Document public

Définition des limites géographiques des cours d'eau au sens de la police de l'eau à Mayotte

Rapport final

BRGM/RP-53495-FR
Décembre 2004

Etude réalisée dans le cadre de l'opération
de Service Public du BRGM 04PIRZ01

G. Eucher, B. Tourlière, L. Denis

DIRECTION
DE L'AGRICULTURE
ET DE LA FORÊT

MINISTÈRE
DE L'ÉCOLOGIE
ET DU DÉVELOPPEMENT

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Mots clés : Bassin Versant, Collectivité Départementale, Cours d'eau, Facteur d'Accumulation, Hydrologie, Mayotte, Méthode de Strahler, Modèle Numérique de Terrain, Ravine

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

Eucher G., Denis L., Tourlière B. (2004) – Définition des limites géographiques des cours d'eau au sens de la police de l'eau à Mayotte – Direction de l'Agriculture et de la Forêt de Mayotte - BRGM/RP-53495-FR, 70 p., 14 ill., 9 Ann.

© BRGM, 2004, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM ou de la DAF

Synthèse

Dans un contexte volcanique accidenté soumis au climat tropical humide, Mayotte est traversée par de nombreuses ravines qu'il convient d'appréhender le mieux possible selon la nomenclature locale (A.P. 133/DAF/2003) et sous l'angle de la Police de l'eau. A la demande de la Direction de l'Agriculture et de la Forêt de Mayotte et dans le cadre de ses missions de service public, le BRGM (Service Géologique Régional Océan Indien, Antenne de Mayotte) a réalisé une étude concernant la définition des limites géographiques des cours d'eau de Mayotte au sens de la Police de l'eau.

L'objectif principal est de réaliser une classification du réseau hydrographique superficiel et des bassins versants de l'île afin de rassembler les éléments cartographiques et les données nécessaires à l'application de la Police de l'eau à Mayotte. Un autre objectif est de produire des données géométriques sur les bassins versants, les confluences et les rivières de l'île afin de créer un outil fiable de quantification des écoulements sur le territoire.

Les résultats de cette étude sont les suivants :

- réalisation de cartes de Mayotte à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT) et de méthodes informatiques novatrices : réseau hydrographique, bassins versants, confluences ;
- valorisation de chaque objet par des informations caractéristiques (longueur, altitude, débit, etc.) ;
- correction des cartes par comparaison aux deux cartes IGN à l'échelle 1/25 000 ;
- proposition de critères de quantification des volumes d'écoulement et détermination de la valeur correspondant à la délimitation « cours d'eau » par un contrôle sur le terrain ;
- application de la méthode à l'ensemble des cours d'eau de Mayotte ;
- déduction d'une carte destinée à améliorer l'application de la réglementation sur les ravines de Mayotte par les services concernés.

Cette étude devra être suivie d'une consolidation des données par une validation progressive de la carte sur le terrain. Le résultat est en effet affecté par le manque de précision des données initiales (MNT, réseau hydrographique initial). Par ailleurs, les enjeux liés à cette cartographie vont apparaître progressivement avec la multiplication des opérations soumises à la loi sur l'eau (travaux, prélèvements, etc.). Cet outil sera affiné à l'avenir pour apporter une aide à la décision de l'autorité administrative mais aussi une information préalable aux usagers des ravines et rivières, grâce à la mise en place d'une banque de données suivie et mise à jour annuellement.

Sommaire

1. Contexte de l'étude **7**

2. Objet de l'étude **9**

3. Méthodologie **10**

3.1. Définitions 10

3.1.1. Bassin versant hydrographique 10

3.1.2. Classifications du réseau hydrographique 10

3.1.3. Méthode de Thiessen, construction de polygones 12

3.1.4. Facteur d'accumulation 13

3.1.5. Termes techniques 13

3.2. Modélisation 14

3.2.1. Découpage et maillage du territoire 14

3.2.2. Vectorisation du réseau hydrographique 14

3.2.3. Attribution du facteur d'accumulation aux objets vecteurs 14

3.3. Méthodologie informatique 15

3.3.1. Méthode initiale 15

3.3.2. Méthode retenue 15

3.3.3. Correction des surfaces 17

4. Résultats cartographiques 17

4.1. Réseau hydrographique à partir du réseau IGN 17

4.2. Confluences 20

4.3. Bassins versants unitaires 21

4.4. Bassins versants « rivières » 22

4.5. Documents au format .wor 23

4.6. Les onze Bassins versants principaux 23

5. Analyses thématiques 25

5.1. Analyse thématique « confluences » 25

5.2. Analyse thématique « bassins versants » 26

6. Contrôle terrain 28

Conclusion 29

Liste des annexes

Annexes 31
Annexe 1 : 32
MNT de Mayotte au pas de 50 m 32
Annexe 2 : 33
Carte des ravines de Mayotte 33
Annexe 3 : 34
Etudes particulières des 10 bassins versants principaux de Mayotte 34
Annexe 4 : 64
Carte des bassins versants de Mayotte d'ordre 7 64
Annexe 5 : 65
Carte des bassins versants de Mayotte d'ordre 6 65
Annexe 6 : 66
Carte des bassins versants de Mayotte d'ordre 5 66
Annexe 7 : 67
Carte des bassins versants de Mayotte d'ordre 4 67
Annexe 8 : 68
Carte des bassins versants de Mayotte d'ordre 3 68
Annexe 9 : 69
Carte des bassins versants de Mayotte d'ordre 2 69

Liste des illustrations

Illustration 1 : Schémas illustrant les méthodes de classification de Horton (a), de Strahler (b) et de Shreve (c) 11

Illustration 2 : Exemple de classification d'un réseau par la méthode de Strahler 11

Illustration 3 : Schémas explicatifs de la construction des polygones de Thiessen 12

Illustration 4 : Représentations du mode vecteur (a) et du mode raster (b) 13

Illustration 5 et Illustration 6 : Graphiques mettant en relation le facteur d'accumulation avec l'altitude des segments du réseau 18

Illustration 7 : Graphique mettant en relation le dénivelé des segments avec la somme des accumulations 19

Illustration 8 : Graphique mettant en relation le facteur d'accumulation des confluences avec l'altitude 20

Illustration 9 : Graphique mettant en relation l'accumulation avec l'altitude des confluences en fonction de l'ordre de Strahler 21

Illustration 10 : Graphique mettant en relation l'accumulation avec l'altitude des bassins versants en fonction de l'ordre de Strahler 22

Illustration 11 : Carte des bassins versants « rivière » de Mayotte. Présentation des 20 bassins les plus importants et des 11 bassins ayant fait l'objet d'une étude particulière. 24

Illustration 12 : Analyse thématique sur les confluences, exemple du Mro Oua Koualé 25

Illustration 13 : Analyse thématique sur les bassins versant, exemple du bassin du Mro Oua Koualé 26

Illustration 14 : Carte présentant l'analyse thématique sur les bassins versants de Mayotte. Les bassins versants sont représentés par classes d'accumulation moyenne. 27

1. Contexte de l'étude

La législation sur l'eau repose notamment sur la notion de cours d'eau, laquelle a parfois donné lieu à diverses interprétations.

La loi du 3 janvier 1992 sur l'eau, codifiée aux articles L. 210-1 et suivants du code de l'environnement, a consacré une approche globale des incidences sur l'eau et les milieux aquatiques. Elle s'intéresse à l'ensemble des eaux qu'elles soient superficielles, courantes ou stagnantes, souterraines ou maritimes. Par exemple, les retenues collinaires établies même en dehors des cours d'eau sont soumises à la police de l'eau. Cependant, certaines rubriques de la nomenclature des opérations soumises à déclaration ou autorisation concernent spécifiquement les cours d'eau. Il s'agit par exemple de travaux dans le lit des rivières ou de prélèvements d'eau en rivière.

Le législateur n'a pas défini a priori les cours d'eau, eu égard à la diversité des situations contrastées que l'on peut rencontrer sur le territoire français (cours d'eau à régime méditerranéen ou cours d'eau à régime torrentiel, avec un écoulement intermittent). Ainsi, la définition d'un cours d'eau s'est construite de façon pragmatique sur la base de la jurisprudence.

La qualification de cours d'eau donnée par la jurisprudence repose essentiellement sur les deux critères suivants :

- la présence et la permanence d'un **lit naturel à l'origine**, distinguant ainsi un cours d'eau d'un canal ou d'un fossé creusé par la main de l'homme mais incluant dans la définition un cours d'eau naturel à l'origine mais rendu artificiel par la suite, sous réserve d'en apporter la preuve – ce qui n'est pas forcément aisé - ;

- la **permanence d'un débit suffisant** une majeure partie de l'année apprécié au cas par cas par le juge en fonction des données climatiques et hydrologiques locales et à partir de présomptions au nombre desquelles par exemple l'indication du « cours d'eau » sur une carte IGN ou la mention de sa dénomination sur le cadastre.

Si l'enjeu peut paraître moindre depuis 1993 du fait du caractère extensif de la nomenclature, il demeure toutefois essentiel de prendre en compte de façon circonstanciée ces deux critères majeurs avant de considérer qu'il ne s'agit pas d'un cours d'eau, ce qui dans ce cas signifie par exemple que le contrôle des ouvrages dans le lit mineur en vue de prévenir les inondations ne s'y applique pas. Or, l'importance de la prévention des inondations est majeure sur les torrents des îles

tropicales, lesquels sont souvent des cours d'eau malgré un débit estival très faible voire nul.

A Mayotte, un autre enjeu du contrôle des ouvrages est lié à la sensibilité des terrains à l'érosion : un obstacle à l'écoulement des eaux pourrait provoquer des érosions du lit et des berges dommageables du fait du charriage de sédiments à l'aval et au lagon.

De par son relief accidenté et ses fortes précipitations, Mayotte est traversée par de nombreuses ravines sèches qu'il convient de bien appréhender sous l'angle de la police de l'eau.

Afin de préciser le terme cours d'eau, une définition a élé introduite dans la dernière version de la nomenclature locale adoptée par arrêté préfectoral (adaptation spécifique à Mayotte, prévue par le code de l'environnement, art.L.652-2) – A.P. 133/DAF/2003 :

> ARTICLE 5 :
>
> La notion de cours d'eau s'établit selon deux critères additifs :
>
> - Au sens du décret n°2002-202 du 13 février 2002, modifiant le décret 93-743 du 29 mars 1993, un talweg est un cours d'eau dès lors que la carte IGN au 1/25000 le représente soit par un double trait pour une largeur supérieur ou égale à 7,5 m, soit un simple trait continu ou discontinu pour une largeur inférieure à 7,5 m. Le texte ne retire pas le statut de cours d'eau à ceux qui ne sont pas cartographiés.
>
> - Le lit d'un cours d'eau s'identifie par la **présence de berges** (dénivelé entre le fond de l'écoulement et le niveau des sols environnants), par la **différenciation du substrat** sur le fond de la zone d'écoulement et un écoulement même temporaire.

Les limites des cours d'eau sont déterminées par la hauteur des eaux courantes à pleins bords avant de déborder.

Dans cette optique, le service Police de l'eau de la DAF de Mayotte a demandé au BRGM de produire des documents et des méthodes cartographiques qui fixent ces limites d'application. Ainsi, ce rapport a pour principal objet de présenter, dans le cadre de la fiche de Service Public du BRGM 04PIRZ01, les méta-données associées aux documents cartographiques fournis au format MAPINFO et décrivant le réseau hydraulique superficiel et les cours d'eau de Mayotte.

2. Objet de l'étude

Il s'agit d'identifier les cours d'eau de Mayotte qui répondent à cette définition locale et de les matérialiser grâce à un Système d'Information Géographique (SIG). La méthode proposée en concertation avec le service Police de l'eau de la DAF se décompose en plusieurs étapes :

- établir des cartes de Mayotte à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT) et de méthodes informatiques novatrices : réseau hydrographique, bassins versants, confluences ;

- valoriser chaque objet par des informations caractéristiques (longueur, altitude, débit, etc.) ;

- corriger ces cartes en les comparant aux deux cartes IGN à l'échelle 1/25 000 ;

- proposer des critères en relation avec les volumes d'écoulement et en déterminer la valeur correspondant à la délimitation « cours d'eau » par un contrôle sur le terrain ;

- appliquer la méthode sur l'ensemble des cours d'eau de Mayotte ;

- déduire une carte destinée à améliorer l'application de la réglementation sur les ravines de Mayotte par les services concernés.

Il est important de noter que la méthodologie n'a cessé d'évoluer tout au long de la construction du projet. Cette évolution est due principalement à l'aspect novateur de l'étude, particulièrement en ce qui concerne la partie informatique. La limite de cette méthodologie est fixée par la qualité des données de départ (MNT au pas de 50 m, réseau hydrographique initial), le détail des résultats ne pouvant excéder la précision des données sources.

Profitant de ce travail géographique, la DAF demande également au BRGM de produire des données sur les bassins versants et les rivières de l'île.

3. Méthodologie

3.1. DÉFINITIONS

3.1.1. Bassin versant hydrographique

Un bassin versant hydrographique est représenté par une aire fermée qui collecte l'eau (et d'autres substances) jusqu'à un point unique appelé **exutoire**. Le bassin est donc caractérisé par l'ensemble des pentes inclinées vers un même cours d'eau et y déversant leurs eaux de ruissellement. Les bassins versants sont séparés par des **lignes de partage des eaux**. Un **interfluve** est caractérisé par la surface comprise entre deux talwegs voisins : il comprend donc deux versants appartenant à deux vallées différentes.

3.1.2. Classifications du réseau hydrographique

Il existe trois grandes méthodes de classification :

- **Horton** (1945) : cette classification se décompose en deux étapes :
    - attribuer à chaque segment du réseau un numéro ou un ordre : tout tronçon, sans affluent est d'ordre 1 ; toute confluence de segments d'ordre identique donne un segment d'ordre supérieur qui reçoit des affluents d'ordre inférieur ;
    - redistribuer les ordres en fonction des longueurs des segments, il faut alors remonter le réseau en donnant l'ordre supérieur au segment le plus long (Illustration 1a) ;
- **Strahler** (1952) : l'ordre du cours d'eau n'augmente que si deux cours d'eau de même ordre se rencontrent (Illustration 1b). Par conséquent, l'intersection entre un cours d'eau de premier ordre et un cours d'eau de second ordre donnera un nouveau cours d'eau de second ordre. L'intersection entre deux cours d'eau d'ordre 1 donnera un cours d'eau d'ordre 2. L'intersection entre deux cours d'eau d'ordre 2 donnera un cours d'eau d'ordre 3, et ainsi de suite. Ceci constitue la méthode la plus commune ;
- **Shreve** (1967) : l'ordre du cours d'eau augmente à chaque intersection. Ainsi, l'intersection entre deux cours d'eau d'ordre 1 donnera un cours d'eau d'ordre 2. L'intersection entre un cours d'eau d'ordre 1 avec un cours d'eau d'ordre 2 donnera un cours d'eau d'ordre 3 (Illustration 1c).

La classification en ordre dépend de l'échelle de travail. En effet, un cours d'eau d'ordre 1 à l'échelle du 1 : 100 000 peut correspondre à un ordre 3 à l'échelle du 1 : 25 000 et à un ordre 4 sur le terrain, tout en conservant les mêmes critères pour définir le cours d'eau.

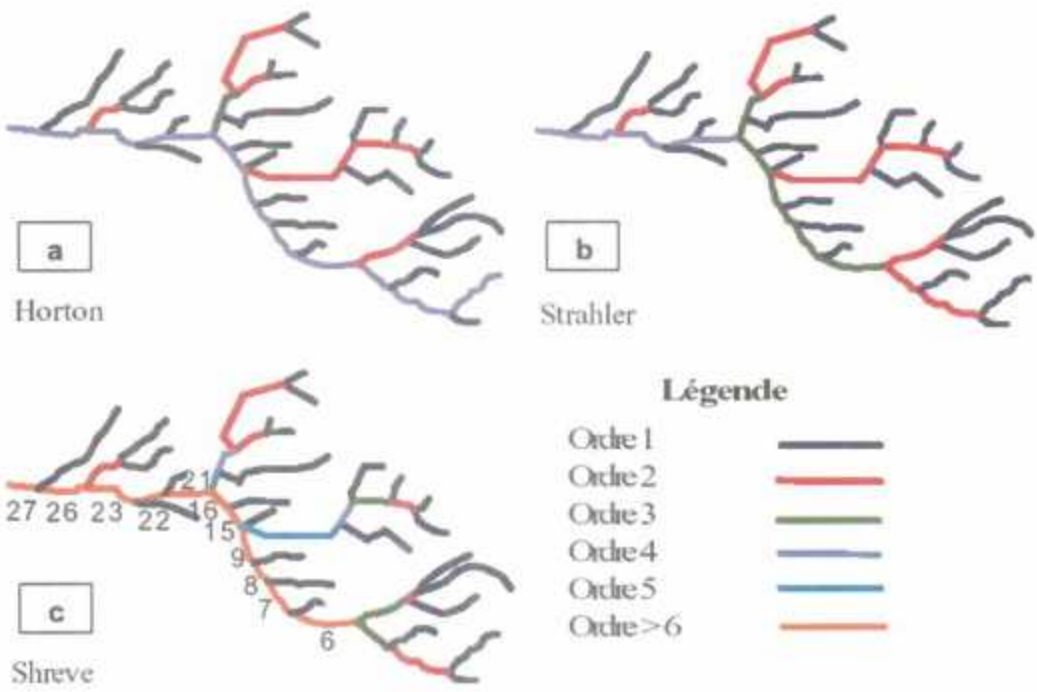


Illustration 1 : Schémas illustrant les méthodes de classification de Horton (a), de Strahler (b) et de Shreve (c)

Dans le cadre de ce projet, c'est la classification selon l'ordre de Strahler qui a été retenue.

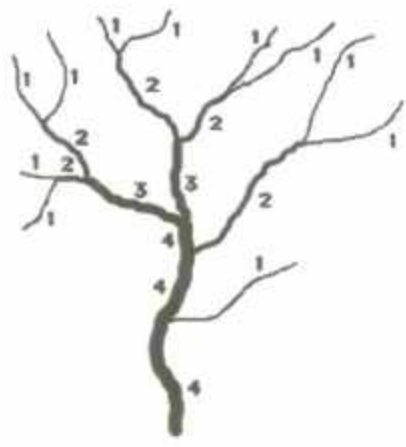


Illustration 2 : Exemple de classification d'un réseau par la méthode de Strahler

3.1.3. Méthode de Thiessen, construction de polygones

À partir d'un nuage de points quelconque, il est possible de définir un grand nombre de maillages différents. L'objectif étant d'approximer l'altitude de nœuds qui se situent dans les triangles, il est souhaitable de choisir une triangulation qui minimise la longueur des facettes. Autrement dit, l'interpolation sera réaliste si les formes des facettes se rapprochent du triangle équilatéral. Ce critère est vérifié par la triangulation de Delaunay.

La Méthode de Thiessen ou diagramme de Voronoï consiste en un découpage de l'espace en régions définies autour des points de données. C'est l'étape qui permet de réaliser facilement la triangulation de Delaunay. Ensuite, le calcul de l'interpolation linéaire est simple. Pour chaque nœud de la grille, il suffit de trouver le triangle concerné. L'altitude du nœud est calculée à l'aide de l'équation du plan portant la facette triangulaire. Il est également possible d'interpoler un point quelconque du modèle numérique de terrain.

L'algorithme utilisé se déroule en trois phases :

- Tessellation de Dirichlet : cette étape est la plus coûteuse en temps de calcul. Chaque nœud de la grille est étiqueté en fonction du point de donnée le plus proche. La fonction de calcul de distance est appelée LxHxN fois si la grille est formée de LxH nœuds. N représente le nombre de points de données, L la largeur de la grille et H la hauteur de la grille ;

- Triangulation de Delaunay : des balayages verticaux et horizontaux de la matrice des nœuds permettent de détecter les régions mitoyennes et donc de trouver les segments constitutifs de la triangulation. Une liste des facettes triangulaires est ensuite établie à partir de la liste des segments ;

- Interpolation : cette phase est la plus rapide. Pour chaque nœud de la grille, il faut rechercher la facette d'appartenance, puis l'altitude calculée grâce à l'équation du plan qui porte la facette. Si aucune facette n'est trouvée (nœud hors maillage) une constante est affectée à l'altitude du nœud.

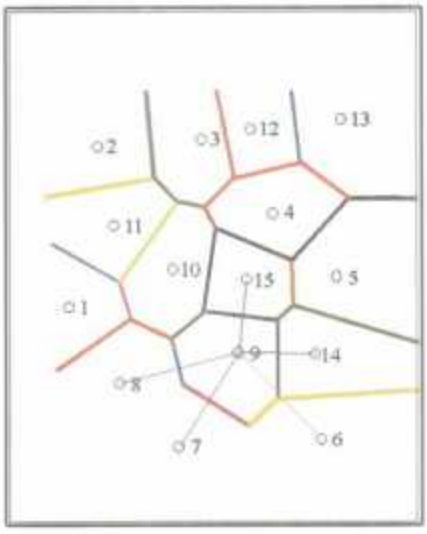
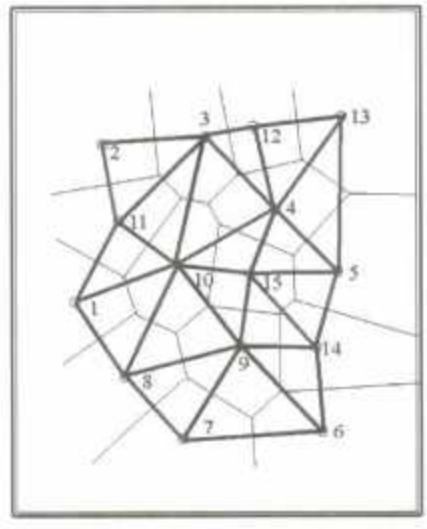


Illustration 3 : Schémas explicatifs de la construction des polygones de Thiessen



3.1.4. Facteur d'accumulation

Le facteur d 'accumulation est une valeur sans unité permettant de quantifier le débit à pluviométrie constante et uniforme. Ainsi, le paramètre d'accumulation donne pour chaque pixel le nombre de pixels qui s'y déversent. Chaque goutte d'eau déposée sur un pixel de crête (FACC = 0) se déverse sur un pixel d'altitude inférieure et ainsi de suite jusqu'à la mer. Il s'agit donc d'une image de la quantité d'eau qui passe par chaque confluence du réseau hydrographique. Même si la fiabilité générale est plutôt bonne, ces paramètres sont calculés à partir du MNT et en récupèrent les erreurs. Ce calcul d'accumulation est donc totalement inféodé au MNT et à sa précision. Il est possible de voir apparaître localement des problèmes. D'autre part, l'imperfection du réseau hydrographique de base ajoute encore une incertitude.

3.1.5. Termes techniques

AML : *Arc Macro Language*, codage informatique Arc Info

Les données spatiales peuvent être initialisées, gérées, stockées, sous deux modes différents : le mode vecteur et le mode raster.

- mode **Vecteur** : dans le mode vecteur, la représentation graphique se fait à l'aide d'une succession de points définis géométriquement par leur coordonnées. C'est le cas obtenu après une digitalisation par exemple. Le mode vecteur est représenté dans un repère cartésien souvent à deux dimensions (Illustration 4a) ;

- mode **Raster** : dans le mode raster, la représentation graphique de l'information se fait sous la forme d'une matrice de points ou pixels. C'est le cas par exemple, des cartes scannées, des images satellites ou de certains modèles numériques de terrain (Illustration 4b).

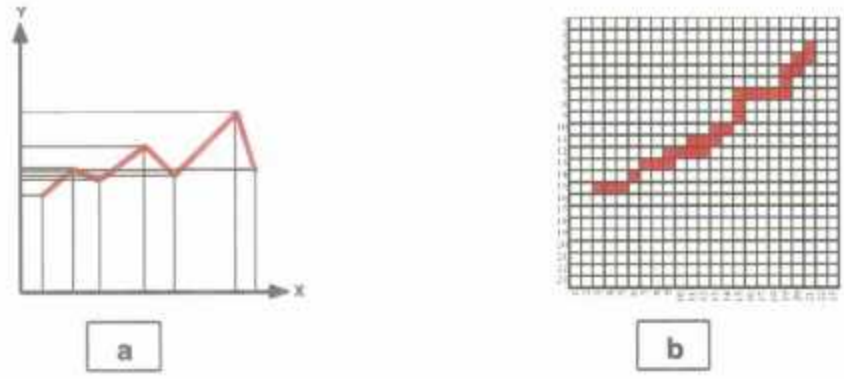


Illustration 4 : Représentations du mode vecteur (a) et du mode raster (b)

3.2. MODELISATION

3.2.1. Découpage et maillage du territoire

Un Modèle Numérique de Terrain (MNT) de Mayotte a été réalisé par l'Institut Géographique National (IGN) en 1996-1997. Ce MNT a été construit à la maille de 50 m. Un pixel (50 m X 50 m) représente donc une surface de 2 500 m².

3.2.2. Vectorisation du réseau hydrographique

Outre le MNT, le projet nécessite un réseau hydrographique vectorisé. Pour cela, le BRGM a utilisé la table « ravines » utilisée par le SIG Inter-Services Publics de Mayotte.

3.2.3. Attribution du facteur d'accumulation aux objets vecteurs

Une fois la grille d'accumulation calculée pour l'ensemble du MNT (cf. 3.1.3.), il faut procéder à sa jointure spatiale avec les objets vecteurs (points, segments, polygones) :

- pour les points, c'est la valeur du pixel situé sous le point qui est récupérée ;
- pour les segments, il faut récupèrer la valeur du pixel la plus élevée (max), la valeur du pixel la plus faible (min) et la valeur moyenne (somme des valeurs des pixels traversés par le segment / nombre de pixels traversés) ;
- pour les polygones, le même principe que pour les segments est utilisé.

S'il existe des incohérences entre le réseau vecteur et le MNT, celles-ci subsisteront pour les attributs récupérés sur les grilles (valeurs). Pour minimiser ces problèmes, le BRGM a procédé à un « *burning* » du MNT par le réseau hydrographique IGN. Ce « *burning* » consiste à créer artificiellement des canyons sur le tracé des ravines en augmentant l'altitude des pixels du MNT de 2000 m en dehors des pixels du tracé. Cet artifice oblige donc une goutte d'eau virtuelle à couler dans le réseau hydrographique vecteur d'origine. Si ce « *burning* » permet de gommer certaines incohérences, il ne suffit pas si un segment du réseau traverse une crête. D'autre part, avec une grille de MNT à 50 m, un problème de précision à conduit le BRGM à rééchantillonner le MNT à 25 m sans changer les valeurs pour éviter que deux ravines démarrent dans le même *pixel topographique (2 500 m² pour le MNT à 50 m).*

Avec un MNT plus précis (au pas de 10 m par exemple), le réseau hydrographique digitalisé en mode vecteur devient inutile pour effectuer tous les calculs. C'est donc bien l'imprécision du MNT qui a conduit l'étude à utiliser ce réseau, et qui a induit lui-même d'autres erreurs. Il est également à noter que les altitudes très basses du MNT se sont avérées très gênantes pour modéliser les écoulements (grande imprécision avec une maille de 50 m). Pour cela, le BRGM a éliminé toutes les altitudes inférieures à 5 m pour éviter les problèmes dans ces zones, même si cela induit une perte de longueur du réseau.

3.3. MÉTHODOLOGIE INFORMATIQUE

Suite à une première réunion le 19/11/2004, le projet a été réorienté afin de mieux répondre aux attentes de la DAF de Mayotte. Ainsi, une méthodologie nouvelle a été mise en œuvre par le BRGM afin d'obtenir des données plus cohérentes et en accord avec l'objectif du projet.

3.3.1. Méthode initiale

Dans un premier temps, la méthode élaborée consistait à :

- calculer les limites des bassins versants à partir du MNT au pas de 50 m et à l'échelle la plus fine autorisée ;

- construire un réseau hydrographique théorique, hiérarchisé selon la méthode de Strahler à partir du MNT.

Le réseau hydrographique obtenu à partir du MNT comportait un grand nombre d'angles dû à la pixellisation. Ce réseau, bien que précis, ne correspondait pas aux attentes de la DAF car inutilisable sur le terrain. A ce stade de l'étude, il a été décidé de travailler à partir du réseau hydrographique utilisé par le SIG Inter-Services Publics de Mayotte.

3.3.2. Méthode retenue

Une nouvelle méthodologie a donc été mise en œuvre à partir du MNT et du réseau hydrographique existant :

- **Fichier « Réseau hydrographique »** : une fois tout le réseau classé par les outils développés par JM Angel en *AML* pour *ArcInfo*, un ordre de Strahler, un numéro de bassin et une longueur ont été attribués à chaque branche du réseau ;

- **Fichier « Confluences »** : à partir du réseau classé, le BRGM a procédé à l'extraction des nœuds dans *Arcview* (extension *Point and Polyline tools v1.2*). Ces nœuds correspondent, à quelques erreurs de digitalisation près, à l'ensemble des confluences du réseau. Pour chaque nœud, une altitude et une accumulation ont été attribués à partir d'un « *Summarize* » sur la grille MNT50 et la grille FACC (calculée par *Flow Accumulation* de l'extension *HydroV1.1*).

- **Fichier « Crêtes »** : ce fichier de lignes a été créé par l'outil *GridRoom* à partir du MNT 50m. Il contient l'ensemble des crêtes d'ordre supérieur à 3, en cohérence avec le réseau IGN, ce qui ajoute une information intéressante.

- **Fichier « bassins versants unitaires »** :

Pour ce fichier difficile à réaliser, et après quelques essais insatisfaisants, la méthode suivante a été sélectionnée :

- extraction de tous les nœuds et vertex (extension *Point and Polyline tools v1.2*) constituant les rivières digitalisées (159393 points) ;

- récupération de tous ces points (avec les attributs bassins, Strahler et numéro de branche) issus des branches des rivières dont ils sont extraits dans *Arc Info* et constitution des polygones de Thiessen (cf. 3.1.3.) correspondant à ce semis de points (*Fonction Arc : Thiessen <inCover> <outCover> tolerance =0*). C'est donc un ensemble de 159393 polygones, décrivant les surfaces qui seraient « drainées » par chaque point si le relief était parfaitement isotrope, qui est récupéré. Il s'agit donc d'une image théorique mais la comparaison avec les bassins versants issus des autres traitements montre que le résultat est assez proche ;

- mise en œuvre d'un « *dissolve* » (fonction Arc qui permet de regrouper des polygones suivant un attribut) de ces polygones sur l'attribut numéro de branche ; un bassin versant unique pour chaque branche de réseau est ainsi récupéré ;

- la même opération de dissolve sur l'attribut bassin peut être mise en œuvre et c'est alors un bassin versant par rivière (**fichier bassins versants rivière**) qui est obtenu ;

- récupération des polygones dans *Arcview* puis attribution d'un ordre de Strahler à partir de la branche de rivière qu'ils contiennent (sélection des branches de réseau d'ordre 1 ; fonction *Select by Theme* ; sélection des BV qui contiennent le centre des branches sélectionnées ; création d'un attribut Strahler dans la table des BV puis affectation de la valeur 1 pour les BV sélectionnés). La même méthode est utilisée pour les branches d'ordre 2, 3, 4, 5 et 6. Au final, un ensemble de bassins versants avec un ordre de Strahler cohérent avec la branche de réseau qui les traverse est obtenu. Chacun de ces polygones possède un attribut *Area* (aire) et *Perimeter* (périmètre) ;

- une dernière opération de *Clipping* permet de découper les 9361 polygones dérivés du calcul des polygones de Thiessen par le tracé de la côte et d'éliminer les polygones s'étendant en mer. Le tracé de côte est issu du MNT et présente donc un aspect pixellisé.

3.3.3. Correction des surfaces

Cette méthode permet de corriger une aire 2D (nombre de pixels x surface d'un pixel) en une surface 3D grâce au calcul de pente.

A partir du calcul des pentes sur le MNT au pas de 50 m, il faut faire une approximation de la surface déprojetée de chaque pixel. Pour cela, la relation suivante est utilisée :

Surface corrigée = surface brute (2500 m²) / Cos (pente)

Un fois l'ensemble des surfaces corrigées calculé, il est possible d'obtenir la surface corrigée de chaque polygone en procédant à la somme des surfaces des pixels contenus dans le polygone. Puis, grâce au rapport (surface corrigée / surface brute), il devient possible de déduire le facteur moyen d'augmentation de la surface pour le polygone considéré. Le produit entre la surface vecteur et ce facteur moyen permet d'obtenir une surface corrigée 3D la plus proche de la réalité terrain.

4. Résultats cartographiques

4.1. RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE A PARTIR DU RÉSEAU IGN

Le réseau hydrographique de Mayotte a donc été tracé grâce au réseau de la table existante dans le SIG Inter-Services Publics de Mayotte. Chaque segment, chaque brin du réseau a été caractérisé par différents attributs, regroupés dans la table « Réseau hydrographique » :

- numéro d'enregistrement du segment ;
- longueur du segment en mètres ;
- numéro du bassin contenant le segment ;
- ordre du segment dans le réseau : position du segment en partant de la mer (1) vers l'amont ;
- ordre de Strahler du segment dans le réseau ;
- facteurs d'accumulation moyen, minimum et maximum du segment (sans unité) ;
- somme des accumulations du segment (sans unité)
- altitudes minimum et maximum du segment en mètres.

Cette table contient 9 537 segments.

Le segment de longueur maximale est situé sur le tracé du Mro Oua Ourovéni, il

mesure 1 652 m. Le segment de longueur minimale est situé sur le tracé du Mroni Bé, il mesure 1,855 m. Le segment d'altitude maximale (634 m) est également situé sur le tracé du Mroni Bé. Les graphiques suivants (Illustrations 5 et 6) présentent l'évolution du facteur d'accumulation des segments du réseau en fonction de leur altitude. Il apparaît que les deux paramètres sont assez bien corrélés : plus l'altitude augmente, plus le débit diminue, et inversement, plus l'altitude diminue, plus le débit maximal augmente.

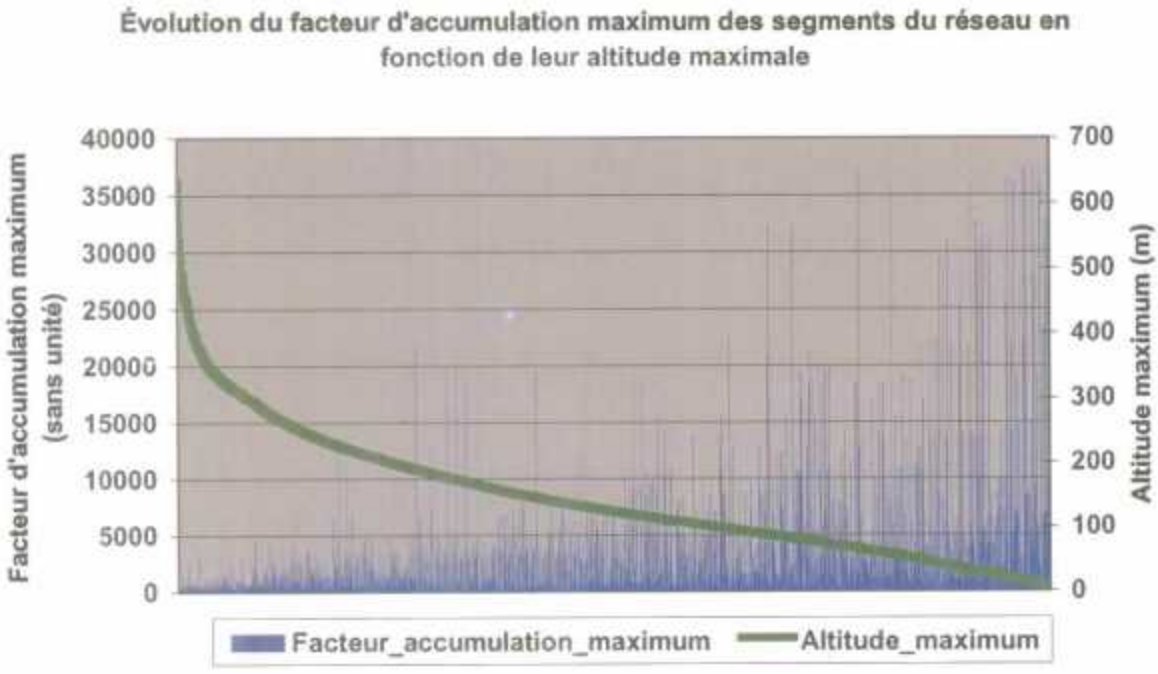
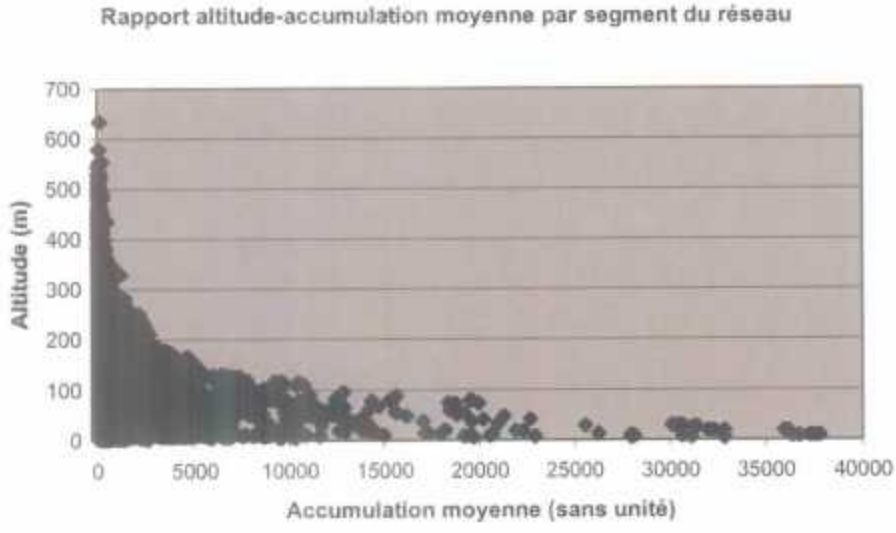


Illustration 5 et Illustration 6 : Graphiques mettant en relation le facteur d'accumulation avec l'altitude des segments du réseau



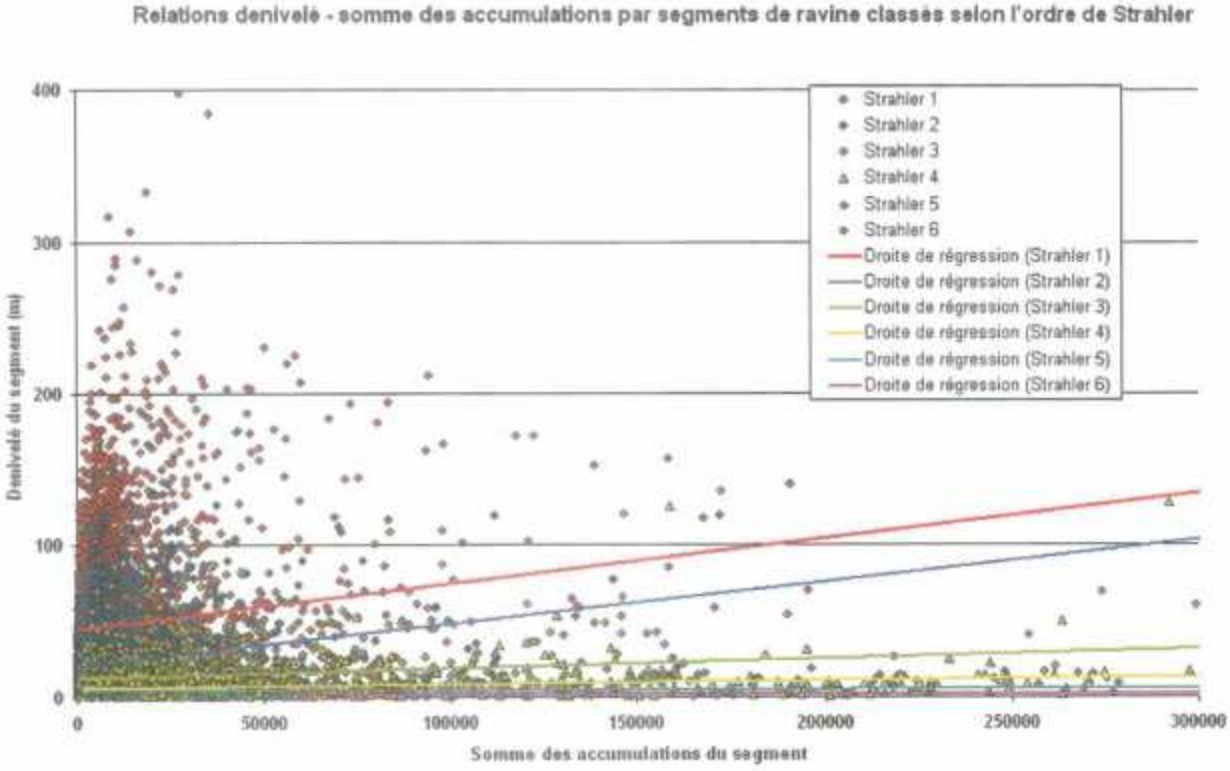


Illustration 7 : Graphique mettant en relation le dénivelé des segments avec la somme des accumulations

Ce graphique (Illustration 7) met en regard le dénivelé de chaque segment (altitude maximum – altitude minimum) avec la somme de ses accumulations. Chaque segment est classé selon l'ordre de Strahler (points). Une droite de régression a été tracée pour chaque série de points de façon à représenter la tendance de chaque ordre. Ainsi, le comportement des segments de ravines d'ordre 1 et 2, à fort dénivelé, diffère fortement de celui des segments d'ordre supérieur. Cette relation dénivelé/débit potentiel permet donc de séparer de façon bien distincte les segments de ravines à dénivelé fort et accumulation faible, de ceux dont le dénivelé est plus faible mais qui présentent une accumulation importante.

Le paramètre dénivelé apparaît intéressant car il permet de différencier les segments de ravines en contexte de plaine de ceux qui appartiennent aux régions de Mayotte dont le relief est plus accentué.

4.2. CONFLUENCES

Chaque point de confluence du réseau hydrographique a été caractérisé par les attributs suivants :

- numéro d'enregistrement du point ;
- facteur d'accumulation du point de confluence (sans unité) ;
- altitude du point de confluence en mètres ;
- numéro du segment de la table « réseau hydrographique ».

Cette table contient 9 999 points.

Le Facteur d'accumulation maximal de 37 812 est situé sur l'estuaire du Mro Oua Ourovéni.

Tout comme pour les segments, une bonne corrélation entre les facteurs d'accumulation des confluences et leur altitude (Illustrations 8 et 9) peut être observée.

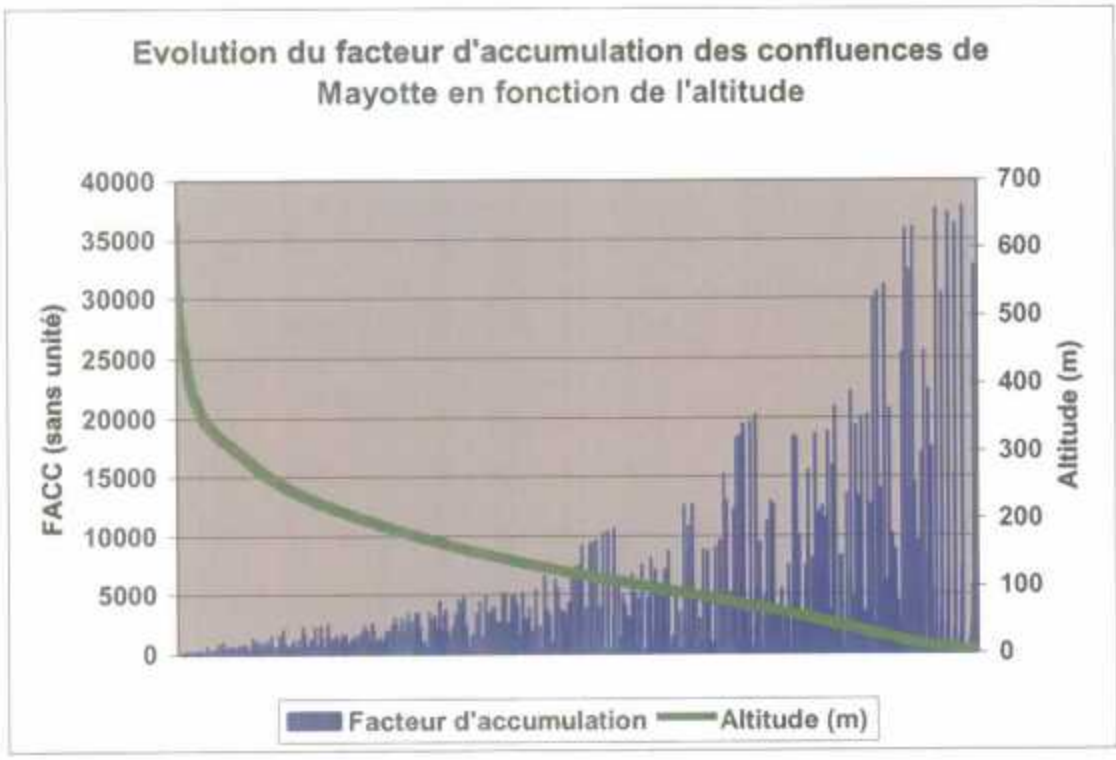


Illustration 8 : Graphique mettant en relation le facteur d'accumulation des confluences avec l'altitude

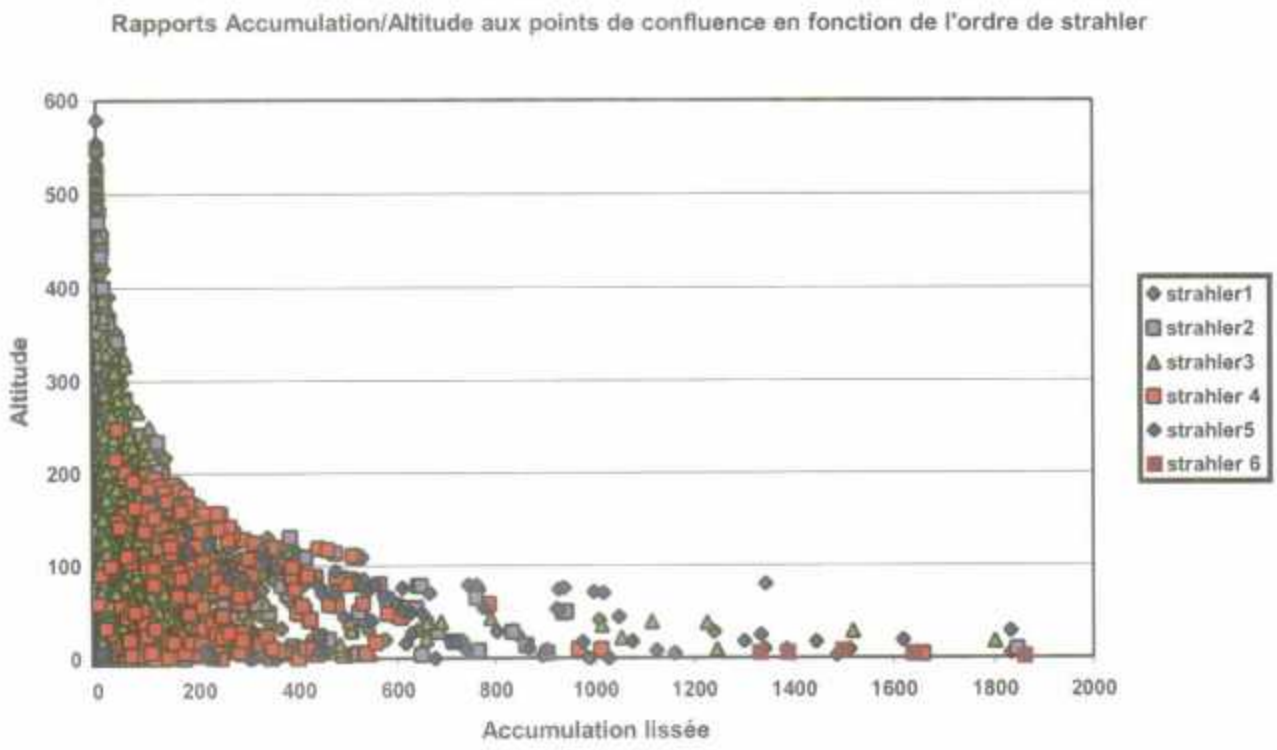


Illustration 9 : Graphique mettant en relation l'accumulation avec l'altitude des confluences en fonction de l'ordre de Strahler

4.3. BASSINS VERSANTS UNITAIRES

Chaque bassin versant unitaire tracé a été caractérisé avec les attributs suivants :

- numéro d'enregistrement du bassin ;
- ordre de Strahler maximum du bassin ;
- nombre de segments du réseau hydrographique contenu dans le bassin (ordre) ;
- numéro de bassin versant « rivière » ;
- facteurs d'accumulation moyen, minimum et maximum du bassin ;
- aire 2D du bassin en m² ;
- périmètre 2D du bassin en mètres ;
- altitudes maximum, moyenne et minimum du bassin en mètres ;
- nombre de pixels contenu dans le bassin (1 pixel = 2500 m²)
- aire 3D corrigée en m².

Cette table contient 9 963 polygones.

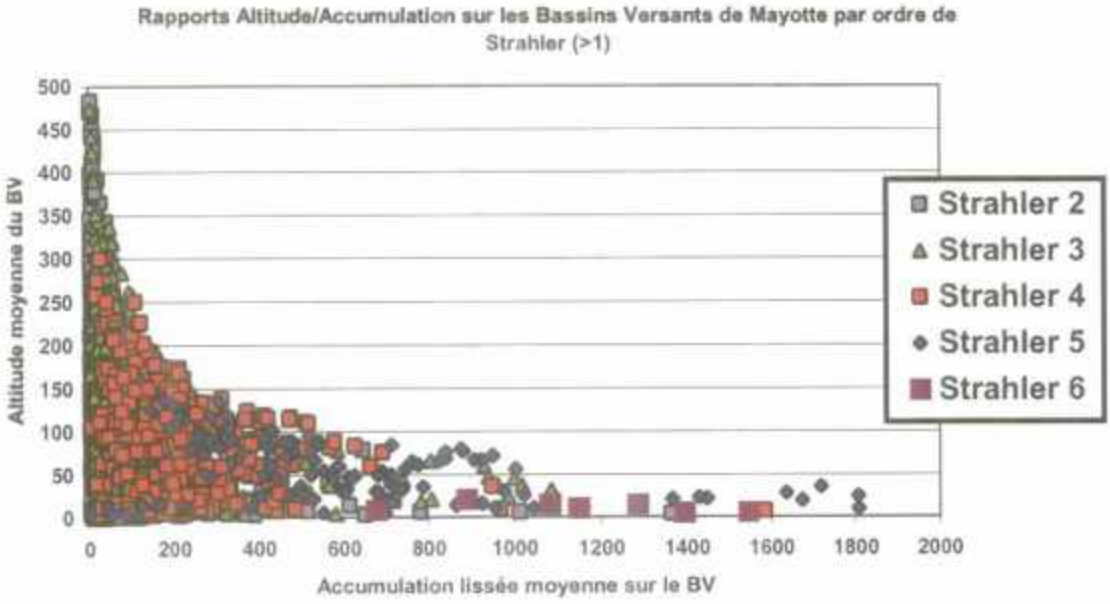


Illustration 10 : Graphique mettant en relation l'accumulation avec l'altitude des bassins versants en fonction de l'ordre de Strahler

On observe une bonne corrélation entre l'altitude et l'accumulation des bassins versants (Illustration 10). Les bassins versants d'ordres inférieurs avec une altitude forte et une accumulation faible se séparent bien des bassins versants d'ordre supérieurs qui présentent une accumulation importante pour une faible altitude.

4.4. BASSINS VERSANTS « RIVIERES »

Chaque bassin versant « rivière » tracé a été caractérisé par les attributs suivants :

- numéro d'enregistrement du bassin ;
- numéro du bassin ;
- aire 2D en m² ;
- périmètre 2D en mètres ;
- facteurs d'accumulation moyen, minimum et maximum ;

- nombre de pixels ;
- altitudes minimum, moyenne et maximum ;
- aire 3D en m².

Cette table contient 599 polygones.

Le réseau hydrographique initial contenant des segments non reliés au réseau principal, cette table contient des polygones inutiles. Aucune correction n'est possible car cela modifierai l'ensemble des calculs d'aire et de périmètre. La correction manuelle a été réalisée en vue de la construction d'un document d'affichage des bassins versants (document au format .wor, Illustration 11).

4.5. DOCUMENTS AU FORMAT .WOR

Dans un souci de rendu et d'impression simplifiée pour la DAF de Mayotte, trois documents au format .wor ont été réalisés par le BRGM :

- Poster au format A0 du réseau soumis à procédure Police de l'eau ;
- Document présentant les bassins versants rivière de Mayotte ;
- Document présentant le réseau police de l'eau avec les données numériques associées.

Ces documents sont imprimables directement ou modifiables à tout moment.

4.6. LES ONZE BASSINS VERSANTS PRINCIPAUX

Les 11 principaux cours d'eau de Mayotte ont fait l'objet d'une étude particulière.

Pour chacun d'eux, un ou plusieurs profils ont été tracés : profils en long du lit du cours d'eau et profils topographiques en travers du bassin versant.

Chaque bassin versant a été renseigné avec des informations de base.

Ces fiches de bassins versants sont présentées en Annexe.

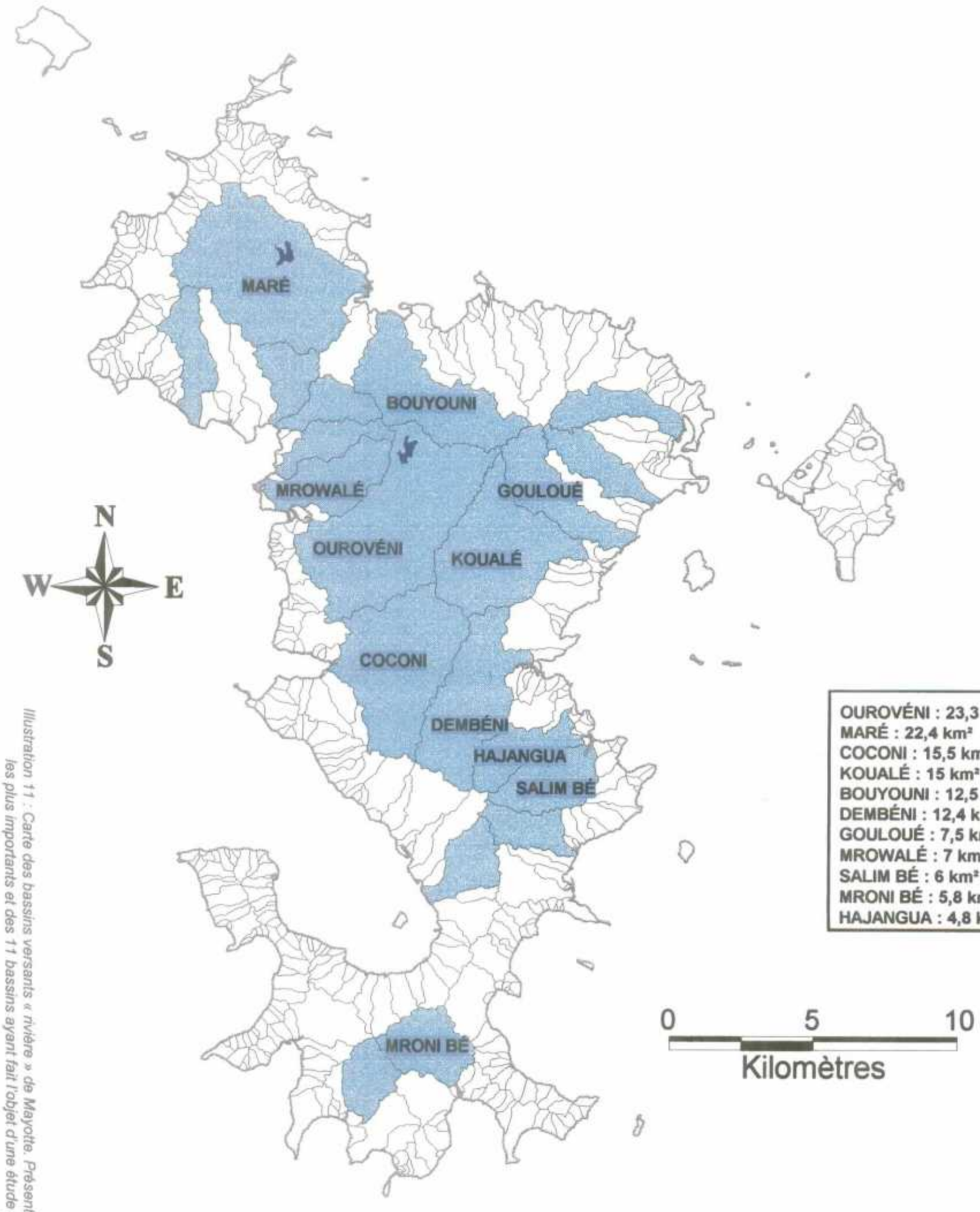


Illustration 11 : Carte des bassins versants « rivière » de Mayotte. Présentation des 20 bassins les plus importants et des 11 bassins ayant fait l'objet d'une étude particulière.

5. Analyses thématiques

A partir des cartes établies, il est possible de créer des analyses thématiques permettant de visualiser et de présenter des classes d'objets.

5.1. ANALYSE THÉMATIQUE « CONFLUENCES »

Les points de confluences ont été classés selon des tranches d'accumulation croissantes de façon a identifier facilement et visuellement l'évolution de leur importance au sein du bassin versant. Chaque tranche est représentée par une couleur de plus en plus foncée en relation avec l'augmentation de l'accumulation (Illustration 12).

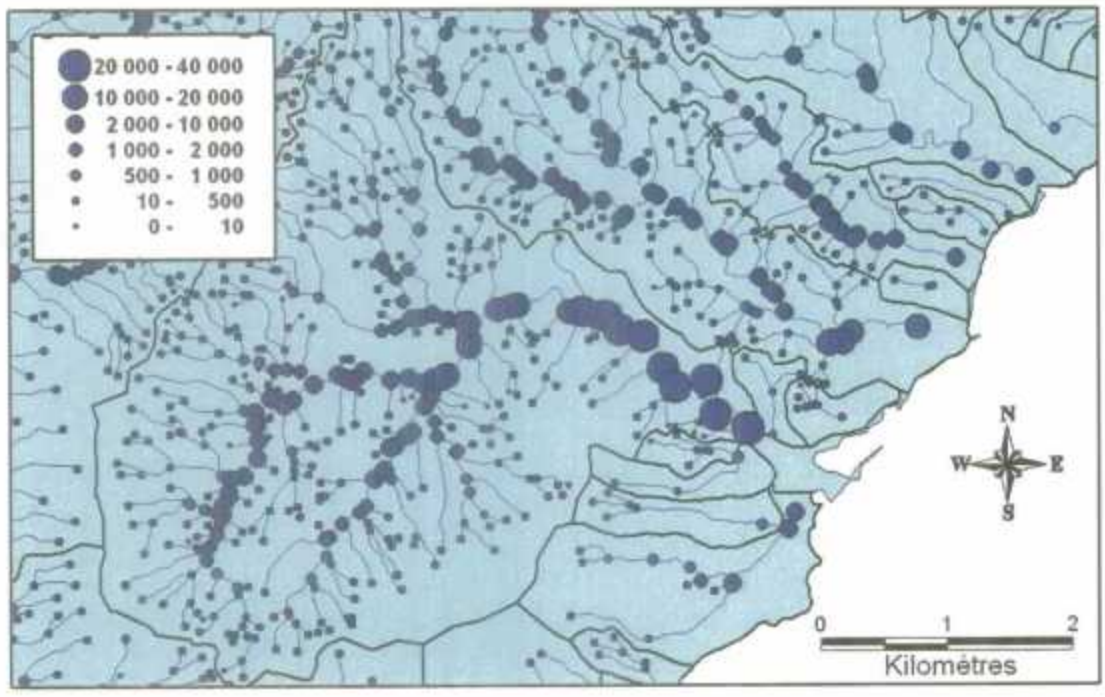


Illustration 12 : Analyse thématique sur les confluences, exemple du Mro Oua Koualé

5.2. ANALYSE THÉMATIQUE « BASSINS VERSANTS »

Les bassins versants unitaires ont été classés selon des tranches d'accumulation croissantes de façon à identifier facilement et visuellement l'évolution de leur importance au sein du réseau. Chaque tranche est représentée par une couleur de plus en plus foncée en relation avec l'augmentation de l'accumulation (Illustrations 13 et 14).

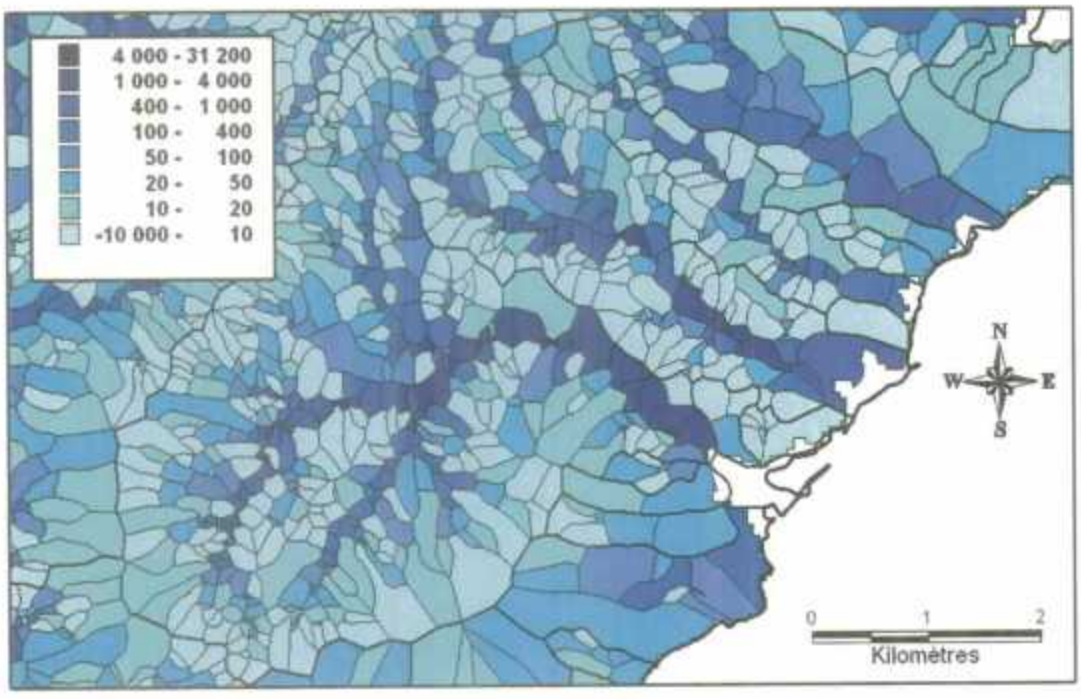


Illustration 13 : Analyse thématique sur les bassins versants, exemple du bassin du Mro Oua Koualé

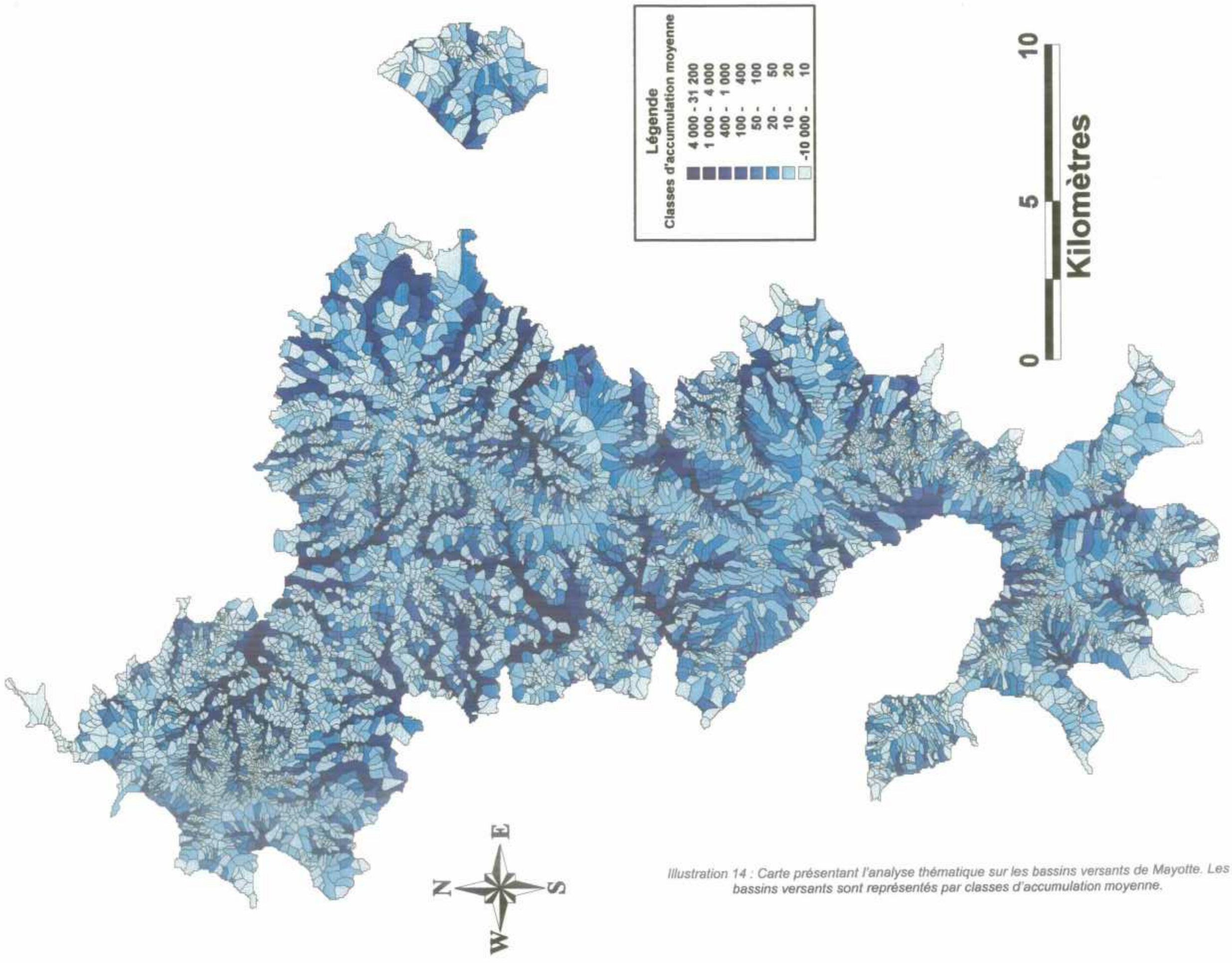


Illustration 14 : Carte présentant l'analyse thématique sur les bassins versants de Mayotte. Les bassins versants sont représentés par classes d'accumulation moyenne.

6. Contrôle terrain

Les résultats obtenus à l'aide des méthodes informatiques automatiques ont été validés par des contrôles terrain sur les zones urbaines et montagneuses. Ce contrôle a consisté à comparer les limites calculées précédemment et la réalité du terrain pour affiner le rendu cartographique final. Plusieurs réunions ont été nécessaires pour faire le bilan et apporter les retouches nécessaires au modèle proposé.

Une sortie de terrain commune le 22 mars 2005 a permis de recadrer le projet. Après avoir parcouru quelques ravines jugées pertinentes, il est apparu que la définition de la ravine n'était pas adaptée à la réalité de terrain. En effet, d'un point de vue géomorphologique, l'ensemble des ravines de Mayotte, de l'amont jusqu'à l'aval, correspondent à cette définition : présence d'un dénivelé et d'un substrat différencié entre les berges. Par exemple, plusieurs ravines de très faible ampleur identifiées sur le terrain présentent une accumulation de grains ou de galets arrondis en fond de lit mineur, ce qui manifeste d'un fonctionnement hydrologique actif. Or ces petites ravines ne sont pas concernées par les enjeux attribués aux véritables cours d'eau.

L'application de cette définition obligerait à réglementer tous les brins du réseau hydrographique, ce qui n'a aucun sens.

Ces critères de base étant trop extensifs, il est proposé :

- de préciser les critères initiaux : présence d'une accumulation de blocs arrondis en lit mineur témoignant de la puissance potentielle du cours d'eau, etc.
- de créer des critères additionnels : quantification de la largeur du lit mineur (1 m), etc.

Une banque de données sera mise en place par la DAF de Mayotte afin de répertorier et de classer les ravines identifiées sur le terrain. Une mise à jour annuelle des données informatiques sera réalisée.

Pour ce rendu 2005, la limite d'accumulation prise en compte est de 70. Cette valeur a été choisie après la visite d'une population de ravines. Le réseau hydrographique actuel soumis à procédure ne présente donc jamais une accumulation inférieure à 70. Le travail de terrain et la mise à jour des données ultérieurs amèneront peut-être à modifier cette valeur.

Conclusion

En vue de la représentation des cours d'eau au sens de la police de l'eau à Mayotte, une méthode de définition des limites géographiques théoriques a été mise en œuvre par le BRGM et le service de la DAF :

- établissement de différentes cartes à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT) et du réseau hydrographique au format Mapinfo grâce à des méthodologies informatiques automatiques ;
- valorisation de chaque bassin versant et du réseau hydrographique par des informations liées aux écoulements (tables de données au format MAPINFO) ;
- correction par comparaison avec le Scan 25 IGN et observations de terrain ;
- mise en place d'une limite à partir d'un échantillon de la population de ravines ;
- application de cette limite à l'ensemble de l'île : obtention d'une carte présentant la délimitation des zones « police de l'eau » ;
- contrôle final sur le terrain ;
- rédaction du rapport, mise en page des différents documents.

Suite à cette étude, le service de la DAF chargé de la police de l'eau dispose d'un outil cartographique qui délimite les zones d'application de la réglementation et de tables de données relatives aux bassins versants concernés. Ce travail sera suivi d'une consolidation des données par une validation progressive de la carte. En effet, l'ensemble de ce travail étant basé sur des données manquant de précision (MNT, réseau hydrographique initial), le résultat en est largement affecté. De plus, les enjeux liés à cette cartographie vont apparaître progressivement avec la multiplication des opérations soumises à la loi sur l'eau (travaux, prélèvements, etc.). Cet outil sera affiné à l'avenir pour apporter une aide à la décision de l'autorité administrative mais aussi une information préalable aux usagers des ravines et rivières, grâce à la mise en place d'une banque de données mise à jour annuellement.

Bibliographie

Audru J.-C., Bitri A., Desprats J.-F., Mathon C., Maurillon N., Sabourault P., Sedan M. et Sedan O. (2002) – Projet risques naturels et érosion à Mayotte ; résultats d'année 1. Rapport BRGM RP-51738-FR.

Fairfield J. and Leymarie P., 1991, The determination and analysis of drainage networks from grid digital elevation models.

Jenson S. K. and J. O. Domingue. 1988. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis, Photogrammetric Engineering and Remole Sensing. Vol. 54, No. 11, November 1988, pp. 1593-1600.

MNT de Mayotte au pas de 50 m : © IGN 1996-1997

Tables Mapinfo : SIG Inter-services publics de Mayotte

Scan 25 © IGN 1993

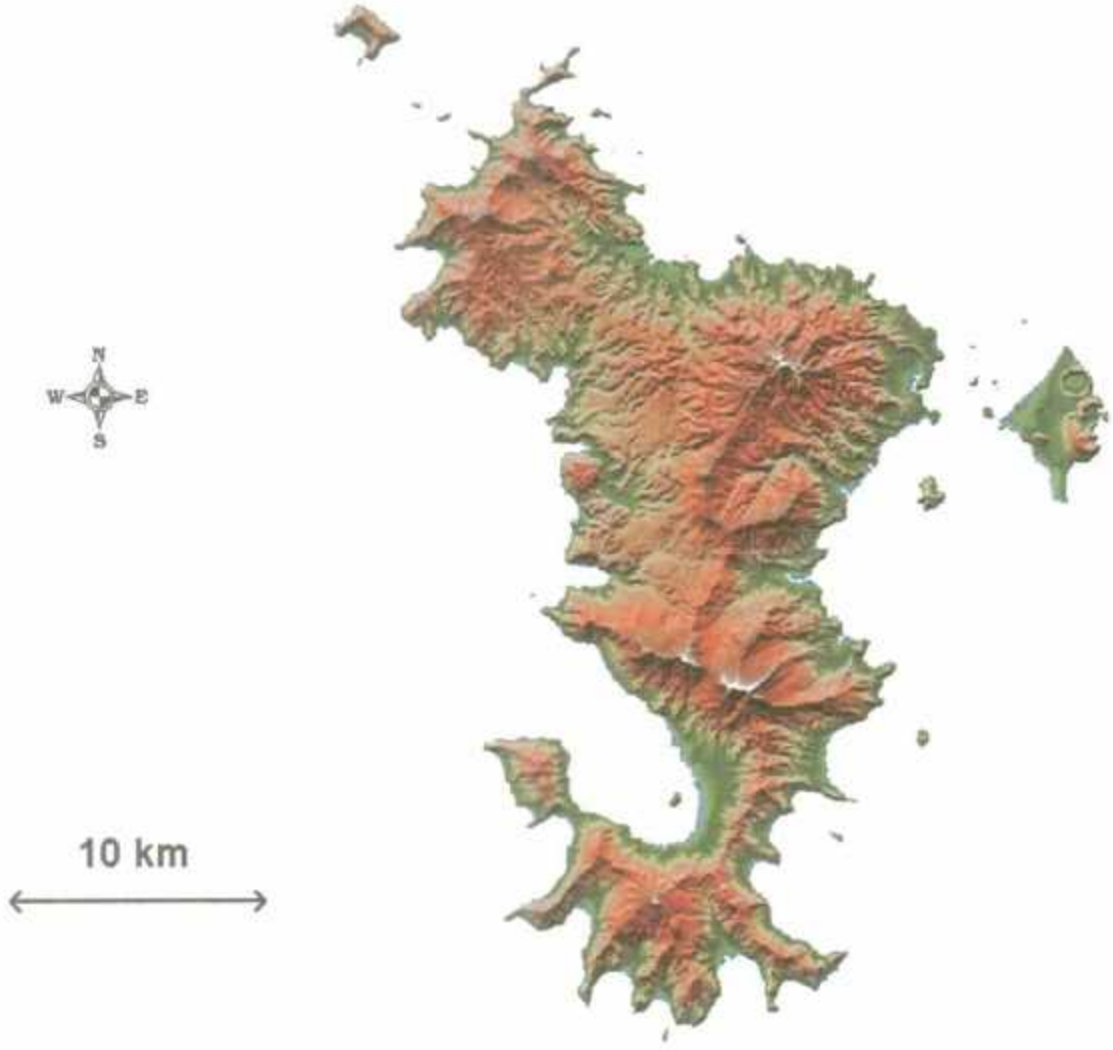
Strahler, A.N. 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. Transactions of the American Geophysical Union, 38: 913-920.

Tarboton D. G., R. L. Bras, I. Rodriguez-Iturbe. 1991. On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data, Hydrological Processes. Vol. 5, pp. 81-100.

Annexes

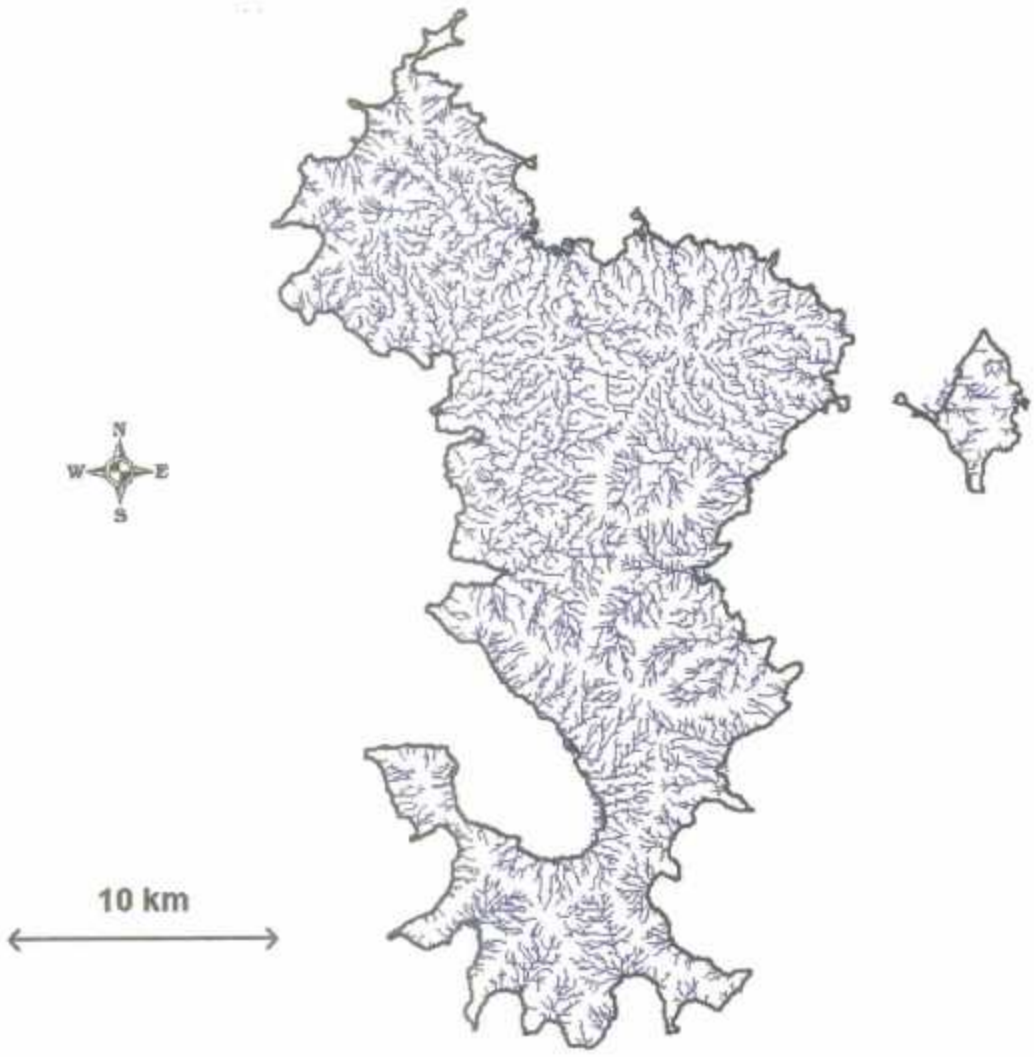
Annexe 1 :

MNT de Mayotte au pas de 50 m



Annexe 2 :

Carte des ravines de Mayotte



Annexe 3 :

Etudes particulières des 10 bassins versants principaux de Mayotte

Le bassin versant du Mro Oua Ourovéni

Affluents : *Mro Oua Goméni, Mro Oua Haoutoungou*

Ville principale : *Combani*

Superficie : *24,1 km²*

Périmètre : *25,1 km*

Longueur thalweg principal : *13,9 km*

Longueur drainance : *123,7 km*

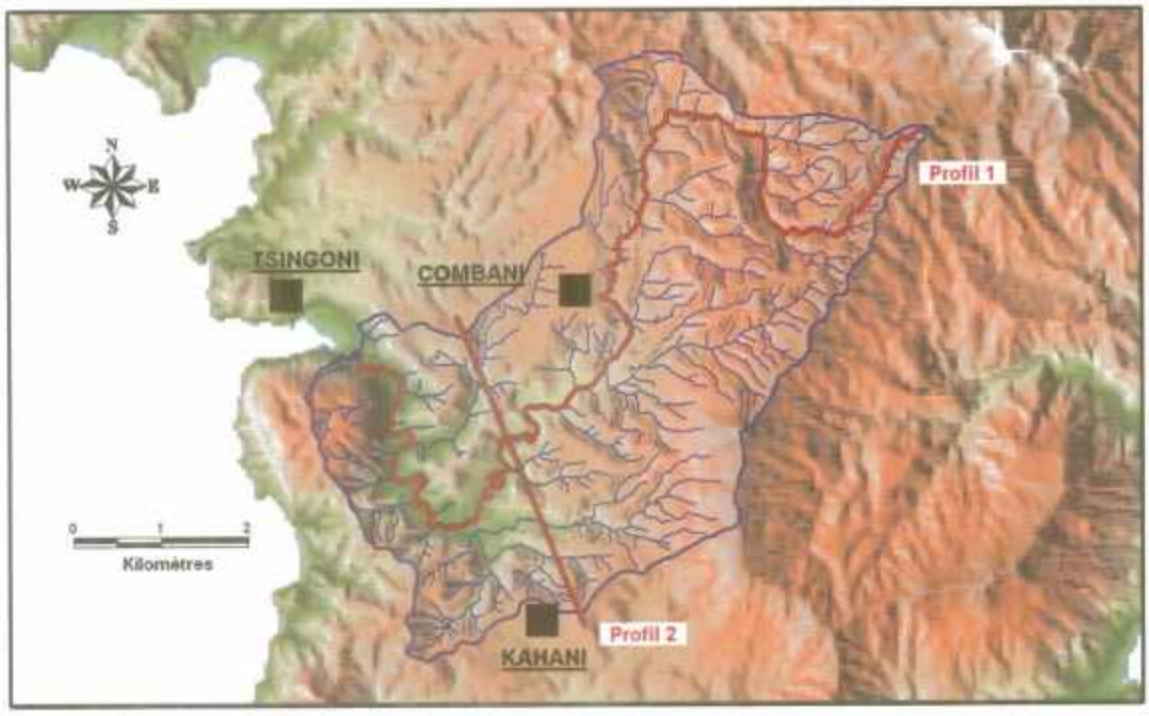
Altitude maximale : *477 m*

Estimation débit de crues :

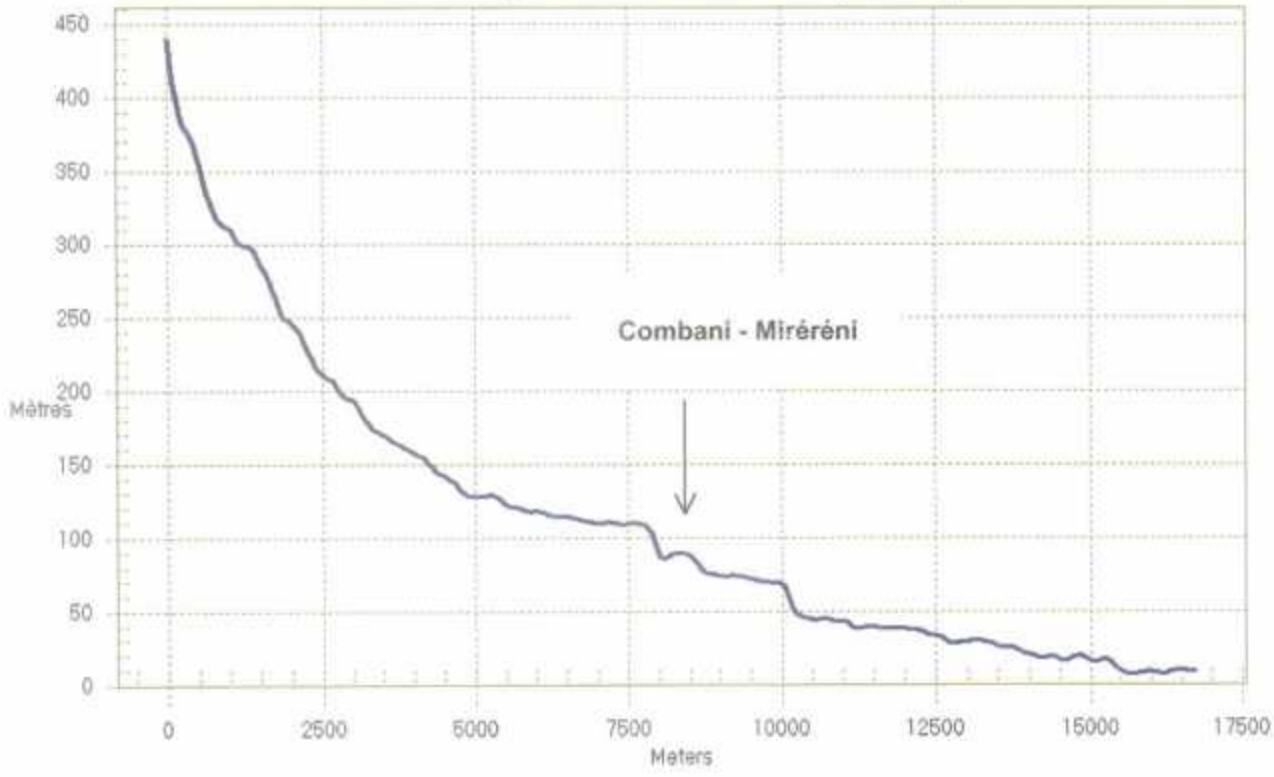
- décennale : *193 m^3/s*
- centennale : *435 m^3/s*

Précipitations :

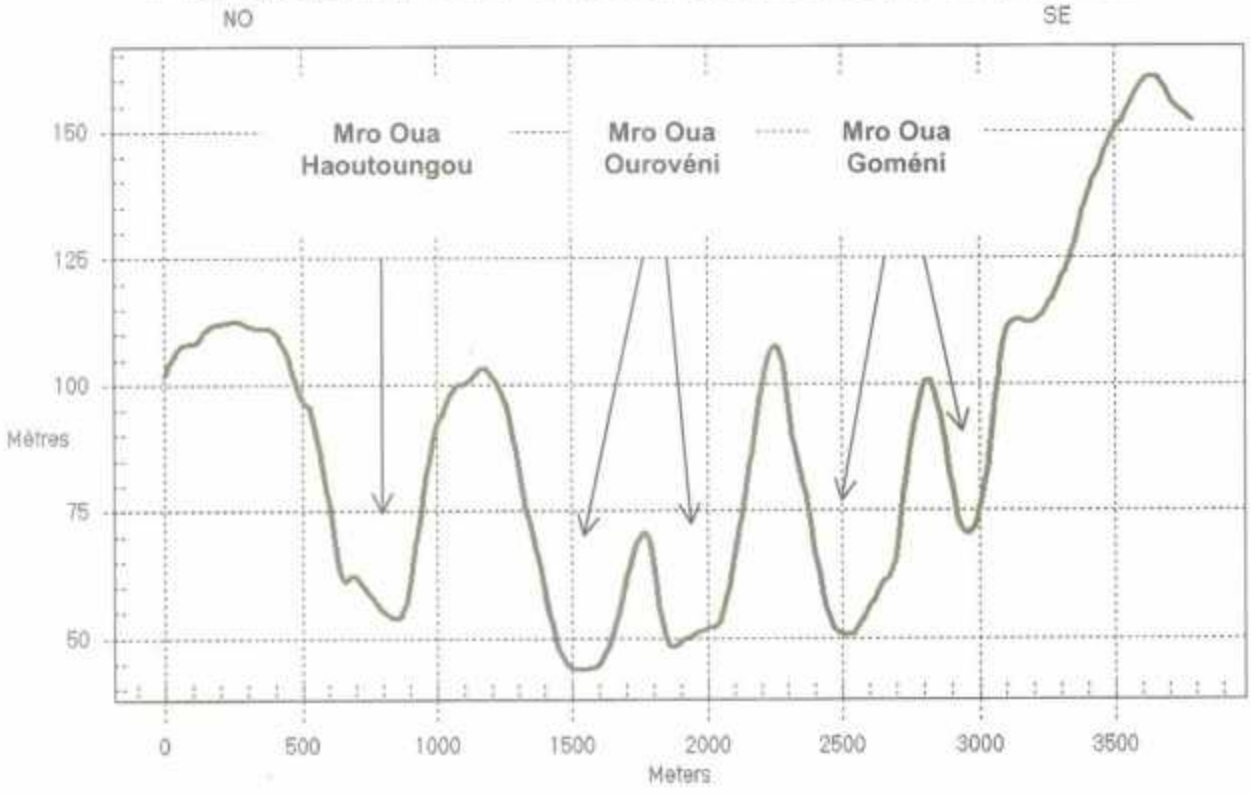
- Cumul annuel (maximum) : *2649 mm*
- Cumul annuel (moyenne) : *1796 mm*
- Mois le plus sec (minimum) : *0 mm*
- Mois le plus sec (moyenne) : *26,6 mm*



Profil en long du Mro Oua Ourovéni (Profil 1)



Profil topographique N/O - S/E du bassin versant du Mro Oua Ourovéni



Le bassin versant du Mro Oua Maré

Affluents : *Mro Oua Bandrani, Mro Oua Massoulaha, Mro Oua Tanabé, Mro Oua Mjihari, Mro Oua Mouhogoni Mro Oua Bizijou, Mro Oua Mapouéra*

Ville principale : *Dzoumonyé*

Superficie : *22,8 km²*

Périmètre : *22,8 km*

Longueur thalweg principal : *7,1 km*

Longueur drainance : *166 km*

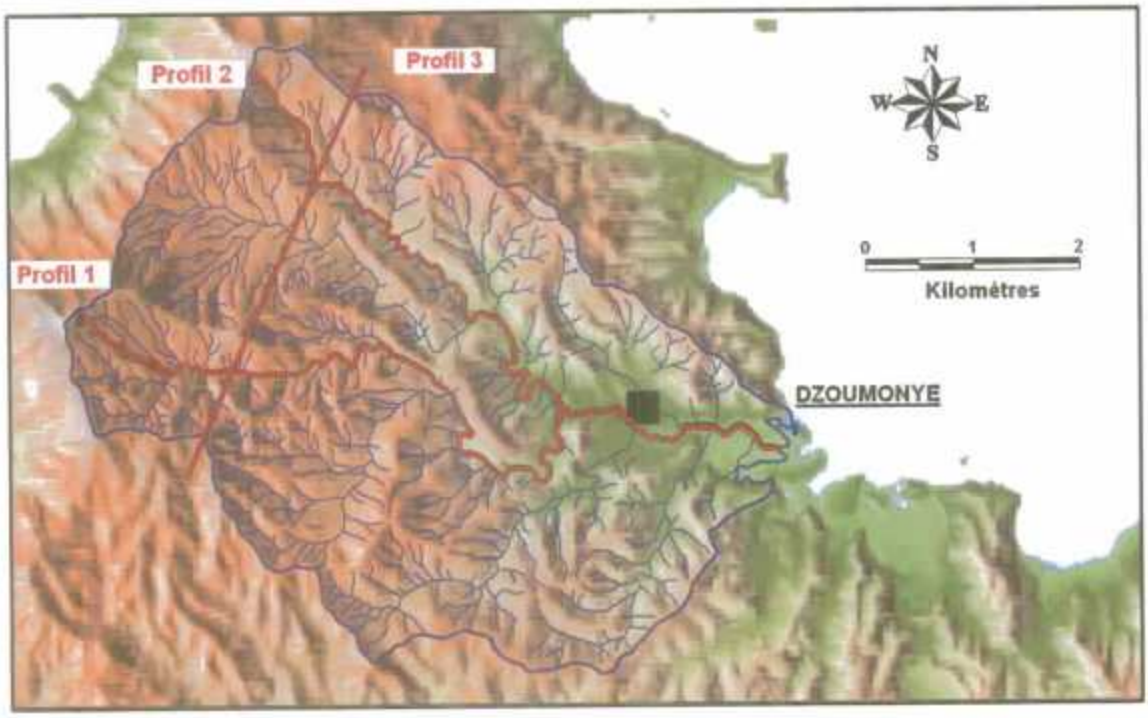
Altitude maximale : *496 m*

Estimation débit de crues :

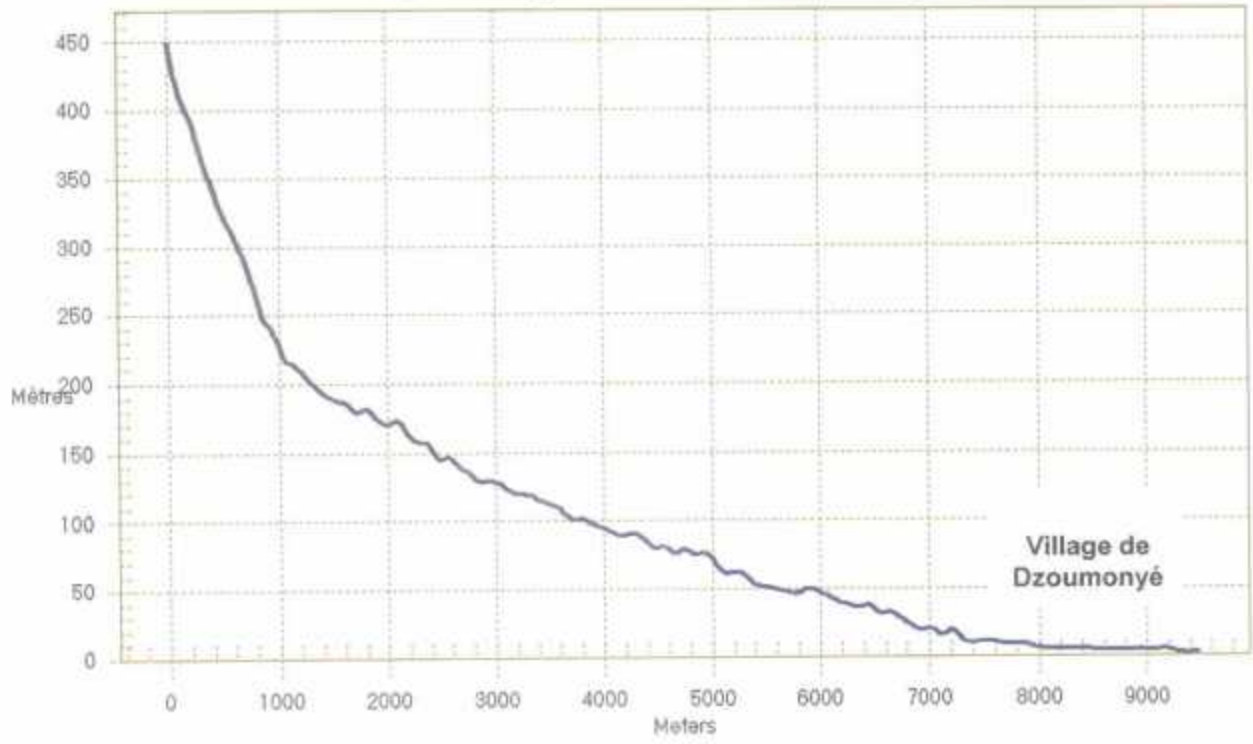
- décennale : *170 m³/s*
- centennale : *383 m³/s*

Précipitations :

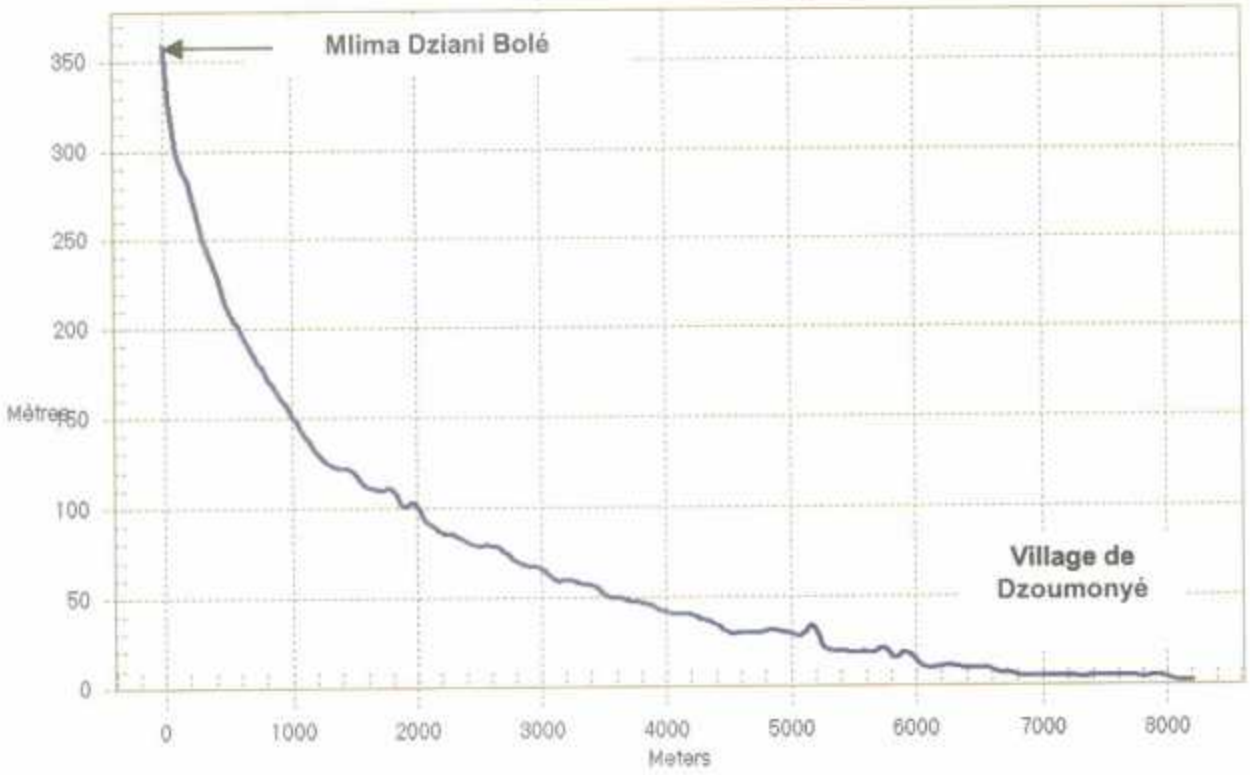
- Cumul annuel (maximum) : *2598 mm*
- Cumul annuel (moyenne) : *1690 mm*
- Mois le plus sec (minimum) : *0 mm*
- Mois le plus sec (moyenne) : *21,8 mm*



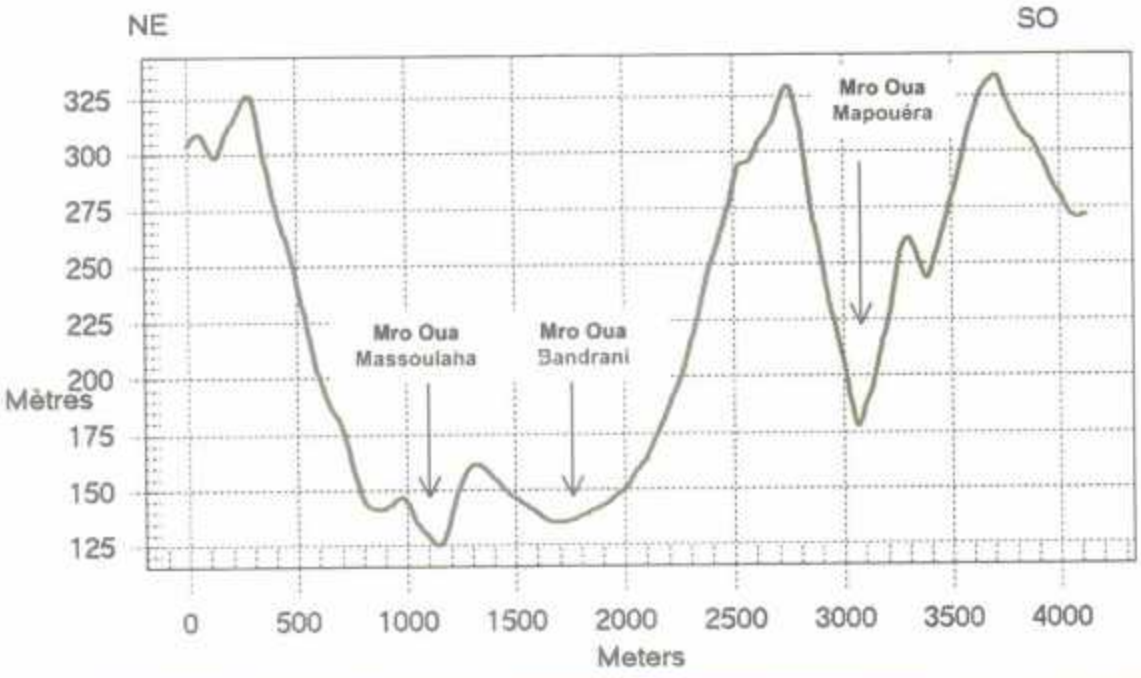
Profil en long du Mro Oua Maré (Profil 1)



Profil en long du Mro Oua Maré (Profil 2)



Profil topographique N/E - S/O du bassin versant du Mro Oua Maré (Profil 3)



Essai de représentation du bassin versant du Mro Oua Maré en 3 dimensions.

Vue vers le nord-ouest. Logiciel Vertical Mapper. Scan ©25 IGN

Le bassin versant du Mro Oua Coconi

Affluents : *Mroni Rouaka, Mro Oua Hachiké*

Ville principale : *Coconi-Barakani*

Superficie : *18 km²*

Périmètre : *20,5 km*

Longueur thalweg principal : *10,3 km*

Longueur drainance : *104,9 km*

Altitude maximale : *581 m*

Estimation débit de crues :

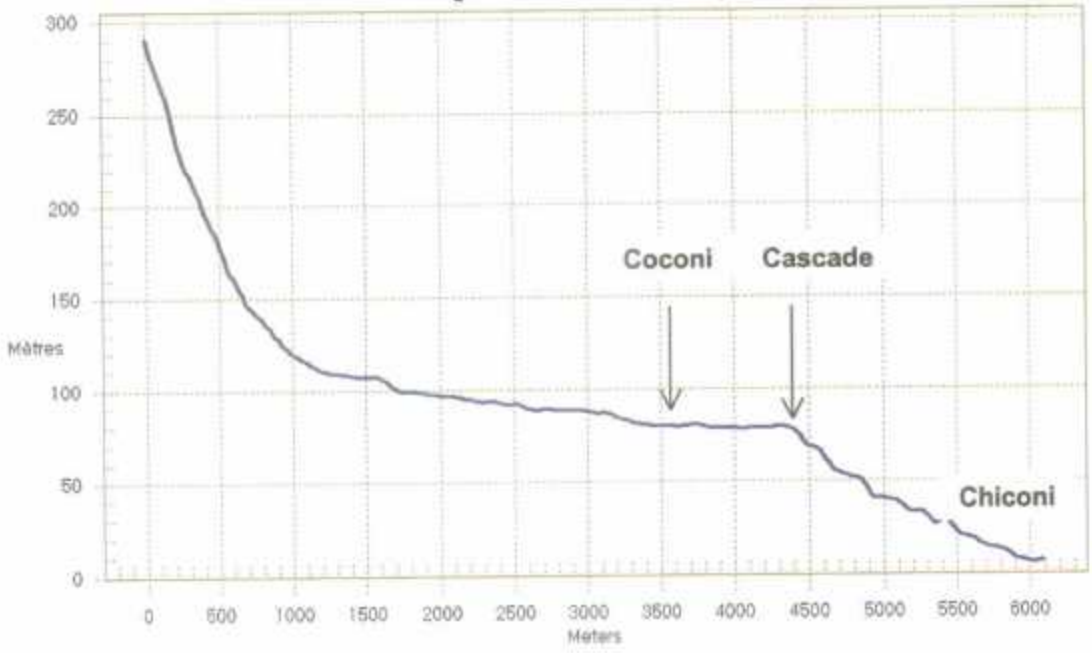
- décennale : *188 m^3/s*
- centennale : *425 m^3/s*

Précipitations :

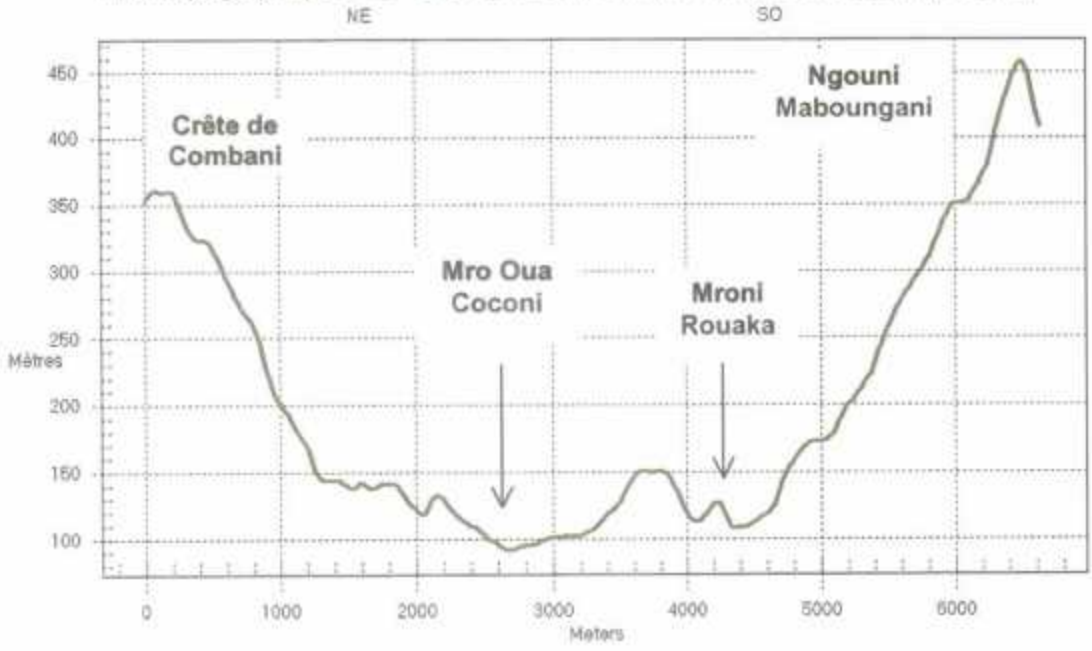
- Cumul annuel (maximum) : *2533 mm*
- Cumul annuel (moyenne) : *1638 mm*
- Mois le plus sec (minimum) : *8 mm*
- Mois le plus sec (moyenne) : *18 mm*

Profil en long du Mroni Rouaka (affluent du Mro Oua Coconi) (Profil 1)

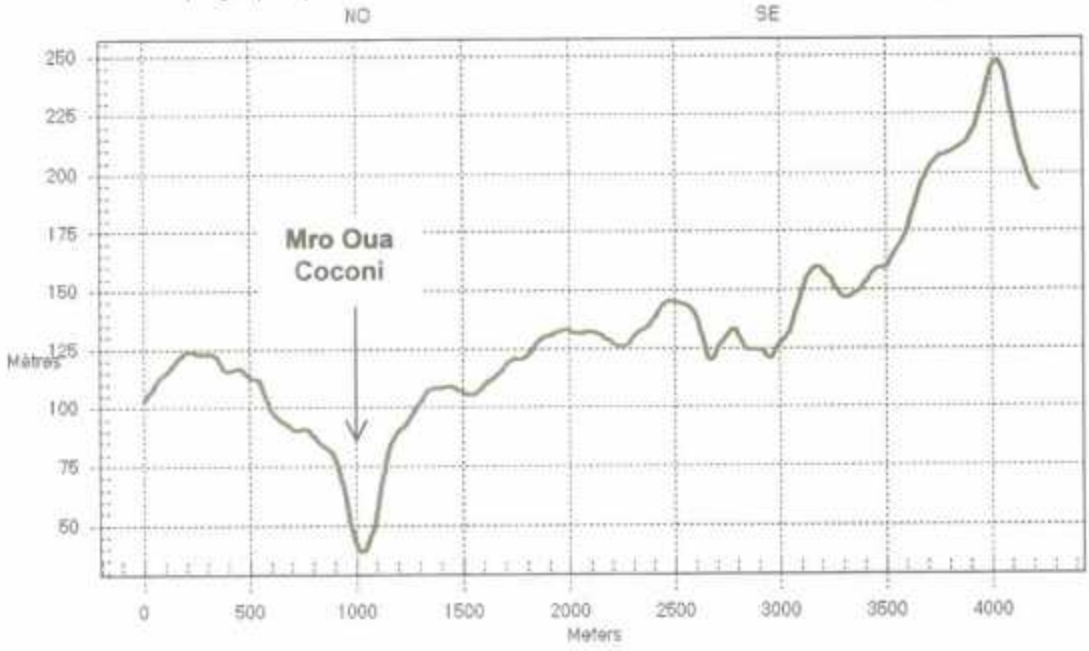
Profil en long du Mro Oua Coconi (Profil 2)



Profil topographique N/E - S/O du bassin versant du Mro Oua Coconi (Profil 3)



Profil topographique N/O - S/E du bassin versant du Mro Oua Coconi (Profil 4)



Le bassin versant du Mro Oua Koualé

Affluents : /

Ville principale : *Koualé Légion*

Superficie : *15,4 km²*

Périmètre : *19,7 km*

Longueur thalweg principal : *9 km*

Longueur drainance : *90,6 km*

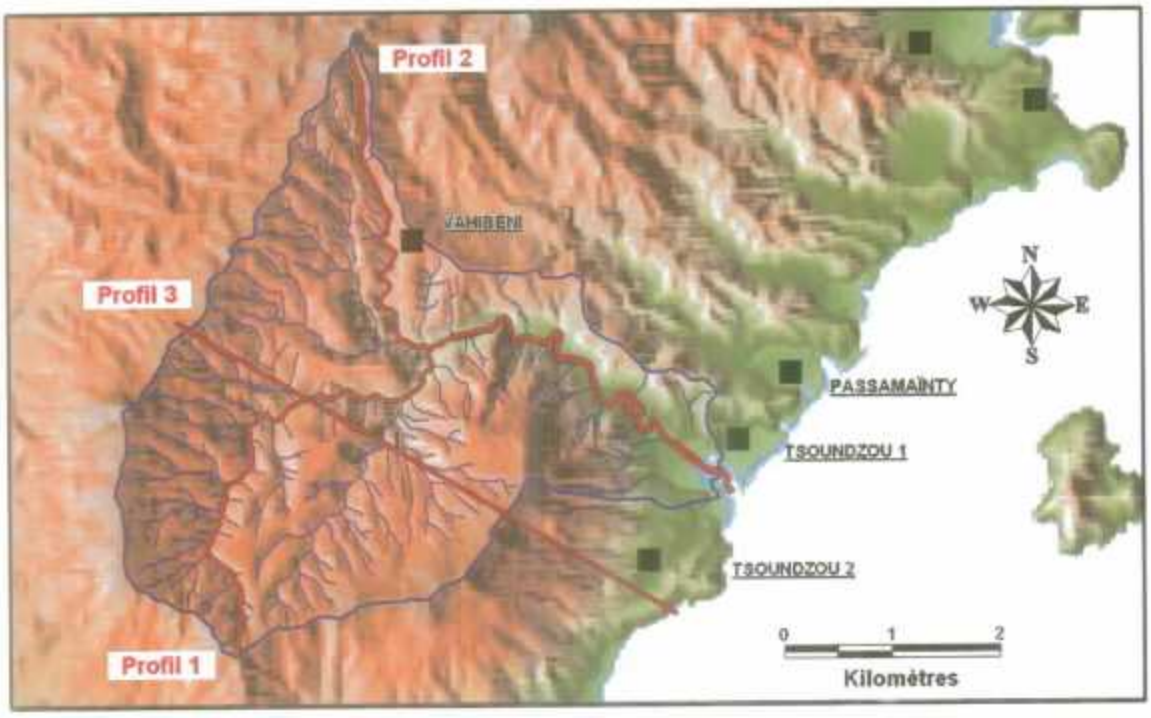
Altitude maximale : *477 m*

Estimation débit de crues :

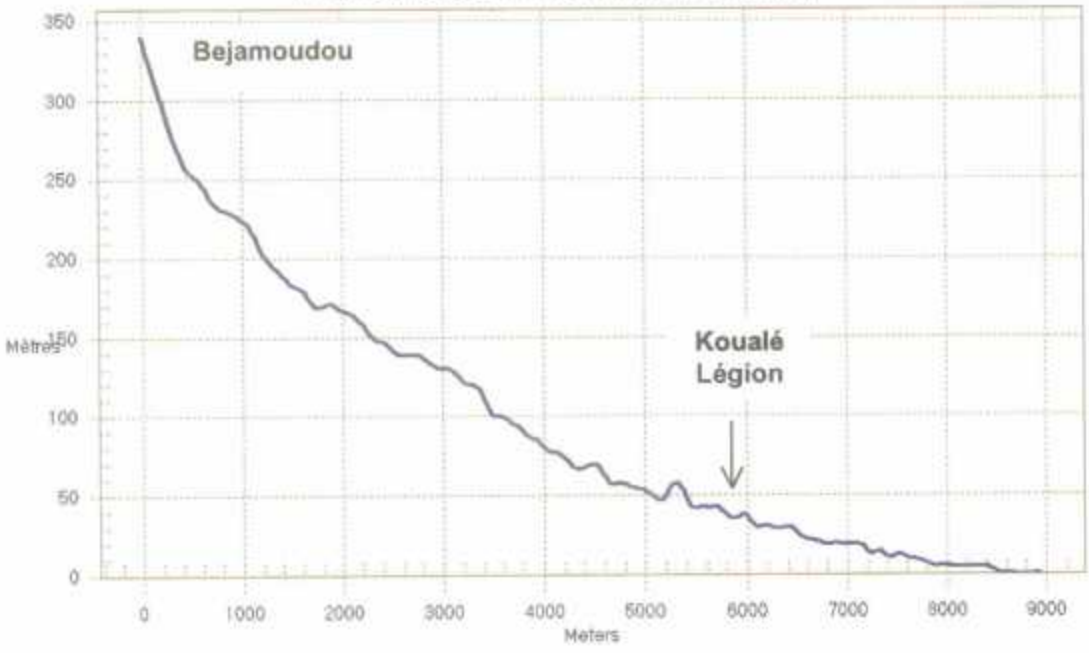
- décennale : *142 m³/s*
- centennale : *321 m³/s*

Précipitations :

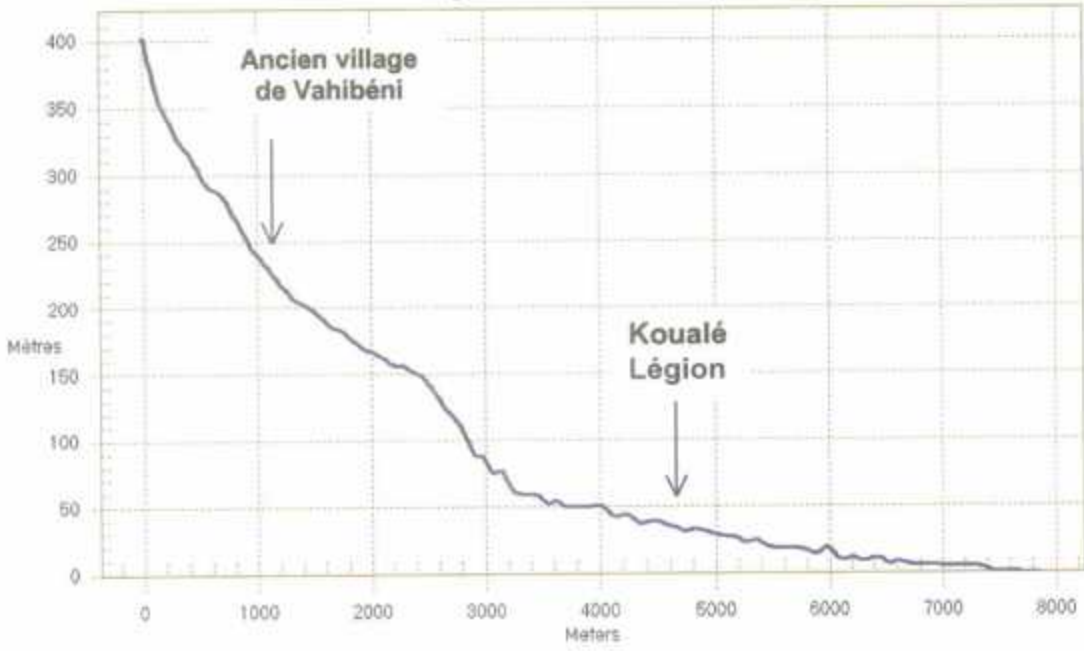
- Cumul annuel (maximum) : *2214 mm*
- Cumul annuel (moyenne) : *1248 mm*
- Mois le plus sec (minimum) : *1,2 mm*
- Mois le plus sec (moyenne) : *12,7 mm*



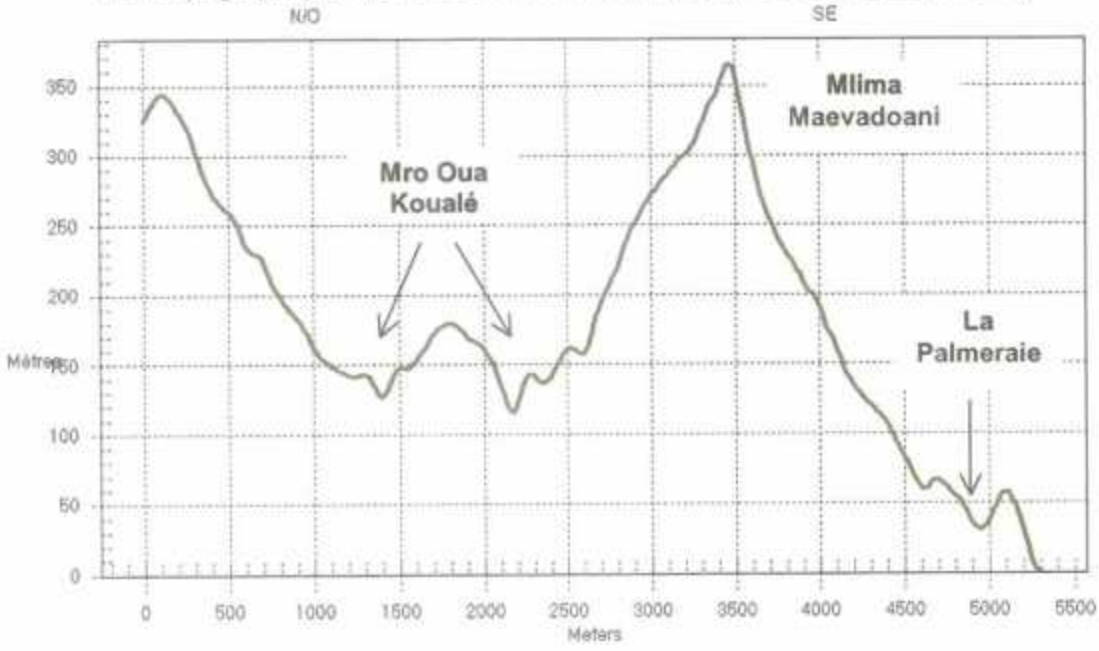
Profil en long du Mro Oua Koualé (Profil 1)



Profil en long du Mro Oua Koualé (Profil 2)



Profil topographique N/O - S/E du bassin versant du Mro Oua Koualé (Profil 3)



Le bassin versant du Mro Oua Gouloué

Affluents : /

Ville principale : *Passamaïnty*

Superficie : *7,1 km²*

Périmètre : *14,8 km*

Longueur thalweg principal : *6,1 km*

Longueur drainance : *46,4 km*

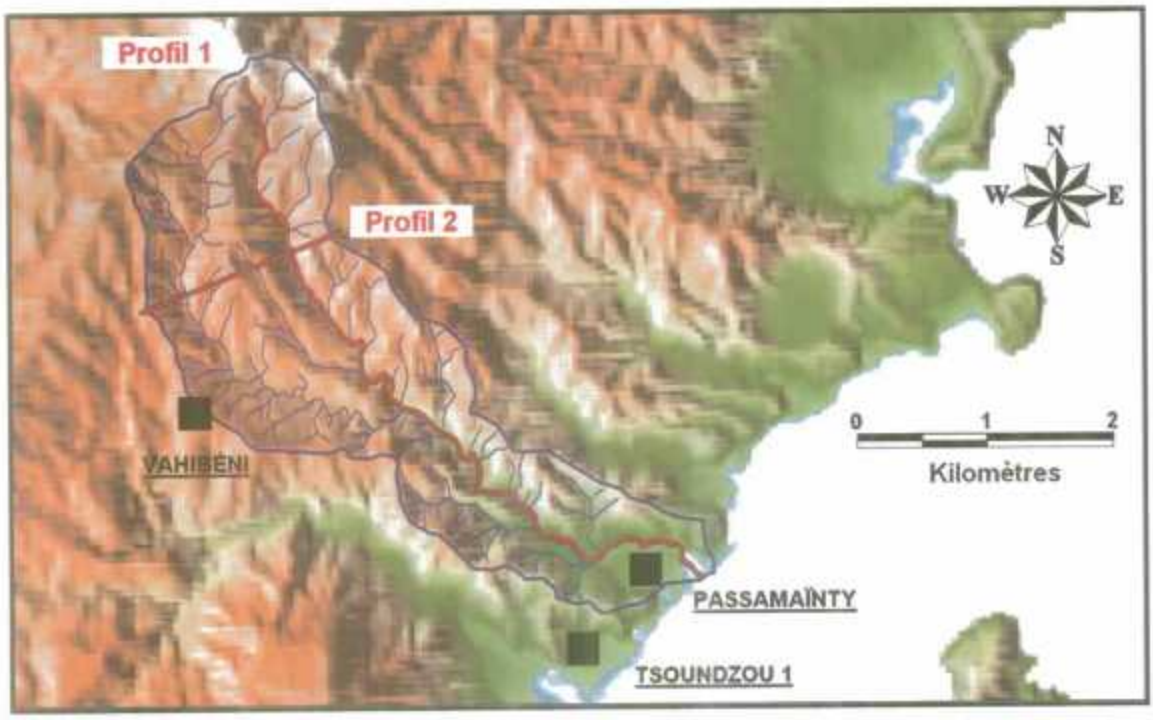
Altitude maximale : *572 m*

Estimation débit de crues :

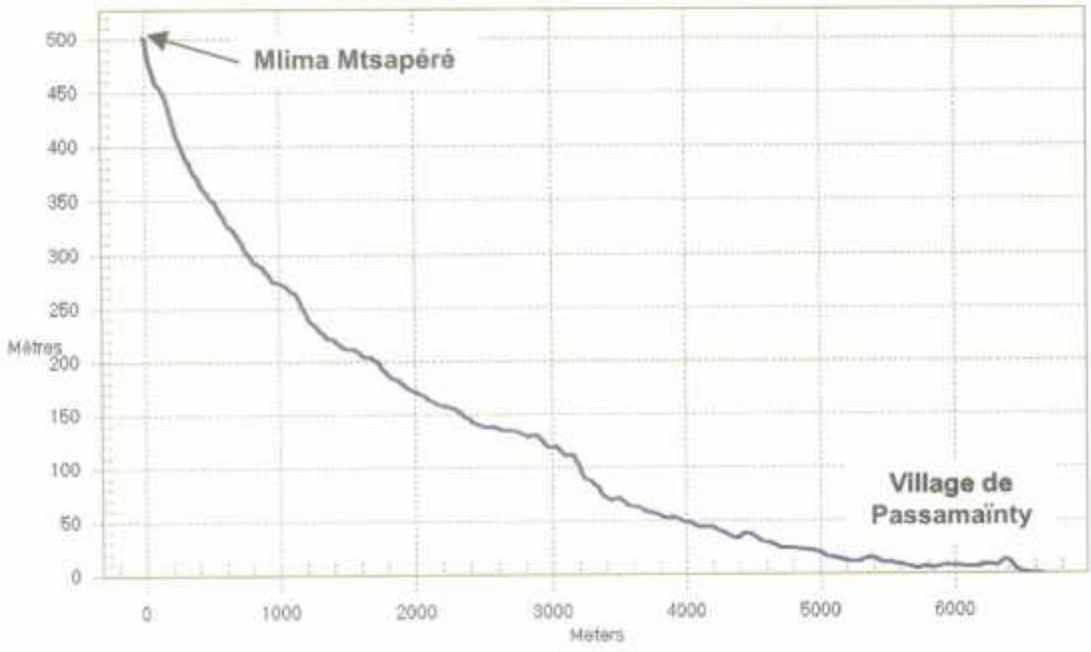
- décennale : *80 m³/s*
- centennale : *181 m³/s*

Précipitations :

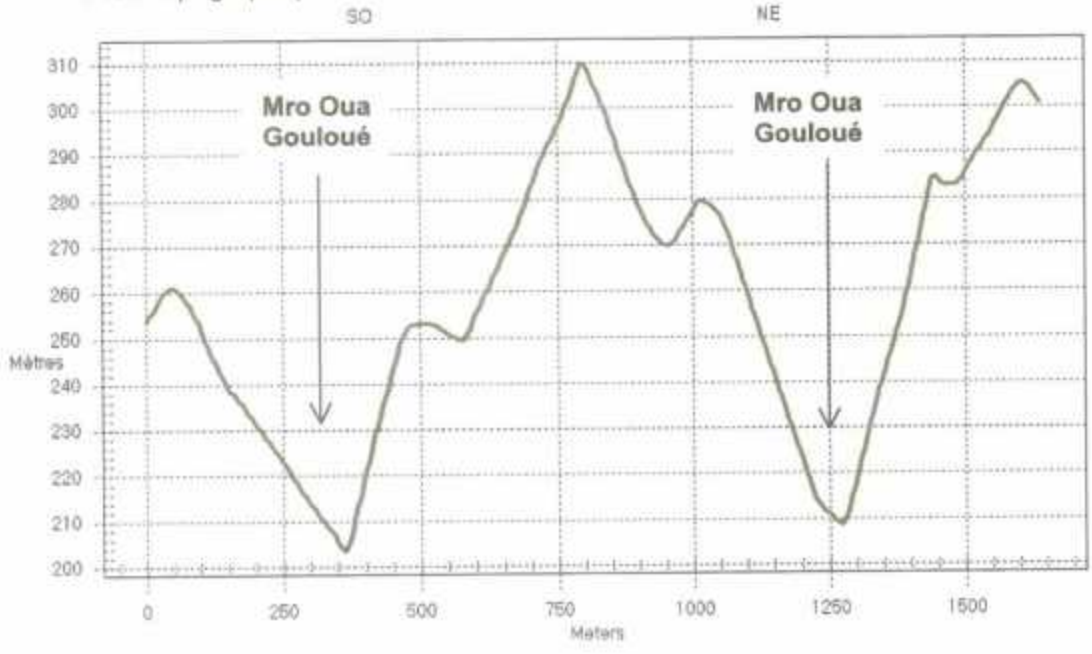
- Cumul annuel (maximum) : *1628 mm*
- Cumul annuel (moyenne) : *1238 mm*
- Mois le plus sec (minimum) : *3 mm*
- Mois le plus sec (moyenne) : *18,1 mm*



Profil en long du Mro Oua Gouloué (Profil 1)



Profil topographique S/O - N/E du bassin versant du Mro Oua Gouloué (Profil 2)



Le bassin versant du Mro Oua Dembéni

Affluents : *Mro Oua Songoro, Mbili*

Ville principale : *Dembéni*

Superficie : *7,1 km²*

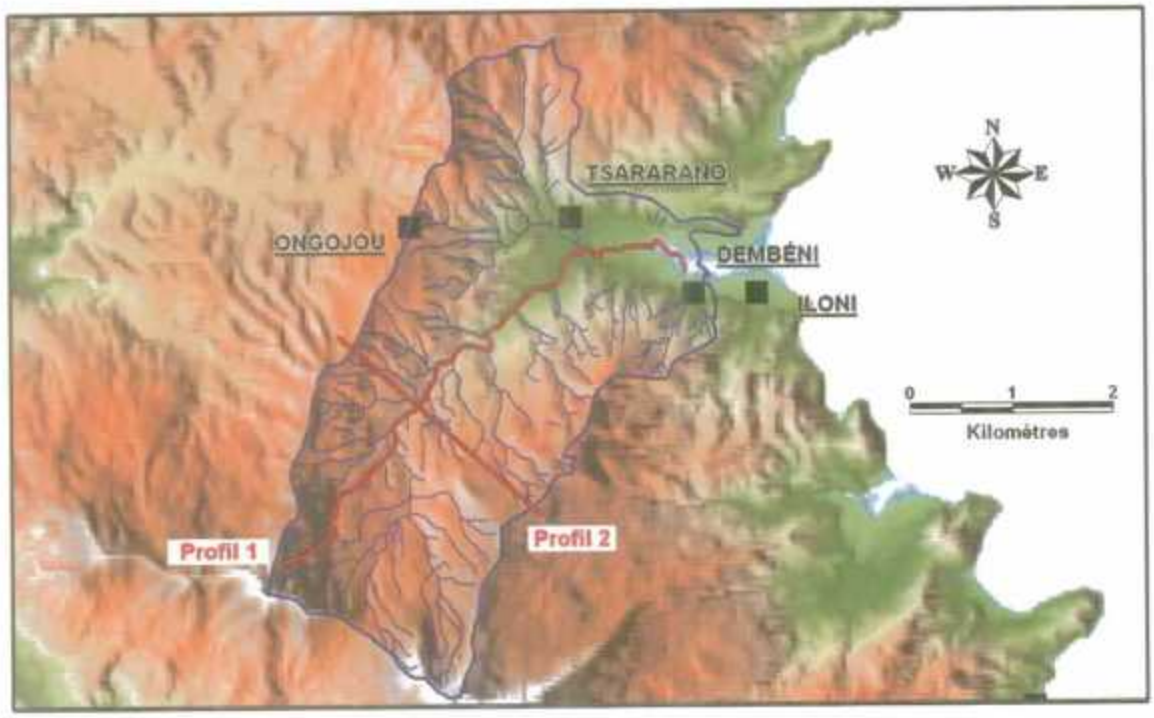
Périmètre : *14,8 km*

Longueur thalweg principal : *7 km*

Altitude maximale : *660 m*

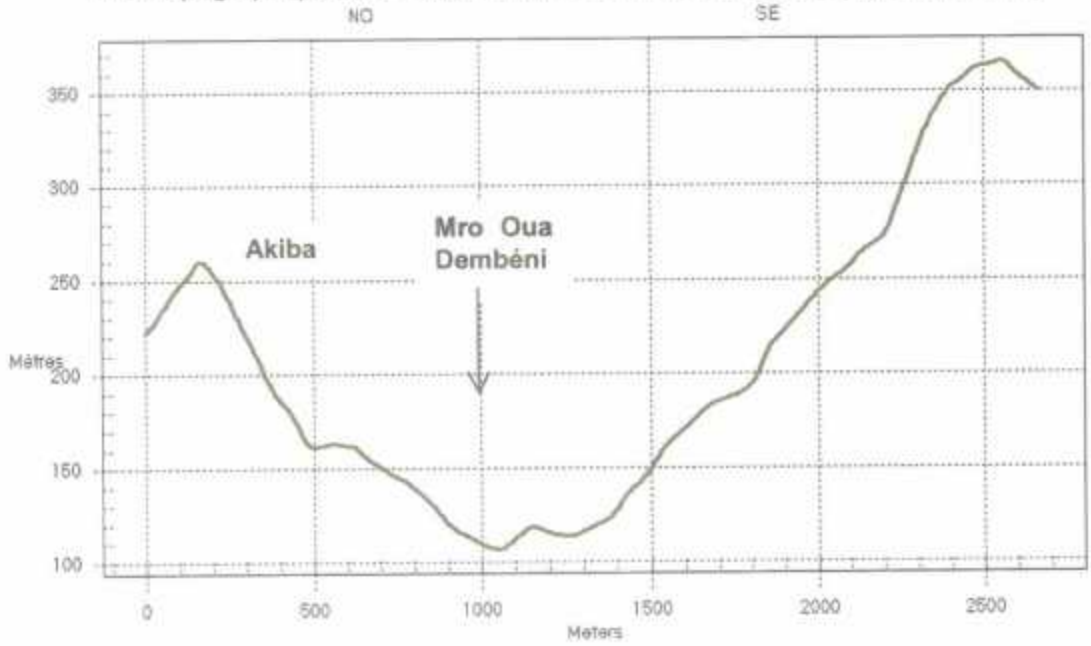
Estimation débit de crues :

- décennale : *130 m³/s*
- centennale : *260 m³/s*



Profil en long du Mro Oua Dembéni (Profil 1)

Profil topographique N/O - S/E du basin versant du Mro Oua Dembéni (Profil 2)



Le bassin versant du Mro Oua Bouyouni

Affluents : /

Ville principale : *Bouyouni*

Superficie : *9,7 km²*

Périmètre : *19 km*

Longueur thalweg principal : *8,7 km*

Longueur drainance : *63,9 km*

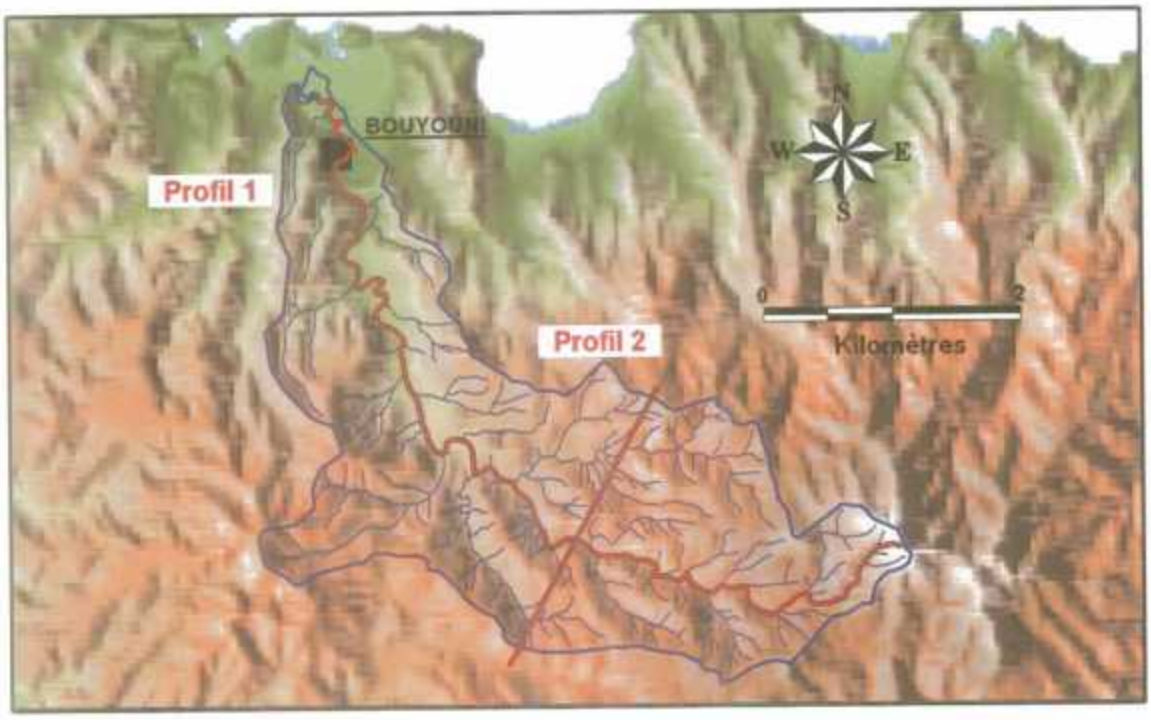
Altitude maximale : *570 m*

Estimation débit de crues :

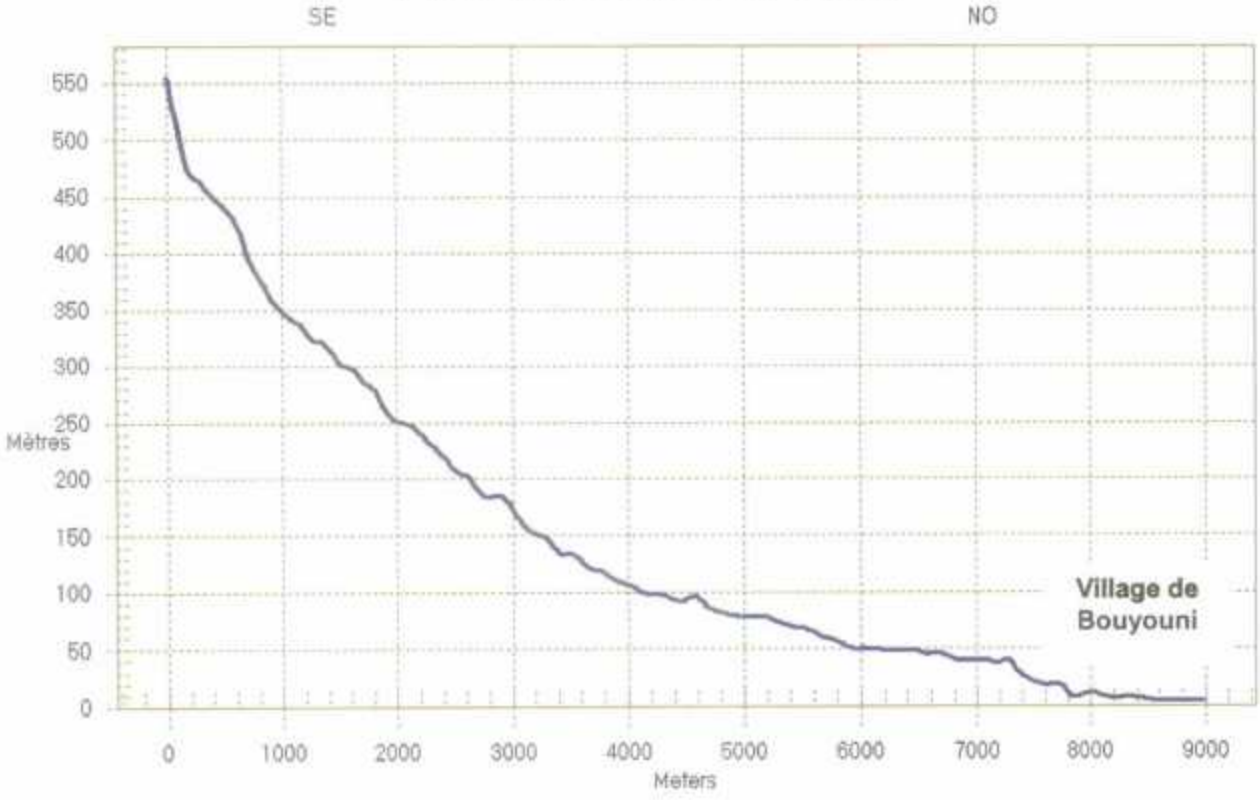
- décennale : *95 m³/s*
- centennale : *215 m³/s*

Précipitations :

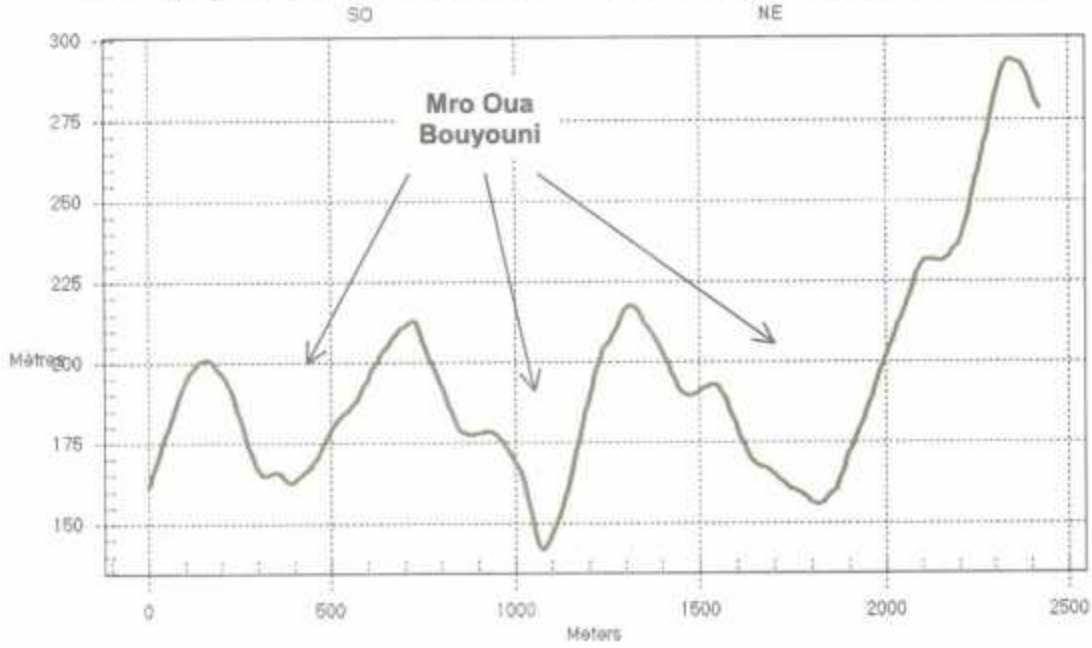
- Cumul annuel (maximum) : *2598 mm*
- Cumul annuel (moyenne) : *1690 mm*
- Mois le plus sec (minimum) : *0 mm*
- Mois le plus sec (moyenne) : *21.8 mm*



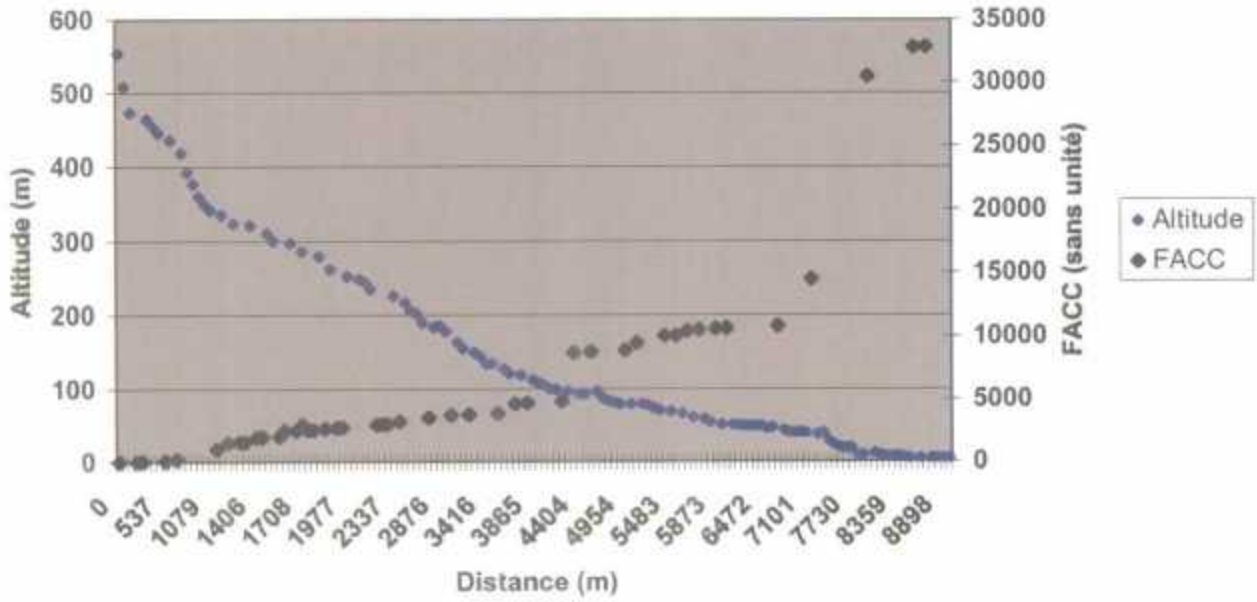
Profil en long du Mro Oua Bouyouni **(Profil 1)**



Profil topographique S/O - N/E du bassin versant du Mro Oua Bouyouni (Profil 2)

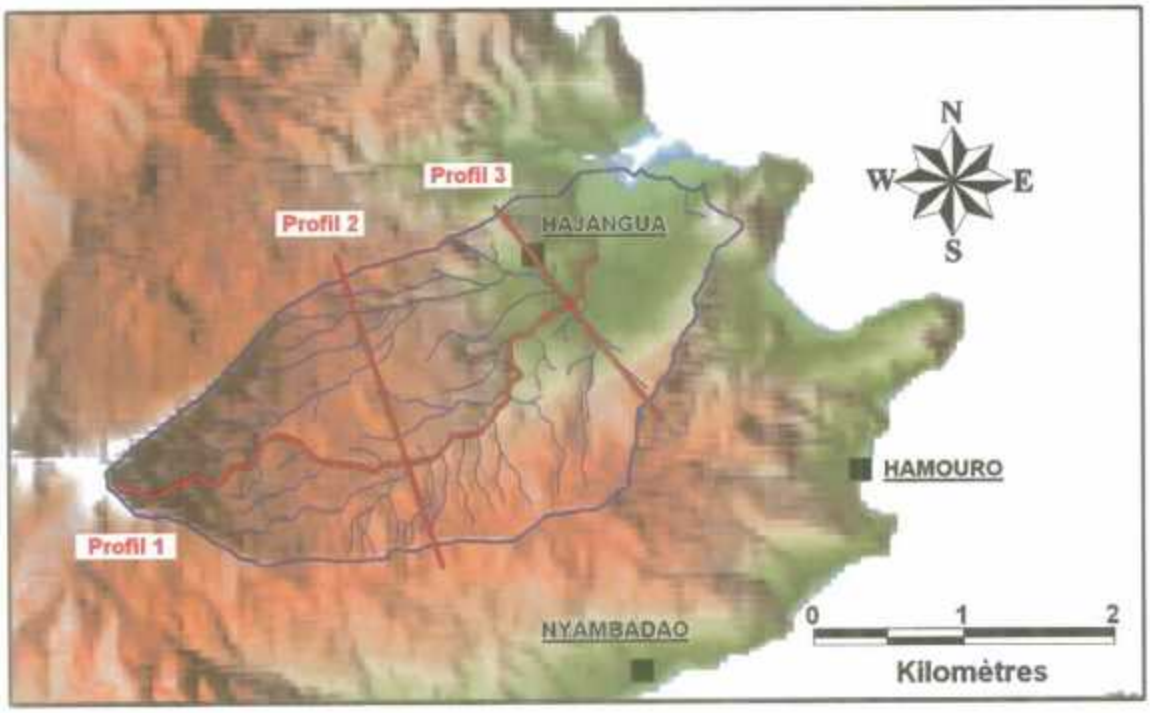


Comparaison entre l'altitude du Mro Oua Bouyouni et l'évolution du facteur d'accumulation

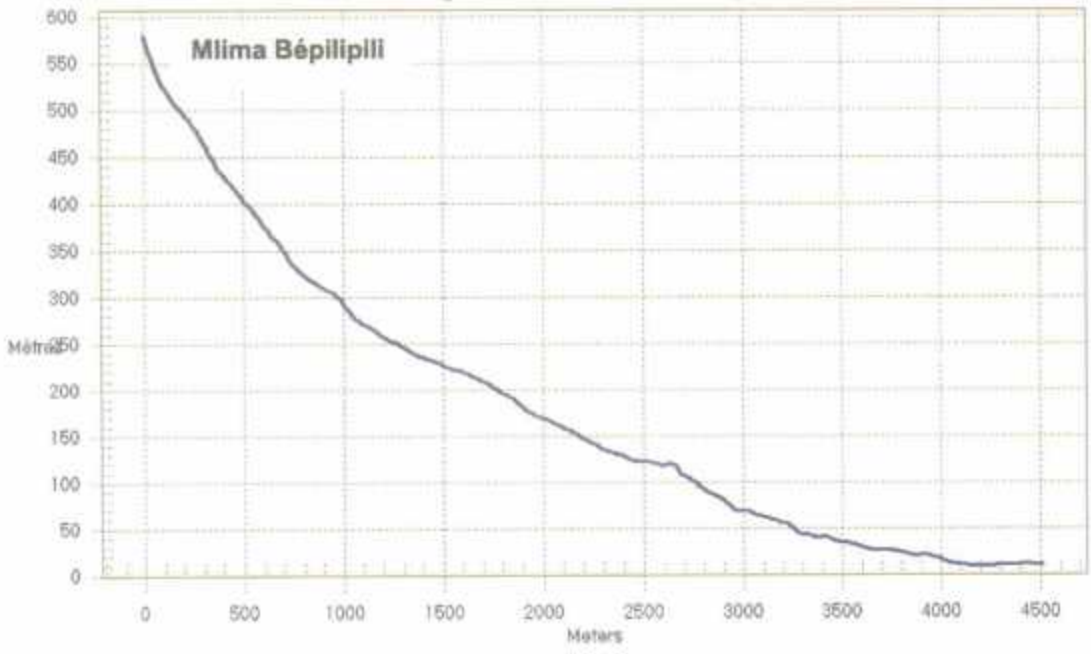


Le bassin versant du Mro Oua Salim Bé

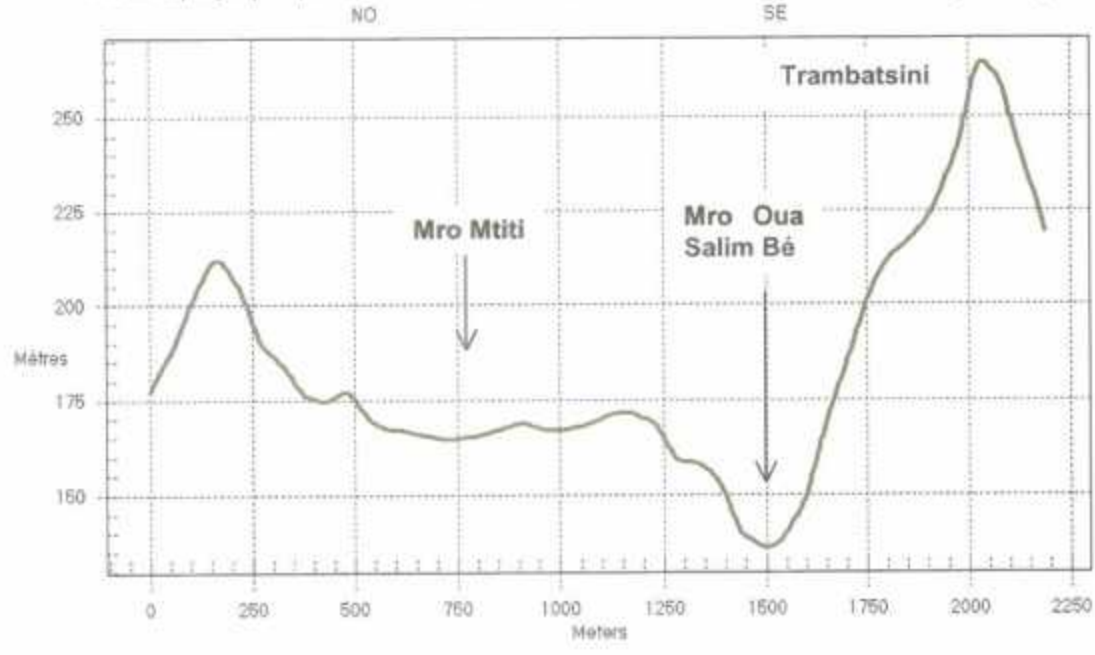
Affluents : *Mro Mtiti*
Ville principale : *Hajangua*
Superficie : *6,6 km²*
Périmètre : *11,2 km*
Altitude maximale : *643 m*



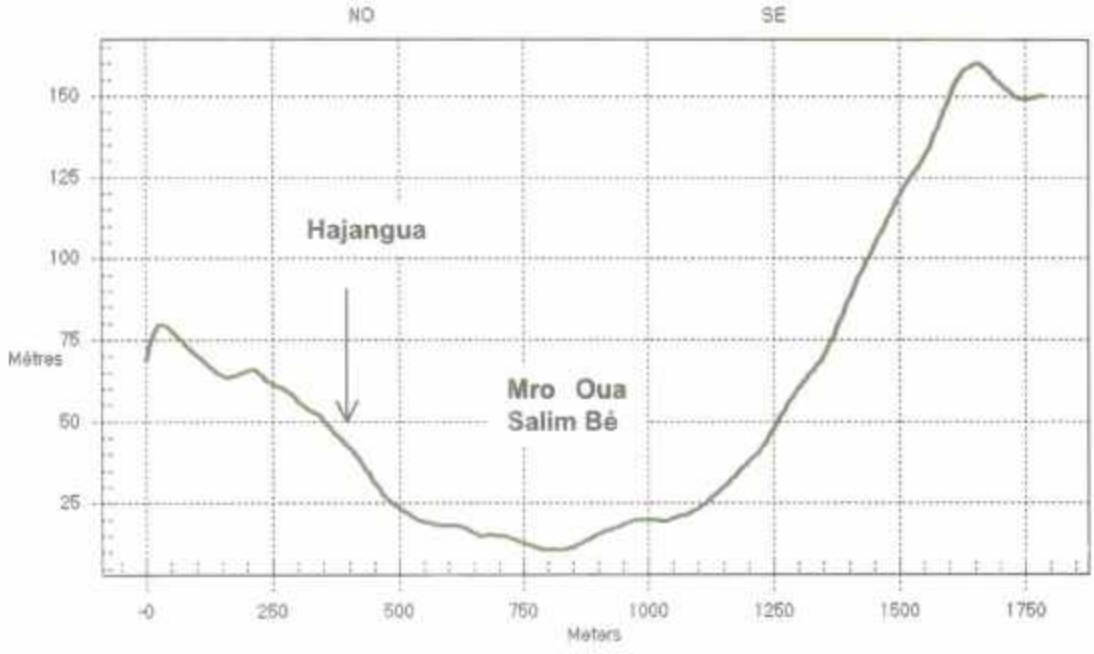
Profil en long du Mro Oua Salim Bé (Profil 1)



Profil topographique N/O - S/E du bassin versant du Mro Oua Salim Bé (Profil 2)



Profil topographique N/O - S/E du bassin versant du Mro Oua Salim Bé (Profil 3)



Le bassin versant du Mro Oua Hajangua

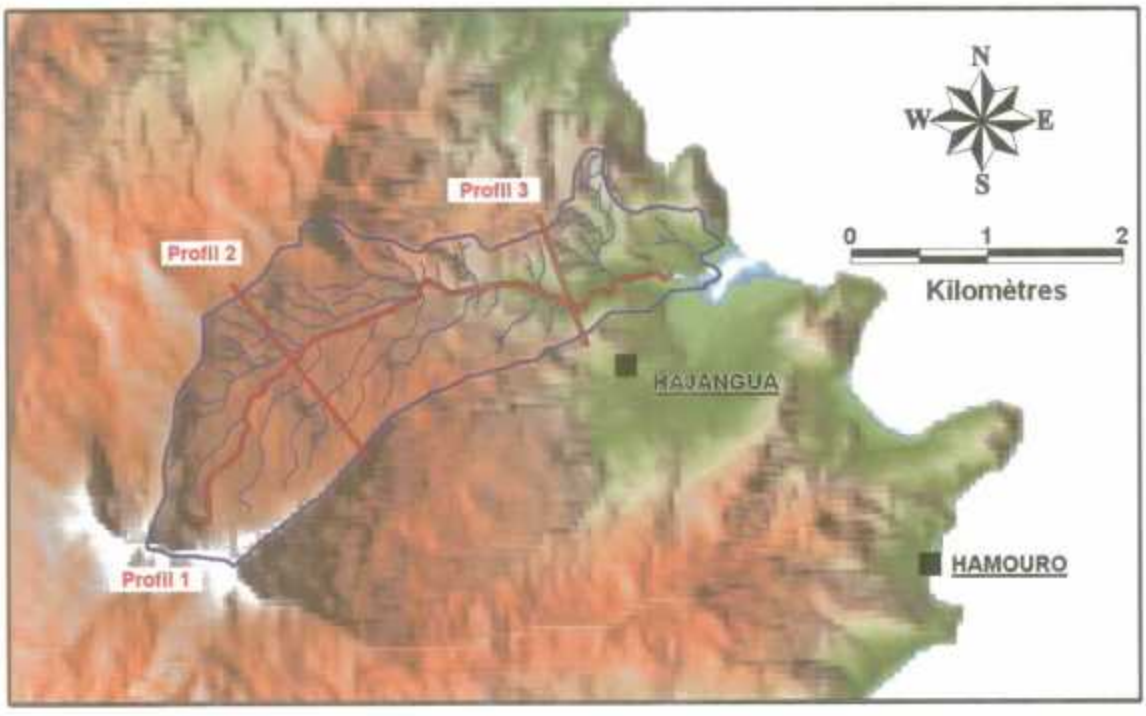
Affluents : /

Ville principale : *Florence (Hajangua)*

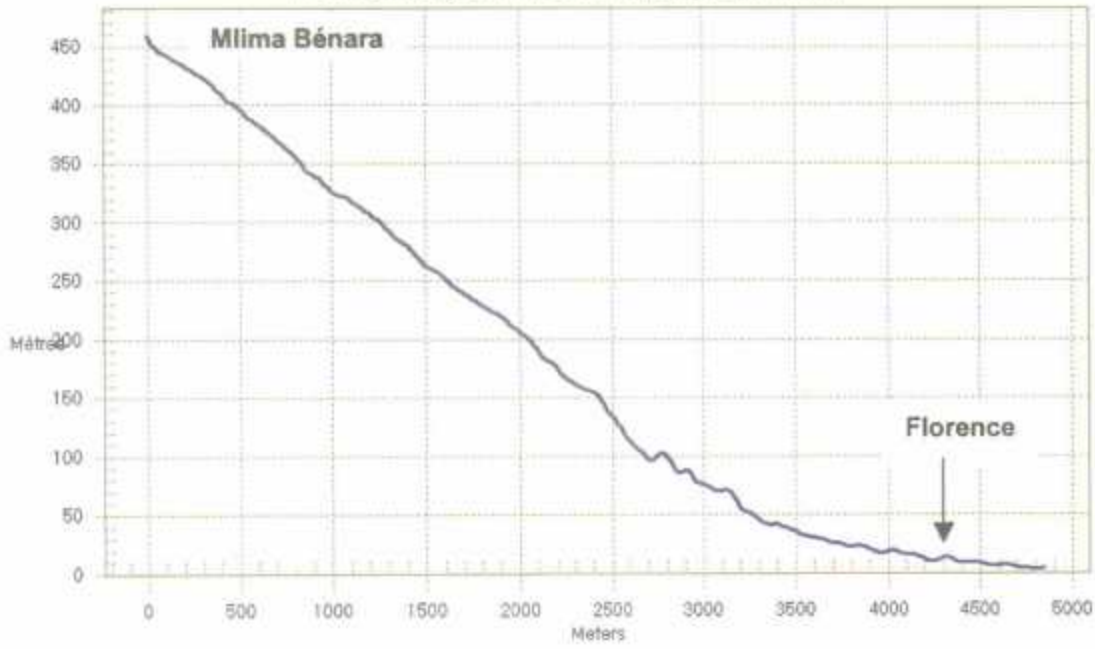
Superficie : *5,1 km²*

Périmètre : *12,5 km*

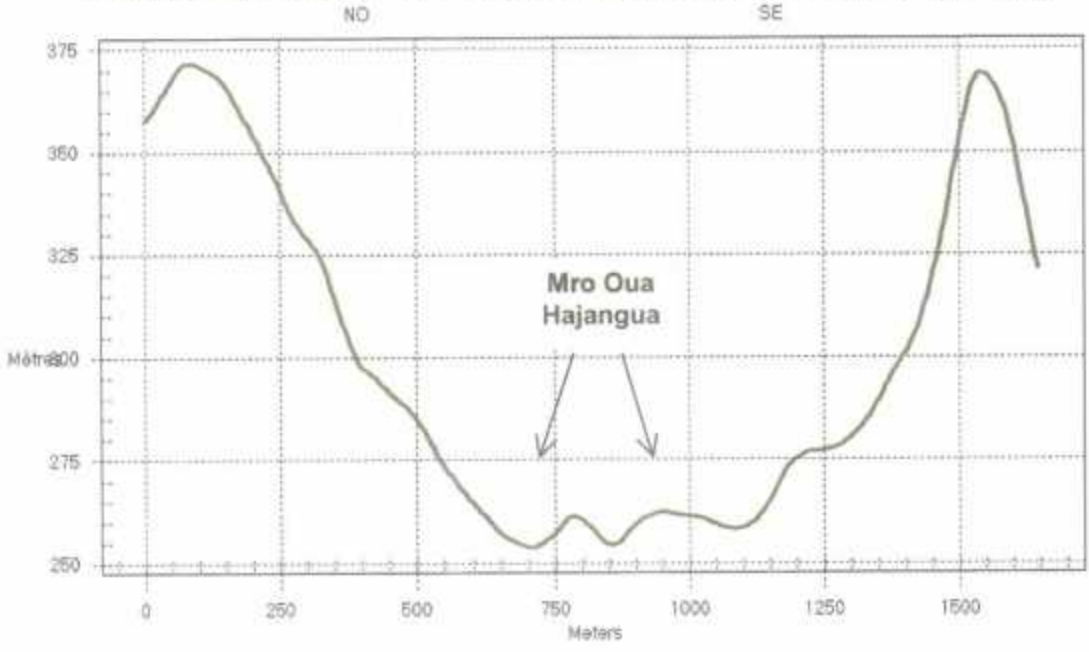
Altitude maximale : *660 m*



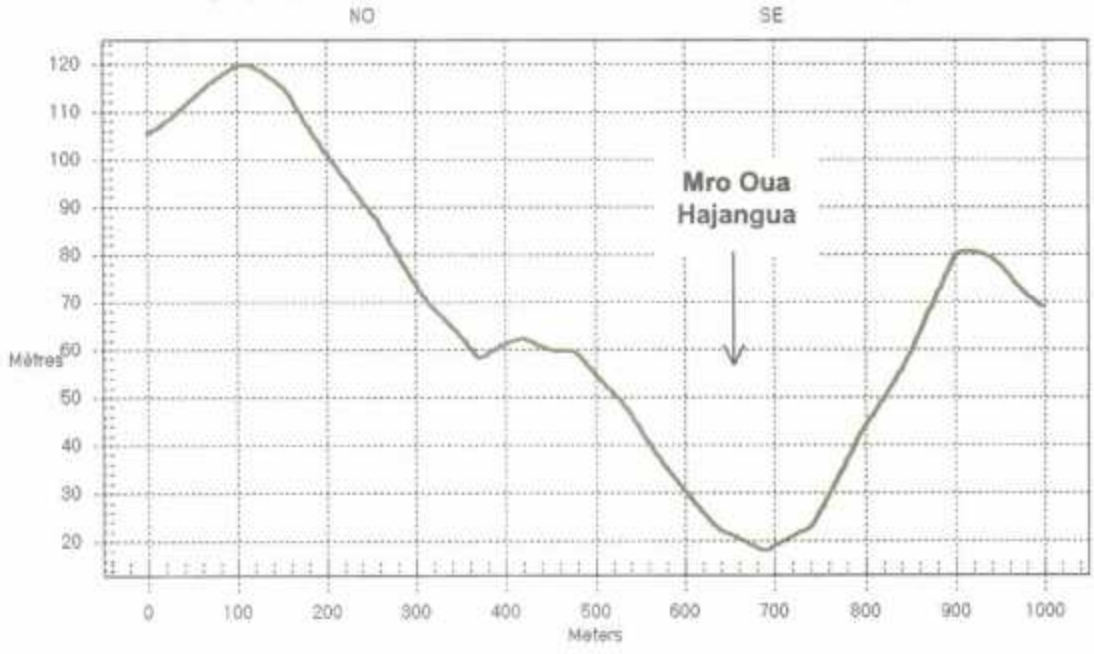
Profil en long du Mro Oua Hajangua (Profil 1)



Profil topographique N/O - S/E du bassin versant du Mro Oua Hajangua (Profil 2)

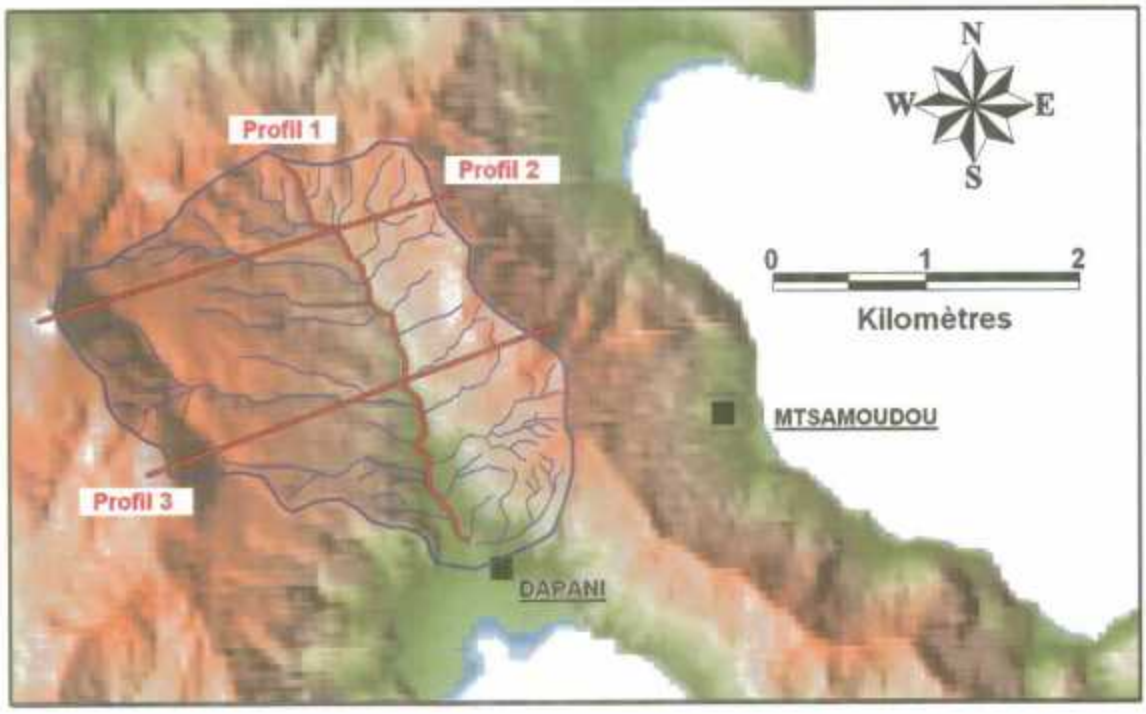


Profil topographique N/O - S/E du bassin versant du Mro Oua Hajangua (Profil 3)

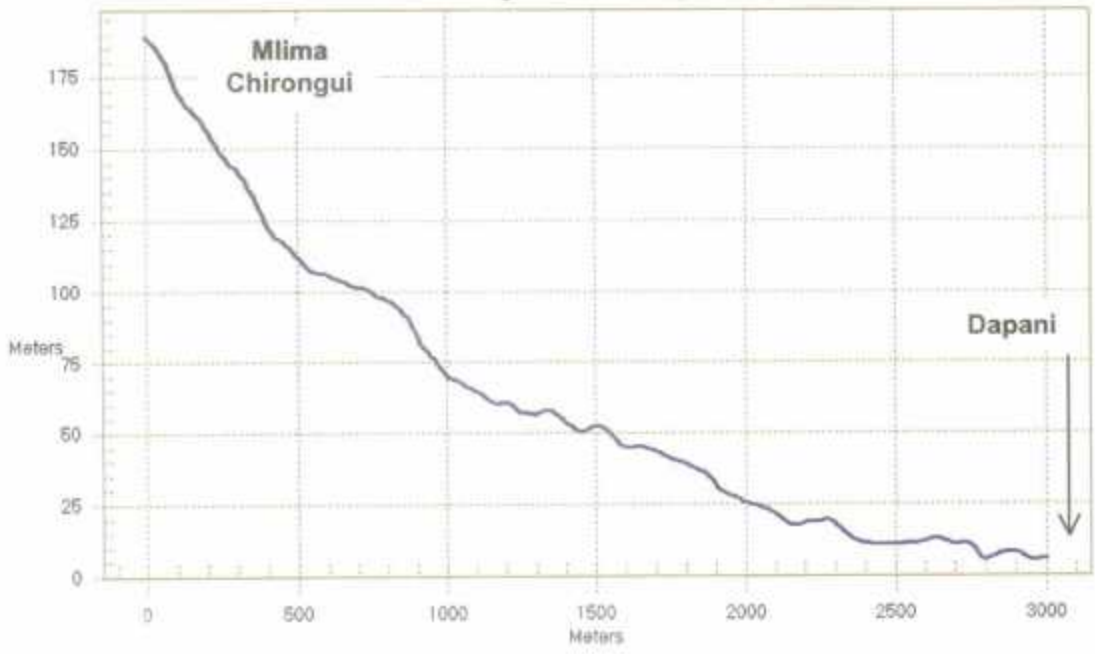


Le bassin versant du Mroni Bé

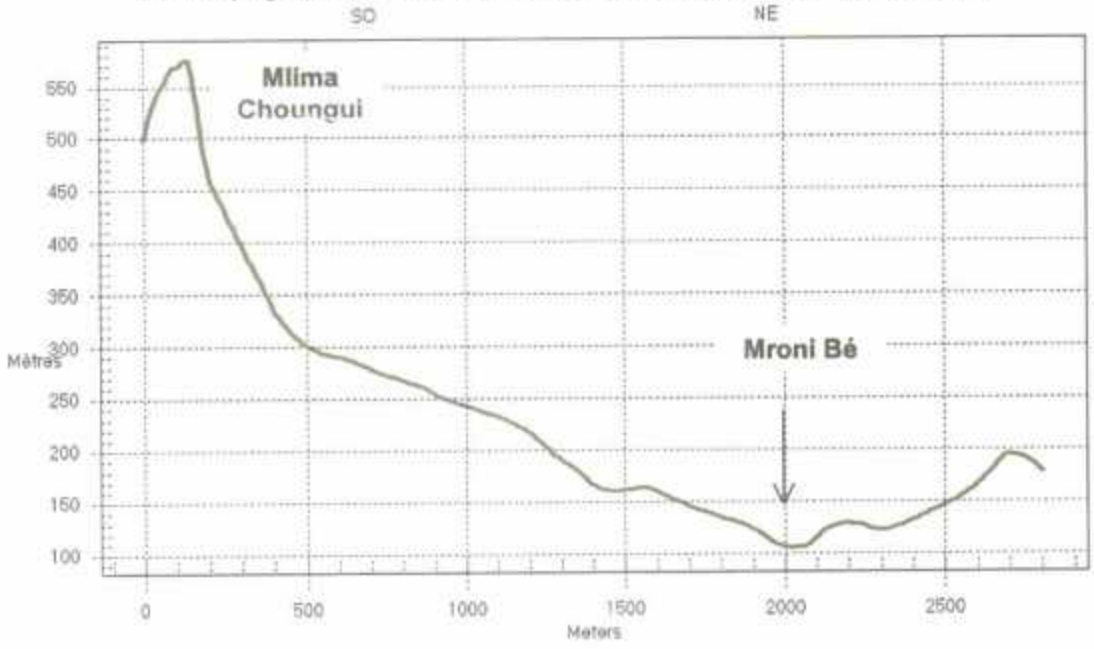
Affluents : *Kanalèni*
Ville principale : *Dapani*
Superficie : *9,2 km²*
Périmètre : *13 km*
Altitude maximale : *594 m*



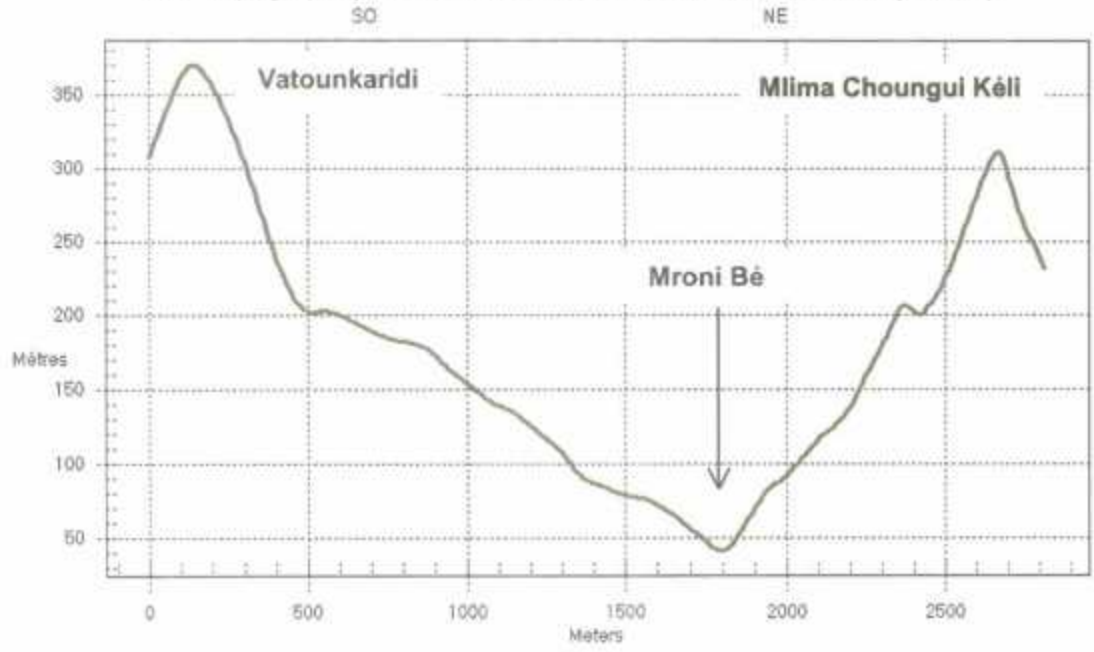
Profil en long du Mroni Bé (Profil 1)



Profil topographique S/O - N/E du bassin versant du Mroni Bé (Profil 2)



Profil topographique S/O - N/E du bassin versant du Mroni Bé (Profil 3)



Essai de représentation du bassin versant du Mroni Bé en 3 dimensions.

Vue vers le nord-ouest. Logiciel Vertical Mapper. Scan 25 ©IGN

Le bassin versant du Mrowalé

Affluents : /

Ville principale : *Tsingoni*

Superficie : *6,5 km²*

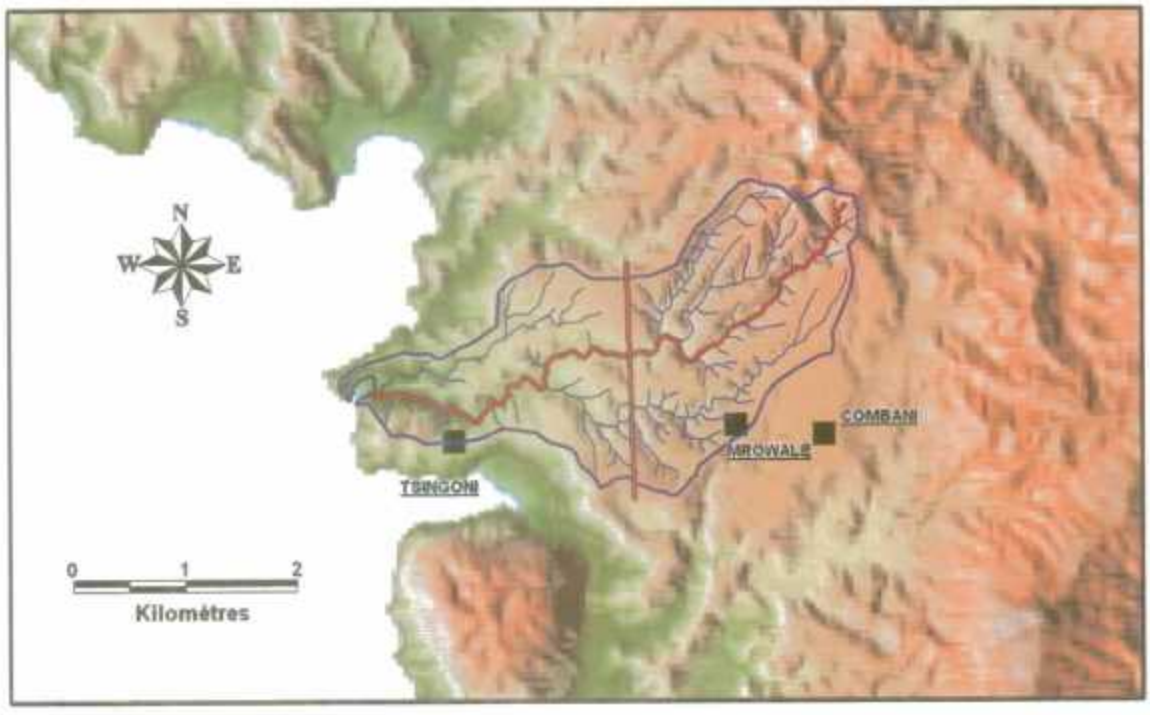
Périmètre : *13,3 km*

Longueur thalweg principal : 5,9 *km*

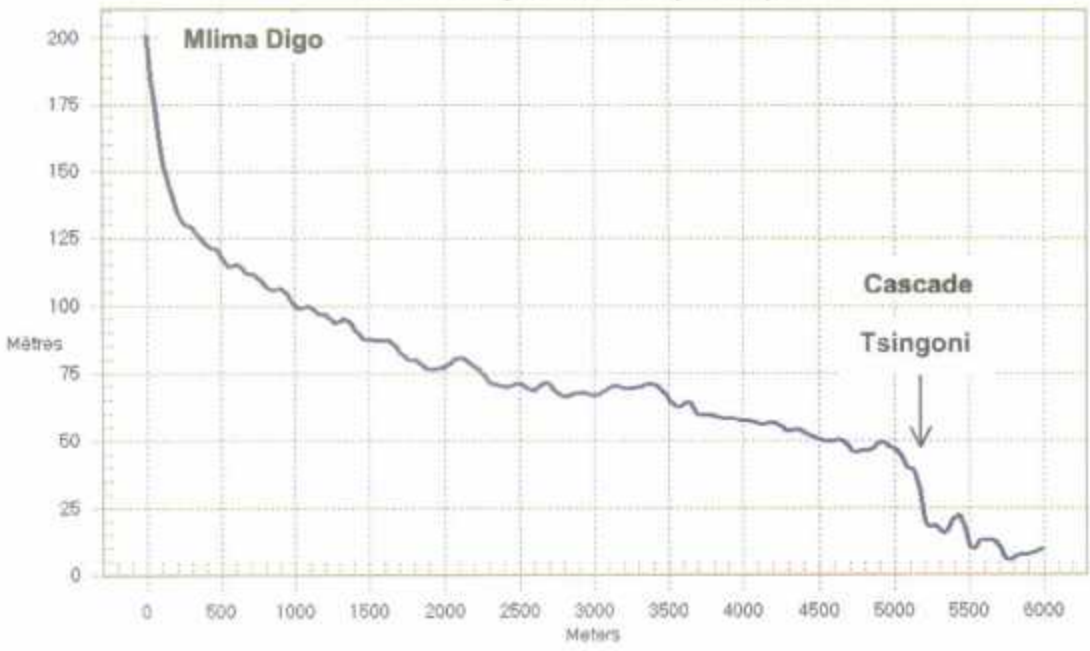
Altitude maximale : *236 m*

Estimation débit de crues :

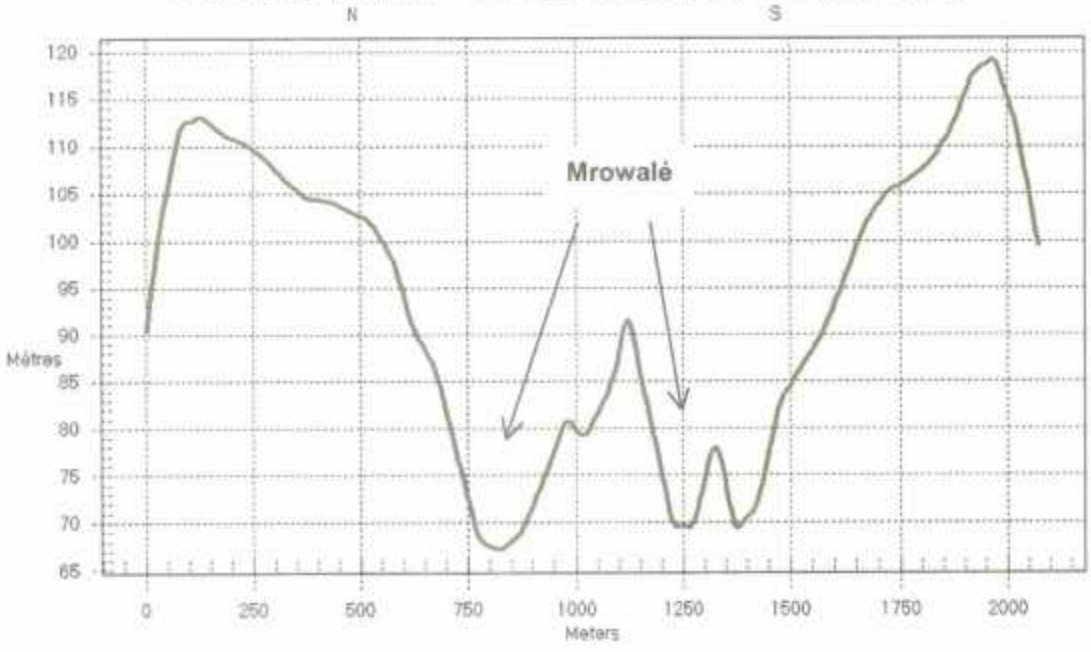
- décennale : *53 m³/s*
- centennale : *120 m³/s*



Profil en long du Mrowalé (Profil 1)

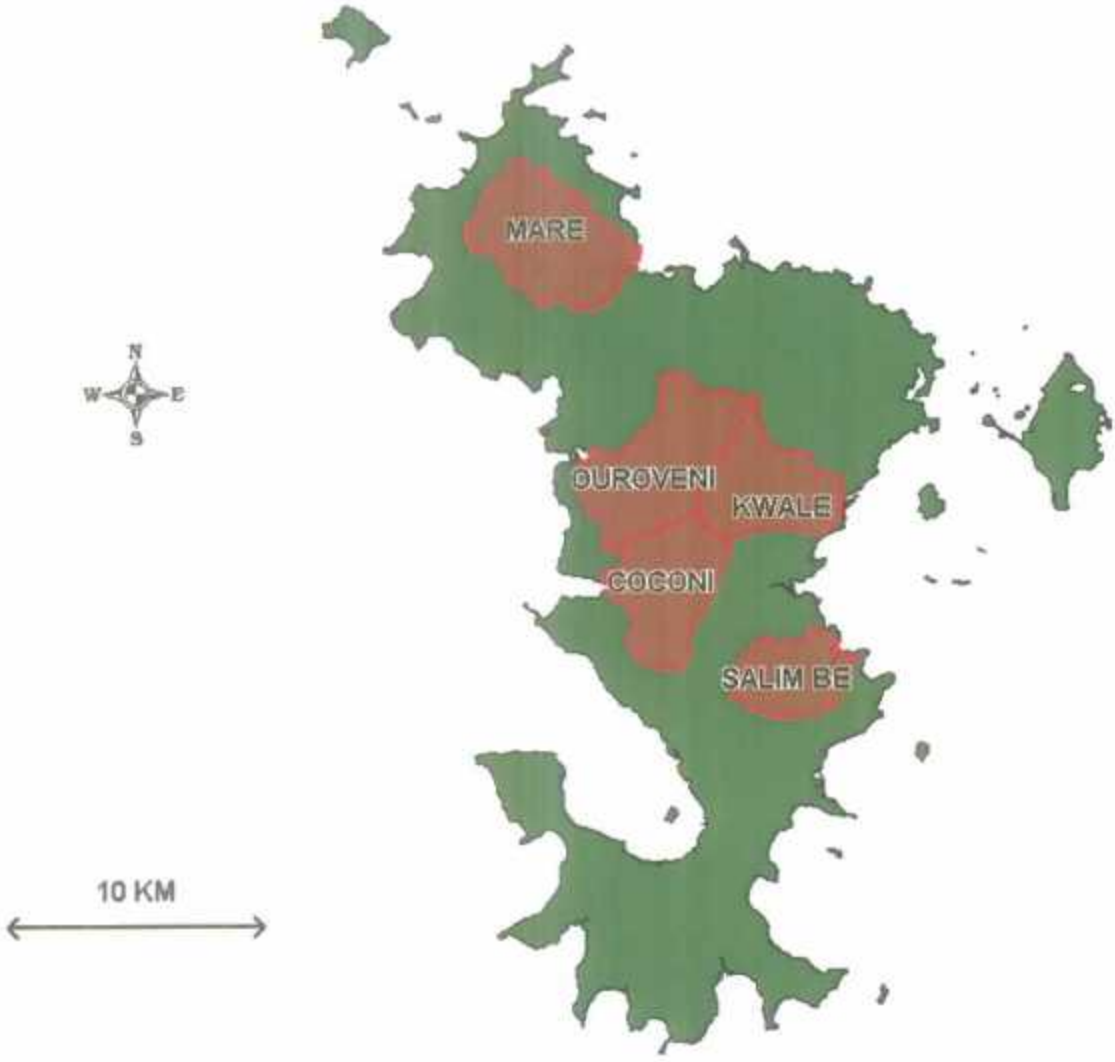


Profil topographique N - S du bassin versant du Mrowalé (Profil 2)



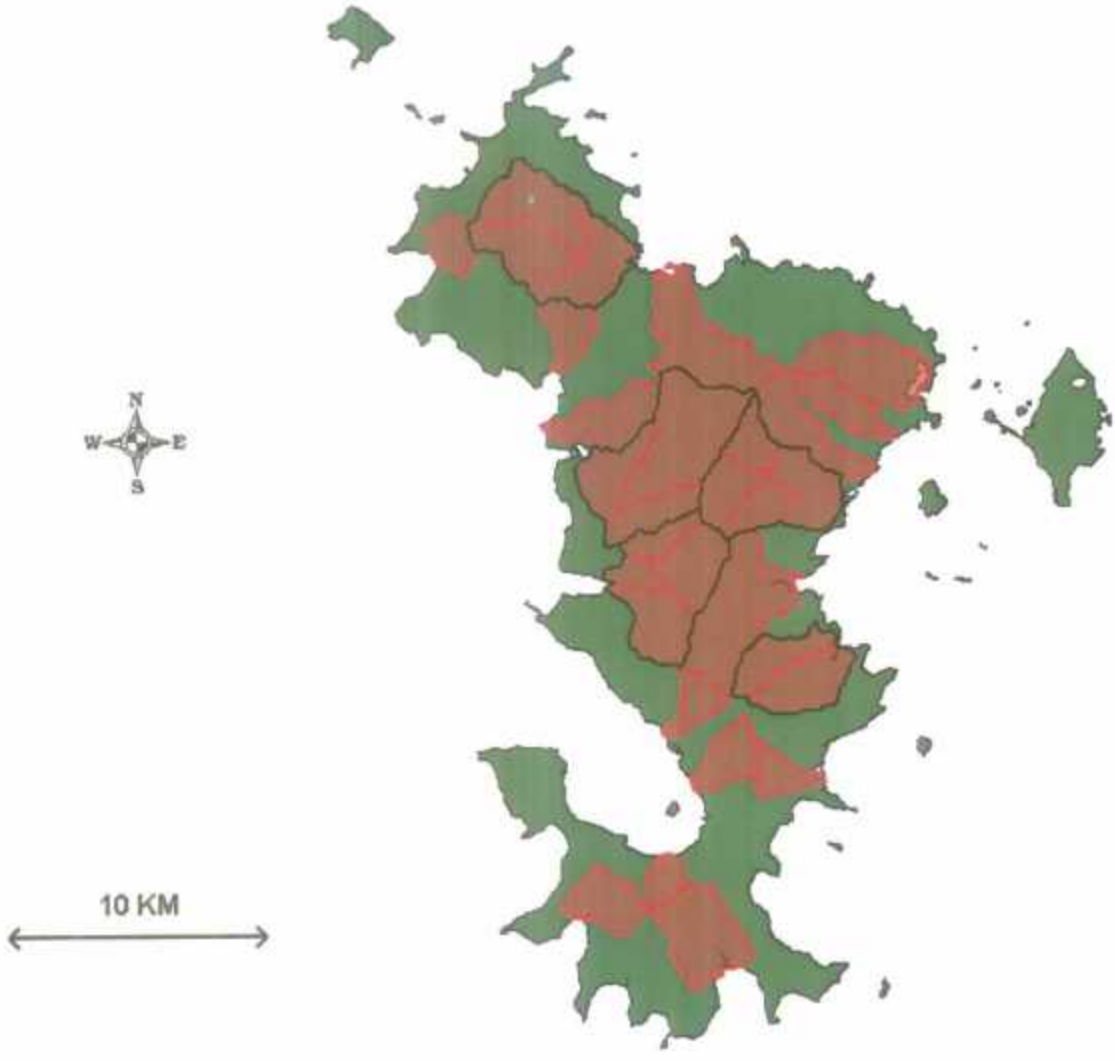
Annexe 4 :

Carte des bassins versants de Mayotte d'ordre 7



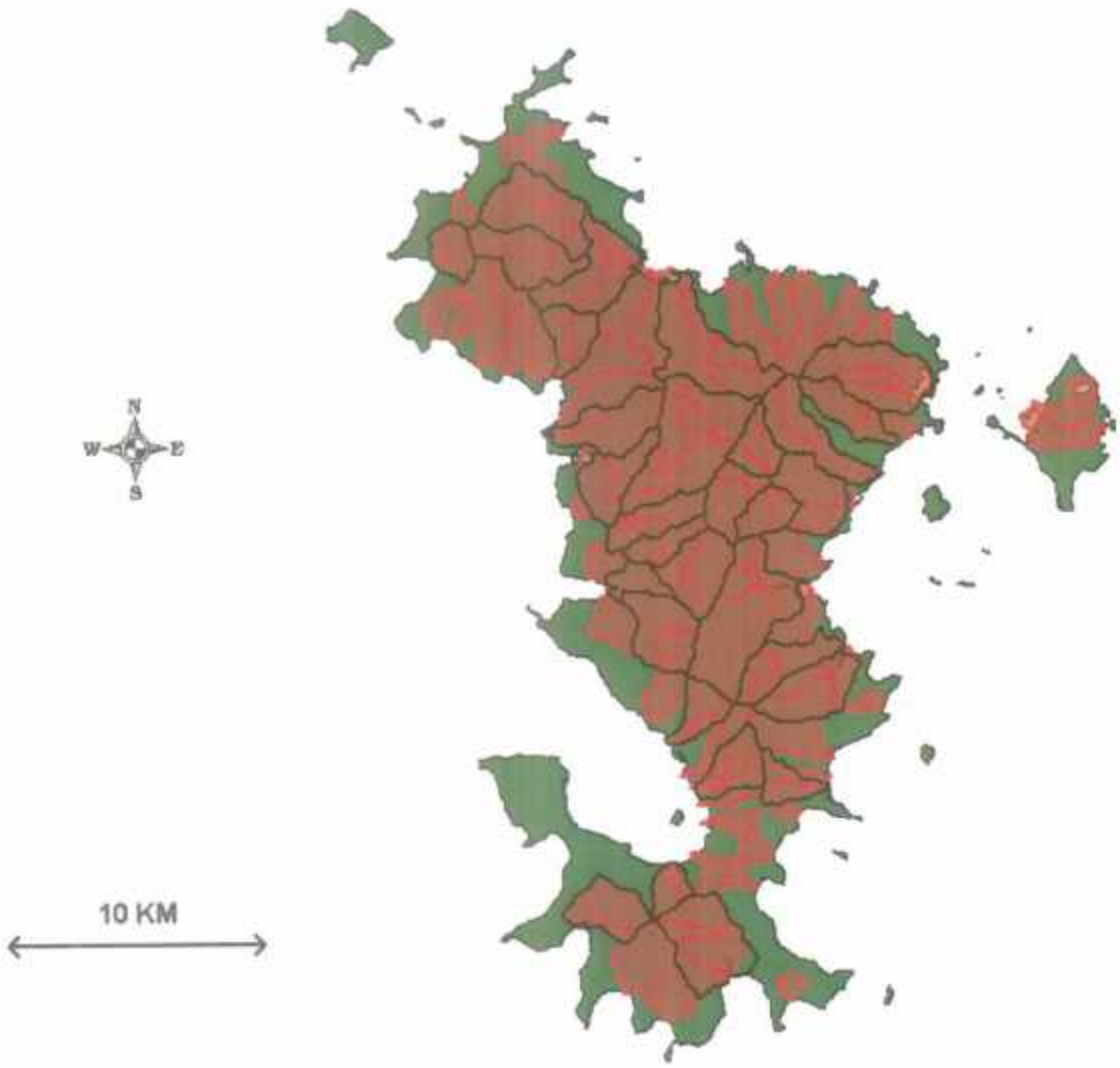
Annexe 5 :

Carte des bassins versants de Mayotte d'ordre 6



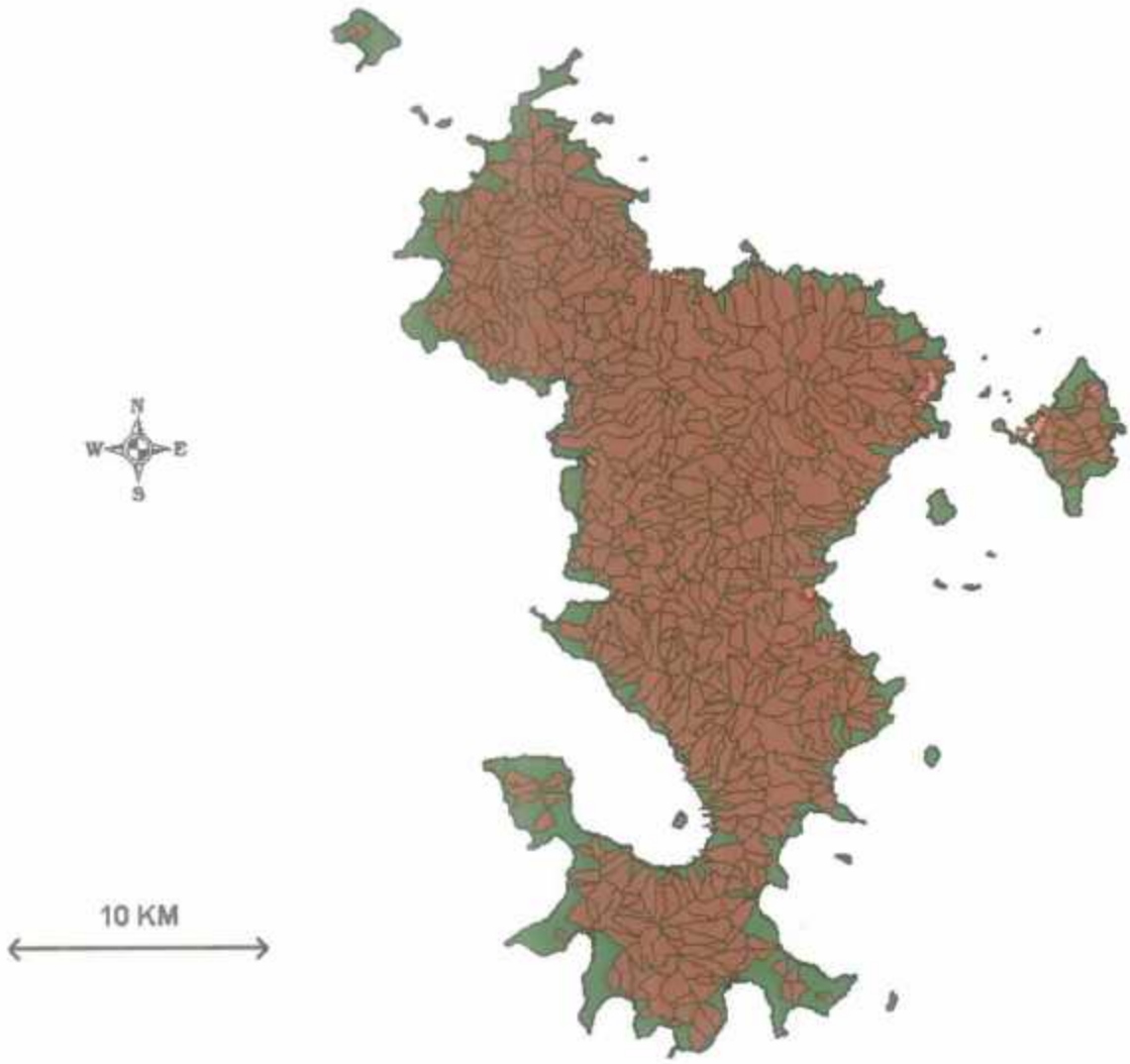
Annexe 6 :

Carte des bassins versants de Mayotte d'ordre 5



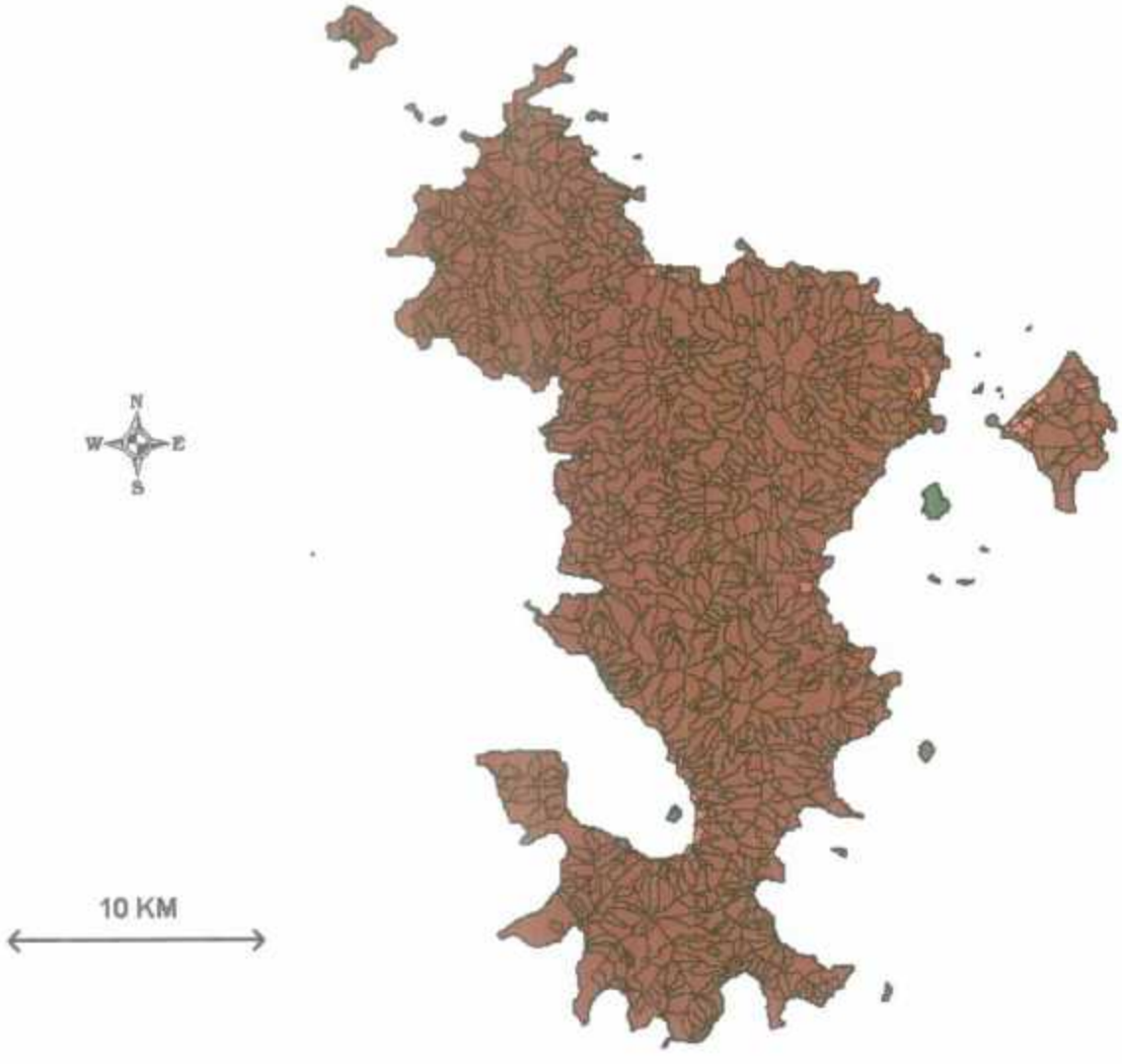
Annexe 7 :

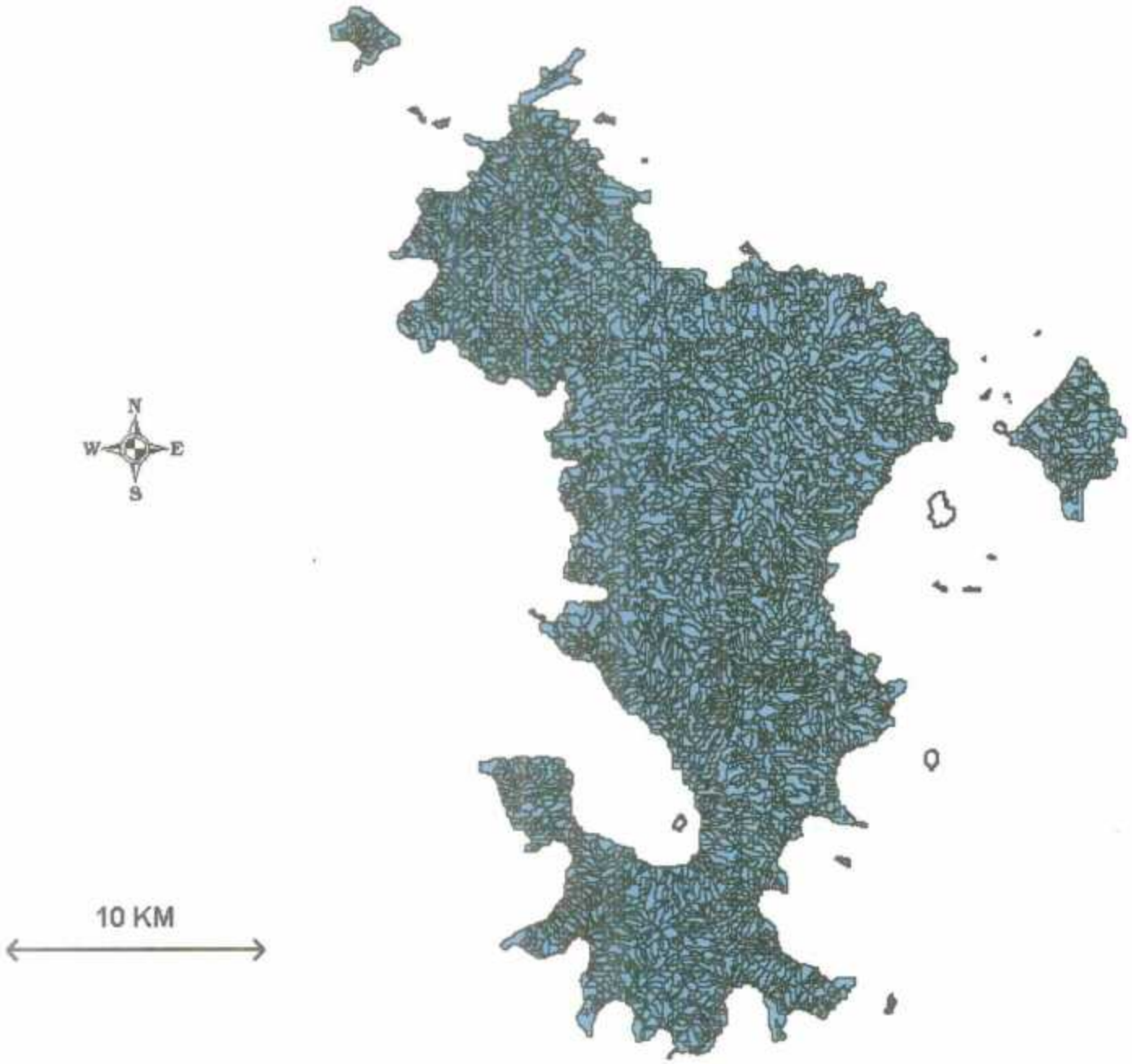
Carte des bassins versants de Mayotte d'ordre 4



Annexe 8 :

Carte des bassins versants de Mayotte d'ordre 3



Annexe 9 :

Carte des bassins versants de Mayotte d'ordre 2