



HAL
open science

EBAUCHE DU FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE DE L'ÎLE D'ANJOUAN (COMORES)

Arnaud Charmoille

► **To cite this version:**

Arnaud Charmoille. EBAUCHE DU FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE DE L'ÎLE D'ANJOUAN (COMORES). [Rapport Technique] ONG AVSF, ONG Dahari. 2013. hal-01465276

HAL Id: hal-01465276

<https://hal.science/hal-01465276v1>

Submitted on 11 Feb 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Engagement Communautaire
pour le Développement Durable

Komori ya leo na meso



EBAUCHE DU FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE DE L'ÎLE D'ANJOUAN (COMORES) :

*Typologie des ressources en eau disponibles et
discussion sur l'impact de la déforestation*

Arnaud CHARMOILLE*

(*) *Docteur en Hydrogéologie, bénévole pour l'ONG AVSF, arnaud.charmoille@free.fr*



Bristol Conservation
& Science Foundation



A propos du projet ECDD

Le projet ECDD est mis en œuvre par la Bristol Conservation & Science Foundation (une unité opérationnelle de la Bristol, Clifton & West of England Zoological Society Ltd.) en partenariat avec Durrell Wildlife Conservation Trust, Agronomes et Vétérinaires Sans Frontières, le Gouvernement de l'Union des Comores et l'Administration de l'île d'Anjouan.

Le financement extérieur provient, entre autres, du Gouvernement du RU, par l'intermédiaire du Darwin Initiative, l'Agence Française de Développement et le Fonds pour l'Environnement Mondial (à travers le projet PoWPA).

Le projet œuvre avec des consultants de l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature et l'Université de Cranfield.

About the ECDD project

The ECDD project is run by Bristol Conservation & Science Foundation (an operating unit of Bristol, Clifton & West of England Zoological Society Ltd.) in partnership with Durrell Wildlife Conservation Trust, Agronomes et Vétérinaires Sans Frontières, the Government of the Union of the Comoros and the Administration of the Island of Anjouan.

External funding comes from the UK government through the Darwin Initiative scheme, the French Development Agency and the Global Environment Facility (through the PoWPA project) amongst others.

The project works with consultants from the International Union for the Conservation of Nature and Cranfield University.



Sommaire

1. Éléments de contexte : Géographie, climat, géologie	10
A. <i>Contexte géographique et climatique</i>	10
I. Contexte géographique	10
II. Morphologie de l'île d'Anjouan	11
III. Climat	11
B. <i>Géologie de l'île d'Anjouan</i>	14
I. Contexte géologique de formation de l'île d'Anjouan.....	14
II. Géologie, minéralogie et fracturation des roches présentes à l'affleurement.....	16
III. Histoire géologique et évolution volcanique de l'île d'Anjouan	18
IV. Carte géologique de l'île d'Anjouan	22
2. Élaboration d'un schéma de fonctionnement hydrogéologique de l'île d'Anjouan.....	24
A. <i>Les particularités hydrogéologiques des îles volcaniques</i>	24
I. Hétérogénéité des formations volcaniques	24
II. Rappels hydrogéologiques succincts.....	25
III. Typologie des aquifères volcaniques et propriétés hydrauliques	25
IV. Les modèles de fonctionnement proposés	30
B. <i>Investigations hydrochimiques menées sur les eaux souterraines</i>	32
I. Protocole et type de mesures réalisées	32
II. Résultats : les paramètres physico-chimiques.....	33
III. Résultats : la composition chimique de l'eau	35
IV. Interprétations et apport à la compréhension du fonctionnement hydrogéologique de l'île. ..	37
C. <i>Les données hydrauliques disponibles.</i>	45
I. Description	45
II. Premières interprétations	46
D. <i>Schéma de fonctionnement hydrogéologique de l'île d'Anjouan</i>	50
I. L'aquifère principal	50
II. Les aquifère perchés liés aux cônes scoriacés récents.....	51
III. Les presqu'îles, Sima, Niumakele.....	52
IV. Les nappes alluviales côtières	53
V. Les aquifères de coulée de vallée.....	53
3. Discussion de l'impact de la déforestation sur les ressources en eau	55
A. <i>Etat de l'art.....</i>	55
I. Connaissances sur les effets de la déforestation sur la ressource en eau	55
II. Fonctionnement d'une forêt de nuages ou de brouillard	57
B. <i>Cas de l'île d'Anjouan</i>	60
I. Données disponibles	60
II. Impact de la déforestation.....	62
III. Facteur aggravants	64
IV. Sensibilité à la déforestation suivant le type d'aquifère et les différentes régions de l'île	66
4. Ressources en eau des villages d'intervention du projet ECDD	67
A. <i>Nindri.....</i>	67
I. Infrastructures d'alimentation en eau	67
II. Analyse de la ressource en eau.....	67

<i>B. Ouzini et salamani</i>	67
I. Infrastructures d'alimentation en eau	67
II. Analyse de la ressource en eau	68
<i>C. Outsa</i>	68
I. Infrastructures d'alimentation en eau	68
II. Analyse de la ressource en eau	69
<i>D. Adda et sa région</i>	69
I. Infrastructures d'alimentation en eau	69
II. Analyse de la ressource en eau	69
5. Bilan - Proposition d'actions à mettre en œuvre	70
<i>A. Bilan et problèmes identifiés</i>	70
I. Disponibilité de la ressource	70
II. Dimensionnement et entretien des réseaux et installations	70
III. Impact de la déforestation sur la ressource en eau	70
<i>B. Proposition d'actions à mettre en place</i>	71
I. Court et moyen terme : gérer et connaître la ressource	71
II. Long terme : diversifier et restaurer	72
6. Conclusions	73

Liste des figures :

Figure 1 : Situation géographique de l'île d'Anjouan au sein de l'archipel des Comores (Von Straaten, 2002)	10
Figure 2 : Géographie et morphologie de l'île d'Anjouan (Source : Google Map ©)	11
Figure 3 : Répartition de la pluviométrie sur le territoire de l'île d'Anjouan et cartographie de microclimats et du type de végétation liée (Browsers, 1978)	12
Figure 4 : Contexte structural de l'archipel des Comores à l'échelle de la partie sud-ouest de l'océan indien (Debeuf, 2004).	15
Figure 5 : Reconstitution de la structuration de l'archipel des Comores à partir de l'analyse géochimique des laves des différentes îles (D'après Späth et al., 1996).	15
Figure 6 : Directions de fracturation principales de l'archipel de Comores	16
Figure 7 : Les différentes hypothèses sur la structure géologique de l'île. Ces trois hypothèses ont été déduites des travaux des différents auteurs cités.	19
Figure 8 : Exemple très pédagogique de remplissage d'une petite vallée par une coulée volcanique, exemple de Mayotte (Graviou, 2010).	21
Figure 9 : Les quatre phases de formation de l'île d'Anjouan.	22
Figure 10 : Carte géologique de l'île d'Anjouan proposée par Flower en 1973	23
Figure 11 : Carte géologique de l'île d'Anjouan proposée par Nougier en 1986	23
Figure 12 : Exemple du profil type d'une coulée volcanique altérée à proximité de la surface sur l'île de Mayotte (Audru et al., 2010).	24
Figure 13 : Morphologie des coulées du type Pahoehoe et Aa (après Loock, 2008 et Bertrand et al., 2010)	26
Figure 14 : Coupe d'une coulée Aa en mouvement (Lachassagne et Maréchal, 2004)	26
Figure 15 : Exemple de succession de coulées Aa à Hawaii (USGS, 2000)	26
Figure 16 : Bloc diagramme présentant la structure d'une coulée Pahoehoe (Rowland and George, 1990)	27
Figure 17 : Débit d'eau récupéré en surface lors de la foration à travers une coulée de type Aa.	28
Figure 18 : Source émergeant au contact de basaltes fracturés et d'un niveau scoriacé, source de Mabougani, presque île de Sima.	28
Figure 19 : Présentation du modèle hawaïen et canarien par Join et al., 2005 d'après Gringerich and Oki, 2000 et Lachassagne et Maréchal, 2004.	30
Figure 20 : Localisation des points d'eau ayant fait l'objet de mesures physico-chimiques et ayant été prélevés pour analyse chimique	32
Figure 21 : Diagramme de piper présentant le faciès chimique des eaux prélevées sur l'île d'Anjouan.	36
Figure 22 : Diagramme de Piper des eaux de l'île de la réunion (Join et al., 1997)	37
Figure 23 : Graphique bivarié du rapport molaire normalisé des concentrations $[Mg]/[Ca]$ en fonction du rapport molaire normalisé $[Ca]/[Na]$ des eaux prélevées au niveau des captages d'eau alimentant les villages du projet ECDD. Les espaces verts représentent les gammes de variation des compositions représentatives des trois principales sources de minéralisation d'une eau naturelle.	38
Figure 24 : Relation entre la concentration en ions Na^+ en fonction de la conductivité électrique de l'eau.	39
Figure 25 : Évolution de la température des points d'eau avec l'altitude	40
Figure 26 : Évolution de la conductivité électrique de l'eau en fonction de l'altitude	40
Figure 27 : Évolution des concentrations en Na^+ et Cl^- pour les échantillons prélevés sur Anjouan.	42
Figure 28 : Hydrogramme (points jaunes) de la source de Daji et précipitations à Adda (traits bleus), sur la période 2007 à 2012.	46
Figure 29 : Hydrogramme de la source de Daji durant le cycle hydrogéologique 2010-2011.	47
Figure 30 : Modèle conceptuel schématique de fonctionnement de l'aquifère principal avec les exutoires associés	50
Figure 31 : Modèle conceptuel schématique de fonctionnement des aquifères perchés liés à la phase volcanique la plus récente de l'île d'Anjouan.	51
Figure 32 : Modèle conceptuel schématique de fonctionnement hydrogéologique des zones de presque île de l'île d'Anjouan.	52
Figure 33 : Modèle conceptuel schématique de fonctionnement des nappes alluviales côtières de l'île d'Anjouan.	53

Figure 34 : Contexte d'émergence des sources drainant les coulées volcaniques remplissant les vallées.	54
Figure 35 : Evolution du débit de l'Aruana en Amazonie entre les années 70 (avant déforestation) et les années 90 (après déforestation) (Coe et al., 2011).	56
Figure 36 : Relation entre la forêt et le bilan hydrogéologique (Allen et Chapman, 2001)	57
Figure 37 : Illustration de l'influence des caractéristiques géographiques du territoire considéré sur l'altitude de formation de la base des nuages : « Telescoping effect » (Bruijnzeel et Hamilton, 2000).	59
Figure 38 : Evolution de la surface de forêt « naturelle » à Anjouan en 1974, 1985 et 2011 (Astudillo, 2012)	60
Figure 39 : Comparaison du caractère permanent des cours d'eau entre 1955 et 1973 (Astudillo, M. F., 2012)	62
Figure 40 : Impact de la déforestation ou de l'évolution des essences sur le fonctionnement hydrologique et hydrogéologique (Foster, 2001).	64
Figure 41 : Comores, anomalie de la précipitation mensuelle, annuelle, (Mc Sweeney et al., 2006)	65
Figure 42 : Réseau de distribution en eau potable de la presqu'île de Niumakele à partir des sources et cours d'eau de la forêt de Moya à proximité du village d'Adda.	69

Liste destableaux :

Tableau 1 : Concentration en mg.l ⁻¹ des ions analysés à partir des échantillons prélevés.	35
Tableau 2 : Quantification de l'apport d'eau des forêts de nuage dans différents secteurs géographiques du globe, et période principale de cet apport (FAO, 2009).	58

Liste des photos :

Photo 1 : Vallée encaissée de l'île d'Anjouan avec forêt de brouillard et d'interception visible sur les hauteurs	13
Photo 2 : Deux faciès des roches constituant le noyau central de l'île d'Anjouan. A gauche ankaramite à phénocristaux d'augite et à droite océanite à macro-phénocristaux d'olivine.	17
Photo 3 : Sols ferralitiques rouges sur la péninsule de Niumakele	18
Photo 4 : Cirque de Bambao, vue en direction de l'est	20
Photo 5 : Panorama du cône volcanique de Dzialaoutsounga	21
Photo 6 : Dépôts pyroclastiques, Sima, île de la Selle. Les éléments grossiers de couleur sombre sont bien visibles dans la matrice cendreuse marron (affleurement d'échelle métrique).	29
Photo 7 : Mesure des paramètres physico-chimiques du captage de Njambo, village d'Outsa avec la sonde multi paramètres.	33
Photo 8 : Puits maraîcher de la plaine alluviale de Pomoni	34
Photo 9 : Arbre de la forêt de nuages de l'île d'Anjouan, présentant toutes les caractéristiques pour une interception optimale des gouttelettes de Brouillard, Dindi Dzamoe, Outsa	59
Photo 10 : Plantation récente de bananiers dans une zone déforestée extrêmement escarpée	61
Photo 11 : A gauche : Fleur d'Ylang-Ylang ; Au centre : Alambic traditionnel ; A droite : Stock de bois de chauffe au premier plan avec l'alambic à l'arrière plan.	61
Photo 12 : Plantations de girofliers sur la presqu'île de Niumakele	66
Photo 13 : Fuite d'eau (pas perdue pour tout le monde) sur le réseau d'eau d'Outsa	68

Résumé

Depuis 5 ans, le projet ECDD (Engagement Communautaire pour le Développement Durable) est actif sur l'île d'Anjouan, un de ses objectifs est d'arriver à une gestion durable des ressources en eau. En effet sur l'île, entre 1945 et 1990, quarante cinq cours d'eau permanents sont devenus intermittents. L'ensemble de la population de l'île est alimenté par des adductions d'eau de type gravitaire captant les rivières. Cette baisse de leur débit pose donc problème, notamment en saison sèche.

Quelle est la disponibilité réelle de l'eau sur Anjouan, la ressource est-elle suffisante pour subvenir aux besoins de la population ? Quel rôle joue la déforestation, conséquence de la pression imposée par l'augmentation de population, dans la diminution du débit des cours d'eau ? Sur la base de réponses à ces questions, quelles sont les clés d'une meilleure gestion de l'eau à Anjouan ? Ce sont les questions auxquelles l'étude présentée dans ce rapport a tenté de répondre.

Les ressources en eaux souterraines à Anjouan :

Les investigations hydrogéologiques et hydrochimiques réalisées au cours de la mission de terrain d'août 2012 ont permis d'identifier trois types de ressources en eaux souterraines caractéristiques des îles volcaniques comme celle d'Anjouan :

- une nappe d'eau souterraine qui s'écoule dans un aquifère que nous appellerons l'aquifère principal. L'eau chemine, dans le milieu souterrain, des points hauts de l'île vers la mer, dans un milieu géologique très hétérogène constitué par l'empilement des coulées et formations volcaniques accumulées au cours de l'histoire géologique d'Anjouan. Cette nappe d'eaux souterraines est drainée par des sources présentes sur les versants de l'île et alimentent les différents cours d'eau ;
- des nappes d'eau dites perchées qui s'écoulent dans les terrains constitués par les matériaux volcaniques mis en place lors des éruptions les plus récentes, c'est le cas des coulées volcaniques qui remplissent d'anciennes vallées comme dans la vallée de Patsy ou encore les cônes de scories de Outsa ou de Dzialaoutsounga. Il a été mis en évidence que les sources drainant ce type de nappes sont très sensibles aux pollutions et aux activités pratiquées en surface à l'amont ;
- enfin de petites nappes alluviales côtières sont présentes mais leur extension géographique est très réduite. Cependant leur exploitation pour le maraichage a été la seule utilisation d'eau souterraine par l'intermédiaire de puits, observée sur Anjouan.

La forêt à Anjouan:

Une partie de la forêt naturelle d'Anjouan est une forêt de type « forêt de nuage » ou « forêt de brouillard ». Ce type de forêts se forme sur les sommets, les versants et les crêtes des reliefs qui baignent souvent dans le brouillard. Il s'y développe des espèces végétales spécifiques capables de capter les gouttelettes de brouillard. Ce phénomène est fréquemment observé sur les îles de faible surface et au relief important comme c'est le cas sur l'île d'Anjouan. En région tropicale humide, l'apport d'eau supplémentaire produit par les forêts de brouillard augmente généralement de 5 à 20% la quantité d'eau disponible pour l'infiltration. Ce mécanisme ajoute ainsi des centaines de millimètres d'eau par an à l'écosystème et son bassin versant. L'apport d'eau supplémentaire produit par la forêt de

nuage permet de conserver des débits importants à l'étiage durant la saison sèche, l'écosystème développé prévient également les crues en saison humide, deux points qui font actuellement défaut sur l'île d'Anjouan.

Les effets de la déforestation :

A Anjouan la déforestation n'a pas, mis à part dans certains secteurs, complètement fait disparaître le couvert végétal. La forêt de nuage a été transformée en un biotope anthropisé constitué d'espèces introduites par l'homme comme les cocotiers, les girofliers, les bananiers, les fruitiers etc. Cependant même si un couvert végétal existe, ces espèces ne présentent pas de bonnes propriétés d'interception des gouttelettes de brouillard. L'apport d'eau supplémentaire que représentait l'eau en provenance du brouillard intercepté par la végétation n'existe plus.

Bilan sur l'eau et sa gestion à Anjouan :

Les dégradations imposées à la forêt d'Anjouan et qui ont amenées à la disparition de la forêt de nuages et son remplacement par des agroforêts, peuvent si l'on considère les données dont nous disposons, expliquer la diminution des débits des cours d'eau observée depuis les années 1950. Un impact aggravant et concomitant du changement climatique n'est pas à exclure pour expliquer la diminution des débits observés.

Actuellement, toutes choses restant égales par ailleurs, étant donné les faibles surfaces de forêt de nuage persistant sur Anjouan, on peut donc considérer que le débit des cours d'eau est quasi stabilisé. Les observations réalisées au cours de cette étude ont démontré que la ressource en eau est suffisante pour la population d'Anjouan. Ce n'est donc pas la disponibilité de l'eau qui pose problème, mais sa mise à disposition de la population, la qualité des installations de distribution de l'eau et leur gestion devant être améliorées. La plupart des réseaux visités sont sous-dimensionnés par rapport à la demande de la population et leur entretien est souvent défaillant, ce qui limite encore l'efficacité des systèmes existants. Dans le même ordre d'idée, aucun dispositif de mesures n'a pu être observé sur les différents réseaux. Or, la mesure est la base d'une gestion raisonnée de la ressource, c'est un point qu'il faudra développer à l'avenir. Les recommandations fournies au projet ECDD pour assurer la gestion durable des ressources en eau sont donc :

- *la mise en place de suivis des débits des cours d'eau et des sources, tels que ceux réalisés par l'UCEA, en différents points de l'île ;*
- *une amélioration et un entretien accru des infrastructures de captage des sources et cours d'eau. A terme une exploitation des eaux souterraines par l'intermédiaire de forages ou de puits, paraît inéluctable ;*
- *la mise en place de mesures sur les réseaux de distribution d'eau de manière à développer une véritable gestion des ressources en eau ;*
- *un soutien technique et scientifique aux comités d'eau ;*
- *le reboisement de certains bassins versants, en veillant à reconstituer une forêt du type forêt de nuages. Des solutions de captation artificielles des brouillards pourraient également être testées sur certains versants de l'île d'Anjouan.*

Introduction

D'après l'ONU, les Comores sont un des pays les moins développés de la planète. La population de cet archipel a été multipliée par trois entre 1961 et 1994 et le taux de croissance démographique atteint 2,7%¹. A Anjouan, petit territoire de 424 km², l'une des conséquences directes de l'augmentation de la densité de population est l'augmentation conjointe du taux de déforestation qui atteint actuellement 9,3%.an⁻¹ selon la FAO², soit le plus haut taux de déforestation au monde.

Dans ce contexte, le projet ECDD (Engagement Communautaire pour le Développement Durable) tente d'introduire de nouvelles pratiques agricoles de type agro-écologiques. L'objectif de ces méthodes de culture est d'augmenter les rendements agricoles pour améliorer les conditions de vie des populations, tout en préservant les ressources naturelles et notamment la forêt et les espèces qui y sont associées. Cependant, depuis quelques années un élément fondamental commence à faire défaut ... l'eau ! En effet, entre 1945 et 1990, quarante cinq cours d'eau permanents sont devenus intermittents.

Il y a-t-il un lien entre ces différentes évolutions sociétales et environnementales récentes ? Quel rôle joue la déforestation, conséquence de la pression imposée par l'augmentation de population, dans la diminution du débit des cours d'eau ? Ce sont les questions auxquelles cette étude se propose de répondre.

Mais avant de démêler ces liens complexes, il est nécessaire de caractériser les ressources en eaux souterraines de l'île. Ce travail, auquel peu d'auteurs se sont intéressés, nécessite en premier lieu de dresser un schéma de sa structure géologique, qui sera développée dans une première partie et s'appuiera principalement sur des travaux bibliographiques rares et parfois contradictoires. Cependant, ils sont suffisants pour dresser le schéma de fonctionnement hydrogéologique de l'île, que nous ambitionnons de réaliser dans une seconde partie. Ce travail va consister à définir une typologie des ressources en eau disponibles.

Viendra ensuite, dans une troisième partie, la présentation de l'état des connaissances actuelles sur l'impact de la déforestation sur le débit des cours d'eau. Cet état de l'art sera suivi d'une discussion sur l'existence d'un tel phénomène à Anjouan.

Enfin, nous décrirons plus précisément la situation hydrogéologique et hydrologique des villages d'intervention du projet ECDD avant, dans une quatrième et dernière partie, de faire un bilan de cette étude et de proposer des actions à mener dans les mois et années à venir.

¹ Source : Article Démographie des Comores (pays) de Wikipédia en français
[http://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9mographie_des_Comores_\(pays\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9mographie_des_Comores_(pays))

² Organisation des Nations Unis pour l'Alimentation et l'Agriculture

1. Éléments de contexte : Géographie, climat, géologie

A. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET CLIMATIQUE

I. Contexte géographique

L'île d'Anjouan fait partie de l'archipel des Comores qui regroupe quatre îles orientées selon un axe NW-SE entre les longitudes 43° et 45° E. Ces îles sont d'ouest en est : Grande Comores, Mohéli, Anjouan et Mayotte. Cet archipel se situe dans la partie nord du canal du Mozambique (*Montaggioni and Nougier, 1981*) à mi-chemin entre l'Afrique et Madagascar.

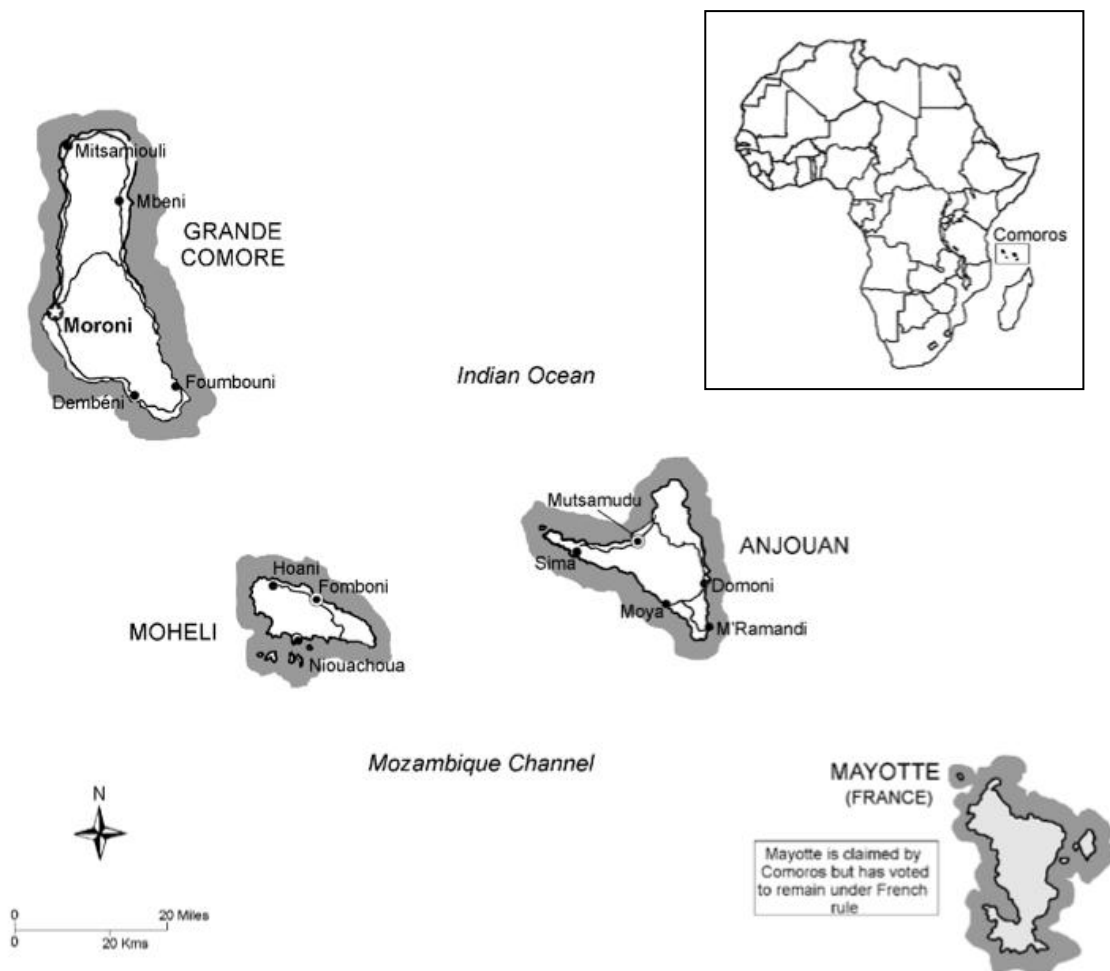


Figure 1 : Situation géographique de l'île d'Anjouan au sein de l'archipel des Comores (Von Straaten, 2002)

D'une superficie de 424 km², l'île d'Anjouan est la plus densément peuplée de l'archipel (600 hab.km⁻²). Les habitants des 97 localités de l'île vivent à 80% de l'agriculture et de la pêche.

II. Morphologie de l'île d'Anjouan

De forme triangulaire, elle est constituée d'un noyau central entouré de trois péninsules : Niumakele au sud, Sima à l'ouest et M'Jimilimé au nord (Figure 2). Le mont N'Tingui, qui atteint 1595 mètres d'altitude, est le point culminant de l'île. Il se situe grossièrement au centre de l'île (Figure 2). La topographie de l'île est très accidentée avec des pentes marquées. Les nombreux cours d'eau, pérennes et temporaires qui parcourent l'île ont creusé des vallées encaissées (Photo 1). Il existe peu de zones topographiquement planes à Anjouan. Quelques plaines alluviales d'extension très réduite existent à l'embouchure des cours d'eaux évoqués précédemment et notamment au niveau des villages de Pomoni, Domoni et Bambao. Les côtes sud et est sont rectilignes. La côte nord présente, quant à elle, une forme concave orientée vers le nord. La morphologie de l'île est marquée par la présence de cirques qui sont d'anciens cônes volcaniques scoriacés³ plus ou moins affectés par l'érosion. Ces restes de cratères sont le lieu de stagnation d'eaux superficielles qui constituent les seules accumulations d'eau de surface, comme les lacs de Dzilandée et Dzialaoutsounga. D'autres sont simplement le siège de zones humides, comme c'est notamment le cas de certains cônes volcaniques à l'amont du village d'Outza et à proximité de Bambao.



Figure 2 : Géographie et morphologie de l'île d'Anjouan (Source : Google Map ©)

III. Climat

a) Généralités

Le climat de l'archipel est de type tropical humide. On distingue deux saisons, la saison des pluies de mi-novembre à mi-avril et la saison sèche de début juin à fin septembre.

³ Edifice volcanique constitué de scories. Les scories sont des éléments de taille variable, riches en vacuoles, de très faible densité, qui se forment lors des éruptions de type explosif par projection de lave plus ou moins fluide, suivie d'un refroidissement à l'air libre.

Durant la saison des pluies, l'archipel est soumis à un régime de mousson du Nord Ouest qui peut être marqué par des épisodes fortement perturbés, liés à la présence de dépressions cycloniques. Durant la saison sèche l'archipel est sous l'influence des Alizés du Sud et du Sud Est.

✓ La saison des pluies

La température moyenne est de 27°C avec des maxima situés entre 31 et 35°C. Les minima fluctuent autour de 23°C. A Anjouan, c'est durant cette période que se produisent 85% des précipitations, soit 1500 mm en bord de mer (station de la ville de Ouani pour la période 1961–1990).

✓ La saison sèche

La saison sèche se distingue de la précédente par des précipitations plus faibles en quantité et en fréquence, ainsi que par des températures minimales beaucoup plus faibles qui fluctuent autour de 18°C, les maxima restant élevés autour de 28°C.

b) Le cas d'Anjouan

A Anjouan, la topographie de l'île et la position des reliefs par rapport aux vents dominants induisent une forte hétérogénéité pluviométrique (Figure 3) de 1500 mm à plus de 2500 mm voir 3000 mm pour les points les plus élevés. Le fort gradient altitudinal de l'île impose également une forte variation thermique. On distingue ainsi de nombreux microclimats qui, sur Anjouan, permettent le développement de biotopes contrastés qui évoluent avec l'altitude (Figure 3).

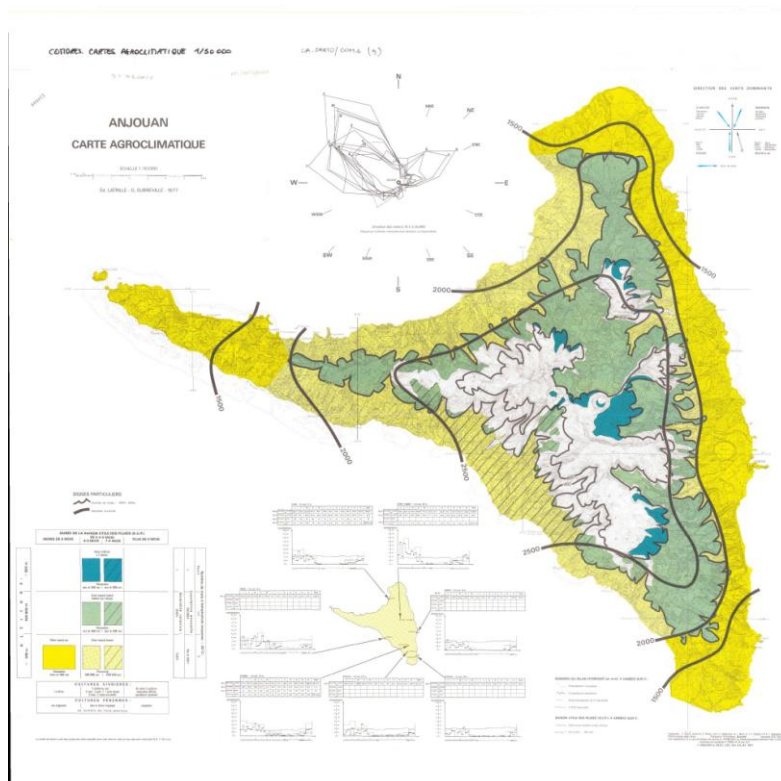


Figure 3 : Répartition de la pluviométrie sur le territoire de l'île d'Anjouan et cartographie de microclimats et du type de végétation liée (Browsers, 1978)

Le caractère montagneux et la proximité de la mer, associés au climat tropical humide, induisent un phénomène particulier appelé « forêt de nuage » ou « forêt de brouillard ». Ainsi, sur les reliefs les plus élevés de l'île, se forme une couverture nuageuse pratiquement permanente même en saison sèche. Cette humidité permanente induit le développement d'espèces végétales particulières qui constituent la forêt de brouillard. D'après *Bruijnzeel et Hamilton (2000)*, en plus des précipitations classiques, ce type de forêt capte et récupère l'humidité des brouillards qui se déplacent horizontalement, ajoutant des centaines de millimètres d'eau par an à l'écosystème et à son bassin versant.



Photo 1 : Vallée encaissée de l'île d'Anjouan avec forêt de brouillard et d'interception visible sur les hauteurs

Nous reviendrons plus en avant dans ce rapport sur le fonctionnement de ce type de forêt et ses interactions avec le cycle hydroclimatique des territoires qu'il occupe

B. GEOLOGIE DE L'ILE D'ANJOUAN

Avant de s'intéresser à ses différentes ressources en eau, qu'il s'agisse d'eaux souterraines ou d'eaux superficielles, il est indispensable de définir un modèle géologique de l'île d'Anjouan. Ce travail s'appuie sur les observations réalisées durant les deux semaines de mission effectuées sur place et surtout sur les travaux d'auteurs ayant étudié la géologie de l'île. Il est important de préciser que les travaux géologiques réalisés sur Anjouan sont rares par rapport à ce que l'on peut trouver à Grande Comore ou encore à Mayotte. Le modèle géologique proposé ici sera donc une base de travail qui gagnera à être améliorée dans le futur. La description géologique qui va suivre a une finalité hydrogéologique, nous ne rentrerons donc pas dans une description rigoureuse des terrains constituant l'île et nous nous attacherons plutôt à leur structuration. Les aspects géologiques auront donc une forme simplifiée et vulgarisée de manière à rendre, autant que possible, leur lecture aisée et accessible aux non géologues. Certaines hypothèses proposées mériteraient dans le futur d'être discutées avec des spécialistes du volcanisme insulaire.

I. Contexte géologique de formation de l'île d'Anjouan

L'archipel des Comores a une origine volcanique. Sa formation a débuté au Miocène (23 à 5 millions d'années) et se poursuit de nos jours. Elle est liée à la présence d'un point chaud au-dessus duquel se déplace d'ouest en est la plaque Africaine. L'île de Mayotte, la plus orientale de l'archipel, est donc la plus ancienne et Grande Comore, la plus occidentale, est la plus récente : c'est d'ailleurs la seule à accueillir encore un volcan actif, le Karthala.

Les autres îles, Mohéli et Anjouan, ont un âge intermédiaire. Ce type de fonctionnement que l'on retrouve dans de nombreux autres contextes de volcanisme archipélagique comme La Réunion et Maurice ou encore Hawaii, les Galápagos, pour ne citer qu'eux, est confirmé par des observations géologiques simples comme la présence d'une barrière de corail à Mayotte alors qu'elle est embryonnaire à Anjouan ou Mohéli, et absente à Grande-Comore⁴. La formation de l'archipel a été principalement contrôlée par des remontées magmatiques le long de fractures de direction régionales affectant le plancher océanique (Figure 4).

⁴Une barrière de corail ne peut s'installer qu'autour d'un édifice volcanique fortement érodé, donc ancien.

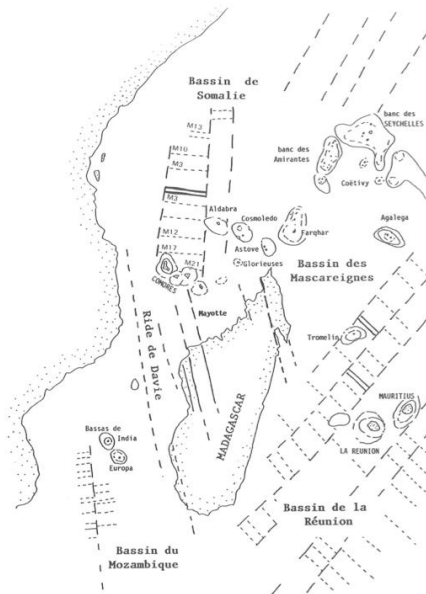


Figure 4 : Contexte structural de l'archipel des Comores à l'échelle de la partie sud-ouest de l'océan indien (Debeuf, 2004).

On trouve dans la littérature des datations géochimiques réalisées à partir d'échantillons de roches volcaniques. Ces analyses ont permis d'approcher les âges de formation de ces différentes îles (Figure 5). Ainsi Mayotte se serait formée entre 15 et 1,4 Ma (Emerick et Duncan, 1982 et 1983; Nougier et al., 1986). Des datations réalisées à Anjouan fournissent des âges entre 1,5 et 0,4 Ma (Esson J., 1970; Flower, 1973) entre 2,8 et 0,62 Ma pour Mohéli tandis que l'île de Grande Comore aurait émergé il y a 0,13 Ma et est toujours en cours de formation (Späth et al., 1996).

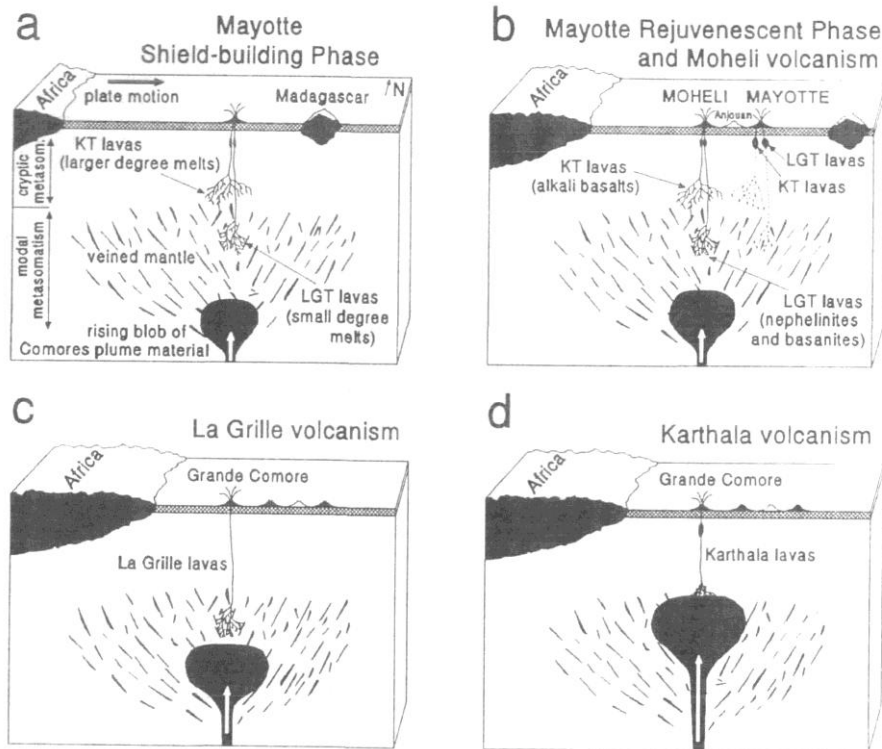


Figure 5 : Reconstitution de la structuration de l'archipel des Comores à partir de l'analyse géochimique des laves des différentes îles (D'après Späth et al., 1996).

II. Géologie, minéralogie et fracturation des roches présentes à l’affleurement

a) Fracturation

La forme triangulaire de l’île et le caractère rectiligne des côtes sud et est (§ A.II) ont pour origine les deux directions de fracturation principales WNW et NNW qui contrôlent sa morphologie (Figure 2 et Figure 6). La côte nord semble être plus composite et liée à deux directions de fracturation associées à une zone de subsidence comme le proposent *Esson et al., (1970)*. En effet, Anjouan est séparée de Grande Comore par un golfe très profond qui peut être à l’origine de cette subsidence. Certaines vallées importantes se sont également développées le long de ces zones de fragilité, comme par exemple la vallée de Patsy (Figure 2).

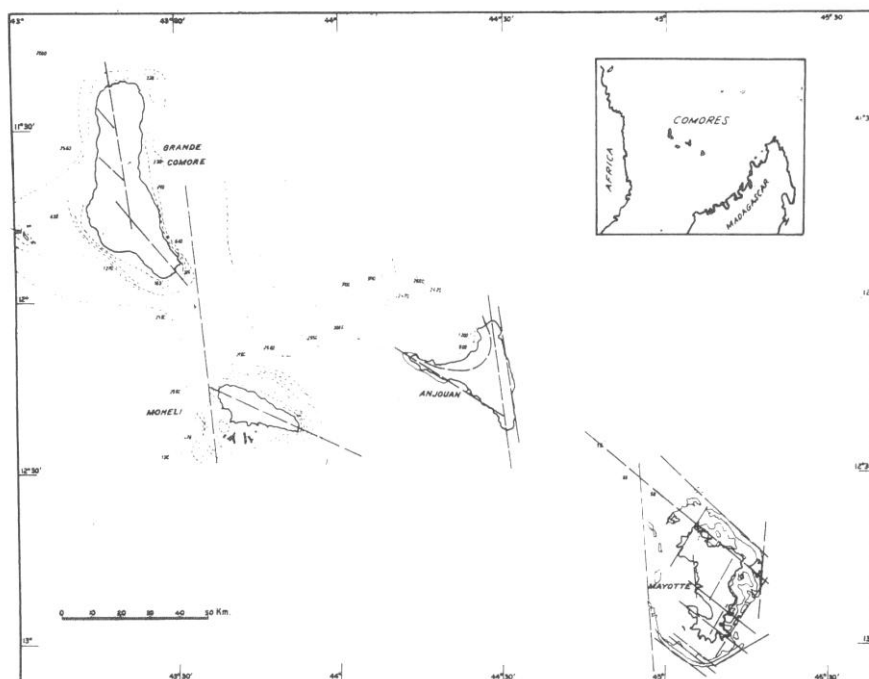


Figure 6 : Directions de fracturation principales de l’archipel de Comores

b) Les différents faciès observables sur l’île

Nous ne ferons pas ici un travail pétrographique rigoureux, c’est à dire que nous ne décrirons pas de manière très détaillée les différentes roches constituant l’île d’Anjouan. Ce qui nous intéresse en premier lieu est la manière dont elles se structurent et s’arrangent entre elles, afin de s’intéresser plus tard à leurs propriétés vis-à-vis des circulations d’eaux.

- **Le bouclier central**

Les roches constituant l’île d’Anjouan sont toutes d’origine volcanique. La partie centrale de l’île, la plus accidentée et qui abrite les crêtes et sommets les plus élevés, est constituée d’une alternance de niveaux basaltiques et scoriacés d’épaisseur très variable. On y trouve principalement les roches volcaniques (Photo 2) suivantes (*Debeuf, 2004*):

- Ankaramite⁵ à Augite ;
- Océanite à mégacristaux d'olivine ;
- Basaltes à olivine et pyroxène ;
- Basaltes à trois minéraux, olivine (1%), pyroxènes (31%) et plagioclases (20%).



Photo 2 : Deux faciès des roches constituant le noyau central de l'île d'Anjouan. A gauche ankaramite à phénocristaux d'augite et à droite océanite à macro-phénocristaux d'olivine.

Une particularité de l'île d'Anjouan, qui la différencie des autres îles de l'archipel des Comores, réside dans la présence, dans certaines zones très localisées, d'enclaves détritiques de grès (*Flower et Strong, 1969 ; Montaggioni et Nougier, 1981*).

Suivant les secteurs considérés du bouclier central, le degré d'altération de ces différentes formations varie fortement. Les alternances de basaltes et de scories constituent une sorte de mille-feuilles, les différentes coulées prises individuellement étant très peu épaisses.

- **Les presqu'îles de Sima et Niumakele**

La presqu'île de M'Jimilimé n'a pas été prospectée lors de notre mission et n'a pas été étudiée dans la littérature. D'après *Marini (1990)*, ces péninsules sont constituées de formations très épaisses d'argiles rouges. Leur caractéristique principale réside dans la présence de produits pyroclastiques⁶. Ces sont des roches volcaniques d'origine explosive, comme des trachytes, qui produisent après altération les sols rouges ferralitiques très caractéristiques (Photo 3) observables en surface (*Marini, 1990*). Ces dépôts sont formés de nombreux éléments de tailles différentes « emballés » dans une matrice constituée de cendres. L'altération de ces roches volcaniques produit des formations argileuses très peu perméables, telles que les argiles rouges très présentes sur les presqu'îles d'Anjouan (*Marini, 1990*). La structure du sous-sol de ces presqu'îles reste cependant assez énigmatique, les théories étant variables suivant les auteurs quant à leur composition et à leur structure.

⁵ Les ankaramites dénomment les basaltes contenant des phénocristaux d'augite (L'augite est un clinopyroxène contenant du calcium)

⁶ Une coulée pyroclastique constitue la base d'une coulée volcanique de type nuée ardente (<http://fr.wikipedia.org/wiki/Caldera>).



Photo 3 : Sols ferrallitiques rouges sur la péninsule de Niumakele

Les épais niveaux argileux présents en surface renferment quelques coulées basaltiques dont la fréquence augmente lorsque l'on se rapproche du niveau de la mer, donc de la base de l'île. Cette caractéristique a pu être observée au niveau de Sima et Niumakele. Les villageois extraient d'ailleurs des pierres de constructions de ces zones d'affleurement en bord de mer. Ces coulées de basalte noir ne sont pas différenciables de celles du centre de l'île. Il est donc possible que les formations du bouclier central affleurent sous les formations des presqu'îles. Une seule coulée d'ankaramite a été observée par *Flower (1973)* au niveau du Village d'Adda-Douani. Un certain nombre d'anciens cônes volcaniques, constitués principalement d'éléments scoriacé plus ou moins altérés, ponctuent ces péninsules.

III. Histoire géologique et évolution volcanique de l'île d'Anjouan

Pavlosky et de St Ours (1953) puis *de St. Ours (1960)* décrivent les premiers la structure géologique de l'île d'Anjouan. Ils y distinguent deux phases qu'ils rapprochent des différentes phases de formation de l'archipel. Les niveaux argileux constituant les péninsules de Niumakele et Sima appartiendraient à la phase dite intermédiaire et les basaltes de la partie centrale, à la phase inférieure. Ainsi, dans la vision de *Pavlosky et de St Ours (1953, 1960)*, les argiles des péninsules se seraient déposées sur le massif central basaltique (Figure 7).

Esson et al., (1970) puis *Flower (1973)* distinguent trois phases volcaniques de formation principales dans la structuration de l'île. Dans leurs travaux, ils ajoutent au schéma précédemment établi une troisième phase, séparée des précédentes par une importante phase d'érosion. Cette dernière phase d'éruptions aurait formé les nombreux restes de cônes volcaniques observables dans la topographie actuelle de l'île et les coulées les plus récentes qui remplissent certaines vallées. Les travaux de *Debeuf en 2004* comparent le processus de formation de l'île à celui de la formation des îles d'Hawaii.

Marini (1990) propose une construction de l'île d'Anjouan en une seule phase et décrit un schéma inverse à celui établi par *Pavlosky et de St Ours (1953,1960)* ainsi que *Flower (1973)* (Figure 7). Ainsi les argiles rouges seraient situées stratigraphiquement en dessous des basaltes constituant le massif central de N'Tingui (Figure 7). Les deux formations appartiendraient à une seule phase de formation, les différences de faciès étant expliquées par l'existence de degrés d'altération différents. *Marini (1990)* met en doute la vision *Pavlosky et de St Ours (1953,1960)* mais ne semble pas avoir eu connaissance des travaux de *Flower (1973)*. L'hypothèse de *Flower (1973)* a été confirmée plus récemment par les travaux de *Nougier et al. (1986)* et *Debeuf (2004)*.

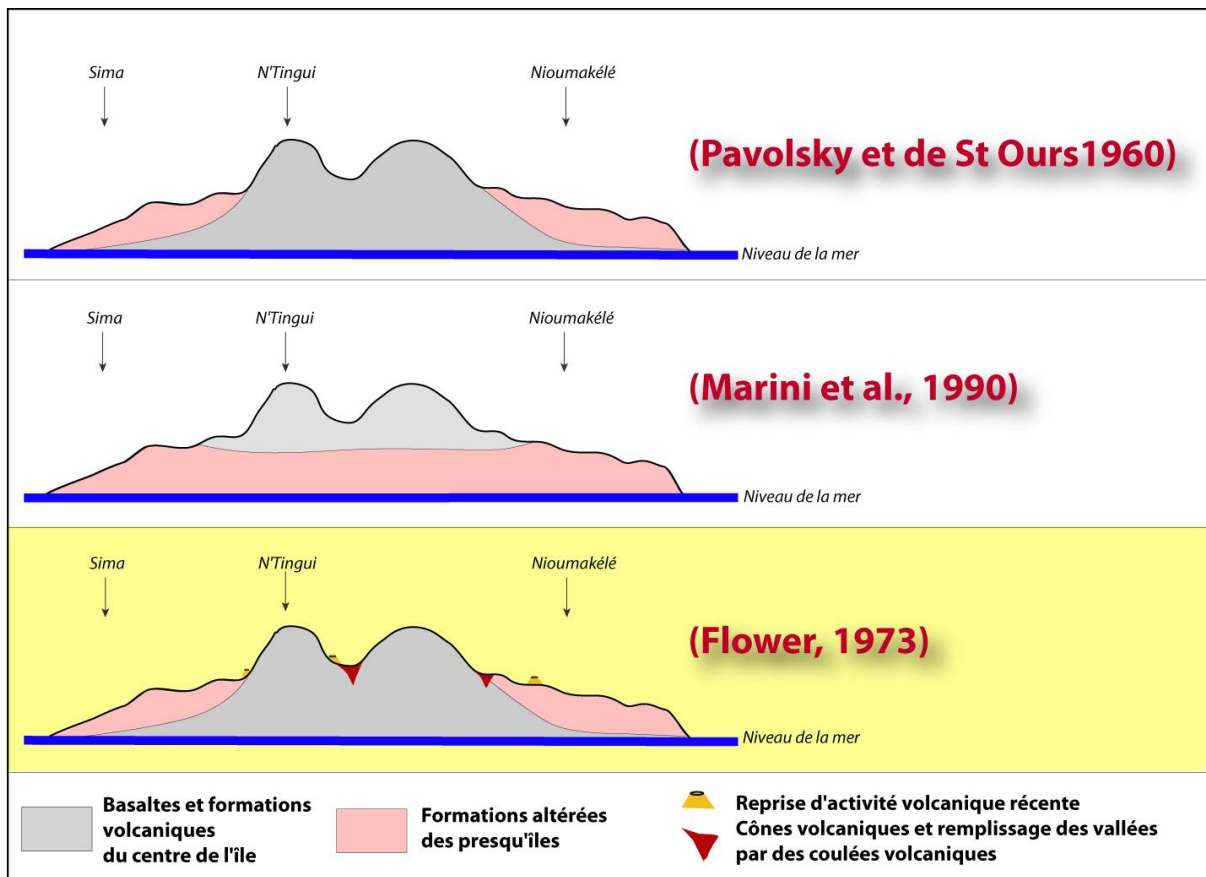


Figure 7 : Les différentes hypothèses sur la structure géologique de l'île. Ces trois hypothèses ont été déduites des travaux des différents auteurs cités.

Les observations réalisées au cours de la mission nous amènent à privilégier le schéma décrit par *Flower (1973)* et repris par des travaux plus récents (Figure 7). Nous allons maintenant présenter plus en détail cette hypothèse de structuration de l'île ainsi que les indices qui nous font privilégier une formation en trois phases.

a) Le bouclier central

Il aurait été formé durant une phase éruptive comparable à l'activité volcanique du massif de la Grille et du Karthala actuellement observables sur Grande Comore (*Esson et al., 1970*). Cette phase a consisté en un épanchement continu de laves basaltiques et d'Ankaramite. L'étude des directions d'écoulement des coulées montre que les différentes phases éruptives de construction de ce noyau ont émané du centre de l'île (*Flower, 1973*). Le cirque actuel de Bambao constituerait cette zone centrale d'émission des produits

volcaniques. La dépression de Bambao constitue un cirque aux versants très abrupts (Photo 4) qui rappelle une structure de type caldeira⁷ qui se serait érodée.



Photo 4 : Cirque de Bambao, vue en direction de l'est

Les roches gréseuses évoquées plus haut et affleurant à la base du cirque de Bambao appuient cette hypothèse. En effet, ces roches seraient des éléments des sédiments recouvrant le plancher océanique. Leur affleurement dans cette zone pourrait s'expliquer par leurs arrachements lors d'éruptions explosives et leur stockage dans la cheminée volcanique. Les effondrements successifs de la caldeira auraient mis à l'affleurement ces roches présentes initialement beaucoup plus en profondeur.

Les travaux les plus récents différencient deux phases, une ancienne et une récente (*Nougier et al., 1986*), dans la mise en place de ce premier édifice volcanique, ceci afin d'expliquer la présence de niveaux très altérés à la base de la formation.

b) Les presqu'îles (Sima et Niumakele)

Les formations affleurant sur les presqu'îles se seraient développées durant une seconde phase éruptive, décrite par *Debeuf, 2004*. Cette fois les produits éruptifs ont été émis le long de fissures. Ces zones de fracturation se sont développées depuis la zone centrale de l'île et selon les directions de fracturation déjà décrites plus haut. La direction et le pendage des coulées indiquent que les zones d'éruption se situent le long des crêtes des différentes péninsules. Niumakale est, d'après *Flower (1973)*, la péninsule la plus récente étant donné son stade d'érosion moins avancé que celui de la péninsule de Sima. Les formations rouges à la surface des presqu'îles sont probablement des argiles résiduelles d'altération en place des formations sous-jacentes.

⁷ Une caldeira, ou caldera, est une vaste dépression circulaire ou elliptique, généralement d'ordre kilométrique, souvent à fond plat, située au cœur de certains grands édifices volcaniques et résultant d'une éruption qui vide la chambre magmatique sous-jacente ; il s'en suit alors un effondrement de la partie supérieure du volcan (<http://fr.wikipedia.org/wiki/Caldera>).

c) Les édifices et coulées volcaniques récentes

La phase précédente a été suivie d'une longue période d'érosion durant laquelle de profondes vallées se sont creusées, formant un relief très escarpé comparable à celui observable aujourd'hui. La phase d'éruption tardive n'a pas fondamentalement modifié la structure générale de l'île. Les coulées volcaniques sont venues remplir les vallées creusées par l'érosion se déposant en discordance sur les terrains et les formations déjà présentes et notamment les produits d'érosion-sédimentation tels que les zones alluvionnaires (*Flower, 1973*) (Figure 8). Ces coulées ont pour origine un certain nombre de cônes volcaniques qui ponctuent la surface de l'île (Photo 5). Les cirques volcaniques de petite taille, les plus proches de la côte, notamment sur la côte nord et est, sont la trace d'éruptions phréato-magmatiques (*Flower, 1973*). L'intensité de ce type d'éruptions est augmentée par l'entrée en contact du magma avec des nappes d'eau de surface, eaux souterraines ou eaux superficielles. *Flower (1973)* remarque que les restes d'édifices volcaniques récents s'alignent selon les principales directions de fracturation. Ces édifices volcaniques, qui datent de quelques milliers d'années, marqueraient la fin de l'activité volcanique sur Anjouan (*Debeuf, 2004*).



Figure 8 : Exemple très pédagogique de remplissage d'une petite vallée par une coulée volcanique, exemple de Mayotte (Graviou, 2010).

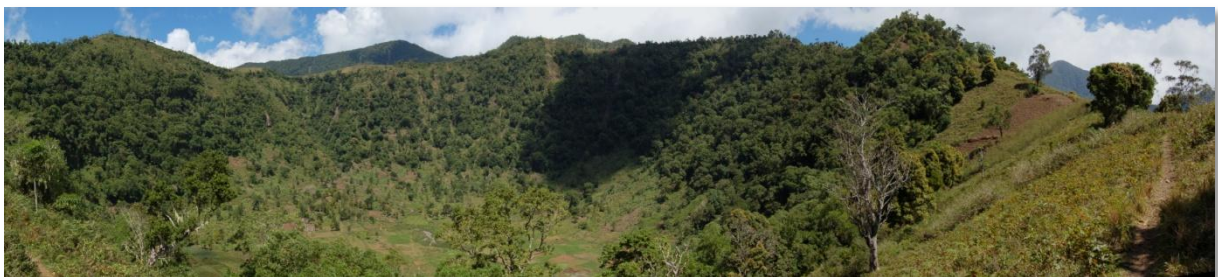


Photo 5 : Panorama du cône volcanique de Dzialaoutsounga

d) Tentative de reconstitution de l'histoire géologique de l'île d'Anjouan

Les différentes phases de structuration de l'île ont été représentées en Figure 9. L'hypothèse proposée ici s'appuie principalement sur les travaux évoqués plus haut et sur les observations géologiques faites sur le terrain.

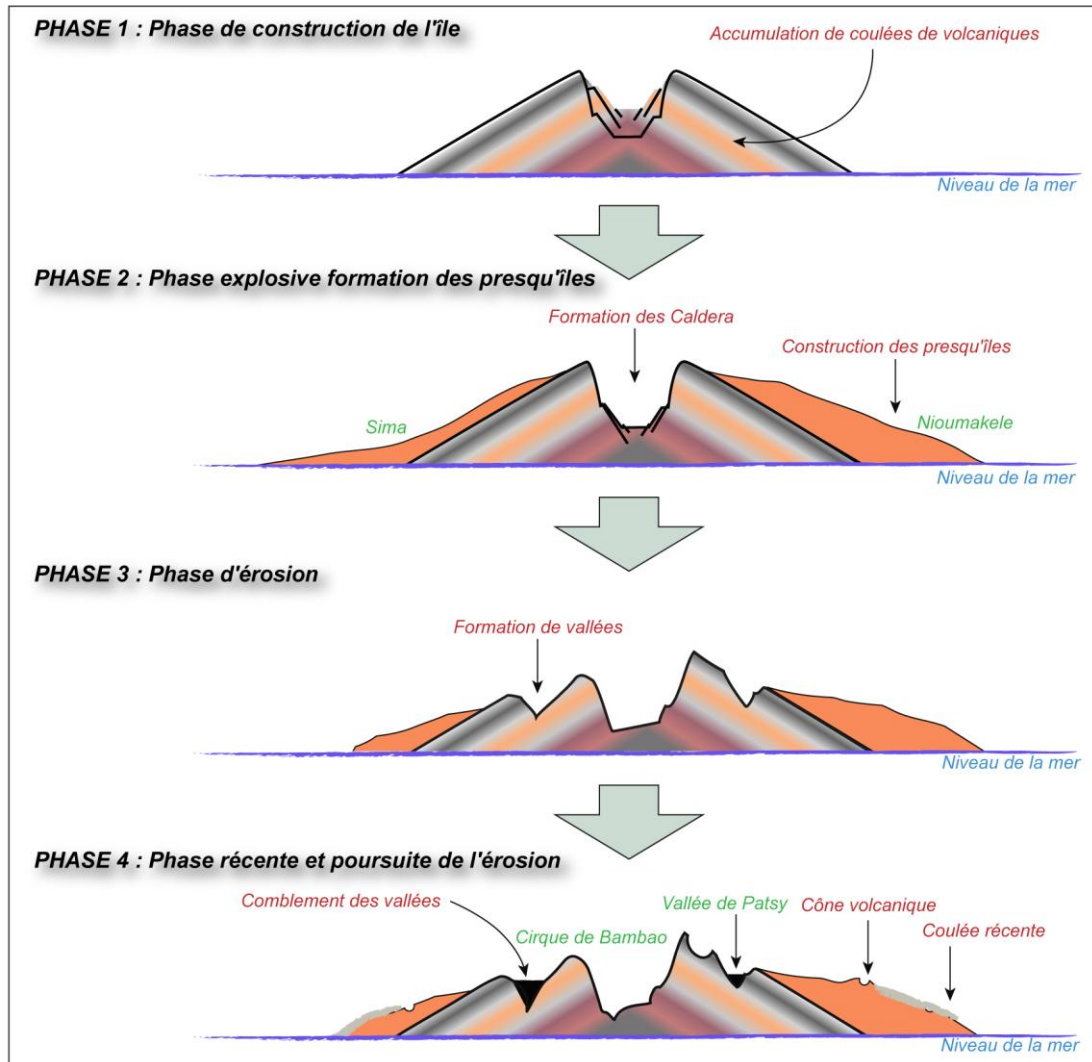


Figure 9 : Les quatre phases de formation de l'île d'Anjouan.

IV. Carte géologique de l'île d'Anjouan

Flower (1973) puis Nougier (1986) ont proposé une carte géologique sommaire de l'île qui replace les différentes formations associées par rapport aux phases de dépôts décrites plus haut. Ces deux cartes sont présentées en Figure 10 et Figure 11.

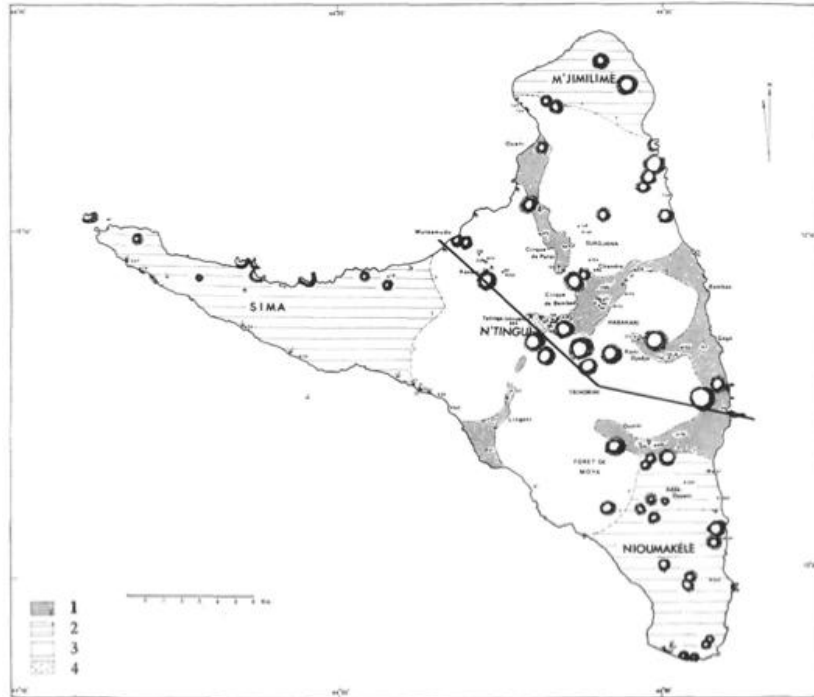


FIG. 2 - Geological map of Anjouan, Comores Archipelago.
 Line of section in Fig. 4 shown.
 1 = Rejuvenescent phase
 2 = Fissure-erupted phase
 3 = Shield-building phase
 4 = Tatinga Intrusion.

Figure 10 : Carte géologique de l'île d'Anjouan proposée par Flower en 1973

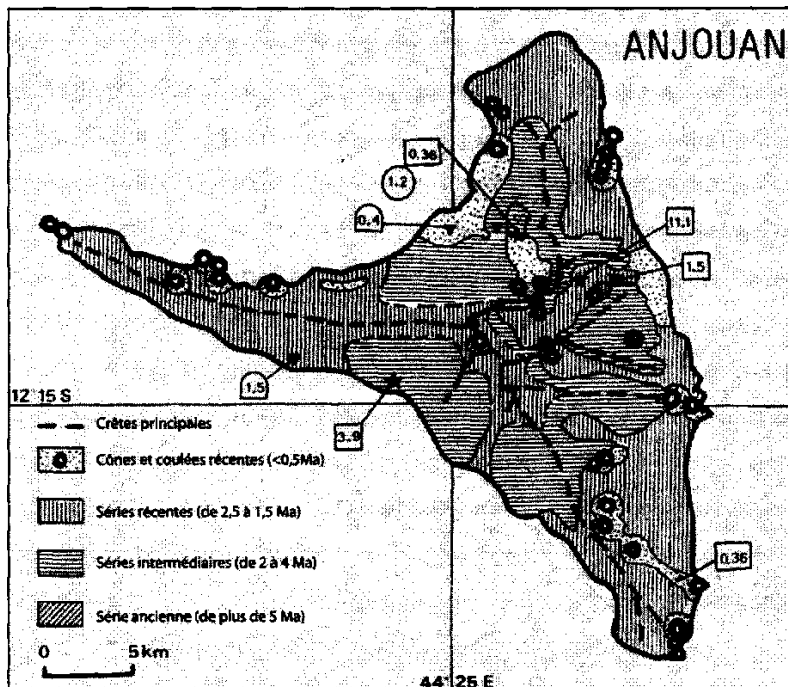


Figure 11 : Carte géologique de l'île d'Anjouan proposée par Nougier en 1986

En 2004, une carte plus récente a été réalisée par B. Robineau du laboratoire de géosciences de la Réunion mais nous n'avons malheureusement pas eu accès à cette carte.

2. Élaboration d'un schéma de fonctionnement hydrogéologique de l'île d'Anjouan

A. LES PARTICULARITES HYDROGEOLOGIQUES DES ILES VOLCANIQUES

I. Hétérogénéité des formations volcaniques

Une des caractéristiques des îles volcaniques réside dans l'importante hétérogénéité des formations constituant le sous-sol. Cette hétérogénéité, autant verticale qu'horizontale, que l'on retrouve à toutes les échelles spatiales, est liée aux modes de dépôts des roches volcaniques et à la variété des matériaux mis en place. Elle s'étend de l'échelle lithologique jusqu'à l'échelle cartographique en passant par les variations importantes observables à l'échelle d'une même formation.

La partie centrale de l'île d'Anjouan illustre bien ce caractère hétérogène avec un empilement de coulées d'épaisseur variable allant de l'échelle métrique à décamétrique et de nature très différente : scories, basaltes de différentes natures, cendres, etc. Au cours du temps, l'altération vient encore augmenter cette hétérogénéité. La Figure 12 schématise, en coupe, une coulée type de l'île de Mayotte et illustre la très grande variabilité des faciès présents à l'échelle d'une même coulée volcanique touchée par l'altération.

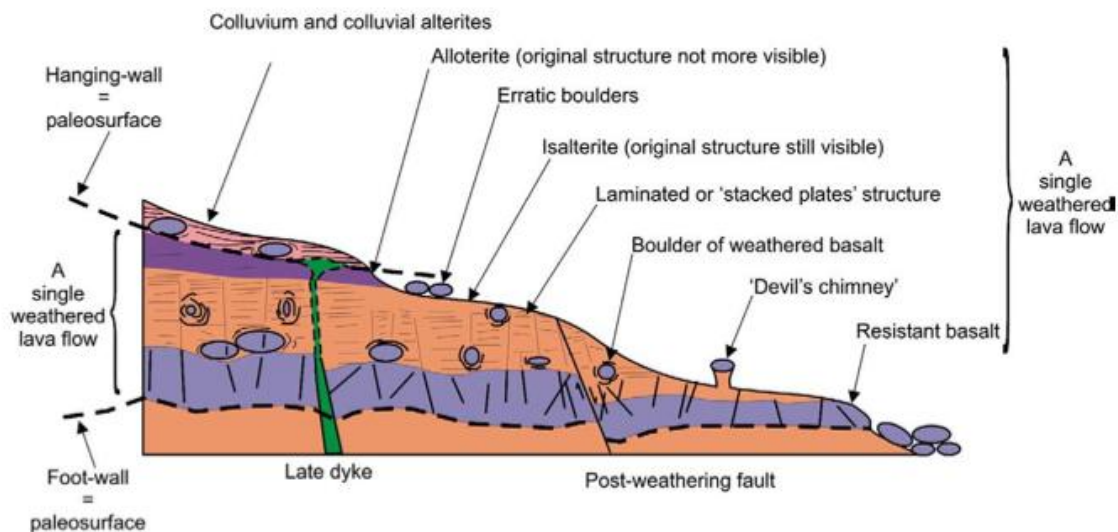


Figure 12 : Exemple du profil type d'une coulée volcanique altérée à proximité de la surface sur l'île de Mayotte (Audru et al., 2010).

Cette hétérogénéité a un impact très important sur les propriétés hydrauliques de ces dépôts. Cette caractéristique, autant spatiale que fonctionnelle, rend donc le travail de l'hydrogéologue très ardu. En effet, dans ce type de contexte il n'est pas possible, comme dans des contextes sédimentaires, d'extrapoler la position géographique d'une formation géologique en profondeur ou dans un autre secteur de l'île. Seule une cartographie détaillée de l'arrangement des coulées permet de connaître l'extension géographique et verticale des différents aquifères. L'absence de forages permettant de connaître la répartition verticale des

terrains en profondeur, comme c'est le cas sur l'île d'Anjouan, ajoute à la difficulté du travail. Seules les géométries des aquifères les plus superficiels sont en partie accessibles.

II. Rappels hydrogéologiques succincts

La perméabilité d'une roche correspond à sa capacité à laisser circuler l'eau, lorsqu'elle est soumise à un gradient de pression. La perméabilité découle de la porosité du matériau, paramètre qui représente la somme des interstices de la roche pouvant contenir du gaz ou de l'eau. La porosité qui va le plus influencer sur la perméabilité de la roche correspond à celle des pores ou interstices qui vont être connectés entre eux de manière continue et permettre au fluide de circuler. La perméabilité d'une roche va donc être intimement liée aux caractéristiques de sa porosité : taille des pores, degré de connexion entre eux, remplissage des interstices par des matériaux étrangers. On distingue deux grands types de porosité (et donc de perméabilité) dont la nature va dépendre de la genèse des vides.

a) Porosité d'interstices

Elle est liée aux vides constitués par l'espace inter-granulaire, c'est-à-dire présent entre les grains constituant la roche. On retrouve ce type de perméabilité dans les roches constituées de galets, graviers, sables ou encore les scories volcaniques, etc. Les roches concernées sont la plupart du temps constituées d'éléments granulaires.

b) Porosité de fissure

Les différentes contraintes qui agissent sur les roches constituant la croûte terrestre (contraintes tectoniques, thermiques, etc.) induisent la création de nombreuses fissures et fractures. Ce sont ces espaces qui constituent la porosité dite de fissure.

Dans les deux cas, l'espace vide peut être rempli par d'autres matériaux qui vont entraver la circulation du fluide.

Il est également important de noter que les deux types de porosité qui viennent d'être décrits peuvent affecter un même matériau. On parlera alors de milieu à double perméabilité. Enfin, suivant le mode de circulation majoritaire de l'eau au sein d'un même aquifère, on parlera alors respectivement d'aquifère à porosité d'interstices ou d'aquifères à porosité de fissures.

III. Typologie des aquifères volcaniques et propriétés hydrauliques

Le mode de dépôt des formations volcaniques et le type de matériaux qui les constituent ont une influence directe sur leur fonctionnement futur ; en tant que vecteur des eaux souterraines.

Dewandel (2010) considère que les potentialités en eaux souterraines des îles volcaniques de type basaltique *présentent une corrélation négative avec l'âge des formations qui les composent, les plus récentes présentant de bien meilleures capacités que celles qui ont été longuement affectées par l'altération*. Bien que cette affirmation soit à relativiser suivant les formations considérées, elle montre bien l'influence des mécanismes d'altération sur les formations d'origine volcanique. Dans le même ordre d'idée, *Debeuf (2004)* fait remarquer que le climat de type tropical humide qui sévit à Mayotte altère énormément les formations volcaniques en les transformant en latérite, formations que l'on retrouve sur les presqu'îles

d'Anjouan.

a) Les coulées volcaniques

Elles constituent le principal vecteur des eaux souterraines. Deux configurations hydrogéologiques existent, comme le présente *Bertrand et al. (2010)*, qui correspondent à la classification faite pour décrire les coulées volcaniques sur l'île d'Hawaï. On distingue d'un point de vue morphologique les coulées de type « Aa » et celles de type « Pahoehoe » (Figure 13).

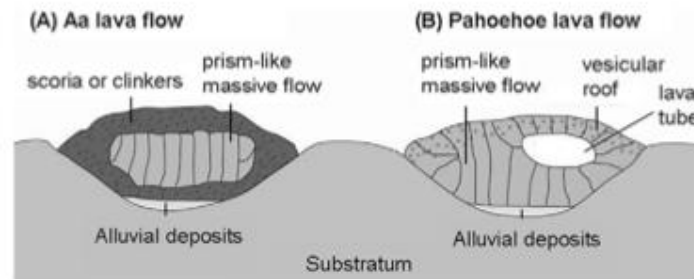


Figure 13 : Morphologie des coulées du type Pahoehoe et Aa (après *Loock, 2008* et *Bertrand et al., 2010*)

Les coulées de type Aa sont visqueuses et se déplacent lentement et lourdement (*Bertrand et al., 2010*). Durant leur déplacement, une accumulation de cratons siliceux et de boules de lave se forme à leur base et en surface, ce qui leur confère un aspect irrégulier et rugueux (Figure 14 et Figure 15).

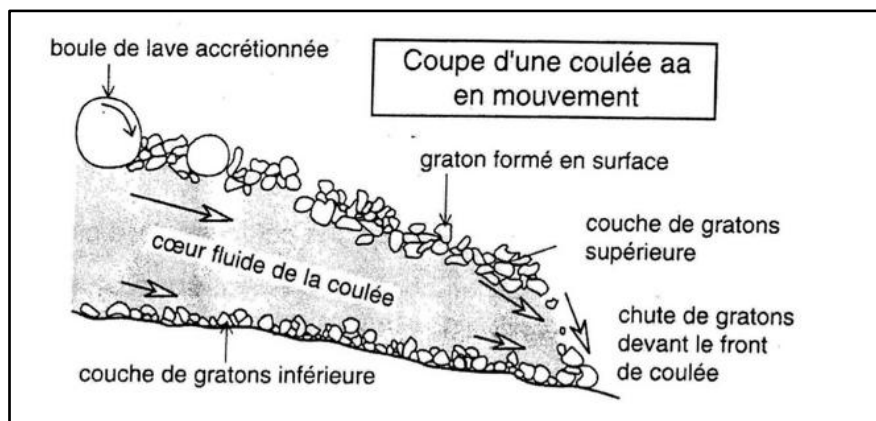


Figure 14 : Coupe d'une coulée Aa en mouvement (*Lachassagne et Maréchal, 2004*)



Figure 15 : Exemple de succession de coulées Aa à Hawaii (*USGS, 2000*)

Les coulées de type Pahoehoe sont fluides et s'accumulent en une superposition de diverticules qui présentent une surface lisse et parfois « organique ». Le caractère très fluide de ces laves induit la formation de cavités au sein de la coulée par refroidissement de la partie externe des laves et formation d'un tunnel ou la lave fluide encore chaude peut circuler plus longtemps (donc plus loin) sans se refroidir et se figer (Figure 16).

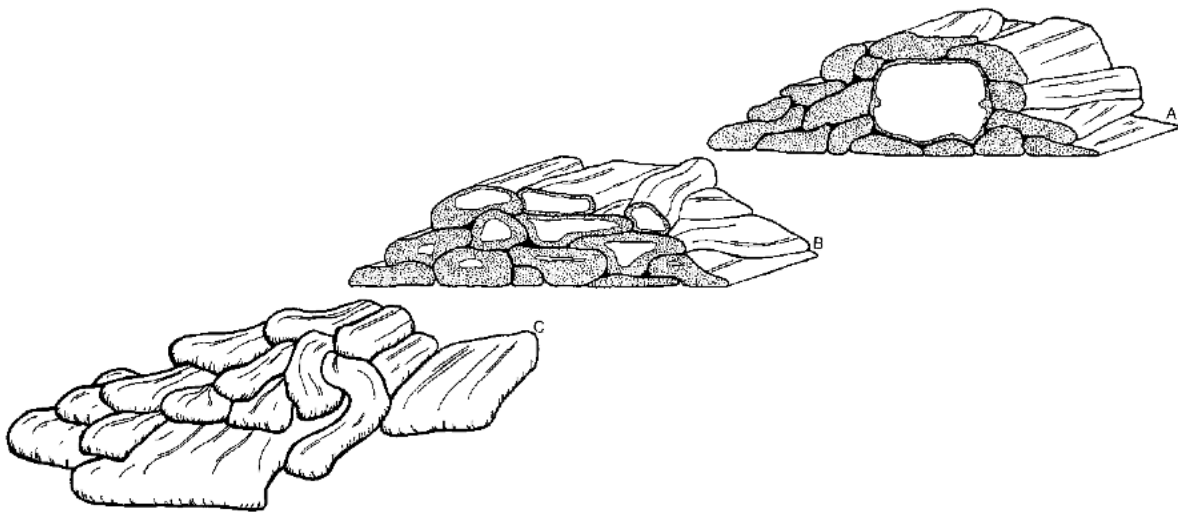


Figure 16 : Bloc diagramme présentant la structure d'une coulée Pahoehoe (Rowland and George, 1990)

Du point de vue de la structure interne, les coulées Aa correspondent à des structures massives fracturées plus ou moins mélangées avec des dépôts scoriacés qui entourent la formation basaltique massive (Figure 13). Le cœur de la formation est souvent caractérisé par des orgues basaltiques qui se forment lors du refroidissement de la coulée. Ce type de formation est réputé pour intercepter de manière efficace les eaux de pluie (Bertrand et al., 2010).

Les coulées Pahoehoe plus massives et moins fracturées sont réputées avoir, d'une manière générale, des propriétés hydrauliques moins bonnes. La base de la coulée, située au contact de produits d'érosion antérieurs, par exemple un dépôt alluvionnaire (Figure 13), peut constituer des ressources en eau non négligeables. Les conduits formés lors du dépôt peuvent également, dans certains cas, jouer le rôle d'un véritable drain, comparable à ce que l'on peut observer dans les milieux calcaires karstifiés.

Certaines mesures réalisées sur l'île de Mayotte montrent que le cœur des coulées de type Aa peut être très imperméable si il n'est pas fracturé. Au contraire certains cœurs de coulée se révèlent très productifs. Lachassagne et Maréchal en 2004 mettent en évidence que, lors de la réalisation de forages, la quasi totalité du débit provient d'une zone fracturée de 2 mètres d'épaisseur au sein de la coulée (Figure 17).

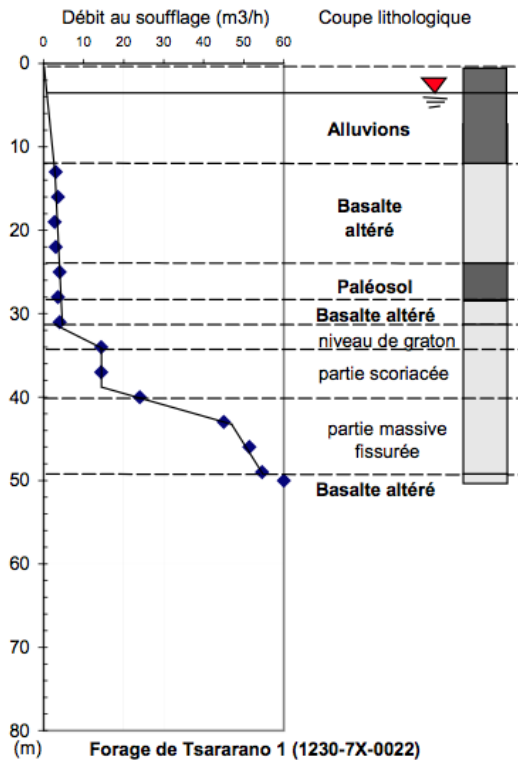


Figure 17 : Débit d'eau récupéré en surface lors de la foration à travers une coulée de type Aa.

Les coulées Aa montrent de bonnes propriétés aquifères à Mayotte et Hawaii (Figure 15 et Figure 16). On retrouve la même configuration sur l'île d'Anjouan comme le montre la Figure 18 qui illustre la présence de ce type de formation sur l'île et le contexte d'émergence de la source de Mabougani sur la presqu'île de Sima à Anjouan.



Figure 18 : Source émergeant au contact de basaltes fracturés et d'un niveau scoriacé, source de Mabougani , presqu'île de Sima.

Certains auteurs soulignent l'anisotropie importante des coulées volcaniques suivant que l'on considère la perméabilité selon un axe horizontal ou vertical. Le rapport entre ces deux

perméabilités peut aller de 20 à 50. Cette caractéristique a des conséquences importantes sur le fonctionnement hydrogéologique général des îles volcaniques.

b) Dépôts pyroclastiques

Les éruptions de type nuée ardente, produisent le plus souvent des dépôts non classés du point de vue de la granulométrie (Photo 6). Au sein de ces dépôts, se mélangent des blocs anguleux pluri-décimétriques avec des dépôts de granulométrie beaucoup plus fine. Cet arrangement granulométrique leur confère le plus souvent une bonne porosité et des propriétés hydrauliques intéressantes. Cependant, ces types de dépôts sont très sensibles à l'altération et les cendres qui les constituent, lorsqu'elles sont altérées, ont tendance à imperméabiliser la formation.



Photo 6 : Dépôts pyroclastiques, Sima, île de la Selle. Les éléments grossiers de couleur sombre sont bien visibles dans la matrice cendreuse marron (affleurement d'échelle métrique).

c) En résumé

Suivant le type de formation considérée, les aquifères présents sur les îles volcaniques peuvent présenter soit une perméabilité d'interstices soit une perméabilité de fissure :

- La première s'exprime dans les niveaux scoriacés (cônes ou dépôts présents à la base ou au sommet des coulées etc.) dans les dépôts pyroclastiques lorsque l'altération ne les a pas rendu imperméables, dans les dépôts alluvionnaires remaniés ou non, ou encore à la base des coulées dans les paléo-vallées.
- La seconde s'exprime dans les coulées basaltiques. La fissuration est le plus souvent liée aux fissures apparues lors du refroidissement à l'origine de la formation des orgues basaltiques. Ce type de perméabilité affecte également les coulées plus visqueuses formant, par exemple, des niveaux de phonolites où la fissuration impose un débit de la roche en plaquettes.

Il est important de noter que les formations volcaniques de type dyke⁸ peuvent influencer la circulation de l'eau, formant des barrages souterrains horizontaux et verticaux, ce qui favorise l'accumulation d'eaux souterraines. Dans certains cas, ils peuvent aussi jouer le rôle de drain, lorsqu'ils sont fissurés.

IV. Les modèles de fonctionnement proposés

En conséquence de l'hétérogénéité des formations volcaniques, leurs modalités de fonctionnement hydrogéologique sont très variables d'un type de formation volcanique et d'un contexte à un autre (Lachassagne et Maréchal, 2004). Une bonne compréhension de ce type de formation passe par la réalisation de forages qui, couplés à la carte géologique, permettent d'obtenir une image tridimensionnelle de l'extension des formations et de leurs propriétés hydrodynamiques. Les îles volcaniques sont constituées de produits volcaniques émis le plus souvent d'un même volcan, notamment dans le cas des points chauds. Elles sont donc affectées d'une complexité importante. Pour décrire leurs fonctionnements hydrogéologiques, les auteurs utilisent deux modèles conceptuels, le modèle dit Canarien et le modèle Hawaïen (Figure 19).

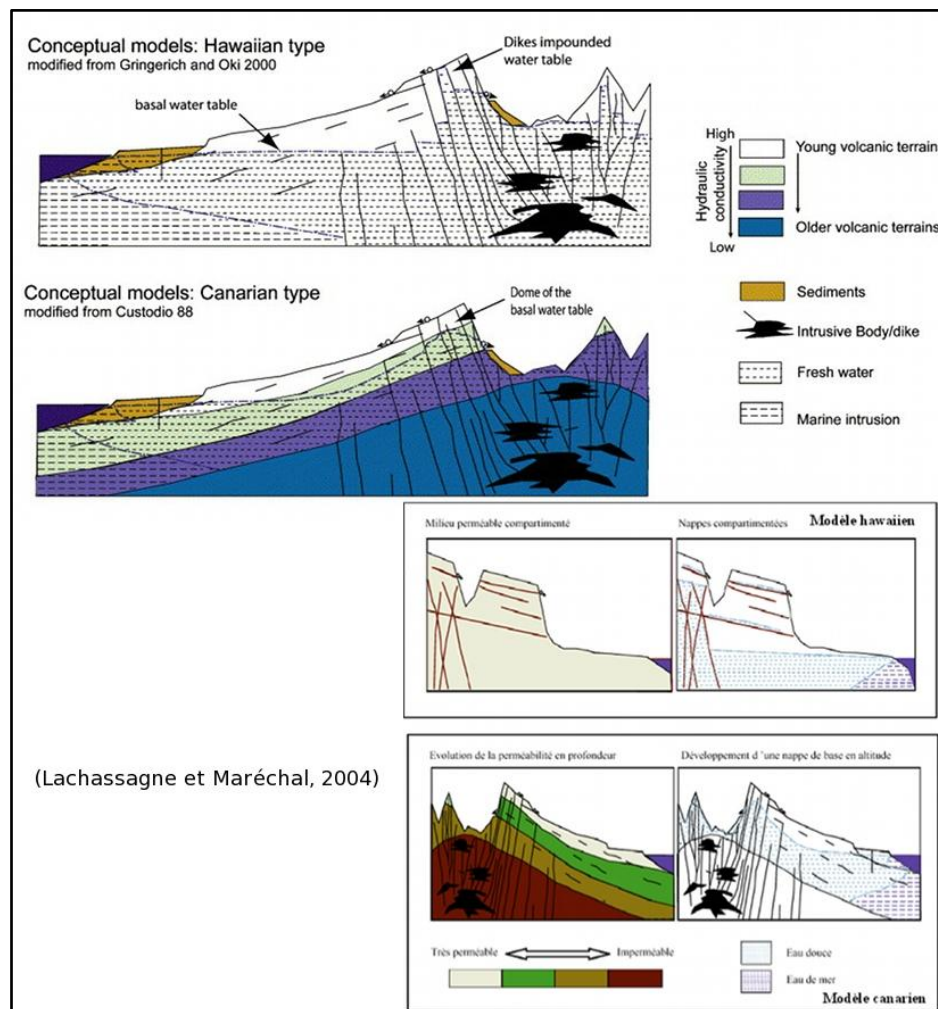


Figure 19 : Présentation du modèle hawaïen et canarien par Join et al., 2005 d'après Gringerich and Oki, 2000 et Lachassagne et Maréchal, 2004.

⁸ Un dyke est un filon de roche magmatique qui recoupe les autres roches qu'il traverse du fait de son infiltration dans une fissure de l'encaissant.

Le modèle canarien (Figure 19) décrit un système avec un aquifère unique continu qui s'étend du sommet de l'île jusqu'à la zone côtière, le gradient hydraulique étant important, l'interface eau douce/eau salée au niveau du biseau⁹ salé est profonde du fait de la charge importante de l'eau douce. Dans ce type de système, les émergences sont rares et plutôt localisées en zone littorale. Cette structuration hydrogéologique est le résultat d'une perméabilité qui diminue avec la profondeur et l'altitude.

Le modèle hawaïen (Figure 19) quant à lui est beaucoup plus hétérogène et compartimenté, ce qui est lié à une accumulation verticale de niveaux perméables et imperméables, ces derniers s'opposant localement au transit vertical de l'eau. On y distingue un aquifère de base qui, du fait de la forte perméabilité des formations, s'écoule principalement en profondeur et est alimenté par la zone centrale de l'île. Les émergences de cet aquifère très discontinu se localisent en zone côtière et, du fait du très faible gradient hydraulique, l'influence du biseau salé est plus marquée. Localement, certains niveaux imperméables peuvent drainer l'eau de cet aquifère vers la surface à des altitudes élevées formant des sources pérennes. Enfin, s'ajoute à cet aquifère principal une multitude d'aquifères perchés de taille beaucoup plus réduite qui forment des émergences au débit plus irrégulier. Ces aquifères sont le résultat de la forte variabilité verticale de la perméabilité induite par l'accumulation de niveaux perméables et peu perméables d'épaisseur variable.

Ces deux modèles présentent des cas types et extrêmes de fonctionnements bien différenciés. Il est probable que certaines îles volcaniques puissent avoir un fonctionnement intermédiaire ou composite suivant les secteurs de l'île concernée. Par exemple *Lachassagne et al., 2004* montrent que l'île de Mayotte possède un fonctionnement différent, associant certaines caractéristiques de ces deux modèles.

⁹ Partie d'un aquifère côtier envahi par l'eau de mer, zone comprise entre la base de l'aquifère et une interface eau douce / eau salée pentée vers l'intérieur des terres du fait de la densité plus élevée de l'eau de mer

B. INVESTIGATIONS HYDROCHIMIQUES MENEES SUR LES EAUX SOUTERRAINES

I. Protocole et type de mesures réalisées

Durant la mission de terrain d'août 2012, un certain nombre de mesures ont été réalisées *in situ*, du 07/08/2012 au 16/08/2012 (Figure 20). Pour chaque point d'eau visité (37 au total), il a été pris une mesure de la température, de la conductivité électrique de l'eau et du pH. Ces mesures ont été faites avec une sonde multi-paramètres YSI professionnel plus (Photo 7).

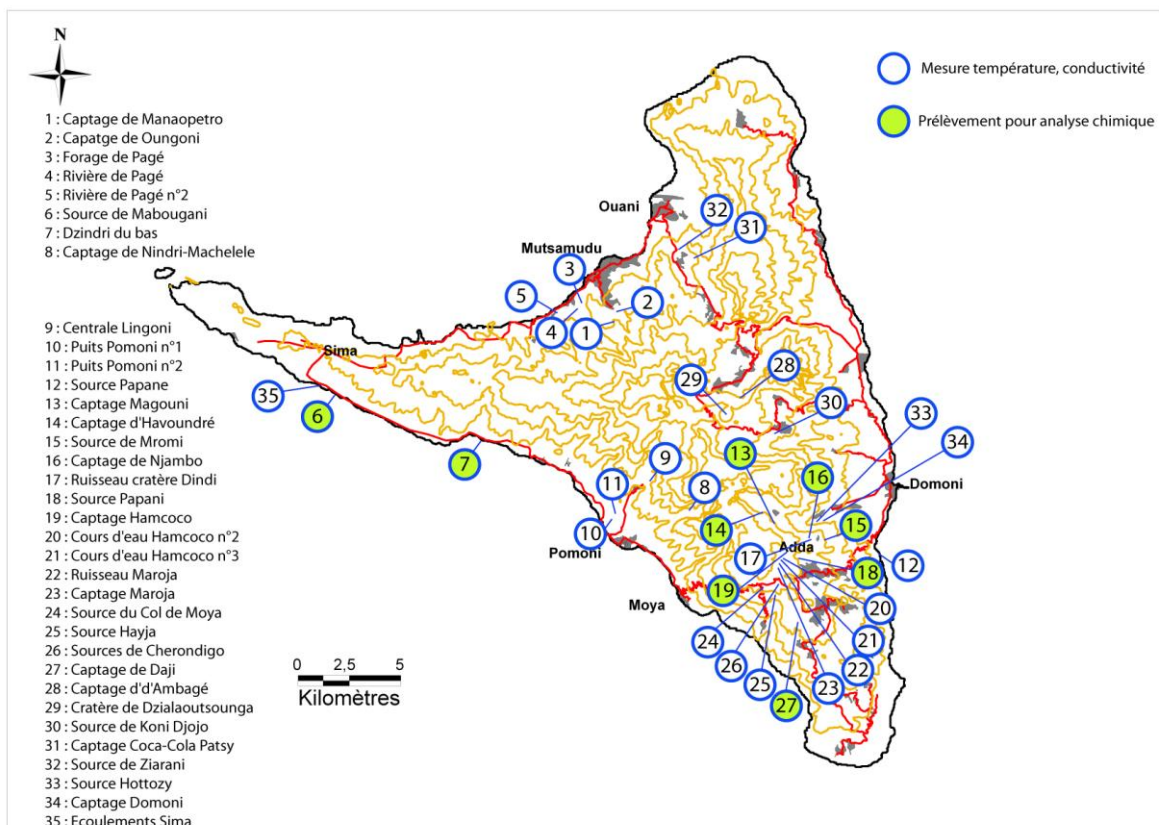


Figure 20 : Localisation des points d'eau ayant fait l'objet de mesures physico-chimiques et ayant été prélevés pour analyse chimique

Les valeurs de pH mesurées ne seront pas présentées ici étant donné que le capteur utilisé était probablement défaillant. Pour certains des points mesurés, un échantillon d'eau a été prélevé (Figure 20). Au total neuf prélèvements ont été effectués sur des points d'eau faisant partie de la zone d'intervention du projet ECDD. Ces échantillons ont été analysés en France. Leur composition en ions majeurs (anions et cations) a été mesurée, ainsi que celle de certains ions mineurs : F^- , Cl^- , NO_2^- , Br^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ et la silice. La concentration en ions HCO_3^- n'a quant à elle pas été analysée. En effet, le dosage de cet ion nécessite d'être réalisé dans les 24 heures suivant le prélèvement sans quoi la concentration obtenue n'est plus représentative de la concentration réelle de l'échantillon. Les teneurs des eaux en HCO_3^- ont cependant pu être recalculées à l'aide du logiciel PHREEQC en équilibrant la balance ionique de chaque échantillon. Il conviendra donc de manipuler les concentrations en HCO_3^- avec prudence.



Photo 7 : Mesure des paramètres physico-chimiques du captage de Njambo, village d'Outsa avec la sonde multi paramètres.

II. Résultats : les paramètres physico-chimiques

Nous présenterons ici les mesures réalisées sur des cours d'eau et sur les points d'eau identifiés comme des sources (Figure 20 et Annexe 1). La campagne de mesures ayant été menée en saison sèche, on peut supposer que le ruissellement était réduit et donc que la plupart des cours d'eau était alimentée en majeure partie par des émergences d'eaux souterraines. Il est important de préciser que, sur le terrain, il était parfois compliqué de savoir si les mesures et les prélèvements étaient réalisés dans les véritables griffons des sources ou au niveau d'écoulements de sub-surface prenant leur source plus en amont.

a) La température

Les températures de la quarantaine de points mesurés s'échelonnent de 18°C pour la plus basse à 26,1°C pour la plus élevée. La moyenne de l'ensemble des points mesurés étant de 22,2°C. Si l'on extrait les eaux clairement identifiées comme des eaux souterraines la température moyenne de ces points s'élève à 22,6°C. En effet, la température moyenne des eaux de surface atteint 21,5°C soit 1,1°C de moins que celle des eaux souterraines. La température la plus basse a été mesurée dans un cours d'eau au niveau du captage de Hamcoco qui alimente en eau la région d'Adda. Le point d'eau le plus chaud a quant à lui été mesuré dans un puits maraicher de la plaine alluviale de Pomoni (Photo 8).

A titre de comparaison, la référence de qualité¹⁰ acceptable en France pour le paramètre température est de 25°C : au-delà de cette valeur, il existe en effet un risque de prolifération bactérienne susceptible de contaminer l'eau si elle n'est pas traitée ou de nécessiter un surdosage de produit de désinfection. Cependant, la température moyenne des eaux souterraines en France métropolitaine est généralement comprise entre 10 et 16°C alors que

¹⁰ Arrêté français du 11 janvier 2007 (note : une « référence de qualité » est moins contraignante qu'une « limite de qualité » ; il s'agit de la valeur à atteindre dans un avenir plus ou moins proche et elle peut donc être temporairement dépassée).

celle-ci est naturellement plus élevée sous les Tropiques : Il est ainsi précisé dans cet arrêté que cette référence de 25°C ne s'applique pas aux départements d'Outre-mer.



Photo 8 : Puits maraîcher de la plaine alluviale de Pomoni

b) La conductivité électrique de l'eau

La conductivité électrique de l'eau est représentative de sa minéralisation ionique, c'est à dire de la quantité de matières dissoutes (et ionisées) contenue dans l'eau. Ce paramètre dépend surtout du temps de contact entre l'eau et la roche, ainsi que du degré de solubilité de cette dernière. La conductivité étant dépendante de la température, nous utiliserons ici la conductivité spécifique, qui représente la conductivité recalculée à 25°C. Ce calcul est fait automatiquement par la sonde utilisée pour les mesures. La moyenne des conductivités électriques mesurées est de $125 \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$, ce qui veut dire que les eaux de l'île d'Anjouan sont globalement très peu minéralisées, une valeur maximale atteinte par la source de Mromi avec $305 \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ et une valeur minimale de $51 \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ mesurée sur une source en contrebas de la route au niveau du col de Moya (captée pour l'alimentation en eau du village de Kangani).

Concernant la conductivité, les eaux souterraines ont une conductivité moyenne de $134 \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ alors que les eaux de surface ont une valeur moyenne de $111 \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$. Les mesures physico-chimiques montrent donc que les eaux souterraines sont plus minéralisées que les eaux de surface, ce qui est logique si l'on tient compte du contact plus étroit entre l'eau et la roche.

A titre de comparaison avec les normes de potabilité françaises, on considère que la conductivité (spécifique) d'une eau potable doit être comprise entre 200 et $1100 \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$. Il s'agit là encore d'une référence de qualité qui correspond :

- pour le seuil inférieur, au risque de corrosion des canalisations métalliques avec possibilité de mise en solution dans l'eau de métaux potentiellement toxiques (fer, zinc, cuivre, aluminium...);

- pour le seuil supérieur, au risque de colmatage des canalisations et ouvrages de captage (puits, forage, source) par précipitation chimique (« entartrage » calcaire) ou bactérienne (précipitation de fer).

III. Résultats : la composition chimique de l'eau

Les analyses chimiques ont confirmé ce que laissait présager la mesure de la conductivité électrique de l'eau, c'est à dire la faible minéralisation des eaux prélevées. Cela est conforme avec le contexte géologique de l'île, formé de terrains volcaniques relativement peu solubles. Les résultats des analyses sont présentés dans le Tableau 1.

Les cations ont été analysés avec un spectrophotomètre à adsorption atomique (Perkin Elmer 1100B®). La sensibilité de cet appareil pour l'analyse des cations est la suivante: K^+ : $\pm 0.8 \text{ mg.L}^{-1}$, Mg^{2+} , $\pm 0.78 \text{ mg.L}^{-1}$, Na^+ : $\pm 0.12 \text{ mg.L}^{-1}$.

Les anions ont été analysés par chromatographie ionique. Le chromatographe utilisé est un modèle DX100® (DIONEX) équipé d'un passeur automatique. Les concentrations sont fournies avec une précision de $\pm 0.2 \text{ mg.L}^{-1}$.

Étant donné le caractère peu minéralisé des eaux, il conviendra d'être prudent dans l'interprétation des variations d'éléments faiblement concentrés comme F^- , PO_4^{2-} , SO_4^{2-} et K^+ . Ceci permettra d'éviter la surinterprétation de variations inter-échantillons qui ne seraient la conséquence que de la variabilité expérimentale des appareils d'analyse à l'approche de leur limite de quantification.

Tableau 1 : Concentration en mg.L^{-1} des ions analysés à partir des échantillons prélevés.

	F^-	Cl^-	NO_3^-	PO_4^{2-}	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	Si
Source Papani (ADD 1)	0,1	6,2	0,0	0,0	1,8	9,5	6,6	6,2	1,1	14,1
Captage Hamcoco (ADD 2)	0,1	4,7	0,0	0,0	1,4	9,5	5,0	9,2	2,1	12,5
Source Mabougani (SC 1)	0,2	11,2	0,0	0,8	1,5	9,0	8,0	18,2	1,5	20,9
Dzidri du bas (SC 2)	0,0	25,4	0,0	0,0	3,6	7,0	5,8	18,0	1,3	9,4
Captage Magouni (OUZ 1)	0,1	3,9	1,4	0,0	0,8	8,5	5,0	5,8	0,9	12,9
Capateg Agobi (OUZ 2)	0,2	5,7	0,0	0,0	1,0	6,0	4,2	8,8	1,5	9,8
Source Mromi (OUT 1)	0,1	24,5	12,4	0,0	4,9	24,5	17,8	14,0	1,8	19,5
Capateg Njambo (OUT 2)	0,3	12,0	3,1	1,2	1,3	7,0	2,0	12,2	8,0	22,8
Capateg daji (DAJ)	0,1	8,1	0,0	0,0	1,2	5,0	4,4	6,2	0,9	10,2

Les éléments les plus concentrés dans les eaux prélevées sur l'île d'Anjouan sont les chlorures, le calcium, le magnésium, le sodium et la silice. En hydrochimie, de manière à identifier le faciès chimique de l'eau, il est courant de représenter les analyses dans un diagramme dit de Piper qui permet d'identifier le faciès chimique d'un prélèvement. La composition chimique des eaux prélevées sur Anjouan a été représentée en Figure 21 : les points bleus correspondent aux eaux de surface et les rouges aux eaux souterraines, prélevées au niveau de sources.

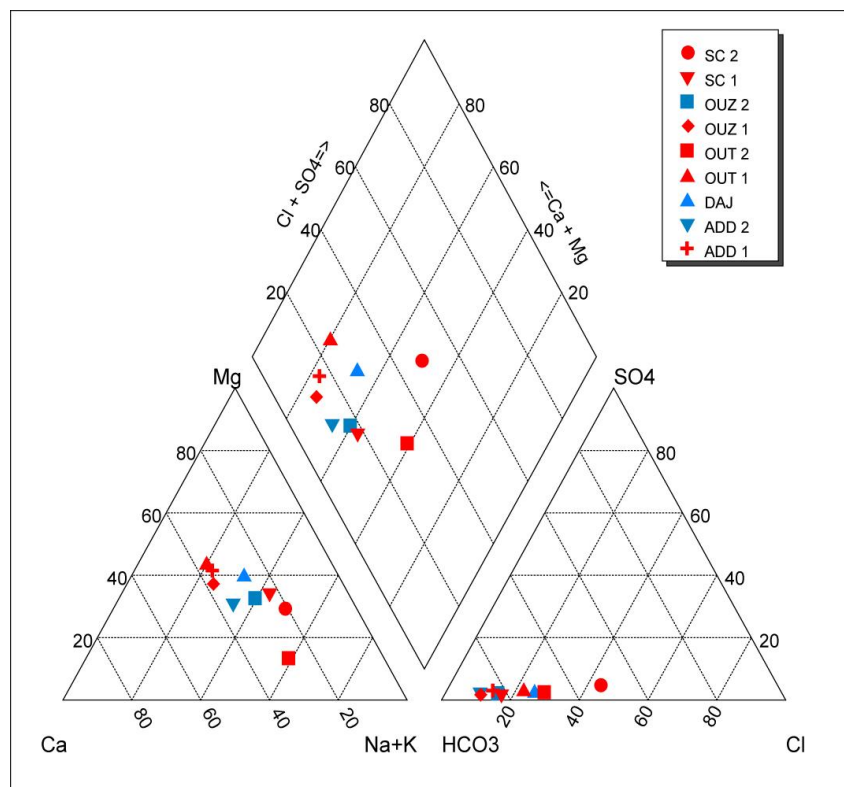


Figure 21 : Diagramme de piper présentant le faciès chimique des eaux prélevées sur l'île d'Anjouan.

La répartition des eaux prélevées correspond à un faciès d'eau à la limite entre le domaine « bicarbonaté calcique/magnésien » et le « domaine bicarbonaté sodi-potassique ». Il est important de noter que le caractère bicarbonaté est peut-être dû au fait que les ions HCO_3^- n'ont pas été analysés et que le calcul de leur concentration peut amplifier leurs teneurs relatives par rapport aux autres éléments. Cependant, les analyses présentées par *Join et al., en 1997* pour 247 prélèvements réalisés sur l'île de la Réunion montrent une localisation des points comparable (Figure 22), ce qui - étant donné les contextes (géologiques et climatiques) proches des deux îles - montre que les faciès chimiques observés sur Anjouan sont cohérents avec les faciès d'une île volcanique de l'Océan Indien.

L'origine probable des principaux ions est naturelle et correspond à la dissolution des roches (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-}). Cependant, certains ions ont une autre origine, tantôt naturelle (Na^+ et Cl^- sont amenés par les précipitations), tantôt artificielle (NO_3^- provient généralement des épandages agricoles, un excès de Cl^- peut traduire une pollution domestique, les déjections humaines étant riches en sel).

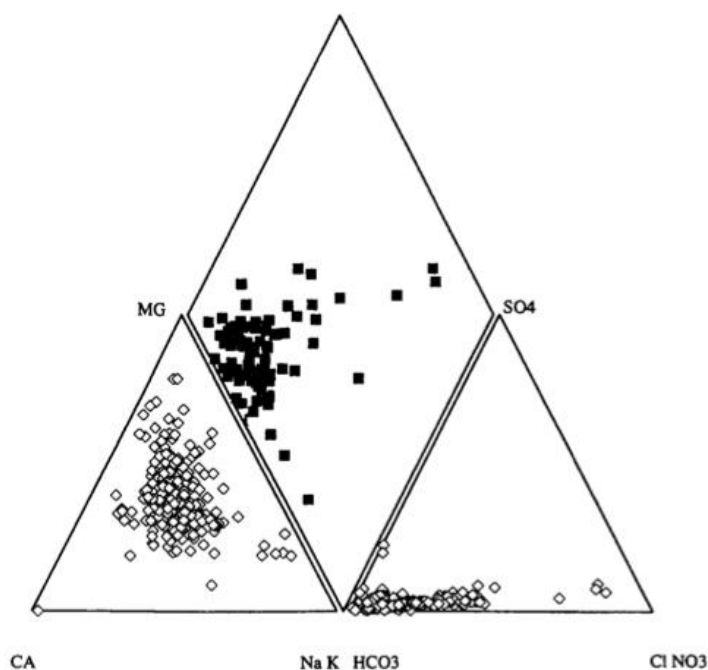


Figure 22 : Diagramme de Piper des eaux de l'île de la Réunion (Join et al., 1997)

Concernant les éléments relatifs à la qualité de l'eau, on note effectivement des concentrations notables en nitrates pour plusieurs points d'eau. Cet élément a une origine uniquement anthropique, sa présence va démontrer la possibilité d'une contamination par d'autres éléments pathogènes qui n'ont pas été analysés ici. Les analyses ont permis de détecter la présence de nitrates pour le captage de Magouni à Ouzini avec une concentration de $1,4 \text{ mg.l}^{-1}$ et pour les eaux du captage de Njambo à Outsa avec une concentration de $3,1 \text{ mg.l}^{-1}$. La source de Mromi, toujours à Outsa, a la concentration mesurée la plus élevée avec $12,4 \text{ mg.l}^{-1}$. On notera cependant que la limite de qualité pour cet élément est de 50 mg.l^{-1} en France.

IV. Interprétations et apport à la compréhension du fonctionnement hydrogéologique de l'île.

a) Origine de la minéralisation des eaux douces d'Anjouan

A partir de l'analyse chimique d'une eau, on peut également représenter des rapports ioniques. Ainsi, la représentation bivariée (Figure 23) du rapport molaire normalisé $[\text{Mg}]/[\text{Ca}]$ en fonction du rapport molaire normalisé $[\text{Ca}]/[\text{Na}]$ permet de distinguer trois pôles pour expliquer la source principale de minéralisation de l'eau (Halim et al., 2010 ; Zhu et al., 2011). Il s'agit :

- du pôle expliquant la minéralisation d'une eau par la dissolution d'évaporites notamment le sel pour un rapport $[\text{Mg}]/[\text{Ca}]$ compris entre 0,01 et 1 et un rapport $[\text{Ca}]/[\text{Na}]$ compris entre 0,01 et 1 ;
- du pôle représentant la dissolution de roches carbonatées, tels que les calcaires pour un rapport $[\text{Mg}]/[\text{Ca}]$ compris entre 5 et 10 et un rapport $[\text{Ca}]/[\text{Na}]$ compris entre 20 et 100 ;

- du pôle expliquant la minéralisation par l'altération de roches silicatées, roches volcaniques, plutoniques ou encore magmatiques pour un rapport $[Mg]/[Ca]$ compris entre 0,1 et 1 et avec un rapport $[Ca]/[Na]$ dans la même gamme.

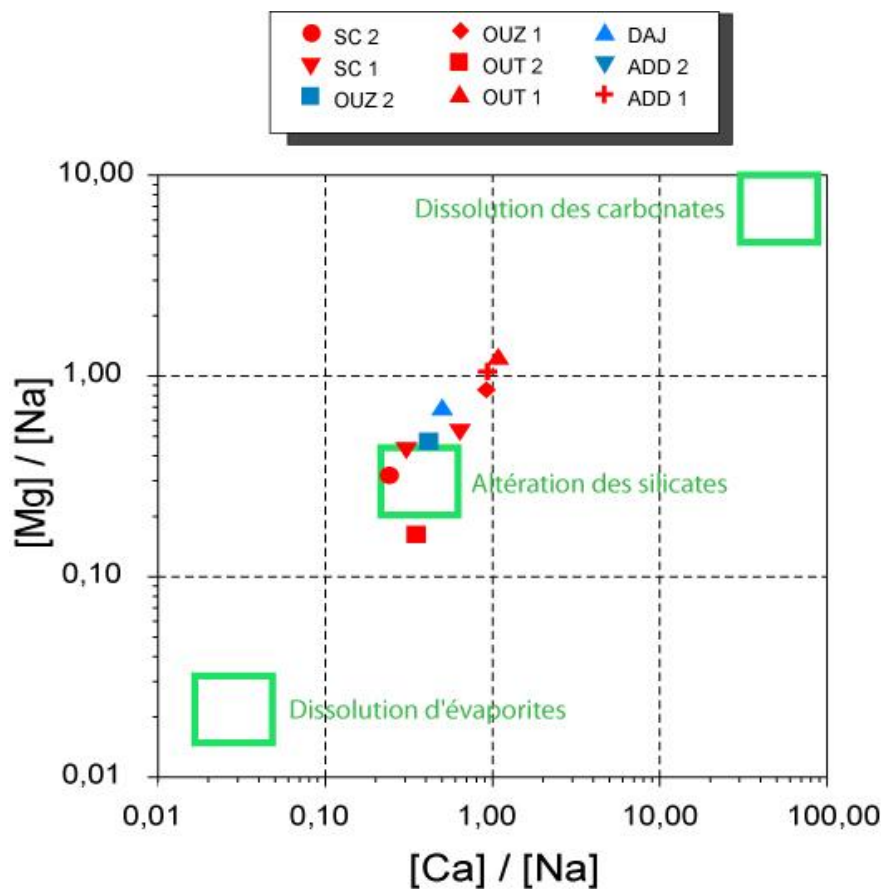


Figure 23 : Graphique bivarié du rapport molaire normalisé des concentrations $[Mg]/[Ca]$ en fonction du rapport molaire normalisé $[Ca]/[Na]$ des eaux prélevées au niveau des captages d'eau alimentant les villages du projet ECDD. Les espaces verts représentent les gammes de variation des compositions représentatives des trois principales sources de minéralisation d'une eau naturelle.

Les échantillons prélevés au niveau des captages des villages du projet ECDD se localisent clairement au niveau du pôle lié à l'altération des roches silicatées. Ce graphique confirme que la minéralisation de l'eau et donc sa composition chimique ont pour origine l'altération des roches volcaniques présentes sur l'île et démontre pour les non initiés que la chimie de l'eau va être représentative de son trajet dans le sous-sol. Au cours de son parcours dans le milieu souterrain, l'eau se charge en minéraux caractéristiques des roches produites par l'activité volcanique dont l'histoire a été reproduite et décrite au §1 de ce document.

Les roches volcaniques sont riches en sodium et silice même si ce dernier élément est très faiblement soluble dans l'eau : on remarque que les analyses chimiques présentées dans le Tableau 1 affichent les concentrations les plus élevées pour ces deux éléments. La Figure 24 représente l'évolution des concentrations en Na^+ en fonction de la conductivité électrique. Le graphique présenté Figure 24 montre que ce composant explique bien la conductivité électrique de l'eau mesurée *in situ*. Ceci signifie que la conductivité électrique de l'eau, mesurée lors de la campagne de terrain, s'explique principalement par les concentrations en sodium présentes dans l'eau. Un seul échantillon ne suit pas la tendance, il s'agit de la source de Mromi d'Outsa pour laquelle la conductivité mesurée sur le terrain est beaucoup plus élevée que ce à quoi l'on devrait s'attendre étant donné les concentrations en

Na⁺ mesurées. Il s'agit d'ailleurs de la conductivité électrique la plus élevée mesurée lors de la campagne d'août 2012.

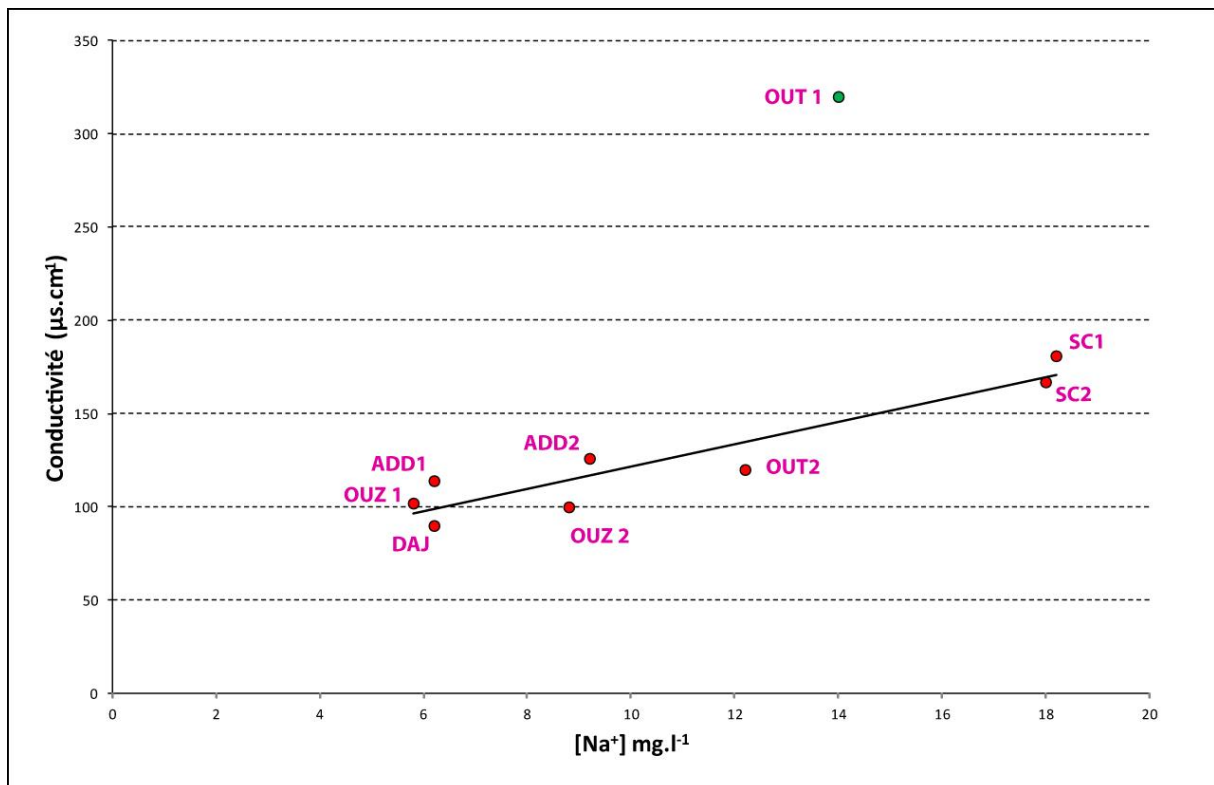


Figure 24 : Relation entre la concentration en ions Na⁺ en fonction de la conductivité électrique de l'eau.

La minéralisation globale de l'eau est bien expliquée par les concentrations en Na⁺, excepté pour un échantillon, pour lequel d'autres éléments semblent être à l'origine de sa minéralisation élevée. Quelle est l'origine de cette différence et a-t-elle une signification du point de vue du fonctionnement hydrogéologique ? C'est la question qui va maintenant être traitée afin d'identifier les différents types de ressources en eau souterraine présents à Anjouan.

b) Identification d'un aquifère de principal

Si l'on représente l'évolution de la température (Figure 25) et de la conductivité (Figure 26) en fonction de l'altitude des points de mesure, on observe que ces deux paramètres sont croissants lorsque l'on se rapproche du niveau de la mer (Figure 25 et Figure 26). Les coefficients de détermination R² pour les droites de régression concernant ces deux paramètres sont respectivement de 0,46 et 0,40. L'altitude n'explique donc respectivement qu'à 46% et 40% la dispersion des mesures de température et de conductivité. Les tendances mises en évidence sont cependant significatives, en effet, pour un niveau de confiance de 0,95, les coefficients de corrélation r de 0,68 et 0,63 sont significatifs puisqu'ils sont supérieurs à 0,32, valeur nécessaire pour que la tendance soit significative avec un effectif de 37 échantillons.

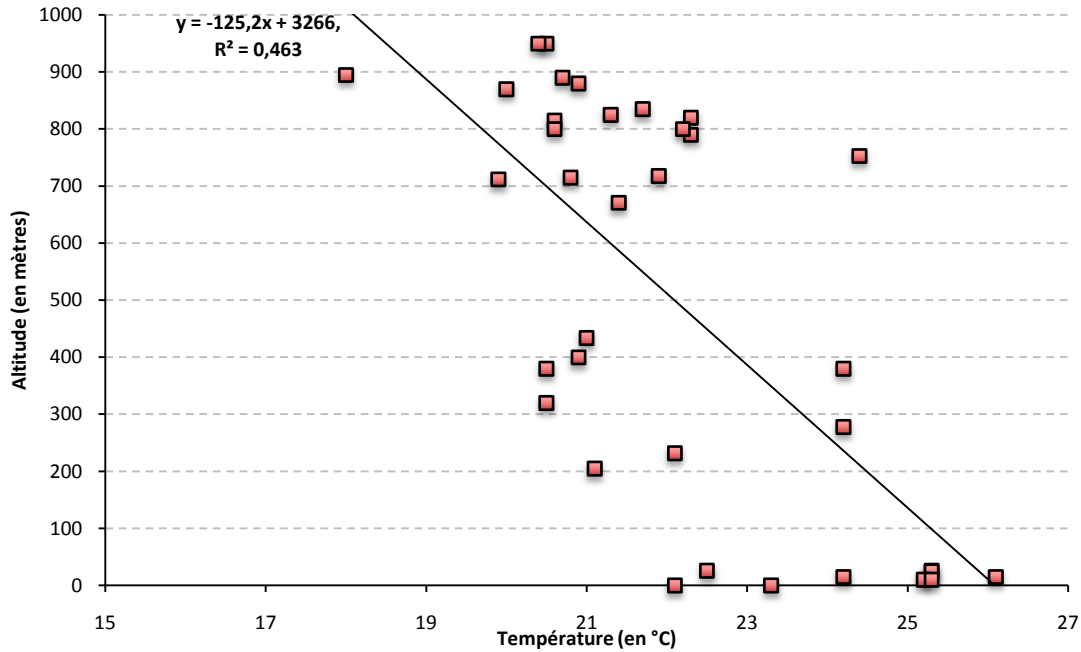


Figure 25 : Évolution de la température des points d'eau avec l'altitude

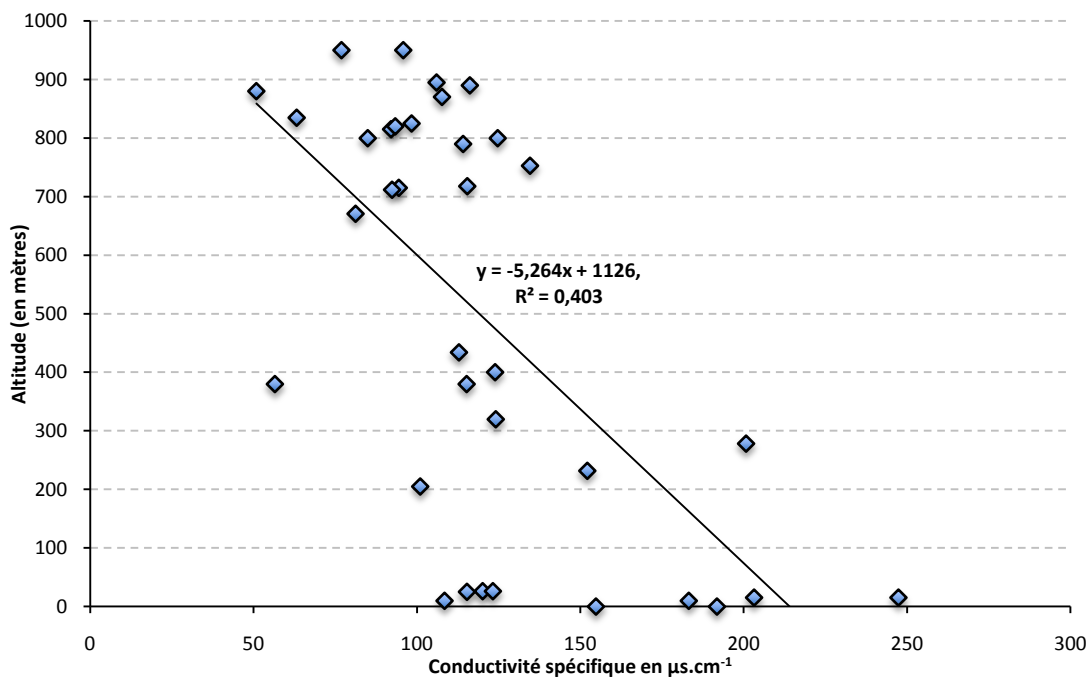


Figure 26 : Évolution de la conductivité électrique de l'eau en fonction de l'altitude

La variation de température mise en évidence par la Figure 25 résulte probablement du gradient altitudinal de température atmosphérique : on peut estimer qu'il vaut ici $8^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$. Les températures des différents points mesurés se situant dans la gamme des températures de l'air durant la saison sèche, soit entre 18°C et 27°C , la dispersivité des points pour une même altitude est liée à divers paramètres qui sont difficilement identifiables sans des investigations complémentaires. Parmi eux, se trouve l'influence du milieu souterrain, qui va être étudiée plus loin, ou encore le rôle du microrelief, des microclimats, le caractère au vent ou sous le vent...

Concernant la conductivité, il convient de préciser avant tout que les valeurs mesurées sont faibles si on les compare à d'autres contextes hydrogéologiques. Les analyses chimiques

ont confirmé cette faible minéralisation des eaux (Tableau 1). Comme le note un rapport du BRGM en 1994, cette faible minéralisation est caractéristique des milieux volcaniques.

La Figure 26 montre que les conductivités les plus faibles sont mesurées en altitude et les conductivités les plus fortes à proximité du niveau de la mer. Dans ce type de contexte de volcanisme insulaire, deux paramètres peuvent influencer la dépendance altitudinale de la minéralisation de l'eau :

- la proximité de la mer ;
- le temps de séjour de l'eau dans l'aquifère.

Pour les aquifères proches de la côte, l'influence de la mer, fortement minéralisée, peut affecter les valeurs mesurées. C'est le cas des conductivités électriques mesurées au niveau des puits maraîchers de Pomoni qui affichent des valeurs parmi les plus élevées de l'île (bien qu'assez modérées en valeur absolue) avec $243 \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ et $206 \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$. Les eaux captées par ces puits proviennent des rares nappes alluviales côtières de l'île. Elles sont issues de l'érosion des reliefs environnants. Ces aquifères sont probablement affectés par un phénomène de biseau salé qui influence la composition chimique de l'eau de cette nappe phréatique. Les conductivités, bien qu'elles soient élevées pour le contexte d'Anjouan, ne présentent pas une minéralisation suffisamment forte pour démontrer la présence d'une intrusion d'eau salée massive dans cet aquifère.

Fermons cette parenthèse pour revenir à la décroissance de la conductivité avec l'altitude. Cette tendance est observée en plusieurs points d'altitude intermédiaire où l'influence de la mer doit être équivalente à celle du sommet de l'île. Il semble donc que pour ces tranches d'altitude intermédiaire, l'éloignement à la côte n'explique pas la tendance observée.

La diminution du temps de séjour de l'eau au contact de la roche semble donc être à l'origine de la décroissance de sa conductivité électrique lorsque l'altitude augmente. Si l'on se place dans les schémas de fonctionnement hydrogéologiques présentés Figure 19, l'eau contenue en altitude a un temps de séjour court, son temps de contact avec la roche va donc être réduit et sa minéralisation faible. Au contraire l'eau émergeant au niveau de la mer va avoir transité à travers toute la colonne des terrains de l'île, elle va donc avoir eu le temps de se minéraliser plus que celle qui émerge en altitude (*Join et al en 1997*). Il faut ajouter à ceci que les terrains situés à la base de l'île sont plus anciens, donc que leur degré d'altération est plus élevé, les rendant ainsi plus solubles. C'est ici qu'intervient ce troisième paramètre qu'est le degré d'altération des roches : plus une roche est altérée plus l'interaction entre elle et l'eau va être facilitée, et plus l'eau va pouvoir se charger en minéraux dissous (*Join et al., 1997*).

Il semble donc que l'augmentation de minéralisation observée avec la diminution d'altitude soit liée au cheminement de l'eau à travers la colonne de terrain et qu'il soit possible de relier ce paramètre avec un temps de séjour de l'eau dans l'aquifère. Cette approche ne permet malheureusement pas de quantifier la durée de transit de l'eau dans le milieu souterrain, mais en comparant les points entre eux, toutes choses étant égales par ailleurs (type d'aquifère, géologie ...), il est possible de déterminer quel échantillon d'eau prélevé a eu le temps de séjour le plus long dans l'aquifère.

Cette variation de minéralisation liée à l'altitude permet de mettre en évidence au niveau de l'île d'Anjouan un transit vertical de l'eau du sommet de l'île jusqu'au niveau de la mer. On peut assimiler cette circulation d'eau à l'aquifère principal de l'île qui serait un composite des modèles hydrogéologiques hawaïen et canariens présentés au paragraphe (2.A.IV) de ce document. Nous utiliserons le terme d'aquifère principal plutôt que le terme aquifère de base.

En effet, ce dernier terme implique l'existence d'un aquifère à gradient très faible qui à notre avis n'existe pas sur Anjouan. Cet aquifère alimente différents cours d'eau et sources présents sur les versants de l'île. Plus ces points d'eau sont situés à basse altitude plus ils ont eu le temps de se charger en ion Na^+ et silice, ce qui provoque une augmentation de leur minéralisation.

Cependant, toutes les sources et cours d'eau étudiés ne suivent pas ce schéma. L'existence de points d'eau avec des minéralisations différentes à des altitudes comparables laisse supposer que le contexte de gisement de l'eau est variable et que différents types d'aquifères peuvent être à l'origine de ces minéralisations. Ce sont ces aquifères, individualisés de l'aquifère de principal, que nous allons maintenant nous attacher à caractériser.

c) Discrimination de différents types d'aquifère

Join et al en 1997, dans un contexte insulaire comparable, utilisent le rapport des concentrations Na/Cl pour différencier l'aquifère principal des autres aquifères, à savoir les aquifères perchés et les aquifères superficiels. D'après ces auteurs, l'enrichissement en ions Na^+ par rapport à l'ion Cl^- marque une participation plus élevée de l'aquifère principal dans la minéralisation de l'eau drainée à une source, la concentration en sodium augmentant avec la quantité de roche volcanique dissoute.

La Figure 27 présente donc l'évolution des concentrations en Cl^- en fonction des concentrations en Na^+ pour les échantillons prélevés à Anjouan. Sont également représentés sur ce graphique, la droite des concentrations de l'eau de pluie (extrait des travaux de Join et al., 1997) sur l'île de la Réunion. Nous avons également tracé la droite représentant les concentrations mesurées sur l'aquifère de base de l'île de la Réunion. Enfin, les droites d'égale quantité en sodium et chlore ainsi que d'un enrichissement en sodium de 50% et 150% ont été tracées sur ce graphique.

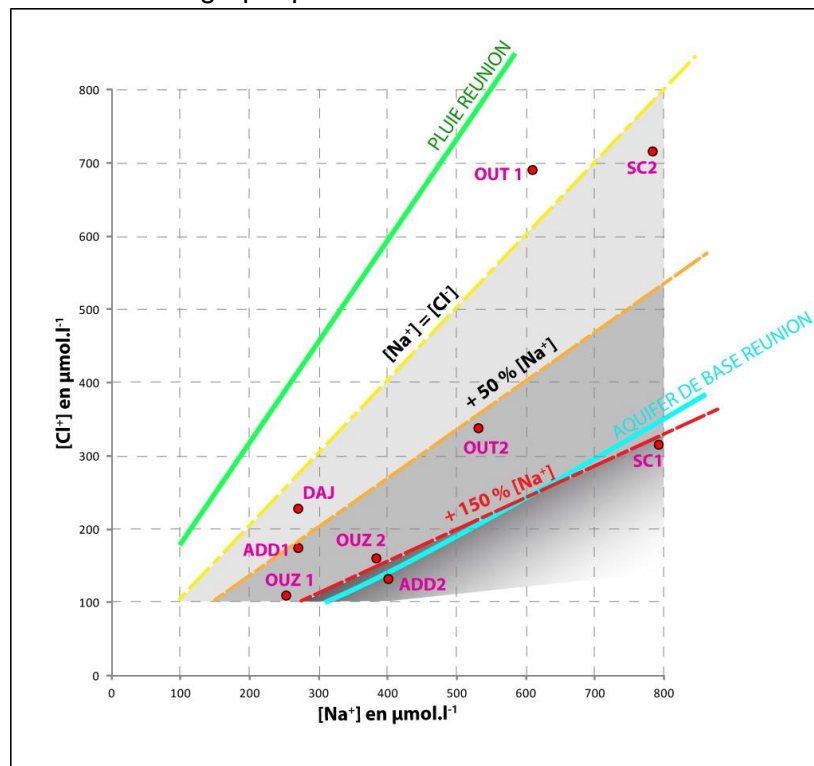


Figure 27 : Évolution des concentrations en Na^+ et Cl^- pour les échantillons prélevés sur Anjouan.

Les eaux prélevées au niveau des captages d'eau des villages d'intervention du projet ECDD se localisent sur la Figure 27 entre la droite de pluie et celle de l'aquifère de base tracées pour l'île de la Réunion. *Join et al., 1997* décrivent que le rapport Na/Cl varie de valeurs faibles, proches de la valeur du rapport pour l'eau de pluie, pour les aquifères superficiels, jusqu'à des rapports élevés, marquant un enrichissement en sodium pour les eaux caractéristiques de l'aquifère de base (prélevées par l'intermédiaire de forages dans le cas de l'île de la Réunion). Il est important de noter que l'évolution de ce ratio est indépendante de la minéralisation totale de l'eau. Nous en déduisons, étant donné ce qui a été expliqué plus haut, que ce rapport est indépendant du temps de séjour de l'eau dans l'aquifère et représente plus une signature du type d'aquifère dans lequel l'eau a circulé.

Sur ces bases, les prélèvements effectués sur Anjouan se divisent en trois groupes (Figure 27) :

- un premier groupe englobant les eaux du captage de Daji (DAJ), de la source de Dzindri du bas (SC2) et surtout la source de Mromi (OUT1) à Outsa. Ces prélèvements encadrant la droite d'égale concentration en Na et Cl sont marqués par l'influence de la pluie ;
- un second groupe avec un enrichissement en Na de 50% qui renferme le captage de Papani (ADD1) à Adda et le captage Njambo (OUT2) à Outsa ;
- un troisième groupe avec un enrichissement proche de 150% en Na⁺ qui englobe les deux captages de Ouzini (OUZ1 et OUZ2), la source de Mabougani (SC1) (Figure 18) sur la presqu'île de Sima, et le captage de Hamcoco à Adda (ADD2). On note que ce troisième groupe s'aligne sur la droite de l'aquifère de base de la Réunion.

Si l'on suit le raisonnement proposé, les eaux appartenant au groupe 1 proviendraient d'aquifères perchés comme décrit dans le modèle hawaïen ; les eaux du groupe 3 seraient issues de l'aquifère de base, l'aquifère principal dans notre cas, déjà identifié au paragraphe précédent et les échantillons du groupe 2 concerneraient des eaux fortement influencées par l'aquifère principal mais avec une composante superficielle importante.

Si l'on met ces interprétations en parallèle des observations géologiques effectuées sur l'île d'Anjouan, les groupes d'eaux identifiés à partir de l'évolution du rapport Na/Cl sont cohérents avec le contexte géologique d'émergence des sources.

Ainsi, les sources de Daji et Mromi sont issues d'aquifères perchés à porosité d'interstice liés à des unités géologiques issues de la période volcanique la plus récente. Un seul prélèvement n'est pas cohérent avec cette interprétation. Il s'agit de la source de Dzindri du bas (SC2) que nous aurions plutôt attribuée à l'aquifère principal. Il est très possible qu'un biais ait été introduit dans notre analyse du fait des conditions de prélèvement. En effet, l'échantillonnage a été réalisé à marée haute, l'eau de mer aurait alors pu contaminer l'échantillon même si les concentrations en Na⁺ et Cl⁻ restent très faibles. Il est aussi possible que la coulée volcanique dont est issue cette source soit très superficielle, des investigations complémentaires permettraient de le confirmer.

Les sources de Papani et Njambo, qui appartiennent au groupe intermédiaire, se caractérisent géologiquement par la présence d'un aquifère perché en connexion avec l'aquifère principal : ceci explique donc leur position intermédiaire dans le graphique Na/Cl.

Enfin le troisième groupe inclut les eaux issues de l'aquifère principal, Mabougani, Hamcoco et Havoundré. Le captage de Magouni correspondrait plus, d'un point de vue géologique au contexte des sources du groupe précédent, sa présence dans la zone d'enrichissement de 150% en Na^+ étant sans doute liée à sa faible minéralisation, ce qui ne permet pas une bonne discrimination de l'échantillon. De plus, la période de prélèvement en saison sèche a sans doute réduit la part d'eau en provenance de l'aquifère perché, d'où sa signature plutôt caractéristique de l'aquifère principal.

d) Impact anthropique

Les teneurs en nitrates analysées montrent la sensibilité accrue de certains points d'eau face aux activités anthropiques. C'est notamment les points d'eau drainant les aquifères perchés qui se démarquent. Une attention toute particulière devrait donc être portée aux activités menées sur les bassins versants de ces aquifères perchés afin de limiter le risque de contamination des ressources en eau. Toutefois, les concentrations mesurées restent largement en dessous des normes de potabilité applicables en France. Les teneurs en nitrates ne présentent donc pas un risque en elles mêmes mais sont le marqueur d'une pollution possible par d'autres éléments pathogènes.

C. LES DONNEES HYDRAULIQUES DISPONIBLES.

I. Description

Il n'existe que peu de mesures destinées à caractériser le débit des cours d'eau et leurs relations avec leur bassin versant. Les jaugeages auxquels nous avons eu accès proviennent des trois sources suivantes :

a) Données UCEA (Union des Comités d'Eau d'Anjouan)

Les données de l'UCEA (Union des Comités d'Eau d'Anjouan) se répartissent sur trois régions d'Anjouan (Niumakele, Sima et Bandrani). Ces données ont été acquises dans le cadre de la mise en place de trois schémas directeurs de gestion de l'eau. Les mesures ont débuté en 2007 pour Niumakele et pour Bandrani, en 2008 pour Sima. Il s'agit là d'une quantité très importante de données, assez inespérée pour l'île d'Anjouan. De ce fait, l'acquisition de ces données doit absolument être poursuivie de manière à disposer d'un suivi sur le long terme permettant de connaître l'évolution du régime des cours d'eau et des sources.

La mise en forme et l'interprétation de ces mesures demande cependant un travail très important qui ne sera pas réalisé dans ce rapport dont l'un des objectifs est de poser les bases du fonctionnement hydrogéologique de l'île. Une fois ce travail réalisé, il sera intéressant de se pencher dans le détail sur les données acquises par l'UCEA pour préciser et quantifier les premières approches développées dans ce rapport. Les personnes qui réaliseront ce travail devront visiter chaque point de jaugeage afin de connaître les conditions exactes de réalisation de la mesure. Il convient d'être très attentif à ce point car une interprétation « en aveugle » des données pourrait conduire à des interprétations erronées.

b) Données du projet ECDD

Il s'agit de mesures de débit acquises par le projet ECDD à l'occasion des travaux de Miguel Fernandez Astudillo. (*Astudillo, M.F., 2012*). A cette occasion, les premières mesures ont été réalisées sur les captages d'eau des villages du projet ECDD. Elles donnent un ordre de grandeur des débits fournis en saison sèche par quelques captages. Ces investigations ont surtout été l'occasion de mettre en évidence la difficulté de mettre en œuvre des mesures de débit au niveau des captages ne disposant pas d'aménagement spécifique.

c) Inventaire de Marini, 1990

Le rapport de *Marini (1990)* présente un inventaire de l'ensemble des ressources en eau de l'île. Pour certains points d'eau, une évaluation du débit est fournie. Ce document est très descriptif et s'attache peu à la compréhension des mécanismes hydrogéologiques ou hydrologiques.

II. Premières interprétations

a) Évolution des débits au cours du temps

C'est la donnée qui fait défaut sur l'île, sur des périodes importantes. *Astudillo (2012)* compare certaines des mesures qu'il a réalisées avec les évaluations de débit proposées par *Marini en 1990*. Il semble que les débits estimés en 2012 soient inférieurs à ceux de 1990. Cependant, le caractère ponctuel des deux évaluations et le manque d'informations sur la méthode d'estimation des débits concernant les travaux de *Marini (1990)* rendent la comparaison de ces mesures délicate.

En ce qui concerne les données de l'UCEA, nous nous intéresserons ici uniquement aux mesures réalisées sur le captage de Daji (Figure 20) qui a été visité à l'occasion de la campagne de terrain et pour lequel un ensemble de données cohérentes existe (puisque nous disposons déjà de mesures physico-chimiques et d'analyses chimiques sur ce point).

Le suivi des débits réalisé depuis 2007 ne montre pas de changement de comportement. En effet, en période d'étiage, le débit du captage atteint 1 l.s^{-1} . Cette valeur n'a pas évolué au cours des cinq dernières années. De la même manière, le débit de hautes eaux fluctue entre 7 et 8 l.s^{-1} depuis 2007. C'est plutôt la période d'apparition des hautes eaux qui semble être fluctuante. En effet, le pic de hautes eaux s'étale de février à juin et, suivant les années, il peut se produire à différents moments durant cette période. Ceci semble très lié à la répartition des précipitations dans le temps qui semblent plus fluctuantes que le comportement de l'aquifère et de son bassin versant.

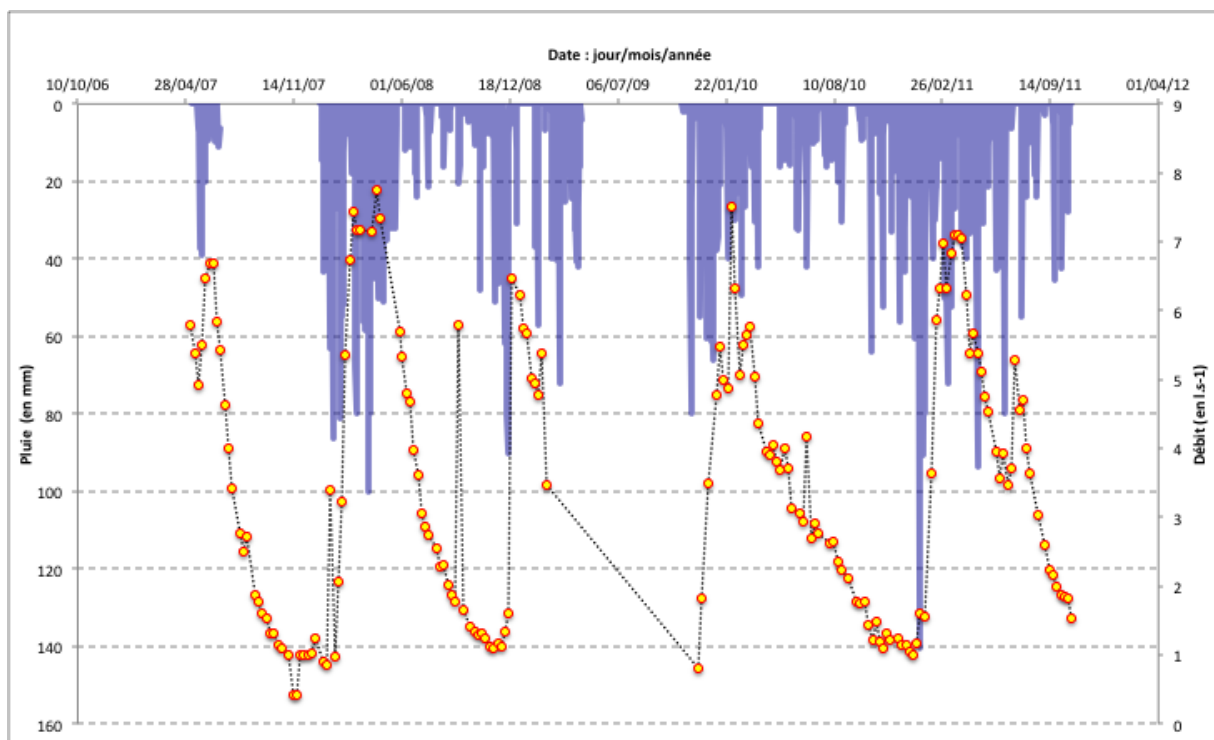


Figure 28 : Hydrogramme (points jaunes) de la source de Daji et précipitations à Adda (traits bleus), sur la période 2007 à 2012.

L'hydrogramme présenté Figure 28 montre une succession de pics asymétriques correspondant à l'augmentation de débit de la source à chaque saison des pluies puis à son tarissement. Lorsque les précipitations deviennent suffisantes durant la saison des pluies, on

observe que l'augmentation de débit est très rapide. Au contraire le tarissement est lent, ce qui est une caractéristique des aquifères (il serait intéressant d'étudier la variabilité de sa pente d'une année à l'autre). La décrue débute dès la baisse d'intensité des précipitations. Ces augmentations de débit témoignent d'un bassin versant et d'un aquifère très réactif avec un temps de concentration très rapide. La pente moins raide de la décrue indique la participation d'une réserve d'eau souterraine à l'alimentation de la source, qui reste cependant réduite. Les hydrogrammes présentés Figure 28 montrent que le débit de la source de Daji est principalement marqué par le ruissellement de subsurface. Une réserve en eau souterraine existe, c'est elle qui permet le maintien d'un débit de 1 l.s^{-1} en saison sèche.

Une analyse plus détaillée, non réalisable dans le cadre de ce travail, de ces hydrogrammes et notamment de leurs courbes de tarissement permettrait de quantifier cette participation et de mieux caractériser les réserves en eau.

b) Exemple d'évaluation de la surface du bassin versant

De manière à illustrer le potentiel, en terme de compréhension du fonctionnement des aquifères et de leur bassin versant, des suivis de débits tels que ceux réalisés par l'UCEA, nous allons évaluer approximativement la surface du bassin versant de la source de Daji. Pour cela, un hydrogramme de la période de hautes eaux de l'année 2011 a été isolé et est présenté Figure 29.

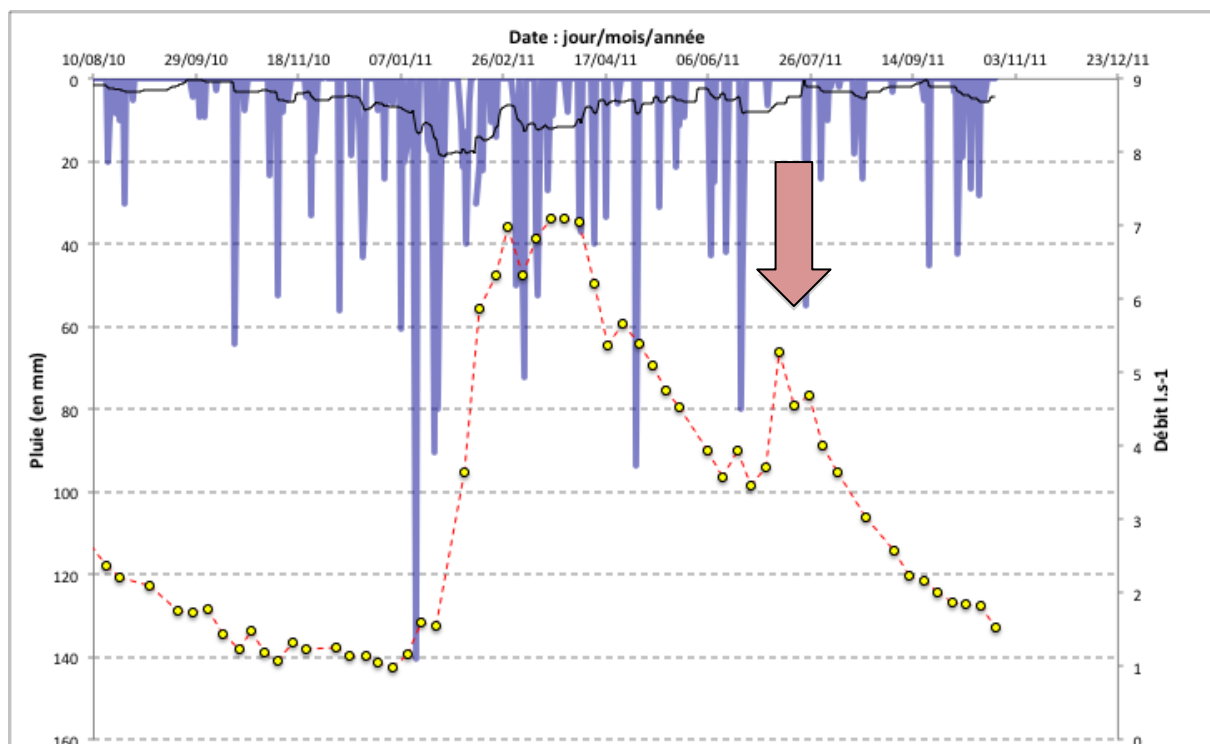


Figure 29 : Hydrogramme de la source de Daji durant le cycle hydrogéologique 2010-2011.

On observe Figure 29 que le débit augmente brutalement en janvier lorsque les précipitations dépassent régulièrement les 60 mm journaliers. Le débit maximal est atteint vers la fin février et reste au-dessus de 7 l.s^{-1} jusqu'à début avril, date à partir de laquelle le débit commence à diminuer, le débit minimal de l'étiage étant atteint en novembre. Une particularité de l'année 2011, réside dans la présence d'une nouvelle augmentation du débit

qui vient interrompre la décrue et qui est provoquée par un épisode pluvieux marqué vers fin juin. Le retour à un débit « normal » pour la période est atteint début août.

Ce petit pic de crue (marqué par une flèche rouge sur la Figure 29) correspond donc à cet épisode pluvieux bien identifiable, ce qui va nous permettre d'évaluer la surface du bassin versant alimentant la source. Nous ferons l'hypothèse que l'intégralité de cette augmentation de débit est liée à cet événement pluvieux, et que le volume de pluie stocké dans l'aquifère est minime. Si nous intégrons l'excès de débit représenté par ce pic de crue, il représente un volume d'environ 18000 m³ qui se serait écoulé à la source. Nous avons calculé que durant l'épisode pluvieux une quantité cumulée de 130 l.m⁻².s est infiltrée en tenant compte du ruissellement et de l'évapotranspiration. A partir de ces chiffres, et des hypothèses formulées, il est donc possible de recalculer la surface du bassin versant qui aurait participé à l'alimentation de la source. Durant cet épisode pluvieux, il semble qu'une surface de 14 hectares ait participé à l'alimentation de la source. Cette surface peu paraître faible, mais ceci confirme le caractère perché et la surface limitée géographiquement de l'aquifère drainée par la source de Daji. En effet, les cônes volcaniques bien visibles dans la topographie d'Anjouan, et qui constituent des aquifères perchés alimentant certaines sources telle que celle de Daji, occupent des surfaces réduites. Ces unités géologiques représentent des bassins versants dont la surface fluctue entre 7 ha (pour le cratère Dindi à Outsa) et 18 ha (pour le cratère Dzialaoutsounga). On peut donc supposer que la source de Daji est alimentée par le même type de structure.

Il convient d'être très prudent avec ces interprétations rapides et réalisées sans avoir vérifié les conditions de jaugeage. En effet, ce type de travail devrait avant tout être précédé d'une vérification des conditions de réalisation de la mesure *in situ*, ainsi que de la marge d'incertitude qui lui est associée, de manière à ne pas fournir d'interprétation erronée. Ce travail n'a pas été fait dans notre cas. Concernant la source de Daji, des investigations complémentaires pourraient préciser la localisation de la zone d'alimentation délimitée ici, plusieurs édifices volcaniques existant à proximité.

c) Synthèse

Il ressort de cette première analyse sommaire des données de débit récoltées sur Anjouan, qu'il ne semble pas y avoir eu d'évolution récente (depuis 2007) du débit des cours d'eau. Ceci a notamment été mis en évidence sur la source de Daji. Le signal de précipitation semble quant à lui très irrégulier et variable d'une année à l'autre, notamment en ce qui concerne sa répartition temporelle. Une analyse plus approfondie des données permettrait de préciser ces affirmations.

Le comportement hydraulique de la source de Daji confirme les conclusions émises suite à l'analyse hydrochimique. **Cette source semble être alimentée par un aquifère perché au bassin versant réduit. Son régime hydraulique est surtout lié au ruissellement de subsurface et donc très dépendant des précipitations. Un aquifère souterrain participe à son alimentation mais la réserve sollicitée semble assez superficielle avec un court temps de séjour de l'eau dans le milieu souterrain.** Les observations géologiques ont montré la présence à l'amont de la source de cônes scoriacés et de coulées récentes appartenant à la dernière phase volcanique d'Anjouan qui pourrait constituer le bassin versant de cette source (Figure 10 et Figure 11).

L'analyse géologique et hydrochimique associée à une analyse sommaire de l'évolution des débits de la source de Daji a permis de préciser son fonctionnement hydrogéologique. Nous allons maintenant tenter de généraliser cette analyse afin d'établir les différents types de

ressources en eaux souterraines existant sur Anjouan et leurs relations avec les eaux de surface.

D. SCHEMA DE FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE DE L'ILE D'ANJOUAN

Il s'agit ici de synthétiser l'ensemble des données géologiques, hydrogéologiques, hydrochimiques et hydrauliques présentées dans ce rapport pour définir une typologie de l'ensemble des ressources en eaux souterraines existant sur l'île d'Anjouan.

I. L'aquifère principal

Il est constitué principalement par les terrains mis en place lors de la construction du noyau central de l'île et les deux premières phases volcaniques décrites au paragraphe §1.B de ce document. La perméabilité de ce type d'aquifère est caractérisée par une double porosité, caractéristique des coulées de type Aa (Figure 18). Les principaux exutoires de ces sources se situent à proximité du niveau de la mer (Figure 30). Cependant, tout au long du transit de l'eau dans l'aquifère un certain nombre d'horizons géologiques moins perméables induisent un transit horizontal des circulations d'eau. Ces « prélèvements » naturels sur l'aquifère principal viennent alimenter les nombreux cours d'eau de l'île à différentes altitudes depuis les parties hautes de l'île jusque dans la zone côtière.

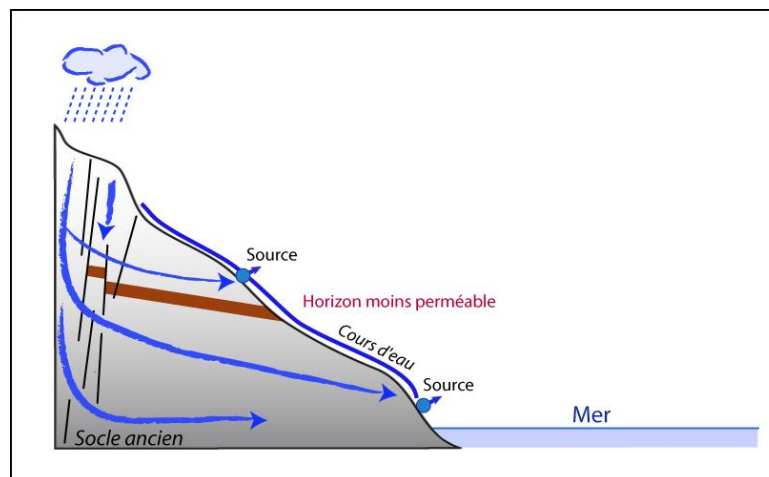


Figure 30 : Modèle conceptuel schématisé de fonctionnement de l'aquifère principal avec les exutoires associés

Les sources qui drainent cet aquifère sont pérennes, ce qui dénote la présence d'une réserve en eau importante au niveau de l'aquifère principal. Le temps de séjour y est également important, ce qui a pour effet de tamponner les effets des événements hydroclimatiques individuels. En effet, les habitants d'Anjouan décrivent de faibles variations de la turbidité au niveau de ces sources. On comprend, en observant la Figure 30, qu'il va être difficile de tracer et de délimiter, pour les sources drainant cet aquifère, un bassin versant correspondant à une zone d'alimentation précise. Ceci est le résultat de l'hétérogénéité importante de ce type de milieu, décrite au §2.A.1.

D'après notre analyse nous pensons que les points d'eau suivants correspondent au schéma décrit en Figure 30 : Manaopetro, Oungoni, les rivières de Pagé, la central de Lingoni, le captage de Nindri-Machelele, le captage de Hamcoco, le captage d'Havoundré et le captage de Ambagé, entre autres (Figure 20).

II. Les aquifères perchés liés aux cônes scoriacés récents

La dernière phase volcanique a produit un certain nombre de cônes volcaniques scoriacés et de coulées basaltiques qui sont venues se déposer à la surface de l'île après une longue phase d'érosion. Ces structures géologiques récentes constituent des aquifères perchés, autant dans la partie centrale de l'île que sur les presqu'îles.

En ce qui concerne cette partie centrale, des aquifères perchés sont présents au niveau des anciens édifices volcaniques (Figure 31). Un des exemples le plus représentatif est la source de Mromi à Outsa qui draine l'édifice volcanique situé à l'amont (bien visible dans la topographie). Les aquifères à porosité d'interstice que nous avons observés sont le plus souvent en connexion avec l'aquifère principal, celui-ci participant à l'alimentation (avec les précipitations) de ces aquifères. Le fonctionnement est le suivant (Figure 31) :

- les sources drainant l'aquifère principal se situent dans ces cas là sur les flans internes des cônes scoriacés (captage de Njambo par exemple) ;
- elles forment ainsi des cours d'eaux qui vont se perdre dans la partie basse des cratères (cela est observable au niveau des cratères de Dindi à Outsa et à Dzialaoutsounga) ;
- une fois infiltrée à nouveau, l'eau ressort plus bas en altitude à la base de l'édifice volcanique ou d'une coulée, formant par exemple la source de Mromi à Outsa (Figure 31) ; le captage de Magouni fonctionne également de cette manière.

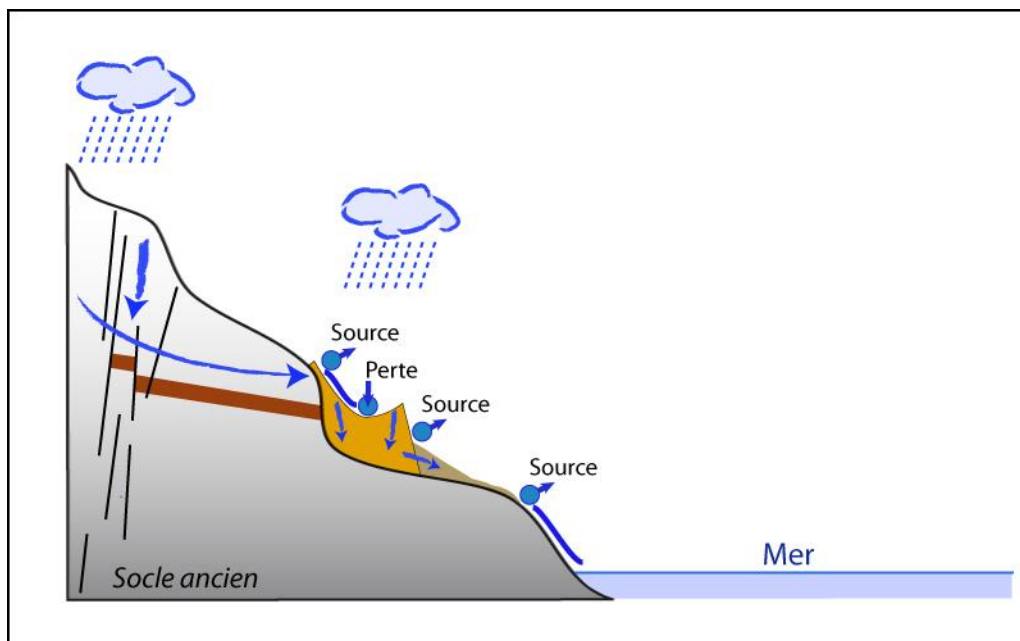


Figure 31 : Modèle conceptuel schématique de fonctionnement des aquifères perchés liés à la phase volcanique la plus récente de l'île d'Anjouan.

Le fait qu'une partie de l'eau drainée par ces sources ait eu un cheminement à l'air libre les rend très vulnérables vis-à-vis des pollutions. Ceci a été confirmé par la présence fréquente de nitrates dans les eaux prélevées dans ce type d'aquifères. Ce risque de contamination est accru par le fait que ces structures volcaniques, sont souvent le lieu de maraîchages et d'élevage (Photo 4 et Photo 5), étant donné la fertilité des produits d'altération volcanique qui s'y déposent.

Au niveau de ce type d'aquifère, la délimitation des bassins versants va être plus aisée que dans le cas de l'aquifère principal. On notera cependant que l'eau circule à la fois dans un milieu à double porosité (coexistence de zones à porosité d'interstices et porosité de fissures) au niveau de l'aquifère principal, puis dans un milieu à simple porosité d'interstices. Comme le décrivent les villageois, ce type d'aquifère pourra produire une turbidité importante à ces exutoires en période de crue.

III. Les presqu'îles, Sima, Nioumakele

La structure géologique de ces presqu'îles reste ambiguë, cependant on peut supposer qu'elles sont constituées à leur base par des terrains mis en place lors de la phase initiale de construction de l'île. Par dessus, sont venus se déposer des terrains qui ont subi une forte altération au cours de son histoire géologique. A l'échelle des presqu'îles, on retrouve donc des circulations d'eau issues de l'aquifère principal : cependant les exutoires de ces aquifères sont présents uniquement sur la zone côtière, les terrains constituant leur roche réservoir n'affleurant pas à la surface des presqu'îles (Figure 32). La source de Mabougani est un exemple d'exutoire drainant l'aquifère basal à basse altitude au niveau de la presqu'île de Sima. D'un point de vue géologique et géographique la source de Dzindri du bas devrait être comparable : cependant son rapport Na/Cl semble avoir été influencé par un prélèvement effectué à marée haute. Mis à part les exutoires côtiers, cet aquifère serait également accessible dans les zones plus élevées en altitudes des presqu'îles mais par forage Figure 32.

Les eaux souterraines exploitables par simple gravité¹¹ sont donc uniquement représentées par les aquifères perchés qui s'établissent au sein des structures volcaniques les plus récentes de la dernière phase volcanique qui a affecté l'île d'Anjouan. Le fonctionnement de ces structures hydrogéologiques a été discuté dans les paragraphes précédents. Les points d'eau visités correspondant à ce deuxième type de ressources seraient la source du col de Moya, la source de Hayja, la source de Maroja et la source de Daji.

Il est possible que certaines de ces sources aient une alimentation composite avec une participation de l'aquifère principal, surtout dans la zone de transition entre la presqu'île de Nioumakele et le reste de l'île.

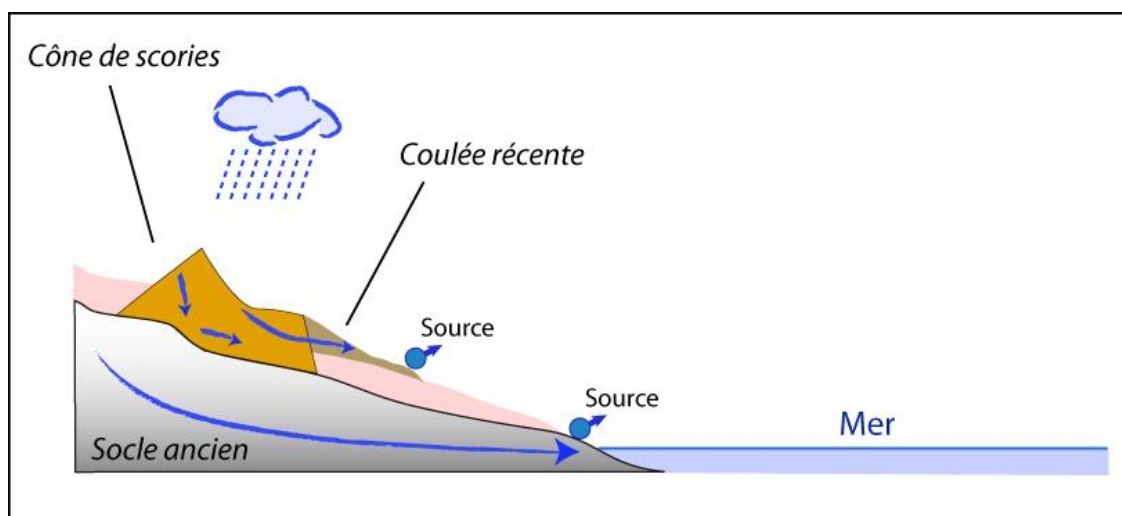


Figure 32 : Modèle conceptuel schématique de fonctionnement hydrogéologique des zones de presqu'île de l'île d'Anjouan.

¹¹ C'est-à-dire sans faire appel à des pompes mécaniques.

IV. Les nappes alluviales côtières

Elles constituent une réserve en eau anecdotique à l'échelle de l'île étant donné l'espace réduit occupé par les formations alluviales. En outre, ces formations peuvent être le siège d'un biseau salé (même réduit) car les conductivités électriques mesurées sont élevées pour l'île : cependant des analyses d'eau complémentaires sur ces nappes alluviales seraient nécessaires afin de mieux les caractériser. L'influence de la mer ne semble cependant pas être très importante car cette eau est utilisée par des puits maraichers, sans impact notable sur les plantations.

L'alimentation de ces nappes se fait par les précipitations et par l'infiltration des cours d'eau qui circulent en surface. On peut également supposer que, dans leur partie amont, elles sont alimentées par l'aquifère principal. Les points d'eau correspondant à ce type de ressource sont les deux puits maraichers de Pomoni et le forage de Pagé sur la parcelle du projet ECDD.

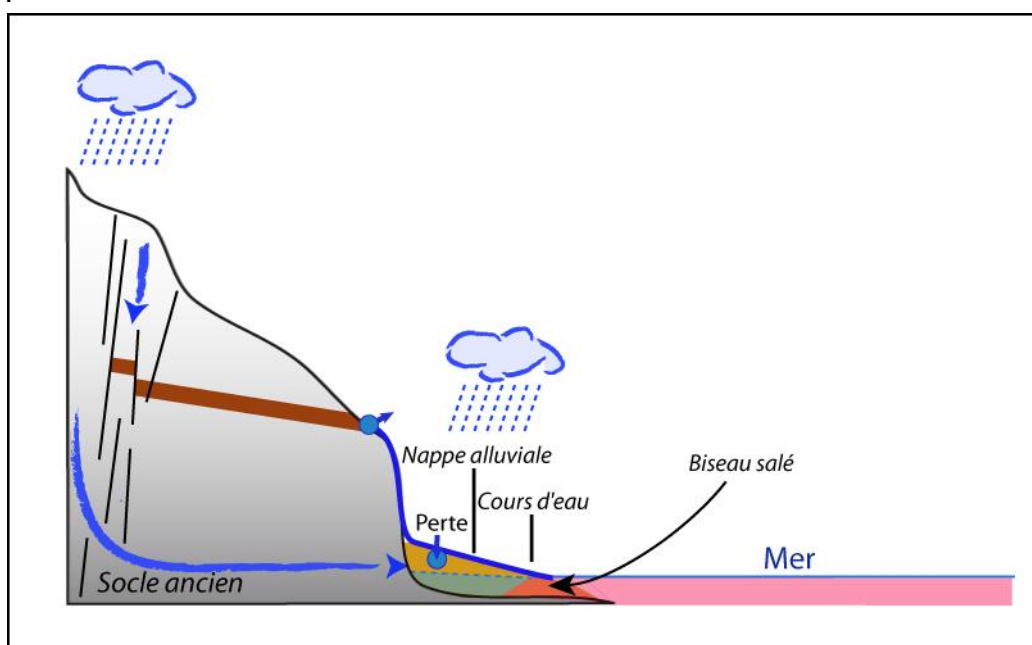


Figure 33 : Modèle conceptuel schématique de fonctionnement des nappes alluviales côtières de l'île d'Anjouan.

V. Les aquifères de coulée de vallée

Aucune analyse chimique n'a été réalisée sur de l'eau prélevée au niveau des sources drainant ce type d'aquifère. Seules ont été effectuées des mesures physico-chimiques au niveau de la source de Ziarani à Patsy, dont une partie du débit est captée par l'usine Coca-Cola proche. Ce type d'aquifère (cf. Figure 8), qui se rapproche de celui d'une coulée fracturée de type Pahoehoe (cf. Figure 13), pourrait constituer une ressource intéressante, d'autant que la base de ce type de coulée (déposée après une phase d'érosion) recouvre des dépôts alluviaux fluviatiles présentant une perméabilité d'interstices avec généralement de bonnes propriétés aquifères. Dans le cas de la source de Patsy, lors de notre visite, l'ensemble du lit du cours d'eau était à sec jusqu'à l'extrémité aval de la coulée où un débit d'eau important s'écoulait d'une émergence située à sa base, suivant le schéma présenté en Figure 34. Ce principe de fonctionnement hydrogéologique est comparable à celui d'une des plus célèbres sources volcaniques Française, la source de Volvic.

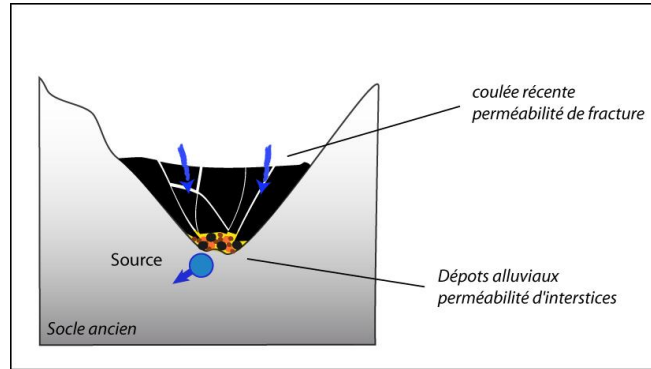


Figure 34 : Contexte d'émergence des sources drainant les coulées volcaniques remplissant les vallées.

3. Discussion de l'impact de la déforestation sur les ressources en eau

Maintenant qu'un modèle du fonctionnement hydrogéologique de l'île d'Anjouan a été établi, la suite de ce document va s'attacher à répondre à la question de connaître l'impact de la déforestation sur le tarissement observé sur l'île d'Anjouan. Il s'agit bien de débits observés et non mesurés. Le fait qu'aucune mesure ni donnée ne permette de quantifier objectivement ce tarissement pose deux problèmes :

- le premier questionne sur la réalité même de ce tarissement. Sans vouloir remettre en cause la bonne foi du peuple anjouanais, la mémoire humaine a souvent montré des biais ou déformations dans l'estimation de l'évolution des phénomènes naturels. Cela est d'autant plus marqué lorsqu'ils s'étalent sur d'importantes périodes de temps, notamment lorsque ces dernières dépassent ou approchent l'échelle d'une vie humaine. Cependant, concernant le cas d'Anjouan, les témoignages étant tellement nombreux (voire généralisés dans toutes les couches de la société) et les récits relatant des évolutions tellement bien décrits sur le terrain, qu'il paraît difficile de mettre en doute qu'une amplification du tarissement des cours d'eau existe durant la saison sèche.
- le second, plus ennuyeux, concerne l'absence de quantification du phénomène. Le travail revient à rechercher les causes d'un phénomène qui n'a été ni caractérisé ni quantifié. En effet, nous n'avons aucune idée de l'ampleur de ce tarissement. Ceci rend donc plus difficile la recherche des causes, car leur effet potentiel ne pourra pas être comparée à un état de référence. La non connaissance de l'amplitude du phénomène en lui-même ne permettra pas, entre autres, d'évaluer par exemple si ce tarissement est multi-causal ou s'il a une origine unique.

A. ETAT DE L'ART

1. Connaissances sur les effets de la déforestation sur la ressource en eau

Il n'y a actuellement pas de consensus scientifique sur les effets de la déforestation ou du reboisement sur les ressources en eau aussi bien d'un point de vue quantitatif que qualitatif. Lorsque l'on s'intéresse à la littérature sur le sujet, il apparaît que l'impact de la déforestation sur la ressource en eau est un débat qui anime la communauté scientifique depuis de nombreuses années (*Andréassian, 2004*). Un certain nombre d'idées reçues ont perduré durant de nombreuses années et sont encore aujourd'hui présentes dans l'inconscient collectif. C'est le cas par exemple du rôle « d'éponge » joué par la forêt, par l'intermédiaire des racines des arbres, associé à la litière forestière et au sol (*Bruijnzeel, 2004*). *Ainsi il avait été suggéré qu'en période d'étiage, les racines libéraient de l'eau après l'avoir stockée durant les phases plus humides.* Les études récentes montrent que cette vision est erronée et que les racines devraient être comparées à une pompe plutôt qu'à une éponge, les racines participant toujours à retirer l'eau du sol durant la saison sèche.

Inversement une tendance actuelle, sans doute née par opposition au discours précédent, vise à exagérer et mettre en lumière les aspects « négatifs » de la forêt (ou plutôt sa

capacité limitée) en ce qui concerne, par exemple, l'écrêtement des crues ou son effet positif sur la qualité de l'eau.

Aujourd'hui, il est généralement admis que la déforestation réduit l'évapotranspiration et augmente le ruissellement, donc le débit des rivières au détriment de l'infiltration vers les nappes. L'ensemble de ces mécanismes a pour effet d'augmenter les processus d'érosion (Coe et al., 2011). Certains auteurs ont mesuré, en Amazonie, une augmentation de 25% du débit des cours d'eau suite au déboisement du bassin versant du Tacantins (Costaa et al., 2003). Les auteurs présentant les mesures (Figure 35) montrent une augmentation importante du débit durant le milieu de la saison des pluies et jusqu'à la fin de la saison sèche. La période durant laquelle le cours d'eau voit son débit le moins varier est la fin de la saison sèche. Les auteurs attribuent ces modifications aux effets de la déforestation sur le sol et ses propriétés hydrauliques.

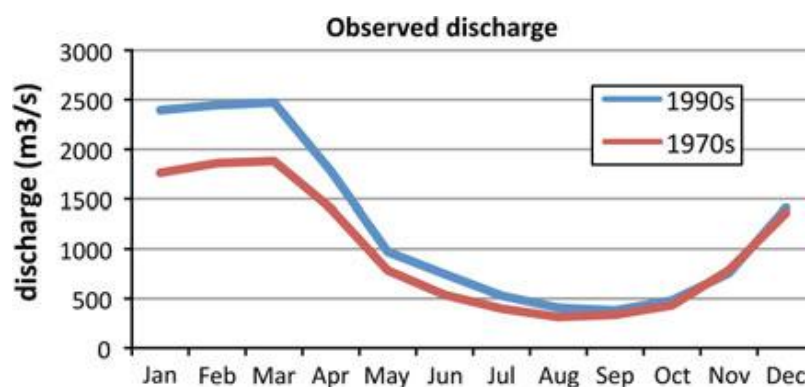


Figure 35 : Evolution du débit de l'Aruana en Amazonie entre les années 70 (avant déforestation) et les années 90 (après déforestation) (Coe et al., 2011).

Ceci fait apparaître la nécessité de distinguer les effets liés à l'évolution de la couverture forestière de ceux liés à l'évolution de la capacité de stockage du sol, ce qui n'est pas toujours facile. La Figure 36 illustre l'interrelation entre la forêt et les eaux souterraines ainsi que les effets (positifs comme négatifs), en termes quantitatifs, que cette dernière peut avoir sur la quantité d'eau qui atteint la nappe souterraine. En effet, une interception importante liée à une canopée dense peut réduire considérablement le ruissellement de l'eau sur la végétation et la quantité d'eau qui atteindra le sol (Brauman et al., 2010). Une canopée dense, suivant les espèces de boisement considérées, peut également augmenter l'évapotranspiration et avoir un impact très négatif sur l'eau transitant dans le sol. Inversement, le milieu forestier va maintenir une certaine perméabilité du sol et ainsi favoriser l'infiltration par rapport au ruissellement. Dans le même ordre d'idée, certains auteurs montrent que l'agroforesterie a un effet positif sur l'infiltration de l'eau dans le sol (Ilstedt et al., 2007). Cependant, il paraît difficile de dégager des règles tant les espèces végétales et les conditions des travaux présentés sont variables.

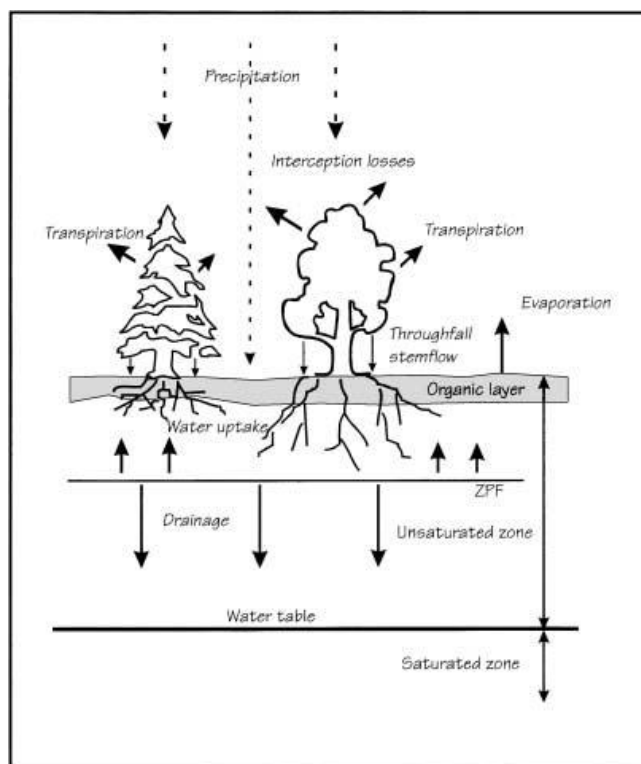


Figure 36 : Relation entre la forêt et le bilan hydrogéologique (Allen et Chapman, 2001)

Il ne faut pas oublier le climat qui va fortement nuancer le rôle de la forêt par son effet sur le type de végétation, le type de sol et la répartition des précipitations. Ainsi, la déforestation pourra avoir des effets totalement opposés suivant que l'on se trouve en zone tempérée ou dans la zone intertropicale.

En ce qui concerne l'effet même de la forêt sur la quantité de précipitations, les travaux consultés semblent montrer que, dans le cas d'un milieu tropical océanique, d'autres paramètres semblent avoir plus d'influence sur la quantité de précipitations. Il s'agit notamment de la température de la surface de la mer (SST Sea-Surface Temperature) (Shukla, 1998).

Pour terminer cette revue rapide des questionnements scientifiques liés à l'impact de la forêt sur la ressource en eau nous citerons Bubb et al. (2004) qui affirme que l'impact hydrogéologique positif des bassins versants boisés est souvent exagéré. Les auteurs de ces travaux font cependant remarquer qu'un type de forêt contribue effectivement à accroître les disponibilités en eau, il s'agit de la forêt de nuages, dont nous avons mentionné l'existence sur Anjouan au début de ce rapport.

II. Fonctionnement d'une forêt de nuages ou de brouillard

Les forêts de nuages se forment sur les sommets, les versants et les crêtes de montagne qui baignent souvent dans les brouillards (Bubb et al., 2004). La contribution des forêts de nuages représente généralement 5 à 20% des précipitations en région tropicale humide (Bruijnzeel, 2004), ajoutant ainsi des centaines de millimètres d'eau par an à l'écosystème et son bassin versant (Bruijnzeel et Hamilton, 2000), comme présenté dans le Tableau 2. Les mêmes auteurs font remarquer que, durant la saison sèche, l'apport d'eau par interception peut dépasser l'apport lié aux précipitations. L'approvisionnement régulier en eau potable

toute l'année qu'assurent les forêts de brouillard *est vital pour de nombreuses communautés montagnardes et villes de plaine (Bubb et al., 2004).*

Tableau 2 : Quantification de l'apport d'eau des forêts de nuage dans différents secteurs géographiques du globe, et période principale de cet apport (FAO, 2009).

Lieu	Altitude (m)	Précipitations horizontales (% du volume des précipitations)	Période
Colombie, Serrania de Maquira	865	63	saison sèche
Costa Rica, Cerro Buenavista	3 500	18	annuelle
Costa Rica, Balalaica	1 300	33	annuelle
Costa Rica, Balalaica	1 300	15	saison des pluies
Hawaï, Mauna Loa	1 580	30	annuelle
Hawaï, Mauna Loa	2 530	68	annuelle
Malaisie, Gunung Silam	884	9	annuelle
Mexique, Sierra Madre	1 330	15	saison des pluies
Mexique, Sierra Madre	1 330	85	saison sèche
Porto Rico, Pico del Oeste	1 050	7	annuelle
Venezuela, Cerro Santa Ana	815	32	annuelle
Venezuela, Cerro Santa Ana	815	66	saison sèche
Venezuela, Cerro Copey	987	11	annuelle
Venezuela, Cerro Copey	987	9	saison sèche
Venezuela, Zumbador	3 100	4	annuelle
Venezuela, Zumbador	3 100	19	saison sèche

Source: Nik, 1996.

L'apport d'eau supplémentaire, décrit dans le cas des forêts de nuages, provient de l'humidité des brouillards qui se déplacent horizontalement. Cet apport par « captation » s'ajoute aux précipitations verticales normales. *Les arbres des forêts de nuages sont généralement moins grands que ceux des forêts montagneuses de moindre altitude, beaucoup plus hygrophiles et davantage chargés de broméliacées, d'orchidées, de fougères, de lichens et d'hépatiques (plantes épiphytes¹²)(Photo 9)(Bubb et al., 2004).* Les branches des arbres deviennent également plus tortueuses avec l'altitude.

¹²C'est-à-dire qui se développent à la surface d'autres plantes.



Photo 9 : Arbre de la forêt de nuages de l'île d'Anjouan, présentant toutes les caractéristiques pour une interception optimale des gouttelettes de Brouillard, Dindi Dzamoe, Outsa

Cet ensemble végétal fait office de «filet hydrophile » et permet la captation des précipitations horizontales qui viennent s'ajouter au bilan hydroclimatique sous forme de gouttes qui tombent des branches ou qui s'écoulent le long des troncs (Photo 9).

La formation des nuages qui s'accrochent aux reliefs et sont la cause de ce type de biotope est conditionnée par l'humidité et la température de l'air. Ces paramètres déterminent le point de condensation de la masse d'air considérée. La masse d'air océanique s'élève sous l'effet de sa rencontre avec un relief (« uplift »). Ce changement d'altitude produit un refroidissement et, lorsque le point de condensation est atteint, les nuages se forment le long du relief. Plus un relief est éloigné de l'océan, plus la masse d'air qui l'atteint va être sèche et plus la base de formation des nuages va être élevée. C'est ce qu'illustre la Figure 37.

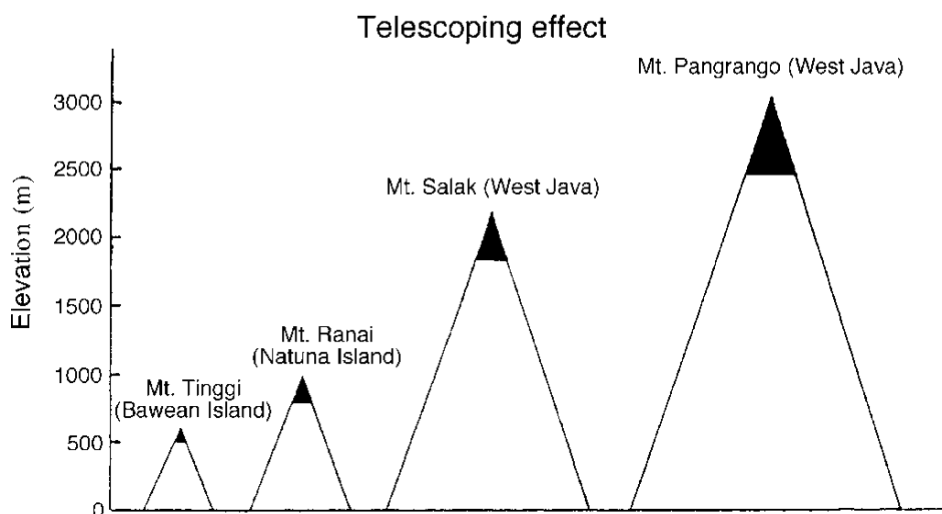


Figure 37 : Illustration de l'influence des caractéristiques géographiques du territoire considéré sur l'altitude de formation de la base des nuages : « Telescoping effect » (Bruijnzeel et Hamilton, 2000).

Il est important de noter que suivant l'orientation des versants, les gradients de température locaux et les vents dominants, certains secteurs d'une même île seront plus favorables à l'apparition de ce biotope (Bruijnzeel et Hamilton, 2000).

Du point de vue du bilan hydrogéologique, les forêts de ce type se caractérisent par une évapotranspiration réduite. Par ailleurs, la petite taille des feuilles et le fait que les sols sont souvent humides et gorgés d'eau, limitent cette catégorie de perte.

B. CAS DE L'ILE D'ANJOUAN

I. Données disponibles

a) La forêt et la déforestation

Astudillo (2012) rapporte que les auteurs cités dans le rapport du Ministère du Développement Rural, de la Pêche de L'artisanat et de L'Environnement (2006) estiment que entre 1974 et 1985 la forêt primaire d'Anjouan s'est réduite de 6800ha à 874 ha avec un taux de déboisement de 74%. La FAO estime en 2011 qu'il ne reste que 436 ha de forêt primaire sur l'île d'Anjouan. Nous entendons par forêt primaire une forêt intacte (ou originelle), et à haut degré de naturalité qui n'a donc jamais été ni exploitée, ni fragmentée ni directement ou manifestement influencée par l'homme¹³.

Il est important de préciser ce point car, lorsque l'on visite l'île d'Anjouan, le paysage ne laisse pas présager les taux de déforestation annoncés ci-avant. En effet, il existe encore une importante surface boisée sur Anjouan et, mis à part au niveau du plateau de Koni Djojooù l'on observe une absence totale de zone forestière, on ne trouve pas de surface complètement exempte de boisement comme il est possible, par exemple, d'en observer à Madagascar (dans des régions où, il y a peu, existait une forêt tropicale humide ancienne). Le plus souvent, la forêt a été remplacée par des plantations de girofliers, de cocotiers et d'arbres fruitiers ou encore par des zones partiellement déforestées, utilisées pour planter du taro et des bananiers. Ce maintien relatif d'un couvert végétal semble préserver l'île d'Anjouan d'une importante dégradation des sols.

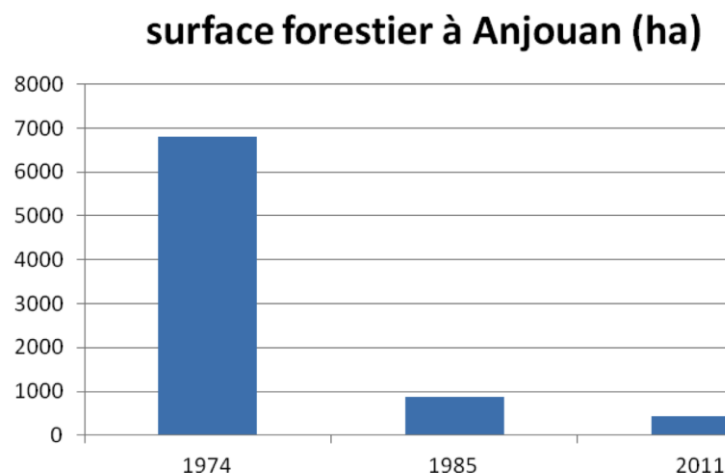


Figure 38 : Evolution de la surface de forêt « naturelle » à Anjouan en 1974, 1985 et 2011 (Astudillo, 2012)

¹³http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=For%C3%AAt_primaires&oldid=84580066

Trois pratiques sont principalement à l'origine de cette déforestation. La première concerne les habitudes de culture des villageois qui se déplacent toujours plus haut dans la montagne (Photo 10) et déboisent la forêt primaire en altitude pour réaliser leurs cultures de bananiers et de taro. Ce déboisement se fait en deux phases d'abord un débroussaillage de la végétation sous les grands arbres pour l'agroforesterie puis la coupe des grands arbres pour une utilisation en bois d'oeuvre. Cette pratique a plusieurs causes que nous ne développerons pas ici.



Photo 10 : Plantation récente de bananiers dans une zone déforestée extrêmement escarpée

La troisième est spécifique à Anjouan. L'île est un haut lieu de production mondiale d'huile d'Ylang-Ylang, qui se fait par distillation. Les alambics utilisés sont traditionnels (Photo 11) et fonctionnent au bois. L'alimentation des nombreuses distilleries en bois de chauffe est donc la seconde cause de la déforestation historique de l'île.



Photo 11 : A gauche :Fleur d'Ylang-Ylang ; Au centre : Alambic traditionnel ; A droite : Stock de bois de chauffe au premier plan avec l'alambic à l'arrière plan.

b) L'eau

Concernant l'eau, peu de données sont disponibles, mises à part les données décrites au §2.C. Cet état de fait nous confronte aux difficultés décrites au début de ce chapitre sur l'impact de la déforestation. Des données quantifiées sur le long terme n'étant pas disponibles, il faut user de « stratagèmes » pour tenter d'apprécier le phénomène de tarissement décrit par la population d'Anjouan. C'est la manière dont a procédé *Astudillo en 2012*. Il a comparé la mention qui est faite des cours d'eau (permanents et temporaires) sur les cartes topographiques de 1955 et de 1973 (Figure 39), en y associant des données citées dans la bibliographie.

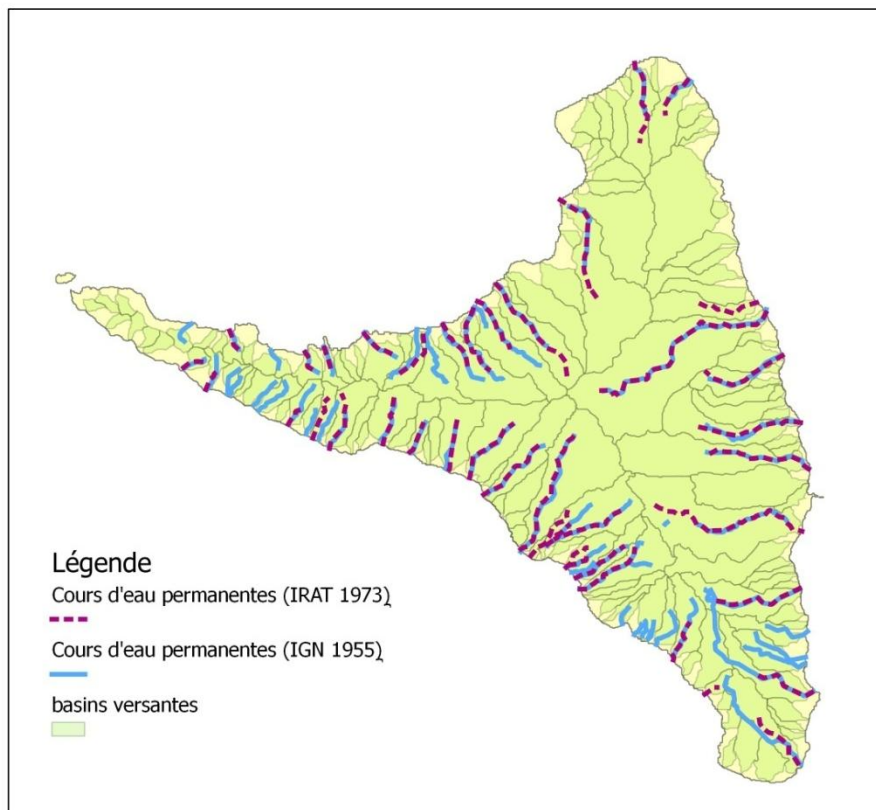


Figure 39 : Comparaison du caractère permanent des cours d'eau entre 1955 et 1973 (Astudillo, M. F., 2012)

Astudillo (2012) montre ainsi que le nombre de cours d'eau permanents, c'est-à-dire qui ne se tarissent pas en saison sèche, est passé de 40 à 19 entre 1950 et 2000.

II. Impact de la déforestation

En 2004, l'organisation des Nations-Unies pour l'alimentation et l'agriculture (F.A.O) identifie et confirme clairement l'existence d'une forêt de nuages sur l'île d'Anjouan à partir d'une certaine altitude qu'il reste à préciser en fonction des versants de l'île. Étant donné le schéma présenté en Figure 37, ce type de forêt a pu se développer à basse altitude sur cette île. Cette forêt de nuages est un exemple de forêt primaire dont nous avons décrit la dégradation au paragraphe précédent. On peut donc malheureusement considérer que la forêt de nuages a quasiment disparu sur Anjouan, surtout si l'on ramène la surface restante au degré de couverture des bassins versants délimités en 2012 (Figure 39). Quelle va être l'impact hydrogéologique de cette mutation de la couverture forestière ? Car il s'agit bien d'une

mutation et non d'une disparition. Comme nous l'avons décrit plus haut, la forêt primaire a été convertie en zones de culture et de plantations qui maintiennent un certain couvert forestier, ce boisement garanti la stabilité des sols et semble les maintenir dans un état hydrique correct. Cependant cela ne semble pas suffire...

En effet, il y a un faisceau croissant d'indices qui montrent, par exemple, qu'en Amérique latine, la destruction de la forêt de nuages a induit une chute des débits durant la saison sèche (Bruijnzeel, 2004). Le Tableau 2 illustre l'impact que peut avoir la disparition des forêts de nuages. Dans les zones où ce type d'écosystème disparaît, et cela semble être le cas d'Anjouan, le gain d'infiltration d'eau supplémentaire est perdu. Aucune recherche approfondie n'a malheureusement correctement quantifié la réduction du volume d'eau résultant de ce type de déboisement (Bruijnzeel, 2005).

Dans le cas d'Anjouan la réduction de la surface couverte par la forêt est clairement quantifiée et spatialisée. Par contre, la diminution du débit des cours d'eau n'est quasiment pas documentée. Les témoignages et méthodes indirectes utilisées pour tenter d'évaluer cette diminution montrent qu'elle semble plus marquée durant la saison sèche. Il semblerait également que les épisodes de crues exceptionnelles durant la saison des pluies soient plus fréquents. Mais encore une fois, concernant ce point, les données manquent ...

Foster (2001) propose de différencier trois situations correspondant à trois écosystèmes différents. Il schématise ensuite leurs interrelations avec les cycles hydrogéologique et hydrologique (Figure 40) :

- dans le cas de la forêt de nuages, l'interception des précipitations horizontales permet de maintenir un niveau piézométrique haut, ce qui fournit un débit suffisant au cours d'eau en saison sèche. Les propriétés d'infiltration sont bonnes, ce qui limite l'apparition de crues par ruissellement. On peut penser que ce fonctionnement était comparable à celui d'Anjouan avant la quasi disparition de la forêt de nuages (Figure 40).
- dans le second écosystème, les espèces végétales ont changé. Dans l'étude de Foster (2001), ce changement est lié au changement climatique. Dans le cas de l'île d'Anjouan, l'évolution des essences est d'origine anthropique¹⁴. La situation décrite comme un biotope de forêt de montagne peut être comparée, à Anjouan, aux zones d'altitude intermédiaire couvertes de girofliers. Dans ce cas, l'interception horizontale de l'humidité n'existe plus ou devient négligeable car les nouvelles espèces végétales ne permettent pas ce type de mécanisme. Ce déficit est accentué par l'évapotranspiration qui devient plus importante. Cette nouvelle situation induit une chute du taux d'humidité dans le sol et, par conséquent, de l'alimentation des eaux souterraines. Les faibles réserves ainsi constituées ne suffisent plus pour soutenir un débit d'étiage en saison sèche et les cours d'eau deviennent temporaires. Ajouté à ceci, l'assèchement de la partie supérieure du sol favorise l'imperméabilisation de la couche superficielle des sols et donc la survenue de crues par ruissellement (Figure 40).
- Dans le dernier écosystème cette fois, plus aucun couvert végétal n'existe. Foster (2001) montre que dans ce cas, contrairement à ce à quoi l'on pourrait s'attendre, la situation est moins défavorable pour le soutien des débits en période d'étiage que le

¹⁴C'est-à-dire attribuable à l'action humaine.

cas présenté précédemment. En effet, l'absence d'évapotranspiration permet le maintien d'une réserve d'humidité dans le sol en saison sèche (Figure 40). Ce dernier cas toutefois est à nuancer car, même si à court terme l'effet semble bénéfique sur la réserve en eau, la dégradation des sols liée à l'absence de végétation aura des conséquences très dommageables sur le long terme. L'effet sur les eaux souterraines risque d'être beaucoup plus négatif que dans le second écosystème décrit.

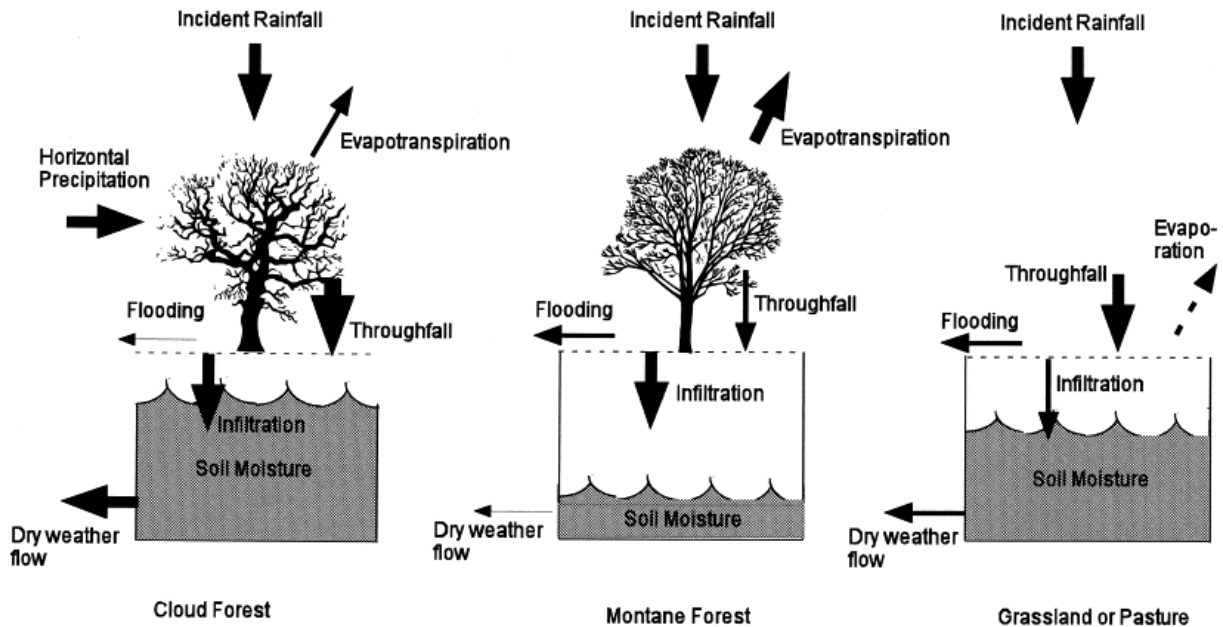


Figure 40 : Impact de la déforestation ou de l'évolution des essences sur le fonctionnement hydrologique et hydrogéologique (Foster, 2001).

Les mutations observées à Anjouan semblent donc être en accord avec l'évolution présentée par Foster (2001) lorsque le couvert végétal passe d'une forêt de nuage à un biotope anthropisé avec des espèces ne présentant pas de bonnes propriétés d'interception des gouttelettes d'eau. **Les dégradations imposées à la forêt d'Anjouan peuvent donc, si l'on considère les données dont nous disposons, expliquer les modifications observées dans le régime hydraulique des cours d'eau depuis les années 50. Comme le fait remarquer Foster (2001), ce schéma démontre les services rendus à l'eau par la forêt de nuage en conservant des débits importants à l'étiage durant la saison sèche et en prévenant les crues, deux points qui font actuellement défaut sur l'île d'Anjouan.** Cependant l'origine de ces évolutions récentes peut-être multifactorielle aussi d'autres facteurs ne peuvent être écartés et doivent être pris en compte étant donné qu'ils sont susceptibles d'aggraver encore la situation dans le futur.

III. Facteur aggravants

a) Le changement climatique

L'impact du changement climatique peut se manifester sous deux formes principales. La première concerne la modification du régime des précipitations. Les études récentes montrent que ça semble être le cas sur les Comores avec un déficit de précipitation régulier depuis les années 2000 (Figure 41). Dans la zone intertropicale de l'hémisphère nord depuis les années 1950-60, un déficit pluviométrique est observé, ceci a fait l'objet d'un colloque en

1998 à Abidjan intitulé « Variabilité des ressources en eau au XXe siècle en Afrique ». Il ne serait pas étonnant d'observer le même phénomène dans la zone intertropicale de l'hémisphère sud. Des travaux présentés en 1998 au cours de ce colloque par Gombert concluent que la baisse pluriannuelle de débit de 32% des sources parmi les plus grosses d'Afrique de l'ouest ($2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) était surtout due à la baisse des précipitations efficaces (d'origine climatique) sans pouvoir chiffrer l'impact de la pression anthropique qui a induit une disparition la savane arborée au profit des cultures.

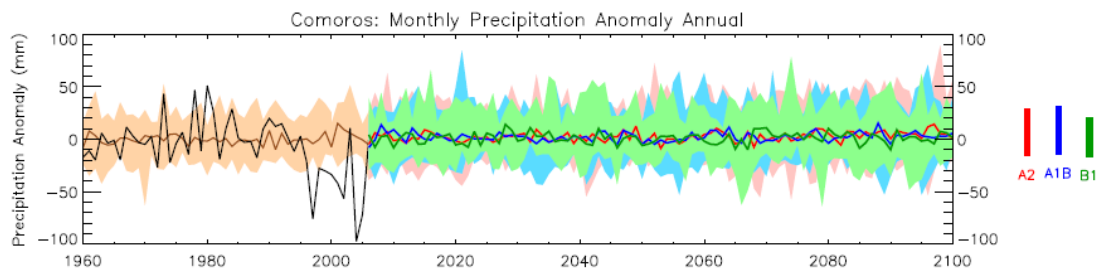


Figure 41 :Comores, anomalie de la précipitation mensuelle, annuelle, (Mc Sweeney et al., 2006)

Sur le plus long terme cette fois un changement de climat notable peut être à l'origine d'une mutation des espèces et induire les effets décrits au paragraphe précédent.

Il paraît difficile d'expliquer l'évolution observée ces cinquante dernières années sur Anjouan par ces deux mécanismes. En effet, le déficit pluviométrique semble récent et donc postérieur aux principales modifications du régime hydraulique des cours d'eau. Concernant l'évolution naturelle des espèces, il est certain qu'il y a eu une évolution, mais que cette évolution est principalement d'origine anthropique.

Cependant, si ces facteurs ne semblent pas à l'origine du tarissement des ressources en eau d'Anjouan, il convient de ne pas les négliger car ils pourraient dans le futur aggraver la situation.

b) La surpopulation

La surpopulation sur Anjouan va avoir une action indirecte sur la ressource en eau. Par contre, l'évolution galopante de la population sans évolution des installations et réseaux de distribution d'eau peut induire un ressenti de « manque d'eau » et faire naître l'idée d'un tarissement dans l'inconscient collectif.

En effet, il sera à l'avenir nécessaire de le quantifier de manière plus exacte, mais la ressource en eau semble suffisante à Anjouan même si la densité de population est très importante. C'est la gestion de cette ressource en eau qui est défailante et qui doit être améliorée. Beaucoup de réseaux de distribution sont anciens et n'ont pas évolué en même temps que l'augmentation exponentielle de la population, le dimensionnement des réseaux n'est donc probablement plus adapté.

Une situation viable il y a une dizaine d'années, avec des villages s'alimentant de manière gravitaire à partir d'un même cours d'eau, n'est plus possible aujourd'hui du fait de l'augmentation de population car les villages à l'amont prélèvent la majorité du débit du cours d'eau en saison sèche. Ce type de situation participe à la mise en place d'une idée de « tarissement de la ressource en eau ». De la même façon, un réseau sous-dimensionné ou mal entretenu induira un manque : encore une fois, ce n'est pas la ressource qui manque mais la demande qui a augmenté et le système de distribution qui n'est plus adapté à cette nouvelle demande.

IV. Sensibilité à la déforestation suivant le type d'aquifère et les différentes régions de l'île

Les différents types d'aquifères mis en évidence plus en avant dans ce rapport ont des modalités de fonctionnement et de recharge qui impliquent une sensibilité et une évolution différentes par rapport à la déforestation comme l'avait déjà supposé *Gombert en 1998*.

Ainsi, l'aquifère principal peut voir encore dans les années à venir sa recharge diminuer si la déforestation se poursuit, le sommet de l'île qui participe à son alimentation n'étant pas encore complètement déforesté. Il est à l'heure actuelle impossible de quantifier ces mécanismes et leur évolution future.

Concernant les aquifères perchés investigués durant cette étude, la plupart de leurs bassins versants sont déforestés depuis longtemps. La principale diminution de débit des sources et cours d'eau alimentés par ces aquifères a dû se faire au cours des décennies précédentes au moment de leur déforestation. On peut donc considérer qu'un nouveau fonctionnement s'est mis en place et que le débit de ces sources devrait donc maintenant être stabilisé.

Cependant Il est important de noter qu'un reboisement de ces zones déforestées avec des espèces végétales provoquant une forte évapotranspiration peu encore réduire la tranche d'eau qui s'infiltré vers l'aquifère et donc provoquer une nouvelle diminution de la ressource. Il est ainsi possible que, dans certains secteurs de l'île, une augmentation de l'évapotranspiration liée aux plantations denses de girofliers s'ajoute au déficit d'infiltration provoqué par la disparition de la forêt de nuage (Figure 40 et Photo 12).



Photo 12 : Plantations de girofliers sur la presqu'île de Niuafooua

4. Ressources en eau des villages d'intervention du projet ECDD

Le projet ECDD cible son action sur un certain nombre de villages de l'île d'Anjouan. Nous allons maintenant nous attacher à décrire les aquifères exploités ainsi que le réseau de distribution mis en place dans chacun de ces villages. Ceci pourra constituer une base de travail afin de planifier une meilleure gestion des ressources en eau pour chacun d'eux.

A. NINDRI

I. Infrastructures d'alimentation en eau

Le village de Nindri est alimenté uniquement par des eaux d'origine superficielle. Le captage de Machelele se situe dans la vallée de Chindrini. Le captage alimente deux réservoirs situés à l'amont du village, d'où partent les conduites qui alimentent en eau ce dernier.

Le captage dévie une partie du cours d'eau, à l'aide d'un petit barrage, dans un canal couvert fortement ensablé. Ce canal débouche sur un réservoir tampon d'où partent les conduites qui alimentent le village. Ce captage a été réaménagé début 2012, cependant les événements pluvieux de mai et juin 2012 ont induit un ensablement important qui, lors de notre visite, devenait critique.

II. Analyse de la ressource en eau

Le captage de Machelele qui alimente en eau le village de Nindri possède le bassin versant le moins dégradé des zones d'intervention du projet ECDD. Contrairement à d'autres cours d'eau de l'île, il est probable que la déforestation ait encore un impact possible à l'avenir sur cette ressource. En effet, la forêt de nuages est encore bien présente sur le bassin versant et explique l'absence d'étiage sévère du cours d'eau capté. L'amont du cours d'eau, qui n'a pas été visité, est certainement alimenté par des sources drainant l'aquifère principal à différentes altitudes. Le bassin versant doit globalement correspondre à celui dessiné par *Astudillo (2012)* avec une participation de l'aquifère principal à son alimentation.

B. OUZINI ET SALAMANI

I. Infrastructures d'alimentation en eau

Le Village d'Ouzini est alimenté par deux captages Magouni et Agobi qui récoltent à la fois l'eau en provenance d'écoulements superficiels et de sources. Le second a été détruit par un glissement de terrain lié à un événement pluvieux exceptionnel en mai 2012. Ces deux captages alimentent un même réservoir situé en amont du village d'Ouzini. Deux conduites en partent pour alimenter le village d'Ouzini et le village de Salamani situés environ 400 m plus bas dans la vallée.

II. Analyse de la ressource en eau.

Le captage de Magouni draine une source située en bordure de plateau. La source se situe dans le lit d'un ruisseau temporaire qui draine un ancien cône volcanique. Elle correspond typiquement au cas d'un aquifère perché en partie alimenté par une source de l'aquifère principal. La surface de l'aquifère perché est occupée par une zone de culture intense et d'élevage. Ce type de configuration est très sensible aux possibles contaminations d'origine anthropique, comme en témoignent les concentrations en nitrates mesurés au niveau de ce captage. En effet, lors de son écoulement en surface, l'eau issue de l'aquifère principal se perd ensuite dans les niveaux scoriacés perméables. Ce passage à l'air libre expose l'aquifère à une possible contamination.

Le captage d'Agobi capte un cours d'eau qui s'écoule de la bordure du plateau. Cette fois c'est directement l'aquifère principal qui est capté. L'eau ne transite pas par un aquifère perché. Cette ressource est donc beaucoup moins sensible du point de vue de l'impact anthropique que le captage de Magouni.

Les bassins versant de ces captages sont difficiles à délimiter étant donné qu'ils sont connectés à l'aquifère principal. Cependant des zones de sensibilité accrue vis-à-vis des pollutions pourraient être délimitées notamment pour celui de Magouni. Cette zone correspond au bassin délimité par Astudillo (2012).

C. OUTSA

I. Infrastructures d'alimentation en eau

Le village d'Outsa est actuellement alimenté par un seul captage situé au lieu dit Dindi Mtseà quelques centaines de mètres du village en direction du nord. Une conduite part de ce captage pour alimenter un réservoir proche du village. Initialement une source située quelques mètres à l'aval du village était également utilisée pour l'alimentation en eau du village. Elle l'est encore aujourd'hui en période de pénurie. Sa position basse par rapport au village ne permet pas une alimentation gravitaire de ce dernier. L'eau est donc transportée dans des bidons, situation observée à plusieurs reprises sur l'île ...



Photo 13 : Fuite d'eau (pas perdue pour tout le monde) sur le réseau d'eau d'Outsa

II. Analyse de la ressource en eau

Les deux points d'eau alimentant Outsa drainent des aquifères perchés selon le schéma présenté Figure 31. La déforestation a dû avoir un impact important sur les ressources en eau de ce village. Les teneurs en nitrates mesurées au niveau de la source illustrent un problème de contamination lié à la forte activité anthropique sur le bassin versant.

Une minéralisation importante de la source de Mromi a été mesurée : elle semble être le résultat du transit de l'eau dans des formations volcaniques récentes très altérée. Cependant des investigations complémentaires et un suivi de cette source permettraient de préciser l'origine de sa signature hydrochimique particulière.

D. ADDA ET SA REGION

I. Infrastructures d'alimentation en eau

La région d'Adda comporte un grand nombre de captages qui alimentent non seulement Adda mais aussi les villages situés plus au sud dans la presqu'île de Nioumakele. Les points d'eau captés sont à la fois des sources et des cours d'eau. L'ensemble de ce réseau complexe mis en place en 1981 par la Chine est en bon état et bien entretenu (Figure 42).

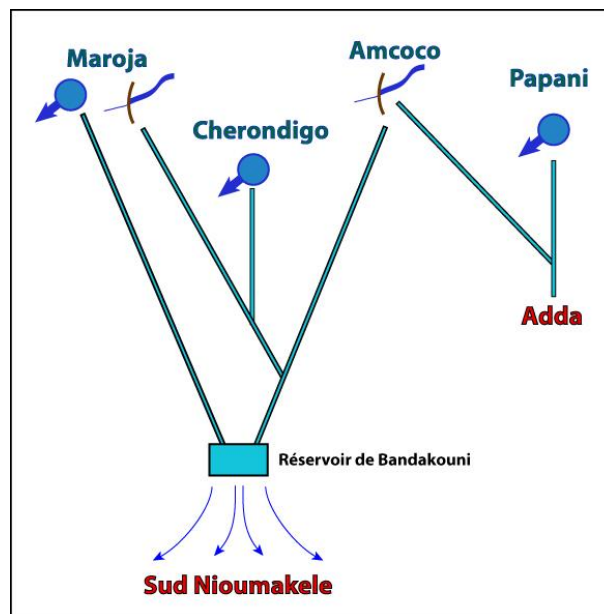


Figure 42 : Réseau de distribution en eau potable de la presqu'île de Nioumakele à partir des sources et cours d'eau de la forêt de Moya à proximité du village d'Adda.

II. Analyse de la ressource en eau

L'origine des eaux captées dans la région d'Adda se partage entre des eaux en provenance de l'aquifère principal (captage de Hamcoco) et d'eau d'origine plus superficielles (source de Papani et sans doute Maroja). Étant donné les données dont nous disposons il est difficile de quantifier les différentes proportions d'eau en provenance de ces deux origines différentes. Une analyse plus approfondie des données de l'UCEA sur ce secteur permettrait sans doute de préciser le fonctionnement des aquifères qui alimente Adda et sa région.

5. Bilan - Proposition d'actions à mettre en œuvre

A. BILAN ET PROBLEMES IDENTIFIES

I. Disponibilité de la ressource

D'un point de vue hydrogéologique et hydrologique, l'île d'Anjouan n'a pour le moment pas de problèmes de ressources en eau (d'un point de vue quantitatif). Les travaux présentés dans ce document ont permis d'identifier les différents types de ressources. Ce travail est une base sur laquelle il va falloir construire une stratégie de gestion. Les travaux réalisés ont montré que certains secteurs de l'île sont plus sensibles que d'autres et que la ressource en eau n'est pas équivalente sur l'ensemble de l'île. Ce point devra être pris en compte dans les stratégies de gestion qui seront mises en place. Il a souvent été noté que c'est probablement la mise à disposition de cette ressource pour les populations qui était défaillante et non forcément son existence.

II. Dimensionnement et entretien des réseaux et installations

La plupart des réseaux visités sont sous-dimensionnés par rapport à la demande de la population. L'entretien des réseaux est souvent défaillant, ce qui limite encore l'efficacité des systèmes existants. Cependant des comités d'eau particulièrement efficaces ont été rencontrés, c'est le cas à Adda où l'ensemble de l'équipe est volontaire et sensibilisée à l'importance de l'entretien du réseau de distribution. Il sera important dans l'avenir de s'appuyer sur ces équipes dynamiques pour mettre en place des actions pilotes de réelle gestion de la ressource en eau.

Aucun dispositif de mesures n'a pu être observé sur les différents réseaux : or, la mesure est la base d'une gestion raisonnée de la ressource, c'est un point qu'il faudra développer à l'avenir.

III. Impact de la déforestation sur la ressource en eau

Nous avons montré que la destruction de la forêt primaire a probablement induit un déficit d'apports vers les eaux souterraines ce qui peut expliquer la baisse du débit des cours d'eau observée en saison sèche. Cependant étant donné le niveau de déforestation atteint et si le boisement « anthropique » reste équivalent, que d'autres paramètres tels que le changement climatique ne viennent pas aggraver la situation (nous avons remarquée une importante variation temporelle de la répartition des précipitations) et que le niveau de dégradation des sols reste le même, on peut supposer qu'un niveau stationnaire est atteint.

Il convient donc maintenant de quantifier cette ressource, de l'analyser en détail et de mettre en place une véritable stratégie de gestion à l'échelle des différents bassins versants. Les mesures récoltées par l'UCEA qui ne montrent pas, pour la source de Daji d'évolutions du débit de basses eaux depuis 2007, tendraient à valider cette stabilisation du régime des cours d'eau. Mais il faut être prudent et il est important de noter que cette analyse serait plus robuste si elle s'appuyait sur une période plus longue et une quantité de données plus importante. Les données récoltées par l'UCEA doivent faire l'objet d'un travail plus approfondi.

B. PROPOSITION D' ACTIONS A METTRE EN PLACE

Nous avons listé ici un certain nombre de propositions d'actions qui pourraient être mises en œuvre sur le court, moyen ou long terme afin d'améliorer les conditions de gestion de l'eau des villages d'intervention du projet ECDD mais également à l'échelle de l'île d'Anjouan.

I. Court et moyen terme : gérer et connaître la ressource

La gestion de la ressource en eau passe obligatoirement par l'acquisition de données. Ces données permettent de maîtriser intégralement le circuit de gestion de l'eau depuis la source exploitée et son bassin versant en passant par le système de distribution, les captages et réseaux jusqu'au consommateur.

a) Gérer la ressource :

Tout d'abord un meilleur entretien des captages et des réseaux doit être réalisé par les comités d'eau, le comité d'eau d'Adda doit servir d'exemple.

Ensuite, la mise en place rapide de sources et bassins versants pilotes associés à un réseau de mesure et de suivi régulier permettrait :

- de préciser les conclusions de ce rapport ;
- d'améliorer la gestion des ressources en eau de l'île et par conséquent les conditions de vie des populations des villages concernés.

Une gestion de l'eau raisonnée passe par la mise en place de mesures de débit au niveau des points d'eau exploités. Pour ce faire, les points d'eau sélectionnés devront être aménagés de manière à ce que tout le débit du point d'eau soit pris en compte dans la mesure. Le type d'aménagement mis en place dépendra de la morphologie et de la topographie des sites choisis. L'objectif est de connaître la quantité d'eau qui s'écoule en une année au point d'eau, de manière à connaître le volume d'eau dont on dispose ainsi que sa répartition au cours de l'année.

Il faut ensuite mettre en place sur les captages un compteur qui va mesurer la quantité d'eau prélevée. Cette mesure est nécessaire pour évaluer si l'on est en situation de sur ou sous exploitation de la ressource mais également pour connaître le volume d'eau qui va être mis à disposition de la population. Sans cette mesure on ne sait pas si le volume prélevé est en cohérence avec le nombre d'habitants qui doivent être alimentés en eau. Ce type de mesures à partir de compteurs devra également être réalisé au niveau de toutes les bornes fontaines de manière à évaluer la consommation de la population et ainsi quantifier les pertes liées aux fuites en différents points du réseau.

Ces différentes mesures permettront ainsi de connaître la ressource disponible par rapport au besoin en eau de la population ainsi que la quantité d'eau perdue. Ce « monitoring » permettra de suivre de manière quantitative l'évolution de la ressource et de quantifier un éventuel tarissement de la ressource, une augmentation de consommation liée à un accroissement de population ou encore de suivre la dégradation du réseau, par l'intermédiaire de l'évolution de la quantité d'eau perdue.

b) Connaître la ressource :

Les ressources en eau de l'île sont très peu, voire pas connues. Toutes les actions visant à améliorer cette connaissance seront donc bénéfiques, nous recommandons donc les actions suivantes :

- le travail d'analyse des données de l'UCEA débuté dans ce rapport doit être poursuivi ;
- l'UCEA doit être encouragé dans sa démarche d'acquisition de données. C'est ce point qui est défaillant sur l'île, les données permettant de caractériser les eaux souterraines manquent ! Toutes les démarches pour palier cette lacune doivent être encouragées ;
- dans un second temps la réalisation d'une nouvelle campagne de prélèvements et de mesures hydrochimiques permettrait de compléter et d'améliorer les interprétations faites ici, qui sont basées sur un petit échantillon de données.

II. Long terme : diversifier et restaurer

Concernant le type d'alimentation en eau, les captages gravitaires ne permettront pas à terme de subvenir aux besoins de la population. Une diversification des ressources exploitées paraît inéluctable. Cette diversification passe par exemple par la mise en place d'une exploitation par forage ou puits de l'aquifère principal ou d'autres types d'aquifère, dans les zones de l'île accessibles et où la topographie permet la réalisation de ce type de travaux.

En ce qui concerne la restauration du couvert forestier, un reboisement pourra être envisagé dans certains secteurs. Une attention particulière devra être portée sur les espèces utilisées. *Bruijnzeel (2004)* décrit des espèces particulièrement efficaces pour la captation des précipitations horizontales. Dans d'autres régions du globe des structures artificielles (filets à mailles très fines) ont également été mises en place pour se substituer à la végétation, c'est le cas sur la cordillère des Andes au Chili et au Pérou. Une présentation de ces dispositifs et de leurs caractéristiques techniques est faite en Annexe 2. Ces travaux devront bien entendu être précédés d'études approfondies de manière à réaliser des aménagements ou reboisements adaptés au contexte local...

Enfin il serait intéressant de quantifier le gain d'infiltration lié à la captation des précipitations horizontales par la forêt d'Anjouan. Certains auteurs (Pryet et al., 2012) ont réalisé des expérimentations destinées à évaluer le gain d'infiltration lié à la forêt de nuage. Une expérimentation de ce type pourrait être mise en place sur Anjouan, dans les zones où ce type de végétation existe encore afin de quantifier le gain de la forêt de nuage sur le taux d'infiltration et ainsi préciser les conclusions de ce rapport.

6. Conclusions

Les investigations de terrains réalisées en août 2012 ainsi que les données extraites de la bibliographie ont permis de poser les bases du fonctionnement hydrogéologique de l'île d'Anjouan. Ces résultats confrontés aux travaux existants sur l'impact de la déforestation sur la ressource en eau permettent d'affirmer ce qui va suivre.

La disparition de la forêt de nuages d'Anjouan et son remplacement par des cultures de cocotiers, de girofliers et de bananiers peuvent expliquer la diminution des débits des cours d'eau observée depuis les années 1950. L'impact hydrogéologique de cette évolution du couvert végétal serait plus marqué durant la saison sèche, ce qui correspond aux faits relatés par les observateurs. Un impact aggravant et concomitant du changement climatique n'est pas à exclure pour expliquer cette diminution des débits.

Certains types de ressources en eau utilisés par les habitants sont plus sensibles à ces évolutions, il s'agit notamment des aquifères non connectés à l'aquifère principal. Ces aquifères présentent également une sensibilité accrue vis-à-vis des activités anthropiques menées sur les bassins-versants. Des investigations complémentaires concernant la qualité de l'eau seraient nécessaires pour mieux appréhender cette problématique mais l'étude présentée ici montre que certaines ressources en eau sont particulièrement exposées à des pollutions possibles, d'origine agricole ou humaine.

Il est important de noter que ces interprétations s'appuient sur un nombre de données limité et que plusieurs d'hypothèses ont été faites afin que ce travail fournisse des réponses aux questions posées et permette ainsi de proposer des perspectives constructives. Les travaux futurs devront dans la mesure du possible palier ces lacunes.

Enfin, j'ose espérer que ce travail participera, même de loin, à améliorer les conditions de vie des Anjouanais et ce, pas seulement en servant de cale stabilisatrice à un meuble instable d'une maison de Mutsamudu... mais que ma petite participation associée aux nombreuses actions de développement menées par le projet ECDD produiront des évolutions positives !



Retour des Kwasa-Kwasa, plage de Domoni ...

Bibliographie

Allen, A. and Chapman, D. (2001) Impacts of afforestation on ground water resources and quality. *Hydrogeology Journal* 9 :390-400.

Andréassian, V., (2004). Waters and Forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*, 291(1-2): 1-27.

Astudillo, M.F., (2012) Cartographie des ressources en eau dans la forêt de Moya Problématiques et priorités d'intervention. Projet ECDD. p 27.

Audru, J.C., Bitri, A., Desprats, J-F., Dominique, P., Eucher, G., Hachim, S., Jossot, O., Mathon, C., Nédellec, J-L., Sabourault, P., Sedan, O., Stollsteiner, P., Terrier-Sedan, M., (2010) Major natural hazards in a tropical volcanic island: A review for Mayotte Island, Comoros archipelago, Indian Ocean. *Engineering Geology* 114 : 364–381

Bertrand, G., Celle-Jeanton, H., Huneau, F., Loock, s., Renac, C., (2010) Identification of different groundwater flowpaths within volcanic aquifers using natural tracers for the evaluation of the influence of lava flows morphology (Argnat basin, Chaîne des Puys, France) *Journal of Hydrology* 391 : 223–234

Brauman, A.K., Freyberg, L.D., Daily, C.G., (2010) Forest structure influences on rainfall partitioning and cloud interception : A comparison of native forest sites in Kona, Hawai'i. *Agriculture Forest Meteorology*, 150 : 265-275.

BRGM,(1994) Hydrochimie des eaux souterraines de l'île de la Réunion. Eaux de sources et eaux de nappes, Bilan et synthèse. 94 REU 49 R 38188 REU SGN 94

Brouwers, M., (1973) Inventaire des terres cultivables et de leurs aptitudes culturales. I.R.A.T. Institut de Recherches Agronomiques Tropicales et des Cultures Vivrières.

Bruijnzeel, L.A. and Hamilton, L.S., (2000) Decision time for cloud forests. UNESCO, IHP Humid Tropics Programme Series NO. 13.

Bruijnzeel, L.A., (2004) Hydrological functions of tropical forests : not seeing the soil for the trees. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 104 : 185-228

Bubb, P., Aldrich, M., and Sayer J., (2002) Les forêts tropicales montagnardes de brouillard - le moment d'agir. FAO - Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Unasyva - No. 208

Coe, t. M., Latrubesse, E.M., Ferreira, M.E., Amsler, M.L., (2011) The effects of deforestation and climate variability on the streamflow of the Araguaia River, Brazil. *Biogeochemistry*. DOI 10.1007/s10533-011-9582-2

Costa, M.H., Botta, A., Cardille, J.A., (2003) Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia, 283 : 206-217.

De St. Ours, J.,(1960) Etude géologique dans l'extrême nord de Madagascar et l'Archipel des Comores. Service Géologique de Madagascar, Tananarive.

Debeuf, D., (2004) *Etude de l'évolution volcano-structurale et magmatique de Mayotte (Archipel des Comores, Océan Indien)(Approches structurale, pétrographique, géochimique et géochronologique)* Thèse, Université de la Réunion, 277 pp.

Dewandel, B., (2010) *Connaissances des aquifères volcaniques –Etat de l'art des caractéristiques hydrodynamiques et du fonctionnement hydrogéologique.* BRGM.

Emerick, C.M. and Duncan, R., (1983). *Age progressive volcanism in the Comore Archipelago, western Indian Ocean and implications for Somali plate tectonics. Errata. Earth and Planetary Sciences Letters 62,439.*

Emerick, C.M. and Duncan, R.A. (1982) *Age progressive volcanism in the Comoro Archipelago, western Indian Ocean and implications for Somali plate tectonics. Earth Planet. Sci. Lett. 60: 415-428.*

Esson, J. Flower, M.F.J., Strong, D.F., Upton, B.G.J. and Wadworth W.J., (1970) *The Geology of the Comores Archipelago. Geol. Mag., p. 547-549.*

Flower, M.F.J. and Strong, D.F., (1969) *The signifiacnce of sandstone inclusions in lavas of the Comores Archipelago. Earth and Planetary Science Letters, 7 :47-50.*

Flower, M.F.J., (1971) *Petrology of Volcanic Rocks from Anjouan, Comores Archipelago. Bull Volc, 36: 238-250.*

Foster, P., (2001) *The potential negative impacts of global climate change on tropical montane cloud forests. Earth-Sciences Reviews 55 : 73-106*

Gingerich, S.B. and Oki, D.S., (2000) *Ground Water in Hawaii, USGS, FS 126-00*

Gingerich, S.B., and Oki, D.S.(2000) *Ground water in Hawaii: U.S. Geological Survey Fact Sheet 126-00, 6 p.*

Gombert P. (1998) - *Evolution du débit d'un important groupe de sources de l'Ouest africain sous l'effet conjugué du déficit pluviométrique et de l'anthropisation de leur aire d'alimentation - Colloque « Variabilité des ressources en eau au XXe siècle en Afrique », ORSTOM-IAHS, Abidjan, novembre 1998, 8 p*

Graviou, P., (2010) *Valorisation du patrimoine géologique de Mayotte : un éventail d'actions complémentaires. BRGM, Géologie de la France, n° 1: 57-63*

Halim, M.A., Majumder, R.K., Nessa, S.A., Hiroshiro, Y., Sasaki, K., Saha, B.B., Saepuloh, A., Jinno, K. (2010) *Evaluation of processes controlling the geochemical constituents in deep groundwater in Bangladesh : Spatial variability on arsenic and boron enrichment. Journal of Hazardous Materials 180 : 50-62.*

Ilstedt, U., Malmer, A., Verbeeten, E., Murdiyaso, D., (2007) *The effect of afforestation on water infiltration in the tropics : A systematic review and meta-analysis. Forest Ecology and Management, 251 :45-51.*

Join J-L., Coudray, J., Longworth, K., (1997) using principal components analysis and Na/Cl ratios to trace groundwater circulation in a volcanic island : the example of Reunion. Journal of Hydrology, 190 : 1-18.

Join J-L., Folio, J-L., Robineau, B., (2005) Aquifers and groundwater within active shield volcanoes. Evolution of conceptual models in the Piton de la Fournaise volcano. Journal of Volcanology and Geothermal Research. 147 :187-201.

Koh, D-C., Ha, K., Lee, K., Yoon, Y-Y., Ko, K-S., (2012) Flow paths and mixing properties of groundwater using hydrochemistry and environmental tracers in the southwestern area of Jeju volcanic island. Journal of Hydrology, 432-433 :61-74.

Lachassagne, P., Maréchal, J.C., (2004) Synthèse des concepts et méthodes de l'hydrogéologie des milieux volcaniques appliqués à la prospection géothermique Rapport final, BRGM/RP-53135-FR.

Lachassagne, P., Maréchal, J.C., (2011) Les ressources en eau souterraine en contexte volcanique insulaire. BRGM, Géosciences, numéro 14.

Loock, S., (2008). Cinématique, déformation et mise en place des laves. Thèse de doctorat de l'Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 220 p.

Marini, D. (1990) Résultats et Interprétations d'une Campagne de Pompages d'Essai sur des Puits dans les Aquifères de Base. Grande Comore / Inventaire des Ressources en eau de Ile d'Anjouan. Direction de la coopération technique pour le développement. COI/79/005 et COI/85/001.

McSweeney, C., New, M., & Lizcano, G. (2006). UNDP Climate change country profile.

Montaggioni, L., and Nougier, J., (1981) Les enclaves de roches détritiques dans les volcans d'Anjouan (Archipel des Comores). Origine et interprétation dans le cadre de l'évolution du canal de Mozambique. Bull. Soc. Géol. France, 6 :595-601.

Nougier, J., Cantagrel, J.M.; Karche, J.P., (1986). The Comore archipelago in the western Indian ocean: volcanology, geochronology and geodynamic setting. Journal of African Earth Sciences 5,135-145.

Pavlovsky, R. and de Saint-Ours, J., (1953) Etude Géologique de l'Archipelago des Comores. Service Géologique, Tananarive, Madagascar, 55pp.

Pryet, A., Diminguez, C., Tomai, F.P., Chaumont, C., D'Ouzouville, N., Villacis, M., Violette, S., (2012) Quantification of cloud water interception along the windward slope of Santa Cruz Island, Galapagos (Ecuador). Agriculture and Forest Meteorology, 161 : 94-106.

Rowland, S.K. and George, P.L.W., (1990) Pahoehoe and aa in Hawaii: volumetric flow rate controls the lava structure. Bulletin of volcanology, 52 : 615-628.

Shukla, J., (1998) Predictability in the Midst of Chaos: A Scientific Basis for Climate Forecasting. Science, 282, 728-731.

Späth, A. Le Roex, A.P., Duncan, R.A., (1996) *The Geochemistry of Lavas from the Comores Archipelago, Western Indian Ocean : Petrogenesis and Mantle Source Region Characteristics. Journal of petrology, 37,4 :961-991.*

Von Straaten, P., (2002) *Rocks for Crops, Agrominerals of sub-Saharan Africa. ICRAF, Nairobi, Kenya, 338 pp.*

Zhu, B., Yang, X., Rioual, P., Qin, X., Liu., Z., Xiong, Z., Yu, J., (2011) *hydrogeochemistry of three watersheds (the erlqis, Zhungarer and yili) in northern Xinjiang, NW China. Applied Geochemistry, 26 : 1535-1548.*

Annexes

Annexe 1 : Récapitulatif des points d'eau visités et des paramètres physico-chimiques mesurés

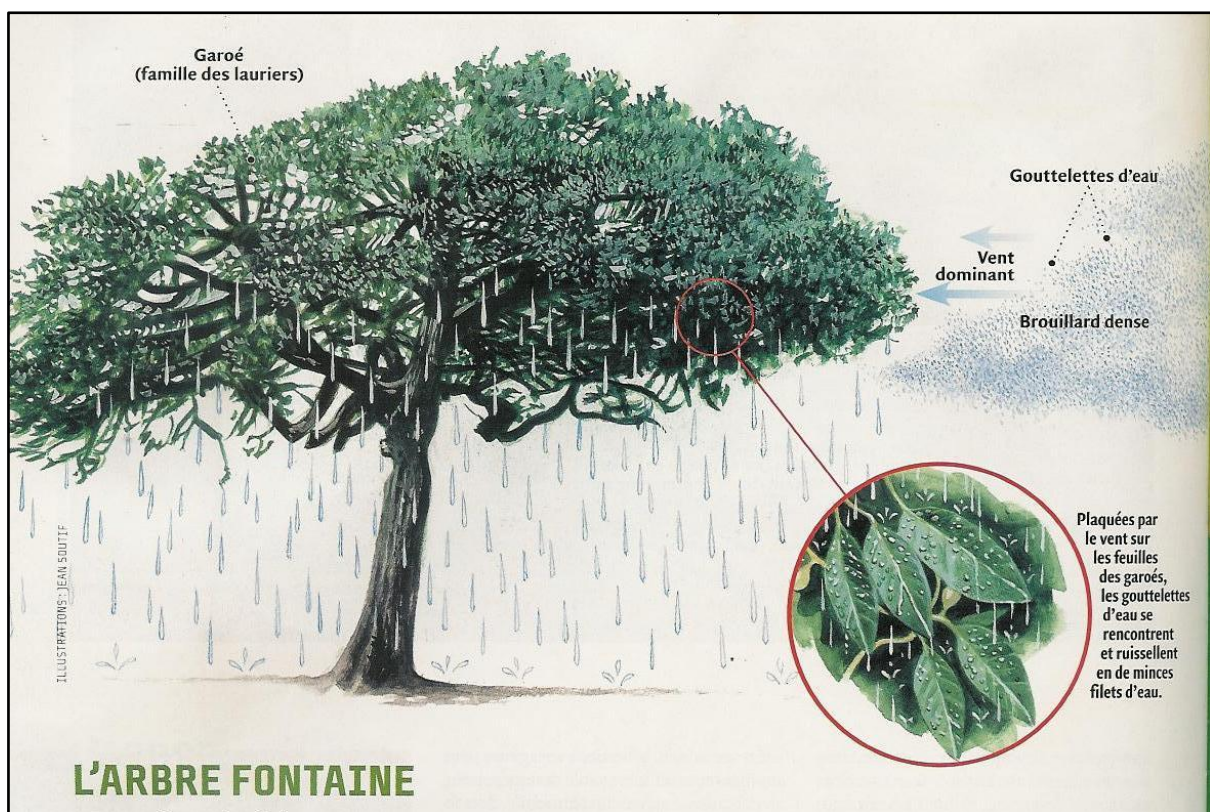
<i>Nom</i>	<i>T°C</i>	<i>X 25°C us.cm-1</i>	<i>ALTITUDE Déterminée cartographiquement</i>	<i>Prélèvement</i>
Captage de Manaopetro	20,5	124,1	320	
Captage de Oungoni	20,9	123,9	400	
Forage Pagé	22,5	120,1	26	
Rivière Pagé	25,3	123,3	26	
Rivière Pagé n°2	25,3	115,3	25	
Ecoulement Sima	25,2	108,5	10	
Source Mabougani SC1	25,3	183,2	10	SC1
Dzidri du bas SC2	22,1	154,8	0	SC2
Captage de Nindri Machelele	21,1	101	205	
Centrale Lingoni	22,1	152,1	232	
Puits n°1 Pomoni	26,1	247,4	15	
Puits n°2 Pomoni	24,2	203,2	15	
Source de Papane	23,3	191,8	0	
Captage Magouni OUZ1	20,6	92,1	815	OUZ1
Magouni amont	21,3	98,4	825	
Captage Agobi OUZ2	22,3	93,41	820	OUZ2
Source de Mromi OUT1	23,1	304,9	690	OUT1
Captage de Outsa Njambo OUT2	20,6	124,7	800	OUT2
Ruisseau cratère	24,4	134,6	753	
Source de Papani	22,3	114,1	790	ADD1
Captage de Hamcoco	18	106	895	ADD2
Captage de Hamcoco n°2	20,5	95,8	950	
Hamcoco n°3	20,4	76,9	950	
Ruisseau de Maroja	20,7	116,2	890	
Captage de Maroja	20	107,7	870	
Source du col de Moya	20,9	50,9	880	
Source Hayja	22,2	85	800	
Zone de sources de Cherondigo	21,7	63,2	835	
Captage Daji DAJ	21,4	81,2	671	DAJ
Captage Ambagé	20,8	94,5	715	
Cratère Dzialaoutsounga	19,9	92,4	712	
Source Koni Djojo	21,9	115,4	718	
Source Patsy Coca Cola	24,2	56,5	380	
Source de Ziarani	24,2	200,7	278	
Source de Hottozy	21	112,9	434	
Captage Domoni	20,5	115,2	380	

Annexe 2 : Les capteurs de brouillard, Présentation et caractéristiques

✓ Capteurs naturels de brouillards

La captation du brouillard par certaines espèces végétales est un phénomène naturel observé par de nombreuses civilisations. Certaines populations ont exploité ce phénomène. Les Guanches, populations antérieures aux Castellans et Espagnols sur l'archipel des Canaries, ont utilisé ce type d'arbre, appelés arbres fontaine, comme borne-fontaine jusqu'au XVIIe siècle. Notamment sur Hierro, une île très aride de l'archipel (Gioda, 1993). L'arbre utilisé était appelé Garoé.

Cette curiosité naturelle est liée au phénomène d'upwelling. Dans les zones littorales, ces courants d'air ascendants induisent une forte condensation et la formation de brumes mais sans précipitations notables. Certaines espèces d'arbre ont la capacité de capter l'eau contenue dans ces brouillards.



Dessin montrant le fonctionnement de l'arbre fontaine de El Hierro qui fut arraché par le vent en 1610 dans la localité de Tiñor où il fut replanté avec succès vers 1948 (schéma A. Gioda pour Pierre Lefèvre et Science & Vie Junior, mai 2003).

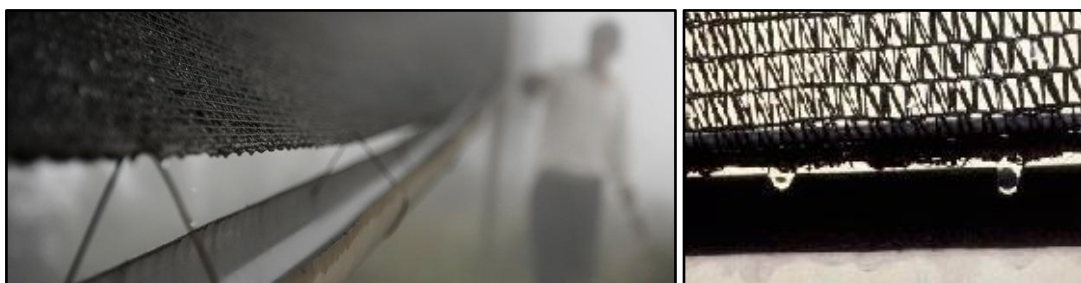


Arbre fontaine du Sultana d'Oman (Crédit photo : Pilar Cereceda)

Ces arbres ou associations végétales sont majoritaires dans les forêts de type forêt de brouillard comme celle d'Anjouan, et fournissent un apport d'eau (vers le sol) supplémentaire par rapport aux précipitations classiques.

✓ Les capteurs de brouillard artificiels

Dans certaines zones déforestées ou pauvres en couverture forestières, des tentatives de reproduire artificiellement ce phénomène ont été menées afin d'augmenter le volume d'eau disponible pour les populations et les cultures. Ces pièges artificiels sont des capteurs passifs de brume. Ils sont constitués de filets en polypropylène sur lesquels les gouttelettes du brouillard s'agglomèrent en gouttes qui ruissellent jusqu'à la base des filets où elles sont collectées par des gouttières.



Détail des filets en polypropylène des capteurs de brouillard

Cette technique convient mieux aux régions où il y a constamment du brouillard. Les montagnes côtières sont considérées comme des lieux d'implantation très adaptés à partir d'une altitude de 400 mètres, là où se situe la base des stratocumulus riches en humidité.

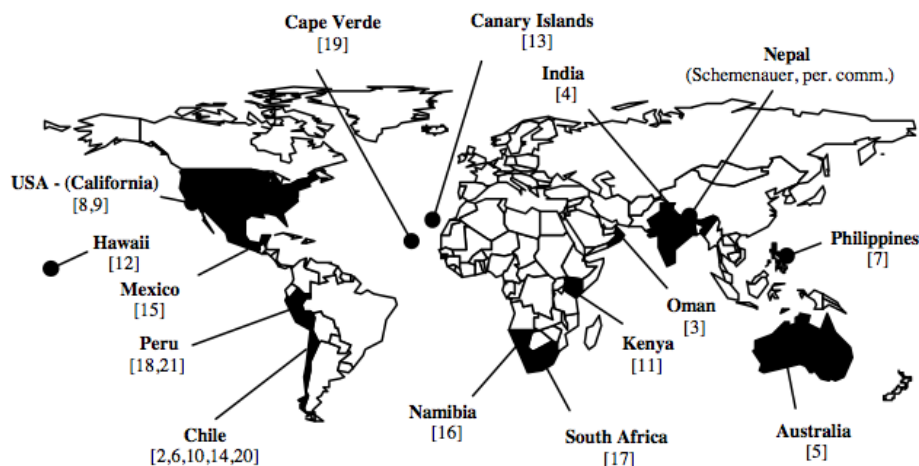
Certains auteurs parlent d'un minimum de 90 jours de brumes par an requis pour que le système soit suffisant pour alimenter une population en eaux de manière sûre. Les filets doivent être implantés perpendiculairement aux vents dominants et ils seront plus efficaces si le relief sur lequel ils sont installés est lui même orienté perpendiculairement au vent.

✓ Caractéristiques et performances

Les premières expériences de ce type ont été menées dans les années 50 au Chili. Un dispositif fonctionnel a été mis en place pour la première fois dans les années 1990 pour alimenter un village dans une région où l'accès à l'eau potable demeurait difficile et le brouillard régulier. Les filets mis en place étaient rectangulaires et mesuraient 4,5 mètres sur 3 mètres. Ces dispositifs permettaient de récolter 7 à 42 litres d'eau par mètre carré par jour. Récit en vidéo à cette adresse : <http://www.youtube.com/watch?v=Xn7YTzPydE>.

Aux Canaries où ce type de système a été installé, la production moyenne est de l'ordre de 30 litres par jour et par mètre carré.

Dans l'île hawaïenne de Maui dans la région de Kahikinui, en 1996 et 1997, James Juvik de l'Université d'Hawaii a réalisé une étude afin d'évaluer quelle quantité d'eau pouvaient être produite par des capteurs de brouillard installés dans trois sites témoins. Son étude a révélé que le volume d'eau recueilli était supérieur à celui de l'eau de pluie et que cette quantité augmentait avec l'altitude. Une fois installée le capteur de brouillard situé le plus haut (à 2200 m d'altitude) a donné le meilleur rendement, soit 3,92 litres/m² par jour. Le nombre d'études destinées à évaluer la faisabilité de mise en place de ce type de système de captation de brouillard se multiplie comme le montre la carte ci-dessous.



Localisation des principales zones de la planète où des études ont été réalisées pour la mise en place de capteurs de brouillard (Furey, 1998)

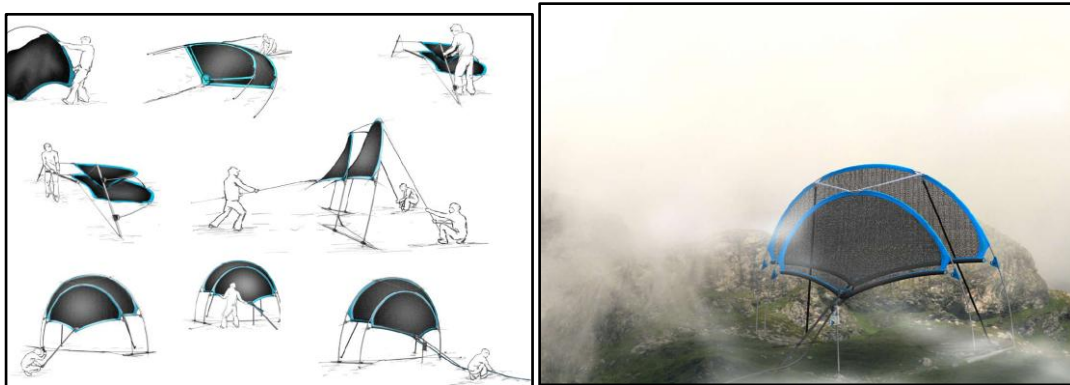
Fog Quest, un organisme spécialisé dans la mise en place de ce type d'équipement a installé 36 filets de captage d'eau de brouillard dans le village montagneux de Tojquia au Guatemala. Le système permet de fournir de l'eau potable à 150 personnes.

✓ Evolutions récentes

Un certain nombre de technologies novatrices sont en cours de développement tant sur les matériaux que le design des capteurs de brouillard eux mêmes.

Des matériaux plus élaborés que le polypropylène sont à l'étude. Ils prennent pour modèle la carapace du scarabée *Stenocara gracilipes* qui vit dans le désert. Sa carapace est composée de bosses qui attirent l'eau et des creux qui la repoussent. L'eau qui se forme sur les bosses s'écoule dans les creux sans être absorbé et se rend de cette façon jusqu'à l'orifice buccal du scarabée. Les matériaux développés suivent le même modèle, composés d'une combinaison de surfaces qui attirent et repoussent l'eau.

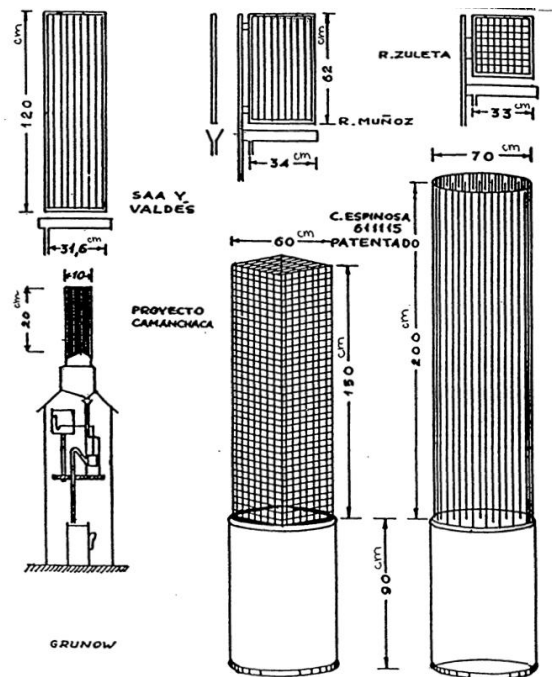
Imke Hoehler a récemment dessiné des capteurs de brouillard (photos ci-dessous) appelés Dropnet. Ces capteurs font 4,5 mètres de large sur 3 mètres de haut, pour une surface nette de 6 m². Le système permet de récolter 20 à 30 litres d'eau par mètre carré et par jour. Chaque capteur est équipé d'un petit réservoir équipé d'un robinet destiné au prélèvement d'échantillons d'eau et d'un filtre pour assainir l'eau avant distribution. D'après la conceptrice le système est très fonctionnel et peut être mis en place par une personne seule



Concept de capteur de brouillard dessiné par Imke Hoehler

✓ Mises en place sur l'île d'Anjouan

Dans un premier temps sans entreprendre des études complémentaires ce système pourrait être testé sur Anjouan pour alimenter les réservoirs des systèmes d'irrigation goutte à goutte fournis par AVSF. Le capteur pourrait être intégré directement au réservoir comme dans les dessins ci-dessous présentant les systèmes permettant de mesurer les précipitations en provenance des brouillards. Dans ce cas le coût du transport de l'eau par canalisation est réduit, mais son efficacité doit être testée. Des capteurs mobiles et de taille réduite du type de ceux proposés par *Imke Hoehler* seraient également appropriés. Les villages où ce type de système pourra être mis en place devront être situés à une altitude suffisante. D'après les documents consultés ils devraient pouvoir être mis en place à partir d'une altitude de 500 mètres, cependant il faudra vérifier que cette altitude est suffisante sur Anjouan. Il semble que certains versants soient plus appropriés notamment les versants les plus humides, sur Anjouan la côte ouest semble très appropriée en particulier les zones d'altitude élevée dans la région de Moya.



Exemples de pièges à brouillard destinés à mesurer les précipitations « horizontales » liées au brouillard.

La qualité de l'eau produite devra être surveillée. En effet, une étude suisse de 2003 a par exemple montré que l'eau du brouillard dans le Jura contenait une quantité de nitrate en moyenne deux fois et demi plus élevée que la valeur tolérée pour l'eau potable en France, avec des valeurs maximales proches de 250 mg.l⁻¹.

✓ Aspects sociologiques

Enfin la mise en place de ce type de système doit se faire en collaboration avec la population qui sera amenée à les utiliser, et ce dès l'initiation de la démarche. Il est toujours indispensable de bien connaître la situation sociale et d'obtenir la collaboration et l'adhésion de la population ou les systèmes seront testés. Après quelques années il s'est avéré que le premier projet de ce type au Chili a échoué. D'après Jorge Nef, professeur de vulgarisation rurale à l'Université de Guelph, *l'absence de volonté réelle d'assurer le fonctionnement à long terme des capteurs de brouillard a montré dans ce cas que l'on a négligé au départ de vérifier si la population acceptait vraiment ce genre de technologie et dans quelle mesure elle était prête à contribuer à l'entretien des capteurs.* D'après Fogquest, il est primordial d'impliquer les femmes du village puisque ce sont elles qui ont la responsabilité de l'eau pour leur maison. Si ces femmes ne sont pas impliquées, les chances sont très faibles que ces systèmes fonctionnent sur le long terme