Télédétection, 2003, vol. 3, n° 2-3-4, p. 237–247
Droit de photocopie soumis à l'autorisation

© 2003 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions scientifiques GB*
Imprimé en France

UTILISATION DES SIG ET DE LA TÉLÉDÉTECTION POUR LA GESTION DE L'ENVIRONNEMENT URBAIN : CAS DE LA VILLE D'ANTANANARIVO (MADAGASCAR)

AURÉLIEN JACQUES MANDIMBIHARISON*[1] et LÉA RAHARIJAONA RAHARISON[2].

École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Département de Géologie
Université d'Antananarivo
Boîte Postale 1500, Antananarivo 101, Madagascar.
Téléphone : (261) 20 22 276 96 ; télécopieur : (261) 20 22 248 54
Courriel [(1,2)] : mandimbiharison.aurelien@caramail.com ; ljrahari@syfed.refer.mg

(soumis le 25 février 2002 ; révisé le 6 mai 2002 ; accepté le 11 décembre 2002)

Antananarivo, la capitale de Madagascar est parmi les nombreuses villes d'Afrique où la croissance démographique et les changements urbains évoluent de façon spectaculaire ces quarante dernières années. Antananarivo est une ville très contrastée au point de vue géomorphologique car les zones collinaires sont souvent à fortes pentes, sensibles à l'érosion et aux mouvements de masse (éboulement, glissement de terrain) et les zones basses sont inondables.

La défaillance dans l'organisation spatiale entraîne la prolifération des constructions illicites et la détérioration des infrastructures (routes, voiries et réseaux de drainage). Les flancs de collines subissent une forte pression urbaine qui aggrave le phénomène de ravinement, provoquant le colmatage rapide des caniveaux et l'ensablement des bas-fonds. Les vallées envahies par les habitations sont le siège de crues brutales et destructives en période de fortes pluies.

L'objectif de cet article est l'utilisation conjointe des SIG et de la télédétection comme outils d'aide à la décision pour la gestion environnementale de la Commune urbaine d'Antananarivo. Ces outils ont permis d'analyser géographiquement les données et d'identifier les tendances actuelles de l'urbanisation. La méthodologie adoptée est basée sur l'exploitation des données de base disponibles. L'approche analytique repose sur l'interprétation visuelle de l'image HRV de SPOT et sur les relevés de terrain. Par analyse du modèle numérique d'altitude (MNA), la carte de pente est constituée. Les cartes de l'occupation du sol sont obtenues à partir des données ETM+ de Landsat-7.

À partir des données conventionnelles (cartes topographiques et géologiques, plan de la ville) sont extraites les couvertures d'informations qui sont numérisées et superposées aux images satellitaires. Ces informations pourront servir d'appui à l'établissement de plans (plan d'aménagement du réseau routier, plan d'extension de la ville). À partir de ces informations de sources diverses, trois types de cartes thématiques sont produits : une carte de risque d'érosion en fonction de la pente et de l'occupation du sol, une carte de risque d'inondation en fonction des conditions du terrain et des contraintes hydro-climatiques ainsi qu'une carte des contraintes à l'urbanisation en tenant compte des contraintes reliées au coût et au contexte général physique et humain du milieu. Par combinaison de plusieurs documents cartographiques les résultats obtenus ont confirmé les possibilités d'application des SIG et de la télédétection pour la gestion efficace du milieu urbain.

Mots-clefs : SIG ; Antananarivo ; risque ; érosion ; inondation ; Landsat.

GIS AND REMOTE SENSING FOR URBAN ENVIRONNMENTAL MANAGEMENT : EXAMPLE OF THE CITY OF ANTANANARIVO (MADAGASCAR)

Antananarivo, the capital city of Madagascar is among the numerous cities of Africa where demographic growth and urban changes evolve in a spectacular way these last forty years. Antananarivo is a city geomorphologicaly contrasted, one part the hilly zones, often with steep slopes liable to erosion and mass movements (crumbling, landslides), and the other part the low zones liable to flooding.

The failure in spatial organization leads to the proliferation of illicit construction and the deterioration of infrastructures (roads, landfills and drainage networks). Hillsides undergo a strong urban pressure aggravating ravine phenomenon, provoking the rapid plugging of gutters and sanding of shallows. The dwelling invaded valleys are the place of violent and destructive flood during strong rainfall period.

The aim of this study is to use GIS and remote sensing as tools for decision making for the environmental management of the urban commune of Antananarivo. These tools have permitted a geographical analysis of data and the identification of the present tendancies in urbanization. The methodology is based on the exploitation of the available basic data. The analytical approach lies on the visual interpretation of SPOT HRV and field data. The map of slope is made up through an analysis of the digital elevation model. The land use map is obtained from ETM+ of Landsat-7. From conventional data (topographic and geological mapping, city planning) are extracted information which are digitized and superimposed on satellite image. These informations can be used as a support for the

* Correspondant principal

plan making (development plan for road network, city expansion plan). From these multisource informations, three types of thematic maps will be produced : a map of erosion risk according to the slope and the land use, a map of flood risk according to land conditions and hydro-climatic constraints and a map of constraints to urbanization taking into account constraints connected to cost and the physical, geographical and human environment . Through combination of several cartographic documents the obtained results have confirmed the possibilities of GIS and remote sensing application for the effective management of urban environment.

Keywords : GIS ; Antananarivo ; risk ; erosion ; flooding ; Landsat.

1. INTRODUCTION

Depuis l'indépendance, Antananarivo, la capitale de Madagascar a subi une forte pression démographique, engendrant ainsi des problèmes d'urbanisation et d'environnement. Si elle a été conçue pour accueillir 400 000 habitants, elle abrite actuellement environ 1 500 000 habitants (communication verbale auprès d'un responsable de la mairie d'Antananarivo). Seule la partie haute a été habitée pendant le royaume d'Andrianampoinimerina, au XVIII^{e} siècle, la partie basse constituée par la plaine alluviale de Betsimitatatra est le siège actuellement d'une expansion démesurée de l'habitat.

De par ses deux grandes unités géomorphologiques, collines et plaine, les problèmes environnementaux d'Antananarivo se résument en deux mots : « érosion » au niveau des flancs de collines et « inondation » dans les bas-fonds.

Les facteurs d'érosion font intervenir l'action conjuguée de la géomorphologie et de la lithologie, action aggravée par l'agressivité des pluies et les activités humaines. Le relief est très accidenté avec des versants convexo-concaves à pente forte (15 à 45 %) en moyenne. La lithologie de la zone haute, d'altitude moyenne de 1 340 m, est essentiellement composée d'un ensemble granito-gneissique et migmatitique, sensible à l'érosion hydrique dès que la couverture végétale s'amenuise. Les produits d'érosion sont transportés et déposés dans les bas-fonds (Ratsimbazafy, 1970).

Les facteurs d'inondation concernent le climat et la morpho-pédologie. La précipitation moyenne annuelle est de 1 362 mm concentrée sur 90 jours, durant la période allant de novembre à avril (Donque, 1975). Les dangers d'inondation proviennent surtout des pluies cycloniques ou exceptionnelles de 7 à 15 jours. La période de décrue est longue en raison de l'obstruction des égouts et canaux d'évacuation et de la nature imperméable des sols argilo-tourbeux des bas-fonds.

Les cours d'eau naturels (rivière Ikopa) et artificiel (canal Andriantany) à écoulement permanent connaissent annuellement des périodes de grosses eaux, voire des crues pendant la saison cyclonique.

2. DESCRIPTION DU SITE D'ÉTUDE

Située sur 18°55' de latitude sud et 47°32' de longitude est dans le domaine des Hautes-terres Centrales de Madagascar avec une altitude moyenne de 1 340 m, la commune urbaine d'Antananarivo est limitée à l'ouest et au sud par la rivière Ikopa et à l'est par la grande colline d'Ambohibe–Ilafy. Elle couvre une superficie d'environ 78 km^2 (figure 1).

2.1. Climat

Comme l'ensemble des Hautes-terres de Madagascar, la région d'Antananarivo connaît un climat réglementé par les régimes de l'alizé et des moussons (Donque, 1975). Ainsi, deux saisons très contrastées ont été observées :

– une saison chaude et pluvieuse de mi-novembre à avril ;

– une saison froide et sèche de mi-mai à septembre ;

– une période de transition sèche et chaude de septembre à novembre.

Les précipitations moyennes annuelles sont de 1 362 mm et pendant la période pluvieuse et elles sont reparties comme on le montre sur le tableau 1.

TABLEAU 1 Données pluviométriques des mois les plus arrosés. *Pluviometric data of the most watered months.*

Mois	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars
Hauteur en mm	170	363,9	283,7	185,7	261,4
Nombre de jours	15	22	18	15	18

La variabilité interannuelle des précipitations montre une très grande irrégularité dans le domaine des Hautes-terres de Madagascar, irrégularité déjà signalée par Donque (1975) et confirmée par Raharijaona Raharison et Randrianarison (1997).

2.2. Géomorphologie

La région d'Antananarivo est constituée de collines à sommet arrondi ou à crête aiguë et d'une plaine alluviale (Andrianasolo, 2000).

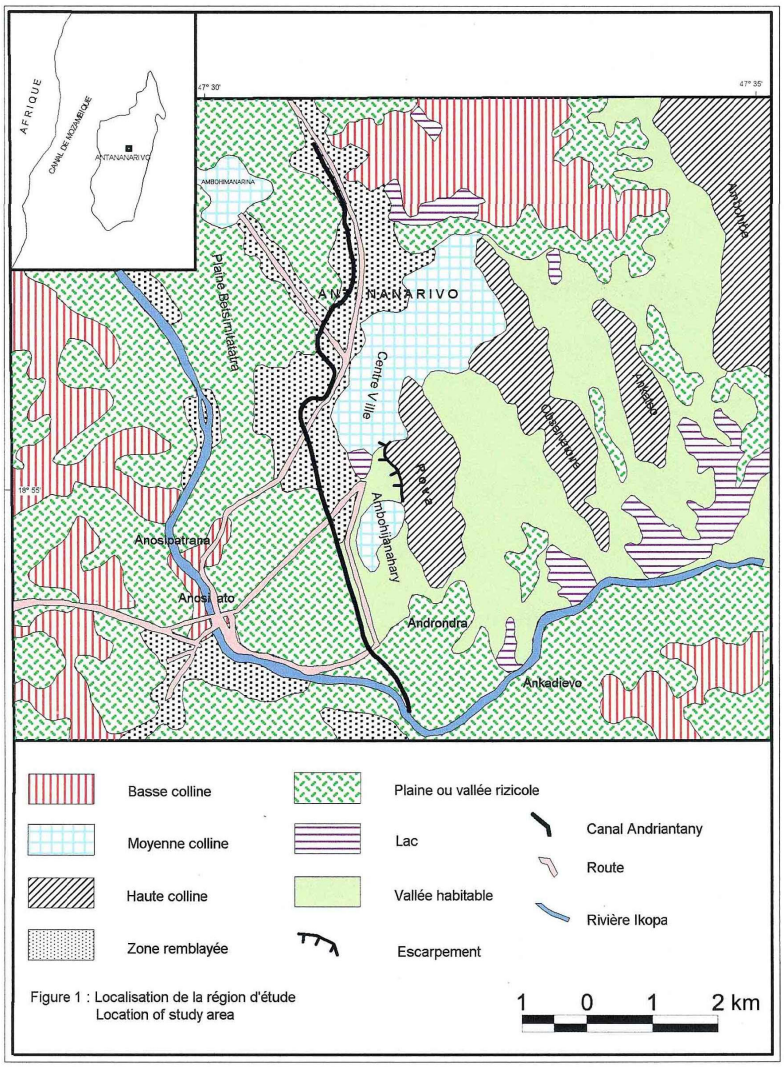


Figure 1 : Localisation de la région d'étude
Location of study area

FIGURE 1 Localisation de la région d'étude extraite de la carte FTM, P47, de 1963 à l'échelle du 1 : 50 000. *Location of study area issued from FTM map, P47 of 1963 at scale 1 : 50 000.*

La zone de collines se situant au nord-ouest et à l'est, est composée :

– de collines résiduelles constituées de massifs érodés de formes irrégulières ou arrondies telles que les collines d'Ankatso, de l'Observatoire, d'Ampasampito et d'Ambohijanahary ;

– des escarpements abrupts limitant la zone haute de la zone basse : tel est le cas de l'escarpement d'Ampamarinana ;

– des interfluves constitués de vallées peu profondes et comblées par des sédiments de talus sur les flancs de collines à l'exemple de Manakambahiny.

La zone de plaine occupe la partie ouest d'Antananarivo sur une superficie de 30 000 ha. Elle est constituée (figure 1) :

– d'une plaine d'inondation formée de sédiments lacustres et des apports fluviaux à la faveur des crues successives de la rivière Ikopa ;

– des îlots de collines plus ou moins arrondies telles que celles d'Anosipatrana et d'Anosizato .

2.3. Hydrologie

Antananarivo est traversée par la rivière Ikopa et des canaux d'irrigation et d'évacuation. Le canal d'Andriantany collecte les eaux de ruissellement de l'impluvium urbain qui domine la plaine. Cet

impluvium est constitué de trois groupes de bassins versants :

– les bassins versants amont, fortement urbanisés et à fortes pentes (Fort Voyron, Soarano, Mahamasina) ;

– les bassins versants aval, partiellement urbanisés et tamponnés par le marais de Masay ;

– les bassins versants situés entre le canal d'Andriantany et les digues de protection de l'Ikopa, occupés par des rizières et une urbanisation précaire et diffuse.

2.4. Facteurs humains

La vocation rizicole de la zone basse tend à disparaître au détriment des remblais et des constructions illicites. En effet, la promotion des zones franches industrielles et le besoin croissant en matériaux de construction, en occurrence les briques de terre cuite, ont entraîné une profonde destructuration à l'intérieur des bas-fonds rizicoles. La transformation plus récente des flancs des collines à pentes raides en espace résidentiel a provoqué une rupture d'équilibre du milieu, engendrant ainsi érosion en nappe et en glissements de terrain. L'urbanisation des sites normalement inconstructibles a fait apparaître des formes d'érosion catastrophique (Blanchard, 1994), telles les ravines dans certains quartiers de la ville d'Antananarivo. Lors des violentes pluies, des quantités considérables de sédiments se répandent dans les rues des bas quartiers et obstruent les canaux d'évacuation.

3. MÉTHODOLOGIE

Les données multisources utilisées dans le cadre de la réalisation de ce travail sont :

– une image ETM+ de Landsat-7 enregistrée le 25 septembre 2000, corrigée géométriquement et radiométriquement ;

– une carte topographique à l'échelle du 1 : 50 000 datant de 1963 (Antananarivo P47).

La démarche méthodologique adoptée relative aux thèmes « érosion et inondation » est représentée dans l'organigramme de la figure 2.

L'image satellitaire ETM+ de Landsat-7 est géoréférencée à la projection UTM 38 sud en vue de faciliter l'exploitation des données existantes.

La carte de l'occupation du sol (voir figure 6) est obtenue par classification dirigée selon le maximum de vraisemblance à partir de la composition colorée 453 qui traduit en nuances de rouge la végétation et en clair les sols nus.

Le modèle numérique d'altitude (MNA) est dérivé de l'interpolation par TIN (*Triangulated Irregular Network*) des courbes de niveau numérisées à partir de la carte topographique P47.

Dans notre hypothèse de travail, la zone basse inondable est définie comme étant une zone dont l'altitude ne dépassant pas 1 250 m. Cette valeur correspond approximativement à la cote d'alerte du plan ORSEC (ORganisation de SECours en cas d'inondation) de la ville d'Antananarivo. Au niveau du pont d'Anosizato, la menace du danger commence en principe au moment où le niveau de l'eau de la rivière Ikopa dépasse la cote 2,7 m, or l'altitude à cet endroit est de 1 248 m.

Pour l'élaboration du SIG, les données sur lesquelles est basé ce travail, sont des documents cartographiques, en particulier la carte topographique d'Antananarivo et des fiches monographiques de la commune concernée.

3.1. Détermination des zones à risque d'inondation

Sur la rivière Ikopa, sont situées des digues appelées « fusibles » qui cèdent automatiquement lors des grandes crues (B.P.P.A.,1985).

Les facteurs qui sont à l'origine des inondations périodiques de la plaine d'Antananarivo sont les facteurs morpho-tectoniques et sociaux.

Les mouvements tectoniques cassants subméridiens et de direction N20°E (Noizet,1967) sont responsables de l'effondrement dans les gneiss du compartiment occidental et du rehaussement des roches granitiques du compartiment oriental. La géomorphologie actuelle de la plaine d'Antananarivo est héritée de cette tectonique ancienne du socle précambrien malgache.

Une crue en amont de la plaine provoquerait rapidement un rehaussement du niveau d'eau en raison de nombreux étranglements à certains endroits de la rivière Ikopa.

Les digues existantes construites à l'époque du roi Andrianampoinimerina au XVIII^{e} siècle sont souvent mal entretenues. La géomorphologie plane et la présence des méandres de la rivière Ikopa favorisent un alluvionnement rapide et, par conséquent, un rehaussement constant du lit mineur des cours d'eau endigués (Ratsimbazafy, 1970).

Le mode d'écoulement des eaux superficielles n'a été étudié sérieusement qu'à partir des travaux récents effectués par le Bureau pour la protection de la plaine d'Antananarivo (B.P.P.A.,1985).

En cas de rupture de brèche du côté droit de l'Ikopa, au niveau de l'Ivanja, les eaux fluviales vont inonder la plaine d'Androndra et se déverser dans le canal d'Andriantany, provoquant ainsi un débordement dès que le débit dépasse 4 m^3/s. Une zone tampon de 2 km par rapport à ce canal a été définie à l'aide de la fonction « *buffer* » sous l'Idrisi 3.2.

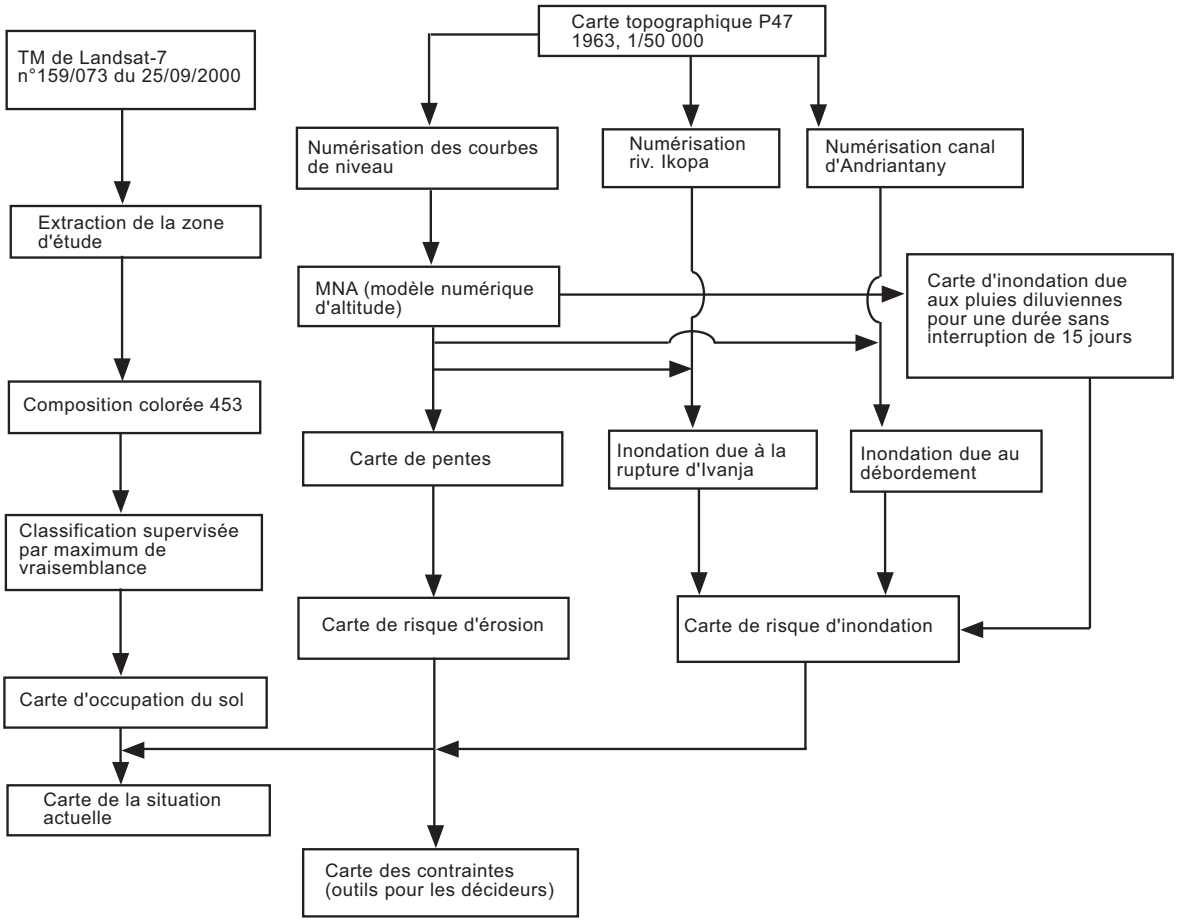


FIGURE 2 Organigramme des différentes étapes de la méthode utilisée. *Flow chart of steps followed for the method used.*

La vérification sur le terrain a permis de constater que :

– la partie orientale du canal d'Andriantany est occupée par des bâtiments administratifs déjà protégés contre les crues ; un masquage préalable a été réalisé sur cette partie ;

– la partie occidentale présente des buttes résiduelles granito-migmatitiques d'altitude supérieure à 1 270 m, qui sont épargnées des inondations et sur lesquelles est appliqué un autre masquage, en vue de limiter les zones inondables ;

– en cas de rupture de brèche de l'Ivanja sur la rive gauche de l'Ikopa, les plaines d'Ankadievo, d'Alasora et de Tanjombato, d'altitude inférieure à 1 260 m, sont submergées .

En cas d'événements pluviométriques exceptionnels, on peut supposer qu'il tombe 400 mm de pluie pendant une période sans interruption de 15 jours (Direction de la météorologie nationale) et les zones susceptibles d'être inondées sont celles favorables à la stagnation d'eau en raison de la vétusté des ouvrages d'assainissement et de la nature morphopédologique du terrain.

Les talwegs à fond plat semés de marécages sont le théâtre des crues brutales et destructrices. Pourtant ces vallées sont envahies par des habitations.

La superposition des trois cartes en format vecteur sous Idrisi a permis d'obtenir la carte de risque d'inondation (figure 3).

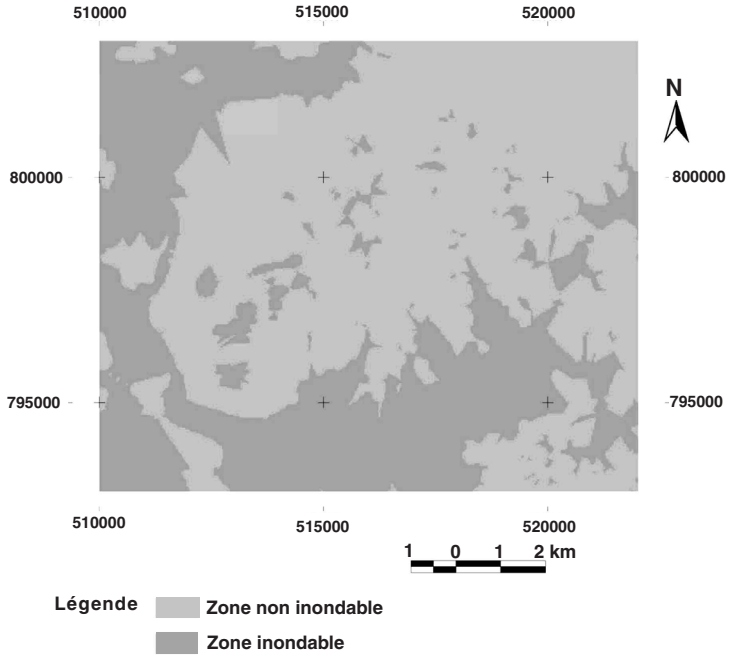


FIGURE 3 Carte de risque d'inondation de la ville d'Antananarivo. *Map of flood risk of Antananarivo.*

3.2. Détermination des zones à risque d'érosion

Les principaux facteurs d'érosion sont de deux types, soit morpho-climatiques et sociaux.

L'agressivité du climat actuel à saisons contrastées, la disparition de la végétation climatique et la pente sont autant de facteurs qui favorisent l'érosion tant en nappes qu'en rigoles au niveau des collines avoisinantes de la plaine.

Outre la plaine alluviale de Betsimitatatra, le relief de la capitale s'organise suivant un réseau d'échines et des vallées principales, plus ou moins parallèles entre elles et de direction générale NNO-SSE (Hoeblich, 1983). Le raccord entre les sommets et les dépressions est assuré par des interfluves au profil irrégulier faisant alterner des replats ou des sections rectilignes à pente douce avec des sections à pente plus forte, rectiligne ou convexe, siège des formes d'érosion en lavaka.

Les formes qui caractérisent le relief de la région ont souvent des limites qui correspondent à des seuils de pente. Aussi, quatre classes de pente ont été définies comme l'a fait le B.P.P.A. et nous ont permis d'élaborer, à partir du MNA, une carte de risque d'érosion comportant quatre classes (figure 4). La classe à faible risque couvre les bas-fonds et les vallées. La classe à risque modéré coïncide avec la zone de raccordement du versant au bas-fond ainsi qu'aux zones remblayées. La classe à risque élevé et très élevé se superpose au domaine des collines. Sur le tableau 2, on présente la relation entre la pente, les unités morphologiques, les formations géologiques et les risques d'érosion.

Les bâtis et agglomérations, construits sur les pentes sans tenir compte de la nature lithologique, créent parfois des dégradations plus ou moins importantes (éboulements, glissements).

3.3. Élaboration de carte de contraintes

Le croisement de deux cartes relatives aux risques d'érosion et d'inondation, en format image sous Idrisi et en utilisant la fonction *crosstab*, a produit la carte de contraintes à l'urbanisation
(figure 5). Huit classes ont été définies en fonction de deux grandes unités géomorphologiques et des classes de pente (tableau 2) :

– la classe 1 est définie comme étant une zone non inondable, la moins exposée à l'érosion du fait qu'elle a été remblayée ;

– la classe 2 est considérée comme une zone inondable à faible risque d'érosion qui coïncide avec la plaine alluviale ;

– la classe 7 est une zone non inondable à risque d'érosion très élevé qui représente la zone des hautes collines à forte pente (> 15 %) ;

– la classe 8 est la zone inondable à risque d'érosion très élevé ; elle est exceptionnelle car il s'agit du corps d'une digue de protection de la rivière Ikopa soumise à la fois à l'érosion et à l'inondation.

Les autres classes ne sont que des étapes intermédiaires entre ces extrêmes.

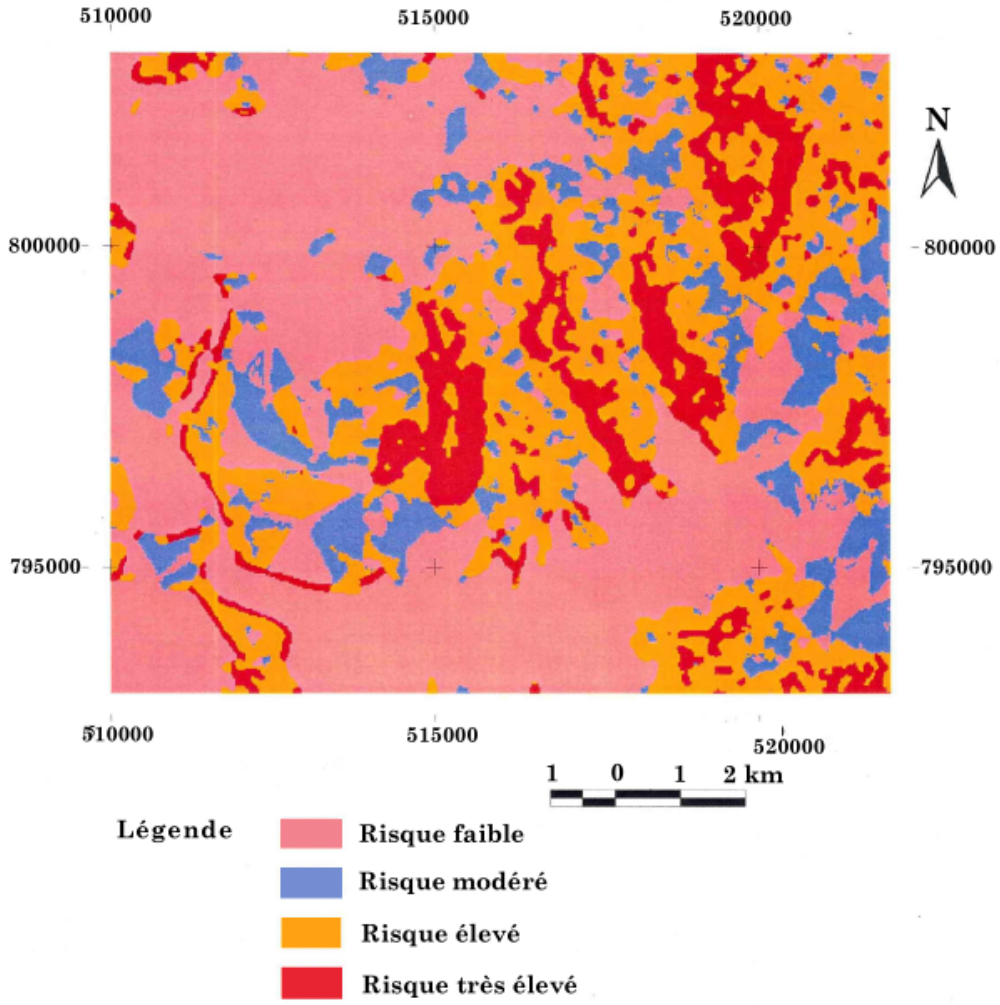


FIGURE 4 Carte de risque d'érosion. *Map of erosion risk.*

TABLEAU 2 Relation entre pente, unités géomorphologiques, formations géologiques et risques d'érosion. *Relationship betwen slope, geomorphological unit, geological formations and erosion risks.*

Unité morphologique	Classe de pente	Sous unité géomorphologique	Formation géologique	Risque d'érosion
Zone basse (< 1 260 m d'altitude)	0 à 8 %	– plaine alluviale – vallées plus ou moins larges – terrasses	Dépôts fluvio-lacustres Produits d'altération gnessiques Sol ferralitique colluvionné	Faible
Zone de collines	8 à 15 %	– basses collines (1260-1300 m)	Ensemble granito-migmatique à manteau d'altération de 10 à 20 m d'épaisseur	Modéré
(1260 à 1480 m d'altitude)	15 à 20 %	– moyennes collines (1300-1360 m)	Ensemble de gneiss et migmatite à sol ferralitique profond (20 à 25 m d'épaisseur)	Élevé
		– hautes collines (1360-1480 m)	Granite monzonitique à faible recouvrement d'altérite de 0 à 10 m d'épaisseur	Très élevé

3.4. Analyse de l'image satellitaire

Après extraction de la zone d'étude, la composition colorée 453 a été réalisée à partir de l'image TM du 25 septembre 2000. La classification dirigée selon le maximum de vraisemblance de cette composition colorée a permis d'identifier sept classes d'occupation du sol (figure 6) :
1) agglomération urbaine ; *2)* cultures de bas-fonds, *3)* marais ; *4)* plan d'eau ; *5)* rizières ; *6)* savane arborée ; *7)* savane herbeuse. L'agglomération se répartit irrégulièrement, dans les deux grandes unités géomorphologiques, d'une manière anarchique et illicite dans la plupart des cas. Les bas-fonds non aménagés en habitat sont occupés par des cultures de cresson. Les marais se trouvant dans quelques bas-fonds et dans la plaine alluviale sont les sites préférés des jacinthes d'eau. Le plan d'eau peut être un lac, un étang, une rivière (l'Ikopa) ou un canal artificiel (Andriantany). Les rizières, occupant une grande partie de la plaine de Betsimitatatra, commencent à être transformées plus ou moins rapidement en zones industrielles et habitables. Les savanes arborées et herbeuses, très dispersées, se limitent sur les flancs de collines et en occupent rarement le sommet.

4. RÉSULTATS

L'intégration des différents facteurs dans le SIG a permis d'obtenir diverses cartes thématiques (figures 3 et 4) tandis que la carte d'occupation du sol (figure 6) a été établie à partir de la composition colorée 4-5-3 de l'image ETM+ de Landsat-7 par classification du maximum de vraisemblance.

La combinaison des cartes thématiques précédentes a permis d'obtenir la carte de contrainte à l'urbanisation (figure 5) que l'on peut utiliser dans l'orientation de l'aménagement de la ville d'Antananarivo. Mais, déjà, on peut dire que les possibilités d'urbanisation sont un peu limitées en raison du risque d'inondation ou de pentes plus ou moins importantes. Les facteurs sociaux liés à la forte croissance démographique et aux problèmes fonciers viennent encore aggraver la situation.

En effet, la zone basse à pente douce de 0 à 8 %, autrement dit à faible risque d'érosion, soumise régulièrement à des inondations dues aux aléas climatiques, est le siège d'une forte concentration urbaine composée en majeure partie d'une population généralement pauvre. Cette zone est généralement dénommée « bas quartiers » où la population la plus vulnérable est évacuée, en cas d'inondation, vers les zones sans risque et prise en charge par le Conseil National de Secours (C.N.S.). À titre indicatif, le nombre de personnes évacuées en 2000 lors de fortes crues est estimé à 8 540 (données recueillies auprès de la Mairie d'Antananarivo-ville).

La zone inondable à risque d'érosion modéré correspond généralement à la partie inférieure des basses collines érigées au milieu de la plaine alluviale de Betsimitatatra. Des constructions anarchiques et illicites commencent à envahir ces zones.

La zone basse inondable à risque d'érosion élevé, correspondant au corps de la digue de la rivière Ikopa, nécessite un renforcement par la mise en place des enrochements et une surveillance régulière.

La zone non inondable à risque d'érosion faible n'est autre que les replats ou terrasses qui correspondent aux zones de raccordement entre la dépression et les sommets. Elle est propice à toute forme de construction et de ce fait elle est très vite envahie et aménagée.

Dans la zone des collines à pente supérieure à 8 %, les sols à fortes épaisseurs d'altérations et à faible cohésion, correspondant aux domaines des gneiss et des migmatites (tableau 2), sont exposés au risque élevé d'érosion et aux mouvements de masse (glissements et éboulements). Après de fortes pluies successives de plus d'une semaine, les maisons construites illégalement et installées anormalement sur des pentes plus ou moins fortes, subissent des dégradations allant jusqu'à l'effondrement ou l'écroulement, causant parfois des pertes de vie humaine.

La zone des hautes collines correspond surtout aux trois échines définies par Hoeblich (1983), dont la première concernant la colline principale à 1 480 m d'altitude et dominant la plaine porte le nom du Rova car le Palais de la Reine s'y trouve. Cette colline est à l'origine de l'implantation urbaine et correspond aux quartiers les plus anciens. La seconde échine englobe les collines de l'Observatoire (1 379 m), du Fort-Duschene(1 378 m) et d'Ampandrianomby (1 338 m). Elle renferme des quartiers résidentiels et des constructions modernes telles que l'Université d'Antananarivo. La troisième échine porte la colline d'Ankatso d'altitude inférieure à 1 384 m. Au pied de cette colline se développe un village.

La zone de collines à haut risque d'érosion nécessite un aménagement préalable avant toute délivrance de permis de construire par la Municipalité.

Les cartes obtenues sont validées à partir des observations sur le terrain et des résultats des travaux antérieurs.

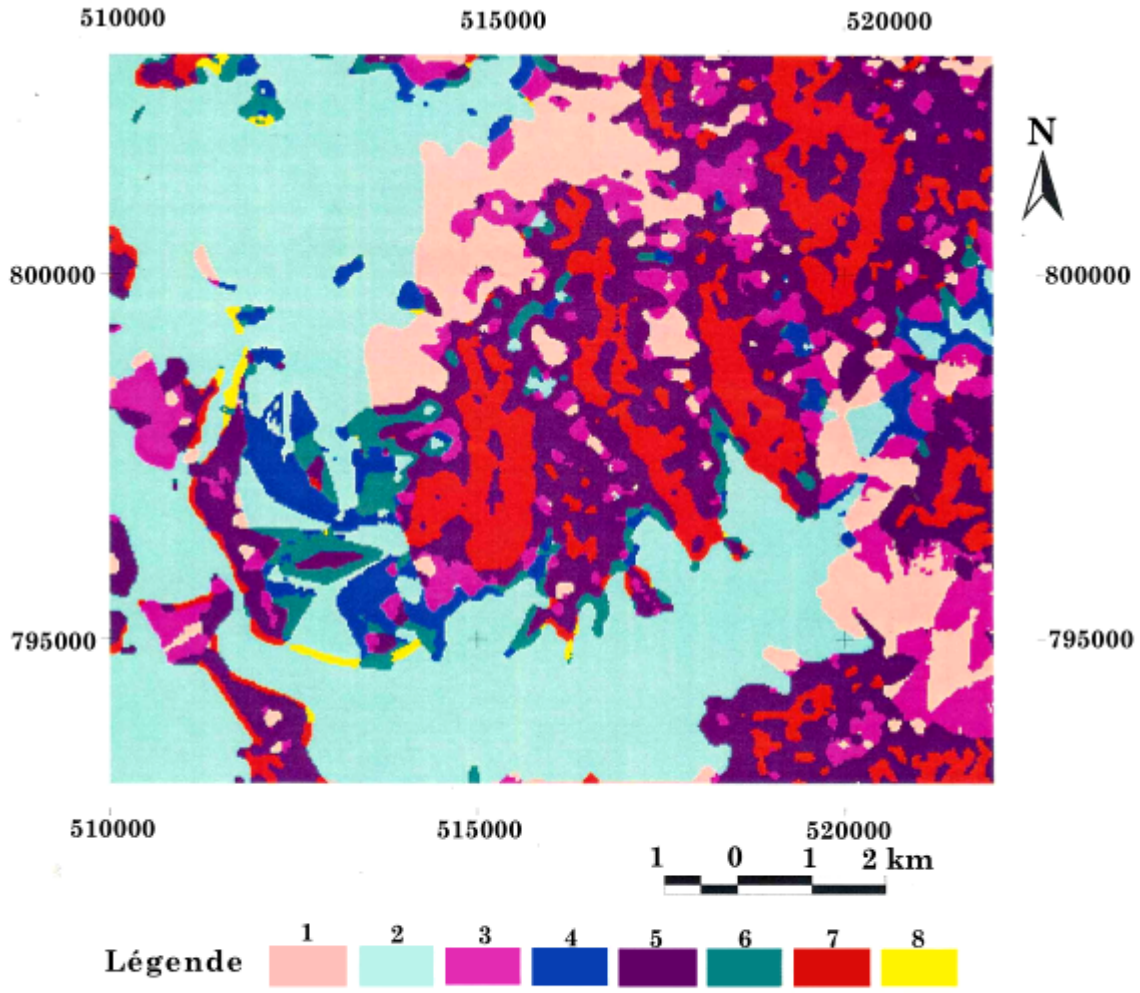


FIGURE 5 Carte de contrainte d'urbanisation. *Map of urbanization constraint.*

La validation de la carte du risque d'inondation (figure 3) est faite à partir du suivi régulier sur le terrain de l'évolution de la limite des zones inondables à chaque période de forte crue ou de passage de cyclone de 1996 à 2000. À ceci s'ajoutent les données récoltées auprès de la mairie et du B.P.P.A. concernant les inondations antérieures.

Les paramètres de terrain utilisés pour la validation de la carte des risques d'érosion sont : la pente, l'état de dénudation du sol, les formes d'érosion et les mouvements de masse et l'utilisation du sol. La classe d'érosion forte à très forte correspond, sur le terrain, à des pentes supérieures à 20 % recouvertes de savanes herbeuses dégradées. L'érosion en nappes est la forme d'érosion la plus développée sur les flancs des collines dont la nature pédologique et la structure lithologique sont aussi favorables aux glissements de terrain. Les bâtis construits sur les versants non appropriés à toute construction accentuent l'érosion en nappes qui en outre provoque l'ensablement des bas fonds et des canaux d'irrigation et d'évacuation.

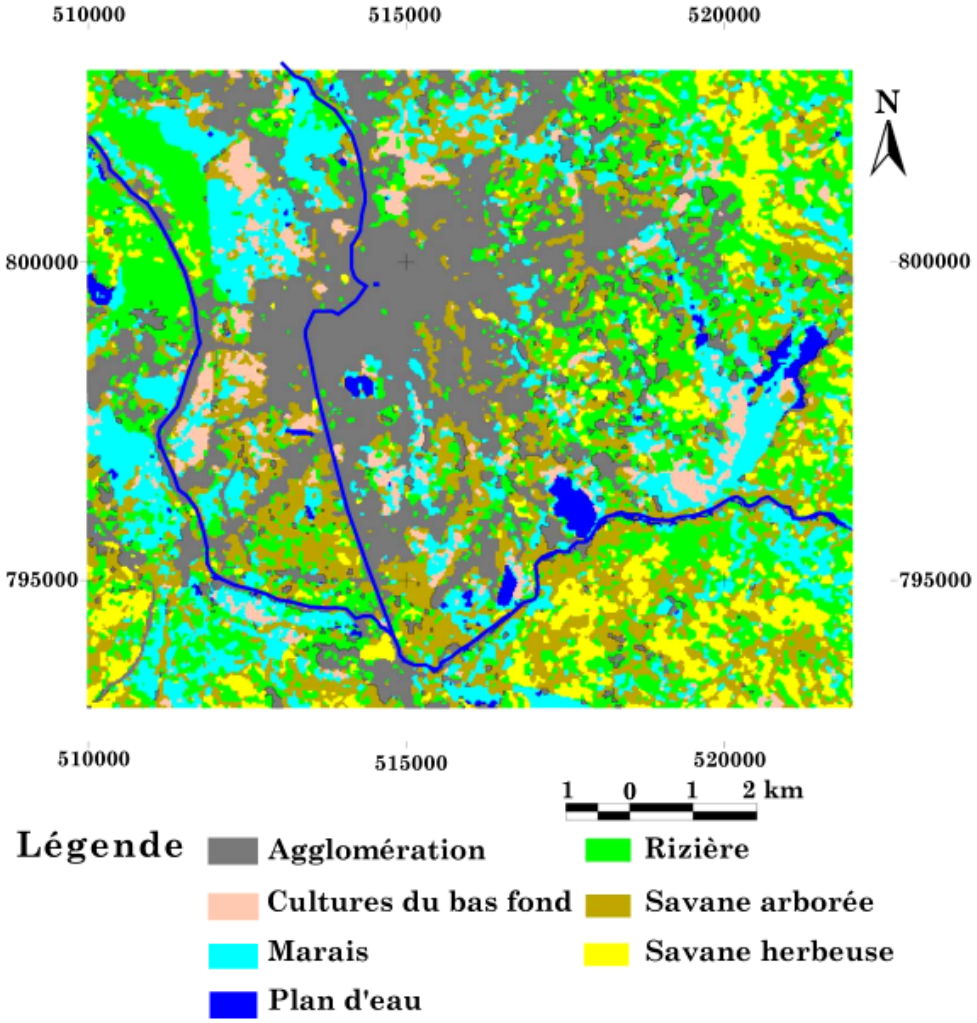


FIGURE 6 Carte d'occupation du sol obtenue à partir de la composition colorée 4-5-3 de EMT+ de Landsat-7. *Land use obtained by colour composite 4-5-3 of ETM+ of Landsat-7.*

5. CONCLUSION

La télédétection a permis de délimiter les zones basses inondables et d'accéder à la description du milieu naturel (occupation du sol, infrastructures, etc.). L'imagerie ETM+ de Landsat-7 offre la possibilité d'identifier les zones de fortes concentrations d'habitation qui se localisent de part et d'autre du canal d'Andriantany et plus particulièrement dans la zone basse marécageuse.

L'utilisation du SIG a permis de mettre en évidence l'importance des notions d'homogénéité des zones basses inondables à faible risque d'érosion et d'hétérogénéité des zones de collines érodables séparées par des vallons susceptibles d'être inondables.

L'apport des SIG a permis l'analyse et le croisement des données sous forme de couvertures indépendantes et superposables, ainsi que la restitution de ces données sous forme de tableaux et de cartes.

Les produits cartographiques ainsi obtenus constituent des outils précieux de travail permettant de :

– gérer les ressources naturelles en milieu urbain ;

– dresser un plan d'aménagement et d'urbanisation ;

– remettre à jour le plan ORSEC existant.

Pour l'étude de la dynamique des surfaces inondables et de la tendance de l'évolution de l'urbanisation, il sera souhaitable de disposer d'autres images satellitaires de plus grande résolution spatiale acquises à différentes dates.

Remerciements

Ce travail a bénéficié de l'appui matériel du FTM (Institut Cartographique de Madagascar). Nous tenons à remercier, messieurs Andrianjafimbelo Razafinakanga, Directeur général du FTM et Joseph Ramboazanakolona, ingénieur topographe.

Nous saluons également la sincère collaboration des membres du Département de géologie de l'École supérieure polytechnique d'Antananarivo, en particulier Mamy Andriamirija Rajaonarison, physicien.

Références

Andrianasolo, L.P. (2000) La plaine d'Antananarivo et ses environs : cadre géologique et géotechnique. Mémoire d'ingéniorat en géologie, Département de géologie, École supérieure polytechnique d'Antananarivo, 133 p.

Blanchard, F. (1994) Mais qu'a donc de particulier l'environnement en Afrique ? Pangea, vol. 27, p. 5-12.

B.P.P.A. (Bureau pour la protection de la plaine d'Antananarivo) (1985) Rapport d'étude d'avant projet sur l'aménagement de l'Ikopa dominant la plaine d'Antananarivo. Antananarivo, 89 p.

Donque, G. (1975) Contribution géographique à l'étude du climat de Madagascar. Nouvelle Imprimerie des Arts Graphiques, Antananarivo, 478 p.

Hoeblich, J.M. (1983) L'organisation du relief dans les environs de Tananarive, Madagascar. Revue de Géographie, juillet–décembre, n°43 , p. 11-38.

Noizet, G. (1967) Étude pour l'aménagement de la plaine de Tananarive. Rapport Annuel du Service Géologique de Madagascar, Antananarivo, 6 p.

Raharijaona Raharison, L.J. et Randrianarison, J. (1997) Facteurs géologiques et climatiques influençant l'érosion en lavaka et ensablement des rizières : le cas du massif d'Ambohitrandriampotsy du sud du lac Alaotra. In H. Hurni et J. ramamojisoa (réd.) IVè Conférence internationale de l'Association pour les montagnes africaines (AMA). 26 mai–1er juin 1997, Antananarivo, p. 159-172.

Ratsimbazafy, J.R. (1970) Contribution au projet d'aménagement de la plaine de Tananarive–Madagascar. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 166 p.