

Définition d'une méthodologie commune aux études des bassins d'alimentation de captages à Mayotte.

Principes de délimitation des bassins et de caractérisation de la vulnérabilité des captages

Rapport final

BRGM/RP-57299-FR
Aout 2009

Rapport final

Aout 2009



Définition d'une méthodologie commune aux études des bassins d'alimentation de captages à Mayotte.

Principes de délimitation des bassins et de caractérisation de la vulnérabilité des captages

Rapport final

BRGM/RP-57299-FR

Aout 2009

Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public 2008 du BRGM.

A. MALARD

Avec la collaboration de

B. AUNAY, J.F. VERNOUX et V. MARDHEL

Vérificateur :

Nom : A. Wuilleumier

Date : 08/07/2009

Signature :

Approbateur :

Nom : P. Puvilland

Date : 05/08/2009

Signature :

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

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.

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

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

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

© BRGM, 2009, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Au vu de la vulnérabilité des ressources en eau de l'île de Mayotte et de l'intérêt pour les services de l'Etat de disposer d'outils de réglementation indispensables à l'application de la loi sur l'eau de 1992, de la LEMA¹ de 2006 et aux exigences de la Directive Cadre sur l'Eau, il s'est avéré urgent à Mayotte de définir les Bassins d'Alimentation de Captage (BAC) d'eau potable, que les prélèvements se fassent en eaux de surface ou en eaux souterraines. La délimitation et la caractérisation de ces bassins d'alimentation initieront les travaux de mise en place des périmètres de protection des captages ; démarche capitale et obligatoire qui s'inscrit dans une logique durable de gestion et d'exploitation des ressources en eau à Mayotte.

La question des périmètres de protection à Mayotte a débuté en 2005 par la réalisation d'une étude préalable à l'instauration de périmètres autour du forage de Kwalé (12307X0022 et 12307X0100, cf. rapport BRGM/RP-53593-FR). La procédure n'ayant pas abouti pour des raisons de connaissances à la fois scientifiques, techniques, réglementaires et par faute de moyens humains, décision a été prise de lancer les études de bassins d'alimentation de captage afin de disposer du socle de connaissances nécessaires à la poursuite de la procédure.

Lors du comité permanent de la MISEEN du 03/03/08, il a été convenu que toutes les prises d'eau et tous les forages d'alimentation en eau potable de Mayotte devaient être protégés. Le précédent comité du 08/11/07 avait proposé une liste de cinq captages considérés comme prioritaires (Ourovéni, Bouyouni haut et bas, Méresse et Gouloué) ainsi que les forages d'eau souterraine destinés à l'alimentation et implantés sur le même bassin versant.

Ainsi la convention de Recherche & Développement partagés DAF/BRGM du 18 août 2008 marque le début des études des quatre bassins versants prioritaires continentaux des Mro Oua Ourovéni, Gouloué, Bouyouni et Méresse et du bassin d'alimentation de la prise d'eau en mer de Petite terre.

La signature de la convention SIEAM / BRGM le 24 avril 2009 lance les études BAC sur 5 autres bassins versants exploités par des captages d'eau de surface et/ou des captages d'eau souterraine. Il s'agit des bassins des Mro Oua Kwalé, Kaouénilajoli, Andiranabé, du Mroni Béja et du Mro Maré.

Enfin, la convention ONEMA/DAF/BRGM signée le 9 juin 2009 prévoit la réalisation des études BAC sur les 4 bassins versants restant, à savoir les bassins du Mrowalé, du Mroni Antanana, du Mroni Bé et du Mro Oua Longoni.

¹ Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques du 30 décembre 2006.

Fin 2009, les études de délimitation et de caractérisation des BAC devront être achevées sur tous les captages en service ou en instance de mise en service du territoire de Mayotte, soit un total de 14 bassins versants comprenant 37 ouvrages d'eau en fonctionnement ou en instance de l'être (20 forages ou drains d'eaux souterraines, 16 captages en rivière et une usine de dessalement) soit pratiquement autant de BAC.

Le BRGM a acquis une solide expérience en matière d'étude de bassin d'alimentation de captages souterrains - expérience appuyée notamment par la rédaction de guides méthodologiques et le développement de réflexions et d'outils mathématiques de délimitation et de caractérisation de la vulnérabilité des captages en fonction des contextes géologiques.

Cependant, le contexte géologique et hydrogéologique de Mayotte (édifice volcanique insulaire érodé), le contexte climatique (tropical humide), l'absence, l'insuffisance ou la mauvaise qualité des connaissances du milieu et des données quantitatives (données hydrologiques, piézométriques, géologiques, de topographie numériques) et la prise en compte des captages d'eau de surface en plus des captages d'eau souterraine comptent parmi les facteurs qui rendent difficilement applicable les méthodologies existantes validées en contexte d'aquifère discontinu fissuré - contexte qui se rapproche le plus des milieux volcaniques insulaires jeunes. La différence étant que le contexte volcanique de Mayotte, ancien et très altéré est un contexte géologique et hydrogéologique à part entière dont la description ne satisfait pas précisément au contexte discontinu fissuré.

Ainsi, ce rapport propose les bases méthodologiques de délimitation des bassins d'alimentation et de caractérisation de la vulnérabilité des captages en contexte volcanique ancien et altéré. Elles sont inspirées et adaptées des guides et outils méthodologiques développés par le BRGM dans le cas des aquifères discontinus fissurés.

La méthodologie retenue ici sera appliquée sur l'ensemble de l'île et servira d'axe de travail pour la réalisation des études BAC des 13 bassins versants continentaux (à l'exception de l'usine de dessalement de Petite terre, contexte trop particulier pour répondre à une méthodologie semblable aux bassins continentaux). Cette adaptation constitue un travail novateur et valorisable hors Mayotte, dans des contextes géologique et hydrogéologique comparables.

Cette méthodologie est basée sur le principe de délimitation du BAC / cartographie de la vulnérabilité / identification des pressions, soit les 3 axes majeurs des guides méthodologiques existants. Les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité considérées dans ces guides (RISK, DRASTIC ou DISCO) ont aussi servis de base de réflexion. Les méthodes ont été adaptées en fonction du contexte environnemental et du type de captage (eau souterraine ou de surface).

En ce qui concerne les captages souterrains, la méthodologie prévoit que la délimitation des bassins d'alimentation suive le contour du ou des bassin(s) d'alimentation de surface qui participent à l'alimentation de la ou des nappe(s) par

infiltration du cours d'eau. La caractérisation de la vulnérabilité intrinsèque repose sur une approche de type IDPR (Indice de Développement et de Persistance des Réseaux) qui met en évidence le contrôle de la géologie et de la pédologie sur la capacité d'infiltration des versants.

En ce qui concerne les captages de surface, la délimitation des bassins d'alimentation suit celles des bassins topographiques de surface auxquels sont ajoutés – quand ils existent - les bassins d'alimentation souterrain participant à l'alimentation des captages de surface par résurgence de leurs eaux. La vulnérabilité des bassins d'alimentation de captage repose sur une approche de type IDPR adaptée aux eaux de surface, permettant de mettre en évidence des disparités spatiales entre des versants à dominante ruisselante et d'autres plus perméables. Des calculs (en cas de hautes eaux) et mesures (en cas de basses eaux) des vitesses de circulation du cours d'eau seront interprétés en termes de délais d'atteinte entre un point du bassin d'alimentation et le captage considéré. Ces informations viendront en complément de la vulnérabilité intrinsèque du bassin.

L'inventaire et la hiérarchisation des pressions (de type urbanisation et aménagement, activités rurales et agricoles, pressions routières, sites industriels et pratiques à risque) seront définis en fonction de leur nature, volume, répartition et impact sur la ressource ou sur le captage et modulés en fonction des capacités de traitement. Ce travail permettra d'établir la cartographie de répartition des pressions à l'échelle des bassins d'alimentation de captage.

Le croisement des informations entre la carte de vulnérabilité et la carte de pression à l'échelle d'un bassin d'alimentation (croisement entendu comme étant l'aléa) permettra d'esquisser bassin d'alimentation par bassin d'alimentation le degré d'exposition de la ressource ou du captage considéré. Ainsi, la considération de cet aléa et des enjeux entendus comme la qualité de l'eau au droit des captages d'eau potable aboutira à la distinction des zones à risques et aux réflexions quant à la pérennité de la ressource et aux mesures de protection qui s'imposeront.

Sommaire

1. Introduction	13
2. Mayotte, un contexte géologique, hydrologique et hydrogéologique particulier	15
3. Méthodologie appliquée à l'étude des Bassins d'Alimentation de Captage à Mayotte	17
3.1. DEFINITION ET DELIMITATION DES BASSINS D'ALIMENTATION DE CAPTAGES	17
3.1.1. Eaux de surface (ESU)	17
3.1.2. Eaux souterraines (ESOUT)	21
3.1.3. Synthèse relative à la délimitation des bassins d'alimentation de captage	29
3.2. CARACTERISATION DE LA VULNERABILITE DES CAPTAGES	31
3.2.1. Définition	31
3.2.2. Approche de la vulnérabilité : la question des paramètres qui la conditionnent	32
3.2.3. Démarche proposée dans le cas des bassins d'alimentation de captage souterrains : L'IDPR, l'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux et l'indice de rugosité	43
3.2.4. Démarche proposée dans le cas des bassins d'alimentation de captage des eaux de surface : L'IDPR, l'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux et l'indice de rugosité	66
3.2.5. Récapitulatif méthodologique relatif à la caractérisation de la vulnérabilité des captages d'eau souterraine et de surface	69
3.3. DETERMINATION DES VITESSES DE CIRCULATION DES EAUX DE SURFACE	72
3.3.1. Principe : détermination en conditions de hautes eaux et de basses eaux	73
3.3.2. Applications	76
3.3.3. Synthèse	78
3.4. EVALUATION DES PRESSIONS ENVIRONNANTES	79
3.4.1. Observations générales	79
3.4.2. Le choix des critères et du degré de pression	85
3.4.3. Récapitulatif méthodologique relatif à la cartographie des pressions	90
3.5. SYNTHESE VULNERABILITE / PRESSIONS DES BASSINS D'ALIMENTATION DE CAPTAGE	94

3.5.1. Carte de croisement vulnérabilité/pression des eaux souterraines de Mayotte (carte évolutive).....	95
3.5.2. Carte de croisement vulnérabilité/pression des eaux de surface de Mayotte (carte évolutive).....	97
4. Conclusion.....	99
5. Glossaire	101
6. Références Bibliographiques.....	103

Liste des illustrations

Illustration 1 : Influence de la compacité du bassin versant (= indice de Gravelius) sur les temps de concentration (t_c) et l'hydrogramme de crue. $K_{GBV1} < K_{GBV2}$, $t_{c2} > t_{c1}$ et les débits de pointe $Q_{BV1} > Q_{BV2}$ (source : http://echo.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre2/chapitre2.html)	19
Illustration 2 : Distinction entre Bassin d'Alimentation de Captage et Portion de Nappe Alimentant le Captage (in Bussard, 2005).....	22
Illustration 3 : Variations saisonnières de la délimitation des BAC.	24
Illustration 4 : Relation entre le niveau piézométrique et l'altitude au sol des ouvrages de la campagne de 1999-2000 (Aquifères et Eaux souterraines en France – 2006, Chap. XIII).....	26
Illustration 5 : Principe de délimitation du bassin d'alimentation de captage (projection en surface). La ligne rouge correspond à la crête piézométrique séparant les deux unités aquifères et dans le cas présent les deux BAC. La superposition Σn correspond à l'incertitude.....	27
Illustration 6 : détails de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines et de surface à chaque étape de la circulation des eaux météoriques : ① précipitation et concentration, ② rétention et infiltration et enfin ③ transfert vers la nappe.	33
Illustration 7 : distribution moyenne des précipitations annuelles à Mayotte (source des données DAF).....	34
Illustration 8 : Gradation des pluies (moyenne annuelle des 9 stations pluviométriques de la DAF) en fonction de l'altitude. La regression linéaire montre une gradation moyenne peu marquée de + 1 mm de précipitations/an/m d'altitude.....	34
Illustration 9 : Influence des précipitations saisonnières sur l'amplitude en valeur absolue de la recharge (en bleue) et de la vidange (en orange) de l'aquifère de Kawéni au droit du piézomètre 1 8". Ce graphique témoigne de la non participation des précipitations à la recharge des aquifères en saison sèche.	35
Illustration 10 : Le principe de calcul de l'IDPR à l'échelle d'un bassin repose sur la comparaison d'un réseau hydrographique naturel (à droite) et d'un réseau hydrographique théorique (au milieu). Les discordances résultantes s'interprètent en termes de contrôle géologique et/ou pédologique (c.à.d. de perméabilité ou de ruissellement)	44
Illustration 11 : Réseau hydrographique de Mayotte (BD Topo 1/25 000, source IGN©).....	45

Illustration 12 : Pré traitement des zones planes de Mayotte	46
Illustration 13 : carte du réseau des talwegs de Mayotte issu du traitement informatique du MNT 1/25 000	47
Illustration 14 : données brutes du calcul de l'IDPR sur l'ensemble de l'île	48
Illustration 15 : légende des valeurs d'Indice de développement et de persistance des réseaux.....	48
Illustration 16 : L'intersection des couches d'informations géologiques et pédologiques compose la carte des unités fonctionnelles	49
Illustration 17 : Distribution des valeurs IDPR (de 0 à 2000) selon les surfaces cumulées (en m ²) et comparaison avec une distribution type en France métropolitaine.	50
Illustration 18 : données du calcul agrégés par unités fonctionnelles (unités lithologiques et morphopédologiques). En surimposition apparaissent les bassins versants du Mro Oua Gouloué (G), Orovéni (O), Bouyouni (B) et Méresse (M). On remarque certaines zones à artefacts (l'îlot d'Handrema, les mangroves de Dapani et de Bandrelé, etc.).....	51
Illustration 19 :distribution des classes IDPR médiane. Les classes les plus représentées à Mayotte se répartissent entre des valeurs IDPR de 50 à 1150. il existe peu de faciès géologiques ou pédologiques se démarquant des autres par une forte proportion au ruissellement, c.à.d. >1150, cf. Illustration 15. Le pic de la classe 950/1050 est considéré comme artefact.	52
Illustration 20 : Méthodes courantes de calcul de la rugosité, LSRI, TRI et VRM	53
Illustration 21 : données du calcul de l'indice de rugosité sur l'ensemble du territoire	54
Illustration 22 : Distribution des classes empiriques de rugosité par unités fonctionnelles selon les valeurs brutes moyennes. A Mayotte la moyenne de ces classes est de 3,58.	54
Illustration 23 : Approche de la vulnérabilité des eaux souterraines de Mayotte. Association des indices IDPR et de rugosité = IDPR combiné.....	56
Illustration 24 : répartition de l'indice IDPR médian en fonction des unités lithologiques par la méthode des boîtes à moustaches de Tukey. Les unités appartenant à la classe « Holocène ou Pleistocène » sont très peu présentes sur Grande terre (à peine quelques ha). Les résultats de la distribution sont donc biaisés par le nombre trop faible d'échantillons.	57
Illustration 25 : répartition de l'indice IDPR médian en fonction des faciès pédologiques. Seuls les faciès dont la distribution (en termes d'échantillons) est représentative à l'échelle de Grande terre ont été considérés. Par exemple, les faciès pédologiques de 7 à 11 ont été retirés car uniquement présents en nombre sur Petite terre.	60
Illustration 26 : Distribution statistique de l'indice de rugosité par unités fonctionnelles lithologiques selon la méthode des boîtes à moustaches de Tukey.....	63
Illustration 27 : Distribution statistique de l'indice de rugosité par unités fonctionnelles pédologiques selon la méthode des boîtes à moustaches de Tukey	65
Illustration 28 : Approche de la vulnérabilité des eaux de surface de Mayotte. Association des indices IDPR et de rugosité = IDPR combiné.....	67
Illustration 29 : Variation de vitesse dans une rivière en fonction de l'écartement au centre et de la profondeur : $v_1 > v_2 > v_3 > v_4 > v_5$	73

Illustration 30 : Vitesses de pointe d'un cours d'eau en basses eaux déterminées à partir des courbes de restitution des jaugeages chimiques.	76
Illustration 31 : découpage des cours d'eau des bassins d'alimentation de captage de surface, estimation des vitesses et des temps d'atteinte au captage	77
Illustration 32 : variabilité de la limite du temps d'atteinte au captage (1 à 2 heures selon les si les bassins d'alimentation de captages sont respectivement de surface inférieure ou supérieure à 6 km ²) entre les régimes hydrologiques de hautes et de basses eaux.....	78
Illustration 33 : décharge sauvage dans le cours d'eau (rivière de Kaouénilajoli, commune de Mamoudzou). Déchets domestiques, déchets verts, matériaux et équipements ménagers (véhicules, électroménagers, batteries plomb) encombrant le lit mineur. Ces pressions sont heureusement plus faibles en amont dans les bassins d'alimentation.....	83
Illustration 34 : Carte évolutive des pressions sur l'île de Mayotte. En surimposition apparaissent les contours des bassins versants du Mro Oua Gouloué, Ourovéni, Bouyouni et Méresse.	93
Illustration 35 : Carte de croisement des informations vulnérabilité / pressions des eaux souterraines de Mayotte. Apparaissent aussi – en surimposition - les contours des bassins versants de l'Ourovéni, Gouloué, Bouyouni et Méresse.	96
Illustration 36 : Carte de croisement des informations vulnérabilité / pressions des eaux de surface de Mayotte. Apparaissent aussi – en surimposition - les contours des bassins versants de l'Ourovéni, Gouloué, Bouyouni et Méresse.	98

Liste des tableaux

Tableau 1 : Variations de la taille de la surface théorique d'alimentation de captage en fonction de la variation indépendante des paramètres de la relation E4.	29
Tableau 2 : synthèse de délimitation des bassins d'alimentation de captage.....	30
Tableau 3 : Principales formations lithologiques à Mayotte (extraites de la carte géologique, Stieljes – 1988)	38
Tableau 4 : Occupation des sols à Mayotte densité et répartition surfacique du couvert végétal (données DAF 2003).....	41
Tableau 5 : Nomenclature des faciès pédologiques (à mettre en relation avec l'illustration 25).....	61
Tableau 6 : récapitulatif méthodologiques des outils et paramètres de caractérisation de la vulnérabilité des captages d'eau souterraine et de surface de Mayotte	71
Tableau 7 : Ordre de grandeur du coefficient de rugosité K_s (m ^{1/3} /s) selon différentes typologies.....	75
Tableau 8 : Sites industriels et activités de service du département de Mayotte regroupés par type d'activité (issu du rapport BRGM/RP-52906-FR).....	88
Tableau 9 : activités industrielles de Mayotte classées par groupe SEI (Service de l'Environnement Industriel du ministère chargé de l'environnement).....	89
Tableau 10 : Classes et indices de pressions. Comme indiqué plus haut, une pression faible diffère d'une pression nulle	90

Tableau 11 : Recapitulatif de cartographie des pressions : nature, supports d'informations et degré.....	92
--	----

Tableau 12 : Schéma méthodologique de délimitation et de caractérisation de la vulnérabilité et des pressions associées aux bassins d'alimentation de captage.	94
---	----

Liste des équations

E1 : Indice de compacité de Gravelius des bassins versants.....	19
E2 : Calcul de la densité de drainage d'un bassin versant.....	20
E3 : Calcul de la densité hydrographique d'un bassin versant.....	21
E4 : Calcul de la surface théorique d'alimentation de captage.....	28
E5 : Equation de Manning Strickler.....	74

Liste des annexes

Annexe 1 Les bassins d'alimentation de captages à Mayotte (mise à jour 1 ^{er} semestre 2009)	107
Annexe 2 Carte géologique de Stieljes - 1988	111
Annexe 3 Carte morphopédologique de Latrille – 1981	115
Annexe 4 Cartes de vulnérabilité	119
Annexe 5 Principe du jaugeage chimique dit « au sel »	125
Annexe 6 Cartes de croisement vulnérabilité / pressions.....	131
Annexe 7 Rappels de statistiques et présentation des boîtes à moustaches de Tukey	137

1. Introduction

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

En l'absence de périmètres de protection de captages à Mayotte et compte tenu des pressions grandissantes exercées sur la ressource (explosion démographique, aménagement, agriculture, déforestation), il s'est avéré urgent d'appliquer les principes de protection de la ressource du cadre réglementaire conformément à la Directive. En outre, la réalisation des études des bassins d'alimentation de captages à Mayotte (au nombre de 14 entre 2008 et 2009, cf. Annexe 1) initiera les études et travaux relatifs à la mise en place des périmètres de protection à l'échelle des captages et l'application des politiques réglementaires prescrites par la loi sur l'eau et les milieux aquatiques.

De nombreuses méthodologies relatives à l'étude des BAC et de nombreux outils ont vu le jour (cf. les travaux du BRGM, rapports BRGM/RP-55322-FR, BRGM/RP-55874-FR, les travaux de l'Office Fédéral de l'Environnement, des Forêts et du Paysage Suisse sur la délimitation des zones de protection des eaux souterraines en milieu fissuré et les outils d'évaluation de la vulnérabilité RISK, DRASTIC, DISCO, EPIK, IDPR, etc.). Le travail réalisé ici consiste à adapter et à compléter - le cas échéant - les méthodologies existantes de délimitation des BAC et de caractérisation de leur vulnérabilité en fonction des types de captages (eau de surface et souterraine), du contexte insulaire, climatique, géologique et hydrogéologique de Mayotte et des données disponibles. L'objectif étant de disposer d'une méthodologie applicable sur l'ensemble du territoire qui rend homogènes les études de délimitation des bassins d'alimentation de captage et de caractérisation de leur vulnérabilité.

Le premier chapitre de l'étude consiste à présenter le contexte particulier de Mayotte qui justifie l'adaptation des principes méthodologiques existants.

Vient ensuite le chapitre relatif aux adaptations méthodologiques portant (i) sur les principes de délimitation et de caractérisation des bassins d'alimentation de captages, (ii) l'étude des paramètres conditionnant la vulnérabilité des captages d'eau souterraine mais aussi d'eau de surface, (iii) l'adaptation des méthodes IDPR dans la caractérisation de la vulnérabilité des captages d'eau souterraine, (iv) l'approche de la vulnérabilité des captages d'eau de surface par calcul et mesure des vitesses de transfert des rivières et (v) l'inventaire des pressions exercées sur chacun des BAC.

Le croisement de ces informations, c.à.d. la superposition du degré de vulnérabilité de la ressource et de la nature ou du volume de la ou des pression(s) concernées

permettra - à l'échelle des bassins d'alimentation - d'estimer le risque réel encouru par les captages considérés.

2. Mayotte, un contexte géologique, hydrologique et hydrogéologique particulier

Mayotte est une île volcanique de point chaud dont l'activité a cessé au Pléistocène (les derniers épisodes volcaniques sont datés entre -100 000 et -7 000 ans avant notre ère) et qui aujourd'hui se trouve soumise aux processus d'altération, rapides sous climat tropical humide (Debeuf – 2004). L'île présente une morphologie composée de nombreux bassins versants de taille petite à moyenne séparés par des reliefs aigus à forte pente, marque d'une érosion avancée. La superficie de l'île est relativement réduite (375 km²) et le climat est de type tropical sous influence marine. Deux saisons se succèdent à Mayotte, l'une chaude et humide qui s'étale de novembre à mai, l'autre sèche et plus fraîche qui règne le reste de l'année. Les intersaisons sont très brèves et peu marquées.

Les recharges en eau par les précipitations sont assez faibles en absolue (en contexte de climat tropical humide) et de fait saisonnières. Ces facteurs ont conditionné le développement de réseaux hydrographiques particuliers : les cours d'eau permanents sont rares et quand ils existent, le débit d'étiage est souvent très faible (100 l/s voire moins) comparé au débit moyen qu'ils peuvent afficher en saison des pluies (plusieurs m³/s). Les temps de concentration de ces cours d'eau sont très rapides (de l'ordre de l'heure) ce qui entraîne une instabilité permanente des régimes hydrologiques, particulièrement en saison des pluies.

Il n'existe pas de grandes structures aquifères continues à Mayotte mais de nombreuses petites unités aquifères. Les cibles hydrogéologiques les plus intéressantes sont les laves peu altérées, principalement en cœur de coulées et/ou en base de coulées, les formations alluviales entre deux coulées, les bases de coulées scoriacées, etc. Le potentiel est à l'évidence contrôlé par le degré d'altération des formations qui - dans certains cas - conduit à un colmatage complet de la perméabilité (perméabilité de fracture, perméabilité matricielle, etc.). Les formations d'accompagnement volcaniques de types scories, cendres, brèches et lapillis ont - sauf cas particulier - de médiocres propriétés hydrodynamiques. A Mayotte, il est difficile de généraliser de manière univoque le rattachement entre les faciès géologiques et leurs propriétés hydrodynamiques.

Les formations sédimentaires de type alluvial et côtier sont souvent issues du remaniement partiel ou total des produits de l'activité volcanique ancienne et/ou récente. Ces formations - quelques peu particulières - sont des cibles hydrogéologiques qui peuvent éventuellement être mises à profit : le cratère de Kawéni en est un exemple (cratère récent de type Maar) avec un potentiel exploité de plus de 60 m³/h réparti sur 3 ouvrages. Néanmoins, ces formations sont souvent contiguës au littoral et par conséquent pourraient être exposées à une intrusion potentielle d'eaux salées (pour le moment les limites de cet aquifère ne sont pas encore connues).

En ce qui concerne les modalités de recharge et de vidange annuelles des aquifères, les différents travaux ont démontré (Aquifères et Eaux souterraines en France – 2006, Chap. XIII, rapports BRGM/RP-56773-FR et BRGM/RP-56438-FR) que les cours d'eau contribuaient à l'alimentation des aquifères par infiltration en saison des pluies et qu'en saison sèche, les phénomènes d'exfiltration de ces mêmes aquifères - qui jouent un rôle capacitif important - soutenaient le régime d'étiage des cours d'eau.

Dans le domaine des eaux de surface, une grande partie des cours d'eau à régime hydrologique permanent fait l'objet d'un suivi des débits mis en place par la DAF depuis plusieurs années (1994-1995 pour les plus anciens). Les cours d'eau sont jaugés 1 à plusieurs fois par semaine au micro-moulinet au niveau d'une station bien précise. Néanmoins, en raison des difficultés de terrain (configuration des sites, accès) et de climat, les données présentent quelque fois des incertitudes marquées. Il est important de signaler par exemple qu'en hautes eaux les débits ne peuvent être mesurés et qu'en basses eaux, la lame d'eau est souvent trop fine pour assurer un fonctionnement optimal du micro-moulinet. Il convient d'adopter une attitude de réserve quant à la validité des données sur l'ensemble de la chronique.

La particularité des ressources en eau de Mayotte a trois conséquences immédiates. D'une, la localisation des ressources, la quantité et ses mécanismes sont souvent difficiles à approcher. Deux, l'alimentation en eau potable de l'île nécessite de diversifier autant que possible les prélèvements, qu'ils soient d'eau de surface, d'eau souterraine ou de dessalement d'eau côtière et trois, les ressources sont très vulnérables aux atteintes anthropiques, que ce soit en termes de quantité ou de qualité. Par exemple ;

- la turbidité des eaux au niveau des prises d'eau en rivière est en augmentation ces dernières années (information SOGEA) et implique lors de certaines conditions une limitation drastique des capacités d'exploitation.
- l'état de la ressource en eau souterraine dans certains secteurs sollicités pour l'alimentation, en particulier Kawéni montre une tendance à la baisse des quantités et une dégradation chronique de la qualité des eaux (cf. rapport BRGM/RP-56773-FR).

3. Méthodologie appliquée à l'étude des Bassins d'Alimentation de Captage à Mayotte

3.1. DEFINITION ET DELIMITATION DES BASSINS D'ALIMENTATION DE CAPTAGES

En théorie, le **bassin d'alimentation d'un captage (BAC)** ou **Aire d'Alimentation de Captage (AAC)** est le lieu des points de la surface du sol qui contribuent à l'alimentation du captage. En d'autres termes, le BAC correspond à une zone délimitée par l'ensemble des gouttes de pluie qui - une fois au sol et en l'absence de considération des phénomènes d'évaporation et de prélèvement - peuvent atteindre le captage considéré à plus ou moins brève échéance. Le terme d'AAC est généralement utilisé pour tout type de captages alors que le terme de BAC est souvent réservé à l'usage des captages d'eau souterraine, même si la notion demeure équivalente. Dans les chapitres qui suivent, seul le terme de BAC sera employé et désigne tout type de captage confondu.

Il est important de noter que la présente méthodologie s'appliquera à l'ensemble des études de caractérisation des captages d'eau de surface et souterraine de Mayotte. Ne sont pas concernés par cette méthodologie les prises d'eau en mer pour le dessalement.

3.1.1. Eaux de surface (ESU)

1) Définition

Le bassin hydrographique ou bassin versant de surface est la partie d'un territoire sur laquelle les eaux s'écoulent en surface vers un même exutoire ou groupe d'exutoires (cours d'eau, lac, lagon, océan). Il est délimité par une ligne de partage des eaux assimilable à une ou à un système de crêtes orographique (cf. Illustration 1). Chaque bassin versant se subdivise en un certain nombre de bassins élémentaires (parfois appelés « sous-bassin versant ») correspondant à la surface d'alimentation des affluents se jetant dans le cours d'eau principal.

En ce qui concerne les bassins d'alimentation des captages d'eau de surface, la délimitation comprend les éléments suivants : le tracé du bassin topographique et ses caractéristiques

2) Le tracé du bassin topographique participant à l'alimentation de la prise d'eau.

Dans le contexte mahorais où les interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines sont importantes, cette surface comprend à la fois la surface de

ruissellement qui alimente directement le cours d'eau mais aussi - lorsqu'il existe - le bassin d'alimentation souterrain qui alimente le cours d'eau par résurgences des eaux souterraines en amont du captage considéré. En l'absence de mise en évidence de bassin versant souterrain, ou si les limites de ce ou ces dernier(s) sont inscrites au sein du bassin versant de surface, le tracé du bassin d'alimentation de captage de la prise d'eau de surface suivra les lignes de crêtes encadrant le cours d'eau et ses affluents (qu'ils soient pérennes ou temporaires) au départ de la prise d'eau.

La mise en évidence de l'alimentation d'un cours d'eau de surface (a) par un bassin versant souterrain lui-même alimenté via un autre bassin versant de surface (b) peut être opérée à travers un bilan hydrologique où le cumul annuel des précipitations efficaces $\sum P_i$ sur le bassin versant (a) est comparé au cumul annuel des débits

enregistrés à l'exutoire $\int_0^1 D$ modulé par la variation de stock ΔS (positive ou négative)

qui correspond à l'emmagasinement d'une nappe d'une année sur l'autre en fonction des saisons.

- Si $\sum P_i > \int_0^1 D$ modulo ΔS , une part des précipitations efficaces du bassin (a) alimente un bassin versant souterrain.
- Si $\sum P_i < \int_0^1 D$ modulo ΔS , le bassin versant de surface (a) est en partie alimenté par un bassin versant de surface (b) via une circulation souterraine.

Ce bilan peut ne peut être réalisé de manière précise qu'en la présence de données hydrologiques fiables, précises et si possible recouvrant plusieurs cycles. Dans le cadre de cette étude, les données hydrologiques à disposition (enregistrement fin des débits à l'exutoire des cours d'eau, variabilité spatiale des précipitations, etc.) ne s'avèrent pas suffisantes pour réaliser un bilan hydrologique pertinent et distinguer l'apport et/ou la perte de flux via les circulations souterraines.

3) La nature du bassin versant

Pour chaque bassin versant accueillant 1 ou plusieurs bassin(s) d'alimentation, une description accompagnera la délimitation et la caractérisation physique du bassin et comprendra les informations suivantes (extraites de <http://echo.epfl.ch/hydrologie/chapitres/chapitre2/chapitre2.html>).

- **La taille et géométrie du bassin**

La taille du bassin versant est obtenue directement sur SIG.

La forme du bassin versant est donnée par l'indice de compacité de Gravelius (1914) K_G , défini comme le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface :

$$K_G = \frac{P}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot A}} \approx 0.28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Avec :

A : surface du bassin versant [km²],

P : périmètre du bassin [km].

E1 : Indice de compacité de Gravelius des bassins versants

L'indice de Gravelius est proche de 1 pour un bassin versant de forme quasiment circulaire et supérieur à 1 lorsque le bassin est de forme allongée. Cet indice de compacité n'est pas sans conséquence dans l'approche des temps de Concentration et de la géométrie des hydrogrammes de crue. Un bassin compact d'indice proche de 1 présentera bien souvent un temps de concentration plus court et les plus forts débits de pointe (cf. Illustration 1).

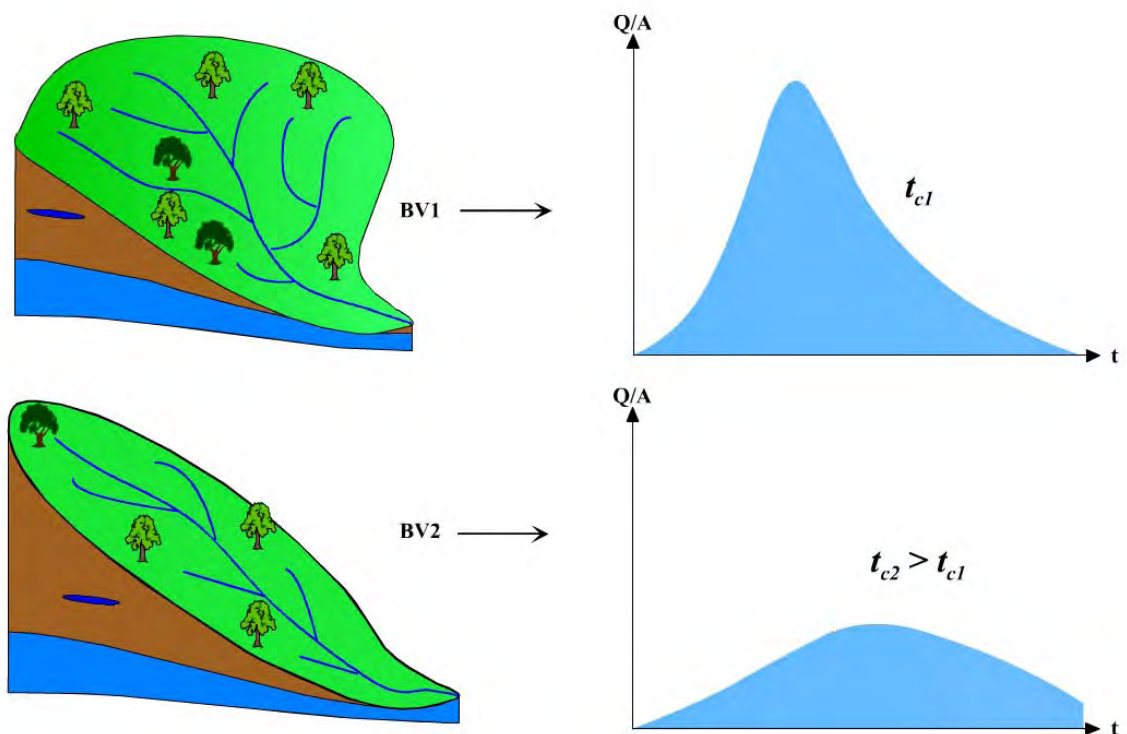


Illustration 1 : Influence de la compacité du bassin versant (= indice de Gravelius) sur les temps de concentration (t_c) et l'hydrogramme de crue. $K_{GBV1} < K_{GBV2}$, $t_{c2} > t_{c1}$ et les débits de pointe $Q_{BV1} > Q_{BV2}$ (source : <http://echo.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre2/chapitre2.html>)

- **La pente moyenne du bassin versant**

L'évaluation de la pente moyenne du bassin versant est une information capitale pour l'estimation des temps de ruissellement, des temps de concentration et sur les débits de pointe en cas d'épisodes pluvieux de forte intensité.

- **Le profil longitudinal du cours d'eau majeur**

Le profil longitudinal du cours d'eau correspond à la variation altimétrique du lit du cours d'eau en fonction de la distance à son émissaire (en l'occurrence l'embouchure du bassin versant ou le captage considéré).

La pente moyenne du cours d'eau sera calculée sur la base de ces informations altimétriques.

- **Le degré de développement du réseau hydrographique**

Le développement du réseau de drainage est évalué à travers la compilation des paramètres suivants :

- **La densité de drainage D_d** : longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface du bassin versant. La densité de drainage dépend de la géologie (structure et lithologie) des caractéristiques topographiques du bassin versant et, dans une certaine mesure, des conditions climatologiques et anthropiques. En pratique, les valeurs de densité de drainage varient de 3 à 4 pour des régions où l'écoulement n'a atteint qu'un développement très limité et se trouve centralisé ; elles dépassent 1000 pour certaines zones où l'écoulement est très ramifié avec peu d'infiltration.

$$D_d = \frac{\sum L_i}{A}$$

Avec :

D_d : densité de drainage [km/km²] ;

L_i : longueur de cours d'eau [km]. Cette information est issue de la Bd Topo cours d'eau de l'IGN ;

A : surface du bassin versant [km²].

E2 : Calcul de la densité de drainage d'un bassin versant

- **La densité hydrographique** : elle représente le nombre de canaux d'écoulement par unité de surface.

Avec :

$$F = \frac{\sum N_i}{A}$$

F : densité hydrographique [canaux.km⁻²] ;

N_i : nombre de canaux, à savoir le nombre de cours d'eau d'ordre de Stralher 1 ;

A : superficie du bassin [km²].

E3 : Calcul de la densité hydrographique d'un bassin versant

A l'échelle de l'île, la densité de drainage calculée donne $D_d = 2,44$ km/km² et la densité hydrographique $F = 1,96$ canaux.km⁻². En somme, les régions à haute **densité de drainage** et à haute **densité hydrographique** (deux facteurs allant souvent de pair), c.à.d. supérieure aux valeurs moyennes de l'île présentent en général une roche mère ou une pédogenèse imperméable, et/ou un couvert végétal restreint et/ou un relief montagneux, donc des capacités d'infiltration moindre à l'échelle du bassin versant. L'opposé - c'est-à-dire une faible densité de drainage et une faible densité hydrographique - se rencontre en région à substratum plus perméable, à couvert végétal important et à relief peu accentué. Ces informations sont capitales dans la validation de la répartition de l'indice IDPR par bassin versant.

Par ailleurs, la géométrie et la nature du bassin d'alimentation conditionnera par la suite les estimations des modalités et temps de transfert d'éventuelles pollutions déversées sur le bassin, en termes de vitesse mais aussi d'appréciation de l'impact.

3.1.2. Eaux souterraines (ESOUT)

1) Définition

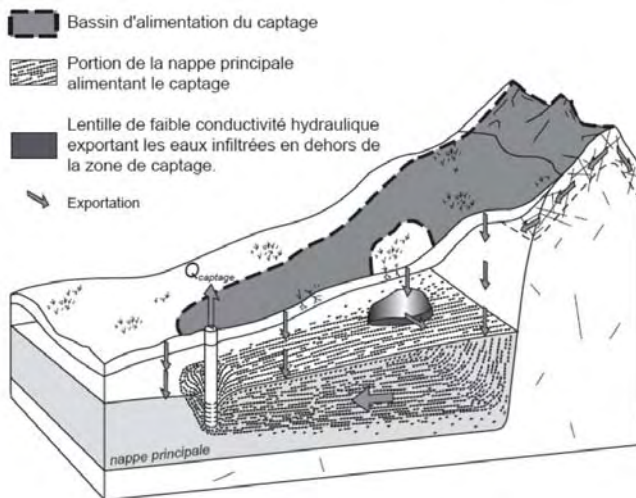
Le bassin hydrogéologique d'un aquifère ou bassin versant souterrain est la partie d'un aquifère, simple ou complexe dans laquelle les eaux souterraines s'écoulent vers un même exutoire ou groupe d'exutoires – en l'occurrence un ou plusieurs captage(s) dans le cas des bassins d'alimentation de captage (source ou forage).

Le BAC est délimité par une ligne de partage des eaux souterraines qui, à l'encontre de celle des bassins de surface peut être migrante (pour les raisons qui sont décrites plus bas, cf. Illustration 3) ; c'est l'homologue souterrain d'un bassin versant pour les eaux de surface (Castany et Margat, 1977). Lorsque l'aquifère est en partie alimenté par l'infiltration d'un cours d'eau, le bassin versant de ce cours d'eau participant à l'alimentation par infiltration directe des eaux météoriques ou après un court ruissellement diffus est considérés *de facto* dans le bassin hydrogéologique. A l'instar du bassin versant topographique, le bassin versant hydrogéologique correspond au domaine souterrain dans lequel les écoulements convergent vers un point bas appelé l'exutoire (une source ou un captage). C'est donc à la surface de la nappe souterraine (surface piézométrique) que l'on se réfère pour calculer les pentes et le contour des bassins hydrogéologiques. Le bassin versant ainsi défini peut ne pas être confondu

avec le bassin versant en surface (se référer au guide méthodologique BRGM/RP-55874-FR). En effet, la forme de la surface piézométrique ne dépend pas seulement de la localisation des zones d'infiltration, mais également de la distribution des perméabilités, de la géométrie des couches imperméables - c.à.d. de la géométrie des structures géologiques en profondeur - qui constituent la base de la nappe pour les nappes libres et de la répartition des pressions (ou charges) pour les nappes captives. En effet, le principe de base de l'écoulement souterrain est qu'il se dirige des charges les plus élevées vers les charges les plus faibles.

Comme rappelé en Introduction, la délimitation des bassins d'alimentation de captage a fait l'objet d'une méthodologie précise en fonction du contexte hydrogéologique ; à savoir les aquifères continus, les aquifères discontinus fissurés et les aquifères discontinus karstiques (rapport BRGM/RP-55874-FR). Les principes fondamentaux de la délimitation sont rappelés ci-dessous et illustrés ci-après :

- dans les cas simples, le bassin d'alimentation concerne un seul aquifère et correspond à la projection en surface de la Portion de Nappe Alimentant le Captage (PNAC). Si cette surface est imperméable, le bassin d'alimentation du captage est plus réduit en surface. Dans la pratique, une surface est rarement totalement ruisselante ou infiltrante, en conséquence, la zone située entre la crête topographique et la crête piézométrique doit être prise en compte pour les deux bassins, les deux BAC ayant alors une partie commune (cf. Illustration 2).



*Illustration 2 : Distinction entre **Bassin d'Alimentation de Captage** et **Portion de Nappe Alimentant le Captage** (in Bussard, 2005)*

- de même, toute frontière basée sur une crête piézométrique doit être considérée comme une bande d'une largeur non négligeable (Δ sur l'illustration 3 et exemple en Illustration 5) et non comme une ligne de partage stricte. En effet, la crête piézométrique varie dans l'espace selon les contraintes climatiques (il est commun de parler de variabilité saisonnière) et/ou les influences des captages qui sollicitent la nappe. En outre, les crêtes piézométriques ne sont jamais abruptes : il s'agit d'un replat par lequel une ligne de partage est un tracé très arbitraire. Il y a donc lieu de considérer là aussi que des BAC peuvent se superposer localement. Par définition, le BAC retenu lors de la délimitation correspond au BAC le plus étendu en surface - soit le BAC le plus étendu en surface ou la somme des différents BAC. A titre

d'exemple, sur l'illustration 3, le BAC final correspond à la somme des BAC saisonniers 1 et 2.

- dans des cas plus complexes le bassin hydrogéologique prend en compte plusieurs aquifères. Le bassin d'alimentation du captage est toujours compris à l'intérieur du bassin hydrogéologique de l'aquifère principal mais il peut alors s'étendre au-delà de l'extension structurale de l'aquifère principal (cas de formations géologiques à pendage marqué se prolongeant de part et d'autre d'une crête hydrographique). A titre d'illustration, en fonction des régimes hydrogéologiques saisonniers, il est fréquent que :
 - les cours d'eau qui drainaient la nappe en période d'étiage alimentent cette même nappe en saison des pluies (exemple en illustration 3 Le BAC 1 en début de saison des pluies comprend une part d'alimentation par la rivière donc par l'ensemble de son bassin versant topographique. Le BAC 2, en début de saison sèche ne comprend pas les infiltrations de la rivière. Cette dernière étant au contraire considérée comme drainée par l'aquifère).
 - des aquifères superposés inversent leurs échanges entre les périodes de hautes eaux et les périodes de basses eaux. Cette inversion de circulation hydraulique en fonction des saisons peut perturber la géométrie des bassins d'alimentation de captage.
- le bassin d'alimentation d'un captage qui, rappelons le, est le secteur en surface qui participe à l'alimentation du captage par l'infiltration directe des eaux ou par l'infiltration de cours d'eau, suit généralement la projection verticale de la portion de la nappe qui alimente le captage, mais il peut en différer par ajout ou retrait de zones en surface.
- dans le cas d'une couverture imperméable, il peut arriver qu'une zone à proximité du captage ne participe pas à son alimentation. En effet, les axes de ruissellement peuvent orienter les écoulements vers un autre bassin. Cette surface ne fait donc pas partie du bassin d'alimentation considéré. A l'inverse les zones attenantes (versants en bordure) caractérisées par des écoulements de subsurface ou par du ruissellement diffus s'infiltrant en partie, participent à l'alimentation du captage.

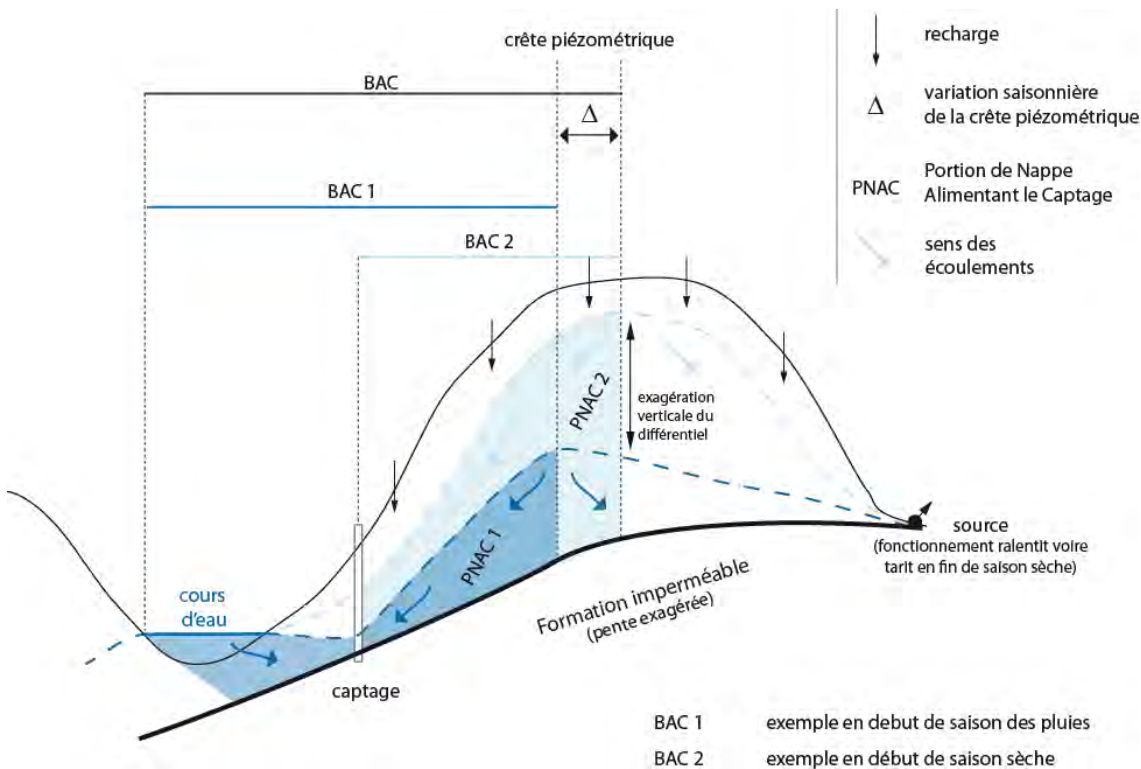


Illustration 3 : Variations saisonnières de la délimitation des BAC.

D'après la méthodologie (BRGM/RP-55874-FR), le style hydrogéologique de Mayotte est à rapprocher des aquifères discontinus fissurés compte tenu :

- de l'extrême hétérogénéité spatiale des formations géologiques qui rend délicat la constance des paramètres hydrodynamiques d'un compartiment aquifère à l'autre.
- de la présence importante de limites structurales. Les aquifères sont compartimentés par des barrières géologiques ou hydrogéologiques de type : failles ou dykes ou formations géologiques latéralement contigües érodés et colmatés sont des aquicludes potentiels. Il s'agit là d'une modification méthodologique par rapport à la méthodologie de référence.

La différence majeure entre les milieux aquifères discontinus fissurés présentés dans la méthodologie et les aquifères rencontrés à Mayotte se trouve être que la perméabilité de fracture est très restreinte. Les fractures ont davantage un rôle de barrière hydraulique que de drain comme il est possible de l'observer en milieu de socle quelque soit son degré d'altération - à condition bien évidemment qu'il ne soit pas trop important.

Par conséquent, la délimitation de l'emprise géographique du BAC est déterminée sur la base des caractéristiques suivantes adaptées du guide méthodologique en contexte d'aquifères discontinus fissurés. Cette adaptation du guide est nécessaire au regard de l'état des connaissances géologiques, hydrogéologiques et historique sur de nombreux

secteurs de Mayotte qui s'avère incomplet et souffre de l'absence de nombreuses données ou de suivis denses, précis et à l'historique long et complet.

En ce qui concerne la géologie, la structure des unités géologiques qui conditionnent le développement spatial des aquifères est souvent méconnue à Mayotte. Le style géologique régional est marqué par l'imbrication des coulées ou épisodes de coulées en système de paléovallées, avec des phases d'érosion entre les différents épisodes, dont les points d'émission ont migré au fil de l'évolution de l'île. A ce style se surimposent les intrusions tardives de phonolithes ainsi que les épisodes volcaniques récents de type phréatomagmatique ou plus généralement explosif qui perturbent la structuration des géométries en coulée.

La structure géologique est déterminée sur la base des informations cartographiées par Stieljes (Stieljes *et al.* – 1988). Ces informations sont complétées – dans les secteurs les plus investigués – par les résultats des études suivantes qui dressent une cartographie de la structure géologique :

- Etude de l'approche géologique et hydrogéologique des ensembles volcaniques de Grande-Terre réalisée sur le secteur de M'tsambo, Bouéni, Poroani et M'tsapéré (BRGM/RP-52193-FR).
- Caractérisation des masses d'eau souterraine. Cette étude, réalisée sur le secteur Nord Est de Grande Terre apporte des éléments concrets sur la caractérisation des aquifères, leur géométrie et les modalités de leur fonctionnement (BRGM/RP-56600-FR).

En ce qui concerne les connaissances hydrogéologiques, les investigations des aquifères mahorais sont récentes (les premiers forages ont été réalisés en 1990-1991), et à ce titre de nombreux secteurs n'ont pas encore fait l'objet d'études ou alors partiellement. Les documents d'informations utiles à la définition des caractéristiques aquifères sont principalement les rapports des campagnes de forage, à savoir la reconnaissance des secteurs d'implantation, la réalisation de profils géophysiques, l'estimation du potentiel en eau et l'interprétation des cuttings.

2) Tracé du bassin d'alimentation des captages d'eau souterraine

Le tracé des BAC d'eau souterraine est la concordance de deux paramètres : les limites structurales du bassin et la surface nécessaire à son alimentation. La délimitation d'un bassin d'alimentation de captage ne sera validée que si la surface consacrée est considérée comme suffisante pour subvenir à l'alimentation du captage. Les éléments de décision au tracé des deux paramètres sont listés ci après.

• Les limites

Dans la majorité des cas, à l'échelle du 1/25 000, les considérations suivantes sont vérifiées à Mayotte et serviront au tracé des limites :

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

l'ouvrage. A titre l'exemple, l'aquifère exploité par le forage de Kwalé 1 a une surface (une PNAC) comprise entre 1 et 1,5 km² (BGRM/RP-56438-FR).

- le style géologique de Mayotte ainsi que la taille des unités ne sont pas des arguments qui favorisent l'intersection d'une structure aquifère avec plusieurs bassins versants de surface (dykes colmatés, structuration géologique conditionnée par le paléorelief, etc.). Par ailleurs, comme l'atteste l'illustration 4, niveau piézométrique et altitude du sol suivent une relation linéaire (à quelques exceptions près), impliquant par la même que bassins versant souterrains et bassins versant de surface sont relativement corrélés ; il est entendu que ces corrélations sont valides sur des extensions réduites, compte tenu du fort compartimentage des aquifères (cf. Aquifères et Eaux souterraines en France – 2006, Chap. XIII). Ces observations nous amènent à énoncer le principe suivant selon lequel – en règle générale, à l'échelle d'un bassin versant - l'alimentation des aquifères sera inscrite au sein d'un seul et même bassin versant de surface.
- la participation des eaux de surface dans l'alimentation des nappes par infiltration dans le lit des cours d'eau implique souvent la prise en compte de tout ou partie du bassin versant de surface dans le tracé du bassin d'alimentation du captage souterrain.
- le sens d'écoulement des aquifères (hors cas connu) est contrôlé par la géométrie en paléovallées des différentes coulées, orientées des reliefs vers les côtes les plus proches, c.à.d. dans le sens des plus grandes pentes. Dans la plupart des cas, la surface piézométrique suit le relief topographique de surface (cf. Illustration 4). Par conséquent, au regard de ces informations et en l'absence de données complémentaires, à l'échelle de la délimitation des BAC, le sens d'écoulement de(s) nappe(s) sera considéré comme similaire à celui des écoulements de surface . Ce schéma général sera le cas échéant reconsidéré si des éléments de connaissance disponibles localement permettaient d'envisager des écoulements selon des directions différentes.

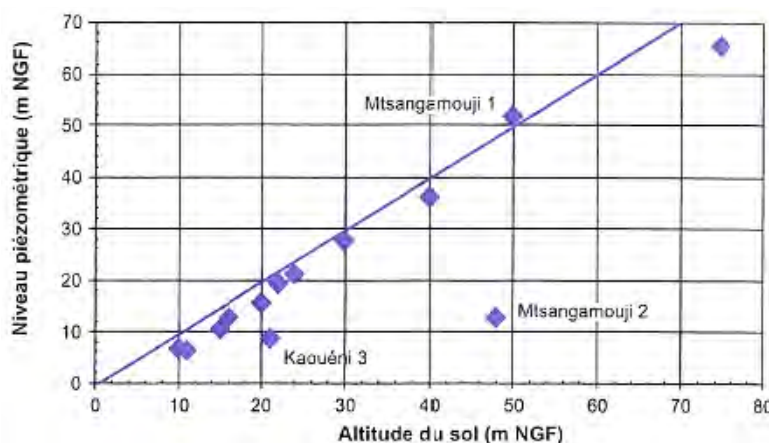


Illustration 4 : Relation entre le niveau piézométrique et l'altitude au sol des ouvrages de la campagne de 1999-2000 (Aquifères et Eaux souterraines en France – 2006, Chap. XIII)

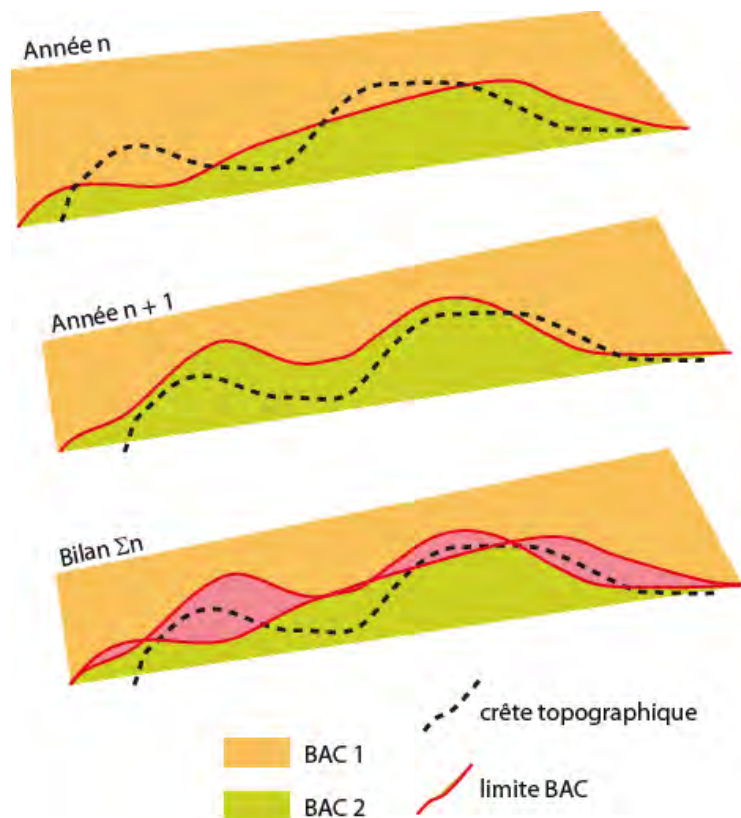
Pour chacun des captages, l'analyse des chroniques piézométriques à disposition, portant notamment sur l'altitude des niveaux piézométriques, leurs variations annuelles, les modalités d'alimentation et de vidange des aquifères (réactivité face au

signal pluviométrique, mimétisme interannuel des courbes piézométriques, etc.) permettent de définir quelques indices relatifs aux mécanismes d'infiltration :

- Proximité de la zone d'alimentation ;
- Vitesse de transfert ;
- Alimentations uniques ou plurielles (sous certaines conditions).

Comme rappelé précédemment, la limite des bassins d'alimentation de captages sera illustrée en projection par un trait linéaire mais correspondra dans la réalité à une bande de largeur variable comme en témoigne l'illustration ci-dessous.

Illustration 5 : Principe de délimitation du bassin d'alimentation de captage (projection en surface). La ligne rouge correspond à la crête piézométrique séparant les deux unités aquifères et dans le cas présent les deux BAC. La superposition Σn correspond à l'incertitude..



• La surface

La surface du BAC est en partie approchée par une simple relation (E4) de type pluviométrie / infiltration / volume exploité / surface. Sur chaque ouvrage, connaissant la pluviométrie, le potentiel d'exploitation de l'ouvrage et la part des infiltrations, il est possible d'estimer la Surface Théorique d'alimentation du captage (ici ST) ou la projection en surface de la PNAC (Portion de Nappe Alimentant le Captage, comme défini dans le rapport BRGM/RP-55874-FR).

$$ST = \frac{F_{\text{sout}}}{V_{\text{inf}}} = \frac{(D_{\text{AE}} / P_{\text{expl}})}{(P_R \times n_{\text{eff}})}$$

E4 : Calcul de la surface théorique d'alimentation de captage

Avec

ST : Surface Théorique d'alimentation (m²)

F_{sout} : Flux souterrain (m³/an)

V_{inf} : Volume infiltré (m³/m²/an) = précipitations efficaces

D_{AE} : Débit annuel exploité de l'ouvrage (m³/an)

P_{expl} : Part du potentiel exploitable (%)

P_R : Précipitations annuelles moyennes (m)

n_{eff} : Part infiltrée des précipitations (%)

Les conditions du calcul en contexte mahorais sont les suivantes :

- les précipitations (P_R) retenues pour le calcul sont celles de la station pluviométrique la plus proche à altitude équivalente (cf. § 3.2.2), généralement la station pluviométrique représentative de l'ensemble du bassin versant. Aucune gradation des précipitations en fonction de l'altitude et de l'extension du bassin n'est prise en compte ; la taille et le gradient d'altitude des bassins étant considérés comme trop faibles (cf. § 3.2.2) ;
- la part infiltrée des précipitations (n_{eff}) considérée est de 14 % en moyenne de la valeur des précipitations P_R (Lapègue, 1999, exemple de Coconi, années 1993 et 1994) ;
- la part exploitée des aquifères (P_{expl}) par les forages est estimée à 25 % des flux transitant annuellement par l'aquifère (= recharge) à l'exception des cas où P_{expl} est connu avec plus de précision (exemple du forage de Kwalè 12307X0022). Dans le cas des sources qui sont l'exutoire naturel de la nappe, la part exploitée est estimée à 90 % (des sources de moindre importance peuvent contribuer à hauteur de 10 % dans la vidange de la nappe).

Il est important de noter que l'ordre de grandeur de la surface théorique de BAC est basé uniquement sur la surface participant à l'alimentation par infiltration directe des précipitations. Le calcul de cette surface ne tient pas compte :

- des alimentations par infiltration des cours d'eau venant de l'amont.
- de la participation par ruissellement des versants imperméables
- des infiltrations favorisées par les objets de type retenue collinaire, étangs, zones humides, etc.

- des alimentations par participation d'autres bassins versants souterrains (exemple d'une source qui alimente un cours d'eau qui par infiltration alimente un aquifère sous-jacent). Le BAC de l'aquifère sous-jacent intégrera le bassin versant du cours d'eau de surface ainsi que le BAC souterrain de la source amont.

En conséquence, la superficie approchée par la relation E4 est une superficie « minimale » d'alimentation qu'il sera nécessaire de prendre en compte lors du tracé de délimitation. La variation indépendante des paramètres de la relation (1) (cf. Tableau 1) conditionne l'augmentation et/ou la diminution de la taille de la surface théorique. Il est important de noter que l'équation est strictement proportionnelle et/ou strictement inversement proportionnelle à l'un ou l'autre des paramètres. Par conséquent, la variation d'un paramètre de X % impliquera une variation stricte de ST de + X % ou – X % selon le tableau suivant.

Variation des paramètres								
Précipitations annuelles moyennes (P_R)	↗	↘	/	/	/	/	/	/
Part infiltration (n_{eff})	/	/	↗	↘	/	/	/	/
Part potentiel exploitable (P_{expl})	/	/	/	/	↗	↘	/	/
Débit annuel exploité (D_{AE})	/	/	/	/	/	/	↗	↘
Conséquence sur la taille de la surface théorique d'alimentation (ST)	↘	↗	↘	↗	↘	↗	↗	↗

Tableau 1 : Variations de la taille de la surface théorique d'alimentation de captage en fonction de la variation indépendante des paramètres de la relation E4.

Ces considérations permettront d'esquisser à la fois la taille et les limites des structures aquifères des ouvrages captés et particulièrement dans les secteurs encore peu investigués. L'ordre de grandeur de cette surface théorique sera comparé avec la surface du bassin d'alimentation tracée sur la base des critères topographiques et géologiques. La comparaison de cette surface « minimale » avec le tracé basé sur l'information topographique et géologique permettra de confirmer et/ou d'infirmer les limites retenues.

3.1.3. Synthèse relative à la délimitation des bassins d'alimentation de captage

Sur la base des données actuelles et des moyens mis en œuvre, les principes de délimitation des bassins d'alimentation de captage à Mayotte peuvent être compilés dans le tableau suivant.

Limites du BAC	Eaux de surface	Eaux souterraines
Prise en considération des limites du bassin versant topographique de surface	Obligatoire en amont du captage quelque soit le contexte	Obligatoire en amont du captage si mise en évidence d'alimentation par infiltration du cours d'eau
Prise en considération des limites du ou des bassin(s) versant(s) souterrain(s)	Obligatoire si l'exutoire du ou des bassin(s) versant(s) souterrain(s) alimente(nt) le cours d'eau en amont du captage	Obligatoire si l'exutoire du ou des bassin(s) versant(s) souterrain(s) alimente(nt) directement la nappe ou le cours d'eau en amont des infiltrations
Vérification de l'ordre de grandeur de la surface du BAC	Bilan hydrologique (non réalisé dans le cadre de l'étude)	relation de type pluviométrie / infiltration / volume exploité / surface

Tableau 2 : synthèse de délimitation des bassins d'alimentation de captage

3.2. CARACTERISATION DE LA VULNERABILITE DES CAPTAGES

3.2.1. Définition

Dans le domaine de la qualité des eaux, la vulnérabilité d'une ressource peut être définie, dans un sens large, comme sa plus ou moins grande capacité de défense « naturelle » face à un processus de contamination ; cette notion étant à relier avec le degré d'exposition de la ressource.

Plus généralement, le concept de vulnérabilité utilisé dans le cadre de la protection des ressources en eau repose sur la manière de décrire la sensibilité de la ressource à toute forme de stress. On peut donc parler de vulnérabilité des eaux à la sécheresse ou aux inondations par remontée de nappe, mais aussi aux contaminations chroniques ou diffuses.

L'action COST 620 (Vulnerability and risk mapping for the protection of karst aquifers) a contribué à la définition de deux concepts de vulnérabilité :

- la vulnérabilité intrinsèque est le terme utilisé pour représenter les caractéristiques topographiques, géologiques, hydrogéologiques, hydrologiques, pédologiques et les aménagements anthropiques qui déterminent les secteurs les plus contributifs à l'alimentation du captage qu'il soit souterrain ou de surface, donc susceptibles de représenter un vecteur de pollution prépondérant vis-à-vis du captage. La vulnérabilité intrinsèque reste indépendante de la nature des pollutions.
- la vulnérabilité spécifique est le terme utilisé pour définir la vulnérabilité d'une ressource captée à un contaminant particulier ou à un groupe de contaminants. Elle prend en compte les propriétés des contaminants et leurs relations avec les divers composants de la vulnérabilité intrinsèque.

Dans le cadre de la présente étude, en raison des priorités visées qui sont en premier lieu la qualité de l'eau pompée au niveau du captage et par extension la protection de la ressource à l'échelle du bassin, seule la vulnérabilité intrinsèque des bassins d'alimentation de captage souterrain et de surface sera déterminée dans ce chapitre.

La surimposition des paramètres contrôlant la vulnérabilité d'un captage (de surface ou souterrain) permet de mettre en évidence les secteurs sensibles à l'échelle du bassin (se reporter au §. 3.5). A terme, la mise en relation du degré de **vulnérabilité** de la ressource en eau (de surface et souterraine) et des facteurs des **pressions** hiérarchisés (cf. § 3.4 : activités polluantes à proximité, urbanisation, pratiques agricoles, aménagements, stockage de déchets, etc.) permettra de déterminer par croisement des informations l'exposition du bassin d'alimentation et du captage concerné aux risques de dégradation de la qualité des eaux (cf. § 3.5).

3.2.2. Approche de la vulnérabilité : la question des paramètres qui la conditionnent

L'approche analytique retenue pour la caractérisation de la vulnérabilité des captages à Mayotte requiert : dans un premier temps l'identification des paramètres caractérisant cette vulnérabilité et dans un second temps le choix d'unités fonctionnelles qui rentreront dans le calcul.

Usuellement, la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines et de surface est conditionnée à chaque étape de la circulation des eaux par les paramètres suivants (au nombre de 7, à mettre en relation avec l'illustration 6 et détaillés ci-après) :

- Phase ① : évaluation de la lame d'eau disponible pour les écoulements : pluie efficace. Les paramètres qui contrôlent la vulnérabilité à ce stade sont :
 - les précipitations ;
 - réserve utile du sol (prise comme identique sur le BV) ;
 - évapotranspiration (identique sur le BV, Lapègue 1999) ;
- Phase ② : partition entre infiltration et ruissellement. Les paramètres qui contrôlent la vulnérabilité à ce stade sont :
 - la topographie ;
 - l'organisation du réseau hydrographique ;
 - la nature lithologique et l'épaisseur des sols ;
 - la présence et l'orientation des discontinuités (failles, dykes, contacts lithologiques, etc.)
 - la densité de la couverture végétale de surface ;
- Phase ③ - uniquement pour les eaux souterraines : transfert vers la nappe et atteinte du captage. Les paramètres qui contrôlent la vulnérabilité à ce stade sont :
 - l'épaisseur de la zone non saturée ;
 - la transmissivité de l'aquifère - ce paramètre est pris en compte dans la mesure où on s'intéresse à un écoulement dans l'aquifère, l'enjeu considéré prioritairement étant la qualité de l'eau au niveau du captage d'eau potable ;

En ce qui concerne les phases ② et ③, certains paramètres (exemple des discontinuités, ou des faciès géologiques qui conditionnent les formations pédologiques sus-jacentes) peuvent avoir une incidence directe ou héritée sur les 2 phases.

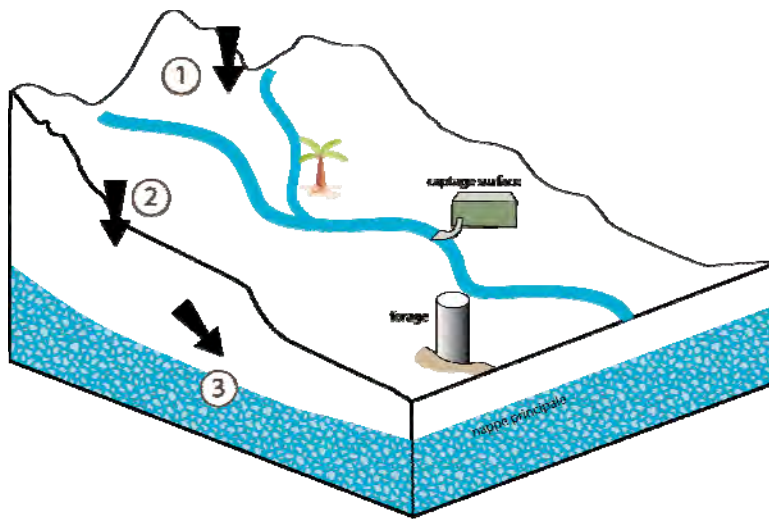


Illustration 6 : détails de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines et de surface à chaque étape de la circulation des eaux météoriques : ① précipitation et concentration, ② rétention et infiltration et enfin ③ transfert vers la nappe.

La pertinence des paramètres est discutée dans les chapitres suivants. Seuls les paramètres qui répondent aux conditions suivantes seront retenus dans la méthodologie de caractérisation de la vulnérabilité du captage :

- i. Le rôle du paramètre en question est connu et il conditionne de manière univoque la vulnérabilité du captage ;
- ii. La cartographie ou données du paramètre couvre uniformément le bassin d'alimentation ;
- iii. La variation du paramètre impacte sensiblement le degré de vulnérabilité du captage ;

1) Les précipitations

Bien que de dimension restreinte, la répartition des précipitations à l'échelle de l'île de Mayotte (carte des isohyètes en Illustration 7) n'échappe pas à la règle. Les précipitations sont hétérogènes et leur répartition est conditionnée par la géographie (exposition du versant aux vents dominants, éloignement à la côte, etc.) et le relief comme en témoignent les résultats de l'étude pluviométrique BRGM 2008 (rapport BRGM/RP-56881-FR) qui définit près de 3 régions pluviométriques à Mayotte (Centre et Sud (1), Nord de Mamoudzou et d'altitude (2) et Convalescence (3)) mais aussi par l'occurrence, la trajectoire et l'importance des phénomènes climatiques (dépression tropicale, ouragan, cyclone, etc.)

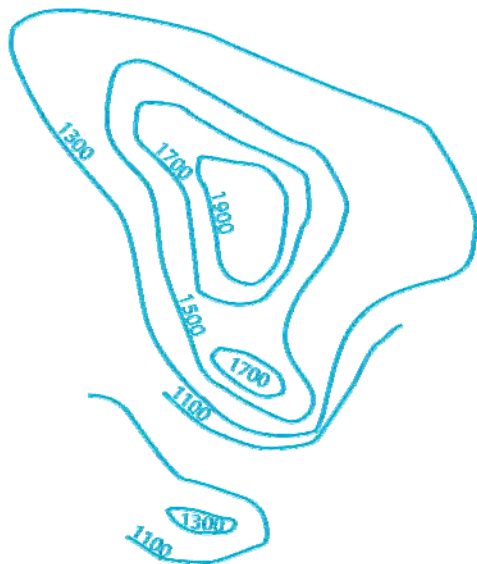


Illustration 7 : distribution moyenne des précipitations annuelles à Mayotte (source des données DAF)

A la lecture de la carte, la variabilité des précipitations à Mayotte est au maximum de l'ordre d'un facteur 2 entre les zones les plus arrosées (environs du mont Combani avec plus de 1900 mm/an) et les zones les plus sèches (Chirongui et Bambo Est avec moins de 1100 mm/an). Cette variabilité est toute relative si l'on compare avec la Réunion par exemple où elle atteint un facteur 6 (source Météo France). Cf. pour la localisation des postes pluviométriques le rapport BRGM/RP-56881-FR.

La gradation des précipitations en fonction de l'altitude (cf. Lapègue, 1999 et Illustration 8) est peu marquée, de l'ordre de 1 mm/an/m d'altitude. Les points n'étant pas homogènement répartis sur une droite, la gradation en fonction de l'altitude n'explique la variabilité des précipitations qu'à hauteur de 50 %. Les écarts type importants (de l'ordre de 5 % ou 72 mm/an) montrent que les précipitations sont aussi fortement conditionnées par les autres facteurs cités ci-dessus.

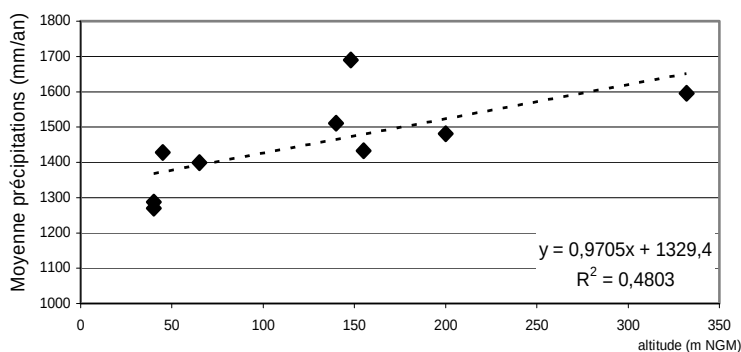


Illustration 8 : Gradation des pluies (moyenne annuelle des 9 stations pluviométriques de la DAF) en fonction de l'altitude. La regression linéaire montre une gradation moyenne peu marquée de + 1 mm de précipitations/an/m d'altitude.

Comme retenu au § 3.1.2.2, la part de l'infiltration est en moyenne de 14 % des précipitations enregistrées) et les précipitations efficaces (entendues comme l'eau disponible à la fois pour le ruissellement et l'infiltration) représentent 46% des précipitations enregistrées (Lapègue – 1999, exemple de Coconi, moyenne des années 1993 et 1994).

Bien que ces précipitations efficaces conditionnent la recharge annuelle des aquifères à l'échelle de l'île et assurent l'alimentation des réseaux hydrographiques superficiels, il est moins évident que la variabilité locale de ces précipitations se traduise de la même façon en termes d'infiltration, que ce soient dans le zonage ou en termes de proportion (en considérant bien évidemment les autres paramètres qui entrent dans l'équation de la vulnérabilité), et ce en raison des arguments suivants :

- **des temps de concentration très rapides** : les eaux précipitées sur les versants rejoignent le lagon en à peine quelques heures. Ce phénomène couplé aux faibles perméabilités des sols étayent difficilement la thèse selon laquelle la distribution des infiltrations est le symétrique au sol des précipitations efficaces. Ces temps de concentration sont des aspects à prendre en compte dans l'estimation de la vulnérabilité de la ressource en eau de surface au niveau des captages ;
- **une recharge en fonction des saisons** : la part d'infiltration des précipitations qui se produisent en saison sèche est très faible comme en témoigne l'illustration 9 (cf. rapport BRGM/RP-56773-FR). Tout épisode pluvieux - quelque soit son intensité (relative, car les pluviométries cumulées en saison sèche restent sous la valeur des 300 mm), se produisant en dehors de la saison humide - n'a qu'une action réduite sur la recharge. A l'inverse, en saison des pluies, les épisodes pluvieux plus conséquents et donc plus généralisés à l'échelle de l'île participent significativement (dans des proportions non encore quantifiées) à la recharge des nappes.

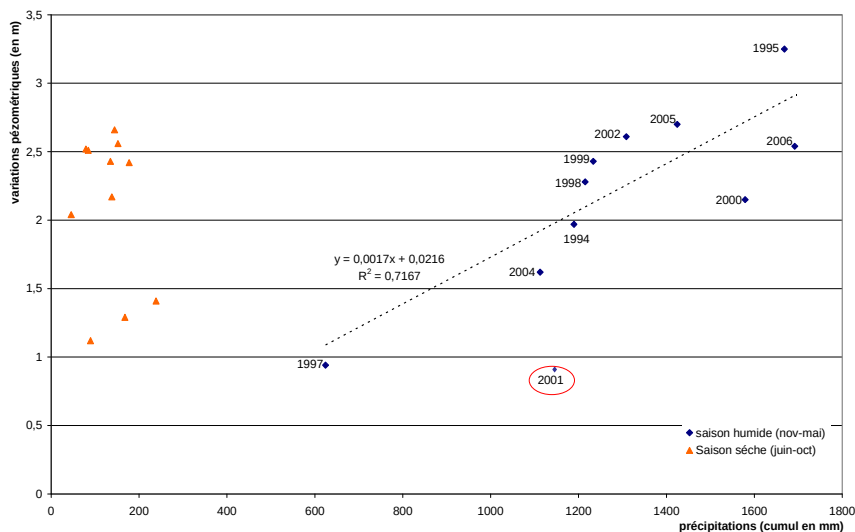


Illustration 9 : Influence des précipitations saisonnières sur l'amplitude en valeur absolue de la recharge (en bleue) et de la vidange (en orange) de l'aquifère de Kawéni au droit du piézomètre 1 8''. Ce graphique témoigne de la non participation des précipitations à la recharge des aquifères en saison sèche.

En résumé, la variabilité locale des précipitations ne sera pas retenue quantitativement dans l'estimation de la vulnérabilité, d'autant plus si les précipitations varient peu à l'échelle d'un BAC.

Néanmoins, les observations montrent que la recharge se déroulant essentiellement en saison des pluies, la vulnérabilité des aquifères et donc des captages d'eau souterraine est très plus prononcée entre les mois d'octobre et de mai que le reste de l'année.

En ce qui concerne les captages d'eau de surface, leur vulnérabilité aux précipitations court toute l'année et augmente aussi en saison des pluies. En saison sèche, il est important de noter que le soutien des cours d'eau par les nappes se traduit par un apport d'eau souterraine de bonne qualité.

2) La topographie et la densité du réseau hydrographique

Dans le cas des bassins d'alimentation des captages d'eau de surface, sont identifiés comme vulnérables à Mayotte, les secteurs présentant des pentes importantes qui ont pour effet d'accélérer la concentration des ruissellements en direction des cours d'eau et donc des captages et de limiter ainsi les phénomènes de ralentissement des écoulements, rétention ou infiltrations diffuses. Les ravines affluentes (à régime torrentiel) des cours d'eau principaux en sont un exemple, car elles participent directement à cette vulnérabilité dans le cas des captages de surface.

En ce qui concerne les bassins d'alimentation des captages d'eau souterraine, les secteurs de moindre pente de type plateaux, fonds de vallée et dépressions (les cratères de Maar fréquents à Mayotte sont un exemple de dépression type) qui ralentissent la concentration des ruissellements et participent au contraire à leur infiltration sont considérés comme plus vulnérables. Les réseaux hydrographiques sont aussi des zones de vulnérabilité importante car les infiltrations directes dans le lit des cours d'eau représentent une part importante de l'alimentation des nappes.

Ces paramètres seront exploités lors du calcul de l'IDPR (cf. 3.2.3.1) sur la base des informations du MNT au pas de 25 m et du réseau hydrographique de la BD topo (tous deux de source IGN©)

3) La géologie

L'île de Mayotte est composée pour l'essentiel de basaltes, de phonolites, de produits pyroclastiques et de quelques formations sédimentaires qui occupent les fonds de vallée et les pénéplaines. Ces formations géologiques rencontrées en surface se sont déposées par épisodes entre -8 Ma et l'actuel. Outre le contrôle par le relief, la perméabilité des lithologies conditionne dans des proportions relatives la vulnérabilité des ressources en eau souterraine et des captages souterrains par conséquent, en favorisant ou non les infiltrations en direction des niveaux aquifères. A l'inverse, les lithologies les moins perméables et les plus continues favorisent le ruissellement au détriment de l'infiltration et augmentent le degré de vulnérabilité des captages d'eau de surface.

A l'heure actuelle, compte tenu de l'état limitée des connaissances géologiques, la classification des lithologies selon leur degré relatif de perméabilité est délicate. Les études géologiques à Mayotte montrent que les lithologies considérées comme les plus perméables sont probablement les remplissages volcano-détritiques et alluvionnaires de fond de vallée et/ou dépressions volcaniques d'origine pléistocène (le fond du cratère de Kawéni en est un exemple mais aussi la vallée quaternaire de Dembéni, cf. rapport BRGM/RP-56773-FR) ainsi que certains produits scoriacés par

endroit. Au contraire, les faciès altérés de type argile d'altération, basaltes altérés et produits pyroclastiques très altérés sont les lithologies considérées comme les moins perméables. A titre d'exemple, les padzas, reliefs hérités de l'altération des basaltes à néphéline ou ankaramitique comptent parmi les formations les plus imperméables de Mayotte. En revanche, il existe peu d'information à notre disposition permettant d'établir une distinction entre les basaltes ankaramitiques du Mio-Pliocène à altération modérée (édifice Sud et Nord de l'île), les phonolites Pliocène qui forment les principaux reliefs de l'île et les coulées récentes Pléistocène du M'tsapéré et du massif de Digo sur des critères relatifs de perméabilité.

Grossièrement et à l'échelle d'un bassin, il est possible de rattacher le caractère de perméabilité des formations basaltiques avec leur âge. Plus les formations basaltiques sont anciennes, plus le degré d'argilisation est important, plus les unités sont colmatées et par conséquent moins elles sont perméables. Néanmoins, un bémol est à apporter sur les formations pyroclastiques, largement répandues et dont les perméabilités peuvent être très distinctes ainsi que sur les formations phonolitiques massives dont les comportements à l'érosion sont distincts des basaltes. L'utilisation de l'indice IDPR (§ 3.2.3.1) apportera des précisions sur les caractères de perméabilité en fonction des lithologies.

Les informations lithologiques utilisables sous forme d'indice de perméabilité pour le calcul de la vulnérabilité sont celles figurées sur la carte géologique de Mayotte au 1/50 000 (Stieljes et al. – 1988, cf. Annexe 2), complétées au cas par cas des informations de terrain et des investigations géologiques récentes (BRGM/RP-51498-FR, BRGM/RP-52193-FR et BRGM/RP-56600-FR, etc.).

Lithologies	Remarques
Formations sédimentaires actuelles, Remplissages volcano-détritiques, alluvions de rivière et de plaines alluviales et colluvions de bas de pentes	Occupent les fonds de ravines, de vallées intermédiaires et de plaines alluviales ou pénéplaines, les fonds de cratère et les bas de pente
Formations volcaniques Holocène ou Pléistocène Cinériles et scories basaltiques prépondérantes. A ces formations sont rajoutées les projections de cendres en couverture dite d'âge indéterminé.	Cinériles et scories surtout présentes sur Petite terre et à signaler dans les secteurs de Mamoudzou et de Majicavo. Les cendres en couverture sont surtout présentes sur les secteurs de Combani, Mohogoni et Kahani.
Formations volcaniques Pléistocène Pyroclastites de Kawéni, laves différenciées des massifs de Digo et de M'tsapéré et phonolithes du M'tsapéré	Formations peu altérées et concentrées dans le Nord Est de l'île
Formations volcaniques Pliocène Basaltes ankaramitiques et phonolites alcalines	Forment les principaux reliefs de l'île, principalement au Sud (Mt Bénara, Mt Choungui) et au Nord la chaîne de

	Bandraboua à M'tsangadoua jusqu'à l'îlot M'tsambo
Formations volcaniques Mio-Pliocène basaltes ankaramitiques et à néphélines des boucliers anciens septentrional et méridional. A ces formations il faut rajouter les formations dites d'altération qui constituent la majorité des padzas de l'île.	Dans ce nombreux cas, ces formations constituent le substratum des aquifères mahorais. Les formations dites d'altération sont fortement imperméables, il convient de nuancer en ce qui concerne les formations basaltiques moins altérées de type basaltes ankaramitiques ou néphélines qui peuvent à l'occasion présenter des perméabilités non négligeables.

Tableau 3 : Principales formations lithologiques à Mayotte (extraites de la carte géologique, Stieljes – 1988)

4) La pédologie

La géologie seule ne permet pas d'interpréter exclusivement la capacité d'infiltration des faciès. En effet, le degré d'altération des lithologies (et par conséquent de développement des sols = pédogenèse) est un élément à prendre en considération car il conditionne - au moins dans les mêmes proportions que la géologie - la capacité d'infiltration des sols.

Il est important de noter qu'en milieu volcanique insulaire « jeune » ou du moins relativement, la géologie est le facteur principal de conditionnement des faciès pédologiques. Ceci s'explique par (i) une lithologie restreinte à une ou quelques famille(s) de faciès volcanique, (ii) la sensibilité prononcée des lithologies à l'altération et (iii) l'absence ou du moins la faible proportion de sols développés (au sens humique) comparé aux milieux plus continentaux où les processus de déplacements et de remaniements des sols sont plus anciens et peuvent chevaucher davantage de formations. Dans le cas de Mayotte, il est intéressant de noter qu'un faciès géologique particulier conditionne le développement d'un horizon pédologique particulier.

Les travaux réalisés par le CIRAD (Latrille et al. – 1981, cf. carte en Annexe 3) et Lapègue (Lapègue – 1999) ont permis de dresser une carte des unités morphopédologiques de Mayotte à l'échelle 1/50 000 en mettant en évidence plus d'une vingtaine d'unités aux caractéristiques pédologiques spécifiques et interprétables en termes de capacité d'infiltration (extraits de la thèse de Lapègue et terminologie issue de Carpenter - 1997.). Ces unités peuvent être regroupées en 5 formations principales :

Les sols de zone sommitale : sols développés sur les sommets, jeunes, peu épais (affleurement fréquent de la roche mère en place, reliefs résiduels) et peu soumis au lessivage mais très soumis à l'érosion mécanique.

Les sols bruns : sols développés sur des pentes assez fortes. Ce sont des sols peu évolués, de composition et de support variables. Ils sont de faible épaisseur et donc

sensibles à l'érosion mécanique et montrent une altération incomplète, les argiles sont de type smectite ou montmorillonite dans le Sud et tendent vers l'illite en profondeur.

Les sols ferralitiques en place : sols relativement épais qui se développe souvent en contexte de planèze² (peut atteindre des épaisseurs décimétriques). La séquence supérieure et d'épaisseur métrique, c'est un matériau homogène dans lequel toute structure rocheuse a disparu et dont la perméabilité verticale est élevée. La séquence inférieure est encore dominée par la présence de la roche mère et de fait relativement imperméable. Ces sols – fortement soumis au ravinement – forment les reliefs de type padzas.

Les sols ferralitiques remaniés : ce sont les sols les plus abondants de l'île. Ils résultent du déplacement en masse des sols ferralitiques en place (du moins des niveaux supérieurs de ces sols). L'épaisseur de ces sols est importante, elle varie entre 1 et 5 m. Ils contiennent des blocs émoussés de roches mères et des éléments peu altérés sans structuration particulière. En raison de la compaction due au déplacement (mécanisme de fluage pour la plupart) la perméabilité des sols est qualitativement moindre que celles des sols ferralitiques en place.

Les sols de fond de vallée, alluviaux et/ou colluviaux : sols composites d'accumulation en fonds de vallée, de plaines littorales ainsi que de cordons colluviaux (ces derniers sont souvent riches en graviers altéritiques). Leur perméabilité est très variable d'un bassin à l'autre et permet ou non le développement des nappes d'accompagnement des cours d'eau.

De même qu'en ce qui concerne les faciès géologiques, l'utilisation de l'indice IDPR (§ suivants) apportera des précisions sur les caractères de perméabilité en fonction des horizons pédologiques.

5) Les discontinuités

Dans le cas des bassins d'alimentation de captages des eaux souterraines, sont identifiés comme vulnérables en contexte volcanique jeune, les secteurs présentant des discontinuités qui favorisent :

- l'infiltration préférentielle des eaux en direction des niveaux aquifères à des vitesses sensiblement plus élevées que la moyenne des infiltrations locales et en l'absence de tout mécanisme d'épuration ;
- la circulation préférentielle des eaux dans la nappe en direction du ou des captage(s) selon l'orientation de ces discontinuités.

A Mayotte, par discontinuités sont entendues : les fractures, les dykes et les discontinuités lithologiques entre deux formations distinctes (entre deux coulées par exemple). Compte tenu de l'ancienneté des formations géologiques, les discontinuités

² Relief constitué par une coulée volcanique peu inclinée et disséquée par des ravins.

sont majoritairement altérées, voire argilitisées donc sensiblement colmatées et fonctionnent davantage comme des barrières hydrauliques que comme des drains favorisant les circulations préférentiels. Dans ce cas, ces objets tendent à compartimenter les aquifères et participent considérablement à la réduction de leur vulnérabilité vis-à-vis des pressions extérieures.

Par ailleurs, le rôle des discontinuités lithologiques entre deux formations est mal connu et il est délicat de leur imposer une étiquette de barrière hydraulique aussi bien qu'une étiquette de drain.

Compte tenu du manque d'informations, notamment cartographiques, les discontinuités ne sont pas utilisées comme une variable indépendante de caractérisation de la vulnérabilité des captages. En revanche, au même titre que la disposition des reliefs ou la lithologie, les discontinuités contrôlent en partie l'organisation des réseaux hydrographiques (contrôle par faille, développement d'un linéaire de cours d'eau le long d'un contact lithologique). Par conséquent, l'impact de ces discontinuités sera implicitement considéré dans le calcul de l'IDPR et dans le calcul de l'indice de rugosité (cf. § suivants) mais non discriminé comme paramètre indépendant.

6) La présence et la densité du couvert végétal de surface (CVS)

Le couvert végétal a la capacité de retenir, ralentir et/ou d'absorber une partie des écoulements (infiltrations) et favorise l'évapotranspiration. Après épuration par les premiers horizons humiques, le devenir des infiltrations est double : une partie est absorbée par le système racinaire et sert à l'alimentation du même couvert végétal, une autre partie se propage plus en profondeur et alimente la nappe. Pour ces dernières, on parle d'infiltrations. Les régions tropicales sont par définition densément couvertes de végétation, de sorte que lorsque le sol est sec, toute l'eau de pluie s'infiltré. Le sol (puis le sous sol) est donc le premier réservoir que les pluies rechargent en début de saison des pluies avant que les rivières ne voient leurs débits augmenter. Lorsque le réservoir sol est plein, des écoulements souterrains apparaissent au voisinage des rivières et leur fournissent des volumes importants. Les débits véritablement forts n'interviennent que lorsque les sols, totalement saturés, obligent les eaux météoriques à rejoindre les cours d'eau sur des aires saturées qui s'étendent latéralement. L'importance de la densité de drainage dans les crues tropicales s'explique par le rôle de ces surfaces saturées dont l'aire est fonction de la longueur des drains visibles (Grésillon 1995).

Ainsi, nonobstant le rôle du relief et de la couverture géologique et pédologique, la densité du couvert végétal contrôle en partie ruissellements et infiltrations. La régulation hydrologique jouée par la végétation a ainsi pour effet de diminuer la quantité, la concentration et le débit du ruissellement. Jusqu'à 70 % de couverture végétale, type couvert forestier, l'eau ruisselle en grande partie ; au-delà, l'eau percole dans le sol et ne ruisselle plus, sauf lors de la saturation des sols (F. Rey et al - 2004). Un couvert végétal fort est *a fortiori* synonyme d'une relative protection des eaux souterraines par rétention en surface donc limitation des infiltrations et d'une même

relative protection vis-à-vis des eaux de surface toujours par la rétention des ruissellements.

Outre la régulation hydrologique, la densité de la couverture végétale réduit les mécanismes d'érosion, ce qui se traduit par une baisse sensible de la turbidité des eaux des captages de surface et la réduction des risques de mouvements de terrain. Par conséquent le maintien d'un couvert végétal dense sur le bassin d'alimentation est une garantie de la réduction de la vulnérabilité des ressources et de la tenue du bassin.

La cartographie de la couverture végétale de surface est établie sur la base des informations du plan d'occupation des sols, et des observations de terrain. Cette cartographie peut être complétée des observations relevées sur photographies aériennes. Peuvent être distingués les secteurs au couvert végétal dense (forestiers) des zones agricoles ou partiellement défrichées, des secteurs dévégétalisés ou non végétalisés (padzas, zones urbaines, zones d'activités, etc.) à l'image du Tableau 4.

Type occupation	Densité du couvert végétal	Surface (km ²)
Réserve forestière	Dense	52
Forêt dense hors réserve forestière	Dense	20,6
Forêt dégradée, association de parcelles de culture et lambeaux de forêt	moyenne	198,2
Jachère, terres abandonnées pour fertilisation	moyenne	5,7
Polyculture vivrière intensive	faible	51,6
Monocultures de bananes	moyenne	5,3
Monocultures d'ylang ylang	moyenne	4,6
Cultures maraichères	faible	1,5
Zones urbanisés et d'activités	très faible	15,4

Tableau 4 : Occupation des sols à Mayotte densité et répartition surfacique du couvert végétal (données DAF 2003)

Les observations montrent que l'occupation des sols à Mayotte est majoritairement de type forêt dégradée composite de l'association de parcelles de cultures (maniocs, bananes, maïs, etc.) et de lambeaux de forêt (près de 200 km², ce qui représente plus de 50 % du territoire) soit une couverture végétale moyenne. Viennent ensuite les

forêts de ou hors réserve forestière (plus de 70 km² soit 20 % du territoire) qui constituent la couverture végétale la plus dense, et enfin, en troisième place, les polycultures vivrières partiellement cultivées (plus de 50 km² soit 15 % du territoire) qui assurent une couverture végétale faible. Les zones urbanisées représentent moins de 5 % du territoire mais sont appelés à augmenter dans les années qui viennent au détriment – en premier lieu - des zones de forêts dégradés.

L'occupation des sols au sein d'un BAC est un facteur éminemment anthropique dans notre société : elle résulte de choix d'exploitation du territoire effectué par l'homme. C'est donc – compte tenu de son importance pour la protection de la ressource en eau – un des facteurs principaux sur lesquels il est possible d'agir pour améliorer la qualité de l'eau au niveau du captage. La carte de la vulnérabilité ne prend donc pas en compte ce facteur : on pourra ainsi, sur une vulnérabilité figée dans le temps (à l'échelle humaine), considérer divers scénarii d'aménagement du territoire en modifiant la teneur de l'occupation du sol.

7) L'épaisseur de la zone non saturée

La vulnérabilité des captages souterrains est modulée par l'épaisseur de la zone non saturée qui contribue au retard des infiltrations et à leur épuration partielle avant d'atteindre les horizons aquifères. Une épaisse zone non saturée diminue d'autant le degré d'exposition de la ressource. A Mayotte, cette épaisseur est très variable sur de courtes distances. Elle n'est approchée qu'à proximité des forages et demeure méconnue sur le reste du bassin versant.

Au regard de l'insuffisance des données en notre disposition, indispensables à une cartographie pertinente de l'épaisseur de la zone-non-saturée, ce paramètre ne sera pas pris en compte dans l'estimation de la vulnérabilité. Il est cependant important de garder à l'esprit l'importance de son rôle dans la notion de vulnérabilité de la ressource en eau souterraine.

8) La transmissivité de l'aquifère

Il est rappelé que ce paramètre est appréhendé dans la méthodologie proposée pour le bassin Seine-Normandie - et appliquée en métropole – sous la forme de la perméabilité (la transmissivité étant égale au produit de la perméabilité par l'épaisseur de la zone saturée). Il a été retenu dans la méthodologie métropolitaine dans la mesure où l'enjeu considéré pour la vulnérabilité est la qualité de l'eau au droit du captage d'eau potable et non la ressource en eau souterraine de façon générale. Cette distinction suppose la prise en compte ou non d'un écoulement dans l'aquifère.

Au même titre que les informations relatives à l'épaisseur de la zone non saturée, celles relatives à la transmissivité des aquifères mahorais sont insuffisantes à l'échelle des bassins d'alimentation. La transmissivité des aquifères est très variable sur de courtes distances car conditionnée par les formations géologiques et leur degré d'altération (équivalent à leur degré de colmatage), ce qui rend difficile l'exercice consistant à généraliser tel degré de transmissivité à tel faciès lithologique.

L'insuffisance des données à notre disposition ne permet pas la prise en compte de ce paramètre comme variable de caractérisation de la vulnérabilité des captages d'eau souterraine. De même qu'en ce qui concerne l'épaisseur de la zone non saturée, il est important de garder à l'esprit l'importance de ce paramètre dans la notion de vulnérabilité de qualité de l'eau au niveau du captage d'eaux souterraines.

3.2.3. Démarche proposée dans le cas des bassins d'alimentation de captage souterrains : L'IDPR, l'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux et l'indice de rugosité

Dans les méthodologies usuelles (rapport BRGM/RP-55874-FR et guide pratique de l'OFEFP 2002) les paramètres qui conditionnent la vulnérabilité (dans le cas des eaux souterraines) font l'objet d'une cartographie sur le bassin d'alimentation de captage délimité au § 3.1 et leur importance est pondérée par un coefficient empirique qui témoigne des 3 critères suivants :

- De l'importance relative des paramètres les uns par rapport aux autres dans l'estimation de la vulnérabilité intrinsèque. Moins un paramètre aura d'influence sur la vulnérabilité, plus faible sera son coefficient de pondération.
- De la connaissance du rôle - exclusif ou non - que joue le paramètre (favorise ou pas la vulnérabilité de la ressource). L'ambivalence du rôle de certains paramètres contribuera à diminuer la valeur du coefficient de corrélation ;
- De la connaissance de la surface (ou densité) couverte par ce paramètre. Les incertitudes de couverture de tel ou tel paramètre entraîneront sa pondération par un coefficient relatif de moindre importance.

Ainsi, pour chacun des paramètres, les coefficients les plus élevés seront synonymes d'une participation plus importante au degré de vulnérabilité du captage considéré. Dans l'étude présente, la méconnaissance - souvent partielle voire plus - des critères ci-dessus ne permet pas une approche de la vulnérabilité par pondération empirique des paramètres la contrôlant. D'où la nécessité d'une approche alternative. Ainsi, la vulnérabilité des bassins d'alimentation de captage des eaux souterraines et de surface sera approchée au moyen de l'IDPR et de l'indice de rugosité, méthodes numériques de caractérisation spatiale de la vulnérabilité.

1) IDPR : définition

L'indice IDPR (Indice de Développement et de Persistance des Réseaux) est un outil qui permet de qualifier l'aptitude du milieu à laisser ruisseler ou s'infiltrer la lame d'eau météoritique sur la base du principe suivant – couramment admis – selon lequel *l'organisation du réseau hydrographique est dépendante des formations géologiques qui le supportent* (cf. rapport BRGM/RP-55311-FR).

Ainsi, dans l'hypothèse d'un milieu parfaitement homogène où le substratum serait imperméable, seule la pente et la géomorphologie seraient guides de la mise en place des cours d'eau. A contrario de cette hypothèse dans le milieu naturel, les structures

géologiques et la composition lithologique du sous-sol ont une influence significative sur l'établissement des réseaux hydrographiques.

La géométrie du réseau des rivières est donc un indicateur des propriétés des formations du sol et sous-sol (pédologie, lithologie et géologie structurale). Un bassin formé de matériaux très perméables aura en général une densité de drainage faible car l'eau aura tendance à s'infiltrer (cf. § 3)). A l'inverse, un bassin formé de roches imperméables (type altérites ou produits pyroclastiques indurés) verra l'eau ruisseler et présenter une densité de drainage élevée.

L'IDPR représente un moyen de quantifier ce rôle en comparant **un réseau théorique** établi selon l'hypothèse d'un milieu homogène (*indice de développement ID*), **au réseau naturel** mis en place sous le contrôle d'un contexte géologique hétérogène (*de persistance des réseaux PR*). L'indice de développement et de persistance des réseaux présente donc une métrologie de l'écart constaté entre ces deux réseaux comme l'indique l'illustration 10.

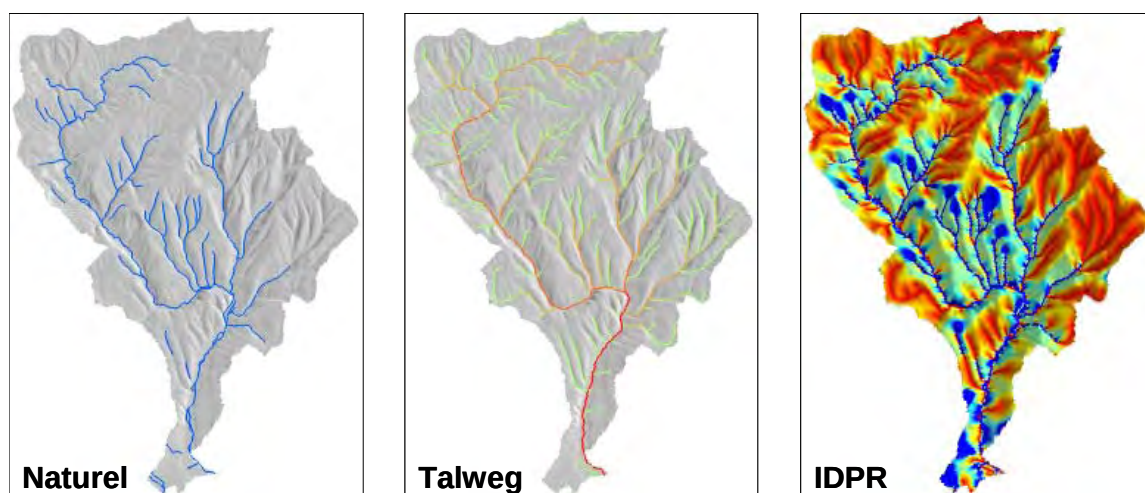
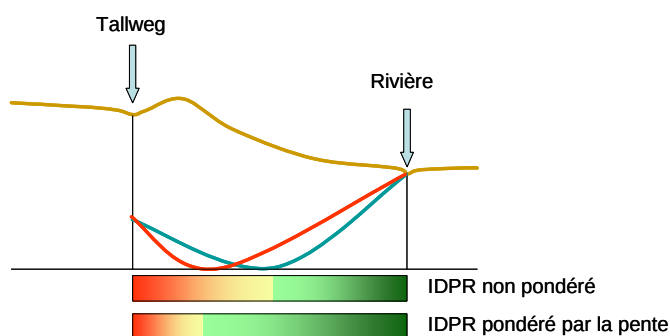


Illustration 10 : Le principe de calcul de l'IDPR à l'échelle d'un bassin repose sur la comparaison d'un réseau hydrographique naturel (à droite) et d'un réseau hydrographique théorique (au milieu). Les discordances résultantes s'interprètent en termes de contrôle géologique et/ou pédologique (c.à.d. de perméabilité ou de ruissellement)

Le calcul de l'indice résulte du rapport, pour tout point de l'espace étudié, entre :

- La distance au plus proche cours d'eau réel,
- La distance au plus proche cours d'eau calculé.



L'indice de rugosité est un indice supplémentaire calculé sur la base des mêmes données que l'IDPR, à savoir le Modèle Numérique de Terrain (MNT) et l'organisation du réseau hydrographique de surface. L'indice permet d'estimer le profil d'équilibre des cours d'eau en fonction de l'orientation des mailles topographiques sur lesquelles il serpente. Plus il y a de dispersion dans l'orientation des mailles, plus l'indice de rugosité est fort et moins le cours d'eau a atteint son profil d'équilibre, ce qui se traduit dans la majorité des cas par des processus importants d'érosion et d'infiltration. A l'inverse, une faible dispersion synonyme d'un indice faible témoigne du fait que le cours d'eau est proche de son profil d'équilibre et que sa capacité érosive diminue voire évolue vers la sédimentation.

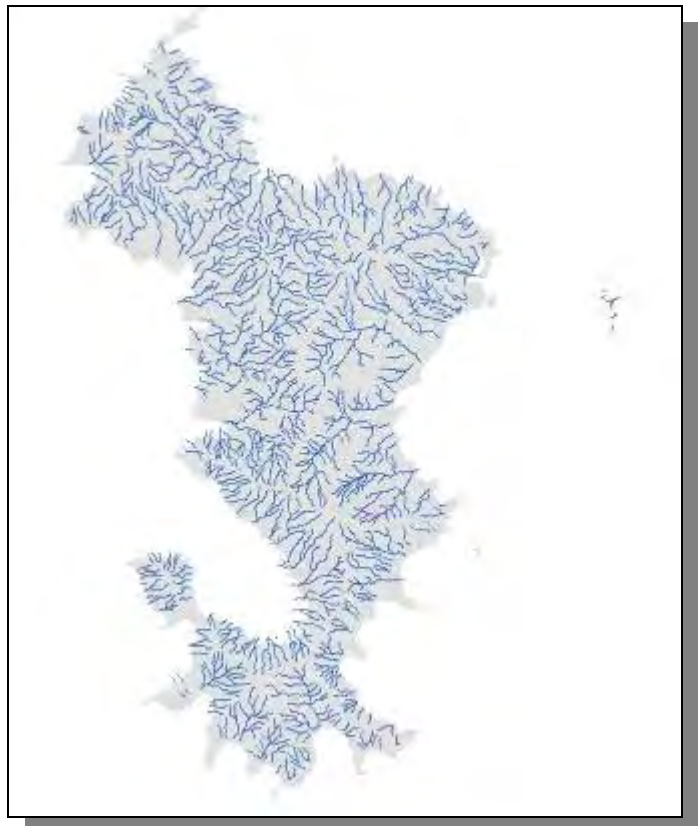
2) Données de base et calcul de l'IDPR brut

Les données de base essentielles au calcul de l'IDPR sont : le tracé du réseau hydrographique de surface et le modèle numérique de terrain. Il est évident que la qualité du calcul est étroitement dépendante de la qualité et de la précision de ces données.

Le tracé du réseau hydrographique de Mayotte utilisé dans la démarche IDPR provient de la BD Topo 1/25 000 de l'IGN©, la plus complète et la plus juste à ce jour.

Illustration 11 : Réseau hydrographique de Mayotte (BD Topo 1/25 000, source IGN©)

Le MNT (Modèle Numérique de Terrain) utilisé pour calculer le réseau de talwegs est le seul disponible à Mayotte (au pas de 25 m, source IGN©)



La plupart des logiciels de systèmes d'information géographique permettent de générer automatiquement des limites de bassins versants à partir d'un MNT. Les traitements

exploités dans le cadre de cette étude ont été développés pour l'application ArcView©. Les procédures utilisées proviennent de l'Université du Texas à Austin. Elles ont été développées pour Arcview© par le CRWR (Center for Research in Water Resources).

L'extraction automatique de réseaux (de talwegs ou de crêtes) exploité dans cette étude peut être assimilée à une démarche structuraliste inspirée du modèle physique du ruissellement de l'eau sur un relief.

La majeure partie des données issues des MNT est précise. Cependant il peut exister dans les modèles, des surfaces causant des dépressions pour lesquelles aucun exutoire n'est possible ou des zones planes pour lesquelles la détermination d'un talweg s'avère impossible (fonds de cratère, lacs sans exutoire, zones planes étendues, etc.). Il est donc nécessaire de traiter artificiellement ces zones afin de rétablir un écoulement potentiel et permettre la détermination des talwegs.

Les principales modifications apportées au MNT de Mayotte portent sur la zone du lac Dziani Dzaha et celle du Dziani Karihani (cf. Illustration 12). L'Illustration 13 présente le réseau de talwegs issu du traitement

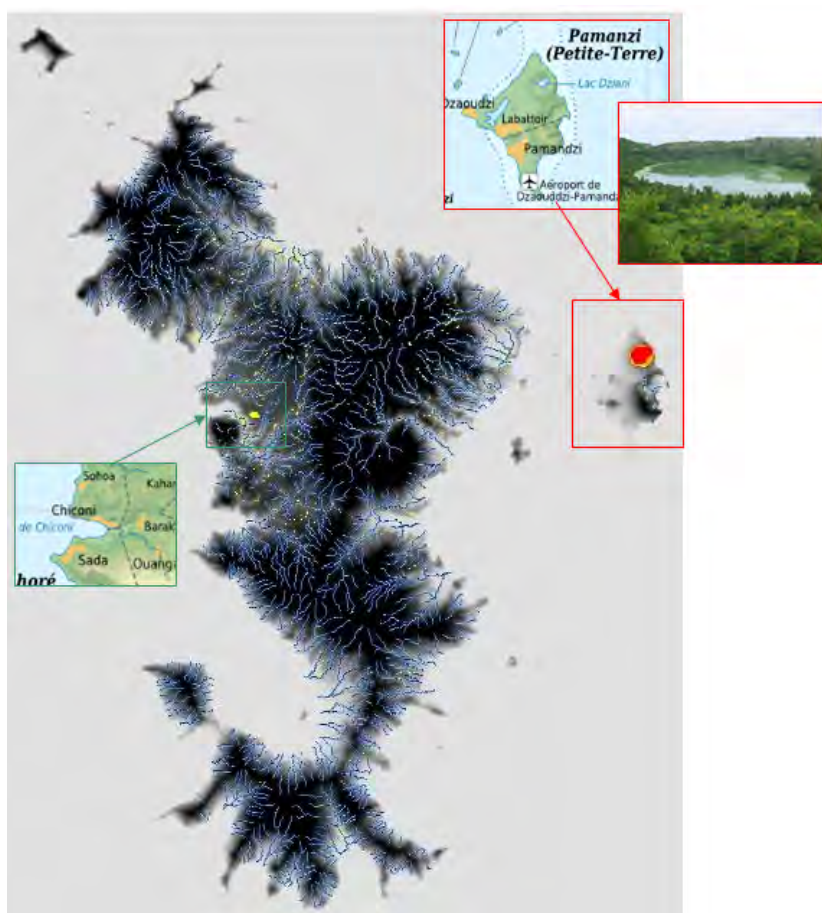


Illustration 12 : Pré traitement des zones planes de Mayotte

Illustration 13 : carte du réseau des talwegs de Mayotte issu du traitement informatique du MNT 1/25 000



Par la suite, le calcul de l'IDPR est réalisé uniquement sur Grande terre :

- Petite terre est exclu du calcul à deux titres : il n'y a aucun captage AEP continental de type forage ou prise d'eau en rivière et l'absence de cours d'eau pérenne constitue un obstacle au calcul de l'IDPR. De plus, la petite superficie de Petite terre rend délicate l'application du calcul.
- Les îlots ne sont pas considérés dans le calcul pour les mêmes raisons que Petite terre.
- La bande littorale de Grande terre : majoritairement composée de plages et de mangroves qui sont des milieux de transition appartenant à la fois au milieu marin et au milieu continental. La dynamique hydrologique régnant sur ces surfaces ne répond pas intégralement à la logique de bassin continental.

Les résultats du calcul sont présentés en Illustration 14. L'indice varie selon une échelle comprise entre 0 et n. Par souci de simplification, l'indice est arbitrairement multiplié par 1000 et limité au maximum à 2000. Concrètement, l'indice est inférieur à 1000 (teintes rouges) quand le réseau théorique n'est pas repris par un cours d'eau naturel, ce qui sous entend alors que la zone privilégie l'infiltration des eaux à son ruissellement. A l'inverse, si l'indice dépasse la valeur arbitraire de 1000, le réseau naturel est plus dense que le réseau théorique, le ruissellement est majoritaire dans la zone concernée (Illustration 15).

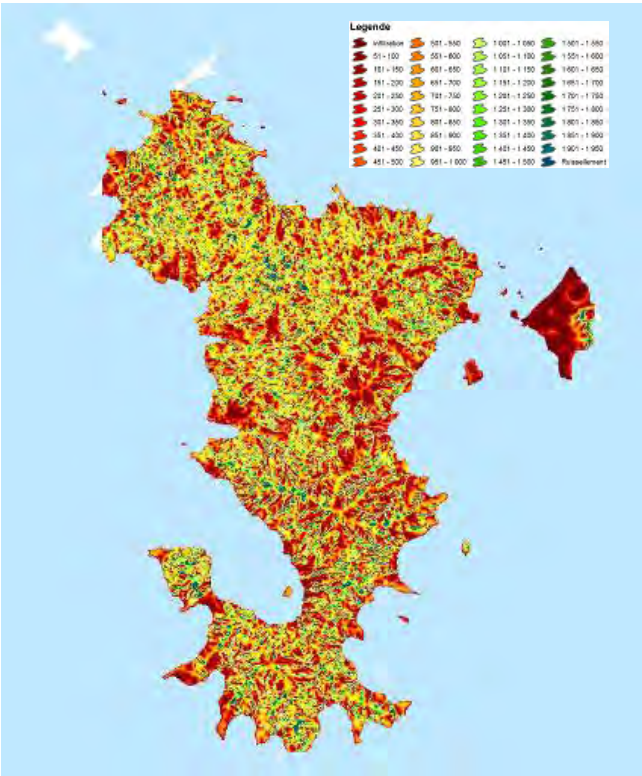


Illustration 14 : données brutes du calcul de l'IDPR sur l'ensemble de l'île

IDPR	Interprétation	
<1000	Infiltration majoritaire Par rapport au Ruissellement superficiel	Il y a non-conformité entre la disponibilité des axes de drainage liés aux talwegs et les axes hydrologiques observés. L'eau ruisselant sur les terrains naturels rejoint un axe de drainage défini par l'analyse des talwegs sans que celui-ci ne se concrétise par l'apparition d'un axe hydrologique naturel. Développement d'un réseau de talweg de densité supérieure à l'expression du réseau de drainage naturel.
≈1000	I Infiltration et Ruissellement superficiel de même importance	Il y a conformité entre la disponibilité des axes de drainage liés au talweg et les axes hydrologiques en place
>1000	Ruissellement superficiel Par rapport à l'infiltration vers le milieu souterrain	L'eau ruisselant sur les terrains naturels rejoint très rapidement un axe hydrologique naturel sans que la présence de celui-ci soit directement justifiée par un talweg. Le réseau de drainage naturel est de densité supérieure à celui du réseau des talwegs.
> 2000	Majoritairement assimilable à des milieux humides	Un IDPR supérieur ou égal à 2000 traduit une stagnation permanente ou transitoire des eaux, menant à deux interprétations différentes. Quand la ZNS est faible, par exemple au niveau des cours d'eau et des zones humides, l'eau ne s'infiltre pas car le terrain est saturé. Dans le cas d'une ZNS plus importante, le refus d'infiltration semble montrer une imperméabilité des terrains naturels. On pose l'hypothèse que des valeurs d'IPR supérieures à 2000 sont majoritairement assimilables à des milieux humides induisant la possibilité d'inondation par effet de barrière hydraulique.

Illustration 15 : légende des valeurs d'Indice de développement et de persistance des réseaux

3) Agrégation des données par unités fonctionnelles spatiales

Compte tenu de l'incertitude existant sur la précision des données de base (MNT, position exacte du réseau hydrographique réel), l>IDPR est utilisé à l'échelle « d'unités fonctionnelles ».

Celles-ci sont définies à partir des unités géologiques et des unités pédologiques (cf. illustration 16). Il est affecté à chaque unité fonctionnelle la valeur médiane des données IDPR circonscrites dans celle-ci. Il est rappelé que les unités fonctionnelles sont supposées d'un comportement hydrogéologique homogène.

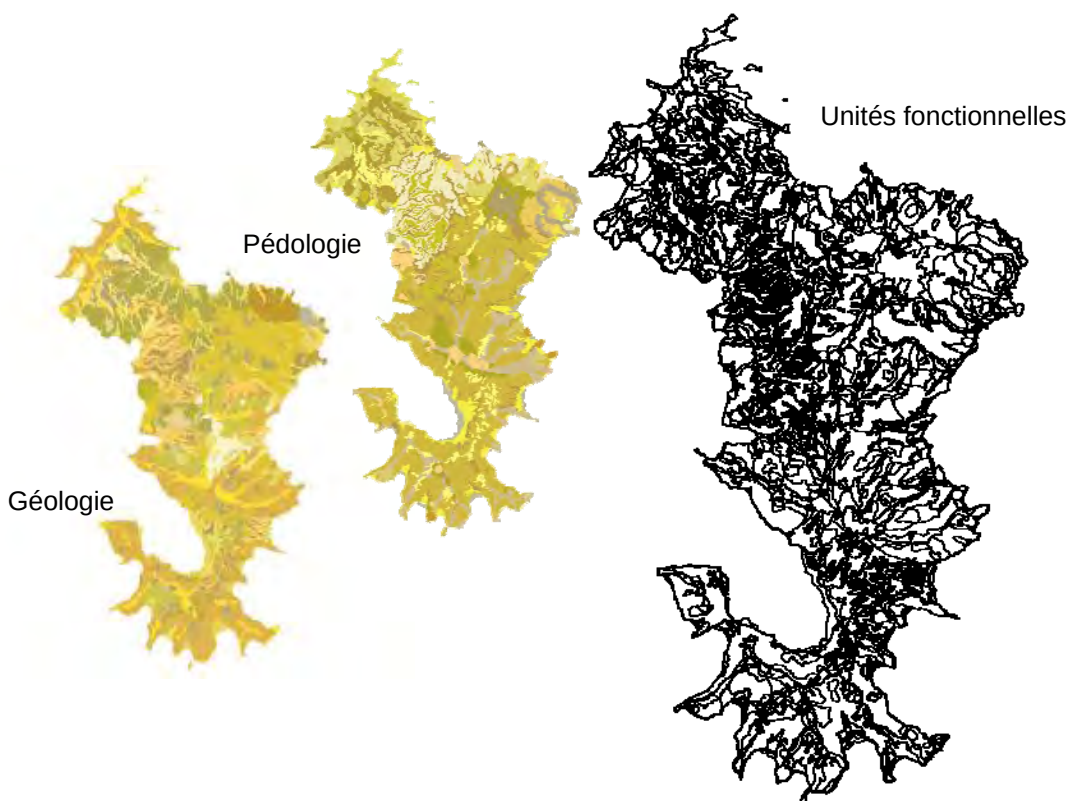


Illustration 16 : L'intersection des couches d'informations géologiques et pédologiques compose la carte des unités fonctionnelles

Les unités fonctionnelles de surface inférieure à 1ha ont été fusionnées avec leur voisines de taille supérieure à 10 000 m². La carte des unités fonctionnelles (à droite sur l'illustration 16) comprend approximativement 2800 polygones sur le territoire d'étude et leur surface moyenne est de 13 ha. La carte résultante est présentée en Illustration 18, et les observations montrent :

- qu'après élimination des valeurs extrêmes sans réalité physique (= artefacts, exemple des plages soumises à la dynamique océanique, des zones de mangroves, etc.) les valeurs médianes de l>IDPR s'échelonnent entre 50 et 1950 pour l'ensemble des unités fonctionnelles, avec une moyenne autour de 682, ce qui

implique qu'il existe probablement une majorité relative de faciès géologiques ou pédologiques infiltrant comparativement aux faciès plus imperméables. La distribution des valeurs médianes par unités de surface est représenté ci dessous.

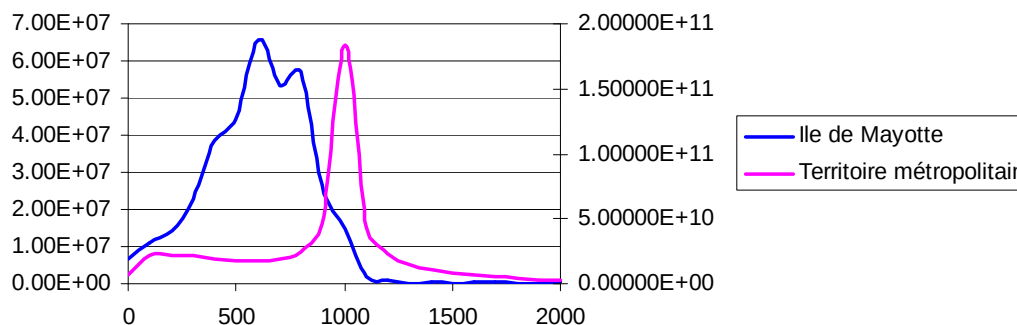


Illustration 17 : Distribution des valeurs IDPR (de 0 à 2000) selon les surfaces cumulées (en m²) et comparaison avec une distribution type en France métropolitaine.

Cette distribution de l'IDPR permet une approche qualitative du territoire. Comparativement aux résultats obtenus sur le territoire métropolitain, dans un contexte climatique tempéré, la distribution de cet indice à Mayotte montre une distribution centrée autour de 650, elle est de 1000 sur le territoire métropolitain. En deçà de la valeur médiane on qualifiera donc les terrains de plus infiltrants que ceux dont la réponse IDPR est supérieure à 650. Cette distribution nous permet d'établir le nombre de classes de vulnérabilité et leur amplitude.

- une répartition hétérogène des valeurs d'IDPR sur le territoire. Les valeurs les plus faibles se rencontrent majoritairement au niveaux des cotes, principalement la cote Est. Les valeurs médianes occupent principalement la bande de terre orientée cote Est ainsi que les zones de fort relief. Les valeurs élevées se rencontrent plutôt sur la bande de terre orientée cote Ouest et Nord ;

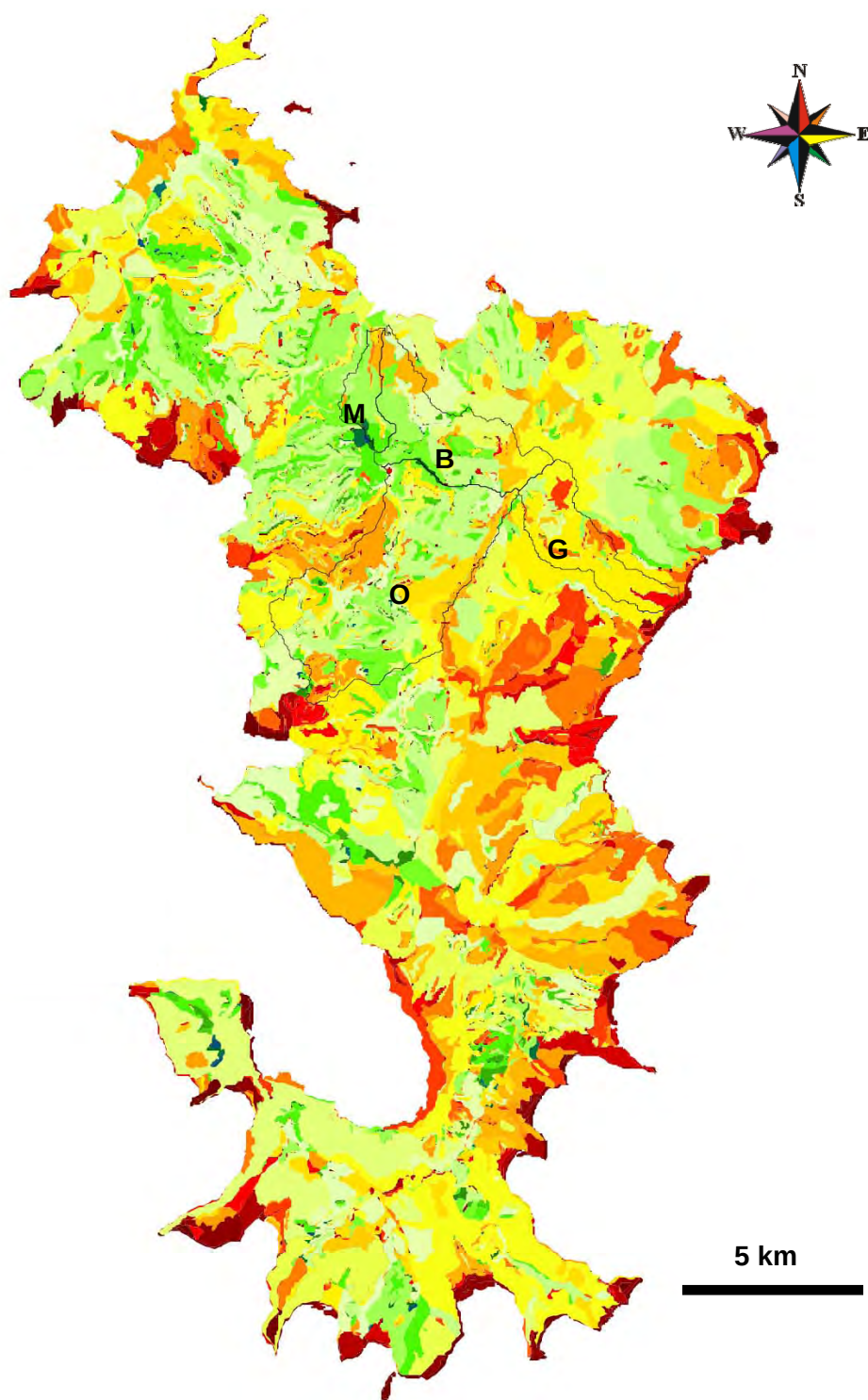


Illustration 18 : données du calcul agrégés par unités fonctionnelles (unités lithologiques et morphopédologiques). En surimposition apparaissent les bassins versants du Mro Oua Gouloué (G), Orovéni (O), Bouyouni (B) et Méresse (M). On remarque certaines zones à artefacts (l'îlot d'Handrema, les mangroves de Dapani et de Bandrelé, etc.)

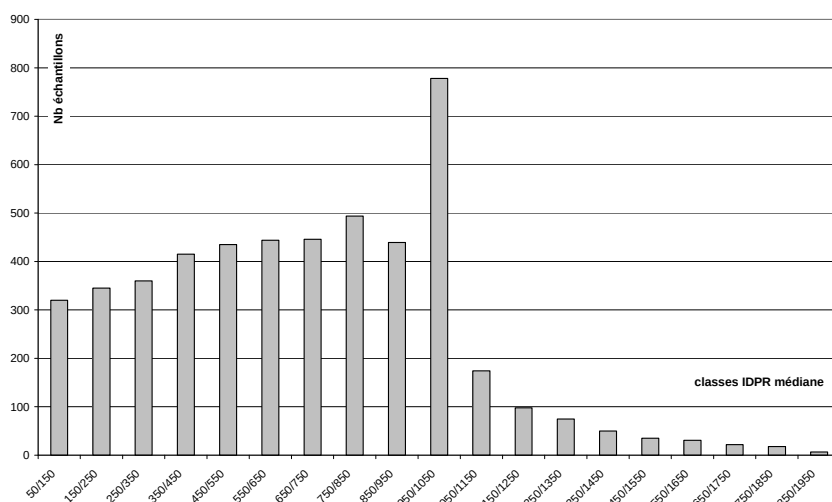


Illustration 19 : distribution des classes IDPR médiane. Les classes les plus représentées à Mayotte se répartissent entre des valeurs IDPR de 50 à 1150. il existe peu de faciès géologiques ou pédologiques se démarquant des autres par une forte proportion au ruissellement, c.à.d. >1150, cf. Illustration 15. Le pic de la classe 950/1050 est considéré comme artefact.

4) Calcul de l'indice de rugosité

La notion qualitative de rugosité des terrains est difficile à appréhender (un terrain inégal, raide rocheux, rocheux cassé et raide, etc.). Il existe différentes méthodes de calcul de rugosité, deux sont courantes LSRI et TRI, la troisième - VRM - retenue dans le cadre de Mayotte a été développée en 2005 selon une approche naturaliste récente³.

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

Pour s'affranchir de cette critique, une mesure idéale de rugosité devait incorporer la variabilité dans l'aspect et la direction de la pente. C'est la solution proposée par la

³ Quantifying Landscape Ruggedness for Animal Habitat

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

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

méthode VRM (Vector ruggedness measure) qui emploie la dispersion dans les trois dimensions des vecteurs orthogonaux aux facettes du DEM

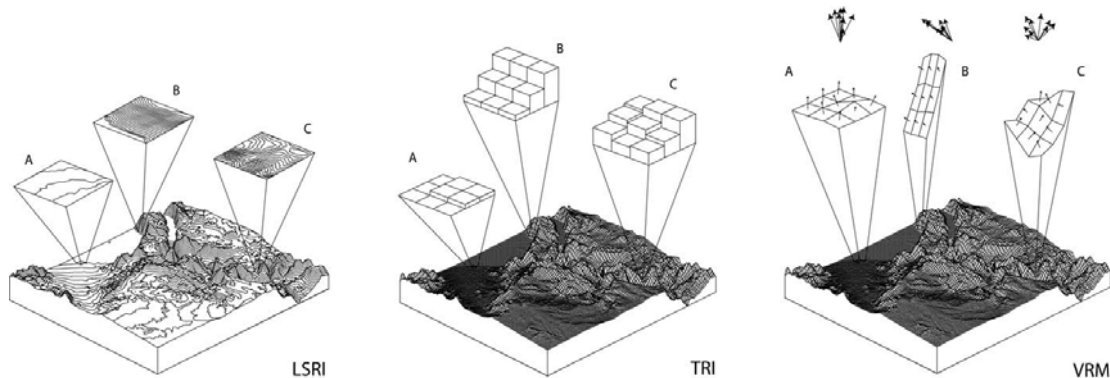


Illustration 20 : Méthodes courantes de calcul de la rugosité, LSRI, TRI et VRM

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

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

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

L'application du calcul de la rugosité à Mayotte donne les résultats bruts suivants.

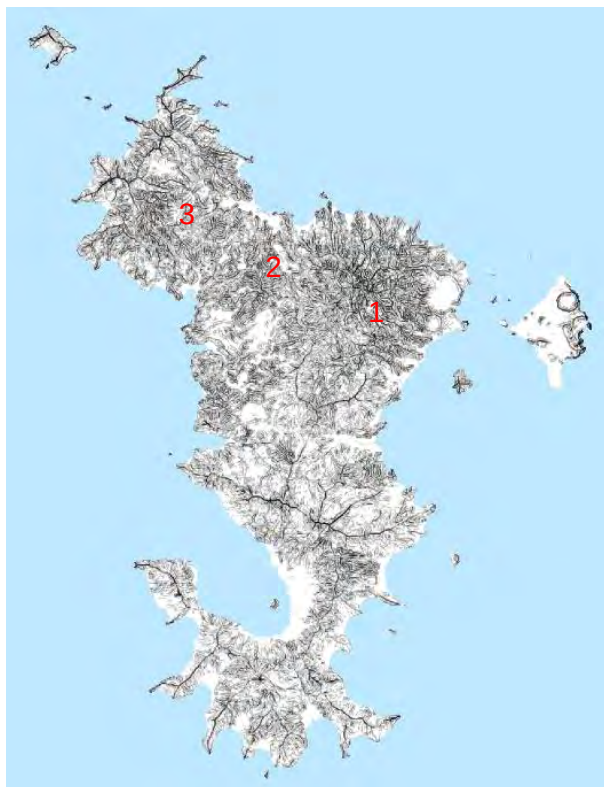


Illustration 21 : données du calcul de l'indice de rugosité sur l'ensemble du territoire

L'indice de rugosité est plus marqué aux niveaux des lignes de crêtes constituant l'ossature de l'île ainsi que dans le massif de M'tsapéré (1.) au Nord Ouest et dans le prolongement du massif de Digo (2.) et des massifs du Nord (3.).

Dans un sens, cet indice reflétant les phénomènes de rajeunissement des massifs, il est normal qu'il soit plus marqué au niveau des massifs jeunes (M'tsapéré et Digo, mais aussi Petite terre) ou tectoniquement réactivés comme au Nord Est qu'au niveau des massifs les plus anciens comme au Sud.

Suite à l'identification précédente, l'indice de rugosité est découpé en 10 classes non linéaires selon les valeurs moyennes et réparti comme suit.

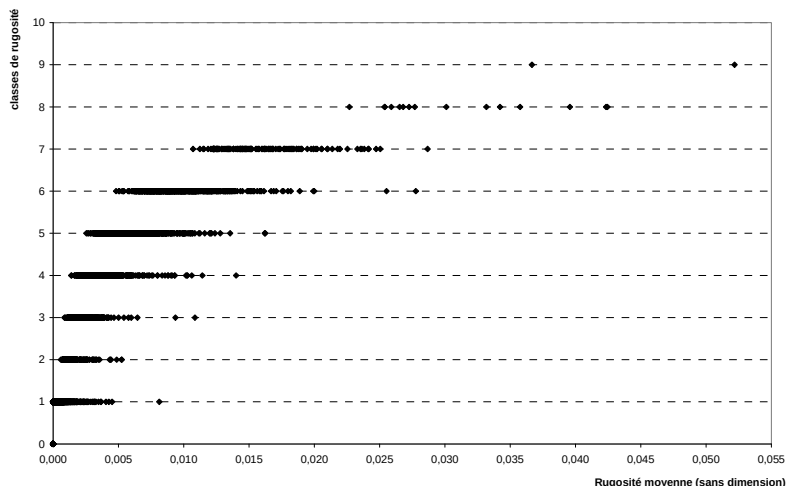


Illustration 22 : Distribution des classes empiriques de rugosité par unités fonctionnelles selon les valeurs brutes moyennes. A Mayotte la moyenne de ces classes est de 3,58.

5) La carte IDPR combinée, approche de la vulnérabilité des eaux souterraines de Mayotte

L'association des résultats des calculs de l'indice IDPR médian et de l'indice de rugosité permet d'établir à l'échelle de Mayotte une carte indirecte de la répartition infiltration / ruissellement qui peut être interprétée comme approche en termes de vulnérabilité des eaux souterraines mais aussi - par inversement des résultats - de vulnérabilité des eaux de surface. L'hypothèse prise en compte suppose, que des terrains à forts contrastes de pentes et d'altitude sont susceptibles de ralentir les écoulements et donc de favoriser l'infiltration - à contrario des terrains de pentes à faibles contrastes sont moins favorables à l'infiltration. Le résultat présenté sur la carte suivante et en Annexe 4 amplifie ainsi les tendances montrées par l'IDPR.

Ainsi si l'indice IDPR médian reflète le contrôle des formations lithologiques et pédologiques sur la vulnérabilité, l'indice de rugosité reflète davantage le contrôle de la dynamique structurale et moins la nature des terrains. Néanmoins, le contrôle de chacun de ces indices n'étant pas aussi tranché, il est important de les combiner à des fins de caractérisation de vulnérabilité.

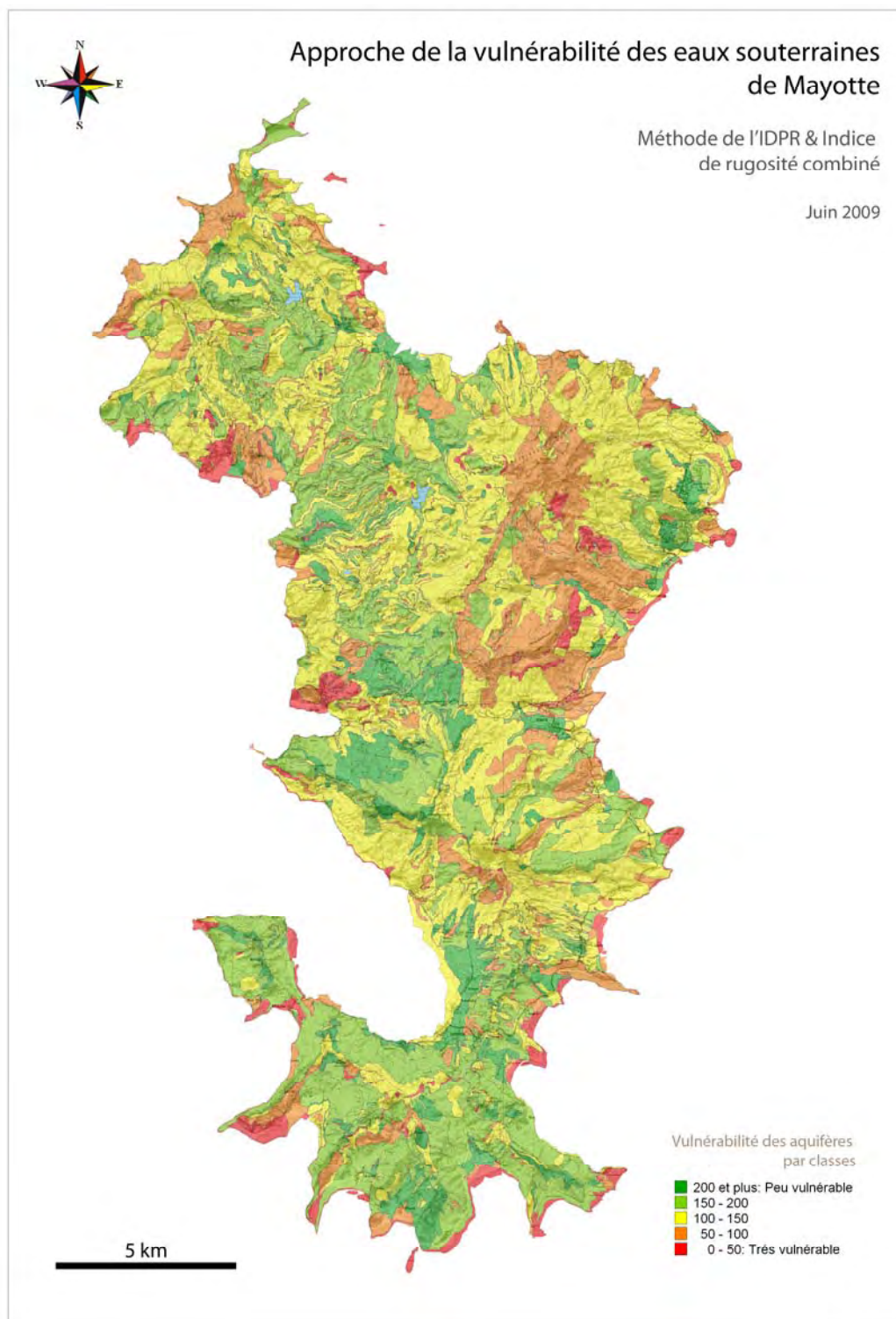


Illustration 23 : Approche de la vulnérabilité des eaux souterraines de Mayotte. Association des indices IDPR et de rugosité = IDPR combiné.

L'illustration 23 montre que la répartition de la vulnérabilité des eaux souterraines à l'échelle de Mayotte est relativement hétérogène. Le Sud de Mayotte (à partir de la ligne Tsararano – Dembéni) affiche majoritairement des zones de faibles à moyennes vulnérabilité. Le Nord Ouest de l'île montre quant à lui des zones de vulnérabilités moyennes. Les zones à vulnérabilités les plus élevées se situent au Nord Est de l'île, au niveau des massifs de M'tsapéré, de Vahibé et du Maévadoani ainsi que localement au niveau des versants de N'Gouja, Chiconi, Sohoa et M'tsangamouji.

6) Confirmation de la méthode

Les résultats obtenus pour la caractérisation de la vulnérabilité des eaux souterraines – et par extension des eaux de surface – sont confortés par le traitement statistique des unités fonctionnelles par groupe géologique puis pédologique et vis-à-vis de l'IDPR. Les illustrations suivantes, basées sur la méthode statistique des boîtes à moustache de Tukey (Annexe 7), montrent que la distribution des indices IDPR médians concorde avec les hypothèses de départ (cf. § 3.2.2) qui proposaient une hiérarchisation d'infiltrabilité des secteurs en fonction des faciès lithologiques mais aussi pédologiques. En revanche, la distribution des indices de rugosité ne permet pas de discriminer à lui seul la nature des unités fonctionnelles.

• Confirmation de l'IDPR médian par la géologie

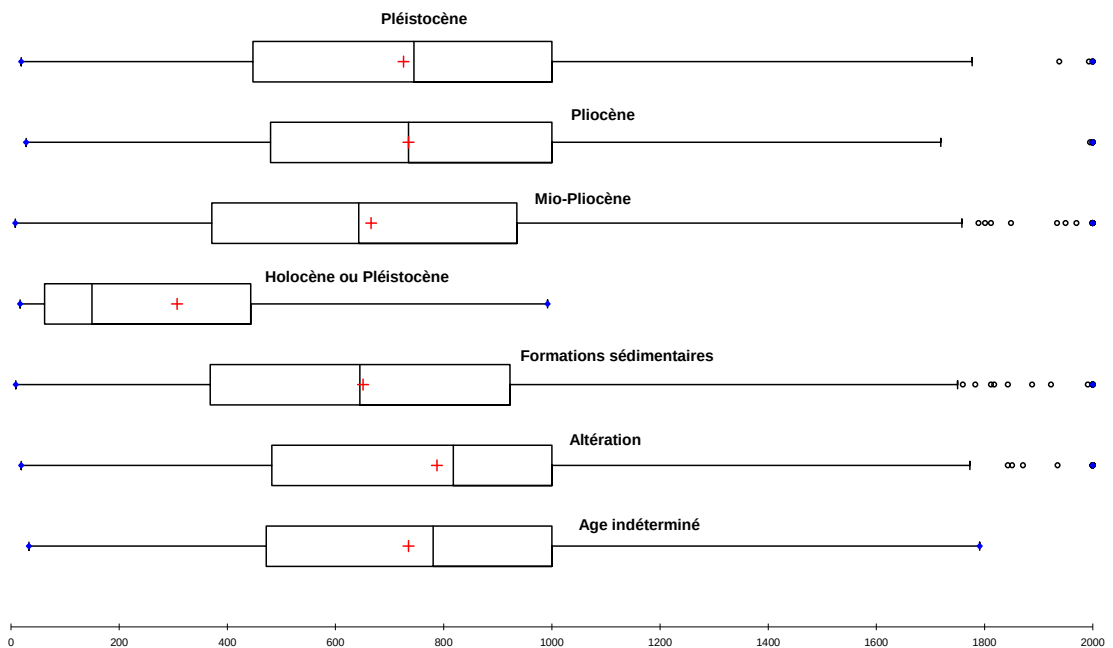


Illustration 24 : répartition de l'indice IDPR médian en fonction des unités lithologiques par la méthode des boîtes à moustaches de Tukey. Les unités appartenant à la classe « Holocène ou Pleistocène » sont très peu présentes sur Grande terre (à peine quelques ha). Les résultats de la distribution sont donc biaisés par le nombre trop faible d'échantillons.

Dans la suite, les résultats obtenus pour le groupe « Holocène ou Pléistocène » ne sont pas exploités dans la mesure où ce groupe ne comporte qu'un faible nombre de polygones, dont très peu sont sur Grande Terre.

L'examen du graphique ci-dessus montre que les distributions ont des allures très similaires quelques soient les unités lithologiques. Par ailleurs :

- pour chaque unité géologique la distribution de l'IDPR médian balaye une très large gamme de valeurs, de 8 à 2000 pour la plupart des unités ;
- l'intervalle interquartile (à savoir comprenant 50 % des individus échantillonnées par unités lithologiques) se situe toujours dans la gamme d'indice 350 à 1000.
- les moyennes (croix rouges) et médianes (trait noir) sont très resserrées et souvent au milieu même de l'intervalle interquartile (à l'exception toutefois des unités dites d'altération ou d'âge indéterminé qui peuvent regrouper des faciès relativement hétérogènes) ;
- les unités aux indices les plus faibles (= décalage de l'intervalle interquartile, de la médiane, et de la moyenne sur la gauche du graphique, ce qui va dans le sens de la vulnérabilité pour les BAC souterrains et de moins de vulnérabilité pour les BAC de surface) sont les formations volcaniques Mio-Pliocène et les formations sédimentaires - comme indiqué dans le §. 3.2.2. En se concentrant sur la carte géologique de Mayotte (Stieljes 1988 – Annexe 2) et sur la carte présentée en Illustration 23, il est possible d'avancer que les formations volcaniques de type basaltes ankaramitiques du bouclier septentrional ainsi que les formations ankaramitiques du Maévadoani contribuent fortement à cette faiblesse de distribution des indices IDPR médians. En ce qui concerne les formations sédimentaires, l'analyse combinée des cartes montrent que les formations de type colluvions (de bas de pentes ou de versants) et les formations alluviales de vallées perchées sont les plus propices à l'infiltration.
- les caractéristiques statistiques de l'IDPR sont plus élevées pour les autres formations volcaniques (Pléistocène, Pliocène, d'âge indéterminé et des formations dites d'altération (d'âge Mio-Pliocène) qui regroupent les faciès les plus altérés en cours d'argilisation (altérites ferrallitiques et kaolinite)) car présentant une même distribution d'intervalle interquartile. Néanmoins dans le détail, il est intéressant de remarquer que (i) les moyennes et médianes des unités Pléistocène et Pliocène sont très proches (c.à.d. que sur la base de cette distribution il est impossible de distinguer ces deux unités), (ii) que les moyennes et médianes d'altération sont plus élevées que les autres et que les formations dites d'âge indéterminé (hétérogènes et à rattacher pour la plupart aux formations Pléistocène) ont un comportement assez proche de celui des unités d'altération, il s'agit notamment des projections de tufs et de cendres associées au volcanisme du même âge. Ces formations sont d'infiltrabilité moyenne à faible à l'échelle de l'île (cf. Illustration 23). En ce qui concerne les formations d'altération, le degré d'altération et de colmatage est la principale raison des valeurs plus fortes d'IDPR médians.

En ce qui concerne les formations Pliocène, à savoir principalement des unités de basaltes ankaramitiques de l'axe basaltique Nord (Longoni à îlot M'tsamboro), les

valeurs moyennes d'IDPR combiné témoignent d'une relative infiltrabilité, qui se vérifie sur la carte en Illustration 23.

Concrètement, à quelques nuances près, les observations étayent le principe énoncé au §. 3.2.2., selon lequel la disposition à l'infiltration des unités géologiques et par conséquent le degré de vulnérabilité au niveau de ces lithologies est dépendant de l'âge des formations. Ce principe souffre néanmoins de quelques exceptions qui ont été mises en exergue plus haut (notamment en ce qui concerne les formations Mio-Pliocène). Comme déjà évoqué, le groupe des formations « Holocène ou Pléistocène » n'est pas traité.

Par conséquent, il est possible de (i) valider la méthode de l'IDPR médian sur la base des informations géologiques et (ii) d'établir une hiérarchisation relative de vulnérabilité des unités lithologiques (entendu ici comme vulnérabilité vis-à-vis des captages souterrains mais aussi de surface).

• Confirmation de l'IDPR médian par la pédologie

De la même façon qu'en ce qui concerne la lithologie, les indices IDPR médians font l'objet d'une distribution traitée statistiquement par la méthode des boîtes à moustache de Tukey.

L'illustration ci-dessous met en relation la distribution des indices IDPR médian en fonction de chaque faciès pédologiques. La correspondance entre les identifiants numériques et les faciès pédologiques (d'après la compilation et le recoupement des informations de Latrille 1981 et Lapègue 1999) est inscrite dans le Tableau 5 ci-après.

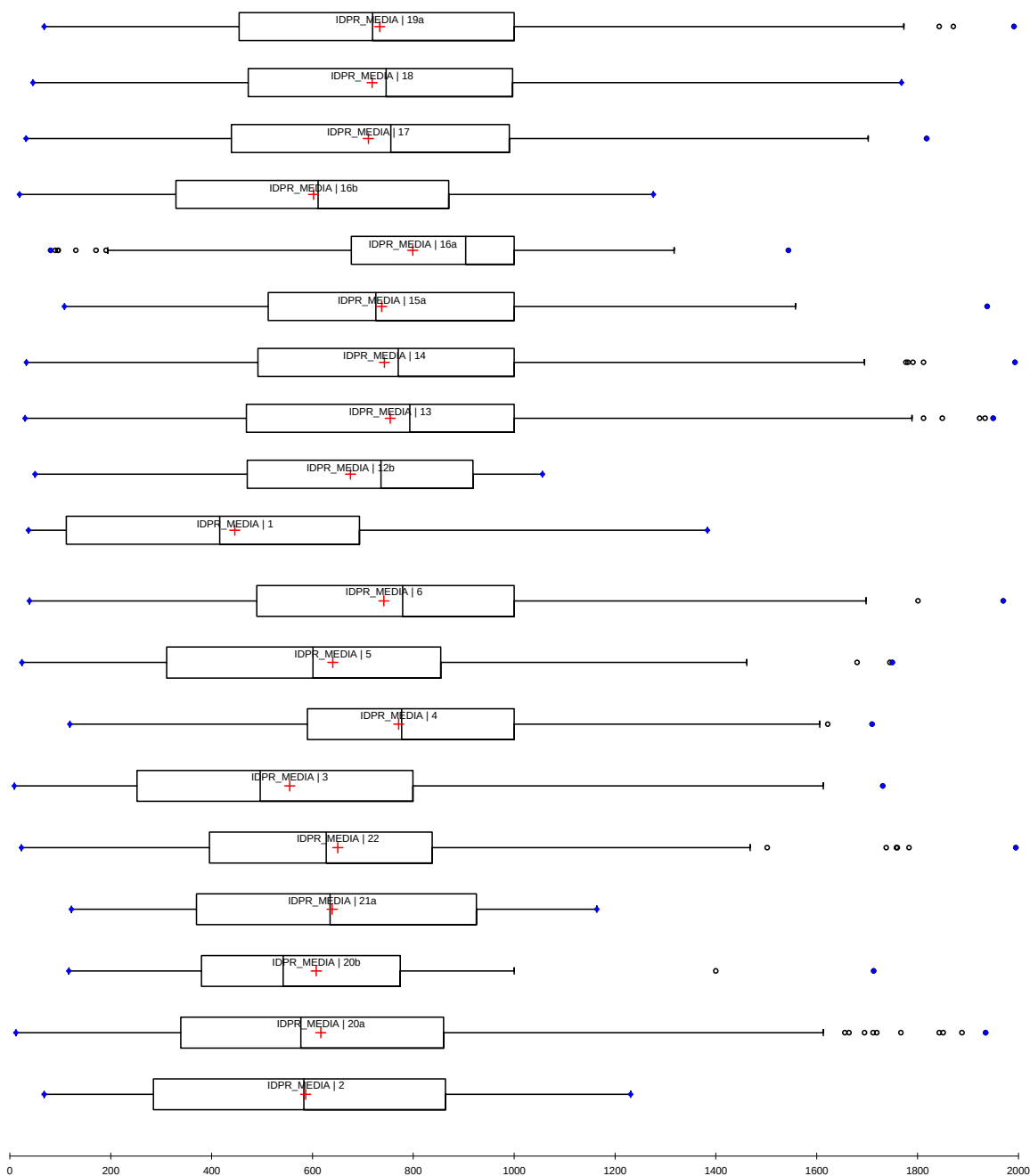


Illustration 25 : répartition de l'indice IDPR médian en fonction des faciès pédologiques. Seuls les faciès dont la distribution (en termes d'échantillons) est représentative à l'échelle de Grande terre ont été considérés. Par exemple, les faciès pédologiques de 7 à 11 ont été retirés car uniquement présents en nombre sur Petite terre.

ID	Faciès pédologique correspondant
2	Gley ⁴ de surface
3	Glacis d'épandage
4	Glacis d'épandage de plaines d'intérieur
5	Glacis d'épandage - remanié
6	Fonds de vallée indifférenciés
12b	Altérites ferralitiques décapées et remaniées
13	Altérites ferralitiques en place = bad lands peu remaniés
14	Planèzes de cendres non remaniés. Sols en place très épais
15a	Plateaux de cendres non remaniés. Sols en place très épais
16a	Sols ferralitiques remaniés, localement cendres
16b	Sols ferralitiques remaniés, localement cendres
17	Altérites ferralitiques en place
18	Sols bruns abondants, remaniés, de faible épaisseur
19a	Sols en place, épais faiblement décapés
20a	Sols ferralitiques remaniés et décapés
20b	Sols ferralitiques remaniés et décapés
21a	Altérites ferralitiques non décapés
22	Reliefs résiduels, absence de sols ou fortement décapés et de faible épaisseur

Tableau 5 : Nomenclature des faciès pédologiques (à mettre en relation avec l'illustration 25)

En confrontant les résultats du graphique de l'illustration 25 avec la carte pédologique de Latrille (1988 – cf. Annexe 3), il apparaît :

- que la distribution des indices par faciès pédologique montre plus d'hétérogénéité que dans le cas des unités géologiques (Illustration 24). Par ailleurs, les

⁴ Horizon d'un sol lié à la présence d'une nappe d'eau stagnante (définition du Dictionnaire de Géologie – 2001)

distributions sont davantage centrées autour des valeurs médianes et moyennes et ne balayent pas l'ensemble du spectre de 0 à 2000 ;

- que les unités pédologiques 1, 2, 3, et 5 identifiées comme des formes d'accumulation quaternaire affichent des distributions de valeurs d'IDPR médianes relativement faibles (intervalles interquartiles larges et médianes décalés sur la gauche) et une dispersion moyenne. A l'inverse, les unités 4 et 6 (aussi identifiées comme des formes d'accumulation quaternaire) ont des distributions similaires entre elles et plus décalées sur la droite (moyennes proches, médianes confondues) et visiblement révélatrices des comportements de fond de vallées continentales ;
- que les unités pédologiques identifiées comme des sols ferralitiques décapés et très souvent remaniés affichent des faibles dispersion et des intervalles interquartiles parmi les plus faibles (avec aussi des valeurs moyennes et médianes faibles), par exemple les unités 12b, 16b, 20a, 20b et 22 (sols de zones sommitales décapées) ;
- que les unités 16a et 16b sont très différentes en termes de distribution, ce qui semble indiquer des comportements différents bien que les pédologies soient proches. Cet écart est probablement à relier avec le contexte morphologique des lieux (fond des vallées, versants, etc.). L'unité 16a montre vraiment une très faible dispersion et un couple moyenne/médiane parmi les plus importants et surtout très espacé (toutes unités confondues) ce qui traduit vraisemblablement un comportement particulier en termes de la vulnérabilité ou simplement une influence forte des valeurs minimum extrêmes ;
- que les unités pédologiques épaisses, en place ou très peu remaniées de type altérites ferralitiques (13, 17) en place ou planèzes et plateaux couverts de cendres (14 et 15a) ou peu décapés (21a) affichent des valeurs d'IDPR combinés très élevées.
- que les unités pédologiques identifiées comme des sols bruns peu développés (exemple du faciès 18 très abondant) affichent des distributions moyennes, comparables aux sols ferralitiques remaniés.
- que les unités pédologiques identifiées comme des sols ferralitiques en place et épais ont une distribution assez dispersée et un écart interquartile fort. Manifestement, le comportement de ces sols en termes de vulnérabilité n'est pas univoque

Ainsi, les principales unités pédologiques identifiées au §. 3.2.2 se distinguent dans les résultats du calcul de l'IDPR combiné selon une hiérarchisation relative en termes d'infiltrabilité supposée. Il semblerait donc que l'infiltrabilité des unités pédologiques soit majoritairement conditionnée par le fait que ces unités soient : remaniées, épaisses, décapées, de zone sommitale ou de fond de vallée. De même que dans le cas de la lithologie, le croisement de ces résultats avec les observations de Lapègue et de Latrille conforte à la fois la hiérarchisation relative de ces unités en termes d'infiltrabilité et donc de vulnérabilité et l'utilisation de méthode IDPR combiné pour la caractérisation de cette vulnérabilité à Mayotte (que ce soit pour les BAC souterrains ou de surface).

• Distribution de l'indice de rugosité

Concernant la distribution statistique de l'indice de rugosité en fonction des unités lithologiques et pédologiques (Illustration 26 et Illustration 27), les observations communes aux deux graphiques peuvent être faites :

- quelles que soient la nature des unités (géologiques ou pédologiques), la distribution des indices est plus dispersée que la même distribution réalisée plus haut avec l'IDPR. Les groupes présentent donc des comportements assez hétérogènes vis-à-vis de la rugosité.
- les écarts entre valeurs moyennes (croix rouge) et médianes (trait noir) sont relativement importants en comparaison avec la taille de l'intervalle interquartile.
- des valeurs extrêmes très prononcées ayant pour effet de décaler les moyennes vers la droite. Dans tous les cas les moyennes sont supérieures aux médianes.

Dans l'ensemble, la qualité de la distribution ne permet pas de proposer un comportement traduisible en termes de vulnérabilité, comme c'est le cas pour l'indice IDPR.

En ce qui concerne spécifiquement l'Illustration 26 ci-dessous (à l'exception de l'unité « Holocène ou Pléistocène » pour les raisons signalées plus haut) :

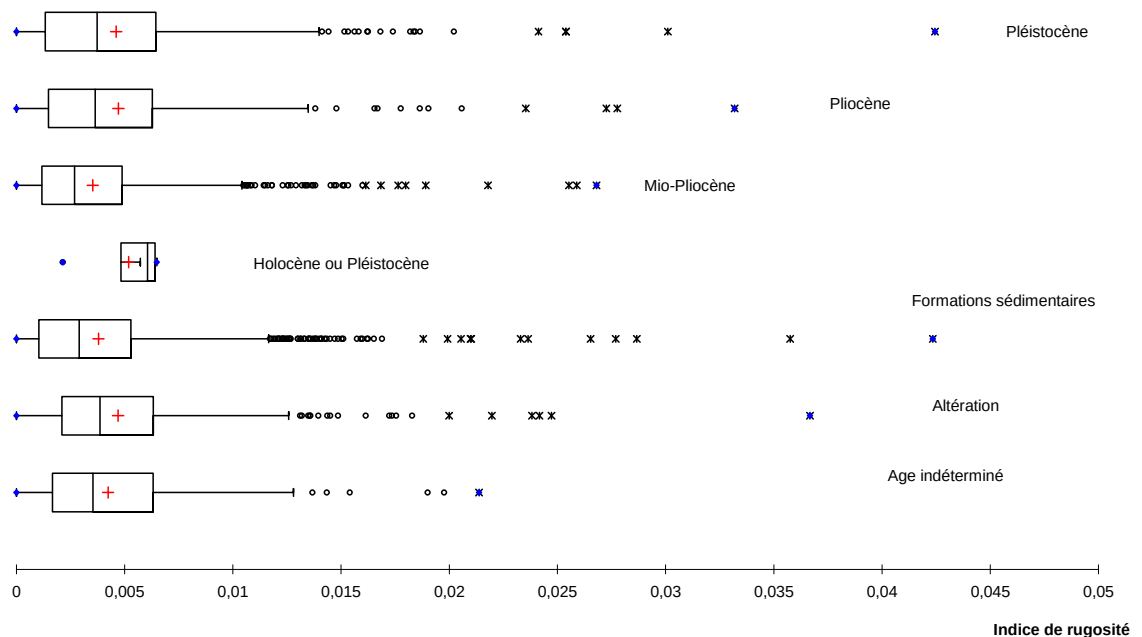


Illustration 26 : Distribution statistique de l'indice de rugosité par unités fonctionnelles lithologiques selon la méthode des boîtes à moustaches de Tukey

- Les unités Mio pliocène et formations sédimentaires montrent des valeurs très hétérogènes mais aussi un intervalle interquartile décalé vers les faibles valeurs (idem pour l'IDPR)

- Les unités Pléistocène et Pliocène montrent aussi des valeurs très hétérogènes mais des distributions similaires (mêmes intervalles interquartiles, mêmes moyennes, mêmes médianes, etc.), c.à.d. des observations assez similaires aux distributions de l'IDPR.
- En revanche, les formations d'altération et d'âge indéterminé sont ici plus différenciées qu'au niveau de la distribution IDPR (notamment au niveau des intervalles interquartiles et des moyennes).

En ce qui concerne la distribution de l'indice de rugosité selon les unités pédologiques, comme indiqué plus haut, l'hétérogénéité des distributions est forte. Il est délicat de retrouver les mêmes signatures qu'en Illustration 25. A titre d'exemple :

- Les unités 16a et 16b, distinguées au niveau de la distribution par rapport à l'indice IDPR ne le sont plus ici
- Les similitudes entre les unités pédologiques proches 17, 15a, 14 et 13 n'apparaissent plus, idem pour les similitudes entre les unités 20a, 20b, 21a 22, 12b et 16b...
- En revanche, on observe, pour les unités 1, 2 et 3 une distribution décalée vers les valeurs faibles et une dispersion du signal assez faible. Ces observations indiquent que ces unités de type accumulation quaternaire ont de faibles indices de rugosité et sont « hydrologiquement » parlant à l'équilibre, ce qui est normal vu qu'il s'agit majoritairement de plaines alluviales, zones de mangroves ou de glacis au débouchée des plaines intérieures, c.à.d. des zones moins soumises au rajeunissement et donc à l'érosion que les zones de versants, plateaux et planèzes.

En conclusion, il est possible d'avancer que l'indice de rugosité n'est pas aussi dépendant des formations pédologiques que l'est l'IDPR (bien qu'un peu quand même). Comme indiqué précédemment, l'IDPR est davantage contrôlé par la répartition des formations géologiques et pédologiques alors que l'indice de rugosité est plutôt un marqueur de la dynamique structurale des reliefs (rajeunissement, reliefs juvéniles, etc.). Il est toutefois important de noter qu'en milieu volcanique, la surrection des reliefs (= édifices volcaniques) s'accompagne de formations lithologiques et pédologiques nouvelles (coulées de laves, intrusions de dômes, couverture de cendres, etc.) ce qui n'est pas le cas dans les autres environnements où la lithologie n'est pas renouvelée à chaque changement structural. D'où la nécessité - comme indiqué précédemment - de coupler ces deux indices dans un indice commun dit IDPR combiné.

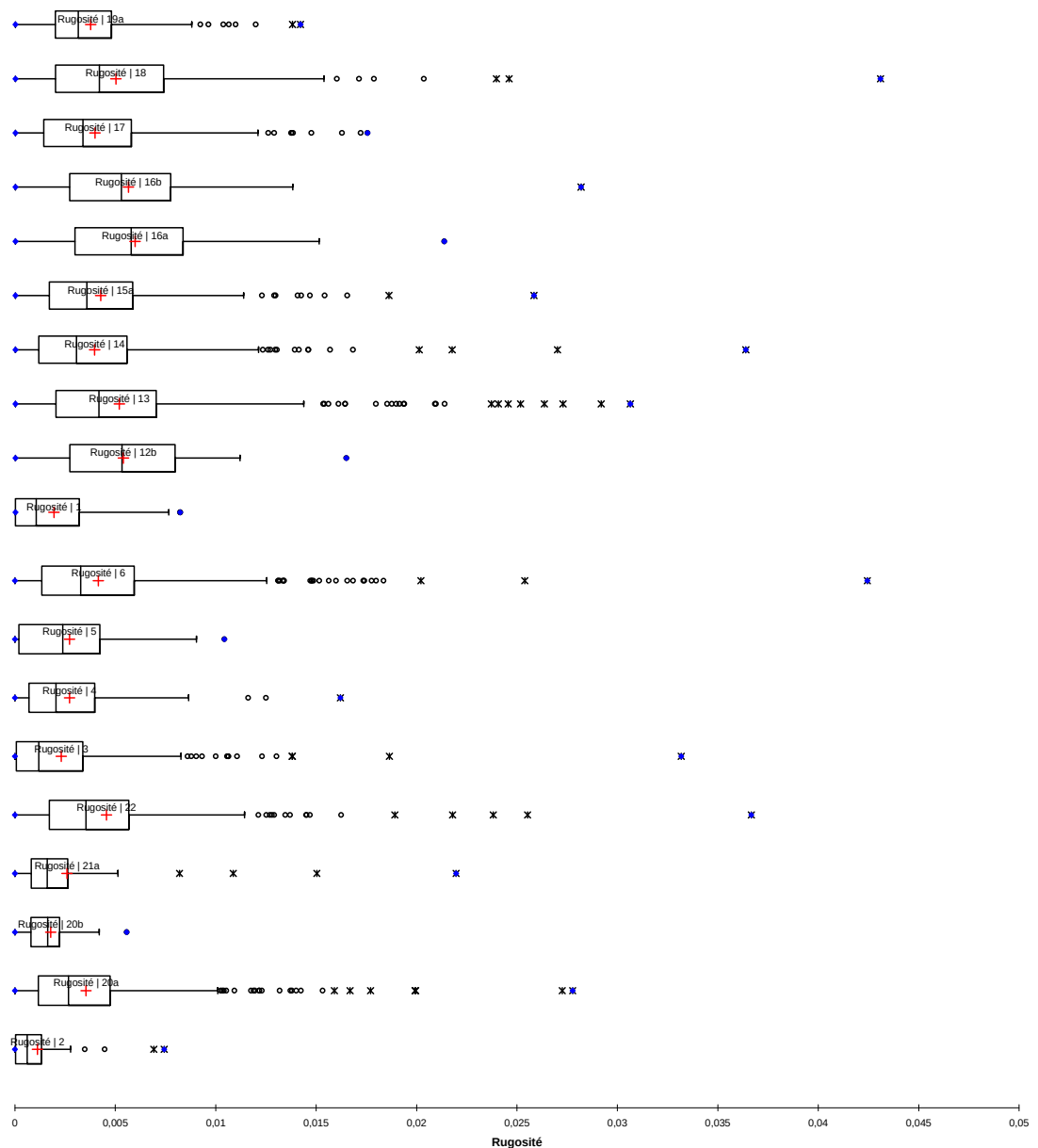


Illustration 27 : Distribution statistique de l'indice de rugosité par unités fonctionnelles pédologiques selon la méthode des boîtes à moustaches de Tukey

• Conclusion sur la méthode utilisée

D'une part, ces observations et résultats soulignent la relative importance du contrôle géologique et pédologique dans la distribution de l'indice IDPR, plus importante que dans la distribution de l'indice de rugosité. Ce dernier, bien que dépendant dans une certaine mesure de l'âge et de la nature des lithologies/pédologies est davantage un marqueur de la dynamique structurale des reliefs (et des bassins par conséquent).

Ces indices traduisent séparément un aspect de la vulnérabilité des eaux (qu'elles soient souterraines ou de surface) et ces observations confirment la nécessité de les coupler dans un seul et même indice dit d'IDPR combiné. Affranchie des artefacts que pouvaient causer Petite terre, les îlots, les zones planes ou dépressionnaires des lacs du Dziani Dzaha ou Karihani ainsi que les unités de calcaires récifaux semi-submergées par la marée, la méthode s'avère efficace pour caractériser la vulnérabilité des eaux souterraines et de surface (phase ②) à l'échelle des bassins d'alimentation. Les premières observations à l'échelle des BAC étudiés (cf. rapports BRGM/RP-57109-FR et BRGM/RP-57110-FR) montrent que l'IDPR combiné est un indice fiable dans la détermination de la vulnérabilité des BAC à Mayotte.

Néanmoins, ce calcul basé sur la répartition du réseau de drainage ne permet pas de distinguer la part des infiltrations diffuses qui peuvent concerner une surface de taille plus ou moins grande des infiltrations localisées de type pertes par le jeu des fracturations ou des contacts lithologiques qui peuvent occasionnellement apparaître.

3.2.4. Démarche proposée dans le cas des bassins d'alimentation de captage des eaux de surface : L'IDPR, l'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux et l'indice de rugosité

Les résultats de la caractérisation de la vulnérabilité des captages d'eau souterraine par l'indice IDPR peuvent être étendus aux captages de surface. En effet, à bassin d'alimentation de taille égale, les risques encourus par un captage de surface ne sont pas les mêmes selon les caractéristiques des terrains vis-à-vis du ruissellement.

Un bassin d'alimentation à dominante perméable aura la possibilité d'infiltrer tout ou partie d'un polluant mobile avant son arrivée au captage. A l'inverse, un bassin d'alimentation à couverture dominante ruisselante sera plus susceptible de transmettre au cours d'eau tout ou partie d'un polluant déversé sur sa surface. De la même façon qu'au § 3.2.3, les résultats de l'IDPR peuvent être appliqués ici, au cas des bassins d'alimentation de surface en mettant en exergue les différences relatives entre les versants ou fonds de vallée ruisselant et ceux plus perméables.

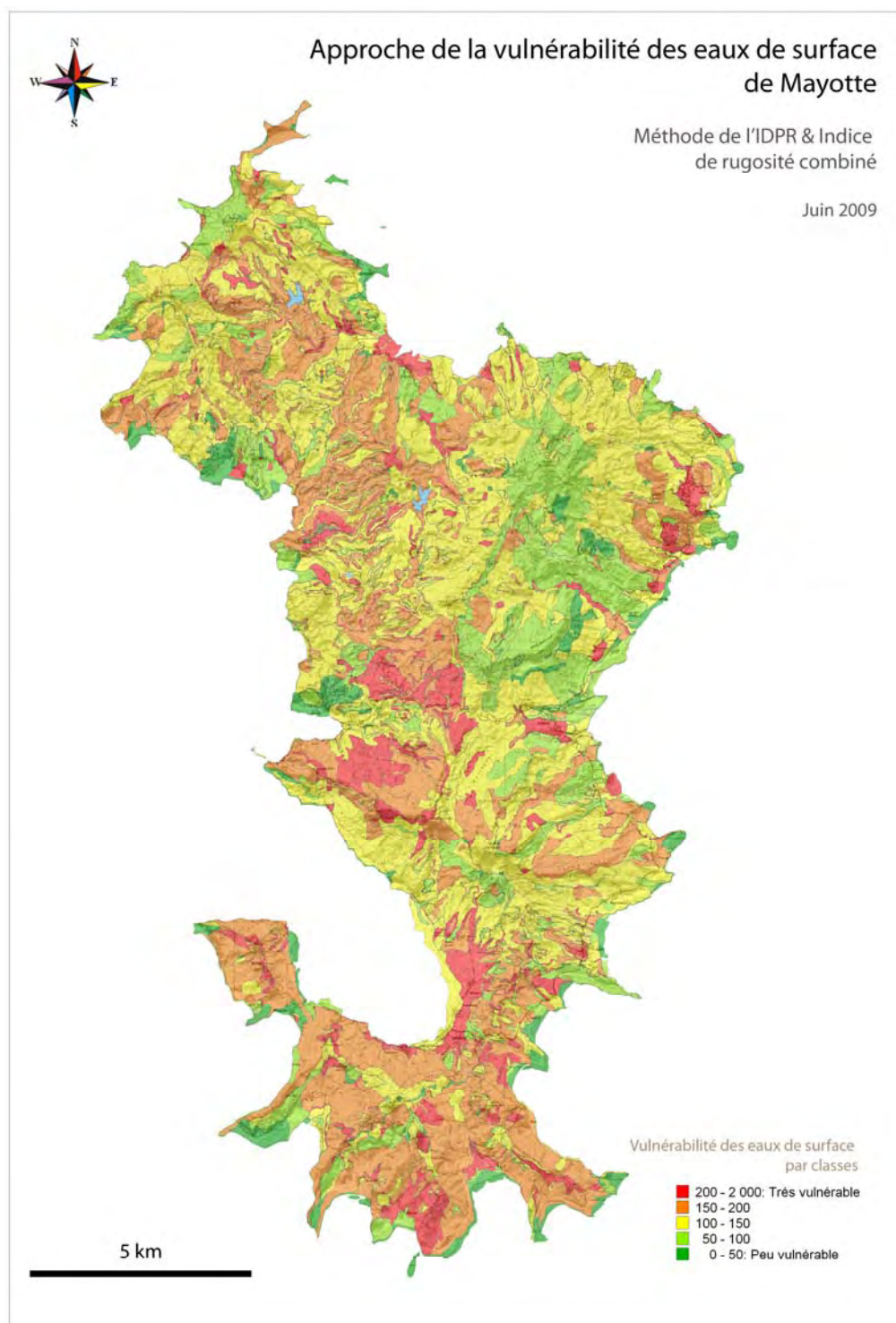


Illustration 28 : Approche de la vulnérabilité des eaux de surface de Mayotte. Association des indices IDPR et de rugosité = IDPR combiné.

Ainsi l'interprétation des résultats du calcul IDPR à l'échelle de l'île de Mayotte donne pour les eaux de surface les résultats ci-dessus (et présentés en Annexe 4).

Par ailleurs, la disparité du régime hydrologique des cours d'eau entre saison humide et saison sèche (d'un facteur 10 à 100 pour les débits journaliers) est un critère capital à prendre en compte dans l'estimation de la vulnérabilité des captages de surface. Comme exposé précédemment dans le cas des eaux souterraines (§ 3.2.2) la recharge des aquifères étant restreinte voire nulle en saison sèche, la vulnérabilité des captages de surface est - quant à elle - accrue car ces derniers collectent la quasi-totalité des écoulements du bassin. Noter aussi que la faiblesse des régimes hydrologiques en étiage restreint évidemment les phénomènes de dilution et de brassage d'éventuels polluants (pour rappel, la capacité de dilution et de brassage d'un cours d'eau sont des conditions importantes qui favorisent la dégradation d'un polluant par le milieu).

Par opposition à l'illustration 23, la carte ci-dessus montre que la répartition de la vulnérabilité des eaux de surface à l'échelle de Mayotte est diamétralement opposée à celles des eaux souterraines. Ainsi, le Sud de Mayotte (à partir de la ligne Tsararano – Dembéni mais de façon plus marquée encore au Sud de la ligne Bandrélé - Poroani) affiche majoritairement des zones de moyennes à fortes vulnérabilités. Les secteurs de Sada, Ongoujou et Kahani témoignent aussi d'une vulnérabilité relativement élevée vis à vis des eaux de surface. En revanche, les secteurs plus au nord, notamment au niveau des massifs de M'tsapéré, de Vahibé et du Maévadoani ainsi que localement au niveau des versants de N'Gouja, Chiconi, Sohoa et M'tsangamouji. Le Nord Ouest de l'île montre quant à lui des zones de vulnérabilités plutôt moyennes à vulnérables.

3.2.5. Récapitulatif méthodologique relatif à la caractérisation de la vulnérabilité des captages d'eau souterraine et de surface

En conclusion pour les eaux souterraines et de surface, l'approche de la vulnérabilité des ressources en eau - étendue aux captages dans le cas qui nous intéresse - repose sur l'application du calcul IDPR, révélateur des capacités infiltrantes ou ruisselantes du bassin d'alimentation. Cette méthodologie doit être bien évidemment discutée au cas par cas dans les études particulières de bassin d'alimentation de captage et les interprétations doivent être modulées en fonction des observations géologiques et hydrogéologiques de terrain et du régime hydrologique très variable au cours de l'année – particulièrement pour les eaux de surface. Le tableau suivant récapitule les méthodologies et paramètres retenus dans l'approche de la vulnérabilité des eaux de surface et souterraines.

	Captages d'eau souterraine	Captages d'eau de surface	Informations de base
Méthodologies d'approche de la vulnérabilité	Approche par IDPR & indice de rugosité (carte IDPR combinée)	Approche par IDPR & indice de rugosité (carte IDPR combinée)	MNT 1/25 000 (IGN©) BD hydro 1/25 000 (IGN©)
Les paramètres qui conditionnent la vulnérabilité des captages			
Les précipitations	Le volume des précipitations efficaces accroît de manière générale la vulnérabilité des captages. Le zonage des infiltrations n'est pas directement lié à la distribution des précipitations Vulnérabilité plus prononcée en saison des pluies (période de recharge des aquifères)	Le volume des précipitations efficaces accroît de manière générale la vulnérabilité des captages. Temps de concentration de l'ordre de 1 à quelques heures	Annuaire DAF
La topographie et la densité du réseau hydrographique	Sont considérés comme vulnérables : - les secteurs de moindre pente de	Sont considérés comme vulnérables : - les secteurs à pentes	MNT 1/25 000 (IGN©) BD hydro 1/25 000 (IGN©)

	type plateaux et fonds de vallée qui ralentissent la concentration des ruissellements et participent à leur infiltration - Cours d'eau en raison des infiltrations directes dans le fond du lit (cf. § 2.) en périodes de hautes eaux	importantes qui ont pour effet d'accélérer la concentration des ruissellements en direction des cours d'eau - Les cours d'eau qui concentrent les ruissellements	
La géologie	Sont considérées comme vulnérables les secteurs présentant à l'affleurement les unités lithologiques les plus perméables	Sont considérés comme vulnérables les secteurs présentant à l'affleurement les unités lithologiques les plus imperméables	Carte géologique 1/50 000 (Stieljes 1988)
La pédologie	Sont considérées comme vulnérables les secteurs présentant les unités pédologiques les plus infiltrantes	Sont considérés comme vulnérables les secteurs présentant les unités lithologiques les moins infiltrantes	Carte morphopédologique 1/50 000 (Latrille – 1981)
Présence et densité du couvert végétal de surface	Facteur sorti de la méthode d'évaluation de la vulnérabilité car fortement anthropique	Facteur sorti de la méthode d'évaluation de la vulnérabilité car fortement anthropique	Plan d'occupation des sols
Les discontinuités	Méconnaissance du rôle des discontinuités. Indirectement prises en compte dans le calcul de l'IDPR	Méconnaissance du rôle des discontinuités. Indirectement prises en compte dans le calcul de l'IDPR	Information absente à l'échelle du bassin d'alimentation
L'épaisseur de la zone non saturée	La vulnérabilité de l'aquifère diminue avec l'augmentation	N'influe pas significativement sur la vulnérabilité des	Information absente à l'échelle du bassin d'alimentation

	de la ZNS (pas de karst ⁵ à Mayotte)	captages de surface	
La transmissivité de l'aquifère	L'enjeu considéré supposant un écoulement dans l'aquifère, la vulnérabilité dépend de la capacité de l'aquifère à laisser circuler l'eau	N'influe pas significativement sur la vulnérabilité des captages de surface	Information absente à l'échelle du bassin d'alimentation

Tableau 6 : récapitulatif méthodologiques des outils et paramètres de caractérisation de la vulnérabilité des captages d'eau souterraine et de surface de Mayotte

⁵ Plateau calcaire affecté d'un modelé karstique issu de la dissolution des roches carbonatées

3.3. DETERMINATION DES VITESSES DE CIRCULATION DES EAUX DE SURFACE

En surimposition à la vulnérabilité des bassins d'alimentation de captage de surface, la détermination de la vitesse de propagation du cours d'eau et - par extension le calcul du temps de transfert d'une masse d'eau (potentiellement polluée) – entre un point donné du cours d'eau et le captage considéré est une donnée importante dans l'estimation du risque encouru par le captage (cf. rapport BRGM R38853). Deux cas de pollution sont à distinguer : les pollutions diffuses et chroniques - cf. définition du CORPEN § 3.4.1.

Les premières se définissent comme la dégradation des eaux causée par des rejets issus de toute la surface d'un territoire ou par l'émission répétée ou constante de polluant et transmis aux milieux aquatiques de façon indirecte. Citons par exemple à Mayotte : les rejets d'eaux usées, et les produits issus de l'activité agricole si mis en évidence.

Les pollutions chroniques ou accidentelles traduisent une pollution localisée à caractère non récurrent.

Dans le premier cas, l'estimation des temps de transfert au captage n'est pas nécessaire à la mise en place des stratégies de protection. En revanche, dans le second cas, le caractère accidentel et donc aléatoire de la pollution peut être maîtrisée par l'estimation d'un temps de transfert correct - ou du moins d'une fourchette de temps dépendante des régimes hydrologiques du cours d'eau afin de prendre les mesures adéquates à la protection du captage, généralement la fermeture de ce dernier le temps que le polluant soit passé. A l'heure actuelle, tous les captages de surface situés dans l'enceinte d'une usine de traitement (par exemple le captage d'Ourovéni) sont surveillés en permanence par le personnel de l'usine habilité à stopper instantanément l'exploitation en cas d'accident. Les captages les plus éloignés (par exemple Bouyouni haut) sont équipés de commandes de distance qui permettent l'arrêt instantané de l'exploitation.

Très fréquemment, les faibles débits représentent les occurrences les plus défavorables en cas de pollution accidentelle : faible dilution, vitesse d'écoulement lente, obligation d'arrêt du prélèvement de longue durée, etc. Les forts débits représentent un moindre intérêt dans le sens où ils correspondent à un facteur de dilution important et à une vitesse d'écoulement élevée qui limite l'allongement du panache de pollution.

Le plus délicat reste à identifier et localiser les accidents de pollution lorsqu'ils sont susceptibles de se produire. A cet effet, aucun moyen de détection n'a été mis en place en amont des captages (essentiellement les captages de surface) de type détecteur d'hydrocarbures ou autre. De plus, il reste à évaluer le temps moyen nécessaire à la communication de l'information entre le moment de l'accident ou de sa mise en évidence et les personnes habilitées à prendre la décision de stopper le captage menacé.

3.3.1. Principe : détermination en conditions de hautes eaux et de basses eaux

Il est admis que la vitesse de l'eau dans une rivière augmente depuis le fond jusqu'à la surface et depuis les berges jusqu'au milieu. La vitesse maximale est atteinte au milieu du cours d'eau, quelques centimètres à mètres sous la surface libre en fonction de la largeur du lit mineur (cf. Illustration 29).

La vitesse moyenne de la rivière peut être assimilée à l'intégration des vitesses mesurées aux différents points de la section du lit mais il est également possible de la calculer par des relations empiriques associant la pente, le périmètre mouillé, la surface de la section mouillée et la rugosité du fond sous réserve que certaines conditions soient respectées : écoulement strictement laminaire ou strictement turbulent, cours d'eau rectiligne, etc.

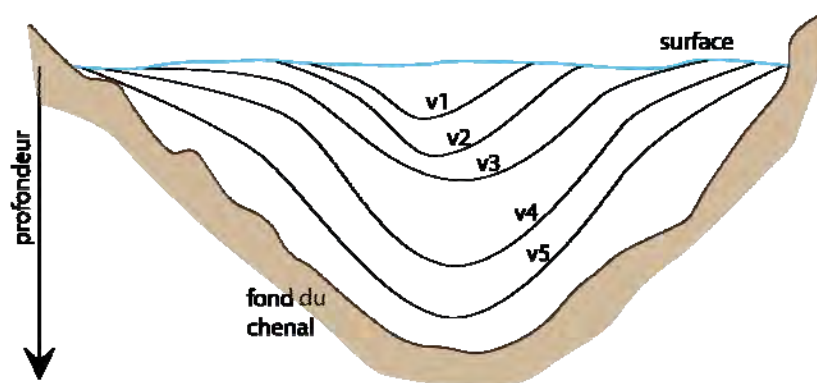


Illustration 29 : Variation de vitesse dans une rivière en fonction de l'écartement au centre et de la profondeur : $v1 > v2 > v3 > v4 > v5$

Dans le cas présent, la méthodologie retenue pour l'établissement des temps de transfert repose sur l'utilisation de l'équation de Manning Strickler (E5) appliquée aux cours d'eau mahorais. Le choix de cette méthodologie s'explique par :

- l'absence - ou du moins le déficit - de données hydrologiques complètes et fiables à Mayotte. A l'heure actuelle les suivis orchestrés par la DAF sur les cours d'eau ne permettent pas les interprétations sur la seule base de ces données (problème de tarage par rapport au seuil, chroniques incomplètes ou non-continues, etc.).
- l'extrême variabilité des régimes hydrologiques : réponse rapide des cours d'eau aux épisodes pluvieux, débits variables d'un facteur 10 à 100 (pour les débits journaliers) entre saisons sèches et saisons des pluies, etc. (Lapègue – 1999) ne justifie pas l'utilisation de modèle hydrologique plus paramétré.
- à l'exception de pollution directement déversée dans le cours d'eau, en ce qui concerne les pollutions versées à proximité des cours d'eau, les modalités de transferts entre ces environnements et le cours d'eau sont probablement plus significatives que les modalités de transfert du polluant entre un point donné de la rivière et le captage.

$$U = K_s R_h^{2/3} i^{1/2}$$

E5 : Equation de Manning Strickler

Avec :

- U : vitesse [m/s]
- K_s : coefficient de rugosité [$m^{1/3}/s$] - (d'autant plus élevé que le substrat est lisse, cf. Tableau 7)
- R_h : rayon hydraulique [m] - (aire mouillée sur périmètre mouillée)
- i : gradient hydraulique [m/m] - (pente de la ligne d'eau)

Le domaine de validité de l'équation impose le respect de certaines conditions physiques dont l'omission peut augmenter considérablement la gamme d'incertitude. Les conditions d'application de la formule de Manning Strickler à Mayotte sont le respect d'un écoulement pseudo uniforme dont les caractéristiques sont les suivantes :

- a. Géométrie du cours d'eau régulière (biefs rectilignes)
- b. Débit suffisant pour occuper le lit apparent sur toute sa largeur
- c. Pente suffisante pour assurer un bon débit
- d. Les caractéristiques de l'écoulement sont identiques d'une section à l'autre (même surface mouillée, même hauteur d'eau, même vitesse...)
- e. La pente de la ligne d'eau (variable i) est à peu près la même que la pente du fond du lit

Les conditions **b.** et **c.** ne sont presque vérifiées à Mayotte qu'en hautes eaux. Les conditions **a.** et **d.** ne sont que partiellement vérifiés, la sinuosité des cours d'eau n'entraînant les mêmes conséquences en termes d'approche de vitesse qu'un cours d'eau rectiligne. **e.** est une caractéristique difficilement approchable à Mayotte car les cours d'eau accusent un profil très raide et le lit est souvent une succession de petits bassins entrecoupés de courtes cascades et concentrent bien souvent des mégablocs qui constituent des obstacles variés. En hautes eaux, les débits importants, la vitesse du courant et le recouvrement du lit mineur tendent à gommer les irrégularités du lit mineur. Par conséquent, les résultats des calculs de l'équation E5 n'auront qu'une valeur relative mais pourront être considérés plus réalistes en **hautes eaux (HE)** où ils seront appliqués qu'en basses eaux (BE).

Dans ces conditions, l'application de cette relation (E5) peut être étendue à un polluant dont la vitesse de déplacement serait assimilée à celle du courant (hypothèse pessimiste dans le sens où la propagation d'un polluant dans l'eau est le plus souvent ralentie par rapport à la vitesse de progression du courant en raison des mécanismes de dispersion / diffusion, de non miscibilité par exemple les hydrocarbures en phase aqueuse, et des mécanismes de stockage / relargage à l'interface eau / sédiment). Le coefficient de rugosité K_s (à ne pas confondre avec l'indice de rugosité du § 3.2.3) rend compte de la rugosité du lit et des berges du cours d'eau. Ce coefficient est compris dans une fourchette de 25 à 40 $m^{1/3}/s$ dans un contexte de berges à galets fortement

végétalisées. L'ensemble des calculs de vitesse de courant réalisés sur les cours d'eau prendront ces deux coefficients comme valeurs d'encadrement.

Nature du lit		$K_s(m^{1/3}/s)$
Lits bétonnés		70
Lits naturels propres à fond lisse		50
Lits naturels propres à fond rugueux		33
Lits naturels avec végétation		20 - 10
Type de cours d'eau		
Lit taillé dans la roche		
1 lisse et uniforme		40 - 25
2 déchiqueté et irrégulier		29 - 20
Lit constitué de matériaux fins		
1 propre sans végétation		56 - 40
2 avec une herbe courte		40 - 30
3 avec une herbe haute		33 - 20
Lit constitué de matériaux grossiers		
1 graviers	(4- 8 mm)	53 - 50
2 graviers	(8- 20 mm)	50 - 45
3 graviers	(20- 60 mm)	45 - 37
4 cailloux et galets	(60-110 mm)	37 - 33
5 cailloux et galets	(110-250 mm)	33 - 29
6 grosses pierres	(suivant la taille)	29 - 14
Berges et/ou lit majeur avec		
1 herbes ou cultures basses (suivant la densité)		33 - 20
2 broussailles (suivant la densité)		20 - 10
3 arbres (suivant la densité)		13 - 10

Tableau 7 : Ordre de grandeur du coefficient de rugosité K_s ($m^{1/3}/s$) selon différentes typologies.

Les paramètres de l'équation seront affinés au plus près des observations de terrain ; notamment les valeurs des gradients hydrauliques, les valeurs de périmètre mouillé dépendantes de la largeur du lit mineur et de la tranche d'eau, ainsi que les valeurs du coefficient de rugosité. Ponctuellement, les jaugeages réalisés en rivière permettront de vérifier la relation entre la vitesse du cours d'eau et le coefficient de rugosité.

En basses eaux (BE), il est convenu que des mesures directes de temps de transfert dans les cours d'eau par jaugeage manuel permettront de s'affranchir de l'équation E5 qui s'avère non-applicable en conditions d'étiage.

Des jaugeages chimiques à la méthode dite « au sel » sont réalisés sur plusieurs sections du cours d'eau en amont des captages. Les résultats sont interprétés doublement. D'une part, ils permettent de déterminer les débits d'étiage, difficilement mesurables au moyen d'une autre méthode et d'autre part, l'injection de sel en amont permet de déterminer la vitesse de transfert du panache entre deux points de distance connue. Comme indiqué sur l'illustration 30, la valeur qui sera retenue comme vitesse de transfert est en réalité la vitesse de pointe du cours d'eau en cette section correspondant au passage du pic du panache.

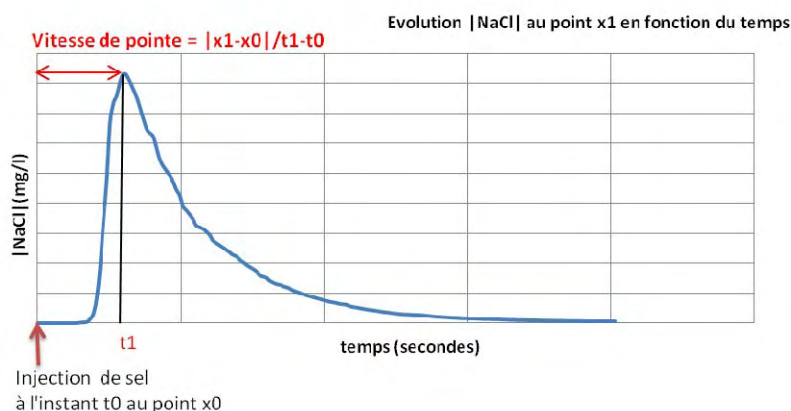


Illustration 30 : Vitesses de pointe d'un cours d'eau en basses eaux déterminées à partir des courbes de restitution des jaugeages chimiques.

Lors de l'interprétation des vitesses, il est important de garder à l'esprit que la réalisation des jaugeages au sel nécessite des sections de cours d'eau à vitesses apparentes élevées pour optimiser le brassage du sel et le passage du panache dans des délais raisonnables (morphologie de type rapides). Les vitesses ainsi déduites ne peuvent donc être considérées comme des vitesses moyennes mais davantage comme des vitesses de pointe. Ainsi les conditions les plus pessimistes sont respectées ici aussi, à savoir : déplacement du polluant à la même vitesse que l'eau (vitesse de pointe) et généralisation des vitesses mesurées au niveau des rapides à l'ensemble de la section considérée.

3.3.2. Applications

Les cours d'eau, c.à.d. le lit principal et les affluents majeurs en amont du captage sont divisées en zones sur la base des caractéristiques d'étagement du cours d'eau (ex : zone 1 = de 50 à 150 m NGM, zone 2 de 150 à 300 m NGM, etc.). Ainsi les vitesses de transfert sont calculées (HE) ou mesurées (BE) zone/zone et retranscrites en temps d'atteinte au captage par addition des temps d'atteinte des zones aval.

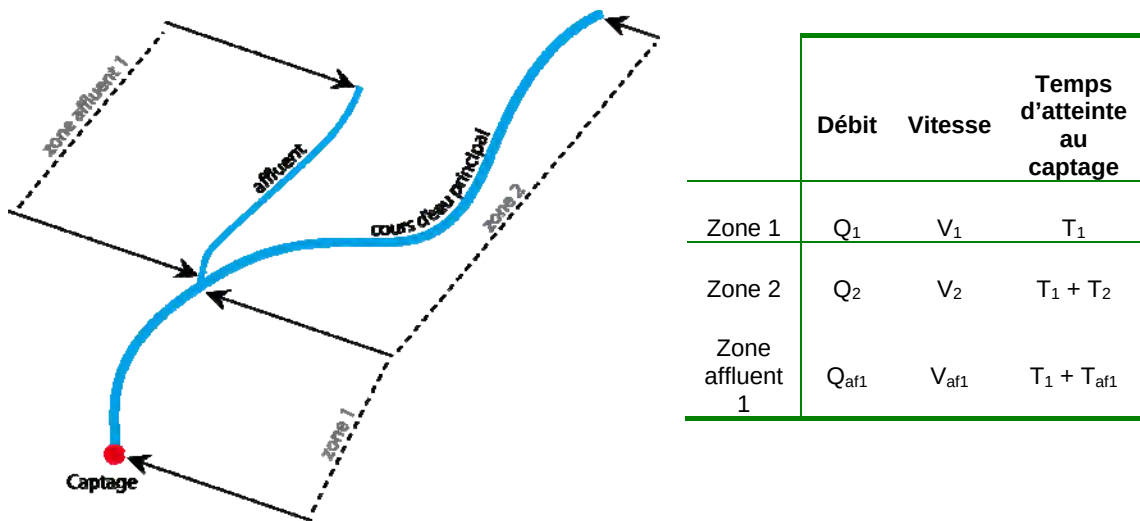


Illustration 31 : découpage des cours d'eau des bassins d'alimentation de captage de surface, estimation des vitesses et des temps d'atteinte au captage

Comme le montre l'illustration 31, à chaque section du cours d'eau principal et de ses affluents, en HE et en BE, il est possible de déterminer un temps d'atteinte minimal au captage (synonyme d'un délai de réaction minimal) d'un ou de plusieurs polluant(s) déversé(s) en amont.

Comme recommandé dans la plupart des guides méthodologiques relatifs à la délimitation de périmètres de protection et la mise en œuvre de dispositifs de surveillance de la ressource (J. Carré 2005, SAUNIER/TECHNA 1999), le temps nécessaire à la communication de l'information entre un éventuel accident de pollution, à la fermeture d'un captage et à la mise en route des ressources de substitution est au maximum de 2 heures; limite temporelle qu'il est possible de réduire en fonction de la configuration des BAC (surface notamment) et de leurs régimes hydrologiques. Par conséquent, les sections de cours d'eau en amont des captages dont les temps d'atteinte sont inférieurs à 2 heures sont considérées comme à vulnérabilité forte.

A Mayotte, deux adaptations sont nécessaires à l'application de cette recommandation.

- i. Compte tenu de la petite taille des BAC (environ 2 km² pour les plus petits à 20 km² pour le plus grand) et des facteurs de concentration de l'ordre de quelques heures maximum, la limite de 2 heures est appliquée aux BAC dont la surface est supérieure à 6 km² et se voit réduite à 1 heure dans le cas des BAC dont la surface est inférieure ou égale à 6 km².
- ii. Compte tenu de la forte variabilité des régimes hydrologiques entre hautes eaux et basses eaux, la limite du temps d'atteinte de 1 à 2 heures fluctue entre ces deux saisons sur une portion non négligeable du cours d'eau (souvent d'un facteur 1 à 5 entre basses eaux et hautes eaux). Deux limites correspondant aux deux extrêmes hydrologiques seront donc figurées, à l'image de l'illustration 32.

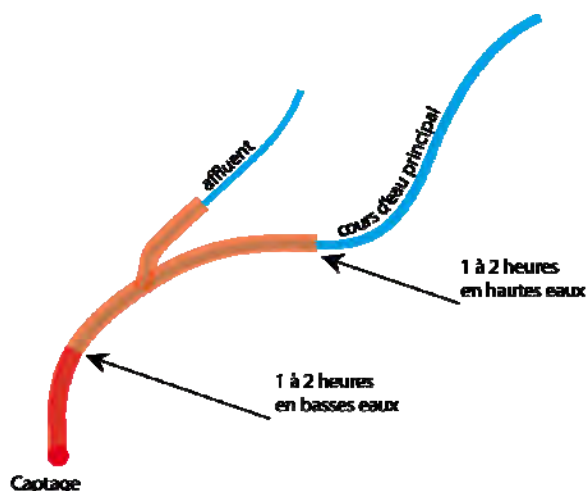


Illustration 32 : variabilité de la limite du temps d'atteinte au captage (1 à 2 heures selon les si les bassins d'alimentation de captages sont respectivement de surface inférieure ou supérieure à 6 km²) entre les régimes hydrologiques de hautes et de basses eaux.

Ces informations complètent bien évidemment le degré de vulnérabilité du captage - plus particulièrement face à une pollution chronique - et permettent d'ores et déjà d'envisager les modalités de protection opérationnelle du captage.

La cartographie de ces informations viendra se surimposer à la cartographie finale des risques du bassin d'alimentation de captage de surface (cf. § 3.5).

3.3.3. Synthèse

En ce qui concerne le calcul des temps de transfert en rivière, ce paramètre en association avec le calcul de l'IDPR, est décisif dans la caractérisation de la vulnérabilité des captages de surface. Il faut retenir que deux méthodes seront comparées : l'utilisation de l'équation de Manning Strickler en hautes eaux et la mesure de débit/vitesse *in situ* par la méthode de jaugeage au sel en conditions d'étiage (cf. Annexe 5).

- Pour les BAC dont la superficie est supérieure à 6 km², une limite de temps d'atteinte égale à 2 h (en HE et en BE) sera considérée ;
- Pour les BAC dont la superficie est inférieure à 6 km², une limite de temps d'atteinte plus courte, c.à.d. égale à 1 h (en HE et en BE) sera considérée.

3.4. EVALUATION DES PRESSIONS ENVIRONNANTES

3.4.1. Observations générales

L'inventaire des pressions réalisé sur le bassin versant consiste à identifier et quantifier l'impact des activités anthropiques exercées sur les bassins d'alimentation de captage. L'exercice suivant consiste à hiérarchiser ces pressions inventoriées selon des degrés révélateurs de leur impact sur la ressource en eau. Cette hiérarchisation sera – pour partie – en accord avec les méthodologies courantes d'estimation des pressions (par exemple cas des activités industrielles dont le degré dépend des groupes SEI) mais aussi adaptée au contexte de Mayotte.

D'une part sont identifiées les activités ou pratiques à risque pour la ressource en eau ; à savoir l'urbanisation concentrée et les pressions associées, les activités agricoles ou industrielles, l'aménagement du territoire et la présence d'infrastructures dont l'impact sur la ressource est à craindre (surexploitation de la ressource, aménagements mal maîtrisés, modifications des mécanismes hydrologiques et/ou hydrogéologiques par détournement ou capture des circulations, etc.)

D'autre part, sont identifiés les produits accompagnant ces activités ou pratiques et susceptibles d'impacter la qualité écologique et chimique de la ressource en eau, c.à.d. l'ensemble des produits de l'activité agricole : pesticides, insecticides, engrais, produits phytosanitaires en général, les produits issus de la concentration urbaine : eaux usées non assainies, déchets domestiques et les produits issus de l'activité industrielle et/ou de stockage (hydrocarbures par exemple).

Les pressions peuvent conduire à deux types de pollutions : diffuses ou chroniques. D'après le CORPEN (Comité d'Orientation pour des Pratiques agricoles respectueuses de l'Environnement), les deux types de pollutions des eaux se définissent de la manière suivante :

- les pollutions chroniques (ou ponctuelles) : elles sont en général liées à des erreurs, à des négligences ou à des difficultés de manipulation des produits et du matériel. Certaines pratiques répétées sont aussi à l'origine de pollutions ponctuelles chroniques, c'est le cas par exemple, dans le domaine agricole de la vidange des fonds de cuve dans la cour de ferme ou dans un puisard, d'un accident industriel ou de transport de matières dangereuses, d'un déversement de produits toxiques (détergent, huiles) directement dans le cours d'eau ;
- les pollutions diffuses : elles proviennent de l'entraînement des produits épanchés sur les parcelles cultivées ou des secteurs habités non assainis vers les eaux superficielles ou souterraines. L'importance de la pollution diffuse dépend de nombreux facteurs en interaction les uns avec les autres : contexte pédo-climatique, contexte culturel, propriétés de la substance active, modalités et époques d'application...

En surimposition à l'inventaire et à la hiérarchisation des pressions, l'exposition des captages aux aléas naturels et leur degré de dangerosité sera discuté et viendra étayer

ou non le degré d'exposition de la ressource ou du captage à un risque naturel pouvant conduire à une dégradation de la ressource ou la destruction du captage en question.

La cartographie des pressions étant évolutive, elle sera complétée au fur et à mesure des études de bassin d'alimentation de captage. Par conséquent la carte réalisée à l'échelle de l'île et présentée en Illustration 34 figure à titre illustratif.

1) Pressions urbaines : déchets / assainissement et eaux usées

L'expansion urbaine que connaît Mayotte aujourd'hui s'accompagne difficilement des mesures adéquates de collecte de déchets et de construction et de raccordement au réseau d'assainissement. L'état des lieux du SDAGE (ASCONIT - décembre 2006) montre que l'utilisation des fosses septiques a sextuplé ces dernières années mais que 37 % des logements ne sont toujours pas équipés de WC, soit près de 60 000 personnes. 69 % des ménages possèdent des douches à l'extérieur de leur logement sans système de collecte des eaux usées. Les habitudes culturelles, le non raccordement et le prix de l'eau sont les principaux facteurs du faible développement de l'assainissement de l'île. A ces facteurs, il convient d'ajouter que la mise en place de systèmes d'assainissement sur l'île est freinée – ou du moins ralentie – pour des raisons financières, foncières et souvent techniques.

Il n'existe qu'une seule station d'épuration sur le territoire de la Collectivité, celle du BAOBAB mise en service en 2001 et qui assure l'assainissement d'une partie de la commune de Mamoudzou (autour de 15 000 Eh⁶). Ailleurs, des minis stations d'épuration (plus de 130, d'une capacité de 20 à 50 Eh) ont été mises en place dans quelques lotissements, par des programmes de RHI ou dans des établissements scolaires. Malheureusement, l'entretien des ces stations n'étant pas toujours assuré, une majeure partie de ces installations montrent des dysfonctionnements qui peuvent conduire à leur arrêt définitif. En mars 2008, la DAF a procédé à l'inventaire de l'état général de ces stations. D'après les conclusions, il s'avère que seule une minorité de ces systèmes d'assainissement collectifs et semi-collectifs fonctionnent correctement.

L'assainissement pour tous est noté comme une priorité dans le schéma de développement de l'île et inscrite dans le contrat de projet 2009-2014.

En termes de pressions sur la ressource, le fait de concentrer les lieux d'aisance au bord des rivières et de jeter les eaux usées directement à l'extérieur des logements dans les réseaux d'eau pluvial représente un risque non négligeable de dégradation écologique et de pollution des cours d'eau lors d'épisodes pluvieux par matières fécales et produits domestiques présents dans les eaux usées (produits ménagers, cosmétiques, etc.).

⁶ Équivalent habitant

2) Pressions agricoles : engrais et produits phytosanitaires

En règle générale – et ce constat sera appliqué à l'ensemble des bassins versants de l'île - l'utilisation d'engrais et de produits phytosanitaires dans la pratique agricole commune n'est pas une généralité, les produits phytosanitaires ont un coût que les agriculteurs ne peuvent pas tous supporter.

Aux dires d'experts (CIRAD et DAF Dembéli) deux insecticides (Lambda-cyhalothrine et Deltaméthrine) ainsi que deux fongicides (bouillie bordelaise/cuivre et mancozèbe) sont couramment utilisés en maraîchage. L'emploi d'engrais est très variable, de 50 kg à 200 kg (pour les plus gros consommateurs) par hectare avec dispersion manuelle localisée autour du plant (contre 177 kg/ha en moyenne en Europe et 261 kg/ha en France en 1997, source : base de données on-line de la FAO, [http : // www .fao. org/waicent/faostat/](http://www.fao.org/waicent/faostat/)). La nature des engrais utilisée est très variable : engrais NPK (synonyme d'azote, phosphore et potassium), urée, compost et fientes de poules, de zébus et de chèvres entrent dans l'inventaire des fertilisants.

A noter que l'évaluation des stocks de pesticides périmés s'élève à moins d'une tonne (recensement DAF, 2008) pour l'ensemble de l'île. S'il s'avère que le stock de produits en circulation est quelque peu proportionnel au stock de produits périmés, la quantité de produits en circulation est bien moins significative en comparaison de celle d'un département métropolitain par exemple.

La diversité des engrais utilisés et le fait qu'une majorité soit produite sur l'île rend difficile la quantification de la pratique. Seuls les engrais de type NPK peuvent être comptabilisés à leur entrée sur le territoire mais ne constituent qu'une faible part des produits utilisés.

Par ailleurs, de nombreux produits clandestins sont en circulation sur l'île et il n'est souvent pas évident d'en déceler la nature ni la quantité dispersée.

Les cultures vivrières et fruitières – bananes, maniocs, patates douces - et les cultures d'Ylang-ylang ne sont pas concernées par l'utilisation d'engrais ou de produits phytosanitaires (source : CIRAD et DAF Dembéli).

Par conséquent, la pression moyenne engendrée par l'activité agricole à Mayotte n'a pas la même ampleur que celle rencontrée en métropole ou à la Réunion par exemple et reste limitée. A l'heure actuelle, les répercussions de l'activité agricole sur les eaux superficielles ou souterraines est quasiment inexistante, que ce soit la teneur en produits azotés (nitrates, nitrites) en ammonium, ou en produits phytosanitaires. Néanmoins, il convient de rester vigilant car le développement et la modernisation de l'activité agricole à Mayotte passe par une hausse de la consommation d'engrais et de produits phytosanitaires qui – dans le futur – pourraient représenter un risque pour la ressource en eau.

A ces pressions agricoles il convient de rajouter les activités d'élevage, importantes sur le territoire. Le SDAGE (Asconit – décembre 2006) fait mention d'un recensement de 17 235 bovins et 22 811 caprins en 2003. Ces cheptels, non déclarés, vagabonds et ne

faisant l'objet d'aucun suivi sanitaire sont autant de risques vis-à-vis de la ressource comme en témoigne par exemple le bassin d'alimentation de captage de l'usine de dessalement de Pamandzi (rapport BRGM/RP-57112-FR). La localisation de ces élevages étant impossible, le risque pourra être considéré comme omniprésent sur toute la surface des bassins d'alimentation de captage.

3) Pressions des pratiques rurales et domestiques : décharges sauvages / lessives et pêches

A Mayotte, les pratiques courantes consistent à effectuer les lessives et les lavages de véhicules directement dans les cours d'eau. En plus d'être une habitude culturelle, cette pratique est encouragée par un prix de l'eau perçu comme trop élevé pour une majorité de la population. Les observations réalisées sur les bassins versants montrent qu'aucun cours d'eau permanent n'échappe à la pratique des lessives quand bien même son débit est très faible pour diluer et entraîner la dispersion des produits de lessive.

La pollution des eaux par les lessives n'est pas sans gravité. Outre l'utilisation des phosphates qui génère des pollutions organiques, la présence de composés alcalins agit sur le pH des eaux, le maintenant à des valeurs élevées (borates, carbonates, etc.). L'utilisation de détergents conduit à la formation de pellicules de produits voire de mousses à la surface des eaux, empêchant la diffusion de l'oxygène et provoquant l'anoxie des cours d'eau, particulièrement en saison sèche où les débits sont les plus faibles. Par ailleurs, la présence de chélatants – type EDTA – d'agents de blanchiment oxydants et de colorants et conservateurs induits des effets néfastes sur la faune, la flore et la chimie des eaux. Une récente campagne d'analyse opérée par la DAF en novembre 2008 sur la qualité des eaux des rivières a mis en évidence la présence d'AMPA dans les rivières dont l'origine pourrait être reliée à la dégradation des lessives (rivières de Coconi et de Gouloué).

Enfin, l'utilisation de javel à des doses excessives a un impact conséquent sur la qualité écologique des cours d'eau (mortalité végétale et animale) mais reste un paramètre maîtrisable dans le cadre de l'eau potable.

Parmi les pratiques courantes, le rejet de déchets verts, de déchets domestiques et d'équipements usagés directement dans les cours d'eau est très fréquent (cf. Illustration 33) et participe considérablement à la pollution des cours d'eau : eutrophisation, concentration de métaux lourds par déversement des batteries plomb, des huiles, des équipements électroménagers, peintures, etc. développement bactériologique, etc.



*Illustration 33 :
décharge sauvage
dans le cours d'eau
(rivière de
Kaouénilajoli, commune
de Mamoudzou).
Déchets domestiques,
déchets verts,
matériaux et
équipements ménagers
(véhicules,
électroménagers,
batteries plomb)
encombrant le lit
mineur. Ces pressions
sont heureusement
plus faibles en amont
dans les bassins
d'alimentation.*

Toutefois, bien que cette pollution soit considérable (et que ces pratiques soient à condamner), les décharges sont majoritairement localisées en aval des zones urbaines et ne concernent que peu les bassins d'alimentation de captage – à l'exception toutefois des bassins de l'Ourovéni ou de Kawéni où les captages sont à niveau ou en aval des zones urbaines. Dans ce cas, les décharges sauvages constituent des pressions majeures vis-à-vis de la ressource en eau.

La pêche au poison - bien qu'elle paraisse anecdotique – est une pratique encore en vigueur aujourd'hui (pêche aux camarons, aux anguilles, etc). La pollution à l'uruva (de la plante *Tephrosia uruva*) officiellement signalée au captage de Kwalé le 16 décembre 1992 en est un exemple. Entre 2007 et 2008, 2 procès verbaux ont été dressés suite à des actions de pêches au moyen de produits chimiques (informations, DAF de Mayotte). Il est important de noter que la détection des poisons locaux, notamment l'uruva est délicate car ce n'est pas un paramètre courant des analyses de routine.

A ces pratiques, il convient de rajouter les campagnes de démoustication réalisées par les services de la DASS à proximité des captages. Ces opérations sont maîtrisées et encadrées, donc ne constituent qu'une pression mineure vis-à-vis des captages car ces derniers sont mis hors service pendant toute la durée de la démoustication. Néanmoins, par le passé, des teneurs non négligeables en pesticides ont été enregistrées sur plusieurs captages et dans certains cas ont nécessité une fermeture temporaire (cf. rapport BRGM/RP-56774-FR).

4) Pressions industrielles

L'activité économique de l'île étant essentiellement tournée vers l'agriculture, les industries à Mayotte sont relativement rares et par conséquent, les pressions associées vis-à-vis de la ressource en eau sont mineures. D'après les données de

l'INSEE de Mayotte, le secteur industriel comptait, en 2002, 255 établissements tournés essentiellement vers le secteur agroalimentaire et de la construction (fabriques de briques, de charpentes, de menuiseries, etc.).

Mayotte compte 4 secteurs d'activités majeures : le secteur de Kawéni, vallée 3 à la sortie du port de Longoni, la zone portuaire de Longoni et le site des Badamiers, c.à.d. dans les zones littorales, en, aval de l'essentiel des bassins d'alimentation de captage. A l'exception de ces 4 secteurs, les activités industrielles sont plus rares et dispersées. Les pressions induites par l'activité industrielle de l'île seront modérées en fonction de la densité d'industrie et de leurs activités *via* la nature et le volume des produits employés.

5) Pressions routières

Considérant l'expansion du trafic automobile à Mayotte (parc automobile multiplié par 2 depuis 2002), les axes routiers peuvent être perçus comme des axes de pressions privilégiés sur le milieu environnant. En effet, compte tenu de la vétusté d'une partie du parc automobile de Mayotte et du comportement des usagers, il n'est pas rare que (i) le non entretien des véhicules entraîne une pollution directe de l'asphalte par fuites d'huile, échappements non réglés, etc. (ii) les abords des routes servent de réceptacles à de nombreux déchets automobiles ou ménagers, carcasses de véhicules, batteries, pièces mécaniques, et (iii) des incidents se produisent occasionnant le renversement de véhicules dans le fossé et entraînant la dispersion de carburant. En fonction de la localisation du tracé routier et des mécanismes d'infiltration ou ruissèlement, c.à.d. de vulnérabilité, ces substances peuvent à terme représenter un risque pour la ressource en eau captée.

Toutefois, il est important de noter l'absence d'entretien des abords des routes au moyen de produits chimiques de type herbicides ou fongicides. Seul l'entretien mécanique (fauchage et désherbage) est opéré (informations de la DE).

Ces axes routiers sont donc incorporés dans l'évaluation des pressions à Mayotte.

6) Risques naturels

Bien qu'il ne s'agisse pas d'une pression anthropique sur laquelle il est possible d'agir à travers une politique et des moyens réglementaires, les risques naturels - très présents à Mayotte et responsables de la majorité des « catastrophes » bien que le terme soit fort - peuvent nuire de deux manières au bon état de la ressource ou à son exploitation et visent plus particulièrement les bassins d'alimentation de captage de surface :

- en provoquant des hausses de turbidité des eaux superficielles : Coulées de boue, inondations, glissement de terrain provoquent bien souvent des pics de turbidité des eaux plus ou moins longs suivant l'importance du phénomène et sa fréquence. Au niveau des captages de surface, la SOGEA enregistre en saison sèche des turbidités usuelles de 2 à 3 NFU et des pics supérieurs à 1000 NFU lors des crues de saison des pluies. Il est à noter qu'à l'heure actuelle, la SOGEA est capable de

potabiliser des eaux de turbidité égale à 1000 NFU⁷ (et de les rendre inférieure à 1 NFU en sortie) mais doit pour cela réduire le rythme de production. Il est important de noter que les actions d'aménagement et de déforestation du territoire (diffus à l'échelle des bassins d'alimentation et plus concentrées en aval au niveau des zones urbaines) sont des facteurs qui participent considérablement à la hausse de la turbidité des eaux.

- en endommageant physiquement le captage : les risques tels que « glissement de terrain », « inondation », « chute de blocs » peuvent nuire à l'intégrité du captage, en interrompant momentanément et/ou en modifiant son fonctionnement. La destruction du captage par un événement catastrophique peut conduire à interrompre l'exploitation plus longtemps.

3.4.2. Le choix des critères et du degré de pression

Les pressions exercées sur les bassins d'alimentation de captage seront découpées et cartographiées en 3 classes (i) selon le degré de nuisance de la pression vis-à-vis de la ressource, (ii) selon s'il s'agit de pollutions chroniques ou diffuses et (iii) modulées en fonction des capacités de traitement liées à la potabilisation de l'eau. A titre d'exemple, le déficit de systèmes d'assainissement à l'échelle de l'île a bien évidemment des répercussions sur la qualité écologique des hydrosystèmes mais ne constitue qu'une pression moyenne sur la ressource étant donné la performance des moyens de traitement mis en œuvre lors du processus de potabilisation. A l'inverse, les pressions conduisant à la pollution des hydrosystèmes par des produits phytosanitaires ou des métaux lourds, dont les traitements sont plus délicats, plus coûteux et moins performants seront considérées comme fortes ; ceci afin de respecter une priorité dans les actions de protection du bassin d'alimentation de captage. Les 3 classes sont les suivantes :

- **forte** : pressions pouvant générer des pollutions chroniques ou diffuses susceptibles de conduire à une dégradation importante de la qualité des eaux, intraitable ou difficilement et réduisant ou empêchant à court ou à long terme son utilisation pour l'alimentation en eau potable.
- **moyenne** : pressions pouvant générer des pollutions chroniques ou diffuses nécessitant une surenchère des moyens de traitement à court ou à long terme pour la potabilisation
- **faible** : pressions pouvant à l'occasion - mais rarement - générer des pollutions chroniques ou diffuses ne nécessitant pas de surenchère de traitement particulier pour la potabilisation de l'eau. Il est important de noter qu'une pression faible n'est pas l'équivalent d'une pression nulle et que dans de nombreux, des activités qu'elles soient recensées ou clandestines et dont la nature n'est pas toujours maîtrisée peuvent avoir un impact sur la ressource captée.

⁷ FNU (Formazine Néphélométric Unit), ou NFU utilisé dans le décret n°2001-1220 du 20 décembre 2001

1) Pressions urbaines : déchets / assainissement et eaux usées

A Mayotte, l'inventaire des pressions urbaines comprenant les problématiques de déchets et des eaux usées est établi sur la base des informations suivantes :

- la cartographie des zones urbaines à enjeux définies par le Plan Local d'Urbanisme (PLU, source DE novembre 2007) ;
- la localisation et l'état général des systèmes d'assainissement collectifs et semi-collectifs de Mayotte (informations cartographiques DAF – mars 2008) ;
- la cartographie des zones urbaines hors zone à enjeux, c.à.d. les habitats dispersés relevés par photo aériennes ;
- le cadastre (informations cartographiques février 2008) ;
- des observations de terrain.

Comme signalé dans le § 3.4.1, les pressions générées par les zones urbaines sur la ressource sont majoritairement dues au manque d'assainissement et au rejet des eaux pluviales qui concentrent une part des eaux usées et des déchets domestiques. Ces pressions – dès lors qu'elles seront exercées sur le bassin d'alimentation de captage - seront dans l'ensemble considérées comme moyennes car la perturbation induite sur la qualité de la ressource en eau potable est globalement bien traitée lors du processus de potabilisation. Par conséquent, les zones urbaines à enjeux seront cartographiées en pression moyenne et les zones urbaines hors enjeux (les habitats dispersés) en pression faible. En revanche, les systèmes d'assainissement collectif en dysfonctionnement grave (au nombre de 30 environ) seront signalés en pression forte car ils concentrent des effluents dont le traitement n'est pas effectif et qui sont restitués au milieu dans des concentrations élevées. Les systèmes d'assainissement en mauvais état de fonctionnement ou dit de fonctionnement moyen seront classés en pression moyenne.

Ce paragraphe ne concerne pas les décharges qui sont traitées dans les paragraphes 3 (décharges sauvages) et 4 (décharges et dépôts divers).

2) Pressions agricoles : engrais et produits phytosanitaires

A Mayotte, l'inventaire des pressions de type « pratiques, activités rurales et agricoles » est établi sur la base des informations suivantes :

La cartographie des parcelles cultivées de taille significative sera établie sur la base du plan d'occupation des sols ainsi que des observations relevées sur le terrain. Sont distinguées les monocultures de bananes, les cultures d'ylang-ylang, les cultures maraîchères et les polycultures vivrières (maniocs, maïs, canne à sucre). Compte tenu de la faible utilisation d'insecticides, fongicides et engrais au niveau des monocultures de bananes et d'ylang-ylang, ces parcelles agricoles seront identifiées comme à pression faible. A contrario, les parcelles utilisées pour les cultures maraîchères et les polycultures vivrières seront considérées comme à pression moyenne car plus consommatrices d'engrais et de produits phytosanitaires.

Les zones de forêts, non soumises à la pression agricole, sont des zones de pression faible.

3) Pressions des pratiques rurales et domestiques : décharges sauvages / lessives et pêches

En l'absence de document cartographique ou de recensement, seules les observations de terrain permettent d'estimer et de localiser les pressions induites par les pratiques rurales et domestiques

Compte tenu : du nombre important de sites et de la récurrence des lessives (quotidienne sur beaucoup de cours d'eau) à proximité des zones habitées, du nombre, du volume et de la composition des décharges sauvages, ces pressions seront signalées comme fortes. En effet, la conjonction d'un faible débit hydrologique et d'une suractivité de lessives avec emploi d'une grande quantité de détergent peut avoir de graves répercussions sur la qualité de l'eau (pic d'AMPA, de chlore, d'EDTA, etc.) et entraîner la fermeture temporaire d'un captage de surface. De la même façon, le déversement ponctuel d'un produit polluant dans les nombreuses décharges sauvages aura les mêmes conséquences en termes de fonctionnement du captage.

En plus des observations de terrain, il est admis que tout accès facile à un cours d'eau (piste d'accès, radiers, ponts) que ce soit en milieu fortement ou faiblement urbanisé sous entend une pression chronique de type lessive ou lavage de véhicules et seront cartographiés de facto comme pression forte.

4) Sites industriels, sites et pratiques à risques (SISPR)

Les sites industriels et activités de service potentiellement polluants ont été répertoriés en 2004 (cf. rapport BRGM/RP-52906-FR) et figureront sur la carte des pressions. Il est important de relever que la densité des sites industriels et activités de service à Mayotte est relativement faible et que la nature et le volume des produits utilisés dans l'industrie restent limités. A cela, il faut rajouter que le développement industriel de l'île est en plein essor et qu'il n'existe pas de document précis, exhaustif et à jour de toutes les activités de l'île (à ce jour seule(s) 1 ou 2 entreprises ont souscrits à la déclaration ICPE : Installations classées pour la protection de l'environnement – source DRIRE Mayotte).

Activité	Groupe SEI	Nombre de sites	Pourcentage (%)
Industries extractives	3	16	18,0
Travail du bois	3	12	13,5
Dépôt de liquides inflammables	1	13	14,6
Garages automobiles	2	8	9,0
Stations services	1	6	6,7
Fabrication de briques (cuites et non cuites,)	3	5	5,6
Décharges et dépôts divers	1	6	6,7
Sucreries	3	4	4,5
Fabrication d'ouvrages en béton	3	3	3,4
Fabrication ou stockage de peintures, vernis ou solvants	1	3	3,4
Fabrication de ciment (Mayotte ne fabrique pas de ciment mais a une unité d'ensachage)	3	3	3,4
Centrale électrique thermique	1	1	1,1
Stockage de produits chimiques (explosif)	1	1	1,1
Décharge de déchet industriel banal (préfabriqué)	1	1	1,1
Transports maritimes et côtiers	2	1	1,1
Transports aériens	1	1	1,1
Fabrication de savons, détergents et produits d'entretien	1	1	1,1
Fabrication, transformation et dépôt de matières plastiques	1	1	1,1
Transports urbains et routiers	2	1	1,1
Distribution de combustible gazeux	1	1	1,1
Elevage	3	1	1,1
TOTAL	I	89	100

Tableau 8 : Sites industriels et activités de service du département de Mayotte regroupés par type d'activité (issu du rapport BRGM/RP-52906-FR)

Le degré de nuisance et par conséquent la classe de pression de telle ou telle industrie sera évaluée sur la base de cet indice SEI.

Indice SEI	Nature
Groupe 1	- décharges ou dépôts ou installations de recyclage, de récupération et d'élimination de déchets industriels, - productions et/ou stockages (associés ou non à l'activité de production) des industries de la chimie, de la pétrochimie, de la carbochimie, de la pharmacie et la parapharmacie, des phytosanitaires, des pesticides, de l'extraction et du raffinage du pétrole, de la gazéification, la cokéfaction et la transformation de la houille, - dépôts d'hydrocarbures et stations services, - activités d'ennoblissement textile, de tanneries et de traitement du bois,
Groupe 2	- centrales thermiques (charbon, fuel), - industries mécaniques et ateliers d'entretien ou de maintenance,
Groupe 3	- autres activités industrielles

Tableau 9 : activités industrielles de Mayotte classées par groupe SEI (Service de l'Environnement Industriel du ministère chargé de l'environnement)

Le degré de nuisance étant plus élevé pour les industries du groupe 1, la classe de pression équivalente sera forte. Pour les industries des groupes 2 et 3 la classe de pression équivalente sera moyenne.

5) Pressions routières (PR)

Compte tenu du trafic routier à Mayotte et de son évolution à l'échelle de l'île (forte concentration sur l'axe Longoni / Kawéni / Tzoundzou), le réseau routier majeur (c.à.d. le couple RN et CCD) sera considéré. Il est toutefois important d'observer que la majeure partie des axes routiers se développent le long du pourtour de l'île, à faible altitude, c.à.d. majoritairement en aval des bassins d'alimentation considérés. Seuls quelques axes traversent l'île de part en part.

Les informations retenues dans la cartographie des axes routiers sont celles de la DE, mises à jour en 2008. La classe de pression retenue pour l'ensemble des axes routiers est la classe 2 (pression moyenne), compte tenu de l'occurrence de ces phénomènes de pollution et du volume que cela représente, tous deux modérés. Techniquement, il sera considéré une emprise de 25 m de chaque côté de l'axe central du tracé routier, soit une emprise totale de 50 m.

6) Risques naturels (RN)

Les informations issues de la cartographie des aléas naturels (BRGM) seront utilisées dans l'évaluation des risques - notamment glissement de terrain, inondation et chute de blocs - encourus par le ou les captage(s). Ces informations faisant déjà l'objet d'une couverture topographique, elles ne seront pas figurées dans la cartographie des pressions mais utilisées pour avis de risques à l'échelle du bassin d'alimentation ou à proximité des installations de captages.

3.4.3. Récapitulatif méthodologique relatif à la cartographie des pressions

3 classes de pression (faible, moyenne et forte) sont retenues avec les indices suivants.

Indice	Classe de pression
1	Faible
2	Moyenne
3	Forte

Tableau 10 : Classes et indices de pressions. Comme indiqué plus haut, une pression faible diffère d'une pression nulle

Techniquement, les pressions sont toutes assimilées à des surfaces. Idem pour les industries ou les objets qui représentent une pression ponctuelle (assainissements collectifs, décharges, etc.) ; ils sont assimilés à une surface concentrique d'un diamètre arbitraire de 100 m pour des facilités de représentation (considérés comme zone sous influence directe de la pression). En ce qui concerne les objets linéaires comme les axes routiers, ils sont assimilés à une bande de largeur 50 m pour les mêmes facilités de représentation. L'éventail des pressions représentées sur les bassins d'alimentation de captage sont synthétisées dans le Tableau 11.

La carte des pressions regroupe l'ensemble des différentes pressions du bassin d'alimentation de captage sur un document unique. En cas de surimposition de pressions, la logique admet que la pression de degré supérieur l'emporte.

Par ailleurs, compte tenu de la densité de population relativement élevée de l'île et de la distribution diffuse des activités sur le territoire (cultures éparses, aménagements et défrichements sauvages, élevages vagabonds, habitations clandestines), les zones identifiées comme n'abritant pas de pressions particulières sont étiquetées par défaut comme zones de pression faible. Il n'existe pas de classes dites « sans pression » sur le territoire.

Pressions identifiées	Type	Informations de base	Degré
Pressions urbaines (PU)	Déchets Assainissement Eaux usées	Zones urbaines (PLU, source DE). Photographies aériennes BD Topo (source IGN) Assainissement collectifs et semi-collectifs de Mayotte (DAF 2008) Observations de terrain	Pression forte : systèmes d'assainissement collectif en mauvais état de fonctionnement ou en dysfonctionnement grave Pression moyenne : zones urbaines car manque d'assainissement et mauvaise gestion des eaux usées + déchets Pression faible : zones extra urbaines (habitats dispersés)
Pratiques rurales et domestiques (PRD)	Décharges sauvages Lessives Pêches	Rapport BRGM/RP-52906-FR Observations de terrain	Pression forte : sites de lessives (radiers) et de décharges sauvages
Sites industriels, sites et pratiques à risques (SISPR)	Industries Activités de service	Rapport BRGM/RP-52906-FR Observations de terrain	Pression forte : industries et activités de services de groupe SEI 1 Pression moyenne : industries et activités de services de groupes SEI 2 et 3
Pressions agricoles (PA)	Engrais Produits phytosanitaires	Plan d'occupation des sols (DAF, actualisation 2002) Observations de terrain	Pression moyenne : cultures maraichères et polycultures vivrières Pression faible : monocultures de bananes et d'ylang-ylang, zones de forêts dégradés, denses ou en réserve forestière,
Pressions routières	Hydrocarbures diffus ou accidentels	Infrastructures routières, RN et CCD (DE, actualisation fév.	Pression moyenne : axes routiers et emprises de 25 m de chaque côté de l'axe

(PR)	Déchets automobiles ou ménagers	2008)	central.
Risques naturels (RN)	Glissement de terrain Inondation Chute de blocs	Atlas des aléas naturels de Mayotte (rapports BRGM)	Pour avis

Tableau 11 : Recapitulatif de cartographie des pressions : nature, supports d'informations et degré

Ainsi, la carte des pressions disponible à l'heure actuelle et non complétée des informations de terrain relatives à chaque BAC – à l'exception des bassins versants de l'Ourovéni, Gouloué, Bouyouni et Méresse où l'information relative aux pressions a été précisée est proposée ci-dessous. Il s'agit donc d'une carte évolutive.

Néanmoins, bien que non exhaustive, cette carte reflète un ordre d'idée de l'importance et de la distribution des pressions sur l'île.

L'examen de la carte montre que les pressions dites faibles sont majoritaires et couvrent près de 80 % du territoire. Les pressions dites moyennes occupent près de 20 % du territoire et se répartissent principalement autour des zones urbaines, dans les fonds de vallées et en zones littorales, le cœur de l'île étant plutôt couvert de pressions faibles.

En revanche les pressions fortes semblent minoritaires – en termes d'occupations – les taches sont plus petites et sont distribuées de façon plus aléatoire.

Compte tenu des propos avancés plus haut, cette cartographie n'est actuellement pas aussi avancée sur tous les secteurs de l'île. Il est donc nécessaire de garder une certaine réserve quant aux détails des résultats, notamment à l'échelle des bassins versants ou des bassins d'alimentation.

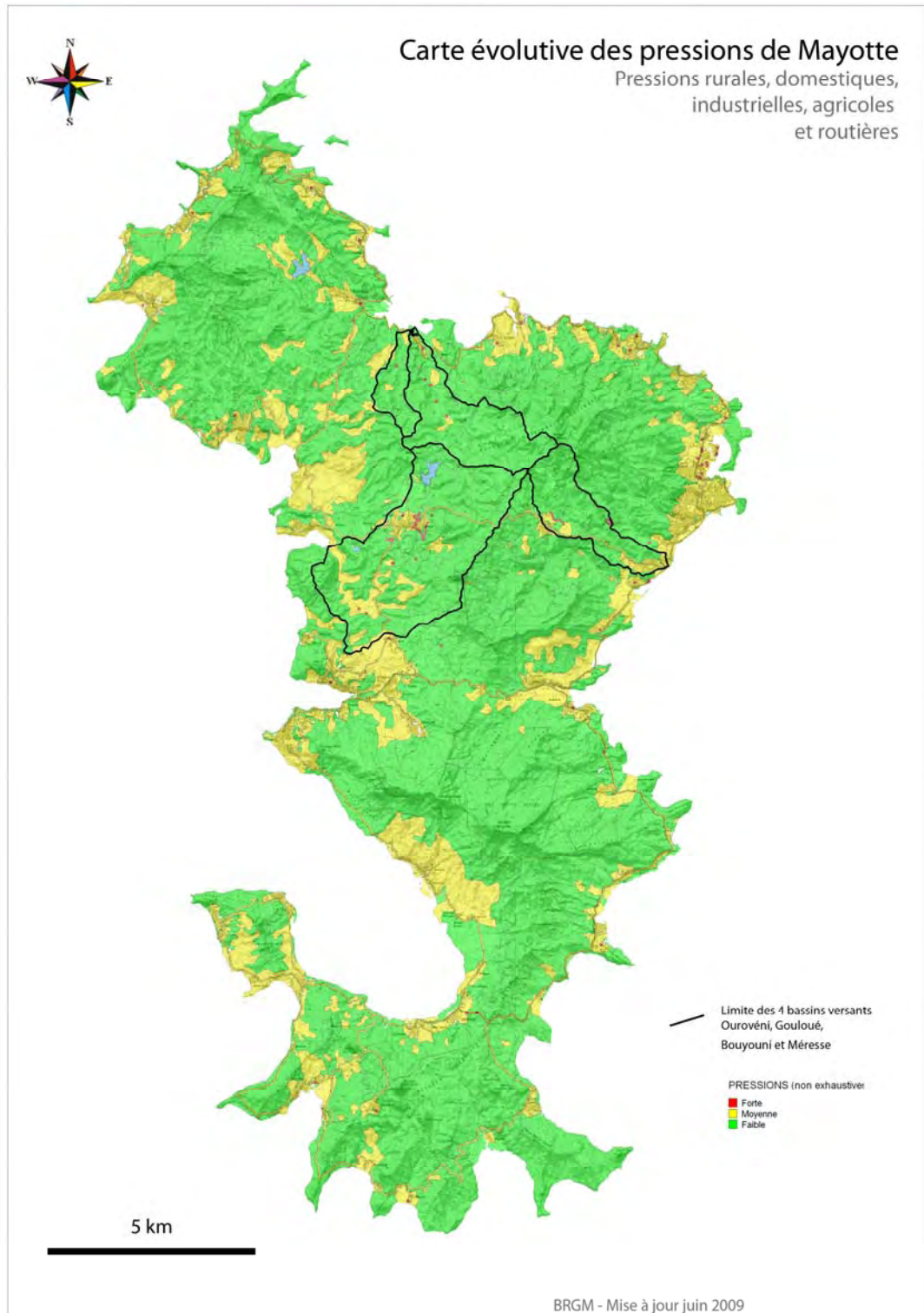


Illustration 34 : Carte évolutive des pressions sur l'île de Mayotte. En surimposition apparaissent les contours des bassins versants du Mro Oua Gouloué, Orouvéni, Bouyouni et Mérése.

3.5. SYNTHÈSE VULNÉRABILITÉ / PRESSIONS DES BASSINS D'ALIMENTATION DE CAPTAGE

Les risques de dégradation encourus par les eaux souterraines ou de surface résultent du croisement d'un ou plusieurs aléas et d'un ou de plusieurs enjeux : $R(isque) = A(léa) \times E(njeux)$.

Les aléas sont entendus comme la conjonction de la vulnérabilité des secteurs et des pressions associées, les enjeux sont – quant à eux – identifiés comme étant la qualité de l'eau au niveau des captages d'eau potable.

Les cartes précédentes relatives à la vulnérabilité et aux pressions associées des bassins d'alimentation de captage peuvent être interprétées en termes de risques pour le captage étudié selon le schéma suivant.

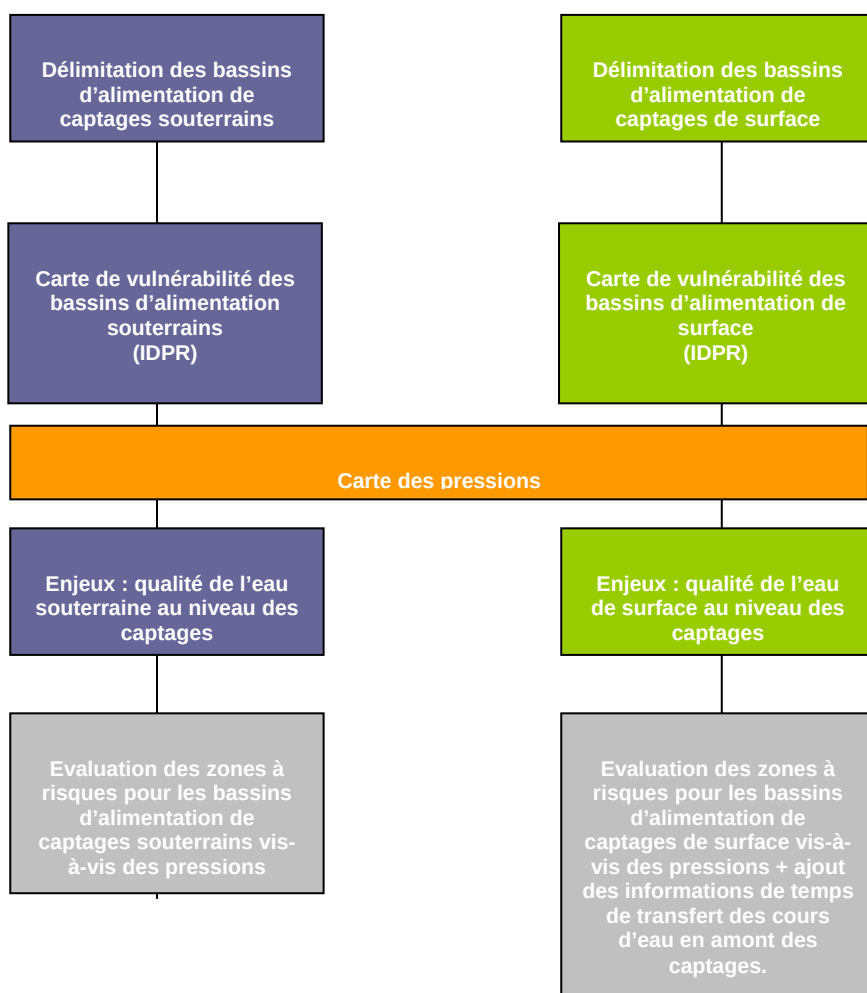


Tableau 12 : Schéma méthodologique de délimitation et de caractérisation de la vulnérabilité et des pressions associées aux bassins d'alimentation de captage.

Les cartes de croisement vulnérabilité/pressions relatives aux bassins d'alimentation souterrains et de surface sont présentées ci-après. Les cartes de vulnérabilité et de pressions étant évolutives, ces cartes de croisement le sont aussi par conséquent.

Dans les études de bassins d'alimentation de captages à Mayotte, ces cartes et les informations qui la composent seront bien évidemment précisées si nécessaires et exploitées à l'échelle du bassin.

3.5.1. Carte de croisement vulnérabilité/pression des eaux souterraines de Mayotte (carte évolutive)

La carte réalisée se fonde sur la présence de nappes sur l'ensemble de l'île principale. Or, si les diverses campagnes de forage ont montré l'absence de nappes dans certains secteurs de l'île – venant donc contredire ce principe – il n'est pas encore possible – en l'état actuel des connaissances – de cartographier les secteurs dans lesquels il n'y a pas d'aquifères identifiés. L'accroissement des connaissances permettra sans doute prochainement de dresser un premier constat en la matière.

En conséquence, cette première approche d'un croisement entre la vulnérabilité des aquifères et les pressions recensées ne peut pas être interprétée de manière univoque à l'échelle de l'île.

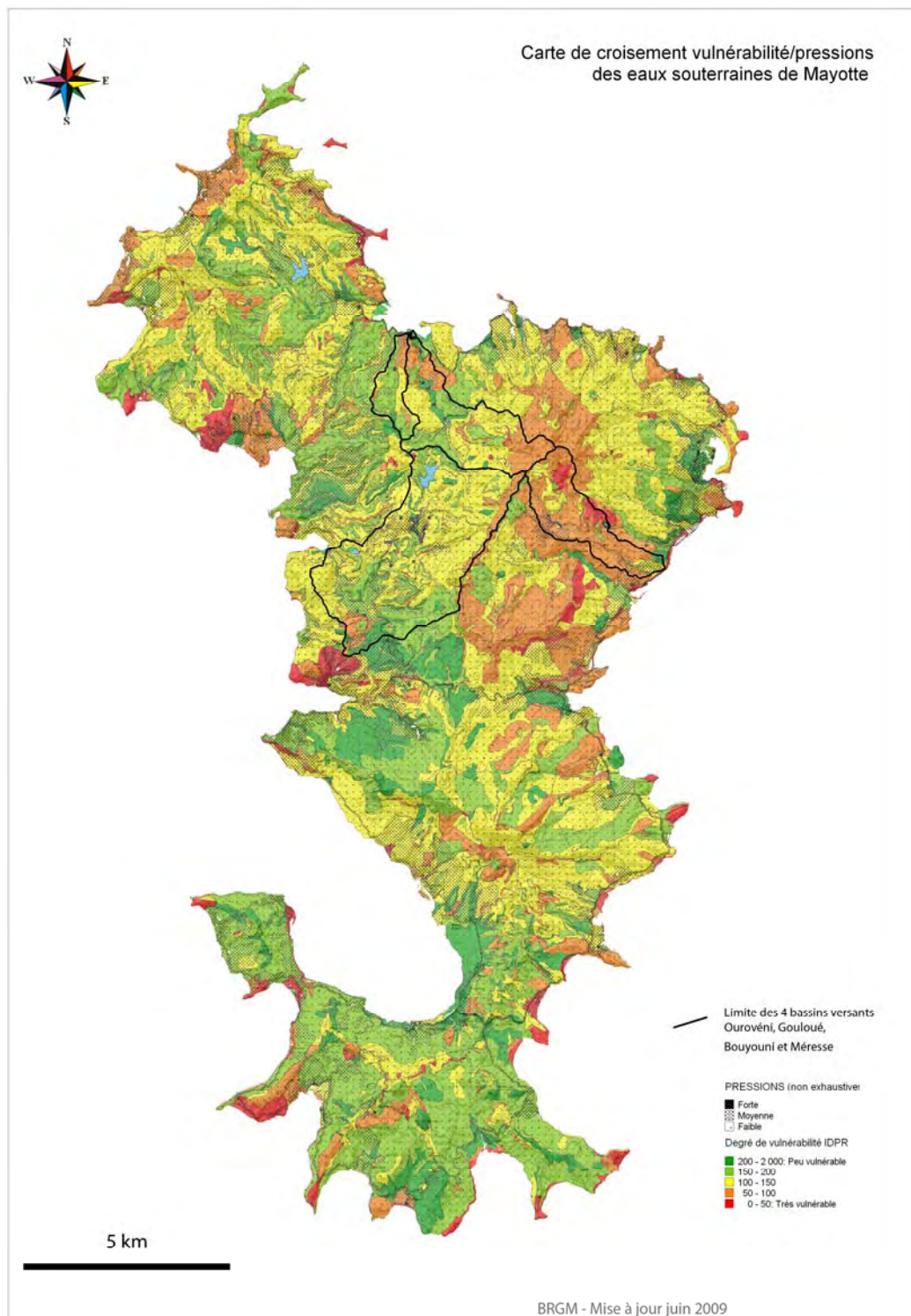


Illustration 35 : Carte de croisement des informations vulnérabilité / pressions des eaux souterraines de Mayotte. Apparaissent aussi – en surimposition - les contours des bassins versants de l'Orouvéri, Gouloué, Bouyouni et Méresse.

3.5.2. Carte de croisement vulnérabilité/pression des eaux de surface de Mayotte (carte évolutive)

En ce qui concerne les eaux de surface, la carte de croisement – précisée des informations de pressions et de vulnérabilité du bassin d'alimentation considéré – pourra être interprétée au cas par cas en termes de risques vis-à-vis de la ressource.

Par ailleurs, cette carte – ou du moins les extraits focalisés sur les bassins versants et/ou d'alimentation considérés – sera complétée des informations de vitesse de transfert du cours d'eau comme indiqué au §. 3.3. La surimposition de ces informations sur la carte de croisement permettra d'apprécier plus précisément le degré d'exposition du captage considéré et surtout – dans les études à venir – de décider des mesures de protection à mettre en place vis-à-vis de ces captages.

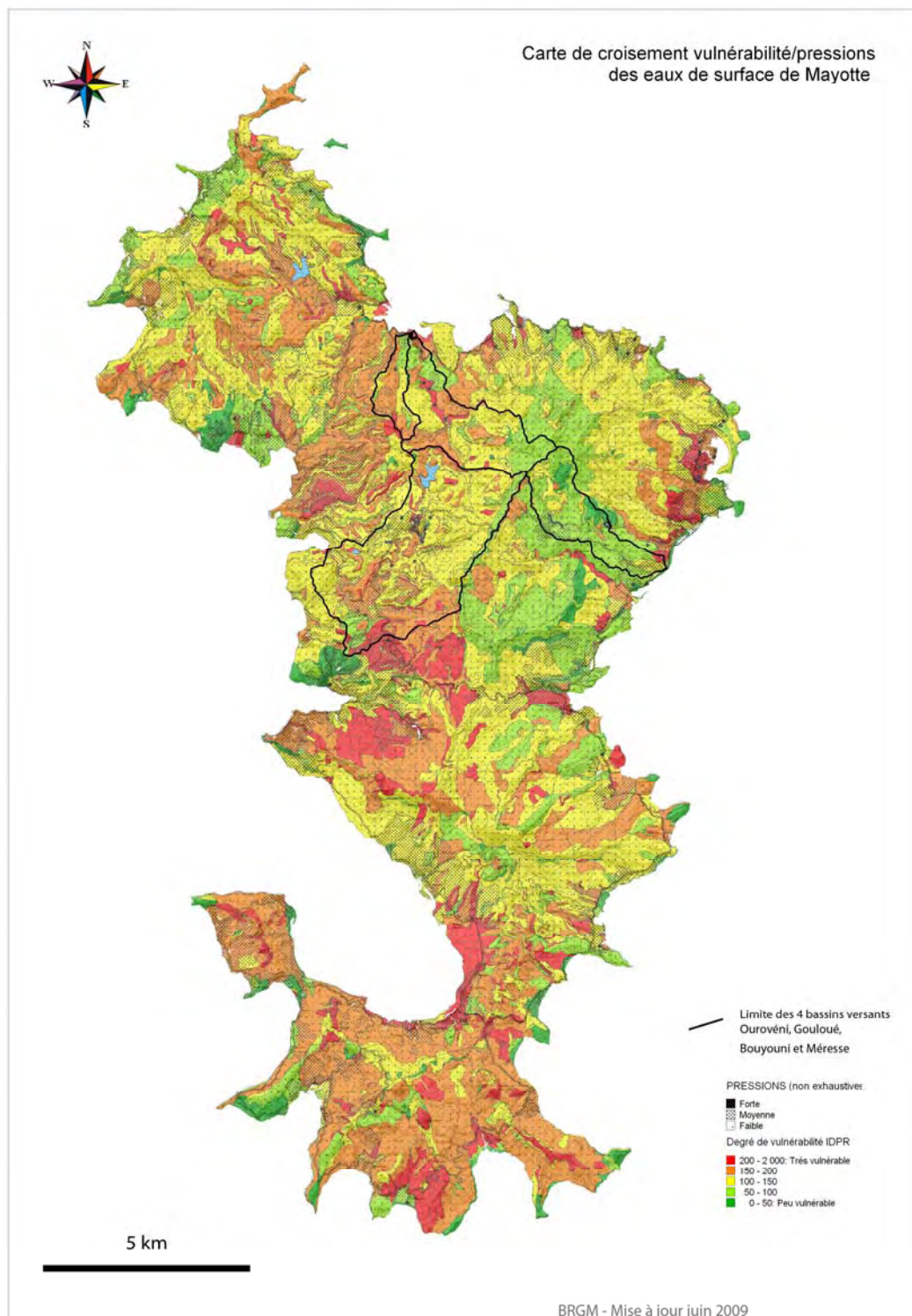


Illustration 36 : Carte de croisement des informations vulnérabilité / pressions des eaux de surface de Mayotte. Apparaissent aussi – en surimposition - les contours des bassins versants de l'Orouvéni, Gouloué, Bouyouuni et Méresse.

4. Conclusion

Les années 2008-2009 voient la réalisation des études de 14 bassins d'alimentation de captage à Mayotte (dont l'usine de dessalement qui est traitée à part) au travers de 3 conventions d'étude de service public :

- La convention R&D partagés DAF/BRGM du 18 août 2008 ;
- La convention R&D partagés SIEAM/BRGM du 24 avril 2009 ;
- La convention ONEMA/BRGM du 9 juin 2009.

Compte tenu (i) de la particularité du contexte environnementale, (ii) de l'état des connaissances géologiques et hydrogéologiques, (iii) de la diversité des captages étudiés (prise d'eau en rivière, en retenue, forages souterrains, etc.) et (iv) de la généralisation des études de bassin d'alimentation de captages sur l'ensemble du territoire mahorais, il a paru nécessaire de mettre au point une démarche méthodologique pertinente et commune à l'ensemble des bassins étudiés sur les années 2008/2009 dans un souci d'homogénéité de la démarche, de l'interprétation et des résultats. Cette démarche, inspirée des méthodologies en vigueur appliquées aux milieux fissurés discontinus se découpe selon 3 axes : délimitation de la superficie du bassin d'alimentation, caractérisation de la vulnérabilité intrinsèque des bassins - en considérant comme enjeu la qualité de l'eau au niveau des captages - et évaluation/hiérarchisation des pressions appliquées au bassin.

Avant toute délimitation, la nature des bassins versants, à savoir : les contextes topographiques, géologiques, pédologiques et hydromorphologiques, la nature des ouvrages d'eau, la qualité des eaux, fait l'objet d'une description complète, condition préalable à la discussion du ou des découpage(s) des BAC. La bonne compilation de ces informations (souvent absentes, insuffisantes et/ou de qualité discutable) permet en effet de disposer des bases et indices indispensables aux délimitations et caractérisations suivantes.

En ce qui concerne la **délimitation des BAC**, la méthode retenue dans le cas des captages de surface repose sur la prise en compte du bassin topographique de surface en amont du captage plus la participation des bassins versants souterrains lorsque ceux-ci sont identifiés, délimités et contribuent aux écoulements de surface. Dans le cas des captages souterrains, compte tenu des mécanismes de recharge des aquifères majoritairement opérés par infiltration des cours d'eau, la délimitation comprend le bassin versant de surface en amont du captage plus la participation des bassins versants souterrains lorsque ceux sont identifiés et délimités. La surface ainsi délimitée est comparée à une surface théorique obtenue à partir d'une évaluation de la recharge saisonnière de l'aquifère. En cas de dissonance importante entre les deux surfaces, une modulation particulière est opérée sur la base de critères topographiques, géologiques et/ou hydrogéologiques.

L'estimation de la **vulnérabilité** des captages souterrains est basée sur la combinaison de l'indice IDPR et de la rugosité qui caractérisent – pour le 1^{er} – la capacité des terrains à infiltrer ou à ruisseler les eaux de pluie, et - pour la seconde – le degré de maturité ou profil d'équilibre du réseau hydrographique. Le zonage réalisé par unités fonctionnelles basées sur la lithologie et la pédologie met en évidence (i) le contrôle des infiltrations par les unités géologiques et pédologiques qui conditionnent ainsi une partie de la vulnérabilité des aquifères et par contre empreinte (ii) le zonage du ruissellement qui conditionne la vulnérabilité des captages de surface.

En règle générale, l'observation des conditions météoclimatiques montrent que la vulnérabilité des aquifères est accrue durant la saison des pluies, lors des épisodes de recharge.

En ce qui concerne **l'étude des pressions** pouvant nuire à la qualité des ressources en eau, les travaux méthodologiques ont permis de recenser et de hiérarchiser les types de pressions courantes à l'échelle de l'île (nature des pressions et degré de dangerosité). Une première cartographie des pressions a pu être réalisée et présentée : elle sera complétée et affinée au fur et à mesure des études BAC.

Finalement, **le croisement des 3 informations**, à savoir : la délimitation des BAC, la caractérisation de la vulnérabilité et l'inventaire hiérarchisé des pressions permet d'apprécier – à l'échelle des bassins – le degré d'exposition des captages aux dégradations de surface. Cette opération, réalisée à la fois sur les bassins d'alimentation de captage souterrains et de surface, constituera un axe majeur de réflexion et de discussion quant à la pérennité de la ressource exploitée et des moyens de protection inhérents à l'exploitation.

La bonne réalisation des études BAC à Mayotte, concordantes et cohérentes sur la base des ces préceptes méthodologiques se poursuivra ensuite par les études hydrogéologiques spécifiques, préalables indispensables à l'instauration des périmètres de protection appropriés et des politiques réglementaires adéquates. Ce présent travail (les études BAC 2008/2009) peut donc être perçu comme une base précieuse appuyant les travaux futurs d'instauration des périmètres de protection

5. Glossaire

BAC : Bassin d'Alimentation de Captage

BE : Basses eaux hydrologiques

DAF : Direction de l'Agriculture et de la Forêt de Mayotte

DE : Direction de l'Equipement de Mayotte

ESOUT : Eaux souterraines

ESU : Eaux de surface

HE : Hautes eaux hydrologiques

IDPR : Indice de Persistance et de Développement des Réseaux

ONEMA : Office Nationale des Eaux et des Milieux Aquatiques. Etablissement public sous tutelle du MEEDDAT créé par la loi sur l'eau et les milieux aquatiques du 30 décembre 2006 et le décret du 25 mars 2007. La convention de partenariat entre l'ONEMA et le BRGM a été signée le 24 janvier 2008.

SEI : Service de l'Environnement Industriel du ministère chargé de l'environnement

SIEAM : Syndicat Intercommunal d'Eau et d'Assainissement de Mayotte

SOGEA : Exploitant du réseau de distribution par un contrat d'affermage en date du 6 Mars 1992 pour une durée de 15 ans (contrat en cours de renouvellement).

MISEEN : Mission Inter Service de l'Eau et de l'ENVironnement

6. Références Bibliographiques

Aquifères et Eaux souterraines en France – 2006, Chap. XIII

ASCONIT 2006. Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) de Mayotte. Etat des lieux et définition des problèmes principaux. 3 tomes, synthèse + atlas cartographique.

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

Carte de vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines de la région Aquitaine. Décembre 2006. BRGM/RP-55311-FR.

COST Action 620 (2003): Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karst) Aquifers, Final Report, F.Zwahlen Chairman, Editor in chief. European Commission, Directorate XII Science, Research and Development, Report EUR, 20912, Brussels, 297 pp

DAF de Mayotte (2002) – Plan d'occupation des sols. Actualisation

DAF de Mayotte (2009) - Analyses de pesticides. Campagne de prélèvement 2008. Eau des rivières.

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

Frissant N., De la Torre Y. et Mouron R. (2004) – Inventaire des sites industriels et activités de service de la Collectivité Départementale de Mayotte. Rapport BRGM/RP-52906-FR. 21 pages, 7 figures, 6 tableaux, 5 annexes dont 3 hors texte.

Foucault A., Raoult J.F. (2001) – Dictionnaire de géologie. 5^{ème} édition. DUNOD

F. Rey et al., C. R. Geoscience 336 (2004).

GIRAUD F. (1995) – Actualisation du guide d'établissement des périmètres de protection des captages A.E.P. : cas des captages d'eau de surface. Rapport BRGM R38853, 59 pages, 4 figures, 15 annexes.

Guilbert M., Aunay B., Lachassagne P., Malard A., Mathieu F. (2008) – Synthèse hydrogéologique du Nord-Est de Mayotte. Caractérisation des masses d'eau souterraine des secteurs de Petite-Terre et de Tsoundzou-Koungou. Rapport BRGM/RP-56600-FR, 79 p., 29 ill. et 8 ann.

Grésillon J.M. (1995) - Estimation des crues des petits bassins africains : réflexion sur l'utilisation de la télédétection - Actes de l'atelier international : Télédétection et ressources en eau

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

J. Carré (2005). Protection des prises d'eau de surface destinées à la production d'eau potable. TSM numéro 4 - 2005 - 100e année.

Jourdain T., Lachassagne P., Lebon D., Miehe J.M., Mouron R. (2002) – Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte. Campagne 2001-2002 – Synthèse des résultats des reconnaissances géologiques, hydrogéologiques, géophysiques et radon – Proposition d'implantation des sondages de reconnaissance - Rapport BRGM/RP-51498-FR, 115 p., 33 fig., 6 tab., 4 ann.

Jourdain T., Maurillon N., Mouron R. (2002) – Approche géologique et hydrogéologique des ensembles volcaniques de Grande-Terre (Ile de Mayotte). Rapport BRGM/RP-52193-FR, 80 p., 17 fig., 8 tab., 5 ann.

Latrille E. (1981) – Mayotte. Carte morphopédologique et des propositions d'affectation des terres. 1/50 000.

Lapègue J. – 1999 – Aspects quantitatifs et qualitatifs de la pluviométrie dans deux enjeux majeurs de la problématique de l'eau à Mayotte. Thèse de l'Université de la Réunion.

MALARD A., AUNAY B. (2009) - Etude du bassin d'alimentation de la prise d'eau en mer de l'usine de dessalement de Petite terre - Mayotte (délimitation, vulnérabilité, pressions). Rapport BRGM/RP-57112-FR, 60 p., 15 ill.

Malard A. avec la collaboration de B. Aunay, J.F. Vernoux et V. Mardhel (2009) - Etude des bassins d'alimentation de captage du bassin versant du Mro Oua Gouloué – Mayotte (délimitation, vulnérabilité, pressions) – BRGM/RP-57109-FR.

Malard A., avec la collaboration de Aunay B., Vernoux J.F. et Mardhel V. (2009) - Etude des bassins d'alimentation de captage du bassin versant du Mro Oua Méresse – Mayotte (délimitation, vulnérabilité, pressions) – BRGM/RP-57110-FR.

Malard A., Vaudour K., Winckel A. (2008) – Modalités d'exploitation et de protection de l'aquifère de Kawéni – Année 3 – BRGM/RP-56773-FR, 116 p., 33 ill., 7 ann.

Malard A., Winckel A. (2008) – Définition des réseaux de surveillance DCE de la qualité des eaux souterraines, de surface et côtières de Mayotte – BRGM/RP-56774-FR, 218 p., 48 ill., 9 ann.

OFEFP – Délimitation des zones de protection des eaux souterraines en milieu fissuré. Guide pratique. Version provisoire du 28 mars 2002.

Petit V., Eucher G. (2005) – Etude préalable à l'élaboration des périmètres de protection des forages de Kwalé (12307X0022 et 12307X0100) – Rapport BRGM/RP-53593-FR. 38 p., 9 ill., 3 ann.

Roux JC. (2006) - Aquifères et eaux souterraines en France. BRGM Editions

SAUNIER/TECHNA (1999). Protection des prises d'eau de surface. Quelles stratégies ? Guide méthodologique.

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

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

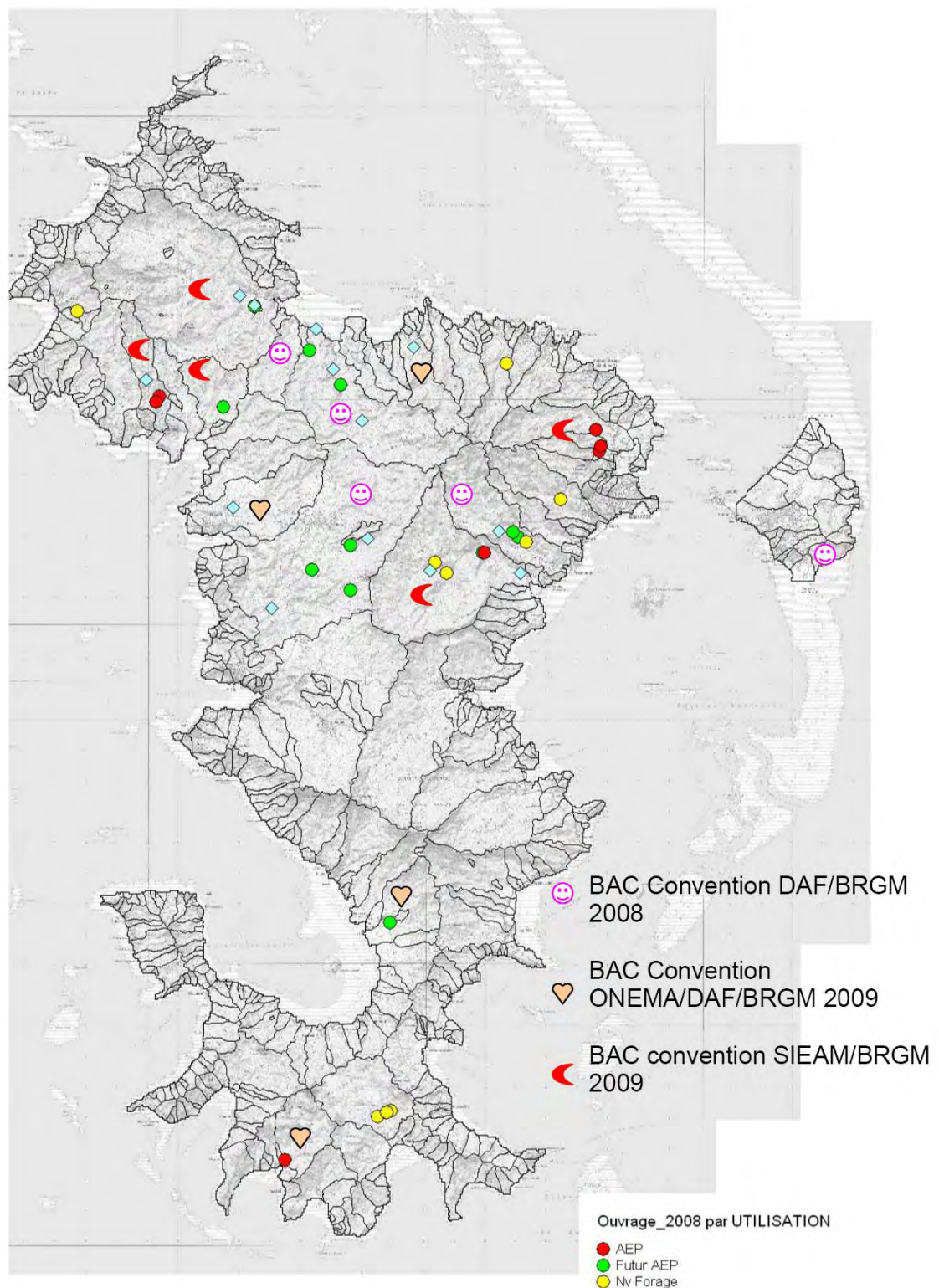
Terminologie de la pédologie FR-EN, recueilli par M.S.N. CARPENTER à partir du document INRA/CILF et autres sources (TERMIUM, Concise Oxford Dictionary of Earth Sciences...), fichier extrait le 25/04/97, ordre de classement standard de MTX

Vernoux J.F., Wuilleumier A., Seguin J.J, Dörfliger N. (2007) – Méthodologie de délimitation des bassins d'alimentation des captages et de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses. Rapport intermédiaire : synthèse bibliographique et analyse des études réalisées sur le bassin Seine-Normandie, rapport BRGM/RP-55332-FR, 128 pages, 125 illustrations, 8 annexes

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

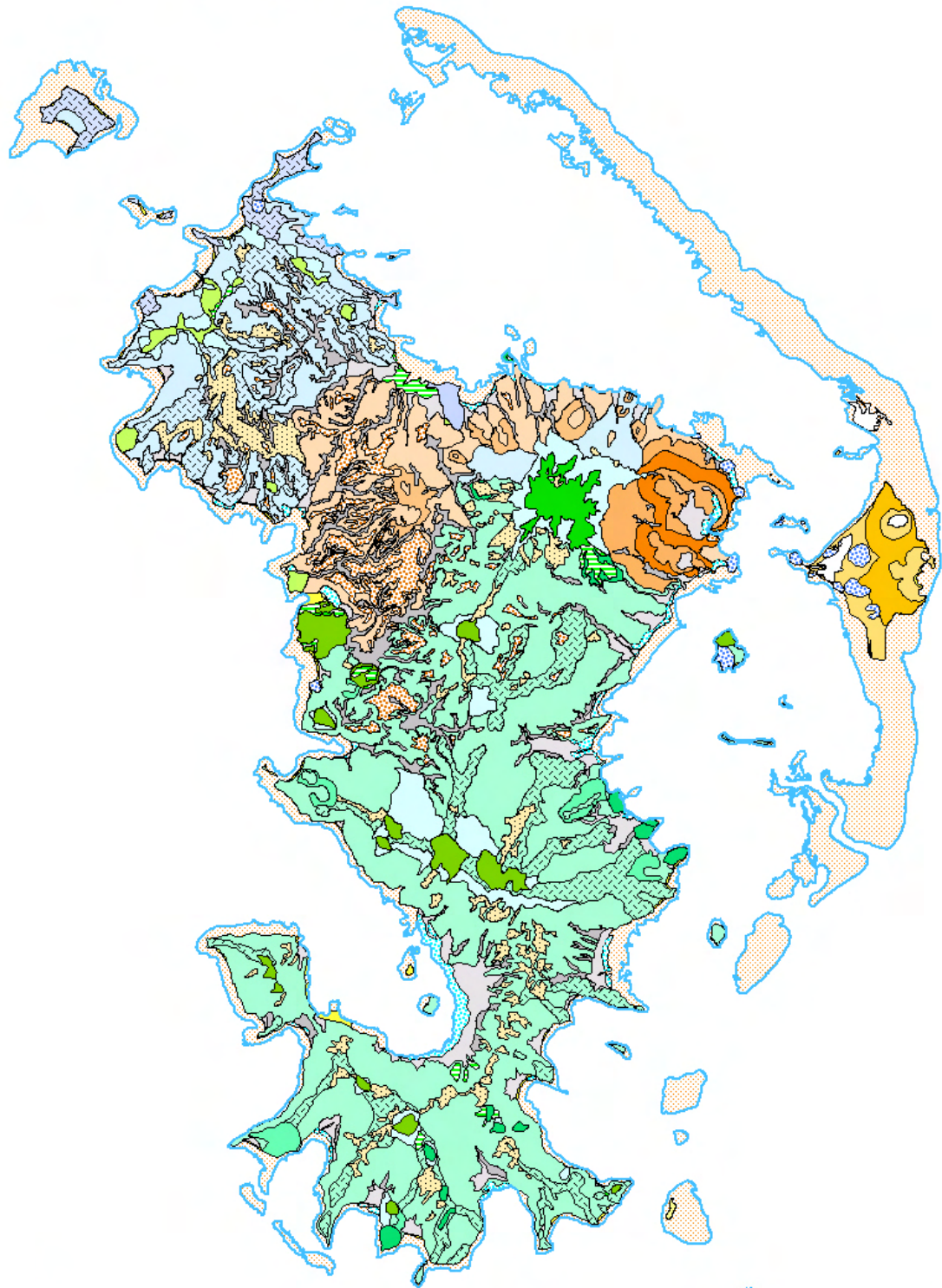
Annexe 1

Les bassins d'alimentation de captages à Mayotte (mise à jour 1^{er} semestre 2009)



Annexe 2

Carte géologique de Stieljes - 1988



Géologie

-  Altération fumerolienne
-  Altérites ferrallitiques pouvant atteindre plusieurs mètres d'épaisseur (bad-land)
-  Anneaux de pyroclastiques trachytiques (ash-ring) de Kawéni
-  Anneaux de pyroclastiques trachytiques (ash-ring) de Kawéni + appareil volc et p
-  Basaltes
-  Basaltes + appareil volc et projection
-  Basaltes ankaramitiques et basaltes à hornblende
-  Basaltes ankaramitiques(βfN)
-  Basaltes ankaramitiques(βfS)
-  Basanites essentiellement (βN), altérés
-  Basanites à olivine
-  Caye de sable corallien
-  Cinérites et ponces trachytiques de Pamandzi
-  Cinérites et ponces trachytiques de Pamandzi + appareil volc et projection
-  Colluvions de versants
-  Formations de rivières = alluvions et petites accumulations
-  Gordons littoraux
-  laves indifférenciées de fond vallée du M'Sapéré
-  laves indifférenciées de fond vallée du M'Sapéré + appareil volc et projection
-  Mangrove (limon sableux)
-  Phonolites
-  Phonolites alcalines : piton
-  Phonolites alcalines du sud de l'île: pitons dôme
-  Plaines alluviales ou littorales (alluvions fines)
-  Projections de cendres en couverture de plusieurs mètres d'épaisseur
-  Récif corallien
-  Sables
-  Scories basaltiques prépondérantes
-  Téphrites phonolitiques

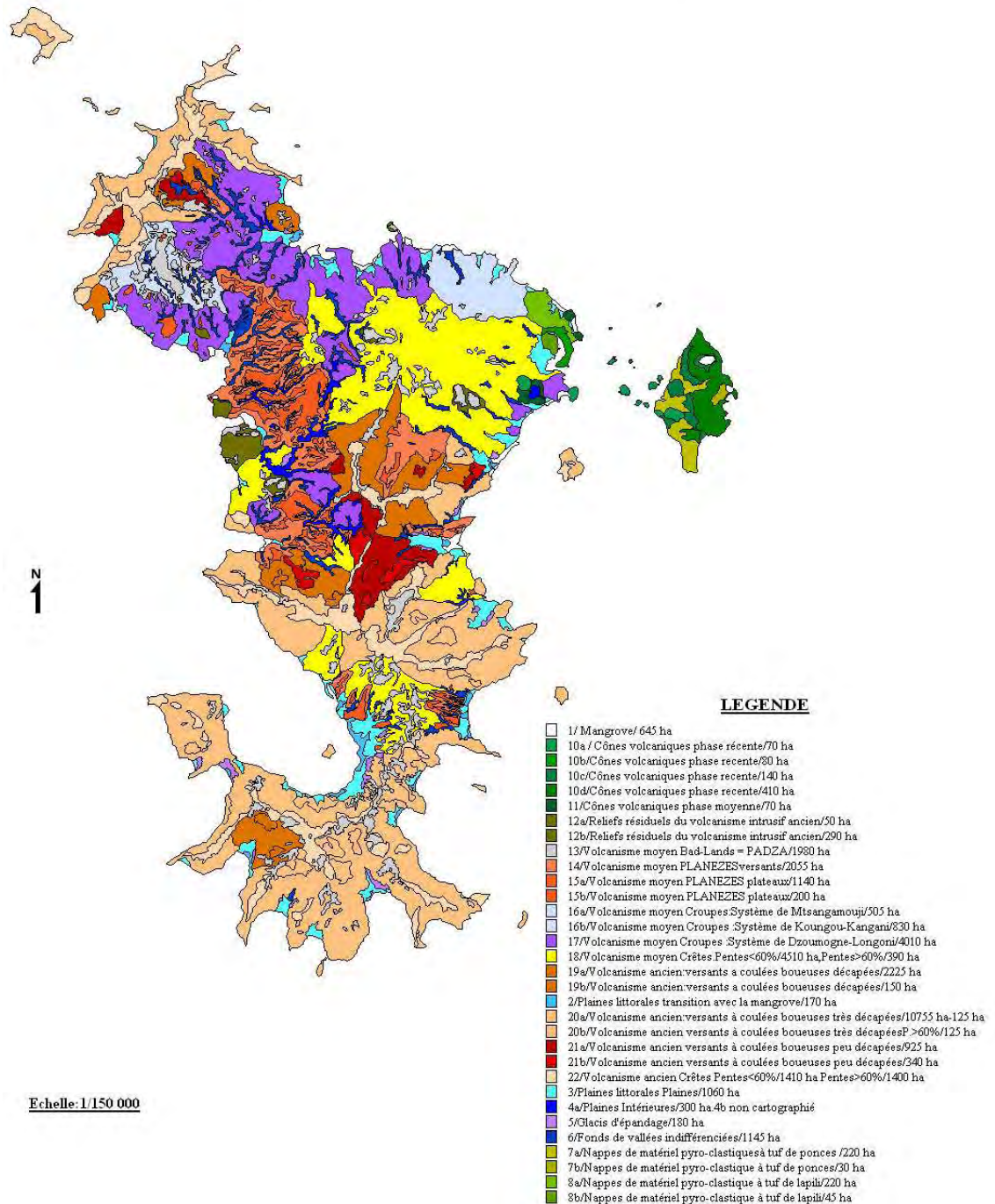
Annexe 3

Carte morphopédologique de Latrille – 1981

CARTE MORPHOPÉDOLOGIQUE DE MAYOTTE DRESSÉE

PAR E.LATRILLE (CIRAD)1981.

Digitalisée par la D.E Service SAUH/SIGO 1999.



Annexe 4

Cartes de vulnérabilité

Eaux souterraines

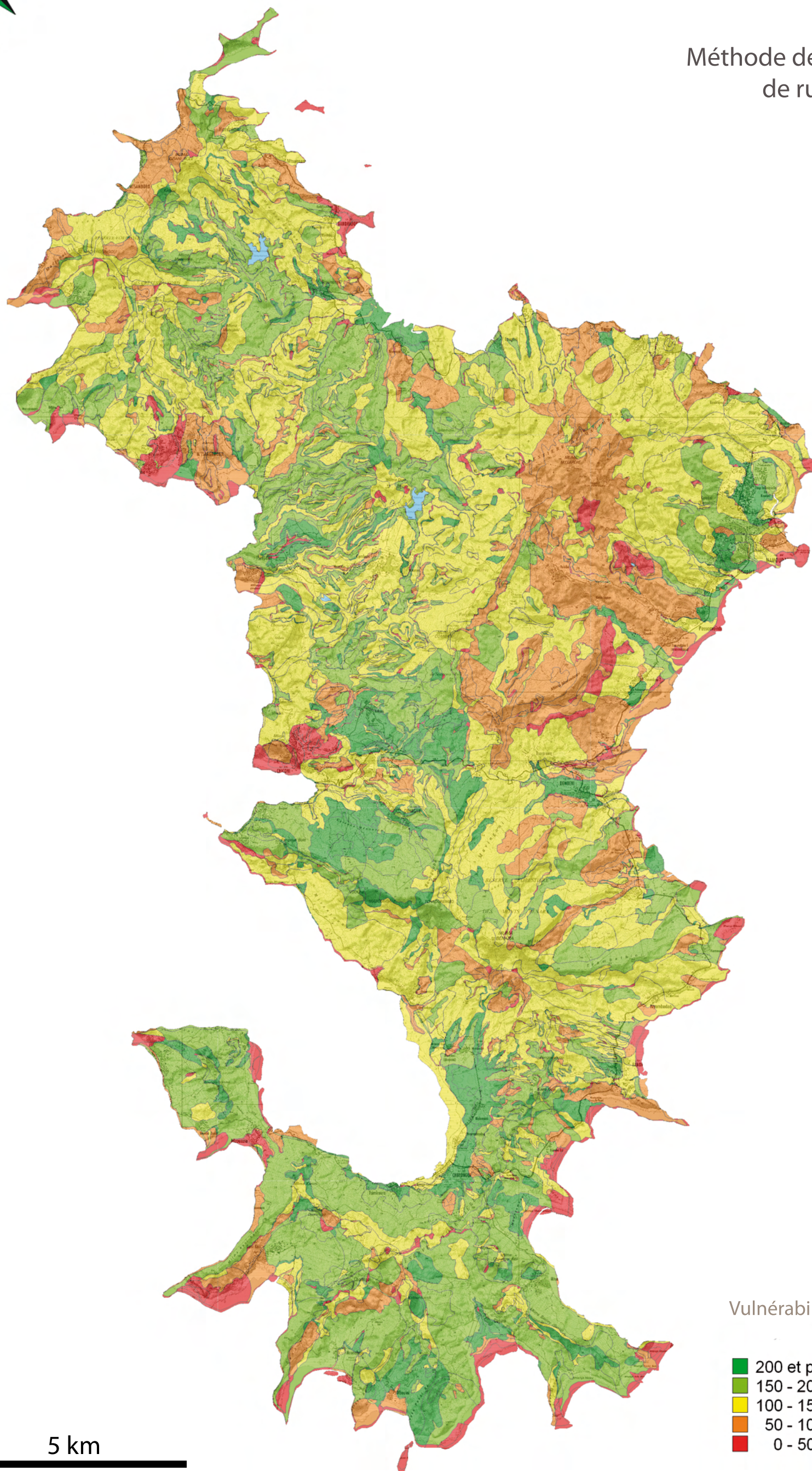
Eaux de surface



Approche de la vulnérabilité des eaux souterraines de Mayotte

Méthode de l'IDPR & Indice
de rugosité combiné

Juin 2009



Vulnérabilité des aquifères
par classes

- 200 et plus: Peu vulnérable
- 150 - 200
- 100 - 150
- 50 - 100
- 0 - 50: Très vulnérable

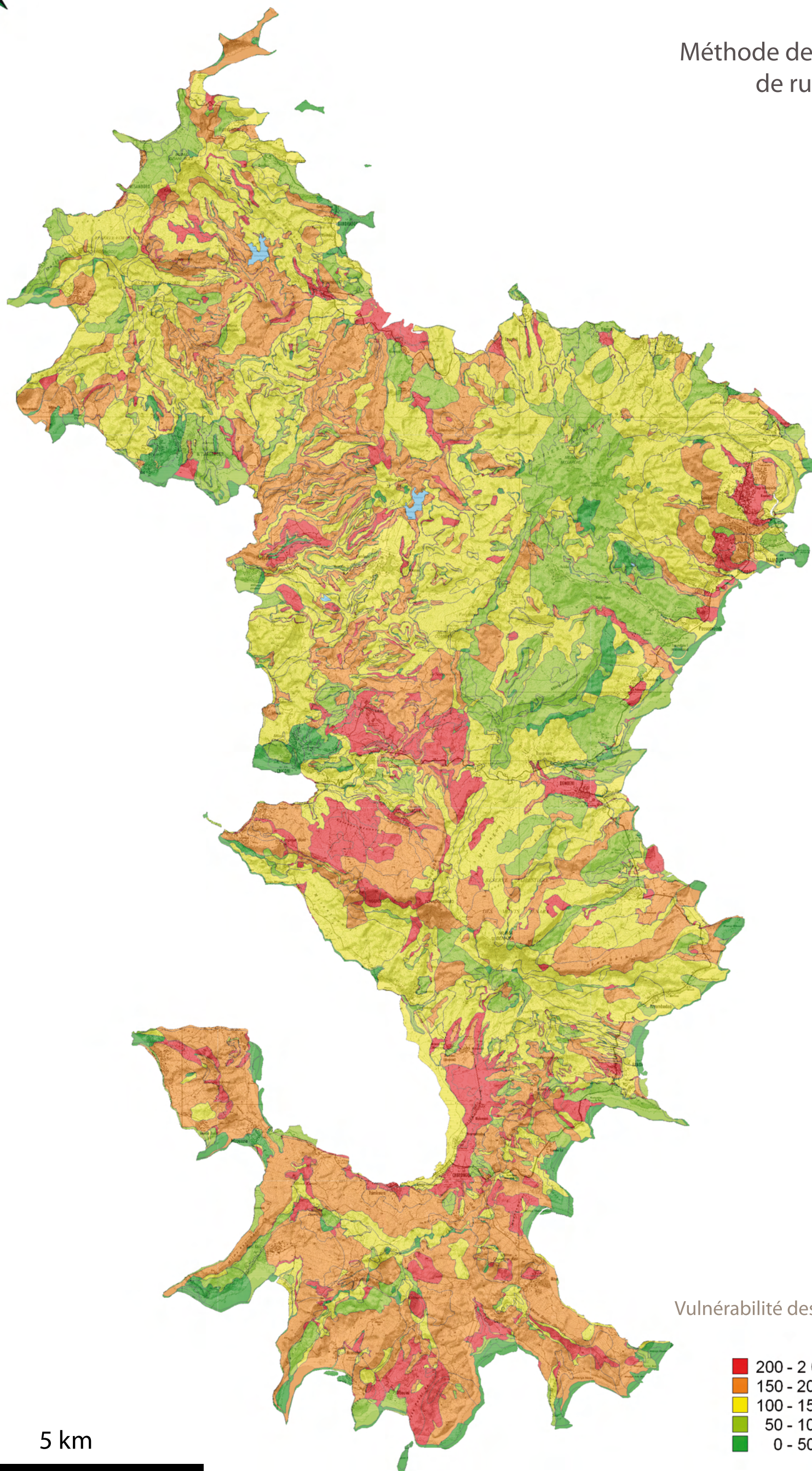
5 km



Approche de la vulnérabilité des eaux de surface de Mayotte

Méthode de l'IDPR & Indice
de rugosité combiné

Juin 2009



Vulnérabilité des eaux de surface
par classes

- 200 - 2 000: Très vulnérable
- 150 - 200
- 100 - 150
- 50 - 100
- 0 - 50: Peu vulnérable

5 km



Annexe 5

Principe du jaugeage chimique dit « au sel »

1 - Principe du jaugeage au sel

Le principe consiste à déterminer le débit d'un cours d'eau à partir de l'injection d'une masse de sel dans un cours d'eau et du suivi de l'évolution des conductivités du nuage de sel en aval du point d'injection.

2 - Domaine d'application de la technique du jaugeage au sel

Le domaine d'application de cette méthode est le suivant (source : Office fédéral des eaux et de la géologie, Bern) :

Paramètres	Valeurs
Profondeur du cours d'eau	< 1 m
Largeur de la surface de l'eau	de 0,3 à 5 m
Vitesse d'écoulement	de 0,6 à 4 m/s
Débits	< 3 m ³ /s

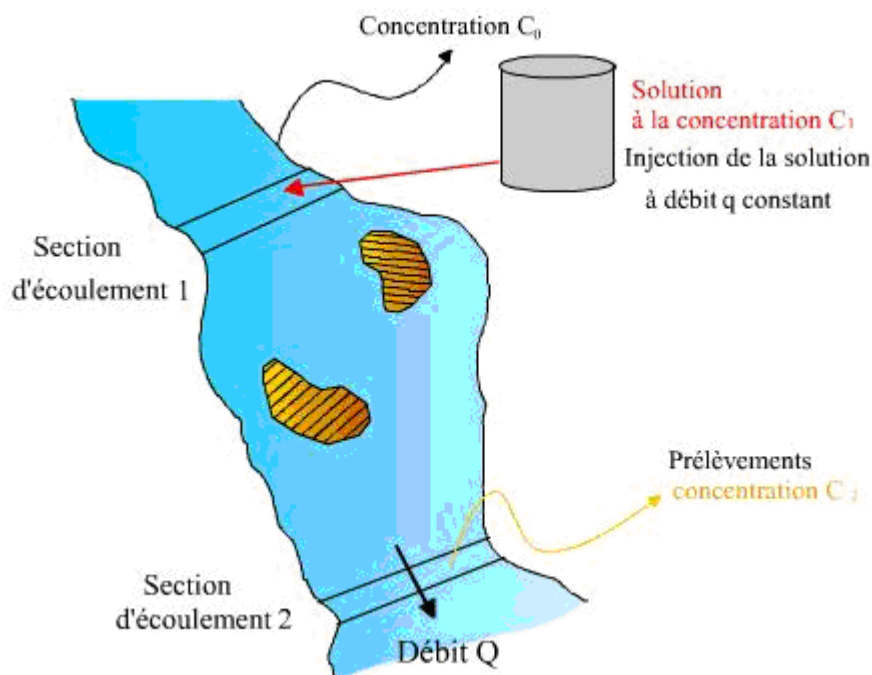
Cette méthode est adaptée aux petits cours d'eau aux écoulements turbulents, c'est le cas de la majorité des cours d'eau de Mayotte. Ces jaugeages supposent aussi un régime permanent de la rivière, une conservation de la masse du traceur et un bon mélange. La température des eaux superficielles de Mayotte étant de 25 °C c'est un avantage car elle favorise la dissolution des cristaux de sel.

3 – Mode opératoire

a) Choix du point de mesure

Le jaugeage doit être réalisé sur une section de la rivière présentant des écoulements turbulents et un régime permanent (Q constant). La figure ci-dessous illustre le mode opératoire à suivre (Source EPFL⁸).

⁸ Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

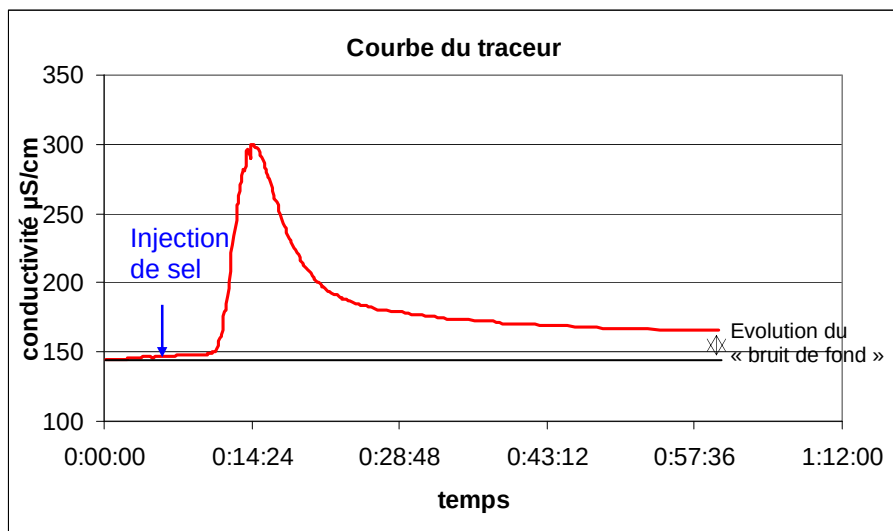


b) Evaluation du « bruit de fond » de l'environnement

La valeur de la conductivité de l'écoulement sur lequel on va effectuer le jaugeage chimique est mesurée en un point avant et après le jaugeage afin de déceler d'éventuelles variations du « bruit de fond » au cours du jaugeage.

c) Mesures des conductivités

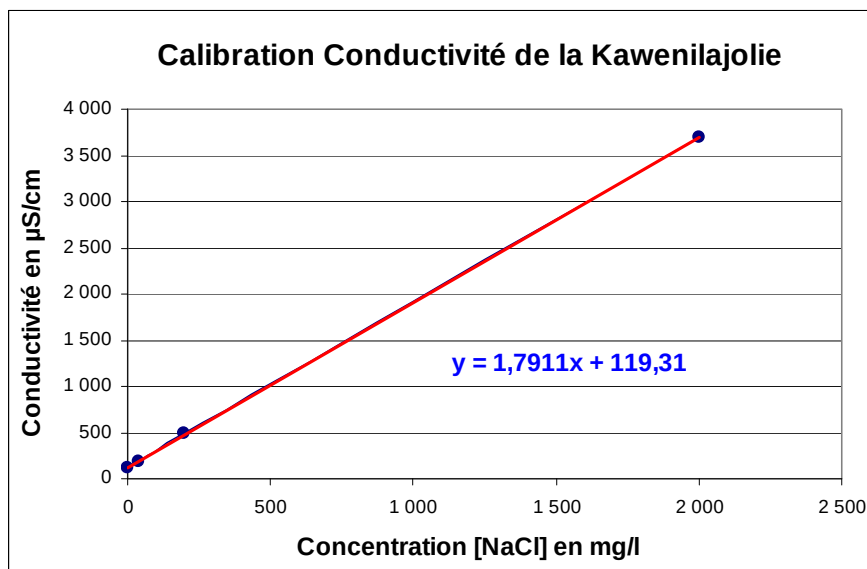
Une masse de sel est injectée en un point du cours d'eau. En aval de la zone de mélange, à une distance suffisamment grande pour que le mélange s'opère efficacement, un conductimètre mesure l'évolution temporelle de la conductivité au cours du passage du nuage de sel.



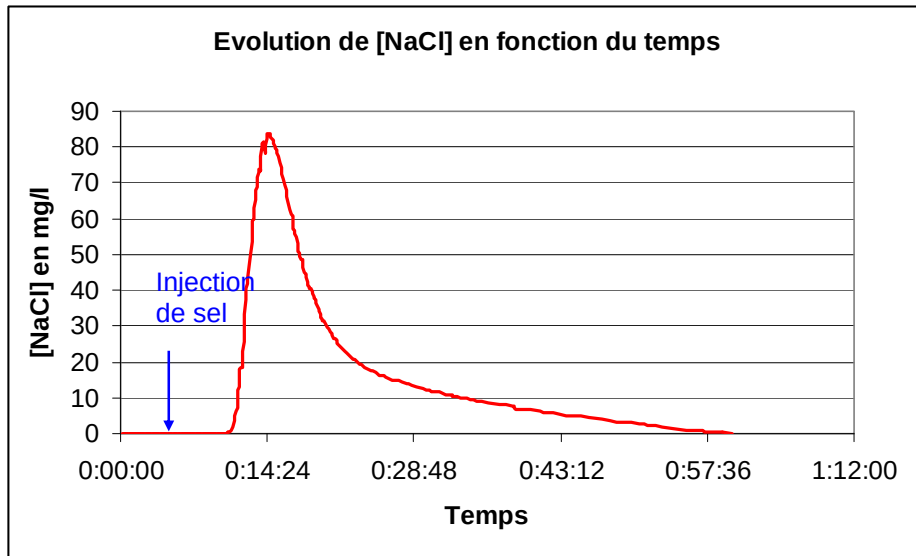
d) Courbe d'étalonnage

Une relation pseudo-linéaire existe entre la conductivité de l'eau et sa concentration en sel dissous. Un échantillon d'eau est prélevé avant chaque jaugeage afin de déterminer par dosage la conversion entre conductivité et masse de sel dissous. Une courbe de conversion est alors établie.

Dans l'exemple suivant (cas des jaugeages de la rivière de Kaouénilajoli) la régression donne le coefficient de conversion (1,79)



Il suffit alors de multiplier les conductivités mesurées (et corrigées) par ce coefficient pour obtenir la concentration en NaCl ($[\text{NaCl}]_t = k \cdot (\text{Cond}_t - \text{Cond}_{\text{bruit de fond}})$). On peut ainsi tracer la courbe de restitution du jaugeage :



e) Calcul du débit

Le débit est alors obtenu en divisant la masse de sel injectée par l'intégration des concentrations au cours du temps en considérant par défaut une restitution intégrale. L'estimation de la restitution réelle de sel permet le calcul de l'incertitude sur la valeur des débits.

L'intégration a été réalisée selon la méthode de la moyennes des $Y = \Sigma \left(\frac{1}{2} \right) * (f(x)1 + f(x)2) * (x2 - x1)$.

Annexe 6

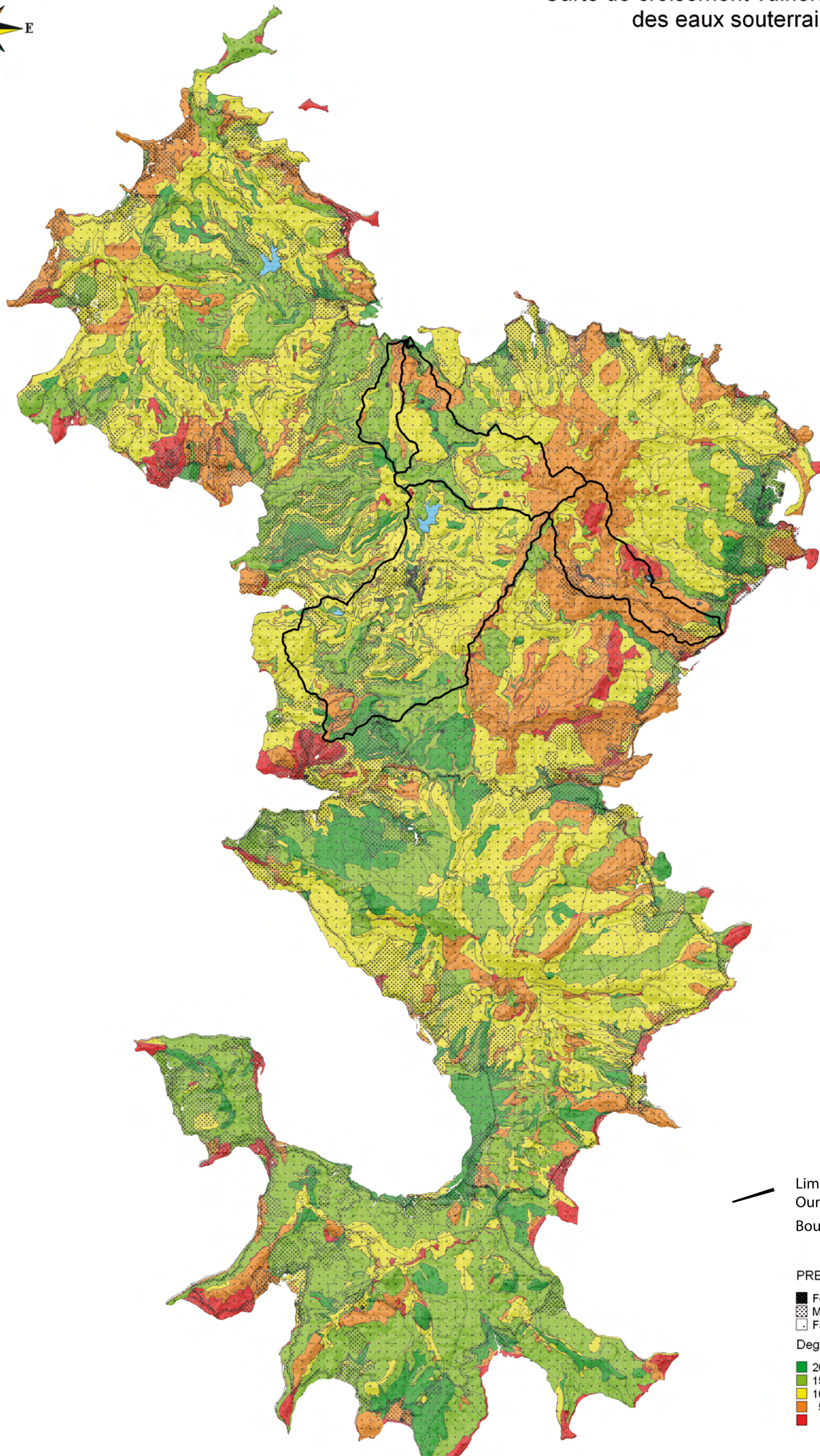
Cartes de croisement vulnérabilité / pressions

Eaux souterraines

Eaux de surface



Carte de croisement vulnérabilité/pressions des eaux souterraines de Mayotte



— Limite des 4 bassins versants
Orouvéni, Gouloué,
Bouyouni et Mérése

PRESSIONS (non exhaustives)

- Forte
- ▨ Moyenne
- Faible

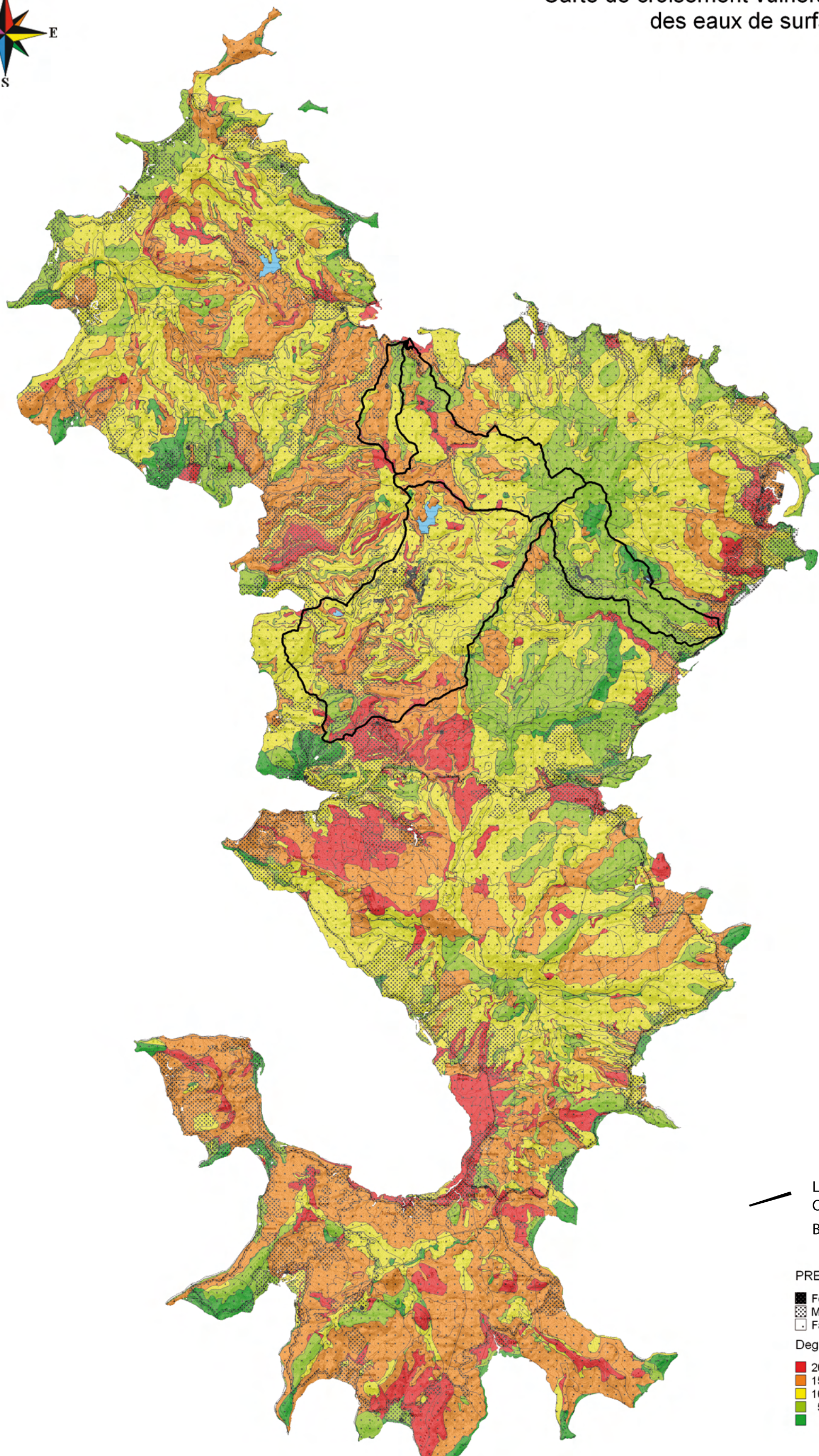
Degré de vulnérabilité IDPR

- 200 - 2 000: Peu vulnérable
- 150 - 200
- 100 - 150
- 50 - 100
- 0 - 50: Très vulnérable

5 km



Carte de croisement vulnérabilité/pressions des eaux de surface de Mayotte



— Limite des 4 bassins versants
Orouvéni, Gouloué,
Bouyouni et Mérése

PRESSIONS (non exhaustives)

- Forte
- ▨ Moyenne
- Faible

Degré de vulnérabilité IDPR

- 200 - 2 000: Très vulnérable
- 150 - 200
- 100 - 150
- 50 - 100
- 0 - 50: Peu vulnérable

5 km

Annexe 7

Rappels de statistiques et présentation des boîtes à moustaches de Tukey

Rappels et définitions

Les variables quantitatives nécessitent trois types de mesure pour avoir une idée complète de la distribution des données : les mesures de tendance centrale, les mesures de position et les mesures de dispersion, c'est-à-dire la mesure de la répartition des données autour de cette position centrale.

Quelques éléments de statistiques sont présentés ci-après, en fonction de leur appartenance à l'une ou l'autre des trois catégories :

- **la médiane**, qui constitue un indice de mesure des tendances centrales, est la valeur qui partage la distribution d'une série en deux parties égales en nombre d'observations ;
- **la moyenne**, qui est également un indice de mesure des tendances centrales, est la valeur égale à la somme des observations divisées par le nombre d'observations ;
- **les quartiles**, qui sont des mesures de position, divisent un nombre d'observations en quatre parties égales. Le premier quartile correspond à 25% des effectifs les plus petits et le troisième quartile à 75% des effectifs les plus petits ;
- **l'intervalle interquartile** représente l'intervalle comprenant 50% des observations les plus au centre de la distribution.

Les boîtes à moustaches de Tukey

Les données de débits ont été traitées par la méthode des « boîtes à moustaches de Tukey » qui permet de représenter schématiquement une distribution (illustration 1). Cette représentation est très intéressante pour visualiser rapidement les points aberrants qui doivent faire l'objet d'une attention particulière.

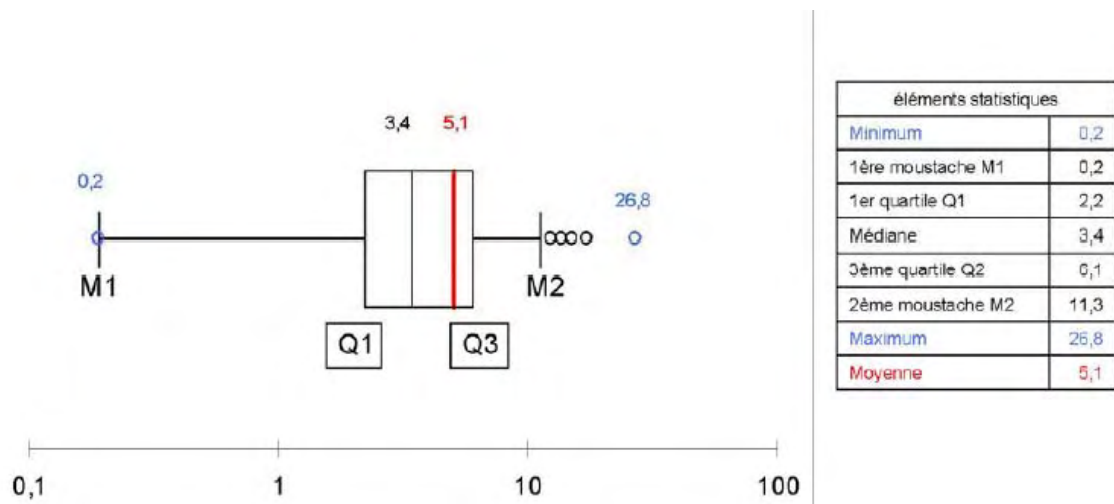


Figure 1 :Exemple de représentation par la méthode des boîtes à moustaches de Tukey

Plusieurs paramètres sont indiqués sur une boîte à moustaches :

- le premier quartile Q1 (25 % des effectifs) et le troisième quartile Q3 (75 % des effectifs), qui correspondent aux deux extrémités de la boîte ;
- la valeur du deuxième quartile Q2 (50 % des effectifs) ou médiane, représentée par un trait vertical à l'intérieur de la boîte ;
- les deux « moustaches » inférieure et supérieure (M1 & M2) représentées par les segments horizontaux de part et d'autre de la boîte. Ces deux moustaches délimitent les valeurs dites adjacentes qui sont déterminées à partir de l'écart interquartile ($Q3-Q1$) ;
- les valeurs dites extrêmes, atypiques ou anormales et qui sont situées au-delà des valeurs adjacentes sont individualisées. Elles sont représentées par les cercles noirs ;
- les valeurs des minimum et maximum sont également individualisées et sont représentées par les cercles bleus ;
- la valeur de la moyenne représentée par une barre ou une croix rouge.

L'extrémité de la moustache inférieure est la valeur minimum dans les données qui est supérieure à la valeur frontière basse : $Q1-1,5*(Q3-Q1)$.

L'extrémité de la moustache supérieure est la valeur maximum dans les données qui est inférieure à la frontière haute : $Q3+1,5*(Q3-Q1)$ (illustration 2).

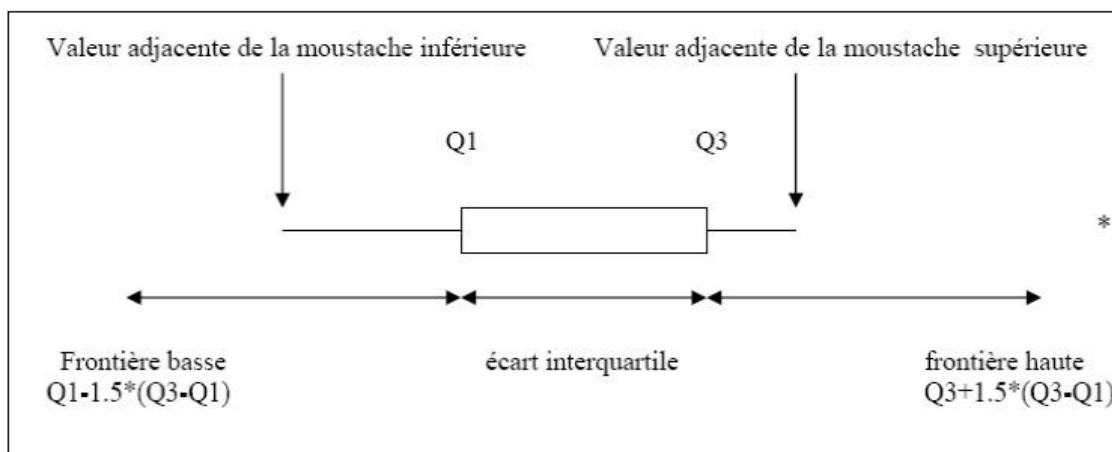


Figure 2 : Evaluation des valeurs des extrémités des moustaches

Dans la boîte à moustaches définie par Tukey, la boîte a pour longueur la distance interquartile ($Q3-Q1$), et les moustaches sont basées généralement sur **1,5** fois la longueur de la boîte. Dans ce cas, une valeur est atypique si elle dépasse de 1,5 fois l'écart interquartile au-dessous du 1^{er} quartile ou au dessus du 3^{ème} quartile.

En se basant sur les quartiles, c'est-à-dire des statistiques d'ordre, la médiane et l'écart interquartile ne sont jamais influencés par les valeurs extrêmes. La valeur 1,5

est selon Tukey une valeur pragmatique (*rule of thumb*), qui a une raison probabiliste. Si une variable suit une distribution normale, alors la zone délimitée par la boîte et les moustaches devrait contenir **99,3 %** des observations. On ne devrait donc trouver que **0,7 %** d'observations atypiques (*outliers*). Si le coefficient valait 1, la probabilité serait de **0,957**, et elle vaudrait **0,999** si le coefficient était égal à 2.

Pour Tukey, la valeur 1,5 est donc un compromis pour retenir comme atypiques assez d'observations mais pas trop d'observations.



Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

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