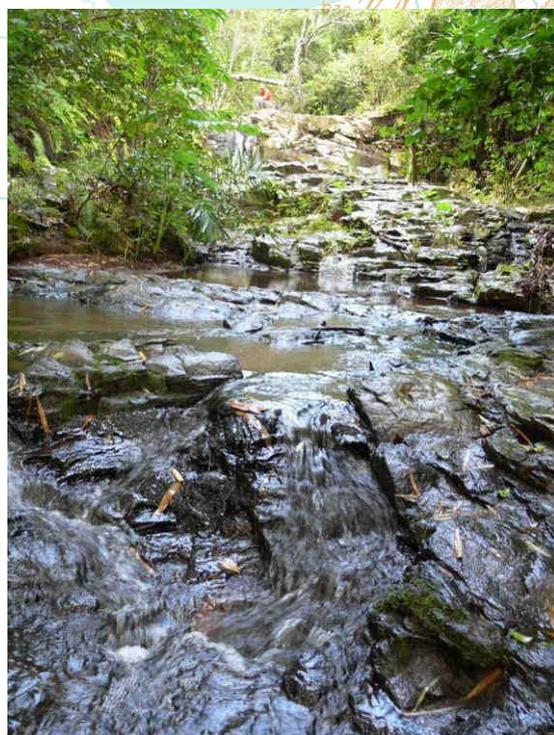
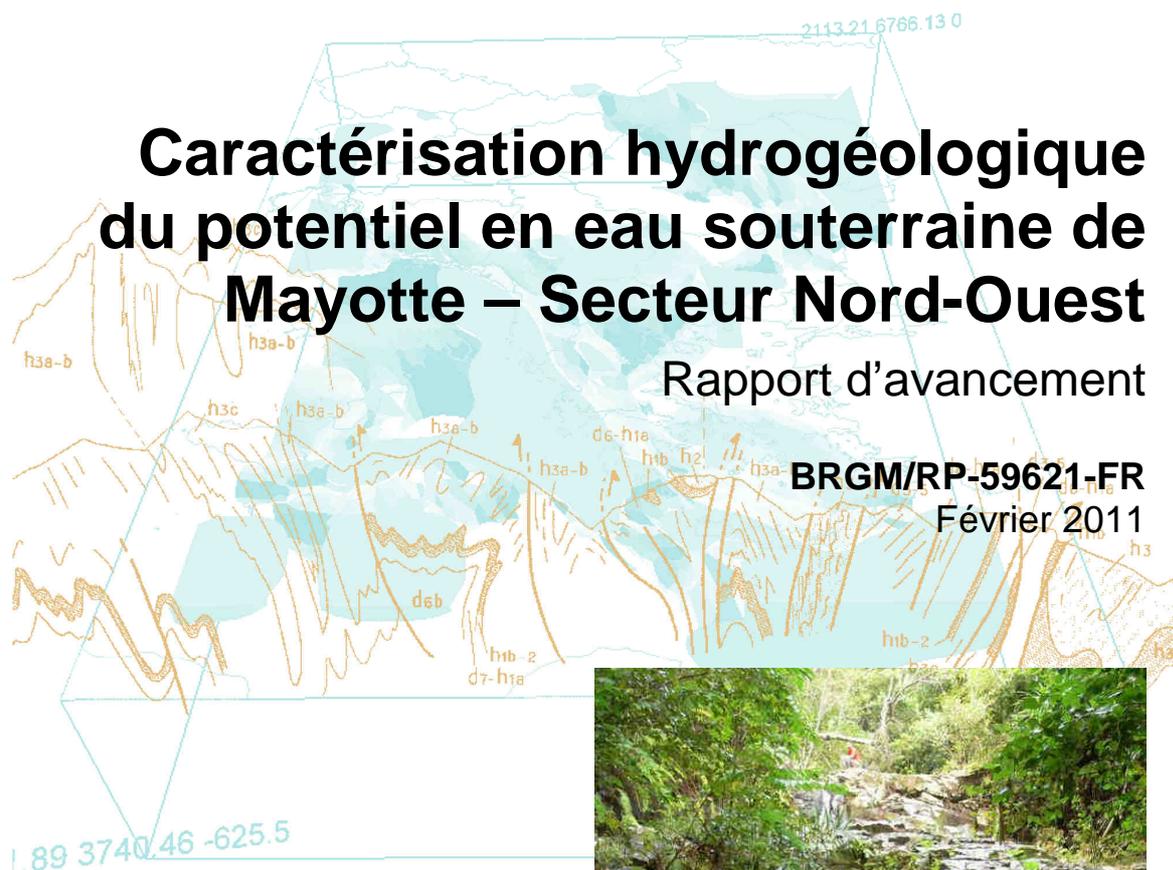




# Caractérisation hydrogéologique du potentiel en eau souterraine de Mayotte – Secteur Nord-Ouest

Rapport d'avancement

BRGM/RP-59621-FR  
Février 2011





# Caractérisation hydrogéologique du potentiel en eau souterraine de Mayotte – Secteur Nord-Ouest

Rapport d'avancement

**BRGM/RP-59621-FR**  
Février 2011

Étude réalisée dans le cadre des projets  
de Service public du BRGM 2010-2011 SP11MAY07 avec le  
soutien de l'ONEMA (convention n°7402) et du SIEAM

**Jaouën T., Vittecoq B., Lions J., Gourcy L.**  
Avec la collaboration de  
**Winckel A. et Allier D.**

**Vérificateur :**

Nom : Blum Ariane

Date : 22/02/2011

Signature :



**Approbateur :**

Nom : Puvilland Pascal

Date : 23/02/2011

Signature :



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

**Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.**

**Mots clés :** Hydrogéologie, eaux souterraines, Mayotte, volcanisme, aquifère, CFC, géophysique

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

Jaouën T., Vittecoq B., Lions J., Gourcy L. avec la collaboration de Winckel 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., 34 ill., 9 tab.

© BRGM, 2010, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l’autorisation expresse du BRGM.

## Synthèse

L'évolution économique et démographique de Mayotte engendre des besoins en eau sans cesse croissants. Au regard de cette pression constante sur les ressources en eau mais aussi au regard de leur vulnérabilité, les travaux visant à accroître notre connaissance de l'hydrogéologie locale et des potentiels d'exploitation s'avèrent prioritaire pour une gestion durable de ces ressources.

Or, le degré de connaissance des formations du sous-sol et de sub-surface de Mayotte est insuffisant pour caractériser la géométrie des structures volcaniques et le développement des profils d'altération qui conditionnent l'écoulement des eaux souterraines. La caractérisation hydrogéologique de Mayotte s'impose donc comme une démarche essentielle pour la connaissance et la gestion durable de ses ressources en eau.

Ce projet répond également aux objectifs de la Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE - 2000/60/CE) qui vise à la préservation des milieux naturels. Dans cette démarche, l'acquisition de connaissance est primordiale pour identifier le fonctionnement des hydrosystèmes naturels.

Pour échelonner ce travail, Mayotte a ainsi été découpée en trois secteurs d'étude correspondant aux grandes unités structurales : (1) le secteur Nord-Est rassemblant le Massif du Mtsapéré et Petite Terre (1<sup>ère</sup> phase d'étude réalisée en 2007-2008 : Gilbert & al. 2008) ; (2) le secteur Nord-Ouest rassemblant le Complexe du Nord et le Massif de Digo (2<sup>ème</sup> phase d'étude, objet de l'étude en cours) et (3) les secteurs Centre et Sud correspondant au bouclier primitif méridional de l'île (3<sup>ème</sup> phase d'étude programmée pour 2011-2012).

Ce rapport présente les résultats des premiers travaux réalisés : (i) la synthèse des données antérieures ; (ii) le compte rendu des reconnaissances géologiques et hydrogéologiques de terrain ; (iii) le compte rendu de la campagne d'analyse chimique et de datation ; (iiii) la proposition d'implantation des profils de la future campagne de prospection géophysique (panneaux électriques).

La poursuite de ce projet comprendra une campagne de prospection géophysique (15 panneaux électriques) qui, calés par rapport aux observations directes (reconnaisances hydrogéologiques, forages) permettront de préciser les modèles conceptuels. En complément, l'interprétation des données de géophysique hélicoptée (électromagnétisme) réalisées dans le cadre du projet GéoMayotte (carte géologique de Mayotte) apporteront également des précisions sur la structure plus globale des Massifs du Nord et de Digo. Enfin, la synthèse de l'ensemble des données acquises permettra d'élaborer des modèles conceptuels, représentation simplifiée du fonctionnement hydrogéologique de la zone d'étude. Par le biais de ces modèles, les zones les plus intéressantes à prospecter seront identifiées. La synthèse contribuera également à la mise en œuvre de la Directive cadre sur l'Eau et en particulier : à l'identification et à la caractérisation des masses d'eau souterraine, à l'évaluation de

l'état de celles-ci et à la mise en œuvre d'un programme de mesures visant à restaurer ou à préserver l'état chimique et quantitatif des eaux souterraines de Mayotte.

## Sommaire

<b>1. Introduction .....</b>	<b>9</b>
1.1. CONTEXTE.....	9
1.2. OBJECTIFS .....	10
<b>2. Synthèse bibliographique.....</b>	<b>13</b>
2.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE.....	13
2.2. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE .....	15
<b>3. Prospections géologiques et hydrogéologiques .....</b>	<b>19</b>
3.1. RECONNAISSANCES GEOLOGIQUES .....	21
3.2. RECONNAISSANCES HYDROGEOLOGIQUES .....	31
<b>4. Campagne hydrogéochimique .....</b>	<b>41</b>
4.1. PARAMETRES IN-SITU.....	45
4.2. ELEMENTS MAJEURS .....	47
4.3. ELEMENTS MINEURS.....	50
4.4. DATATION DES EAUX .....	52
4.4.1. Méthode d'échantillonnage et de prélèvement .....	54
4.4.2. Facteurs influençant la détermination des âges apparents.....	56
4.4.3. Modèles de calcul .....	58
4.4.4. Datation des eaux .....	59
<b>5. Proposition d'implantation des panneaux électriques.....</b>	<b>63</b>
<b>6. Etapes à venir.....</b>	<b>67</b>
<b>7. Bibliographie .....</b>	<b>69</b>

## Liste des illustrations

<i>Illustration 1 : Localisation de la zone d'étude (en rouge) par rapport au précédent projet de caractérisation hydrogéologique du Nord-Est (contours noirs : zone d'étude ; hachurés noirs : zones d'investigations géologiques, hydrologiques ou géophysiques de terrain).....</i>	11
<i>Illustration 2 : schéma conceptuel élaboré pour le schéma directeur de la mise en valeur des ressources en eau de Mayotte (Stieltjes L., Rigal D., 1982). .....</i>	15
<i>Illustration 3 : carte des itinéraires et des points d'observations des reconnaissances de terrain de septembre-octobre 2010. ....</i>	20
<i>Illustration 4 : carte synthétique des reconnaissances géologiques. ....</i>	23
<i>Illustration 5 : coupe d'une coulée de type « aa » en mouvement .....</i>	31
<i>Illustration 6 : schéma type d'une coulée andésitique, d'après Westercamp, 1972 .....</i>	32
<i>Illustration 7 : basaltes fissurés et fracturés affleurant dans la rivière Andrianabé .....</i>	33
<i>Illustration 8 : profil d'altération présentant des boules avec des figures d'altération en « pelures d'oignons ».....</i>	33
<i>Illustration 9 : schémas explicatifs du processus d'altération en boules d'une coulée de lave (D'après Graviou et Rançon, 2006) .....</i>	34
<i>Illustration 10 : histogramme des débits spécifiques classés des cours d'eau pérennes jaugés .....</i>	36
<i>Illustration 11 : classement des cours d'eau en fonction de leurs débits spécifiques .....</i>	38
<i>Illustration 12 : points de prélèvement de la campagne d'hydrogéochimie 2010.....</i>	44
<i>Illustration 13 : graphique de la conductivité en fonction du pH – campagne hydrogéochimie 2010 points (oranges : eaux de forage ; points bleus : eaux de source) .....</i>	46
<i>Illustration 14 : diagramme de piper (ESU = eau de surface, ESO = eau souterraine) .....</i>	49
<i>Illustration 15 : résultats d'analyse des éléments mineurs – campagne hydrogéochimie 2010. ....</i>	50
<i>Illustration 16 : Chronique des concentrations dans l'air des CFC et SF<sub>6</sub>.....</i>	54
<i>Illustration 17 : Système de prélèvement utilisé pour les CFC et SF<sub>6</sub>.....</i>	55
<i>Illustration 18 : Schéma du système de prélèvement de l'eau pour analyses de CFC et SF<sub>6</sub> 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 .....</i>	55
<i>Illustration 19 : Tableau récapitulatif des méthodes d'analyses pour la datation .....</i>	56
<i>Illustration 20 : Schéma des modèles d'écoulement par piston et exponentiel.....</i>	59
<i>Illustration 21 : Concentrations (picomol.l<sup>-1</sup> (10<sup>-12</sup>) et femtomol.l<sup>-1</sup> (10<sup>-15</sup>)) en CFC et SF<sub>6</sub> des échantillons de Mayotte – novembre 2010. ....</i>	60
<i>Illustration 22 : Tracé des comparaisons entre les concentrations en SF<sub>6</sub> et CFC-113 et CFC-11 et CFC-12 des eaux de Mayotte – novembre 2010.....</i>	61

<i>Illustration 23 : Synthèse des âges CFC calculés pour les eaux collectées en novembre 2010 selon le modèle exponentiel (EM) et mélange binaire (BM).....</i>	<i>62</i>
<i>Illustration 24 : localisation prévisionnelle des profils électriques par rapport à la géologie.....</i>	<i>65</i>
<i>Illustration 25 : localisation prévisionnelle des profils électriques.....</i>	<i>66</i>
<i>Illustration 26 : Représentation d'un modèle numérique de terrain ou raster d'altitude. ....</i>	<i>81</i>
<i>Illustration 27 : Directions d'écoulements .....</i>	<i>83</i>
<i>Illustration 28 : traitement du modèle numérique de terrain - Etape 2 : directions de flux. ....</i>	<i>84</i>
<i>Illustration 29 : Calcul de la quantité de « flux » de surface accumulée dans chaque cellule (une fois les directions d'écoulements connues, on peut compter pour une cellule donnée, le nombre de cellules qui s'y jette) .....</i>	<i>85</i>
<i>Illustration 30 : Traitement du modèle numérique de terrain - Etape 4 : délimitation des bassins versants et des talwegs. ....</i>	<i>86</i>
<i>Illustration 31 : Méthodes courantes de calcul de la rugosité, LSRI, TRI et VRM.....</i>	<i>87</i>
<i>Illustration 32 : Traitement du modèle numérique de terrain - Calcul de la rugosité. ....</i>	<i>89</i>
<i>Illustration 33 : carte des isohyètes de Mayotte (Lachassagne et al., 2000).....</i>	<i>93</i>
<i>Illustration 34 : Plan de vol hélicoptère réalisé : un total de 2 915 km de profils a été parcouru par l'hélicoptère à basse altitude (40 m au-dessus du sol). ....</i>	<i>97</i>

## Liste des tableaux

<i>Tableau 1 : tableau synthétique de l'histoire géologique du secteur Nord-Ouest. ....</i>	<i>14</i>
<i>Tableau 2 : tableau récapitulatif des résultats des campagnes de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte (1999-2006) pour la zone d'étude. ....</i>	<i>17</i>
<i>Tableau 3 : tableau synthétique de description des affleurements.....</i>	<i>25</i>
<i>Tableau 4 : mesures de débits et calculs des débits spécifiques .....</i>	<i>35</i>
<i>Tableau 5 : tableau récapitulatif des reconnaissances hydrogéologiques. ....</i>	<i>39</i>
<i>Tableau 6 : tableau récapitulatif de la campagne de prélèvement d'eau souterraine. ....</i>	<i>43</i>
<i>Tableau 7 : résultats des paramètres physico-chimiques de terrain – campagne hydrogéochimique 2010.....</i>	<i>45</i>
<i>Tableau 8 : résultats de l'analyse des éléments majeurs – campagne hydrogéochimique 2010.....</i>	<i>47</i>
<i>Tableau 9 : balance ionique - campagne hydrogéochimique 2010. ....</i>	<i>48</i>

## Liste des annexes

<i>Annexe 1 Analyse automatisée du MNT .....</i>	<i>79</i>
<i>Annexe 2 carte des isohyètes de Mayotte.....</i>	<i>91</i>
<i>Annexe 3 Présentation des données de géophysique aéroportée, méthode TEM (Transect ElectroMagnetic).....</i>	<i>95</i>

# 1. Introduction

## 1.1. CONTEXTE

L'évolution économique et démographique de Mayotte engendre des besoins en eau sans cesse croissants. Au regard de cette pression constante sur les ressources en eau mais aussi au regard de leur vulnérabilité, les travaux visant à accroître notre connaissance de l'hydrogéologie locale et des potentiels d'exploitation s'avèrent prioritaire pour une gestion durable de ces ressources.

Or, le degré de connaissance des formations du sous-sol et de sub-surface de Mayotte est insuffisant pour caractériser la géométrie des structures volcaniques et le développement des profils d'altération qui conditionnent l'écoulement des eaux souterraines. La caractérisation hydrogéologique de Mayotte s'impose donc comme une démarche essentielle pour la gestion durable des ressources en eau.

Ce projet répond également aux objectifs de la Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE - 2000/60/CE) qui vise à la préservation des milieux naturels. Dans cette démarche, l'acquisition de connaissance reste prioritaire pour identifier le fonctionnement des hydrosystèmes naturels.

En 2007-2008, sur un cofinancement de la Collectivité Départementale de Mayotte (CDM) et du BRGM, une première phase de la caractérisation des masses d'eau souterraine a été menée sur le secteur Nord-Est<sup>1</sup> de Mayotte. Celle-ci a abouti à une différenciation des unités hydrogéologiques sur la base de leurs propriétés aquifères. Cette étude a également permis d'aborder les problématiques de vulnérabilité et d'exploitation des eaux souterraines. Ce travail s'est appuyé sur la synthèse des données antérieures, des campagnes de prospection géologique et hydrogéologique de terrain et la réalisation de panneaux électriques (6 profils). Les résultats de cette étude ont fait l'objet d'un rapport (Guilbert *et al.*, 2008).

Grâce aux résultats prometteurs de cette première phase, ce programme a été étendu au reste de l'île. Pour échelonner ce travail, Mayotte a ainsi été découpée en trois secteurs d'étude correspondant aux grandes unités structurales :

- le secteur Nord-Est rassemblant le Massif du Mtsapéré et Petite Terre (1<sup>ère</sup> phase d'étude réalisée en 2007-2008) ;
- le secteur Nord-Ouest rassemblant le Complexe du Nord et le Massif de Digo (2<sup>ème</sup> phase d'étude, objet de l'étude en cours, cofinancée par l'ONEMA, le SIEAM et le BRGM.) ;
- les secteurs Centre et Sud correspondant au bouclier primitif méridional de l'île (3<sup>ème</sup> phase d'étude programmée pour 2011-2012).

---

<sup>1</sup> Le secteur Nord-Est correspondant à Petite Terre et aux contreforts littoraux du Massif du Mtsapéré soit la frange littorale de Tsoundzou à Koungou.

## 1.2. OBJECTIFS

Le premier objectif de cette étude est de construire les modèles hydrogéologiques conceptuels du secteur Nord-Ouest, représentation schématique des relations entre la nature et la structure des formations et la circulation des eaux. Ensuite, et en fonction des résultats des reconnaissances de terrain, une délimitation et une caractérisation des ressources en eau souterraine sera proposée de manière à distinguer les formations aquifères au potentiel hydrogéologique intéressant des formations non aquifères, colmatées, altérées, non alimentés ou aux propriétés hydrodynamiques faibles.

L'aboutissement de ce travail sera d'élaborer pour les organismes en charge de la gestion des milieux aquatiques un outil d'aide à la décision tant dans la connaissance des eaux souterraines que pour les programmes de recherche et d'exploitation. Cette phase de caractérisation des eaux souterraines est un préalable nécessaire à la mise en œuvre de la DCE et du programme de mesure du SDAGE 2010-2015. En particulier, ces actions pourront aboutir à une meilleure compréhension des transferts au sein des aquifères, d'une meilleure gestion quantitative de la ressource voire à un redécoupage des masses d'eau souterraines.

Cette étude se déroulera en quatre phases comprenant :

- phase 1 : la synthèse des données existantes et une campagne de reconnaissance hydrogéologique de terrain ;
- phase 2 : l'élaboration de modèles conceptuels par entité hydrogéologique ;
- phase 3 : la réalisation d'une campagne de prospection géophysique au sol comprenant 15 panneaux électriques et l'interprétation des données du TEM<sup>2</sup> qui permettront de valider ou de faire évoluer les modèles conceptuels ;
- phase 4 : l'élaboration d'une synthèse hydrogéologique sur le secteur Nord-Ouest.

Les quatre phases énumérées ci-dessus ne se succéderont pas nécessairement dans le temps. En particulier, l'élaboration de modèle conceptuel sera abordée comme un travail de fond bénéficiant des données antérieures, des résultats des reconnaissances de terrain, des analyses chimiques, de l'étude géomatique...

Enfin, rappelons que les données acquises parallèlement à ce programme à l'occasion de l'actualisation de la carte géologique de Mayotte<sup>3</sup> participeront à l'élaboration des modèles conceptuels. En particulier, les données de géophysique aéroportée (levers magnétiques et électromagnétiques) seront utilisées à des fins de prospection

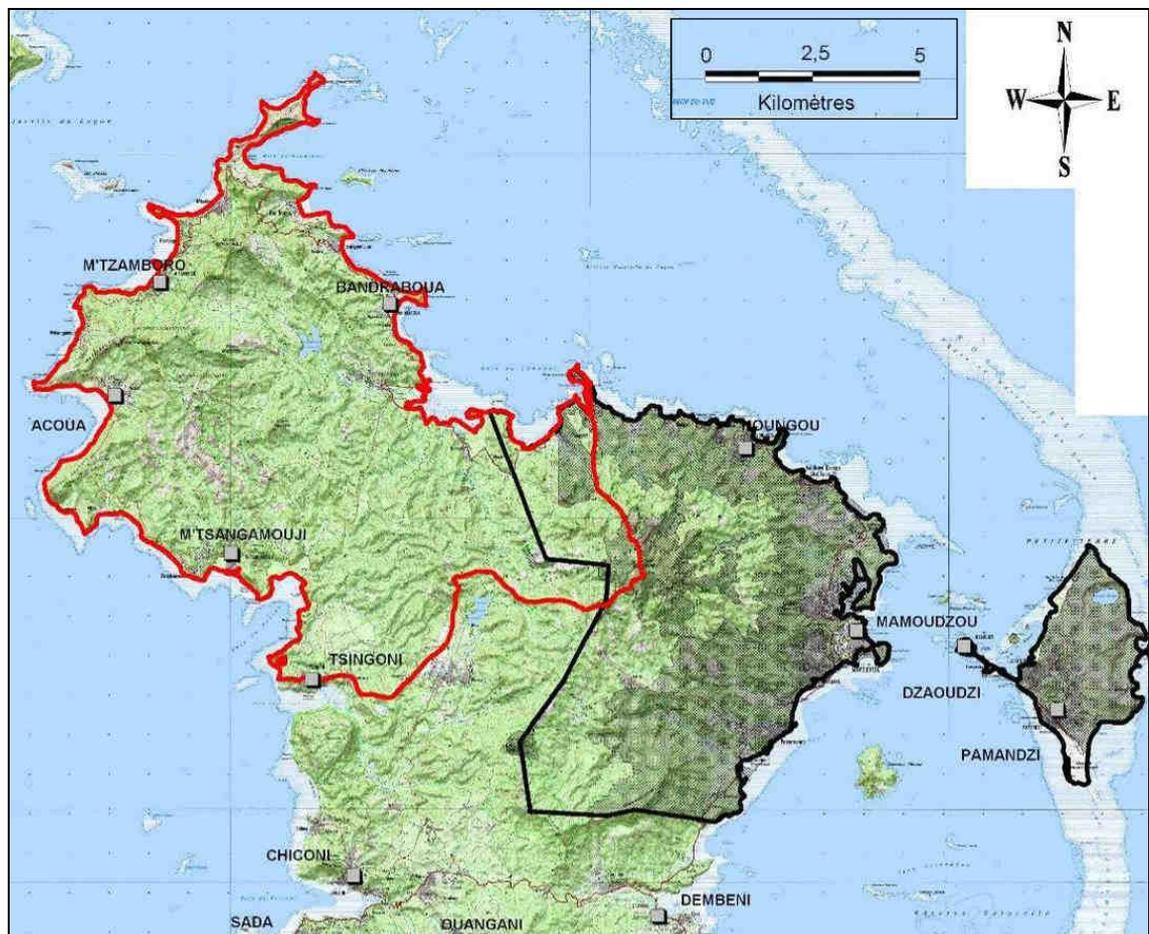
---

<sup>2</sup> *Transect ElectroMagnetic : leviers de géophysique héliportés réalisés à l'occasion de l'actualisation de la carte géologique de Mayotte.*

<sup>3</sup> Programme de Recherche cofinancé par l'Etat et le BRGM

hydrogéologique et de connaissance de la géométrie du sous-sol. De même, les modèles conceptuels seront réalisés en collaboration avec les géologues en charge de la cartographie géologique.

La zone d'étude (voir l'illustration 1) s'intéressera aux formations géologiques définies dans la carte géologique de Mayotte au 1/50 000 (Stieltjes L., 1988) comme appartenant au Massif de Digo, au bouclier ancien septentrional et à l'axe basaltique du Nord. Pour une plus grande cohérence hydrogéologique, les limites de la zone d'étude suivent les limites des grands bassins versants. Seront concernés les bassins hydrologiques de la Bouyouni, de la Méresse, de la Maouéni, de la Maré, de la Kavani, de la Massimoni, de l'Andrianabe, de la Boungoumouhé, de la Béja, de la Batirini, de la Chirini, de la Mrowalé et des bassins versants côtiers de plus faible extension dépourvus de cours d'eau pérennes.



*Illustration 1 : Localisation de la zone d'étude (en rouge) par rapport au précédent projet de caractérisation hydrogéologique du Nord-Est (contours noirs : zone d'étude ; hachurés noirs : zones d'investigations géologiques, hydrologiques ou géophysiques de terrain).*



## 2. Synthèse bibliographique

Une synthèse des données disponibles en bibliographie a été réalisée sur le secteur Nord-Ouest de Mayotte. Ces données proviennent essentiellement :

- des campagnes de recherche et d'exploitation des eaux souterraines antérieures réalisées par le BRGM et par la DAF de Mayotte (prospection en petit diamètre en 1990 puis 4 campagnes entre 2000 et 2006) ;
- de la carte géologiques et les rapports du BRGM traitant de la géologie de l'île ainsi que les diverses contributions à la connaissance du sous-sol recueillies à l'occasion d'études ponctuelles (délimitation des bassins d'alimentation de captage, atlas des risques, définition des réseaux de surveillance DCE, etc.) ;
- de la compilation de publications scientifiques et en particulier des thèses de Debeuf. (2004), de Eberschweiller (1986) et de Lapègue (1999).

Les données recueillies seront utilisées au fil de l'étude en fonction des besoins pour compléter les observations et les reconnaissances. Les deux paragraphes suivants synthétisent les résultats de ces recherches.

### 2.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE

Deux éléments clés caractérisent la géologie de Mayotte : la quasi omniprésence des formations volcaniques, majoritairement constituées de laves de type basaltique et leur profonde altération, jusqu'à plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, qui marque fortement dans le paysage. Les formations sédimentaires sont limitées au récif et à quelques plaines côtières.

Mayotte semble être le résultat d'une évolution volcanologique en 4 phases principales :

1. L'émergence d'un bouclier primitif (via deux, Nord-Ouest et Sud, ou plusieurs volcans coalescents), généralisé à l'ensemble de l'île, dont les coulées de base subaériennes sont datées aux environs de 8 Ma. L'âge du volcanisme initial (basanites et basaltes à néphéline, augite, olivine) est estimé entre 10 et 15 Ma. Dans le Nord-Ouest de l'île, cette phase est datée entre 7 et 4 Ma et l'existence d'un point d'émergence situé en mer au Nord-Ouest de l'île semble en être l'origine.

2. Ensuite, des laves plus différenciées se sont épanchées entre 5 et 2,5 Ma. Ce sont essentiellement des dômes et écoulements phonolitiques présents dans le centre et le sud de l'île. Mais, elles ont également affectées le secteur Nord-Ouest où elles se seraient mise en place le long de grands accidents. Elles arment à présents les reliefs donnant un caractère accidenté à la topographie.

3. le volcanisme basaltique et basanitique du nord-ouest est daté aux alentours de 2 Ma. Il serait relié à une zone de rift distensive de direction N175 (la seule de l'île) qui aurait provoqué une augmentation du taux de fusion permettant la genèse de séries faiblement alcalines (basaltes à olivine). Ces coulées nappent les reliefs de l'extrémité nord-ouest de l'île, à partir d'un centre d'émission situé probablement en mer. Suit la mise en place du massif du M'tsapéré (Massif du M'tsapéré s.s. et Massif de Digo) qui, avec son cortège de phonolites intrusives (1,5 à 1,8 Ma), puis de coulées tardives de vallées (1,4 à 1,5 Ma), traverse et occupe la partie méridionale du rift. L'hypothèse d'un déplacement des émissions volcaniques d'Ouest en Est le long de l'axe N175 est avancée.

4. Une phase trachytique et basaltique très récente avec des structures de type maar bien préservées, en particulier sur Petite Terre (lac Dziani) et au Nord de Mamoudzou (cratères de Cavani et Kawéni). L'île a ensuite été soumise, depuis 1 à 1,5 Ma au moins, à une subsidence d'au moins 70 m qui explique la présence du récif frangeant. Les plaines sédimentaires côtières actuelles correspondent principalement au comblement récent de vallées entaillées lors des bas niveaux marins de l'Holocène (les vallées de la Kwalé et de Tsararano en sont des exemples).

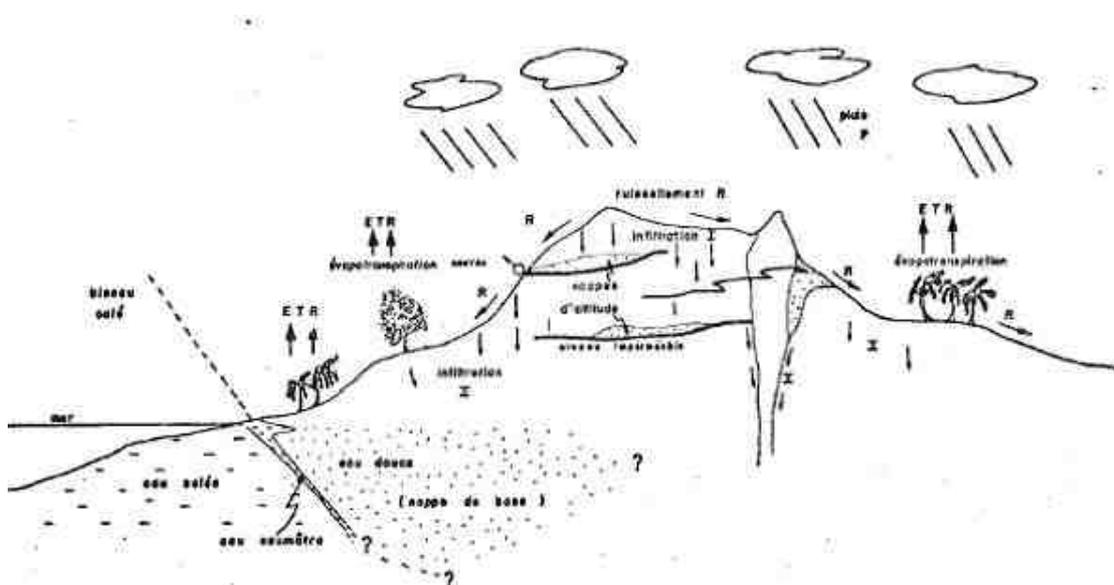
L'histoire géologique du secteur Nord-Ouest est résumée dans le tableau suivant :

Ages (Ma)	Phase de l'évolution du volcanisme	Nature des roches
-7 à -4	<b>Construction du bouclier Nord-Ouest</b> : épanchement de laves sous-saturées et peu alcalines.	Basalte et basanites
-5 à -3,5	<b>Mise en place des intrusions phonolitiques</b> armant les reliefs actuels des zones Nord et Ouest de la zone d'étude.	Phonolites
-3,5 à -2,5	<b>Phase d'érosion ? Emissions de laves ?</b>	Inconnue
-2,5 à -1,5	<b>Réactivation de l'activité volcanique</b> : augmentation du taux de fusion par amincissement de la lithosphère associée à un phénomène régional de nature extensive. Emission de séries sous-saturées et faiblement alcalines	Basaltes à olivine, dykes de téphrite
-2 à 0,8	<b>Mise en place des laves différenciées du Massif de Digo.</b> Séries plus alcalines que les laves antérieures	Basaltes et téphrites
-0,8 à aujourd'hui	<b>Phase d'érosion</b> , d'incision des vallées et de démantèlement des reliefs.	Dépôts sédimentaires (détritiques terrigènes)

Tableau 1 : tableau synthétique de l'histoire géologique du secteur Nord-Ouest.

## 2.2. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

Les premières études hydrogéologiques de l'île de Mayotte datent du début des années 1980. La première synthèse hydrogéologique des ressources en eau souterraine (Stieltjes L., Rigal D., 1982 ; Daessle M., Verrez P., 1987), comprenant des prospections hydrogéologiques et géophysiques (63 sondages électriques répartis sur 11 sites) a abouti à la réalisation d'une campagne de forage de reconnaissance en 1990. 18 forages (dont 3 dans la zone d'étude) répartis sur 15 sites ont été implantés. A défaut de matériel disponible, ces forages carottés réalisés en petit diamètre (100-110 mm), ont permis de montrer la bonne qualité des eaux souterraines, par rapport aux intrusions marines (sauf dans le cas de Petite Terre) et l'existence de nappes proches de la surface. Par contre, les essais à l'air lift (débit entre 1 et 2 l/s soit inférieur à 6 m<sup>3</sup>/h) et de type « Lefranc » (perméabilité entre 10<sup>-5</sup> et 10<sup>-6</sup> m/s) montraient une faible perméabilité des terrains.



- Les nappes d'altitude alimentent sources et cours d'eau (à l'étiage en particulier). L'infiltration à partir de la surface et des nappes d'altitude alimente la nappe de base qui repose sur l'eau de mer en équilibre hydrostatique.

- Le contact entre eau douce et eau salée se fait suivant la surface du niveau valé. L'inclinaison de la pente de ce niveau peut-être très variable suivant la géométrie des formations aquifères (répartition spatiale des perméabilités), la charge d'eau douce.

- Les mouvements de marée et circulations de nappes créent un brassage au contact de l'eau de mer et de l'eau douce : il s'ensuit une zone de quelques mètres d'eau saumâtre.

Illustration 2 : schéma conceptuel élaboré pour le schéma directeur de la mise en valeur des ressources en eau de Mayotte (Stieltjes L., Rigal D., 1982).

4 campagnes de recherche et d'exploitation des eaux souterraines ont ensuite été menées entre 1999 et 2006 par le BRGM et/ou la DAF de Mayotte. Chacune de ces campagnes a fait l'objet d'investigations préalables comprenant :

- une synthèse bibliographique ;
- une analyse des linéaments par stéréoscopie ;
- des reconnaissances géologiques et hydrogéologiques de terrain ;
- de la prospection géophysique au sol (panneaux électriques) ;
- des campagnes de prospection émanométrique radon.

16 études ont été réalisées dans la zone d'étude ou à proximité à l'occasion de ces campagnes de recherche d'eau. Elles ont abouties à la réalisation de 31 forages de prospection dont 13 ont été réalisés dans la zone d'étude. 9 de ces forages sont exploités pour l'alimentation en eau potable ou en passe de l'être.

L'essentiel des ressources en eau souterraine est stocké au sein d'aquifère volcanique. La compréhension de la géométrie et des caractéristiques hydrauliques de ces unités géologiques est donc l'enjeu essentiel des futurs programmes de recherche et d'exploitation des eaux souterraines.

A l'échelle de l'île, la bonne répartition des forages d'eau permet d'avancer que les ressources en eau souterraine exploitables sont presque généralisées à l'ensemble de l'île. Néanmoins, jusqu'à présent, les ressources exploitées fournissent des débits en moyenne proche de 25 m<sup>3</sup>/h.

Néanmoins, la localisation des aquifères et l'estimation précise des ressources demeurent encore très difficile à définir de par la variabilité latérale et verticale des faciès lithologique et leur degré d'altération. Ces changements de faciès engendrent un important compartimentage des aquifères observé depuis les premières campagnes de forage des années 1990. Une nappe superficielle, dont la profondeur piézométrique est inférieure à 20 mètres est presque toujours identifiée.

Le Tableau 2 récapitule les résultats des campagnes de recherche et d'exploitation des eaux souterraines menées sur la zone d'étude de 1999 à 2006.

CAMPAGNE	NUMERO BSS	NOM	XRGM04	YRGM04	COMMUNE	ETAT	UTILISATION	SUUVI	HISTORIQUE DES DONNEES	FREQUENCE DE MESURE	METHODE DE MESURE	POTENTIEL D'EXPLOITATION	POTENTIEL AIR LIFT (m <sup>3</sup> /h)	DEBIT EXPLOITATION	COTE SOL	HAUTEUR TETE-SOL	Diamètre	Profondeur (en m)	Date fin de travaux	Distance à la mer (en m)	Aquifère	Perméabilité (Lefranc)	Crépine (en profondeur)	Masse d'eau	Commentaire	Prélevé en 2011
1990/1991	12302X0017	Dzoumogne	512336	8593697	Bandraboua	Vandalisé - forage perdu	Piezomètre		1992-2004	Plus mesuré			3		13,64	0,73	8	46,5	05/11/1990	2000	Coulées de basalte sain fissuré avec zones de fracture	1,4 à 2,2 10E-6 m/s de 9 à 19 m 4,9 à 8,8 10E-7 m/s de 12 à 34,5 m	16,5 - 56	Complexe du nord (9601)	Vandalisé	Non
1990/1991	12306X0011	Mtsangamouji 8"	509694	8598795	Mtsangamouji	Moyen	Piezomètre	DAF	1992-2009	Hebdo	Manuel		3		39,29	0,81	8	40,5	19/11/1990		Coulées de basalte plus ou moins altéré, fracturé	1,8 10E-6 m/s de 9 à 11 m 0,7 à 1,4 10E-5 m/s de 19,5 à 27 m 1,0 à 1,2 10E-6 m/s de 21 à 34,5 m	10,5 - 40,5	Complexe du nord (9601)	Historique de mesure intéressante, assez proche des forages d'exploitation : Mtsangamouji 1 et 2. Substratum altéré peu perméable, représentativité des mesures piézométriques ?	Non
1990/1991	12306X0009	Combani 1	514664	8586466	Tsingoni	Couvercle détérioré	Piezomètre	DAF	1992-2009	Hebdo	Manuel		6		124,79	0,70	8	41,0	20/03/1990	3000	Altérite de basalte et niveaux argileux sableux	1,0 à 1,3 10E-5 m/s de 15,5 à 16,5 m 0,9 à 2,0 10E-6 m/s de 18 à 22 m 2,9 10E-6 m/s de 33 à 35 m 1,5 à 2,2 10E-6 m/s de 33 à 44 m	13 - 41	Massif de Digo (9602c)	A proximité de Combani 2 qui est obstrué et capte le même aquifère	Non
1990/1991	12306X0010/COMB2	Combani 2	514368	8585852	Tsingoni	Vandalisé - forage perdu	Piezomètre	BRGM	1992-2007	Plus mesuré			6		117,98	1,04	8	45,0	27/03/1990	3000	Altérite de basalte et niveaux argileux sableux	5,1 10E-6 m/s de 12 à 14,5 m 0,9 à 1,0 10E-5 m/s de 15 à 17,8 m 1,2 à 2,6 10E-6 m/s de 25 à 39 m	10,5 - 45	Massif de Digo (9602c)	Profil d'altération. Représentativité des mesures piézométriques dans niveau peu perméable ?	Non
1990/1991	12312X0030/KAHA1	Kahani 1	514078	8582431	Ouangani	Moyen	Piezomètre	BRGM	1992-2009	Horaire	Automatique		6		116,18	0,51	8	45,0	03/04/1990	2300	Argile d'altération et altérite de basalte. Surtout produit en sur! jusqu'à 20m	0,3 à 3,0 10E-3 m/s de 9 à 11 m 4,6 à 6,4 10E-5 m/s de 16,5 à 18 m 4,5 à 5,5 10E-6 m/s de 21 à 23 m 1 à 2,9 10E-6 m/s de 24 à 35 m	8,5 - 45	Massif de Digo (9602c)	Alluvions anciennes. Peu perméable en profondeur. Représentativité des mesures piézométriques ?	Non
1990/1991	12312X0031	Kahani 2	514522	8581831	Ouangani	Moyen	Piezomètre	DAF	1992-2009	Hebdo	Manuel		5		98,26	0,84	8	45,0	11/04/1990	2300	Basalte altéré et fissuré, légèrement vacuolaire, surtout à partir de 21m de profondeur	1,2 à 6,1 10E-5 m/s de 9 à 16,5 m 2,5 10E-6 m/s de 15 à 21,8 m 2,4 10E-4 m/s de 21,6 à 32m	4,5 - 36	Massif de Digo (9602c)	Peut être proposé comme piézomètre de surveillance de nappe volcanique peu profonde	Non
1990/1991	12306X0013	Tsingoni	511944	8586660	Tsingoni	Couvercle détérioré	Piezomètre	DAF	1992-2009	Hebdo	Manuel		3		53,36	0,59	8	50,0	29/11/1990	900	Basalte altéré à très plus ou moins fracturé	6,8 à 6,0 10E-5 m/s de 3 à 4,5 m 3,1 10E-6 m/s de 9 à 12 m 9,0 10E-7 m/s de 9 à 18 m 2,4 10E-6 m/s de 9 à 25,5 m 1,1 10E-6 m/s de 26,5 à 32 m	4,5 - 50	Massif de Digo (9602c)	Laves altérées peu perméables. Formation provenant sûrement du complexe nord et non du Milima Digo. Est-ce que les mesures piezo sont vraiment représentatives ?	Oui
1999/2000	12306X0014/BEJA1	Beja 1	511673	8588951	Mtsangamouji	Excellent	AEP	SOGEA	2000-2006	Horaire	Automatique	50-60 m <sup>3</sup> /h			24,50	0,42	10	85,0	15/03/2000	1450	Formations alluviales et basalte scoriacé		23,1 - 53,9	Complexe du nord (9601)	Forage d'exploitation	Oui
1999/2000	12306X0015/BEJA2	Beja 2	511789	8590215	Mtsangamouji	Excellent	Piezomètre	DAF	2000-2009	Hebdo	Manuel		14		28,40	0,27	10	57,0	22/03/2000	1750	Coulées de basalte avec niveau scoriacé		19,91 - 45,38	Complexe du nord (9601)	Futur forage d'exploitation	Non
1999/2000	12306X0017	Mtsangamouji 1	509588	8590301	Mtsangamouji	Excellent	AEP	SOGEA		Horaire	Automatique	70 m <sup>3</sup> /h artésien		63	52,00	0,50	10	81,0	21/07/2000	1480	Coulées de basalte fissuré/fracturé		31,48 - 78,74	Complexe du nord (9601)	Forage d'exploitation	Oui
1999/2000	12306X0016	Mtsangamouji 2	509498	8590111	Mtsangamouji	Excellent	AEP	SOGEA		Horaire	Automatique	60 m <sup>3</sup> /h		38	47,00	0,70	10	80,0	30/08/2000	1250	Coulée de basalte massif et surtout niveau de basalte type Pahoehoe		65,85 - 76,97	Complexe du nord (9601)	Forage d'exploitation	Oui
2001/2003	12306X0045	Mtsangamouji-Massimoni	508306	8589666	Mtsangamouji	Train de tige tombé dans l'ouvrage									70,00	0,87	10	96,0	20/01/2003	800	Tuf scoriacés indurés et alluvions		66,3 - 89,3	Complexe du nord (9601)	Il est plus éloigné des forages AEP que le forage Mtsangamouji 8". Représentativité des mesures de quantité / qualité à vérifier	Non
2001/2003	12306X0024	Bouyouni-Bouyouni	515504	8590692	Bandraboua	Excellent	Futur AEP	SOGEA	2003-2009	Hebdo	Manuel	20-35 m <sup>3</sup> /h			48,00	0,50	10	124,0	24/10/2002	1750	Base de coulée scoriacée et pyroclastite remaniée		73,25 - 114	Massif de Digo (9602c)	Futur forage d'exploitation	Non
2001/2003	12306X0038	Combani-Mrerani	515814	8585447	Tsingoni	Excellent	AEP	SOGEA	2003-2009	Hebdo	Manuel	6-10 m <sup>3</sup> /h			109,00	0,58	10	89,0	21/11/2002	3875	Coulée de lave vacuolaire et fissurée intercalée de tufs volcaniques		28,75 - 69	Massif de Digo (9602c)	Forage d'exploitation	Non
2001/2003	12306X0046	Bouyouni Meresse	514495	8591799	Bandraboua	Excellent	AEP	SOGEA	2003-2007	Hebdo	Manuel	21 m <sup>3</sup> /h		21	21,00	0,50	10	82,0	02/06/2003	1100	Coulée de basalte fissurée		29,5 - 46,75	Massif de Digo (9602c)	Forage d'exploitation	Oui
2001/2003	12306X0047	Combani Kahani	515838	8583980	Ouangani	Excellent	AEP	SOGEA	2003-2008	Hebdo	Manuel	8-13 m <sup>3</sup> /h			176,00	0,50	10	120,0	18/08/2003	2500	Niveaux fissurés au sein de coulées de lave		60,75 - 86,5 83,75 - 95,25 101 - 118,25	Massif de Digo (9602c)	Forage d'exploitation	Non
2001/2003	12306X0048	Ouroveni 1	514580	8584835	Tsingoni	Excellent	AEP	SOGEA	2003-2009	Hebdo	Manuel	20 m <sup>3</sup> /h			76,00	0,00	10	87,0	17/09/2003	3750	Basalte sain fracturé/fissuré		5,8 - 24	Massif de Digo (9602c)	Forage d'exploitation	Non
2004	12302X0025/MOHOG	Mohogoni	512705	8593257	Bandraboua	Excellent	AEP	SOGEA		Hebdo	Manuel	45 m <sup>3</sup> /h artésien			10,00	0,00	10	75,0	16/08/2004	0	Coulée de basalte avec brèche de base de coulée		13,65 - 36,57	Complexe du nord (9601)	Forage d'exploitation	Oui
2004	12306X0012/OURO02	Ouroveni 2	514122	8583920	Tsingoni	Excellent	Piezometre	BRGM	2005-2009	Horaire	Automatique	5-10 m <sup>3</sup> /h			59,00	0,00	10	100,5	10/11/2004	3000	Alluvions : blocs, graviers et sables polygéniques et roulés		12,52 - 15,35 29,84 - 35,35 43,96 - 53,6	Massif de Digo (9602c)	Dans alluvions anciennes. Possible qu'elles appartiennent soit aux formations basales au Milima Digo soit à des formations contemporaines. Peu de forage exploité à proximité.	Non
2005/2006	12307X0116/LonTri	Longoni Tririmi	518703	8592051	Koungou	Rebouché	-								25,00				12/12/2005					Massif de Mtsapéré (9602a)	Forage rebouché	Non
2008	12302X0026/PZ1	Dzoumogné 2	510288	8594842	Mtsamboro	Excellent	Piezomètre	BRGM	2009				30		103,00	0,48	6	55,0	24/01/2009	1500	Coulée de basalte et sable basaltique		20 - 52	Complexe du nord (9601)	Nv piezo de 55 m de prof. A proximité de l'ancien forage de dzoumogné qui a été vandalisé. Un premier forage raté de 41 m a été foré à 4 m de l'actuel mais rebouché car trop dévié	Oui
2008	12306X0033/PZ5	Digo	515803	8589220	Tsingoni	Excellent	Piezomètre	BRGM	2009				18		111,00	0,54	6	60,0		4000	Coulée de basalte et sable basaltique		24 - 60	Massif de Digo (9602c)	le long de la piste de Bouyouni/Combani ou Milima Digo	Oui
2011	En projet	Acoua S1	506919	8593083	Acoua																			Complexe du nord (9601)	Futur ouvrage de la 5ème campagne (2011-2012)	Non

Tableau 2 : tableau récapitulatif des résultats des campagnes de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte (1999-2006) pour la zone d'étude.

Les campagnes de forage ont permis d'établir les paramètres déterminants la présence de ressources exploitables, en particulier le déterminisme lié :

- à la lithologique : la nature de la roche joue un rôle important dans la circulation des eaux souterraines ; les formations de lave saine présentent généralement de meilleures porosités que les brèches, pyroclastites ou altérites ;
- à la structure de la coulée : dans une même coulée, en fonction de sa mise en place, plusieurs types de texture se succèdent (graton, cœur de coulée, brèche de base, etc.) chacun ayant ses propres caractéristiques hydrodynamiques ;
- à la fracturation : outre la fissuration primaire ou prismation qui se met généralement en place dans les cœurs de coulée, une fracturation secondaire peut apparaître dont le remplissage (cristallisation de zéolites) où l'ouverture détermine les propriétés hydrodynamiques du milieu ;
- à l'altération qui tend à argiliser les formations volcaniques et donc à limiter la transmissivité des formations.

Ainsi, les aquifères apparaissent généralement comme un ensemble multicouches très compartimentés dans lesquels des horizons sains et fracturés (laves) drainent des formations moins perméables mais plus capacitives (altérites, pyroclastites, paléosols, alluvions de fond de vallée, brèches, etc.). Ces géométries multi-couches sont généralement difficiles à appréhender. A plus grande échelle, ces ensembles multicouches sont assimilés à des systèmes semi-perméables.

En termes de qualité des eaux souterraines, les analyses réalisées pour la mise en exploitation des ouvrages AEP et celles réalisées dans le cadre des réseaux de surveillance DCE n'ont pu permettre de déceler la présence en quantité significative de polluants organiques ou minéraux. Les études des Bassins d'Alimentation de Captage (« BAC », Malard et al., 2009) avancent également une faible vulnérabilité des eaux souterraines vis-à-vis des pollutions anthropiques. Cependant la présence en faible quantité mais récurrente de bactéries (E. Coli, Entérocoques, Coliformes) (Malard & Winckel, 2009, Jaouën & Winckel, 2010) montre que les eaux souterraines restent vulnérables à l'infiltration d'eau superficielle.

### 3. Prospections géologiques et hydrogéologiques

La campagne de prospection hydrogéologique de terrain s'est déroulée du 28 septembre au 7 octobre 2010. Les objectifs de cette campagne étaient :

- ✓ identifier et de caractérise les ressources en eau souterraine : altération, perméabilité, fissuration/fracturation, géométrie, figures de flux...
- ✓ élaborer un ou plusieurs modèle(s) hydrogéologique(s) conceptuel(s) ;
- ✓ identifier les secteurs sur lesquels faire de la géophysique ;
- ✓ identifier les points à prélever pour l'étude hydrogéochimique ;
- ✓ identifier les secteurs des futures prospections (accès et risque de pollution).

Durant cette campagne, les reconnaissances ont été effectuées à pieds et en voiture en empruntant les chemins ou le fond des talwegs. La logique suivie consistait à remonter chaque bassin versant d'aval vers l'amont en suivant les changements géologiques (nature, aspect des roches), morphologiques (modifications du relief et de la couverture végétale) et hydrologiques (débit, conductivité, émergence, aspect du réseau hydrographique, etc.).

La reconnaissance géologique de terrain a consisté à établir une description macroscopique des affleurements et à les caractériser en termes de nature, de fissuration/fracturation, de prismation, de géométrie et de degré d'altération.

La reconnaissance hydrogéologique de terrain a été axée sur l'identification des différents types de venues d'eau souterraine, la définition du contexte d'émergence des eaux souterraines, les interactions eaux souterraines/eaux de surface (zones d'apport d'eaux souterraines, zones de pertes des eaux de surface). Elle s'est appuyée sur des observations et mesures de terrain : évaluation du débit des émergences d'eau souterraine et des cours d'eau et des variations spatiales du débit de ces derniers, mesures de la conductivité électrique des eaux de surface et éventuellement des venues d'eau souterraine.

Le but de cette prospection n'était pas d'établir une cartographie géologique du secteur d'étude compte tenu de l'actualisation en cours de la carte géologique de Mayotte et du temps imparti par rapport à la surface à prospecter. Par contre, les informations recueillies, confrontées à celles existantes en bibliographie permettront d'élaborer des modèles conceptuels du fonctionnement hydrogéologique basés sur les grandes structures identifiées et les observations réalisées sur le terrain.

L'illustration 3 représente ainsi les itinéraires parcourus et les observations réalisées.

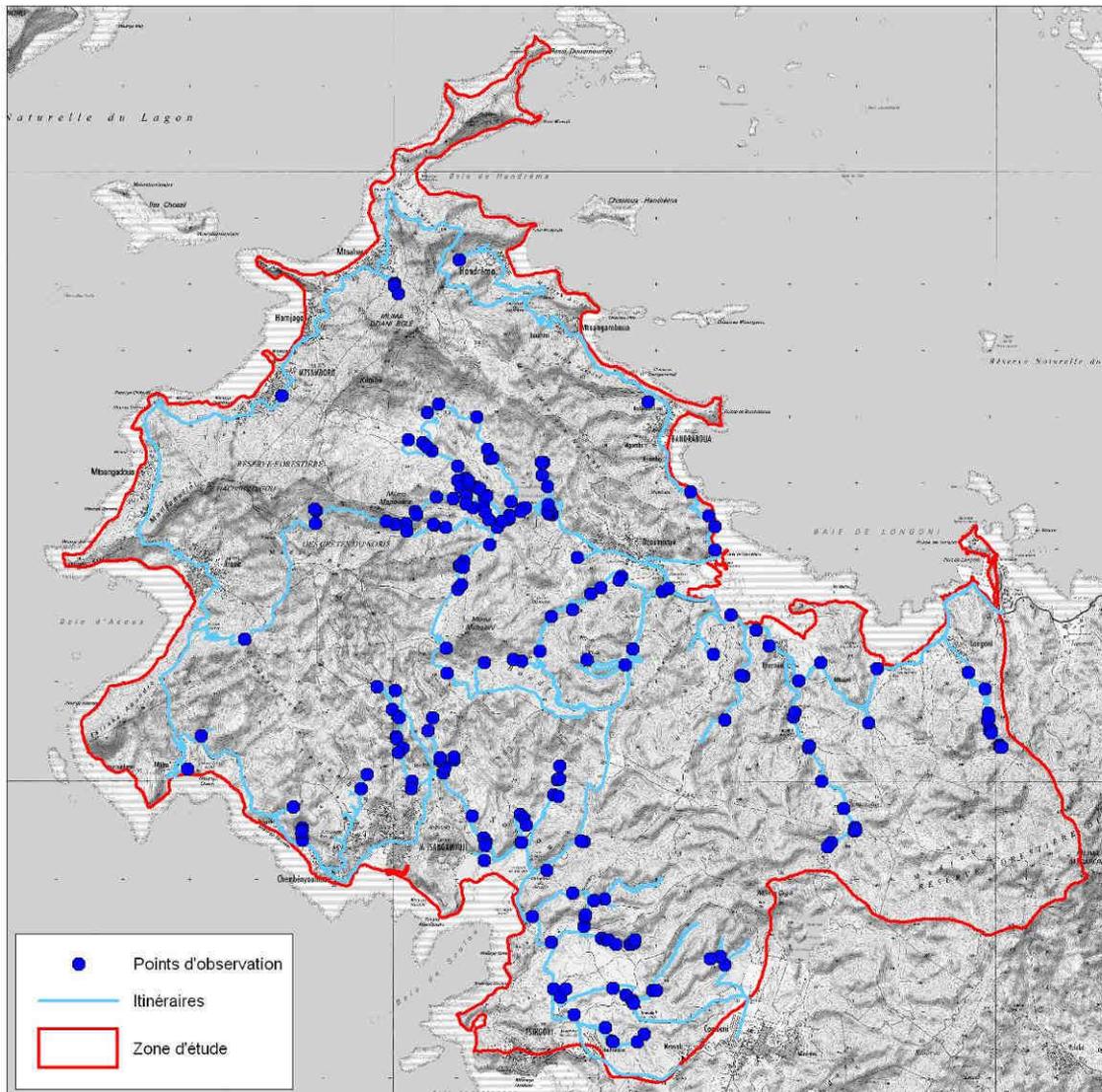


Illustration 3 : carte des itinéraires et des points d'observations des reconnaissances de terrain de septembre-octobre 2010.

Le secteur d'étude comprend le domaine septentrional de l'île généralement discriminé des secteurs Sud et Nord-Est par une morphologie des reliefs et des lithologies particulières. En effet, le bouclier septentrional se caractérise par des reliefs beaucoup plus accidentés que le reste de l'île et dont les crêtes sont parallèles au trait de côte.

Le secteur d'étude comprend également le Massif de Digo généralement associée au volcanisme plus récent du M'tsapéré mais qui n'avait été prospecté lors de la 1<sup>ère</sup> phase de ce programme (Caractérisation hydrogéologique du Nord-Est de Mayotte). Cette zone, très peu habitée, se caractérise par des reliefs très lâches, essentiellement boisées.

En termes d'occupation des sols et d'aménagement, le secteur Nord-Ouest est principalement occupé par quelques villes et villages côtiers dont les plus importantes sont Tsingoni, Mtsangamouji, Acoua, Mtsamboro, Dzoumogné. Ce secteur demeure essentiellement agricole (agriculture vivrière courante à Mayotte) même si les reliefs accidentés limitent l'extension de cette activité.

Signalons que de nombreux aménagements ont été réalisés dans le bassin versant de la Maré pour la réalisation du barrage de Dzoumogné (dérivation de la Mapouéra et de la Mijahari). Des captages pour l'alimentation en eau potable sont également présents sur la Longoni (aval), la Bouyouni (amont et aval), la Méresse (aval), la Maré (aval), la Mohogoni (aval), l'Andiranabé (amont) et la Mrowalé (aval).

### 3.1. RECONNAISSANCES GEOLOGIQUES

Les reconnaissances géologiques ont mis en évidence une quasi généralisation des altérites, tant dans les parties basses des bassins versants que dans les parties amont à l'exception des crêtes. Les parties sommitales des reliefs sont quant à elle beaucoup plus compétentes et saines que les roches formant le fond des bassins versants expliquant les morphologies particulièrement raides observées. Ces formations de crêtes n'ont été observées que dans la partie Nord-Ouest du secteur d'étude, au-delà d'une ligne Dzoumogné-Mtsangamouji.

Plusieurs domaines géologiques ont été identifiés lors de cette campagne :

- le domaine septentrional composé par un substratum de laves et de pyroclastites associées très altérées, la présence de padzas dans les parties hautes surmontées localement par des crêtes phonolitiques ;
- le Massif de Digo se caractérisant par des reliefs lâches remontant en pente douce sur le M'tsapéré à l'Est, et peu de roches saines affleurantes ;
- le plateau s'étendant de la Mrowalé à la Beja, très légèrement vallonnée, sans affleurement sain mais une importante proportion de formations latéritiques.

Les roches affleurantes, souvent très altérées, ne permettaient pas une caractérisation précise du faciès lithologique. Néanmoins, quatre faciès et leurs isaltérites et des allotérites (latérites) ont été différenciés :

- **latérites** caractérisées par une couleur rouge, rouille à ocre, toujours meuble et pulvérulente dans laquelle la roche originelle n'est plus identifiable ;
- **pyroclastites** pouvant se présenter sous forme de dépôts fins lités (dépôt en milieu aérien ou aquatique calme) jusqu'à des brèches polygéniques à scories et blocs mal classés ;
- **basaltes à olivines et/ou pyroxène** (et/ou amphibole ?) se présentant sous l'aspect de laves massives majoritairement mélanocrates à mésocrates, bleutées, à débits fréquents en prismes, dalles ou plaques et dans lesquelles les phénocristaux

d'olivine et de pyroxène sont supérieur à 1 mm (la présence d'amphibole a été proposée sans qu'elle puisse être confirmée) ;

- **basaltes sub-aphyrique** montrant un aspect général similaire à l'ensemble lithologique précédemment décrit mais dans lesquels aucun phénocrystal n'a pu être significativement reconnu ;

- **phonolites** retrouvées dans les colluvions et les éboulis de versant sous la forme de mégablocs, à patine claire et cassure esquilleuse mélanocrate, toujours aphyrique.

Les observations réalisées sur le terrain sont présentées dans le Tableau 3, et leurs localisations sont reportées dans l'illustration 4.

Signification des champs listés dans le tableau de description des affleurements :

- **MARK** : numéro du point GPS ;
- **DATE** : date au format JJ/MM/AAAA ;
- **HEURE** : heure au format HH :MM :SS
- **X\_RGM04** : latitude en mètre dans le système RGM04 ;
- **Y\_RGM04** : longitude en mètre dans le système RGM04 ;
- **Z\_NGM** : altitude en mètre dans le système NGM d'après le MNT ;
- **TEINTE** : teinte générale de la roche ;
- **COULEUR** : couleur générale de la roche ;
- **TEXTURE** : texture générale de la roche ;
- **PHENOCRISTAUX** : présence ou absence, description macroscopique des phénocristaux ;
- **DESCRIPTION** : description de l'affleurement ;
- **DENOMINATION** : dénomination usuelle du type de roche ;
- **LITHOLOGIE** : attribution d'un type lithologique ;
- **PUISSANCE** : épaisseur en mètre de la formation décrite ;
- **FISSURATION** : présence ou absence, description, origine des fissures ;
- **HYDROGEOL** : caractéristique hydrogéologique générale (formation aquifère, drainante, aquiclude, aquitard).

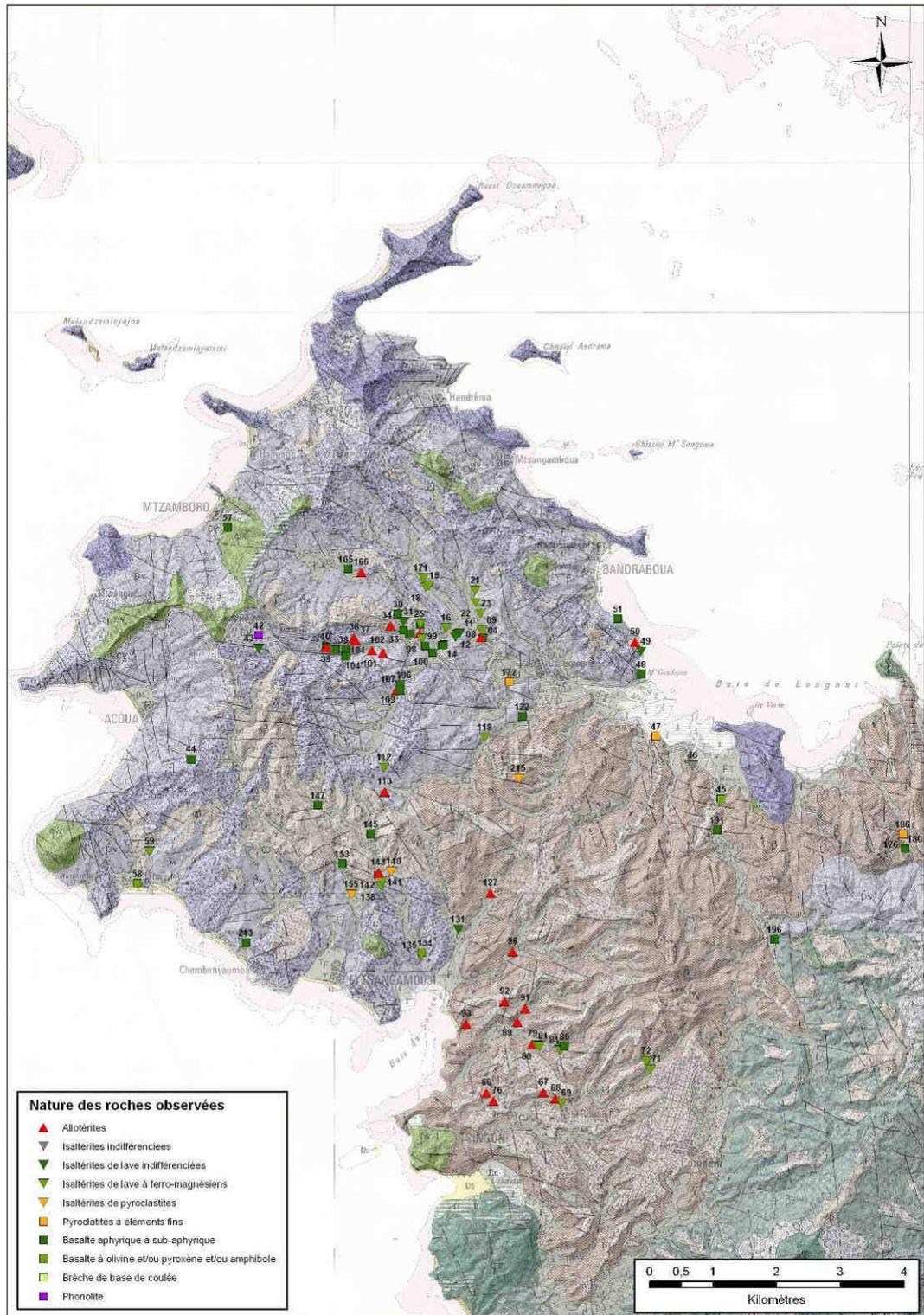


Illustration 4 : carte synthétique des reconnaissances géologiques.



Tableau 3 : tableau synthétique de description des affleurements.

MARK	DATE	HEURE	X_RGM04	Y_RGM04	Z	TEINTE	COULEUR	TEXTURE	PHENOCristaux	DESCRIPTION	DENOMINATION	LITHOLOGIE	PUISSANCE	FISSURATION	HYDROGEOLOGIE
04	28/09/2010	08:54:11	511614	8594260	33	Claire	Grise	Argileuse, pulvérulente	Ferro-magnésiens très altérés de couleur rouille à ocre	Lave altérée, gris clair à minéraux ferro-magnésiens altérés.	Isaltérites de lave	Isaltérites de lave à ferro-magnésiens	5,00	50E40 ; 60V	Aquitard
05	28/09/2010	09:08:43	511621	8594288	30	Sombre	Gris bleuté	Microclitique à rares phénocristaux	Ferro-magnésiens (Px) automorphes, inférieurs à 1 mm	Lave massive altérée à patine crème verdâtre et matrice gris bleuté microclitique présentant des ferro-magnésiens (Px) automorphes et inf. à 1 mm. Début d'altération en boules.	Basalte sub-aphyrique à pyroxène	Basalte aphyrique à sub-aphyrique		N10V ; N90V	Aquidude
08	28/09/2010	09:37:59	511591	8594297	36	Sombre	Rouge	Argileuse, pulvérulente	Aucun	Allotérites rouge sombre de 2 à 3 mètres d'épaisseur, recouvertes par un sol brun d'environ 0,15 à 0,20 m.	Allotérites de lave	Allotérites de lave	3,00	Néant	Aquitard
09	28/09/2010	09:48:31	511603	8594398	35	Claire	Grise	Argileuse, pulvérulente	Ferro-magnésiens très altérés de couleur rouille à ocre	Lave à patine brune, matrice gris clair, meuble et pulvérulente présentant des traces d'altération en boules	Isaltérites de lave	Isaltérites de lave à ferro-magnésiens		Néant	Aquitard
10	28/09/2010	10:13:29	511209	8594338	64	Claire	Grise	Argileuse, pulvérulente	N/A	Isaltérites grises, très pâles (blanchâtre), sur une cinquantaine de mètre de long (de Mark 11 à 12)	Isaltérites de lave	Isaltérites de lave indifférenciées	3,00	Néant	Aquitard
11	28/09/2010	10:18:29	511250	8594352	65	Sombre	Rouge	Argileuse, pulvérulente	Sans objet	Contact : allotérite/isaltérites au SE eu MARK10	Allotérites de lave	Isaltérites de lave indifférenciées		Néant	Aquitard
12	28/09/2010	10:20:35	511187	8594292	64	Sombre	Rouge	Argileuse, pulvérulente	Sans objet	Contact : allotérite/isaltérites au NO du MARK10	Allotérites de lave	Isaltérites de lave indifférenciées		Néant	Aquitard
13	28/09/2010	10:30:34	511007	8594183	59	Sombre	Lit de vin à Noirâtre	Microclitique à très rares phénocristaux	Très rares ferro-magnésiens automorphes	Coulée de lave massive < 1 m, très vacuolaire, sub-aphyrique, très rares phénocristaux.	Basalte sub-aphyrique à pyroxène	Basalte aphyrique à sub-aphyrique	1,00	Pseudo-prismation sub-verticale	Drain
13'	28/09/2010	10:30:34	511007	8594183	59	Sombre	Grisâtre à rouge lie-de-vin	Argileuse	Sans objet	Scories argilisées pouvant constituer la base de la coulée 13"	Scories argilisées	Basalte aphyrique à sub-aphyrique	0,50	Néant	
13"	28/09/2010	10:30:34	511007	8594183	59	Sombre	Noirâtre (Bleu gris foncé)	Microclitique	Aucun	Coulée de lave massive > 3 m, noirâtre, à cassure légèrement esquilleuse, débit en dalles frustes, aphyrique. Figures de flux zébrées.	Basalte aphyrique	Basalte aphyrique à sub-aphyrique	3,00	Pseudo-prismation sub-verticale	Drain
14	28/09/2010	10:36:36	510982	8594166	59					Extrémité du profil MARK13		Basalte aphyrique à sub-aphyrique			
16	28/09/2010	11:10:25	511039	8594438	67	Claire	Grise à blanchâtre	Argileuse, pulvérulente	Ferro-magnésiens altérés ocre-rouille	Isaltérites gris clair à ferro-magnésiens altérés ocre-rouille, pulvérulente, meuble et allotérites rouge et décomprimées en partie haute. Affleurement sur une dizaine de mètres.	Isaltérites de lave	Isaltérites de lave à ferro-magnésiens		Néant	Aquitard
18	28/09/2010	11:25:13	510721	8595088	67	Sombre	Rouge violacé	Argileuse, pulvérulente	Ferro-magnésiens altérés ocre-rouille abondants	Lave vacuolaire, riche en minéraux ferro-magnésiens altérés, roche molle, rougeâtre violacé (à pourpre) avec allotérite en partie haute	Isaltérites de lave	Isaltérites de lave à ferro-magnésiens		Néant	Aquitard
19	28/09/2010	11:30:18	510764	8595106	65	N/A	Grise	Microclitique-Argileuse	Ferro-magnésiens très altérés nombreux	Lave altérée massive à patine noire et matrice grise, minéraux nombreux, très altérés	???	Isaltérites de lave à ferro-magnésiens		Néant	
21	28/09/2010	11:54:41	511495	8595036	57	N/A	Grise	Argileuse, pulvérulente	Ferromagnésiens altérés nombreux, < 2 mm	Lave altérée, patine noire, matrice grise, minéraux ferro-magnésiens nombreux < 2 mm, vacuoles centimétriques, humide, avec traces de fissuration	Basalte à Px (OI ?)	Isaltérites de lave à ferro-magnésiens		Néant	
22	28/09/2010	12:04:25	511501	8594845	64	N/A	N/A	N/A	N/A	Contact type "paléo-vallée" entre des laves altérées grise à minéraux ferro-magnésiens abondant et le sol recuit d'une paléo-vallée	Altérites	Isaltérites de lave à ferro-magnésiens		Néant	Aquitard
23	28/09/2010	12:12:06	511585	8594674	73	Claire	Grise	Argileuse, pulvérulente	Ferro-magnésiens mm nombreux, quelques ~ 1 cm, très altérés ocre-rouille	Lave altérée, grisâtre, claire à minéraux millimétriques abondants et rares minéraux centimétriques très oxydés. Roche meuble, pulvérulente et légèrement humide à la main.	Isaltérites de lave	Isaltérites de lave à ferro-magnésiens		Néant	Aquitard
25	28/09/2010	12:31:28	510633	8594501	79	Sombre	Gris bleuté	Microclitique	Absent	Lave sombre, gris bleuté, aphyrique à fissuration sub-verticale et feuilletage sub-horizontal	Basalte aphyrique	Basalte aphyrique à sub-aphyrique		Prismation sub-verticale et feuilletage sub-horizontal	
25'	28/09/2010	12:31:28	510633	8594501	79	Sombre	Grisâtre à rouge lie-de-vin	Argileuse	Ferro-magnésiens altérés ocre-rouille abondants (mm)	Lave grisâtre teintée de rouge voire totalement lie-de-vin, tendre et meuble, à ferro-magnésiens millimétriques abondants (altérites recuites ?)	Altérites	Isaltérites de lave à ferro-magnésiens		Néant	Aquitard
30	28/09/2010	14:05:22	510281	8594654	114	Rouge brun	Claire	Argileuse, pulvérulente	Absent	Isaltérites rouge-brun à boules	Isaltérites	Isaltérites de lave indifférenciées	1,50		Aquitard
30'	28/09/2010	14:05:22	510281	8594654	114	Sombre	Gris bleuté	Argileuse, pulvérulente	Sub-aphyrique : rares ferro-magnésiens automorphes < 1 mm	Lave gris bleu, vacuolaire, pseudo-aphyrique à rares minéraux < 1 mm	Basalte aphyrique	Basalte aphyrique à sub-aphyrique	1,00		
30"	28/09/2010	14:05:22	510281	8594654	114	Gris	Claire	Argileuse, pulvérulente	Absent	Isaltérites grisâtre, très vacuolaire, meuble, pulvérulente, recuites sur 15-20 cm	Isaltérites de lave	Isaltérites de lave indifférenciées	4,00	Néant	Aquitard
31	28/09/2010	14:21:19	510369	8594530	118	???	Gris rosé à rougeâtre	Argileuse	Absent	Lave gris rosé à rougeâtre, aphyrique et vacuolaire, très altérée et friable	Isaltérites de lave	Isaltérites de lave indifférenciées			
32	28/09/2010	14:31:58	510467	8594347	140	Claire	Gris		Rares ferromagnésiens (Px) < 1 mm	Lave altérée gris clair, vacuolaire en partie haute, sub-aphyrique à microcristaux de pyroxène	Lave aphyrique altérée	Basalte aphyrique à sub-aphyrique			
33	28/09/2010	14:40:35	510366	8594409	147	Claire	Gris		Rares ferromagnésiens (Px) < 1 mm	Lave altérée gris clair, vacuolaire en partie haute, sub-aphyrique à microcristaux de pyroxène	Lave aphyrique altérée	Basalte aphyrique à sub-aphyrique			
34	28/09/2010	14:42:43	510173	8594482	160	Claire	Brun foncé rubéfié	Argileuse, pulvérulente	Rares ferromagnésiens < 1 mm	Transition allotérites/isaltérites, quelques rares minéraux ferro-magnésiens très altérés, très argileux, brun rubéfié	Altérites	Allotérites			



MARK	DATE	HEURE	X_RGM04	Y_RGM04	Z	TEINTE	COULEUR	TEXTURE	PHENOCRISTAUX	DESCRIPTION	DENOMINATION	LITHOLOGIE	PUISSANCE	FISSURATION	HYDROGEOL
36	28/09/2010	14:53:43	509595	8594292	195	Claire	Brun rouge	Argileuse, pulvérulente	Sans objet	Allotérites brun rouge, avec des fentes de retrait (Argilisées), anciennes boules.	Altérites	Allotérites			
37	28/09/2010	14:58:37	509623	8594249	200	Claire	Ocre	Argileuse, pulvérulente	Sans objet	Lave altérée ocre (allotérites) où demeurent quelques traces de boules, puissance < 0,7 m	Altérites	Allotérites			
37 <sup>a</sup>	28/09/2010	14:58:37	509623	8594249	200	Claire	Rouge	Argileuse, pulvérulente	Sans objet	Allotérite rouge recuite, sous le MARK37	Altérites	Allotérites			
38	28/09/2010	15:05:59	509462	8594106	198	Sombre	Noirâtre (bleu-gris foncé)			Lave aphyrique massive vacuolaire	Basalte aphyrique	Basalte aphyrique à sub-aphyrique	2,00		
39	28/09/2010	15:14:33	509300	8594102	223	Sombre	Gris bleuté	Microlitique	Absent	Lave massive, vacuolaire, microlitique, gris bleu foncé	Basalte aphyrique	Basalte aphyrique à sub-aphyrique		N/A	
40	28/09/2010	15:22:30	509163	8594139	229	Sombre	Gris	Microlitique	Absent	Lave aphyriques sombre, vacuolaire (fluage)	Basalte aphyrique	Basalte aphyrique à sub-aphyrique		N/A	
40 <sup>a</sup>	28/09/2010	15:22:30	509163	8594139	229	Sombre	Lie-de-vin	Argileuse, pulvérulente	Sans objet	Lave altérée lie-de-vin grumeleuse	Altérites	Allotérites		N/A	
42	28/09/2010	15:46:33	508093	8594325	291	Sombre	Gris bleuté	Microlitique	Sub-aphyrique : rares ferro-magnésiens < 1 mm : Px et Fd, subautomorphe à automorphe	Phonolite sombre, gris bleuté, sub-aphyrique à rares micropyxènes en baguettes et microfledspaths en plages, patine superficielle claire, tinte claire. Observée dans des blocs en fond de talweg.	Phonolite	Phonolite		Pas en place	
43	28/09/2010	16:16:12	508098	8594113	300	Claire	Grise	Argileuse, pulvérulente	Absent	Lave altérée, friable, gris clair, aphyrique, à vacuoles nombreuses et très zeolitisées	Isaltérites	Isaltérites de lave indifférenciées		Néant	
44	28/09/2010	16:48:51	507033	8592358	244	Sombre	Rouge ocre à rouille	Argileuse, pulvérulente	Ferro-magnésiens automorphes, dastes, hétérogènes (1 - 7 mm) : scories, lapillis, éléments polygéniques	Brèche comprenant des cristaux subautomorphes à automorphe < 3 mm et des éléments très vacuolaires de 4 à 100 mm, éléments crème à ocre rouille, matrice rougeâtre à lie-de-vin. Dyke formant un V recoupant cette formation. Décalé par un petit jeu en faille normal, contact sup. et inf. brûlés, prismation perpendiculaire aux flancs, patine très superficielle, teinte sombre, aphyrique et cassure légèrement esquilleuse. Roche très dure.	Isaltérites de pyroclastites	Isaltérites de pyroclastites			
44 <sup>a</sup>	28/09/2010	16:48:51	507033	8592358	244	Sombre	Gris bleuté	Microlitique	Sub-aphyrique à rares cristaux d'Oi ou de Px < 1mm	Coulée de lave surmontant l'ensemble MARK44. Altération en boule, patine crème, matrice gris bleuté sombre, sub-aphyrique à olivine exceptionnelle (< 1 mm) et pyroxènes rares (< 1 mm). Présence d'un dyke au contact coulée de lave / pyroclastites.	Basalte sub-aphyrique à pyroxène	Basalte aphyrique à sub-aphyrique			
45	29/09/2010		515362	8591733	9	Sombre	Gris bleuté	Microlitique aphanitique	Nombreux cristaux d'Olivine (< 1 mm) et de Pyroxène (< 1mm)	Coulée de basalte à Olivine et Pyroxène, altération de couleur rouge teinté d'orangé, prismation et débit en polyèdre de base 10-15 cm de côté. Roche très dure visible sur 3 m de haut et 30 m de long.	Basalte à olivine et pyroxène	Basalte à olivine et/ou pyroxène et/ou amphibole	4	Prismation marquée	Drain
46	29/09/2010		514907	8592260	9					Bel affleurement type : - substratum de pyroclastites altérées - surmontées par 2 à 4 m de lave altérées - jusqu'à 5 m d'isaltérites de lave avec des boules apparentes - une paléo-vallée incisée avec un remplissage sédimentaire recoupe la partie superficielle - plus à l'Est, laves grise, claire, pseudo-aphyrique à cassure spathique et à micro-cristaux d'olivine, pyroxène (?), Feldspath (?), vacuolaire.	Alternance de roches altérées : basalte et pyroclastites	Isaltérites indifférenciées	10	Néant	
47	29/09/2010		514336	8592732	3					Ginértes de Bouyouini, marron-gris, empilement de séries à granoclassement normal : éléments de 2 mm à inframillimétriques. Formation fissurée, très fragile. Présence d'éléments végétaux détritiques "fossiles" sous forme de charbons ou minéralisés.		Pyroclastites à éléments fins	8	Nombreuse	Aquitard
48	29/09/2010		514098	8593715	6	Sombre	Gris bleuté	Microlitique	Absent	Lave massive, vacuolaire, fluidale, comprenant un gros minéral très altéré ocre rouille. 5 m d'épaisseur, pas fissuré mais avec un début d'altération.	Basalte aphyrique	Basalte aphyrique à sub-aphyrique	5	Néant	Aquiclude
49	29/09/2010		514104	8594065	17					Isaltérite à boule, fracturation sub-v verticale et sub-horizontale délimitant des blocs métriques frustrés	Isaltérites	Isaltérites de lave indifférenciées	4	Néant	Aquitard
50	29/09/2010		514007	8594219	23					Allotérite rouge foncé, colluvionnée avec blocs éparses	Allotérites colluvionnées	Allotérites	4	Néant	Aquitard
51	29/09/2010		513739	8594593	30	Sombre	Gris bleuté	Microlitique	Absent	Lave très vacuolaire en tête (cm) devenant moins vacuolaire en base (rare, mm). Pseudo-prismation frustrée, cassure facile, début d'altération, aphyrique.	Basalte aphyrique	Basalte aphyrique à sub-aphyrique		Pseudo-prismation	Drain
57	29/09/2010		507603	8596044	39	Sombre				Belle lave prismée en cours d'altération, couverture latéritique	Basalte	Basalte aphyrique à sub-aphyrique		Prismation marquée	Drain
58	29/09/2010		506184	8590397	1	Sombre	Gris bleuté	Microlitique aphanitique	Cristaux millimétriques de pyroxène abondant	Lave massive, patine gris-brun, matrice gris bleuté, fissuration frustrée (blocs métriques)	Basalte à pyroxène	Basalte à olivine et/ou pyroxène et/ou amphibole		Pseudo-prismation	Drain
59	29/09/2010		506381	8590893	21	Claire	Crème ocre à gris	Micritique argileuse à phénocristaux	Phénocristaux de de pyroxène automorphe nombreux	Lave d'aire, crème ocre à grise, Argilisée, vacuolaire, à Px nombreux automorphes.	Basalte à pyroxène altéré	Isaltérites de lave à ferro-magnésiens			

MARK	DATE	HEURE	X_RGM04	Y_RGM04	Z	TEINTE	COULEUR	TEXTURE	PHENOCRISTAUX	DESCRIPTION	DENOMINATION	LITHOLOGIE	PUISSANCE	FISSURATION	HYDROGEOLOG
66	30/09/2010	09:36:01	511674	8587071	66		Rouge à brun orangé	Argileuse, pulvérulente	Sans objet	Allotérites latéritiques grumeleuses, meubles. 3 mètres épaisseur.	Altérites latéritiques.	Allotérites	3	Néant	Aquitard
67	30/09/2010	09:45:35	512567	8587078	79		Rouge à brun orangé	Argileuse, pulvérulente	Sans objet	Allotérites latéritiques grumeleuses, meubles. 3 mètres épaisseur.	Altérites latéritiques.	Allotérites	3	Néant	Aquitard
68	30/09/2010	09:52:54	512762	8586983	77				Sans objet	Colluvions de couleur brun ocre à blocs millimétriques à décimétriques de basalte clair, grisâtre, à ferromagnésiens altérés nombreux. Colluvions reposant sur les latérites MARK67.	Colluvions / Latérites	Allotérites		Néant	
69	30/09/2010	10:00:10	512854	8586904	66	Claire	Grise ocre	Argileuse, pulvérulente	Ferro-magnésiens automorphes, < 1 mm, nombreux, peu altérés	Lave très altérée à matrice grise ocre argilisée, pulvérulente, avec une fissuration sub-verticale et sub horizontale frustrée (blocs décimétriques). Cristaux de ferro-magnésiens peu altérés nombreux, quelques vacuoles. Lave similaire aux blocs retrouvés dans la MARK68.	Altérites de basalte à pyroxène	Isaltérites de lave à ferromagnésiens	4	Pseudo-prismation frustrée	Aquitard
71	30/09/2010	11:27:58	514245	8587439	95	Calire	Brun Ocre	Argileuse, pulvérulente	Ferro-magnésiens altérés ocre-rouille abondant	Lave très altérée, bûne à ocre, matrice argilisée pulvérulente	Basalte à pyroxène (?)	Isaltérites de lave à ferromagnésiens		Néant	Aquitard
72	30/09/2010	11:35:41	514180	8587565	109	Calire	Brun Ocre	Argileuse, pulvérulente	Ferro-magnésiens altérés ocre-rouille abondant	Lave très altérée, bûne à ocre, matrice argilisée pulvérulente avec une fissuration subverticale frustrée et quelques vacuoles allongées (mm - cm)	Basalte à pyroxène (?)	Isaltérites de lave à ferromagnésiens		Néant	Aquitard
76	30/09/2010	13:07:26	511785	8586941	72				Sans objet	La piste est rouge "latérite"	Latérites	Allotérites		Néant	
79	30/09/2010	13:30:19	512396	8587841	65				Sans objet	Latérites rouge brun grumeleuses	Latérites	Allotérites		Néant	
80	30/09/2010	13:31:54	512462	8587817	66	Claire	Marron brun	Argileuse	Ferro-magnésiens millimétriques très altérés et oxydés ocre rouille dans les blocs.	Lave gris crème à brune, très altérée à ferro-magnésiens millimétriques oxydés. Présence de blocs anguleux dans une matrice argileuse brune, l'ensemble paraît +/- colluvionné.	Colluvions de basalte subaphyrique à pyroxènes	Isaltérites de lave à ferromagnésiens		Néant	Aquitard
81	30/09/2010	13:37:06	512505	8587807	58	Claire	Gris crème à légèrement ocre	Argileuse	Ferro-magnésiens millimétriques très altérés et oxydés ocre rouille.	Lave gris crème à brune, très altérée à ferro-magnésiens millimétriques oxydés. L'altération suit les fissures uniquement : pas d'altération dans la masse.	Colluvions de basalte subaphyrique à pyroxènes	Isaltérites de lave à ferromagnésiens		Fissuration dégageant des blocs décimétriques à pluridécimétriques	
84	30/09/2010	14:00:38	512838	8587741	60	Claire	Brune	Argileuse	Nombreux ferromagnésiens < 1 mm altérés	Lave claire grise à jaune, brun ocre, à nombreux ferro-magnésiens en cristaux < 1 mm très altérés. Présence de deux blocs de basalte gris bleuté subaphyrique très dur pris dans la masse.	Basaltes à pyroxènes altérés	Isaltérites de lave à ferromagnésiens	3	???	Aquitard
86	30/09/2010	14:20:40	512902	8587812	64	Claire	Gris dair	Microclitique aphanitique	Rares ferro-magnésiens automorphes < 1 mm	Lave grise, massive, sub-aphyrique avec quelques ferro-magnésiens < 1 mm et quelques vacuoles.	Basalte aphyrique	Basalte aphyrique à sub-aphyrique	5	Pseudo-prismation	Drain
89	30/09/2010	14:51:34	512158	8588195	49	Claire	Orange ocre	Argileuse		Altérites d'une lave claire, très argileuses et légèrement colluvionnées	Altérites de basalte colluvionnées	Allotérites		Néant	Aquitard
91	30/09/2010	15:20:20	512284	8588409	56	Sombre			Sans objet	Latérites rouges +/- colluvionnées	Latérites	Allotérites		Néant	
92	30/09/2010	15:26:20	511961	8588520	80	Sombre			Sans objet	Latérites rouges	Latérites	Allotérites		Néant	
93	30/09/2010	15:31:54	511358	8588162	30	Sombre			Sans objet	Latérites rouges	Latérites	Allotérites		Néant	
96	30/09/2010	15:49:41	512087	8589312	63	Sombre			Sans objet	Latérites rouges	Latérites	Allotérites		Néant	
97	01/10/2010	09:22:35	510627	8594360	95				Sans objet	Latérites rouges le long de la route et sur le flanc amont sur au moins 20 m d'épaisseur	Latérites	Allotérites	20	Néant	
98	01/10/2010	09:24:49	510654	8594275	95	Claire	Gris	Argileuse	Ferro-magnésiens millimétriques très altérés et oxydés ocre rouille.	Lave grise très altérée et à minéraux oxydés, argile rouge colmatant les fissures.	Isaltérites	Isaltérites de lave à ferromagnésiens	3	Néant	
99	01/10/2010	09:30:23	510711	8594163	105	Claire	Gris bleuté	Microclitique	Rares	Basalte sub-aphyrique à nombreux microclites, massif, en boules	Basalte aphyrique	Basalte aphyrique à sub-aphyrique	5	Néant	
100	01/10/2010	09:34:28	510836	8594052	94	Claire	Gris	Microclitique	Rares	Basalte sub-aphyrique, massif, en boules	Basalte aphyrique	Basalte aphyrique à sub-aphyrique			
101	01/10/2010	09:50:15	510054	8594047	138	Sombre	Rouge	Argileuse	Sans objet	Latérites rouges	Latérites	Allotérites		Néant	
102	01/10/2010	09:52:07	509882	8594086	137	Sombre	Rouge	Argileuse	Absent	Latérites colluvionnées	Latérites colluvionnées	Allotérites		Néant	
104	01/10/2010	10:13:32	509471	8593996	152	Sombre				Brèches de base de coulée soudées à chaud	Brèches de coulées	Basalte de base de coulée	3	Néant	
104'	01/10/2010	10:13:32	509471	8593996	152	Mi-claire / mi-sombre	Gris bleuté	Microclitique aphyrique	Absent	Lave massive présentant une belle fissuration verticale (environ une fracture tous les 50 cm), vacuoles.	Basalte aphyrique	Basalte aphyrique à sub-aphyrique	3	Verticale régulière tous les 50 cm	
106	01/10/2010	10:50:11	510324	8593542	115	Sombre	Gris bleuté	Microclitique aphyrique	Absent	Boules de lave dures, massives, gris bleuté, sombre, aphyrique, microclitique. Présence de traces plus sombre, grumeleuses, sur la cassure fraîche.	Basalte aphyrique	Basalte aphyrique à sub-aphyrique			
107	01/10/2010	10:54:33	510265	8593467	134		Ocre rouge	Argileuse	Sans objet	Latérite ocre-rouge	Latérites	Allotérites		Néant	
109	01/10/2010	11:10:05	510318	8593450	117	Sombre	Gris bleuté	Microclitique aphyrique	Absent	Lave massive présentant une belle fissuration verticale (environ une fracture tous les 50 cm), lave gris bleuté aphyrique avec quelques vacuoles	Basalte aphyrique	Basalte aphyrique à sub-aphyrique	2	Verticale régulière tous les 50 cm	
112	01/10/2010	11:55:48	510063	8592225	194	Claire	Gris	Argileuse	Nombreux ferromagnésiens < 1 mm altérés	Petit padza constitué d'altérites grises à nombreux minéraux altérés	Padza	Isaltérites de lave à ferromagnésiens			
113	01/10/2010	12:04:09	510078	8591851	137	Sombre	Rouge	Argileuse	Sans objet	Latérites	Latérites	Allotérites		Néant	
118	01/10/2010	13:45:06	511647	8592704	66	Claire	Gris	Argileuse, pulvérulente	Ferro-magnésiens altérés ocre-rouille abondant	Lave altérée, à nombreux ferro-magnésiens oxydés, rouille-ocre, roche molle, argilisée	Isaltérites	Isaltérites de lave à ferromagnésiens		Non	
122	01/10/2010	14:51:59	512241	8593041	24	Claire	Gris	Microclitique aphyrique	Absent	Basalte sub-aphyrique, massif, fuidal et fissuré	Basalte aphyrique	Basalte aphyrique à sub-aphyrique		Oui	
127	04/10/2010	10:03:07	511740	8590240	26		Rouge	Argileuse	Absent	Latérites rouges avec des blocs cannelés de roche massive au niveau de la rivière	Latérites	Allotérites	3	Néant	
131	04/10/2010	10:57:11	511229	8589651	13			Argileuse	Absent	Contact entre des alluvions à blocs lités, marron ocre, en rive droite et des isaltérites de lave sombre en rive gauche	Alluvions / isaltérites	Isaltérites de lave indifférenciées	3		Aquitard

MARK	DATE	HEURE	X_RGM04	Y_RGM04	Z	TEINTE	COULEUR	TEXTURE	PHENOCRISTAUX	DESCRIPTION	DENOMINATION	LITHOLOGIE	PUISSANCE	FISSURATION	HYDROGEOLOG
134	04/10/2010	11:44:04	510660	8589296	23	Sombre	Grise	Microclitique	Ferro-magnésiens présents < 2 mm (Olivine et pyroxène)	Lave grise sombre à olivine et pyroxènes légèrement oxydés. Petits prismes de 0,15 x 0,15 m de base.	Basalte à olivine et pyroxène	Basalte à olivine et/ou pyroxène et/ou amphibole		Prismation fine	Drain
135	04/10/2010	11:56:19	510647	8589245	21	Sombre		Microclitique	Nombreux phénocristaux d'olivine et de pyroxène millimétriques	Lave altérée avec une prismation visible et des précipitations dans les fissures (filonnets bien cristallisés et argiles d'altération). Le cœur des prismes reste très sain. Nombreuses olivines et pyroxènes millimétriques.	Basalte à olivine et pyroxène (isaltérites)	Isaltérites de lave à ferro-magnésiens		Prismation	
138	04/10/2010	12:30:26	510015	8590342	91	Clair	Marron brun	Argileuse	Nombreux phénocristaux de ferro-magnésiens très altérés et oxydés rouille-ocre	Isaltérites : lave très altérée, argileuse avec une structure en boule et des fissures bien marquées. Fantômes de phénocristaux rouille-ocre nombreux dans une matrice argilisée marron.	Isaltérites de lave	Isaltérites de lave à ferro-magnésiens		Fissuration et boules	
140	04/10/2010	13:06:05	510175	8590573	57	Sombre	Marron	Argileuse	Nombreux clastes et phénocristaux automorphes très altérés, couleur rouille.	Clastes et cristaux automorphes très altérés de couleur rouille pris dans une matrice fine, argileuse. Quelques blocs de lave très vacuolaires (scories, lapillis)	Pyroclastites	Isaltérites de pyroclastites		Néant	
141	04/10/2010	14:00:02	510041	8590419	84	Clair	Gris bleuté	Argileuse	Nombreux ferro-magnésiens oxydés rouille-ocre.	Lave altérée, très vacuolaire, de teinte claire, gris bleuté à nombreux ferro-magnésiens rouille (Olivine ?). Lave en contact avec des latérites rouges à blocs (lave gris bleuté sombre, aphyrique, cassure esquilleuse, massive) colluvionnées.	Basalte à olivine	Isaltérites de lave à ferro-magnésiens			
142	04/10/2010	14:08:42	509978	8590517	98	Clair	Marron ocre	Argileuse	Absent	Pyroclastite fine indurées.	Pyroclastites	Pyroclastites à éléments fins			
143	04/10/2010	14:13:27	509978	8590563	100	Clair	Marron	Argileuse	Absent	Brèches colluvionnées, très altérées à matrice marron et à blocs altérés gris.	Brèches	Allotérites		Néant	
145	04/10/2010	14:28:32	509862	8591177	96	Sombre	Gris bleuté		Rares phénocristaux de ferro-magnésiens < 1 mm (Olivine et pyroxène)	Lave à patine sombre, matrice gris bleuté sombre, grumeleuse, phénocristaux peu nombreux (< 1 mm) voire quelques cristaux de l'ordre de 3 mm, Olivine et pyroxène ?	Basalte sub-aphyrique à olivine et pyroxène	Basalte aphyrique à sub-aphyrique		Fissuration fine	
147	04/10/2010	15:48:59	509028	8591636	127	Sombre	Gris bleuté	Microclitique	Rares phénocristaux de ferro-magnésiens < 1 mm (Olivine et pyroxène)	Lave subaphyrique, gris bleuté sombre, à rare olivines et pyroxènes < 1 mm	Basalte sub-aphyrique à olivine et pyroxène	Basalte aphyrique à sub-aphyrique		Fissuration fine	
153	04/10/2010	17:01:03	509410	8590710	66	Sombre	Gris bleuté	Microclitique	Rares ferro-magnésiens automorphes < 5 mm	Lave à cassure esquilleuse, gris sombre, bleuté à rares ferro-magnésiens < 5 mm (Pyroxènes). Débit en dalles de 0,3x0,3x0,1 m très marqué.	Dyke de téphrite	Basalte aphyrique à sub-aphyrique		Très fissuré	Drain
155	04/10/2010	17:23:24	509557	8590210	47		Gris marron	Argileuse	Absent	Roche meuble, marron à brune, litée à nombreux clastes.	Pyroclastites	Isaltérites de pyroclastites		Néant	Aquitard
165	05/10/2010	14:30:23	509499	8595383	132	Sombre	Gris bleuté	Microclitique	Exceptionnels	Lave sombre, gris bleuté, saine et massive, aphyrique à fissuration grossière	Basalte aphyrique	Basalte aphyrique à sub-aphyrique		Fissuration grossière	Aquiclude
166	05/10/2010	14:44:18	509714	8595329	129	Sombre	Rouge	Argileuse, grumeleuse	Absent	Latérites rouges reposant sur des basaltes assez massifs. De nombreuses émergences et plantes hydrophiles visibles. La rivière coule sur les basaltes.	Latérites	Allotérites		Néant	Aquitard
171	05/10/2010	16:02:23	510682	8595228	86	Clair	Grise	Argileuse, pulvérulente	Nombreux ferro-magnésiens altérés et oxydés ocre-rouille	Isaltérite grise de lave à nombreux ferro-magnésiens oxydés < 1 mm. Une lentille de matériaux fins, rouge brique, ressemblant à des argiles à petits clastes < 1 mm, non pulvérulente est recouverte par les isaltérites (paléo-sol ?).	Isaltérites	Isaltérites de lave à ferro-magnésiens		Néant	Aquitard
172	05/10/2010	17:04:42	512033	8593593	12	Sombre	Gris bleuté	Microclitique	Rares ferro-magnésiens < 1 mm (Pyroxène ?).	Lave massive, gris bleuté, sombre, sub-aphyrique à pyroxènes rares < 1 mm. Nombreuses fissures de refroidissement frustrées et lâches (tous les mètres environ).	Basalte sub-aphyrique à pyroxènes	Pyroclastites à éléments fins		Fissuration de refroidissement frustrée et lâche	Aquiclude
176	06/10/2010	10:44:45	518218	8591158	55	Clair	Ocre gris	Sablo-graveleuse	Nombreux clastes et phénocristaux automorphes de ferro-magnésiens (< 3 mm)	Pyroclastites indurées de couleur ocre sans stratification visible, nombreux clastes polygéniques dont de nombreux cristaux de ferro-magnésiens automorphes < 3 mm.	Pyroclastites	Pyroclastites à éléments fins	5	Légères fissures sub-horizontales, tous les mètres environ.	Aquitard / Aquiclude
180	06/10/2010	11:08:06	518250	8590945	66	Sombre	Gris bleuté	Microclitique	Non observés	Lave très massive et très dure, sombre, gris bleuté avec une brèche de base de coulée à scories et éléments hétérogènes. Fissuration dense tous les décimètres, découpant des pavés d'un à deux décimètre de côté. Le substrat de la rivière reste les pyroclastites.	Basalte aphyrique	Basalte aphyrique à sub-aphyrique	5	Fissuration marquée, blocs décimétriques.	Drain
186	06/10/2010	12:18:11	518216	8591176	54	Clair	Ocre gris	Sablo-graveleuse	Nombreux clastes et phénocristaux automorphes de ferro-magnésiens (< 3 mm)	Pyroclastites suivies le long de la rivière vers l'amont jusqu'à la MARK184. Description : cf. MARK176.	Pyroclastites	Pyroclastites à éléments fins	5	Légères fissures sub-horizontales, tous les mètres environ.	Aquitard / Aquiclude
191	06/10/2010	13:52:05	515304	8591247	29					Basaltes, très prismés, les orgues formant des cascades.	Basalte	Basalte aphyrique à sub-aphyrique	10	Intense	Drain
196	06/10/2010	14:29:57	516202	8589511	83					Basaltes sains et massifs surplombant la prise d'eau de Bouyouini haut.	Basalte	Basalte aphyrique à sub-aphyrique	4	Fissuration sub-v verticale et sub-horizontale découpant des blocs métriques	Drain
213	07/10/2010	11:03:20	507895	8589453	15	Sombre	Gris bleuté	Microclitique	Nombreux ferro-magnésiens (Px) < 1 mm	Lave sombre, gris bleuté, saine et massive à nombreux pyroxènes < 1 mm. Brèche de base de coulée visibles dans le fond de la rivière	Basalte à pyroxène	Basalte aphyrique à sub-aphyrique	6	Faible	Aquiclude
215	07/10/2010	12:24:26	512180	8592051	144	Clair	Rouge	Argileuse	Mégacristaux de pyroxènes automorphes occasionnels, mm à cm	Sol rouge où des projections de lave sont visibles (lapillis, scories, bombes) à texture vacuolaire et fluidale. Occasionnellement, on retrouve de nombreux cristaux de pyroxènes automorphes pouvant atteindre plusieurs centimètres.	Dôme de scorie	Isaltérites de pyroclastites	3	Néant	Aquitard



### 3.2. RECONNAISSANCES HYDROGEOLOGIQUES

Le secteur d'étude est majoritairement marqué par la présence de formations volcaniques (basaltes, basanites, ankaramites, phonolites), qui constituent la principale cible d'intérêt pour la prospection des eaux souterraines à Mayotte en général et sur notre secteur d'étude en particulier.

Les prospections ont ainsi été axées sur la caractérisation des principaux déterminismes (structure, fissuration et altération) caractéristiques des formations volcaniques, qui sont succinctement rappelés ci-dessous.

Leurs propriétés aquifères dépendent en effet étroitement de leurs conditions de mise en place, de fissuration et de fracturation. Par ailleurs, comme pour l'ensemble des autres formations volcaniques, leur degré d'altération joue également un rôle important. Les laves présentent ainsi une forte variabilité de leurs propriétés hydrodynamiques au sein d'une même coulée qui se traduit, en forage, par des variations de la perméabilité selon la verticale. Cette variabilité s'explique majoritairement par la structure interne des coulées, liée à leur mode de mise en place. Les coulées comprennent ainsi généralement, de haut en bas (Illustration 5 et Illustration 6) : une surface scoriacée montrant soit des gratons, soit un niveau scoriacé ; un cœur de coulée plus massif souvent diaclasé (fissures de refroidissement et/ou de flux) ; une brèche de base de coulée présentant des éléments scoriacés, en gratons, et reprenant fréquemment des blocs de la coulée sous-jacente.

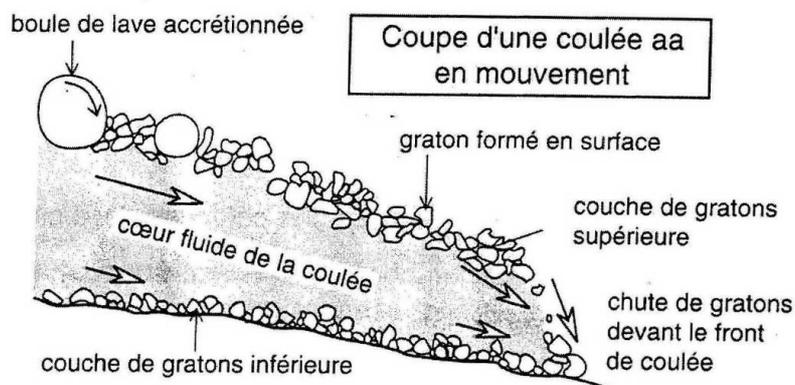
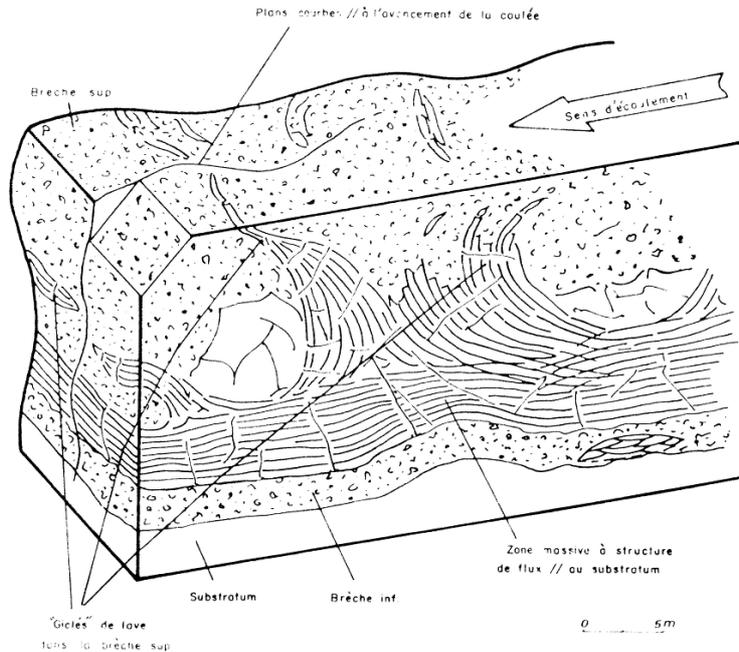


Illustration 5 : coupe d'une coulée de type « aa » en mouvement

Les reconnaissances de terrains ont ainsi permis de mettre en évidence ce type de structure de coulées, notamment en amont du barrage de Dzoumogné (à l'aval du Mro Oua Bandrani, points GPS 13 et 14).

L'écoulement de la lave est à l'origine de **figures de flux** qui se traduisent fréquemment par une fissuration de la roche et/ou un débit en plaquettes, souvent

parallèle au substratum. Le **refroidissement** de la lave génère lui aussi une fissuration (prismation avec des fissures en général perpendiculaires à la surface de refroidissement). Ces processus confèrent aux laves des caractéristiques hydrauliques intéressantes surtout si cette perméabilité initiale est renforcée par une fracturation d'origine tectonique.



*Illustration 6 : schéma type d'une coulée andésitique, d'après Westercamp, 1972*

Les reconnaissances de terrains ont ainsi permis de mettre en évidence ce type de figures de flux à plusieurs reprises, et notamment en aval du pont de la RN sur la rivière Bougoumouhé (point GPS 134) ou en amont de la rivière Andrianabé (points GPS 148, 150 et 151, cf. Illustration 7).

L'**altération climatique** de la roche se traduit par une argilisation partielle ou totale de ses minéraux constitutifs qui oblitère, en partie ou complètement, une éventuelle perméabilité. L'altérabilité des différents faciès constitutifs d'une coulée est variable. Dans un schéma type de coulée à la lave relativement fluide, les faciès de bordure (brèches et scories des murs, toit et flancs de coulée) présentent, du fait de leurs porosités et perméabilités initiales, une plus forte aptitude à s'altérer rapidement que le cœur de l'écoulement, massif car refroidi lentement. Ainsi, un même ensemble lithologique peut constituer à la fois des niveaux aquifères (dans ses parties non altérées) et un substratum ou toit imperméables vis-à-vis des formations sus ou sous-jacentes (pour ce qui concerne ses parties argilisées).

L'observation des horizons altérés permet ainsi, grâce à l'observation de figures d'altérations en pelures d'oignons, de suspecter la présence sous-jacente d'horizons sains et fissurés (Illustration 9). Ce type de figures a notamment été observé en aval du barrage de Dzoumonié (Point GPS 9) et sur une crête entre la rivière Mapouera et le Mro Oua Bandrani (Point GPS 99).



*Illustration 7 : basaltes fissurés et fracturés affleurant dans la rivière Andrianabé*



*Illustration 8 : profil d'altération présentant des boules avec des figures d'altération en « pelures d'oignons ».*

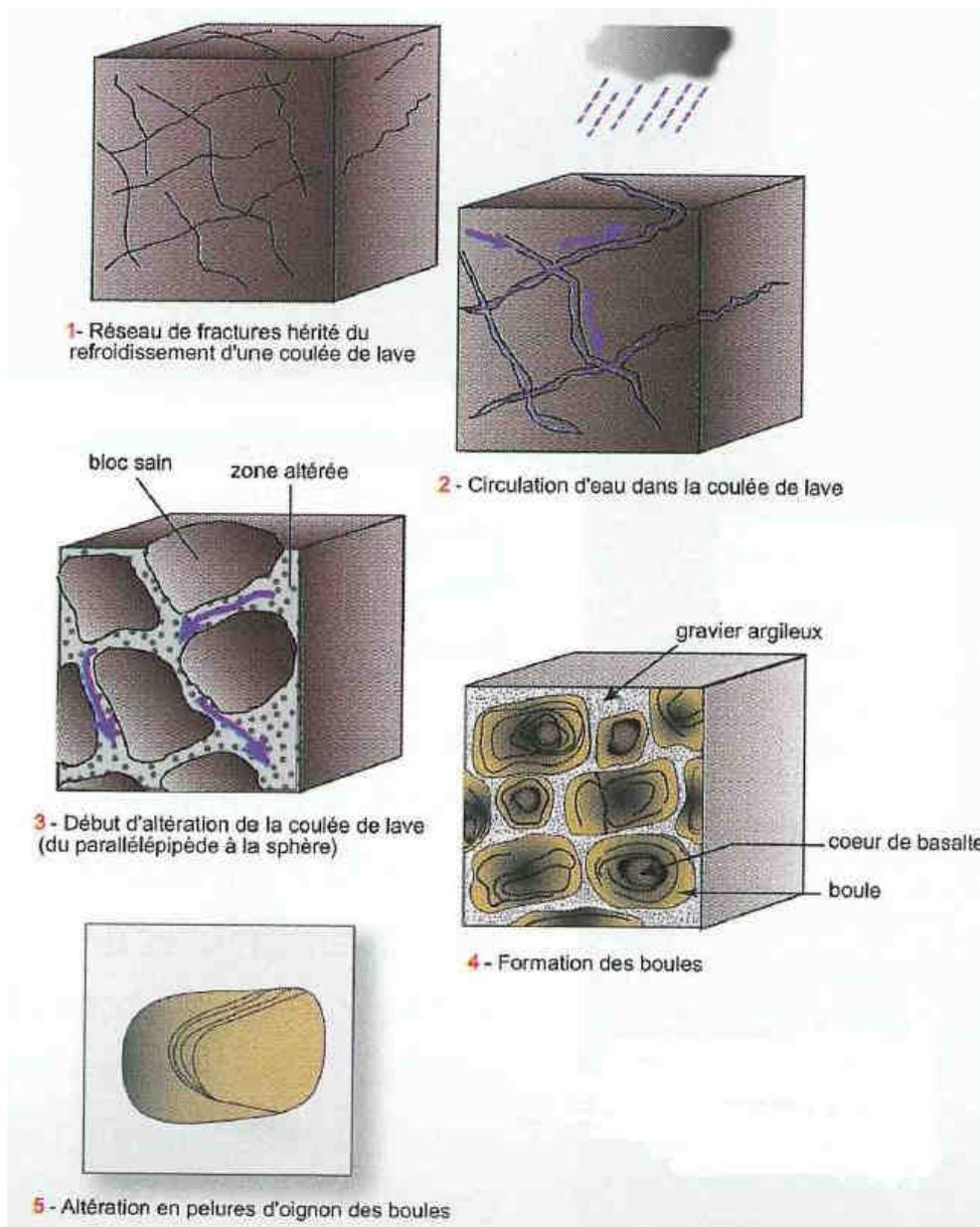


Illustration 9 : schémas explicatifs du processus d'altération en boules d'une coulée de lave (D'après Graviou et Rançon, 2006)

Le rôle des latérites et des pyroclastites n'est pour l'instant pas clairement déterminé. En effet les latérites sont globalement imperméables, mais elles pourraient également jouer localement le rôle d'éponte certes peu perméable mais capacitive, qui pourraient être drainées via des laves fissurées sous-jacentes. La question se pose également concernant les dépôts de pyroclastites (d'épaisseur métrique à plurimétrique, déposés majoritairement sur le versant Ouest du massif de Digo), qui pourraient être localement capacitif, en fonction de leur position topographique.

Les interactions eaux souterraines - eaux de surface ont été abordées de manière indirecte, en estimant les débits des cours d'eau et en calculant leur débit spécifique. Les mesures de débit ayant été réalisées en saison sèche, les cours d'eau sont alors majoritairement alimentées par les eaux souterraines.

Tableau 4 : mesures de débits et calculs des débits spécifiques

	Q mesuré	superficie BV	Débit spécifique	
	l/s	km <sup>2</sup>	l/s/km <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /h/km <sup>2</sup>
Massimoni	1.5	4.3	0.3	1.3
Sud Mapouéra	1	2.3	0.4	1.5
Maouéni	1	2.2	0.5	1.6
Méresse	1.5	2.3	0.6	2.3
Bouyouni	5.5	7.6	0.7	2.6
Batirini	2.5	3.3	0.7	2.7
Mitséni	0.5	0.5	0.9	3.3
Maboungani	1	1.0	1.0	3.5
Bandrani	4	3.4	1.2	4.2
Bougoumouhé	2.5	2.1	1.2	4.4
Longoni	3	2.3	1.3	4.6
Béja	2.5	1.7	1.4	5.2
Mrowalé	7	4.6	1.5	5.5
Mouhogoni	4.5	2.7	1.7	6.0
Mapouéra	6	3.0	2.0	7.2
Chirini	3.5	1.7	2.0	7.3
Andrianabé	5.5	2.3	2.4	8.5

Les bassins versants des cours d'eau pérennes peuvent ainsi être classés de la façon suivante (cf. Illustration) :

- ✓ 3 cours d'eau ont des débits spécifiques compris entre 2 et 2.5 l/s/km<sup>2</sup> (Andrianabé, Chirini, Mapouera). Ce sont les valeurs les plus élevées mesurées dans le secteur d'étude,
- ✓ 2 bassins versants ont des débits spécifiques compris entre 1.5 et 2 l/s/km<sup>2</sup> (Mouhogoni et Mrowalé),
- ✓ 4 bassins versants ont des débits spécifiques légèrement plus faibles compris entre 1 et 1.5 l/s/km<sup>2</sup> (Béja-Est, Longoni, Bougoumouhé et Bandrani)
- ✓ 5 bassins versants ont des débits spécifiques compris entre 0.5 et 1 l/s/km<sup>2</sup> (Maboungani, Mitséni, Batirini, Bouyouni et Méresse).
- ✓ Enfin 3 bassins versants ont des débits spécifiques inférieurs à 0.5 l/s/km<sup>2</sup> (Sud Maouéni, Sud Mapouéra et massimoni).

Ces cours d'eau seraient ainsi alimentés par des aquifères suffisamment capacitifs pour que les cours d'eau ne soient jamais sec. Plus le débit spécifique est élevé, plus les aquifères associés présenteraient de bonnes caractéristiques hydrogéologiques.

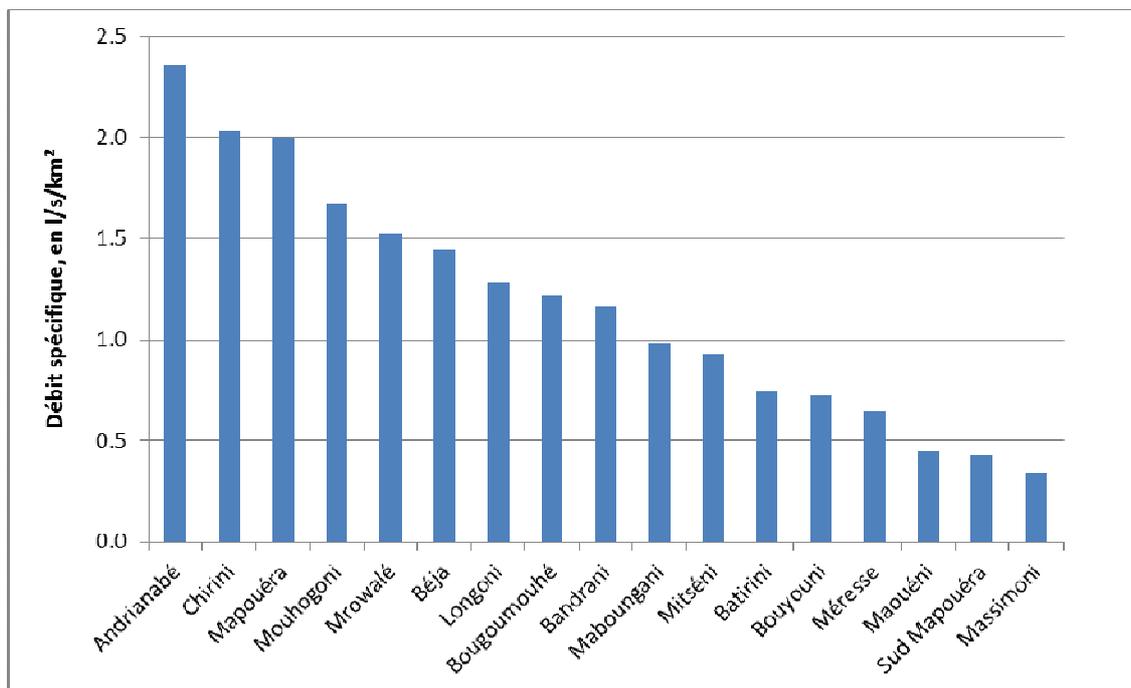


Illustration 10 : histogramme des débits spécifiques classés des cours d'eau pérennes jaugés

Les autres bassins versants sont sec ou quasiment secs (Béja, Bizijou), avec des débits spécifiques nuls ou s'en approchant. Compte tenu de la nature majoritairement imperméable des horizons superficiels, l'hypothèse la plus probable est que ces bassins versants soient majoritairement ruisselants (d'autant plus quand ils présentent des pentes élevées), avec une part d'eau infiltrée très faible.

Néanmoins, la présence de zones d'infiltrations pourrait être envisagée dans certains cas particulier :

- ✓ La rivière Massimoni est à sec sur la majorité de son linéaire. Elle ne devient pérenne qu'à environ 300 m de son exutoire en mer, grâce à quelques sources situées entre 15 et 20 m d'altitude. Ces sources pourraient être alimentées en amont par infiltration au sein des basaltes ankaramitiques et des basanites. Il est également possible qu'une partie des eaux infiltrées dans le bassin versant de la Massimoni s'écoulent dans le bassin versant de l'Andrianabé (celui-ci a d'ailleurs le débit spécifique le plus élevé de la zone d'étude).
- ✓ Une hypothèse similaire pourrait être envisagée pour le cours d'eau de la Béja-ouest : celui-ci est sec, alors que son affluent « Est » est pérenne ( $Q_s=1.25$  l/s/km<sup>2</sup>). Le cours d'eau « Ouest » est également à une altitude supérieure (+10m) par rapport à l'affluent Est. Une infiltration et une circulation souterraine au sein des basaltes sous-jacent pourrait ainsi être envisagée.
- ✓ Enfin, le bassin versant « Sud Mapouéra » pourrait également présenter le même type de configuration, avec un écoulement vers un secteur qui reste à déterminer, et qui pourrait dépendre du sens d'écoulement des laves.

La remontée ou descente des cours d'eau a également permis de mettre en évidence au moins deux types d'écoulement/Alimentation des cours d'eau différents :

- ✓ Soit le cours d'eau est alimenté uniquement par une source (ou plusieurs situées à proximité) et aucun apport supplémentaire d'eau n'est observé jusqu'à son exutoire (avec un ruissellement majoritaire supposé). Ce cas est notamment observé pour la rivière Longoni (sources situées à environ 90 m d'altitude).
- ✓ Soit le cours d'eau prend naissance à une émergence et son débit augmente progressivement jusqu'à son exutoire ce qui suppose une alimentation. Ce cas est observé pour les rivières suivantes : Andrianabé, Mouhogoni, Mapouera. Ces rivières sont également celles qui présentent les plus forts débits spécifiques.

Les informations présentées dans ce chapitre, et l'ensemble des observations réalisées sur le terrain, vont être confrontées aux données issues des mesures chimiques, des mesures de datations CFC et également aux mesures de conductivités réalisées dans les sources et cours d'eau afin de bâtir les modèles conceptuels du secteur Nord-Ouest.

Une analyse hydro-géomorphologique va également être réalisée à partir d'une analyse numérique automatisée du MNT (cf. Annexe 1) avec comme objectif d'identifier, de délimiter et de caractériser des unités fonctionnelles homogènes, dont les propriétés hydrogéologiques pourraient être déterminées à partir des observations réalisées sur le terrain, et notamment les calculs de débits spécifiques présentés ci-dessus. Cette analyse, si elle s'avère concluante, pourra servir de base à une cartographie des formations potentiellement aquifères.

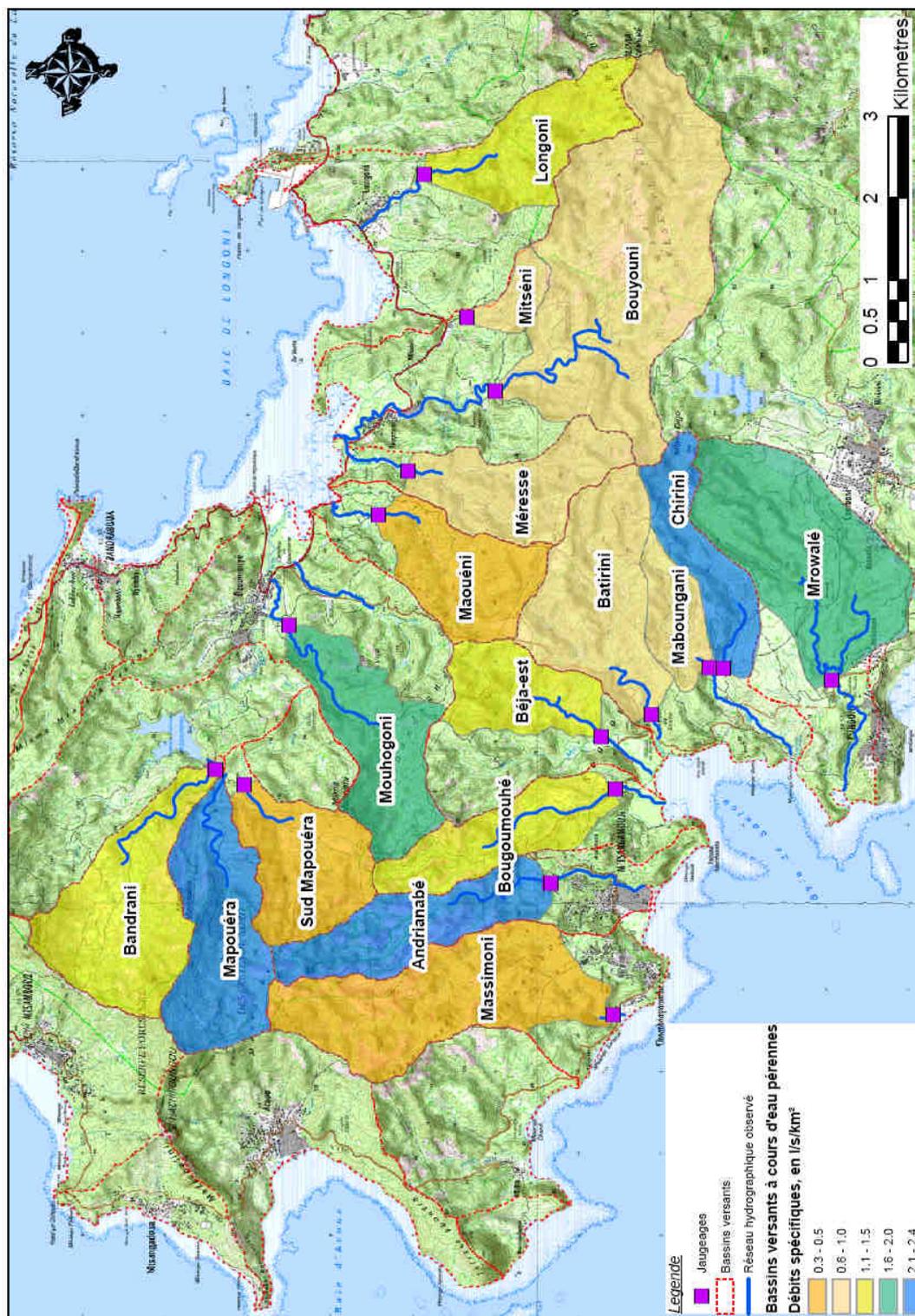


Illustration 11 : classement des cours d'eau en fonction de leurs débits spécifiques

Tableau 5 : tableau récapitulatif des reconnaissances hydrogéologiques.

MARK	DATE	HEURE	X_RGM04	Y_RGM04	Z_NGM	TYPE	PH	CONDUCTIVITE	TEMP	Q	OBSERVATIONS
03	28/09/2010	08:46:37	511652	5594245	31	Rivière	7,1	178	24,6	4	Mesure prise au niveau du radier, en aval de la retenue collinaire
04	28/09/2010	08:54:11	511634	5594280	33	Rivière	7,0	177	25,7	4	Mesure prise entre le radier et la retenue collinaire, près des roches saines affleurantes
05	28/09/2010	09:08:43	511621	5594288	30	Emergence	6,4	179	26,2	0,1	Petite émergence en rive droite au contact entre les isotérites et la roche massive, environ 0,5 m au-dessus de la rivière
07	28/09/2010	09:27:38	511621	5594305	34	Rivière	7,0	178	25,8	4	Mesure prise entre le radier et la retenue collinaire, près de la surverse
15	28/09/2010	11:04:32	511009	5594324	60	Rivière	6,2	190	25,8	5	Radier au-dessus de la Bândram sur la route de la retenue collinaire
20	28/09/2010	11:52:28	511531	5595040	57	Talweg				0	Sec
24	28/09/2010	12:12:06	511585	5594674	79	Rivière	7,5	209	25,1	-1	Rivière sur le premier radier en allant au piezo de Dzoumogné
25	28/09/2010	12:23:58	510670	5594530	79	Emergence	7,1	212	25,6	0,05	Source située en rive droite de la rivière MARK24, site de lessive
26	28/09/2010	12:31:28	510633	5594501	79	Zone humide				0	En bordure de rivière
28	28/09/2010	13:48:45	510400	5594760	94	Rivière	7,1	162	23,3	0,1	Rivière longeant le piézomètre de Dzoumogné, presque à sec, écoulement vers le SSO
29	28/09/2010	14:02:27	510235	5594762	308	Talweg				0	Sec
31	28/09/2010	14:21:39	510289	5594530	118	Talweg				0	Sec
35	28/09/2010	14:47:43	509923	5594507	167	Talweg				0	Sec
41	28/09/2010	15:42:34	508112	5594307	284	Talweg				0,2	Vasque en bordure de route
42	28/09/2010	15:46:33	508093	5594325	291	Talweg	8,1	299	22,2	0,2	En amont du point précédent, hors des eaux stagnantes
52	29/09/2010		510265	5598098	63	Emergence	7,6	730	26,2	0	Jointure de deux talwegs en amont d'Hindrema. Pas de débit apparent. Aménagement pour le
53	29/09/2010		509290	5597747	78	Emergence	7,2	628		0,01	Fond de la weg. Vasque avec un très faible débit. Nombreuses plantes hydrophiles et sols hydromorphes. Aval.
53'	29/09/2010		509290	5597747	78	Emergence	7,1	622		0,01	Fond de la weg. Vasque avec un très faible débit. Nombreuses plantes hydrophiles et sols hydromorphes. Vasque.
54	29/09/2010		509285	5597718	82	Talweg				-1	Aménagement pour lessive.
55	29/09/2010		509286	5597696	83	Zone humide				0	Réurgence avec nombreuses plantes hydrophiles et sols hydromorphes. Mesure impossible à cause de la végétation verdoyante et luxuriante.
56	29/09/2010		509351	5597580	117	Emergence	7,5	597	24,0	0,01	Fond de la weg, dans une vasque. Nombreuses plantes hydrophiles et sols hydromorphes.
55	29/09/2010		506194	5590297	1					0	Sec
59	29/09/2010		506583	5590893	21	Talweg				0	Sec
60	30/09/2010	08:29:30	511989	5586679	51	Rivière	7,1	197	21,6	7	Captage de la Mwawala. Traces de lessives. 5-20 l/s.
61	30/09/2010	08:47:38	512457	5586484	56	Rivière	7,0	147	23,0	-1	Mwawala amont. Débit instable: trop de divagations
62	30/09/2010	08:57:02	512599	5586277	60	Puits	6,8	154	24,1	-1	Puits: prof. 2,30 m/TN; niveau statique à 1,78m/TN
63	30/09/2010	09:04:06	512570	5586275	59	Rivière	6,8	151	24,0	5	Rivière adjacente au puits
64	30/09/2010	09:19:16	512932	5586272	66	Puits	7,5	215	24,4	-1	Puits maçonné - 2x2 maçonné
65	30/09/2010	09:28:12	513036	5586381	68	Zone humide				0	Pas d'écoulement: Emergence de la rivière (?)
70	30/09/2010	10:10:17	512979	5586558	65	Gue	6,8	156	23,0	-1	Passage à gué sur la rivière pour les voitures. Mesures prises en aval
74	30/09/2010	12:11:09	513185	5587042	68	Puits	6,2	123	25,1	-1	Puits: prof. 2,15 m/TN; niveau statique à 1 m/TN. Utilisé pour l'irrigation d'un champ de tomates. Zone humide constituant l'émergence d'une rivière à une dizaine de mètres
75	30-sept-10	12:45:01	513238	5587046	69	Emergence	7,0	142	24,6	-1	Zone humide / émergence
77	30/09/2010	13:10:04	513865	5587085	64	Talweg				0	Sec
78	30/09/2010	13:16:28	513844	5587781	29	Rivière	7,9	250	22,8	4,5	Rivière aménagée avec un saut pour la lessive.
82	30/09/2010	13:43:39	513839	5587748	54	Rivière	7,8	230	24,1	3,5	Rivière: Débit de 3 l/s
83	30/09/2010	13:54:26	513817	5587742	59	Rivière	7,2	223	24,9	3	Rivière: Débit de 3 l/s (influence par les rejets d'un Alambic)
85	30/09/2010	14:10:06	512888	5587764	63	Emergence	7,4	245	25,5	0,5	Emergence.
86	30/09/2010	14:20:40	512902	5587812	64	Rivière	7,6	223	24,9	1,5	Rivière coulant en amont, non accessible, 1-2 l/s
87	30/09/2010	14:41:59	512138	5588016	42	Rivière	7,8	231	24,1	3,5	Rivière: mesure prise sur le radier, 3-4 l/s
88	30/09/2010	14:47:39	512143	5588157	46	Rivière	7,1	194	23,7	1	Rivière: mesure prise sur le radier, 1 l/s
90	30/09/2010	14:58:14	512442	5588431	57	Zone humide				0	Zone r/-humide, pas de chenaux, jamais d'écoulement
94	30/09/2010	15:38:38	511570	5588561	11	Rivière	7,6	222	23,8	2,5	Mesure prise sur un petit gue, 2-3 l/s
95	30/09/2010	15:45:38	511229	5589299	57	Rivière	6,9	185	/	1	Mesure prise au niveau d'un site de lessive, < 1 l/s
100	01/10/2010	09:34:28	510836	5594052	94	Rivière	8,1	285	22,8	6	Présence d'une prise d'eau captant la majeure du débit de la rivière (débit résiduel de 1 à 2 l/s). Les eaux ca press sont dérivées vers le bassin versant de la retenue collinaire de Dzoumogné.
102	01/10/2010	09:52:07	509882	5594086	137	Talweg				0	Sec
103	01/10/2010	09:55:30	509867	5594302	135	Rivière	8,3	294	22,4	2	
104	01/10/2010	10:19:32	509471	5593936	152	Rivière	8,2	292	21,7	2,5	
105	01/10/2010	10:41:49	510713	5593795	97	Rivière	7,6	248	22,9	-1	Prise d'eau captant 100% du débit de la rivière
108	01/10/2010	11:01:35	510274	5593477	132	Zone humide				-1	Caniveau humide sur le bord de route
109	01/10/2010	11:10:05	510318	5593450	117	Rivière	7,7	241		1,5	Petites résurgences en rive droite, a priori au contact entre les colluvions et la lave constituée à priori le lit de la rivière (ou du moins ses bordures)
110	01/10/2010	11:29:55	510236	5593115	125	Rivière				0	Sec
111	01/10/2010	11:34:54	510299	5593385	125	Emergence	7,2	232	22,1	0,01	Début de la rivière: r/- à l'interface colluvions à blocs / isotérites de la vie, grise.
114	01/10/2010	12:17:50	510639	5592011	99	Zone humide				0	Accès de la pause repas
115	01/10/2010	13:13:49	511201	5592026	82	Rivière				0	Sec
116	01/10/2010	13:20:31	511069	5592055	54	Rivière	6,8	140	24,0	0	Eau stagnante ?
117	01/10/2010	13:30:32	511472	5592177	80	Rivière	6,5	149	25,0	0,5	Petit pont sur la rivière
119	01/10/2010	13:54:03	511962	5592806	30	Rivière	7,5	218	25,3	2,5	
120	01/10/2010	14:29:19	512894	5593306	7	Rivière	7,5	317	27,0	11	Gue en aval du forage (Site de lessives)
121	01/10/2010	14:45:32	512381	5593140	9	Rivière	7,9	304	26,8	4,5	
123	01/10/2010	14:55:00	512432	5593520	25	Rivière	7,0	257	23,2	4,5	En amont du forage et du site de lessive
124	04/10/2010	09:27:23	511192	5593287	8	Rivière	6,6	192	23,7	2,5	For sur la RN, 2 à 3 l/s. Plaine alluviale (alluvions et colluvions)
125	04/10/2010	09:42:59	511681	5590003	23	Rivière	6,6	192	23,7	0,5	Rivière se transformant en marigot, débit faible < 1 l/s (cours secondaire)
126	04/10/2010	09:52:15	511742	5590988	27	Rivière	7,7	236	23,8	0,1	Petit affluent du marigot MARK25, 0,1 l/s
127	04/10/2010	10:03:07	511740	5590240	26	Rivière	7,4	195	24,8	0,5	Cours secondaire: alternance de petites vasques et de petits sauts (< 0,5 m), substrat de latérite rouge à blocs cailloux.
128	04/10/2010	10:06:35	511770	5590245	29	Piezomètre				-1	Beja 2
129	04/10/2010	10:34:32	511766	5590442	34	Rivière	7,2	228	24,5	1,5	Mesure pris avant un saut de 1 mètre. Substrat: alluvions et colluvions. Débit de l'ordre de 1,5 l/s (effet de seuil)
130	04/10/2010	10:44:36	511173	5589713	37	Rivière				0	Sec
132	04/10/2010	11:05:56	511265	5589553	30	Emergence	6,8	110	24,0	0,1	Début de la rivière (?), système de vasque sur un substrat argileux: alluvions à blocs décimétriques coalescés, compacts.
133	04/10/2010	11:39:29	510623	5589361	25	Rivière	7,4	196	23,5	2,5	
136	04/10/2010	12:06:22	510637	5589013	8	Rivière	7,4	196	22,8	2	
137	04/10/2010	12:22:13	510450	5589891	33	Rivière	7,5	204	24,1	2	
139	04/10/2010	12:45:15	510178	5590537	56	Rivière	8,1	225	25,6	3,5	Rivière avec alluvions à galets: 3 à 4 l/s
140	04/10/2010	13:06:05	510175	5590573	57	Rivière	7,5	228	23,1	0,1	Très faible débit de l'ordre de 0,1 l/s
140'	04/10/2010	13:06:05	510175	5590573	57	Rivière	8,0	225	25,5	3,5	Confluence de deux cours. Affluent creusé, ravine à flancs raides (3 à 4 mètres de haut) la forme d'une cascade. Débit de l'ordre de 3 à 4 l/s.
143	04/10/2010	14:13:27	509978	5590563	300	Talweg				0	Sec
144	04/10/2010	14:24:15	509795	5590382	92	Talweg				0	Sec

Caractérisation hydrogéologique des ressources en eau souterraine de Mayotte – Secteur Nord-Ouest

MARK	DATE	HEURE	X_RGM04	Y_RGM04	Z_NGM	TYPE	PH	CONDUCTIVITE	TEMP	Q	OBSERVATIONS
145	04/10/2010	14:23:32	509862	8591177	36	Talweg				0	Sec
146	04/10/2010	15:42:55	509306	8591579	327	Rivière				0	Sec
147	04/10/2010	15:48:59	509028	8591686	327	Rivière				0	Sec
148	04/10/2010	16:12:46	509253	8591296	309	Emergence	7,6	204	25,0	0,2	Debut de la rivière : saut (cascades) et suintements à 1 mètre du fond de la ravine
149	04/10/2010	16:24:46	509332	8591399	204	Emergence					Petite ligne de sources.
150	04/10/2010	16:30:20	509952	8591167	301	Rivière	8,0	230	24,8	4	
151	04/10/2010	16:45:39	509933	8590885	30	Rivière					Lit de rivière plat
152	04/10/2010	16:48:35	509824	8590895	33	Rivière	8,1	233	24,2	4,5	
154	04/10/2010	17:07:55	509546	8590644	63	Rivière	7,5	224	24,6	4	
155	04/10/2010	17:23:24	509557	8590210	47	Rivière	8,0	229	24,9	4	Mesure sur le radier au droit de F1
156	04/10/2010	17:31:55	509535	8590095	41	Rivière	8,0	233	24,6	5,5	Mesure sur le radier au droit de F2
157	05/10/2010	09:41:47	511016	8594211	58	Rivière	8,2	286	22,7	5,5	Rivière relevée MARK13, débit de 5 à 6 l/s
158	05/10/2010	09:54:35	510668	8594520	77	Rivière	7,5	225	23,7	1,5	
159	05/10/2010	10:09:30	510901	8594359	61	Rivière	8,4	299	23,1	4	Dérivation du bassin versant voisin (Mapouéira)
160	05/10/2010	10:21:15	510568	8594699	89	Rivière	7,4	215	24,1	1,5	Mesure au niveau du radier MARK26, 1 à 2 l/s
162	05/10/2010	10:43:39	510399	8594795	95	Rivière	7,4	160	23,5	0,5	Debit très faible
165	05/10/2010	13:45:57	510238	8594976	301	Rivière	7,4	159	25,1	0,4	Debit très faible de 0,2 à 0,5 l/s
164	05/10/2010	13:59:45	509850	8595201	117	Rivière	7,4	199	26,5	0,75	Rivière coulant sur des lavas grès bleuté sombre, aphyriques, sa line et massives avec une fissuration grossière.
165	05/10/2010	14:30:23	509499	8595383	332	Zone humide				0	Zone humide en amont de la rivière avec chenaux anastomozés, très argileuse et envahie de végétation.
166	05/10/2010	14:44:38	509734	8595429	329	Zone humide				0	Latérites rouges reposant sur des basaltes assez massifs. De nombreuses petites émergences et plantes hydrophiles visibles. Pas d'écoulement observable. En aval de cette zone, la rivière coule sur les basaltes.
167	05/10/2010	14:53:02	509767	8595280	325	Rivière	6,9	141	24,6	0,2	
168	05/10/2010	15:20:22	509781	8595794	322	Rivière				0	En eau mais sans écoulement (saut de plus de 2, 3 et 4 octobre)
169	05/10/2010	15:29:00	509948	8595915	120	Rivière				0	Seche
170	05/10/2010	15:47:57	510523	8595722	303	Rivière	7,7	429	24,7	0,01	Ruisseau plus qu'une rivière coule très faiblement
172	05/10/2010	16:02:23	510682	8595228	86	Rivière				0	Seche. En saison humide, rivière s'écoule sur des basaltes massifs à fissuration frustre et grossière, subaérique à rares $P_{a} < 1$ mm.
173	05/10/2010	09:59:05	517907	8593357	22	Rivière	8,2	304	24,9	3,5	Captage de Longoni, débit de 3 à 4 l/s
174	05/10/2010	10:13:53	518157	8593405	35	Rivière	9,3	307	24,8	3	Longoni
175	05/10/2010	10:35:28	518198	8593237	51	Rivière	8,2	300	24,9	3	Longoni
178	05/10/2010	10:55:58	518228	8593083	66	Rivière	8,4	242	25,3	1	Affluent de la Longoni (en RG)
179	06/10/2010	11:03:36	518244	8593076	65	Rivière	8,2	295	25,4	2,5	La Longoni en amont de la ravine, MARK178, débit de 2 à 3 l/s
181	06/10/2010	11:27:28	518371	8593057	82	Rivière	8,4	258	25,0	3,5	Cascade se jette dans le "cours principal", débit de 3 à 4 l/s
182	06/10/2010	11:39:39	518376	8593737	82	Emergence	7,7	256	26,4	0,25	Source adjacente à la Longoni (30 mètres) se jette dans celle-ci. Mesure faite en aval hydraulique de la source.
183	06/10/2010	11:42:15	518388	8593725	85	Emergence				0,25	Source cf. MARK182
184	06/10/2010	11:52:09	518398	8593729	84	Emergence	7,8	357	24,7	0,01	Origine des écoulements de la Longoni
185	06/10/2010	12:15:58	518394	8593125	56	Amenagement				-1	Prise d'eau artisanale : ~1 l/s prélevés.
187	06/10/2010	13:11:25	518411	8593095	41	Rivière	7,9	382	26,1	0,75	Debit à 0,5 - 1 l/s
188	06/10/2010	13:18:17	518529	8593915	5	Rivière	7,5	361	25,5	0,1	
189	06/10/2010	13:28:57	518688	8592003	8	Rivière	7,6	364	24,7	0,1	
190	06/10/2010	13:44:52	518729	8593385	34	Rivière	7,7	233	24,9	-1	Captage de Bouyouini bas. 72 cm à l'échelle de la usage
192	06/10/2010	14:01:52	518505	8593710	46	Amenagement				-1	Forage de Bouyouini-Bouyouin
193	06/10/2010	14:02:52	518515	8593754	44	Rivière	8,4	233	26,2	5,5	Radier sur le Bouyouini.
194	06/10/2010	14:14:13	518705	8593210	55	Rivière	7,7	239	25,7	4,5	Radier sur le Bouyouini. Pyroclastites indurées en substratum (?)
195	06/10/2010	14:22:38	518685	8593800	76	Rivière	7,6	235	25,7	0,3	Bouyouini débit de 0,2 à 0,5 l/s
196	06/10/2010	14:29:57	518202	8593511	83	Rivière	7,9	173	24,6	-1	Captage de Bouyouini haut. Capte tout le débit de la rivière (environ 5 l/s). Basaltes sans surplomb et le captage.
197	06/10/2010	14:42:39	518189	8593462	84	Rivière	8,0	162,2	24,0	1	1er affluent (RG) de l'affluent principal de la Bouyouini en amont du captage de Bouyouini haut.
198	06/10/2010	14:48:25	518239	8593474	83	Rivière	7,9	177	24,2	4	2ème affluent de l'affluent principal de la Bouyouini en amont du captage de Bouyouini haut.
199	06/10/2010	15:02:32	518844	8593282	304	Rivière	7,5	175	27,1	0,75	Bouyouini en amont. Prés du P24 - DIGC
200	06/10/2010	15:10:32	518795	8593237	111	Amenagement				-1	P24 - DIGC
201	06/10/2010	15:35:36	514714	8592494	3	Rivière	7,7	254	26,5	-1	Captage de Méréasse. Débits inestimables.
202	06/10/2010	15:48:27	514493	8593812	21	Amenagement				-1	Forage de Bouyouini-Méréasse
203	06/10/2010	15:50:03	514538	8593806	18	Rivière	7,8	247	26,6	1,5	Méréasse.
204	06/10/2010	16:15:12	514249	8593399	44	Rivière	7,7	225	25,8	0,1	Méréasse.
205	06/10/2010	16:49:07	514074	8592131	11	Rivière	7,6	233	25,5	1	Maouéni aval, débit de 1 l/s
206	07/10/2010	10:08:52	508783	8590099	73	Rivière				0	Sec
207	07/10/2010	10:13:59	508878	8590321	81	Rivière				0	Rivière en eau, sans écoulement
208	07/10/2010	10:40:05	507909	8589325	4	Rivière				0,5	Pont sur la Massimoni CDD1
209	07/10/2010	10:46:48	507991	8589430	11	Amenagement				-1	Seul sur la Massimoni
210	07/10/2010	10:50:26	507909	8589500	18	Rivière				-1	Sec, Massimoni
211	07/10/2010	10:51:58	507896	8589473	16	Emergence	7,2	402	26,1	0,1	Début de la Massimoni et émergences adjacentes
212	07/10/2010	10:57:59	507895	8589458	15	Emergence	7,7	410	26,0	0,1	Source 1
213	07/10/2010	11:03:20	507895	8589453	15	Emergence	7,3	421	26,4	1	Source 2
214	07/10/2010	11:30:38	507764	8589820	66	Emergence	6,5	390	26,2	0	Emergence de Tamaraki
216	07/10/2010	13:44:44	512748	8593777	54	Rivière				0	Sec
217	07/10/2010	13:49:59	512869	8592210	42	Emergence	6,2	157	26,5	0,75	Debut de la Bizjou
218	07/10/2010	14:08:00	513314	8593078	6	Rivière				0,25	Rivière à faible écoulement, zone agricole (banane, cucurbitacées, cocotiers...)
219	07/10/2010	14:12:39	513399	8593123	6	Rivière	7,4	222	27,4	0,1	Debit diminuant au cours de la zone agricole
220	07/10/2010	14:43:00	513091	8595964	13	Rivière				0	Sec

## 4. Campagne hydrogéochimique

Une campagne de prélèvement des eaux souterraines (forages, piézomètres et sources) dans la zone d'étude a été réalisée à la fin de l'été 2010 pour s'affranchir des contaminations par les eaux pluviales au niveau des émergences.

L'analyse chimique a pour objectif une première évaluation des caractéristiques générales du faciès chimique de ces eaux ainsi que l'estimation des temps de circulation dans le sous-sol par une datation par les CFC/SF6. Les résultats de cette campagne seront également confrontés aux données historiques inventoriées lors de la définition des réseaux de surveillance DCE (Jaouën & Akbaraly, 2011 et Malard & Winckel, 2009). Ce travail pourra apporter une aide à la caractérisation des différents réservoirs au regard de la géologie et de l'hydrogéologie du secteur.

Les points de prélèvement ont été sélectionnés sur les critères suivants :

- la représentativité des différents contextes hydrogéologiques et anthropiques ;
- la répartition des sites sur la zone d'étude ;
- les conditions de prélèvement.

9 sources, 4 forages AEP, 3 piézomètres et 1 puits ont donc été sélectionnés. Les techniques de prélèvements ont été adaptées en fonction :

- les sources ont été prélevées au plus proche de l'émergence ;
- les forages AEP ont été prélevés au robinet, en tête du forage ;
- les piézomètres et le puits ont fait l'objet d'un pompage (2 fois le volume d'eau de la colonne de forage) avant prélèvement. Une pompe Grundfos MP1 (alimentée par un groupe électrogène) a été utilisée pour les piézomètres de Digo et de Dzoumogné et une pompe Twister 12V (alimentée sur batterie) a été utilisée pour le puits d'Achenoua et le piézomètre de Tsingoni.

Les 17 points sélectionnés ont été prélevés les 15 et 16 novembre. Durant cette période, des pluies intermittentes de début de mousson ont perturbé le bon déroulement de la campagne de prélèvement. L'émergence de la ravine de Mtsahara n'a ainsi pas été prélevée. Lors du passage sur le site, les eaux de ruissellement se sont avérées trop importantes pour garantir un prélèvement représentatif. Un problème technique a également été constaté sur la sonde de mesure du pH durant la campagne (faux contact entre la sonde et le boîtier de mesure) expliquant les deux valeurs aberrantes relevées. L'ensemble des échantillons ont été expédié au laboratoire d'analyse du BRGM dans les 48 heures qui ont suivies le prélèvement.

Le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** présente les caractéristiques des points ayant été prélevés, leur localisation est indiquée dans l'illustration 12.



Caractérisation hydrogéologique des ressources en eau souterraine de Mayotte – Secteur Nord-Ouest

NUMERO	CODE	NOM	X_RGM04	Y_RGM04	Z_NGM	BASSIN VERSANT	TYPE	DATE-HEURE	PRELEVEMENT CATION_50ML	PRELEVEMENT ANIONS_250ML	PRELEVEMENT PTOT_250ML	PRELEVEMENT CFC/SF6	REMARQUE
1	12302X0026	PZ1 - DZOUMOGNE	510356	8594795	95	BANDRAMI	PIEZO	15/11/2010 08:30	Filtration 45 µm	Filtration 45 µm	aucun	oui	Pompage de 30 min à 6 l/min jusqu'à stabilisation des paramètres physico-chimiques.
2	MARK111	EMERGENCE MAPOUERA	510295	8593185	125	MAPOUERA	RIVIERE	15/11/2010 09:30	Filtration 45 µm	aucun	aucun	oui	Debit imperceptible ; eaux +/- stagnantes, très chargée en MES.
3	12302X0025	MOHOGONI	512704	8593256	10	MOHOGONI	AEP	15/11/2010 11:00	Filtration 45 µm	Filtration 45 µm	aucun	oui	Pompage en route à notre arrivée ; prélèvement après stabilisation des paramètres physico-chimiques.
4	MARK114	EMERGENCE MOHOGONI	510639	8592011	99	MOHOGONI	EMERGENCE	15/11/2010 12:05	Filtration 45 µm	aucun	aucun	non	Debit imperceptible ; eaux +/- stagnantes, très chargée en MES.
5	12306X0046	MERESSE	514495	8591799	21	MERESSE	AEP	15/11/2010 13:10	Filtration 45 µm	Filtration 45 µm	aucun	oui	Pompage en route à notre arrivée ; prélèvement après stabilisation des paramètres physico-chimiques.
6	12306X0053	PZ5 - DIGO	515801	8589219	111	BOUYOUNI	PIEZO	15/11/2010 14:20	Filtration 45 µm	Filtration 45 µm	aucun	oui	Pompage de 25 min à 12 l/min jusqu'à stabilisation des paramètres physico-chimiques.
7	MARK184	EMERGENCE LONGONI	518406	8590729	84	LONGONI	RIVIERE	15/11/2010 16:00	Filtration 45 µm	Filtration 45 µm	aucun	oui	Très faible débit (< 1 l/min)
8	MARK084	PUITS HACHENOUA	512932	8586272	66	MROWALE	PUITS	16/11/2010 08:00	Filtration 45 µm	Filtration 45 µm	aucun	oui	Puits marocain de 3 mètres de fond ; pompage de 20 min à 4 l/min jusqu'à stabilisation des paramètres physico-chimiques.
9	MARK075	EMERGENCE MROWALE	513216	8587046	68	MROWALE	EMERGENCE	16/11/10 9:00	Filtration 45 µm	Filtration 45 µm	aucun	oui	Source à très faible débit ; prélèvement effectué dans une tranchée creusée à la main, à 1,5 m de l'émergence.
10	MARK085	EMERGENCE CHIRINI	512889	8587764	66	CHIRINI	EMERGENCE	16/11/2010 09:50	Filtration 45 µm	Filtration 45 µm	aucun	oui	Zone humide étendue ; prélèvement effectué dans un des canaux principaux avec une circulation d'eau de l'ordre du litre par seconde.
11	12306X0014	BEJA 1	511767	8590243	29	BEJA	AEP	16/11/2010 14:20	Filtration 45 µm	Filtration 45 µm	aucun	oui	Problème de fonctionnement de la pompe à 11:00 ; pompage de 15 min à 24 m <sup>3</sup> /h jusqu'à stabilisation des paramètres physico-chimiques.
12	12306X0017	MSTANGAMOUI 1	509588	8590301	51	ANDRIANABE	AEP	16/11/2010 11:50	Filtration 45 µm	Filtration 45 µm	aucun	oui	Pompage de 5 min à 63 m <sup>3</sup> /h jusqu'à stabilisation des paramètres physico-chimiques.
13	12306X0016	MTSANGAMOUI 2	509498	8590111	49	ANDRIANABE	AEP	16/11/10 11:30	Filtration 45 µm	Filtration 45 µm	aucun	oui	Pompage de 20 min à 37 m <sup>3</sup> /h jusqu'à stabilisation des paramètres physico-chimiques ; pH inhabituel (défaut de contact sur la sonde).
14	MARK150	EMERGENCE ANDRIANABE	509352	8591167	103	ANDRIANABE	EMERGENCE	16/11/2010 13:00	Filtration 45 µm	Filtration 45 µm	aucun	oui	Prélèvement effectué sur une venue d'eau importante en aval de l'émergence réelle et située légèrement sur la rive gauche, débit de l'émergence amont trop faible (suitements) ; pH inhabituel (défaut de contact sur la sonde).
15	12305X0002	EMERGENCE MASSIMONI	507895	8589473	13	MASSIMONI	EMERGENCE	16/11/2010 16:00	Filtration 45 µm	Filtration 45 µm	aucun	oui	Prélèvement effectué sur une venue d'eau importante à gauche du réservoir situé en rive gauche ; pluie très violente ; stabilisation des valeurs d'oxygène dissous impossible.
16	12301X0016	EMERGENCE ACOLA	506183	8593482	4	ACOLA	EMERGENCE	16/11/2010 16:45	Filtration 45 µm	Filtration 45 µm	aucun	oui	Très faible débit (imperceptible) ; pluie sporadique.
17	MARK56	EMERGENCE MTSAHARA	509351	8597580		MTSAHARA	EMERGENCE	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	Non prélevée.
18	12306X0013	PZ - TSINGONI	511944	8586660	53	MROWALE	PIEZO	16/11/10 15:15	Filtration 45 µm	Filtration 45 µm	aucun	oui	Pompage de 25 minutes jusqu'à stabilisation des paramètres physico-chimiques ; après 5 minutes de pompage, l'eau se trouble à cause de la précipitation de fer.

Tableau 6 : tableau récapitulatif de la campagne de prélèvement d'eau souterraine.

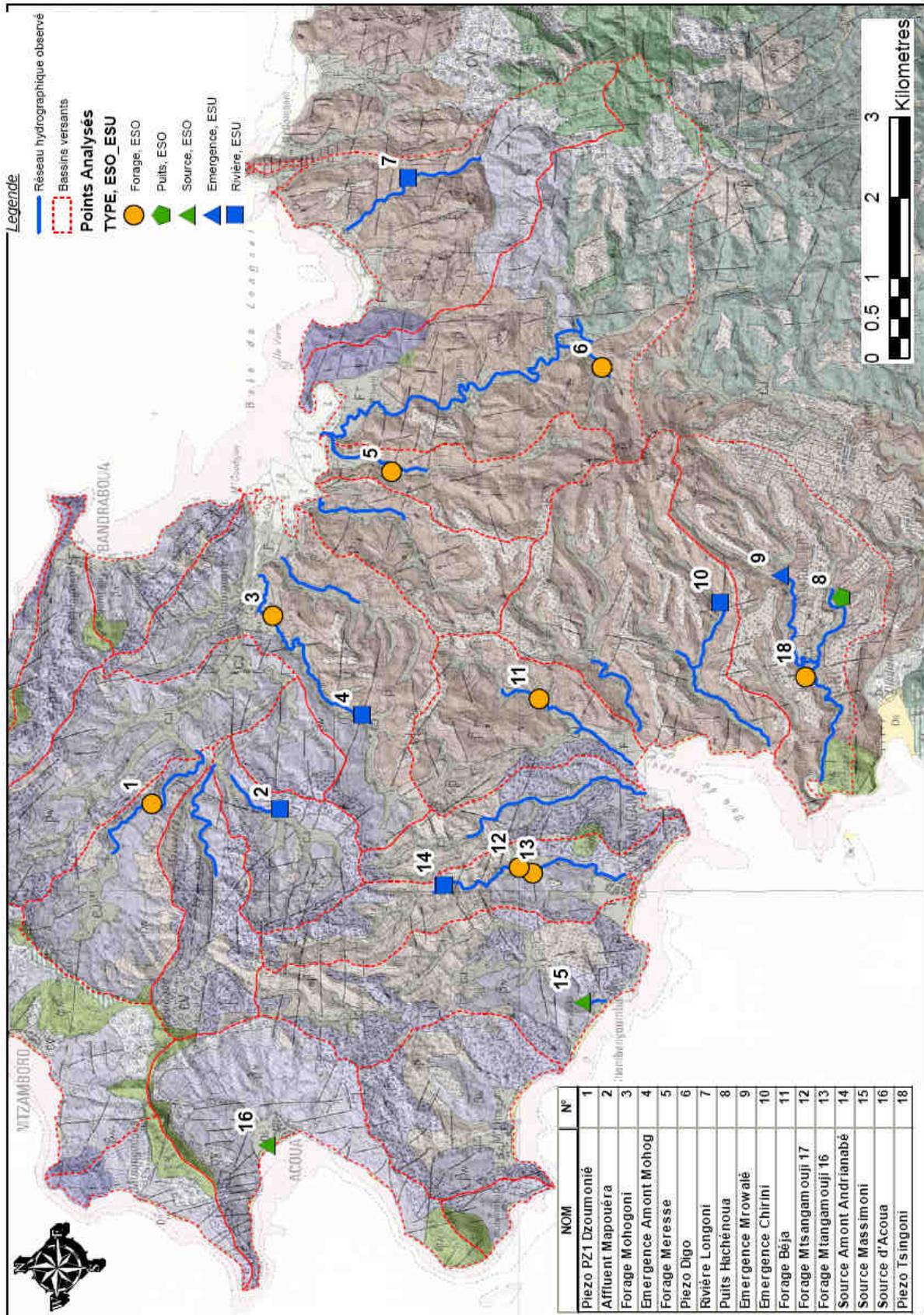


Illustration 12 : points de prélèvement de la campagne d'hydrogéochimie 2010.

#### 4.1. PARAMETRES IN-SITU

Les paramètres mesurés *in situ* varient relativement peu d'un point à un autre : les températures enregistrées varient entre 23,6 et 28,4°C, avec une moyenne de 26,4°C.

A l'exception de deux valeurs<sup>4</sup>, le pH évolue entre 5,7 et 7,6, avec une moyenne proche de la neutralité de 6,9. Seul un point fait exception avec un pH basique de 8,7 (12306X0017/MTSAN1 ; point n°12) ; cette valeur sera à contrôler de nouveau compte tenu de la dérive de la sonde constatée pour les points 13 et 14. Les points présentant des pH acides (entre 5,7 et 6,6) sont au nombre de quatre :

- 12302X0026/PZ1 (point n°1 ; pH de 6,1) ;
- MARK114 (point n°4 ; pH de 5,9) ;
- 12306X0053/PZ5 (point n°6 ; pH de 6,6) ;
- 12306X0013/TSIN1 (point n°18 ; pH de 5,7).

Numéro	Code BSS ou désignation du point	Date de prélèvement	PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DE TERRAIN					
			Température	pH	Conductivité	Eh	Oxygène dissous	Oxygène dissous
			°C		µS/cm	mV	%	mg/L
1	12302X0026/PZ1	15/11/2010	26,3	6,1	167	156	2,6	0,21
2	MARK111	15/11/2010	23,6	6,9	149	123	2,9	0,24
3	12302X0025/MOHOG	15/11/2010	27,6	7,5	315	232	3,9	0,31
4	MARK114	15/11/2010	25,5	5,9	97	64	4,7	0,33
5	12306X0046/BOUY	15/11/2010	28,0	7,6	239	155	5,2	0,41
6	12306X0053/PZ5	15/11/2010	26,3	6,6	162	181	5,7	0,45
7	MARK184	15/11/2010	25,5	7,3	301	173	5,9	0,51
8	MARK084	16/11/2010	25,8	7,4	238	193	7	0,56
9	MARK075	16/11/2010	24,6	7,0	139	36	7,1	0,58
10	MARK085	16/11/2010	25,8	6,9	273	86	8,2	0,68
11	12306X0014/BEJA1	16/11/2010	27,5	7,0	272	226	8,4	0,66
12	12306X0017/MTSAN1	16/11/2010	28,4	8,7	260	167	10,8	0,84
13	12306X0016/MTSAN2	16/11/2010	28,3	10,9	343	160	11,1	0,86
14	MARK150	16/11/2010	25,5	13,0	230	222	9,4	0,76
15	12305X0002/HY	16/11/2010	26,0	7,1	395	117	N/M	N/M
16	12301X0016/HY	16/11/2010	26,8	6,9	253	128	9,1	0,76
18	12306X0013/TSIN1	16/11/2010	26,8	5,7	109	173	11,9	0,94

Tableau 7 : résultats des paramètres physico-chimiques de terrain – campagne hydrogéochimique 2010.

Les conductivités observées sur les eaux du secteur varient entre 97 et 395 µS/cm, avec une moyenne de 232 µS/cm. Ces valeurs sont caractéristiques d'eaux faiblement à peu minéralisées typiques des eaux drainant des formations volcaniques. Pour référence, la conductivité des eaux d'émergence de la Réunion (Lions et al. 2010) a permis de distinguer les eaux ayant des conductivités proches de l'eau de pluie (< 50 µS/cm) ; des eaux très jeunes légèrement enrichies par rapport à une eau de pluie 50 à 100 µS/cm), des eaux jeunes (100 à 200 µS/cm), puis les eaux ayant acquis des faciès plus marqués (> 200 µS/cm).

<sup>4</sup> Les mesures de pH présentent deux valeurs aberrantes pour les points 13 et 14 qui ne seront donc pas prises en compte dans la présente étude

D'une manière globale, les eaux les moins minéralisées (conductivités inférieures à 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , entre 97 et 167  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) ont un pH faible, ne dépassant pas 7. Par ailleurs, la signature des eaux de surface ne diffèrent pas des eaux souterraines. Ainsi les eaux de surface prélevées au niveau des émergences et en amont des cours d'eau ne se différencient pas des eaux souterraines et peuvent être utilisées pour la caractérisation hydrochimique du système.

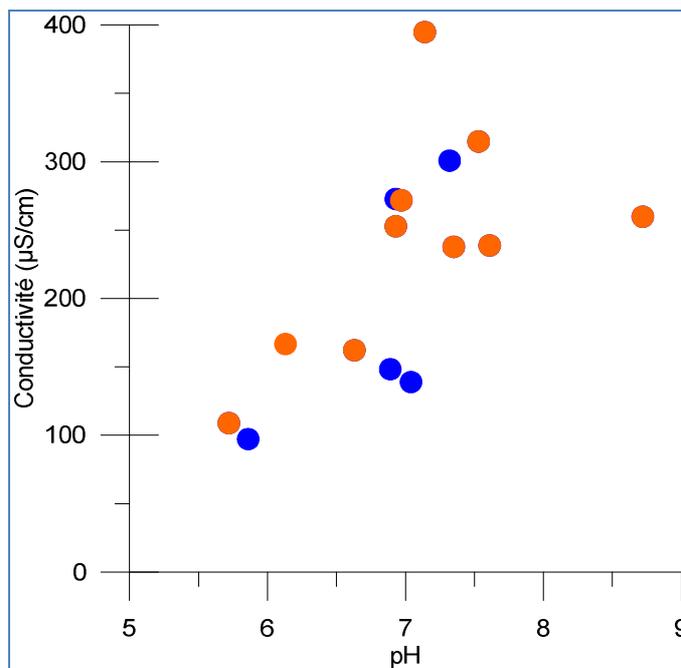


Illustration 13 : graphique de la conductivité en fonction du pH – campagne hydrogéochimique 2010 points (oranges : eaux de forage ; points bleus : eaux de source) .

Le potentiel redox varie entre 36 et 232 mV. Les teneurs en oxygène dissous sont faibles et évoluent entre 2,6 et 11,9 %.

## 4.2. ELEMENTS MAJEURS

Les teneurs en éléments majeurs varient globalement peu d'un point à un autre.

Numéro	MAJEURS													
	Ca (Calcium)	Mg (Magnésium)	Na (Sodium)	K (Potassium)	HCO <sub>3</sub> (Bicar- bonates)	CO <sub>3</sub> (Carbo- nates)	Cl (Chlorures)	SO <sub>4</sub> (Sulfates)	NO <sub>3</sub> (Nitrate)	NO <sub>2</sub> (Nitrite)	NH <sub>4</sub> (Ammonium)	PO <sub>4</sub> (Ortho- phosphates)	PTOT (Phosphore Total)	SiO <sub>2</sub> (Silice)
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
	0,5	0,5	0,5	0,5	5	5	0,5	0,5	0,5	0,01	0,05	0,1	0,05	0,5
1	9,7	9,4	9,8	< LQ	84	< LQ	11,7	3,4	0,5	< LQ	< LQ	0,2	< LQ	31,4
2	5,8	6,7	8,2	6,2	63	< LQ	12,5	3,0	< LQ	0,02	0,31	0,3	0,33	17,7
3	19,1	11,4	23,2	3,7	154	< LQ	18,5	4,7	1	< LQ	< LQ	0,3	0,08	46,1
4	1,6	2,4	8,5	2,0	13	< LQ	12,1	5,8	< LQ	< LQ	0,13	< LQ	0,15	9,7
5	13,5	8,9	17,8	2,9	121	< LQ	14,8	4,6	1,5	< LQ	0,05	0,3	0,11	46,5
6	10,0	5,9	10,9	2,6	89	< LQ	8,3	2,2	1,2	< LQ	< LQ	0,7	0,22	59,9
7	14,1	9,8	27,7	5,0	137	< LQ	25,0	2,4	< LQ	< LQ	< LQ	0,3	0,19	42,2
8	28,2	3,9	12,1	1,5	127	< LQ	6,7	6,6	1,2	0,03	0,07	0,3	0,10	25,4
9	8,1	6,0	8,8	0,6	67	< LQ	8,7	3,1	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0,05	29,2
10	16,4	10,4	13,9	1,5	127	< LQ	11,1	3,9	0,7	< LQ	< LQ	0,5	0,21	47,1
11	15,7	12,2	18,4	2,0	136	< LQ	16,9	3,4	0,6	< LQ	< LQ	0,3	0,06	45,7
12	3,8	0,7	44,8	6,5	120	< LQ	19,7	3,8	< LQ	< LQ	0,09	< LQ	< LQ	20,4
13	14,1	11,2	33,8	4,2	154	< LQ	27,6	6,6	1,2	< LQ	0,05	< LQ	< LQ	28,3
14	13,4	12,0	13,2	2,4	121	< LQ	10,6	2,9	< LQ	< LQ	< LQ	0,3	0,10	48,4
15	21,2	20,6	26,0	3,2	211	< LQ	19,8	8,6	0,7	< LQ	< LQ	0,5	0,22	47,9
16	14,2	5,5	22,5	2,5	88	< LQ	24,1	7,9	3,7	0,03	0,35	< LQ	< LQ	15,4
18	4,2	4,0	10,1	< LQ	41	< LQ	10,2	4,9	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0,23	20,8
X	seuil de quantification													

Tableau 8 : résultats de l'analyse des éléments majeurs – campagne hydrogéochimique 2010.

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

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

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

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

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

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

Les balances ioniques étant comprises entre -7,1 et +1,7 %, toutes les analyses ont été considérées comme fiables et de ce fait ont été représentées dans le diagramme de Piper.

Numéro	Code BSS ou désignation du point	Date de prélèvement	Balance ionique
1	12302X0026/PZ1	15/11/2010	-2,9
2	MARK111	15/11/2010	-3,3
3	12302X0025/MOHOG	15/11/2010	-2,7
4	MARK114	15/11/2010	1,7
5	12306X0046/BOUY	15/11/2010	-5,6
6	12306X0053/PZ5	15/11/2010	-7,1
7	MARK184	15/11/2010	-2,7
8	MARK084	16/11/2010	-2,9
9	MARK075	16/11/2010	-4,2
10	MARK085	16/11/2010	-3,6
11	12306X0014/BEJA1	16/11/2010	-2,7
12	12306X0017/MTSAN1	16/11/2010	-4,8
13	12306X0016/MTSAN2	16/11/2010	-3,9
14	MARK150	16/11/2010	-1,1
15	12305X0002/HY	16/11/2010	-3,0
16	12301X0016/HY	16/11/2010	-3,1
18	12306X0013/TSIN1	16/11/2010	-4,1

Tableau 9 : balance ionique - campagne hydrogéochimique 2010.

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

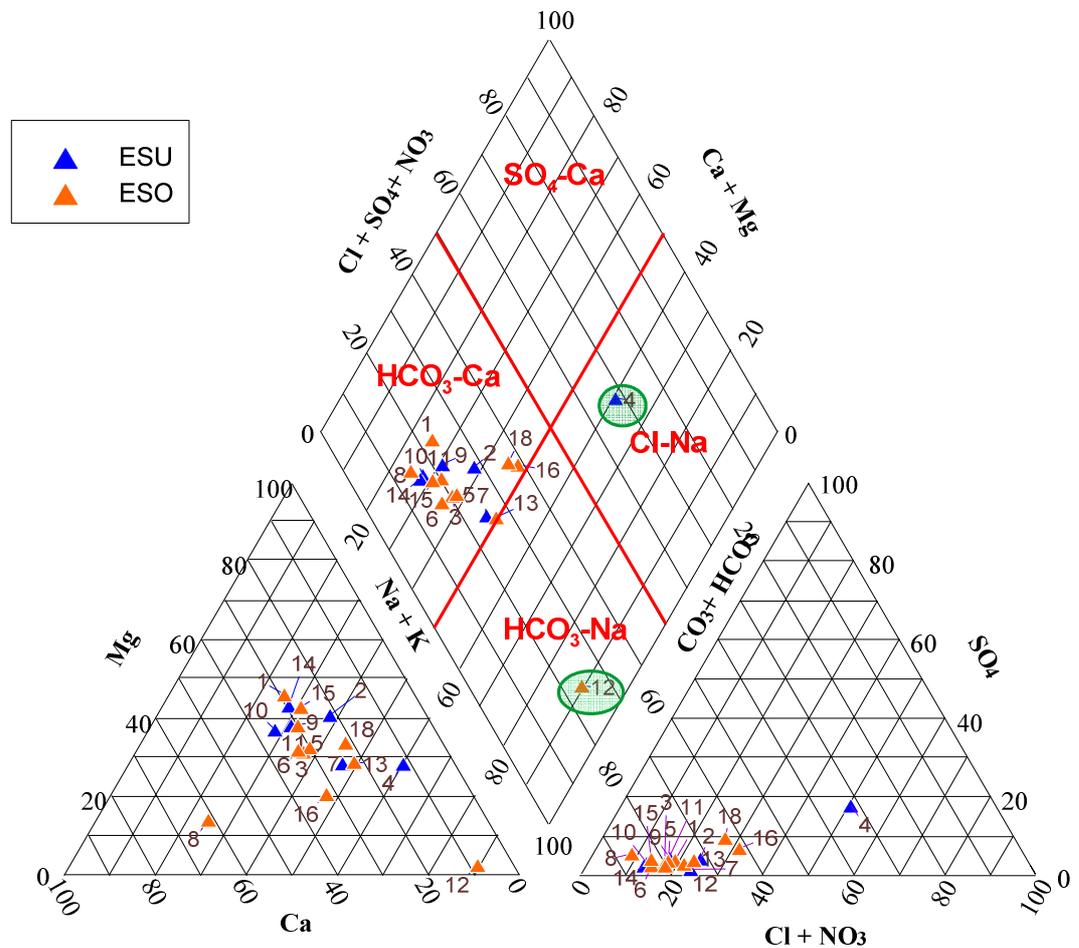


Illustration 14 : diagramme de piper (ESU = eau de surface, ESO = eau souterraine)

La composition en anions est relativement homogène pour les différents points, avec une prépondérance des ions bicarbonates (entre 61 et 86 %), à l'exception du point 4 dont la teneur en chlorures dépasse 50 %.

Au niveau des cations, on note une plus grande variabilité.

Pour six points, la teneur en sodium est prépondérante sur les autres cations. Pour 5 d'entre eux (MARK114, point n°4 ; MARK184, point n°7 ; 12306X0016/MTSAN2, point n°13 ; 12301X0016/HY, point n°16 et 12306X0013/TSIN 1, point n°18), la teneur en sodium varie entre 42 et 53 %. Le point 12306X0017/MTSAN1 (point n°12) se distingue avec une teneur relative en sodium de 83 %.

Pour les autres points, le cation ou les cations majoritaires est/sont :

- magnésium (6 points)
- calcium/magnésium (2 points)
- calcium/magnésium/sodium (2 points).

Au final, la majorité des points a un faciès de type bicarbonaté avec une composition en cations majoritaires variables (Mg, Ca, Ca-Mg, Ca-Na-Mg, Na). Les points 12306X0017/MTSAN1 (point n°12) et MARK114 (point n° 4) se distinguent par des faciès chimiques atypiques (respectivement HCO<sub>3</sub>-Na pour le premier et Na-Cl pour le second).

Comme pour les paramètres physico-chimique (pH, conductivité); les faciès hydrochimiques des eaux de surface et des eaux souterraines ne diffèrent pas spécifiquement exception faite des points atypiques n°4 et n°12. Cela confirme que les eaux de surface pourront être utilisées pour la caractérisation hydrochimique du système étudié.

La disparité dans les faciès hydrochimiques illustre le fait que toutes les eaux ne circulent pas au sein des mêmes formations aquifères. Ces observations devront être en rapport avec la géologie. Par exemple, on note que les points 12 et 13, bien que voisins, ne présentent pas le même faciès hydrochimique. Le caractère plus alcalin du point n°12 sera à investiguer en regard des formations volcaniques drainées.

Le faciès chloruré sodique du point n°4 et sa faible minéralisation est à mettre en regard d'une signature de type eau de pluie sous influence marine. L'eau prélevée correspondrait à une eau jeune ayant peu interagit avec la roche en raison d'un temps de transit court (court chemin ou rapide).

### 4.3. ELEMENTS MINEURS

Numéro	MINEURS																	
	Al (Aluminium)	As (Arsenic)	B (Bore)	Ba (Baryum)	Br (Brome)	Co (Cobalt)	Cr (Chrome)	Cu (Cuivre)	F (Fluorures)	Fe (Fer)	Li (Lithium)	Mn (Manganèse)	Ni (Nickel)	Pb (Plomb)	Sb (Antimoine)	Se (Sélénium)	Sr (Strontium)	Zn (Zinc)
	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	mg/L	µg/L	µg/L	µg/L	mg/L	mg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
	0,5	0,05	0,5	0,05	0,05	0,05	0,1	0,1	0,02	0,1	0,1	0,1	0,05	0,05	0,1	0,1	0,1	0,5
1	1,44	< LQ	20,3	8,15	40,5	< LQ	0,63	0,60	< LQ	< LQ	0,28	0,6	0,35	< LQ	< LQ	0,13	66,7	0,71
2	352	0,08	42,6	77	30,2	2,58	0,55	1,85	0,1	0,896	0,18	372	6,61	< LQ	< LQ	0,19	78,5	1,03
3	1,45	0,14	23	6,62	75	< LQ	0,68	0,22	0,1	< LQ	0,28	< LQ	0,12	0,05	< LQ	0,17	234	2,34
4	21,7	< LQ	26,4	58,2	47	7,62	< LQ	0,73	< LQ	1,464	0,30	751	5,72	< LQ	< LQ	< LQ	20,6	1,97
5	2,58	0,17	17,2	2,69	50,5	< LQ	1,91	0,39	0,1	< LQ	0,20	0,4	< LQ	0,09	< LQ	0,14	173	5,09
6	1,43	0,05	17,9	20,2	31,1	0,05	1,45	0,16	0,1	< LQ	0,28	0,5	0,41	< LQ	< LQ	< LQ	162	2,56
7	8,34	0,15	33	37,8	82,6	0,36	0,23	0,27	0,1	0,102	0,61	145	1,01	< LQ	< LQ	< LQ	220	6,85
8	46,6	0,53	24,8	9,52	30,1	< LQ	0,95	1,61	0,1	0,021	0,35	0,8	0,41	< LQ	0,40	0,16	118	< LQ
9	4,51	< LQ	16,6	13,4	30,3	0,27	< LQ	0,20	0,1	0,610	< LQ	83	0,31	0,06	< LQ	< LQ	89,4	0,85
10	2,74	< LQ	21,4	11,3	32,8	0,13	0,13	< LQ	0,1	0,026	0,17	3,8	0,10	0,05	< LQ	0,16	211	< LQ
11	1,43	< LQ	18,4	5,42	51,9	< LQ	0,69	< LQ	0,1	< LQ	0,10	0,67	0,13	< LQ	< LQ	< LQ	207	5,62
12	9,15	0,33	13,4	0,1	70,9	< LQ	< LQ	0,11	0,1	< LQ	0,41	0,4	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	13,8	< LQ
13	5,63	0,14	9,94	1,41	88,2	< LQ	2,56	< LQ	0,1	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0,2	198	2,31
14	6,32	0,05	19	0,79	23	< LQ	1,93	< LQ	0,2	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	138	< LQ
15	1,35	< LQ	25,1	1,15	54	< LQ	0,22	< LQ	0,1	< LQ	0,12	< LQ	0,20	< LQ	< LQ	0,3	506	< LQ
16	5,64	0,12	40,8	216	86,9	0,31	< LQ	0,19	< LQ	0,422	0,48	123	0,34	0,12	< LQ	0,8	157	1,86
18	5,26	< LQ	20,3	5,9	33,9	0,22	0,56	0,12	< LQ	0,097	0,18	38,8	0,31	< LQ	0,07	0,31	43,2	1,87
X	seuil de quantification																	

Illustration 15 : résultats d'analyse des éléments mineurs – campagne hydrogéochimique 2010.

Quant aux éléments traces, on note la présence dans les eaux souterraines d'éléments mineurs en quantités traces à significatives selon les points d'eau et l'élément considérés.

Ainsi pour l'**aluminium**, les teneurs varient de 1 µg/l à 352 µg/l. Cette dernière valeur exceptionnellement forte peut traduire la présence de colloïdes dans les eaux (particules d'argile). La majorité des eaux présente des concentrations inférieures à 10 µg/l ce qui traduit la faible présence de colloïdes dans les eaux prélevées (pas d'impacts des altérites sur les eaux, eaux bien filtrées).

Pour l'**arsenic**, on note la présence de traces avec quelques valeurs plus élevées 0,3 µg/l pour le point n°12 et 0,53 µg/l pour le point n°8. Ces valeurs restent bien inférieures au seuil de qualité (10 µg/l) mais peuvent traduire la présence d'un fond géochimique. La considération des formations géologiques devraient pouvoir permettre de caractériser ce fond géochimique.

Pour le **bore** les concentrations varient entre 10 µg/l et 42,6 µg/L. Une eau de qualité optimale pour être consommée ne doit pas dépasser une concentration de 50 µg/L (SEQ-Eau). La limite de qualité est fixée par l'arrêté du 11 janvier 2007 à 1 mg/l dans les eaux destinées à la consommation humaine. Le bore existe dans la nature sous différentes formes dans les minéraux et les eaux naturelles et l'eau de mer (4,45 mg/l). Dans les eaux souterraines non contaminées, on peut rencontrer de fortes anomalies en bore liées aux spécificités géologiques et à la nature lithologique des aquifères. Le bore est alors associé à des apports naturels par érosion et solubilisation des roches. Dans les eaux de surface et les eaux souterraines superficielles, les apports de bore peuvent être d'origine anthropique, liés aux rejets urbains et industriels (0,5 à 1 mg/l).

Les teneurs en **baryum** sont comprises entre 0,1 et 216 µg/L. La présence de baryum dans les eaux est généralement associée à la présence de baryte dans les roches aquifères.

On note la présence de **cobalt, de chrome et cuivre** à l'état de trace et des concentrations relativement plus importantes en cobalt pour le point d'eau n°4 (7,6 µg/l).

Les teneurs en **fluorure** sont négligeables et ne permettent pas de discriminer une influence géologique.

L'étude des concentrations en fer et manganèse en regard de la géologie et de l'hydrogéologie permettront de comprendre les circulations d'eau. En effet, le **fer et le manganèse** ont un comportement comparable du fait de leur participation aux réactions d'oxydo-réduction. Dans les environnements réducteurs, ces éléments présentent une forte solubilité qui explique leur présence dans les eaux souterraines captives. Dans des environnements soumis à l'altération de surface, ces éléments sont mobilisés sous forme particulaire. Les minéraux tels que l'olivine, les pyroxènes ou les argiles peuvent également contenir du manganèse qui peut se substituer avec le magnésium ou le fer.

Les concentrations en **lithium** sont relativement homogènes (0,1 à 0,68 µg/l).

Les teneurs en **nickel** sont relativement faibles (< 1 µg/l) à l'exception des points n°2 et 4 (respectivement 6,61 µg/l et 5,72 µg/l). Une origine géologique sera à investiguer. A La Réunion, la présence de chrome et de nickel dans les sols volcaniques est liée à

l'enrichissement des roches ultramafiques et mafiques en ces deux éléments traces (Selinus et al., 2005).

Le **plomb**, l'**antimoine**, le **sélénium** et le **zinc** sont mesurés dans certains points d'eau à l'état de traces, avec localement quelques concentrations plus fortes, 0.4 µg/l en antimoine pour le point d'eau n°8 et 0.8 µg/l en sélénium pour le point n°16. Une contribution géologique même mineure pourra être étudiée.

Le **strontium** est mesuré en concentrations variables selon les points d'eau avec des teneurs pouvant atteindre 506 µg/l pour le point n°15.

La mise en cohérence des analyses d'eau avec la composition géochimique des formations géologiques drainées devrait permettre d'aider la compréhension des circulations (temps de séjour, facies rencontrés).

#### 4.4. DATATION DES EAUX

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). A un point donné (forage, source), l'eau collectée correspond à une multitude de gouttes d'eaux accumulées ayant un âge plus ou moins grand. C'est pour cela que l'âge estimé par les traceurs chimiques est considéré comme un âge « apparent ». 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.

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

L'hexafluorure de soufre ( $\text{SF}_6$ ) 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  $\text{SF}_6$  a débuté en 1953. Le  $\text{SF}_6$  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  $\text{SF}_6$  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.

Le  $\text{SF}_6$  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  $\text{SF}_6$ , en milieu rural tout du moins, car ce composé ne sert pour aucune application domestique contrairement aux CFC (Busenberg and Plummer, 2000).

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  $\text{SF}_6$  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 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, Illustration 16) 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'infiltré (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 pour les CFC et le  $\text{SF}_6$  sont celles de l'hémisphère nord donné par le Climate Monitoring Diagnostics Laboratory / National Oceanic and Atmospheric Administration (CMDL/NOAA). Pour les années 2006 à 2009

ce sont les données de Samoa qui ont été prises en compte. Les écarts entre les deux stations sont peu importants.

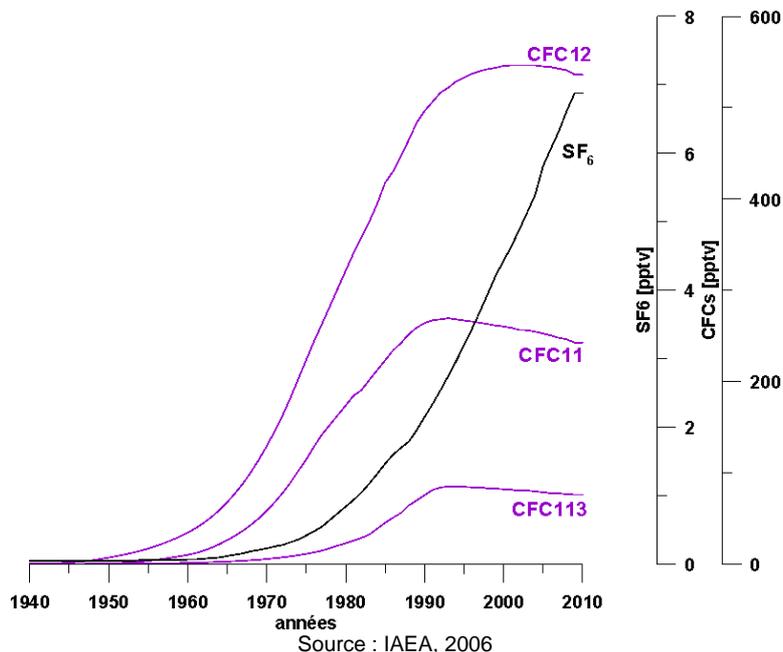


Illustration 16 : Chronique des concentrations dans l'air des CFC et SF<sub>6</sub>

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

#### 4.4.1. 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 :

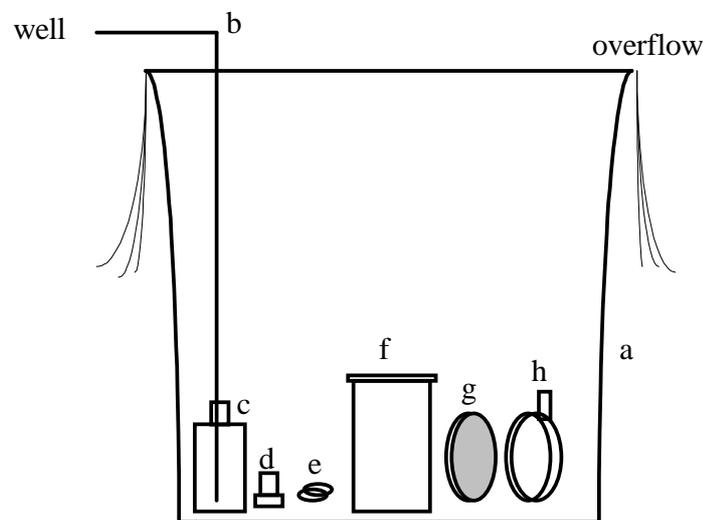
- représentativité du milieu,
- caractérisation des phénomènes,
- limitation des transformations.

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 SF<sub>6</sub> 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 SF<sub>6</sub>) eux même placés dans un récipient métallique (Illustration 17) 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 18).



Illustration 17 : Système de prélèvement utilisé pour les CFC et SF<sub>6</sub>



Source : IAEA, 2006

Illustration 18 : Schéma du système de prélèvement de l'eau pour analyses de CFC et SF<sub>6</sub> 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 analyses des gaz dissous (CFC, SF<sub>6</sub>) 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 19).

Outils de datation	Méthode	Incertitude
CFC-113, CFC-12, CFC-11, SF <sub>6</sub>	Chromatographe en phase gazeuse équipé d'un détecteur à capture d'électron	± 5%

*Illustration 19 : Tableau récapitulatif des méthodes d'analyses pour la datation*

Les analyses des CFC et SF<sub>6</sub> par chromatographie gazeuse ont été réalisées par le laboratoire Spurenstofflabor (Allemagne).

#### 4.4.2. 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 SF<sub>6</sub>.

- **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 et 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 et Plummer, 1992, Cook et Salomon, 1997).

Les décharges sauvages sont présentes à Mayotte et il est possible de retrouver 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 SF<sub>6</sub> proche de celle de l'air). Il est raisonnable de penser que pour une ZNS inférieure à 10 mètres la concentration en SF<sub>6</sub> 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 est 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. Par contre la non connaissance, à ce stade de l'étude, de la température moyenne de la recharge peut entraîner une incertitude sur les âges apparent de 2 ou 3 années. Une estimation plus précise de ces deux facteurs sera faite dans un deuxième temps.

- **Excès d'air**

Le phénomène d'excès d'air (concentration en gaz dissous dans l'aquifère plus importante que celle attendue, Heaton et Vogel, 1981) peut être important surtout pour le SF<sub>6</sub>. Il est quasiment négligeable dans le cas du CFC-11 du fait de la haute solubilité de ce gaz (Plummer et 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 SF<sub>6</sub>. Les concentrations en COD à Mayotte sont toutes inférieures à la limite de quantification (5 mg.l<sup>-1</sup>). On peut donc considérer cet effet 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-oxygène (faible

concentration en O<sub>2</sub> dissous et Eh NHE inférieur à 250 mV). Dans ce cas une adsorption est possible et les âges SF<sub>6</sub> (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.

- **Production naturelle**

Les CFC sont d'origine anthropique mais une faible partie des SF<sub>6</sub> peut être d'origine naturelle (authigénique). C'est plus particulièrement le cas pour les roches volcaniques, ignées ou cristallines (Busenberg and Plummer, 2000 ; Koch et al., 2007) mais également possible en bassin sédimentaire (von Rodhen et al., 2010). Dans une étude réalisée en contexte volcanique à La Martinique (Vittecoq et al., 2007) de fortes concentration en SF<sub>6</sub> ont été notées sur quelques points d'eau. Pour cette étude un excès de SF<sub>6</sub> par production naturelle est possible. Dans ce cas les données de CFC seront utilisées préférentiellement.

#### **4.4.3. 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 toute une répartition des âges qu'il faut déterminer. Pour permettre une datation des eaux souterraine, 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 testés pour estimer les temps de séjour moyens des eaux dans les aquifères de Mayotte :

- Le modèle piston (considérant qu'il n'y a pas de mélange et aucune modification des activités par dispersion, diffusion ou échange direct,
- le modèle exponentiel (une eau récente se mélange parfaitement à une eau ancienne, il y a échange et écoulement) pouvant correspondre à un aquifère homogène d'épaisseur négligeable pour lequel la recharge se fait sur toute la surface (Illustration 20),
- le modèle de type mélange (à deux pôles) sont également attendus. Dans ce cas un des deux pôles est considéré comme de l'eau ancienne sans CFC donc antérieur à 1950. Le deuxième 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.

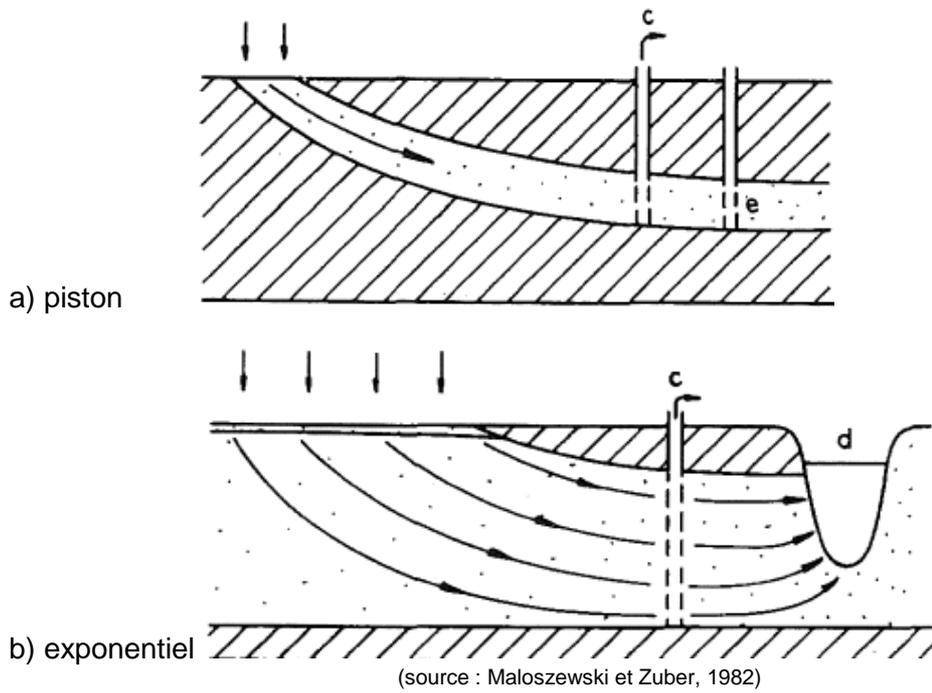


Illustration 20 : Schéma des modèles d'écoulement par piston et exponentiel

#### 4.4.4. Datation des eaux

- Résultats des analyses CFC et SF<sub>6</sub>

Les concentrations en CFC et SF<sub>6</sub> ont été mesurées dans tous les échantillons d'eau souterraine sauf pour le point 4 (MARK114) qui était trop exposé à la contamination atmosphérique (Illustration 21).

N°	Code	Nom	BV	CFC11 pmol.l <sup>-1</sup>	CFC12 pmol.l <sup>-1</sup>	CFC113 pmol.l <sup>-1</sup>	SF <sub>6</sub> fmol.l <sup>-1</sup>
1	12302X0026	PZ1 - DZOU MOGNE	BANDRAMI	1,9	1,5	0,2	2,2
2	MARK111	EMERGENCE MAPOUERA	MAPOUERA	1,3	1,5	0,5	1,7
3	12302X0025	MOHOGONI	MOHOGONI	0,48	0,34	0,05	0,4
5	12306X0046	MERESSE	MERESSE	0,7	0,23	0,1	0,4
6	12306X0053	PZ5 - DIGO	BOUYOUNI	0,7	0,63	0,08	1,7
7	MARK184	EMERGENCE LONGONI	LONGONI	3,1	1,4	0,39	1,5
8	MARK064	PUITS HACHENOUA	MROWALE	4,3	1,4	0,21	1,4
9	MARK075	EMERGENCE MROWALE	MROWALE	2,7	1,5	0,52	1,6
10	MARK085	EMERGENCE CHIRINI	CHIRINI	1,8	1,1	0,15	0,9
11	12306X0014	BEJA 1	BEJA	1,9	0,4	0,26	0,6
12	12306X0017	MSTANGAMOUI 1	ANDRIANABE	0,24	0,11	0,02	0,2
13	12306X0016	MTSANGAMOUI 2	ANDRIANABE	0,23	0,15	0,02	0,2
14	MARK150	EMERGENCE ANDRIANABE	ANDRIANABE	2,2	1,3	0,49	1,1
15	12305X0002	EMERGENCE MASSIMONI	MASSIMONI	1,7	1	0,23	0,9
16	12301X0016	EMERGENCE ACOUA	ACOUA	4,5	1,2	0,32	1,4
18	12306X0013	PZ - TSINGONI	MROWALE	1,3	1	0,13	1,4

Illustration 21 : Concentrations (picomol.l<sup>-1</sup> (10<sup>-12</sup>) et femtomol.l<sup>-1</sup> (10<sup>-15</sup>)) en CFC et SF<sub>6</sub> des échantillons de Mayotte – novembre 2010.

#### • Application aux échantillons étudiés

L'illustration 22 indique les concentrations en gaz dans l'air calculée à partir des concentrations mesurées dans l'eau et de la loi de Henry régissant la diffusion des gaz dans l'eau. Sur les figures sont également données les courbes théoriques de la variation de concentrations des gaz selon un modèle piston et un modèle exponentiel. Sur l'ensemble des autres échantillons, il apparaît pour 50% des points d'eau un excès de SF<sub>6</sub> qui pourrait être dû à la production naturelle de ce gaz en contexte volcanique. On observe également une contamination de la moitié des échantillons par le CFC-113.

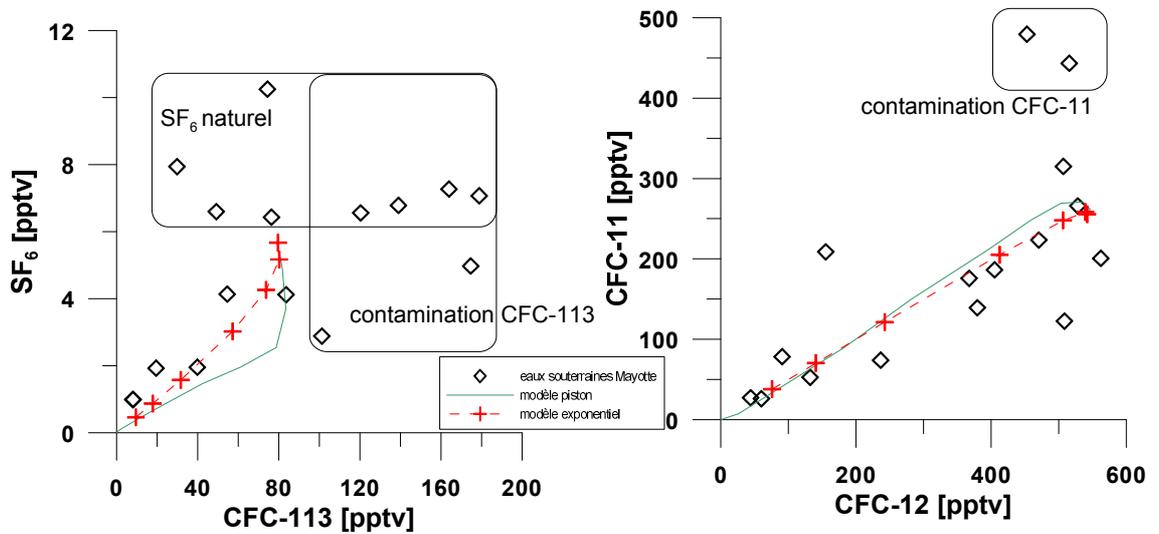


Illustration 22 : Tracé des comparaisons entre les concentrations en SF<sub>6</sub> et CFC-113 et CFC-11 et CFC-12 des eaux de Mayotte – novembre 2010

Deux échantillons sont contaminés en CFC-11 (émergence Acoua et puits Achenoua). Une étude plus approfondie des résultats permet également de définir que pour 4 points d'eau une dégradation du CFC-11 est possible. Ce CFC est celui qui se dégrade le plus facilement en milieu réducteur.

Ces contaminations peuvent également être dues à un problème d'échantillonnage ou une contamination locale de l'atmosphère. Dans toutes les zones d'études des décharges sauvages peuvent être des sources de contamination anthropique.

#### • Estimation des temps de résidence des eaux et âges relatifs

Les trois modèles ont été systématiquement testés pour les eaux collectées en novembre 2010. L'utilisation de plusieurs traceurs (trois CFC et le SF<sub>6</sub>) permet en général de sélectionner le modèle de circulation le mieux adapté au cas d'étude. Pour les eaux analysées à Mayotte c'est principalement le modèle de mélange binaire qui donne une meilleure cohérence entre les différents traceurs utilisés. Toutefois, dans le cas des émergences Longoni, Mwrowale, Mapouera, Acoua et du piézomètre Dzoumogne la contamination de plusieurs traceurs et possible dégradation du CFC-11, ne permet l'estimation d'un âge qu'à partir d'un seul gaz. Dans ces conditions le modèle de mélange binaire n'est pas utilisable (deux traceurs au minimum sont nécessaires). Pour ces eaux un modèle exponentiel a été utilisé.

Pour les cinq émergences précitées, du fait de la contamination de plusieurs traceurs, l'estimation de l'âge des eaux est peu précises. On estime respectivement à 11, 8, 13, 16 et 17 ans le temps moyen de résidence des eaux dans le système.

Pour les autres eaux l'utilisation d'un modèle de mélange binaire permet d'estimer le pourcentage d'eau jeune au point de prélèvement. Trois points d'eau présentent un % d'eau jeune relativement faible et donc une forte proportion d'eau d'âge antérieure à

1950. Ce sont les eaux collectées à Mohogoni, Mstangamouji (1 et 2) qui présentent respectivement entre 22-28% et 11-14% (1 et 2) d'eau actuel (1 à 3 ans).

Les eaux à Meresse sont également à faible proportion d'eau jeune (32%).

Les eaux à Tsingoni (PZ), à l'émergence de l'Andrianabe et au puits de Achenoua ont une proportion d'eau jeune supérieure à 80%. Il faut noter toutefois que pour Tsingoni l'eau jeune est estimée à plus d'une vingtaine d'année alors que pour les autres points c'est une eau de quelques (max.5) années qui dominant.

Les eaux à Digo (PZ5), à l'émergence de la Chirini, à Beja 1 et à l'émergence de la Massimoni sont d'âge intermédiaire par rapport aux autres points.

L'illustration 23 synthétise l'âge correspondant au modèle qui semble le mieux adapté et les traceurs utilisés.

N°	Code	Nom	BV	Traceurs Utilisés	Age estimé		
					EM (ans)	BM %	Age eaux jeunes
1	12302X0026	PZ1 - DZOUMOGNE	BANDRAMI	CFC113	16		
2	MARK111	EMERGENCE MAPOUERA	MAPOUERA	CFC12	13		
3	12302X0025	MOHOGONI	MOHOGONI	Tous		22 à 28	< 10 ans
5	12306X0046	MERESSE	MERESSE	CFC11 SF6		32	< 10 ans
6	12306X0053	PZ5 - DIGO	BOUYOUNI	CFC12, CFC113		55	10-20 ans
7	MARK184	EMERGENCE LONGONI	LONGONI	CFC12	11		
8	MARK064	PUITS HACHENOUA	MROWALE	CFC12 CFC113 SF6		94 à 98	< 10 ans
9	MARK075	EMERGENCE MROWALE	MROWALE	CFC11 SF6	8		
10	MARK085	EMERGENCE CHIRINI	CHIRINI	Tous		70 à 75	< 10 ans
11	12306X0014	BEJA 1	BEJA	CFC11 SF6		78	10-20 ans
12	12306X0017	MSTANGAMOUJI 1	ANDRIANABE	Tous		11 à 14	< 10 ans
13	12306X0016	MTSANGAMOUJI 2	ANDRIANABE	Tous		11 à 14	< 10 ans
14	MARK150	EMERGENCE ANDRIANABE	ANDRIANABE	CFC11 CFC12 SF6		87 à 90	
15	12305X0002	EMERGENCE MASSIMONI	MASSIMONI	CFC11 CFC12 SF6		68 à 72	
16	12301X0016	EMERGENCE ACOUA	ACOUA	CFC12	17		
18	12306X0013	PZ - TSINGONI	MROWALE	CFC12 CFC113		81	10-20 ans

Illustration 23 : Synthèse des âges CFC calculés pour les eaux collectées en novembre 2010 selon le modèle exponentiel (EM) et mélange binaire (BM)

## 5. Proposition d'implantation des panneaux électriques

Sur la base des travaux de synthèse bibliographique et des reconnaissances de terrain, une proposition pour l'implantation des panneaux électriques comportant 19 sites est proposée. 15 panneaux électriques seront réalisés dont 2 selon la même implantation que des prospections antérieures afin de recalibrer les mesures de la campagne 2011 tout en bénéficiant des résultats des forages réalisés dans ces secteurs.

Ces panneaux électriques permettront d'améliorer la compréhension de la structure des formations volcaniques sous-jacentes et de compléter les modèles conceptuels. Site par site, les objectifs sont les suivants :

- **Mtsahara (720 m)** : les objectifs de ce profil sont (1) de mettre en évidence l'épaisseur des colluvions, (2) d'essayer de déterminer le pendage des basaltes sous-jacents et (3) d'identifier le contexte structural des émergences observées vers 85 m (présence d'un imperméable ?). Les données acquises sur ce secteur pourraient également permettre de mieux appréhender les bassins versants côtier, et de mettre en évidence une éventuelle corrélation avec les mesures faites sur le secteur d'Accoua.
- **Kadjifoujtchéni (720 m)** : l'objectif de ce profil est de déterminer l'épaisseur des ankaramites surmontant les basanites, des circulations d'eau étant possible à cet interface.
- **Piézomètre de Dzoumogné (720 m)**: ce profil a un double objectif. Le premier est un calage des mesures géophysiques sur un forage existant, le second est d'identifier d'où viennent les venues d'eau observées dans ce piézomètre.
- **Amont du piézomètre de Dzoumogné (950 m)** : l'objectif de ce profil perpendiculaire à l'axe de la vallée est de mettre en évidence l'extension latérale des coulées d'ankaramites et éventuellement le contexte d'émergence de la rivière.
- **Massoulaha (720 m)** : l'objectif de ce profil est de mettre en évidence d'éventuelles corrélations avec la vallée située à l'ouest et dans laquelle un aquifère a été recoupé (piézomètre de Dzoumogné).
- **Forage de Mou hogoni (720 m)** : l'objectif de ce profil est de mettre en évidence le contact entre les basaltes pléistocènes  $\beta$  du M'tsapéré et les basanites  $\beta_N$  sous-jacente. La présence d'un paléosol ou d'un horizon imperméable entre les deux est supposée, et serait à l'origine de l'artésianisme du forage et d'une zone de remontée de nappe (augmentation du débit de la rivière) en aval.
- **Bandranzia (720 m)** : l'objectif de ce profil est de comprendre la structure de la partie amont d'un bassin versant où de nombreuses zones humides ont été repérées. Le contexte est supposé similaire au site du forage de Dzoumogné,

avec des circulations d'eau supposée au contact entre  $\beta$  et  $\beta_N$ . Ce profil recoupera également une faille dont le rôle sera à déterminer.

- **Maouéni (720 m)** : l'objectif de ce profil est de mettre en évidence le contexte d'émergence de la rivière (identification d'un horizon imperméable et/ou d'un éventuel aquifère sous-jacent).
- **Padza (720 m)** : l'objectif de ce profil est d'essayer de comprendre la structure en profondeur des Padzas, et leur rôle hydrogéologique.
- **Massimoni (720 m)** : l'objectif de ce profil est double. Tout d'abord, il s'agira de corréliser les mesures avec les anciens profils réalisés il y a quelques années avec un autre dispositif électrique (J.M. Miehe), ensuite il s'agira de voir si la structure des coulées peut permettre d'expliquer la présence d'une source observée en aval (15 m d'altitude) et également le fait que la rivière soit sèche alors que les bassins versants voisins sont en eau.
- **Forages Béja (720 m)** : l'objectif de ce profil est faire un calage avec les anciennes mesures et avec deux forages réalisés dans la vallée, afin de pouvoir être confronté avec les mesures qui seront réalisées sur le site situé juste à l'ouest.
- **Béja Ouest (720 m)** : l'objectif de ce profil est de mettre en évidence d'éventuelles corrélations avec la vallée située à l'Ouest et dans laquelle un aquifère a été recoupé (Forages de Béja).
- **Bandramaji (720 m)** : l'objectif de ce profil est d'une part d'essayer de voir si l'augmentation de débit de la rivière peut être corrélée avec les structures géologiques. D'autre part, ce site est situé entre le piézomètre de Digo à l'amont et les forages de Bouyouni en aval, une continuité structurale sera donc également à rechercher.
- **Piézomètre de Digo (720 m)** : comme pour le piézomètre de Dzoumogné, ce profil a un double objectif. Le premier est un calage des mesures géophysiques sur un forage existant, le second est d'identifier l'origine des venues d'eau observées dans ce piézomètre.
- **Maboungani (720 m)** : l'objectif de ce profil est de mettre en évidence le contexte d'émergence de la rivière et les structures sous-jacentes.
- **Chirini (720 m)** : l'objectif de ce profil est de mettre en évidence le contexte d'émergence de la rivière et les structures sous-jacentes, ainsi que l'épaisseur des altérites.
- **Mrowalé 1 (720 m)** : comme pour les deux précédents sites, l'objectif de ce profil est de mettre en évidence le contexte d'émergence de la rivière et les structures sous-jacentes, ainsi que l'épaisseur des altérites, mais cette fois-ci en ayant un profil perpendiculaire à l'axe de la vallée.
- **Mrowalé 2 (720 m)** : ce profil pourrait être facultatif, les objectifs étant les mêmes que pour les sites précédents.
- **Mrowalé 3 (amont)** : l'objectif de ce profil est de mettre en évidence les effets topographiques non corrigés par la géophysique aéroportée. Ce site est de plus une zone sèche potentiellement infiltrante, dont la structure et l'extension des coulées sera à déterminer. Ce profil perpendiculaire à l'axe de la vallée pourra notamment permettre de rechercher des structures de type paléovallées.

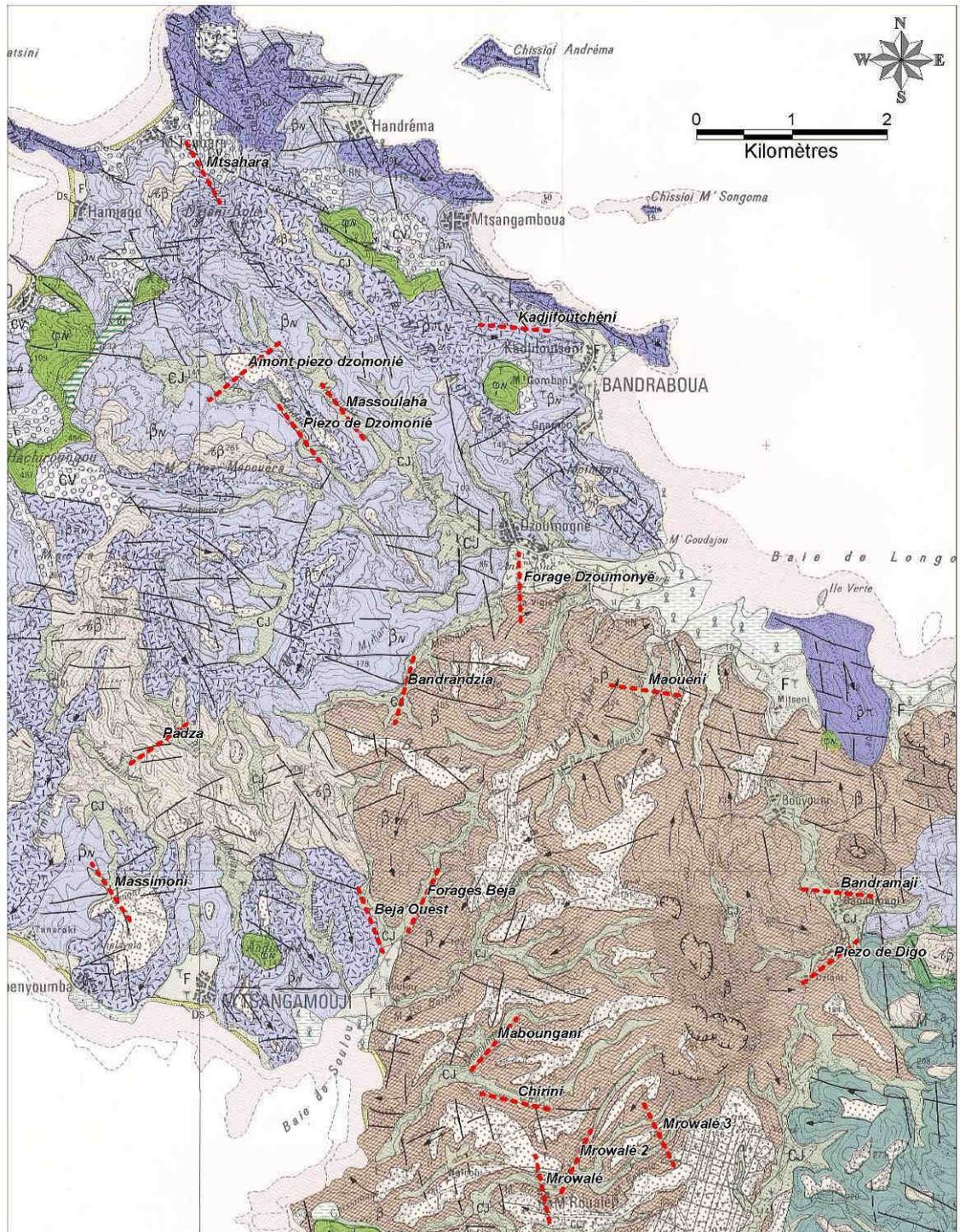


Illustration 24 : localisation prévisionnelle des profils électriques par rapport à la géologie.



Illustration 25 : localisation prévisionnelle des profils électriques.

## 6. Etapes à venir

Une campagne de géophysique au sol (panneaux électriques) prévoyant la réalisation de 15 profils sera réalisée en mars et avril 2011. En croisant ces données avec les observations directes (reconnaitances de terrain, logs de forage, morphologie) il sera possible de compléter la compréhension des structures sous-jacentes et de compléter les modèles conceptuels.

Un couplage entre les panneaux électriques, dont les résultats seront recalés, dans la mesure du possible, sur des logs de forage, et la géophysique aéroportée sera réalisé par la suite. Ce travail devrait permettre de passer des interprétations locales, à des conceptions plus régionales à l'échelle des bassins versants et/ou massifs.

Pendant ce travail, l'exploitation des observations de terrain ainsi que l'exploitation des données d'hydrochimie, d'hydrologie et de géomorphologie continueront. Elles seront confrontées pour établir les relations qui existent entre géologie et écoulements.

Au terme du projet, l'approche structurale des formations du sous-sol complétées par les données d'hydrochimie et les observations de terrain seront croisées pour établir des modèles conceptuels cohérents à l'échelle du bassin versant. L'objectif de ces modèles est :

- (1) de proposer un fonctionnement hydrogéologique de la zone d'étude afin d'optimiser la mise en œuvre des réseaux de suivi DCE (qualitatif et quantitatif) et du programme de mesures du SDAGE voire de préciser le découpage des masses d'eau souterraine ;
- (2) d'identifier les zones les plus intéressantes à prospecter et celles ne présentant qu'un faible intérêt dans la perspective d'une exploitation des eaux souterraines pour l'alimentation des populations.



## 7. Bibliographie

### ***Carte géologique***

STIELGES, L. (1988) Carte géologique de Mayotte (archipel des Comores) au 1/50 000. Notice explicative. BRGM.

### ***Caractérisation hydrogéologique du Nord-Est (Projet Masses d'Eau – Année 1)***

Guilbert M., Dewandel B., Lachassagne P., en collaboration avec Malard A. (2008) – Protection et optimisation de la ressource en eau souterraine à Mayotte. Année 4 – BRGM/RP-56438-FR, 105 p., 38 ill., 10 tab., 6 ann.

### ***Campagnes de recherche en eau antérieures***

Daesslé M. (1988) - Programme départemental de recherche en eau 1986 - Les moyens de captage des eaux souterraines en milieu volcanique insulaire. Rapport BRGM/88-REU-29; 108 p.

Daesslé M., Verrez P. (1987) - Mise en valeur du potentiel en eau souterraine dans le Sud de l'île de Mayotte - Reconnaissance géophysique et hydrogéologique. Rapport BRGM/87-REU-11, 149p.

Mauroux B. (1992) - Programme des forages de reconnaissance des eaux souterraines à Mayotte. Rapport BRGM/RR-35165-FR, 102 p.

MAUROUX, B. (1992). Programme des forages de reconnaissance des eaux souterraines à Mayotte. BRGM/RP-31165-FR / REU 4S 92.

### ***Campagne de recherche et d'exploitation des eaux souterraines 1999-2000***

CRUCHET M., DAESSLE M., GERARD A., LACHASSAGNE P. (2000) - Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte - Synthèse des résultats des reconnaissances géologiques, hydrogéologiques, géophysiques, et émanométriques radon - Propositions d'implantation des sondages de reconnaissance - Rap. BRGM/RP-50386-FR - 2000 SGRSGR/MAY 30, 54 p., 17 fig., 3 ann.

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

Mathieu F. (1999) programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte. Reconnaissance géophysique. BRGM/RP-40750 FR.

### ***Campagne de recherche et d'exploitation des eaux souterraines 2001-2003***

BONNIER J., JOSSOT O., LACHASSAGNE P. et MOURON R. (2003) - Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte (Campagne 2001-2003) - Forage de Bouyouni-Méresse (1230-6X-0046). Rapport BRGM/RP-52481-FR, 37 p., 12 fig., 4 ann.

Bonnier L., Jossot O., Lachassagne P. et Mouron R (2003) en collaboration avec J.P. Rançon - Programme de recherche et exploitation des eaux souterraines à Mayotte (Campagne 2001-2003) - Forage de Combani (1230-2X-0047). Rapport BRGM/RP-52721-FR, 53 p., 16 fig., 4 ann.

JOURDAIN T., LACHASSAGNE P., LEBON D., MIEHE J.M., MOURON R. (2002) - Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte campagne 2001-2002 - Synthèse des résultats des reconnaissances géologiques, hydrogéologiques, géophysiques et radon - Propositions d'implantation des sondages de reconnaissance – Rap. BRGM/RP-51498-FR – 2002 MAY 01, 115 p., 33 fig., 6 tab., 4 ann.

Lachassagne P., Ladouche B., Petit V. avec la collaboration de Jourdain Th. et Mouron R. (2002) - Protection et optimisation de la ressource en eau souterraine à Mayotte. Réévaluation des débits d'exploitation des forages de 1999 - 2000, sur la base d'observations complémentaires réalisées en 2000-2001. BRGM/RP 51603-FR, 89 p., 31fig.

LACHASSAGNE P., MAURILLON N. et MOURON R. (2002) - Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte (Campagne 2001-2003) - Forage de Combani (1230-6X-0038). Compte-rendu des travaux - Principaux résultats géologiques et hydrogéologiques. - Rapport BRGM/RP- 52054-FR- 2002 MAYOTTE 09, 29 p., 8 fig., 5 ann.

Lachassagne P., Maurillon N. et Mouron R. (2002) - Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte (Campagne 2001-2003) - Forage de Bouyouni-Bouyouni (1230-6X-0024). Compte-rendu des travaux - Principaux résultats géologiques et hydrogéologiques. - Rapport BRGM/RP- 51969-FR- 2002 MAYOTTE 07, 30 p., 7 fig., 5 ann.

LACHASSAGNE P., MAURILLON N. et MOURON R. (2003) - Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte (Campagne 2001-2003) - Forage de Mtsangamouji-Massimoni (1230-6X-0045). Compte-rendu des travaux - Principaux résultats géologiques et hydrogéologiques.- Rapport BRGM/RP-52103-FR – 2003 MAYOTTE 04, 21 p., 4 fig., 3 ann.

### ***Campagne de recherche et d'exploitation des eaux souterraines 2004***

Petit V., Eucher G. (2004) - Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte - Campagne 2004 - Forage 1230-6X-0012 (Ourouvéni 02). BRGM/RP-53472-FR, 61 p., 11 illustrations, 4 ann.

Petit V., Frissant N., Eucher G., Lachassagne P. (2004) - Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte – Campagne 2004 - Forage 1230-7X-0100 (Koualé 3). BRGM/RP-53471- FR, 89 p., 13 illustrations, 4 annexes.

### ***Campagne de recherche et d'exploitation des eaux souterraines 2005-2007***

Eucher G., Mouron R. (2006).- Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte – Campagne 2005 - Forage 1230-7X-0116 (Longoni-Tririni). BRGM/RP-54434- FR, 41 p., 6 illustrations, 3 annexes.

Frissant N., Lachassagne P., Miehe J. M., Eucher G., Petit V., Mouron R., coll. Barthélemy L. (2006) - Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte. Campagne 2006-2007. Synthèse des résultats des reconnaissances géologiques, hydrogéologiques et radon. Proposition d'implantation des sondages de reconnaissance. Rapport BRGM/RP-55322- FR, 138 p., 41 ill. et 6 ann.

Miehe J.M., Eucher G., Petit V. (2005) - Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte – Campagne 2005 – Reconnaissance géophysique et implantation des forages. BRGM/RP-54111- FR, 37 p., 8 illustrations, 3 annexes.

### ***Etude pour les Bassins d’Alimentation de Captage***

Brugeron A., Malard A., avec la collaboration de Wuilleumier A et Mougin B. (2009) - Etude du bassin d'alimentation du captage de Mrowalé - bassin versant de la Mrowalé – Mayotte – BRGM/RP-57626-FR. 86 p., 29 ill., 10 tab., 4 annexes.

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

Malard A., avec la collaboration de Aunay B., Vernoux J.F. et Mardhel V. (2009) - Etude des bassins d'alimentation des 3 captages du bassin versant du Mro Oua Bouyouni – Mayotte (délimitation, vulnérabilité, pressions) – BRGM/RP-57108-FR, 94 p., 19 ill., 9 tab., 4 ann.

Malard A., avec la collaboration de Aunay B., Vernoux J.F. et Mardhel V. (2009) - Etude des bassins d'alimentation des 2 captages du bassin versant du Mro Oua

Méresse – Mayotte (délimitation, vulnérabilité, pressions) – BRGM/RP-57110-FR, 76 p., 18 ill., 6 tab., 4 ann

Malard A., avec la collaboration de Brugeron A., Mougin B. et Wuilleumier A. (2009) - Etude du bassin d'alimentation du forage de Béja 1 (12306X0014/BEJA1) - bassin versant du Mroni Béja – Mayotte – BRGM/RP-57619-FR. 72 p., 23 ill., 7 tab. et 2 ann.

Malard A., avec la collaboration de Brugeron A., Mougin B., Wuilleumier A. (2009) - Etude des bassins d'alimentation des 3 captages du bassin versant du Mro Oua Maré – Mayotte – BRGM/RP-57622-FR. 136 p., 42 ill., 30 tab., 4 ann.

Mougin B., Malard A., avec la collaboration de Brugeron A., Wuilleumier A. (2009) - Etude des bassins d'alimentation des 2 captages du bassin versant du Mro Oua Andrianabé – Mayotte – BRGM/RP-57618-FR. 101 p., 28 ill., 13 tab., 4 ann.

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

### ***Réseau piézométrique***

Malard A. (2008) - Mise en place du réseau piézométrique de Mayotte sous maîtrise d'ouvrage du BRGM. Gestion pour l'année 2008. Rapport BRGM/RP-56768-FR. 96 p., 29 ill., 4 tab et 5 ann.

Malard A. (2009) - Programme de surveillance des eaux souterraines de Mayotte - Campagne 2008/2009 – piézomètre 12302X0026/PZ1 (Dzoumognè 2). BRGM/RP-56779-FR, 56 p., 8 ill., 3 tab et 5 ann.

Malard A. (2009) - Programme de surveillance des eaux souterraines de Mayotte - Campagne 2008/2009 – piézomètre 12306X0053/PZ5 (Digo). BRGM/RP-56781-FR, 52 p., 8 ill., 2 tab., 5 ann.

Malard A., Jaouen T. (2009) – Réseau de surveillance piézométrique de Mayotte sous maîtrise d'ouvrage BRGM. Année 2009. BRGM/RP-57459-FR, 75 p., 21 ill., 8 tab., 4 ann.

### ***Définition des réseaux DCE de surveillance qualitative***

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

Malard A., 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.

### **Autres études du BRGM**

Almaric L. (2007) - Les retenues collinaires de Mayotte: environnement et qualité biologique des eaux. Bilan pesticides. Rapport final. RP-55934-FR, 37 p., 15 ill.

Auclair S., Vanoudheusden E., Rey J., Bernardie S., Garnier C., Oppermann A., Baltassat J-M., Blondel A., Bitri A. et Roullé A. (2009) - Site TOTAL du dépôt d'hydrocarbures de Longoni (commune de Koungou, Mayotte). Evaluation de l'aléa sismique local et des mouvements de terrain induits. Rapport final. BRGM/RC-57925-FR, 122 p., 24 figures, 16 tableaux, 5 annexes.

Billard G. (1977) - Inventaire des ressources hydrauliques de Mayotte. Rapport BRGM/77-REU-04

BRGM (2000) - Caractéristiques physiques et chimiques de cinq rivières et de leurs bassins versants sur Grande Terre, île de Mayotte - Etablissement d'un état des lieux vis à vis des facteurs de pollution. Rapport BRGM / RC-50355-FR – 2000 SGR/MAY 27, 68 p., 40 fig, 20 tab., 5 annexes.

BRGM (2000) - Recherche par forage d'eaux souterraines pour l'approvisionnement de l'usine d'embouteillage de boissons gazeuses de la Vallée 3, Ile de Mayotte. Rapport BRGM/RC-50356-FR - 2000 SGR/MAY 26, 15 p., 5 fig.

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

Dutartre P., Stieltjes L. (1990) - Utilisation de l'imagerie satellitaire SPOT pour la prospection hydrogéologique en milieu volcanique. Exemple de la Réunion, Océan Indien. Rapport BRGM R30641/TED SGN 90. 59 p.

Gérard A., Lansiard M., Rançon J-P. (2000) - Caractéristiques physiques et chimiques de cinq rivières et de leurs bassins versants sur Grande Terre, île de Mayotte - Etablissement d'un état des lieux vis à vis des facteurs de pollution. Rapport BRGM/RC-50355-FR, 2000 SGR/MAY 27, 68 p., 40 Fig., 20 Tabl., 5 Ann.

Guilbert M., Dewandel B., Lachassagne P. avec la collaboration de Malard A. (2008) – Protection et optimisation de la ressource en eau souterraine à Mayotte. Année 4 – BRGM/RP-56438-FR, 105 p., 38 ill., 10 tab., 6 ann.

Jossot O., Mouron R. Pouget R. (2003) - Etude hydrologique et hydraulique de la rivière Bouyouni, commune de Bandraboua (Mayotte). Rapport BRGM/ 52516- FR, 25 p., 2 fig., 6 tab., 4ann

Jourdain T., Maurillon N. et Mouron R. (2002) - Approche géologique et hydrogéologique des ensembles volcaniques de Grande-Terre (Mayotte). Rap. BRGM/RP-51498-FR – 2002 MAYOTTE 04, 80 p., 17 fig., 8 tab., 5 ann.

Malard A. avec la coll. de A. Bourhane (2009) - Stockage d'hydrocarbures du site SMSPP de Longoni – Mayotte. Implantation et réalisation de 3 piézomètres de surveillance. Rapport BRGM/RC-57362-FR. 84 pages, 19 Illustrations, 12 tableaux et 6 annexes.

MALARD, A. (2009). Etudes géologiques et hydrogéologiques du site de stockage d'hydrocarbures de Longoni en vue de l'implantation de piézomètres de surveillance. Note 2009 BRGM/SAR/MAYOTTE 20.

Miehe J.M. et Audru J.C. (2007) – Étude de résistivité sur le site de la future centrale thermique EDM de Longoni, commune de Koungou (Mayotte).

Mouron R. (2002) : BSS-ES Mayotte 2001 - 2002. Rapport de fin d'année 1 - Rap. BRGM/RP-51925-FE- 2002 Mayotte, 25 p., 3 ann.

Pajot G., Debeglia N. et Miehé J.-M. (2007) – Estimation du potentiel géothermique de Mayotte : Phase 2- Etape 1. Investigations géophysiques par gravimétrie, magnétisme et panneau de résistivité électrique. Rapport BRGM/RP-56027-FR, 59 p., 27 fig., 2 ann.

Rapport BRGM/RC-55555-FR, 40 pages, 20 Illustrations, 1 tableau et 4 annexes

Sanjuan B., Baltassat J-M., Traineau H., Brach M. (2008) - Estimation du potentiel géothermique de Mayotte en 2008 : Synthèse élargie des principaux résultats. Rapport BRGM/RP-56802SYNTH-FR, 26 p., 7 fig.

Solages S.(1998) - Evaluation technique et financière d'un programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte. Rapport BRGM/RR-40184-FR, 2 vol., 103 p., 3 pht.

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

Stieltjes L., Rigal D. (1982) - Schéma directeur de mise en valeur des ressources en eau de Mayotte. Rapport BRGM/82-REU-18, 42 p.

Stollsteiner P., avec la collaboration de C. Cluzet (2008) – Actualisation des propositions pour une méthodologie relative aux études hydrauliques et hydrologiques à Mayotte. Rapport BRGM/RP-56881-FR, 98 p., 32 ill., 4 ann.

## **Thèses**

DEBEUF, D. (2004). Etude de l'évolution volcano-structurale et magmatique de Mayotte (Archipel des Comores, Océan Indien). Approche structurale, pétrographique, géochimique et géochronologique. Thèse de Doctorat. Université de la Réunion.

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

LAPEGUE, J. (1999). Aspects quantitatifs et qualitatifs de la pluviométrie dans deux enjeux majeurs de la problématique de l'eau à Mayotte : la ressource hydrique et l'assainissement pluvial et l'érosion. Thèse de Doctorat. Laboratoire des Sciences de la Terre. Université de la Réunion.

### ***Datation CFC/SF6***

**Busenberg, E., Plummer, L.N.** (1992) - Use of Chlorofluoromethanes ( $\text{CCl}_3\text{F}$  and  $\text{CCl}_2\text{F}_2$ ) as hydrologic tracers and age-dating tools: Example- The alluvium and terrace system of Central Oklahoma, *Water Resour. Res.* 28, 2257-2283.

**Busenberg, E., Plummer, L.N.** (2000) - Dating young groundwater with sulphurhexafluoride – Natural and anthropogenic sources of sulphurhexafluoride, *Water Resour. Res.* Vol. 36, 3011-3030.

**Busenberg, E., Weeks, E.P., Plummer, L.N., Bartholemey, R.C.** (1993) - Age dating groundwater by use of chlorofluorocarbons ( $\text{CCl}_3\text{F}$  and  $\text{CCl}_2\text{F}_2$ ) 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.

**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,  $^3\text{H}/^3\text{He}$  and  $^{85}\text{Kr}$ , *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., Goody, D.C.** (2007) – Assessing the applicability of global CFC and SF6 input functions to groundwater dating in the UK. *Science of the Total Environment*, in press.

**Goody, D.C., Darling, W.G., Abesser, C., Lapworth, D.J.** (2006) - Using chlorofluorocarbons (CFCs) and sulphur hexafluoride ( $\text{SF}_6$ ) to characterise groundwater movement and residence time in a lowland Chalk catchment. *Journal of Hydrology, Volume 330, Issues 1-2, 30 October 2006, Pages 44-52.*

**Heaton, T.H.E., Vogel, J.C.**, (1981) - "Excess air" in groundwater, *J. Hydrol.*, Vol. 50, 201-216.

**Ho, D.T., Schlosser, P., Smethie, W.M., Jr., and Simpson, H.J.** (1998) - Variability in atmospheric chlorofluorocarbons ( $\text{CCl}_3\text{F}$  and  $\text{CCl}_2\text{F}_2$ ) near a large urban area: Implications for groundwater dating, *Environ. Sci. and Technol.*, Vol. 32, No. 16, 2377-2382.

**IAEA** (2006) – Use of Chlorofluorocarbons in hydrology: A guidebook. STI/PUB 1238, IAEA, Vienna.277p.

**INRS.** (2000). "Fiche toxicologique de l'hexafluorure de soufre." 2005, from <http://www.inrs.fr/>.

**MacCarthy R.L., Bower F.A., Jesson J.P.** (1977) – The fluorocarbon-ozone theory, 1. production and release – world production and release of  $\text{CCl}_3\text{F}$  and  $\text{CCl}_2\text{F}_2$  (fluorocarbons 11 and 12) through 1975. *Atmospheric Environment*, 11, 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, N.4, pp. 504-517.

**Maloszewski, P., Zuber, A.** (1982) - Determining the turnover time of groundwater systems with the aid of environmental tracers. 1. Models and their applicability, *J. Hydrol.*, Vol. 57, 207-231.

**Maiss, M., C. A. M. Brenninkmeijer** (1998). Atmospheric  $\text{SF}_6$ : Trends, sources and prospects. *Environmental Science & Technology* 32: 3077-3086.

**Maiss, M., L. P. Steele, et al.** (1996). Sulfur hexafluoride - a powerful new atmospheric tracer. *Atmospheric Environment* 30(10/11): 1621-1629.

**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.

**Oster, H., Sonntag, C., Munnich, K.O.,** (1996) - Groundwater age dating with chlorofluorocarbons, *Water Resour. Res.*, Vol. 32, No. 10, 2989-3001.

**Plummer, L.N., 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, 441-478.

**Santella, N., Ho, D.T., Schlosser, P., Stute, M.** (2003) - Distribution of atmospheric  $\text{SF}_6$  near a large urban area as recorded in the vadose zone. *Environmental Sciences and Technologie*, Vol. 37, pp. 1069-1074.

**Schultz, T.R., Randall, J.H., Wilson, L.G., Davis, S.N.** (1976) – Tracing sewage effluent recharge – Tucson, Arizona. *Groundwater*, 14, pp.463-470.

**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, 50p., 29 ill.

**von Rohden C., Kreuzer A., Chen ZY, Aeschbach-Hertig W.** (2008) - 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(3)**, pp. **279-290**

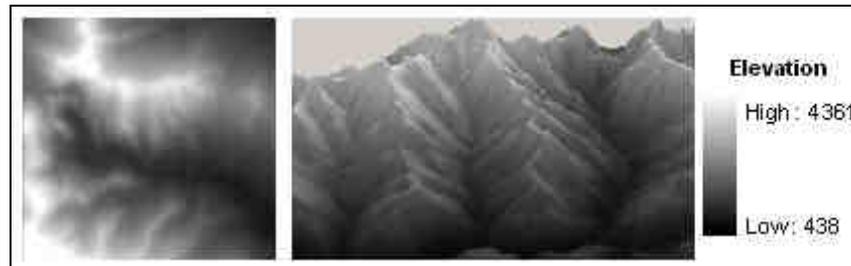


## **Annexe 1**

### **Analyse automatisée du MNT**



Le territoire de Mayotte est couvert par Modèle Numérique de Terrain (MNT) très performant dont la maille de mesure est de 1 mètre par 1 mètre et la précision altimétrique de 0,1 mètre. Cette donnée levée par l'IGN en 2008 est fournie par le Conseil Général 976 aux professionnels.



*Illustration 26 : Représentation d'un modèle numérique de terrain ou raster d'altitude.*

Le MNT est une représentation de la surface topographique, des reliefs. Des analyses géomorphologiques, structurales ainsi que la délimitation de zones spécifiques peuvent donc être réalisées à partir de traitements mathématiques. Les éléments cartographiques qui en découlent apportent des informations complémentaires aux données de terrain sur les structures et l'organisation générale de la zone d'étude.

Dans le cadre de cette étude, les données cartographiques suivantes seront calculées à partir du MNT :

- la carte des pentes et des courbures (dérivées arithmétiques du 1<sup>er</sup> et du 2<sup>nd</sup> degré du MNT) ;
- la délimitation des bassins versant ;
- le tracé du réseau hydrographique théorique ;
- la rugosité de la surface topographique.

Seule l'altitude est fournie de manière "brute" par le MNT. Le calcul des pentes, des bassins versants et des talwegs font appel aux techniques de traitements spatiaux intégrés aux logiciels de Système d'Information Géographique (SIG). Les traitements exploités dans le cadre de cette étude ont été développés pour l'application ArcView©. Les procédures utilisées proviennent de l'Université du Texas à Austin. Elles ont été développées pour Arcview par le Center for Research in Water Resources (CRWR).

## Délimitation des bassins versants et tracé du réseau hydrographique

La délimitation des bassins versants se fonde sur quatre étapes :

- La première utilise un algorithme, permettant de corriger les dépressions du MNT, i.e. les zones pour lesquelles aucun exutoire n'est possible.
- La seconde étape calcule le "graphe dérivé" du MNT qui attribue à chaque point la direction de la maille voisine suivant la plus grande pente.
- Cet ensemble de "cellules de drainage" décrit un bassin versant lorsque l'exutoire est situé sur le bord du MNT ou un "bassin de dépression" lorsque tous les chemins décrits en suivant les cellules aboutissent en un minimum local. L'outil « watershed » permet de délimiter ces ensembles de cellules de drainage.
- Enfin l'application trace dynamiquement des lignes, en partant de certains points choisis et en suivant la ligne de plus grande pente jusqu'à arriver soit en bord d'image, soit en un minimum local, soit enfin jusqu'à rencontrer une ligne déjà tracée.

(1) Avant tout, il est nécessaire de réaliser un pré-traitement du MNT, en particulier, des zones de dépression.

Les solutions sont généralement basées sur l'hypothèse suivante : si l'eau s'écoule en surface et s'il y a une dépression naturelle, l'eau remplit préalablement celle-ci avant de continuer sa route vers l'aval. La première des techniques de traitement des dépressions considère les dépressions comme des artéfacts altimétriques ne représentant aucune forme réelle (Jenson et Domingue 1998). De ce fait, certains auteurs procèdent au comblement des dépressions après avoir déterminé l'exutoire de la dépression : c'est la technique dite du « bouche-trous ». Dans ce cas, on détermine la cellule exutoire et on affecte à toutes les cellules de la dépression l'altitude de cet exutoire.

La seconde, décrite par Fairfield et Leymarie (1991), vise à déterminer l'exutoire de la dépression puis à inverser le chemin d'écoulement entre le fond de la dépression et cet exutoire. Ceci aura pour effet de rendre la continuité du réseau hydrographique. Pour déterminer quelle cellule représente l'exutoire, il faut trouver, parmi toutes les cellules ne recevant pas d'eau d'une autre cellule et s'écoulant vers le fond de la dépression, laquelle possède l'altitude la plus basse.

Enfin, une dernière méthode répandue consiste à identifier une zone d'altitude forte entre deux dépressions et à creuser cette zone de façon à ce que l'eau de la dépression puisse s'écouler en aval.

A l'usage, ces techniques offrent toutes des résultats comparables. La seconde technique indiquée ci-dessus est sans effet sur les altitudes, les deux autres vont les modifier. C'est pourquoi nous retiendrons ici la seconde méthode, pour « corriger » le MNT.

(2) La seconde étape consiste à déduire les directions d'écoulements de ce MNT corrigé. En comparant l'altitude de chaque cellule aux altitudes des cellules voisines, il est possible d'identifier la plus grande pente descendante et de coder la direction d'écoulement.

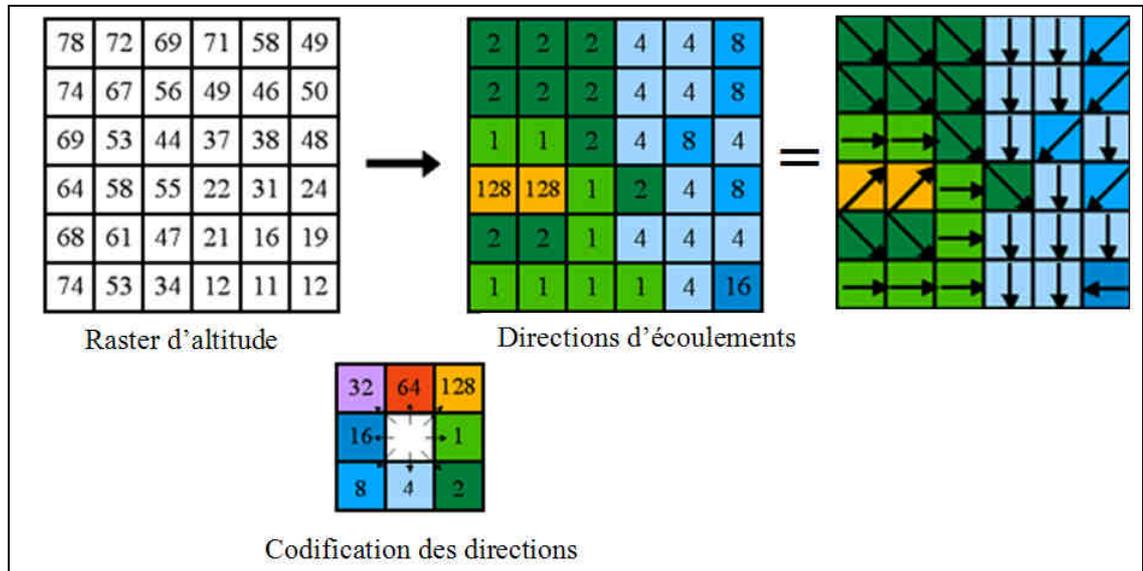


Illustration 27 : Directions d'écoulements

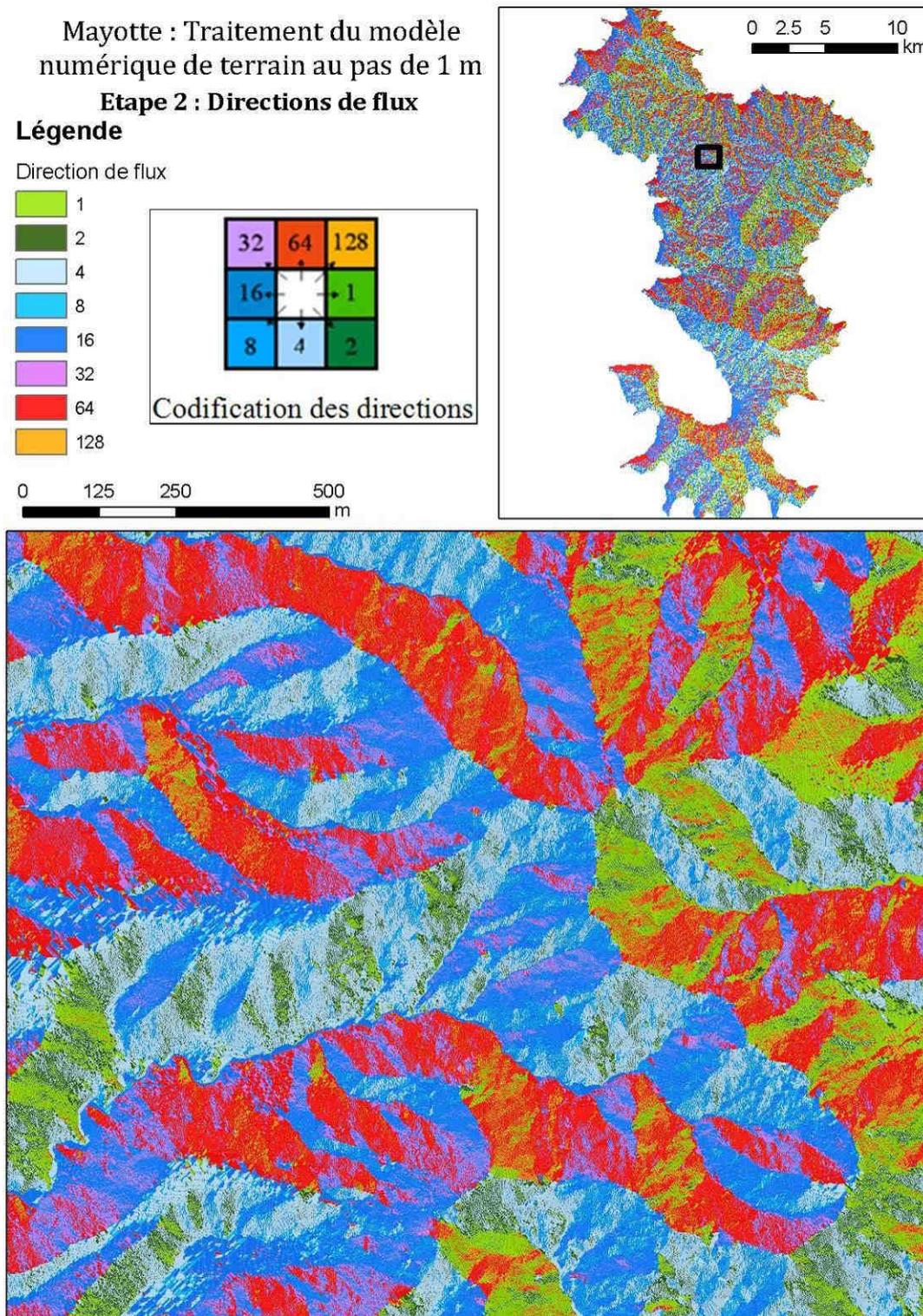
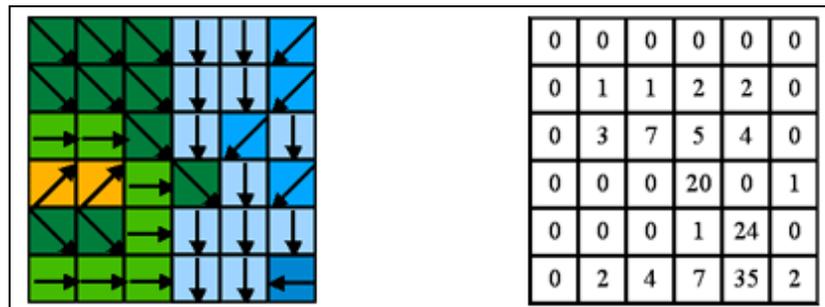


Illustration 28 : traitement du modèle numérique de terrain - Etape 2 : directions de flux.

(3) L'étape suivante est la délimitation des bassins versants. A partir des sens d'écoulement attribués à chaque cellule (étape 2), on peut déterminer les bassins de drainage, constitués de cellules reliées qui s'écoulent vers une localisation commune. Ce sont les bassins versants topographiques.

(4) Le dernier outil utilisé pour la délimitation des BAS calcule **la quantité de flux de surface accumulée dans chaque cellule**. Les cellules contenant de fortes valeurs d'accumulation sont généralement des cours d'eau ou des rivières. Les lignes de crêtes sont des surfaces d'accumulation de flux nulle.



*Illustration 29 : Calcul de la quantité de « flux » de surface accumulée dans chaque cellule (une fois les directions d'écoulements connues, on peut compter pour une cellule donnée, le nombre de cellules qui s'y jette)*

Mayotte : Traitement du modèle numérique de terrain au pas de 1 m

Etape4 : Délimitation des bassins versants et des thalwegs

Légende

 Bassins versants

Thalwegs

 Axes théoriques principaux

 Axes théoriques secondaires

0 50 100 200  
 m

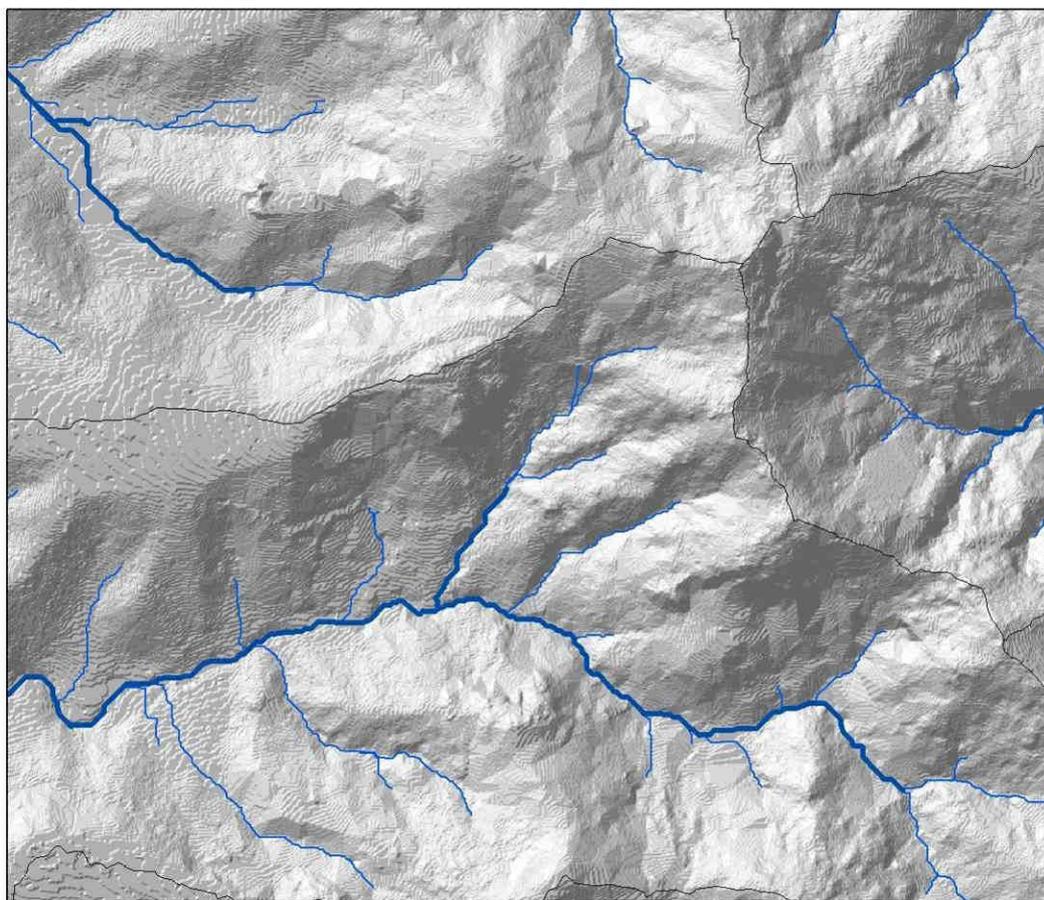
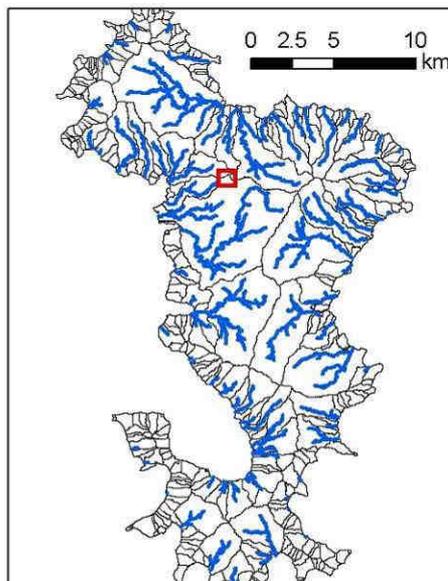


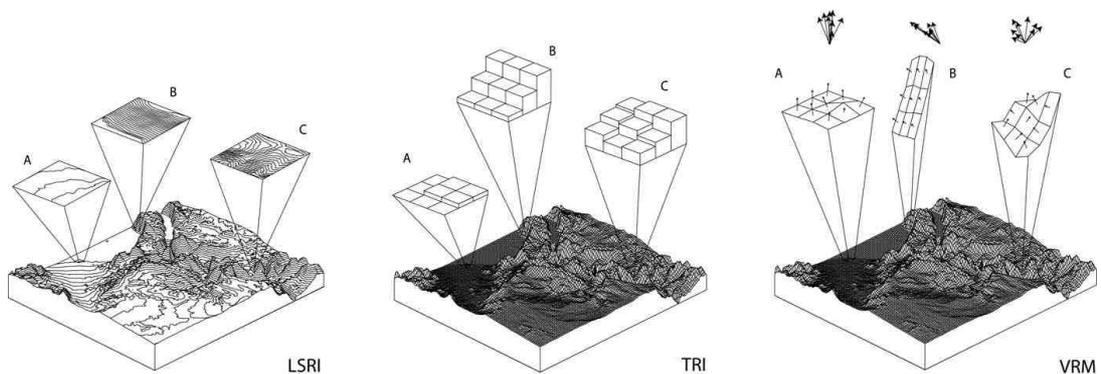
Illustration 30 : Traitement du modèle numérique de terrain - Etape 4 : délimitation des bassins versants et des thalwegs.

## Calcul de l'indice de rugosité

La notion qualitative de rugosité des terrains est difficile à appréhender (un terrain inégal, raide rocheux, rocheux cassé et raide, etc.). Il existe différentes méthodes de calcul de rugosité, deux sont courantes LSRI et TRI, la troisième - VRM - retenue dans le cadre de Mayotte a été développée en 2005 selon une approche naturaliste récente<sup>5</sup>.

Les méthodes LSRI (Land surface ruggedness index) et TRI (Terrain ruggedness index) ont pour inconvénient d'être fortement corrélées avec la pente et de la sorte ne peuvent clairement distinguer des terrains de pente forte mais homogène (glacis) de terrains de pente forte et de direction hétérogène.

Pour s'affranchir de cette critique, une mesure idéale de rugosité devait incorporer la variabilité dans l'aspect et la direction de la pente. C'est la solution proposée par la méthode VRM (Vectorruggednessmeasure) qui emploie la dispersion dans les trois dimensions des vecteurs orthogonaux aux facettes du DEM.



*Illustration 31 : Méthodes courantes de calcul de la rugosité, LSRI, TRI et VRM*

La première (LSRI) exploite la densité des courbes isohypses dans un secteur donné. Les valeurs d'index sont basses dans les secteurs plats (**a**), tandis que les valeurs d'index sont hautes dans les secteurs où les courbes sont proches (fortes pentes homogène **b** (d'orientations similaires) et hétérogènes **c** (d'orientations variées)).

<sup>5</sup>Quantifying Landscape Ruggedness for Animal Habitat

Analysis: A Case Study Using Bighorn Sheep in the Mojave Desert. J. MARK SAPPINGTON, 1,2 Department of Biological Sciences, 4505 Maryland Parkway, University of Nevada Las Vegas, Las Vegas, NV 89154-4004,

USA ; KATHLEEN M. LONGSHORE, United States Geological Survey, Western Ecological Research Center, 160 N. Stephanie Street, Henderson, NV 89074, USA ; DANIEL B. THOMPSON, Department of Biological Sciences, 4505 Maryland Parkway, University of Nevada Las Vegas, Las Vegas, NV 89154-4004, USA

La seconde (TRI) utilise la somme des variations d'altitude dans un secteur donné comme index de la rugosité de terrain. De la même manière que précédemment, les valeurs d'index sont basses dans des secteurs plats (a) mais plus importantes dans les deux secteurs de fortes pentes homogène **b** (d'orientations similaires) et hétérogènes **c** (d'orientations variées).

Enfin la troisième approche, la mesure de rugosité par les vecteurs (VRM) mesure la rugosité des terrains en mesurant la dispersion des vecteurs orthogonaux sur la surface de terrain. Les valeurs de VRM sont basses dans les secteurs plats (a) et dans les zones de pentes élevées mais de directions homogènes, elles sont élevées dans les secteurs qui sont raide et « rugueux » fortes pentes et orientations variées.

Les résultats du calcul de la rugosité bruts sont présentés dans l'illustration 31.

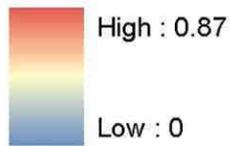
Mayotte : Traitement du modèle  
numérique de terrain au pas de 1 m  
Calcul de rugosité

### Légende

 Bassins versants

### Indice de rugosité

#### Value



 0 50 100 200 m

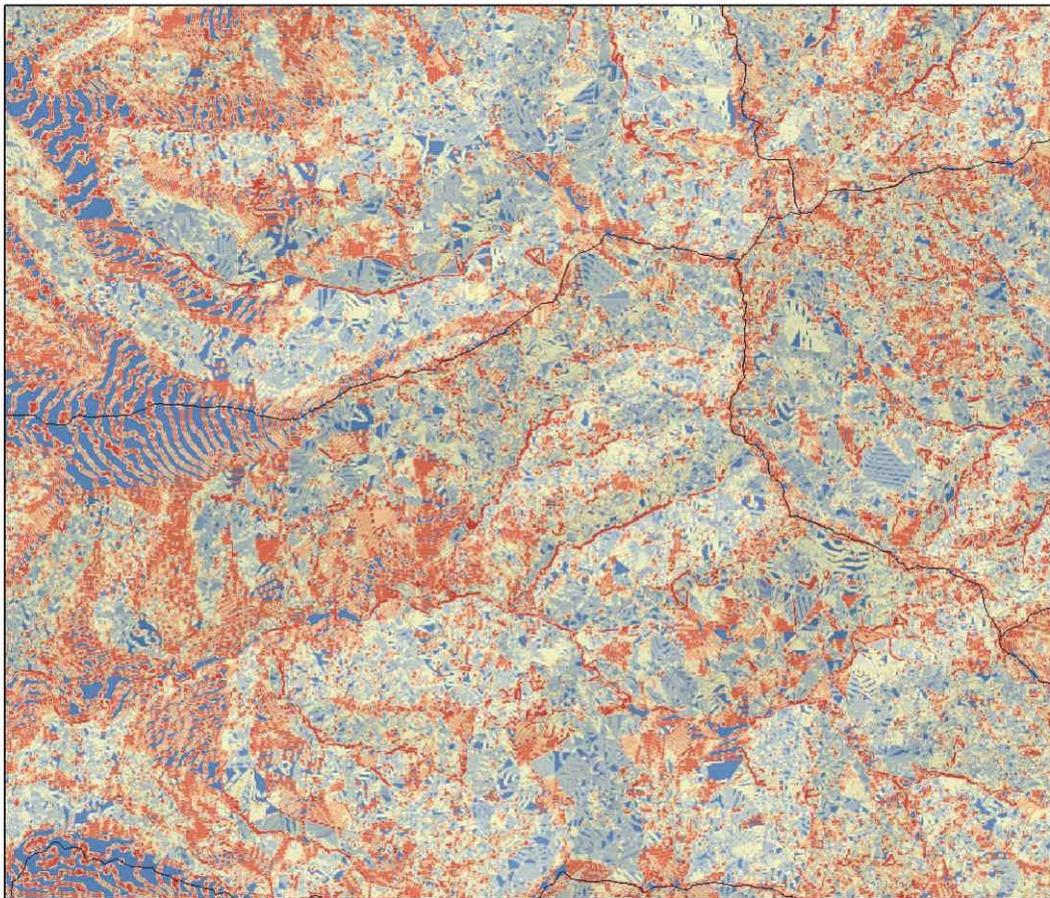
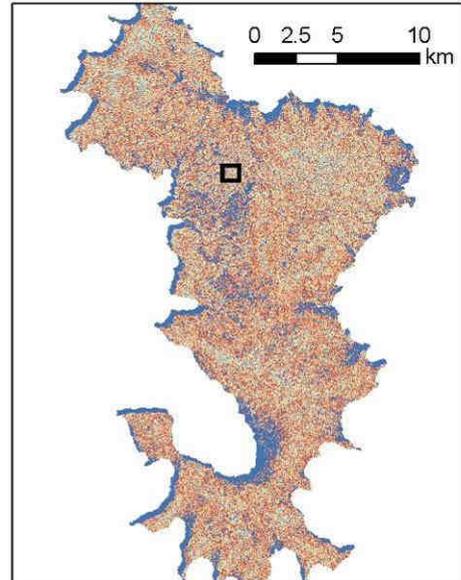


Illustration 32 : Traitement du modèle numérique de terrain - Calcul de la rugosité.



## **Annexe 2**

### **carte des isohyètes de Mayotte**



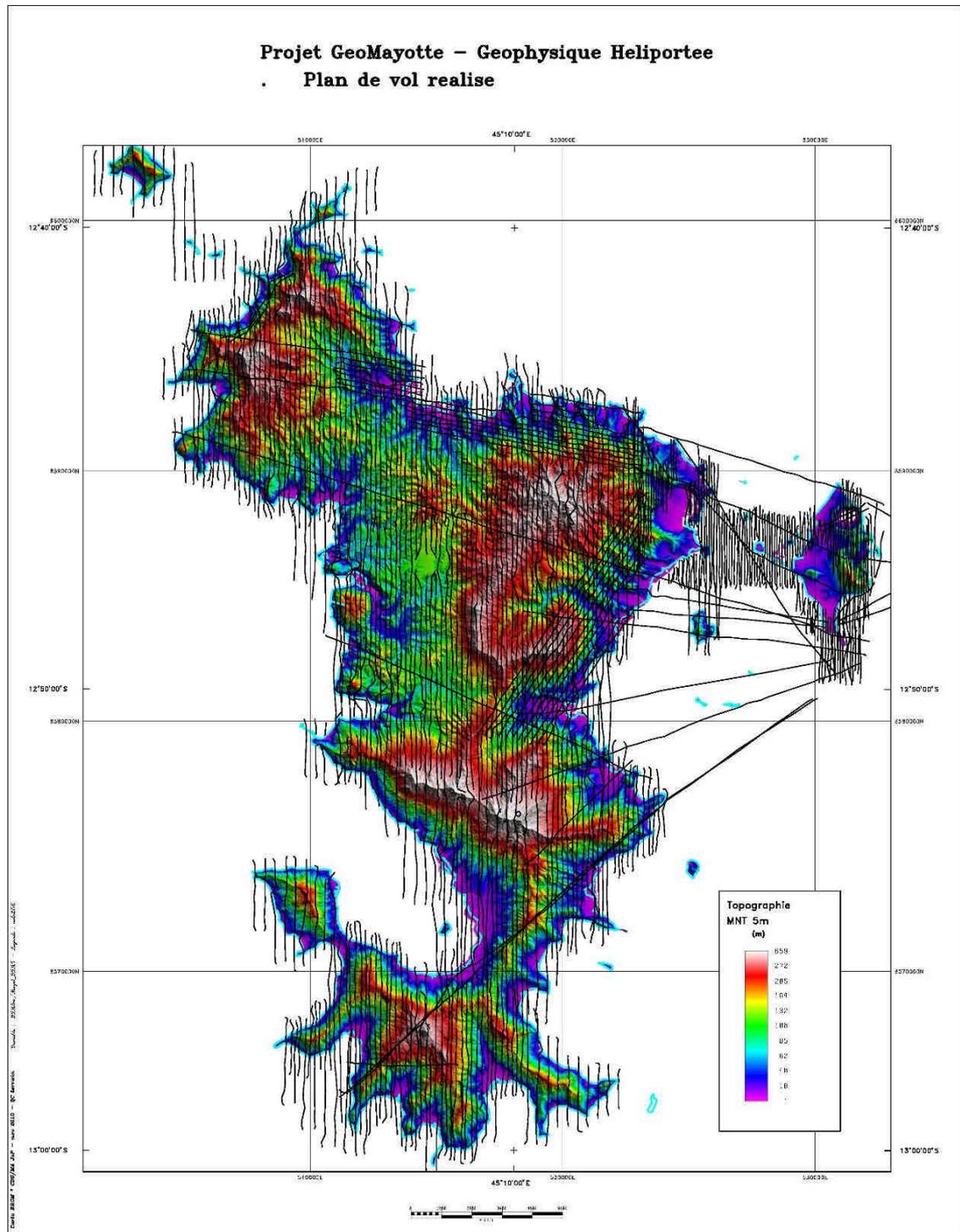




## **Annexe 3**

# **Présentation des données de géophysique aéroportée, méthode TEM (Transect ElectroMagnetic)**





*Illustration 34 : Plan de vol hélicoptéré réalisé : un total de 2 915 km de profils a été parcouru par l'hélicoptère à basse altitude (40 m au-dessus du sol).*

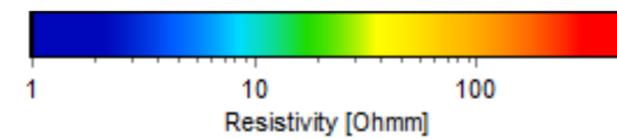
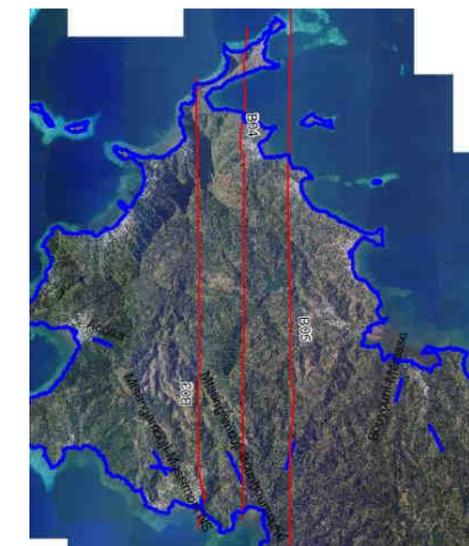
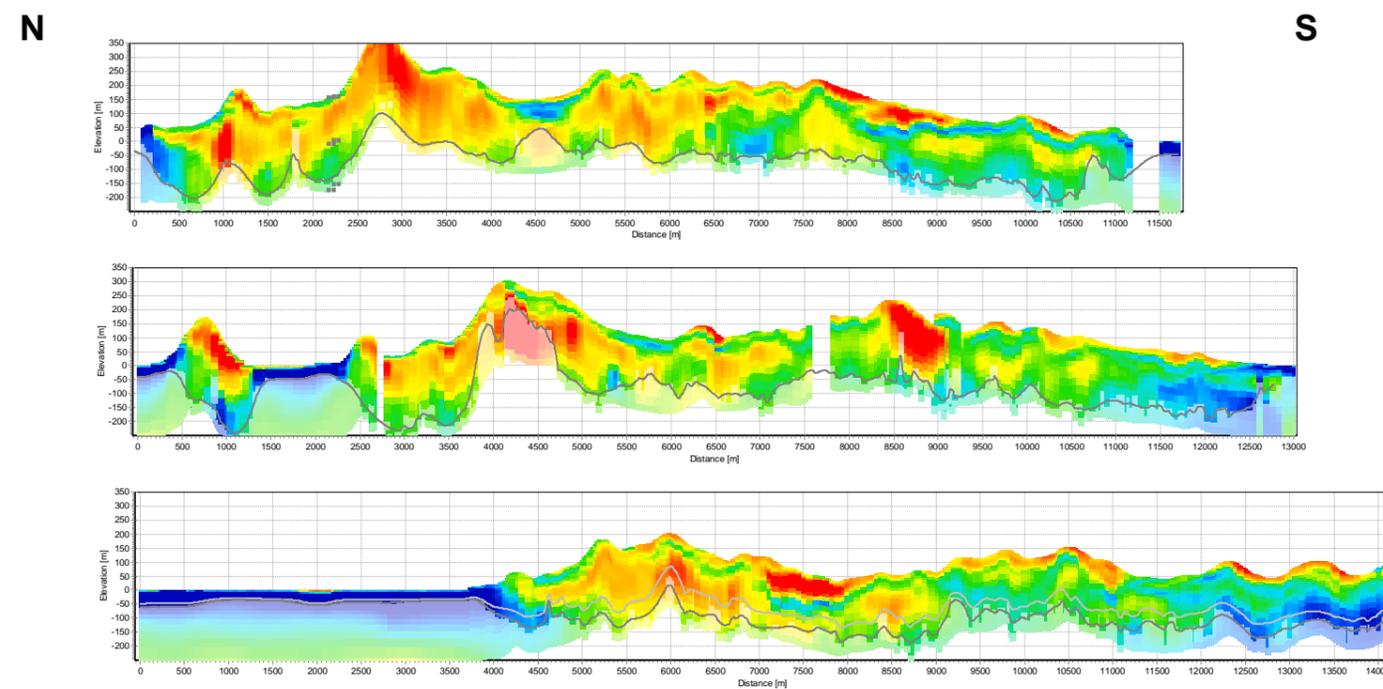
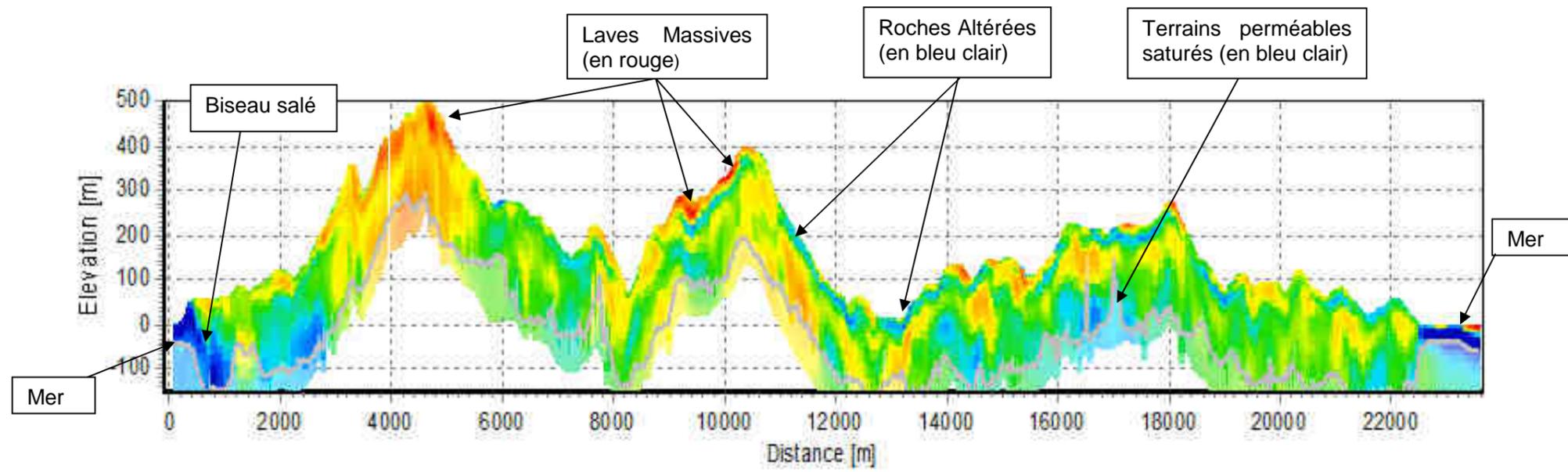


Illustration 35 : exemples de coupes Electromagnétiques sériées du Nord de l'île.



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

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