

Article 4. Gestion de risques géotechniques en zone urbanisée : cas de la Ville Haute d'Antananarivo, MADAGASCAR

Andriamalala A. Nirina Miraniaina, Ratoarivelo Manitriniaina Dimby, Andrianirina Harifidy
Institut Supérieur de Technologie d'Antananarivo, Ecole du Génie Civil

1. INTRODUCTION

La Haute Ville d'Antananarivo (HVA), fait partie des quartiers de la capitale de Madagascar soumis à la réglementation de la zone de protection du patrimoine architectural, urbain et paysager (ZPPAUP). En revanche, l'urbanisation de cette zone, n'a pas permis d'endiguer l'urbanisation incontrôlée qui se caractérise par la spontanéité des constructions illicites causées notamment par la paupérisation des populations locales. Face à cette situation, l'aspect assainissement de la zone n'est plus maîtrisée et l'ensemble de ces phénomènes a créé un nouveau type d'exposition au risque par la dégradation du sol support et le déclenchement de mouvements du terrain parfois mortels

Cette zone urbanisée est soumise à des risques géotechniques qui nécessitent des reconnaissances sur la structuration géologique, l'urbanisation et les problèmes constatés pour suivre l'évolution des aléas. Des études techniques du massif de la haute ville d'Antananarivo révèlent des instabilités voire des aléas, tels que le glissement de terrain, les éboulements et les chutes de blocs. Ces phénomènes prompts exposent les populations riveraines à de nouveaux risques. Cette situation justifie la prise en compte de la gestion du risque dans cette zone et de sa cartographie en utilisant le Système d'Information Géographique (SIG).

L'objectif est d'élaborer des cartes de l'urbanisation et d'aléas géotechniques de la zone concernée afin de suivre l'évolution des risques et d'alerter les populations vis-à-vis du danger qui risque de se produire.

Les résultats de notre recherche vont apporter des solutions opérationnelles, surtout dans la prise de décision des autorités locales vis-à-vis de l'évolution de ces aléas et l'évolution sporadique des habitations dans la ville haute d'Antananarivo. Ceci mènerait à la mise en place d'un dispositif de surveillance continue, avec déclenchement d'alarme sur détection de seuil, le Système d'Alarme Précoce (SAP). La réalisation du SAP demande une stratégie bien menée à la fois à la recherche de financement et le soin des éléments de surveillance à mettre en place contre le vandalisme.

Notre investissement se porte sur l'observation du site et le recueil de données disponibles qui sont axées sur l'évolution de l'urbanisation de la zone et de sa périphérie ainsi que sur les mouvements du terrain.

Des moyens d'investigation ont été utilisés pour l'observation actuelle du site : photographie, descente sur le terrain pour détecter et inventorier les désordres liés à la fois à l'urbanisation et aux mouvements du terrain. Le report sur carte par le biais du logiciel Arc GIS permet un suivi de ces investigations.

Ces interventions vont être continuellement améliorées et affinées en utilisant très prochainement des matériels récents, à savoir, un scanner en trois dimensions et un drone plus performant.

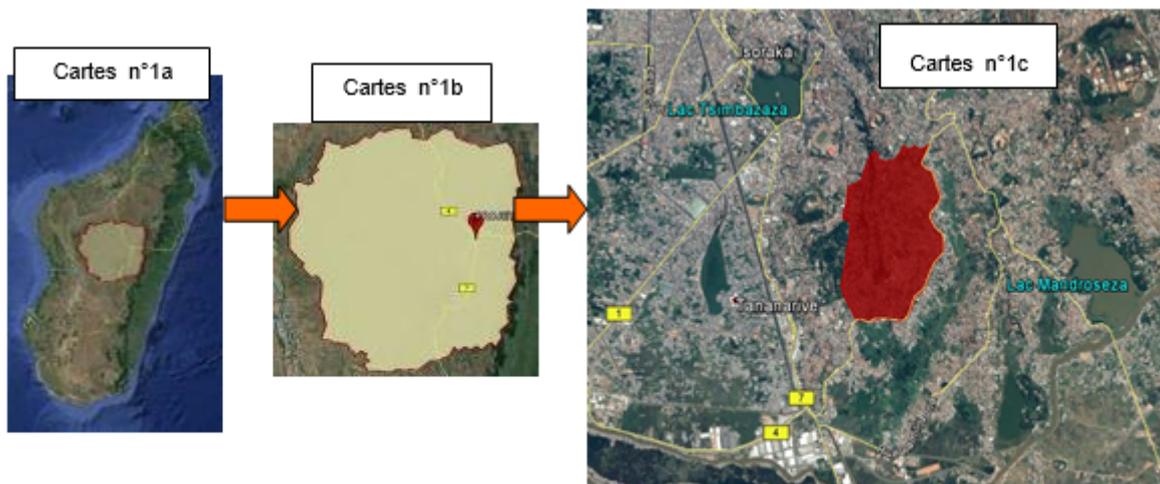
2. METHODES

2.1. LA ZONE D'INVESTIGATION

Notre site d'investigation est la Ville Haute d'Antananarivo (VHA), dans la Région d'Analamanga, une zone urbanisée possédant un historique particulier.

2.1.1 Délimitation de la ville haute

La haute ville d'Antananarivo fait partie de la région d'Analamanga dans la province d'Antananarivo. C'est une colline qui culmine à plus de 1400 mètres d'altitude. Sa superficie est d'environ 80 hectares et ses coordonnées géographiques sont : S18 55 20 E47 31 58. Elle est entourée d'une zone tampon de 170 hectares. Elle regroupe les quartiers d'Andohalo, Ambavahadimitafo, Belvédère, Amontana, Manjakamiadana, Ambohipotsy, témoins de l'époque de la puissante royale. Les cartes suivantes permettent de situer cette partie de la ville haute d'Antananarivo.



Carte n° 1 : LOCALISATION DE LA VILLE HAUTE D'ANTANANARIVO
Cartes n° 1a : Madagascar - 1b : Antananarivo – 1c : Ville haute d'Antananarivo (hachurée en rouge)

2. 1. 2 Historique de la ville haute [1]

Nous voyons en quelques lignes l'histoire de cette ville haute d'Antananarivo qui nous permet de mettre l'accent sur son urbanisation, un des facteurs d'enjeux du risque géotechnique.

« Antananarivo » fut appelée « Analamanga » — la « forêt bleue » — jusqu'en 1610, année où le roi merina « Andrianjaka » fit construire son palais sur la plus haute colline de la ville et y bâtit le tout premier « Rova » avec le palais « Besakana » pour y poster une garnison de 1 000 hommes. L'ancienne « Analamanga » prend alors le nom d'Antananarivo : la « ville des Mille », en réalité un village fortifié, protégé par de nombreux fossés circulaires et dont l'accès se fait par sept portes mégalithiques. C'est depuis l'emplacement du premier « Rova » que la cité se développe progressivement pour s'étendre sur l'ensemble de la colline (et devenir le noyau historique actuel). Son essor coïncide avec celui de l'Imerina, territoire de l'ethnie « merina », dominante sur les Hauts Plateaux et son statut de capitale est définitivement scellé à la fin du XVIIIème siècle, lorsque le roi « Andrianampoinimerina » parvient à unifier les peuples des Hautes Terres et quitte définitivement « Ambohimanga ».

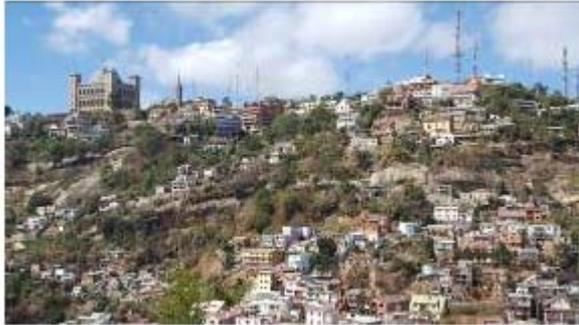


Photo n° 1 : la haute ville d'Antananarivo, versant Ouest

La Haute Ville est un site d'une qualité exceptionnelle. Elle est un site urbain d'une grande qualité patrimoniale, aussi bien en ce qui concerne les édifices architecturaux que sa situation paysagère.

Actuellement, la haute ville d'Antananarivo est soumise par la réglementation de la Zone de Protection du Patrimoine Architectural, Urbain et Paysager (ZPPAUP) mise en œuvre sur l'ensemble des zones historiques de la ville.

Les composantes historiques majeures de cette partie de la ville d'Antananarivo méritent d'être protégées vis-à-vis des risques menaçants :

- les bâtiments patrimoniaux majeurs (le site du Rova, les palais, etc.),
- les espaces publics remarquables (la place Andohalo, etc.),
- les espaces et lieux sacrés (les églises, temples, sources, arbres, etc.).

Voici quelques photos illustrant ces composants historiques.



1 : Rova Manjakamidana / 2 : Eglise Catholique Andohalo / 3 : Palais d'Andafiavaratra et Belvédère / 4 : Temple protestant Ambohipotsy

Photo n°2 : Exemple ensemble des composants historiques de la ville haute d'Antananarivo

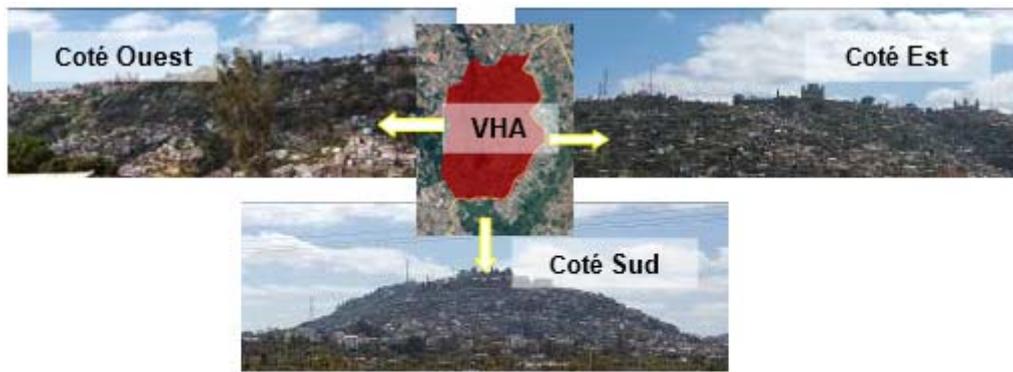
2. 2 .1 LES CARACTERISTIQUES DU SITE

2. 2 .1 les caractéristiques physiques du site

Les données géographique, topographique, hydrogéologique, météorologique et démographique de la ville haute d'Antananarivo sont présentées ci-après.

▫ La Morphologie du site

La ville haute d'Antananarivo s'est étendue sur un relief possédant une topographie caractérisée par des équidistances très marquées. La présence d'un escarpement bien souligné le long de la ville haute distingue ce site des autres collines de la ville d'Antananarivo. Morphologiquement, le versant Est épouse une forme de pente moyenne qui s'accroît progressivement, tandis que le versant Ouest surplombe la ville basse par la présence d'une grande falaise de massif rocheux granitique.

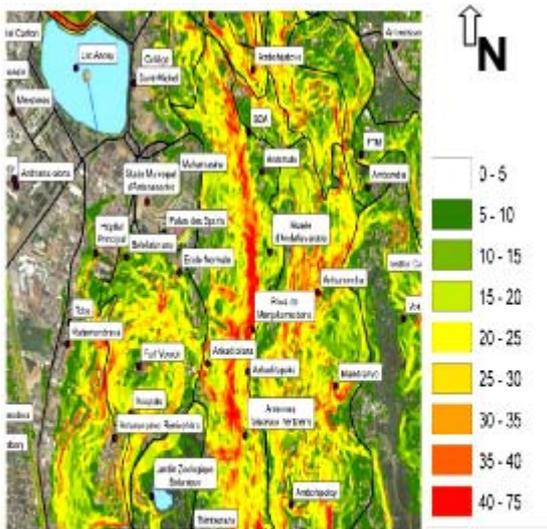


Photos 3 :
Morphologie de la Ville Haute d'Antananarivo (VHA)

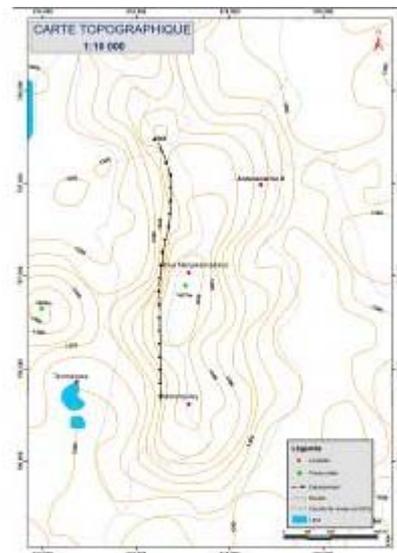
▫ La Topographie du terrain

La topographie du terrain de la ville haute d'Antananarivo met en évidence la présence d'un plateau subhorizontal de forme allongée au sommet, du fokontany Manjakamiadana à Ambohipotsy. Cette partie est située entre deux parties abruptes, présentée dans la carte n°2 ci-dessous, dont l'inclinaison varie de :

- 15 à 35 degrés, sur le versant Est et quelques endroits particuliers qui arrivent avoir jusqu'à 40 degrés,
- 35 à 75 degrés sur le flanc Ouest, presque une falaise qui surplombe le quartier de Mahamasina et Ankadilalana.



Carte 2a :
Pentés du terrain de la Ville Haute d'Antananarivo

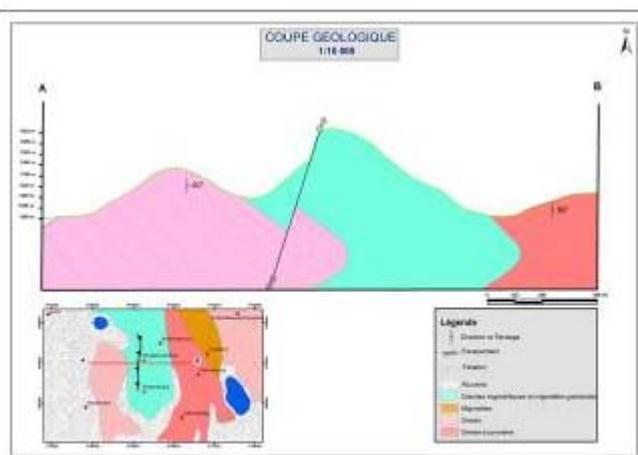
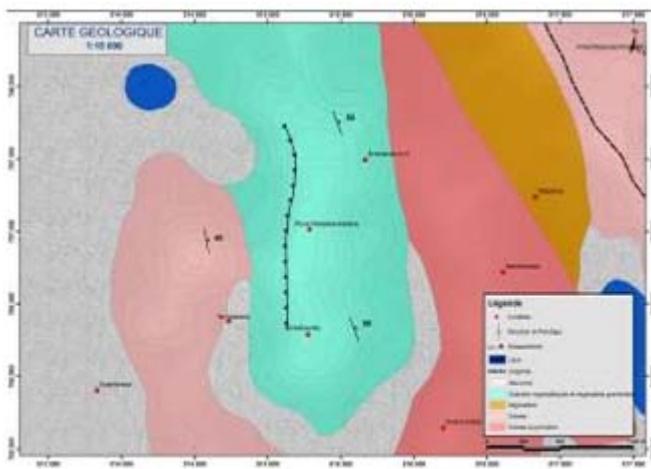


Carte 2b :
Topographie de la Ville Haute d'Antananarivo

▫ La Formation Géologique du site

Le relief de la haute ville d'Antananarivo est complexe, elle est constituée de la formation tectono-magmatique et métamorphique : ensemble des formations rocheuses de Granite migmatite et Migmatite granitoïde et des matériaux meubles dominants limoneux en surface.

Nous avons établi les cartes géologiques, par le Système d'Information Géographique (SIG), à l'échelle 1/15 000 de la ville haute d'Antananarivo et ses alentours (carte n°3).



**Carte n° 3 :
Carte géologique de la Ville Haute d'Antananarivo et ses alentours par le SIG**

▣ **Les caractéristiques climatiques**

Notre zone d'étude se situe dans la Région à climat humide (hautes terres) qui est caractérisée par des hivers frais et très secs et des étés doux et très pluvieux. Situé dans la zone intertropicale, la région présente les caractéristiques d'un climat tropical d'altitude présentant deux saisons bien distinctes :

- une saison pluvieuse et chaude s'étalant de Novembre à Avril
- une saison fraîche et relativement sèche sur le reste de l'année.

Les données, ci-après, de la pluviométrie, des températures et du vent de ville d'Antananarivo nous permettent d'analyser le processus du risque géotechnique car ces trois éléments font parties des facteurs aggravants du mouvement du terrain.

La pluviométrie

Nous utilisons une série pluviométrique qui s'étale de l'année 2012 à l'année 2016 de la Direction Générale de la Météorologie d'Antananarivo

Selon ces données pluviométriques établies, les précipitations moyennes varient entre 800 à 1500 mm par an.

La Température

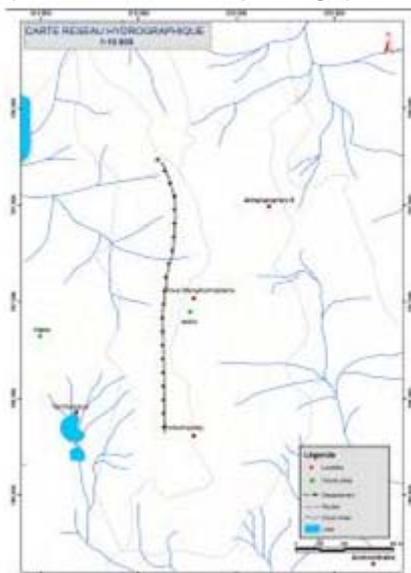
La température moyenne de la région d'Analamanga est 19°C, avec une variation annuelle de 9°C.

Les Vents

Le haut plateau d'Antananarivo est exposée à des vents allant de 1.39 à 1.94 m/s. Il est positionné dans une zone à haut risque cyclonique et dans ce cas, les rafales atteignent très quelquefois 100 km/h. Voici les données les plus récentes disponibles, celle de l'année 2016.

▣ **L'Hydrologie du site**

Le site d'étude appartient à la zone hydrologique des Hauts-Plateaux, présenté dans la carte suivante.



**Carte n°5 : Réseau hydrographique de la ville
haute d'Antananarivo, par le SIG**

On constate sur le lieu la présence de sources naturelles sporadiques provenant des blocs rocheux utilisés comme source d'eau par les habitants durant la saison sèche.

Ces sources, ainsi que leur utilisation accentuent l'instabilité des terrains dans cette zone.

▣ **La couverture végétale**

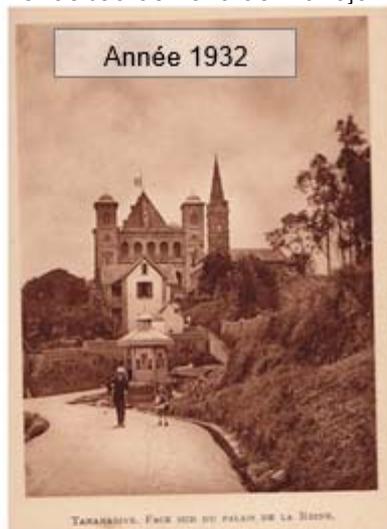
Le site et ses alentours sont marqués par une « mixité » du paysage naturel et urbain : jardins, places urbaines et espaces publics.

On rencontre des plantes qui participent majoritairement à la limitation de l'érosion et de plantes sauvages dans les terrains abrupts (voir photo n°4). Dans la zone où les pentes sont moindres, on rencontre de l'agriculture urbaine. L'étude de la végétation en milieu urbain, constitue une information de base précieuse pour la gestion de l'espace. Mais dans notre site, l'étendue de la couverture végétale diminue progressivement, et voire inexistant dans les parties où le phénomène de glissement a lieu.



Photos N° 4 :
Aspect des couvertures végétales de la VHA

Les deux photos suivantes illustrent la disparition totale des couvertures végétales d'une partie de la VHA suite à l'urbanisation du quartier au sud du Rova de Manajakamiadana.

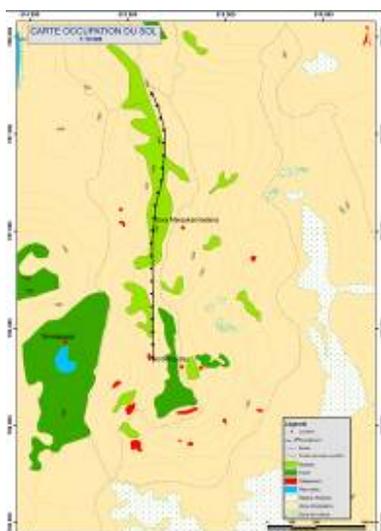


De I.Manhes, tirée de « A MADAGASCAR » B.Arthaud. Grenoble

De l'Auteur

Photos N°5 :
Disparition totale des végétations sur le coté sud du Rova de Manajakamiadana

La carte d'occupation du sol suivante nous montre le reste de la végétation de cette VHA en 2018.



Carte 4 : Carte d'occupation du sol de la VHA
Le reste de la couverture végétale

D'après les caractéristiques physiques de la ville haute d'Antananarivo : une topographie escarpée avec la prédominance des formations meubles en surface et par la présence des formations rocheuses particulières bien

marquées, l'action de la climatologie, pluviométrique intense en été, zone à haut risque cyclonique et température annuelle modérée, fragilise les structures des formations lithologiques surtout les limons. Ceux-ci constituent des facteurs naturels favorisant le déclenchement des glissements de terrain et les autres types d'aléas.

Maintenant, nous nous posons la question sur le rôle des facteurs anthropiques dans le déclenchement de ces mouvements de terrain.

2.2.2 Les facteurs anthropiques de la ville haute d'Antananarivo

▫ La population

En 1924, la population de la ville d'Antananarivo comptait de 1500 à 3000 habitants. La commune urbaine d'Antananarivo dont la ville haute d'Antananarivo fait partie accueille plus de 2 200 000 habitants en 2012. Cette évolution du nombre de population dans la Commune Urbaine d'Antananarivo est représentée dans la figure suivante.



Figure n° 1 : Evolution du nombre de population dans la Commune Urbaine d'Antananarivo

La densité de population en 2018 dans la Commune Urbaine d'Antananarivo (CUA) est de 14 113 habitants/ hectare ?

▫ Evolution de l'urbanisation

A l'époque royale, la zone nord du Rova de Manjakamiadana est très boisée et les constructions sont de nature légère. Les risques de mouvement de terrain sont minimes (voir photo n°6 et n°7).



Photo n° 6 : Urbanisation à l'époque royale



Photo n° 7 : Urbanisation année 2018

Par contre, en 2018, l'urbanisation de la ville d'Antananarivo a connu une grande évolution vis-à-vis des années précédentes. Les deux photographies aériennes, prise en 2002 et 2017 montre cette importante évolution de l'urbanisation.



2002



2017

Photo n° 8 : Photographies aériennes de la zone d'étude en l'année 2002 et

Ceux-ci sont due à la fois à l'exiguïté des possibilités d'extensions, à la topographie du site et l'occupation du terrain, qui s'est fait de manière :

- anarchique
- informelle en termes de construction et d'occupation du sol, sans considération de la promiscuité et des lieux d'implantations



Photo n° 9 : Urbanisation suivant le flanc Est de la colline

Nous voyons à travers les facteurs Naturels et anthropiques de la ville haute d'Antananarivo que le secteur n'est pas à l'abri du danger tel que l'instabilité des versants qui engendre un risque pour la zone urbaine située en contrebas.

Ces facteurs sont :

à la topographie très accidentée dans la partie Ouest de la colline, et des pentes aux dénivellations très fortes ; la partie Est qui possède une pente atténuée est sujette à l'urbanisation accélérée.

à le massif granitique surmonté de la prédominance des formations des sols limoneux en surface

à le pluviométrique caractérisé par une irrégularité interannuel, saisonnière et mensuelle

à l'accroissement démographique

à l'urbanisation désordonné et non maîtrisée qui s'est réalisée sur les terrains les plus vulnérables de la ville haute et dans les moindres endroits inconstructibles.

L'ensemble de ces modes d'urbanisation, ainsi que les caractéristiques physiques du terrain entraînent plusieurs aléas dont les plus fréquents et majoritaires sont des glissements de terrain, les chutes des blocs sont rares mais ont des conséquences très meurtrières.

Cette combinaison constitue le risque géotechnique que nous allons expliciter par la suite et nous allons voir comment faire pour l'évaluer et le gérer ?

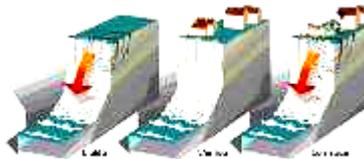
2.3 LE RISQUE

La notion de risque se situe à l'interface du milieu physique et du milieu anthropique, dans notre cas c'est la zone urbanisée de la ville haute d'Antananarivo.

2.3.1 Qu'est-ce un risque ?

Un danger pourrait arriver à chaque instant inopiné, et le risque est un outil utilisé pour mesurer ce danger tel que pertes de vies humaines, blessés, dommages aux biens, et atteinte à l'activité économique etc...

$$\text{ALEA} \times \text{ENJEU} = \text{RISQUE}$$



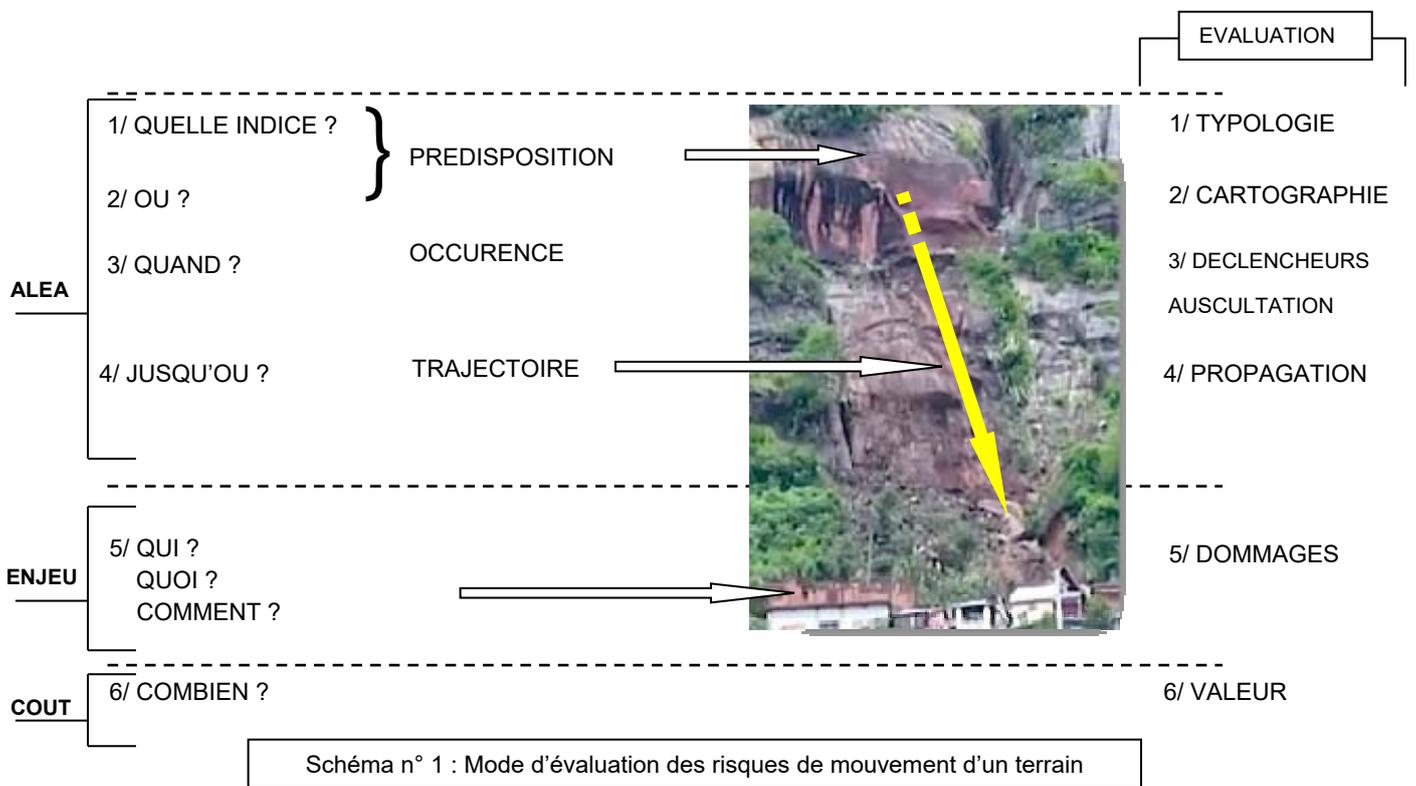
En d'autre terme, un risque géotechnique correspond à un aléa géotechnique associé à un enjeu montré par le schéma ci-après [2].

Dans une zone urbanisée, l'enjeu présente les personnes, les biens, les intérêts et les valeurs socio-économiques menacés par un aléa.

L'aléa, lié aux plusieurs risques possible vis-à-vis du terrain est exprimé généralement dans une échelle de type : faible, moyen ou fort. Par exemple, pour un glissement de terrain, est-ce qu'il a une grande ampleur que ce soit un glissement circulaire ou plan? Si oui, l'aléa est fort.

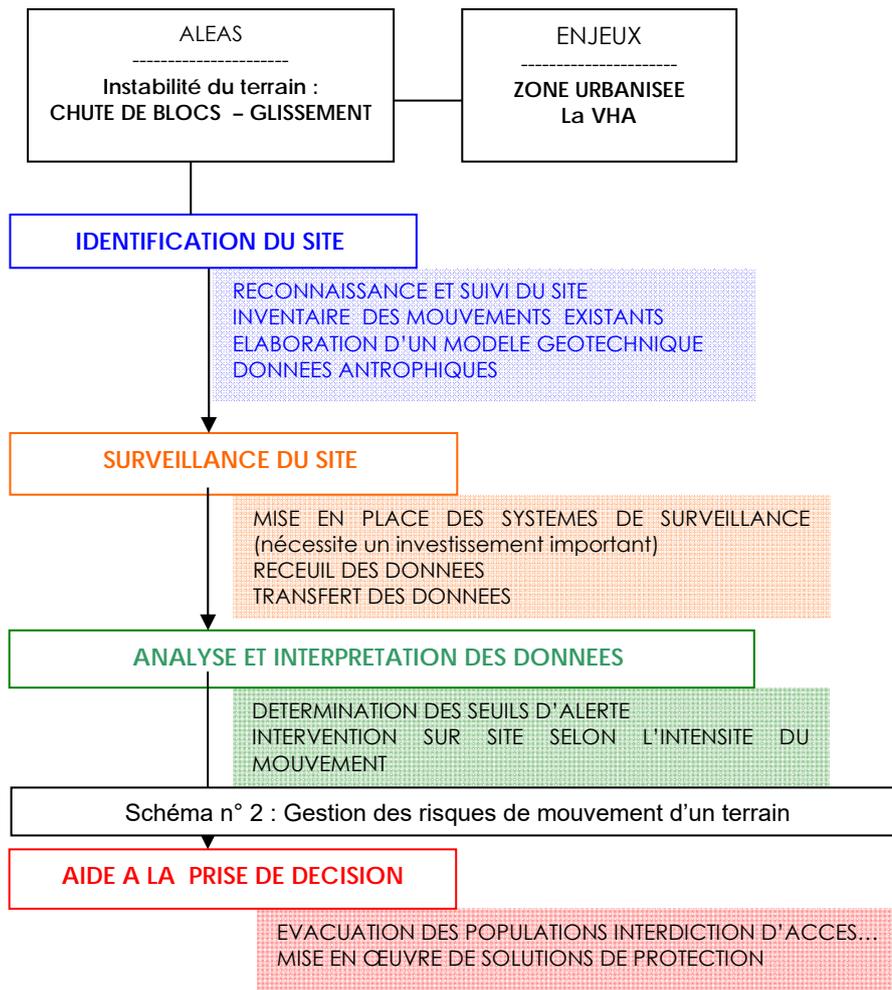
2.3.2 Que faut-il faire pour évaluer le risque géotechnique ?

Le schéma ci-dessous, illustré par la photo de la chute de bloc meurtrière de février 2018 de la falaise d'Ampamarinana, montre les questions principales auxquelles il faut répondre afin d'évaluer le risque de mouvement du terrain. Il ne faut pas oublier la question du coût qui n'est pas négligeable dans la gestion des risques pour pouvoir assurer la question de la résilience (non traité dans cette étude).



2.3.3 Comment gère-t-on un risque géotechnique ?

La gestion des risques géotechniques dans la ville haute d'Antananarivo nécessite l'identification du site, sa surveillance. A travers l'analyse et l'interprétation des données recueillies, ceci constitue une aide à la prise de décision, afin de déclencher le moment où l'on doit intervenir sur le site pour mettre en place des solutions adéquates. Cette gestion est résumée dans le schéma suivant.



Pour bien cerner ces aléas, nous devons localiser les indices d'instabilités dans ce secteur de la VHA. Des essais géotechniques, à savoir l'identification physique et essais de mécanique des sols dans des zones instables, ont été mené par la suite.

2. 4 LES ALEAS GEOTECHNIQUES

Un aléa géotechnique est la possibilité qu'un lieu ou un site subisse un phénomène géotechnique (glissement, chute de bloc...). Nous avons fait des relevés et avons observé sur terrain les indices d'instabilités pour bien spécifier les aléas géotechniques de la VHA, notamment le glissement du terrain et la chute de bloc.

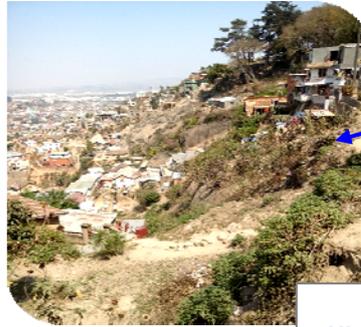
2.4.1 Phénomènes de glissement de terrain

Plusieurs indices d'instabilités sont repérés dans la zone d'investigation : niches d'arrachement, inclinaison des arbres, fissuration des infrastructures, écoulement du mur de soutènement, déformation des ouvrages et départ des fines. Ces indices forment des signes d'instabilité préalable aux phénomènes de glissements de terrain.

▫ NICHE D'ARRACHEMENT

Dans le fokontany d'Ambohipotsy

Photos N° 11 :
Indice de glissement de terrain
Secteur 1 : Amorondalana



Photos N°12 :
Niche d'arrachement / Secteur 2 : Amparihy

▫ INCLINAISON DES ARBRES ET ECOULEMENT DU MUR DE SOUTÈNEMENT

Dans le fokontany de Manjakamiadana

Inclinaison des arbres

Écroulement d'un mur de soutènement en maçonnerie de moellons

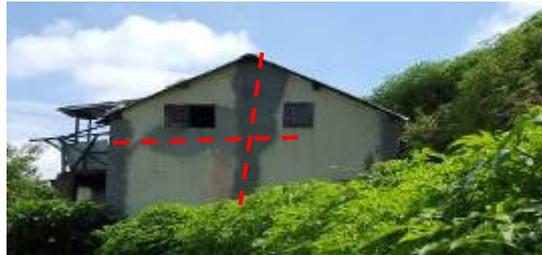


Photo N° 13 :
Écroulement du mur de soutènement
Inclinaison des arbres
Secteur 4 : Ambaravambato

Les fissurations des infrastructures (bâtiment, mur de soutènement,...), constituent des alarmes pour les populations indiquant la présence du glissement. Les habitants concernés tentent de réparer ces fissurations à plusieurs reprises mais l'effet des mouvements, rapides ou lents, du terrain n'empêchent pas la réapparition de ces dégâts.

▫ Présence des fissurations sur les bâtiments

Dans le fokontany de Manjakamiadana



Photos N°14 :
Fissuration des murs des maisons dans le flanc Ouest du Fokontany de Manjakamiadana

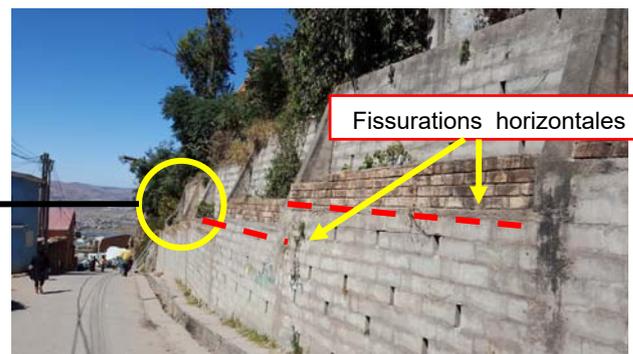
▫ Présence des fissurations sur les ouvrages de soutènement

Dans le fokontany d'Ambohipotsy

Photos N°15 :
Déformation du contrefort et fissurations du mur de soutènement



Contrefort



▣ **Présence du départ des fines**

L'eau joue un rôle important dans les processus de glissements dans un milieu de formation meuble. Elle exerce sur ces sols une influence particulière, qui se traduit de plusieurs manières : départ des fines, création des dolines, écoulement des ouvrages ... dont voici quelques exemples d'apparitions significatifs dans la VHA.

Dans le fokontany de Manjakamiadana



Place Andohalo

Photos N°16 :
Départ des fines sous chaussées : entre le lycée et la place Andohalo



Rova Manjakamiadana

Photos N° 17 :
Départ des fines sous chaussées : route coté Ouest du Rova vers Ambohipotsy

Dans le Fokontany d'Andohamandry à coté d'Ambohipotsy



Evacuation des eaux usées



Photos
Départ des fines sous ouvrage provoquant l'écroulement du soutènement à cause de l'assainissement non maîtrisé des eaux usées qui sapent sa fondation

2.4.2 Phénomènes de chutes de blocs

La caractérisation des indices morphologiques liés aux phénomènes de chutes de blocs est basée sur l'identification de plusieurs paramètres tels que le type et la dimension de la paroi rocheuse, sa pente, sa nature géologique, sa texture ainsi que le dièdre instable et les incrustations des blocs dans la pente. Voici quelques indices de prédiction des chutes de blocs parmi tant d'autres que nous avons relevés in-situ.

Dans le fokontany de Manjakamiadana



Déficiences des matériaux d'incrustation pouvant entraîner la chute du bloc, direction indiquée par la flèche rouge

Photos N°19 :
Présence de détachement de bloc rocheux

Photo N° 20 :
Départ des matériaux sur le versant sous une paroi rocheuse de dimension importante



Poussée de la paroi rocheuse granitique de masse importante

La présence de dièdres instables dans la paroi rocheuse est un indice significatif concernant l'aléa « chute de blocs ». Cet indice se retrouve particulièrement dès que la roche est fracturée et où l'on constate une présence d'eau visible. Des blocs se décollent de la matrice rocheuse ce qui entraîne des risques majeurs pour les habitants aux alentours.

Dans le fokontany d'Ambohipotsy

Dièdre rocheux instable

Départ d'une partie rocheuse du à la perte des fines



Photo N° 21 :
Roches fracturées, présence de dièdres instables et départ d'une partie rocheuse. Secteur 2 :

Face à ces types d'aléas, constituant des consignes d'alerte, les habitants doivent être prudents et les autorités devraient surveiller l'évolution des ces mouvements de terrain anticipés.

En effet, l'ensemble de l'aléa et de l'enjeu entraîne des risques qui menacent les habitants en amont et en aval de ces phénomènes.

Nous allons voir par la suite, quels sont les enjeux qui provoquent des risques géotechniques dans la VHA ?

2. 5 LES ENJEUX : HABITATION, ASSAINISSEMENT

Par définition, l'enjeu est l'ensemble des personnes et des biens vulnérables à la survenue de l'aléa géotechnique. Autrement dit, les enjeux sont les intérêts humains et économiques menacés lors de l'événement [3]

Dans la ville haute d'Antananarivo, ci-après quelques exemples pour mettre en exergue ces enjeux au niveau des infrastructures et les habitations.

AU NIVEAU DES INFRASTRUCTURES ROUTIERES

Photo N°22 :
ROUTE BITUME VERS AMPAHAMARINANA : FISSURATION TRANSVERSALE DE LA SURFACE DE REVETEMENT



ENJEU AU NIVEAU DES HABITATIONS



Photo N°23:
HABITATION IMPLANTE SUIVANT LA PENTE DU VERSANT ET EN TETE DU GLISSEMENT



Photos N°24 :
HABITATION AU BORDS OU EN BAS DE LA FALaise DE LA VHA

Des études scientifiques ont été faites pour connaître les caractéristiques géotechniques de la formation meuble sujette au glissement dans ce secteur ainsi que la stabilité des pentes. Des prélèvements des échantillons, intacts et remaniés, ont été faits pour effectuer les essais au laboratoire.

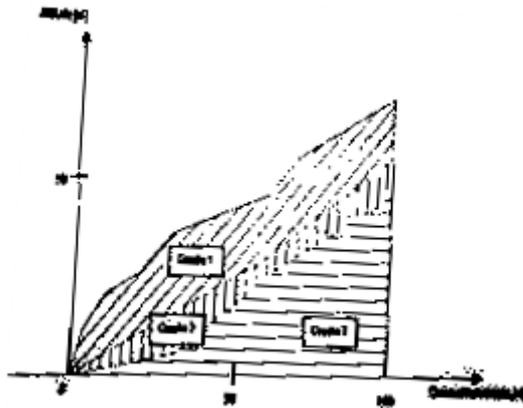
2 .5. ESSAIS ET CALCUL DE STABILITE DU TERRAIN

2.5.1 Essai géotechnique

Suite à la descente in-situ, nous avons mené des essais de laboratoire sur les trois sols constitutifs d'un glissement de terrain de la VHA. Les matériaux testés sont des sols limoneux. D'après l'observation du glissement sur terrain, nous avons une surface de glissement circulaire, ce qui nous mène à modéliser le mouvement du terrain selon le graphe n° 3 .



Photo n° 25 :
Glissement du terrain de la VAH,
versant Est de la colline de
Manajakamiadana



Graphe n° 3
Modélisation d'un glissement du terrain de la VAH

Pour le glissement du terrain, les paramètres importants sont la cohésion et l'angle de frottement du sol ; ces valeurs sont déterminées à l'aide des essais triaxiaux et de cisaillement direct.

Des paramètres physiques tels que les différents poids volumiques (humide, sec, des grains solides), la granulométrie et la teneur en eau sont obtenus à partir des essais d'identification physique des sols.

2.5.2 Calcul de stabilité

Etudier la stabilité d'une pente nécessite la compréhension du mécanisme de rupture du sol.

La rupture statique du sol se déclenche lorsque les efforts moteurs excèdent les efforts résistants mobilisables le long de la surface du glissement ou de la rupture Σ.

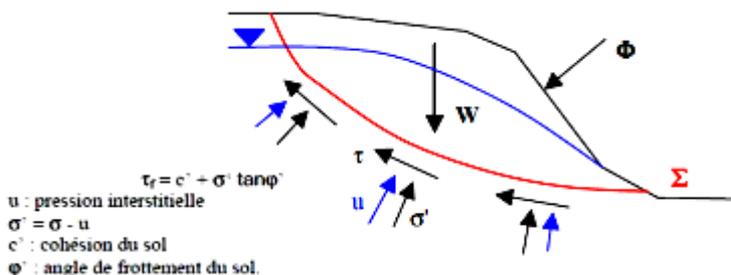


Schéma n° 4
Rupture statique d'un glissement

Les caractéristiques physiques et mécaniques de sol obtenues, nous avons effectué des calculs de stabilité en utilisant la méthode de tranches (voir schéma ci-dessous).

Cette méthode se repose sur le principe de découpage en tranches verticales le sol en mouvement et étudie l'équilibre de chaque tranche pour déterminer le coefficient de sécurité. Il des cas particulier pour la méthode de tranches :

α: Méthode de Fellenius : surface de glissement de forme circulaire, hypothèse= pas d'effort entre tranches,

α Méthode de Bishop : surface de glissement de forme circulaire, efforts horizontaux pris en compte, résolution itérative sur l'équation de moment.

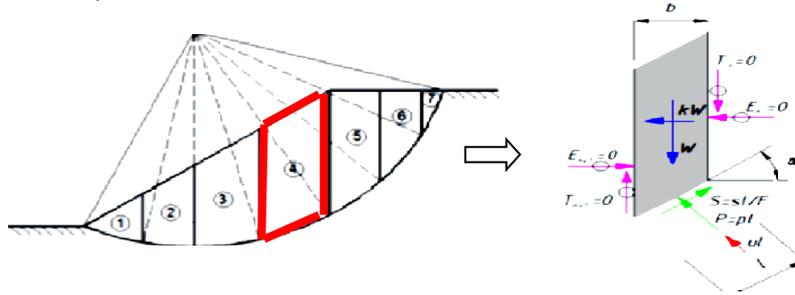


Schéma n° 5
Méthode des tranches – Calcul des stabilités des pentes

La gestion des risques géotechniques effectuée, voyons la partie cartographie de ces aléas et enjeux dans la VHA.

2.6. ELABORATION DES CARTOGRAPHIES DES RISQUES

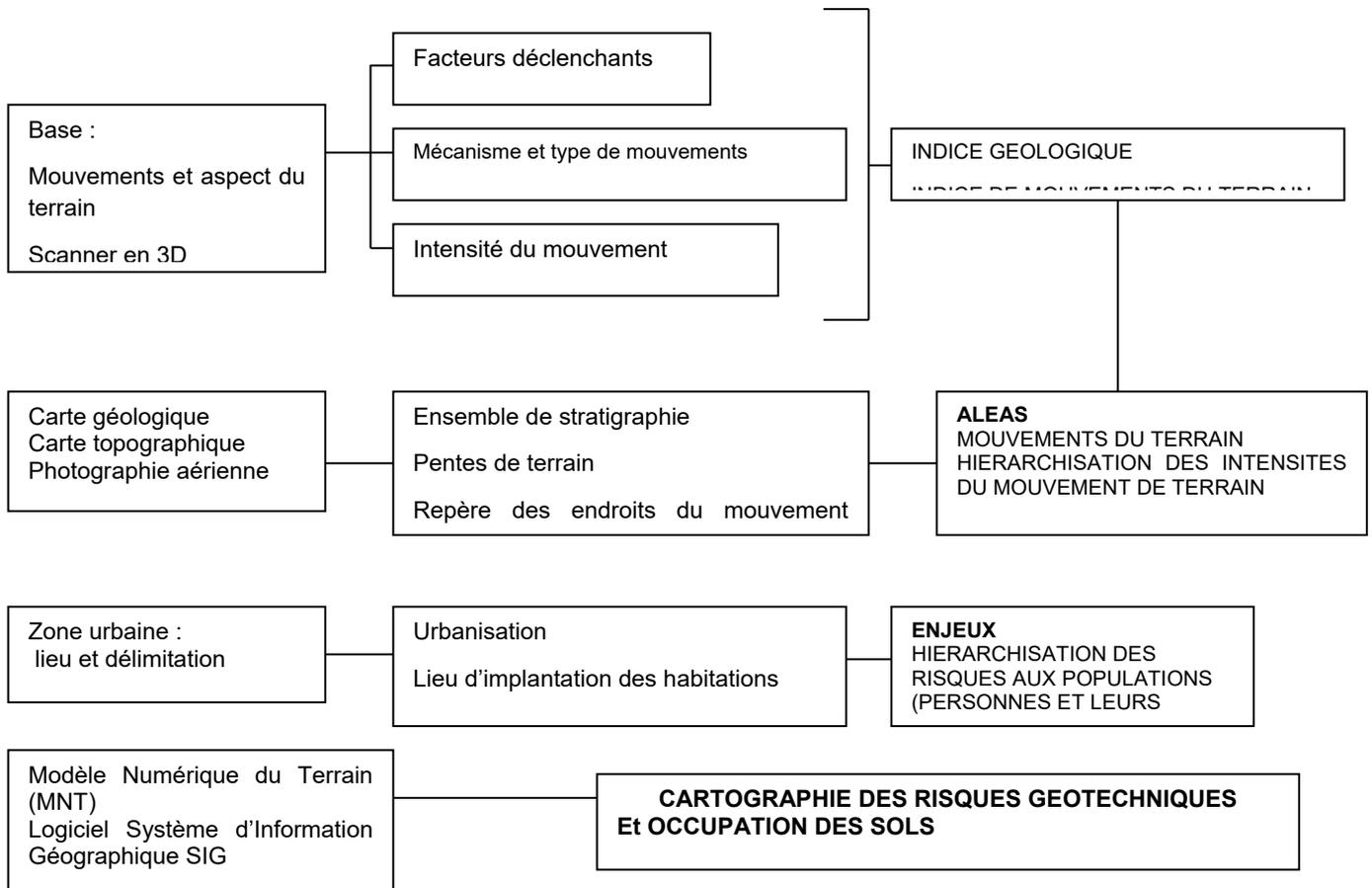
Le Système d'Information Géographique (SIG) devient aujourd'hui un outil de connaissance et d'outil d'aide à la décision dans de nombreux domaines. En effet, ce système permet d'acquérir, de traiter et d'analyser les données géo-spatiales dans le but d'élaborer des cartes et des bases de données spatiales.

Dans notre cas, nos cartographies des risques et d'occupation de sols ont été élaborées par le logiciel « ArcGis ».

Tout d'abord, on établit en premier la représentation des différentes cartes telle que la carte géologique, carte topographiques, la carte hydrologique à partir de la photographie aérienne du site et des données disponibles.

Ensuite, on a la possibilité de faire plusieurs combinaisons par le système de superpositions des cartes, ce qui aboutit à l'élaboration des cartes finales. Dans notre cas, c'est la carte de risques géotechniques et l'occupation des sols de la ville haute d'Antananarivo.

Voici la méthode de travail que nous avons appliqué pour réaliser les cartes.



Voici les résultats de nos investigations dans la ville haute d'Antananarivo en terme de cartographie des risques géotechniques.

3. RESULTATS

Les résultats présentés, ci-dessous, montrent les indices des instabilités, les caractéristiques géotechniques et les cartes de risques ainsi que l'occupation du sol de la ville haute d'Antananarivo.

3.1 Résultats géotechniques

Les résultats géotechniques sont constitués de relevés des indices d'instabilités, des paramètres géotechniques et des coefficients de sécurité.

▫ Indice d'instabilités

Les indices d'instabilités constatés et relevés sur les flancs Est-Ouest-Sud de la colline de Manjakamiadana sont présentés dans le tableau n°1 lors de notre intervention dans le fokontany Manjakamiadana et le fokontany Ambohipotsy.

Quartier		Indice d'instabilité	Mouvement	Degré de risque
Ambohipotsy	Secteur 1 : Amorondalana	Niche d'arrachement Escarpement	Glissement de terrain Effondrement	Fort
Ambohipotsy	Secteur 2 : Amparihy	Eboulis	Eboulement	Moyen
Ambohipotsy	Secteur 2 : Amparihy	Roches fracturées et présence de dièdres instables	Chute des blocs	Faible
Ambohipotsy	Secteur 4 Ambatabe	Déracinement et escarpement	Glissement, Erosion	Fort
Manjakamiadana	Secteur 4 : Ambaravarambato	Eroulement du mur de soutènement	Glissement du terrain en aval du talus	Moyen
Manjakamiadana	Secteur 5 : Antsahondra	fractures fraîches des massifs rocheux	Chute des blocs	Fort
Manjakamiadana	Secteur 5 : Antsahondra	Rupture de pente	Glissement	Fort
Manjakamiadana Ambohipotsy	Plusieurs secteurs	Fissuration des murs	Glissement Effondrement	Moyen à Fort
Manjakamiadana Ambohipotsy	Secteur 5 : Antsahondra Secteur 2 et 4 : Amparihy et Ambatabe	Ecoulement débordant et présence des zones humides, en permanence ou temporaire	Glissement Affouillement des fondations des ouvrages	Moyen à Fort

Tableau n° 1 : Indices de mouvement d'instabilité du terrain de la VHA (année 2018)

▫ Essais géotechniques

Les caractéristiques physiques et mécaniques des ces sols limoneux présents dans le glissement de la VAH sont résumés dans le tableau suivant.

Tableau n° 2 : Résultats des essais géotechniques

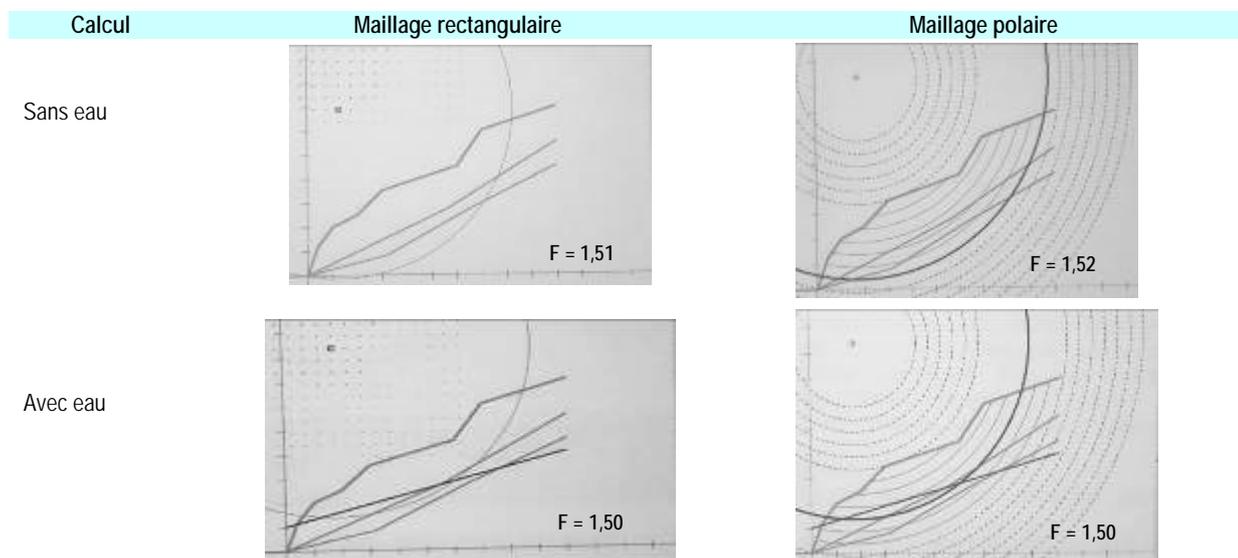
N° couche	Teneur en eau [%]	Poids volumique humide [kN/m ³]	Poids volumique des grains [kN/m ³]	Angle de frottement [°]	Cohésion [kPa]
1	18	16,5	26,5	16	18
2	19,5	16	27,2	17	21
3	20	18,5	27,4	20	25

D'après les résultats du laboratoire, nous avons des formations meubles, sol limoneux à limon-argileux-sableux, peu à moyennement compacte.

Des calculs de stabilité de pente naturelle ont été menés en tenant compte de ces valeurs caractéristiques du sol rencontré sur le terrain.

▫ Calcul de stabilité

Après calcul nous avons quelque exemple des positions de la surface de glissement avec les coefficients de sécurité respectifs dans le tableau suivant.



3.2 Résultats urbanisation

On peut voir que l'urbanisation de la VHA s'accroît par la présence d'immeubles au sommet de la colline et l'apparition des constructions illicites sur des versants instables, ce qui provoque des mouvements de terrains. Ce mode de construction est dû à l'évolution de l'urbanisation non maîtrisée selon la carte aérienne suivante. Cette ville haute d'Antananarivo est constituée par des quartiers très saturés par rapport à l'habitation et à l'occupation du sol, c'est une « zone à forts risques ».

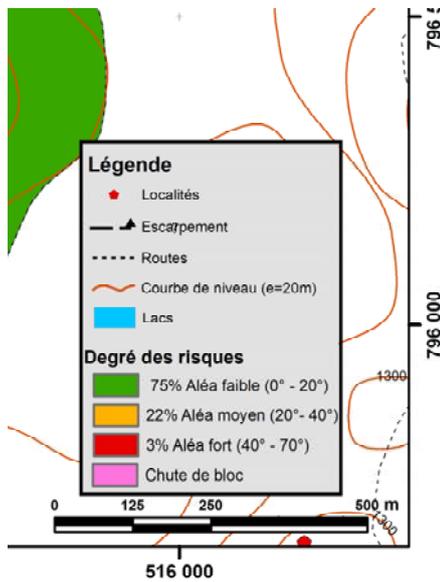


Evolution de l'urbanisation, non contrôlée

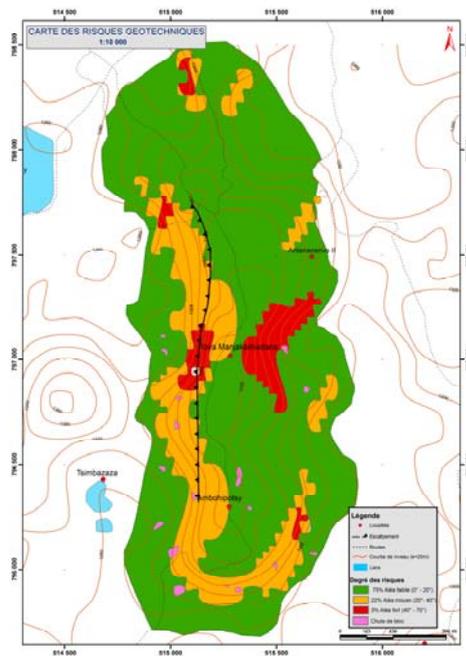
Photo n° 26 : Evolution de l'urbanisation de la zone d'étude de l'année 2002 à 2017

▣ Carte des risques géotechniques

Le report des investigations sur le terrain combiné par le traitement des cartes par le logiciel ArcGis permet d'obtenir les résultats suivants : carte des risques géotechniques et l'occupation du sol suivant des périodes différentes de la ville haute d'Antananarivo.

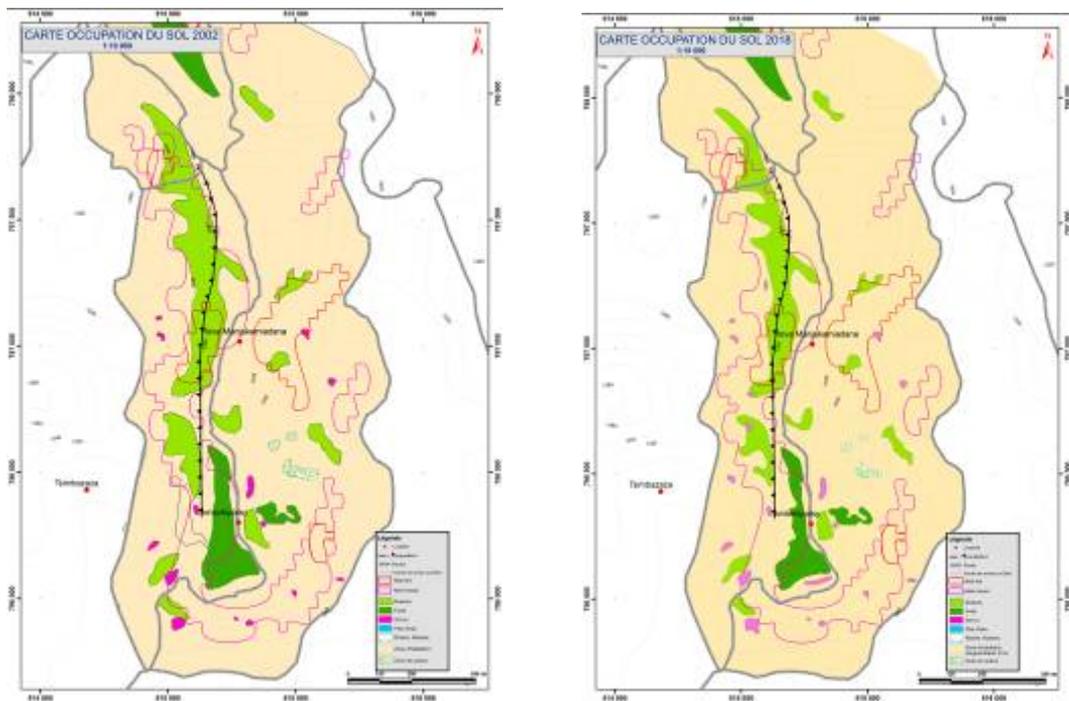


Année 2002



▣ Cartes d'occupation du sol

Année 2018



CARTE N°4 : Carte des risques géotechniques

4. DISCUSSION

CARTE N°5 ET 6 : Carte d'occupation des sols en 2002 et 2018

Cette recherche montre les potentialités de la combinaison d'investigation in-situ et d'analyse spatiale (échelle : 1/10 000) pour estimer le risque de glissement du terrain.

Elle complète les investigations déjà entamés par les autres organismes qui travaillent dans le domaine de la Gestion de Risque de Catastrophe dans la VHA, entre autres le BNGRC. Bureau National de gestion de risque de catastrophe. A partir des différents étapes, le risque géotechnique et l'occupation des sols ont été identifiés et cartographiés en associant plusieurs données : (1) recueil des données géographique, géologique, hydrologique et le mode d'urbanisation de la ville haute d'Antananarivo ; (2) investigations sur terrain pour relever des indices de mouvement de terrain et réaliser des essais géotechniques au laboratoire ; (3) l'exploitation des photographies aériennes.

▣ Milieu naturel

La combinaison de la topographie et l'hydrogéologie du site est un facteur important pour la gestion de risque géotechnique (zone susceptible de s'ébouler ou de se glisser) ;

Un exemple qui s'est passé dans notre secteur d'étude, un gros bloc rocheux, lessivé par des pluies estivales, pendant plusieurs années, s'est détaché soudainement de la matrice rocheuse et a chuté de la falaise d'Ampahamarinana. A part cela, la multiplication des zones de glissement actives, de taille moyenne, sont apparus sur les deux versants de la colline.

Pour les infrastructures, cette combinaison topo-hydrogéologique peut aussi parfois concentrer et/ou dévier l'écoulement des eaux pluviales dans un bassin versant, ce qui entraîne la destruction des réseaux d'assainissement et d'autres biens immobiliers.

Concernant les mesures in-situ, elles ne suffisent pas à prédire la déstabilisation du terrain, il est très complexe à l'heure actuelle de connaître le moment où cet aléa aura lieu. En effet, la modélisation d'un glissement de terrain en couche mince vis-à-vis de la topographie de la VHA très complexe est difficile à mettre en œuvre. L'introduction de l'hétérogénéité des matériaux et la non maîtrise de l'occupation des sols compliquent encore le problème.

Vis-à-vis de ceci, il est primordial de surveiller régulièrement le site en réalisant des mesures de déplacement des masses repérées au préalable et susceptibles de se déstabiliser. Ceci mènera à la mise en place des appareils des mesures en permanence sur le terrain et suivie spatiale de l'évolution des mouvements. La mise en place des ouvrages de drainage, d'assainissement et de confortement sont vivement recommandées.

▣ Milieu anthropique

Entre 2002 et 2017, l'urbanisation, non contrôlée, de cette zone de la VHA a connu une hausse de l'ordre de 21 %.

Cette forte accélération de l'urbanisation est due à l'accroissement de la population, ce qui conduit à la suroccupation et à la densification des flancs de la colline.

En conséquence, l'évolution de la zone urbanisée à travers son étalement et sa densification ont entraîné la disparition progressive de la couverture végétale. Les populations qui construisent ces maisons ne sont pas conscientes de l'instabilité que cela peut engendrer sur le terrain.

A part l'urbanisation, ces constructions (bâtiments, mur de soutènement, assainissement) précaires, constituent un aléa majeur pour les habitants de la VHA et ceux du pied de la colline.

▣ *Cartographie*

L'utilisation du logiciel ArcGis pour la gestion des risques facilite le repérage des mouvements du terrain, leur suivi, ainsi que celui de l'évolution de l'occupation des sols.

Pour commencer, nous avons élaboré des cartes de risque géotechnique et de l'occupation des sols à grande échelle. Pour la suite, après avoir mis en place des mesures effectives pour la surveillance du site, ce qui demande un grand investissement en terme personnel, matériel et financière, il est primordial d'établir d'autres cartes telles que la carte de susceptibilité de mouvement de terrain qui va prédire, par exemple, le glissement et les chutes de blocs sur des lieux précis. Ces cartes, affinées, constituent une aide à la décision pour pouvoir prévenir les habitants des risques qui sont encourus; elles permettent aussi de cibler les endroits nécessitant une solution pour stopper les mouvements de terrains, en construisant des ouvrages de protection et/ou de drainage. Et finalement, la connaissance des terrains meurtriers c'est-à-dire à un degré de risque « Aléas Forts », par le biais de ces cartes, peut aider, d'une part, à l'évacuation totale du lieu lorsque le danger sera imminent, et d'autre part, pour la mise en place du Système d'Alerte Précoce (SAP) à des endroits bien précis et en temps voulu.

5. CONCLUSION

La gestion des risques dans une zone urbanisée, mérite actuellement une nouvelle stratégie :

▣ En terme de géotechnique, il faut accepter l'incertitude, l'hétérogénéité des sols, l'importance des données sur terrain, et d'y adapter la conception des ouvrages ; Il faut aussi identifier le plutôt possible les risques géotechniques à encourir et les insérer dans l'analyse de risque.

▣ Pour l'urbanisation, les responsables du ministère en charge de l'aménagement du territoire et de la commune concernée doivent appliquer strictement la réglementation en vigueur, et former les populations sur les conduites à tenir lors de diffusion d'alertes.

Les responsables municipaux devraient appliquer la réglementation en vigueur en évaluant les risques liés aux glissements lors de l'instruction des dossiers pour l'obtention des permis de construire.

▣ Pour la cartographie par le SIG, afin avoir des cartes de risque fiables, il faut que notre recherche tient compte de la composante temps. Il sera mieux aussi d'avoir des cartes de mesures d'accompagnement suivant l'aléa.

Nous avons conclu que les caractéristiques topographique, hydrogéologique et géotechnique du site vont inexorablement tendre vers une instabilité du milieu urbain. C'est fondamental de gérer les risques géotechniques dans la ville haute d'Antananarivo car cela peut aider à mettre en place une politique d'occupation des sols rationnelle, et peut surtout sauver des vies humaines. Dans ce cas, nous pouvons répondre à la question : « le mode d'urbanisation de la zone urbanisée constitue-t-il un facteur d'amplification des risques d'origines naturels liés aux mouvements de terrain ? ».

Pour conclure, les travaux entamés jusqu'à ce jour sont considérables mais ils ne suffisent pas pour surveiller et maîtriser les risques géotechniques dans un milieu urbain. Beaucoup de chemin est encore à parcourir, nous améliorerons nos résultats avec des outils et appareils récents que l'Institut Supérieur de Technologie d'Antananarivo va obtenir, d'ici peu, par le biais de projets

Construire une infrastructure, sur un terrain provoque, le remaniement du sol et la modification des conditions d'équilibre des versants. Ceci peut participer à la déstabilisation du terrain (la distribution des contraintes internes du sol devient hétérogène). Pour éviter ce phénomène, il faut suivre les règles d'urbanisme et celles de la construction.

6. REFERENCE

[01] <https://whc.unesco.org/fr/listesindicatives/6078/> (historique)

[02] <https://www.madagascar-island.com/antananarivo-ville-haute/> (délimitation)

[03] : Antoine DENIS, Arlon Campus Environnement, Université de Liège, Belgique 2012

[04] : BENDADOUCHE. H ; LAZIZI. S Glissement de terrain et de confortements, Copyright Pages Bleues Internationales 2013

[05] : Jean-François CORTE Jean Pierre MAGNAN, Yves GUIDOUX / REALISATION DES REMBLAIS ET DES COUCHES DE FORME, Fascicule I – Principes généraux/ LCPC ET SETRA/1994