU	BE 2017	HCO3-Ca
Mtsangamouji 2	Mtsangamouji	MG001	Complexe du Nord	Forage AEP	ESO	BE 2017	HCO3-Ca
Mtsangamouji 2	Mtsangamouji	MG001	Complexe du Nord	Forage AEP	ESO	HE 2018	HCO3-Ca
Combadrain	Tsingoni	MG002	Massif du Mtsapere	Source	ESO	BE 2017	HCO3-Ca
Combadrain	Tsingoni	MG002	Massif du Mtsapere	Source	ESO	HE 2018	HCO3-Ca
Digo PZ5	Tsingoni	MG002	Massif du Mtsapere	Piézomètre	ESO	BE 2017	HCO3-Ca
Digo PZ5	Tsingoni	MG002	Massif du Mtsapere	Piézomètre	ESO	HE 2018	HCO3-Ca
Gîte Mont Combani	Mamoudzou	MG002	Massif du Mtsapere	Source	ESO	BE 2017	HCO3-Ca
Gîte Mont Combani	Mamoudzou	MG002	Massif du Mtsapere	Source	ESO	HE 2018	HCO3-Ca
Gouloué 1 (Amont)	Mamoudzou	MG002	Massif du Mtsapere	Forage AEP	ESO	BE 2017	HCO3-Ca
Gouloué 1 (Amont)	Mamoudzou	MG002	Massif du Mtsapere	Forage AEP	ESO	HE 2018	HCO3-Ca
Gouloué Amont	Mamoudzou	MG002	Massif du Mtsapere	Cours d'eau	ESU	BE 2017	HCO3-Ca
Kwalé 3	Mamoudzou	MG002	Massif du Mtsapere	Forage AEP	ESO	BE 2017	HCO3-Ca
Kwalé 3	Mamoudzou	MG002	Massif du Mtsapere	Forage AEP	ESO	HE 2018	HCO3-Ca
Longoni Amont	Koungou	MG002	Massif du Mtsapere	Cours d'eau	ESU	BE 2017	HCO3-Na
Gymnase Petite Terre	Pamandzi	MG003	Petite Terre	Piézomètre	ESO	BE 2017	HCO3-Na
Gymnase Petite Terre	Pamandzi	MG003	Petite Terre	Piézomètre	ESO	HE 2018	HCO3-Na
Chirini Amont	Tsingoni	MG004	Massif du Digo	Cours d'eau	ESU	BE 2017	HCO3-Ca
Kahani 1	Ouangani	MG004	Massif du Digo	Piézomètre	ESO	BE 2017	Cl-Na
Kahani 1	Ouangani	MG004	Massif du Digo	Piézomètre	ESO	HE 2018	Cl-Na
Ouroveni F3	Ouangani	MG004	Massif du Digo	Forage AEP	ESO	HE 2018	HCO3-Na
Walé Amont	Tsingoni	MG004	Massif du Digo	Cours d'eau	ESU	BE 2017	HCO3-Ca
Antanana Amont	Kani-Keli	MG005	Complexe du Sud	Cours d'eau	ESU	BE 2017	HCO3-Ca
Bandrele Dagoni	Bandrele	MG005	Complexe du Sud	Futur AEP	ESO	HE 2018	HCO3-Ca
Dapani Source	Chirongui	MG005	Complexe du Sud	Source	ESO	BE 2017	HCO3-Ca
Dapani Source	Chirongui	MG005	Complexe du Sud	Source	ESO	HE 2018	HCO3-Ca
Dembeni Emergence	Dembeni	MG005	Complexe du Sud	Source	ESO	BE 2017	HCO3-Ca
Dembeni Emergence	Dembeni	MG005	Complexe du Sud	Cours d'eau	ESU	HE 2018	HCO3-Ca
Dembeni Haut	Dembeni	MG005	Complexe du Sud	Piézomètre	ESO	HE 2018	HCO3-Ca
Djalimou Amont (anc. Source)	Kani-Keli	MG005	Complexe du Sud	Source	ESO	BE 2017	HCO3-Ca
Djalimou Amont (anc. Source)	Kani-Keli	MG005	Complexe du Sud	Source	ESO	HE 2018	HCO3-Ca
Hajangua 1 - Dembeni	Dembeni	MG005	Complexe du Sud	Piézomètre	ESO	HE 2018	HCO3-Na
Hajangua Amont	Dembeni	MG005	Complexe du Sud	Cours d'eau	ESU	BE 2017	HCO3-Ca
Kani Keli 2	Kani-Keli	MG005	Complexe du Sud	Piézomètre	ESO	HE 2018	HCO3-Ca
Kavani Amont	Chirongui	MG005	Complexe du Sud	Cours d'eau	ESU	BE 2017	HCO3-Ca
La Bonne marée	Dembeni	MG005	Complexe du Sud	Source	ESO	BE 2017	HCO3-Ca
La Bonne marée	Dembeni	MG005	Complexe du Sud	Source	ESO	HE 2018	HCO3-Ca
Mrereni 2 - Poroani	Chirongui	MG005	Complexe du Sud	Futur AEP	ESO	HE 2018	HCO3-Na
Ouangani Amont	Ouangani	MG005	Complexe du Sud	Cours d'eau	ESU	BE 2017	HCO3-Ca
Poroani Source	Chirongui	MG005	Complexe du Sud	Source	ESO	BE 2017	HCO3-Ca
Poroani Source	Chirongui	MG005	Complexe du Sud	Cours d'eau	ESU	HE 2018	HCO3-Ca
Salimbé résurgence	Dembeni	MG005	Complexe du Sud	Source	ESO	BE 2017	HCO3-Ca-Na
Salimbé résurgence	Dembeni	MG005	Complexe du Sud	Source	ESO	HE 2018	HCO3-Ca
Kaweni 1	Mamoudzou	MG006	Alluvions de Kaweni	Piézomètre	ESO	HE 2018	HCO3-Ca
Kaweni 2	Mamoudzou	MG006	Alluvions de Kaweni	Futur AEP	ESO	HE 2018	HCO3-Ca

Tableau 34 : Faciès hydrochimiques de l'ensemble des points d'eau échantillonnés lors des deux nouvelles campagnes en BE 2017 et HE 2018.

5.7. RELATIONS INTER-ELEMENTS : DIAGRAMMES BINAIRES

Les diagrammes binaires suivants ont été réalisés afin de vérifier que la cohérence des délimitations des masses d'eau souterraine (MESO) avec les eaux souterraines prélevées ; autrement dit pour vérifier s'il était possible de déterminer des groupes homogènes d'eaux souterraines, afin d'adapter par la suite la méthodologie pour déterminer les concentrations de références des masses d'eau. Dans cette partie, les eaux de surface prélevées en cours d'eau se voient affecter le même code masse d'eau que les eaux souterraines, ceci afin de comparer les résultats des ESO aux ESU.

- **Diagramme Na vs. Cl**

Les eaux souterraines (ESO) et superficielles (ESU) de Mayotte prélevées lors des campagnes de BE 2017 et HE 2018 forment globalement 2 pôles (Illustration 53) :

- le pôle des ESO de Petite Terre ;
- le pôle des eaux de la Grande Terre, avec une plus grande variabilité.

En prenant en considération les résultats des échantillons de pluie réalisés en saison des pluies 2018, globalement alignés sur la droite d'eau de mer, on peut constater l'enrichissement en Na et Cl des eaux souterraines et des eaux des cours d'eau.

Les eaux de surface (Illustration 53), avec des temps d'interaction eau-roche beaucoup moins importants sont un peu moins minéralisées, mais restent proches des eaux souterraines. Comme constaté précédemment avec les données historiques, les eaux souterraines et superficielles de Mayotte échantillonnées lors des campagnes de BE 2017 et HE 2018 indiquent un enrichissement en Na par rapport à la droite de dilution de l'eau de mer (Illustration 53). Plusieurs eaux souterraines du Complexe Sud sont marquées par un enrichissement en Na un peu plus important.

Les eaux souterraines de Petite Terre se distinguent nettement ; elles sont plus minéralisées et surtout nettement plus enrichies en Na. Le cercle vert (Illustration 53) indique le pôle « Petite Terre » identifié à partir des données historiques ESO ; ce qui permet d'affirmer que ce pôle est stable.

Les données de ces nouvelles campagnes BE 2017 et HE 2018 permettent aussi de distinguer un nouveau comportement. En effet, un point ESO du Massif de Digo (carré jaune) est proche du pôle « Petite Terre », il s'agit du forage d'Ouroveni F3 prélevé en HE 2018. Ce forage destiné à l'AEP a en effet une minéralisation plus importante que les forages de la MESO du Massif de Digo. La campagne de HE 2018 confirme donc son caractère atypique dans cette MESO.

Par contre, ce diagramme binaire Na vs. Cl ne permet pas de distinguer des groupes homogènes parmi les MESO de la Grande Terre.

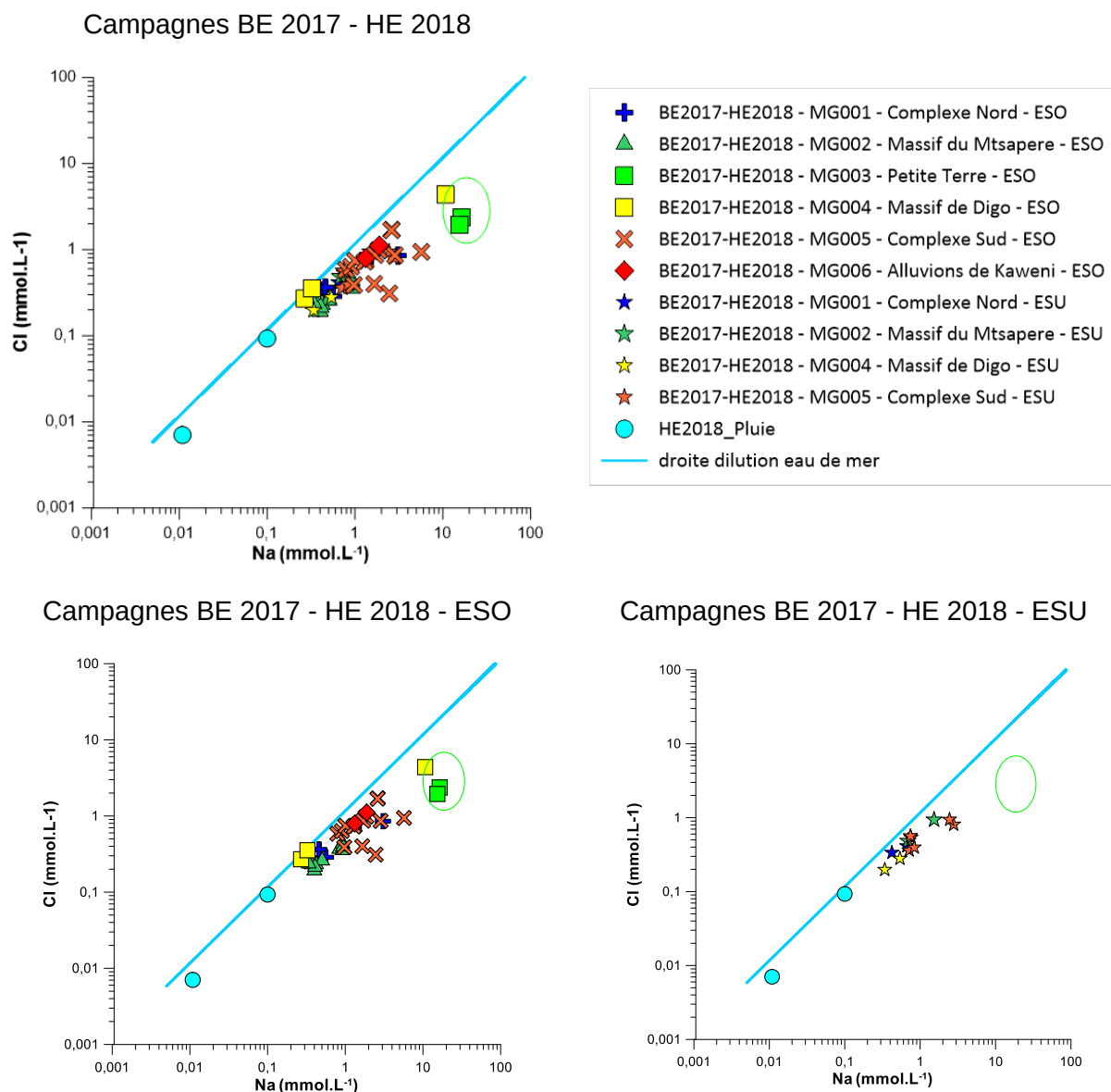


Illustration 53 : Diagrammes Na vs Cl (mmol.L⁻¹) des points d'eau souterraine (ESO) et des eaux des cours d'eau (ESU) de Mayotte, en fonction des masses d'eau souterraine, Campagne BE 2017 et HE 2018.

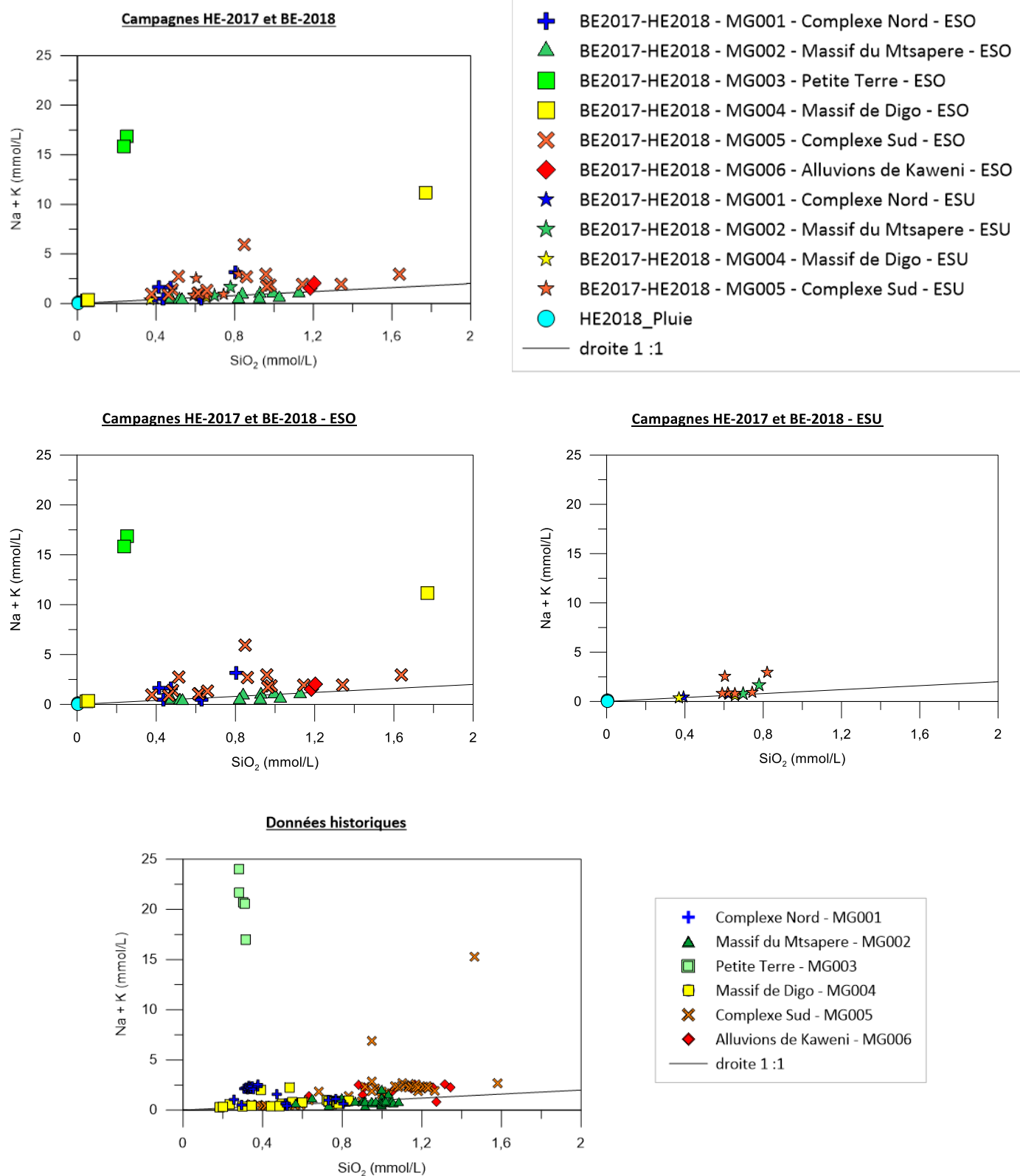


Illustration 54 : Diagrammes SiO₂ vs Na + K (mmol.L⁻¹) des points d'eau souterraine (ESO) et des eaux des cours d'eau (ESU) de Mayotte, en fonction des masses d'eau souterraine, Campagne BE 2017 et HE 2018.

- **Diagramme Na +K vs.SiO₂**

Les diagrammes Na + K vs. SiO₂ (Illustration 54) réalisées avec les résultats des campagnes BE 2017 et HE 2018 pour les eaux souterraines et superficielles de Mayotte, ainsi que pour les résultats historiques des eaux souterraines ont été réalisés afin d'essayer de mettre en évidence des groupes homogènes de MESO en relation avec la nature géologique et lithologique des laves constituant les aquifères, illustrées par les diagrammes de TAS (Total Alkali versus Silica ; Illustration 5 ; Chapitre 1.2 Géologie). En effet , les roches volcaniques du Sud appartiennent à une série volcanique ayant une composition minéralogique un peu plus riche en éléments alcalins (Na + K) que les roches volcaniques du Nord (Illustration 5 a) ou du Nord-Ouest / Centre Nord (Illustration 5 b).

Que ce soit pour les données des campagnes complémentaires, BE 2017 et HE 2018, ou pour les données historiques, le pôle des eaux souterraines de Petite Terre est clairement distinct des autres eaux de Mayotte. Il se caractérise par une forte concentration en alcalins et une faible concentration en silice. Par comparaison avec le diagramme de TAS (Illustration 5 b), où les laves de Petite Terre sont identifiées dans le pôle « phonolite », riche en silice et en alcalins, les eaux souterraines qui correspondent sont nettement appauvries en silice.

Les eaux de la Grande Terre sont globalement situées sur une droite de pente 1 : 1 partant du pôle très peu minéralisé, marqué notamment par les eaux de pluie et un point d'eau souterraine du Massif de Digo correspondant au forage de Kahani 1 (12312X0030/KAHA 1) en BE 2017 et HE 2018 et les eaux du Complexe Sud.

On retrouve alignées sur cette pente de droite 1 : 1 :

- Les eaux souterraines et superficielles du Massif du Mtsapere qui sont très bien alignées sur cette droite de pente 1 : 1 ; une grande partie des eaux souterraines étant plus minéralisées que les eaux superficielles ;
- Les eaux souterraines des alluvions de Kaweni ; elles sont plus minéralisées que les eaux souterraines du Massif du Mtsapere.
- Les eaux souterraines du Massif de Digo, qui sont globalement un peu moins minéralisées que les eaux souterraines du Massif du Mtsapere et des Alluvions de Kaweni.

Pour ce qui est des eaux du Complexe Sud, deux cas se présentent :

- Les eaux souterraines et superficielles alignées sur cette droite de pente 1 : 1 ; avec des eaux souterraines en partie plus minéralisées ;
- Les eaux souterraines et superficielles marquées par un enrichissement en alcalins ; certains points d'eau souterraine du Complexe Sud se distinguent nettement, avec un très fort enrichissement en alcalins. C'est le cas du piézomètre de Hajangua 1 –Dembeni en HE 2018 et d'après les données historiques (12313X0020/HANJ1) et de l'ancien piézomètre du Dispensaire Mramadoudou (12316X0038/PZ3). Pour ces deux piézomètres, il est probable qu'il y ait une influence notable de l'intrusion saline, notamment pour l'ancien dispensaire de Mramadoudou situé à moins de 200 m du trait de côte, pour le piézomètre d'Hajangua 1 -Dembeni situé à 750 m du trait de côte, il est aussi intéressant de noter la présence de phonolites à proximité.

Les eaux du Complexe Nord ont globalement de faibles concentrations en silice ; elles sont soit alignées sur la pente de droite 1 : 1, soit légèrement enrichies en alcalins.

Les eaux superficielles prélevées, principalement en BE 2017 et HE 2018, se comportent donc de façon homogène aux eaux souterraines sur la même zone géographique (ici référence choisie la MESO) ; elles sont un peu moins minéralisées en général.

Diagrammes « Na + K » et « Cl » vs. Distance au trait de côte

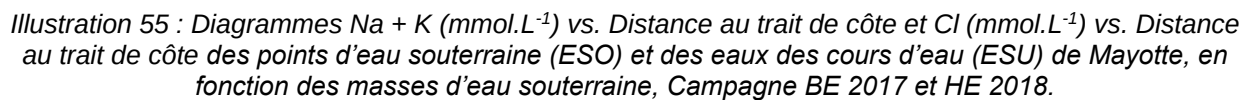
La comparaison des diagrammes « Na + K vis-à-vis de la distance au trait de côte » et « Cl vis-à-vis de la distance au trait de côte » est assez intéressante (Illustration 55).

Dans les deux cas, on a une concentration de base, entre 8 et 23 mmol/L pour les chlorures et comprise entre 1 et 2 mmol/L pour les alcalins, quelle que soit notre distance à la mer. La majorité des points d'eau souterraine et de surface correspondent à ces critères. La source de La Bonne Marée (MG005), située à moins de 30 m du trait de côte, accessible à marée basse ne déroge pas à cette règle générale.

Les points d'eau souterraine de Petite Terre se distinguent uniquement par leurs concentrations en alcalins des autres eaux de Mayotte.

Les points d'eau souterraine du Massif de Digo, que sont le piézomètre de Kahani 1 (12312X0030/KAHA1) et le forage d'Ouroveni F3 (12306X0183) (Illustration 55), ont une signature géochimique complètement différente. Les eaux souterraines de Kahani 1 sont nettement enrichies en chlorures, alors que les eaux d'Ouroveni F3 sont quant à elles très nettement enrichies en alcalins (Na + K), surtout en sodium.

Les eaux souterraines du Complexe Sud présentent pour certaines d'entre elles soit un enrichissement en alcalins, soit un enrichissement en chlorures, soit les 2 ; et ceci de façon indépendante de la distance au trait de côte. L'eau souterraine du piézomètre d'Hajangua 1 - Dembeni situé à 750 m du trait de côte présente le plus fort enrichissement en alcalins des points d'eau souterraine du Complexe Sud, par contre sa signature en chlorures est relativement faible. La concentration en alcalins est donc peut être due à son réservoir et donc à mettre en relation avec la composition géochimique des laves du sud (Diagrammes de Tas, Illustration 5) et la présence à proximité de phonolites (plus riches en alcalins).



Diagrammes Ca vs. HCO_3 et SO_4 vs. Ca

Comme déjà constaté avec les données historiques, le diagramme Ca vs. HCO_3 (Illustration 56 a) met en avant que la majorité des eaux de Mayotte ont un ratio Ca/ HCO_3 proche ; avec des concentrations plus ou moins concentrées en Na et HCO_3 ; mises à part les eaux de Petite terre qui sont plus riches en HCO_3 que les autres eaux de la Grande Terre. Cet alignement des eaux sur le diagramme Ca vs. HCO_3 est intéressant à prendre en compte pour caractériser les eaux souterraines de l'île et l'acquisition de leur chimie.

Le forage d'Ouroveni F3 s'illustre ici encore par sa différence par rapport aux autres eaux de Mayotte, situé entre le pôle de Petite Terre et l'alignement des eaux de la Grande Terre.

Le cercle vert sur les diagrammes correspond au pôle identifié pour les eaux souterraines de Petite Terre avec les données historiques, ce pôle est donc stable dans le temps.

Le diagramme Ca vs. SO_4 (Illustration 56 b) indique que les eaux souterraines sont plus enrichies en sodium qu'en sulfates à l'exception des eaux souterraines du volcanisme de Petite Terre nettement enrichies en sulfates. Les eaux souterraines de la Grande Terre sont regroupées entre elles à l'exception de deux points d'eau souterraine du Massif de Digo correspondant au piézomètre de Kahani (12312X0030/KAHA1) qui a un ratio en Ca/ SO_4 proche de 1.

Certaines eaux souterraines du volcanisme de Complexe pour les campagnes de BE 2017 et HE 2018 sont proche des autres eaux de la Grande Terre, certaines d'entre elles indiquent un enrichissement un peu plus important en calcium. On n'observe plus pour ces deux campagnes, les quelques points d'eau souterraine du Complexe Sud qui tendaient à se rapprocher du pôle de Petite Terre. La variabilité de la chimie des eaux du Complexe Sud est donc relativement importante.

- **Diagrammes (Ca + Mg) vs. (Na + K) ; Ca/Mg vs. Na/Cl ; Ca/Na vs. Ca/Mg**

Comme déjà constaté avec les données historiques, le diagramme (Ca + Mg) vs. (Na + K) (Illustration 56 c) met en avant l'alignement de la majorité des points d'eau souterraine sur une droite de pente 1 :1. Le pôle des eaux de Petite Terre est bien identifié et stable dans le temps. Le forage d'Ouroveni F3 est encore une fois atypique.

Contrairement aux résultats présentés pour les données historiques, on ne retrouve pas sur le diagramme Ca/Mg vs. Na/Cl (Illustration 56 d) les deux pôles précédemment identifiés pour les eaux du Complexe Nord (cercles en bleu), en effet le pôle correspondant aux eaux du Complexe Nord qui avaient un ratio Ca/Mg plus élevé n'est plus présent. Ce même pôle avait pu être identifié sur le diagramme Ca/Na vs. Ca/Mg (Illustration 56 e), il est effectivement absent pour les eaux des campagnes BE 2017 et HE 2018. On constate donc une variabilité qui peut être important au niveau de la masse d'eau souterraine du Complexe Nord. D'après les données d'Eberschweiler (1986) sur les ratios mesurés dans les différents types de roches volcaniques drainées par les eaux à Mayotte (repris également par Jaouën et al. 2012), les eaux souterraines du volcanisme du Complexe Nord doivent leurs ratios Ca/Na et Ca/Mg à la signature géochimique de phonolite. Il semblerait que ce soit un peu plus complexe.

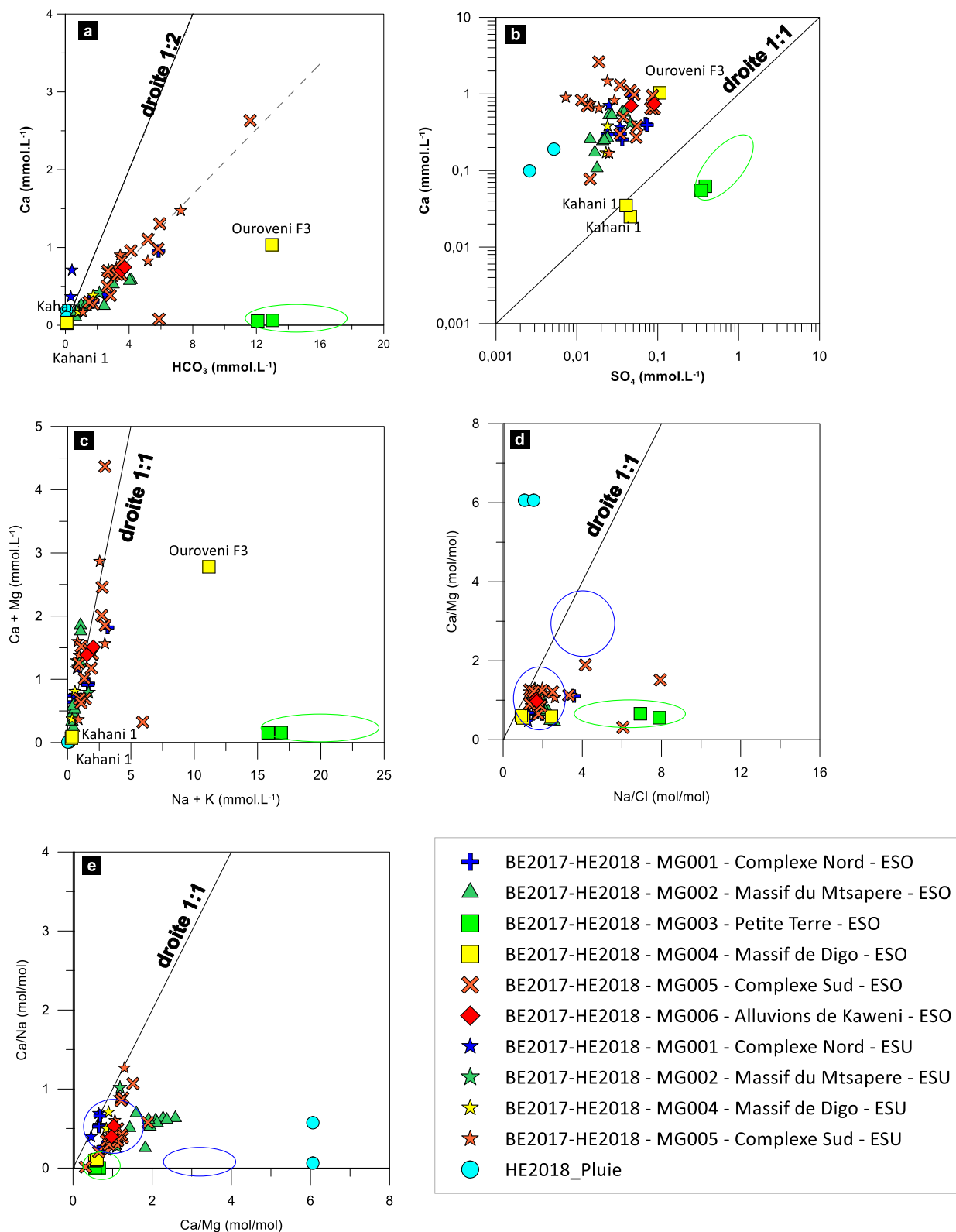


Illustration 56 : Diagrammes des eaux souterraines (ESO) et des cours d'eau (ESU) de Mayotte, campagnes BE 2017 et HE 2018, en fonction des masses d'eau souterraine: (a) Ca vs. HCO_3 , (b) Ca vs. SO_4 , (c) $\text{Ca} + \text{Mg}$ vs. $\text{Na} + \text{K}$, (d) Ca/Mg vs. Na/Cl , (e) Ca/Na vs. Ca/Mg .

5.8. ELEMENTS TRACES

Les résultats d'analyses des éléments traces indiquent des concentrations élevées en Fe, Mn, PO₄, NH₄, Hg, F.

Des distinctions sont observables entre les campagne de basses eaux 2017 et de hautes eaux 2018 ; ainsi qu'entre masses d'eau (Tableau 35).

Le manganèse a des concentrations élevées, aussi bien en BE 2017 qu'en HE 2018 et 5 masses d'eau ont des valeurs élevées (MG001, MG002, MG004, MG005 et MG006), seule la masse d'eau de Petite Terre (MG003) a des concentrations en dessous des normes de potabilité et valeurs seuil (50 µg/L).

Les concentrations élevées en fer ont été relevées en BE 2017 et HE 2018, les masses d'eau concernées sont le Massif de Digo (MG004), le Complexe Sud (MG001) et les Alluvions de Kaweni (MG006).

Des concentrations élevées en mercure (Hg) ont été relevées en HE 2018 pour la masse d'eau du Complexe Sud. Ces valeurs sont nettement supérieures aux normes de potabilité et valeur seuil (1000 ng/L). Il s'agit de deux points d'eau souterraine, un piézomètre et une source, situés sur la commune de Kani-Keli. Il existe à l'heure actuelle peu de données d'analyses pour le mercure dans les eaux souterraines à Mayotte ; ces deux points d'eau mettent en évidence un risque de fond hydrochimique élevé en mercure très localisé. Une étude complémentaire spécifique permettrait de mieux caractériser et comprendre l'origine de ces fortes concentrations.

Les concentrations en orthophosphate sont élevées en BE 2017 et en HE 2018. Quasiment toutes les masses d'eau sont concernées par des concentrations qui dépassent la valeur seuil (0,5 mg/L), sauf la masse d'eau du Complexe Nord (MG001).

L'ammonium (NH₄) indique quelques concentrations élevées, notamment en période de HE 2018 pour la masse d'eau du Complexe Sud (MG005).

Le fluor (F) : très fortes valeurs observées pour la masse d'eau de Petite Terre (MG003), avec des concentrations 20 fois au-dessus de la norme de potabilité (1,5 mg/L). Les données ne concernent que le piézomètre du Gymnase (12308X0086/PZ4) à Petite terre et marquent très nettement un pôle hydrothermal.

139

BRGM/RP-68526-FR – Rapport final

5.9. TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNEES DES DEUX CAMPAGNES COMPLEMENTAIRES

Zoom sur les éléments majeurs et traces indiquant des concentrations supérieures aux normes de potabilité

Les premiers résultats des campagnes complémentaires indiquent que quelques éléments majeurs et traces ont des concentrations élevées, parfois supérieures aux normes de potabilité.

La description statistique de ces éléments en prenant en compte l'ensemble des résultats d'analyses de ces deux campagnes, soit 50 échantillons, indiquent les résultats suivants (Tableau 36). Ces résultats sont aussi illustrés sous forme de box plot (boîte à moustaches), avec indiquées en rouge les normes de potabilité (Illustration 57).

Nouvelles campagnes d'acquisition de données 2017 - 2018	Na (mg/L)	K (mg/L)	F (mg/l)	Fe (mg/l)	PO ₄ (mg/L)	Mn (µg/l)	Hg (ng/l)	NH ₄ (mg/l)
Normes de potabilité	200	12	1,5	0,2		50	1000	0,5
Valeurs seuils	200	12	1,5	0,2	0,5	50	1000	0,5
Normes de Qualité Environnementale (NQE)					0,5		70	0,5
Nombre d'analyses	50	50	50	50	50	50	50	50
Minimum	6,2	0,3	0,1	0,0	0,0	0,1	7,5	0,0
Maximum	377,7	19,4	30,7	1,7	2,7	975,0	1843,0	3,3
1st Quartile	12,6	1,7	0,1	0,0	0,1	0,2	7,5	0,0
Médiane	21,4	3,2	0,2	0,0	0,2	17,2	7,5	0,0
3rd Quartile	42,7	4,5	0,3	0,0	0,5	80,4	7,5	0,0
Moyenne	46,9	4,4	1,4	0,2	0,4	78,5	75,1	0,1
Ecart-type	76,0	4,7	5,7	0,4	0,4	168,4	335,9	0,5

Tableau 36 : Statistique descriptive des éléments à concentrations élevées pour les deux campagnes BE 2017 et BE 2018.

En prenant en compte l'ensemble des résultats d'analyses des deux campagnes, les box plots indiquent que :

- La valeur seuil recoupe l'écart interquartile du Mn, ce qui indique un nombre relativement important de données au-dessus de la valeur seuil ; sans compter la présence de 4 outliers ;
- La valeur seuil pour les orthophosphates recoupe l'axe du percentile 75, ce qui indique aussi un nombre important de valeurs dépassant la valeur seuil ; un seul outlier (= valeur extrême) est à signaler ;
- Pour le fer, les concentrations sont dans leur majorité inférieure à la valeur seuil, néanmoins au moins 8 outliers sont à signaler ;
- Pour le sodium, le potassium, l'ammonium, le fluor, les concentrations des eaux de Mayotte sont globalement inférieures aux valeurs seuils ; il s'agit essentiellement de quelques outliers, **donc plutôt de valeurs élevées localement** ;
- Pour le mercure, la majorité des données sont inférieures à la LQ, sauf les deux outliers correspondant aux deux points ESO sur la commune de Kani-Keli.

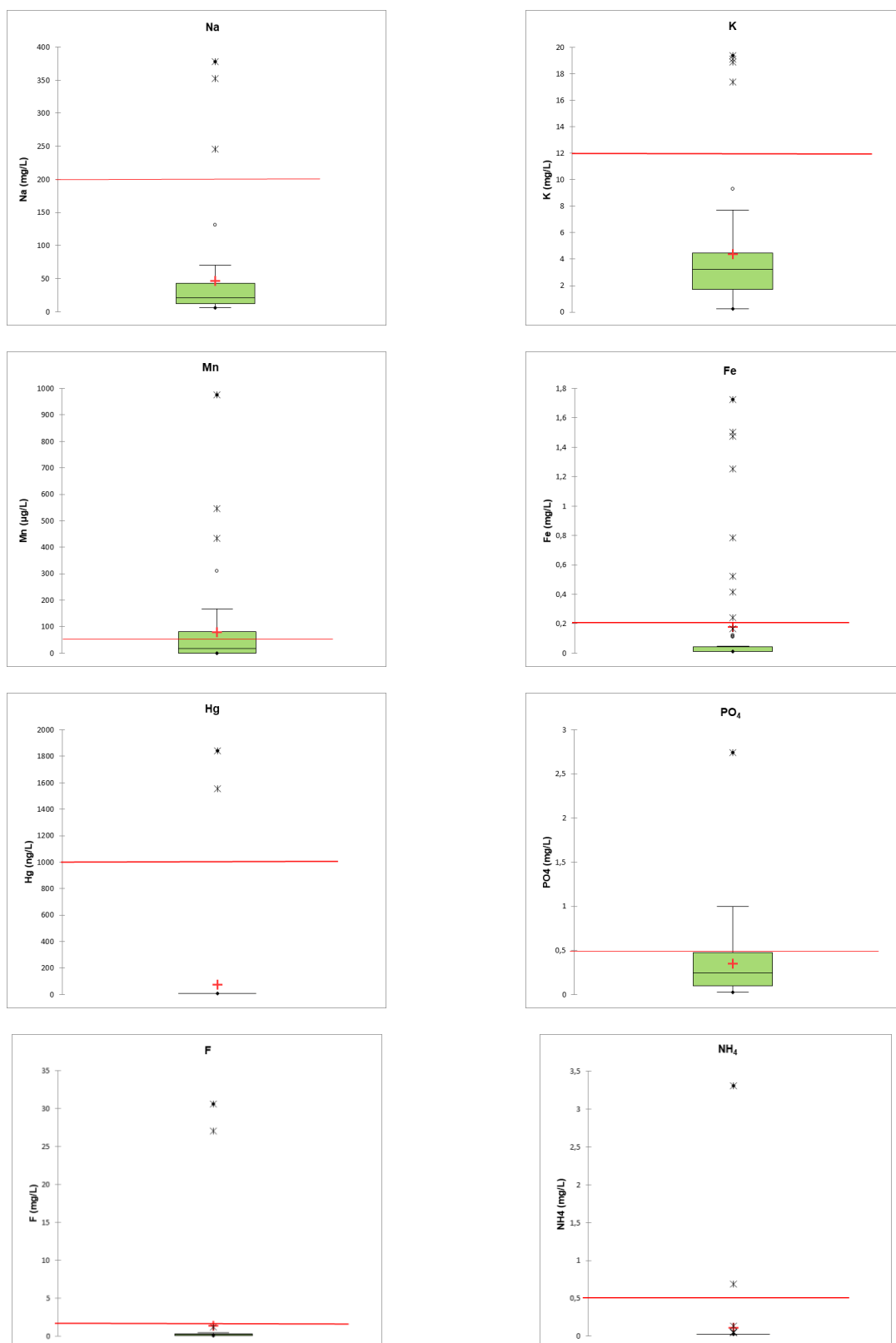


Illustration 57 : Box plots des éléments majeurs et traces ayant des valeurs supérieures aux normes de potabilité (valeurs seuils).

Statistiques descriptives des données des deux nouvelles campagnes par masse d'eau souterraine

Les résultats récapitulatifs de l'ensemble des résultats d'analyses pour les 50 points d'eau échantillonnés lors des deux campagnes d'acquisition complémentaires BE 2017 et HE 2018 sont présentés dans ce chapitre par masses d'eau souterraine. Le Tableau 37 indique la répartition des points ESO et ESU par MESO.

Code MESO	Nom MESO	Nombre de points ESO	Nombre de points ESU	Total
MG001	Complexe du Nord	6	2	8
MG002	Massif du Mtsapere	10	2	12
MG003	Petite Terre	2	-	2
MG004	Massif du Digo	3	2	5
MG005	Complexe du Sud	15	6	21
MG006	Alluvions de Kaweni	2	-	2
Total		38	12	50

Tableau 37 : Répartition des points d'eau échantillonnés en BE 2017 et HE 2018, ESO et ESU, en fonction des masses d'eau souterraine (MESO).

Les résultats des points d'eau superficielle, peu nombreux par rapport aux points ESO, ont été volontairement présentés dans ce chapitre dans le même référentiel afin de les comparer aux résultats des points d'eau souterraine. Le Tableau 38 indique les correspondances entre les masses d'eau souterraine (MESO) et les masses d'eau - cours d'eau.

Eaux superficielles

Code MESO	Nom MESO	Masse d'eau - Cours d'eau associé	Nb points ESU
MG001	Complexe du Nord	FRMR08 ; FRMR02	2
MG002	Massif du Mtsapere	FRMR04 ; FRMR19	2
MG003	Petite Terre		0
MG004	Massif du Digo	FRMR12 ; FRMR13	2
MG005	Complexe du Sud	FRMR16 ; FRMR21 ; FRMR22 ; Pas de cours d'eau associé (3)	6
MG006	Alluvions de Kaweni		0

Tableau 38 : Lien entre les prélèvements en cours d'eau et les masses d'eau souterraine correspondantes, avec le nombre de points échantillonnés par MESO.

Les Tableaux 39 à 48 présentent les résultats de statistiques descriptives, pour les eaux souterraines (ESO) et des eaux de surface (ESU), des paramètres physico-chimiques *in situ*, des éléments majeurs et traces par masse d'eau souterraine (MESO). Les risques de fond hydrogéochimique élevé identifiés sont décrits après chaque tableau.

e) Volcanisme du Complexe Nord (MG001)

	Paramètres	Unité	Normes de potabilité	Valeurs seuils	Normes de Qualité Environnementale (NQE)	Nombre d'analyses	Minimum	Maximum	1st Quartile	Médiane	3rd Quartile	Moyenne	Ecart-type
MG001-ESO	Température	°C	≥4,5 et ≤9			6	26,6	28,6	26,8	27,8	28,3	27,6	0,9
MG001-ESO	pH	-				6	5,8	9,2	6,3	7,3	7,9	7,3	1,3
MG001-ESO	Conductivité à 25°C	µS/cm				6	181	653	201	284	358	326	178
MG001-ESO	Eh NHE	mV				6	248	456	325	387	415	368	77
MG001-ESO	O2 dissous	mg/L	50			6	0,3	7,4	1,2	2,2	4,0	2,9	2,6
MG001-ESO	TDS	mg/L				6	151	571	183	236	282	276	154
MG001-ESO	COD	mg/L				6	0,3	2,5	0,3	0,6	0,9	0,8	0,9
MG001-ESO	NO3	mg/L				6	0,3	3,2	0,6	0,8	2,5	1,4	1,3
MG001-ESO	SO4	mg/L	250	0,5	0,5	6	2,3	7,1	3,4	4,1	6,3	4,6	2,0
MG001-ESO	PO4	mg/L	0,5			6	0,0	0,3	0,0	0,1	0,2	0,1	0,1
MG001-ESO	HCO3	mg/L				6	78,0	357,0	95,3	128,5	152,0	156,0	103,2
MG001-ESO	Cl	mg/L	250			6	10,2	30,3	12,8	21,2	29,6	20,9	9,8
MG001-ESO	Na	mg/L	200	0,5	0,5	6	10,5	70,3	11,3	23,7	34,9	29,0	23,3
MG001-ESO	NH4	mg/L	0,5			6	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
MG001-ESO	K	mg/L	12			6	0,3	4,7	1,1	3,3	4,5	2,8	2,0
MG001-ESO	Mg	mg/L	50			6	9,3	21,0	10,8	11,9	12,7	12,9	4,2
MG001-ESO	Ca	mg/L				6	10,2	38,3	12,0	14,0	16,3	17,5	10,5
MG001-ESO	SiO2	mg/L				6	24,9	48,3	26,8	32,9	37,7	33,8	9,0
MG001-ESO	Ag	µg/L				6	0,02	0,10	0,02	0,03	0,06	0,05	0,03
MG001-ESO	Al	µg/L	200	200	pas de valeur	6	0,52	4,70	0,96	2,91	4,44	2,72	1,99
MG001-ESO	As	µg/L	10	10	0,83	6	0,03	0,13	0,03	0,05	0,11	0,07	0,05
MG001-ESO	B	µg/L	1000	1000	pas de valeur	6	8,89	20,40	10,80	14,80	18,13	14,60	4,80
MG001-ESO	Ba	µg/L	700	700	pas de valeur	6	1,32	70,00	2,85	8,91	14,78	17,78	26,20
MG001-ESO	Be	µg/L		5	de ≤ 0,08 à 0,25 (par classes)	6	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG001-ESO	Cd	µg/L				6	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG001-ESO	Co	µg/L	20			6	0,03	1,24	0,03	0,03	0,03	0,23	0,50
MG001-ESO	Cr	µg/L	50	50	3,4	6	0,13	2,08	0,23	0,49	1,68	0,90	0,92
MG001-ESO	Cu	µg/L	2000	2000	1	6	0,05	0,19	0,05	0,12	0,19	0,12	0,07
MG001-ESO	F	mg/L	1,5	1,5		6	0,05	0,41	0,05	0,08	0,29	0,17	0,17
MG001-ESO	Fe	mg/L	0,2	0,2	pas de valeur	6	0,01	0,16	0,01	0,01	0,01	0,04	0,06
MG001-ESO	Hg	ng/L	1000	1000	70	6	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG001-ESO	Li	µg/L		50	50	6	0,05	0,56	0,05	0,12	0,23	0,19	0,20
MG001-ESO	Mn	µg/L				6	0,05	433,00	0,09	0,21	1,14	72,49	176,61
MG001-ESO	Ni	µg/L	20	20	4	6	0,05	0,83	0,05	0,09	0,17	0,22	0,31
MG001-ESO	Pb	µg/L	10	10	1,2	6	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG001-ESO	Sr	µg/L		5000	5000	6	77,20	400,00	87,35	154,00	212,25	180,33	122,62
MG001-ESO	Zn	µg/L				6	0,25	1,94	0,36	0,92	1,16	0,91	0,65
MG001-ESO	Br	µg/L				6	26,20	108,73	43,12	65,15	86,13	65,69	31,61
MG001-ESO	Sb	µg/L	5	5	pas de valeur	6	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG001-ESO	Se	µg/L	10	10	pas de valeur	6	0,05	0,24	0,05	0,11	0,17	0,12	0,08

Tableau 39 : Description statistique des résultats d'analyses BE 2017- HE 2018 pour les points ESO de MG001.

Risque de fond hydrogéochimique élevé pour : Mn

	Paramètres	Unité	Normes de potabilité	Valeurs seuils	Normes de Qualité Environnementale (NQE)	Nombre d'analyses	Minimum	Maximum	1st Quartile	Médiane	3rd Quartile	Moyenne	Ecart-type
MG001-ESU	Température	°C	≥4,5 et ≤9			2	24,7	25,2	24,8	25,0	25,1	25,0	0,4
MG001-ESU	pH	-				2	7,3	7,5	7,4	7,4	7,5	7,4	0,1
MG001-ESU	Conductivité à 25°C	µS/cm				2	154	295	189	224	260	224	100
MG001-ESU	Eh NHE	mV				2	345	396	358	370	383	370	36
MG001-ESU	O2 dissous	mg/L	50			2	6,5	7,6	6,8	7,1	7,4	7,1	0,8
MG001-ESU	TDS	mg/L				2	130	257	162	194	225	194	89
MG001-ESU	COD	mg/L				2	1,2	1,5	1,3	1,4	1,4	1,4	0,2
MG001-ESU	NO3	mg/L				2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG001-ESU	SO4	mg/L	250	0,5	0,5	2	2,4	3,3	2,6	2,9	3,1	2,9	0,6
MG001-ESU	PO4	mg/L	0,5			2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1
MG001-ESU	HCO3	mg/L				2	66,0	151,0	87,3	108,5	129,8	108,5	60,1
MG001-ESU	Cl	mg/L	250			2	11,9	14,6	12,6	13,3	13,9	13,3	1,9
MG001-ESU	Na	mg/L	200	0,5	0,5	2	9,7	15,3	11,1	12,5	13,9	12,5	4,0
MG001-ESU	NH4	mg/L	0,5			2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG001-ESU	K	mg/L	12			2	0,9	2,4	1,3	1,7	2,0	1,7	1,1
MG001-ESU	Mg	mg/L	50			2	8,9	17,2	11,0	13,1	15,1	13,1	5,9
MG001-ESU	Ca	mg/L				2	6,7	18,4	9,6	12,6	15,5	12,6	8,3
MG001-ESU	SiO2	mg/L				2	23,6	37,4	27,1	30,5	34,0	30,5	9,8
MG001-ESU	Ag	µg/L				2	0,01	0,06	0,02	0,03	0,05	0,03	0,04
MG001-ESU	Al	µg/L	200	200	pas de valeur	2	1,02	1,29	1,09	1,16	1,22	1,16	0,19
MG001-ESU	As	µg/L	10	10	0,83	2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG001-ESU	B	µg/L	1000	1000	pas de valeur	2	16,90	18,90	17,40	17,90	18,40	17,90	1,41
MG001-ESU	Ba	µg/L	700	700	pas de valeur	2	18,70	45,20	25,33	31,95	38,58	31,95	18,74
MG001-ESU	Be	µg/L		5	de ≤ 0,08 à 0,25 (par classes)	2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG001-ESU	Cd	µg/L				2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG001-ESU	Co	µg/L	20			2	0,06	0,86	0,26	0,46	0,66	0,46	0,57
MG001-ESU	Cr	µg/L	50	50	3,4	2	0,05	0,36	0,13	0,21	0,28	0,21	0,22
MG001-ESU	Cu	µg/L	2000	2000	1	2	0,18	0,19	0,18	0,19	0,19	0,19	0,01
MG001-ESU	F	mg/L	1,5	1,5		2	0,20	0,30	0,23	0,25	0,28	0,25	0,07
MG001-ESU	Fe	mg/L	0,2	0,2	pas de valeur	2	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01
MG001-ESU	Hg	ng/L	1000	1000	70	2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG001-ESU	Li	µg/L		50	50	2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG001-ESU	Mn	µg/L				2	5,37	69,40	21,38	37,39	53,39	37,39	45,28
MG001-ESU	Ni	µg/L	20	20	4	2	0,15	0,89	0,34	0,52	0,71	0,52	0,52
MG001-ESU	Pb	µg/L	10	10	1,2	2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG001-ESU	Sr	µg/L		5000	5000	2	62,60	166,00	88,45	114,30	140,15	114,30	73,11
MG001-ESU	Zn	µg/L				2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG001-ESU	Br	µg/L				2	30,16	31,10	30,40	30,63	30,87	30,63	0,66
MG001-ESU	Sb	µg/L	5	5	pas de valeur	2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG001-ESU	Se	µg/L	10	10	pas de valeur	2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	

Tableau 40 : Description statistique des résultats d'analyses BE 2017-HE 2018 pour les points ESU de MG001.

Risque de fond hydrogéochimique élevé pour : Mn (Attention, les résultats ne reposent que sur 2 échantillons).

f) Volcanisme du Massif du Mtsapere (MG002)

	Paramètres	Unité	Normes de potabilité	Valeurs seuils	Normes de Qualité Environnementale (NQE)	Nombre d'analyses	Minimum	Maximum	1st Quartile	Médiane	3rd Quartile	Moyenne	Ecart-type
MG002-ESO	Température	°C	≥4,5 et ≤9			10	24,4	27,7	25,6	26,2	27,2	26,3	1,1
MG002-ESO	pH	-				10	5,6	7,5	6,1	6,9	7,3	6,7	0,7
MG002-ESO	Conductivité à 25°C	µS/cm				10	99	440	141	164	336	236	133
MG002-ESO	Eh NHE	mV				10	224	491	334	430	475	399	89
MG002-ESO	O2 dissous	mg/L				10	2,6	7,0	3,2	4,4	5,5	4,4	1,5
MG002-ESO	TDS	mg/L				10	95	405	134	212	314	234	118
MG002-ESO	COD	mg/L				10	0,3	1,4	0,3	0,8	1,0	0,7	0,4
MG002-ESO	NO3	mg/L				10	0,3	1,2	0,3	0,7	1,0	0,7	0,4
MG002-ESO	SO4	mg/L				10	1,4	3,7	1,8	2,2	2,6	2,3	0,8
MG002-ESO	PO4	mg/L				10	0,1	0,7	0,2	0,3	0,4	0,3	0,2
MG002-ESO	HCO3	mg/L	250	0,5	0,5	10	38,0	252,0	64,0	113,5	181,5	130,2	81,7
MG002-ESO	Cl	mg/L				10	6,8	15,4	8,2	8,8	13,0	10,4	3,1
MG002-ESO	Na	mg/L				10	7,8	21,5	9,3	10,7	20,7	13,9	6,0
MG002-ESO	NH4	mg/L				10	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG002-ESO	K	mg/L				10	0,3	4,0	1,4	2,0	2,8	2,1	1,3
MG002-ESO	Mg	mg/L				10	3,1	31,0	5,2	7,9	17,9	13,0	10,4
MG002-ESO	Ca	mg/L				10	4,3	23,3	9,8	10,5	21,2	14,0	7,2
MG002-ESO	SiO2	mg/L				10	28,6	67,7	36,3	53,0	58,8	49,2	13,9
MG002-ESO	Ag	µg/L				10	0,01	0,11	0,02	0,03	0,07	0,05	0,04
MG002-ESO	Al	µg/L				10	0,25	2,81	0,58	1,23	1,73	1,26	0,82
MG002-ESO	As	µg/L	1000	1000	pas de valeur	10	0,03	0,13	0,03	0,06	0,11	0,07	0,04
MG002-ESO	B	µg/L				10	10,70	16,40	11,05	14,25	15,03	13,41	2,23
MG002-ESO	Ba	µg/L				10	0,15	35,50	4,21	5,74	13,55	10,29	10,90
MG002-ESO	Be	µg/L				10	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG002-ESO	Cd	µg/L				10	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG002-ESO	Co	µg/L				10	0,03	0,39	0,03	0,03	0,03	0,06	0,12
MG002-ESO	Cr	µg/L				10	0,12	1,35	0,54	0,92	1,15	0,83	0,43
MG002-ESO	Cu	µg/L				10	0,05	3,69	0,11	0,22	0,81	0,69	1,11
MG002-ESO	F	mg/L				10	0,05	0,20	0,10	0,12	0,16	0,13	0,04
MG002-ESO	Fe	mg/L				10	0,01	0,11	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03
MG002-ESO	Hg	ng/L	1000	1000	70	10	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG002-ESO	Li	µg/L				10	0,05	0,27	0,11	0,12	0,16	0,14	0,07
MG002-ESO	Mn	µg/L				10	0,05	88,60	0,05	0,08	2,51	9,57	27,80
MG002-ESO	Ni	µg/L				10	0,05	1,23	0,07	0,13	0,16	0,23	0,36
MG002-ESO	Pb	µg/L				10	0,03	0,29	0,03	0,03	0,08	0,09	0,10
MG002-ESO	Sr	µg/L				10	36,10	366,00	82,50	136,00	234,50	168,90	111,70
MG002-ESO	Zn	µg/L				10	0,25	5,50	0,86	1,23	2,20	1,83	1,70
MG002-ESO	Br	µg/L				10	19,90	56,44	24,65	34,15	44,88	35,69	13,58
MG002-ESO	Sb	µg/L				10	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG002-ESO	Se	µg/L				10	0,05	0,17	0,05	0,05	0,13	0,08	0,05

Tableau 41 : Description statistique des résultats d'analyses BE 2017 - HE 2018 pour les points ESO de MG002.

Risque de fond hydrogéochimique élevé pour : Mn, PO₄

	Paramètres	Unité	Normes de potabilité	Valeurs seuils	Normes de Qualité Environnementale (NQE)	Nombre d'analyses	Minimum	Maximum	1st Quartile	Médiane	3rd Quartile	Moyenne	Ecart-type
MG002-ESU	Température	°C	≥4,5 et ≤9			2	26,5	26,7	26,6	26,6	26,7	26,6	0,1
MG002-ESU	pH	-				2	6,9	8,9	7,4	7,9	8,4	7,9	1,4
MG002-ESU	Conductivité à 25°C	µS/cm				2	326	338	329	332	335	332	8
MG002-ESU	Eh NHE	mV				2	293	391	317	342	366	342	69
MG002-ESU	O2 dissous	mg/L				2	5,9	7,6	6,3	6,7	7,2	6,7	1,2
MG002-ESU	TDS	mg/L				2	276	284	278	280	282	280	6
MG002-ESU	COD	mg/L				2	0,7	1,8	1,0	1,3	1,5	1,3	0,8
MG002-ESU	NO3	mg/L				2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG002-ESU	SO4	mg/L				2	1,3	4,4	2,1	2,9	3,6	2,9	2,2
MG002-ESU	PO4	mg/L				2	0,3	0,5	0,4	0,4	0,5	0,4	0,1
MG002-ESU	HCO3	mg/L	250	0,5	0,5	2	130,0	165,0	138,8	147,5	156,3	147,5	24,7
MG002-ESU	Cl	mg/L				2	17,1	33,2	21,1	25,2	29,2	25,2	11,4
MG002-ESU	Na	mg/L				2	15,8	35,2	20,7	25,5	30,4	25,5	13,7
MG002-ESU	NH4	mg/L				2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG002-ESU	K	mg/L				2	3,7	5,0	4,0	4,4	4,7	4,4	0,9
MG002-ESU	Mg	mg/L				2	9,1	14,3	10,4	11,7	13,0	11,7	3,7
MG002-ESU	Ca	mg/L				2	16,6	28,0	19,5	22,3	25,2	22,3	8,1
MG002-ESU	SiO2	mg/L				2	41,9	46,8	43,1	44,4	45,6	44,4	3,5
MG002-ESU	Ag	µg/L				2	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
MG002-ESU	Al	µg/L				2	0,64	1,07	0,75	0,86	0,96	0,86	0,30
MG002-ESU	As	µg/L	1000	1000	pas de valeur	2	0,08	0,18	0,11	0,13	0,16	0,13	0,07
MG002-ESU	B	µg/L				2	14,50	28,80	18,08	21,65	25,23	21,65	10,11
MG002-ESU	Ba	µg/L				2	15,20	21,20	16,70	18,20	19,70	18,20	4,24
MG002-ESU	Be	µg/L				2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG002-ESU	Cd	µg/L				2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG002-ESU	Co	µg/L				2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG002-ESU	Cr	µg/L				2	0,72	0,73	0,72	0,73	0,73	0,73	0,01
MG002-ESU	Cu	µg/L				2	0,05	0,29	0,11	0,17	0,23	0,17	0,17
MG002-ESU	F	mg/L				2	0,14	0,16	0,15	0,15	0,16	0,15	0,01
MG002-ESU	Fe	mg/L				2	0,01	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01
MG002-ESU	Hg	ng/L	1000	1000	70	2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG002-ESU	Li	µg/L				2	0,10	0,74	0,26	0,42	0,58	0,42	0,45
MG002-ESU	Mn	µg/L				2	9,56	23,70	13,10	16,63	20,17	16,63	10,00
MG002-ESU	Ni	µg/L				2	0,12	0,17	0,13	0,15	0,16	0,15	0,04
MG002-ESU	Pb	µg/L				2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG002-ESU	Sr	µg/L				2	180,00	274,00	203,50	227,00	250,50	227,00	66,47
MG002-ESU	Zn	µg/L				2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG002-ESU	Br	µg/L				2	37,70	88,30	50,35	63,00	75,65	63,00	35,78
MG002-ESU	Sb	µg/L				2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG002-ESU	Se	µg/L				2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	

Tableau 42 : Description statistique des résultats d'analyses BE 2017 - HE 2018 pour les points ESU de MG002.

Risque de fond hydrogéochimique élevé pour : PO₄ (Attention, les résultats ne reposent que sur 2 échantillons).

g) Volcanisme de Petite Terre (MG003)

	Paramètres	Unité	Normes de potabilité	Valeurs seuils	Normes de Qualité Environnementale (NQE)	Nombre d'analyses	Minimum	Maximum	1st Quartile	Médiane	3rd Quartile	Moyenne	Ecart-type
MG003-ESO	Température	°C				2	28,4	28,9	28,5	28,7	28,8	28,7	0,4
MG003-ESO	pH	-	≥4,5 et ≤9			2	8,4	10,5	9,0	9,5	10,0	9,5	1,5
MG003-ESO	Conductivité à 25°C	µS/cm				2	1510	1586	1529	1548	1567	1548	54
MG003-ESO	Eh NHE	mV				2	-92	274	-1	91	182	91	258
MG003-ESO	O2 dissous	mg/L				2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,1
MG003-ESO	TDS	mg/L				2	1213	1314	1238	1264	1289	1264	71
MG003-ESO	COD	mg/L				2	1,6	5,2	2,5	3,4	4,3	3,4	2,5
MG003-ESO	NO3	mg/L	50			2	0,3	1,7	0,6	1,0	1,3	1,0	1,0
MG003-ESO	SO4	mg/L	250			2	33,2	37,2	34,2	35,2	36,2	35,2	2,8
MG003-ESO	PO4	mg/L	0,5		0,5	2	0,6	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,04
MG003-ESO	HCO3	mg/L				2	737,0	794,0	751,3	765,5	779,8	765,5	40,3
MG003-ESO	Cl	mg/L	250			2	69,0	84,1	72,8	76,6	80,3	76,6	10,7
MG003-ESO	Na	mg/L	200			2	352,8	377,7	359,0	365,3	371,5	365,3	17,6
MG003-ESO	NH4	mg/L	0,5	0,5	0,5	2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG003-ESO	K	mg/L	12			2	17,4	19,4	17,9	18,4	18,9	18,4	1,4
MG003-ESO	Mg	mg/L	50			2	2,3	2,4	2,3	2,4	2,4	2,4	0,1
MG003-ESO	Ca	mg/L				2	2,2	2,5	2,3	2,4	2,4	2,4	0,2
MG003-ESO	SiO2	mg/L				2	14,3	15,2	14,5	14,8	15,0	14,8	0,6
MG003-ESO	Ag	µg/L				2	0,01	0,06	0,02	0,03	0,05	0,03	0,04
MG003-ESO	Al	µg/L	200	200	pas de valeur	2	28,90	31,90	29,65	30,40	31,15	30,40	2,12
MG003-ESO	As	µg/L	10	10	0,83	2	4,57	8,67	5,60	6,62	7,65	6,62	2,90
MG003-ESO	B	µg/L	1000	1000	pas de valeur	2	441,00	581,00	476,00	511,00	546,00	511,00	98,99
MG003-ESO	Ba	µg/L	700	700	pas de valeur	2	25,80	45,80	30,80	35,80	40,80	35,80	14,14
MG003-ESO	Be	µg/L				2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG003-ESO	Cd	µg/L	5	5	de ≤ 0,08 à 0,25 (par classes)	2	0,04	0,50	0,16	0,27	0,39	0,27	0,33
MG003-ESO	Co	µg/L	20			2	0,03	0,07	0,04	0,05	0,06	0,05	0,03
MG003-ESO	Cr	µg/L	50	50	3,4	2	0,05	0,14	0,07	0,10	0,12	0,10	0,06
MG003-ESO	Cu	µg/L	2000	2000	1	2	0,05	0,23	0,10	0,14	0,19	0,14	0,13
MG003-ESO	F	mg/L	1,5	1,5		2	27,10	30,66	27,99	28,88	29,77	28,88	2,52
MG003-ESO	Fe	mg/L	0,2	0,2	pas de valeur	2	0,01	0,12	0,04	0,07	0,09	0,07	0,08
MG003-ESO	Hg	ng/L	1000	1000	70	2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG003-ESO	Li	µg/L				2	2,34	4,09	2,78	3,22	3,65	3,22	1,24
MG003-ESO	Mn	µg/L	50	50		2	11,20	15,30	12,23	13,25	14,28	13,25	2,90
MG003-ESO	Ni	µg/L	20	20	4	2	0,12	0,25	0,15	0,19	0,22	0,19	0,09
MG003-ESO	Pb	µg/L	10	10	1,2	2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG003-ESO	Sr	µg/L				2	201,00	334,00	234,25	267,50	300,75	267,50	94,05
MG003-ESO	Zn	µg/L	5000	5000	7,8	2	0,60	0,96	0,69	0,78	0,87	0,78	0,25
MG003-ESO	Br	µg/L				2	206,00	206,03	206,01	206,01	206,02	206,01	0,02
MG003-ESO	Sb	µg/L	5	5	pas de valeur	2	0,03	0,06	0,03	0,04	0,05	0,04	0,02
MG003-ESO	Se	µg/L	10	10	pas de valeur	2	0,05	0,11	0,07	0,08	0,10	0,08	0,04

Tableau 43 : Description statistique des résultats d'analyses BE 2017-HE 2018 pour les points ESO de MG003

Risque de fond hydrogéochimique élevé pour : F, Na, PO₄, K

Attention, les résultats ne reposent que sur 2 échantillons, du même point d'eau, en BE 2017 et HE 2018. Néanmoins, les eaux souterraines de Petite Terre peuvent être en partie influencées par un pôle hydrothermal, enrichi principalement en F et Na, sans omettre la possibilité d'un pôle d'eau de mer (biseau salé) qui pourrait se surimposer. En l'état actuel des connaissances, il n'est pas possible d'aller plus loin dans l'interprétation.

h) Volcanisme du Massif du Digo (MG004)

	Paramètres	Unité	Normes de potabilité	Valeurs seuils	Normes de Qualité Environnementale (NQE)	Nombre d'analyses	Minimum	Maximum	1st Quartile	Médiane	3rd Quartile	Moyenne	Ecart-type
MG004-ESO	Température	°C	≥4,5 et ≤9			3	27,1	29,5	27,2	27,2	28,4	27,9	1,4
MG004-ESO	pH	-				3	4,8	6,4	4,8	4,9	5,7	5,4	0,9
MG004-ESO	Conductivité à 25°C	µS/cm				3	65	1605	67	70	838	580	888
MG004-ESO	Eh NHE	mV				3	224	534	347	471	503	410	164
MG004-ESO	O2 dissous	mg/L				3	0,0	4,1	1,9	3,8	4,0	2,6	2,3
MG004-ESO	TDS	mg/L				3	32	1393	34	37	715	487	784
MG004-ESO	COD	mg/L				3	0,3	1,7	0,7	1,1	1,4	1,0	0,7
MG004-ESO	NO3	mg/L				3	0,3	1,5	0,8	1,3	1,4	1,0	0,7
MG004-ESO	SO4	mg/L				3	3,9	10,2	4,2	4,4	7,3	6,2	3,5
MG004-ESO	PO4	mg/L				3	0,0	0,3	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1
MG004-ESO	HCO3	mg/L	250	0,5		3	5,0	791,0	5,0	5,0	398,0	267,0	453,8
MG004-ESO	Cl	mg/L				3	9,6	155,4	11,1	12,6	84,0	59,2	83,3
MG004-ESO	Na	mg/L				3	6,2	245,6	6,9	7,5	126,6	86,4	137,8
MG004-ESO	NH4	mg/L				3	0,03	0,69	0,03	0,03	0,36	0,25	0,38
MG004-ESO	K	mg/L				3	1,0	18,9	1,2	1,3	10,1	7,1	10,2
MG004-ESO	Mg	mg/L				3	1,1	42,4	1,3	1,4	21,9	15,0	23,8
MG004-ESO	Ca	mg/L				3	1,0	41,5	1,2	1,4	21,5	14,6	23,3
MG004-ESO	SiO2	mg/L				3	2,9	106,3	3,2	3,4	54,9	37,5	59,6
MG004-ESO	Ag	µg/L				3	0,03	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,01
MG004-ESO	Al	µg/L				3	0,62	59,70	27,81	55,00	57,35	38,44	32,84
MG004-ESO	As	µg/L	10	10	pas de valeur	3	0,03	0,88	0,03	0,03	0,45	0,31	0,49
MG004-ESO	B	µg/L				3	12,20	73,30	12,95	13,70	43,50	33,07	34,85
MG004-ESO	Ba	µg/L				3	5,88	22,30	10,89	15,90	19,10	14,69	8,28
MG004-ESO	Be	µg/L				3	0,02	0,05	0,03	0,04	0,05	0,04	0,02
MG004-ESO	Cd	µg/L				3	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG004-ESO	Co	µg/L				3	0,37	1,86	0,91	1,45	1,66	1,23	0,77
MG004-ESO	Cr	µg/L				3	0,05	0,56	0,20	0,34	0,45	0,32	0,26
MG004-ESO	Cu	µg/L				3	0,13	0,76	0,40	0,66	0,71	0,52	0,34
MG004-ESO	F	mg/L				3	0,05	0,10	0,05	0,05	0,08	0,07	0,03
MG004-ESO	Fe	mg/L				3	0,01	1,72	0,02	0,04	0,88	0,59	0,98
MG004-ESO	Hg	ng/L	1000	1000	pas de valeur	3	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG004-ESO	Li	µg/L				3	0,17	3,70	0,20	0,22	1,96	1,36	2,02
MG004-ESO	Mn	µg/L				3	27,70	310,00	44,95	62,20	186,10	133,30	154,00
MG004-ESO	Ni	µg/L				3	0,10	5,03	2,51	4,91	4,97	3,35	2,81
MG004-ESO	Pb	µg/L				3	0,03	0,15	0,03	0,03	0,09	0,07	0,07
MG004-ESO	Sr	µg/L				3	2,02	308,00	2,44	2,85	155,43	104,29	176,42
MG004-ESO	Zn	µg/L				3	2,07	3,02	2,32	2,57	2,80	2,55	0,48
MG004-ESO	Br	µg/L				3	46,26	415,96	55,08	63,90	239,93	175,37	208,54
MG004-ESO	Sb	µg/L				3	0,03	0,05	0,03	0,03	0,04	0,03	0,01
MG004-ESO	Se	µg/L				3	0,05	0,85	0,44	0,83	0,84	0,58	0,46

Tableau 44 : Description statistique des résultats d'analyses BE 2017-HE 2018 pour les points ESO de MG004.

Risque de fond hydrogéochimique élevé pour : principalement pour Mn et Fe, possible pour Na, NH₄, K.

	Paramètres	Unité	Normes de potabilité	Valeurs seuils	Normes de Qualité Environnementale (NQE)	Nombre d'analyses	Minimum	Maximum	1st Quartile	Médiane	3rd Quartile	Moyenne	Ecart-type
MG004-ESU	Température	°C	≥4,5 et ≤9			2	26,0	26,3	26,1	26,2	26,2	26,2	0,2
MG004-ESU	pH	-				2	5,9	8,7	6,6	7,3	8,0	7,3	2,0
MG004-ESU	Conductivité à 25°C	µS/cm				2	116	215	141	166	190	166	70
MG004-ESU	Eh NHE	mV				2	244	409	285	327	368	327	117
MG004-ESU	O2 dissous	mg/L				2	3,9	4,6	4,1	4,3	4,5	4,3	0,5
MG004-ESU	TDS	mg/L				2	100	197	124	148	173	148	68
MG004-ESU	COD	mg/L				2	0,3	0,6	0,3	0,4	0,5	0,4	0,2
MG004-ESU	NO3	mg/L				2	0,3	0,6	0,3	0,4	0,5	0,4	0,2
MG004-ESU	SO4	mg/L				2	2,2	2,3	2,2	2,3	2,3	2,3	0,1
MG004-ESU	PO4	mg/L				2	0,0	0,5	0,1	0,3	0,4	0,3	0,3
MG004-ESU	HCO3	mg/L	250	0,5		2	49,0	106,0	63,3	77,5	91,8	77,5	40,3
MG004-ESU	Cl	mg/L				2	7,0	9,9	7,7	8,5	9,2	8,5	2,1
MG004-ESU	Na	mg/L				2	7,8	12,4	9,0	10,1	11,3	10,1	3,3
MG004-ESU	NH4	mg/L				2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG004-ESU	K	mg/L				2	0,7	1,7	1,0	1,2	1,5	1,2	0,7
MG004-ESU	Mg	mg/L				2	4,9	10,3	6,3	7,6	9,0	7,6	3,8
MG004-ESU	Ca	mg/L				2	6,8	15,3	8,9	11,1	13,2	11,1	6,0
MG004-ESU	SiO2	mg/L				2	22,2	39,4	26,5	30,8	35,1	30,8	12,2
MG004-ESU	Ag	µg/L				2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG004-ESU	Al	µg/L				2	0,25	0,72	0,37	0,49	0,60	0,49	0,33
MG004-ESU	As	µg/L	10	10	pas de valeur	2	0,03	0,05	0,03	0,04	0,04	0,04	0,02
MG004-ESU	B	µg/L				2	14,80	17,30	15,43	16,05	16,68	16,05	1,77
MG004-ESU	Ba	µg/L				2	15,60	16,60	15,85	16,10	16,35	16,10	0,71
MG004-ESU	Be	µg/L				2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG004-ESU	Cd	µg/L				2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG004-ESU	Co	µg/L				2	0,11	1,29	0,41	0,70	1,00	0,70	0,83
MG004-ESU	Cr	µg/L				2	0,13	0,28	0,17	0,21	0,24	0,21	0,11
MG004-ESU	Cu	µg/L				2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG004-ESU	F	mg/L				2	0,10	0,19	0,12	0,15	0,17	0,15	0,06
MG004-ESU	Fe	mg/L				2	0,01	1,25	0,32	0,63	0,94	0,63	0,88
MG004-ESU	Hg	ng/L	1000	1000	pas de valeur	2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG004-ESU	Li	µg/L				2	0,12	0,15	0,13	0,14	0,14	0,14	0,02
MG004-ESU	Mn	µg/L				2	19,10	157,00	53,58	88,05	122,53	88,05	97,51
MG004-ESU	Ni	µg/L				2	0,05	0,59	0,19	0,32	0,46	0,32	0,38
MG004-ESU	Pb	µg/L				2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG004-ESU	Sr	µg/L				2	71,40	175,00	97,30	123,20	149,10	123,20	73,26
MG004-ESU	Zn	µg/L				2	0,25	0,91	0,42	0,58	0,75	0,58	0,47
MG004-ESU	Br	µg/L				2	23,80	34,70	26,53	29,25	31,98	29,25	7,71
MG004-ESU	Sb	µg/L				2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG004-ESU	Se	µg/L				2	0,05	0,17	0,08	0,11	0,14	0,11	0,08

Tableau 45 : Description statistique des résultats d'analyses BE 2017-HE 2018 pour les points ESU de MG004.

Risque de fond hydrogéochimique élevé pour : Fe, Mn, PO₄ (Attention, les résultats ne reposent que sur 2 échantillons).

i) **Volcanisme du Complexe Sud (MG005)**

	Paramètres	Unité	Normes de potabilité	Valeurs seuils	Normes de Qualité Environnementale (NQE)	Nombre d'analyses	Minimum	Maximum	1st Quartile	Médiane	3rd Quartile	Moyenne	Ecart-type
MG005-ESO	Température	°C				15	24,0	32,8	25,0	27,7	27,9	27,0	2,2
MG005-ESO	pH	-	≥4,5 et ≤9			15	6,4	8,8	6,7	7,1	7,4	7,2	0,7
MG005-ESO	Conductivité à 25°C	µS/cm				15	242	1051	376	448	644	507	211
MG005-ESO	Eh NHE	mV				15	50	443	224	325	406	299	125
MG005-ESO	O2 dissous	mg/L				15	0,0	10,4	0,1	0,4	5,7	3,1	3,6
MG005-ESO	TDS	mg/L				15	202	1024	282	417	567	439	211
MG005-ESO	COD	mg/L				15	0,3	5,0	0,8	1,3	1,7	1,6	1,2
MG005-ESO	NO3	mg/L	50			15	0,3	4,7	0,3	0,3	0,8	1,0	1,5
MG005-ESO	SO4	mg/L	250			15	1,1	8,7	2,6	4,4	6,6	4,6	2,7
MG005-ESO	PO4	mg/L	0,5		0,5	15	0,0	2,7	0,2	0,3	0,6	0,5	0,7
MG005-ESO	HCO3	mg/L				15	91,0	708,0	167,5	214,0	335,5	259,1	151,7
MG005-ESO	Cl	mg/L	250			15	11,0	60,7	21,7	26,4	34,1	29,7	14,5
MG005-ESO	Na	mg/L	200			15	18,2	131,1	26,3	39,0	58,3	45,4	28,4
MG005-ESO	NH4	mg/L	0,5	0,5	0,5	15	0,03	3,31	0,03	0,03	0,03	0,25	0,85
MG005-ESO	K	mg/L	12			15	1,7	19,1	2,6	3,5	4,3	4,8	4,4
MG005-ESO	Mg	mg/L	50			15	6,0	42,2	11,3	13,5	19,8	16,6	9,3
MG005-ESO	Ca	mg/L				15	3,1	105,5	17,8	26,1	38,9	32,0	24,3
MG005-ESO	SiO2	mg/L				15	22,7	98,4	33,9	51,0	58,4	49,9	21,3
MG005-ESO	Ag	µg/L				15	0,01	0,09	0,02	0,04	0,06	0,04	0,03
MG005-ESO	Al	µg/L	200	200	pas de valeur	15	0,25	3,75	0,53	0,75	1,42	1,19	1,14
MG005-ESO	As	µg/L	10	10	0,83	15	0,03	1,36	0,06	0,10	0,18	0,19	0,33
MG005-ESO	B	µg/L	1000	1000	pas de valeur	15	5,77	186,00	14,65	18,10	19,75	27,51	44,06
MG005-ESO	Ba	µg/L	700	700	pas de valeur	15	3,03	135,00	21,25	32,30	51,90	44,21	39,15
MG005-ESO	Be	µg/L				15	0,01	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
MG005-ESO	Cd	µg/L	5	5	de ≤ 0,08 à 0,25 (par classes)	15	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG005-ESO	Co	µg/L	20			15	0,03	1,66	0,04	0,19	0,45	0,39	0,50
MG005-ESO	Cr	µg/L	50	50	3,4	15	0,05	2,37	0,05	0,11	0,17	0,40	0,76
MG005-ESO	Cu	µg/L	2000	2000	1	15	0,05	0,61	0,05	0,05	0,23	0,16	0,16
MG005-ESO	F	mg/L	1,5	1,5		15	0,10	1,20	0,22	0,30	0,36	0,34	0,25
MG005-ESO	Fe	mg/L	0,2	0,2	pas de valeur	15	0,01	1,50	0,01	0,01	0,14	0,25	0,51
MG005-ESO	Hg	ng/L	1000	1000	70	15	7,50	1843,00	7,50	7,50	7,50	232,90	597,35
MG005-ESO	Li	µg/L				15	0,05	1,17	0,18	0,23	0,47	0,41	0,35
MG005-ESO	Mn	µg/L	50	50		15	0,05	547,00	7,81	61,00	122,50	95,20	136,96
MG005-ESO	Ni	µg/L	20	20	4	15	0,05	0,82	0,08	0,18	0,33	0,24	0,22
MG005-ESO	Pb	µg/L	10	10	1,2	15	0,03	0,10	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
MG005-ESO	Sr	µg/L				15	55,20	790,00	174,50	289,00	391,00	306,48	182,98
MG005-ESO	Zn	µg/L	5000	5000	7,8	15	0,25	2,77	0,25	0,65	1,10	0,89	0,76
MG005-ESO	Br	µg/L				15	24,40	156,20	52,86	82,50	108,91	79,71	38,60
MG005-ESO	Sb	µg/L	5	5	pas de valeur	15	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG005-ESO	Se	µg/L	10	10	pas de valeur	15	0,05	0,37	0,05	0,05	0,09	0,11	0,12

Tableau 46 : Description statistique des résultats d'analyses BE 2017-HE 2018 pour les points ESO de MG005.

Risque de fond hydrogéochimique élevé pour : K, Fe, Hg, Mn, PO4

	Paramètres	Unité	Normes de potabilité	Valeurs seuils	Normes de Qualité Environnementale (NQE)	Nombre d'analyses	Minimum	Maximum	1st Quartile	Médiane	3rd Quartile	Moyenne	Ecart-type
MG005-ESU	Température	°C				6	24,2	26,6	24,3	25,0	26,2	25,2	1,1
MG005-ESU	pH	-	≥4,5 et ≤9			6	7,7	9,7	7,9	8,4	8,8	8,5	0,8
MG005-ESU	Conductivité à 25°C	µS/cm				6	162	770	327	366	533	428	215
MG005-ESU	Eh NHE	mV				6	224	457	273	369	433	352	100
MG005-ESU	O2 dissous	mg/L				6	1,7	8,0	5,9	6,8	7,2	6,0	2,3
MG005-ESU	TDS	mg/L				6	156	664	287	327	467	377	182
MG005-ESU	COD	mg/L				6	1,2	3,2	1,2	1,5	1,8	1,7	0,8
MG005-ESU	NO3	mg/L	50			6	0,3	0,6	0,3	0,3	0,3	0,3	0,1
MG005-ESU	SO4	mg/L	250			6	0,7	2,8	1,5	2,1	2,4	1,9	0,8
MG005-ESU	PO4	mg/L	0,5		0,5	6	0,1	1,0	0,2	0,3	0,4	0,4	0,3
MG005-ESU	HCO3	mg/L				6	67,0	442,0	169,8	203,0	289,5	232,0	130,5
MG005-ESU	Cl	mg/L	250			6	12,8	33,4	15,3	19,5	26,5	21,3	8,2
MG005-ESU	Na	mg/L	200			6	16,4	63,9	17,2	18,3	47,2	31,8	22,2
MG005-ESU	NH4	mg/L	0,5	0,5	0,5	6	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG005-ESU	K	mg/L	12			6	2,7	6,4	3,1	3,2	3,7	3,8	1,4
MG005-ESU	Mg	mg/L	50			6	4,7	33,8	13,7	16,2	17,7	17,0	9,5
MG005-ESU	Ca	mg/L				6	6,7	59,1	27,1	31,5	35,4	31,9	16,9
MG005-ESU	SiO2	mg/L				6	35,5	49,3	36,5	38,3	43,4	40,4	5,5
MG005-ESU	Ag	µg/L				6	0,01	0,09	0,02	0,02	0,07	0,04	0,04
MG005-ESU	Al	µg/L	200	200	pas de valeur	6	0,63	11,30	1,08	1,47	7,94	4,32	4,97
MG005-ESU	As	µg/L	10	10	0,83	6	0,03	0,15	0,06	0,09	0,12	0,09	0,05
MG005-ESU	B	µg/L	1000	1000	pas de valeur	6	9,03	18,50	15,50	16,75	17,70	15,69	3,48
MG005-ESU	Ba	µg/L	700	700	pas de valeur	6	17,70	85,80	26,58	47,60	59,25	46,90	25,71
MG005-ESU	Be	µg/L				6	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG005-ESU	Cd	µg/L	5	5	de ≤ 0,08 à 0,25 (par classes)	6	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG005-ESU	Co	µg/L	20			6	0,03	2,55	0,05	0,10	0,18	0,50	1,01
MG005-ESU	Cr	µg/L	50	50	3,4	6	0,05	0,40	0,05	0,09	0,30	0,17	0,16
MG005-ESU	Cu	µg/L	2000	2000	1	6	0,10	0,67	0,18	0,27	0,36	0,31	0,20
MG005-ESU	F	mg/L	1,5	1,5		6	0,10	0,41	0,17	0,21	0,23	0,22	0,10
MG005-ESU	Fe	mg/L	0,2	0,2	pas de valeur	6	0,01	0,78	0,01	0,01	0,09	0,16	0,31
MG005-ESU	Hg	ng/L	1000	1000	70	6	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG005-ESU	Li	µg/L				6	0,05	0,72	0,15	0,19	0,39	0,29	0,25
MG005-ESU	Mn	µg/L	50	50		6	3,90	975,00	21,05	34,00	69,00	190,72	385,04
MG005-ESU	Ni	µg/L	20	20	4	6	0,05	0,44	0,11	0,15	0,34	0,21	0,16
MG005-ESU	Pb	µg/L	10	10	1,2	6	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG005-ESU	Sr	µg/L				6	100,00	489,00	236,50	282,00	296,00	279,17	126,38
MG005-ESU	Zn	µg/L	5000	5000	7,8	6	0,25	1,81	0,25	0,40	0,62	0,63	0,61
MG005-ESU	Br	µg/L				6	29,23	68,20	33,45	45,30	61,65	47,44	16,90
MG005-ESU	Sb	µg/L	5	5	pas de valeur	6	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG005-ESU	Se	µg/L	10	10	pas de valeur	6	0,05	0,10	0,05	0,05	0,05	0,06	0,02

Tableau 47 : Description statistique des résultats d'analyses BE 2017-HE 2018 pour les points ESU de MG005.

Risque de fond hydrogéochimique élevé pour : Mn, Fe, PO4

j) **Alluvions de Kaweni (MG006)**

	Paramètres	Unité	Normes de potabilité	Valeurs seuils	Normes de Qualité Environnementale (NQE)	Nombre d'analyses	Minimum	Maximum	1st Quartile	Médiane	3rd Quartile	Moyenne	Ecart-type
MG006-ESO	Température	°C	≥4,5 et ≤9			2	28,5	28,8	28,6	28,7	28,7	28,7	0,2
MG006-ESO	pH	-				2	6,8	7,1	6,9	7,0	7,1	7,0	0,2
MG006-ESO	Conductivité à 25°C	µS/cm				2	429	502	447	466	484	466	52
MG006-ESO	Eh NHE	mV				2	147	438	220	293	365	293	206
MG006-ESO	O2 dissous	mg/L				2	0,8	1,9	1,1	1,4	1,6	1,4	0,8
MG006-ESO	TDS	mg/L				2	394	451	409	423	437	423	40
MG006-ESO	COD	mg/L				2	1,3	1,8	1,4	1,6	1,7	1,6	0,4
MG006-ESO	NO3	mg/L	50			2	0,3	10,8	2,9	5,5	8,2	5,5	7,5
MG006-ESO	SO4	mg/L	250			2	4,5	8,7	5,6	6,6	7,7	6,6	3,0
MG006-ESO	PO4	mg/L	0,5		0,5	2	0,0	0,6	0,2	0,3	0,5	0,3	0,4
MG006-ESO	HCO3	mg/L				2	215,0	227,0	218,0	221,0	224,0	221,0	8,5
MG006-ESO	Cl	mg/L	250			2	28,3	39,5	31,1	33,9	36,7	33,9	7,9
MG006-ESO	Na	mg/L	200			2	30,5	43,3	33,7	36,9	40,1	36,9	9,1
MG006-ESO	NH4	mg/L	0,5	0,5	0,5	2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG006-ESO	K	mg/L	12			2	5,8	7,7	6,3	6,8	7,2	6,8	1,3
MG006-ESO	Mg	mg/L	50			2	16,6	18,6	17,1	17,6	18,1	17,6	1,4
MG006-ESO	Ca	mg/L				2	28,2	29,9	28,6	29,1	29,5	29,1	1,2
MG006-ESO	SiO2	mg/L				2	71,1	72,3	71,4	71,7	72,0	71,7	0,8
MG006-ESO	Ag	µg/L				2	0,07	0,11	0,08	0,09	0,10	0,09	0,03
MG006-ESO	Al	µg/L	200	200	pas de valeur	2	1,08	2,11	1,34	1,60	1,85	1,60	0,73
MG006-ESO	As	µg/L	10	10	0,83	2	0,31	0,93	0,47	0,62	0,78	0,62	0,44
MG006-ESO	B	µg/L	1000	1000	pas de valeur	2	21,60	23,60	22,10	22,60	23,10	22,60	1,41
MG006-ESO	Ba	µg/L	700	700	pas de valeur	2	0,34	8,66	2,42	4,50	6,58	4,50	5,88
MG006-ESO	Be	µg/L				2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG006-ESO	Cd	µg/L	5	5	de ≤ 0,08 à 0,25 (par classes)	2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG006-ESO	Co	µg/L	20			2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG006-ESO	Cr	µg/L	50	50	3,4	2	0,11	1,21	0,39	0,66	0,94	0,66	0,78
MG006-ESO	Cu	µg/L	2000	2000	1	2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG006-ESO	F	mg/L	1,5	1,5		2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG006-ESO	Fe	mg/L	0,2	0,2	pas de valeur	2	0,01	0,52	0,14	0,27	0,39	0,27	0,36
MG006-ESO	Hg	ng/L	1000	1000	70	2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG006-ESO	Li	µg/L				2	0,39	1,33	0,63	0,86	1,10	0,86	0,66
MG006-ESO	Mn	µg/L	50	50		2	0,05	110,00	27,54	55,03	82,51	55,03	77,75
MG006-ESO	Ni	µg/L	20	20	4	2	0,05	0,17	0,08	0,11	0,14	0,11	0,08
MG006-ESO	Pb	µg/L	10	10	1,2	2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG006-ESO	Sr	µg/L				2	241,00	279,00	250,50	260,00	269,50	260,00	26,87
MG006-ESO	Zn	µg/L	5000	5000	7,8	2	0,80	0,82	0,81	0,81	0,82	0,81	0,01
MG006-ESO	Br	µg/L				2	86,40	120,82	95,00	103,61	112,21	103,61	24,34
MG006-ESO	Sb	µg/L	5	5	pas de valeur	2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
MG006-ESO	Se	µg/L	10	10	pas de valeur	2	0,05	0,55	0,18	0,30	0,43	0,30	0,35

Tableau 48 : Description statistique des résultats d'analyses BE 2017-HE 2018 pour les points ESO de MG006

Risque de fond hydrogéochimique élevé pour : Fe, Mn, PO₄

Attention, ces résultats ne reposent que sur 2 échantillons, mais comme l'extension de cette masse d'eau est peu importante, ils peuvent être considérés comme représentatifs.

5.10. RISQUES DE FOND HYDROCHIMIQUE ELEVE IDENTIFIES D'APRES LES DEUX CAMPAGNES COMPLEMENTAIRES

D'après les données de ces deux campagnes complémentaires, BE 2017 et HE 2018, il apparaît effectivement des risques de fond hydrogéochimiques élevé en fer, manganèse et orthophosphate pour plusieurs masses d'eau souterraine de Mayotte.

Campagnes BE 2017 - HE 2018		Eaux souterraines			Eaux superficielles		
		Fond hydrogéochimique élevé et niveaux de confiance			Fond hydrogéochimique élevé et niveaux de confiance		
Code MESO	Nom MESO	Elevé	Moyen	Faible	Elevé	Moyen	Faible
MG001	Complexe Nord		Mn			Mn	
MG002	Massif du Mtsapere			Mn, PO ₄		PO ₄	
MG003	Petite Terre	Na, F, K	PO ₄				
MG004	Massif du Digo	Fe, Mn		K, NH ₄ , Na	Fe, Mn		PO ₄
MG005	Complexe Sud	Mn, PO ₄ , Hg (loc)	Fe	K	Mn	PO ₄	Fe
MG006	Alluvions de Kaweni	Mn, Fe	PO ₄				

Tableau 49 : Risques de fond hydrochimique élevé identifiés d'après les données des deux campagnes complémentaires réalisées en basses eaux 2017 et hautes eaux 2018, en fonction des masses d'eau souterraine de Mayotte.

Un risque de fond hydrochimique élevé en mercure est mis en évidence pour la masse d'eau du Complexe Sud (MG0005), localisé au sud de cette masse d'eau.

Un risque de fond hydrochimique élevé en fluor typique d'un pôle hydrothermal a été identifié pour les eaux souterraines de Petite Terre, il est associé un risque de fond hydrochimique élevé en sodium et potassium.

6. Données complémentaires prises en compte

Les données de la qualité des eaux extraites de la thèse de Puyraveau (2016) ont été prises en compte :

- Puyraveau R.-A., 2016. Altération de l'île volcanique de Mayotte (Comores) : approches par géochimie des eaux et isotopie du silicium sur les roches des profils d'altération. Thèse de doctorat Université Aix Marseille, 253 p.
- Puyraveau R.-A., Rad S., Basile-Doelsch I., Deparis J., Jaouën T., Nehlig P., 2014. Mayotte Critical Zone Observatory: preliminary results on chemical weathering and erosion rates on volcanic edifices. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2014, 10, pp. 73-76.

6.1. DONNEES - EAUX SOUTERRAINES (ESO)

Pour les eaux souterraines, 21 points d'eau (sources, forage AEP, piézomètres, résurgences) ont été suivis. Leur localisation est présentée sur l'illustration 60.

Par contre, le nombre de données physico-chimiques est limité. Il s'agit essentiellement des données des paramètres physico-chimiques *in situ* (pH, température, oxygénation, potentiel d'oxydo-réduction) et des éléments suivants : nitrates, nitrites et orthophosphate.

Les échantillons d'eau prélevés ont été conditionnés pour analyses des majeurs et traces sont décrits dans le tableau ci-après.

Tableau IV.1 : liste du flaconnage utilisé pour chaque prélèvement destiné à un type d'analyse spécifique.

Flaconnage	Filtration	Acidification	Application
100 ml LDPE	0,45 µm	non	Anions
50 ml LDPE	0,45 µm	HNO ₃ 14N suprapur	Cations
50 ml LDPE lavé	0,45 µm	HNO ₃ 14N suprapur	Traces
3x12 ml tubes verre	0,20 µm	non	δ ¹³ C
100 ml LDPE	non	non	δ ¹⁸ O & δD
125 ml verre	0,45 µm	H ₂ SO ₄	C.O.D.
1L HDPE lavé	0,45 µm	HCL 8,65N sub	Isotopie

Illustration 58 : Conditionnement des échantillons d'eau prélevés en fonction des éléments analysés aux laboratoires (extrait de Puyraveau, 2016).

Les analyses des nitrates, nitrites et orthophosphate ont été réalisées dans les Laboratoires du BRGM, la méthode analytique est spécifiée dans la thèse de Puyraveau (2016) ; il est alors possible d'en déduire les limites de quantification correspondantes.

Il est à noter qu'aucune analyse de mercure (Hg) n'a été réalisée pour les eaux souterraines dans les travaux de Puyraveau (2016) et Puyraveau et al. (2014).

	Mesure	Machine	Norme	Opérateurs	Laboratoire
Cations Majeurs	Ca, K, Na, Mg, Fe, SiO ₂	ICP spectrométrie d'émission	MO229-NF EN ISO 11885-E	Service de T. Conte	BRGM (FR)
	Ca, K, Na, Mg, Si, Fe, Sr, P, Mn	ICP-MS Perkin-Elmer Nexion 300X		B. Angeletti R-A. Puyraveau I. Basile-Doelsch	CEREGE (FR)
Anions	Cl, F, NO ₃ , SO ₄	Chromatographie ionique (Dionex)	MO018-NF T 90-004-E	Service de T. Conte	BRGM (FR)
	NH ₄	Analyse en flux (FFA & FIA) et détection spectrométrique	NF EN ISO 11732-E	Service de T. Conte	BRGM (FR)
	PO ₄	Spectrométrie au molybdate d'ammonium	NF EN 1189-E	Service de T. Conte	BRGM (FR)
	NO ₂	Spectrométrie d'absorption moléculaire	MO028-NF EN ISO 10304-E	Service de T. Conte	BRGM (FR)
	CO ₃ , HCO ₃	Alcalinité TA/TAC par potentiométrie	MO245-NF EN ISO 9963-1-E	Service de T. Conte	BRGM (FR)
	HCO ₃	Méthode de Gran		R-A. Puyraveau	Terrain
Traces	Ag, Al, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Li, Mn, Ni, Pb, Sr, Zn, Ge, Th, V	ICP-MS	MO108-NF EN ISO 11885-E	Service de T. Conte	BRGM (FR)
	Li, Be, B, Mg, Al, Si, P, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ge, As, Se, Sr, Zr, Mo, Cd, Sb, Ba, Hg, Pb, Bi, Th, U	ICP-MS Perkin-Elmer Nexion 300X		B. Angeletti R-A. Puyraveau I. Basile-Doelsch	CEREGE (FR)

Illustration 59 : Méthodes analytiques, laboratoires d'analyses pour les échantillons de Puyraveau (2016).

Ces données concernant les paramètres physico-chimiques *in situ*, nitrates, nitrites et orthophosphate ont été ajoutées aux jeux de données constitués par les données historiques et les données des deux campagnes complémentaires en basses eaux 2017 et hautes eaux 2018, afin de confirmer les risques de fond hydrochimique élevée.

6.2. DONNEES - EAUX SUPERFICIELLES (ESU)

Pour les eaux superficielles, 44 points d'eau ont été suivis, répartis sur l'ensemble de Mayotte. Pour les eaux superficielles, le nombre de données physico-chimiques est un peu plus important.

Par contre, les éléments ont été analysés soit aux laboratoires du CEREFÉ soit aux laboratoires du BRGM. Bien que les méthodes analytiques soient connues, les limites de quantification pour un certain nombre d'éléments traces ne sont pas précisées.

Les données prises en compte dans notre étude sont les mêmes que pour les eaux souterraines, à savoir les paramètres physico-chimiques *in situ*, nitrates, nitrites et orthophosphate.

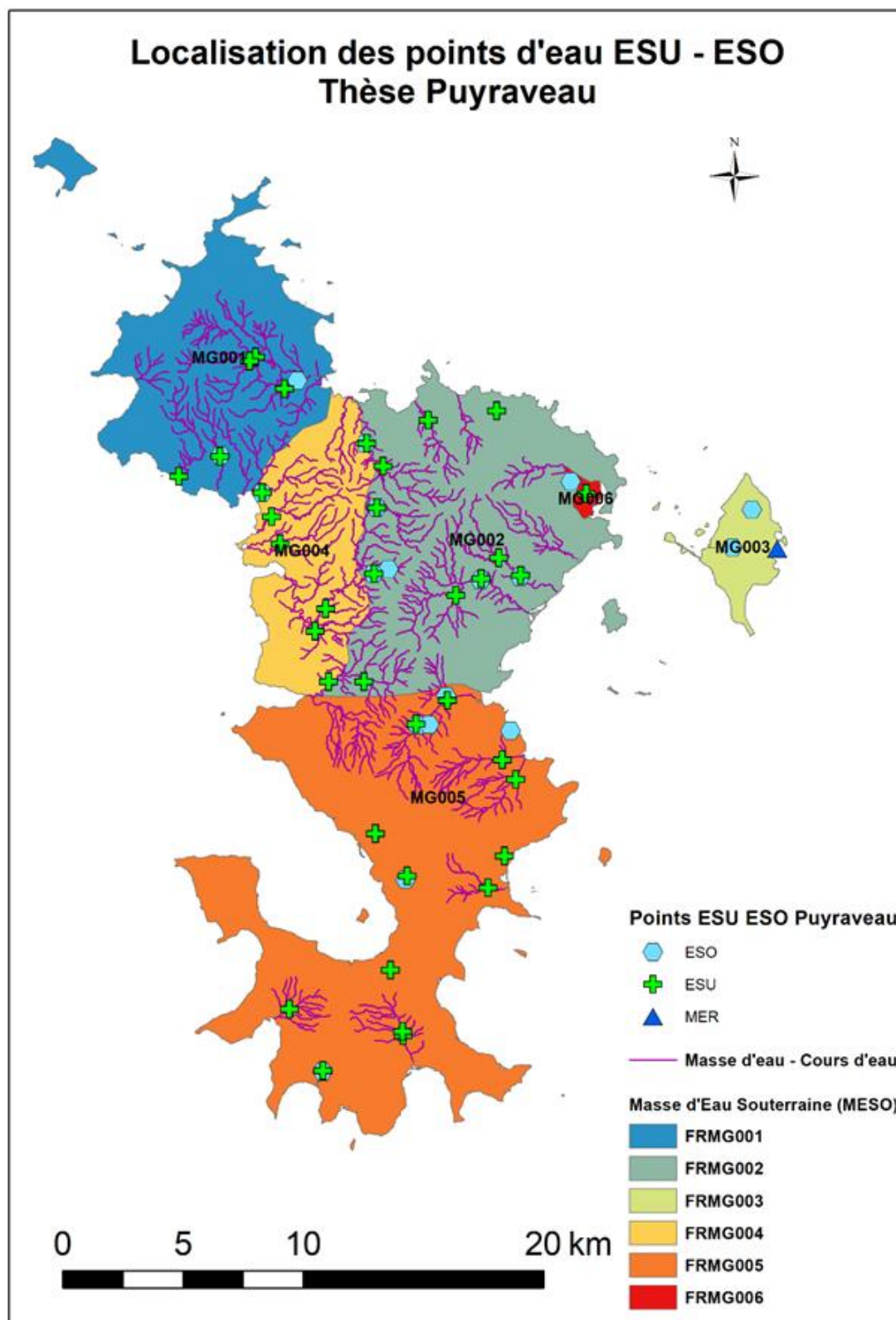


Illustration 60 : Localisation des points d'eau ESU et ESO, avec données physico-chimiques extraites des travaux de thèse de Puyraveau, 2016.

7. Datation des eaux par analyses CFC-SF6

7.1. PRESENTATION GENERALE

Différentes méthodes de datation

Dater les eaux souterraines signifie déterminer l'âge de l'eau souterraine, i.e. le temps écoulé à partir du moment où l'eau devient souterraine, en d'autres termes, depuis son infiltration dans le sol à partir des précipitations ou depuis tout autre type d'eau de surface (rivières, lacs). Il existe plusieurs méthodes pour calculer ou estimer l'âge des eaux souterraines. L'utilisation d'une méthode ou d'une autre dépendra de l'âge attendu des eaux et de la disponibilité d'une chronique du signal d'entrée (Illustration 61, Illustration 62).

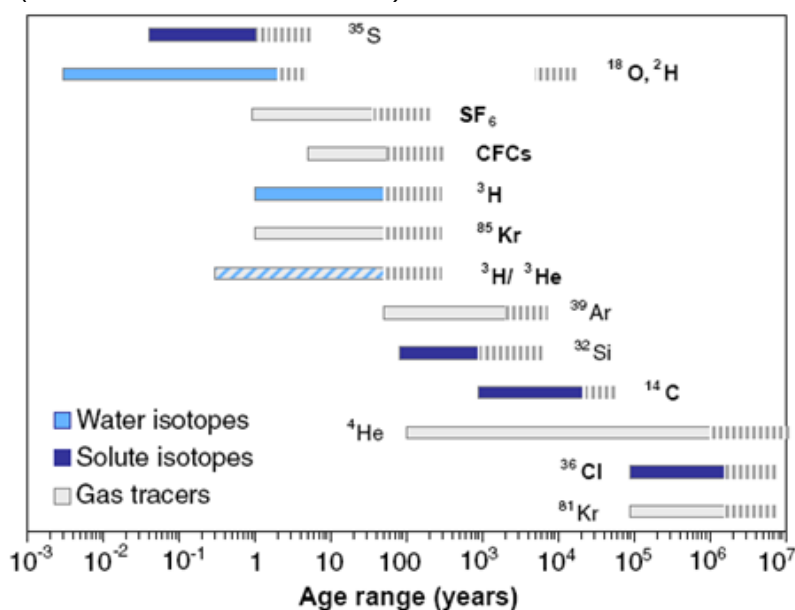


Illustration 61 : Echelle de datation pour quelques éléments radioactifs et gazeux.

Un outil développé pour la datation des eaux jeunes se base sur la mesure de certains gaz dissous conservatifs à l'état de trace (IAEA, 2006).

Les CFC

Les composés halogénés CFC-11 (trichlorofluorométhane), CFC-12 trichlorodifluorométhane), et CFC-113 (trichlorotrifluorométhane) communément appelés fréons sont utilisés principalement comme gaz réfrigérants, propulseurs, solvants et agents d'expansion dans les mousses de matières plastiques. L'intérêt de l'utilisation de ces composés halogénés repose principalement sur leur origine et leurs propriétés physico-chimiques :

- temps de résidence atmosphérique élevé,
- homogénéité des concentrations atmosphériques entre les deux hémisphères,
- pas de source naturelle, d'origine uniquement anthropique,
- bonne stabilité chimique dans le sol et dans l'eau.

Les CFC ne sont pas présents naturellement dans l'atmosphère. Leur première synthèse a été effectuée en 1928 mais ce n'est qu'au début des années 30 que leur commercialisation a commencé. Entre les années 1950 et 1960 ces gaz ont été largement diffusés et de nombreuses utilisations ont été développées. Les CFC se diffusent alors dans l'atmosphère et l'hydrosphère.

Les traceurs gazeux présents dans l'atmosphère passent la zone non saturée selon un transport diffusif avant d'entrer dans l'eau souterraine sous forme de gaz dissous suivant la loi d'Henry. La datation des eaux se base sur la comparaison des concentrations en gaz dissous dans les eaux souterraines et les chroniques de concentration des gaz dans l'atmosphère. Ces chroniques (fonction d'entrée) sont parfaitement connues car mesurées en routine à plusieurs stations localisées dans les hémisphères nord et sud. Pour ce type de traceur de l'âge des eaux, il est très important de connaître la fonction d'entrée, i.e. le taux de traceur qui s'infiltre (dépendant du temps). Les premières mesures de CFC dans l'atmosphère ont été effectuées en 1971 et 1974 et un suivi systématique de ces gaz a été instauré à partir du milieu des années 1970 dans le cadre du réseau ALE/GAGE/AGAGE et à partir de 1976 par le laboratoire de suivi et diagnostic du climat de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, USA). Les données de concentrations de CFC rejetés dans l'atmosphère avant 1970 ont été estimées à partir des informations sur la production de ces gaz (McCarthy et al., 1977).

Dans cette étude, les chroniques d'entrées utilisées pour les CFC et le SF₆ sont celles de l'hémisphère sud donné par le Climate Monitoring Diagnostics Laboratory / National Oceanic and Atmospheric Administration (CMDL/NOAA) pour la station de l'observatoire de Samoa (Prinn et al., 2018).

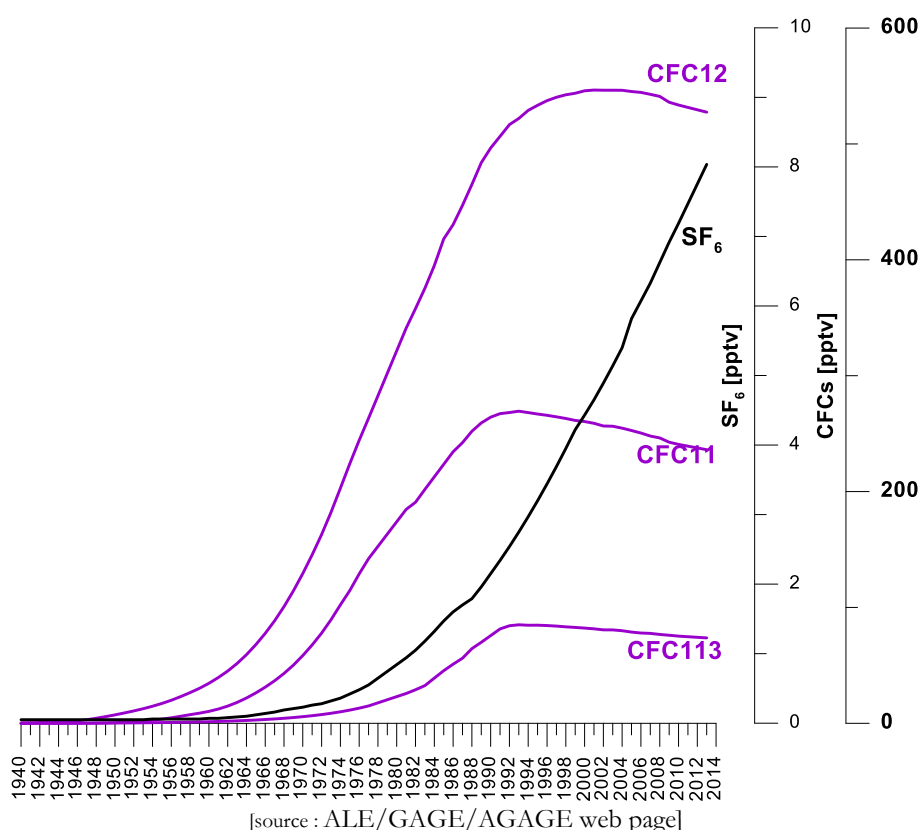


Illustration 62 : Chronique des concentrations dans l'air des CFC et SF₆ (Mace Head).

Les CFC sont mesurés à l'aide de la chromatographie en phase gazeuse équipée d'un capteur à détecteur d'électron.

Le SF₆

L'hexafluorure de soufre (SF₆) est utilisé principalement pour ces capacités isolantes par l'industrie d'énergie électrique, dans les accélérateurs et la production du double vitrage. Ce gaz est également utilisé dans la production du magnésium et comme traceur pour la détection des transferts de polluants (traçage gazeux). La production industrielle du SF₆ a débuté en 1953. Le SF₆ est un gaz provoquant l'effet de serre spécifiquement dénoncé par la communauté internationale (protocole de Kyoto pour les réductions d'émission et le contrôle du réchauffement global de l'atmosphère).

Le SF₆ est principalement d'origine anthropique mais contrairement aux CFC il existe également une production géogénique de ce gaz, estimé à 1% à l'échelle mondiale mais qui peut représenter, localement, un apport important.

Ce composé ne semble affecté par aucun processus tant chimique que biologique et est donc susceptible de résider longtemps dans l'atmosphère et l'hydrosphère (INRS, 2000). Etant donné son fort pouvoir d'amplification de l'effet de serre, ses concentrations atmosphériques sont suivies, au même titre que les CFC à plusieurs endroits du globe.

Le SF₆ a été intensément utilisé comme traceur atmosphérique naturel et comme traceur artificiel pour des études océaniques. Ces propriétés présentent un grand intérêt pour l'évaluation des échanges gazeux, étude de dispersion et de mélanges dans les eaux des océans, lacs, rivières, estuaires. Pour les eaux souterraines, un des principaux intérêts est la faible possibilité de contaminations en SF₆, en milieu rural tout du moins, car ce composé ne sert pour aucune application domestique contrairement aux CFC (Busenberg and Plummer, 2000).

Sa méthode d'analyse est similaire à celle utilisée pour les CFC avec une préconcentration initiale de type « purge-and-trap ».

En 1987 à Montréal, les principaux pays producteurs de CFC décidèrent d'en stopper la production. En Europe, depuis le 1er octobre 2000, les CFC ne peuvent plus être mis sur le marché et doivent être impérativement récupérés et détruits depuis le 1er janvier 2002 relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE). Même si l'utilisation du SF₆ et des CFC est maintenant limitée et les concentrations dans l'air en diminution, le démantèlement des réfrigérateurs, bombes à aérosols, double vitrage, entraîne encore des émissions.

Les concentrations (cas des gaz dissous) ne donne qu'une information relative de l'âge d'une eau. L'âge radiométrique d'une eau souterraine est en fait l'âge moyen d'un mélange de nombreux écoulements élémentaires. La datation des eaux souterraines ne peut donc se limiter uniquement à déterminer un âge. C'est toute une répartition des âges qu'il faut déterminer. Pour permettre une datation des eaux souterraines il est essentiel d'obtenir au préalable un modèle conceptuel des circulations souterraines qui permettra notamment la détermination des principaux modes de circulation des eaux (type piston, exponentiel, modèle de mélange).

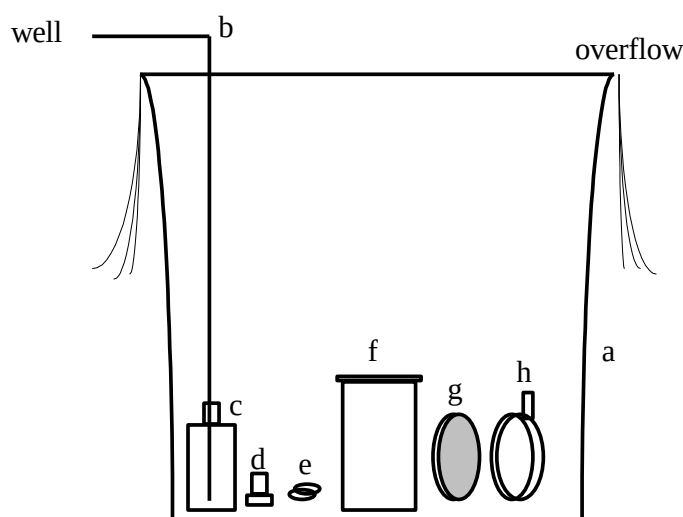
Méthode d'échantillonnage et de prélèvement

Toutes les techniques de prélèvement, d'échantillonnage et de conservation ont été validées au BRGM afin de répondre à trois objectifs :

- représentativité du milieu,
- caractérisation des phénomènes,
- limitation des transformations

Elles font l'objet d'un mode opératoire spécifique qui permet de garantir la non contamination des échantillons. Les prélèvements pour mesure de CFC et SF₆ dissous dans l'eau suivent ainsi le protocole développé par Oster et al. (1996).

Le prélèvement se fait dans des flacons en verre de 500 ml (pour la mesure des CFC et du SF₆) eux même placés dans un récipient métallique qui sera également rempli d'eau prélevée en évitant les mélanges avec l'air ambiant. Le remplissage de la bouteille de verre et du récipient métallique se fait en permanence sous l'eau (Illustration 63).



Source : IAEA, 2006

Illustration 63 : Schéma du système de prélèvement de l'eau pour analyses de CFC et SF₆ a) récipient en métal, b) tuyau de prélèvement, c) flacon de verre, d) bouchon de verre, e) clip métallique pour bloquer le bouchon, f) récipient métallique, g) couvercle du récipient métallique, h) bloqueur couvercle métallique.

Les analyse des gaz dissous (CFC, SF₆) ne font pas l'objet de normes ISO, inexistantes pour ces éléments mais suivent un contrôle continu (utilisation de standards internes et participation à des exercices de calibration inter-laboratoires) qui permettent de garantir l'obtention de faibles incertitudes (Illustration 64). Les analyses des CFC et SF₆ par chromatographie en phase gazeuse ont été réalisées par le laboratoire Spurenstofflabor (Allemagne).

Analyses isotopiques	Méthode	Incertitude
CFC-113, CFC-12, CFC-11, SF ₆	Chromatographe en phase gazeuse équipé d'un détecteur à capture d'électron	± 5%

Illustration 64 : Tableau récapitulatif des méthodes d'analyses pour datation par CFC-SF₆.

Facteurs influençant la détermination des âges apparents

Plusieurs facteurs peuvent affecter la détermination des âges « apparents » de l'eau à partir des données de concentrations en CFC et SF₆.

- **Contamination par l'air ambiant**

Le plus commun est une contamination par l'air ambiant à fortes concentrations en gaz par rapport à l'eau souterraine lors de l'échantillonnage. Toutes les précautions ont été prises pour éviter ce problème mais les conditions de terrain ne permettent pas toujours de se protéger totalement de ce risque.

- **Contamination locale de l'atmosphère**

Le deuxième problème fréquent est celui de la contamination locale de l'atmosphère par un ou plusieurs gaz du fait notamment de la proximité d'une source de ce(s) gaz. C'est le cas dans un milieu urbain (Busenberg and Plummer, 1992, Ho et al., 1998, MacDonald et al., 2003, Santella et al., 2003, Darling and Gooddy, 2007) ou à proximité des sites de rejets des eaux usées ou décharges (Schultz et al., 1976, Busenberg and Plummer, 1992, Cook and Salomon, 1997).

Les décharges sauvages sont présentes à Mayotte et il est possible dans les ravines des réfrigérateurs et autres appareils d'électroménager, sources de CFC. D'autre part, les CFC sont encore présents et utilisés dans un certain nombre de vieux climatiseurs, participant ainsi à la contamination locale de l'atmosphère par ces gaz.

- **Epaisseur de la Zone Non Saturée (ZNS)**

Dans le cas d'une zone non saturée de forte épaisseur il peut y avoir une surestimation de l'âge des eaux du fait d'une mise à zéro de l'horloge retardée (l'eau des pores de la ZNS a une composition en CFC et SF₆ proche de celle de l'air). Il est raisonnable de penser que pour une ZNS inférieure à 10 mètres la concentration en SF₆ reflète celle de l'atmosphère (Busenberg et al., 1993). Si l'effet de la zone non saturée n'est pas pris en compte, les âges des eaux souterraines peuvent être surestimés, par exemple de 1 à 2 ans pour une ZNS de 10 mètres (Cook et Salomon, 1995). L'écart d'estimation des âges selon l'épaisseur de la ZNS dépend du type et de la teneur en eau des sols.

L'épaisseur de la zone non saturée au niveau de la partie libre de ces nappes n'est pas connue.

- **Altitude et température de la recharge**

La température de la recharge qui correspond à la température d'équilibre air-air au moment où l'échantillon d'eau est isolé de l'atmosphère est importante dans le calcul des âges CFC (IAEA, 2006). La température de recharge peut être considérée comme la température annuelle de l'air dans le cas d'une ZNS importante (Mazor, 1972). Dans cette étude, la température de la recharge est estimée d'après la température moyenne de l'eau au moment du prélèvement. De même, l'altitude moyenne de la recharge a été considérée comme l'altitude du point de prélèvement de l'eau. Etant donné les faibles reliefs de l'île, l'erreur d'estimation de l'altitude de recharge a une incidence minimale sur l'estimation de l'âge CFC.

- **Excès d'air**

Le phénomène d'excès d'air (concentration en gaz dissous dans l'aquifère plus importante que celle attendue, Heaton and Vogel, 1981) peut être important surtout pour le SF₆. Il est quasiment négligeable dans le cas du CFC-11 du fait de la haute solubilité de ce gaz (Plummer and Busenberg, 2000, IAEA, 2006).

- **Effet de sorption**

Les effets de sorption sont surtout fréquents dans les milieux riches en carbone organique dissous (COD). L'effet de sorption est minimal pour le CFC-113 et nul pour le SF₆. Les concentrations en COD des eaux souterraines à Mayotte sont faibles, cet effet peut donc être considéré comme négligeable.

- **Dégradation microbienne**

La dégradation microbienne affecte les concentrations en CFC sous milieu anaérobie. La dégradation de CFC-11 en milieu anoxique est plus importante (facteur 10) que la dégradation du CFC-12 et du CFC-113 (Cook et al., 1995, Oster et al., 1996). Les données de terrain indiquent que quelques eaux sont en milieu semi-anoxique (faible concentration en O₂ dissous et Eh NHE inférieur à 250 mV). Dans ce cas une adsorption est possible et les âges SF₆ (gaz non affecté par ce phénomène) ainsi que le CFC-12 permettent de déterminer l'importance de ce paramètre dans la détermination des âges. Les eaux étudiées présentent toutes un taux d'oxygène mesurable et une dégradation microbienne des CFC est donc peu probable.

- **Dégradation microbienne**

Les CFC sont d'origine anthropique mais une faible partie des SF₆ peut être d'origine naturelle (authigénique). C'est plus particulièrement le cas pour les roches volcaniques, ignées ou cristallines (Busenberg and Plummer, 2000), mais également possible en bassin sédimentaire (von Rodhen et al., 2010). Dans une étude réalisée en contexte volcanique en Martinique (Vittecoq et al., 2007) de fortes concentrations en SF₆ ont été notées sur quelques points d'eau. Pour cette étude, un excès de SF₆ par production naturelle est possible. Dans ce cas, les données de CFC seront utilisées préférentiellement.

Modèles de calcul

La mesure des concentrations ne donne qu'une information relative de l'âge d'une eau. L'âge géochimique d'une eau souterraine est en fait l'âge moyen d'un mélange de nombreux écoulements élémentaires. La datation des eaux souterraines ne peut donc se limiter uniquement à déterminer un âge. C'est une répartition des âges qu'il faut déterminer. Pour permettre une datation des eaux souterraines, il est essentiel d'estimer le modèle conceptuel des circulations souterraines qui permettra notamment la détermination des principaux modes de circulation des eaux (type piston, exponentiel, modèle de mélange).

Trois modèles empiriques ont été utilisés pour estimer les temps de séjour moyens des eaux des aquifères de Mayotte :

- Le modèle piston (PF), considérant qu'il n'y a pas de mélange et aucune modification des activités par dispersion, diffusion ou échange direct,
- le modèle exponentiel (EM) : une eau récente se mélange parfaitement à une eau ancienne, il y a échange et écoulement. Il peut correspondre à un aquifère homogène d'épaisseur négligeable pour lequel la recharge se fait sur toute la surface (Illustration 65),
- le modèle de type mélange à deux pôles (BM) : un des deux pôles est considéré comme de l'eau ancienne sans CFC donc antérieur à 1950 ; l'autre pôle est de l'eau jeune d'âge variable. Le résultat de la datation par l'utilisation d'un modèle de mélange binaire est donc un pourcentage d'eau jeune.

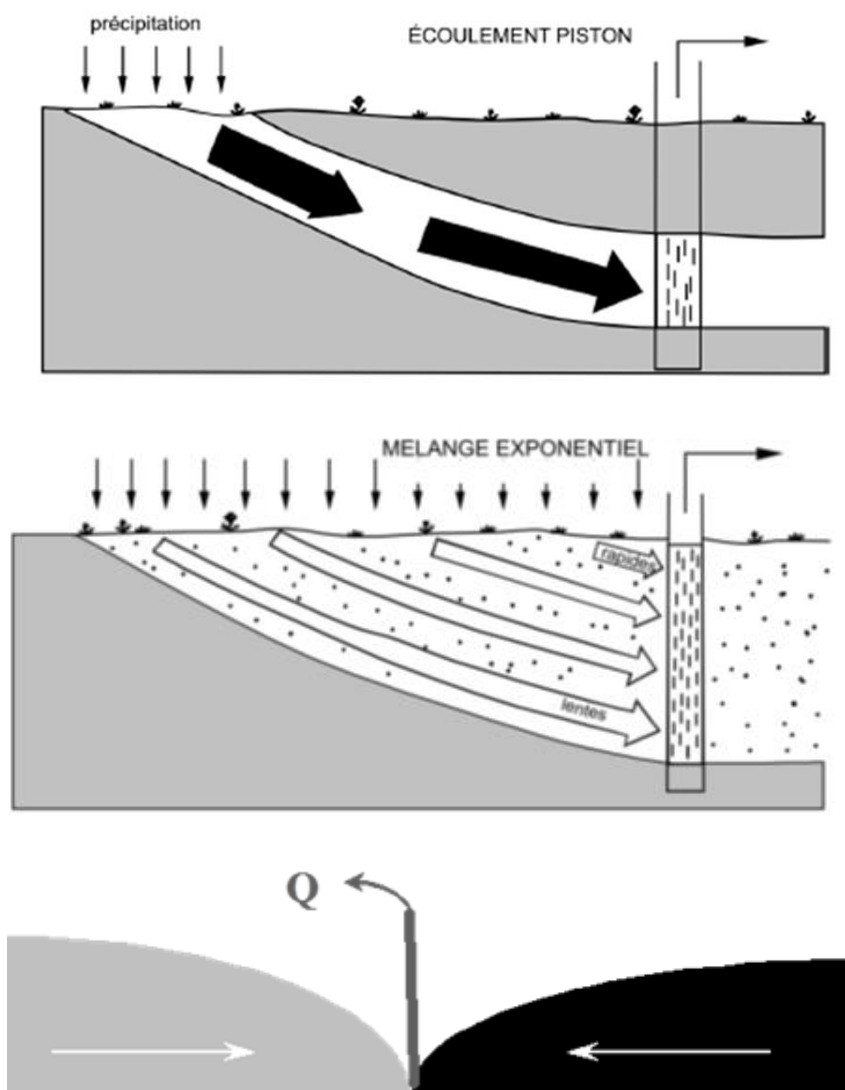


Illustration 65 : Schéma des modèles d'écoulement type piston, exponentiel et mélange binaire.

7.2. RESULTATS DES CFC-SF₆ POUR LES EAUX SOUTERRAINES DE MAYOTTE

Compilation des résultats des analyses CFC et SF₆

Les anciens résultats des analyses CFC et SF₆ de Mayotte ont été extraites des rapports du BRGM, à savoir RP-61757-FR (Jaouën et al. 2013) et RP-59621-FR (Jouaën et al. 2011). Les concentrations en CFC et SF₆ du prélèvement réalisé lors de la campagne de Hautes Eaux 2018, sur le forage d'OUROUVENI F3, ont été rajoutées. L'ensemble de ces résultats ont été compilés dans le tableau ci-après.

Nom	date	alt m	Temp °C	Cond μS/cm	Eh mV	O2 % %	CFC11 pmol/L	CFC12 pmol/L	CFC113 pmol/L	SF6 fmol/L
KAHANI 2	13/02/2012	98	27,4	80,4	606	28,8	1,1	0,9	0,12	2,2
OUROVENI 2	13/02/2012	59	29	212	617,9	15,2	0,8	0,77	0,08	1
COMBANI-KAHANI	13/02/2012	176	27,3	338	619,1	56,7	1	1	0,12	1,8
OUROVENI 1	13/02/2012	76	27,6	237	482,7	100,8	2,1	1,3	0,18	1,6
COMBANI-MRERENI	13/02/2012	108	27,9	385	542,7	3,17	0,8	0,87	0,09	1,1
COMBADRAIN	13/02/2012	131	26,3	158	572,8	85,2	1,8	1,2	0,16	1,3
KAHANI 1	13/02/2012	116	28,2	61,2	701,5	86,5	2,6	1,5	0,22	1,6
MONT COMBANI	14/02/2012	263	25,3	139,7	470,5	20,5	1,3	1,1	0,13	1,1
DEMBENI HAUT	14/02/2012	88	28	1098	275	2,5	0,28	0,16	0,04	0,3
SOURCE DEMBENI (BENARA)	15/02/2012	328	29,8	324	532,3	98	0,7	1,5	0,12	1,5
POROANI 10"	15/02/2012	36	28,9	448	207,6	1,5	0,25	0,2	0,03	1
MRERENI-POROANI	15/02/2012	14	30	275	282,6	0,8	0,22	0,22	0,03	0,9
EMERGENCE AMONT POROANI	15/02/2012	198	25,8	326	565,2	23	1,8	1,5	0,2	1,7
EMERGENCE CHEMIN ANDILABE	15/02/2012	145	25,6	328	552,3	84,2	2,3	1,5	0,22	1,7
DISPENSARE	16/02/2012	9	28,6	1471	163,2	0,7	0,22	0,32	0,04	0,4
EMERGENCE DJALIMOU	16/02/2012	156	26,1	364	371,5	34,9	0,9	1,3	0,14	1,8
KANI KELI 2	16/02/2012	15	28,3	677	533,4	1,5	0,9	0,62	0,09	0,7
MRONABEJA 2	16/02/2012	159	27,7	647	568,5	57	0,8	0,75	0,08	1,2
SOURCE LABOMARE	16/02/2012	8	29,6	487	522	59,3	1	0,72	0,09	0,6
BANDRELE DAGONI	17/02/2012	20	27,7	450	513,8	8	0,8	0,71	0,09	1,2
MRONI BE (DAPANI)	17/02/2012	17	25,6	524	491,9	89,6	2,3	1,5	0,2	1,6
HAJANGUA 2	17/02/2012	72	28,4	697	106,3	1,1	0,18	0,22	0,04	1,4
TSARARANO 1	17/02/2012	12	27,7	119	482,8	6,7	1,8	1,1	0,13	1,9
PZ1 - DZOU MOGNE	15/11/2010	95	26,3	166,9	156	2,6	1,9	1,5	0,2	2,2
EMERGENCE MAPOUERA	15/11/2010	125	23,6	148,5	123	2,9	1,3	1,5	0,5	1,7
MOHOGONI	15/11/2010	10	27,6	315	232	3,9	0,48	0,34	0,05	0,4
MERESSE	15/11/2010	21	28	239	155	5,2	0,7	0,23	0,1	0,4
PZ5 - DIGO	15/11/2010	111	26,3	162,4	181	5,7	0,7	0,63	0,08	1,7
EMERGENCE LONGONI	15/11/2010		25,5	301	173	5,9	3,1	1,4	0,39	1,5
PUITS HACHENOUA	16/11/2010	66	25,8	238	193	7	4,3	1,4	0,21	1,4
EMERGENCE MROWALE	16/11/2010	68	24,6	139,1	36	7,1	2,7	1,5	0,52	1,6
EMERGENCE CHIRINI	16/11/2010	66	25,8	273	86	8,2	1,8	1,1	0,15	0,9
BEJA 1	16/11/2010	29	27,5	272	226	8,4	1,9	0,4	0,26	0,6
MSTANGAMOUI 1	16/11/2010	51	28,4	260	167	10,8	0,24	0,11	0,02	0,2
MTSANGAMOUI 2	16/11/2010	49	28,3	343	160	11,1	0,23	0,15	0,02	0,2
EMERGENCE ANDRIANABE	16/11/2010	103	25,5	230	222	9,4	2,2	1,3	0,49	1,1
EMERGENCE MASSIMONI	16/11/2010	25	26	395	117		1,7	1	0,23	0,9
EMERGENCE ACOUA	16/11/2010	4	26,8	253	128	9,1	4,5	1,2	0,32	1,4
PZ - TSINGONI	16/11/2010	53	26,8	109,1	173	11,9	1,3	1	0,13	1,4
OUROUVENI F3	23/05/2018	35	29,5	1605	223,5	0,01	0,07	0,02	<0,01	<0,1

Tableau 50 : Résultats d'analyses des CFC en pmol/L (10^{-12}) et SF₆ en fmol/L (10^{-15}) de l'ensemble des analyses CFC-SF₆ réalisées sur les eaux souterraines de Mayotte.

Estimation des temps de résidence des eaux et âges relatifs

L'ensemble des données et des calculs ont été vérifiés pour les données historiques. Les résultats des eaux du forage d'Ouroveny F3 ont été ajoutés.

Les trois modèles ont été systématiquement testés. L'utilisation de plusieurs traceurs (trois CFC et le SF₆) permet en général de sélectionner le modèle de circulation le mieux adapté au cas d'étude.

Le tableau ci-après récapitule les temps de résidence en fonction des modèles de calcul les plus adaptés aux traceurs CFC-SF₆. Les résultats correspondent suivants les modèles utilisés à :

- EM : le temps en nombre d'années depuis que la recharge a eu lieu ;
- BM : le pourcentage d'eau jeune au point de prélèvement ;
- PF : la date de la recharge.

Le forage d'Ouroveni F3 capte de l'eau ancienne, dont la recharge date d'au moins 70 ans, soit antérieure à 1950, sans contamination d'eau jeune. D'un point de vue de l'exploitation de ce forage, ces éléments vont dans le sens d'une bonne couverture, donc d'une bonne protection du captage.

Nom	date	alt m	EM Nbre d'années	BM %	PF date
KAHANI 2	13/02/2012	98	41	52-57	
OUROVENI 2	13/02/2012	59		33-37	
COMBANI-KAHANI	13/02/2012	176	31-39		1985
OUROVENI 1	13/02/2012	76	17-20	84-88	1987-1991
COMBANI-MRERENI	13/02/2012	108		38-42	
COMBADRAIN	13/02/2012	131	21-24		
KAHANI 1	13/02/2012	116	10	97-98	1994
MONT COMBANI	14/02/2012	263	40-45	56-59	
DEMBENI HAUT	14/02/2012	88		12	
SOURCE DEMBENI (BENARA)	15/02/2012	328	1		2009
POROANI 10"	15/02/2012	36	16	10 ou 71	
MRERENI-POROANI	15/02/2012	14	20	13 ou 58	
EMERGENCE AMONT POROANI	15/02/2012	198	9 à 25	81 à 98	
EMERGENCE CHEMIN ANDILABE	15/02/2012	145	9 à 17	88 à 94	
DISPENSAIRE	16/02/2012	9	58	27	
EMERGENCE DJALIMOU	16/02/2012	156		36	1988
KANI KELI 2	16/02/2012	15		36 à 45	
MRONABEJA 2	16/02/2012	159		32-36	
SOURCE LABOMARE	16/02/2012	8	58 à 64	38 à 48	
BANDRELE DAGONI	17/02/2012	20	58 à 63	40 à 45	
MRONI BE (DAPANI)	17/02/2012	17	11 à 18	88 à 96	
HAJANGUA 2	17/02/2012	72	6	91	
TSARARANO 1	17/02/2012	12	29 à 38		1985
PZ1 - DZOU MOGNE	15/11/2010	95	16		1990
EMERGENCE MAPOUERA	15/11/2010	125	13		1991
MOHOGONI	15/11/2010	10		22 à 28	
MERESSE	15/11/2010	21		32	
PZ5 - DIGO	15/11/2010	111		55	
EMERGENCE LONGONI	15/11/2010		11		1991
PUITS HACHENOUA	16/11/2010	66		94 à 98	
EMERGENCE MROWALE	16/11/2010	68	8		1995
EMERGENCE CHIRINI	16/11/2010	66		70 à 75	
BEJA 1	16/11/2010	29		78	
MSTANGAMOUI 1	16/11/2010	51		11 à 14	
MTSANGAMOUI 2	16/11/2010	49		11 à 14	
EMERGENCE ANDRIANABE	16/11/2010	103		87 à 90	
EMERGENCE MASSIMONI	16/11/2010	25		68 à 72	
EMERGENCE ACOUA	16/11/2010	4	17		1988
PZ - TSINGONI	16/11/2010	53		81	1985
OUROUVENI F3	23/05/2018	35	>70 ans		<1950

Tableau 51 : Synthèse des âges apparents calculés pour les eaux souterraines de Mayotte, selon les 3 modèles (EM : modèle exponentiel ; BM : mélange binaire ; PF : piston flow modèle).

8. Zones à risque de fond hydrogéochimique élevé, concentrations de référence, valeurs seuils des masses d'eau souterraine

Cette étude doit permettre mieux contraindre l'estimation du fond hydrogéochimique pour l'ensemble des éléments à risque de fond hydrogéochimique élevé, comme par exemple le fer et le manganèse, ou pour lesquels trop peu de données de qualité sont disponibles.

Un de ses objectifs est aussi de compléter la connaissance de la qualité des masses d'eau continentales acquise dans le cadre de la surveillance DCE en déterminant les concentrations de référence pour les eaux souterraines et superficielles.

8.1. METHODOLOGIE

La méthodologie suivie pour déterminer les zones à risques de fond hydrogéochimique élevé, déterminer les concentrations de référence par masse d'eau, proposer des valeurs seuils adaptées est décrite de façon synthétique dans l'illustration 66.

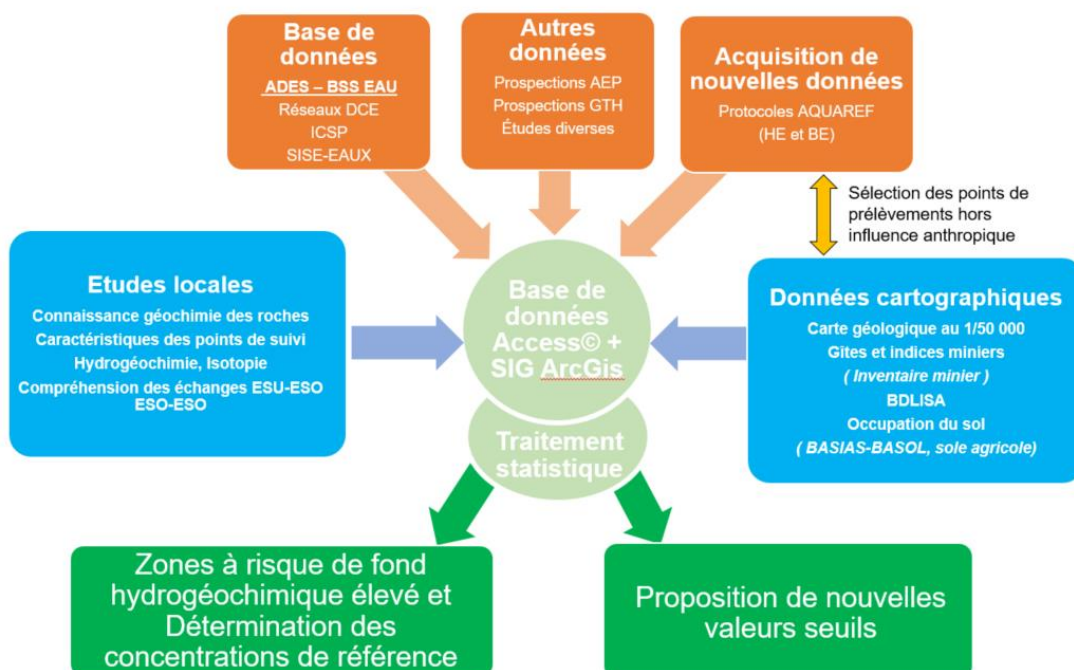


Illustration 66 : Méthodologie employée pour l'étude du fond hydrogéochimique.

La méthodologie employée est équivalente à celle mise en œuvre lors de l'étude sur l'identification des zones à risque de fond hydrogéochimique élevé en éléments traces menée sur le territoire métropolitain afin de disposer d'outils communs. Dans les DOM, ce travail a été réalisé entre 2007 et 2009 (Guadeloupe, Martinique, Réunion, Guyane)

Cette démarche consiste en :

- Une synthèse bibliographique des données existantes ;

- L'extraction de l'ensemble des données qualité bancarisées dans les bases de données ADES et SISE Eaux pour les eaux de surface et les eaux souterraines ;
- L'acquisition de nouvelles données, en suivi les protocoles AQUAREF, ici en basses eaux 2017 et en hautes eaux 2018 ;
- L'établissement de bases de données et le traitement statistique de ces données.

Les données sont au préalable validées et corrigées si nécessaire (généralement des erreurs d'unité), puis un traitement statistique des données brutes est réalisé. L'ensemble des informations collectées est ensuite croisé sur des supports cartographiques pertinents.

Puis des unités hydrogéologiques pouvant présenter des caractéristiques comparables en termes d'occurrence et de mobilisation des éléments majeurs et traces vers les eaux souterraines et les eaux de surface sont définies.

Une délimitation des zones à risque de fond hydrogéochimique élevé est réalisée en attribuant pour chaque zone un niveau de confiance (faible, moyen et élevé) rendant compte de la disparité des données disponibles.

Des concentrations de référence sont déterminées par masse d'eau à l'aide d'analyses statistiques, et si besoin de nouvelles valeurs seuils pour les eaux souterraines sont proposées par masses d'eau.

Des recommandations concernant la définition de futurs programmes d'acquisition de données peuvent être formulées, pour les zones où le niveau de confiance est clairement insuffisant, mais aussi pour des secteurs où un fond hydrogéochimique localisé a été détecté et mérite des analyses complémentaires afin d'être mieux caractériser.

8.2. DELIMITATION DES ZONES A RISQUE DE FOND HYDROGEOCHIMIQUE ELEVE

Rappel réglementaire

La délimitation des zones à risque de fond hydrogéochimique élevé pour les eaux souterraines concerne :

- ✓ les éléments minéraux majeurs, à savoir le calcium, le magnésium, le sodium, les ions chlorures, les ions sulfates, les bicarbonates et le potassium ;
- ✓ les éléments traces considérés comme toxiques ou indésirables par la directive « Eau potable » 98/60/CE et l'arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine : l'arsenic, le baryum, le bore, le fluor, le cadmium, le chrome, le mercure, le cuivre, le nickel, le plomb, le zinc, l'antimoine, le sélénium, l'aluminium, le fer et le manganèse. Le cadmium, le nickel, le mercure et le plomb font également partie de la liste des substances prioritaires de la Directive Cadre sur l'Eau.

Eléments majeurs

Parmi les majeurs, deux éléments, le sodium (Na) et le potassium (K), peuvent être rencontrés à des concentrations supérieures aux normes de potabilité dans les eaux souterraines de Mayotte. Les eaux souterraines de Petite Terre sont enrichies en Na et des eaux souterraines enrichies en K peuvent être rencontrées dans les masses d'eau souterraine de Petite Terre (MG003), du Massif de Digo (MG004) et du Complexe Sud (MG005).

Fer et manganèse

La mobilité du fer et du manganèse, dans les eaux souterraines dépend, d'une part, de la nature des minéraux constituant l'aquifère avec lesquels interagissent les eaux, et d'autre part, des conditions physico-chimiques d'interactions eau-roche. Les concentrations élevées en fer et en manganèse sont principalement liées à des conditions réductrices. Lors de l'évolution du milieu vers des conditions réductrices, le fer et le manganèse présents dans les oxy-hydroxydes sous forme oxydés (Fe^{3+} et Mn^{3+} ou Mn^{5+}) se transforment en forme réduite (Fe^{2+} et Mn^{2+}). Or, les formes réduites du fer et du manganèse sont plus solubles que les formes oxydées, ce qui implique une dissolution des oxy-hydroxydes et donc la mobilisation de fer et de manganèse vers les eaux souterraines (Appelo and Postma, 2005). Lorsque le fer et le manganèse sont associés à de la matière organique dissoute, leur solubilité croît. La dégradation de la matière organique consomme en effet de l'oxygène et rend le milieu plus réducteur : il y a ainsi libération de fer et de manganèse en solution.

Les données historiques et les données des 2 campagnes complémentaires réalisées en basses eaux 2017 et hautes eaux 2018 permettent d'identifier des zones à risque de fond hydrogéochimique élevé en fer et manganèse sur la Grande Terre de Mayotte (Illustration 67 et Illustration 68). Leur indice de confiance de l'estimation est faible à élevé suivant les masses d'eau souterraine.

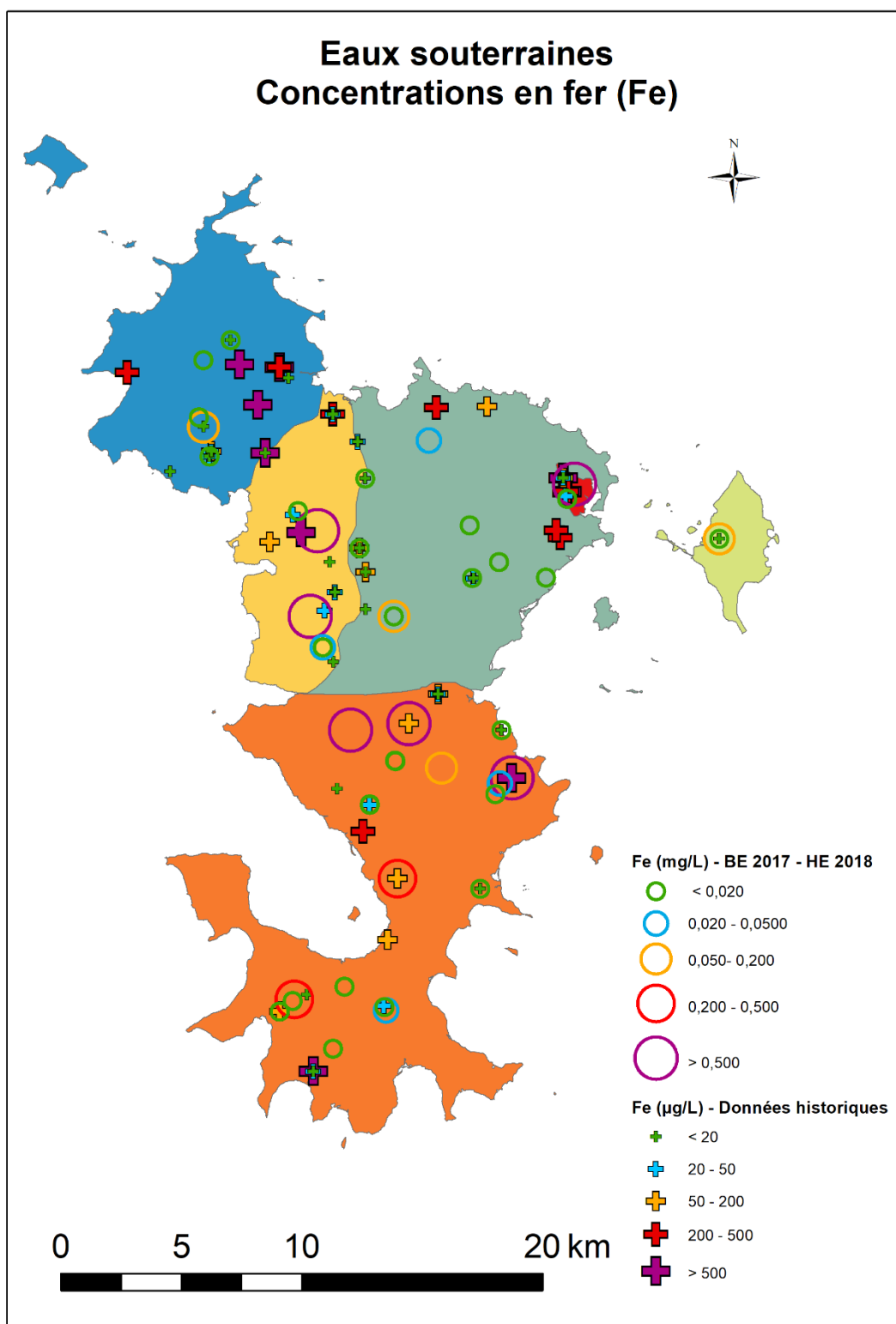


Illustration 67 : Carte des concentrations en fer dans les eaux souterraines de Mayotte..

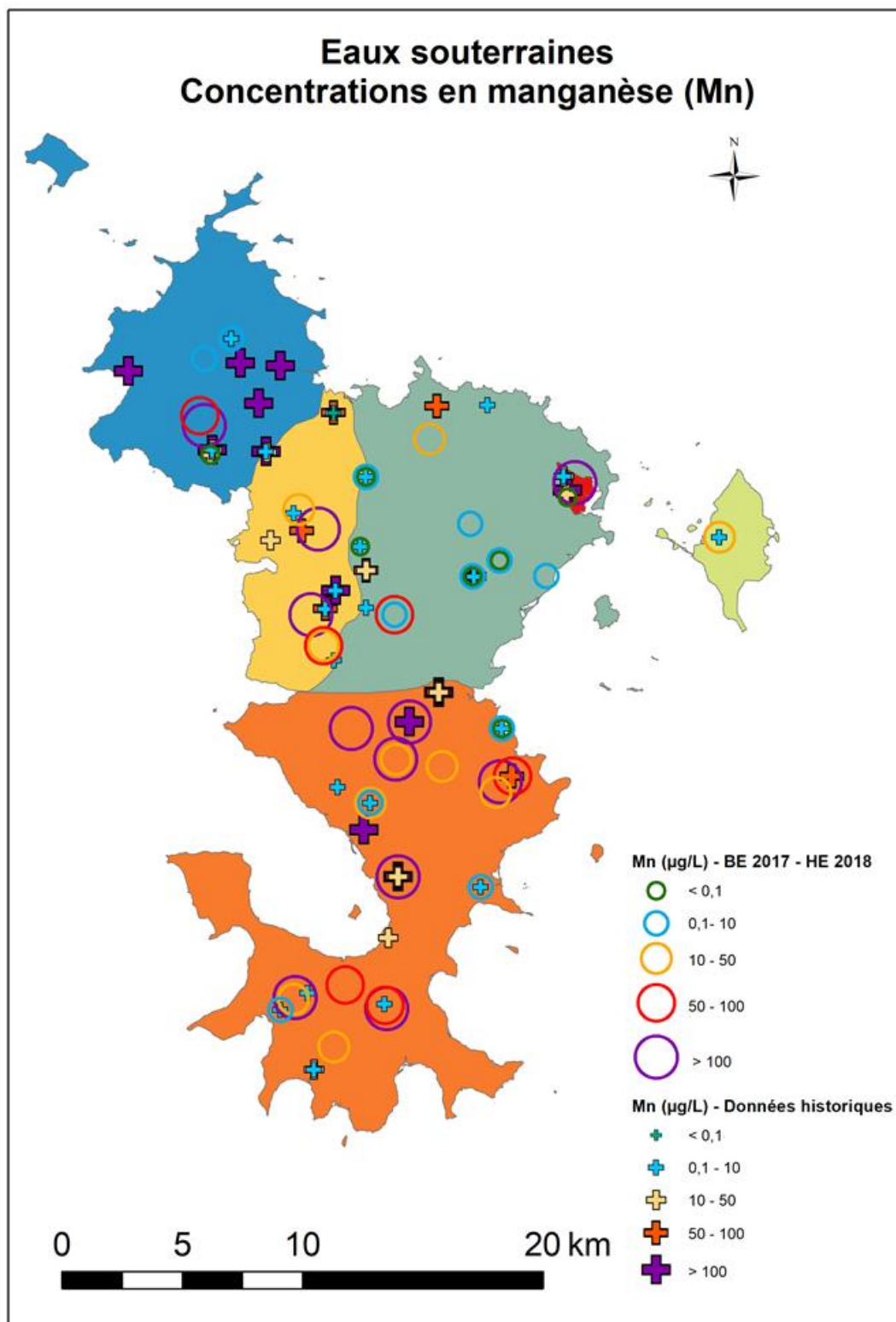


Illustration 68 : Carte des concentrations en manganèse dans les eaux souterraines de Mayotte.

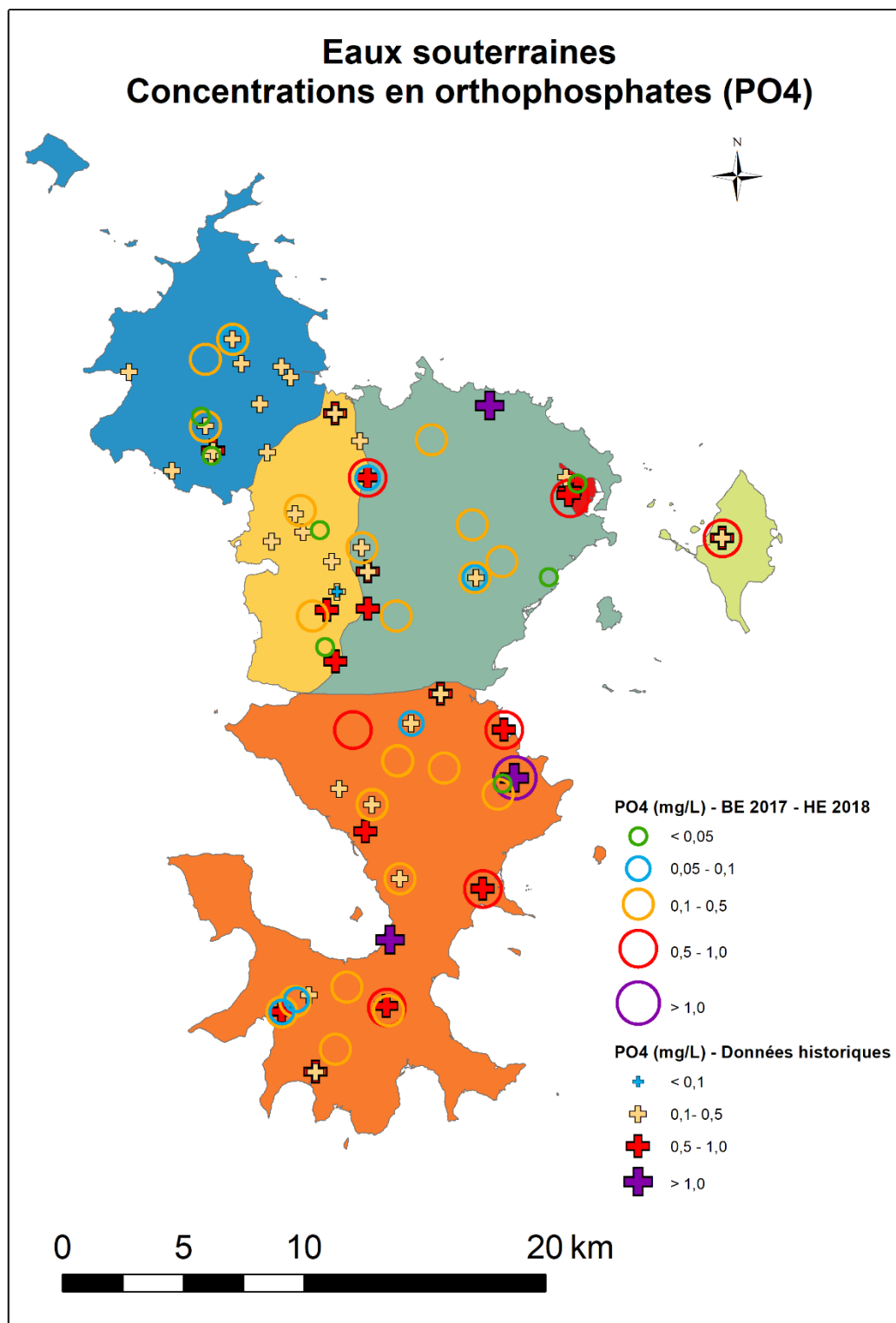


Illustration 69 : Carte des concentrations en orthophosphate dans les eaux souterraines de Mayotte.

Orthophosphate

En domaine volcanique, les concentrations en orthophosphate dans les eaux souterraines peuvent être non négligeables. Par contre, des pressions anthropiques peuvent aussi être à l'origine de certaines valeurs anormales.

Les roches ignées sont les terrains les plus riches en phosphore, viennent ensuite les argiles, les grès et les carbonates. L'apatite ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{Cl}, \text{F}, \text{OH})$) est le principal minéral phosphaté. Ce minéral est aussi un composé accessoire des roches éruptives et métamorphiques, mais également des roches sédimentaires marines. Le phosphore existe sous deux formes : minérale et organique. La première forme est soluble, la deuxième, particulière, n'est pas toujours mobilisable. Les états d'oxydation du phosphore varient entre $-III$ et $+V$, mais l'espèce P^{5+} est largement prédominante dans les eaux naturelles. Le radical orthophosphate PO_4^{2-} , seule forme naturelle du phosphore minéral, est le produit final de la dissociation de l'acide phosphorique H_3PO_4 . (Chery, 2006).

D'après Gourcy et al., 2015, deux principaux processus géochimiques régulent la mobilité des ions phosphates ; le processus d'adsorption/désorption et la précipitation/dissolution des minéraux phosphatés.

Les minéraux phosphatés sont constitués d'ions phosphates et de cations majeurs naturellement présents dans les eaux souterraines tels que le calcium, le fer ou l'aluminium. Les phosphates de calcium sont les plus abondants et présentent la plus grande diversité. Dans les aquifères silicatés ayant un pH légèrement acide, les phosphates d'aluminium (e.g. strengite) et les phosphates de fer (e.g. vivianite) sont les principaux minéraux phosphatés. Les réactions de dissolution et de précipitation des minéraux phosphatés sont en accord avec la théorie de l'état transitoire, ce qui implique que ces réactions reposent sur la formation d'un complexe activé à la surface du minéral précipitant ou se dissolvant. Le facteur d'Arrhenius associé à la formation des complexes d'activités pour les minéraux phosphatés ayant une valeur élevée, les cinématiques de réactions de dissolution et de précipitation des minéraux phosphatés sont relativement élevées. En conséquence, les réactions de dissolution ou de précipitation des minéraux phosphatés peuvent rapidement et significativement influencer la chimie des eaux souterraines.

D'après l'étude de Gourcy et al., 2015, basée sur les données métropolitaines disponibles dans ADES, les formations volcaniques correspondent à la lithologie qui présente les plus fortes valeurs de centiles 90 pour l'orthophosphate ; la concentration de référence pour les formations volcaniques métropolitaines a été estimée à 0,29 mg/L.

Il n'existe pas de norme de potabilité pour l'orthophosphate, par contre une valeur seuil à 0,5 mg/L a été fixée pour les eaux souterraines ; cette valeur est supérieure à la NQE (concentration moyenne annuelle), qui est de 0,2 mg/L pour les eaux de surface.

D'après les données historiques et les données des deux nouvelles campagnes, BE 2017 et HE 2018, un certain nombre de points d'eau souterraine à Mayotte dépassent la valeur seuil (0,5 mg/L). L'illustration 69 permet de les localiser.

L'ensemble des masses d'eau souterraines de Mayotte présentent un risque de fond hydrogéochimique élevé en orthophosphate, avec un niveau de confiance allant de faible à fort.

Eléments traces indésirables

a) Aluminium

L'aluminium est relativement abondant dans les roches magmatiques. Il entre dans la composition des feldspaths, des feldspathoïdes, des biotites et des amphiboles en se substituant au fer et au silicium. De plus, l'altération des minéraux aluminosilicatés (plagioclase, amphibole) conduit également à la mobilisation de l'aluminium qui précipite sous forme secondaire (argile, hydroxyde d'aluminium). L'aluminium étant peu soluble peut être aussi mobilisé en grande quantité sous formes colloïdale et/ou particulaire dans les eaux souterraines ou superficielles.

La norme de potabilité est fixée à 200 µg/L par l'arrêté AEP du 11 janvier 2007.

Deux masses d'eau souterraine de Mayotte, le Complexe Sud (MG005) et les Alluvions de Kaweni (MG006), présentent un risque de fond hydrogéochimique élevé en aluminium, avec un niveau de confiance faible.

b) Antimoine

L'antimoine est un élément peu abondant dans les roches comme dans les eaux naturelles. Seules les eaux thermales ou les eaux drainant des filons miniers (zones plombifères par exemple) peuvent contenir de fortes concentrations en antimoine (Chery, 2006).

La norme de potabilité est fixée à 5 µg/L (Arrêté AEP du 11 janvier 2007).

Aucune zone à risque de fond géochimique élevé en antimoine n'a été identifiée pour les eaux souterraines de Mayotte.

c) Baryum

Le baryum est relativement abondant dans les roches magmatiques. Le principal minéral contenant du baryum est la barytine (BaSO_4). Il peut également entrer dans la composition des feldspaths (Chery, 2006).

Différents paramètres influencent la teneur en baryum dans les eaux : (1) sa présence dans les sols, (2) la faible solubilité de la barytine, (3) la concentration en sulfates dans les eaux et (4) l'adsorption sur des hydroxydes ou des oxydes métalliques (de manganèse en particulier).

De façon générale, les concentrations en baryum dépassent couramment 100 µg/L dans les eaux souterraines. L'OMS fixe une concentration maximale admissible de 700 µg/L.

Aucune zone à risque de fond géochimique élevé en baryum n'a été identifiée pour les eaux souterraines de Mayotte.

d) Bore

Le bore est relativement abondant dans les océans. En milieu volcanique, il sera retrouvé préférentiellement dans les eaux en domaine littoral et au sein de formations épanchées en milieu sous-marin.

La norme de potabilité du bore est fixée à 1 000 µg/L (Arrêté AEP du 11 janvier 2007).

Aucune zone à risque de fond géochimique élevé en bore n'a été identifiée pour les eaux souterraines de Mayotte.

e) Fluor

L'origine principale du fluor dans les eaux souterraines est la dissolution de minéraux fluorés, comme la fluorine. Les aquifères volcaniques ne correspondent pas à un contexte géologique favorable à la mobilisation du fluor dans les eaux souterraines. Par ailleurs, un enrichissement en fluor peut être aussi lié à une intrusion saline et/ou à des venues d'eau hydrothermale.

La norme de potabilité du fluor est fixée à 1 500 µg/L (Arrêté AEP du 11 janvier 2007).

A Mayotte, les eaux souterraines de Petite Terre présentent un fond géochimique élevé en fluor avec un indice de confiance élevé.

f) Cuivre

Le cuivre et le zinc sont deux éléments associés dans les roches aux minéraux ferromagnésiens (olivine, amphibole, biotite) (Selinus, 2005) ainsi qu'aux processus fumeroliens et/ou hydrothermaux (Pons et al., 1989). D'un point de vue anthropique, ces deux éléments peuvent également être associés aux produits phytosanitaires.

Les caractéristiques physico-chimiques (faible solubilité, adsorption) du cuivre n'autorisent généralement pas l'existence de fortes concentrations dans les eaux naturelles. Celles-ci ne dépassent habituellement pas 1 µg/L, même si des valeurs plus fortes sont possibles à un pH plus acide et s'il y a oxydation des sulfures de cuivre.

La norme de potabilité pour le cuivre est de 2 000 µg/L (Arrêté AEP du 11 janvier 2007). À titre indicatif, la Norme de Qualité Environnementale (NQE) est fixée à 1,4 µg/L.

Aucune zone à risque de fond géochimique élevé en cuivre n'a été identifiée pour les eaux souterraines de Mayotte.

g) Zinc

Le zinc est relativement plus soluble que le cuivre et le nickel. Le zinc s'adsorbe facilement sur certaines surfaces minérales et peut co-précipiter limitant ainsi sa concentration dans les eaux naturelles. Néanmoins, les plus fortes concentrations connues dans la littérature sont de quelques centaines de µg/L.

La norme de potabilité pour le zinc est de 5 000 µg/L (Arrêté AEP du 11 janvier 2007). La Norme de Qualité Environnementale (NQE) pour les cours d'eau est fixée à 7,8 µg/L.

Aucune zone à risque de fond géochimique élevé en zinc n'a été identifiée pour les eaux souterraines de Mayotte.

Éléments traces toxiques

a) *Arsenic*

En solution, l'arsenic se présente essentiellement sous forme inorganique. La forme trivalente (As III) domine en milieu réducteur et peut co-précipiter avec du soufre pour former des sulfures. En milieu oxydant, la forme pentavalente (As V) prédomine et tend à être adsorbée ou à co-précipiter avec des hydroxydes de fer. Les conditions d'oxydo-réduction sont donc essentielles dans le contrôle de la mobilité de l'arsenic. Selon les contextes hydrogéologiques, des concentrations dans les eaux souterraines de quelques µg/L à quelques dizaines µg/L d'arsenic sont observées dans les environnements favorables.

La norme de potabilité pour l'arsenic est de 10 µg/L (Arrêté AEP du 11 janvier 2007).

Aucune zone à risque de fond géochimique élevé en arsenic n'a été identifiée pour les eaux souterraines de Mayotte.

b) *Cadmium*

Les propriétés chimiques du cadmium sont proches de celles du zinc, mais il est nettement moins abondant. Il est généralement présent dans des minerais de zinc souvent associés aux filons hydrothermaux. Il est aussi couramment associé à la pyrite. Le cadmium peut co-précipiter avec des oxydes de manganèse. Ces propriétés limitent sa concentration dans les eaux naturelles.

Dans la littérature, il existe ainsi très peu de concentration significative en cadmium d'origine naturelle (Chery, 2006).

La norme de potabilité pour le cadmium est de 5 µg/L (Arrêté AEP du 11 janvier 2007).

Aucune zone à risque de fond géochimique élevé en cadmium n'a été identifiée pour les eaux souterraines de Mayotte.

c) *Chrome*

Le principal minéral contenant du chrome est la chromite (FeCr_2O_4). Le chrome se substitue aisément au fer ferrique, ce qui lui vaut d'être présent dans de nombreux minéraux silicatés fréquemment rencontrés en Martinique (pyroxènes, amphiboles, micas) (Chery, 2006). Il est néanmoins peu mobile dans les eaux souterraines du fait de sa forte affinité avec les oxyhydroxydes de fer ou de manganèse.

La norme de potabilité pour le chrome est de 50 µg/L (Arrêté AEP du 11 janvier 2007).

Un pH alcalin (>7) et un milieu oxygéné favorisent la mise en solution du chrome. En théorie, les eaux souterraines drainant des roches mafiques et ultra-mafiques ayant une signature plus basique pourraient être enrichies en chrome.

Aucune zone à risque de fond géochimique élevé en chrome n'a été identifiée pour les eaux souterraines de Mayotte.

d) Mercure

Dans les eaux naturelles, la forme stable du mercure est la forme dissoute, non ionisée $\text{Hg}_{(\text{aq})}$. Le mercure peut former différents complexes comme avec le chlorure ou avec le radical méthyl, pour former HgCH_3^+ , le méthylmercure qui se décompose très lentement (Chery, 2006).

La concentration en mercure dans les eaux souterraines ne dépasse généralement pas 1 $\mu\text{g/L}$. Les valeurs se situent le plus souvent autour de 0,01 $\mu\text{g/L}$. Des concentrations en mercure d'origine naturelle supérieures au seuil analytique sont rares en raison d'une faible solubilité des complexes qu'il forme, de l'adsorption.

En revanche, la présence de mercure peut être l'indicateur d'une activité géothermale. Son origine peut aussi être liée à l'origine volcanique des dépôts constitutifs de l'aquifère.

La norme de potabilité pour le mercure est de 1 $\mu\text{g/L}$ (Arrêté AEP du 11 janvier 2007).

Aucune analyse de mercure n'est disponible dans les données historiques. Lors des campagnes complémentaires réalisées en basses eaux 2017 et hautes eaux 2018, les concentrations en mercure mesurées dans les eaux souterraines et superficielles sont souvent très faibles, voire inférieures à la limite de quantification.

Néanmoins, lors de la campagne en hautes eaux 2018, deux points d'eau souterraine (un piézomètre et une source) situés sur la commune de Kani-Keli et appartenant au Complexe Sud ont indiqué des concentrations en mercure élevées, dépassant nettement la norme de potabilité (1 $\mu\text{g/L}$).

Ces concentrations en mercure élevées (>1,5 $\mu\text{g/L}$) sont vraisemblablement liées à la nature de l'aquifère. Un fond hydrogéochimique localisé a donc été identifié pour le mercure, dans le sud du Complexe Sud, avec un indice de confiance élevé.

Lors de la campagne HE 2018, des captages d'eau en rivière et/ou de source pour l'alimentation de la population ont été repérés sur le terrain à proximité des points de prélèvement, il paraît important de mettre en place une caractérisation plus précise de cette zone à risque de fond hydrogéochimique élevé en mercure, et de mieux en comprendre l'origine.

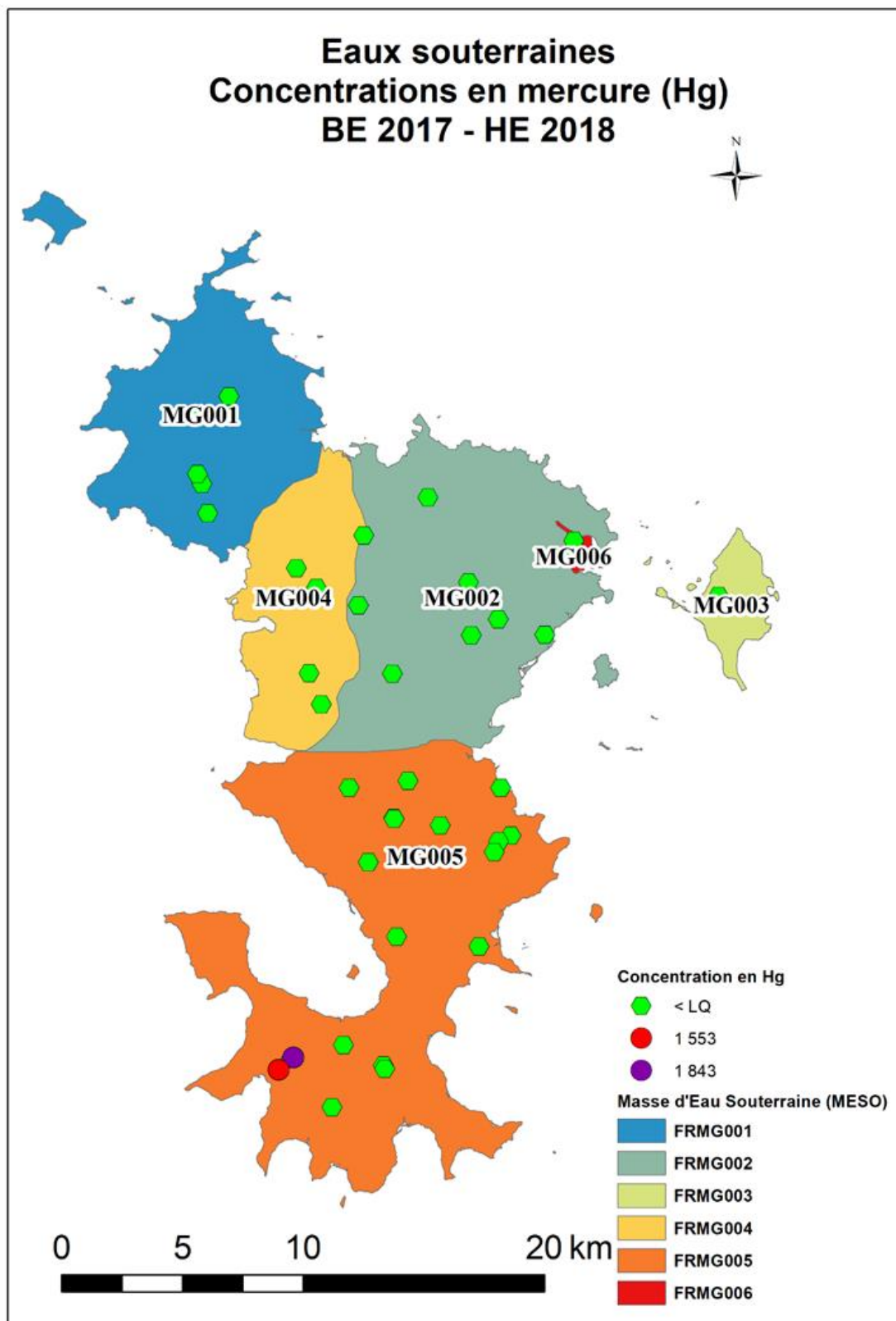


Illustration 70 : Carte des concentrations en mercure (Hg), BE 2017 et HE 2018.

e) Nickel

Le nickel se substitue facilement au fer et au magnésium dans les roches ferromagnésiennes. Il est ainsi principalement présent dans les minéraux sulfurés comme la pyrite ou la pentlandite.

La norme de potabilité pour le nickel est de 20 µg/L (Arrêté AEP du 11 janvier 2007).

Aucune zone à risque de fond géochimique élevé en nickel n'a été identifiée pour les eaux souterraines de Mayotte.

f) Plomb

Le plomb se substitue principalement au potassium, au strontium et au baryum, on le trouve ainsi en trace dans des minéraux potassiques tels que les feldspaths ou les micas. Le plomb est également présent en moindre quantité dans les pyroxènes, les hornblendes, les amphiboles ou les plagioclases (Wedepohl, 1974).

Des concentrations en plomb d'origine naturelle supérieures au seuil analytique restent cependant rares en raison d'une faible solubilité des complexes qu'il forme, de l'adsorption sur diverses surfaces et d'une co-précipitation possible avec les oxydes de manganèse (Chery, 2006).

La norme de potabilité du plomb est de 10 µg/L (Arrêté AEP du 11 janvier 2007).

Aucune zone à risque de fond géochimique élevé en plomb n'a été identifiée pour les eaux souterraines de Mayotte.

Un seul point d'eau souterraine, le forage de Kaweni F2 (12307X0014/F2), a enregistré dans les données historiques une forte concentration en plomb (40 µg/L mesurée en 2003) ; compte tenu de la localisation du forage, de sa configuration, et de ses caractéristiques techniques et hydrogéologiques, cette valeur maximale peut être due à une pollution ponctuelle d'origine anthropique, d'autant plus que cette valeur maximale de 2003 coïncide également avec des concentrations maximales en aluminium et en fer.

g) Sélénium

Le sélénium est présent dans les roches sous forme de sulfures ou associé à des hydroxydes de fer. La mise en solution du sélénium s'explique le plus souvent par l'oxydation de sulfures. Enfin, dans les aquifères contenant du sélénium, le front d'oxydation est la zone de l'aquifère où l'eau est la plus riche en sélénium (Chery, 2006).

La norme de potabilité du sélénium est de 10 µg/L (Arrêté AEP du 11 janvier 2007).

Aucune zone à risque de fond géochimique élevé en sélénium n'a été identifiée pour les eaux souterraines de Mayotte.

Zones à risque de fond hydrogéochimique élevé pour les masses d'eau souterraine

Le travail de délimitation des zones à risque de fond hydrogéochimique élevé des eaux souterraines a été réalisé en prenant en compte les données historiques et les données des campagnes complémentaires réalisées en basses eaux 2017 et hautes eaux 2018. Le poids affecté aux données des campagnes complémentaires réalisé en période de basses eaux 2017 et en hautes eaux 2018 a été beaucoup plus important que celui accordé aux données historiques, puisque les points d'eau des campagnes complémentaires ne sont pas influencés par des pollutions anthropiques ; les prélèvements ont été réalisés en respectant le protocole AQUAREF et les résultats d'analyses réalisés aux laboratoires du BRGM Orléans ont des limites de quantification suffisamment basses.

Les résultats des risques de fond hydrogéochimique élevé sont indiqués par masse d'eau souterraine dans le Tableau 52, avec leur indice de confiance (fort, moyen, faible).

Ces résultats par masse d'eau souterraine (MESO) sont également présentés sur l'illustration 71.

Eaux souterraines		Fond hydrogéochimique élevé et niveaux de confiance		
Code MESO	Nom MESO	Elevé	Moyen	Faible
MG001	Complexe du Nord		Mn	Fe, PO ₄
MG002	Massif du Mtsapere		PO ₄	NH ₄ , Mn
MG003	Petite Terre	Na, F	PO ₄	K
MG004	Massif du Digo	Fe, Mn		K, PO ₄
MG005	Complexe du Sud	Mn Hg (loc)	PO ₄	Al, K
MG006	Alluvions de Kaweni	Mn, Fe	PO ₄	NH ₄ , Al

Tableau 52 : Tableau récapitulatif des zones à risque de fond hydrogéochimique élevé, avec niveau de confiance, par masse d'eau souterraine de Mayotte.

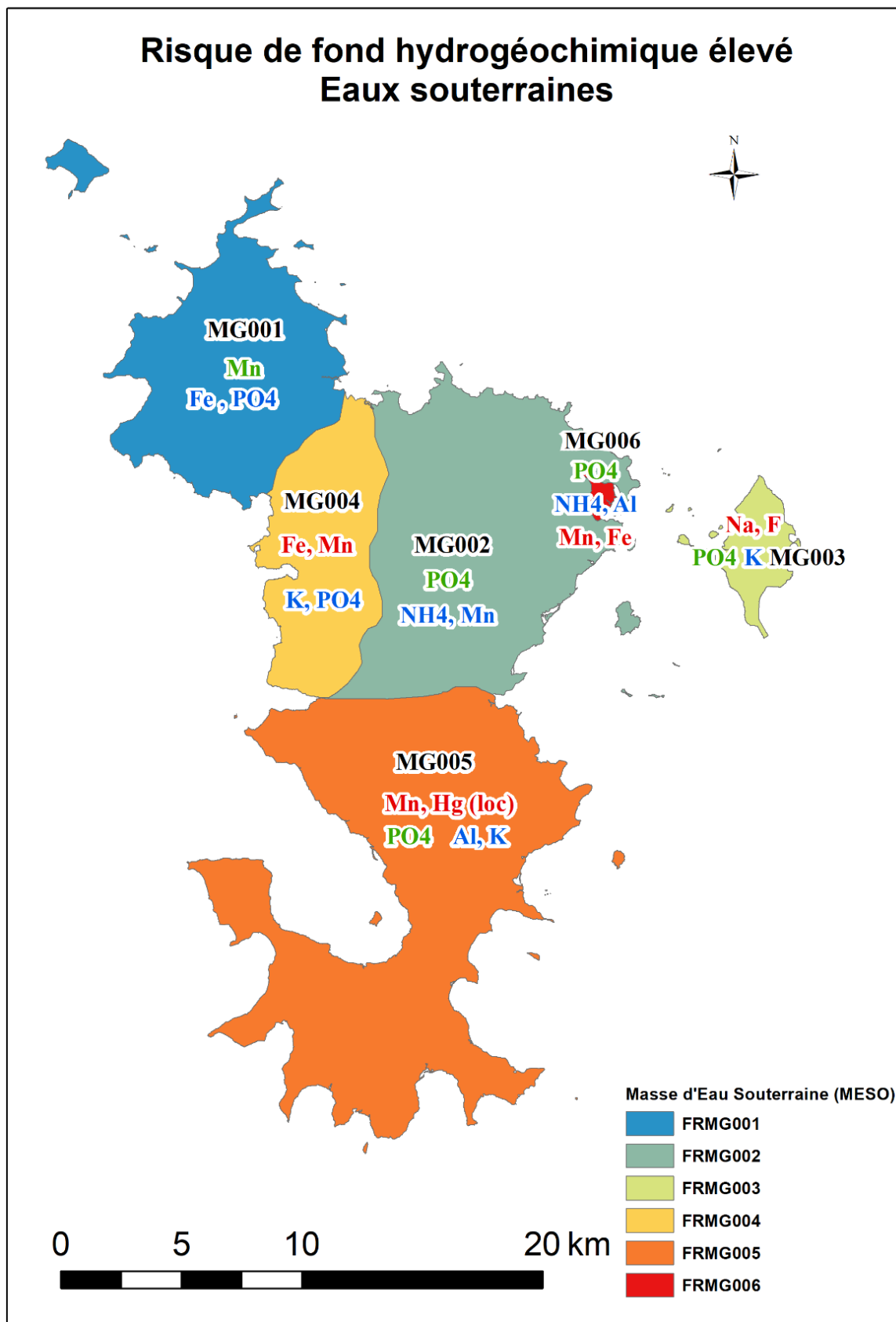


Illustration 71 : Masses d'eau souterraine et risques de fond hydrogéochimique élevé (la couleur du texte indique l'indice de confiance : rouge : élevé, vert : moyen, bleu : faible).

8.3. DETERMINATION DES CONCENTRATIONS DE REFERENCE

Un des objectifs de cette étude est de compléter la connaissance de la qualité des masses d'eau continentale acquise dans le cadre de la surveillance DCE en déterminant les concentrations de référence pour les eaux souterraines et superficielles.

Méthodologie

Les concentrations de référence par entités de fond hydrogéochimique, ici les masses d'eau souterraine (MESO), ont été déterminées pour les éléments majeurs, éléments traces indésirables, les éléments traces toxiques, le fer et le manganèse.

Différentes méthodologies sont possibles, selon les objectifs, selon le jeu de données, la qualité et la quantité des données et la/les masse(s) d'eau ciblée(s).

Les calculs des statistiques descriptives réalisés, et déjà présentés dans ce rapport, comportent : médiane, moyenne, 1^{er} quartile (Q1, centile 25), 3^{ème} quartile (Q3, centile 75), centile 10 et centile 90, description de la distribution des médianes sous forme de boîte à moustaches (box plot).

Pour chaque élément, les concentrations de référence pour une entité de fond hydrogéochimique ont été obtenues en calculant le centile 75 à partir des concentrations en élément mesurées au sein de cette zone. En effet, compte tenu du jeu de données, le choix a été fait d'utiliser le **centile 75 (Q3) comme seuil pour les concentrations naturelles par MESO** (lithologie, etc.). Le centile 75 définit la concentration à partir de laquelle 75 % des points d'eau associé ici à une MESO (ou lithologie, etc..) ont une concentration inférieure. Le centile 75 permet ici de définir des concentrations naturelles guides en dehors de toute influence anthropique et anomalie géogénique.

Concentrations de référence pour les masses d'eau souterraine

Les résultats sont présentés dans le Tableau 53.

Concentrations de référence - Eaux souterraines

Concentrations de Référence – Laix souterraines												
Paramètres		Unité	Complexe du Nord MG001-ESO	Massif du Mtsapere MG002-ESO	Petite Terre MG003-ESO	Massif du Digo MG004-ESO	Complexe du Sud MG005-ESO	Alluvions de Kaweni MG006-ESO	Norme de Qualité Environnementale	Norme de Potabilité	Valeurs seuils nationales	Limite de Quantification (µg/L) Analyses BRGM LAB 2017-2018
Aluminium	Al	µg/L	7,2	2,1	31,2	47,8	3,4	16,4	pas de NQE	200	200	0,5
Antimoine	Sb	µg/L	<LQ	0,64	<LQ	0,65	<LQ	<LQ	pas de NQE	5	5	0,1
Baryum	Ba	µg/L	29	14	45	18	53	7	pas de NQE	700	700	0,05
Bore	B	µg/L	23	17	587	38	21	28	pas de NQE	1000	1000	0,5
Fer	Fe	mg/L	0,02	0,01	0,07	0,67	0,12	0,31	pas de NQE	0,2	0,2	20
Fluorure	F	mg/L	0,3	0,2	29,0	0,1	0,3	0,2	pas de NQE	1,5	1,5	100
Manganèse	Mn	µg/L	32	3	13	142	100	64	pas de NQE	50	50	0,1
Sélénium	Se	µg/L	0,4	0,7	0,1	1,3	0,7	0,9	pas de NQE	10	10	0,1
Arsenic	A	µg/L	0,44	0,70	7,65	0,96	0,18	0,78	0,83	10	10	0,05
Cadmium	Cd	µg/L	0,10	0,13	0,39	0,07	0,13	0,11	0,08	5	5	0,01
Chrome	Cr	µg/L	1,66	1,49	0,12	0,96	0,75	1,33	3,4	50	50	0,1
Cuivre	Cu	µg/L	0,53	1,23	0,19	1,16	0,23	3,79	1	2000	2000	0,1
Mercurure	Hg	µg/L	<LQ	0,03	<LQ	0,03	0,03	0,03	0,07	1	1	0,015
Nickel	Ni	µg/L	0,75	0,74	0,22	4,35	0,33	0,14	4	20	20	0,1
Plomb	Pb	µg/L	0,03	0,69	<LQ	0,69	<LQ	0,77	1,2	10	10	0,05
Zinc	Zn	µg/L	1,5	11,9	0,9	3,4	1,9	28,7	7,8	5000	5000	0,5
Chlorure	Cl	mg/L	27	13	80	67	36	34	pas de NQE	250	250	0,5
Nitrate	NO ₃	mg/L	2,0	1,0	1,1	1,4	0,8	6,7	50	50	50	0,5
Orthophosphate	PO ₄	mg/L	0,3	0,5	0,6	0,2	0,6	0,5	0,5	pas de valeur	0,5	0,05
Sulfate	SO ₄	mg/L	6	3	37	7	7	7	pas de NQE	250	250	0,5
Ammonium	NH ₄	mg/L	0,2	0,1	0,2	0,3	0,1	0,1	0,5	0,5	0,5	0,05
Sodium	Na	mg/L	38	20	396	100	57	42	pas de NQE	200	200	0,5

Tableau 53 : Concentrations de référence déterminées pour masses d'eau souterraine de Mayotte.

8.4. RECOMMANDATIONS POUR LES VALEURS SEUILS POUR LES MASSES D'EAU SOUTERRAINE

Méthodologie

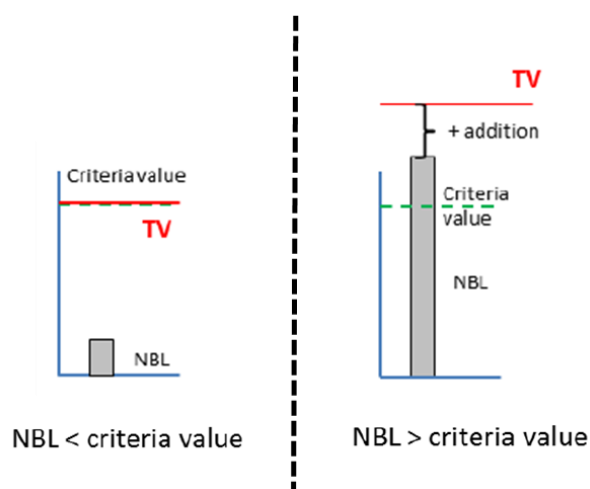
Suite à l'établissement des concentrations de référence pour les eaux souterraines de Mayotte, des propositions de valeurs seuils ont été calculées à partir des données historiques et des données des deux nouvelles campagnes réalisées en basses eaux 2017 et hautes eaux 2018.

Deux cas distincts sont donc à prendre en compte pour la détermination des valeurs seuils proposées (Illustration 72) :

- pour les paramètres ayant une concentration de référence inférieure à la valeur seuil nationale : la valeur seuil nationale est conservée ;
- pour les paramètres ayant une concentration de référence supérieure à la valeur seuil nationale : une nouvelle valeur seuil est proposée ;

Des éléments explicatifs supplémentaires sur les valeurs seuils figurent dans le rapport de Scheidleder A., 2012.

Compte tenu du contexte de Mayotte, du jeu de données disponibles, des délimitations des masses d'eau souterraine et de leurs lithologies, il a été décidé de déterminer les valeurs seuils proposées en cas de dépassement de la valeur critique à partir des centiles 90 ; ceci afin de couvrir des valeurs anormales naturelles dans le risque de fond hydrogéochimique et d'éviter la prise en compte de toute influence anthropique.



Concentration de référence : Natural Background Level (NBL)

Valeur seuil : Groundwater Threshold Value (TV)

Illustration 72 : Schéma explicatif pour proposer de nouvelles valeurs seuils en fonction du fond hydrogéochimique (concentration de référence), d'après Scheidleder, 2012.

Propositions de valeurs seuils par masse d'eau souterraine

Le tableau récapitulatif ci-après synthétise l'ensemble des concentrations de référence et valeurs seuils, par élément et par masse d'eau souterraine.

Propositions de valeurs seuils - Eaux souterraines

Paramètres	Unité	Concentrations de ref.		Propositions Valeurs Seuils		Concentrations de ref.		Propositions Valeurs Seuils		Norme de Potabilité	Valeurs seuils nationales	Limite de Quantification (µg/L) Analyses BRGM LAB 2017-2018
		Complexe Nord MG001-ESO	Complexe du Nord MG001-ESO	Massif du Mtsapere MG002-ESO	Massif du Mtsapere MG002-ESO	Petite Terre MG003-ESO	Petite Terre MG003-ESO					
Aluminium	Al	µg/L	7,2	200	2,1	200	31,2	200	200	200	200	0,5
Antimoine	Sb	µg/L	<LQ	5	0,64	5	<LQ	5	5	5	5	0,1
Baryum	Ba	µg/L										
Bore	B	µg/L	29	700	14	700	45	700	700	700	700	0,05
Fer	Fe	mg/L	23	1000	17	1000	587	1000	1000	1000	1000	0,5
Fluorure	F	mg/L	0,02	0,20	0,01	0,20	0,07	0,20	0,2	0,2	0,2	20
Manganèse	Mn	mg/L	0,3	1,5	0,2	1,5	29,0	30	1,5	1,5	1,5	100
Sélénium	Se	µg/L	32	50	3	50	13	50	50	50	50	0,1
Arsenic	A	µg/L	0,4	10	0,7	10	0,1	10	10	10	10	0,1
Cadmium	Cd	µg/L	0,44	10	0,70	10	7,65	10	10	10	10	0,05
Chrome	Cr	µg/L	0,10	5	0,13	5	0,39	5	5	5	5	0,01
Cuivre	Cu	µg/L	1,66	50	1,49	50	0,12	50	50	50	50	0,1
Mercurure	Hg	µg/L	0,53	2000	1,23	2000	0,19	2000	2000	2000	2000	0,1
Nickel	Ni	µg/L	<LQ	1	0,03	1	<LQ	1	1	1	1	0,015
Plomb	Pb	µg/L	0,75	20	0,74	20	0,22	20	20	20	20	0,1
Zinc	Zn	µg/L	0,03	10	0,69	10	<LQ	10	10	10	10	0,05
Chlorure	Cl	mg/L	1,5	5000	11,9	5000	0,9	5000	5000	5000	5000	0,5
Nitrate	NO ₃	mg/L	27	250	13	250	80	250	250	250	250	0,5
Orthophosphate	PO ₄	mg/L	2,0	50	1,0	50	1,1	50	50	50	50	0,5
Sulfate	SO ₄	mg/L	0,3	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	pas de valeur	0,5	0,5	0,05
Ammonium	NH ₄	mg/L	6	250	3	250	37	250	250	250	250	0,5
Sodium	Na	mg/L	0,2	0,5	0,1	0,5	0,2	0,5	0,5	0,5	0,5	0,05
			38	200	20	200	396	400	200	200	200	0,5

Paramètres	Unité	Concentrations de ref.		Propositions Valeurs Seuils		Concentrations de ref.		Propositions Valeurs Seuils		Norme de Potabilité	Valeurs seuils nationales	Limite de Quantification (µg/L) Analyses BRGM LAB 2017-2018
		Massif du Digo MG004-ESO	Massif du Digo MG004-ESO	Complexe Sud MG005-ESO	Complexe du Sud MG005-ESO	Alluvions de Kaweni MG006-ESO	Alluvions de Kaweni MG006-ESO					
Aluminium	Al	µg/L	47,8	200	3,4	200	16,4	200	200	200	200	0,5
Antimoine	Sb	µg/L	0,65	5	<LQ	5	<LQ	5	5	5	5	0,1
Baryum	Ba	µg/L	18	700	53	700	7	700	700	700	700	0,05
Bore	B	µg/L	38	1000	21	1000	28	1000	1000	1000	1000	0,5
Fer	Fe	mg/L	0,67	0,90	0,12	0,20	0,31	0,40	0,2	0,2	0,2	20
Fluorure	F	mg/L	0,1	1,5	0,3	1,5	0,2	1,5	1,5	1,5	1,5	100
Manganèse	Mn	µg/L	142	170	100	130	64	80	50	50	50	0,1
Sélénium	Se	µg/L	1,3	10	0,7	10	0,9	10	10	10	10	0,1
Arsenic	A	µg/L	0,96	10	0,18	10	0,78	10	10	10	10	0,05
Cadmium	Cd	µg/L	0,07	5	0,13	5	0,11	5	5	5	5	0,01
Chrome	Cr	µg/L	0,96	50	0,75	50	1,33	50	50	50	50	0,1
Cuivre	Cu	µg/L	1,16	2000	0,23	2000	3,79	2000	2000	2000	2000	0,1
Mercurure	Hg	µg/L	0,03	1	0,03	1	0,03	1	1	1	1	0,015
Nickel	Ni	µg/L	4,35	20	0,33	20	0,14	20	20	20	20	0,1
Plomb	Pb	µg/L	0,69	10	<LQ	10	0,77	10	10	10	10	0,05
Zinc	Zn	µg/L	3,4	5000	1,9	5000	28,7	5000	5000	5000	5000	0,5
Chlorure	Cl	mg/L	67	250	36	250	34	250	250	250	250	0,5
Nitrate	NO ₃	mg/L	1,4	50	0,8	50	6,7	50	50	50	50	0,5
Orthophosphate	PO ₄	mg/L	0,2	0,5	0,6	0,7	0,5	0,6	pas de valeur	0,5	0,5	0,05
Sulfate	SO ₄	mg/L	7	250	7	250	7	250	250	250	250	0,5
Ammonium	NH ₄	mg/L	0,3	0,5	0,1	0,5	0,1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,05
Sodium	Na	mg/L	100	200	57	200	42	200	200	200	200	0,5

Tableau 54 : Propositions de valeurs seuils en fonction des concentrations de référence déterminées, par élément et par masse d'eau souterraine de Mayotte.

Les éléments surlignés en jaune sont les éléments qui ont une concentration de référence supérieure à la valeur seuil nationale, et pour lesquels suivant la masse d'eau souterraine une nouvelle valeur seuil peut être proposée.

Les concentrations de référence écrites en rouge correspondent à des concentrations élevées, supérieures à la norme de potabilité et/ou à la valeur seuil nationale.

Les valeurs écrites en rouge et surlignées en jaune dans les colonnes « Propositions Valeurs Seuils » correspondent aux nouvelles valeurs seuils proposées.

9. Zones à risque de fond hydrogéochimique élevé, concentrations de référence des masses d'eau – cours d'eau

9.1. LES MASSES D'EAU – COURS D'EAU

L'unité de surveillance et de gestion des eaux de surface terrestres au titre de la DCE est la masse d'eau de surface. Les masses d'eau superficielle de Mayotte comportent 26 masses d'eau-cours d'eau (Tableau 55).

Code	Nom de la masse d'eau - cours d'eau
Versant Nord Ouest au vent	
FRMR01	Rivière Maré en amont du barrage de Dzoumonyé
FRMR02	Rivière Maré en aval du barrage de Dzoumonyé
FRMR03	Rivière Bouyouni
FRMR04	Rivière Longoni
FRMR05	Rivière Mgombani
FRMR06	Rivière Mroni Kavani
FRMR07	Rivière Mroni Massimoni
FRMR08	Rivière Adrianabé
FRMR09	Rivière Boungoumouhé
FRMR10	Rivière Mroni Beja
FRMR11	Rivière Mroni Batirini
FRMR12	Rivière Chirini
FRMR13	Rivière Mrowalé
FRMR14	Rivière Oourovéni en amont du barrage de Combani
FRMR15	Rivière Oourovéni en aval du barrage de Combani
FRMR16	Rivière Coconi
Versant Est sous le vent	
FRMR17	Rivière Kaouénilajoli
FRMR18	Rivière Majimbini
FRMR19	Rivière Gouloué
FRMR20	Rivière Koualé
FRMR21	Rivière Dembéni
FRMR22	Rivière Hajangua
FRMR23	Rivière Salim Bé
Versant Sud	
FRMR24	Rivière Dagoni
FRMR25	Rivière Bé (Dapani)
FRMR26	Rivière Djalimou

Tableau 55 : Liste des Mases d'eau – Cours d'eau de Mayotte

Les 26 masses d'eau-cours d'eau ne couvrent pas l'intégralité du territoire de Mayotte, comme cela est par exemple le cas de la BD-Carthage (Illustration 12). Certains prélèvements effectués en rivière n'ont pas de masse d'eau - cours d'eau affectées.

9.2. DELIMITATION DES ZONES A RISQUE DE FOND HYDROGEOCHIMIQUE ELEVE

La délimitation des zones à risques de fond hydrogéochimique élevée pour les masses d'eau cours d'eau de Mayotte s'est basée sur les données historiques et les nouvelles données des campagnes complémentaires réalisées en BE 2017 et HE 2018.

Pour les eaux de surface terrestres, il est possible de classer les éléments suivis selon 3 catégories :

- **Nutriments – paramètres physico-chimiques généraux pour les cours d'eau :** nitrate, nitrite, ammonium, orthophosphate ;
- **Eléments traces ayant une NQE :** arsenic, cadmium, chrome, nickel, cuivre, mercure, plomb, zinc ;
- **Eléments traces sans NQE :** aluminium, antimoine, baryum, bore, brome, cobalt, lithium, manganèse, fer, sélénium, strontium.

Parmi les éléments traces ayant une NQE, deux groupes sont suivis : les substances prioritaires et les polluants spécifiques de l'état écologique. Ces éléments sont décrits avec leur code SANDRE et leur NQE dans le Tableau 56.

Les éléments traces sans NQE ne sont pas suivis pour les masses d'eau – cours d'eau.

	Substance	CODE SANDRE	Norme de Qualité Environnementale (NQE) en µg/L
Substances prioritaires de l'état chimique	Cadmium et composés	1388	0,08
	Mercure et composés	1387	0,07 *
	Nickel	1386	4
	Plomb	1382	1,2
Polluants spécifiques de l'état écologique	Arsenic et composés minéraux	1369	0,83
	Chrome	1389	3,4
	Cuivre	1392	1
	Zinc	1383	7,8

* Concentration Maximale Admissible Directive 2013/39/UE

Tableau 56 : Normes de Qualité Environnementale des 8 éléments traces toxiques (arrêté du 27 juillet 2015) – normes en vigueur depuis le 22 décembre 2015 (moyennes annuelles pour les eaux de surface intérieures sauf *). Pour le cadmium valeur de classe d'eau 2 (suivant la dureté de l'eau, 40-50 mg de CaCO₃).

Il est indispensable, notamment pour les éléments traces à très faible NQE de prendre en compte les limites de quantification des analyses.

Résultats des données historiques

Un état des lieux des données historiques des points d'eau – cours d'eau permet de mettre en évidence que :

- Les données historiques concernent 19 des 26 masses d'eau - cours d'eau de Mayotte ;
- 16 cours d'eau ont a minima 4 données ;
- Les limites de quantification (LQ) des données historiques du Cd, Ni, Pb, As, Cr, Cu et Zn sont trop élevées, elles ne permettent pas de se prononcer ;
- Aucune donnée historique ne concerne le mercure (Hg).

De plus, les données historiques peuvent comporter certains points d'eau influencés par des pollutions anthropiques. Le percentile 75 a été préféré au percentile 90 pour déterminer les concentrations de référence, afin d'éviter la prise en compte de toute influence de pollution anthropique. Les calculs de statistiques descriptives réalisés indiquent donc : minimum, maximum, médiane, moyenne, écart type, percentile 25 et percentile 75

Prenons l'exemple de la masse d'eau – cours d'eau de la rivière Bouyouni (FRMR03), qui s'écoule sur les masses d'eau souterraine du Massif du Mtsapéré (MG002) et du Massif de Digo (MG004).

Les résultats des données historiques pour la masses d'eau – cours d'eau de la rivière Bouyouni (FRMR03) indique des valeurs élevées, supérieures aux NQE pour les orthophosphates et l'ammonium. La concentration maximale observée pour l'ammonium (14 mg/L) laisse supposer l'influence d'une pollution anthropique pour un point d'eau.

Les données historiques indiquent également des valeurs élevées en aluminium, fer et manganèse ; ces éléments n'ont pas de NQE définie, par contre les valeurs élevées sont supérieures aux valeurs seuils et normes de potabilité. Elles sont en lien avec les zones à risques de fond hydrogéochimique élevée pour les eaux souterraines.

Données historiques		Paramètres	Unité	Normes de Qualité Environnementale (NQE)	Nombre d'analyses	Minimum	Maximum	1st Quartile	Médiane	3rd Quartile	Moyenne	Ecart-type
FRMR03	Eléments physico-chimiques généraux	NO3 (Nitrate)	mg/L	50	29	0,10	1,00	0,25	0,25	0,25	0,34	0,24
FRMR03		NO2 (Nitrite)	mg/L	0,3	29	0,01	0,05	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
FRMR03		PO4 (Orthophosphates)	mg/L	0,5	29	0,05	1,80	0,11	0,19	0,34	0,31	0,39
FRMR03		NH4 (Ammonium)	mg/L	0,5	29	0,03	14,00	0,03	0,03	0,03	0,53	2,59
FRMR03	Substances prioritaires de l'état chimique	Cd	µg/L	de ≤ 0,08 à 0,25 (par classes)	pas de données							
FRMR03		Hg	ng/L	70								
FRMR03		Ni	µg/L	4								
FRMR03		Pb	µg/L	1,2								
FRMR03	Polluants spécifiques non synthétiques de l'état écologique	As	µg/L	0,83								
FRMR03		Cr	µg/L	3,4								
FRMR03		Cu	µg/L	1								
FRMR03		Zn	µg/L	7,8								
FRMR03	Autres paramètres en lien avec le fond hydrogéochimique des masses d'eau souterraine	Al	µg/L	pas de valeur	29	25,0	566,0	52,8	129,0	288,5	212,3	247,0
FRMR03		Fe	µg/L	pas de valeur	29	110,0	780,0	219,5	311,0	455,0	368,6	203,6
FRMR03		Mn	µg/L	pas de valeur	29	22,0	78,0	32,5	48,5	65,3	49,3	25,1

Tableau 57 : Statistique descriptive des éléments pris en compte pour les eaux de surface, exemple de la masse d'eau – cours d'eau FRMR03.

L'ensemble des données historiques pour ces éléments ont été prises en considération ; il en ressort que :

- Des valeurs de concentrations en Fe, Mn et Al élevées peuvent être rencontrées dans les eaux de surface ; mais ces éléments ne sont pas suivis à proprement parler pour les eaux de surface ; par contre, ils peuvent être en lien avec le fond hydrogéochimique des eaux souterraines ;
- Pour les éléments physico-chimiques généraux :
 - aucune valeur élevée n'a été constatée pour le nitrate ;
 - 2 valeurs maximales juste au-dessus de la NQE (0,3 mg/L) ont été constatées pour le nitrite ; elles concernent les masses d'eau - cours d'eau FRMR02 et FRMR19, ayant comme valeurs maximales respectivement 0,36 mg/L et 0,33 mg/L ;
 - des valeurs de concentrations élevées ont été observées pour l'ammonium et les orthophosphates.

Pour l'ammonium (NH_4), les données historiques (Tableau 58) indiquent que 4 masses d'eau – cours d'eau sur 16 ont des valeurs maximales qui sont supérieures ou égales à la NQE (0,5 mg/L). Certains de ces points peuvent être influencés par une pollution d'origine anthropique. Ces résultats doivent être confrontés aux résultats des campagnes complémentaires.

Pour les données historiques des masses d'eau – cours d'eau, les orthophosphates constituent l'élément principal à prendre en considération, avec des valeurs maximales élevées pour une majorité des masses d'eau – cours d'eau. Les résultats des statistiques descriptives des orthophosphates pour les 16 masses d'eau – cours d'eau, ayant à minima 4 données sont présentés dans le Tableau 58.

Le risque principal de fond hydrogéochimique élevé, d'après les données historiques des cours d'eau, concerne les orthophosphates. En effet, 8 masses d'eau – cours d'eau sur 16 sont concernées, il s'agit de FRMR03 ; FRMR04 ; FRMR12 ; FRMR14 ; FRMR19 ; FRMR22 ; FRMR25 et FRMR27. Ces résultats seront confrontés aux résultats des campagnes complémentaires

Eléments physico-chimiques généraux

COURS D EAU	Paramètres	Unité	Normes de Qualité Environnementale (NQE)	Nombre d'analyses	Minimum	Maximum	1st Quartile	Médiane	3rd Quartile	Moyenne	Ecart-type
FRMR02	NH4 (Ammonium)	mg/L	0,5	8	0,03	0,23	0,05	0,07	0,15	0,10	0,08
FRMR02	NO2 (Nitrite)	mg/L	0,3	8	0,01	0,36	0,03	0,03	0,09	0,09	0,13
FRMR02	NO3 (Nitrate)	mg/L	50	8	0,25	3,00	0,46	1,00	1,73	1,23	0,96
FRMR02	PO4 (Orthophosphates)	mg/L	0,5	8	0,02	0,20	0,03	0,05	0,13	0,08	0,08
FRMR03	NH4 (Ammonium)	mg/L	0,5	29	0,03	14,00	0,03	0,03	0,03	0,53	2,59
FRMR03	NO2 (Nitrite)	mg/L	0,3	29	0,01	0,05	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
FRMR03	NO3 (Nitrate)	mg/L	50	29	0,10	1,00	0,25	0,25	0,25	0,34	0,24
FRMR03	PO4 (Orthophosphates)	mg/L	0,5	29	0,05	1,80	0,11	0,19	0,34	0,31	0,39
FRMR04	NH4 (Ammonium)	mg/L	0,5	14	0,03	0,10	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
FRMR04	NO2 (Nitrite)	mg/L	0,3	14	0,01	0,03	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
FRMR04	NO3 (Nitrate)	mg/L	50	14	0,10	1,00	0,25	0,25	0,25	0,31	0,21
FRMR04	PO4 (Orthophosphates)	mg/L	0,5	14	0,16	1,00	0,28	0,31	0,41	0,37	0,22
FRMR08	NH4 (Ammonium)	mg/L	0,5	4	0,03	0,19	0,07	0,11	0,15	0,11	0,12
FRMR08	NO2 (Nitrite)	mg/L	0,3	4	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
FRMR08	NO3 (Nitrate)	mg/L	50	4	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
FRMR08	PO4 (Orthophosphates)	mg/L	0,5	4	0,22	0,32	0,25	0,27	0,30	0,27	0,07
FRMR11	NH4 (Ammonium)	mg/L	0,5	12	0,03	0,60	0,03	0,03	0,03	0,08	0,17
FRMR11	NO2 (Nitrite)	mg/L	0,3	12	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
FRMR11	NO3 (Nitrate)	mg/L	50	12	0,25	0,50	0,25	0,25	0,25	0,29	0,10
FRMR11	PO4 (Orthophosphates)	mg/L	0,5	12	0,05	0,45	0,05	0,14	0,40	0,21	0,17
FRMR12	NH4 (Ammonium)	mg/L	0,5	14	0,03	0,50	0,03	0,03	0,06	0,08	0,13
FRMR12	NO2 (Nitrite)	mg/L	0,3	14	0,01	0,03	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
FRMR12	NO3 (Nitrate)	mg/L	50	14	0,25	0,50	0,25	0,25	0,36	0,31	0,11
FRMR12	PO4 (Orthophosphates)	mg/L	0,5	14	0,03	1,20	0,05	0,30	0,41	0,37	0,33
FRMR13	NH4 (Ammonium)	mg/L	0,5	4	0,03	0,22	0,04	0,06	0,11	0,09	0,09
FRMR13	NO2 (Nitrite)	mg/L	0,3	4	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
FRMR13	NO3 (Nitrate)	mg/L	50	4	0,25	1,20	0,38	0,50	0,85	0,65	0,49
FRMR13	PO4 (Orthophosphates)	mg/L	0,5	4	0,05	0,30	0,05	0,06	0,18	0,14	0,14
FRMR14	NH4 (Ammonium)	mg/L	0,5	6	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
FRMR14	NO2 (Nitrite)	mg/L	0,3	6	0,01	0,03	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
FRMR14	NO3 (Nitrate)	mg/L	50	6	0,25	1,00	0,25	0,25	0,44	0,42	0,30
FRMR14	PO4 (Orthophosphates)	mg/L	0,5	6	0,14	0,60	0,17	0,41	0,53	0,37	0,21
FRMR15	NH4 (Ammonium)	mg/L	0,5	26	0,03	0,33	0,03	0,03	0,03	0,05	0,06
FRMR15	NO2 (Nitrite)	mg/L	0,3	26	0,01	0,09	0,01	0,02	0,03	0,02	0,02
FRMR15	NO3 (Nitrate)	mg/L	50	26	0,10	4,50	0,25	1,15	1,88	1,26	1,13
FRMR15	PO4 (Orthophosphates)	mg/L	0,5	26	0,02	0,30	0,04	0,05	0,06	0,08	0,07
FRMR16	NH4 (Ammonium)	mg/L	0,5	14	0,03	0,17	0,03	0,03	0,09	0,06	0,06
FRMR16	NO2 (Nitrite)	mg/L	0,3	14	0,01	0,10	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02
FRMR16	NO3 (Nitrate)	mg/L	50	14	0,25	1,40	0,25	0,85	1,08	0,74	0,43
FRMR16	PO4 (Orthophosphates)	mg/L	0,5	14	0,02	0,40	0,05	0,05	0,06	0,09	0,10
FRMR19	NH4 (Ammonium)	mg/L	0,5	22	0,03	0,17	0,03	0,03	0,03	0,05	0,05
FRMR19	NO2 (Nitrite)	mg/L	0,3	22	0,01	0,33	0,01	0,01	0,01	0,03	0,07
FRMR19	NO3 (Nitrate)	mg/L	50	22	0,25	4,94	0,25	0,25	0,50	0,75	1,20
FRMR19	PO4 (Orthophosphates)	mg/L	0,5	22	0,04	0,63	0,16	0,21	0,35	0,28	0,19
FRMR20	NH4 (Ammonium)	mg/L	0,5	29	0,03	0,96	0,03	0,03	0,08	0,10	0,21
FRMR20	NO2 (Nitrite)	mg/L	0,3	29	0,01	0,04	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01
FRMR20	NO3 (Nitrate)	mg/L	50	29	0,25	3,09	0,25	0,25	0,50	0,51	0,61
FRMR20	PO4 (Orthophosphates)	mg/L	0,5	29	0,05	0,30	0,11	0,18	0,20	0,17	0,07
FRMR21	NH4 (Ammonium)	mg/L	0,5	12	0,03	0,13	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
FRMR21	NO2 (Nitrite)	mg/L	0,3	12	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
FRMR21	NO3 (Nitrate)	mg/L	50	12	0,25	1,50	0,25	0,25	0,50	0,46	0,39
FRMR21	PO4 (Orthophosphates)	mg/L	0,5	12	0,14	0,42	0,19	0,27	0,36	0,28	0,10
FRMR22	NH4 (Ammonium)	mg/L	0,5	10	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
FRMR22	NO2 (Nitrite)	mg/L	0,3	10	0,01	0,03	0,01	0,02	0,03	0,02	0,01
FRMR22	NO3 (Nitrate)	mg/L	50	10	0,25	0,50	0,25	0,25	0,25	0,28	0,08
FRMR22	PO4 (Orthophosphates)	mg/L	0,5	10	0,10	0,60	0,20	0,30	0,33	0,28	0,14
FRMR25	NH4 (Ammonium)	mg/L	0,5	7	0,03	0,08	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
FRMR25	NO2 (Nitrite)	mg/L	0,3	7	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
FRMR25	NO3 (Nitrate)	mg/L	50	7	0,25	0,50	0,25	0,25	0,38	0,32	0,12
FRMR25	PO4 (Orthophosphates)	mg/L	0,5	7	0,30	0,70	0,39	0,53	0,64	0,51	0,16
FRMR26	NH4 (Ammonium)	mg/L	0,5	14	0,03	0,09	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
FRMR26	NO2 (Nitrite)	mg/L	0,3	14	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
FRMR26	NO3 (Nitrate)	mg/L	50	14	0,25	0,50	0,25	0,25	0,25	0,27	0,07
FRMR26	PO4 (Orthophosphates)	mg/L	0,5	14	0,20	0,50	0,28	0,31	0,40	0,34	0,10

Tableau 58 : Statistiques descriptives des concentrations des éléments physico-chimiques généraux pour 16 masses d'eau - cours d'eau de Mayotte ; données historiques.

Résultats des données des campagnes complémentaires

Les données des campagnes complémentaires réalisées en basses eaux 2017 et hautes eaux 2018 comportent un nombre limité de points d'eau de surface (ESU). De plus, une masse d'eau - cours d'eau n'est représentée que par un seul point d'eau.

Pour rappel dans le chapitre 6.9.2, il a été démontré que des risques de fond hydrogéochimique élevé en Mn, PO₄, Fe existaient pour les 4 masses d'eau souterraines (MG001, MG002, MG004 et MG005).

Eaux superficielles - Campagnes BE 2017 et HE 2018				Fond hydrogéochimique élevé et niveaux de confiance		
Code MESO	Nom MESO	Masse d'eau - Cours d'eau associé	Nb points ESU	Elevé	Moyen	Faible
MG001	Complexe Nord	FRMR08 ; FRMR02	2		Mn	
MG002	Massif du Mtsapere	FRMR04 ; FRMR19	2		PO ₄	
MG003	Petite Terre		0			
MG004	Massif du Digo	FRMR12 ; FRMR13	2	Fe, Mn		PO ₄
MG005	Complexe Sud	FRMR16 ; FRMR21 ; FRMR22 ; Pas de cours d'eau associé (3)	6	Mn	PO ₄	Fe
MG006	Alluvions de Kaweni		0			

Tableau 59 : Risques de fond hydrochimique élevé identifiés pour les eaux de surface, d'après les données des deux campagnes complémentaires réalisées en basses eaux 2017 et hautes eaux 2018, en fonction des masses d'eau souterraine de Mayotte.

Ces résultats sont cohérents avec les données historiques des eaux de surface, mais aussi avec les risques de fond hydrogéochimique élevée identifiées pour les eaux souterraines.

Zones à risque de fond hydrogéochimique élevé pour les masses d'eau – cours d'eau

Le travail de délimitation des zones à risque de fond hydrogéochimique élevé des eaux a été réalisé en prenant en compte les données historiques et les données des campagnes complémentaires réalisées en basses eaux 2017 et hautes eaux 2018.

Au regard des paramètres suivis d'un point de vue réglementaire pour les cours d'eau, à savoir les paramètres physico-chimiques généraux, les substances prioritaires et les polluants spécifiques de l'état écologique, les données historiques et des campagnes complémentaires mettent en avant :

- Parmi les nutriments – paramètres physico-chimiques généraux, pas de risque de fond hydrogéochimique élevé identifiés pour le nitrate, le nitrite et l'ammonium, par contre plusieurs zones à risque de fond hydrogéochimique élevé en orthophosphate ont été mises en avant par les données historiques, les données des nouvelles campagnes mais aussi les données de thèse de Puyraveau (2016) ;
- Pas de risque de fond hydrogéochimique élevé pour les substances prioritaires de l'état chimique (Cd, Hg, Ni, Pb) et les polluants spécifiques non synthétiques de l'état écologique (As, Cr, Cu, Zn).

9.3. CONCENTRATIONS DE REFERENCE POUR LES MASSES D'EAU - COURS D'EAU

Rappel réglementaire

L'unité de surveillance et de gestion des eaux de surface terrestres au titre de la DCE est la masse d'eau de surface. Son état est jugé sur la base des paramètres écologiques et chimiques.

Propositions de concentrations de référence pour les eaux de surface (ESU) - Cours d'eau de Mayotte

Pour 16 des 26 masses d'eau – cours d'eau de Mayotte, les données historiques et celles de deux campagnes complémentaires réalisées en basses eaux 2017 et hautes 2018 permettent d'arriver aux conclusions suivantes :

- Pour les substances prioritaires de l'état chimique (Cd, Hg, Ni, Pb) et les polluants spécifiques non synthétiques de l'état écologique (As, Cr, Cu, Zn) :
 - Pas de zone à risque de fond hydrogéochimique élevé identifié ;
 - Il est conseillé de se référer aux normes de qualité environnementales (NQE) nationales (Tableau 60).
- Pour les paramètres physico-chimiques généraux :
 - Pas de zone à risque de fond hydrogéochimique élevé **pour NH₄, NO₃, NO₂** ; Il est conseillé de se référer aux normes de qualité environnementales (NQE) nationales (Tableau 60).
 - **Des zones à risque de fond hydrogéochimique élevé ont été mises en évidence pour PO₄** ; il est donc conseillé de prendre en compte les concentrations de référence proposées (Tableau 61) et les NQE (Tableau 60).

	Paramètres	Unité	Normes de Qualité Environnementale (NQE)
Eléments physico-chimiques généraux	NO3 (Nitrates)	mg/L	50
	NO2 (Nitrites)	mg/L	0,3
	PO4 (Orthophosphates)	mg/L	0,5
	NH4 (Ammonium)	mg/L	0,5
Substances prioritaires de l'état chimique	Cd	µg/L	de ≤ 0,08 à 0,25 (par classes)
	Hg	ng/L	70
	Ni	µg/L	4
	Pb	µg/L	1,2
Polluants spécifiques non synthétiques de l'état écologique	As	µg/L	0,83
	Cr	µg/L	3,4
	Cu	µg/L	1
	Zn	µg/L	7,8

Tableau 60 : Rappel des éléments physico-chimiques généraux ; des substances prioritaires et des substances spécifiques à suivre pour les masses d'eau – cours d'eau, avec leur NQE.

COURS D EAU	Paramètres	Unité	Proposition - concentration de référence
FRMR02	PO4 (Othophosphates)	mg/L	0,13
FRMR03	PO4 (Othophosphates)	mg/L	0,34
FRMR04	PO4 (Othophosphates)	mg/L	0,41
FRMR08	PO4 (Othophosphates)	mg/L	0,30
FRMR11	PO4 (Othophosphates)	mg/L	0,40
FRMR12	PO4 (Othophosphates)	mg/L	0,41
FRMR13	PO4 (Othophosphates)	mg/L	0,18
FRMR14	PO4 (Othophosphates)	mg/L	0,53
FRMR15	PO4 (Othophosphates)	mg/L	0,06
FRMR16	PO4 (Othophosphates)	mg/L	0,06
FRMR19	PO4 (Othophosphates)	mg/L	0,35
FRMR20	PO4 (Othophosphates)	mg/L	0,20
FRMR21	PO4 (Othophosphates)	mg/L	0,36
FRMR22	PO4 (Othophosphates)	mg/L	0,33
FRMR25	PO4 (Othophosphates)	mg/L	0,64
FRMR27	PO4 (Othophosphates)	mg/L	0,40

Tableau 61 : Propositions de concentration de référence pour 16 des 26 masses d'eau – cours d'eau de Mayotte (en rouge les 2 concentrations supérieures à la NQE).

10. Conclusions

Le travail d'analyse et d'interprétation des données est reparti des premiers résultats de la phase 1 de cette étude (Serniquet et al., 2018). Les points d'eau ont été classés en fonction de leur appartenance aux différentes masses d'eau souterraine de Mayotte ; ce qui a notamment permis de distinguer les eaux de Petite Terre et des eaux de la Grande Terre. Le travail sur la composition en éléments majeurs des eaux souterraines de Mayotte a donc été poursuivi et complété avec les données des campagnes complémentaires réalisées en basses eaux 2017 et hautes eaux 2018.

Les eaux souterraines de la Grande Terre de Mayotte ont un **faciès hydrochimique majoritairement de type bicarbonaté-calcique**. Certains points d'eau du Massif de Digo (MG004) se distinguent avec un faciès bicarbonaté-sodique ou chloruré-sodique. Les eaux de Petite Terre forment quant à elles un pôle stable de faciès bicarbonaté-sodique.

Les eaux de surface ont une signature hydrochimique proche des eaux souterraines, avec principalement des eaux de type bicarbonaté-calcique.

Le travail à l'échelle de la masse d'eau souterraine initié lors de la Phase 1 (Serniquet et al., 2018) a été poursuivi afin d'essayer de distinguer différents pôles, en les reliant si possible avec la nature géologique des formations captées ou lessivées. Certaines masses d'eau souterraine, comme par exemple celle du Massif de Digo (MG004) ou celle du Complexe Sud (MG005) sont caractérisées par des points d'eau à la chimie très différentes. De plus, certaines caractéristiques mises en avant avec les données historiques pour les points d'eau souterraine du Complexe Nord (MG001) n'ont pas été retrouvées avec les données des deux nouvelles campagnes.

Bien que les eaux souterraines de la Grande Terre de Mayotte aient globalement une signature commune, avec des mécanismes communs dans l'acquisition de leur chimie, avec des eaux plus ou moins enrichies en fonction de leur localisation géographique et probablement en fonction de la nature géologique de leur aquifère et de leur temps de séjour ; des différences importantes dans la composition des eaux souterraines au sein d'une même masse d'eau existent.

Dans le cadre de cette étude des fonds hydrogéochimiques de Mayotte, les entités de fond hydrogéochimiques sont les masses d'eau souterraines et les masses d'eau - cours d'eau.

Le travail de délimitation des zones à risque de fond hydrogéochimique élevé a donc été réalisé à la masse d'eau. En zones littorales, l'influence des intrusions salines sur le fond hydrogéochimique est souvent identifiée, ceci n'est pas forcément le cas pour les îles de Mayotte, notamment pour la Grande Terre. En contexte volcanique, le fond hydrogéochimique est généralement élevé en fer, manganèse et parfois aluminium selon le type de formations volcaniques et leur degré d'altération, sachant que ces éléments sont principalement mobilisés sous formes colloïdales. Il a effectivement été mis en évidence **pour la plupart des masses d'eau un risque de fond hydrogéochimique élevé en fer et en manganèse**. Les données des deux campagnes complémentaires n'ont pas confirmé le risque de fond hydrogéochimique élevé en aluminium. Pour ces zones volcaniques, des phénomènes hydrothermaux sont fréquents et localement des zones de risque de fond hydrogéochimique élevé ont pu être délimitées pour les éléments associés comme le fluor ou l'arsenic. **Pour Mayotte, les eaux souterraines prélevées à Petite Terre forment le pôle hydrothermal, un fond hydrogéochimique élevé en fluor, sodium et potassium** a été mis en évidence. Par ailleurs, pour les eaux souterraines et superficielles de Mayotte, **un risque de fond hydrogéochimique élevé en orthophosphate** a été mis en évidence, avec un indice de confiance élevé à faible suivant les masses d'eau.

Cette étude a aussi permis de détecter **une zone à risque de fond hydrogéochimique élevé en mercure**, localisée dans le sud du Complexe Sud (MG005). Il est fortement conseillé de mettre en place une étude spécifique complémentaire afin de mieux caractériser et comprendre cette zone à risque de fond hydrogéochimique élevée en mercure, d'autant plus que lors des campagnes de terrain des captages d'eau en rivière à proximité des points de prélèvement à forte concentration en mercure ont été repérés.

Pour déterminer les concentrations de référence, les résultats du travail d'interprétation des éléments majeurs s'est poursuivi avec des analyses de statistique descriptive ; au vu des résultats le percentile 75 a été choisi pour déterminer les concentrations de référence.

Pour les masses d'eau souterraine, les concentrations de référence ont donc été déterminées pour les éléments majeurs, les éléments traces indésirables, les éléments traces toxiques, le fer, le manganèse et les orthophosphates. Il est conseillé de prendre en compte ces concentrations de référence pour l'état des lieux. Des **propositions de valeurs seuils** ont également été faites pour l'ensemble de ces éléments par masses d'eau souterraine.

Pour les masses d'eau - cours d'eau, les paramètres physico-chimiques généraux (NH_4 , NO_3 , NO_2 et PO_4), les substances prioritaires de l'état chimique (Cd, Hg, Ni, Pb) et les polluants spécifiques non synthétiques de l'état écologique (As, Cr, Cu, Zn) ont été pris en compte ; seuls **les orthophosphates présentent des concentrations élevées nécessitant la détermination de concentrations de référence par masses d'eau - cours d'eau.** Pour les zones à risque de fond hydrogéochimique élevé en PO_4 , il est donc conseillé de prendre en compte les concentrations de référence proposées et les normes de qualité environnementale.

11. Bibliographie

Appelo C.A.J. and Postma D., 2005. Geochemistry, groundwater and pollution. 2nd Edition, A.A. Balkema Publishers, 683 p.

Audru, J.-C., Guennoc, P., Thinon, I., Abellard, O., 2006. BATHYMAY: Underwater structure of Mayotte Island revealed by multibeam bathymetry. Comptes Rendus Geoscience 338.

Brenot A., Gourcy L., Allier D., Mascre C., Pons A., Chery L., Blum A., 2007. Identification des zones à risques de fond géochimique élevé en éléments traces dans les cours d'eau et les eaux souterraines. Rapport BRGM/RP-55346-FR, 5 volumes.
<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-55346-FR.pdf>.

Brenot A., Allier D., Dumon A., 2008. Identification des zones à risque de fond géochimique élevé dans les cours d'eau et les eaux souterraines en Guadeloupe. Rapport BRGM RP-55709-FR, 109 p. <http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-55709-FR.pdf>

Busenberg E. and Plummer L.N., 1992. Use of chlorofluorocarbons (CCl₃F and CCl₂F₂) as hydrologic tracers and age-dating tools: The alluvium and terrace system of Central Oklahoma. Water Resour. Res., Vol.28, No. 9, pp. 2257-2283.

Busenberg E. and Plummer L.N., 2000. Dating young groundwater with sulphurhexafluoride – Natural and anthropogenic sources of sulphurhexafluoride, Water Resour. Res., Vol. 36, pp. 3011-3030.

Busenberg E., Weeks E.P., Plummer L.N., Bartholemey R.C. ,1993. Age dating groundwater by use of chlorofluorocarbons (CCl₃F and CCl₂F₂) and distribution of chlorofluorocarbons in the unsaturated zone, Snake River Plain aquifer, Idaho National Engineering Laboratory, Idaho. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations 93-4054, 47 p.

Chery L., 2006. Guide technique. Qualité naturelle des eaux souterraines. Méthode de caractérisation des états de références des aquifères français. BRGM Editions, Orléans, 238 p. ISBN 2-7159-0973-X.

Cook P.G., Solomon D.K., 1995. The transport of atmospheric trace gases to the water table: Implications for groundwater dating with chlorofluorocarbons and Krypton-85. Water Resour. Res., Vol. 31, 263-270.

Cook P.G., Solomon D.K., 1997. Recent advances in dating young groundwater: chlorofluorocarbons, ³H/³He and ⁸⁵Kr, J. Hydrol. 191, 245-265.

Cook P.G., Solomon D.K., Plummer L.N., Busenberg E., Schiff S.L., 1995. Chlorofluorocarbons as tracers of groundwater transport processes in a shallow, silty sand aquifer, Water Resour. Res., Vol. 31, No. 3, 425-434.

Darling W.G., Gooddy D.C. 2007. Assessing the applicability of global CFC and SF₆ input functions to groundwater dating in the UK. Science of the Total Environment, 387, pp. 353-362.

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

Eberschweiler C., 1986. Etude hydrologique, hydrochimie et géochimie isotopique d'une île volcanique sous climat tropical humide, Mayotte. Thèse de doctorat, Université de Paris sud, Orsay, France, 295 p.

Ghestem JP, Crouzet C, Girardot N., 2008. Estimation des fonds géochimiques en éléments traces des eaux de surface continentales et des eaux souterraines : cahier des charges pour l'analyse et le prélèvement. Version 0, BRGM/RP-56835-FR, 44 p.
<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-56835-FR.pdf>

Ghestem JP, Gal F., Moreau P., 2017. AQUAREF - Opérations d'échantillonnage d'eau souterraine dans le cadre des programmes de surveillance DCE - Recommandations techniques – Edition 2017.

Gourcy L., Surdyk N., Devau N., 2015. Le phosphore total et orthophosphate dans les eaux souterraines – Synthèse des informations permettant de répondre à la directive 2014/80. Rapport final. BRGM/RP-65610-FR, 37 p. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-65610-FR.pdf>

Guilbert M., Aunay B., Lachassagne P., Malard A., Mathieu F., 2008. Synthèse hydrogéologique du Nord-Est de Mayotte. Caractérisation des masses d'eau souterraine des secteurs de Petite-Terre et de Tsoundzou-Koungou. Rapport BRGM RP-56600-FR, 79 p.
<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-56600-FR.pdf>

Heaton T.H.E., Vogel J.C., 1981. "Excess air" in groundwater, J. Hydrol., Vol. 50, pp. 201-216.

Ho D.T., Schlosser P., Smethie W.M., Jr. and Simpson H.J., 1998. Variability in atmospheric chlorofluorocarbons (CCl₃F and CCl₂F₂) near a large urban area: Implications for groundwater dating. Environ. Sci. Technol., Vol 32, No. 16, pp. 2377-2382.

IAEA, 2006. Use of chlorofluorocarbons in hydrology: a guidebook. STI/PUB 1238, IAEA, Vienna, 227 p.

INRS, 2000. Fiche toxicologique de l'hexafluorure de soufre, from
http://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?reflNRS=FICHETOX_102

Izuka K., Gingerich S.B., 2003. A thick lens of fresh groundwater in the southern Lihue Basin Kauai, Hawaii, USA. Hydrogeology Journal, 11, pp. 240 - 248.

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.
<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-61757-FR.pdf>

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.
<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-59550-FR.pdf>

Jaouën T., Vittecoq B., Lions J., Gourcy L., avec la collaboration de Winkel A. et Allier D., 2011. Caractérisation hydrogéologique du potentiel en eaux souterraines de Mayotte – Secteur Nord-Ouest. Rapport d'avancement BRGM/RP-59621-FR, 96 p.
<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-59621-FR.pdf>

Lacquement F., Nehlig P., Bernard J., 2013. Carte géologique de Mayotte à 1/30 000.

Lapègue J., 1999. Aspects quantitatifs et qualitatifs de la pluviométrie dans deux enjeux majeurs de la problématique de l'eau à Mayotte : La ressource hydrique & l'assainissement pluvial et l'érosion. Thèse de doctorat, Université de la Réunion, 376 p.

Lebon D., Lachassagne P., 2001. Source Massimoni (commune de Mamoudzou, Mayotte) – Contexte d'émergence, origine de la pollution, vulnérabilité, proposition de solutions. – Rapport BRGM RP-50691-FR 2001 SG/MAY 02. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-50691-FR.pdf>

Le Maitre R.W., Streckeisein A., Zanettin B., Le Bas M.J., Bonin B., Bateman P., Bellieni G., Dudek A., Efremova S., Keller J., Lamere J., Sabine P.A., Schmid R., Sorensen H. and Woolley A.R., 2002. Igneous rocks: A classification and glossary of terms, recommendations of the International Union of Geological Sciences, Subcommittee of the Systematics of Igneous Rocks. Cambridge University Press.

McCarthy R.L., Bower F.A. and Jesson J.P., 1977. The fluorocarbon-ozone theory-1. Production and release - World production and release of CCl₃F and CCl₂F₂ (Fluorocarbons 11 and 12) through 1975. Atmos. Environ. 11, pp. 491-497.

MacDonald, A.M., Darling, W.G., Ball, D.F., Oster, H., 2003. Identifying trends in groundwater quality using residence time indicators: an exemple from the Permian aquifer of Dumfries, Scotland. Hydrogeology Journal, Vol. 11, No.4, pp. 504-517.

Malard A., Winckel A., 2008. Définition des réseaux de surveillance DCE de la qualité des eaux souterraines, de surface et côtières de Mayotte – BRGM/RP-56774-FR, 218 p., 48 Ill., 9 ann. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-56774-FR.pdf>

Mazor E., 1972. Paleotemperatures and other hydrological parameters deduced from noble gases dissolved in groundwater: Jordan Rift Valley, Israel. Geochemica Cosmochemica Acta, Vol. 36, pp.1321-1336.

MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE (MEDDE), 2015. Arrêté du 27 juillet 2015 modifiant l'arrêté du 25 janvier 2010 relatif aux méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique, de l'état chimique et du potentiel écologique des eaux de surface pris en application des articles R. 212-10, R. 212-11 et R. 212-18 du code de l'environnement, Journal officiel de la république française, no 0198 du 28 août 2015, p. 15032.

Nehlig P., Lacquement F., Bernard J., Caroff M., Deparis J., Jaouën T., Pelleter A.-A., Perrin J., Prognon C., Vittecoq B., 2013. Notice de la carte géologique de Mayotte à 1/30 000. Rapport BRGM RP-61803-FR. 135 p. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-61803-FR.pdf>

Oster H., Sonntag C. and Munnich K.O., 1996. Groundwater age dating with chlorofluorocarbons. *Water Resour. Res.*, Vol. 32, No. 10, pp. 2989-3001.

Pelleter A.A., 2012. Etude pétrologique, volcanique et géochimique des formations volcaniques récentes de l'île de Mayotte, archipel des Comores, France. Rapport de Master, Université de Brest, 43 p.

Pelleter A.A., Caroff M., Cordier C., Bachèlery P., Nehlig P., Debeuf D., Arnaud N., 2014. Melilite-bearing lavas in Mayotte (France): An insight into the mantle source below the Comores. *Lithos.* 2014, 208-209, pp. 281-297.

Plummer L.N. and Busenberg E., 2000. Chlorofluorocarbons: Tools for dating and tracing young groundwater. In: *Environmental Tracers in Subsurface Hydrology* (P. Cook and A. Herczeg, eds.), Kluwer Academic Publishers, Boston, Chapter 15, pp. 441-478.

Prinn R. G., Weiss R. F., Arduini J., Arnold T., DeWitt H. L., Fraser P. J., Ganesan A. L., Gasore J., Harth C. M., Hermansen O., Kim J., Krummel P. B., Li S., Loh Z. M., Lunder C. R., Maione M., Manning A. J., Miller B. R., Mitrevski B., Mühle J., O'Doherty S., Park S., Reimann S., Rigby M., Saito T., Salameh P. K., Schmidt R., Simmonds P. G., Steele L. P., Vollmer M. K., Wang R. H., Yao B., Yokouchi Y., Young D., Zhou L. 2018: History of chemically and radiatively important atmospheric gases from the Advanced Global Atmospheric Gases Experiment (AGAGE), *Earth System Science Data*, 10, pp. 985-1018.
<https://doi.org/10.5194/essd-10-985-2018>

Pons J-C, Parra M., Ferragne A., Latouche C., 1989. Caractéristiques des argiles hydrothermales de la Martinique – Petites Antilles Françaises. *Applied Clay Science*, 4, pp. 207-325.

Puyraveau R.-A., 2016. Altération de l'île volcanique de Mayotte (Comores) : approches par géochimie des eaux et isotopie du silicium sur les roches des profils d'altération. Thèse de doctorat Université Aix Marseille, 253 p.

Puyraveau R.-A., Rad S., Basile-Doelsch I., Deparis J., Jaouën T., Nehlig P., 2014. Mayotte Critical Zone Observatory: preliminary results on chemical weathering and erosion rates on volcanic edifices. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2014, 10, pp. 73-76.

Santella N., Ho D.T., Schlosser P., Stute M., 2003. Distribution of atmospheric SF₆ near a large urban area as recorded in the vadose zone. *Environmental Sciences and Technologie*, Vol. 37, pp. 1069-1074.

Scheidleder A., 2012. GROUNDWATER THRESHOLD VALUES Aim of The Assessment. In-depth assessment of the differences in groundwater threshold values established by Member States, Umweltbundesamt GmbH, Vienna, 2012, 20 p.

Schultz T.R., Randall J.H., Wilson L.G., Davis S.N., 1976. Tracing sewage effluent recharge – Tucson, Arizona. *Groundwater*, 14, pp.463-470.

Selinus O., 2005. *Essentials of Medical Geology*. Academic Press, London, 812 p.

Serniguet H., Malcuit E., Lions J., Parizot M., Eddam S., Ratsimihara T., 2018. Caractérisation des fonds hydrogéochimiques des eaux souterraines et des cours d'eau de Mayotte. Phase 1 : Synthèse et valorisation des données disponibles Définition d'un programme d'échantillonnage. Rapport BRGM/RP-67461-FR, 78 p. <http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-67461-FR.pdf>

Vittecoq B. Gourcy L., Baran N., 2007. Datation des eaux souterraines de Martinique par l'analyse conjointe des CFC, SF₆ et tritium et relation avec les concentrations en nitrates et produits phytosanitaires. Rapport BRGM/RP-55844-FR, 50 p.
<http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-55844-FR.pdf>

Vittecoq B., Deparis J., Violette S, Jaouën T., Lacquement F., 2014. Influence of successive phases of volcanic construction and erosion on Mayotte Island's hydrogeological functioning as determined from helicopter-borne resistivity survey correlated with borehole geological and permeability data. *Journal of Hydrology*, 509, 2014, pp. 519-538.

Von Rohden C., Kreuzer A., Zongyu C., Aeschbach-Hertig W., 2010. Accumulation of natural SF₆ in the sedimentary aquifers of the North China Plain as a restriction on groundwater dating. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 46, pp. 279-290.

Wedepohl K. H., 1974. Handbook of Geochemistry, Vol II/4: Berlin, Germany, Springer-Verlag.

Annexe 1

Réhabilitation d'anciens forages pour l'alimentation en eau potable

Dans le cadre du plan d'urgence établi suite à la crise hydrique ayant touché l'île fin 2016, 3 forages abandonnés ont été réhabilités dans le but de les exploiter pour l'AEP. Il s'agit des forages de Kawéni 2 (12307X0020/KAOUÉ2), Bandrélé-Dagoni (12313X0033/BAND) et Mréréni 2 (12312X0035/MRERE2). Ceux-ci ont ainsi fait l'objet d'un brossage, suivi d'un air-lift et d'un soufflage. Des essais de pompage sont également prévus afin de déterminer les caractéristiques des ouvrages.

Forage de Kawéni

Cet ouvrage a été anciennement équipé en tant que captage. Aucun écrit officiel ne permet de déterminer la cause de l'arrêt de l'exploitation de celui-ci.

Nettoyage

Dans un premier temps, 2 L de produit anti-algue, utilisé pour le traitement des eaux de piscine (APCA : chlorure d'ammonium quaternaire polymérisé), ont été injectés dans le forage 48h avant l'intervention pour prévenir tout développement de biofilm, d'algue. Les opérations de nettoyage ont démarré le 23/01/2018. La profondeur du niveau statique étant de 3,70 m à cette date.

Le brossage « manuel » a été effectué à l'aide d'une brosse en nylon à un diamètre adapté au forage. Celle-ci a été installée depuis la trappe du toit du local par tige de 3 mètres (Illustration 73). Un premier brossage est donc réalisé jusqu'au fond de l'ouvrage, à 50 m de profondeur.

Le 24/01/2018, la brosse est retirée et le dispositif est démonté tige par tige, permettant ainsi un deuxième brossage lors de la remontée.



Illustration 73 : Opération de brossage dans le forage de Kawéni 2 (à droite).

Le 25/01/2018, une nouvelle tige est installée jusqu'au fond afin de procéder à l'air-lift et au soufflage. L'eau sale est refoulée dans une ravine située à 50 m à l'est de l'ouvrage depuis un flexible dur. L'air-lift est réalisé pendant 4 heures.

Le 26/01/2018, la procédure est reprise et de l'eau brunâtre est évacuée au départ, puis au bout d'une trentaine de seconde, l'eau apparaît plus claire. Après une heure d'air-lift, un premier soufflage est alors effectué pendant quelques minutes afin d'expulser l'eau en surface. Des premiers colliers de serrage rislan sont alors évacués.

L'ensemble du dispositif est ensuite remonté jusqu'à 25 m de profondeur où un nouvel air-lift est réalisé pendant 2h, suivi d'un soufflage durant quelques minutes. L'eau est désormais beaucoup plus claire.

Essais de pompage

Le 29/01/2018, une pompe immergée est installée à 40 m de profondeur, aux 2/3 inférieur des crépines. Les caractéristiques de la vanne installée par le prestataire étant inconnue, un test d'ouverture de celle-ci et de mesures de débits est alors effectué du 29/01/2018 au 31/01/2018. 13 m³ d'eau sont alors pompés au cours de ces tests. Le débit maximal choisi pour l'essai par paliers est fixé à environ 70 m³/h.

Le 01/02/2018, jour des essais par palier, l'ensemble du dispositif disjoncte et les essais sont reportés dans l'attente de l'acquisition d'une nouvelle pompe.

Forage de Bandrélé-Dagoni

Avant de procéder au brossage, une désinfection du forage a été réalisée, avec l'introduction d'une pastille d'eau de javel dans le forage. Le niveau statique a été mesuré le 08/02/2018 à une profondeur de 2,48 m.

Une brosse en nylon adaptée au diamètre du forage (Illustration 74) est installée jusqu'à 50 m de profondeur le 13/02/2018. En raison d'épisodes pluvieux compliquant l'accès du camion destiné à l'installation des tiges, le nettoyage sur Bandrélé a été interrompu et n'a repris que le 18/04/2018. L'ensemble du dispositif est alors complètement retiré, une nouvelle désinfection du forage avant la reprise du brossage depuis le haut jusqu'au fond du forage à 64 m.



Illustration 74 : Opérations de brossage et d'air-lift dans le forage de Bandrélé-Dagoni.

Le 19/04/2018, un premier air-lift (Illustration 74) est effectué à 62 m. Au bout de 2h, l'eau est claire, mais après un arrêt suivi d'une reprise du processus, des impuretés sont présentes. Un soufflage est alors réalisé pendant 15 minutes. Le 20/04/2018, un air-lift est effectué à 30 m de profondeur, le niveau piézométrique étant au départ à 2,40 m, et au bout de 15 minutes à 16,10 m. L'opération est arrêtée au bout de 2h avec un niveau mesuré à 16 m. S'ensuit un soufflage d'une heure à 32 m. Le 23/04/2018, avant repli du matériel, un dernier soufflage est réalisé pendant 15 minutes.

Forage de Mréréni 2

Ce forage a été exécuté et équipé en exploitation en 2000. A ce jour, aucun élément bibliographique ne permet de connaître les modalités d'exploitation, ni les raisons de son retrait du réseau.

Une désinfection du forage (pastille d'eau de javel) a eu lieu 24 h avant les opérations de brossage. Le 24/04/2018, la brosse en nylon conçue spécialement pour le forage de Mréréni 2 (Illustration 75) est installée depuis la trappe du local. Le brossage est effectué le 25/04/2018 jusqu'au fond du forage soit à 69 m. Le 26/04/2018, un deuxième brossage est opéré lors du retrait de la brosse et des tiges.



Illustration 75 : Opération de brossage dans le forage de Mréréni 2.

Le matériel destiné à l'air-lift est ensuite placé à 68 m de profondeur. Le prestataire a dans premier temps procéder à une phase de soufflage durant 30 minutes. Lors de cette étape, du sable a été évacué du forage. Le lendemain, le 27/04/2018, un air-lift est lancé pendant 2h à 68 m, puis 1h à 63 m. Le 02/05/2018, l'ensemble du dispositif est remonté à 38 m pour un air-lift d'une heure. S'ensuit finalement un soufflage à cette même profondeur pendant 1h30.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale Mayotte

Immeuble Jacaranda,
Les Hauts Vallons

97600 Mamoudzou - France

Tél. : 02 69 61 28 13