Tableau 1. Coordonnées géographiques des stations météorologiques dans la zone d'étude

N°	Station	Distance entre stations (km)	Latitude Sud	Longitude Est	Altitude
1	Antsirabe-Aérodrome	6.5 entre 1 et 2	19°50	47°04	1540
2	Antsirabe-Pépinière	1.8 entre 2 et 3	19°52	47°01	1506
3	Antsirabe-Ecole	5 entre 1 et 3	19°52	47°02	1508
4	Antsirabe-Sambaina	--	19°37	47°07	-
5	Antsirabe-Pluviométrie	--	19°39	47°10	-

Source : Service de la météorologie Ampandrianomby et Razafimahefa, 2010

Le **Tableau 1** montre quelques stations météorologiques dans le bassin d'Antsirabe. Les stations 1-2-3 sont les plus proches de la zone de recherche et offrent le plus de données. La distance entre la station 1 et la station 2 est de 6 km contre 5 km entre la station 1 et la station 3. Elle est de 1.8 km pour la station 2 et la station 3. La base de l'étude climatique se fera à partir des données de la station Antsirabe-aérodrome, car c'est la seule station synoptique de la région. Les deux autres stations (Antsirabe-Pépinière et Antsirabe-Ecole) ne disposent que des données pluviométriques. Cela pourra toutefois être utile dans la mesure où l'on peut effectuer une comparaison des données dans des stations différentes et voir quelles sont les variations à une courte distance pendant une période de référence notamment pour mettre en évidence une éventuelle influence de la situation géographique. Il est à noter que même si les données obtenues des deux stations 4 et 5 sont peu pour une étude climatique (11 ans), elles serviront à étudier les variations climatiques au cours de la dernière décennie. En effet, les enquêtes ont démontré une modification marquée durant les dernières années tant dans la répartition saisonnière des précipitations que dans la variation mensuelle des températures.

I.3. LES TRAVAUX DE TERRAIN ET TRAITEMENT DES INFORMATIONS

Suite aux travaux de documentation et à la collecte des informations et données nécessaires à la recherche, les préparations ont abouti à l'élaboration des fiches de terrain **(**Cf. **Annexe 1**), quelques fonds de carte ainsi qu'une fiche d'enquête **(**Cf. **Annexe 5)**. Elles ont été utilisées pendant les séjours à Antsirabe qui ont duré 10 jours.

I.3.1. Les travaux de terrain

Suivant les itinéraires préétablis, la première étape dans cette phase a consisté à faire des observations sur terrain souvent perturbées et limitées par les activités anthropiques, la difficulté des terrains et l'absence d'éléments d'observations. Cette observation s'est effectuée en suivant les vallées le long du lit de la rivière principale de la Sahatsio et quelques-uns de ses affluents. L'observation a débuté dans les environs de Vinaninkarena, dans le village d'Ankarinomby, au niveau duquel la Sahatsio reçoit à sa gauche un petit affluent nommé Andavarano[9]. On a ensuite parcouru la rivière jusqu'en amont du bassin, au pied du

[9] Latitude S19°57'09.1''/ Longitude E049°02'47.8'' ; Altitude : 1360m

Famoizankova (2365 m), au niveau duquel son principal affluent -Morarano-Andriamamovoka- prend source dans des reliefs accidentés d'origine volcanique. Cela a permis d'une part des observations au sens strict de l'ensemble du paysage et de la topographie et d'autre part, une lecture verticale des coupes naturelles rencontrées le long du lit de la rivière. Aussi, une description minutieuse des seuils rocheux et une analyse relative des dépôts liés à l'érosion et au fonctionnement hydrologique de la rivière ont été effectuées.

En effet, les coupes ont facilité l'identification des formations superficielles dans lesquelles s'écoule la rivière, mais elles témoignent surtout de la dynamique de l'encaissement de celle-ci dans son lit. Leurs descriptions ont révélé que l'érosion est d'autant plus accélérée en remontant vers le Nord du bassin. D'ailleurs, l'interprétation du paysage a permis de constater une topographie plane en aval du bassin contre une dissection assez marquée en amont.

Au moins, 18 coupes ont été rencontrées le long du lit de la rivière principale **(**Cf. **Annexe 2)**. Celles qui sont les plus intéressantes ont été choisies comme « stratotypes » sur lesquelles devraient se baser les grandes lignes de cette recherche. Elles feront évidemment l'objet d'une étude approfondie en vue d'obtenir des résultats nouveaux, du moins une idée sur les relations relief-formations superficielles-géologie-érosion. Cette liste s'ajoute aux autres coupes déjà étudiées dans les travaux antérieurs sur la région (RAZAFIMAHEFA, 2010), lesquelles ont été étudiées avec beaucoup de soin (Cf. **Annexe 3)**.

Les enquêtes auprès des paysans constituent la deuxième étape dans cette phase de recherche. En effet, elles ont été utiles dans la mesure où les réponses ont fourni des témoignages intéressants sur des thèmes relatifs au sujet de recherche, dont l'érosion, le climat, les inondations, les crues, les ensablements des rizières, le fonctionnement hydrologique, etc. Cette méthode facilite la corrélation des données théoriques avec les réalités de la zone et permet également de vérifier leur cohérence ainsi que de constater s'il en existe d'autres éléments susceptibles d'apporter de nouvelles connaissances dans le domaine étudié.

Les enquêtes ont été effectuées d'une manière rationnelle, car les questions posées ont visé spécialement les personnes directement concernées par l'érosion c'est-à-dire celles ayant des activités dépendantes directement ou indirectement, de la rivière Sahatsio. La sélection concerne plus simplement tous les paysans travaillant sur les terrains de culture le long de la rivière. Sur les cinq (5) communes appartenant au bassin-versant de la Sahatsio, 11 Fokontany

ont été enquêtés soit 24.4 % des 45 Fokontany que renferment l'ensemble des communes (Cf. **Tableau 2)**. Le nombre de population de chaque Fokontany concerné par les travaux d'enquêtes figure dans le **Tableau 3** avec le nombre de ménages.

Tableau 2. Nombre de population par commune dans le bassin-versant de la Sahatsio en 2009

Identifiant commune	Libellé commune	Nb de Fkt	Nb de Fokontany concernés par l'enquête	Population	Nb de toit
108003	Soamalaza Mahatsinjo	9	1	33 643	5 479
108004	Antsirabe Afovoany Atsinanana	10	2	44 695	6 362
108005	Manodidina Ny Gara Ambilombe	7	0	27 402	4 187
118010	Ambano	12	7	37 449	5 956
118090	Vinaninkarena	7	1	13 653	2 289
TOTAL		**45**	**11**	**129 440**	**20 086**

Source : INSTAT Madagascar 2009

Tableau 3. Nombre de population dans les Fokontany concernés par les enquêtes

Identifiant fokontany	Libellé fokontany	Population	Nombre de toits
108003002	Sahatsiho	3 583	588
108004006	Tsinjorano	2 013	339
108004007	Ambalavato 601	1 772	308
118010001	Ambano	6 539	1 314
118010004	Tsaramandroso	3 337	475
118010007	Antanetibe	3 115	537
118010008	Tsarafara	1 806	331
118010010	Manampisoa	2 027	217
118010011	Mahazina Atsimo	1 244	133
118010012	Tsarafiraisana	3 273	664
118090001	Ankarinomby	3 566	514
	TOTAL	**32 275**	**5 420**

Source : INSTAT Madagascar 2009

Certes, on a essayé de faire le maximum d'enquêtes possible afin d'obtenir des résultats fiables, mais vu que c'est un travail de géographie physique, basé en grande partie sur les observations et la description des phénomènes physiques et géographiques, le milieu naturel et le paysage ont été privilégiés. Ainsi, le nombre de ménages enquêtés est de 32, correspondant à un taux d'échantillonnage de 0.61 %, ce qui est très faible vis-à-vis de l'ensemble. La taille de ces ménages représente environ 165 personnes soit 0.51 % de la totalité de la population dans les 11 fokontany concernés.

I.3.2. Outils d'analyse

Déjà, au cours des travaux de documentation, des préparations ont été indispensables pour les travaux de terrain, ce qui a nécessité des outils particuliers. Les fonds de cartes, les itinéraires ainsi que toutes les cartes présentées dans ce mémoire ont été élaborés à l'aide du SIG sous le logiciel gratuit Qgis version 2.14.2. Les bases de données manipulées sont de natures variées : des données vectorielles sous format *shapefile*[10] **(**Cf. **Figure 2 et 3)**, un Modèle Numérique du Terrain (MNT) **(**Cf. **Figure 4)**, des images satellitaires **(**Cf. **Photo 1)**, des photo-aériennes (Cf. **Photo 8)**, etc.

Une fois sur terrain, quelques outils ont été également indispensables : un appareil photographique pour prendre en photo tous les éléments s'avérant utile dans les recherches (coupes, reliefs, seuils rocheux, barrages, affleurements, les zones de glissement de terrain, les éboulements, les dépôts des crues, etc.), un GPS pour leur localisation de manière précise, un mètre ruban pour mesurer l'épaisseur des couches, un bloc-notes avec les fiches d'enquêtes et les fiches de terrains. Il était plus que nécessaire d'apporter des fonds de carte topographique et une carte d'itinéraire pour bien cerner la zone de recherche. Chaque soir, il a été nécessaire de faire un recoupement des informations obtenues par enquêtes, mais aussi celles obtenues dans les descriptions du paysage.

Des travaux de traitement des données statistiques ont été également obligatoires pour les données climatiques. Le traitement a été effectué sous Microsoft Excel 2010. La rédaction du mémoire a été réalisée sous Microsoft Word 2010. D'autres logiciels ont été également utilisés à l'exemple du logiciel Global Mapper version 17 pour le traitement du bassin-versant ainsi que la réalisation des profils topographiques, le logiciel gratuit Monteverdi 1.24 pour le traitement des images satellitaires.

[10] Fichiers de formes développés par l'ESRI (Environmental Systems Research Institute**)** pour des logiciels commerciaux, qui est un format standard et largement utilisé par un grand nombre de logiciels libres (Kamdom 2011)

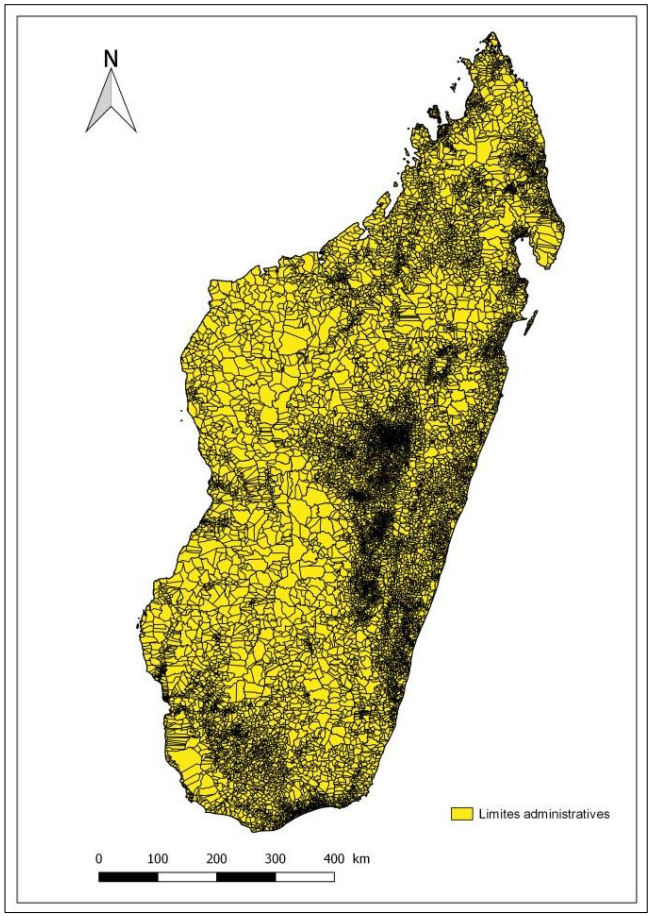

Figure 2. Bases de données OCHA-BNGRC, 2011

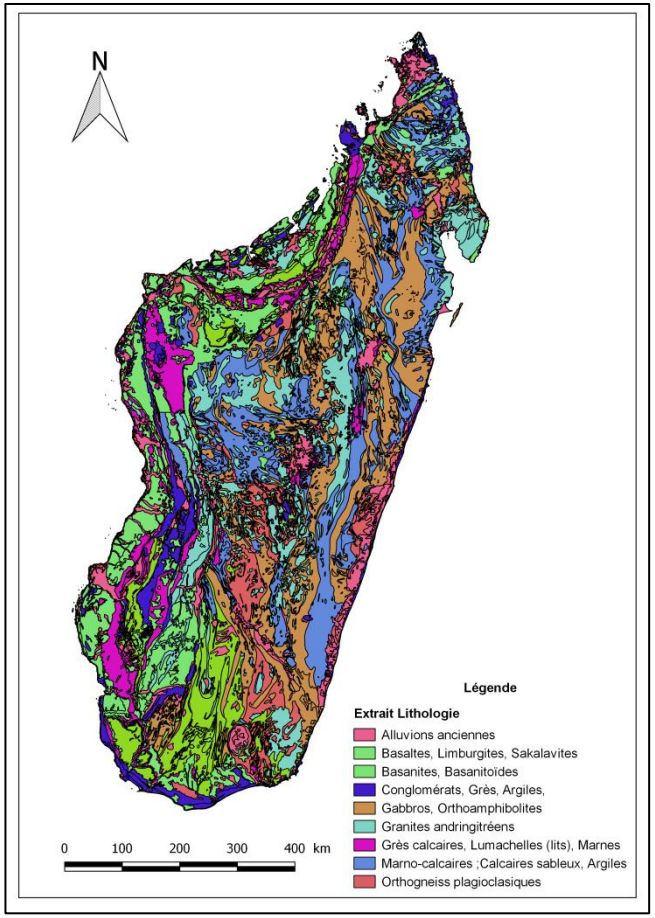

Figure 3. Base de données géologie de BESAIRIE, 1964

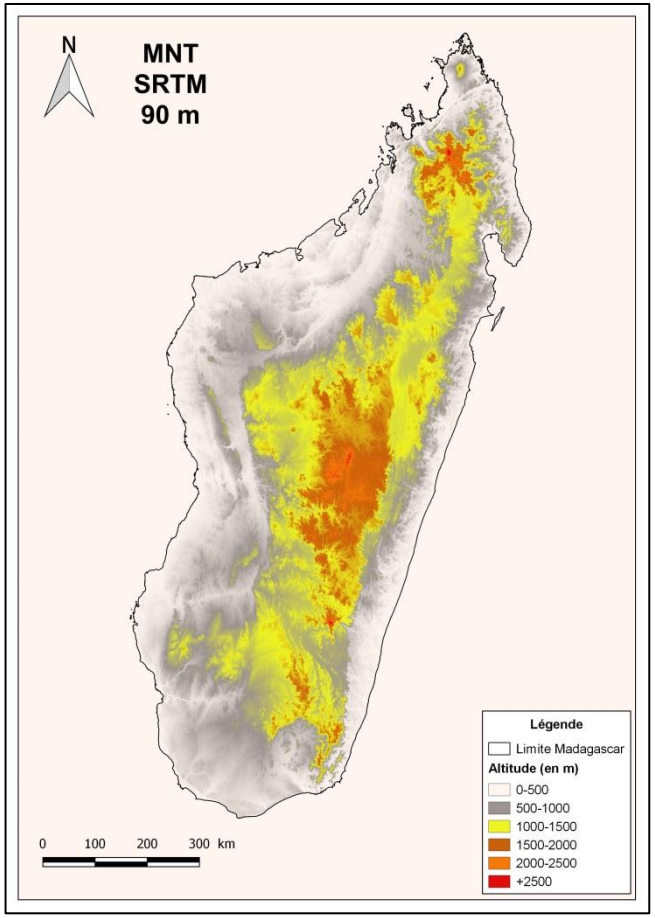

Figure 4. Base de données MNT SRTM 90 m

Source : lv.eosda.com

Photo 1. Extrait de l'image LANDSAT 8-2016 couvrant la zone

La **Photo 1** présente la zone de recherche au mois d'août 2016. Elle est extraite de l'image LANDSAT 8 qui couvre la région **(**Cf. **Annexe 6)**. Elle a été utile dans la mesure où elle a servi de comprendre l'occupation du sol dans le bassin-versant de la Sahatsio et de dégager l'état actuel de l'étendue de la végétation.

I.3.3. Traitement des informations

Après les travaux de terrain, il faut bien traiter les informations afin de pouvoir mettre en œuvre un plan de rédaction du mémoire proprement dit. Ainsi, les premiers traitements consistent à rassembler tous les résultats d'enquêtes et les témoignages des paysans sur les thèmes posés. Les recoupements de ces informations ont abouti d'abord au comptage des personnes et des ménages enquêtés au niveau desquels se basent l'échantillonnage pour les recherches.

Ensuite, le triage des informations en fonction des différents thèmes enquêtés auprès des paysans notamment les facteurs de l'érosion, la dynamique fluviale, la conséquence de l'érosion sur l'espace et au niveau de l'agriculture, la variation du climat dans la région d'Antsirabe, les solutions proposées par la population afin de résoudre, du moins, limiter les problèmes relatifs à l'érosion.

Il y a également les analyses des données observées sur terrain concernant les coupes naturelles, les seuils rocheux ainsi que les différents éléments du milieu naturel qui ont attiré l'attention lors de notre passage. Les photographies et les prises de notes ont beaucoup aidé dans ce travail ; d'ailleurs les coordonnées géographiques relevées sur ces phénomènes ont facilité leur localisation par rapport à l'ensemble de la zone d'intervention. Ceci a facilité la description des coupes naturelles et la rédaction des commentaires sur les différents dépôts de la rivière. Celle-ci aboutit souvent à des comparaisons avec les données des travaux de documentation qui sont effectivement indispensables si l'on veut vérifier l'exactitude des hypothèses proposées.

D'autres traitements ont été nécessaires dans cette phase, à l'exemple de l'élaboration des cartes sur SIG, l'utilisation de la télédétection pour l'analyse de l'occupation du sol dans le bassin, le traitement des données climatiques par la méthode de « tableau dynamique croisé[11] ».

I.3.4. Problèmes rencontrés

Effectivement, quelques problèmes se sont posés tout au long de la réalisation de ce mémoire. Dans les travaux de documentation, les principaux problèmes concernent les documents consultés. Ces derniers sont très anciens et quelques fois, les écritures ne sont plus lisibles ; d'ailleurs, rares sont les livres récents concernant la zone d'étude. De plus, certains

[11] Méthode de traitement des données brutes sur Excel ou sur d'autre logiciel adéquat.

ouvrages de référence sont introuvables dans les bibliothèques et d'autres sont difficilement accessibles surtout pour la région d'Antsirabe, car ils sont désormais classés dans les archives.

Un autre problème concerne l'absence des données hydrologiques de la rivière Sahatsio, car il n'y a pas de station d'observation sur cette rivière.

Quelques problèmes ont été également rencontrés pendant les travaux de terrain. D'abord, le problème de logement qui est dû à la forme très allongée du bassin-versant, car nous étions obligés de séjourner dans des lieux différents à chaque fois qu'on termine une journée. De plus, certaines zones sont quasiment inaccessibles du fait des accidents topographiques et l'absence de piste. Il y a également la méfiance et la réticence des paysans vis-à-vis des enquêtes, car ils semblent ennuyés pendant les entretiens, certains ne veulent pas qu'on leur pose de question ! Cette méfiance s'explique effectivement par le fait que nombreux sont ceux qui ont effectué des enquêtes sur la zone, mais cela n'a jamais été bénéfique pour la population.

Ainsi, le contexte de recherche qui concerne le choix du sujet et le choix de la zone de recherche a mené à la phase de documentation. Cela dans le but d'obtenir le maximum d'informations et de données sur le sujet et la zone de recherche. Cette étape de la recherche a été succédée par les travaux de terrain proprement dits qui vont mettre en exergue les différents résultats de recherche qui seront présentés dans la deuxième et la troisième partie de ce travail. Mais avant tout, il est primordial de faire une brève étude de la zone de recherche en question dans son cadre géographique afin de dégager ses différentes caractéristiques.

CHAPITRE II. LA SAHATSIO ET SON BASSIN-VERSANT

II.1. CADRE GÉOGRAPHIQUE DU BASSIN-VERSANT

Le bassin-versant de la Sahatsio est entouré par deux compartiments : celui de la Sahalombo à l'Est et celui de la Manandona à l'Est **(**Cf. **Figure 5)**. Par rapport à ces deux éléments du réseau hydrographique, la rivière Sahatsio est la plus développée dans la partie septentrionale, dans les abords de l'Ankaratra. Topographiquement, il longe le centre du bassin d'Antsirabe avec une forme très allongée et une direction nord-sud suivant les principaux escarpements à l'origine même de la formation de ce bassin (RAZAFIMAHEFA, 2010). Ce sont l'escarpement du Betampona et du Mandray ayant tous les deux une direction subméridienne. La faille du Mandray se présente à l'Est comme limite du compartiment avec les reliefs de Tsiatosika (1619 m), Vohibe (1686 m), Mandray (1740 m). À l'Ouest, il n'existe pas de véritable limite naturelle pour le bassin-versant, mais on observe souvent de petites collines (Mahabatry 1604 m) et quelques discontinuités topographiques, ce qui rend difficile la délimitation du compartiment par rapport à celui de la Sahalombo qui draine la partie occidentale du bassin d'Antsirabe. Dans la partie méridionale, le compartiment est délimité par la colline d'Ambohitrimanjaka (1542 m) et le volcan de l'Ivohitra (1649 m).

La rivière traverse tout le bassin d'Antsirabe et reçoit quelques affluents avant de rejoindre la rivière Manandona à l'est/Sud-est du village de Vinaninkarena vers 1380 m.

Son premier affluent -Morarano- naît dans le contrefort méridional de l'Ankaratra au pied du massif du Famoizankova (2365 m), d'Ambohitrandraina (2018 m) et de l'Iorifatra (2172 m). Celui-ci suit la façade occidentale du massif de l'Ivohibe (2035 m) dans des reliefs montagneux au niveau desquels la rivière traverse une série de seuils rocheux. À titre d'exemple, celui d'Andriamamovoka qui mesure environ 17 m de haut à l'ouest de l'Ivohibe (S19°43'53.8''/ E047°03'24.7'', Altitude : 1784 m).

Un deuxième affluent, en rive droite –Anteritery- qui prend source dans la partie occidentale du massif d'Anozatra (2285 m) rejoint la Sahatsio à l'ouest d'Ampataka[12]. La confluence s'effectue dans une vallée très profonde et étroite exposant un seuil rocheux dans lequel affleure de la roche saine notamment du basalte de forme très particulière.

[12] Latitude S19°43'48.0''/ Longitude E047°03'00.3'' ; Altitude : 1680 m

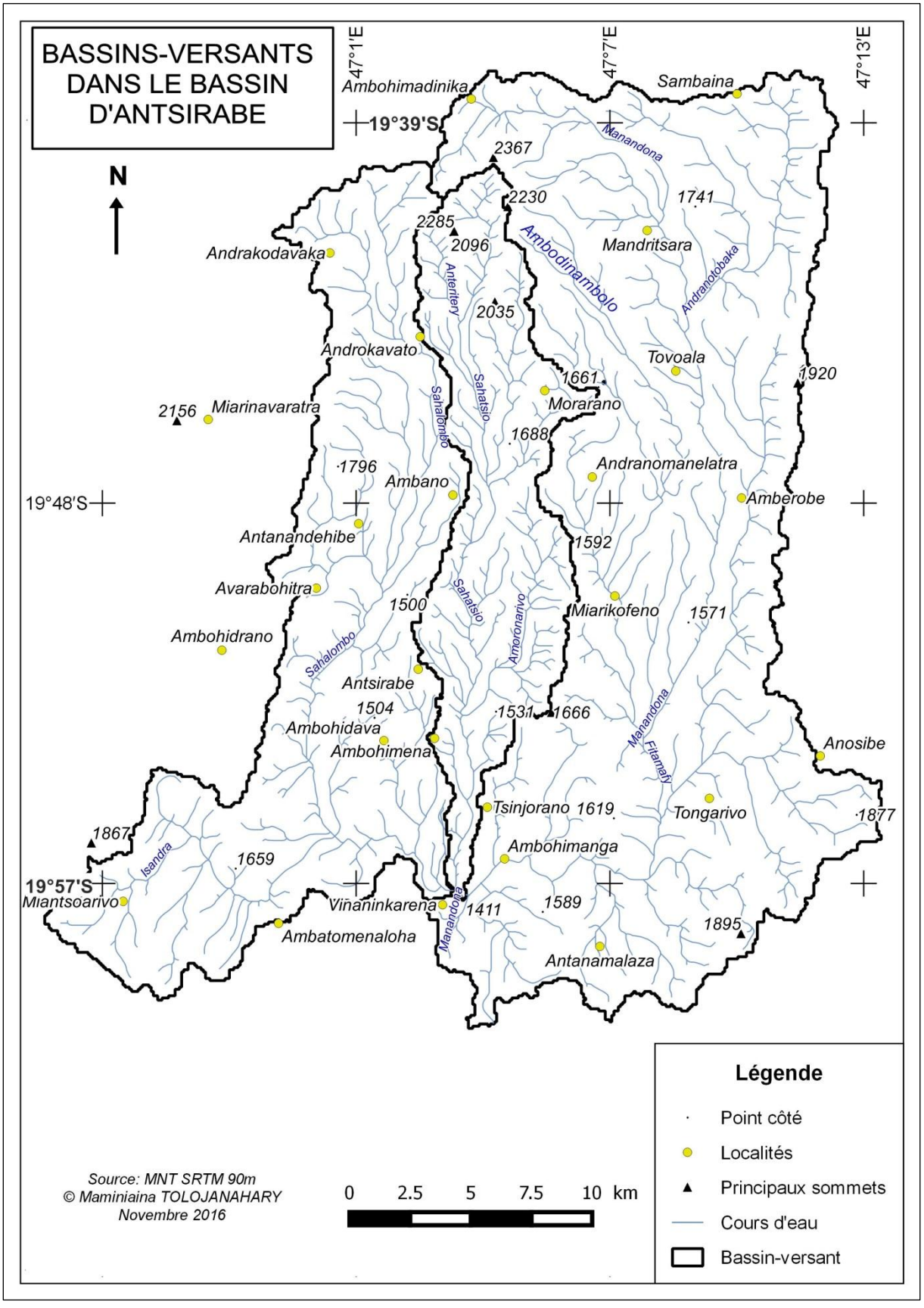

Figure 5. Bassins-versants dans le bassin d'Antsirabe

Un affluent -Miolikolika- (Sahatsio Est) naît au sud-est du massif de l'Ivohibe dans les environs d'Ambaribe et rejoint la Sahatsio à l'est d'Ambano[13] dans un paysage de colline. Un autre affluent sur la rive gauche au pied du Mandray –Amoronarivo- rejoint la Sahatsio à l'est d'Antsirabe. Enfin, quelques affluents viennent s'ajouter à la rivière Sahatsio, le Savolambo-descendant de l'escarpement du Mandray et –Andavarano- au nord-ouest de Vinaninkarena.

L'occupation du sol dans le bassin-versant se définit par une prédominance des cultures pluviales et des savanes pâturées étendues sur une vaste surface (Cf. **Figure 6**). La disparition progressive de la végétation fait place aux cultures pluviales et aux jachères. Cette situation va de pair avec une extension de la surface occupée par les constructions et les sols nus sur les versants.

II.2. MORPHOMÉTRIE DU BASSIN-VERSANT

La combinaison de la carte topographique au 1/100 000^{e} du FTM avec les bases de données vectorielles et le MNT SRTM 90 m a permis d'obtenir la morphométrie du bassin-versant de la Sahatsio **(**Cf. **Tableau 4)** avec des caractères spécifiques selon des indices donnés. Mis à part les calculs effectués à l'aide du SIG, la méthode de planimétrie a été adoptée avec une marge d'erreur de 2 à 3 %.

Tableau 4. Caractères morphométriques du bassin-versant de la Sahatsio

Superficie	**154 km²**
Périmètre	**83 km**
Indice de compacité de Gravelius (**Kc**)	**1,9**
Indice de pente globale (**IG**)	**24 m/km**
Rapport de confluence	**5**
Densité de drainage (**Dd**)	**1,36 km/km²**
Longueur de la rivière principale	**36,2 km**
Longueur totale des cours d'eau	**209 km**
Longueur du bassin	**33 km**
Largeur du bassin	**5 km**

Source : Calcul sur SIG et planimétrie

[13] Latitude S19°47'30.5''/ Longitude E047°03'34.0''; Altitude : 1511 m

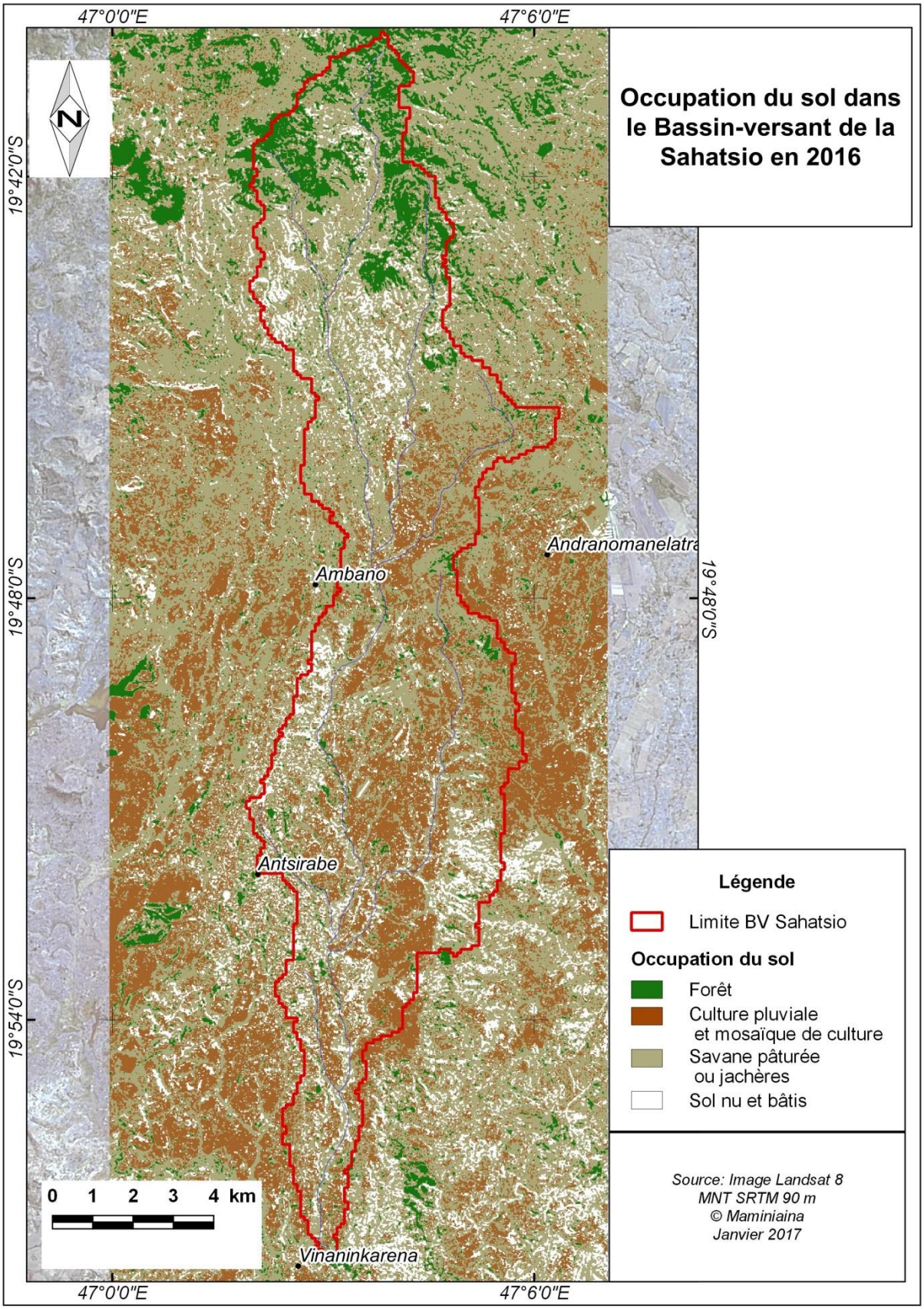

Figure 6. Occupation du sol dans le bassin-versant de la Sahatsio

La superficie totale du bassin-versant est d'environ 154 km² sur 33 km de long et 5 km de large en moyenne avec un périmètre avoisinant 83 km. La longueur de la rivière principale avoisine 36,2 km et la longueur totale des cours d'eau est d'environ 209 km. Dans le cas ici présent, la superficie, le périmètre du bassin ainsi que et la longueur de la rivière principale ont été calculés sur papier millimétré.

L'indice de compacité de Gravelius (*Kc*), qui, par définition, représente le rapport du périmètre du bassin par rapport au périmètre d'un cercle ayant la même surface, est obtenu à partir de la formule $\mathbf{Kc = 0,28 \times \frac{P}{\sqrt{A}}}$ où *P* est le périmètre du bassin-versant en kilomètre, et *A* représente la surface du bassin en km^2. Si l'indice est proche de 1, on peut déduire que le bassin-versant a une forme circulaire et il possède par contre une forme allongée si le résultat est supérieur à 1. La valeur de l'indice pour la Sahatsio est en effet largement supérieure à 1 (1,9). De toute évidence, tous les sous bassins-versants dans le bassin d'Antsirabe possèdent la même forme.

L'indice de pente globale est donné par la formule $\mathbf{IG = \frac{D}{L}}$ dont *D* représente la Dénivellation maximale de la rivière en mètres ou simplement la distance entre deux (2) points de celle-ci sur la carte, et *L* la distance réelle entre ces points en kilomètres. Cet indice donne une vue globale de la pente sur l'ensemble du bassin. Le profil en long de la rivière démontre formellement une pente faible de 3,3 m/km à l'aval d'Ambano contre 36 m/km en amont (Cf. **Figure 7**). Cela s'explique par une diversification du paysage qui peut être classé en deux : dans la partie Sud du bassin à partir d'Ambano jusqu'à Vinaninkarena, la platitude est généralisée, tandis qu'en amont, le relief est beaucoup plus varié, caractérisé par de vastes plateaux de coulées volcaniques vallonnées, souvent recouvertes d'un manteau de projection (ZEBROWSKI et RATSIMBAZAFY, 1979).

La densité de drainage peut être calculée par la formule suivante :

$\mathbf{Dd = \sum \frac{Li}{A}}$ (Formule de HORTON), où *Dd* est la densité de drainage (km/km²), *Li* représente la longueur totale des cours d'eau en kilomètres et *A* la superficie totale du bassin-versant en km². La densité de drainage d'une rivière est en outre fonction de la nature du substrat sur lequel elle s'écoule. Un substrat plus dur ne permet pas un développement du réseau hydrographique tandis qu'un substrat plus tendre occasionne et facilite la ramification des cours d'eau. C'est le cas pour la rivière Sahatsio qui s'inscrit tout entier dans un bassin à