

Travail de fin d'études

Auteur : Ranaivo, Miraina

Promoteur(s) : Hanson, Alain

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master de spécialisation en sciences et gestion de l'environnement dans les pays en développement

Année académique : 2020-2021

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/12992>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

ULiège - Faculté des Sciences - Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

UCLouvain - Faculté des bioingénieurs

**ANALYSE ET ÉTUDE DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DE
L'ORPAILLAGE ET DE LEUR ÉVOLUTION DANS LA COMMUNE RURALE
DE BETSIKA, REGION DIANA, MADAGASCAR**



MIRAINA RANAIVO

**MÉMOIRE RÉDIGÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER DE SPÉCIALISATION EN SCIENCES ET GESTION DE L'ENVIRONNEMENT DANS LES PAYS EN
DÉVELOPPEMENT**

MODULE NATURE ET TERRITOIRE

ANNÉE ACADEMIQUE 2020-2021.

REDIGÉ SOUS LA DIRECTION DE ALAIN HANSON

COMITÉ DE LECTURE :

BRUNO DELVAUX

GILLES COLINET

Copyright

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique* de l'Université de Liège et de l'Université Catholique de Louvain.

*L'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre(s) du personnel enseignant de l'Université de Liège et de l'Université Catholique de Louvain.

Le présent document n'engage que son auteur.

Auteur du présent document : RANAIVO Miraina,
mirainaranaivo@gmail.com

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier, en premier lieu, Dieu de m'avoir donné le courage, accordé du temps et la patience pour la réalisation de ce travail de fin d'étude et guidé tout au long de ma vie.

Je tiens à exprimer ma gratitude aux personnes qui se sont investies de près ou de loin à notre formation notamment à l'ensemble du personnel de l'Université de Liège à travers le Professeur Bernard TYCHON, responsable du master de spécialisation en sciences et gestion de l'environnement dans les pays en développement et à l'ensemble du personnel de l'Université Catholique de Louvain représenté par le Professeur Charles BIELDERS co-responsable de la formation et qui a accepté de présider ce mémoire.

J'adresse également mes vifs remerciements à :

- L'Académie de Recherche de l'Enseignement Supérieur (ARES) qui nous a donné l'opportunité de suivre cette formation, qui aboutit à la réalisation de ce travail de fin d'étude
- Mon promoteur M. Alain HANSON pour avoir accepté d'encadrer ce mémoire, pour ses conseils et ses encouragements
- M. Gilles COLINET et M. Bruno DELVAUX pour avoir accepté d'examiner ce travail
- M. Antoine DENIS pour son dévouement et sa disponibilité durant toute la formation
- L'Agence Nationale de la filière Or (ANOR), pour leur précieuse aide dans l'élaboration de ce mémoire
- Mes collègues et tierces personnes qui ont collaboré de près ou de loin à la réalisation de cet ouvrage
- Mon mari, mes enfants, mes parents, ma famille et mes ami(e)s pour leurs soutiens et leurs aides malgré la distance. Je vous remercie de tout cœur.

RÉSUMÉ

La zone d'étude est localisée dans la commune rurale de Betsiaka, précisément dans le Fokontany de Betsiaka qui est l'un des sites les plus producteurs d'or de Madagascar. En effet, de 2017 à 2020, l'exportation officielle de l'or provenant de la commune a été de 1.300,98 kg sur une exportation officielle nationale de 10.207,94 kg durant cette période, soit 13% de l'exploitation nationale de 2017 à 2020 provient de Betsiaka. L'exploitation aurifère est artisanale et tient une place importante dans la vie socio-économique de la commune. L'objectif du présent travail est d'évaluer les impacts de l'orpaillage sur l'environnement, l'économie, la société et la santé de la population afin d'élaborer des programmes de gestion de l'environnement par rapport à l'orpaillage.

Des analyses diachroniques des images satellites des années 2000, 2016 et 2020 ont été alors faites pour mesurer les impacts de cette activité sur le milieu physique, notamment la couverture végétale et le sol et au cours duquel, les résultats ont pu mettre en évidence une dégradation accrue de la couverture végétale et une augmentation de la déforestation. La perte estimée de la surface végétale est de 60,96% de 2016 à 2020, avec une vitesse de régression importante de 418,75 ha/an. Par ailleurs, une augmentation de la surface des sols nus correspondants aux sols érodés à une vitesse d'extension de 263,03 ha/an de 2016 à 2020, a été observée. Néanmoins, cette étude a également permis de constater que d'autres facteurs anthropiques comme les feux de brousse, la culture sur-brûlis ou tavy, l'agriculture, et l'extension des zones urbaines constituent des causes de déforestation dans la zone d'étude, outre l'orpaillage.

Des enquêtes sur le terrain, ont été réalisées et ont contribué à montrer la place de l'orpaillage dans l'économie de la commune et de la population. Cependant, le manque de gestion et de suivi de ce secteur a des impacts négatifs importants sur l'environnement, la société, et la santé humaine. La modélisation des impacts de l'orpaillage sur le milieu physique à l'horizon 2030 a permis de mettre en avant trois scénarios principaux selon lesquels l'étendue de la couverture végétale dépendrait de la tendance actuelle des activités anthropiques, de la mise en place d'une politique de protection des couvertures ligneuses ou de la croissance démographique et économique dans la région.

Enfin, l'évaluation de tous ces impacts a permis d'élaborer un plan de gestion de l'environnement afin de compenser et d'atténuer les effets néfastes de l'orpaillage et de renforcer les effets positifs.

Mots-clés : Betsiaka, Orpaillages, Analyse diachronique, Images satellites, Modélisation, Programme de gestion.

ABSTRACT

The study area is located in the rural commune of Betsiaka, precisely in the Fokontany of Betsiaka which is one of the most gold-producing sites in Madagascar. Indeed, from 2017 to 2020, the official export of gold from the municipality was 1.300,98 kg out of an official national export of 10.207,94 kg during this period, or 13% of the national exploitation of 2017 to 2020 comes from Betsiaka. Gold mining is artisanal and holds an important place in the socio-economic life of the town. The objective of this work is to assess the impacts of gold panning on the environment, the economy, society and the health of the population in order to develop environmental management programs in relation to the gold panning.

Diachronic analyzes of the satellite images of the years 2000, 2016 and 2020 were then made to measure the impacts of this activity on the physical environment, in particular the plant cover and the soil and during which, the results were able to highlight a degradation increased vegetation cover and increased deforestation. The estimated loss of plant surface is 60,96% from 2016 to 2020, with a significant rate of decline of 418,75 ha / year. In addition, an increase in the surface area of bare soils corresponding to eroded soils at an extension rate of 263,03 ha / year from 2016 to 2020 was observed. Nevertheless, this study also made it possible to observe that other anthropogenic factors such as bush fires, slash-and-burn or tavy cultivation, agriculture, and the extension of urban areas constitute causes of deforestation in the area of study, besides gold panning.

Field surveys have been carried out and have helped to show the place of gold mining in the economy of the municipality and the population. However, the lack of management and monitoring of this sector has significant negative impacts on the environment, society, and human health. The modeling of the impacts of gold panning on the physical environment by 2030 has made it possible to highlight three main scenarios according to which the extent of the vegetation cover would depend on the current trend of human activities, the establishment of a policy of protecting woody cover or demographic and economic growth in the region.

Finally, the assessment of all these impacts made it possible to develop an environmental management plan in order to compensate and mitigate the harmful effects of gold mining and to reinforce the positive effects.

Keywords: Betsiaka, Gold panning, Diachronic analysis, Satellite images, Modeling, Management program

TABLE DES MATIERES

Introduction.....	1
I. Généralités.....	3
1. Présentation de la zone d'étude.....	3
2. Cadre social et économique	8
3. Méthodes d'exploitation à Betsiaka	11
4. Utilisation et intoxication au mercure dans l'orpaillage	14
II. Méthodologie.....	16
1. Étude bibliographique	16
2. Visite, enquête et analyse des données sur le terrain	18
3. Traitement des images satellites	20
4. Modélisation	21
III. Résultats et discussions	23
1. Localisation des sites d'orpaillage	23
2. Analyse des données sur terrain.....	23
3. Interprétation des images satellites	26
4. Détermination et évaluation des impacts de l'exploitation artisanale de l'or sur l'environnement	32
5. Modélisation de l'occupation des terres en 2030.....	44
6. Discussion	46
7. Limites de l'étude	47
IV. Programme de gestion environnementale et sociale.....	49
Conclusion	56
Bibliographie	57
ANNEXES.	
Guide d'entretien auprès de la commune.....	i
Fiche d'enquête sur les propriétaires et sponsors.....	iii
Fiche d'enquête sur les collecteurs	iv
Fiche d'enquête sur les orpailleurs.....	v
Coordonnées des sites d'orpaillage	viii
Principes d'Elinor Oström.....	x

GLOSSAIRE

Collecte d'or	Activité d'achat et de vente de l'or sous toutes ses formes.
Environnement	Combinaison des milieux naturels et socio-économique qui constitue le cadre de vie d'un individu ou d'une population et qui intéresse le développement national.
Ferrallitisation	Phénomène géologique qui permet la création de la ferralite ou latérite dû à l'altération par lessivage des roches cristallines en climat intertropical.
Ferruginisation	Fait d'enrichir en fer.
Fokontany	Unité administrative malgache dont l'ensemble forme la Commune.
Gîte alluvionnaire	Gîte sédimentaire détritique résultant du transport et de la concentration de l'or dans les alluvions des cours d'eau.
Gîte primaire	Formation géologique non sédimentaires dans laquelle l'or est déposé et fixé dans sa roche hôte d'origine ou dans un filon d'or.
Hydromorphie	Caractère d'un sol régulièrement saturé en eau.
Occupation des sols	Couverture bio-physique de la surface des terres émergées (FAO, 1998) et le type d'usage de ces terres par l'homme.
Orpillage	Activité de recherche et d'exploitation artisanale de l'or dans les rivières.
Phénomène de Lavakisation	Phénomène naturel qui contribue à la formation de « <i>lavaka</i> » qui sont des excavations grossièrement ovoïdes façonnées dans les altérites de roches cristallines et métamorphiques par des eaux de ruissellement et des sous-écoulements. Il se déroule généralement sur les flancs des montagnes et des collines.
Phénomène de splash	Phénomène physique dû aux impacts des gouttes de pluie sur le sol arrachant les particules qui seront ensuite transportées par l'eau.

Ruée

Précipitation rapide des orpailleurs vers un site à la suite d'une découverte de gisement d'or.

Tavy

Terme malgache désignant la culture sur-brûlis.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ANN	Artificial Neuronal Network (Réseau de Neurones Artificiels)
ANOR	Agence Nationale de la filière Or
EIE	Etude d'Impact Environnemental
EMAPE	Exploitation Minière Artisanale et à Petite Echelle
FAO	Food and Agriculture Organisation
FTM	Foibe Tao-Tsaritan'i Madagasikara
GIZ	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit
GPS	Global Positioning System
IDA	Association Internationale de Développement
IUCN	Union Internationale pour la Conservation de la Nature
LR	Régression Logistique
MAP	Madagascar Action Plan
MCE	Evaluation Multi-Critères
MECIE	Mise En Compatibilité des Investissements avec l'Environnement
MOLUSCE	Modules for Land Use Change Evaluation
ONG	Organisation Non Gouvernementale
ONU	Organisation des Nations Unies
PAGE	Programme d'Appui à la Gestion de l'Environnement
PE	Permis d'Exploitation
PGES	Programme de Gestion Environnemental et Social
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'Environnement
PR	Permis de Recherche

PRE

Permis Réservé aux petits Exploitants

RN

Route Nationale

SCP

Semi automatic Classification Plugin

UCL

Université Catholique de Louvain

LISTE DES FIGURES

Figure 1 Localisation de la zone d'étude : Betsiaka.....	3
Figure 2 Carte topographique de Betsiaka	4
Figure 3 Diagramme de la hauteur de pluie dans la commune de Betsiaka.....	4
Figure 4 Carte géologique de la commune de Betsiaka	5
Figure 5 Carte hydrographique de la commune Betsiaka	7
Figure 6 Aspect de la végétation dans le Fokontany de Betsiaka (ANOR, 2021)	8
Figure 7 Travail des enfants dans l'orpaillage et Ecole Primaire Publique à Betsiaka (ANOR, 2021).....	9
Figure 8 Hopital dans le village de Betsiaka (Agence National de la filère Or (ANOR), 2016)	9
Figure 9 Méthode d'exploitation « kopaka lalan-tany » (Agence National de la filère Or (ANOR), 2016).....	12
Figure 10 Broyage et tamisage des minerais (Agence National de la filère Or (ANOR), 2016)	12
Figure 11 Méthode alakopaka (Agence National de la filère Or (ANOR), 2016)	13
Figure 12 Méthode « hili-jia » dans les couloirs d'orpaillage (Agence National de la filère Or (ANOR), 2016).....	13
Figure 13 Sites d'exploitation des Chinois sur le site d'Andrafiava dans la commune de Betsiaka (Gasikara.info, 2016).....	14
Figure 14 Masque de nuages multi-dates pour les images satellites	20
Figure 15 Images Landsat avec masque somme	21
Figure 16 Localisation des sites d'orpaillage dans le Fokontany de Betsiaka	23
Figure 17 Exploitation artisanale de l'or à Betsiaka	25
Figure 18 Exemples de classes d'occupation du sol dans un secteur de la zone d'étude.....	26
Figure 19 Évolution du paysage de la période 2000-2016.....	27
Figure 20 Évolution du paysage de la période 2016-2020.....	27
Figure 21 Évolution du paysage de la période 2000-2020.....	28
Figure 22 Evolution des classes d'occupation du sol de 2000-2020.....	31
Figure 23 Sites abandonnés	32
Figure 24 Sites actifs	32
Figure 25 Erosion et lavakisation des sols	33
Figure 26 Tarissement de l'eau	34
Figure 27 Barrage pour dévier les cours d'eau.....	34
Figure 28 Pollution par le lavage des minerais	34
Figure 29 Evacuation de l'eau dans un puit par un moteur artisanal	35
Figure 30 Simulation des trois scénarios d'occupation du sol en 2030	44
Figure 31 Exploitation de l'or dans la commune de Betsiaka en 1910.....	46

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Répartition des populations dans les 12 villages (fokontany) de la commune de Betsiaka (ANDRIATSIHOARANA, 2016).....	8
Tableau 2 Objectifs, Hypothèses et Indicateurs pour l'enquête auprès des orpailleurs.....	20
Tableau 3 Exportation dans la commune de Betsiaka VS exportation totale d'or à Madagascar.....	23
Tableau 4 Informations pratiques sur l'exploitation aurifère sur le site de Betsiaka.....	24
Tableau 5 Matrice de transition de 2000-2016	28
Tableau 6 Matrice de transition de 2016-2020	29
Tableau 7 Évolution des classes d'occupation du sol de 2000-2016	29
Tableau 8 Évolution des classes d'occupation du sol de 2016-2020	29
Tableau 9 Evolution des classes d'occupation du sol de 2000-2020	31
Tableau 10 Ristournes obtenues par l'exportation de l'or produit de Betsiaka	36
Tableau 11 Matrice des impacts directs des différentes phases de l'exploitation artisanale de l'or sur les composantes environnementales à Betsiaka	37
Tableau 12 Critère d'évaluation des impacts d'après Fecteau (ABDOU AMADOU, 2019-2020).....	39
Tableau 13 Notation pour les critères d'évaluation	40
Tableau 14 Matrice d'évaluation des impacts de l'exploitation artisanale de l'or à Betsiaka	43
Tableau 15 Évolution de l'occupation du sol en 2030 avec le scénario 1	45
Tableau 16 Évolution de l'occupation du sol en 2030 avec le scénario 2	45
Tableau 17 Évolution de l'occupation du sol en 2030 avec le scénario 3	45
Tableau 18 Plan de gestion pour l'atténuation et compensation des impacts de l'orpaillage à Betsiaka (1 Eur= 4497,31 Ariary (03/08/21))	54
Tableau 19 Renforcement et amélioration des impacts positifs de l'orpaillage à Betsiaka....	55

Introduction

Madagascar est une île riche en biodiversité avec un taux d'endémisme élevé. Il est ainsi considéré comme un sanctuaire de la nature. Outre ses richesses en biodiversités, le pays possède également de nombreuses ressources minérales telles que le saphir, le rubis, la tourmaline, le nickel, le cobalt et des métaux précieux comme l'or, l'argent, le platine, etc.

Bien qu'il n'occupe pas une place aussi importante que dans les autres pays d'Afrique Subsaharienne, Madagascar a une forte potentialité aurifère. En effet sur les 1.579 communes, environ 400 sont aurifères avec 500.000 orpailleurs recensés en 2017 dont seulement 3.000 formels (LUZ, 2017). Il faut néanmoins noter que dans le pays, l'exploitation aurifère est encore dominée par l'exploitation artisanale et à petite échelle.

Toutefois, la grande île profite aussi de l'appui de l'IDA (Association Internationale de Développement) depuis 1998, pour la réforme de son secteur minier à travers une série de projets d'assistance technique qui visent surtout à attirer l'investissement, à améliorer la performance environnementale du secteur, et à assurer que toutes les parties prenantes bénéficient des retombées économiques. Le secteur aurifère fait partie de ces projets.

La commune rurale de Betsiaka, dans le district d'Ambilobe, région Diana, est l'une des communes aurifères les plus productrices d'or de Madagascar. De ce fait, l'orpaillage est une des activités économiques principales de la commune.

Cependant, l'exploitation artisanale de l'or dans la commune a des impacts considérables sur les plans environnemental, social et économique. En effet, les retombés économiques des petites mines comme l'orpaillage ne se font sentir qu'au niveau local. Le manque de traçabilité de l'or due à l'informalité du secteur est un problème que celui-ci devrait affronter. De plus, les études socio-environnementales dans ce secteur sont superficielles voire inexistantes et l'utilisation de certains produits chimiques comme le mercure, nuisibles à la santé de l'homme, et dont l'interdiction de son usage par les différentes lois et conventions, n'est pas réellement implémentée. Outre à cela, la forte pression anthropique due aux différentes activités économiques de la région, notamment l'orpaillage, accentue la dégradation du couvert végétal voire la déforestation.

C'est dans cette optique que les résultats de notre travail intitulé : « *ANALYSE ET ÉTUDE DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DE L'ORPAILLAGE ET DE LEUR ÉVOLUTION DANS LA COMMUNE RURALE DE BETSIKA, REGION DIANA* » interviendront.

En effet, cette étude permettra de mettre en évidence les enjeux socio-économiques et environnementaux liés aux activités d'orpaillage. Les enquêtes auprès des parties prenantes, les orpailleurs, les collecteurs, les propriétaires de carrières et les autorités locales, ainsi que les analyses et observations effectuées sur le terrain et enfin la cartographie de l'occupation des sols dans la zone, permettront une évaluation concrète des impacts environnementaux de l'orpaillage et ainsi de proposer des plans de gestion et de réhabilitation adéquats.

Plus précisément, il s'agit de :

- Faire l'état des lieux de l'orpaillage dans le site de Betsiaka
- Mesurer les impacts de cette activité sur l'environnement, la société et l'économie

- Évaluer l'apport de cette activité
- Étudier l'évolution des impacts des activités anthropiques notamment l'orpaillage à l'horizon 2030

Ainsi, le travail se répartit en quatre chapitres :

- Le premier traitera des généralités présentant la zone d'étude
- Le deuxième sera axé sur la méthodologie du travail
- Le troisième abordera les résultats et discutera des impacts de l'exploitation artisanale de l'or
- Et enfin, le dernier sera consacré à l'élaboration d'un programme de gestion environnementale et socio-économique (PGES)

I. Généralités

1. Présentation de la zone d'étude

1.1. Localisation de la zone d'étude

La commune rurale de Betsiaka est située dans la province d'Antsiranana, au Nord de Madagascar, dans la Région de Diana et dans le district d'Ambilobe. Elle se trouve à 1.005 km d'Antananarivo en empruntant la route nationale n°4 (RN4, bitumée) jusqu'à Ambondromamy, puis la route nationale n°6 (RN6, bitumée), jusqu'à Ambilobe. Notre zone d'étude se localise principalement dans le village ou fokontany de Betsiaka, qui est le chef-lieu commune et qui se trouve à 28 km d'Ambilobe en utilisant la route nationale n°5a (RN5a, secondaire), qui est difficilement accessible pendant les périodes de pluies. Les coordonnées géographiques de la commune sont S 13°09'30,14'' et E 49°14'14,11'' (ANDRIATSIHOARANA, 2016).

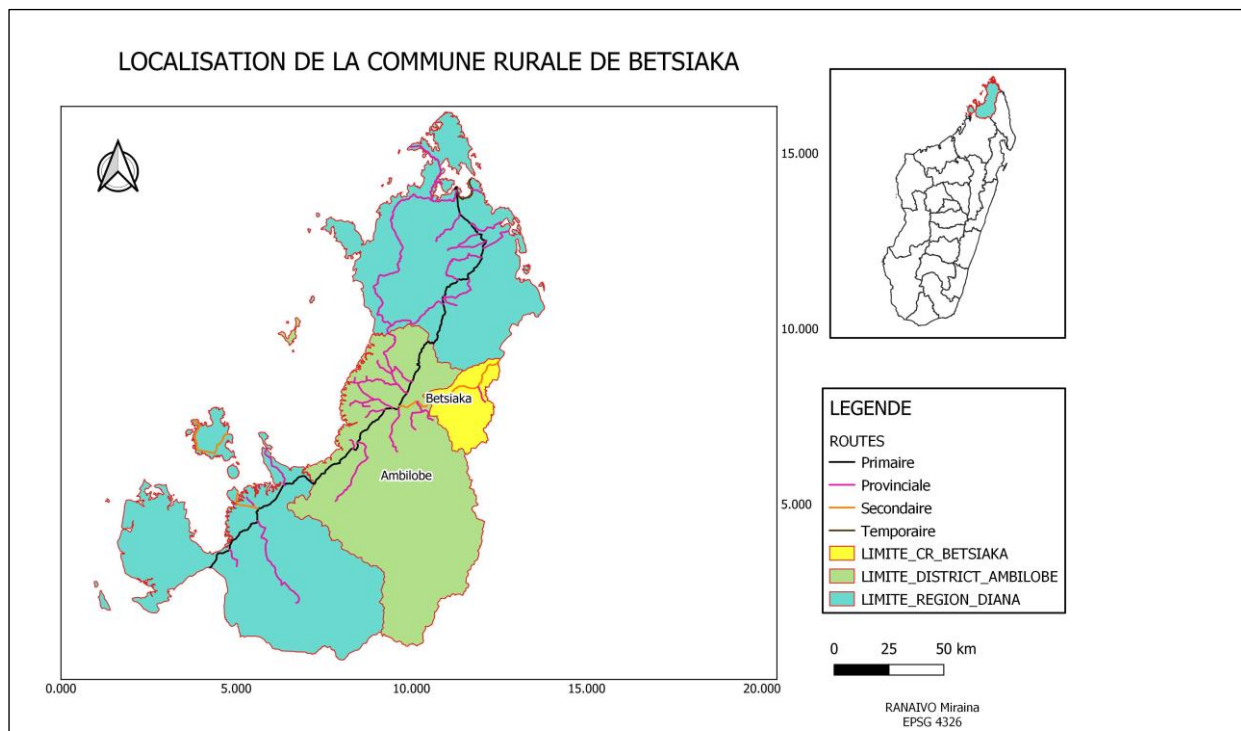


Figure 1 Localisation de la zone d'étude : Betsiaka

1.2. Géographie de la zone d'étude

1.2.1. Relief

La zone de Betsiaka est située au milieu des massifs d'Andrafiabe au Sud-Est et limitée par la chaîne gréseuse de l'Andavakoera au Nord. Cette dernière domine de près de 500 m la plaine de l'Ambavazoro et formée d'argile schisteuse triasique. Des chaînes de montagnes ondulées et allongées avec des altitudes moyennes variant de 100 à 150 m marquent le relief (ANDRIATSIHOARANA, 2016). Des collines disposées en lignes parallèles et correspondants à des affleurements des filons quartzo-barytiques sont remarquées au Sud (ANDRIANOMENY, 2014).

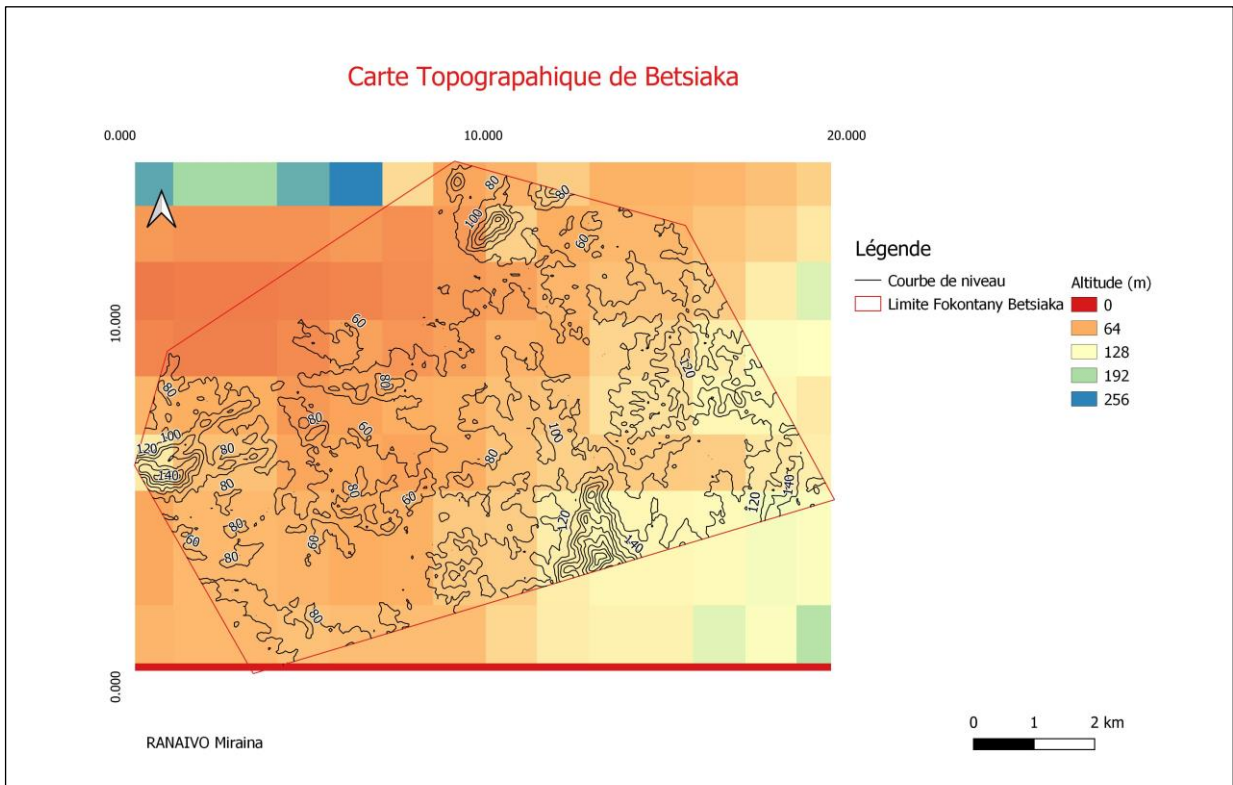


Figure 2 Carte topographique de Betsiaka

1.2.2. Climat

La zone d'Ambilobe est caractérisée par un climat de type tropical savane (Aw) avec un hiver sec, selon la classification de Köppen-Geiger. La saison des pluies est oppressante et les précipitations sont plus importantes en été de novembre en avril qu'en hiver de mai à octobre avec une pluviométrie mensuelle moyenne de 143 mm qui varie de 7,5 mm en saison sèche à 629,8 mm en saison humide pour un total annuel de 1.716mm.

Le climat est très chaud tout au long de l'année. La température moyenne annuelle est de 26°C, avec un maximum de 31°C d'octobre en avril et un minimum de 18,7° C de juin en août. D'avril à novembre, la région est soumise au vent d'Alizé « Varatraza » dont le régime est commandé par l'alternance des brises de terre et de mer. C'est également une zone exposée aux cyclones tropicaux surtout en janvier et février (ANDRIANOMENY, 2014).

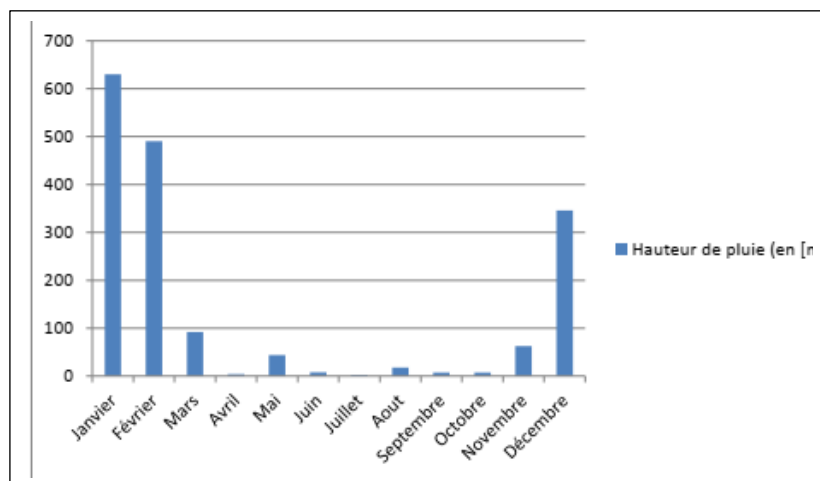


Figure 3 Diagramme de la hauteur de pluie dans la commune de Betsiaka (ANDRIANOMENY, 2014)

1.3. Description de la géologie de la région

1.3.1. Géologie et gîte aurifère de Betsiaka

La commune rurale de Betsiaka se trouve à la limite du bassin d'Ambilobe, une zone de contact des formations sédimentaires et du socle. Cette zone de contact est liée à l'effondrement du Canal de Mozambique et s'étend de la vallée du Sambirano au Sud-Ouest jusqu'à la côte Est (Vallée de la Loky) sur 170 km.

Les formations sédimentaires comprennent du bas vers le haut des :

- Conglomérats, des grès arkosiques, des argilo-grès, des argilo-silts, d'âge permien et de faciès marin paralytique (dépôts sédimentaires riches en matières organiques formés en milieu côtier)
- Schistes argileux à nodules fossilifères du Trias inférieur, de faciès marin,
- Argilo-schistes azoïques du Trias indifférenciés passant vers le haut à des épaisses assises de grès continentaux qui couronnent la crête principale de l'Andavakoera.

Ces formations sédimentaires ont dans l'ensemble un pendage régional vers le Nord-Ouest d'environ 30°.

Le socle protérozoïque est quant à lui caractérisé par des orthogneiss à muscovite et à amphibole, d'amphibolite à grenat avec quelques horizons de quartzites à magnétite assez peu fréquents. Ces formations ont un pendage plus marqué vers le Nord-Ouest qui est de 50 à 70° (RASOANAIVO & al, 1988).

Les gîtes aurifères de Betsiaka sont caractérisés principalement par des gisements dans les roches mésozoïques et tertiaire des cordillères dont la formation s'est déroulée dans un régime tectonique d'extension. Ce sont les gisements d'or épithermaux associés à des roches volcaniques et sédimentaires comprenant les volcans d'arc insulaire, les arcs continentaux et les centres volcaniques. Ces gîtes d'or épithermaux consistent en des minéralisations filoniennes. Les fluides hydrothermaux précipitent les métaux sous forme de sulfures ou d'éléments natifs pour former des veines en circulant dans les réseaux de fractures (ECKSTRAND, SINCLAIR, & THORPE, 1995).

Ainsi à Betsiaka, on rencontre surtout des gisements secondaires constitués essentiellement par la latérite dite « aurifère » provenant de l'altération et de la désagrégation des gisements primaires sous l'action des divers éléments atmosphériques sur une grande échelle temporelle et entraînés par les eaux météoriques. Ce transport par les eaux peut aussi aboutir à des gisements alluvionnaires ou éluvionnaires selon l'importance du transport (ANDRIATSIHOARANA, 2016).

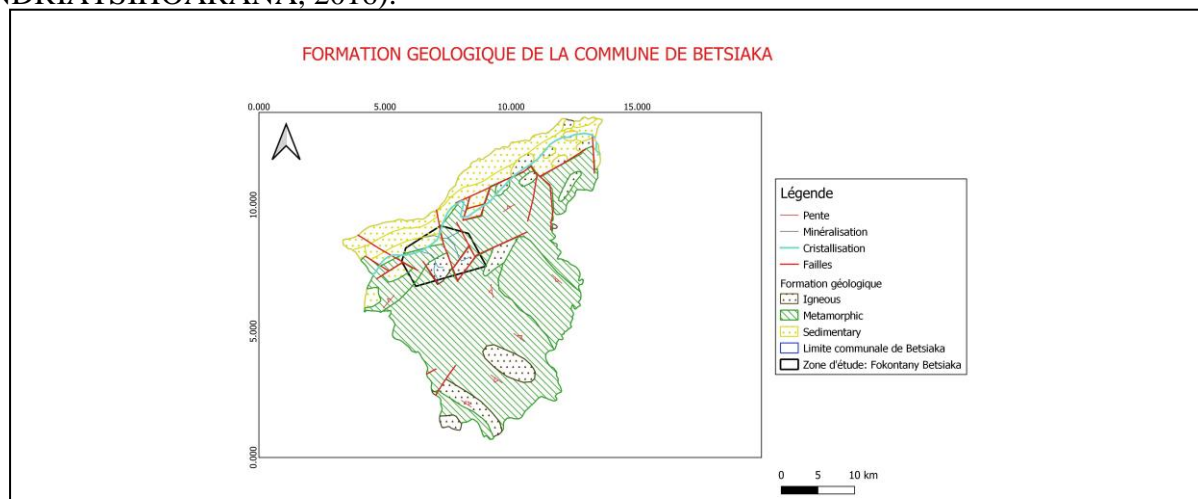


Figure 4 Carte géologique de la commune de Betsiaka

1.3.2. Pédologie

La zone d'Ambilobe comprend plusieurs types de sols. Les formations des roche-mères et le climat ont joué des rôles importants par rapport à la végétation et à la topographie dans la caractérisation de ces sols.

Cependant, quelques grands processus d'évolution se sont manifestés pour mettre en place ces différents types de sol comme la ferrallitisation et la ferruginisation, le lessivage, et enfin l'hydromorphie.

A l'intérieur de ces processus pédogénétiques principaux, l'intensité de l'altération des roches, la nature de la roche-mère ainsi que les variantes locales importantes comme le climat ont permis de classer les sols de la zone comme suit :

- Les sols ferrallitiques qu'on observe sur les massifs et les flancs. Ces sols se sont formés sous couvert forestier et en climat tropical ou équatorial. Ils sont très riches mais fragiles sans une couverture forestière. Le lessivage donne une formation de cuirasse stérile.
- Les sols ferrugineux tropicaux et peu évolués qui se trouvent dans les parties basses. On retrouve ce type de sol dans les régions de très longue saison sèche et un pédoclimax de savane à graminée. Riche en fer, argile mais pauvre en alumine libre, ils sont peu sensibles à l'action humaine mais les couvertures végétales sont de plus en plus appauvries surtout par les cultures sur brûlis.
- Les sols faiblement ferrallitiques et ferrisols qui sont localisés sur les zones sédimentaires sablo-argilo-limoneuses supportant une forêt dense climacique et une forêt de dégradation.
- Les sols hydromorphes qu'on voit dans les zones marécageuses, les dépressions et les cuvettes. Sa formation dépend des conditions hydrogéologiques locales (ANDRIATSIHOARANA, 2016).

1.3.3. Hydrologie

La région de Diana est caractérisée par trois grands ensembles de cours d'eau :

- Ceux de la montagne d'Ambre
- Ceux de Tsaratanana
- Les rivières du versant oriental

Les principales rivières qui prennent leur source dans la montagne d'Ambre sont :

- La Saharenana avec une longueur de 52 km et un bassin versant de 140 km²
- L'Irodo de 80 km de longueur

Les trois principaux cours d'eau dans la région qui prennent leur source dans le Tsaratanana sont :

- Le Mahavavy (165 km)
- Le Sambirano (124 km)

- Le Ramena (80 km) (ROGEZ, 2021)

La rivière de Mahavavy constitue avec les rivières de Mananjeba et de l'Ifasy des deltas traversant la région du Sud-Est au Nord-Ouest du district d'Ambilobe.

Le cours d'eau de Mananjeba, avec une longueur de 45 km et un bassin versant de 300 km², constitue le principal cours d'eau du district d'Ambilobe. Dans la commune rurale de Betsiaka, la rivière d'Ambalabao, affluent de la Mananjeba, est la ressource en eau de surface avec quelques ruisseaux plus ou moins permanents.

Les nappes phréatiques libres, à une profondeur moyenne d'environ 2,50 m, constituent les eaux souterraines (ANDRIATSIHOARANA, 2016).

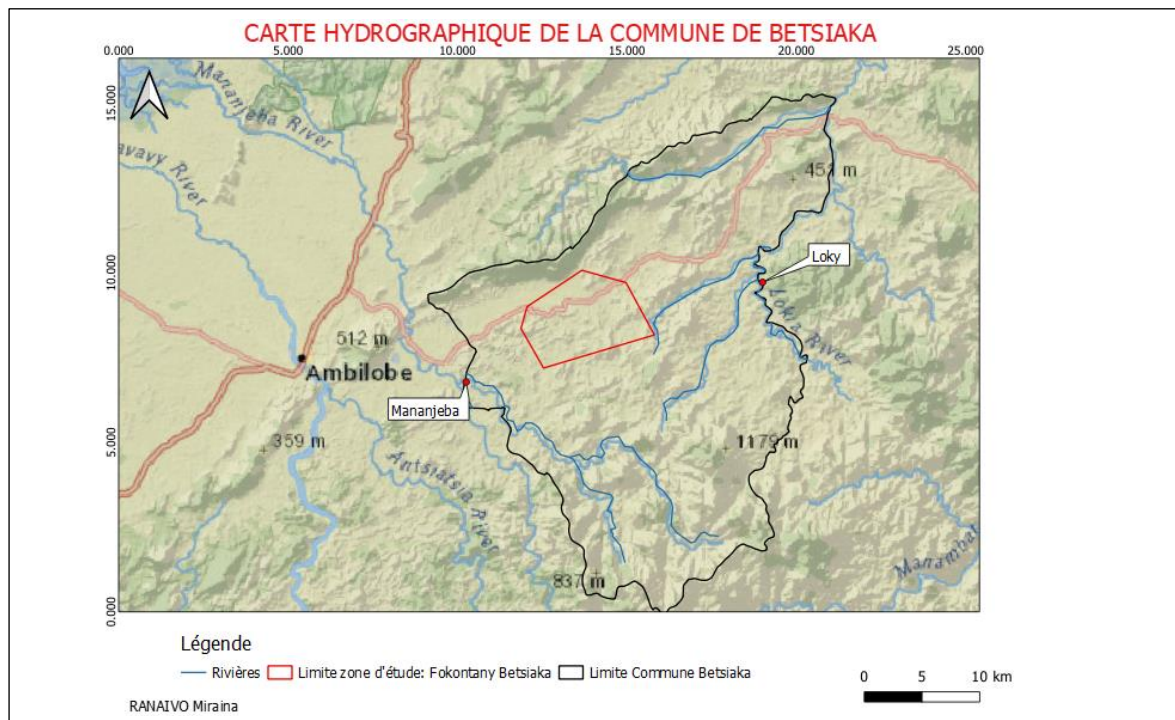


Figure 5 Carte hydrographique de la commune Betsiaka

1.4. Description de l'écosystème de la zone d'étude

1.4.1. Végétation

On rencontre également deux types de formations végétales dans la commune notamment:

La formation ouverte qui correspond à :

- Une savane herbeuse dominée par des espèces herbacées telles que *Heteropogon Contortus* (danga) qui sont des herbes piquantes, *Cynodon* qui sont des poacées. Elle recouvre 98% de la zone.
- Une savane arbustive dominée par des espèces ligneuses et recouvrant 70% de la commune avec une strate arbustive formée d'albizzia, d'acacia.

Et la formation fermée qui est constituée par :

- Un vestige forestier qui est surtout destiné pour la collecte de bois de chauffe. Il a un taux de recouvrement de 46% avec des espèces comme l'acacia et l'albizzia.
- Une forêt ripicole qui se trouve principalement en bordure des cours d'eau, avec des espèces comme le manguier (*Mangifera indica*), le jojoba. Elle recouvre 35% de la zone.

En tout, on a recensé vingt-cinq (25) familles et cinquante-deux (52) espèces végétales dans la zone, mais aucune espèce menacée de la liste rouge de l'IUCN (ANDRIATSIHOARANA, 2016).



Figure 6 Aspect de la végétation dans le Fokontany de Betsiaka (ANOR, 2021)

1.4.2. Faune

La région est riche en biodiversité animale et on y a recensé vingt-sept (27) espèces avec de nombreuses espèces endémiques comme les lémuriens dont certains sont considérés comme en danger critique comme le *sifaka* et le *sahafary*, d'autres nouvelles espèces ont été également découvertes telles que le *chirogale moyen*.

On y trouve aussi des micromammifères notamment les rongeurs comme le *Eliurus minor* qui est aussi endémique à l'île et vingt (20) espèces de l'avifaune dont quinze (15) sont endémiques. Une des espèces qu'on retrouve à Betsiaka est le *foudy rouge*.

Et enfin, on y rencontre des reptiles et une (1) espèce d'amphibien dans la zone (ANDRIATSIHOARANA, 2016).

2. Cadre social et économique

2.1. Démographie et ethnie dans la région

La commune de Betsiaka a une superficie de 590 km² et une population totale de 40.691 habitants (2016), répartie dans douze (12) villages. La densité de population s'élève alors à 69 hab/km².

Villages (fokontany)	Nombre de population
Betsiaka	23.517
Andrafialava	1.147
Ankaramy	468
Ampahaka	630
Tanambao/Mangily	826
Morafeno	733
Ambararatra	12.994
Sandranary	905
Antanamivony	1.253
Fihety	844
Ankatoko	7.267
Mosorobe	900

Tableau 1 Répartition des populations dans les 12 villages (fokontany) de la commune de Betsiaka (ANDRIATSIHOARANA, 2016)

La population de la zone d'étude est d'origine diversifiée avec une prédominance, cependant, des tribus de Sakalava, venant de l'Ouest de Madagascar et qui s'unissent avec les Antakarana du Nord pour former le peuple autochtone. Les principaux migrants dans la région sont les Tsimihety du Nord-Ouest et les Betsimisaraka de l'Est de l'île (ANDRIANOMENY, 2014).

Outre les migrants malgaches dans la région, il y a aussi des étrangers, surtout des Chinois qui exercent dans l'exploitation aurifère.

2.2. Education dans la commune de Betsiaka

Sur les sites, les orpailleurs et leurs familles ainsi que la population environnante vivent dans des conditions précaires, avec des habitats indécents, un faible accès à l'eau potable, aux soins de santé, à l'éducation et à tout autre service social.

Du point de vue de l'éducation, le taux de scolarisation est de 34,45% dans la commune de Betsiaka avec vingt-trois établissements primaires (dont trois privés et vingt publiques). Il existe également trois établissements secondaires et un lycée qui sont répartis dans les douze (12) villages de la commune (ANDRIANOMENY, 2014). Cependant, 80% des enfants abandonnent l'école par manque de moyen financier de leurs parents et à l'aspiration pour les travaux d'orpaillage afin d'aider à subvenir aux besoins de la famille (Ministère de l'Environnement, de l'Ecologie et des Forêts, ONU, 2018).



Figure 7 Travail des enfants dans l'orpaillage et Ecole Primaire Publique à Betsiaka (ANOR, 2021)

2.3. Santé

Sur le plan santé, malgré la mise en place des centres de santé à proximité des sites d'orpaillage, aucune visite médicale liée à l'activité d'orpaillage n'a été enregistrée. En cas de maladie, la pauvreté des orpailleurs ne leur permet pas d'accéder à des soins appropriés. Le manque d'infrastructure et de matériels médicaux de ces centres sont aussi des difficultés auxquelles les communes aurifères doivent faire face (Ministère de l'Environnement, de l'Ecologie et des Forêts, ONU, 2018). Toutefois, de nombreuses maladies liées à l'activité minière notamment à l'utilisation de mercure sont observées à proximité des sites d'orpaillage.



Figure 8 Hopital dans le village de Betsiaka (Agence National de la filère Or (ANOR), 2016)

2.4.Sécurité

Les mineurs sont le plus souvent victimes des attaques à main armée par les Dahalo ou les bandits de grands chemins. Bien que des mesures aient été prises comme l'affectation d'unités militaires spécialisées et la mise en place de poste avancé de la gendarmerie nationale dans la commune de Betsiaka, ou l'installation des agents de sécurité civils, dénommés quartiers mobiles, pour défendre les habitants contre ces bandits, l'insécurité semble toujours régner dans ces zones (Ministère de l'Environnement, de l'Ecologie et des Forêts, ONU, 2018).

2.5.Valeurs culturelles et religieuses

La commune de Betsiaka est une commune à cultures et religions diversifiées. On remarque pourtant la prédominance du christianisme.

Cependant, malgré la foi chrétienne de la population, les coutumes et les traditions restent fortement ancrées dans les pratiques de la population comme les sacrifices rituels ou « joro » avant toute activité culturelle, économique ou sociale dans la région. Il y a aussi le « fady » ou tabou qui interdit le travail le mardi, le jeudi et le dimanche surtout l'exploitation aurifère (ANDRIANOMENY, 2014).

2.6. Activités économiques de la commune

La population dans la commune rurale de Betsiaka vit principalement des activités minières, l'agriculture et l'élevage viennent en deuxième position.

2.6.1. Activité minière

Le sous-sol de Betsiaka regorge d'une richesse diversifiée de ressources minières notamment : l'or, l'argent, le quartz, la tourmaline, l'améthyste, etc.

Pour l'activité aurifère en particulier, on y comptait 12.669 orpailleurs en 2016 dans la commune dont 9.305 sont des hommes et 3.364 des femmes (PAGE GIZ, 2016).

Certaines couches socio-professionnelles ont été identifiées sur les sites d'orpaillage, et sont généralement composées par :

- les orpailleurs et leur famille,
- le propriétaire du sol,
- le propriétaire de puits,
- le fournisseur des vivres, qui est à la fois collecteur,
- le collecteur ambulant sur site,
- les bijoutiers,
- le marchand des équipements et outillages,
- le forgeron pour les outils de mines,
- les gargotes
- les administrations.

A Betsiaka, les orpailleurs travaillent 4 jours sur 7 et 10 mois sur 12 dans l'année avec une production annuelle moyenne de 19.968 g soit un revenu communal d'environ 1.179.102,68 USD (1g de 24 carat = 59,05 USD : 26/02/2021), ce qui n'est pourtant pas palpable ni au niveau de la commune ni au niveau national à cause de l'informalité du circuit (PAGE GIZ, 2016)

2.6.2. Agriculture

L'agriculture n'est pas très développée dans la région à cause de l'engouement de la population pour l'exploitation artisanale de l'or qui est une source de revenu rapide et de la dégradation environnementale causée par cette dernière. Toutefois, si cette dégradation rend difficile l'agriculture par la réduction des ressources hydriques et l'infertilité des sols, l'activité demeure, importante avec un taux d'occupation de 80% de la totalité de la population et constitue une activité de substitution à l'orpaillage durant les saisons des pluies pendant lesquelles l'exploitation aurifère est impossible (ANDRIANOMENY, 2014).

2.6.3. Élevage

Dans la zone, l'élevage est surtout caractérisé par l'élevage familial et dominé par l'élevage bovin avec un cheptel de plus de 19.000 têtes répartis dans les villages. Il est souvent associé à l'agriculture et dans ce cas, le zébu est uniquement utilisé comme animal de trait et très peu comme animal d'abattage. L'élevage de volaille vient en second lieu avec un cheptel de 100.000 têtes et enfin l'élevage porcin avec un cheptel de 7.000 têtes (ANDRIANOMENY, 2014).

3. Méthodes d'exploitation à Betsiaka

3.1. Types d'exploitation aurifère

Différentes méthodes d'exploitation artisanale de l'or sont pratiquées à Betsiaka.

- Le « *fatana* » ou galerie qui est le plus pratiqué. En effet, 369 galeries actives et 80 galeries abandonnées sont recensées dans le site de Betsiaka. Ce type de méthode est surtout pratiqué par les hommes et dans le cas de notre zone d'étude, 1.180 hommes et 32 femmes y travaillent (PAGE GIZ, 2016).
 - o Une des variantes de ce type d'exploitation est la méthode de « *kopaka lalan-tany* » qui est appliquée dans le gisement secondaire constitué essentiellement par la latérite dite "aurifère". Littéralement « *lalan-tany* » signifie dans un langage minier "galerie", vernaculairement « *lozoka* ». Le principe consiste à creuser un tunnel au hasard depuis la surface du sol, qui est couverte des produits de l'érosion par ruissellement, jusqu'à rencontrer les graviers aurifères. En pratique, une bouche de trou de forme circulaire de 2 m de diamètre environ est creusée avec une profondeur de 2 à 3 m maximum. Ensuite, un gradin pour accéder à la galerie est réalisé. La dimension du trou diminue aussi à chaque descente et devient constante. Le « *kopaka lalan-tany* » se fait habituellement avec un puits vertical de 8 à 10 m et une inclinaison subhorizontale de 10 à 30 m et on atteint alors la nappe phréatique. Après quelques heures d'exploitation, l'eau est asséché avec un seau ou une motopompe (Agence National de la filère Or (ANOR), 2016).

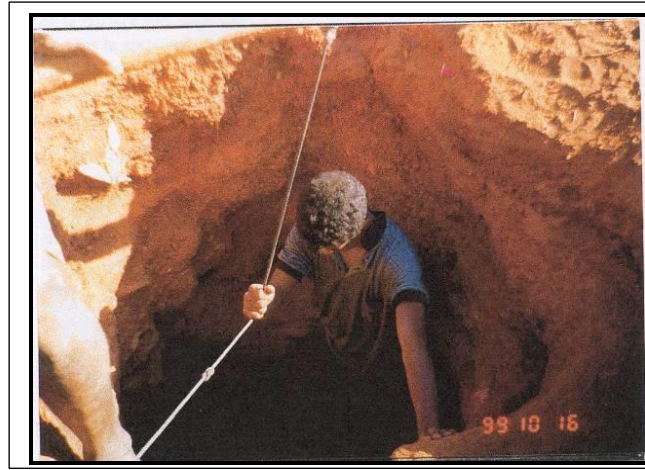


Figure 9 Méthode d'exploitation « kopaka lalan-tany » (Agence National de la filière Or (ANOR), 2016)

- Une autre variante est la méthode « kopaka lalam-bato », qui consiste à, comme son appellation l'indique, suivre le filon de quartz de la partie superficielle. Ce signe avant-coureur sert de guide pour aller beaucoup plus en profondeur tout en creusant une galerie. Le principe consiste à traquer le filon de quartz aurifère de couleur rougeâtre (vernaculièrement "vatomasaka") de la surface vers la profondeur. Ce suivi se fait par le creusement d'une galerie en fonction de l'allure du filon. En cas d'une discordance stratigraphique du filon, on essaie de le poursuivre au hasard jusqu'à ce qu'on le retrouve. En pratique, le déblocage du filon se fait à l'aide d'une barre à mine et le quartzite aurifère est récupéré. Les orpailleurs laissent intact le gneiss à sillimanite du toit. A noter que si le quartz présente de grains d'or, les orpailleurs pensent que la zone tout autour est aurifère. Les blocs de quartz concassés de dimension 3x3 cm² environ sont amassés et broyés à l'aide d'un mortier fabriqué en granite et de pilon constitué par la barre à mine. La poudre de quartz ainsi obtenue sera tamisée. Les refus sont broyés à nouveau tandis que les passés (poudre de quartz) sont prêts à être lavés avec la batée. Il est à noter que la méthode "kopaka lalam-bato" se pratique en saison sèche. Les femmes travaillent surtout dans le traitement des minerais après son extraction par les hommes (Agence Nationale de la filière Or (ANOR), 2017).



Figure 10 Broyage et tamisage des minerais (Agence National de la filière Or (ANOR), 2016)

- Une troisième variante du type d'exploitation par « fatana » ou galerie est la méthode « alakopaka » qui consiste à abattre progressivement la latérite, sans la délaissier au niveau minéral pour atteindre la roche-mère considérée comme la fin du gisement. Ainsi, il faut procéder au déblaiement pour découvrir les épontes (toit et mur du filon). Cette méthode ne nécessite aucune prospection, ni recherche. Le creuseur fait confiance à son intuition et à son expérience pour trouver le filon. L'essentiel est de trouver la galerie pour avoir de l'or. Cependant cette méthode nécessite plus de temps (Agence Nationale de la filière Or (ANOR), 2017).

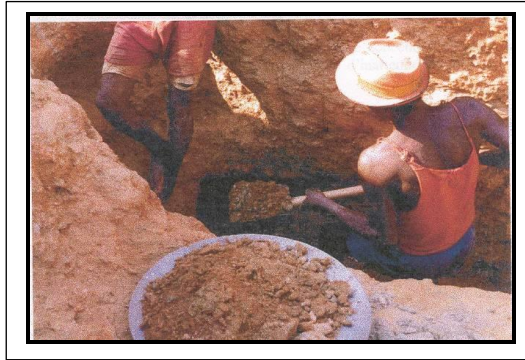


Figure 11 Méthode alakopaka (Agence National de la filière Or (ANOR), 2016)

- Des couloirs d'orpaillage sont également observés dans le site de Betsiaka. Les femmes sont plus dominantes que les hommes pour ce type d'exploitation, 629 femmes pour 192 hommes dans ces couloirs en 2016 (PAGE GIZ, 2016). La méthode est appelée vermiculairement « hili-jia ». Elle consiste à enlever, à l'aide d'une bêche dans un premier temps, les sables couvrant les débris aurifères qui se trouvent au fond de la rivière à une profondeur d'au moins 1 m. Cela se fait par plongeon si la profondeur dépasse un mètre au cours de la saison sèche. Les plongeurs plongent jusqu'à une profondeur de 2 m. Ils prélèvent les dépôts fluviaux avec une batée, et remontent en dehors du trou par une rampe pour émerger. Ils travaillent en moyenne de 8h à 16h. Ils préparent le repas dans le même site. Ils rentrent chez eux lorsque la température de l'eau baisse vers 16h. Quoiqu'il en soit, les femmes et les enfants continuent toujours à laver les débris recueillis des cours d'eau au voisinage du site même (Agence Nationale de la filière Or (ANOR), 2017).

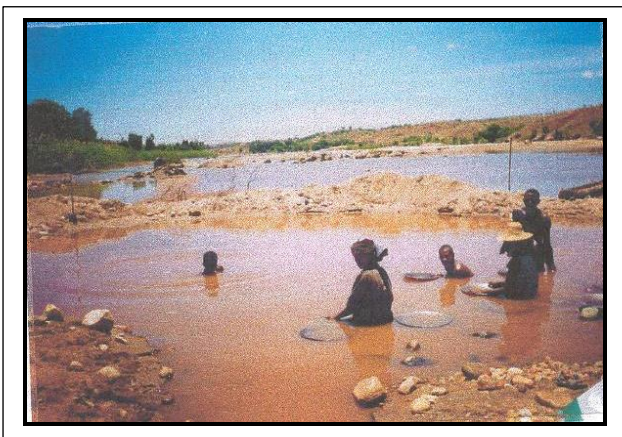


Figure 12 Méthode « hili-jia » dans les couloirs d'orpaillage (Agence National de la filière Or (ANOR), 2016)

Ainsi, les matériels les plus utilisés par les orpailleurs nationaux de Betsiaka sont des outils primaires comme les pioches, les barres à mines, les pelles, et les batées.

Cependant, des étrangers, en particulier des Chinois sont également présents dans la commune et utilisent des matériels plus sophistiqués comme les engins, les dragues, les pelles mécaniques, les broyeurs, les tamis à moteur et ont recours au mercure pour l'extraction de l'or par amalgamation du minerai brut directement sur le sluice après avoir récupéré les couches à graviers dans les bedrock des rivières par des dragues flottantes. Le produit chimique est pourtant toxique aussi bien pour la santé humaine que pour l'environnement.



Figure 13 Sites d'exploitation des Chinois sur le site d'Andrafiavava dans la commune de Betsiaka (Gasikara.info, 2016)

4. Utilisation et intoxication au mercure dans l'orpaillage

L'utilisation de mercure est prohibée par le code minier malgache et est mentionnée dans l'article 22 du régime de l'or. Cependant il continue d'être utilisé. L'importation du mercure est clandestine et on estime que 18 à 44 tonnes de mercure sont utilisées dans l'exploitation minière artisanale et à petite échelle dans le pays en 2016. Ainsi, on peut évaluer que plus de 11 tonnes par an polluent l'atmosphère et 3,6 tonnes les eaux et le sol (Ministère de l'Environnement, de l'Ecologie et des Forêts, ONU, 2018).

Le mercure métallique est utilisé dans l'exploitation aurifère pour extraire l'or par la formation d'un amalgame dont les teneurs en or et en mercure sont approximativement égales. Cette pratique est rapide, moins coûteuse, et plus facile que les autres méthodes d'extraction de l'or, ce qui fait que l'orpaillage est un des principaux facteurs de contamination mercurielle. Le mercure est par la suite, séparé de l'or par brûlage de l'amalgame à une température entre 400°C et 500°C, ce qui entraîne sa vaporisation, car il bout à partir de 357°C alors que l'or ne bout qu'à partir de 1.063°C (MOULLET, SAFFACHE, & TRANSLER, 2006). Dans notre zone d'étude, les orpailleurs n'utilisent pas le mercure dans l'extraction de l'or. Toutefois, l'utilisation de ce produit par les Chinois dans des sites voisins, a des répercussions considérables sur la santé de la population sur notre zone par la consommation des poissons dans les rivières contaminées.

En effet, le mercure élémentaire rejeté dans l'environnement se transforme en mercure inorganique qui va s'infiltrer dans les cours d'eau et les sédiments et qui sera par la suite, transformé par les bactéries au sein des milieux aquatiques anoxiques en un dérivé organique qui est le méthylmercure et qui atteindra la chaîne trophique par la bioamplification et la bioaccumulation dans les poissons (BOUDOU, DOMINIQUE, FRERY, & CORDIER, 2006).

L'exposition à courte durée et à forte dose du mercure organique peut être mortelle pour l'homme. Le méthylmercure agit principalement sur le système nerveux central provoquant lors d'une faible intoxication, un trouble de sensibilité des extrémités, une fatigue générale, un malaise et un trouble de vision. Pour des intoxications plus sévères, des troubles de comportement, une détérioration de la fonction cérébrale et intellectuelle et une ataxie surviennent. Comme le diméthylmercure traverse facilement la barrière placentaire et hématoencéphalique, il peut atteindre le fœtus et provoquer des atteintes cérébrales plus importantes que chez les adultes. Ce composé passe également dans le lait maternel. Les impacts chez les enfants sont principalement des troubles psychomoteurs se traduisant par le retard mental, la cécité, la surdité. Ces enfants sont souvent victimes de convulsions. La consommation importante de produits contaminés par le méthylmercure entraîne la mort (BENSEFA-COLAS, ANDUJAR, & DESCATHA, 2011) (SOLIDARITE SANTE, 2005).

II. Méthodologie

Ce chapitre aborde les différentes méthodologies mises en œuvre pour réaliser le travail telles que l'étude bibliographique, la visite et l'enquête sur le terrain, la télédétection et enfin la modélisation.

1. Étude bibliographique

L'étude bibliographique consiste à recueillir les documents nécessaires à la compréhension et à la réalisation du travail comme :

- Le cadre juridique et législatif sur l'exploitation aurifère et l'environnement à Madagascar
- La description du milieu récepteur
- L'acquisition des images satellitaires, des bases de données
- Le modèle utilisé pour la modélisation

Ainsi, dans le cadre de ce travail, plusieurs documents ont été passés en revue tels que les rapports rédigés par les institutions nationales et internationales sur l'exploitation artisanale de l'or et des documents relatifs aux études et analyses nécessaires, à travers les moteurs de recherche comme Google, Google Scholar et Scopus sur le portail de l'UCL.

1.1. Cadre juridique et législatif

L'exploitation aurifère à Betsiaka est régie par le code minier malgache ainsi que son régime de l'or. Les substances minérales relèvent du domaine privé national de l'Etat. Néanmoins, une institution établie entre les divers acteurs de l'activité, dans le but de gérer communément la ressource est aussi appliquée. Il s'agit du « Dina ». L'activité aurifère est alors règlementée par un pluralisme juridique mettant en œuvre les lois étatiques comme le code minier et ses divers décrets d'application ainsi qu'une institution bricolée par les différents utilisateurs de la ressource. Outre ces différentes législations, il existe aussi le décret MECIE (Mise En Compatibilité des Investissements avec l'Environnement) qui va définir les règles à suivre sur les études d'impact environnemental de toute activité et dans notre cas de l'exploitation minière, en particulier l'orpaillage.

1.1.1. Législations étatiques

- Code minier

Le code minier malgasy a été défini par la loi N° 99-022 du 19 août 1999 et a été modifié par la loi N°2005-021 du 17 octobre 2005. Il régit les régimes suivants :

- La prospection, la recherche et l'exploitation des substances minérales
- L'orpaillage
- La recherche et l'exploitation des gîtes fossilifères

Il aborde les modalités d'acquisition et de renouvellement des permis miniers et des différentes autorisations comme l'autorisation d'orpaillage et les procédures administratives adéquates. L'accès aux ressources minières est ouvert à tous. Cependant, c'est le principe du premier arrivé, premier servi qui est appliqué (Ministère des Mines, 2005).

Le code minier a également pour objectif la protection de l'environnement et d'assurer la conformité de celui-ci aux activités minières comme stipulé dans son article 99 où toute personne physique ou morale exerçant l'activité minière doit minimiser les impacts de ses activités sur l'environnement et prendre des mesures de compensations de ces impacts. Elle est donc responsable de la dégradation de l'environnement du fait de ses activités (Ministère des Mines, 2005).

- Décret d'application et arrêté interministériel

Le décret d'application N° 2006-910 du 19 août 2006 portant application du code minier mentionne les diverses réglementations environnementales applicables au secteur minier ainsi que les modalités du suivi d'orpaillage en matière environnementale. Cela implique les modalités et approbations des plans d'engagements environnementaux ou des études d'impact environnemental, qui sont soumis par les demandeurs d'autorisations minières (Ministère des Mines, 2006).

En outre, l'arrêté interministériel N°12032/2000 sur la réglementation du secteur minier en matière de protection de l'environnement stipule aussi, dans son article 69 le fait que les opérations d'orpaillage qui emploient plus de vingt (20) personnes aux alentours de 500 m sont soumises à la mise en œuvre d'un plan d'engagement environnemental (Ministère de l'Energie et des Mines- Ministère de l'Environnement, 2000).

- Régime de l'or

Le régime de l'or est fixé par le décret N°2015-1035 du 30 juin 2015. Il avance dans son article 14 que chaque titulaire de carte d'orpailleur doit contribuer aux travaux environnementaux dans le cadre de l'orpaillage au sein de la commune. Il fait également référence, dans son article 22, de l'interdiction d'utilisation d'une drague que ce soit portatif ou non et des produits chimiques notamment le mercure, dans toute activité d'exploitation aurifère. Enfin, il définit les différentes procédures administratives d'octroi des différentes autorisations nécessaires pour travailler dans le secteur aurifère, les modalités de délimitation de couloirs d'orpaillage, les règles et consignes d'hygiène, de sécurité et d'environnement ainsi que les matériels autorisés dans l'orpaillage (Ministère auprès de le Présidence chargé des Mines et du Pétrole, 2015).

- MECIE- EIE pour un projet minier

Dans le cadre de l'application du code minier et du décret de MECIE ou Mise En Compatibilité des Investissements avec l'Environnement, les activités suivantes sont soumises à l'étude de l'impact environnemental ou EIE :

- Les exploitations minières et les traitements des minerais pour un permis d'exploitation ou PE
- Les opérations d'extraction mécanisée des substances minières, des fossiles et des gîtes rares
- Les exploitations ou extractions minières dans des zones sensibles
- Les recherches pour les permis de recherche ou PR en zone sensible
- Les recherches et exploitation minière en vertu d'un permis réservé aux petits exploitants ou PRE lorsque les activités risquent d'avoir des impacts considérables sur l'environnement (Ministère de l'Environnement, 2004).

- Agence Nationale de la filière OR (ANOR)

Le code minier place l'ANOR ou Agence Nationale de la filière OR, dans son article 86, comme un responsable qui doit assister techniquement et former les orpailleurs ainsi que les collectivités décentralisées pour la recherche et l'exploitation de l'or alluvionnaire et éluvionnaire, une formation sur la sécurité et l'hygiène dans les mines, sur la protection environnementale ainsi que les différentes procédures administratives pour l'acquisition des différentes autorisations dans l'activité aurifère. Elle a aussi pour rôle de collecter les informations nécessaires pour une maîtrise de l'activité aurifère. De ce fait, elle collabore étroitement avec les responsables communaux et les autorités locales pour le développement et l'harmonisation de la filière or ainsi que la protection de l'environnement par rapport aux activités d'exploitation aurifère (Ministère des Mines, 2006).

1.1.2. Dina

Le Dina est une institution qui règlemente la filière aurifère dans la commune de Betsiaka. Il a été élaboré et utilisé depuis 2013 mais a été renouvelé pour être conforme à la loi 2001-004 du 27 octobre 2001 portant sur les Dina à Madagascar. Il est fait pour gérer la filière or et résoudre les problèmes particuliers dans la commune que le code minier ne peut pas solutionner. Il est donc adapté au contexte socio-économique de la localité et fait participer tous les acteurs de l'activité aurifère. Il permet ainsi de gérer communément la ressource et d'appliquer le principe de subsidiarité et les principes d'Elinor Oström sur la gestion des biens communs (en annexe3).

Cependant, cette gestion commune des ressources dépend des relations sociales et des rapports de force, ce qui laisse toujours place à la possibilité de la tragédie de communs. L'Etat doit alors intervenir pour faire respecter les règles et éviter cette tragédie. Le pluralisme juridique est alors prôné dans la commune pour gérer la ressource.

1.2. Acquisition des images satellites et des bases de données

Les images satellites utilisées dans le cadre de ce travail sont le LANDSAT 4-5 pour l'image satellite de 2000 et LANDSAT 8 pour celles de 2016 et 2020. Ces images ont été téléchargées via le lien <https://earthexplorer.usgs.gov/>. La recherche d'une image sur ce site est libre et sans création de compte tandis que le téléchargement nécessite une possession ou une création de compte sur le site.

Les bases de données utilisées, en plus des images satellites sont les données de la FTM (Foibe Tao-Tsaritan'i Madagasikara) qui est l'institution responsable de la cartographie et de la topographie nationale ainsi que les cartes de délimitation administrative de Madagascar.

1.3. Modèle utilisé

Le modèle utilisé pour la simulation dans le futur de l'état de la couverture végétale et des impacts des activités anthropiques dans la commune est le plugin MOLUSCE (Modules for Land Use Change Evaluation) dans QGIS 2.18.0 qui est basé sur le principe des automates cellulaires. Le modèle utilise l'implémentation à partir de cartes d'occupation des terres passé et présent ainsi que des rasters de variables statiques qui ont une influence sur le changement d'occupation du sol pour prédire la future occupation du sol (GIS LAB, 2014). Le plugin se sert d'un réseau de neurones artificiels (ANN), une évaluation multicritères (MCE), des éléments de preuve (WoE) et d'une méthode de régression logistique (LR) pour modéliser le potentiel de transition d'utilisation et d'occupation du sol (GIS & RS Solution, 2020).

2. Visite, enquête et analyse des données sur le terrain

La réalisation d'un tel travail nécessite de nombreuses études notamment des activités sur le terrain pour atteindre les objectifs telles que :

- Une enquête auprès des différents acteurs : orpailleurs et non orpailleurs
- Un entretien avec la commune dans le but de connaître la gestion de la filière et les mesures environnementales prises
- Un échantillonnage des eaux de rivière pour déterminer le taux de mercure présent

Toutefois, différents facteurs, en particulier, la pandémie du Covid-19 et les restrictions qui s'en suivirent telles que la fermeture des frontières internationales à Madagascar ne nous ont pas permis de voyager au pays d'où la nécessité de collaborer avec les agents de l'ANOR sur place et la fermeture des frontières régionales dans le pays dû au confinement, a retardé le départ des agents sur le terrain. Ces facteurs ont limité le temps de l'étude et n'ont pas permis d'effectuer les activités initialement prévues. Ainsi, la visite sur le terrain se résume à collecter les données de base axées surtout sur les activités d'orpaillage, de quelques acteurs autres que les orpailleurs et un entretien avec les responsables communaux. L'échantillonnage des eaux pour la détermination de la contamination au mercure n'a pas pu être réalisé.

Néanmoins, pour pouvoir collecter ces données, des fiches d'enquêtes et des guides d'entretien ont été conçus. Les fiches d'enquêtes concernent les acteurs comme les orpailleurs et les non orpailleurs et ont pour but de leur poser une série de questions afin de comprendre le déroulement de l'activité et des impacts qu'elle engendre. Tandis que le guide d'entretien a été élaboré pour s'entretenir avec les responsables communaux pour savoir les modalités de gestion de la filière or et les mesures prises pour la protection et la réhabilitation de l'environnement dans la commune.

Ainsi les démarches pour la conception des fiches d'enquêtes et des guides d'entretien se fait comme suit :

- En amont, il faut définir les problèmes et poser les hypothèses
- Puis expliciter les objectifs spécifiques de l'enquête et du guide d'entretien
- Ensuite déterminer le type d'analyse ad hoc et identifier la méthode d'interrogation
- En aval, il faut formuler les questions et prévoir la configuration des données et leur traitement

Pour mieux appréhender l'activité d'orpaillage dans la commune en général, un guide d'entretien a été élaboré pour les responsables communaux et qui est adressé au Maire et a son adjoint. L'entretien avec les autorités locales permettront de situer l'activité d'exploitation artisanale de l'or dans l'économie de la commune et de comprendre les responsabilités de la commune dans la gestion de cette activité surtout par rapport à l'environnement.

Des questionnaires seront administrés à chaque type d'opérateur pour évaluer leur rôle et leur bénéfice dans l'exploitation. Un de ces questionnaires est destinés aux orpailleurs exerçant de façon permanente ou temporaire l'orpaillage. L'enquête sera réalisée dans le Fokontany de Betsiaka qui comprend les sites de Akodomo, Ambarian'Omby, Ambolamenabe, Ampizopiny, BRGM, BTM, Londre, Makorazy ; et Secren.

Les objectifs, les hypothèses ainsi que les indicateurs sont définis comme suit :

Objectifs de l'enquête	<ul style="list-style-type: none"> - Déterminer si les orpailleurs sont formels ; - Déterminer le type de gisement exploité et la méthode d'exploitation utilisés ; - Déterminer les méthodes de traitement de minerai et si les orpailleurs utilisent du mercure dans l'extraction de l'or ; - Déterminer si des maladies ont été relevées et si elles ont une relation avec l'utilisation de mercure ; - Déterminer l'impact de l'orpaillage sur la dégradation physique de l'environnement et la déforestation ; - Déterminer l'impact de l'orpaillage sur le revenu ; - Déterminer si les exploitants ont reçu une formation sur leur activité et sur la protection de l'environnement.
Hypothèses	<p>H1 : L'exploitation est informelle ;</p> <p>H2 : Les orpailleurs exploitent les rejets des amalgames issus des exploitations des Chinois dans la commune ;</p> <p>H3 : L'environnement physique se dégrade et la déforestation est observée ;</p> <p>H4 : Des problèmes de santé sont liés à l'utilisation de mercure ;</p>

	<p>H5 : L'exploitation artisanale de l'or impacte positivement sur le revenu des exploitants et de la commune ;</p> <p>H6 : Il manque de sensibilisation et de formation des orpailleurs sur leur activité et la protection de l'environnement.</p>
Indicateurs	<ul style="list-style-type: none"> - Nombre d'orpailleurs formels VS nombre d'orpailleurs total dans le Fokontany de Betsiaka - Quantité de rejets d'amalgame utilisé par les orpailleurs - Nombre d'exploitants en forêt et nombre d'exploitants qui réhabilitent le site après exploitation - Existence de maladies liées à l'utilisation de mercure - Revenu généré et production des opérateurs - Nombre d'orpailleurs sensibilisés.

Tableau 2 Objectifs, Hypothèses et Indicateurs pour l'enquête auprès des orpailleurs

Les coordonnées des sites d'exploitation ont été relevés à l'aide d'un GPS. L'analyse et le traitement des données et des coordonnées collectées sont fait sur Excel.

3. Traitement des images satellites

Le traitement des images satellites acquises et la cartographie se font à partir du logiciel QGIS 3.16 et QGIS avec GRASS 7.8.4. Il se fait en plusieurs étapes :

3.1. Prétraitement

Les prétraitements ont pour but de préparer les images avant la réalisation des traitements thématiques qui consistent en la classification supervisée et l'analyse diachronique. Ils se font par le biais de l'outil SCP (Semi-Automatic Classification Plugin) de QGIS et sont les suivantes (DENIS, 2021) :

- Correction atmosphérique DOS1 ou conversion de radiance vers réflectance
- Création d'un jeu de bandes
- Découpage spatial de l'image sur la zone d'intérêt
- Création de masque de nuage multi-dates

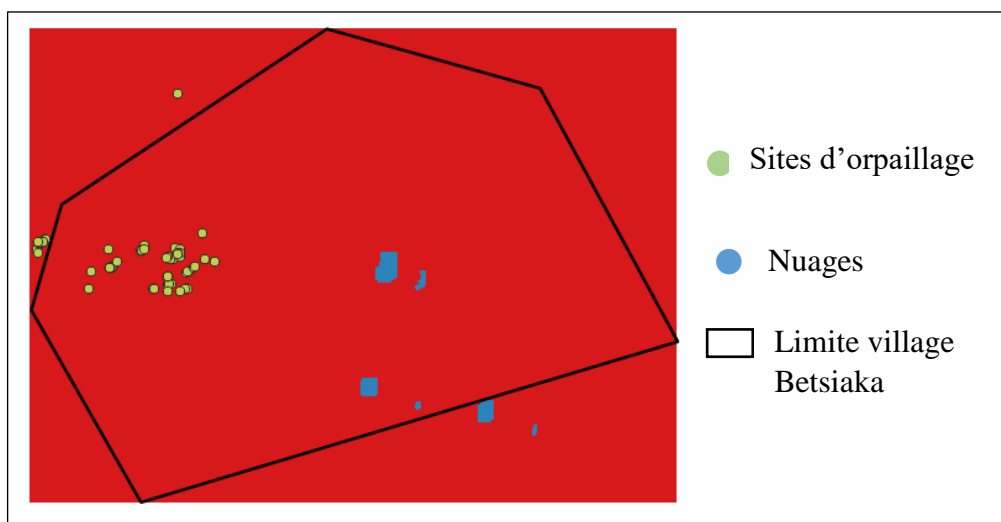


Figure 14 Masque de nuages multi-dates pour les images satellites

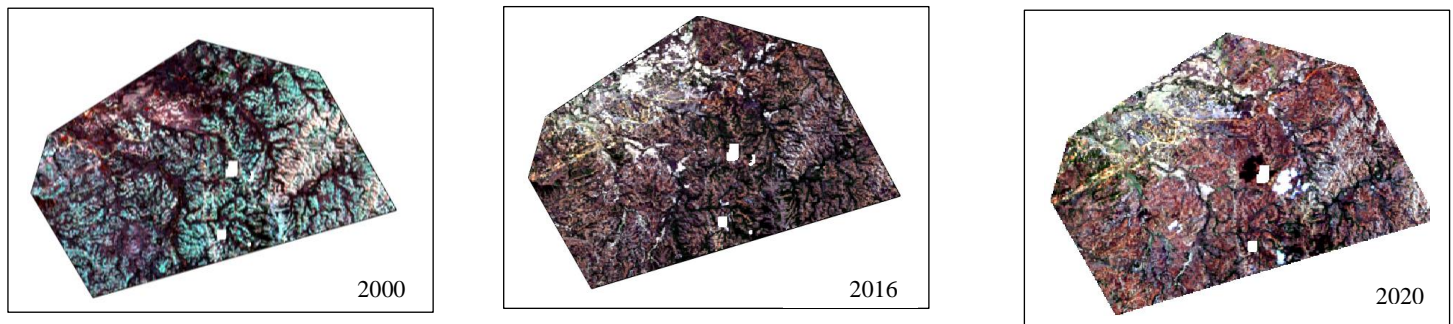


Figure 15 Images Landsat avec masque somme

3.2. Traitement des images

Le traitement des images consiste à l'observation de celles-ci et l'identification des classes d'occupation du sol au cours duquel on fait la distinction entre les classes objectifs ou macro-classes et les sous-classes ou classes spectrales.

Les macro-classes regroupent de nombreuses sous-classes spectrales qui ont des signatures spectrales distinctes. Ces macro-classes seront par la suite validées par une matrice de confusion et le changement observé sera étudié dans la matrice de transition après une analyse diachronique pendant laquelle les classes d'occupation du sol peuvent changer (DENIS, 2021).

La visualisation des images en 2D permet également d'améliorer l'analyse visuelle et établir les relations entre les couleurs apparaissant sur l'image et les classes d'occupation du sol ainsi que de distinguer certaines classes spectrales par les informations supplémentaires qu'apportent les seules bandes visibles.

Enfin, une amélioration des contrastes permet de rendre certains éléments plus clairs en attribuant plusieurs palettes de couleurs à l'image. Certains traitements supplémentaires sont aussi nécessaires pour réaliser l'analyse diachronique de deux images satellites comme les masques de nuages, la construction d'une image désennuagée et la reclassification conditionnelle (DENIS, 2021).

3.3. Post-traitement

Le post-traitement consiste à améliorer le résultat de la classification et le rendu visuel et ainsi de rectifier certaines erreurs. Pour ce faire, plusieurs opérations sont possibles (DENIS, 2021) :

- Changer les couleurs de certaines classes
- Fusionner différentes classes
- Editer un raster
- Eroder ou dilater les frontières de groupes de pixels d'une classe

4. Modélisation

La modélisation consiste à étudier l'évolution de la dégradation de l'environnement par rapport aux activités anthropiques de la commune de Betsiaka à l'horizon 2030. Ceci implique de prévoir les impacts de ces activités, notamment de l'exploitation artisanale de l'or et donc l'évolution spatiale de l'occupation du sol pour pouvoir aider à la prise de décision quant aux mesures qui devront être prises.

Le but est alors de prédire le changement d'occupation et d'utilisation du sol en utilisant les états d'occupation du passé (2000 et 2016) et de calibrer avec l'occupation des terres actuelle (2020). On a aussi utilisé les variables explicatives tels que les altitudes, la proximité aux routes, la couverture végétale et le modèle numérique de terrain qui reflète la topographie de la région.

Le processus pour la modélisation suit les étapes suivantes :

- L'évaluation des corrélations entre les différentes variables explicatives
- Le calcul des matrices de transition entre la carte d'occupation du sol 2016 et 2020
- La modélisation du potentiel de transition qui sera d'abord appliquée pour la simulation de l'occupation du sol actuel (2020) pour avoir les paramètres comme l'erreur globale de validation, la précision globale et le kappa de validation et qui permet de choisir la méthode de modélisation comme la méthode du voisin le plus proche, le taux d'apprentissage ou utilisant les chaînes de couches cachées
- La simulation d'automates cellulaires qui va utiliser la méthode de modélisation choisie pour prédire le changement dans le futur
- La validation qui permet de vérifier, de valider et de comparer les résultats de la simulation en utilisant comme référence la carte d'occupation du sol en 2020 pour prédire la carte d'occupation du sol en 2030

Ainsi, trois scénarios ont été élaborés pour prédire l'évolution des occupations et utilisation de la terre pour aider à la prise de décision :

- **Scénario 1 : Extrapolation des tendances actuelles en 2030**

Dans ce scénario, l'hypothèse est qu'il n'y a pas de nouvelles politiques économiques ou environnementales, ainsi, les futures distributions d'utilisation des terres suivent les tendances observées dans le passé. Les données socio-économiques seront constantes dans le futur, ce qui rend le dynamique des changements d'affectation des terres similaires à celui de la période actuelle 2016-2020.

- **Scénario 2 : Protection et réhabilitation de l'environnement**

Dans ce scénario, le reste des couvertures végétales est protégé et le gouvernement encourage la foresterie et le respect de la législation sur la protection de l'environnement. Il subventionne ainsi les différents travaux de réhabilitation des sites d'orpaillage et l'émergence de la sylviculture. De ce fait, les probabilités de trouver plus de couverture végétale sont élevées.

- **Scénario 3 : Croissance socio-économique élevée**

Dans ce scénario, l'hypothèse est qu'on observe une croissance démographique élevée dans la région, ce qui augmente également la croissance économique par la recherche de plus de terres à cultiver et donc génère une pression anthropique accrue sur les ressources ligneuses et la couverture végétale. Toutefois, malgré son caractère pessimiste, ce scénario est le plus probable dans la commune où aucune politique de gestion durable des ressources naturelles n'est mise en place et que l'exploitation aurifère continue à prendre de l'ampleur par la découverte de nouveaux gisements, ce qui provoque une ruée souvent incontrôlable (AGBANOU, PAEGELow, TOKO IMOROU, & TENTE, 2018).

III. Résultats et discussions

1. Localisation des sites d'orpaillage

Les sites d'orpaillage étudiés se trouvent dans le village ou « Fokontany » de Betsiaka qui constitue aussi le chef-lieu de la commune rurale de Betsiaka dans la région de Diana.

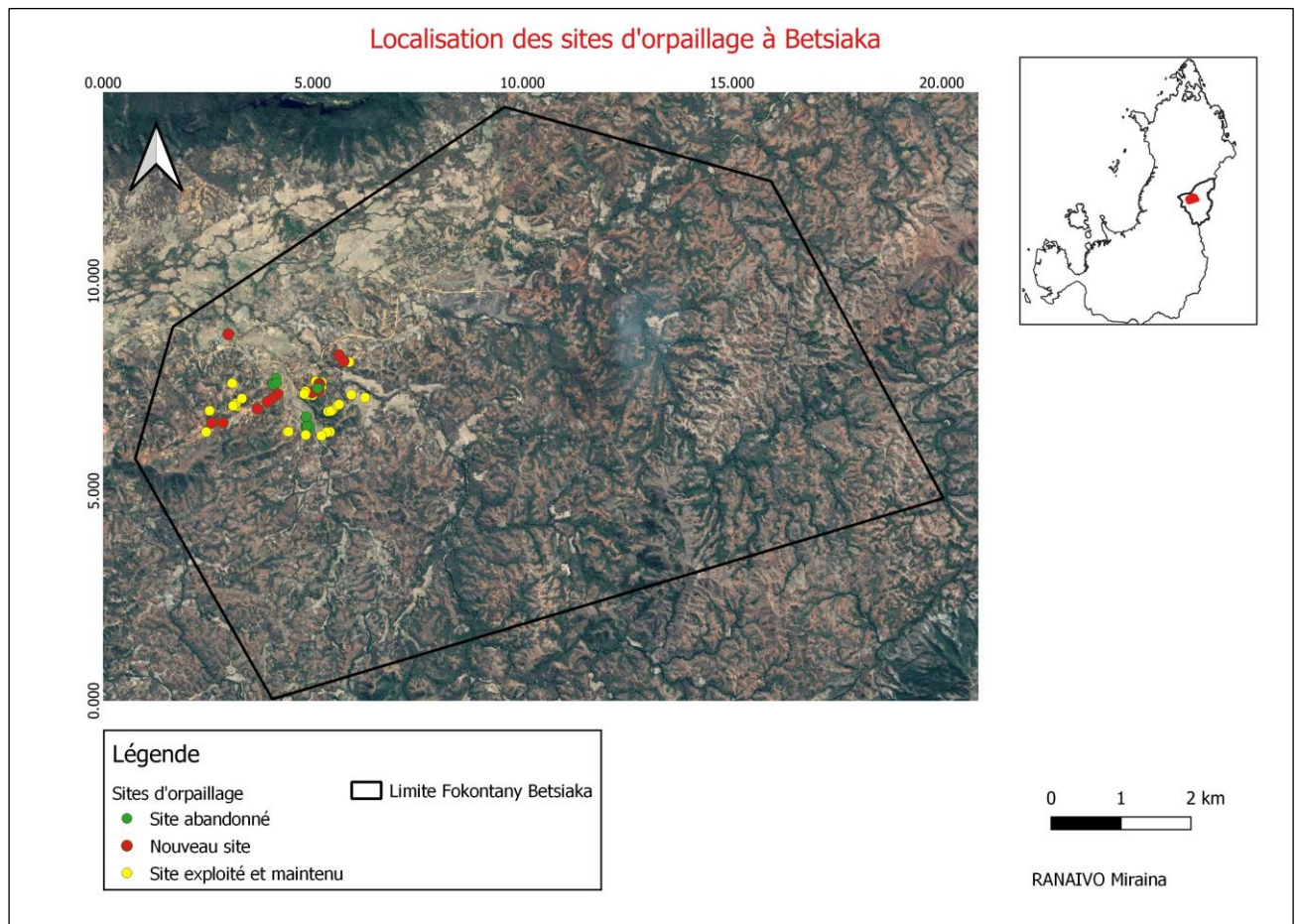


Figure 16 Localisation des sites d'orpaillage dans le Fokontany de Betsiaka

2. Analyse des données sur terrain

L'entretien avec les responsables communaux de Betsiaka dont le Maire et son Adjoint a confirmé une croissance démographique dans la commune. En effet, la population locale a augmenté de 40.691 en 2016 et à 43.000 en 2021.

Six villages aurifères sont dénombrés dans la commune dont : Betsiaka, Ankatoko, Andrafialava, Ankaramy, Ampahaka, Ambilo. Ces sites d'exploitations constituent 75% de la commune et les sites les plus exploités se trouvent dans les villages de Betsiaka et Ambilo. Sur le site de Betsiaka, 6.000 orpailleurs et creuseurs sont recensés en 2021 dont 2.000 sont formels, contre 2.033 orpailleurs et creuseurs en 2016 avec 101 formels (PAGE GIZ, 2016) (Agence National de la filère Or (ANOR), 2016). Alors que le Ministère des Mines évalue la quantité d'or produite dans la commune de Betsiaka à travers le circuit formel d'exportation, les responsables communaux estiment globalement cette production à 1 tonne par an.

2017		2018		2019		2020	
Betsiaka (kg)	Total (kg)	Betsiaka (kg)	Total (kg)	Betsiaka (kg)	Total (kg)	Betsiaka (kg)	Total (kg)
975,68	2 793,94	276,52	3 051,70	0,00	2 423,35	48,78	1 938,95

Tableau 3 Exportation dans la commune de Betsiaka VS exportation totale d'or à Madagascar

De ce tableau et d'après les affirmations des responsables de la commune, on peut conclure que la production totale de l'or à Betsiaka n'est pas traçable. En effet, la quantité totale de l'or produit n'est pas exportée mais n'est pas non plus répertoriée officiellement. Notons que l'exportation de l'or à Madagascar a été suspendue depuis octobre 2020.

La superficie de la commune est constituée de 70% de forêt. Il y a aussi la présence de l'aire protégée d'Andrafiarana-Andavakoera de 79.948 ha que la commune gère avec l'ONG Fanamby.

Les orpailleurs du site de Betsiaka sont également constitués d'hommes et de femmes de tous les tranches d'âge allant de 16 ans jusqu'à 70 ans avec une domination de la classe d'âge de 30 à 40 ans. Les hommes sont aussi les plus nombreux et travaillent surtout dans les galeries tandis que les femmes et les enfants travaillent particulièrement dans les couloirs d'orpaillage.

Les immigrants constituent 25% des exploitants surtout dans les galeries tandis que les autochtones (75%), préfèrent travailler dans les couloirs d'orpaillage.

89% des exploitants aurifères travaillent en permanence dans l'exploitation alors que 11% font de l'exploitation un travail saisonnier. En outre, 55% de ces exploitants ne pratiquent pas d'activités économiques autres que l'exploitation aurifère. Seuls 44% pratiquent l'agriculture, le charpentage ou la menuiserie et le commerce.

La production journalière varie de 1 dg à 10 dg d'un exploitant à un autre dans la zone. Ainsi la variation de la production mensuelle est de 5 dg à 500 dg avec un prix de l'or oscillant entre 50.000 Ariary et 100.000 Ariary le gramme (1 Euro = 4 506,01 Ariary le 26/07/2021). Le revenu mensuel moyen d'un exploitant est alors de 115.000 Ariary.

Le tableau 3 ci-dessous résume les informations sur l'exploitation de l'or dans le Fokontany de Betsiaka :

Activité d'exploitation aurifère	25% de la population
Nombre d'orpailleurs recensés	6000
Nombre d'orpailleurs formels	2000
Nombre de collecteurs recensés	108
Type de gisement	Alluvionnaire, éluvionnaire et primaire
Lieu d'exploitation	"Fatana" ou galerie, couloir d'orpaillage
Méthode d'exploitation	Galerie jusqu'à 100 m de profondeur: "kopaka lalan-tany", Couloir d'orpaillage: alodrano, hili-jia
Nombre de fatana	350
Nombre de zone d'orpaillage	8
Nombre moyen d'ouvriers par fatana	10
Production moyenne par orpailleur	4 à 7 décigramme par jour
Production des collecteurs	2 à 6 grammes par jour
Production des sponsors	3 à 10 grammes par jour
Production des propriétaires	2 à 5 grammes par jours
Prix de l'or sur site	50.000 à 100.000 Ariary par gramme
Utilisation de mercure sur le site	NON

Tableau 4 Informations pratiques sur l'exploitation aurifère sur le site de Betsiaka

Sur le site de Betsiaka, les orpailleurs n'utilisent pas du mercure pour extraire l'or et ne sont pas informés des conséquences néfastes de ce produit sur leur santé. Cependant, les exploitants Chinois qui travaillaient dans les autres villages avant la fermeture de leur site par le gouvernement malgache en 2019, utilisaient du mercure, qui a pollué les cours d'eau de toute la région. Ainsi, le risque de contamination de la population sur notre zone d'étude est toujours élevé. L'analyse des eaux de surface et des eaux souterraines nous auraient donné plus de précision sur cette contamination. Cependant, avec le temps limité et l'insuffisance des moyens sur place, cette analyse n'a pas pu être faite. Toutefois, l'enquête auprès des orpailleurs sur les éventuelles maladies causées par l'utilisation du mercure nous a permis de constater qu'aucun orpailleur ne ressent les symptômes probables liés à ces maladies ou par manque d'informations et de connaissances à propos. Néanmoins, les centres de santé dans la région ont relevé certains cas de maladies qui sont probablement liés au mercure.

En ce qui concerne les impacts de l'exploitation aurifères sur l'environnement, 55% des exploitants sont conscients de ces impacts comme : l'ensablement des rizières, des cours d'eau, l'érosion du sol, et la pollution de l'eau. Toutefois, 24% de ces exploitants exploitent toujours dans les forêts. Seulement, 28% des creuseurs réhabilitent leur site après l'abandon par une culture agricole mais la majorité par le remblaiement des terres. Les 72% restants ne pratiquent pas de réhabilitation par manque d'information et de sensibilisation, ou en vue d'une exploitation ultérieure du site.

Les images suivantes représentent l'exploitation artisanale aurifère dans le Fokontany de Betsiaka sur les différents sites :

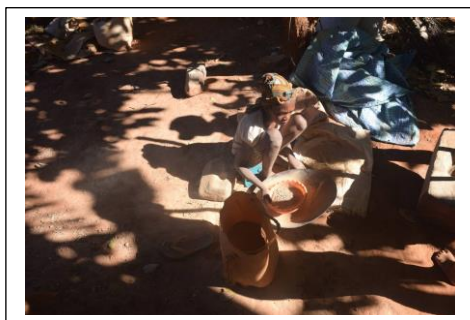


Figure 17 Exploitation artisanale de l'or à Betsiaka

3. Interprétation des images satellites

3.1. Les différentes classes d'occupation du sol

Plusieurs classes d'affectation du sol dans la zone d'étude sont observées. Elles sont réparties en sept (7) macro-classes correspondant à :

- La couverture végétale qui est formée par la forêt, plus précisément les vestiges forestiers et la savane arborée
- Les sols nus naturels et dégradés correspondant aux activités d'orpaillage ou aux sols érodés par les facteurs naturels
- La surface agricole avec la culture vivrière
- La surface bâtie avec les routes et les habitations
- Les brûlis avec les feux de brousse et/ou les cultures sur-brûlis
- Les ressources en eau qui correspondent aux rivières mais qui sont difficiles à discerner à cause des similitudes avec la végétation car les cours d'eau sont d'une dimension réduite et souvent entourés par la végétation de la ripisylve.



Légendes :

1 : habitations

3 : ressources en eau

5 : culture vivrière

7 : brûlis

2 : routes

4 : vestige forestier

6 : sols nus

8 : savane

Figure 18 Exemples de classes d'occupation du sol dans un secteur de la zone d'étude

3.2. Classification des occupations du sol

La classification supervisée des images Landsat 5 de l'année 2000 et des Landsat 8 des années 2016 et 2020 ont permis de constater les variations des occupations du sol pendant les périodes 2000-2016 et 2016-2020.

3.2.1. Changement de l'occupation du sol de 2000 à 2016

L'exploitation aurifère a commencé pendant la colonisation à Betsiaka, toutefois après l'indépendance de Madagascar et jusqu'à l'année 2000, l'orpaillage n'occupait plus une grande place dans la zone. Néanmoins, cette activité a considérablement repris de l'ampleur à partir de 2016 suite à la découverte d'un gisement qui a été à l'origine de la ruée dans la localité. Il serait donc intéressant d'étudier l'évolution du paysage pendant cette période. L'analyse et la classification des occupations du sol des deux images satellites LANDSAT 5 de l'année 2000 et LANDSAT 8 de 2016 ont donné les résultats suivants :

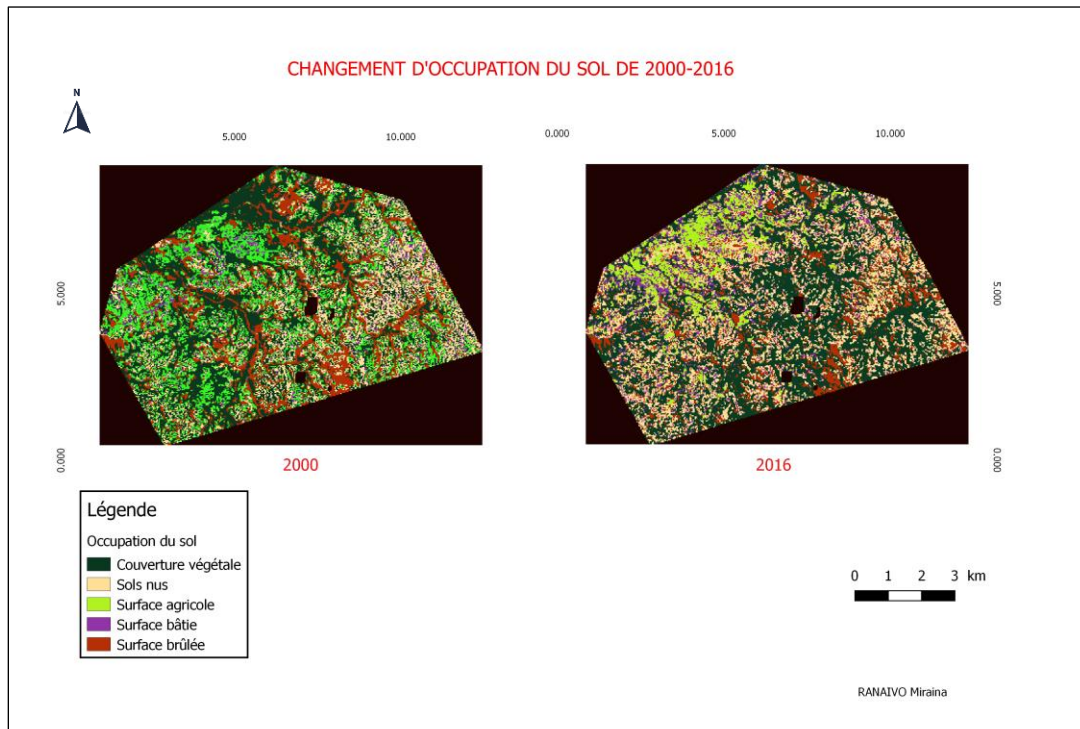


Figure 19 Évolution du paysage de la période 2000-2016

3.2.2. Changement de l'occupation du sol de 2016-2020

Pour une analyse plus approfondie, on étudiera également le changement d'occupation du sol de la période 2016 à 2020 avec les images LANDSAT 8 de 2016 et 2020. Ainsi, on obtient le résultat suivant :

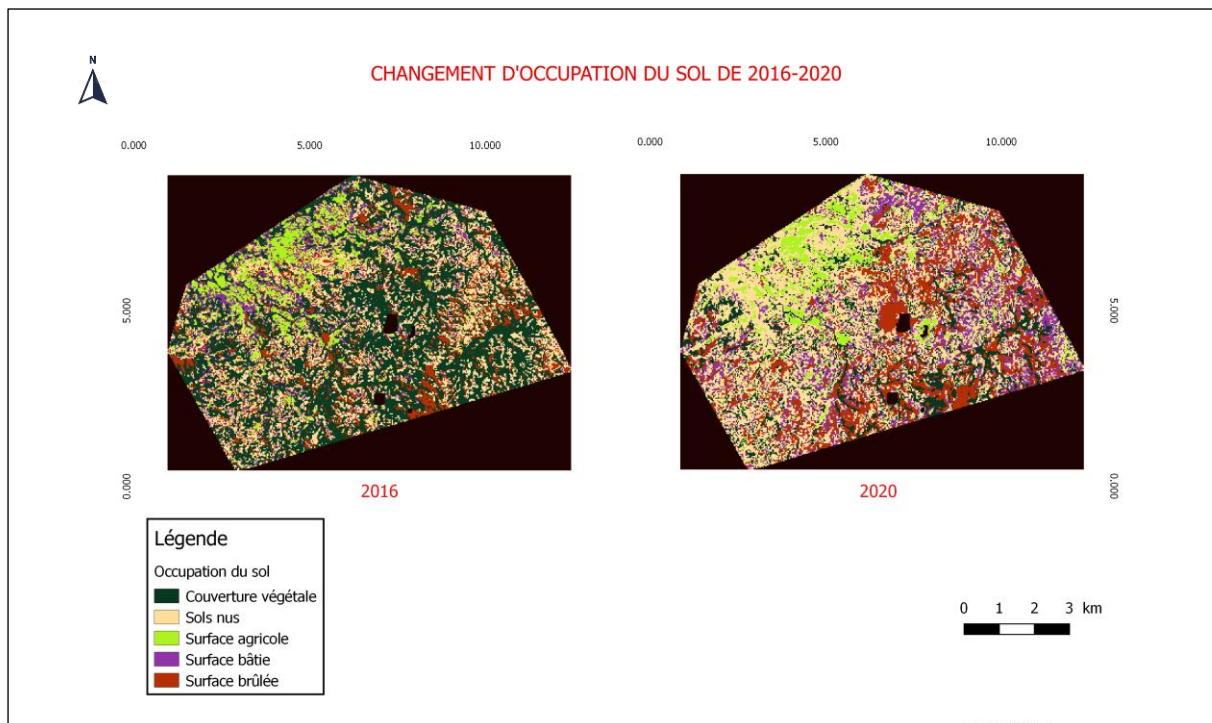


Figure 20 Évolution du paysage de la période 2016-2020

3.2.3. Interprétation et analyse diachronique

L'analyse diachronique permet de comparer les différentes images à des dates différentes pour déterminer les changements d'occupation du sol de la zone d'étude. Ceci permet d'observer l'existence et l'ampleur de la dégradation du couvert végétal, la déforestation ou encore l'extension de la zone bâtie. Ce changement peut être dû à des facteurs naturels comme l'érosion par le vent ou la pluie et à des facteurs anthropiques comme l'exploitation artisanale de l'or, l'agriculture, les feux de brousse, les cultures sur-brûlés et l'extension des zones bâties. La détection de l'ampleur de ces changements permet d'évaluer l'évolution de la dégradation physique de l'environnement. Cette analyse permet alors d'estimer l'évolution et la vitesse de changement de l'occupation du sol dans la zone d'étude.

La combinaison des trois images nous permet d'observer l'évolution du paysage durant la période 2000 à 2020.

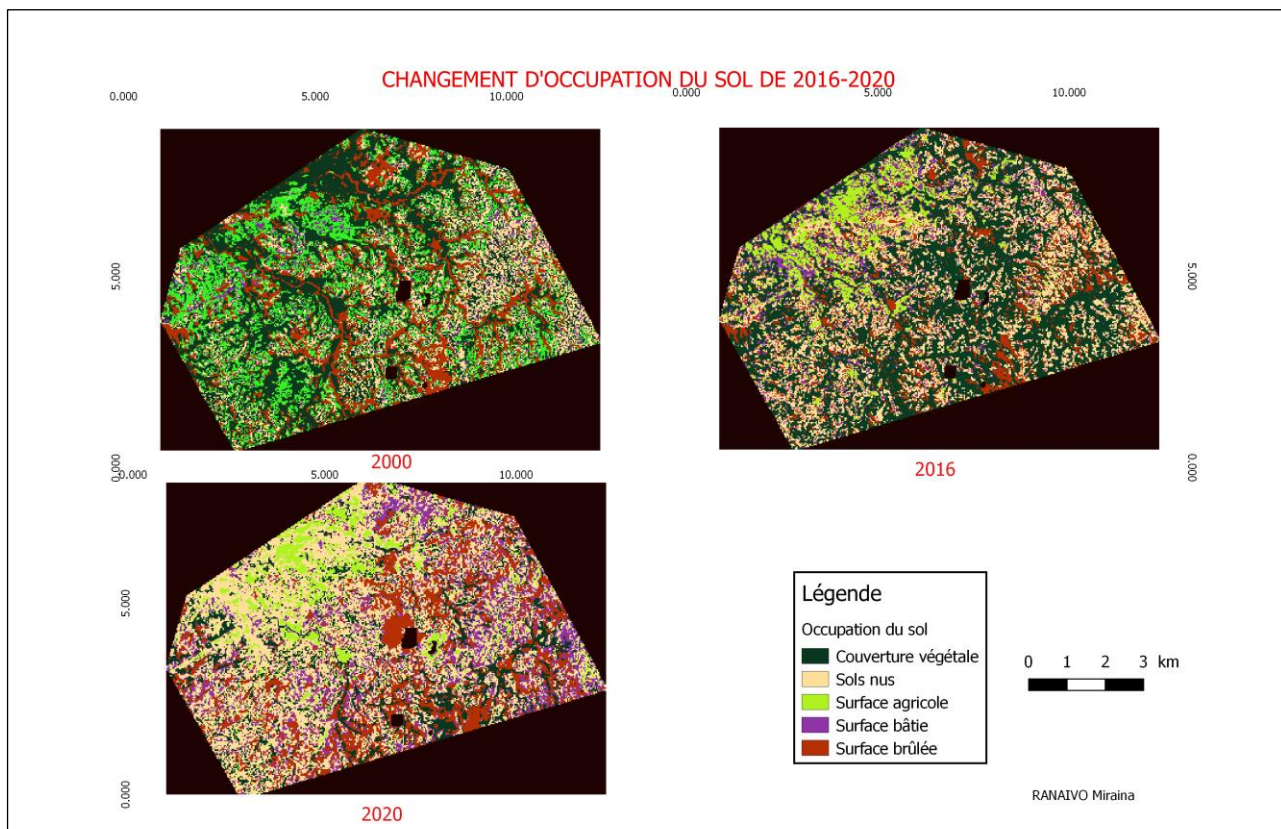


Figure 21 Évolution du paysage de la période 2000-2020

Les matrices de transition entre les deux périodes 2000-2016 et 2016-2020 ont donné les résultats suivants :

Classification 2016 (aires en m2)						
V_Référence 2000	Couverture végétale	Sols nus	Surface agricole	Surface bâtie	Surface brûlée	Total
Couverture végétale	10 323 000.00	5 229 900.00	3 267 900.00	2 349 000.00	2 337 300.00	23 507 100.00
Sols nus	2 904 300.00	4 316 400.00	262 800.00	790 200.00	1 583 100.00	9 856 800.00
Surface agricole	5 914 800.00	3 235 500.00	1 352 700.00	1 207 800.00	1 250 100.00	12 960 900.00
Surface bâtie	713 700.00	1 043 100.00	300 600.00	319 500.00	369 000.00	2 745 900.00
Surface brûlée	7 620 300.00	705 600.00	486 900.00	563 400.00	2 058 300.00	11 434 500.00
Total	27 476 100.00	14 530 500.00	5 670 900.00	5 229 900.00	7 597 800.00	97 459 200.00

Tableau 5 Matrice de transition de 2000-2016

Classification 2020 (aires en m2)						
V_Référence2016	Couverture végétale	Sols nus	Surface agricole	Surface bâtie	Surface brûlée	Total
Couverture végétale	6 003 900.00	9 098 100.00	351 000.00	4 312 800.00	7 710 300.00	27 476 100.00
Sols nus	2 038 500.00	7 555 500.00	1 001 700.00	2 370 600.00	1 564 200.00	14 530 500.00
Surface agricole	443 700.00	2 659 500.00	2 165 400.00	207 000.00	195 300.00	5 670 900.00
Surface bâtie	735 300.00	2 923 200.00	697 500.00	538 200.00	335 700.00	5 229 900.00
Surface brûlée	1 504 800.00	2 815 200.00	324 900.00	1 374 300.00	1 578 600.00	7 597 800.00
Total	10 726 200.00	25 051 500.00	4 540 500.00	8 802 900.00	11 384 100.00	97 459 200.00

Tableau 6 Matrice de transition de 2016-2020

Avec ces matrices, nous pouvons calculer les gains, les pertes et l'évolution de chaque classe d'occupation du sol avec les formules suivantes:

$$\text{Gain : } G_j = \frac{[(\sum_{i=1}^j S_{ij}) - S_{jj}] \times 100}{\sum_{i=1}^j S_{ij}}$$

$$\text{Perte : } L_j = \frac{[(\sum_{j=1}^i S_{ij}) - S_{ii}] \times 100}{\sum_{j=1}^i S_{ij}}$$

$$\text{Evolution : } E_{(i,k)} = \frac{S_k - S_i}{S_i} \times 100$$

$$\text{Vitesse d'évolution : } V_{(i,k)} = \frac{S_k - S_i}{t_2 - t_1}$$

S_{ii}/S_{jj} : superficie stable d'une catégorie d'occupation i/j entre deux dates

S_{ij}/S_{ji} : superficie d'une catégorie d'occupation i/j transformée en j/i entre deux dates

S_i/S_k : superficie d'une catégorie d'occupation des terres de l'année i/k avec $k > i$

$E_{(i,k)}, V_{(i,k)} = 0$, stabilité de cette catégorie d'occupation des terres

$E_{(i,k)}, V_{(i,k)} < 0$, régression de cette catégorie d'occupation des terres

$E_{(i,k)}, V_{(i,k)} > 0$, extension ou évolution de cette catégorie d'occupation des terres

2000-2016	Gain %	Perte %	Taux d'évolution %	Vitesse d'évolution (ha/an)
Couverture végétale	39.82	21.70	16.88	24.81
Sols nus	57.74	22.09	47.42	29.21
Surface agricole	72.03	88.35	-56.25	-45.56
Surface bâtie	93.49	86.83	90.46	15.53
Surface brûlée	62.84	78.05	-33.55	-23.98

Tableau 7 Évolution des classes d'occupation du sol de 2000-2016

2016--2020	Gain %	Perte %	Taux d'évolution %	Vitesse d'évolution (ha/an)
Couverture végétale	-27.14	72.04	-60.96	-418.75
Sols nus	56.82	-8.32	72.41	263.03
Surface agricole	8.83	38.23	-19.93	-28.26
Surface bâtie	93.49	88.53	68.32	89.33
Surface brûlée	83.90	73.77	49.83	94.66

Tableau 8 Évolution des classes d'occupation du sol de 2016-2020

Entre 2000 et 2016, la couverture végétale a gagné 39,82% en terme de superficie équivalent à 472,23 ha et perdu 21,70% soit 2.147,22 ha de surface. Toutefois, elle a un taux d'évolution de

16,88%, qui correspond à une extension de cette classe. Nous observons ce résultat sur la carte où la perte est surtout marquée au Nord au profit de la surface agricole qui a gagné 72,03% de superficie soit 237,51ha. Le gain de surface de couverture végétale est constaté au Sud où une forêt secondaire s'est installée après le passage des feux qui ont beaucoup affecté cette partie de la région durant la période de 2000.

Nous constatons également une augmentation de 47,42% des sols nus qui englobent les sols nus naturels et les zones d'orpaillage. Cette augmentation est surtout marquée dans la partie Ouest de la zone où les sites d'orpaillage se trouvent et correspond à un gain de 57,74% soit 1.749,6 ha de terrain.

Nous remarquons aussi une extension de la surface bâtie due à la croissance démographique accrue dans la région, notamment avec l'arrivée des immigrants durant la ruée de l'exploitation de l'or, avec un taux d'évolution de 90,46% soit 93,49% de gain en surface, qui est équivalent à 826,47 ha.

Néanmoins, la superficie brûlée a diminué au cours de la période de 2000-2016 et a un taux de régression nette de 33,55% pour une perte de 78,05% équivalent à 601,92 ha de surface au profit de la couverture végétale surtout dans la partie Sud de la zone. Ceci s'explique par la mise en place d'une politique de protection environnementale et la lutte contre les feux de brousse dans la stratégie nationale du pays par le biais du Madagascar Action Plan (MAP) en 2007 et une sensibilisation massive effectuée par le Ministère de l'Environnement, de l'Ecologie, de la Mer et des Forêts (RASOANAIVO A. , 2015).

Par ailleurs, durant la période 2016-2020, la couverture végétale a subi une régression importante de 60,96% soit une perte de 72,04% de superficie, équivalent à 1.318,41 ha. Cette perte est observée un peu partout dans la zone et due principalement à l'augmentation des activités de feux de brousse et de culture sur-brûlis ou « tavy » avec un taux de 49,83% soit un gain de superficie de 83,90% équivalent à 553,95 ha après 2016.

La croissance démographique accrue de la région influence également sur les occupations du sol, notamment par l'extension des surfaces bâties. De 2016 à 2020, on constate que ce taux d'extension est de 68,32% ce qui se traduit par un gain d'aires de 93,49% soit 491,04 ha de surface bâtie.

Cependant, la zone agricole a diminué de 19,93% soit une perte de superficie de 38,23% équivalent à une perte de 1.160,82 ha. Ceci est due au fait que la population pratique plus le tavy ou la culture sur-brûlis.

Enfin, la catégorie des sols nus a aussi connu une extension de 72,41%. Cette classe a donc gagné 1.021,41 ha soit 56,82%. Ce gain est surtout noté dans la partie Nord et Nord-Ouest de la région où se trouvent les sites d'orpaillage. On peut dire que l'effet de l'érosion est plus marqué dans ces zones.

L'examen de la vitesse d'évolution des classes d'occupation du sol nous permet de remarquer que durant la période 2000-2016, la classe de sols nus augmente plus rapidement que les autres classes d'occupation du sol tandis que la classe de surface agricole régresse plus vite.

Par contre, pendant la période de 2016-2020, la classe de couverture végétale a une vitesse de régression plus importante et donc se change plus rapidement que les autres classes tandis que la classe de sols nus augmente plus vite.

Le graphe suivant résume l'évolution de chaque classe d'occupation du sol de 2000-2020.

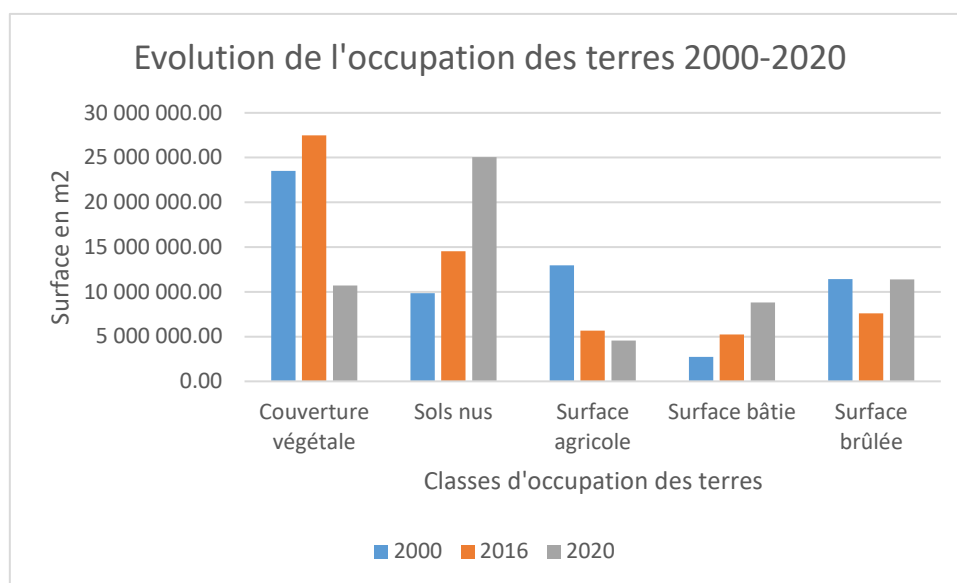


Figure 22 Evolution des classes d'occupation du sol de 2000-2020

CLASSES	Evolution 2000-2016 (%)	Evolution 2016-2020 (%)	Vitesse d'évolution 2000-2016 (ha/an)	Vitesse d'évolution 2016-2020 (ha/an)
Couverture végétale	16.88	-60.96	24.81	-418.75
Sols nus	47.42	72.41	29.21	263.03
Surface agricole	-56.25	-19.93	-45.56	-28.26
Surface bâtie	90.46	68.32	15.53	89.33
Surface brûlée	-33.55	49.83	-23.98	94.66

Tableau 9 Evolution des classes d'occupation du sol de 2000-2020

L'étude de ce graphe et du tableau sur l'évolution des classes du sol de 2000 à 2020 nous montre une augmentation de la couverture végétale de 2000 à 2016 tandis qu'entre 2016 à 2020, la superficie de cette classe a diminué considérablement avec une vitesse de régression importante de 418,75 ha/an. Cependant, la classe sols nus a augmenté avec des vitesses progressives de 29,21 ha/an pour la période de 2000-2016. Cette vitesse a considérablement augmenté sur la période de 2016-2020 et est égale à 263,03 ha/an. La surface bâtie a également connu une vitesse de progression importante de la période 2016-2020, qui est de 89,33 ha/an par rapport à la période de 2000-2016 qui est de 15,53 ha/an.

Tout ceci explique qu'entre la période 2000-2016, l'activité aurifère n'avait pas encore une grande place dans la commune mais a pris de l'ampleur sur la période de 2016-2020, ce qui a accéléré la déforestation dans la zone et a augmenté la surface des sols nus. L'attraction de cette activité par la découverte de gisement d'or dans la région a fait croître de façon significative la démographie et en parallèle les surfaces bâties.

La période 2016-2020 correspond donc à une période de ruée de l'exploitation de l'or dans le village de Betsiaka.

3.3. Principales sources de déforestation et de dégradation dans la zone d'étude

La déforestation est la conversion de la forêt en un autre usage avec une perte de couvert forestier à long terme. La forêt est alors convertie en une autre classe d'occupation du sol (FAO et PNUE, 2020). Ainsi les principales causes de la déforestation dans notre zone d'étude sont :

- L'exploitation artisanale et intensive de l'or
- L'agriculture

- La culture sur-brûlis
- L'extension urbaine

Par ailleurs, la dégradation concerne la réduction ou la perte de la productivité biologique ou écologique et de la complexité des écosystèmes donc la réduction des biens ou des services fournis par la forêt (FAO et PNUE, 2020).

Les principales sources de dégradation sont alors :

- L'exploitation des bois d'œuvre et des bois de feu qui n'occupe pas une grande place dans la localité
- Le pâturage de bétail

4. Détermination et évaluation des impacts de l'exploitation artisanale de l'or sur l'environnement

L'exploitation artisanale de l'or est source de perturbation de l'environnement et de nombreux problèmes de santé chez les orpailleurs et les personnes vivant aux alentours des sites. Toutefois, cette exploitation est également une source de revenu pour de nombreuses familles et contribue à l'amélioration des ressources financières de la commune. Ainsi, les données recueillies sur le terrain et les études bibliographiques nous permettront d'identifier ces impacts sur le milieu physique et biologique et les enjeux sur le plan socio-économique des orpailleurs et de la population locale.

4.1. Détermination des impacts sur le milieu physique

4.1.1. Impacts de l'orpaillage sur le paysage

La descente sur le terrain en juillet 2021 a permis de constater que le paysage sur les sites aurifères dans le village de Betsiaka est constitué de trous ou puits d'exploitation, de monticules de terres excavés, de bassins de lavage de différentes tailles, etc. Ceci traduit la forte dégradation du paysage due à l'exploitation aurifère de l'or. Les images suivantes représentent l'état actuel de ce paysage dans le Fokontany de Betsiaka.



Figure 23 Sites abandonnés



Figure 24 Sites actifs

L'exploitation artisanale de l'or entraîne de nombreux dégâts sur le paysage comme :

- La dégradation de l'esthétique du paysage par les trous ou puits d'exploitation non remblayés et l'apparitions de monticules et de tranchés
- La dénudation du sol par le défrichage des couvertures végétales
- L'humidification constante du sol par les bassins de lavage qui en sus environnés de boues.
- Transformation du profil topographique

4.1.2. Impacts de l'orpaillage sur le sol

Pour pouvoir exploiter, un défrichage des couvertures végétales est nécessaire, ce qui provoque une déforestation qui est incontournable sur les sites aurifères. Outre la disparition de certaines espèces végétales produite par la déforestation, cette dernière provoque aussi une érosion des sols. En effet, en enlevant le couvert végétal, le sol nu n'est plus protégé des eaux météoriques et du vent. Ainsi, les couches supérieures les plus fertiles sont les plus vulnérables au lessivage mobilisant ainsi les particules vers les fleuves par ruissellement. En plus de cette mobilisation des particules du sol, le rendant infertile, il y a également l'effet splash, qui est la projection de ces particules à cause des gouttes de pluie et qui dépend de la force de cohésion et de la taille des particules. Une croute de battance plus imperméable peut par la suite se former rendant difficile l'infiltration de l'eau dans le sol rendant la zone vulnérable à l'inondation. Toutefois, un sol recouvert d'une couverture végétale est moins soumise à l'impact direct de cet effet splash (LORIN, LALLEMAND, EL-SHAFFEY, & DARBOUX, 2018). Enfin, une accentuation des phénomènes de « Lavakisation » (formation de profondes excavations) est observée sur les sites d'exploitation.



Figure 25 Erosion et lavakisation des sols

De l'analyse diachronique des images satellites sur la zone d'étude, on a pu constater une régression considérable de la couverture végétale dans la zone et surtout et une extension progressive des sols nus qui peuvent représenter les sols érodés dans la région.

Enfin, cette pollution physique est accentuée par la pollution chimique engendrée par les différents déchets produits sur le site.

4.1.3. Impacts de l'orpaillage sur l'eau

Outre la pollution de l'eau par les sédiments lors du lavage de minerais changeant la couleur de l'eau en rouge et les particules mobilisés lors de l'érosion du sol qui sont des polluants physiques et chimiques de l'eau, le rendant plus turbide réduisant ainsi la pénétration de la lumière et affectant certaines espèces, la déviation des cours d'eau pour faciliter le lavage des minerais contribue aussi au tarissement (réduction du débit d'un cours d'eau) de ces derniers voire le vidage des nappes d'eau souterraines. La pollution chimique de l'eau provient essentiellement des particules de sédiments (argile, matières organiques, limon, etc.) lors du lavage des minerais et de l'érosion du sol. Ces particules sont des transporteurs de molécules souvent néfastes pour l'eau comme les pesticides, les produits chimiques utilisés lors de l'extraction de l'or comme le mercure pouvant provenir d'une autre zone où l'utilisation de ces produits se fait. (LORIN, LALLEMAND, EL-SHAFFEY, & DARBOUX, 2018)



Figure 28 Pollution par le lavage des minerais



Figure 27 Barrage pour dévier les cours d'eau



Figure 26 Tarissement de l'eau

Par ailleurs, la réduction de la couverture végétale diminue également la capacité de rétention d'eau du sol qui a un effet sur le débit des cours d'eau et la fréquence des inondations. En effet, le stockage de l'eau est plus élevé pour un sol avec une forêt naturelle. En l'absence de couvert végétal, le sol est alors rapidement saturé et l'écoulement en surface de l'eau est plus important surtout en saison de pluie.

En outre, l'utilisation des motopompes pour évacuer l'eau des nappes phréatiques dans les puits contribue à la réduction du niveau des nappes.

Enfin, l'infiltration des divers déchets des orpailleurs sur le site pollue les ressources en eau, notamment par l'abandon des piles usées dans les puits.

Bref, les impacts de l'orpaillage sur l'eau sont physiques tels que l'épuisement des ressources en eau par leur utilisation massive et la création des différents barrages pour dévier les cours d'eau détruisant ainsi le lit des rivières. Les impacts sont également chimiques comme la pollution des eaux de surfaces et souterraines par les divers particules et déchets.

4.1.4. Impacts de l'orpaillage sur l'air

Sur le site d'exploitation de l'or, la quantité de poussières est remarquable et entraîne une pollution importante de l'air. Les activités de traitement des minerais comme le concassage, le broyage et le tamisage en sont les sources. L'utilisation des motopompes pour l'évacuation de l'eau des nappes phréatiques dans les puits est également source d'une forte émission de fumées, de gaz (CO₂) et de bruits. En outre, les odeurs dues à la décomposition des ordures ménagères rejetées par les exploitants dans la nature sans aucune mesure d'assainissement sont

aussi source de cette pollution de l'air. De plus, les travailleurs sur les sites font leurs besoins dans la nature à cause du manque d'infrastructures sanitaires.



Figure 29 Evacuation de l'eau dans un puit par un moteur artisanal

4.2. Détermination des impacts de l'orpaillage sur le milieu biologique

4.2.1. Impacts sur la faune

La déforestation engendrée par les activités d'orpaillage contribue à la perte de nombreuses espèces fauniques par la destruction de leur habitat naturel. Les activités de braconnage sont plus importantes sur ces sites d'exploitation.

4.2.2. Impacts sur la flore

La régression de l'étendue de la couverture végétale est importante sur les sites d'orpaillage. De nombreuses espèces végétales peuvent disparaître à cause de cette déforestation accrue qui est l'un des impacts les plus évidents de l'exploitation de l'or. Les orpailleurs utilisent les bois pour les soutènements des puits ou pour la construction de leur habitation et comme bois de chauffe pour la cuisson. Ainsi, la savane est totalement déboisée.

4.3. Impacts de l'orpaillage sur la santé humaine

De par leurs conditions de vie et de travail précaires, les orpailleurs sont exposés à un certain nombre de maladies. En effet, la méthode d'exploitation utilisée par les orpailleurs présente des risques pour leur santé et pour celle de la population environnante. Ces impacts sont importants vu la vulnérabilité socio-économique et sanitaire de la population. Les principaux impacts sanitaires relevés sur les sites d'orpaillage sont la douleur mécanique, l'affection nerveuse, l'affection respiratoire due à l'inhalation et ingestion prolongée de poussières pendant l'exploitation et le traitement des minerais, la gastralgie et la diarrhée, l'algie dentaire, l'affection oculaire comme la conjonctivite, la dermatose, l'hypertension artérielle, etc. Les principaux motifs de consultation dans les centres de santé de base autour des sites sont les infections respiratoires aiguës, le paludisme et les diarrhées suivis par l'hypertension artérielle ; les maladies sexuellement transmissibles (MST), les caries dentaires, la pneumonie et les affections digestives. Par ailleurs, les maladies liées à l'intoxication au mercure sont aussi observées sur ces sites, et sont plus marquées dans les sites où les étrangers utilisent du mercure pour l'extraction de l'or polluant les rivières. Ainsi, la consommation des poissons par les orpailleurs et les populations locales, même dans des zones qui n'utilisent pas du mercure dans l'orpaillage mais utilisent les mêmes cours d'eau que le Chinois, engendre des maladies liées à l'exposition chronique au mercure comme l'éréthisme (excitabilité) ; l'irritabilité, l'insomnie ; les tremblements musculaires, les troubles rénaux, les effets gastro-intestinaux aigus, les troubles visuels, les troubles moteurs, les retards et troubles cognitifs et moteur chez les enfants (Ministère de l'Environnement, de l'Ecologie et des Forêts, ONU, 2018).

En outre, le manque d'infrastructure d'hygiène et d'assainissement ainsi que l'accès difficile à l'eau potable sur les sites d'orpaillage, augmente la proportion de diarrhée sur ces sites.

Enfin, les accidents tels que les glissements de terrain sur les sites d'orpaillage sont élevés, entraînant le décès et les blessures physiques graves.

Bref, les activités d'orpaillage sont source de risques sanitaires biomécaniques et physiques, psychologiques et neurologiques chez les orpailleurs et la population locale (Ministère de l'Environnement, de l'Ecologie et des Forêts, ONU, 2018).

4.4. Impact de l'orpaillage sur l'économie

Étant une source de revenu pour les exploitants, l'orpaillage contribue également à la création d'activités annexes autour des sites comme la restauration, les bars, le commerce, etc. Cependant, cette activité engendre aussi la dégradation des mœurs par la vente des produits prohibés tels que l'alcool, les drogues, et la prostitution des femmes et des jeunes filles sur les sites. De plus, l'exploitation artisanale de l'or occasionne des pertes de terres agricoles et la déforestation, ce qui impacte négativement sur l'économie locale. Toutefois, cette activité est aussi source de revenu pour la commune par l'exportation de l'or produit.

Le tableau suivant fait référence aux ristournes obtenues par la commune via l'exportation de l'or produit.

Année	Quantité exporté (kg)	Ristourne pour la commune (Ariary)	Ristourne pour la commune (Euro)	Ristourne pour la région (Ariary)	Ristourne pour la région (Euro)	Ristourne pour le province (Ariary)	Ristourne pour le province (Euro)
2017	975.68	678 604.95	149.86	339 302.48	74.93	113 100.83	24.98
2018	276.52	192 325.19	42.47	96 162.60	21.24	32 054.20	7.08
2019	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2020	48.78	33 927.47	7.49	16 963.73	3.75	5 654.58	1.25

Tableau 10 Ristournes obtenues par l'exportation de l'or produit de Betsiaka

4.5. Évaluation des impacts

L'évaluation des impacts engendrés par le projet permet de déterminer l'importance de ces derniers pour justifier l'application des mesures d'atténuation, de compensation, et de suivis. Cette évaluation repose sur la matrice d'impacts qui consiste à croiser les différentes phases d'activités de l'exploitation artisanale de l'or et les composants du milieu qui peuvent être touchés par ces activités dans le but d'identifier, de caractériser et d'évaluer les impacts de l'orpaillage sur les milieux physiques et humain.

Afin d'apprécier les impacts de l'orpaillage sur le site de Betsiaka, les différentes phases de l'exploitation artisanale de l'or seront associées aux dimensions humaines et environnementales.

Cette matrice prend la forme suivante :

Phases d'exploitation	Activités	Impacts	Composantes environnementales impactés			
			Eau	Air	Sol	Végétation
Creusement des puits	Défrichage et abattage des arbres	Dénudation du sol Régression de la couverture végétale Disparition de certaines espèces végétales Erosion du sol, perte de fertilité du sol Emission de CO2 et de particules en suspension dans l'air Pollution de l'eau par les particules du sol	x	x	X	x
	Stockage de déblai	Emission de gaz et de poussières Pollution du sol Pollution de l'eau par les déblais et déviation des ruissellements	x	x	X	
	Exhaure	Emission de gaz Réduction du niveau de la nappe Pollution des eaux souterraines	x	x		
Traitement des minerais	Concassage, broyage et tamisage	Emission de poussières		x		
	Lavage des minerais	Pollution des cours d'eau Tariement des eaux de surface Ensablement des rivières	x			

Tableau 11 Matrice des impacts directs des différentes phases de l'exploitation artisanale de l'or sur les composantes environnementales à Bestiaka

4.5.1. Caractérisation des impacts

L'évaluation des impacts de l'orpillage repose sur différents critères notamment la nature de l'impact, son intensité, sa portée, sa durée et sa réversibilité.

- Nature

Un impact peut être positif (P) s'il permet d'améliorer les conditions de vie de la société ou l'état de l'environnement et négatif (N) s'il occasionne une dégradation de l'environnement ou de la qualité de vie humaine. L'impact est considéré comme nul dans le cas où il n'apporte pas de changement ni à la société ni à l'environnement.

- Intensité

C'est le degré de changement ou de perturbation qu'un impact génère sur une composante donnée en fonction de la vulnérabilité de cette dernière. Elle peut être forte, moyenne ou faible (ABDOU AMADOU, 2019-2020)

- Une intensité forte correspond à de profonds changements de la composante étudiée, l'empêchant de fonctionner normalement. Elle peut aussi être constatée lorsque les normes sont dépassées.
- Une intensité moyenne correspond aux modifications visibles de la composante mais n'altèrent pas son fonctionnement normal.
- Une intensité est faible quand les changements générés par l'impact sont négligeables ou légers.

- Portée

Elle fait référence à l'étendue géographique de l'impact sur la composante. Elle peut être :

- Locale si l'impact est seulement ressenti sur son point d'origine, c'est-à-dire sur une partie limitée de la zone d'étude ou un groupe restreint de personne, qui est le site d'orpillage dans notre cas.
- Régionale si les répercussions se font sentir au-delà de la zone d'étude et affecte une surface plus étendue ou une plus grande proportion d'individus.
- Nationale si les répercussions se font sentir au niveau du pays (ABDOU AMADOU, 2019-2020)

- Durée

C'est la période pendant laquelle un impact se fait sentir. Elle peut être courte, moyenne ou long terme.

- Une durée est courte quand l'impact disparaît rapidement après sa génération.
- Une durée est moyenne quand les répercussions persistent un certain temps mais disparaît une fois le projet fini.
- Une durée est dite à long terme quand l'impact persiste pendant l'activité et même au-delà (ABDOU AMADOU, 2019-2020).

- Réversibilité

Elle caractérise la capacité de la composante à se remettre à son état initial après une perturbation engendrée par l'activité. L'impact est dit réversible dans le cas où la composante

est capable de reprendre son état initial et son fonctionnement normal après l'activité et irréversible dans le cas contraire (ABDOU AMADOU, 2019-2020).

Le tableau suivant permet de caractériser l'intensité absolue d'un impact en associant les trois critères qui sont ; l'intensité, la portée et la durée.

Intensité	Portée	Durée	Intensité absolue
Haute (H)	Nationale	Long terme	Majeure
		Moyen terme	Majeure
		Court terme	Majeure
	Régionale	Long terme	Majeure
		Moyen terme	Moyenne
		Court terme	Moyenne
	Locale	Long terme	Majeure
		Moyen terme	Moyenne
		Court terme	Mineure
Moyenne (M)	Nationale	Long terme	Majeure
		Moyen terme	Moyenne
		Court terme	Moyenne
	Régionale	Long terme	Moyenne
		Moyen terme	Moyenne
		Court terme	Moyenne
	Locale	Long terme	Moyenne
		Moyen terme	Moyenne
		Court terme	Mineure
Faible (F)	Nationale	Long terme	Majeure
		Moyen terme	Moyenne
		Court terme	Mineure
	Régionale	Long terme	Moyenne
		Moyen terme	Moyenne
		Court terme	Mineure
	Locale	Long terme	Mineure
		Moyen terme	Mineure
		Court terme	Mineure

Tableau 12 Critère d'évaluation des impacts d'après Fecteau (ABDOU AMADOU, 2019-2020)

- L'impact majeur correspond à de fortes répercussions sur le milieu qui peuvent être difficilement atténuées. Le changement observé peut affecter la nature d'un élément et son fonctionnement et peut être un danger pour les individus et l'environnement.
- L'impact moyen fait référence à des répercussions qui peuvent être atténuées avec des mesures spécifiques. Les changements de la nature d'un élément et de son fonctionnement sont partiels.
- L'impact mineur correspond à des effets réduits ou négligeables sur le milieu avec de légères modifications de la nature et du fonctionnement de la composante étudiée. Les mesures d'atténuation ne sont donc pas forcément nécessaires.

Dans la suite du travail, on prendra les notations suivantes :

Nature	Positif	P
	Négatif	N
Intensité	Haute	H
	Moyenne	M
	Faible	F
Portée	Nationale	Na
	Régionale	R
	Locale	L
Durée	Long terme	Lt
	Moyen terme	Mt
	Court terme	Ct
Intensité absolue	Majeure	+++
	Moyenne	++
	Mineure	+
Réversibilité	Irréversible	Ir
	Réversible	Rv

Tableau 13 Notation pour les critères d'évaluation

Ainsi, la matrice d'évaluation des impacts se fait comme suit :

Milieu	Composante l'environnement	Phases/enjeux de l'exploitation	Activités	Principaux impacts	Evaluation						
					Nature	Intensité	Portée	Durée	Intensité absolue	Réversibilité	
PHYSIQUE	EAUX	Creusement des puits	Défrichement et abatage	Pollution de l'eau par les particules provenant de l'érosion du sol	N	H	Na	Lt	+++	Ir	
			Stockage des déblais	Pollution de l'eau par les déblais et déviation des ruissellements	N	M	L	Lt	++	Ir	
				Ensablement des cours d'eau par les déblais	N	H	L	Mt	++	Ir	
			Exhaure des puits	Réduction des ressources en eau souterraine	N	M	R	Ct	++	Ré	
			Ouverture de puits	Disponibilité des ressources en eaux	P	M	L	Ct	+	Ré	
		Traitements des minerais	Lavage des minerais	Pollution des cours d'eau par les sédiments et turbidité des eaux	N	M	Na	Lt	+++	Ir	
				Tarissement des eaux de surface	N	M	R	Mt	++	Ré	
				Ensablement des rivières par les sédiments	N	H	L	Mt	++	Ir	
		SOL	Creusement des puits	Défrichement et abatage	Dénudation et érosion du sol	N	M	L	Lt	++	Ré
					Perte de fertilité du sol	N	M	R	Lt	++	Ré
	Accentuation du phénomène de Lavakisation				N	M	R	Lt	++	Ir	
	Stockage des déblais			Pollution du sol par l'infiltration des particules	N	M	R	Mt	++	Ré	
			Dégradation physique du sol	N	M	L	Lt	++	Ir		

				Transformation du profil topographique	N	H	L	Lt	+++	Ir	
			Ouverture de puits	Présence des trous dans le sol	N	H	L	Mt	++	Ré	
	AIR	Creusement des puits	Défrichement et abatage	Emission de CO2 lors de l'abattage des arbres	N	M	Na	Lt	+++	Ir	
			Exhaure des puits	Emission de gaz par les motopompes	N	M	L	Ct	+	Ré	
			Stockage des déblais	Emission de gaz et de poussières	N	M	L	Ct	+	Ré	
		Traitements des minerais	Broyage, concassage et tamisage	Emission de poussières	N	H	L	Ct	+	Ré	
	VEGETATION	Creusement des puits	Défrichement et abatage	Réduction de la couverture végétale	N	H	R	Lt	+++	Ré	
				Disparition de certaines espèces végétales	N	M	Na	Lt	+++	Ir	
				Déforestation et dégradation de la végétation	N	H	Na	Lt	+++	Ré	
			Ouverture de puits	Abattage des arbres pour les soutènements et les constructions	N	H	R	Lt	+++	Ré	
			Stockage des déblais	Dégradation de la végétation	N	M	L	Lt	++	Ré	
	HUMAIN	SANTE	Creusement des puits	Ouverture de puits	Risque d'accident pouvant être mortel et blessure	N	H	L	Lt	+++	Ir
					Risques d'asphyxie liée au manque d'oxygène dans l'air dans les puits	N	M	L	Ct	+	Ré
			Traitements des minerais	Broyage, concassage et tamisage	Risque de maladies respiratoires et oculaires	N	H	L	Lt	+++	Ir
			Activités annexes à l'exploitation	Utilisation de l'eau de surface pour le ménage	Risque de maladies gastriques, hydriques et dermatologiques	N	H	R	Lt	+++	Ré
Cohabitation sur le site				Risque de MST, VIH, paludisme	N	M	R	Lt	++	Ir	
Consommation de poissons des rivières				Risque d'intoxication au mercure	N	H	Na	Lt	+++	Ir	

EDUCATION	Traitements des minerais	Travail des enfants dans le traitement des minerais	Diminution du nombre d'enfants éduqués	N	H	Na	Lt	+++	Ré
ECONOMIE	Disponibilité d'emplois	Amélioration de revenus	Revenus supplémentaires des ménages	P	M	R	Mt	++	Ré
		Création de nouveaux emplois annexes	Création de nouvelles activités génératrices de revenus	P	M	R	Mt	++	Ré
	Création de nouveaux commerces et marchés dans le village		P	H	R	Lt	+++	Ré	
	Développement de la zone	Construction d'infrastructures sociales, culturelles	Amélioration du cadre de vie de la population locale	P	F	R	Lt	++	Ir
	Ouverture des puits	Perte de terres agricoles et de pâturage	Influence négative sur l'économie locale	N	H	R	Lt	+++	Ré
SOCIETE	Activités annexes à l'exploitation	Création de nouveaux emplois annexes	Dégradation des mœurs	N	M	R	Mt	++	Ir
	Insécurité sur le site	Attaques des bandits	Augmentation des attaques des « Dahalo » (bandits à mains armées)	N	H	R	Lt	+++	Ré
	Exploitation de l'or	Conflits avec des orpailleurs avec les agriculteurs	Augmentation des conflits sur les terres dans les sites par l'accaparement des terres par les exploitants	N	M	L	Ct	+	Ré

Tableau 14 Matrice d'évaluation des impacts de l'exploitation artisanale de l'or à Betsiaka

Cette matrice d'évaluation nous permet d'identifier les composantes les plus sensibles aux impacts des différentes activités de l'exploitation artisanale de l'or dans le Fokontany de Betsiaka. De ce tableau, on peut constater que l'eau et le sol sont les plus sensibles aux impacts tandis que la végétation et l'air, malgré qu'ils soient également très sensibles aux activités, des mesures d'atténuation peuvent être mises en place pour réduire les répercussions. Toutefois, malgré les différents impacts négatifs de l'orpaillage sur le site, cette activité permet aussi d'améliorer l'économie de la population et de la région. L'orpaillage a donc aussi des points positifs outre ses différents effets négatifs.

Ainsi, des mesures d'atténuation et de compensation des impacts négatifs peuvent être envisagées. Les répercussions positives peuvent, par ailleurs, être renforcés.

5. Modélisation de l'occupation des terres en 2030

En faisant varier les conditions aux limites comme le maintien de la tendance actuelle des activités anthropiques générant les dégradations et les déforestations dans la zone, la mise en place des mesures de réhabilitation et de protection de la couverture végétale ainsi que la croissance démographique et économique élevée, on obtient les trois scénarios suivants :

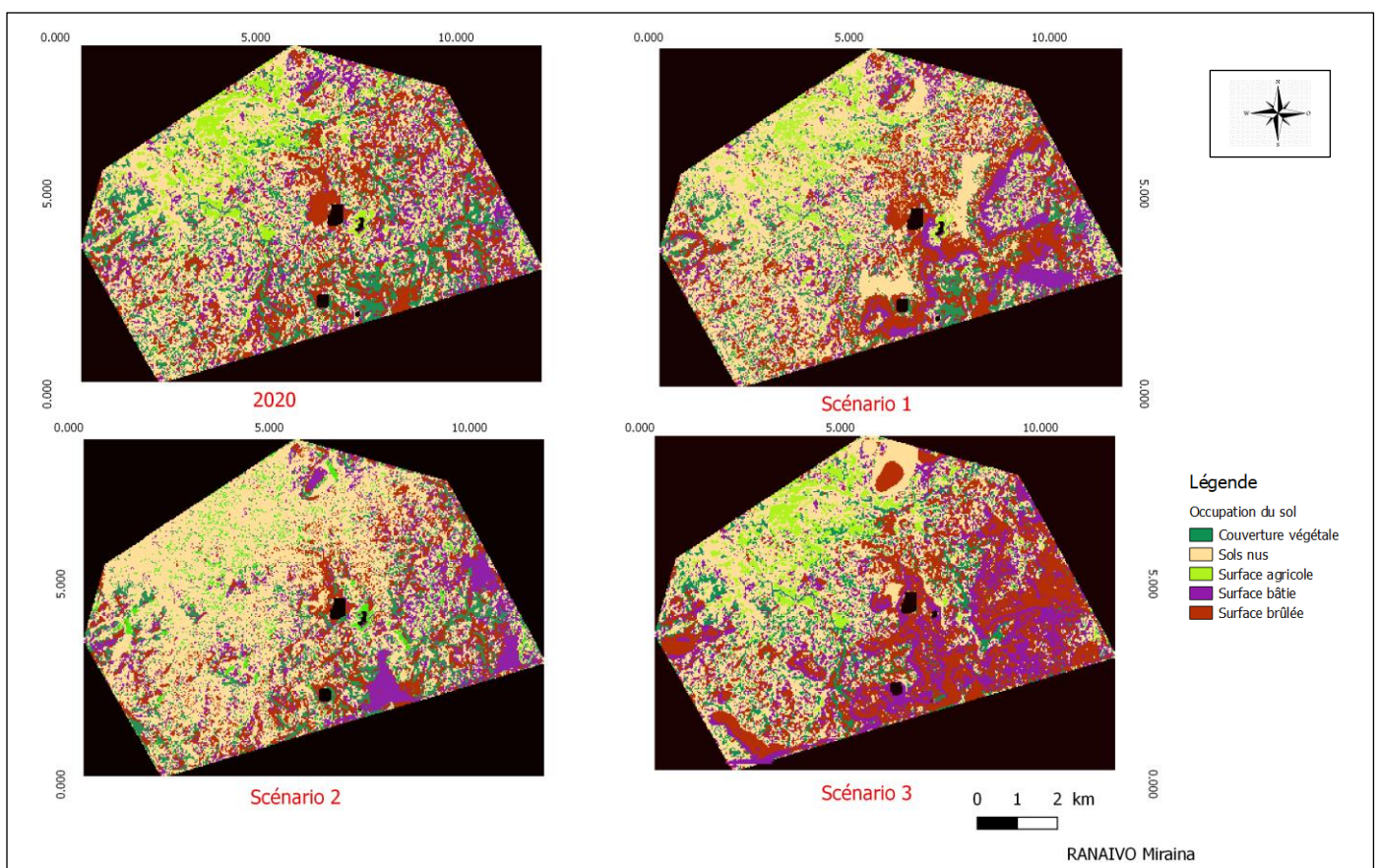


Figure 30 Simulation des trois scénarios d'occupation du sol en 2030

De ces scénarios dont le premier consiste en l'extrapolation des tendances actuelles, le second avec la mise en place des politiques de protection de la couverture ligneuse et le troisième qui traduit une croissance démographique et économique élevée, on obtient les évolutions de l'occupation du sol suivantes en 2030 :

2020-2030 scénario 1		
Classes	Taux d'évolution %	Vitesse d'évolution (ha/an)
Couverture végétale	-26	-28
Sols nus	10	24
Surface agricole	-18	-8
Surface bâtie	6	5
Surface brûlée	6	7

Tableau 15 Évolution de l'occupation du sol en 2030 avec le scénario 1

2020-2030 scénario 2		
Classes	Taux d'évolution %	Vitesse d'évolution (ha/an)
Couverture végétale	-5	-5
Sols nus	-7	-18
Surface agricole	15	7
Surface bâtie	35	31
Surface brûlée	-13	-14

Tableau 16 Évolution de l'occupation du sol en 2030 avec le scénario 2

2020-2030 scénario 3		
Classes	Taux d'évolution %	Vitesse d'évolution (ha/an)
Couverture végétale	-37	-40
Sols nus	-16	-40
Surface agricole	-11	-5
Surface bâtie	38	33
Surface brûlée	46	52

Tableau 17 Évolution de l'occupation du sol en 2030 avec le scénario 3

De l'examen de ces tableaux, nous remarquons une régression de la classe de couverture végétale dans l'ensemble des trois scénarios mais qui est plus marquée pour les scénarios 1 et 3 avec, respectivement un taux de régression de 26% et 37%. Par contre, avec le scénario 2, c'est-à-dire avec la mise en place de politique de protection de la couverture ligneuse et de la réhabilitation, ce taux est plus réduit et est de 5%, ce qui traduit une conservation du reste de la couverture végétale de la région.

Avec la tendance actuelle, qui correspond au scénario 1, la catégorie des sols nus connaît une augmentation de 10%. Toutefois, cette catégorie diminue de 7% avec la mise en œuvre des réglementations de protection de l'environnement. Nous pouvons ainsi dire que la mise en place de plan de réhabilitation et de re-végétalisation des sites diminue l'érosion des sols. Cette régression est de 16% avec le scénario 3 de la croissance démographique élevée.

La surface agricole est en baisse dans les scénarios 1 et 3 avec des taux de régression respectives de 18% et de 11%, mais elle a augmenté de 15% pour le scénario 2. La population est plus sensibilisée à la pratique d'une agriculture verte avec ce scénario 2.

Par ailleurs, nous observons dans la zone, une augmentation de la classe de surface bâtie dans l'ensemble des trois scénarios qui reflète bien la réalité sur le terrain avec une croissance démographique et économique élevée ainsi que la venue de nouveaux migrants pour

l'exploitation de l'or. Ce taux est quand même plus élevé pour le scénario 3 avec 38%, 35% pour le scénario 2 et 6% pour le scénario 1.

Enfin la surface brûlée augmente considérablement pour le scénario 3 avec un taux de 46%, qui traduit la croissance du besoin en terre de la population et l'augmentation de la pratique des feux de brousse ainsi que la culture sur-brûlis. Ce taux est par contre moins important pour le scénario 1 avec la tendance actuelle, il est de 6%. Pour le scénario 2, avec la protection de l'environnement, la classe de surface brûlée diminue de 46%.

L'examen de la vitesse de changement des occupations du sol, nous permet de constater que pour le scénario 1, la catégorie des sols nus a la plus grande vitesse d'augmentation de superficie tandis que la classe de couverture végétale se régresse plus vite que les autres classes.

Pour le scénario 2, la superficie des sols nus diminue plus vite que les autres tandis que la superficie des surfaces bâties a augmenté rapidement.

Enfin, nous notons dans le scénario 3 que la classe des surfaces brûlées augmente plus vite que les autres et la classe des sols nus connaît une vitesse de régression plus importante.

Cette modélisation s'est faite avec une précision globale moyenne de 87% et une erreur de 0,10 en prenant comme référence pour la validation l'occupation du sol en 2020 qui constitue également l'entrée pour la modélisation.

6. Discussion

L'exploitation aurifère à Betsiaka a vu le jour pendant la période coloniale dans les sites d'Andavakoera en 1908, et dans la rivière de Sambirano en 1910. Une mine à ciel ouvert a été mise en place en 1910 à Ranomafana dans la commune produisant 49 kg d'or par semaine. Ces exploitations ont été faites par les colons qui employaient la population locale pour l'orpaillage, initiant cette dernière à la méthode (GRUNDMANN, 2020). Cependant, après l'indépendance de Madagascar, l'exploitation a un peu ralenti mais suite à la découverte d'un filon en 2016, générant une ruée incontrôlable, elle a repris de l'ampleur.

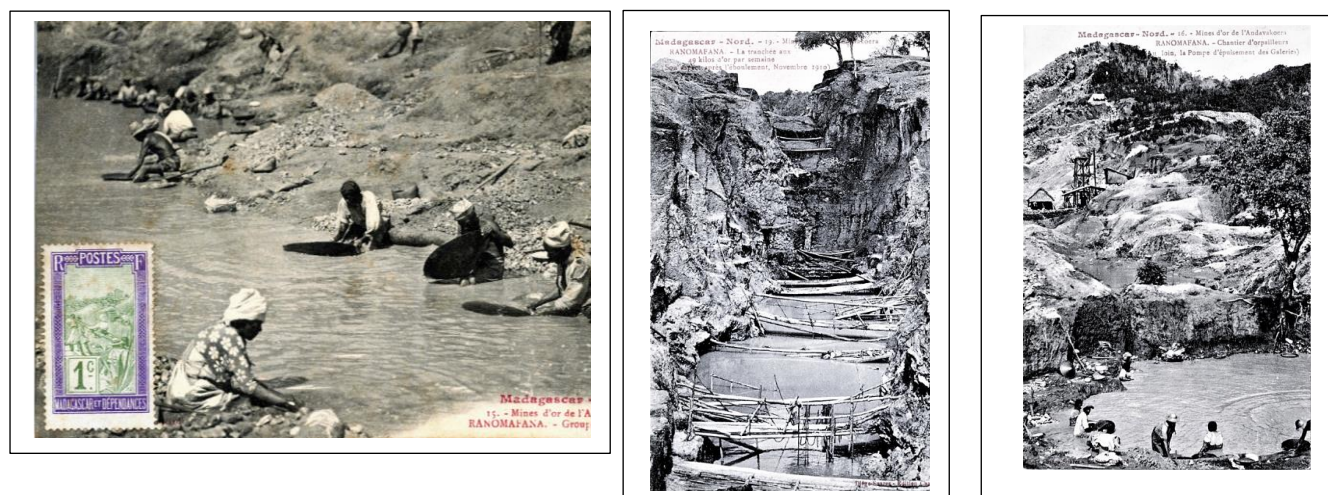


Figure 31 Exploitation de l'or dans la commune de Betsiaka en 1910

L'exploitation artisanale de l'or est une des activités génératrices de revenu pour la population locale et pour la commune. En effet, même si c'est seulement 25% de la population qui vivent directement de l'orpaillage, de nombreuses activités annexes se sont créées autour de cette

exploitation permettant à la commune de se développer. Toutefois, l'informalité de l'exploitation influence négativement l'économie locale. En outre, l'utilisation de méthodes archaïques et sans aucune mesure de sécurité et de protection de l'environnement a des impacts considérables sur le milieu naturel et la santé humaine.

Les impacts physiques comme la déforestation et la dégradation de l'environnement peuvent être appréciées grâce à la l'analyse diachronique des images satellites de 2000 à 2016 pendant laquelle l'orpaillage n'était pas encore très important et de 2016-2020 quand cette dernière a repris de l'ampleur.

Ainsi, de l'analyse des transitions des périodes passées et actuelles, nous avons observé une importante régression de la couverture végétale surtout entre 2016 et 2020 au profit des sols nus. En parallèle à ceci, nous avons constaté une augmentation des surfaces bâties due notamment à la croissance démographique de la région par l'arrivée d'exploitants migrants et une augmentation de la surface brûlée pour la culture sur-brûlis ainsi que les feux de brousse. Toutefois, l'activité agricole a sensiblement diminué dans la zone. La culture sur-brûlis est plus pratiquée car le sol est devenu moins fertile à cause de l'érosion rendant ainsi l'agriculture difficile.

Pour une période ultérieure, de 2020 à 2030, il y aura une tendance de régression du paysage ligneux au profit des espaces urbaines ou péri-urbaines, des brûlis dus aux feux de brousse et aux cultures sur-brûlis. Par contre, l'étendue des sols nus, très marquée dans la partie Nord-Ouest de la zone où se trouvent les sites d'exploitation, augmente dans le scénario 1 qui suit la tendance actuelle, mais diminue pour le scénario 2 avec la mise en œuvre d'une politique de protection de l'environnement. Ainsi, on peut dire que si les activités d'orpaillage continuent dans ce sens et que de mesures de réhabilitation ne sont pas mises en place, il y aura plus de sols érodés dans la région et plus de terres non cultivables, ce qui peut nuire à l'économie locale. Cependant, la croissance démographique accrue dans la zone augmentera le besoin en terre de la population qui aura ainsi recours aux culture sur-brûlis et qui est représenté sur le scénario 3.

Bref, nous constatons actuellement une déforestation dans la région qui entraîne une perte importante de la biodiversité. Globalement, nous remarquons une tendance régressive des formations végétales dans la région et une évolution progressive des activités anthropiques qui pourraient s'aggraver dans le futur sans une prise de mesures adéquates.

7. Limites de l'étude

Une des limites majeures de cette étude a été le temps pour les enquêtes sur le terrain dû, notamment, aux différentes restrictions de la crise sanitaire du covid-19, qui a retardé et limité le travail effectué.

Un autre problème rencontré lors de l'enquête sur le terrain fut la confiance entre l'enquêté et l'enquêteur. La formulation des questions de manière objective a été faite au maximum pour ne pas proposer directement des réponses dans la question demandée et de permettre à l'interviewé de répondre à sa façon. Cependant, la méfiance des opérateurs vis-à-vis de l'administration et des enquêteurs ont suscité des réponses souvent déformées et loin de la réalité comme la production de l'or des opérateurs et leur revenu.

Lors de la classification des occupations du sol, certaines classes spectrales présentent une signature similaire et sont difficilement distinguables augmentant l'incertitude sur le modèle.

Enfin, le modèle MOLUSCE de QGIS 2.18.0 utilise les automates cellulaires pour la modélisation qui procèdent à de simple sélection des pixels avec une forte probabilité de changement élevé. Le modèle ne permet donc pas une reproduction de patrons spatiaux

vraisemblables. Le modèle possède aussi une structure fixe et rigide qui rend impossible l'implémentation sur la modélisation des effets de séjour et les effets de saturation et définit ainsi un flux constant de procédures.

IV. Programme de gestion environnementale et sociale

D'après les études faites auparavant, on a constaté que l'orpaillage à Betsiaka a de nombreuses répercussions sur l'environnement et la société, qui peuvent être à la fois négatives et positives. Des programmes de gestion environnementale et sociale devraient ainsi être envisagés pour pallier aux impacts négatifs de cette activité et renforcer les impacts positifs. Ces programmes permettent également d'atténuer les impacts et de les compenser. Toutefois, pour que le projet soit une réussite et pour avoir des résultats à long terme, des programmes de suivi doivent être mis en œuvre. Les objectifs de ces programmes sont de réduire les impacts négatifs de l'orpaillage sur le milieu récepteur et d'évaluer l'efficacité des mesures proposées.

Ainsi, le programme de gestion est constitué d'un programme de surveillance qui consiste à assurer la réalisation des mesures d'atténuation et de compensation des impacts négatifs lors de l'exploitation et d'autre part, d'un programme de suivi qui consiste à évaluer l'efficacité de ces mesures dans le temps et de les rectifier si besoin.

Le programme constituera ainsi un projet national et interministériel en collaboration avec les ONG (Organismes Non Gouvernementaux) comme l'ONG Fanamby qui opère dans le secteur de la protection de l'environnement et qui travaille déjà dans la commune de Betsiaka, l'ONU environnement qui élabore déjà avec le Ministère de l'Environnement et le Ministère des Mines un programme pour la réduction voire l'élimination du mercure dans l'EMAPE (Exploitation Minière Artisanale et à Petites Echelles) pour la protection de l'environnement et de la santé humaine et la GIZ avec son programme d'appui à la gestion de l'environnement (PAGE) et qui travaille en étroite collaboration avec le Ministère des Mines et le Ministère de l'Environnement pour l'encadrement des orpailleurs en matière d'environnement.

1111Mi lieu	Composantes	Enjeux	Mesures d'atténuation/com pensation	Indicateurs	Moyen de surveillance	Période de surveillance	Fréquence de suivi	Responsable	Coûts estimatifs (Ariary)	Coûts estimatifs (Euro)
PHYSIQUE	EAUX	Pollution et tarissements des cours d'eau lors du lavage de minerais	Mise en place de bassin de rétention destiné au lavage des minerais	Nombre de bassin mis en place et débit de cours d'eau	Comptage et observation	Trimestriel	Semestriel	Ministère des Mines, ANOR et Commune	6 745 965 ,00	1 500,00
	SOL	Dégradation du paysage et des sols sur les sites	Formation des orpailleurs et des responsables communaux à la réhabilitation des sites	Nombre de sites réhabilités	Comptage et observation	Trimestriel	Semestriel	Ministère de l'Environnement, ANOR et Commune	300 000,00	66,71
		Modification du profil topographique et dégradation du paysage	Aménagement des sites d'orpaillage abandonnés	Surface aménagée	Observation et mesure	Mensuel	Trimestriel	Commune	1 349 193,00	300,00
		Dénudation et érosion du sol	Re-végétalisation sur les sites abandonnés	Surface re-végétalisée	Mesure et observation	Annuel	Annuel	Ministère de l'Environnement, ANOR et Commune	1 574 058,50	350,00
		Perte de fertilité du sol	Réduction de la mise à nu des sols	Surface de sols nus	Mesure et observation	Annuel	Annuel	Ministère de l'Environnement, ANOR et Commune		

	Pollution du sol due au stockage de déblais	Mise en place de stockage de stérile	Nombre et surface de stockage de stérile	Comptage, mesure et observation	Annuel	Annuel	Ministère de l'Environnement, Ministère des Mines, ANOR et Commune	224 865,50	50,00
	Présence de trous/puits	Remblaiement des trous/puits après abandon de site	Nombre de trous remblayés	Comptage et Observation	Mensuel	Trimestriel	Commune	100 000,00	22,24
	Pollution du sol par les déchets ménagers	Mise en place de station de recyclage de déchets en compost	Nombre de stations et poids de compost produits	Mesure et comptage	Mensuel	Annuel	Ministère de l'Environnement et Commune	193 384,33	43,00
	Pollution du sol par le manque d'hygiène et d'assainissement	Installation d'infrastructures d'hygiène et d'assainissement sur sites	Nombres de toilettes mises en place	Comptage et observation	Annuel	Annuel	Ministère de l'Environnement et Commune	175 000,00	38,91
AIR	Altération de la qualité de l'air par les matières en suspension et la poussière lors de l'exploitation et du traitement des minerais	Arrosage systématique des zones sensibles à l'émanation de poussières	Surface arrosée	Mesure et Observation	Journalier	Hebdomadaire	Commune	500 000,00	111,18
VEGETATION	Réduction de la couverture végétale et	Re-végétalisation sur les sites abandonnés	Surface re-végétalisée	Mesure et observation	Annuel	Annuel	Ministère de l'Environnement, ANOR et Commune	1 574 058,50	350,00

dégradation de la végétation								
Déforestation et disparition de certaines espèces végétales lors de l'abattage des arbres	Reboisement sur les sites abandonnés	Surface reboisée	Mesure et observation	Annuel	Annuel	Ministère de l'Environnement, Ministère des Mines, ANOR et Commune	4 497 310,00	1 000,00
Déforestation due à la croissance de la culture sur-brûlis	Promotion de la sylviculture	Surface cultivée avec la méthode de l'agroforesterie	Mesure et observation	Semestre	Annuel	Ministère de l'Environnement et Commune	2 000 000,00	444,71
Déforestation due à la croissance démographique et l'augmentation de surfaces bâties	Zonage et aménagement du territoire pour délimiter les zones habitables	Surface bâtie	Mesure et observation	Annuel	Tous les 5 ans	Ministère de l'aménagement et des travaux publics et commune	5 000 000,00	1 111,78
Augmentation des activités de feux de brousse et d'abattage des arbres	Formation et sensibilisation de la population sur la protection de l'environnement	Nombre de personnes sensibilisées et formées	Contrôle	Journalier	Mensuel	Ministère de l'Environnement et Commune	100 000,00	22,24

HUMAIN

SANTÉ	Risques d'accidents et de blessure lors de l'exploitation et de la descente dans les puits	Formation des exploitants sur la sécurisation des puits par des soutènements efficaces	Nombre d'exploitants formés et de puits sécurisés	Comptage et observation	Hebdomadaire	Mensuel	ANOR et Commune	150 000 ,00	33 ;35
		Port de matériels de protection pour les exploitants	Nombre de matériels à disposition	Comptage et contrôle	Journalier	Mensuel	Commune	3 000 000, 00	667,07
	Augmentation du nombre de maladies liées à l'orpaillage et aux autres activités	Mise en place des services de santé aux proximités des sites d'orpaillage pour des soins continus et en cas d'accidents sur les sites	Nombre de services de santé mis en place	Comptage et contrôle	Semestre	Annuel	Ministère de la santé publique et commune	5 000 000,00	1 111,78
	Augmentation des maladies liées au manque d'hygiène	Sensibilisation et formation de la population sur le respect de l'hygiène	Nombre de personnes sensibilisées et formées	Comptage et contrôle	Journalier	Mensuel	Ministère de la santé publique et commune	150 000,00	33,35
SOCIALE	Diminution du nombre d'enfants éduqués	Campagnes de sensibilisation et de promotion des droits, des lois de l'homme	Taux de scolarisation des enfants	Comptage et contrôle	Trimestriel	Annuel	Ministère de l'éducation publique et commune	300 000,00	66,71
	Augmentation de l'insécurité sur les sites	Installation des Brigades mixtes sur les sites	Nombre de brigades installées	Comptage et contrôle	Annuel	Annuel	Ministère de sécurité publique et commune	1 000 000,00	222,36

	Accaparement des terres par les orpailleurs, source de conflits avec les agriculteurs	Instauration des accord et des procès-verbaux entre les deux parties avant l'exploitation	Procès-verbaux par les deux parties et copies à la commune	Contrôle	Semestre	Annuel	Commune		
ECONOMIE	Activités informelles générant des pertes financières pour la commune	Sensibilisation et formalisation des opérateurs aurifères	Nombre d'opérateurs formels	Comptage et contrôle	Trimestriel	Annuel	ANOR et commune	1 200 000,00	266,83
	Perte financière de la commune sur les redevances et ristournes minières à l'exportation	Sensibilisation et formation des responsables communaux sur l'avantage de la formalisation et de la traçabilité de l'or	Quantité d'or déclarée officiellement à l'exportation provenant de la commune	Contrôle	Trimestriel	Annuel	ANOR et Commune	1.500. 000,00	333,53
Total des programmes de gestion environnementale pour l'atténuation et la compensation des impacts de l'exploitation artisanale de l'or à Betsiaka								36 633 834,83	7 845,54

Tableau 18 Plan de gestion pour l'atténuation et compensation des impacts de l'orpaillage à Betsiaka (1 Eur= 4497,31 Ariary (03/08/21))

Outre ce plan de gestion environnementale pour atténuer ou compenser les impacts de l'orpaillage sur le milieu récepteur, il faudrait aussi renforcer et améliorer les impacts positifs de cette activité.

Enjeux	Impacts	Renforcement/amélioration
Ouverture des puits lors de l'exploitation	Disponibilité des ressources en eaux pour la population	Installation des points de distribution d'eau potable à partir de ces puits
Orpaillage: source de revenu	Amélioration de revenus pour de nombreux ménages	Formation, sensibilisation et formalisation des opérateurs et des responsables communaux
		Transparence dans le prix et le marché de l'or
Création de nouvelles activités génératrices de revenus	Amélioration des revenus et des conditions pour la population locale et la commune	Formalisation des activités et formation sur les métiers annexes à l'orpaillage (bijouterie, forgeron, charpentier, etc.)
Traçabilité de l'or générant une ristourne pour la commune	Construction d'infrastructures sociales et culturelles dans la commune améliorant les conditions de vie de la population locale	Formation, sensibilisation et motivation des responsables communaux à formaliser les opérateurs et à contrôler la production communale
		Inciter et motiver les comptoirs de l'or à s'installer et à travailler dans la commune pour l'achat de l'or

Tableau 19 Renforcement et amélioration des impacts positifs de l'orpaillage à Betsiaka

Conclusion

Malgré la faible étendue des sites d'orpaillage à Betsiaka, l'exploitation artisanale de l'or constitue néanmoins une des principales sources de dégradation de l'environnement et notamment de la déforestation. Ces impacts ont pu être observés et évalués grâce à l'analyse diachronique des images satellites de la zone d'étude à des dates antérieures et actuelles. Outre ses impacts sur le milieu physique, l'orpaillage génère également des problèmes de santé chez les orpailleurs et même de la population riveraine.

Cependant, cette étude nous a aussi permis de constater que même si ces impacts sont importants, d'autres facteurs plus dévastateurs comme les feux de brousse, les cultures sur-brûlis, et l'urbanisation due à la forte croissance démographique engendrent plus de dégâts sur l'environnement en particulier sur la couverture végétale. Les simulations futures confirment cela et place les feux de brousses et culture sur-brûlis ainsi que l'extension de zones bâties comme les principaux facteurs de dégradation et de déforestation dans la zone. Les impacts de l'orpaillage sont donc plus faciles à maîtriser par rapport à ceux des autres facteurs. De plus, des programmes de gestion se référant sur les mesures d'atténuation et de compensation peuvent être mises en place pour réduire ces impacts et renforcer les effets positifs de l'exploitation de l'or sur la société. Toutefois, la participation active de la commune et des différentes entités responsables dans la surveillance et le suivi de ces plans de gestion est nécessaire.

Néanmoins, des analyses plus approfondies sur la contamination des composantes de l'environnement (sol et eau) par l'orpaillage notamment par l'utilisation de produits tels que le mercure devraient être réalisées. Ces analyses n'ont pas pu être réalisées dans le cadre de cet ouvrage mais serait de bonne perspective pour suivre le travail.

Enfin, cette étude permettra aux différents responsables de prendre conscience des impacts de l'exploitation artisanale de l'or à Betsiaka et de prendre des décisions sur la gestion environnementale de ces impacts en se basant sur le programme de gestion déjà proposé.

Bibliographie

- Ministère auprès de le Présidence chargé des Mines et du Pétrole. (2015). *Décret N°2015-1035 fixant le Régime de l'or*.
- ABDOU AMADOU, S. (2019-2020). *Evaluation des impacts de l'exploitation artisanale de l'or sur le site d'orpaillage de Komabangou (Liptako, NIGER)*.
- AGBANOU, T., PAEGELOW, M., TOKO IMOROU, I., & TENTE, B. (2018). Modélisation des changements d'occupation des terres en région Soudanienne au Nord-Ouest du Bénin. *European Scientific Journal*, 248-266.
- Agence National de la filère Or (ANOR). (2016). *Guichet unique à Betsiaka*.
- Agence Nationale de la filière Or (ANOR). (2017). *Méthodes d'exploitation de l'or à Madagascar*.
- ANDRIANOMENY, H. O. (2014). *Apport de la prospection électrique à l'étude de la minéralisation aurifère dans la commune rurale de Betsiaka, Région Diana*. Antananarivo.
- ANDRIATSIHOARANA, M. E. (2016). *Etude d'impact environnemental et social du projet de recherche aurifère et d'exploitation pilote dans les gisements alluvionnaires à Betsiaka (Région Diana)*.
- ANOR. (2021). *Enquête sur terrain pour l'étude d'impact environnemental de l'orpaillage à Betsiaka*.
- BENSEFA-COLAS, L., ANDUJAR, P., & DESCATHA, A. (2011). Intoxication par le mercure. Dans J. Pouchot, & H. Lévesque, *La revue de médecine interne* (pp. 416-424). Paris, France: Elsevier Masson.
- BOUDOU, A., DOMINIQUE, Y., FRERY, N., & CORDIER, S. (2006). Les chercheurs d'or et la pollution par le mercure en Guyane française: conséquences environnementales et sanitaires. Dans A. Boudou, Y. Dominique, N. Frery, & S. Cordier, *Environnement, risques et santé vol5 n°3* (pp. 167-179). France: S.Cordier.
- Britaldo Silveira Soares, F., Gustavo Coutinho, C., & Cassio Lopes, P. (2002). DINAMICA- a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. *Ecological Moelling- ELSEVIER*, 217-235.
- CSFR-UFMG. (2013, Avril 05). *Tutoriel: building a land use and land cover change simulation model*. Récupéré sur Dinamica EGO: https://csr.ufmg.br/dinamica/dokuwiki/doku.php?id=tutorial:building_a_land-use_and_land-cover_change_simulation_model
- DEHON, B., NISSE, C., LHERMITTE, M., & HAGUENOER, J.-M. (2001). Métaux et Médecine du travail. *ata-journal*, 203-219.
- DENIS, A. (2021). *Travaux pratiques de télédétection spatiale II-Avec données et logiciels libres*. Belgique: ULIEGE.
- ECKSTRAND , O., SINCLAIR, W., & THORPE, R. (1995). *Géologie des types de gîtes minéraux du Canada*. Géological Society of America.

- FAO et PNUE. (2020). *La situation des forêts du monde 2020. Forêts, biodiversité et activité humaine*. Rome.
- Gasikara.info (Réalisateur). (2016). *GRAND DOSSIER BETSIKA* [Film].
- GIS & RS Solution. (2020). *Modules for Land Use Change Evaluation/LULC Prediction*.
- GIS LAB. (2014, avril 21). *Landscape change analysis with MOLUSCE- methods and algorithms*. Récupéré sur wiki.gis-lab: https://wiki.gis-lab.info/w/Landscape_change_analysis_with_MOLUSCE_-_methods_and_algorithms
- GRUNDMANN, G. (2020, Août 22). *Galerie de photos Ambilobe, Diana, Madagascar*. Récupéré sur mindat: <https://www.mindat.org/gallery.php?pco=2&loc=35969>
- LORIN, T., & adapté de DAMPIER, L. (2018, UBC 2013).
- LORIN, T., LALLEMAND, F., EL-SHAFFEY, A., & DARBOUX, F. (2018). *Quelques conséquences locales et régionales des changements d'usages des sols liés aux activités humaines*. Olivier Dequincey.
- LUZ, R. (2017). ANOR: 500.000 orpailleurs recensés à Madagascar. *MIDI Madagascar*.
- Ministère de l'Energie et des Mines- Ministère de l'Environnement. (2000). *Arrêté interministériel N°12032/2000 sur la réglementation du secteur minier en matière de protection de l'environnement*.
- Ministère de l'Environnement, de l'Ecologie et des Forêts, ONU. (2018). *Plan d'Action National pour réduire et/ou éliminer l'utilisation du mercure dans l'Extraction Minière Artisanale et à Petite Echelle de l'or MADAGASCAR*.
- Ministère de l'Environnement, d. e. (2004). *Décret MECIE*.
- Ministère des Mines. (2005). *Texte du Droit Minier Malagasy Loi N°99-022 du 19 août 1999 portant Code minier modifiée par la Loi N°2005-021 du 17 octobre 2005*.
- Ministère des Mines. (2006). *Décret N°2006-910 du 19 août 2006 portant application du Code minier*.
- MOULLET, D., SAFFACHE, P., & TRANSLER, A. (2006). *L'orpaillage en Guyane française: synthèse des connaissances*. Open Edition Journals.
- OMS. (2013). *L'exposition au mercure et ses conséquences sanitaires chez les membres de la communauté de l'extraction minière artisanale et à petite échelle de l'or (ASGM)*. Genève.
- PAGE GIZ. (2016). *Rapport final du recensement des maillons de la chaîne d'activité d'orpaillage dans la commune rurale de Betsiaka, district d'Ambilobe, région Diana*.
- RASOANAIVO, J., & al. (1988). *Rapport de la campagne de terrain 1987 sur les régions d'Andavakoera, Maevatanana, Dabolava et Itea*. Madagascar: Ministère de l'Industrie et de l'Energie et des Mines.
- RASOANAIVO, A. (2015). *Feux de brousse: Sensibilisation et conscientisation des populations*. *MIDI Madagasikara*.
- ROGEZ, P. (2021, Mai 10). *Liste des cours d'eau de Madagascar*. Récupéré sur Wikipédia: https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_cours_d%27eau_de_Madagascar

Service géologique de Madagascar. (s.d.). *Carte géologique de Betsiaka échelle=100.000.*

SOLIDARITE SANTE. (2005). Toxicité des métaux et de leurs différentes formes. *solidarité santé.*

Yamazaki D., D. Ikeshima., R.Tawatari, T, Yamaguchi, F.O Loughlin, J.C. Neals, C.C. Sampson, S.Kanae, P.D Bates (5844-5853). A high accuracy map of global terrain elevations. *Geophysical Research Letters*, vol.44,, 2017.

ANNEXES

ANNEXE 1 : Fiches d'enquête et guide d'entretien utilisés sur le terrain

GUIDE D'ENTRETIEN POUR LA COMMUNE

THEMES	RELANCES VERBALES
Activités économiques de la commune : <ol style="list-style-type: none"> 1. Nombre de la population dans la commune 2. Activités économiques de la population 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Quel est l'effectif total de la population dans la commune ? 2. Quelles sont les activités économiques de la population dans la commune ?
Exploitation de l'or dans la commune : <ol style="list-style-type: none"> 1. Sites d'exploitation 2. Sites les plus exploités 3. Effectif des orpailleurs 4. Situation des orpailleurs 5. Activité de la commune pour la formalisation des acteurs aurifères 6. Production de l'or dans la commune 	<ol style="list-style-type: none"> 1. A) Combien de sites d'exploitation se trouvent dans la commune ? (CO et galeries : fatana) B) Quel pourcentage du territoire communal est concerné ? 2. Quels sont les sites les plus exploités ? 3. Combien d'orpailleurs existent en total dans la commune ? 4. Combien d'orpailleurs possèdent des cartes ? 5. Que fait la commune pour sensibiliser les acteurs à se formaliser ? 6. Quelle est la production moyenne en kg/an de la commune ?
Impacts de l'orpaillage : <ol style="list-style-type: none"> 1. Impacts sur le sol 2. Impacts sur la végétation 3. Impacts sur l'eau 4. Impacts du mercure sur la santé 5. Eventuels conflits d'usage. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Quels sont les impacts observés de l'exploitation de l'or sur le sol ? 2. L'exploitation a-t-elle des effets sur la végétation ? 3. Les orpailleurs utilisent-ils des cours d'eau pour l'exploitation ou pour le lavage des minerais ? Quels impacts ont été observés ? 4. Utilisent-ils du mercure pour extraire l'or ? quels sont les effets sur leur santé ? et sur celle de la population ? 5. L'activité entre-t-elle en conflit avec d'autres usages, pratiques ou activités ?
Réhabilitation de l'environnement : <ol style="list-style-type: none"> 1. Responsabilités de la commune 2. Travaux effectués 3. Contrôle par la commune 4. Taxes pour la réhabilitation de l'environnement 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Que fait la commune pour la réhabilitation de l'environnement ? 2. Quels sont les travaux déjà effectués ? Et par qui ? 3. La commune contrôle-t-elle ces travaux ?

<p>5. Collaboration avec d'autres organismes</p>	<p>4. Est-ce qu'il y a des taxes pour l'environnement que les orpailleurs doivent payer ou est-ce compris dans le prix des cartes ?</p> <p>5. La commune collabore-t-elle avec d'autres organismes comme les ONG ou le Ministère de l'environnement pour la protection de l'environnement communal ?</p>
<p>Exploitation de la forêt :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Existence d'une forêt dans la commune 2. Exploitation des produits de la forêt 3. Utilisation des produits de la forêt 4. Contrôle par la commune 	<ol style="list-style-type: none"> 1. A) Est-ce qu'il y a une forêt dans la commune ? B) Quel pourcentage du territoire communal est occupé par la forêt ? 2. La population exploite-t-elle les produits de la forêt ? 3. A quelle fin la population utilise-t-elle ces produits ? ménagère ou économique ? 4. La commune contrôle-t-elle ces activités ?

FICHE D'ENQUETE AUPRES DES PROPRIETAIRES/SPONSORS

Identification des propriétaires N° /2021

Nom :

Age :

Sexe : Masculin Féminin

Adresse :

Immigrant : Oui Non Si oui d'où ?.....

Possession de carte professionnel : Oui Non

Nombre d'ouvriers :

Production : quelle est votre production ?

- Journalière :
- Mensuelle :

Affiliation à un sponsor : êtes-vous affilié à un sponsor ?

Oui Non

Si oui, combien et quels sont leurs noms ?.....

.....
.....

Si non, pourquoi ?

.....

Identification des sponsors N° /2021

Nom :

Age :

Sexe : Masculin Féminin

Adresse :

Immigrant : Oui Non Si oui d'où ?.....

Possession de carte professionnel: Oui Non

Affiliation à un propriétaire : combien de propriétaires vous sont affiliés ? :

Production : quelle est votre production ?

- Journalière :
- Mensuelle :

Identification des collecteurs N° /2021

Nom :

Age :

Sexe : Masculin Féminin

Adresse :

Immigrant : Oui Non

Lieu de travail :

Possession de carte de collecte : Oui Non

Affiliation à un orpailleur : Oui Non

Si oui, combien d'orpailleurs vous sont affiliés ? :

Si non, pourquoi ? :

.....

Production : quelle est votre production ?

- Journalière :
- Mensuelle :

FICHE D'ENQUETE AUPRES DES ORPAILLEURS

Identification des orpailleurs N° /2021

Nom :

Age :

Sexe : Masculin Féminin

Adresse :

Immigrant : Oui Non Si oui d'où ?

Lieu de travail : (CO ou galerie).....

Possession de carte d'orpillage : Oui Non

Appartenance à un groupement : Oui Non

Si oui, le nom du groupement :

Si non, pourquoi ? :

.....

Temps de travail : êtes-vous travailleur permanent ou saisonnier ?

Permanent Saisonnier

Exploitation de l'or

Site de production :

Type de gisement : quel type de gisement exploitez-vous ?

- Primaire
- Alluvionnaire
- Eluvionnaire
- Terrasse

Méthode d'exploitation : quelle méthode d'exploitation utilisez-vous ?

- Alakopaka
- Kopaka lalan-tany
- Kopaka lalam-bato
- Hili-jia
- Alodrano
- Autre :

Matériels utilisés : quels matériels (et nombre) utilisez-vous pour exploiter l'or ?

Alakopaka	
Koapaka lalan-tany	
Kopaka lalam-bato	
Hili-jia	
Alodrano	
Autre	

Lavage des minerais : où lavez-vous vos minerais ?

- Flaque d'eau près des sites d'exploitation
- Près d'une source
- Dans la rivière
- Dans un lac
- Dans un bassin de rétention
- Autre

.....

Traitement des minerais : comment traitez-vous le minerais ?

- Débourage
- Concassage
- Triage
- Broyage
- Tamisage
- Autre

.....

Utilisation de produits chimiques : utilisez-vous des produits chimiques pour l'extraction de l'or ?

Oui

Non

Si oui, le(s)quel(s) ? Et quantité(s) par an ?

Production : quelle est votre production ? Journalier :dg Mensuel :dg

Revenu : A quel prix vous vendez l'or ?Ar

Quel est votre revenu mensuel ?Ar

Environnement et santé humaine

Exploitation à l'intérieur d'une forêt : exploitez-vous à l'intérieur d'une forêt ?

Oui

Non

Si oui, est-ce une zone protégée ?

Oui

Non

Si oui pourquoi ?

.....

.....

Impact de l'exploitation sur l'environnement : pensez-vous que l'exploitation de l'or a des impacts sur l'environnement ?

Oui

Non

Si oui, lequel ?

- Ensablement des rizières, lac
- Erosion du sol
- Problème d'irrigation
- Infertilité du sol
- Pollution de l'eau
- Affaissement du sol

- Tarissement des sources d'eau
- Ensablement des lits de rivières
- Autres

Réhabilitation des sites : procédez-vous à des réhabilitations des sites après l'exploitation ?

Oui Non

Si oui, lesquels ?

- Remblaiement des terres
- Ré-végétalisation
- Culture agricole
- Autres

Si non, pourquoi ?

.....

.....

Taxe pour environnement : payez-vous des taxes pour la réhabilitation de l'environnement ?

Oui Non

Si oui, à qui et comment ?

.....

Si non, pourquoi ?

.....

Si utilisation de mercure, impact du mercure sur la santé : savez-vous que le mercure a des impacts néfastes sur la santé ?

Oui Non

Si oui, pouvez-vous dire lesquels ?

.....

.....

Ressentez-vous l'un ou plusieurs de ces symptômes ?

- Excitabilité
- Irritabilité
- Insomnie
- Salivation excessive
- Tremblements
- Troubles rénaux
- Effets gastro-intestinaux
- Trouble visuel
- Autres

.....

ANNEXE 2 : Coordonnées des sites d'orpillage

NOM DU SITE	COORD Y	COORD X	OBSERVATION
Akodomo	-13.16302778	49.24805556	Site maintenu
Akodomo	-13.16316667	49.24886111	Site maintenu
Akodomo	-13.16483333	49.24761111	Site maintenu
Akodomo	-13.16475	49.24705556	Site maintenu
Akodomo	-13.164488	49.247547	Nouveau site
Ambarian'omby	-13.16433333	49.24669444	Site maintenu
Ambarian'omby	-13.16466667	49.24652778	Site maintenu
Ambarian'omby	-13.16433333	49.24866667	Site maintenu
Ambarian'omby	-13.16377778	49.24880556	Site maintenu
Ambarian'omby	-13.163357	49.248535	Nouveau site
Ambarian'omby	-13.163492	49.248515	Nouveau site
Ambarian'omby	-13.164266	49.248478	Nouveau site
Ampizopiny	-13.16058333	49.25247222	Site maintenu
Ampizopiny	-13.16519444	49.25455556	Site maintenu
Ampizopiny	-13.156892	49.23656	Nouveau site
Ampizopiny	-13.159682	49.251166	Nouveau site
Ampizopiny	-13.160477	49.251756	Nouveau site
Andranotakatra	-13.16894444	49.24669444	Abandonné
Andranotakatra	-13.16891667	49.24669444	Abandonné
Andranotakatra	-13.16888889	49.2472222	Abandonné
Andranotakatra	-13.16888889	49.24680556	Abandonné
Andranotakatra	-13.16875	49.24688889	Abandonné
Andranotakatra	-13.16763889	49.24675	Abandonné
Andranotakatra	-13.16761111	49.24675	Abandonné
Andranotakatra	-13.16761111	49.24677778	Abandonné
BRGM	-13.16675556	49.23402778	Site maintenu
BRGM	-13.1695	49.23355556	Site maintenu
BRGM	-13.16955556	49.24425	Site maintenu
BRGM	-13.16952778	49.24441667	Site maintenu
BRGM	-13.16958333	49.24988889	Site maintenu
BRGM	-13.16963889	49.24944444	Site maintenu
BRGM	-13.17008333	49.24875	Site maintenu
BRGM	-13.16997222	49.24669444	Site maintenu
BRGM	-13.168337	49.234314	Nouveau site
BRGM	-13.168296	49.235742	Nouveau site
BRGM	-13.196632	49.048087	Nouveau site
BTM	-13.16152778	49.22627778	Site maintenu
BTM	-13.1615	49.22658333	Site maintenu
BTM	-13.163	49.22522222	Site maintenu
BTM	-13.16197222	49.22544444	Site maintenu
BTM	-13.16213889	49.22566667	Site maintenu
BTM	-13.16180556	49.22625	Site maintenu
BTM	-13.16180556	49.22608333	Site maintenu
BTM	-13.16186111	49.22538889	Site maintenu

Londre	-13.16619444	49.23752778	Site maintenu
Londre	-13.16591667	49.2375	Site maintenu
Londre	-13.16586111	49.2375	Site maintenu
Londre	-13.16519444	49.23830556	Site maintenu
Londre	-13.16322222	49.23702778	Site maintenu
Londre	-13.16613889	49.23705556	Site maintenu
Londre	-13.16613889	49.23708333	Site maintenu
Londre	-13.16613889	49.23713889	Site maintenu
Makorazy	-13.16480556	49.25275	Site maintenu
Makorazy	-13.16694444	49.24966667	Site maintenu
Makorazy	-13.1667778	49.25025	Site maintenu
Makorazy	-13.16688889	49.25002778	Site maintenu
Makorazy	-13.16616667	49.25091667	Site maintenu
Makorazy	-13.16605556	49.25113889	Site maintenu
Manjola	-13.16258333	49.24283333	Abandonné
Manjola	-13.16338889	49.24236111	Abandonné
Manjola	-13.16336111	49.24233333	Abandonné
Manjola	-13.16344444	49.24241667	Abandonné
Manjola	-13.16322222	49.24288889	Abandonné
Manjola	-13.1380556	49.24861111	Abandonné
Manjola	-13.16388889	49.24844444	Abandonné
Manjola	-13.16397222	49.24827778	Abandonné
Secren	-13.16375	49.22541667	Site maintenu
Ambolamenabe	-13.164676	49.243007	Nouveau site
Ambolamenabe	-13.165229	49.242318	Nouveau site
Ambolamenabe	-13.16567	49.241656	Nouveau site
Ambolamenabe	-13.166563	49.240339	Nouveau site

ANNEXE 3 : Principes d'Elinor Oström

- 1- Limite clairement définie
- 2- Une concordance entre les règles d'appropriation et de fourniture et les conditions locales
- 3- Des dispositifs de choix collectifs
- 4- Un mécanisme de surveillance interne
- 5- Des sanctions graduelles des parties concernées
- 6- Des mécanismes pour résoudre les conflits
- 7- Une légitimité reconnue par l'Etat
- 8- Composition d'un système étendu par une imbrication de structures chargées de gérer les ressources communes