



ISTOM
Ecole Supérieure d'Agro-Développement International

4, rue Joseph Lakanal, 49 000 ANGERS
Tél. : 02 53 61 84 60 istom@istom.fr



Mémoire de fin d'études

Evaluation de la ressource hydrique à utilisation agricole et de sa variabilité spatiale et temporelle pour la conservation de la ressource en eau sur le massif de la Grille sur l'île de la Grande Comore (Ngazidja – Union des Comores).



COUTANT Léana

Promotion 108

Stage effectué à la Grande Comore – Union des Comores
du 28/02/22 au 26/08/22
au sein de l'UR ADI-Suds, ISTOM

Maître de stage : Matthieu DURAND
Tuteur pédagogique : Samuel LABOISSE

Mémoire de fin d'études soutenu le lundi 07 novembre 2022

Résumé

L'objectif principal de cette étude est de spatialiser les besoins et les disponibilités de la ressource en eau pour l'agriculture sur le massif de La Grille, de l'île de la Grande Comore, et de caractériser les zones défavorisées en termes d'accès à l'eau. Afin de comprendre les facteurs qui régissent l'évolution de l'agriculture et les tendances de la disponibilité en eau à venir avec les changements climatiques, l'étude s'est également axée sur une dimension temporelle.

La problématique eau est particulièrement importante sur cette île volcanique aux sols très poreux. En effet les eaux de pluies s'infiltrent directement dans le sol, empêchant toute rétention d'eau de surface. Ainsi la disponibilité de l'eau dépend directement de la pluviométrie et ses moyens de stockage et récupération.

Il n'existe pas de diagnostic hydraulique spécifique au massif de la Grille, ni de carte d'occupation du sol actualisée et précise sur cette zone d'étude.

Une analyse diachronique a été faite pour la dimension temporelle de l'étude. Elle s'est construite sur 3 périodes différentes afin d'évaluer les changements d'occupation du sol de l'agriculture sur la forêt. La méthodologie s'est basée sur la classification supervisée et la télédétection d'images satellites.

Sur la dimension spatiale, les données de disponibilités quantitatives ont été récoltées par un inventaire des infrastructures hydrauliques et les besoins en eau des cultures de rentes ont été évaluées sur le terrain par des enquêtes.

Ces données ont été croisées avec un traitement multicritère SIG afin de spatialiser les zones ayant un accès favorisé et défavorisé à l'eau pour la pratique des cultures de rente.

Les enquêtes ont permis de faire émerger les facteurs ayant un poids sur la prédisposition des agriculteurs à irriguer leurs champs agricoles. L'eau est fournie par les infrastructures hydrauliques. Ainsi la proximité des parcelles aux citernes est un facteur important afin de pouvoir irriguer ses parcelles. L'étude démontre un manque en infrastructures hydrauliques sur les zones agricoles, limitant ainsi la possibilité d'irriguer les cultures et donc les rendements en produits maraichers. Selon des prédictions climatiques (Ministère du Développement Rural, de la Pêche, de l'Artisanat et de l'Environnement, 2006), les Comores seront en situation de famine d'ici 2025 et subiront une pénurie en eau. Les enjeux de l'eau sont donc primordiaux.

Les résultats démontrant déjà un manque en eau pour l'agriculture, sont à prendre avec alerte bis à vis des prédictions futures. Pour pallier les dérèglements futurs, il faudrait plus d'infrastructures hydrauliques couvrant les principales zones agricoles. De plus, depuis l'indépendance, les surfaces agricoles ne font qu'augmenter, suivant les tendances d'évolution démographique. Ainsi, le besoin en eau augmentera également.

Mots clés : Analyse diachronique, occupation du sol, télédétection, ressource hydrique, utilisation de l'eau, pluviométrie, traitement multicritère, analyse SIG, enquêtes, inventaires, infrastructures hydrauliques, accès à l'eau

Abstract

The main objective of this study is to spatialize the needs and availability of water resources for agriculture on the La Grille massif of Grande Comore Island, and to characterize the disadvantaged areas in terms of access to water. To understand the factors that determine the evolution of agriculture and the trends of water availability in the future with climate change, the study also focused on a temporal dimension.

The water issue is particularly important on this volcanic island with very porous soils. Indeed, rainwater infiltrates directly into the soil, preventing any retention of surface water. Thus the availability of water depends directly on rainfall and its means of storage and recovery.

There is no specific hydraulic diagnosis for the La Grille massif, nor any updated and precise land use map for this study area.

A diachronic analysis was made for the temporal dimension of the study. It was built on 3 different periods in order to evaluate the changes of land use from agriculture to forest. The methodology was based on supervised classification and remote sensing of satellite images.

On the spatial dimension, quantitative availability data were collected through an inventory of hydraulic infrastructures and the water needs of cash crops were assessed in the field through interviews.

These data were cross-referenced with a multi-criteria GIS processing (X) in order to spatialize the areas with favored and unfavored access to water for the practice of cash crops.

The interviews revealed the factors that influence farmers' predisposition to irrigate their agricultural fields. Water is provided by hydraulic infrastructures. Thus, the proximity of the plots to cisterns is an important factor in being able to irrigate their plots. The study shows a lack of hydraulic infrastructure in agricultural areas, thus limiting the possibility of irrigating crops and therefore the yields of market garden produce. According to IPCC predictions, Comoros will be in a famine situation by 2025 and will suffer a water shortage in 2025. The stakes of water are therefore essential.

The results already showing a lack of water for agriculture, are to be taken with attention in view of future predictions. To mitigate future disruptions, more hydraulic infrastructures covering the main agricultural areas are needed. Moreover, since independence, the agricultural surfaces have only increased, following the demographic evolution trends.

In this way, the need for water will also increase.

Keywords : Diachronic analysis, land use, remote sensing, water resources, water use, rainfall, multi-criteria processing, GIS analysis, interviews, inventories, hydraulic infrastructures, access to water

Resumen

El objetivo principal de este estudio es representar espacialmente las necesidades y disponibilidades de recursos hídricos para la agricultura en el macizo de La Grille de la isla de Gran Comora, y caracterizar las zonas desfavorecidas en términos de acceso al agua. Con el fin de comprender los factores que rigen la evolución de la agricultura y las tendencias de la disponibilidad de agua en el futuro con el cambio climático, el estudio también se centró en una dimensión temporal.

La cuestión del agua es especialmente importante en esta isla volcánica con suelos muy porosos. De hecho, el agua de lluvia se filtra directamente en el suelo, impidiendo cualquier retención de agua superficial. Así, la disponibilidad de agua depende directamente de las precipitaciones, de su almacenamiento y recuperación.

No existe un diagnóstico hidráulico específico del macizo de La Grille, ni tampoco un mapa de uso del suelo actualizado y preciso para esta zona de estudio.

Para la dimensión temporal del estudio se realizó un análisis diacrónico. Se construyó en 3 periodos diferentes para evaluar los cambios de uso del suelo de la agricultura sobre el bosque. La metodología se basó en la clasificación supervisada y la teledetección de imágenes de satélite.

En cuanto a la dimensión espacial, se recogieron datos cuantitativos sobre la disponibilidad mediante un inventario de las infraestructuras hídricas y se evaluaron las necesidades de agua de los cultivos comerciales sobre el terreno mediante encuestas.

Estos datos se cruzaron con un tratamiento SIG multicriterio (X) para espacializar las zonas con acceso favorable y desfavorable al agua para la práctica de los cultivos comerciales.

Las encuestas permitieron identificar los factores que influyen en la disposición de los agricultores a regar sus campos agrícolas. El agua es suministrada por las infraestructuras hidráulicas. Así, la proximidad de las parcelas a los tanques es un factor importante para poder regar sus parcelas. El estudio pone de manifiesto la falta de infraestructuras hídricas en las zonas agrícolas, lo que limita la posibilidad de regar los cultivos y, por tanto, el rendimiento de los productos hortícolas. Según las predicciones del IPCC, las Comoras estarán en situación de hambruna en 2025 y sufrirán escasez de agua en 2025. Por lo tanto, las cuestiones relacionadas con el tema del agua son primordiales.

Los resultados, que ya muestran la falta de agua para la agricultura, deben tomarse con mucha atención de cara a las predicciones futuras. Para paliar las futuras interrupciones, se necesitan más infraestructuras hídricas que cubran las principales zonas agrícolas. Además, desde la independencia, la superficie agrícola ha aumentado, siguiendo las tendencias demográficas. Por lo tanto, la necesidad de agua también aumentará.

Palabras claves : Análisis diacrónico, uso del suelo, teledetección, recursos hídricos, uso del agua, precipitaciones, tratamiento multicriterio, análisis SIG, encuestas, inventarios, infraestructuras hidráulicas, acceso al agua

Table des matières

Résumé	2
Abstract	3
Resumen	4
Table des matières	5
Table des illustrations.....	6
Liste des tableaux.....	7
Liste des abréviations et sigles.....	8
Remerciements	9
Introduction.....	10
Partie I : Stratégie d'étude	15
1. Zone d'étude.....	15
2. Méthodologie générale.....	20
Partie II : Démarche scientifique Chapitre 1 : Définition de la zone d'étude	22
1. Données SIG	22
2. Traitements de la délimitation de la zone d'étude	24
Chapitre 2 : Analyse diachronique	26
1. Données et matériels	26
2. Méthode.....	28
3. Résultats.....	37
Chapitre 3 : traitement multicritère	43
1. Données et matériels	43
2. Méthode.....	44
3. Résultats.....	53
Partie III : Analyse et discussion.....	68
1. Analyses et interprétation des résultats.....	68
2. Discussion	70
Conclusion et recommandation.....	72
Bibliographie.....	73
Liste des annexes.....	75

Table des illustrations

Figure 1: courbe des températures observées entre 1960 et 1989 (source : ANACM).....	11
Figure 2 : courbe des précipitations observées entre 1960 et 1989 (Source : réseau national de stations météorologiques)	12
Figure 3 : Précipitations moyennes réparties sur l'île de la Grande Comores (Bourhane et al., 2016) (GCCA+, 2021)	16
Figure 4 : Schéma de la méthodologie générale	20
Figure 5 : Carte des 3 massifs de l'île de la Grande Comore.....	22
Figure 6 : Carte des pentes et des courbes de niveau	23
Figure 7 : Construction de l'élaboration de la délimitation de la zone d'étude.....	24
Figure 8: Délimitation de la zone d'étude	25
Figure 9: Schéma processus création cartographie occupation sol	29
Figure 10: Création du raster à plusieurs bandes.....	31
Figure 11: carte d'occupation du sol 2021	38
Figure 12 : Occupation du sol en fonction de la topographie.....	40
Figure 13: cartes d'occupation du sol ; 1960, 1991 et 2021	41
Figure 14: graphique des mouvements d'occupation du sol sur 60 ans en superficie (ha).....	42
Figure 15 : schéma de la méthodologie de l'analyse multicritère	44
Figure 16 : Carte des zones agricoles principales retenues issues du zonage.....	53
Figure 17: Carte de l'inventaire des infrastructures hydrauliques sur le massif de la Grille	59
Figure 18: carte des prédispositions à l'accès à l'eau sur le massif de la Grille	62
Figure 19: Cartes des prédispositions à l'accès à l'eau sur les zones agricoles du plateau de La Grille et de Maroni, croisés avec les données des volumes d'eau utilisés par les agriculteurs sur leurs parcelles respectives.....	65
Figure 20: Carte des prédispositions à l'accès à l'eau croisée avec l'occupation du sol agricole sur le plateau	66
Figure 21: Zones déforestées et reforestées entre 1960 et 2021	68
Figure 22: cartes des zones mises en culture de 1960 à 2021	69

Liste des tableaux

Tableau 1 : Tableau des propriétés des images satellites utilisées	26
Tableau 2 : des bandes de l'image Sentinel 2 (Montoya, 2022)	27
Tableau 3 : Tableau des bandes de l'image Landsat 5 TM	27
Tableau 4 : représentation des types d'occupation du sol utilisées pour la classification d'occupation du sol 2021	32
Tableau 5 : tableau type d'occupation du sol 2021	35
Tableau 6 : type d'occupation du sol pour l'analyse diachronique	35
Tableau 7: Matrice de confusion de la classification 2021	37
Tableau 8 Matrice de confusion de la classification de 1991	37
Tableau 9 : surface par occupation du sol	39
Tableau 10 : surface d'occupation du sol pour chaque carte	41
Tableau 11 : mouvements des classes d'occupation du sol.....	42
Tableau 12 : données quantitatives récoltées par enquêtes	43
Tableau 13 : données spatiales SIG utilisées pour l'analyse multicritère	44
Tableau 14.....	48
Tableau 15 : Tableau des critères des prédispositions à l'accès à l'eau	49
Tableau 16 : tableau de la classification des critères	51
Tableau 17 : Caractérisation des zones agricoles	54
Tableau 18 : Nombre d'agriculteurs pratiquant la culture de pommes de terre, choux, tomates, laitues et autres	56
Tableau 19 : Volume d'eau utilisés par cultures par saisons cultural selon les questionnaires	56
Tableau 20 : Caractéristiques des différentes infrastructures hydrauliques répertoriées	60
Tableau 21 : Croisements des données de volume d'eau utilisés sur l'échelle de prédispositions	63
Tableau 22 : Données des volumes d'eau utilisées pour Maroni et La Grille croisées avec l'échelle de prédisposition	65

Liste des abréviations et sigles

AOGCM	Atmosphere Ocean General Circulation Model
ARVI	Atmospherically resistant vegetation index
CNES	Centre national d'études spatiales
CRDE	Centres ruraux de développement économique
EVI	Enhanced vegetation index
FIDA	Fonds international de développement agricole
IRM	Imagerie résonance magnétique
IRT	Infrarouge thermique
ISTOM	Institut supérieur technique d'Outre-Mer
MIR	Mi Infrarouge
MNT	Modèle Numérique Terrain
NIR	Near Infrarouge
ONG	Organisation non gouvernementale
OTB	Orfeo ToolBox
PANA	Programme d'Action National d'adaptation aux Changements Climatiques
PIR	Proche Infrarouge
PNUD	Programme de développement des nations unies
QGIS	Quantum geographic information system
ROI	Region of Interest
SCP	Semi auto Classification Plug-in
SIG	Système d'information géographique
SIPI	Structure Insensitive Pigment Index
SWIR	Short-Wave Infrared
UFR	Unité de formation et de recherche
UR ADI Suds	Unité de recherche agro développement et innovations au sud

Remerciements

A travers ces lignes, je souhaite remercier l'ensemble des personnes ayant contribué au bon déroulement de cette étude et plus largement de ma formation à l'ISTOM.

Tout d'abord, merci à l'ISTOM pour ses années de formation au sein de l'école.

Merci à h DURAND, mon maître de stage, pour m'avoir accompagné dans ce stage, pour ses précieux conseils et son soutien.

Je souhaite remercier Samuel LABOISSE, tuteur de stage, pour avoir pris le temps de m'accompagner dans la compréhension de mon étude.

J'aimerais également remercier l'ONG DAHARI et Hugh DOULTON, pour m'avoir accompagné sur le terrain et m'avoir fait découvrir le massif de La Grille. Je remercie particulièrement Safina ALI, pour son apport dans l'étude et son amitié tout au long de mon terrain, ainsi que sa grande gentillesse et son accueil.

De même pour Aboubacar, Ahmed et Kadhafi qui m'ont partagé leurs connaissances et apporté leur vision du terrain et des Comores.

Je témoigne également de ma grande reconnaissance à tous les villageois de Maouéni pour leur accueil chaleureux et tous ces instants de partage que je n'oublierai jamais et sans qui cette étude n'aurait jamais été possible. Je remercie tout particulièrement Moustoifa et Abdillah pour m'avoir emmené dans les forêts et les champs agricoles à la découverte de cette magnifique région.

Enfin, je souhaite remercier ma famille et mes amis, qui ont toujours su m'accompagner et me soutenir, m'écouter et m'appuyer dans mes choix. Mes parents pour avoir participé à mes études, sans lesquels je n'aurais jamais pu faire l'ISTOM.

Esteban Loisy, Pauline Brossat et Jeanne Liquier pour m'avoir aidé à la relecture de ce mémoire et pour leurs soutiens tout au long de ces années.

Introduction

Contexte scientifique général

Changements climatiques et impacts sur la ressource en eau

Le changement climatique a déjà eu divers impacts négatifs sur les systèmes humains, notamment sur la sécurité de l'eau et la production alimentaire (IPCC, 2022).

Selon le dernier rapport du GIEC (2022), les changements climatiques vont entraîner des répercussions significatives sur le cycle de l'eau, influençant l'humidité, la sécheresse, les zones côtières et les océans. Le stress hydrique se fera de plus en plus ressentir alors que déjà 50% de la population mondiale y est soumise (Ministère du Développement Rural, de la Pêche, de l'Artisanat et de l'Environnement, 2006).

Malgré un stress hydrique et une baisse de la disponibilité en eau, l'utilisation de l'eau s'est accrue au cours des dernières décennies dans la plupart des pays (Ritchie & Roser, 2017). Cela s'explique par la croissance démographique et les changements de mode de vie, provoquant parallèlement une augmentation des besoins (Bates *et al.*, 2008).

La ressource hydrique est une ressource essentielle à la vie humaine, elle a plusieurs utilisations; en eau potable, en eau à utilisation agricole pour l'irrigation, en eau ménagère et industrielle. L'irrigation représente environ 70% de la totalité des prélèvements d'eau dans le monde et plus de 90% de la consommation. Les terres irriguées génèrent 40% de la totalité de la production agricole. Cette utilisation joue donc un rôle majeur dans la consommation en eau.

La consommation d'eau, en particulier pour l'irrigation, augmente avec la température et diminue avec les précipitations. Mais l'utilisation de l'eau est influencée non seulement par des facteurs climatiques mais également anthropiques. En effet, les principaux facteurs influençant l'utilisation de l'eau pour l'irrigation (hors changements climatiques) dans l'avenir sont; l'étendue de la superficie irriguée, le type de culture, l'intensité et l'efficacité de l'utilisation de l'eau d'irrigation (Bates *et al.*, 2008).

La ressource en eau sur le continent Africain et la région de l'Afrique de l'Est

L'eau est l'un des principaux problèmes actuels et futurs auxquels est confrontée l'Afrique. L'approvisionnement en eau n'est pas également accessible sur le continent, étant donné sa répartition géographique naturelle irrégulière.

Selon le rapport du GIEC, d'ici 2025, la disponibilité en eau basée sur l'augmentation de la démographie sans tenir compte de la variation des ressources en eau due aux changements climatiques, devrait être inférieure à 1 000m³ /personne/an dans 9 pays, principalement en Afrique de l'Est et du Sud. De plus, une estimation indique une augmentation de la proportion de la population africaine qui pourrait être confrontée à un stress hydrique et à une hausse de la pénurie d'eau de 47% en 2000 à 65% en 2025 (Ashton, 2002).

L'Afrique de l'Est fait face à un phénomène d'intensification du cycle de l'eau, avec des pluies plus intenses mais aussi des sécheresses plus dures durant les saisons sèches.

En ce qui concerne l'océan Indien, les analyses montrent que le réchauffement était de 0,24 à 0,5°C par décennie pendant la période de 1971 à 2004 (Bates *et al.*, 2008).

Les Comores, un archipel soumis aux effets des changements climatiques de l'Afrique de l'Est et de l'océan Indien

La variabilité climatique exerce une influence négative tant sur la quantité et qualité des ressources en eau par la dérégulation des précipitations.

Les Comores, un archipel insulaire, dans l'océan Indien, est soumis aux changements climatiques des régions de l'Afrique de l'Est et des petites îles de l'océan Indien.

Au cours des trente dernières années, l'archipel a subi une augmentation de la température moyenne de l'ordre de 1°C (voir figure 1), des précipitations irrégulières avec un décalage des saisons et des sécheresses prolongées entraînant des pénuries d'eau (voir figure 2). La hausse de la température exerce une influence directe sur le cycle de l'eau, car elle entraîne une hausse de l'évapotranspiration réduisant donc le taux de réalimentation des nappes. Sur la figure 2, on peut voir qu'entre 1960 et 1975 il y a eu une diminution des précipitations et qu'à partir de 1976, une nette augmentation des précipitations suivie d'une baisse avec fortes irrégularités (Ministère du Développement Rural, de la Pêche, de l'Artisanat et de l'Environnement, 2006).

Malgré l'absence de données après 1989 permettant d'apprécier l'évolution des précipitations, les observations actuelles et les fluctuations passées observées laissent penser que cette tendance devrait se poursuivre dans l'avenir. Cependant, selon le GIEC à travers les projections du Modèle de Circulation Générale Atmosphère-Océan (AOGCM), les scénarios de changements climatiques pour les petites îles de l'Océan Indien, pour la période 2040-2069, indiquent une augmentation de la moyenne annuelle des précipitations de 3,1% (+ ou - 0,45%) avec cependant une diminution qui varie entre -2,6 et -1,8 % pendant les périodes sèches (juin-août). Selon les projections réalisées lors de la communication nationale initiale, la température moyenne annuelle augmentera de 1°C à l'horizon 2050. Les scénarios du GIEC pour les températures, à l'échelle des îles du sud-ouest de l'océan Indien, indiquent eux, une augmentation de 2,10°C à l'horizon 2040-2069 (Ministère du Développement Rural, de la Pêche, de l'Artisanat et de l'Environnement, 2006).

L'irrégularité des précipitations s'accompagne d'un raccourcissement de la durée de la saison des pluies de 6 à 3 mois voire 2 en faveur de la saison sèche avec une incidence sur les microclimats locaux. L'indice d'aridité s'est alors accru, passant de 12 à 14, confirmant la persistance de la sécheresse. Malgré cette baisse moyenne globale en termes de pluviométrie, il se trouve que durant la saison des pluies, le cumul des pluies est de plus en plus important, générant de violentes pluies torrentielles (Ministère du Développement Rural, de la Pêche, de l'Artisanat et de l'Environnement, 2006).

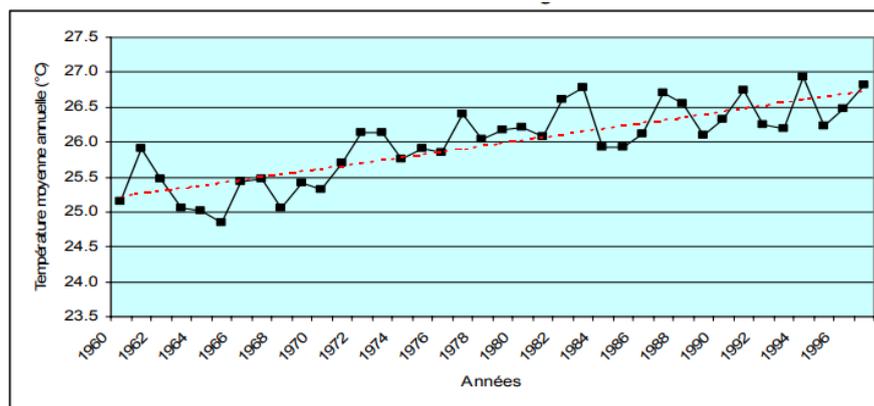


Figure 1: courbe des températures observées entre 1960 et 1989 (source : ANACM)

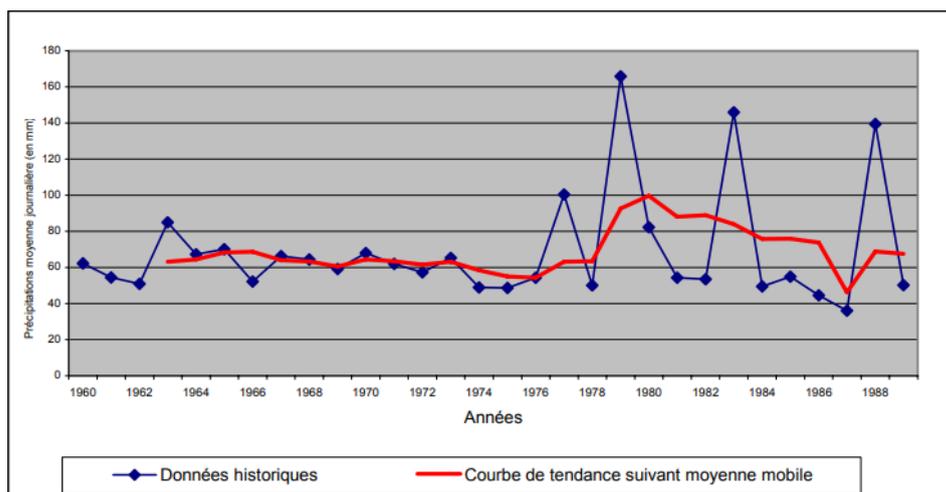


Figure 2 : courbe des précipitations observées entre 1960 et 1989 (Source : réseau national de stations météorologiques)

Impacts sur le domaine agricole des Comores

Aux Comores l'agriculture est strictement pluviale. Ainsi, les changements du cycle de l'eau ont un impact direct dans le secteur agricole avec des phénomènes de sécheresse et des retards de saisons.

Les différents phénomènes évoqués de sécheresses, d'irrégularités de précipitations et modifications des saisons, auront sur le plan agricole l'effet d'accentuation de la pénurie en eau. Compte tenu de cette situation et des projections démographiques, l'enquête EIM 2004 estime que les ressources en eau par habitant diminueront de plus de 25% si aucune mesure n'est entreprise. Ces prévisions sont proches de celles établies par la Commission Economique des Nations Unies pour l'Afrique, l'Avenir de l'Environnement Mondial 2000, le PNUE et EarthScan (1999). Ces prévisions indiquent que les Comores plongeront dans une situation de pénurie en eau en 2025 (Ministère du Développement Rural, de la Pêche, de l'Artisanat et de l'Environnement, 2006). Il est également prédit une accélération de la perte de fertilité et de la dégradation des terres cultivées se traduisant par une famine chronique.

L'accroissement de la population et la pauvreté, le déboisement et la déforestation à des fins agricoles auront pour effet l'extinction de ce qui reste du patrimoine national de biodiversité. En effet à la grande Comore la forêt a réduit de 3,1 % entre 1974 et 1985 et le taux de déboisement a atteint 36% (- 5000 ha) (Ministère du Développement Rural, de la Pêche, de l'Artisanat et de l'Environnement, 2006).

Zones vulnérables

Sur l'île de Grande-Comore, la majorité des sols dégradés se situent sur le Nord-Ouest, l'Est et le Sud qui sont aussi les régions les plus peuplées. Ces régions sont également les moins arrosées de l'île. L'agriculture comorienne étant strictement pluviale, les cultures dans ces zones souffrent plus fortement du déficit en eau que le reste des régions agricoles du pays.

Les zones particulièrement vulnérables sont les régions à faible pluviométrie, situées à l'Est de l'île.

C'est donc dans ce contexte impacté par de nombreux changements et dérégulation climatiques, que l'étude s'insère.

Objectifs de l'étude

Les enjeux de la ressource hydrique pour cette étude sont agricoles et environnementaux. Agricole, pour maintenir une sécurité alimentaire avec les cultures vivrières et pour créer du revenu avec les cultures rentières.

Environnemental, afin de préserver le massif forestier de la Grille qui peut avoir un impact sur le cycle de l'eau, et soutenir des services écosystémiques pour l'agriculture (auxiliaire de cultures, ombrage, humidité, matière organique, etc.).

Les pressions qui pèsent sur la ressource hydrique sont ; sa disponibilité brute sur le court et long terme, conditionnée par le climat et le cycle de l'eau. Ainsi que l'utilisation anthropique de cette ressource pour répondre aux besoins humains, ici agricoles.

L'étude va tenter d'établir un état des lieux de la disponibilité et de l'utilisation de l'eau pour l'agriculture sur le massif de La Grille à Grande Comore, et comprendre ses liens avec son environnement.

Pour répondre aux objectifs, il faut premièrement déterminer quelle place prend l'agriculture et quel type d'agriculture requiert la pratique de l'arrosage.

Nous allons également étudier la gestion et l'utilisation de l'eau sur des zones agricoles qui seront prédéfinies. Dans le cadre de la production maraîchère (culture de rente), nous tenterons d'identifier les facteurs influençant l'accès à l'eau pour les agriculteurs.

Ensuite, d'un point de vue de gestion de l'espace, nous déterminerons les zones agricoles ayant un accès favorisé et défavorisé à l'eau et la place que celles-ci prennent et ont pris sur les espaces de forêt.

Les besoins et les disponibilités en eau pour l'agriculture seront quantifiés et permettront de répondre à la question de quelles infrastructures de quels volumes faudrait-il mettre en place afin de favoriser l'accès à l'eau sans entraver la ressource naturelle hydrique et forestière.

Les objectifs principaux directs pour répondre aux précédentes questions sont :

- **Cartographier les zones** en disponibilité hydrique (dites cultivables) et les zones en manque hydrique (dites difficilement cultivables), les zones déforestées et agricolisées.
- Caractériser les liens existants entre la ressource hydrique avec **l'environnement naturel et l'agriculture** sur le massif de la Grille.
- Caractériser la disponibilité et la pression existantes sur l'eau d'un point de vue agricole
- Identifier les facteurs limitant la disponibilité de la ressource en eau

Cadre institutionnel

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'un stage de fin d'études de l'école d'ingénieur ISTOM d'Angers (Ecole d'Ingénieur en Agro-développement à l'International). Elle fait partie intégrante du projet de Recherche HYDRO-GRILLE porté par Matthieu DURAND, Enseignant-chercheur appartenant à l'UR ADI-Suds de l'ISTOM, en partenariat avec l'ONG Dahari et l'UFR des Sciences et Techniques de l'Université de Moroni, et qui vise à évaluer les ressources en eau et leur variabilité sur le massif forestier de la Grille et à tester des scénarios pour optimiser la gestion de l'eau dans un contexte de changement climatique global. Le projet de Recherche a bénéficié d'un financement de l'Ambassade de France en Union des Comores à hauteur de 10 000 €.

Organisation du mémoire

Le mémoire s'organise en 3 parties :

Le **Partie I** présente la démarche scientifique menée afin de répondre aux objectifs précités. Le matériel et les méthodes d'analyses utilisés au cours de ce travail de stage seront présentés ainsi que la zone d'étude.

La **Partie II** s'articule autour des 3 grandes étapes de la démarche scientifique menée : Le **Chapitre I** pose les limites spatiales du site d'étude. Le **Chapitre II** rend compte de l'analyse de l'occupation du sol par télédétection et l'analyse diachronique de cette dernière sur le Massif de la Grille ; le **Chapitre III** traite de l'analyse multicritère qui spatialise les besoins et la disponibilité en eau ainsi que les facteurs permettant de faciliter l'accès à cette ressource. Et finalement dans le **Chapitre III** sont exposées les données et les résultats obtenus ainsi que la réponse aux objectifs.

Enfin la **Partie III** clôture ce travail par une discussion des résultats et de la stratégie d'étude faisant apparaître quelques recommandations sur le plan agricole est les études à venir.

Partie I : Stratégie d'étude

1. Zone d'étude

1.1. Cadre géographique de l'île de la Grande Comore, Ngazidja

L'île de Ngazidja, aussi appelée Grande Comore, fait partie d'un archipel situé sur la partie Nord du canal du Mozambique entre Madagascar et le Mozambique. Cet archipel des Comores comprend 4 îles ; Ngazidja (Grande Comore), Ndzouani (Anjouan), Mwali (Mohéli) et Maoré (Mayotte) (Nougier, Cantagrel & Karche, 1986).

Néanmoins, l'union des Comores ne comprend que Ngazidja, Ndzouani et Mwali depuis 1975. En effet, à la suite de la colonisation et selon l'administration française, Maoré est un département d'outre-mer Français. L'île ne fait donc pas parti de l'union des Comores, même si elle est revendiquée comorienne par la population comorienne (PNUD, 2010).

La zone où se situe l'étude est dans le Nord et comprend plusieurs régions ; Mbude, hamanvou Hamahamet, Dimani. Avec les villages de Helendje, Diboini, Maouéni, Ivembéni, Dimadjou et Batou.

1.2. Un relief issu de formation volcanique

L'archipel des Comores a surgi du canal du mozambique au Miocène (23 à 5 millions d'années) après la dislocation du continent Gondwana, causant la séparation de Madagascar et de la côte Est Africaine (Charlotte, s. d.). Cet émergement est lié à la présence d'un hotspot (point chaud), dans le canal du Mozambique, au-dessus duquel se déplace la plaque africaine de l'Ouest à l'Est. Ainsi, l'île de Mayotte étant la plus à l'Est est la plus ancienne, et l'île de Grande Comore, la plus à l'Ouest est la plus récente. Etant la plus récente, c'est la seule ayant un volcan actif, le Karthala.

La barrière de corail existante à Mayotte et embryonnaire sur Anjouan, Mohéli et Grande Comores, témoigne des temporalités d'apparition différentes des 4 îles de l'archipel (Charmoille, 2013).

En plus d'être la plus jeune, l'île de la Grande Comore, aussi nommée Ngazidja, est également la plus grande (1025 km²) de l'archipel et la plus haute avec le massif du Karthala et son point culminant à 2361 m d'altitude.

Elle est constituée par des formations volcaniques à différentes phases d'éruptions issues de la phase supérieure Quaternaire constituées de roches compactes vacuolaires.

Les formations les plus caractéristiques de l'île sont les coulées à scories et les cônes adventifs de projection (Bourhane *et al.*, 2016).

L'île est composée de 3 principaux volcans boucliers de type basaltique dominant : Il y a le massif de M'Badjini qui est le plus ancien et donc le plus altéré se situe au Sud. Le massif du Karthala, volcan toujours actif, qui couvre deux tiers de l'île et est le plus récent. Puis d'âge intermédiaire, le massif de la Grille qui couvre la moitié nord de l'île, culminant à 1087 m d'altitude, il est moins altéré que M'Badjini, caractérisé par des pentes douces et plusieurs cônes adventifs (Bourhane *et al.*, 2016).

Le rift ayant formé le massif de la Grille est de type hawaïen, c'est-à-dire essentiellement formé par épanchement de laves. Les coulées de lave récentes et anciennes ont formé des roches basaltiques (J.-L. Guébourg, 1994).

La topographie du massif s'aplanit vers 900 m d'altitude mais est clairsemée de dômes et de scories, issues des rejets lors des phases d'activités des cratères adventifs (E.J. Adjanohoun, 1982).

1.3. Un climat tropical humide, avec une pluviométrie inégalement répartie

Les Comores se situent sous un climat tropical humide sous influence océanique avec de forts contrastes locaux marqués par des microclimats du fait de l'influence du relief sur la pluviométrie (Charmoille, 2013). Ainsi les précipitations suivent différentes tendances, temporellement et spatialement. Le climat est caractérisé par deux saisons :

- Saison humide et chaude dite saison des pluies ; de novembre à avril avec de forts épisodes pluvieux, une chaleur humide. La température moyenne est de 27 ° C (entre 23 et 35°C).
- Saison sèche et fraîche dite saison sèche ; de mai à octobre, se caractérise par une faible température et humidité mais avec la quasi-permanence des vents. La température moyenne est de 23 à 24°C avec un minimum de 18°C et un maximum de 24°C.

La pluviométrie moyenne de la Grande Comore varie de 1500 mm (côtes Nord Est) à 4000 mm (côtes sud-Ouest) par an. Elle est inégalement répartie dans le temps et l'espace, influencée par l'altitude et l'exposition aux vents dominants. Cette répartition inégale est expliquée par la présence des vents dominants en provenance de l'Ouest ; Kashikazi venant du Nord-Ouest et Kusi venant du Sud-Ouest. Les massifs bloquent ainsi les masses d'airs humides sur la face Sud – Ouest de l'île durant la saison sèche dû à l'effet orogénique du Karthala (Ministère du Développement Rural, de la Pêche, de l'Artisanat et de l'Environnement, 2006). Le massif montagneux de Ngazdija génère plus de 50 microclimats locaux avec un fort contraste entre les versants sous le vent et les autres versants (IRAT, 1974).

Sur les trois îles, la Grande Comore est l'île avec le plus de pluviométrie dû à son relief plus élevé du Karthala et sa situation la plus à l'Ouest de l'archipel. Les températures varient autour de 25°C en haute altitude et 28°C en basse altitude en moyenne annuelle. La température diminue de 0.7°C tous les 100m. Ainsi les quatre villages bordant la Grille, ont une température annuelle plus basse que la moyenne, à 21.3°C (Charlotte, s. d.).

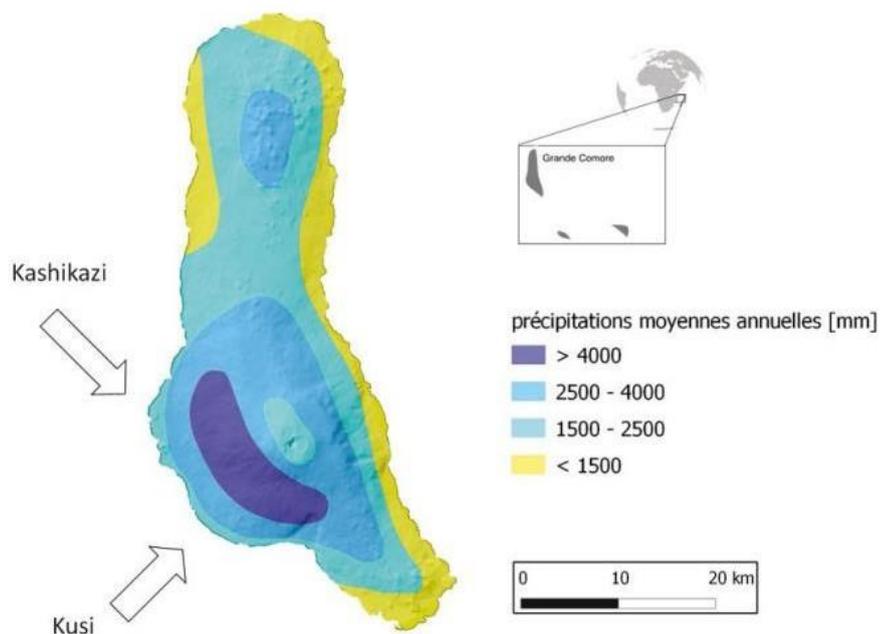


Figure 3 : Précipitations moyennes réparties sur l'île de la Grande Comores (Bourhane et al., 2016) (GCCA+, 2021)

1.4. Particularités hydrologiques et hydrogéologiques de l'île de La Grande Comore

Sur les îles volcaniques de type point chaud, les eaux ont tendance à s'infiltrer rapidement et profondément dans le sol. Les nappes d'eaux souterraines se situent ainsi souvent à un niveau proche de celui de la mer, augmentant les chances de salinisation des eaux douces (Comte *et al.*, 2016).

Ce phénomène est flagrant sur l'île de la Grande Comore, où le réseau hydrographique de surface est inexistant en raison de la porosité des roches volcaniques qu'il s'agisse de basalte fissuré ou de scories. En effet, 57 à 63 % des précipitations annuelles s'infiltreraient dans le sol aboutissant à un grand volume d'eau souterraine (Marini 1990 ; Ragot 2007 ; Mohamed 2012).

Le bilan hydrologique réalisé par Marini, 1990 évalue une évapotranspiration à 35% des précipitations, et un taux de ruissellement à 5%. Le volume d'eau souterraine annuellement renouvelable est évalué entre 0,2 et 0,5 milliard de mètres cubes (Bourhane, 2014).

Dans les zones d'altitudes de la Grande Comores, se trouvent des aquifères perchés, notamment sur le massif de la Grille. Des coulées de laves altérées et des dépôts pyroclastiques peuvent former des couches imperméables capables de soutenir des nappes d'eau souterraines formant des sources. (Bourhane *et al.*, 2016). Ces sources existent principalement sur le massif de la Grille et le massif de M'badjini. Les exutoires des sources fournissent une eau douce et potable. Les débits sont assez faibles, mais la source de Bondé située dans les hauteurs de Maouéni est la plus importante (GCCA+, 2021).

Les principales sources sur le massif de la Grille sont : la source de Bondé, de Mkoudoussi et de Hamwidzi (DGME, 2013).

La source de Bondé a un débit faible en saison sèche et fort en saison des pluies. Elle est alimentée par une nappe perchée située en profondeur sous le plateau de la Grille. Elle alimente le village de Maouéni (Bourhane, 2014).

1.5. L'agriculture et son insertion dans le paysage

En 2017, l'agriculture représentait 57% des emplois sur l'île (Banque mondiale, 2018). L'agriculture est divisée en deux activités, d'une part elle concerne la majorité de la population pour la production vivrière qui représente la majorité d'alimentation quotidienne des ménages comoriens. D'une autre part, les cultures maraichères sont apparues dans les années 1991 et ont pris de plus en plus de place dans l'agriculture jusqu'à constituer une source de revenu chez les agriculteurs qui la pratiquent. Les cultures maraichères sont aussi appelées « culture de rente » car elles nécessitent une trésorerie et produisent un revenu. Elles sont destinées à la vente et ne sont généralement pas consommées par les agriculteurs (Ni, 2019). C'est également la seule culture demandeuse en intrants, que ce soit en eau, en fertilisants ou pesticides. Afin d'être pratiquée, elle doit être irriguée contrairement à la culture vivrière.

Le terme employé pour les cultures de rentes – maraichère, sera « maraichage », car c'est le terme utilisé par tous les agriculteurs de l'île et également par les différents organismes qui travaillent à Grande Comore. Cela permet de faciliter les traitements de données.

Selon le diagnostic agricole réalisé en 2019 par Laura Ni sur la région Maouéni Mbude (Ni, 2019), l'agriculture de la zone se découpe en 3 étages agroécologiques importants (voir annexe 5) :

- Milieu de versant : 400 à 600 m d'altitude, pente douce
- Haut de versant : 600 à 900 m d'altitude, pente forte
- Plateau de la Grille : 900 à 1100 m d'altitude, zone planes et cônes adventifs.

Un étage agroécologique se rapporte à une étendue de terres possédant des caractéristiques homogènes vis-à-vis de son aptitude et sa potentialité en termes de production agricole et d'impact

environnemental en fonction de la topographie et l'altitude. C'est une ressource en terres définie en termes de climat, géomorphologie, sols, couvert végétal, etc. (FAO, 1997).

En milieu de versant, se trouve une agriculture plutôt arboricole et vivrière. En haut de versant, les forêts sous plantées peuplent les pentes fortes, tandis que les pentes faibles sont peuplées par du maraichage.

Le plateau est formé de deux coulées de lave (récentes et anciennes). Ce relief plat est interrompu par des cratères adventifs. Sur les zones planes sont cultivées principalement les cultures maraichères en rotation avec des tubercules. Sur les cônes à faible pente, ce sont les tubercules qui sont cultivés et sur les fortes pentes ce sont plutôt des agro forêt sous plantées de bananiers taros (Ni, 2019).

Ainsi les pentes et l'altitude de la zone, exercent une forte influence sur les types de cultures et les types d'occupations du sol.

Les coulées anciennes du plateau ainsi que les cônes à pente douce sont très largement spécialisées en cultures maraichères. Ces cultures à haute valeur ajoutée par surface sont pour la plupart fortement consommatrices en intrants de synthèse (engrais, fongicides et insecticides). Le coût de ces intrants en fait un produit réservé aux agriculteurs possédant une trésorerie suffisante pour pouvoir les acquérir. La culture maraichère est réalisée à l'aide de l'utilisation importante d'intrants de synthèse (Ni, 2019).

Les cultures vivrières sont constituées de manioc, patates douces, taros, bananiers et ne nécessitent aucunes trésoreries particulières. Les cultures dites maraichères sont constituées de choux, tomates, pommes de terre, carottes, laitues et autres légumes. Elles nécessitent toutes une trésorerie et des intrants sauf la carotte. Mais fournissent toutes un revenu.

Le calendrier cultural de ces cultures est axé en fonction des saisons. Pour le maraichage, les semis ont lieu à la fin de la saison des pluies afin de bénéficier de l'humidité du sol et des pluies restantes, et de limiter les dégâts que peuvent causer les pluies torrentielles.

1.6. Mœurs et coutumes influençant les pratiques agricoles

Aux Comores, bien que le système soit patriarcal, la matrilinearité domine dans la société comorienne. Ce n'est pas le mari ou le père qui a la figure d'autorité dans la famille, mais l'oncle maternel. C'est-à-dire que la transmission de propriété se fait envers le côté maternel de la famille. Néanmoins, la femme ne cultive généralement pas la parcelle. En effet, avant son mariage la parcelle est exploitée par les hommes de sa famille puis après son mariage, par son mari. Il existe tout de même des héritages patrilinéaires et/ ou un partage égalitaire entre les filles et les fils (Ni, 2019).

Les deux parents participent aux travaux agricoles dans un ménage comorien. Le travail du sol, de plantation, de sarclage, d'irrigation, semis, etc. est réalisé par l'homme. Les femmes s'occupent de la récolte.

Les saisons des semis des cultures vivrière et maraichère, en plus de dépendre du climat, dépendent également de facteurs culturels et religieux. En effet, la religion musulmane est très importante aux Comores. La totalité des Comoriens sont musulmans et l'Etat est islamique.

Ainsi, les cultures vivrières occupent une place importante lors de la période du ramadan, elles constituent la principale alimentation lors des coupés du jeûne. Ainsi les agriculteurs programment leur planning cultural pour que la récolte se situe au début du ramadan. Cependant, il faut noter que la date du ramadan change chaque année. Il est donc probable que la période de forte intensité de récolte des cultures vivrières soit décalée chaque année.

Les cultures maraichères sont programmées de sorte que les récoltes se déroulent lors de la saison des grands mariages et de l'arrivée des « je viens » (juin à septembre), les « je viens » sont des franco-

comoriens vivant en France. C'est la période où la demande en produit maraîcher est la plus forte de l'année. Les grands mariages, sont fréquents aux Comores et sont une porte d'entrée dans la notabilité pour les hommes. C'est un évènement culturel très important et qui nécessite une très grande trésorerie. C'est pour cela que chaque année lors de la période des « je viens », plusieurs grands mariages ont lieu (Ali & Mgomri, 2013.).

2. Méthodologie générale

La méthodologie utilisée a pour objectif de marquer les zones avec une disponibilité favorisée et défavorisée en ressource hydrique, d'identifier les facteurs influençant l'accès à l'eau pour les agriculteurs et de quantifier spatialement les besoins et disponibilité en eau.

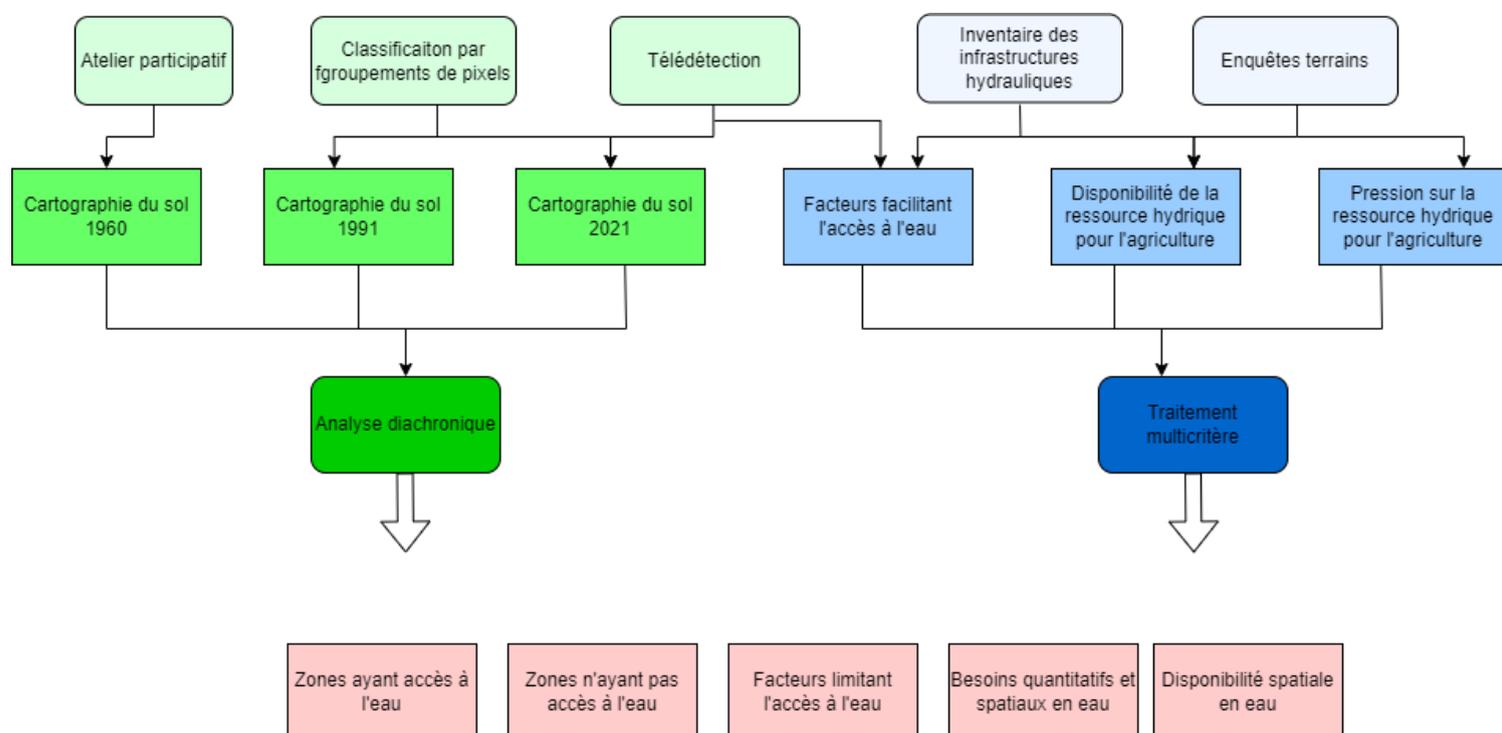


Figure 4 : Schéma de la méthodologie générale

2.1. Définition de la zone d'étude

Le massif de la Grille a plusieurs significations dans la région. C'est à la fois un massif forestier, un ancien massif volcanique et une zone agricole.

Le massif de la Grille représente premièrement un massif volcanique issu du Quaternaire comme évoqué dans le contexte géologique. Mais c'est également un massif composé d'une forêt en altitude. Cette forêt a subi de nombreux changements, entre déforestation pour la mise en culture de certaines terres et reforestation par des forêts artificielles d'eucalyptus.

Pour les agriculteurs, c'est un plateau agricole situé au-dessus des villages d'Ivembéni et Maouéni. C'est le nom d'un lieudit, où il y a beaucoup de maraîchage.

2.2. Analyse diachronique

Une analyse diachronique repose sur la comparaison de cartes à des périodes différentes (Bonnot, 2020). Ici les cartes utilisées seront des cartes d'occupation du sol et la comparaison portera sur les types d'occupation du sol. La carte d'occupation du sol peut être définie comme la couverture biophysique de la surface des terres émergées, elle comprend la végétation et l'aménagement du territoire (El hadraoui, 2013).

L'analyse diachronique est axée sur l'évolution spatiale de la forêt et de l'agriculture dans le temps. Cela permet de mettre en corrélation les mouvements de déforestation au cours des années au profit de l'agriculture afin d'étudier l'évolution de la pression sur l'eau et de comprendre quel type d'occupation prédomine.

De ce fait, trois cartes d'occupation du sol ont été construites ; deux cartes réalisées par classification et télédétection de 1991 et de 2021 et une carte de l'époque coloniale (1950 – 1970) réalisée à dire d'acteurs.

En plus de permettre de construire cette analyse diachronique du paysage, la carte d'occupation du sol actuelle permet de spatialiser la pression existante sur la ressource en eau agricole et d'identifier les liens entre les types d'occupation du sol et la disponibilité de cette ressource.

2.3. Traitement multicritère

Le traitement multicritère va mettre en lien la pression exercée par l'agriculture avec l'occupation du sol et les enquêtes terrains en rapport avec la disponibilité en eau vis-à-vis des infrastructures hydrauliques.

Les facteurs facilitant l'utilisation de l'eau agricole seront déterminés par des enquêtes menées auprès des agriculteurs, qui permettront également de quantifier les besoins et la disponibilité en eau pour l'agriculture.

Cette analyse permettra de spatialiser les zones ayant un accès facilité à l'eau et les zones ayant un accès difficile à l'eau et ainsi de les comparer avec les données récoltées lors des enquêtes.

Ainsi, les facteurs influençant l'utilisation de l'eau et les zones ayant besoin d'infrastructures hydrauliques pour favoriser l'agriculture pourront être spatialisés et caractérisés. Avant de pouvoir mettre en œuvre les outils méthodologiques il est essentiel de délimiter la zone d'étude.

Partie II : Démarche scientifique

Chapitre 1 : Définition de la zone d'étude

1. Données SIG

1.1. Géologiques

L'île de Ngazidja comprend trois massifs volcaniques dont un toujours actif (massif du Karthala).

L'étude s'intéresse au massif de la Grille, qui est le plus au Nord de l'île et est un ancien massif volcanique inactif. Son point culminant est de 1087 m.

Pour délimiter géologiquement la zone d'étude, nous prendrons les délimitations géologiques de ce massif (Bourhane, 2014).

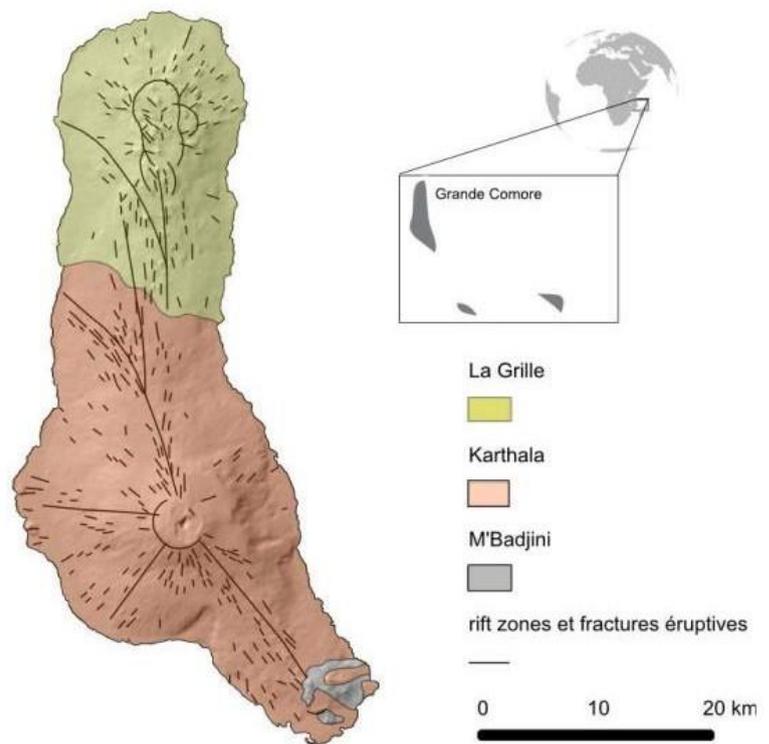


Figure 5 : Carte des 3 massifs de l'île de la Grande Comore

1.2. Topographiques

Il y a trois étages agroécologiques selon le diagnostic agraire réalisé sur la région (Ni, 2019) :

- Milieu de versants (pente douce 10%) 400 à 600 m
- Haut de versant (pente forte 33%) 600 à 900m
- Plateaux et cônes adventifs 900 à 1100 m

L'étude s'intéresse aux étages de haut de versant et plateaux / cônes adventifs. De 600m à 1100m d'altitude. L'agriculture se rencontre le plus souvent sur les plateaux. Notre étude se focalisera donc sur ces zones. Afin de délimiter les hauts plateaux, la rupture de pente a été localisée en haut de versants menant aux hauts plateaux de la Grille, à partir de 900 d'altitude environ.

Les données utilisées sont issues du MNT (Modèle Numérique Terrain) de résolution 10m, réalisé par le projet AMCC de 2019 (GCCA+, 2021). Cette donnée a été traitée en fonction des données du diagnostic agraire de la région.

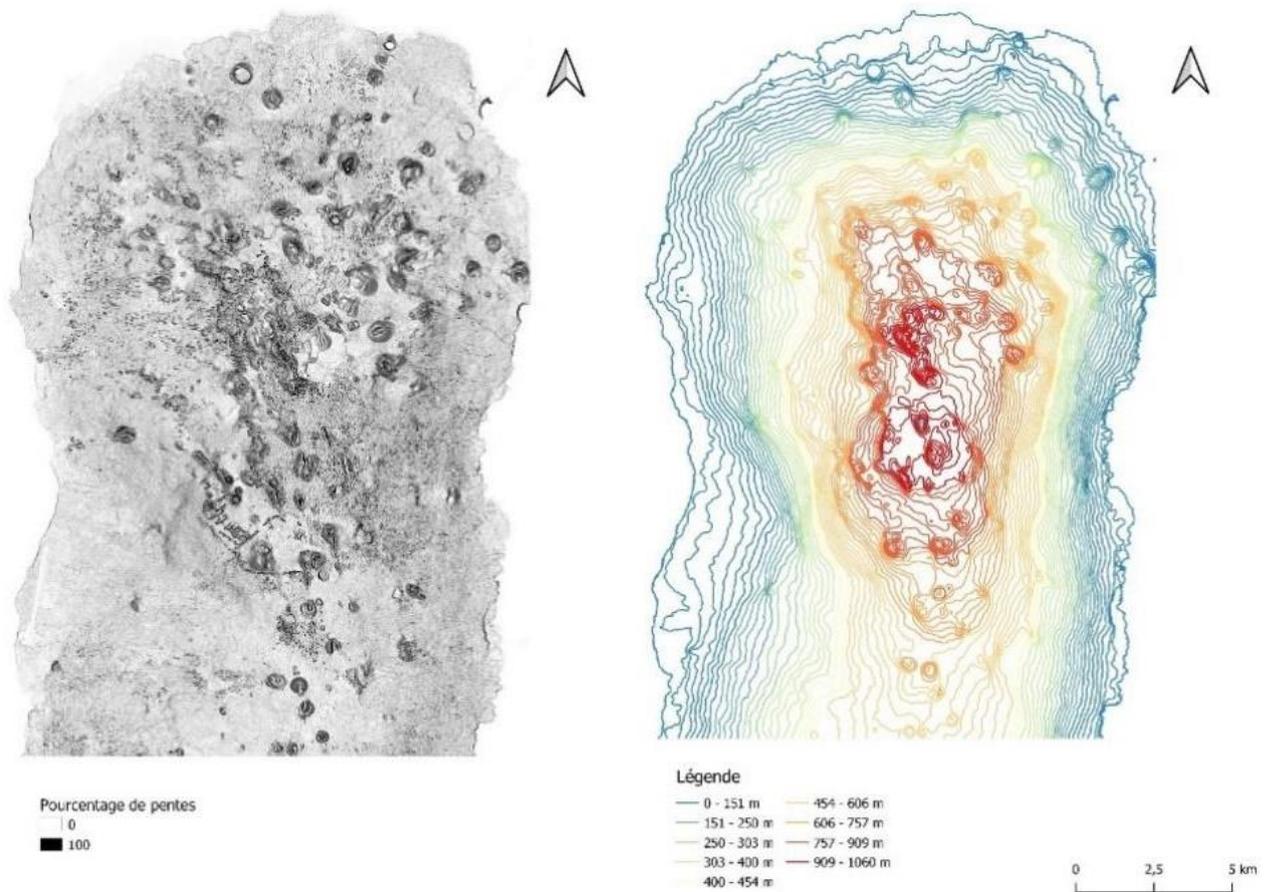


Figure 6 : Carte des pentes et des courbes de niveau

1.3. Forestières

La Grille est également un massif forestier ancien qui abrite une biodiversité endémique et indigène. L'étude portant sur une analyse diachronique de l'évolution de cette forêt dans le temps, il est nécessaire d'avoir dans la zone d'étude l'amplitude de la forêt sur les différentes décennies.

Pour cela les cartes d'occupation du sol ont permis de préciser la zone d'étude en prenant en compte l'état de la forêt de 1940/1975, de 1991 et d'aujourd'hui. Les données utilisées seront les zones forestières issues de la carte d'occupation du sol de 1950-1975, de 1991 et de 2021.

1.4. Agricoles

L'étude porte sur une évaluation de la ressource en eau à des fins agricoles. Il est donc nécessaire de représenter les zones agricoles dans la zone d'étude. Ainsi la carte d'occupation du sol actuelle va permettre de localiser les zones agricoles. Le zonage agricole fait en parallèle permettra également d'y introduire les zones agricoles principales et qui seront étudiées plus précisément.

2. Traitements de la délimitation de la zone d'étude

Le massif de la Grille représenté par la carte géologique, comprend la majorité de la partie Nord de l'île, ce qui a permis de se concentrer sur cette partie-là de Grande Comore.

Les différentes couches ont été superposées sur le logiciel QGIS afin de réaliser un traçage comprenant les facteurs de délimitations importants à l'étude (4).

L'étude se situe sur le massif de la Grille et les principales cultures du massif de la Grille se situent sur les plateaux à partir de 600 m d'altitude (1). Ainsi la topographie avec les courbes de niveaux et la carte des pentes vont permettre de faire ressortir les hauts plateaux de la Grille (2).

L'étude cherche également à évaluer les mouvements d'occupation du sol dans le temps, notamment l'évolution de la forêt qui est dépendante de l'évolution de l'agriculture (3).

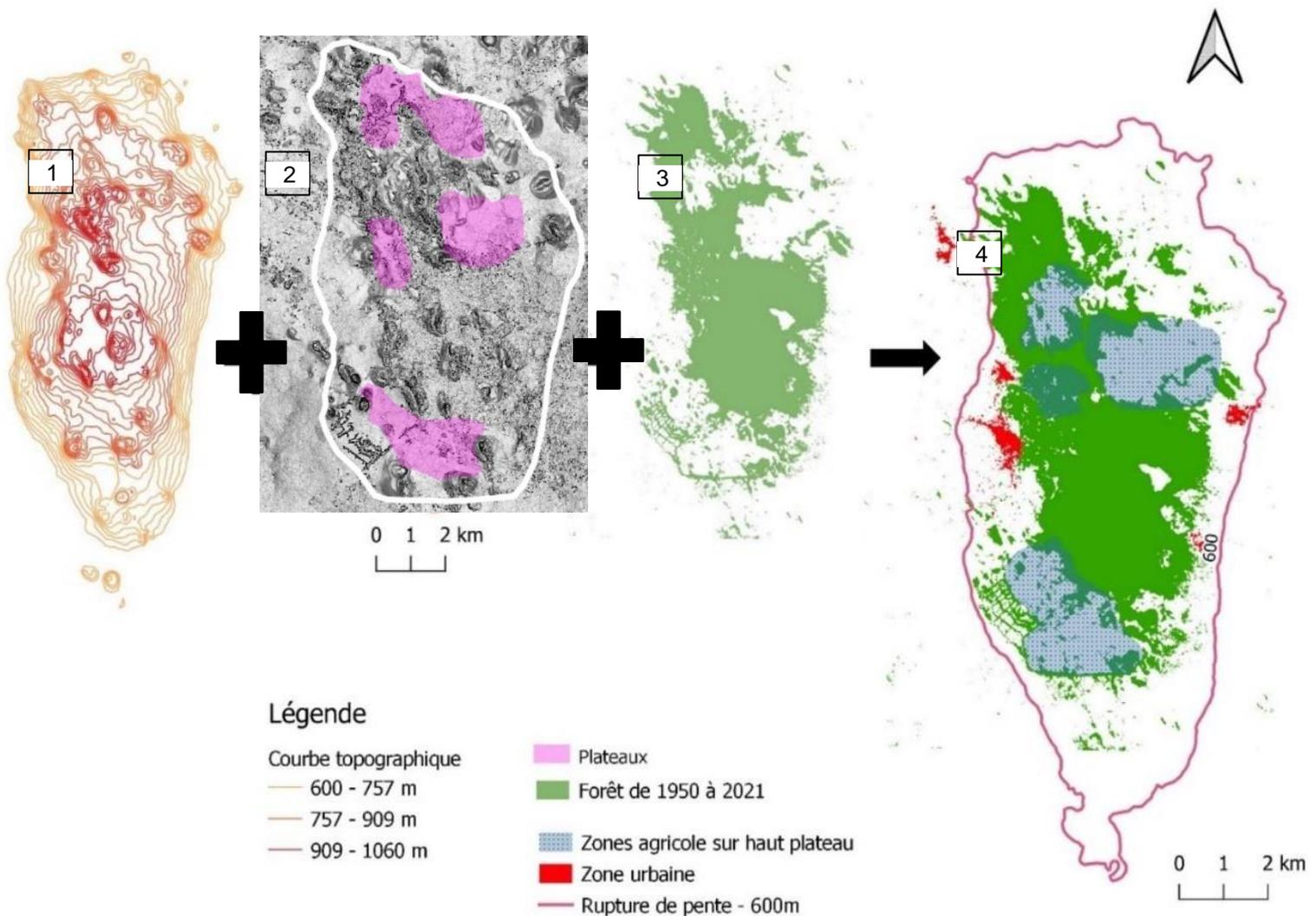


Figure 7 : Construction de l'élaboration de la délimitation de la zone d'étude

La superposition de ces couches donne une carte représentant les différents éléments nécessaires à la délimitation de la zone d'étude (4). Le traçage de la limite s'est fait en prenant toute la partie forêt, tous les plateaux, les zones agricoles au delà de 600 m d'altitude et au-dessus de la rupture de pente.



Figure 8: Délimitation de la zone d'étude

La surface de l'étendue de la zone d'étude est de 5 653 hectares représentant une grande partie du massif de la Grille, et se situe à partir de 600m d'altitude.

Chapitre 2 : Analyse diachronique

L'analyse diachronique s'est faite sur l'étendue de la délimitation de la zone d'étude expliquée précédemment et sur 3 périodes dont actuelle afin d'évaluer les tendances de changements d'occupation du sol.

La méthodologie choisie s'appuie sur une méthode de classification supervisée, sur la télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG).

1. Données et matériels

1.1. Données satellitaires

Les données satellites ont été téléchargées sur le site earthexplorer.usgs.gov. (« EarthExplorer », 2022)

Le choix de la date des images et de leurs satellites a principalement été fait par contraintes :

- Absence de couverture nuageuse sur la zone d'étude
- Période de saison sèche (mai à septembre), permet de mieux distinguer les différences spectrales entre les éléments paysagers (Oszwald *et al.*, 2010) et permet d'avoir des images avec nébulosité et biais atmosphériques réduit (Oszwald *et al.*, 2010; Louise, 2012).
- Disponibilité d'images sur la zone d'étude
- Différentes périodes afin de réaliser l'analyse diachronique

Tableau 1 : Tableau des propriétés des images satellites utilisées

Date	Identifiant	Couverture nuageuse	Date et heure d'acquisition	Satellite	Catégorie	Résolution	UTM ZONE	Nombres de bandes
2021	L1C_T38LLN_A 030848_202105 19T073229	0.61 %	19/05/2021 07 :36 :31	Sentinel2 1C	L1C S2MSI1C	10 – 20 m	WGS 84 UTM 38 S	13
1991	_163068_19 910625_201701 26_01_T2	0.00 %	25/06/1991 06 :37 :53	Landsat5	T2 TM	30 m	WGS 84 UTM 38	7

1.1.1. Images Sentinel - 2021

Les images téléchargées de 2021 sont issues du satellite Sentinel 2 et de son capteur MSI. Ce choix s'est fait car les avantages d'une image Sentinel2 L1C sont sa haute résolution de 10 m et la multiplicité de ses mesures avec 13 bandes. Néanmoins les images satellites issues du capteur L1C n'ont pas subi de correction atmosphérique au préalable, mais les seules images correspondantes aux contraintes citées précédemment étaient issues du capteur L1C. (Moinard, 2018) Cette date est proche de l'année de réalisation de cette étude et donc servira pour la carte de l'occupation du sol actuelle.

Le tableau ci-dessous représente les différentes bandes radiométriques de l'image téléchargée avec ses différentes résolutions spatiale et spectrale.

Tableau 2 : des bandes de l'image Sentinel 2 (Montoya, 2022)

Sentinel 2	Résolution spectrale (μm)	Résolution spatiale (m)	Bandes
Bande 2	0.490	10	Bleu
Bande 3	0.560	10	Vert
Bande 4	0.665	10	Rouge
Bande 5	0.705	20	Bord rouge 1
Bande 6	0.740	20	Bord rouge 2
Bande 7	0.783	20	Bord rouge 3
Bande 8	0.842	10	Proche Infrarouge 1
Bande 8A	0.865	20	Proche Infrarouge 2
Bande 9	0.945	60	Water vapour
Bande 10	1.375	60	Infrarouge court
Bande 11	1.610	20	Infrarouge court 1
Bande 12	2.190	20	Infrarouge court 2

1.1.2. Images Landsat - 1991

Les images Landsat téléchargées sont issues du capteur TM de la série Landsat. Il n'y avait pas d'image disponible répondant aux contraintes avant 1991, c'est donc sur cette date que le choix s'est porté pour l'analyse diachronique. Landsat TM est le seul qui couvre cette période, c'est donc la raison pour laquelle le choix des images téléchargées en cette période s'est porté sur le capteur Landsat TM (« Landsat 5 | U.S. Geological Survey », 2022). La résolution de 30 m permet de caractériser des éléments au sol de 900m², suffisant pour identifier des zones homogènes d'occupation du sol (El HADRAOUI, 2013).

Tableau 3 : Tableau des bandes de l'image Landsat 5 TM (« Landsat 5 | U.S. Geological Survey », 2022)

Landsat 5 TM	Résolution spectrale (μm)	Résolution spatiale (m)	Bandes
Bande 1	0.45-0.52	30	Bleu
Bande 2	0.52-0.60	30	Vert
Bande 3	0.63-0.69	30	Rouge
Bande 4	0.76-0.90	30	PIR
Bande 5	1.55-1.75	30	MIR
Bande 6	10.40-12.50	120	IRT
Bande 7	2.08-2.35	30	IRM

1.1.3. Avant 1991

Il n'y a pas d'images satellites existantes avant 1991. Mais il a été jugé constructif de connaître et spatialiser les mouvements d'occupations du sol ayant eu lieu pendant et après la colonisation française (de 1886 à 1975), car c'est une période où de nombreux changements ont eu lieu sur le paysage de la Grille avec des phénomènes de déforestation et reforestation (Ni, 2019).

N'ayant pas accès à des images satellites ou aériennes antérieures à 1991, la construction de cette carte a dû se faire par perception des agriculteurs ayant connu cette période. Cela s'est fait par un atelier cartographique participatif avec des groupes d'agriculteurs âgés.

Cette carte s'est basée sur celle de 1991 et a été modifiée par les dires des agriculteurs.

1.2. Données photographiques

Les données photographiques utilisées sont des images aériennes prises lors du programme AMCC

en partenariat avec le PNUD. Le programme AMCC aux Comores de 2016 à 2019 a été réalisé dans le cadre d'une mise en place de collection de données cartographiques SIG sur les 3 îles de l'Union des Comores.

Des images aériennes à haute précision de résolution 10cm ont été réalisées par avion et caméra. Ces images précises permettent de différencier certains types de végétation, plantes, types d'infrastructures, routes, etc. (GCCA+, 2021).

Ces images permettent de mieux identifier les types d'occupation du sol pour la carte de 2021. Elles vont également servir à la validation des classifications.

1.3. Outils

Ces données vont permettre de mettre en place une méthode de classification supervisée de l'occupation du sol à l'aide de la boîte à outils Orfeo Tool Box 8.0.1 (OTB) et de QGIS 3.16. La bibliothèque de traitements d'images de télédétection OTB a été initiée par le CNES, dans le cadre du projet Pléiades (Grizonnet *et al.*, 2017). Cet outil permet le prétraitement d'images, les extractions d'indices, la segmentation et la classification d'image (CNES, 2022).

2. Méthode

Pour réaliser l'étude diachronique du paysage et la carte d'occupation du sol de 2021, la méthode de classification supervisée par groupements de pixels a été utilisée. Chaque pixel et groupements de pixels ont été classifiés dans des classes qui ont été définies à l'aide d'investigations terrains et de la littérature. Cette méthode est utilisée dans les analyses de changements d'occupation du sol et lors des paysages sous couvert forestier (Cindy Schmidt, 2020). Cette méthode a été utilisée seulement pour les images de 2021 et de 1991.

Plusieurs outils ont été utilisés. Le pré-traitement (1) est nécessaire afin de réaliser l'image raster qui sert de base lors de la classification des images 2021 et 1991. Ces images rasters seront implantées dans l'outil Orfeo Tool Box puis seront classifiées avec le modèle issu de la classification par le vecteur d'entraînement des points ROI (CNES, 2022).

2.1. Prétraitement

Le prétraitement se découpe en plusieurs étapes. Il permet de corriger et améliorer les images pour créer un raster final à N bandes regroupant plusieurs informations par pixels. Il va se faire sur QGIS 3.16.

2.1.1. Correction atmosphérique

Les images Sentinel 2 de 2021 et de Landsat 5 TM de 1991 n'ayant pas subi de correction atmosphérique doivent être corrigées manuellement avec l'outil plug-in Semi Auto-classification SCP sur QGIS 3.16. C'est un plug-in open source développé par Luca Congedo (« Semi-Automatic Classification Plugin », 2022) qui permet de prétraiter, classifier, et post traiter des images satellites. Cette correction est primordiale afin de supprimer les effets des aérosols et limiter les erreurs lors de la classification par pixel (Leroux *et al.*, 2018).

2.1.2. Mise en forme

Afin d'optimiser la performance du logiciel et ne couvrir que la zone d'étude, les rasters utilisés doivent être découpés avec l'outil raster extraction sur QGIS et une couche masque représentation l'emprise de la délimitation de la zone d'étude.

2.1.3. Calcul d'indices spectraux

Certaines classes d'occupation du sol ne sont pas visibles par photo-interprétation ni identifiable sur l'ensemble de la zone d'étude. C'est notamment le cas pour les différentes classes de forêts cachées par la canopée, elles sont indifférenciables. De ce fait, les bandes R, V, B, PIR (hors du visible) vont être utilisées pour calculer des indices spectraux qui mettent en évidence certaines caractéristiques choisies (Leroux *et al.*, 2018; Tassi *et al.*, 2021).

Les caractéristiques à mettre en évidence sont :

- Les différents types de strates arborées
- Différenciation des zones végétalisées et non végétalisées
- Efficacité en zone tropicale
- Efficacité en zone forestière avec forte canopée
- Limitations des effets atmosphériques
- Limitations des effets topographiques

De ce fait, 3 indices spectraux ont été choisis ; ARVI, EVI 2, SIPI 3. (« IDB - List of available Indices », 2022). Voir annexe 3. Les indices ont été calculés à l'aide de la calculatrice raster sur QGIS 3.16.

2.1.4. Création d'un raster multi bande

La dernière étape du pré-traitement consiste à créer un raster multi-bandes contenant toutes les bandes nécessaires au processus de classification. Ce raster contient les bandes initialement acquises avec l'image satellite, les indices spectraux calculés, et le Modèle Numérique Terrain (Leroux *et al.*, 2018).

Plusieurs combinaisons ont été testées afin de garder celle qui est la plus représentative et valide.

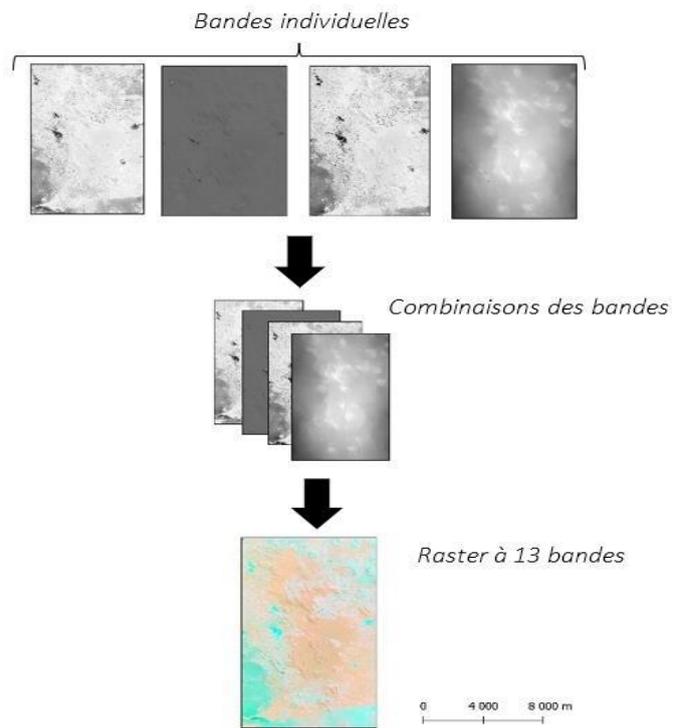


Figure 10: Création du raster à plusieurs bandes

2.2. Classification

2.2.1. Investigations terrains

Catégoriser des types d'occupation du sol seulement à partir d'une vision aérienne n'est pas assez précis, notamment pour les classes de forêts où la couverture arborée empêche une vision précise.

Des prospections terrains sont donc nécessaires afin de reconnaître les éléments paysagers et afin de relever des points GPS appartenant et représentant chaque classe.

i. Points GPS par transects

Des transects ont été réalisés sur l'ensemble de la zone d'étude et principalement en forêt, car ce sont les classes les plus difficiles à identifier par images satellites et aériennes (SARR, 2009) URL : <http://cybergeog.revues.org/22707>.

Les missions terrains se sont faites sur plusieurs semaines en parallèle d'un inventaire des espèces forestières, ce qui a permis de différencier les différents types de forêts en fonction des différences essences forestières. Ces transects ont eu pour but d'appréhender le paysage, de reconnaître les différents types d'occupation de sol et de prendre de données sous forme de points GPS.

3 méthodologies ont été utilisées pour réaliser ces transects :

- Parcours établi en avance (hors sentiers) ; prise de points GPS tous les 100 mètres et remplissage de fiche terrain.
- Parcours non établi en avance ; prise de points GPS à chaque changement d'occupation du sol

- Parcours et points GPS établi en avance par analyse des indices spectraux et des images satellites ; prise de points GPS dès que l'on rejoint le point GPS.

285 points GPS ont été récoltés, conservés en .kml, traités et classés. Seulement un nombre de points jugés représentatifs ont été analysés dans un tableur Excel.

ii. Points GPS par satellite

Les points GPS terrains ont été complétés par des points de prise issus de photo interprétation par les images aériennes à haute précision, les indices spectraux et le merge raster.

Les zones ouvertes (agricoles, urbaines, etc.) ont pu être facilement détectables par photo interprétation. Cela a permis de compléter sur les zones où il n'y avait pas eu d'excursion terrains.

iii. Détermination des classes d'occupation du sol

L'occupation du sol sur le massif de la Grille est assez hétérogène et le passage entre deux types d'occupation du sol peut se faire progressivement, rendant donc difficile la tâche. Pour cela, il a fallu discriminer et fusionner certains types d'occupation du sol.

Pour cette étude, deux typologies de classes d'occupation du sol ont été créées; une est pour la carte précise de l'occupation du sol actuel de 2021, et l'autre a été utilisée pour l'analyse diachronique de l'occupation du sol entre 1991 et 2021.

vi. Classes d'occupation du sol actuelle

Pour mettre en œuvre la classification de la carte d'occupation précise, 9 classes principales ont été identifiées suite aux repérages terrains. Certaines d'entre elles ont été regroupées afin de faciliter la discrimination des classes.

Tableau 4 : représentation des types d'occupation du sol utilisées pour la classification d'occupation du sol 2021

Macroclasses	Sous classe	Définition	Images aériennes (échelle 1 : 1000)	Images vues sol
Forêt	Naturelle	Végétation très dense, peuplement continu d'arbres, canopée fermée. +/- 80% d'espèces d'arbres indigènes et / ou endémiques. Présence d'arbres exotiques et / ou de plantes invasives faiblement existante. Pression anthropique quasi-inexistante Situés généralement en haut des collines et des calderas.		
	Dégradée	Végétation dense, peuplement semi-continu, canopée fermée. Présence d'espèces d'arbres indigènes et exotiques. Présences visibles de pression anthropiques (chemins, coupes d'arbres, charbons, agriculture faible). Présence de plantes invasives. Confusion possible avec la classe de forêt naturelle.		
	Plantée (Eucalyptus)	Forêt issue d'une campagne de reboisement en 1950, institués par les colons. Reboisement d'un peuplement entièrement d'Eucalyptus. Et sous peuplée de plantation type : Bananiers – taros. Canopée semi – ouverte		
	Sous plantée	Végétation dense avec ouverture, canopée semi-fermée. Espèces principalement indigènes / endémiques. Sous peuplé de plantation type : Bananiers taros. Confusion possible avec la classe de forêt plantée.		
Agro forêt		Végétation épars et relativement dense. Arbres essentiellement exotiques et fruitiers. Présence de cocotiers et bananiers. Arbres peu développés et présence de friches, broussailles. Principalement en moyenne altitude.		

Végétation spontanée		<p>Friche herbeuse et ou arbustives.</p> <p>Jeunes arbres inférieurs à 6m ; Canopée ouverte. Sous-bois arbustifs.</p>		
Plantation		<p>Surfaces cultivées d'étendues variables. Souvent à nues lors de la saison sèche. Présence d'arbres en haies. Regroupements des parcelles en maraichage, vivrier et en jachères.</p>		
Urbain		<p>Comprend les infrastructures urbaines, principalement les habitations.</p> <p>Confusion possible avec sol nu.</p>		
Sol nu		<p>Comprend les coulées de laves et les sols nu sans aucune présence de végétation.</p>		

vii. Classes d'occupation du sol pour l'étude diachronique

Il n'est pas possible physiquement d'acquérir des données de points GPS pour 1991 et pour la carte antérieure à 1991, et ainsi avoir une vision discriminante du paysage sur certaines classes. Il n'existe pas non plus de données terrains GPS ni d'images aériennes de cette période.

Nous partons du principe, que les classes d'occupation du sol de 2021 et des deux autres sont les mêmes.

Ainsi les ROIs de 1991 vont être faits par ortho photo avec les images satellites Landsat et les indices spectraux. Sans relevés terrain il n'est pas possible de différencier les différentes classes forêts entre elles. Les sous-classes forêt ont été fusionnées pour former la classe forêt.

L'intérêt de l'analyse diachronique est de constater l'évolution de la forêt vis-à-vis de l'agriculture sur 30 ans, il n'est donc pas nécessaire de différencier les sous-classes forêt pour cette analyse.

Toutefois, il aurait été intéressant de voir l'évolution de la forêt sous plantée et dégradée, mais le manque de données rend la tâche impossible.

Les cartes utilisées pour l'analyse diachronique du paysage auront 6 classes : Forêt, agriculture, agro forêt, végétation spontanée, urbain, sol nu.

2.2.2. Classification supervisée par groupements de pixels

Pour réaliser une classification par groupements de pixels, il est nécessaire d'entraîner un vecteur de données en vue d'obtenir un modèle comprenant les probabilités d'appartenance aux classes (El HADRAOUI, 2013).

i. Image 2021

Le vecteur d'entraînement de l'image 2021 a été créé en se basant sur les images aériennes à haute résolution, les points ROIs récoltés sur le terrain, et sur les différentes combinaisons de bandes satellites et indices spectraux. Ce vecteur comprend plusieurs polygones délimitant et représentant les différentes classes. Ce fichier permettra à l'algorithme de calculer les signatures spectrales, voir annexe3.

Pour que l'algorithme soit le plus efficient, il faut que chaque classe ait environ le même nombre de polygone et que chaque polygone est le même ordre de grandeur de nombre de pixels (Louise, 2012; Bonnot, 2020; Diédhiou *et al.*, 2020).

Tableau 5 : tableau type d'occupation du sol 2021

MC	Name	Code
1	Forêt dégradée	1-n
2	Forêt naturelle	1-n
3	Forêt sous plantées	1-n
4	Forêt plantée	1-n
5	Plantation	1-n
6	Agro forêt	1-n
7	Végétation spontanée	1-n
8	Urbain	1-n
9	Sol nu	1-n

ii. Image 1991

Pour la classification de l'image 1991, la création du vecteur d'entraînement n'a pas pu se faire à l'aide des points ROIs issus du terrain, ni par les images aériennes à haute résolution de 2019 car ces données sont inexistantes. Seulement les images satellites téléchargées et les indices spectraux calculés ont servi à la création du vecteur d'entraînement. Néanmoins les polygones du jeu de données de 2021 ont été utilisés. Ce sont seulement les polygones dont on est sûr qu'il n'y a pas eu de changements entre 1991 et 2021 qui ont été conservés. Le reste s'est fait par photo interprétation.

Tableau 6 : type d'occupation du sol pour l'analyse diachronique

MC	Name	Code
1	Forêt	1-n
2	Plantation	1-n
3	Agro forêt	1-n
4	Végétation spontanée	1-n
5	Urbain	1-n
6	Sol nu	1-n

iii. Algorithme Random forest

Cette classification supervisée a été effectuée sur le raster à multi-bandes avec le logiciel OTB dans l'outil Train Image Classifier (CNES, 2022). Cette méthode a été développée par Breiman (2001) et est utilisée pour la classification d'occupation du sol car elle est facile d'utilisation et robuste.

Le choix de l'algorithme s'est fait à l'aide de la littérature et par différents tests (CNES, 2022).

L'algorithme Random forest a été retenu après plusieurs tests avec d'autres algorithmes (SVMClassifier) qui ne se sont pas révélés représentatifs et valides. (« sklearn.ensemble.RandomForestClassifier », 2022) Cet algorithme constitue un ensemble d'arbres de décisions indépendant. Ils sont formés à partir de sous échantillons du vecteur d'entraînement constitués par un double tirage aléatoire. Les résultats de cette multitude d'arbres sont assemblés par un vote à la majorité pour obtenir le résultat final (Tassi *et al.*, 2021).

Par maximiser la réalité des résultats, les paramètres nombre d'arbres et profondeur de l'arbre ont été modifiés après plusieurs tests, afin d'avoir la meilleure classification.

2.3. Construction de la carte 1960/1975.

La construction de la carte d'occupation des sols durant l'époque coloniale, s'est faite sur la base de la carte d'occupation de 1991 par perception des agriculteurs. L'échantillon des agriculteurs à interroger, s'est fait en fonction de leur âge (minimum 60 ans), leur passé d'agriculteurs et leurs connaissances sur le territoire.

La construction de cette carte s'est faite sous forme d'un atelier avec participation active sur support d'une carte image satellite de la région en 1991 et des cartes d'occupation du sol de 1991 et 2021. Les participants devaient délimiter les zones ayant connu une déforestation, les zones ayant subi un phénomène de reforestation et les zones ayant été mises en cultures. Ces zones étaient répertoriées spatialement directement sur les cartes, ou en fonction des noms des lieux dits connus. Des points repères et les délimitations des lieux dits ont été mis avant, afin que les interlocuteurs puissent se situer dans l'espace.

2.4. Vérification de la classification

Indice Kappa

Pour valider les classifications, la matrice de confusion a été extraite lors de la classification, et a permis des calculs de métriques.

Le coefficient Kappa permet de mesurer la différence entre l'accord observé et la probabilité d'un accord dû au hasard. Il est compris entre 0 et 1. Ce coefficient permet de voir la précision d'une classification en le comparant avec d'autres coefficients Kappa. Une classification est considérée précise lorsque ces mesures ont une haute valeur de pourcentage (Tassi *et al.*, 2021).

Une fois le modèle avec un indice Kappa satisfaisant, celui est validé et utilisé dans la classification avec l'outil ImagesClassifier de OTB pour sortir le raster classifié (CNES, 2022).

3. Résultats

3.1. Validité des classifications

Afin d'avoir une carte d'occupation du sol reflétant au mieux la zone d'étude, plusieurs essais de combinaisons de bandes, d'algorithmes et de paramètres ont été testés.

La validité des classifications testées a été évaluée par les matrices de confusions regroupant les données terrains et issues de la classification des images satellitaires.

L'indice de Kappa permet d'avoir la précision de la classification. Il est calculé sur un classeur Excel.

Après plusieurs essais les classifications retenues étaient celles avec le meilleur Kappa. La précision globale obtenue à partir de la classification des images satellites de 2021 est de 88% (voir tableau 7). Pour la classification des images satellites de 1991, l'indice est de 89% (voir tableau 8). C'est-à-dire que plus de 88% et 89% respectivement des pixels de ces images sont correctement classés et valides vis-à-vis de la réalité du terrain.

Tableau 7 : Matrice de confusion de la classification 2021

Classes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Total	PU
1	1339	87	87	2	1	0	0	0	0	1516	88%
2	114	1325	77	0	0	0	0	0	0	1516	87%
3	296	123	951	80	9	56	1	0	0	1516	63%
4	2	0	51	1360	42	61	0	0	0	1455	93%
5	1	0	18	28	1347	98	22	2	0	1516	89%
6	0	0	33	60	62	1333	28	0	0	1516	88%
7	0	0	0	0	54	47	1410	3	2	1516	93%
8	0	0	0	0	8	0	2	1506	0	1516	99%
9	0	0	0	0	0	0	3	6	1507	1516	99%
Total	1752	1535	1217	1530	1523	1595	1466	1517	1509	13583	
PR	76%	86%	78%	89%	88%	84%	96%	99%	100%		
PG	89%										
Kappa	88%										

Tableau 8 Matrice de confusion de la classification de 1991

Classes	1	2	3	4	5	6	Total	PU
1	158	1	7	0	0	0	166	95%
2	2	149	4	9	0	2	166	90%
3	1	10	151	2	0	2	166	91%
4	0	18	15	130	1	2	166	78%
5	0	5	1	6	154	0	166	93%
6	0	0	3	0	0	163	166	98%
Total	161	183	181	147	155	169	996	
PR	98%	81%	83%	88%	99%	96%		
PG	91%							
Kappa	89%							

3.2. Carte d'occupation du sol actuelle

La classification dirigée de l'image Sentinel 2 de 2021 a permis d'obtenir la carte d'occupation du sol actuelle représentée dans la figure 11.

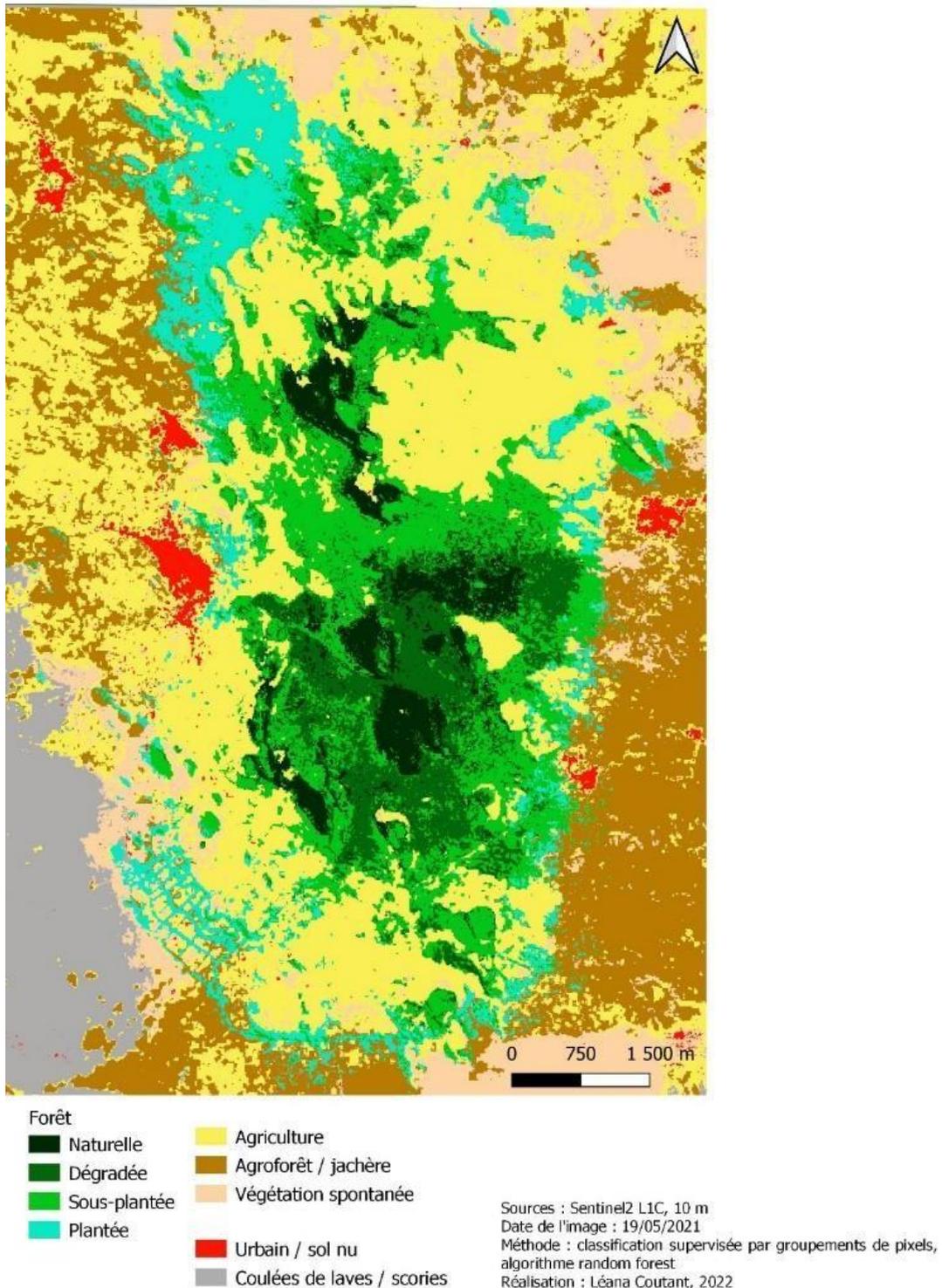


Figure 11: carte d'occupation du sol 2021

Sur la carte de la figure 11, la forêt naturelle se situe principalement au centre de la forêt, après les forêts dégradées par l'Homme. On retrouve ensuite, la forêt sous plantée qui borde les zones d'agriculture et d'agro forêt. On voit un phénomène de dégradation progressive par l'agriculture sur la forêt.

Les forêts plantées sont issues d'une campagne de reboisement ayant eu lieu durant la colonisation par les Français. Ces arbres sont des espèces exotiques ; des eucalyptus. C'est donc une forêt artificielle.

Tableau 9 : surface par occupation du sol

Code	Type d'occupation	Surface (ha)	%
1	Forêt dégradée	511,2795	4,4
2	Forêt naturelle	323,1188	2,8
3	Forêt sous plantée	1174,3565	10
4	Forêt plantée	702,2323	6
5	Agriculture	3826,1743	32,9
6	Agro forêt	2362,5898	20,3
7	Végétation	1270,6738	10,9
8	Urbain	159,9082	1,4
9	Sol nu	1298,6958	11,2

Selon le tableau on remarque que la forêt de la Grille est principalement composée de forêt sous plantée. La forêt naturelle est très faible (2,8%) et se situe sur les hauteurs des cônes adventifs. L'agriculture occupe la place prépondérante dans le paysage (33%) avec les agro-forêts (20,3%). La carte de la figure 12 met en exergue les liens entre les types d'occupation du sol et la géomorphologie du massif.

On remarque sur la carte ci-dessous, figure 12 que la forêt naturelle se situe sur les cônes adventifs et en haut des collines, où l'accès est difficile. L'agriculture est surtout située sur les plateaux et les zones planes, elle suit la topographie. Ainsi, plus on monte en altitude plus on observe de la forêt naturelle encerclée de forêt dégradée. La forêt de la Grille se situe à partir de 800 m d'altitude. On retrouve les forêts sous plantées en fond de vallées ou autour des plateaux et zones agricoles, sur les zones plateaux plates.

L'agriculture est principalement sur les plateaux tandis que les agro forêt sur les zones à pente plus forte, en dessous de 700 m d'altitude.

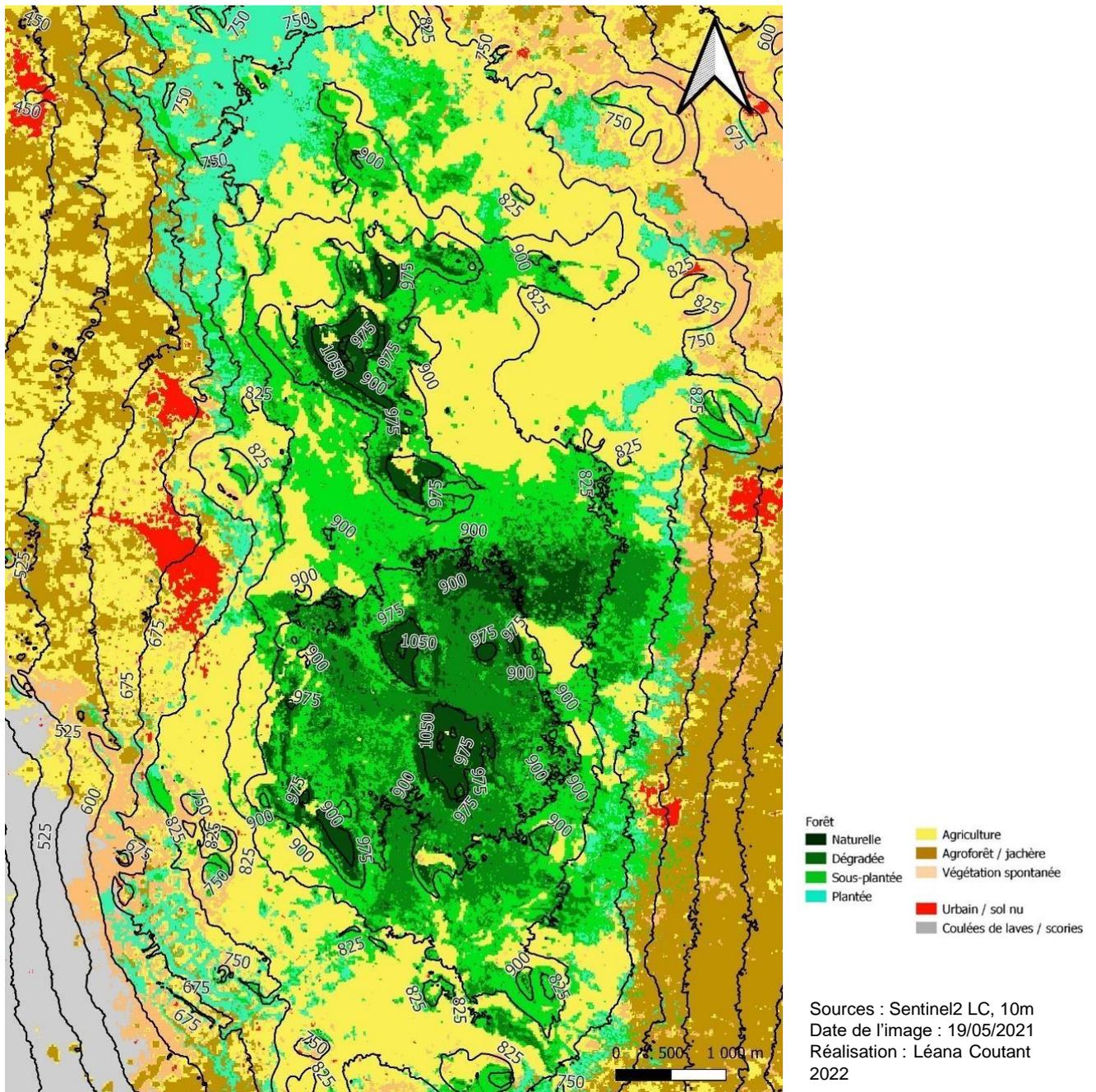


Figure 12 : Occupation du sol en fonction de la topographie

3.3. Dynamique d'occupation du sol entre l'époque coloniale et 2021

Les classifications des images de 1960/1971, 1991 et 2021 respectivement ont permis d'obtenir les cartes d'occupations du sol. Entre l'époque coloniale et 1991 il y a eu de nombreux changements sur la forêt de la Grille. Entre 1991 et 2021, on constate que l'agriculture s'immisce de plus en plus dans celle-ci (figure 13)

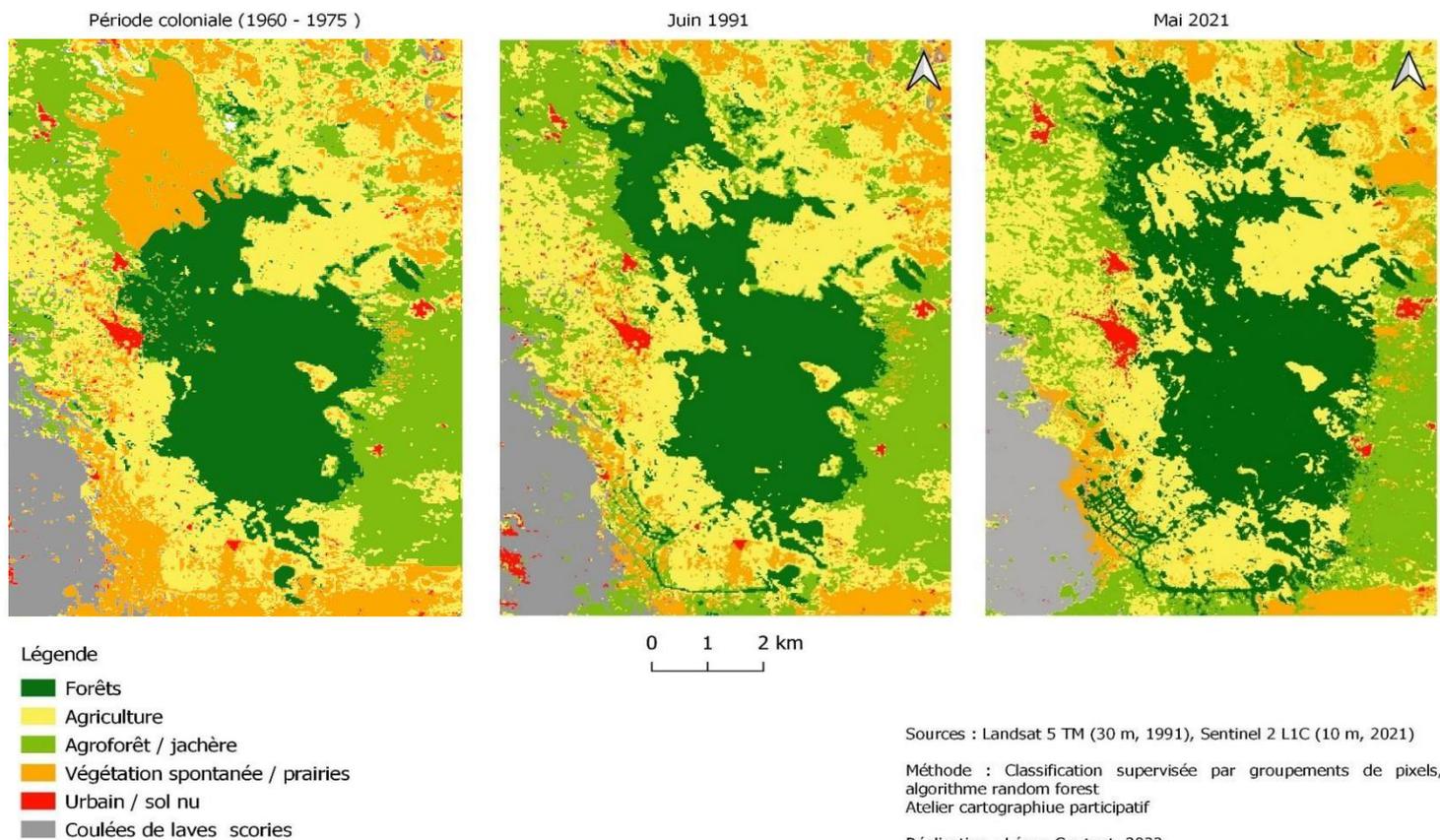


Figure 13: cartes d'occupation du sol ; 1960, 1991 et 2021

Tableau 10 : surface d'occupation du sol pour chaque carte

Code	Type d'occupation	2021		1991		1960	
		Ha	%	Ha	%	Ha	%
1	Forêt	2711	23,2	2423	20,76	2083	17,87
2	Agriculture	3826	32,9	3440	29,47	3156	27,07
3	Agro forêt	2363	20,3	2919	25	2442	20,95
4	Végétation	1271	10,9	1424	12,20	2509	21,52
5	Urbain	160	1,5	109	0,93	109	0,93
6	Sol nu	1299	11,2	1359	11,64	1359	11,66

Sur le tableau 10 et la figure 13, on observe une augmentation de la surface en forêt suite au phénomène de reboisement ayant eu lieu dans les années 50 durant la période coloniale. Néanmoins cette forêt est complètement artificielle et est constituée d'une seule espèce d'arbre, l'eucalyptus. Cela a fait augmenter l'espace forestier de presque 3%.

Entre 1991 et 2021, on observe également via le tableau 13, une augmentation du couvert forestier, pourtant pas flagrant sur les cartes de la figure 13.

L'agriculture a également augmenté depuis 1960 à aujourd'hui de pratiquement 6%, au détriment de certaines parties de la forêt mais surtout au détriment de la végétation spontanée qui n'a fait que diminué depuis 1960 jusqu'à 10%. (Tableau 11)

Les zones urbaines (les villages) ont augmenté de 0,57% à partir de 1991. Il n'y a pas de données pour l'évolution des zones urbaines avant 1991, mais on peut supposer qu'elle a augmenté avec l'arrivée de la route en goudron reliant les villages côtiers à Maouéni.

Tableau 11 : mouvements des classes d'occupation du sol

Code	Type d'occupation	1960-1991		1991-2021	
		Ha	%	Ha	%
1	Forêt	340	+	288	+ 2.44
2	Agriculture	284	+ 2.4	386	+ 3.43
3	Agro forêt	477	+	-556	-4.7
4	Végétation	-1085	-9.32	-153	-1.3
5	Urbain	0	0	51	+ 0.57
6	Sol nu	0	-0.02	-60	-0.44

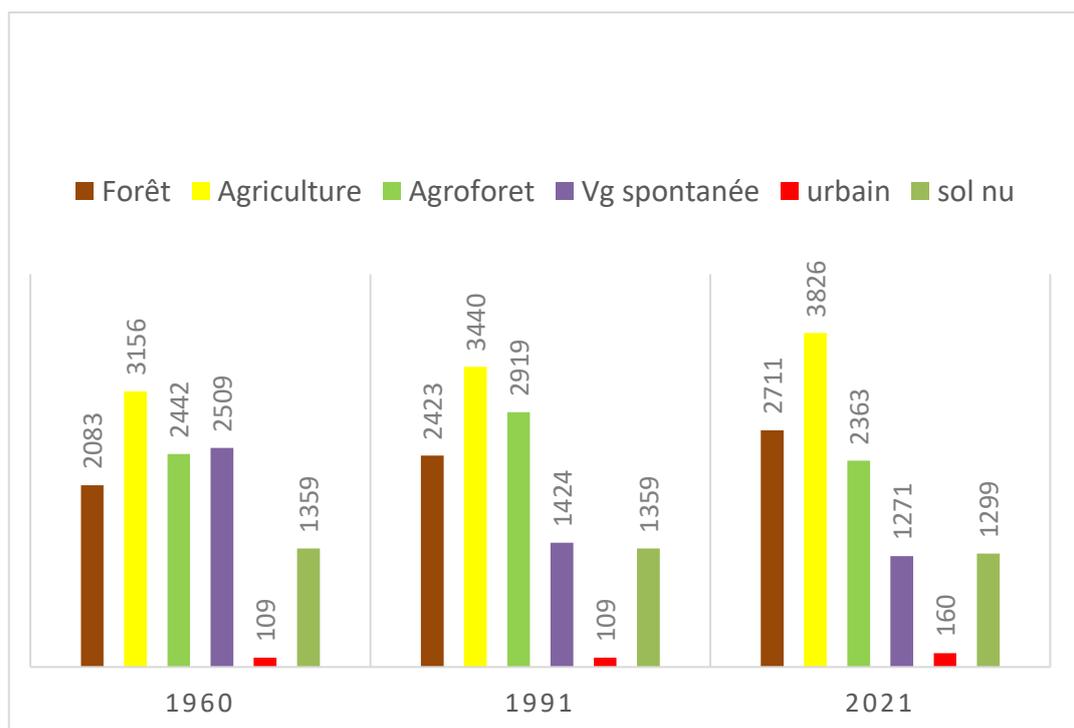


Figure 14: graphique des mouvements d'occupation du sol sur 60 ans en superficie (ha)

Chapitre 3 : traitement multicritère

Le traitement multicritère s'est basé sur des récoltes de données récupérées par des investigations terrains. Il se définit comme un système combinant simultanément l'analyse de tous les critères d'attribution pour l'appréciation d'un choix et permettant d'établir une note globale et un classement relatif des choix possibles (Nicolas, s. d.).

L'objectif de cette analyse est de déterminer quels sont les facteurs limitants et facilitant l'accès à l'eau pour les agriculteurs, et quelles zones ont un accès à l'eau favorisé ou défavorisé.

Via ce traitement, les besoins et les disponibilités en eau ont été quantifiés. L'utilisation et la gestion de l'eau ont également été décrites. Ce traitement multicritère qui a une approche itérative, a été utilisé pour optimiser la combinaison finale. Elle consiste à choisir une équation initiale considérée comme une première ébauche de solution et de l'améliorer graduellement au fur et à mesure des recherches et des résultats obtenus (Prévil et al., 2003).

1. Données et matériels

1.1. Données d'enquêtes qualitatives

Les données qualitatives récoltées auprès d'enquêtes, seront utilisées afin de déterminer les critères facilitant l'accès à l'eau. Ces facteurs de facilité à l'accès à l'eau seront issus de la perception et de l'expérience des agriculteurs concernés. Ils seront récoltés auprès de questionnaires puis traités par récurrence des résultats.

Les facteurs les plus répétés seront les facteurs ayant le plus d'influence dans l'accès à l'eau.

1.2. Données d'enquêtes quantitatives

Les données principales utilisées pour ce traitement ont été directement récoltées sur le terrain par des enquêtes auprès des agriculteurs des zones d'étude. Ces données vont permettre de quantifier les besoins et les disponibilités de la ressource hydrique mais aussi de les comparer avec les résultats du traitement SIG afin de valider le modèle.

Tableau 12 : données quantitatives récoltées par enquêtes

	Détails	Moyens	Procédés
Pressions sur l'eau en volume	Le volume d'eau moyen, minimum et maximum utilisés pour l'agriculture en fonction de chaque culture étudiée par rapport à la surface et à la quantité semée	Questionnaire enquête terrain	et Calcul et traitements des données sur Excel
Disponibilité de l'eau en volume	Volume d'eau max par infrastructures hydrauliques sur chaque zone	Inventaire infrastructure hydrauliques	des Points GPS terrains et calcul des données Excel

1.3. Données spatiales

Les données qui vont permettre le traitement multicritère sont issues des choix des facteurs facilitant l'accès à l'eau. Ces données sont récoltées sur le terrain et par télédétection.

La couche citerne est issue d'un inventaire des infrastructures hydrauliques par un travail de récolte de données terrain. La couche piste est issue d'un travail de télédétection par images aériennes précises récupérées par le projet AMCC. La couche pente a été rastérisée sur Qgis 3.16 par le Modèle Numérique Terrain réalisé par le projet AMCC.

Tableau 13 : données spatiales SIG utilisées pour l'analyse multicritère

	Détails	Moyens	Données et matériels utilisés
Couche_citernes	Localisation de l'emplacement des infrastructures hydrauliques (inventaire des infrastructures hydrauliques)	Points GPS terrains, Télédétection	Images aériennes AMCC, GPS
Couche_pistes	Tracer des routes, pistes et chemins sur les zones d'études	Télédétection	Images aériennes AMCC
Pentes 10m	Gradients des pentes	Traitement raster	MNT 10m AMCC

2. Méthode

La stratégie menée afin de réaliser ce traitement multicritère a été dans un premier temps de poser un diagnostic sur les pratiques de l'utilisation de la ressource hydrique dans le contexte agricole afin de mieux appréhender le contexte. Afin de spatialiser la disponibilité de la ressource hydrique, un inventaire des infrastructures hydrauliques a été fait. Pour spatialiser les besoins, une délimitation des zones agricoles d'intérêt a été réalisée.

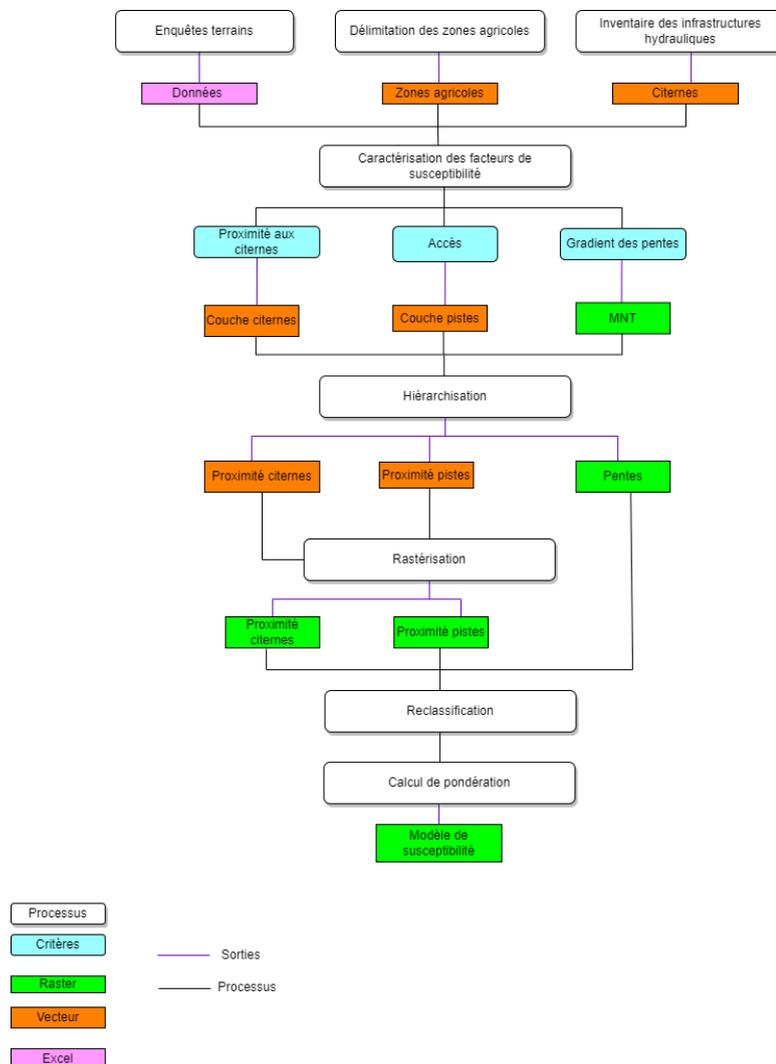


Figure 15 : schéma de la méthodologie de l'analyse multicritère

2.1. Investigation terrain

Afin d'identifier les pratiques agricoles liées à l'utilisation de l'eau, des enquêtes terrains auprès des agriculteurs et agricultrices ont été menées. Le principal objectif pour l'analyse multicritère étant d'identifier les critères de facilité à l'accès à l'eau pour l'agriculture.

2.1.1. Approche terrain

i. Connaissances existantes sur le territoire

Les données sur la région sont assez pauvres. Il existe quelques études réalisées dont un diagnostic agraire (Ni, 2019) sur la zone dite. Les connaissances de l'ONG Dahari sur la région ont permis de récolter des premières informations à dire d'experts. Certaines institutions travaillent également sur ce terrain, et par suite d'entretiens, ont permis d'avoir une première idée globale du territoire.

ii. Observations du paysage

Plusieurs excursions terrains ont eu lieu afin de comprendre comment est formé le paysage, constater les types de cultures cultivées et la gestion de l'agriculture. Cela a également permis d'avoir une première approche auprès des agriculteurs et comprendre leurs fonctionnements.

La région n'étant pas très connue, ces premières excursions ont permis de connaître les zones agricoles et de les répertorier.

iii. Premières investigations

Une fois la région bien connue et approvoisée, il a été possible de dessiner les premières lignes des principales zones agricoles. Il a également été possible de déterminer quelles sont les principales cultures et de comprendre le fonctionnement des agriculteurs.

Cette première investigation s'est faite sur la plupart des zones où il y a de l'agriculture et par l'intermédiaire d'entretiens semi-directifs. Ces enquêtes avaient pour but de cibler les questions et les problématiques pour une première caractérisation de la région.

Les informations recherchées étaient ; les différents types de cultures cultivées, les principales zones agricoles, les types de cultures requérant la pratique de l'arrosage, la provenance de l'eau utilisée, l'organisation agricole générale et la gestion de l'eau.

La méthodologie consistait à se rendre sur les zones agricoles avec les relais communautaires de Dahari et d'interpeller les agriculteurs sur leurs parcelles afin de faire un entretien. Ainsi il a été possible de construire au fur et à mesure des questions compréhensibles afin qu'elles soient les plus faciles, et efficaces à l'obtention des données et informations désirées.

2.1.2. Zonage agricole

Afin de réduire l'amplitude de la zone à étudier et se concentrer sur les zones représentatives de l'étude et du territoire, un zonage agricole a été construit.

Le choix des zones agricoles s'est fait par :

- Présence de maraichage, car ce sont les cultures maraichères qui sont consommatrices d'eau
- Importance et représentativité sur le territoire ; en fonction de leur surface et leur importance en termes de production agricole maraichère.

Ce zonage s'est fait dans un premier temps durant les investigations et observations terrains puis par points GPS. Les zones avec le plus de points GPS représentant le maraichage ont servi d'outils pour la réalisation du zonage.

Dans un second temps, les délimitations se sont faites par traçage sur QGIS grâce aux images satellites et aériennes.

2.1.3. Construction d'un questionnaire

Les enquêtes ont été réalisées sur forme d'un questionnaire précis, construit à partir des premières recherches, observations et investigations faites en amont.

Les enquêtés étaient interrogés par prise de rendez-vous, grâce à un échantillonnage réalisé à dire d'experts, une fiche de contacts faite à partir des premières investigations, et des critères déterminés à la suite des premiers résultats.

Le questionnaire est constitué de 4 parties :

- Présentation générale
- Production quantitative
- Utilisation de l'eau
- Principales problématiques

Voir annexe 1.

i. Limites et capacités des agriculteurs à répondre

La construction de ce questionnaire a été compliquée car certaines informations ne sont pas directement connues des agriculteurs. Cela est le cas pour les données quantitatives et temporelles.

Ainsi une stratégie a été mise en place pour récolter les données désirées en posant des questions sur lesquels les agriculteurs peuvent répondre.

ii. Données recherchées

L'objectif de ce questionnaire est de récupérer des informations quantitatives sur :

- Les cultures principalement cultivées
- Le volume d'eau utilisé en fonction de chaque culture sur une échelle
- La provenance de l'eau utilisée
- Les principaux facteurs influençant la pratique de l'arrosage

Pour les cultures principales ; Les données types « surfaces cultivées », « surfaces des parcelles », « quantité de graines semées » ne sont pas connues des agriculteurs, il était donc difficile de déterminer les cultures principales en se passant de la perception des agriculteurs. Néanmoins, le nombre de boîtes et de sachets utilisés à la plantation des légumes est une information connue des agriculteurs. Sachant qu'un sachet fait 5 grammes et qu'une boîte fait 50 ou 100 grammes et que l'on connaît la concordance poids en gramme / nombre de semences, la quantité plantée a pu être calculée et il a été possible de déterminer quelles plantes étaient les plus cultivées.

Cette donnée a été récoltée grâce à la question : « combien de sachets ou boites utilisés pour planter la tomate ? »

Pour les pommes de terre, le nombre de kilos est généralement connu.

Pour certains agriculteurs ils ne savaient pas combien de sachets ou boites ils utilisaient mais ils connaissaient le nombre de plants. Certains agriculteurs n'étaient pas en mesure de répondre à cette question.

Pour le volume d'eau utilisée en fonction des cultures ; Le nombre de litres utilisés pour l'arrosage est une donnée qui demeure inconnue pour les agriculteurs, notamment par rapport aux surfaces ou aux rendements, quantités semées.

Les quantités semées sont connues grâce aux questions précédentes.

Pour le volume, les premières investigations nous ont permis de savoir que l'eau était acheminée des citernes aux parcelles dans tous les cas de figure, sauf s'il y avait une présence de citerne privée au sein de la parcelle. L'eau est acheminée et stockée dans des bidons d'eau.

Ainsi pour connaître le volume d'eau utilisée par cultures, les questions suivantes étaient posées :

- Volumes des bidons d'eau, si non connus mesure des bidons.
- Fréquence d'arrosage pour chaque culture (tous les combien de jours, ou combien de fois sur un cycle)
- Sur combien de temps arrosage pour chaque culture (pendant 3 mois, les 3 premiers jours, etc.)
- Nombre de bidons d'eau utilisés à chaque arrosage.

Ces données ont permis de connaître le volume d'eau total utilisée pour l'agriculture pour chaque culture.

Afin de pouvoir comparer les données et qu'elles aient du sens, il faut mettre la donnée sur un rapport de volume d'eau/culture/surface ou volume d'eau/culture/quantité.

Pour connaître la surface, certaines parcelles ont été mesurées lors de l'entretien. D'autres ont été localisées avec un point GPS et calculées par mesure sur images aériennes à haute résolution.

Pour la provenance et l'acheminement de l'eau ; Lors des entretiens sur les parcelles directement avec les agriculteurs, un point GPS était pris. Sinon le lieu-dit était noté et répertorié par la suite.

Afin de connaître comment les agriculteurs se procurent de l'eau et analyser le rapport proximité / utilisation de l'eau, il était d'abord demandé aux agriculteurs combien de parcelles ils avaient, où se situaient-elles, le nom des lieux dits, quel type de culture était pratiqué et quelles parcelles étaient arrosées.

Ensuite pour les parcelles arrosées, il était demandé d'où provenait l'eau utilisée. Puis quels moyens d'acheminements étaient utilisés entre le lieu de provenance de l'eau et la parcelle arrosée et combien de temps cela mettait à pied.

Pour les principaux facteurs influençant l'utilisation de l'eau ; une question ouverte était posée pour avoir une idée de la perception des agriculteurs sur cette question, car étant les principaux concernés.

Les questions étaient ; « Pourquoi n'arrosez-vous pas plus vos plantations ? » et « si vous aviez la possibilité d'avoir une citerne sur votre champ, combien de fois de plus vous arroseriez vos plantations ». Les réponses issues de la première question permettent de faire le choix des critères d'influences sur la pratique de l'arrosage. Les réponses issues de la seconde question permettent de déterminer les besoins en eau pour l'agriculture.

Les données volume d'eau – temps d'acheminement de l'eau – points GPS, permettent également de faire une analyse de l'impact de l'éloignement des citernes sur les volumes d'eaux utilisés pour les plantations.

2.1.4. Traitements des données

Les données brutes issues des questionnaires ont été triées, classées puis rentrées sur un tableur Excel. Ces données ont ensuite été traitées par des calculs, des analyses statistiques et SIG. Les informations recherchées pour l'analyse multicritère sont :

Tableau 14 : données quantitatives récoltées lors des enquêtes directives

Information recherchée	Calcul	Méthode
Volume d'eau / culture / surface	Minimum, maximum, moyenne	$Volume/surface = L/m^2/culture$
Volume d'eau / culture / quantité semée	Minimum, maximum, moyenne	$Volume / g = L/50g/cultures$
Principales cultures	Moyenne volume / surface	Hiérarchisation
	Moyenne volume / quantité semée	
Cultures arrosées	Réurrence	Hiérarchisation
Problématiques liées à l'eau	Réurrence	Hiérarchisation

2.2. Inventaire des infrastructures hydrauliques

2.2.1. Excursions terrains

L'inventaire des infrastructures hydrauliques s'est fait par investigations terrains.

Il n'existe pas de vrai inventaire disponible de l'ensemble des infrastructures hydrauliques fonctionnelles sur le territoire. Néanmoins la localisation de ces infrastructures est bien connue des habitants et habitantes de la région mais également par certains experts et organismes travaillant sur cette zone.

Ainsi, pour dresser cet inventaire, il a fallu se rendre sur place afin de localiser ces infrastructures et les caractériser.

Cela a été fait lors des excursions terrains en demandant aux agriculteurs où se situent les infrastructures les plus proches. Une fois rendus, des points GPS étaient pris, le volume de la citerne était mesuré, l'état de celle-ci était noté, et son histoire était acquise par discussions avec les agriculteurs environnants et d'autres experts plus tard.

2.2.2. Photo interprétation

Pour être certain de n'avoir oublié aucune infrastructure, les informations ont été complétées par analyse des images aériennes précises, en localisant les points où semblait se trouver une infrastructure hydraulique. Les coordonnées étaient prises sur Google Earth et rentrées dans le GPS pour se rendre sur place et récolter les informations vis-à-vis de l'infrastructure.

2.3. Evaluation de la susceptibilité à l'accès à l'eau

2.3.1. Caractérisation des facteurs de prédisposition à l'utilisation de l'eau

Les facteurs de prédisposition à l'utilisation de l'eau ont été définis à la suite des enquêtes réalisées auprès des agriculteurs et aux traitements de ces données (Prévil *et al.*, 2003).

Trois critères ont été retenus pour l'évaluation de la prédisposition à l'utilisation de l'eau sur les zones agricoles choisies. Ces critères ont été traités et classés en fonction de leur importance dans la prédisposition des agriculteurs à l'accès à l'eau. Ils ont été entrés dans la formule ci-dessous, avec X étant le facteur d'importance :

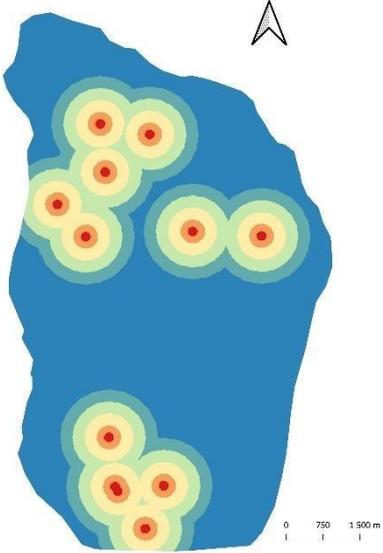
$$GT = X1*ProxCiterne + X2*AccesCiterne + X3*PenteGradient$$

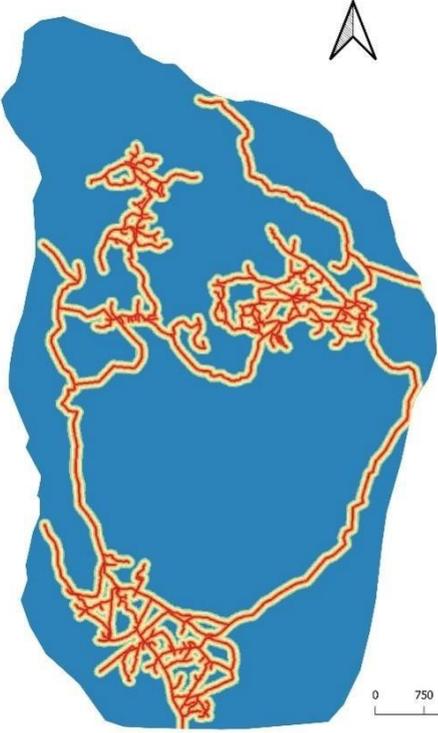
2.3.2. Critères SIG spatiaux

La récolte des données spatiales a été faite par :

- Terrain : Le manque de données concernant cette région a dû être comblé par des relevés de coordonnées GPS sur le terrain.
- Enquêtes : Les enquêtes auprès des acteurs locaux ont permis d'affiner les recherches et les connaissances sur le terrain.
- Photo interprétation : les images aériennes de haute résolution issue du projet AMCC ont permis ce travail, pour créer les couches pistes et corriger les données GPS récoltées sur le terrain.

Tableau 15 : Tableau des critères des prédispositions à l'accès à l'eau

Facteurs	Explications	Données	Répartition spatiale
Proximité aux citernes	La proximité aux citernes est considérée comme un facteur important, car c'est l'un des seuls moyens d'approvisionnement en eau pour l'utilisation agricole dans ce contexte. La totalité de l'eau utilisée provient de l'eau de pluies, récoltée par citerne publique ou citerne privé. La majorité des personnes interrogées n'ont pas de citerne privée.	<p>Cette couche a été obtenue par coordonnées GPS récoltées sur le terrain.</p> <p>Des zones tampons sur plusieurs distances ont été tracées à l'aide de l'outil géo traitement sur QGIS 16.0.</p>	 <p>Prédisposition à l'accès à l'eau</p> <ul style="list-style-type: none"> Nulle Très faible Faible Moyenne Forte Très forte

<p>Accès aux pistes</p>	<p>Il a été démontré suite aux résultats des enquêtes terrains, que l'accès aux pistes et aux routes favorise l'acheminement de l'eau des citernes aux parcelles, et donc l'accès à cette ressource.</p> <p>Il permet de transporter l'eau à l'aide de brouette, ou de véhicules lorsque les routes ne sont pas trop accidentées et en fonction des moyens des agriculteurs. Cela rallonge donc la distance de parcours pouvant être effectuée pour acheminer l'eau de la citerne aux parcelles à arroser.</p>	<p>Cette couche a été obtenue par photo interprétation réalisée par l'analyse des images aériennes à haute résolution (10 cm) issu du projet AMCC.</p> <p>Des zones tampons ont été créées sur plusieurs distances à partir des lignes de routes.</p>	
<p>Gradient des pentes</p>	<p>Le pourcentage de pente influence le degré de pénibilité et de difficulté d'acheminement de l'eau.</p> <p>Plus la pente sera pentue, plus il sera difficile d'accéder à la citerne.</p>	<p>Cette couche est issue du MNT de 1m, créée par le projet AMCC.</p>	 <p>Prédisposition à l'accès à l'eau Très forte Très faible</p>

2.3.3. Rastérisation

L'ensemble des couches vecteurs a ensuite été rastérisé. Cela permet de combiner plusieurs facteurs sur un même raster et combiner les résultats. Le choix de la résolution (nombre de pixels par raster) choisie s'est basé sur celle du raster MNT de AMCC, qui est du format de 10 m sur 10 m par pixel.

2.3.4. Hiérarchisation

Afin de pouvoir procéder à la comparaison des facteurs, une note a été attribuée à chaque valeur des cellules « raster ». Ces valeurs ont été rééchelonnées pour chaque couche sur une échelle de 0 à 10. La classe tendant vers 0 représente une valeur d'un paramètre empêchant totalement l'accès à l'eau, tandis que 10 indique une faible tendance à l'utilisation de l'eau. Une classe tendant vers 10 indique une forte tendance à l'accès à l'eau (Prévil *et al.*, 2003).

Ces valeurs permettent une hiérarchisation en cinq catégories de facilité d'accès :

- Prédilections très faibles = 0 – 1 = Très peu de probabilités d'irrigation
- Faible = 2 – 3 = Peu de probabilités d'irrigation
- Modérée = 4 – 6 = Irrigation potentielle et probable
- Élevée = 7 – 8 = Forte probabilité d'irrigation
- Très élevée = 9 – 10 = très forte probabilité d'irrigation

2.3.5. Reclassification

Ces notes vont ainsi être attribuées aux valeurs des cellules raster en fonction de leur influence sur la potentialité d'utilisation de l'eau.

A noter qu'il n'y a pas de normes universellement acceptables en ce qui concerne la notation et la catégorisation de ces données. En effet ces notations dépendent de chaque contexte. La connaissance du terrain, certains témoignages et les analyses SIG en fonction des enquêtes réalisées ont permis de catégoriser ces valeurs au plus proche de la réalité du contexte et de déterminer les classes (Prévil *et al.*, 2003).

Tableau 16 : tableau de la classification des critères

Facteurs	Valeurs	Notes de susceptibilité attribuées
Accès piste AccesR	0-10 m	10
	10 - 20 m	9
	20 - 30 m	8
	30- 50 m	7
	50 - 75 m	5
	75- 100m	3
	>100m	1
Proximité citerne CitR	0-100m	10
	100 - 250m	8
	250 - 500m	5
	500 - 750m	3
	750 - 1000m	2
>1000m	1	
Pentes PenteR	0-10%	10
	10 - 30%	8
	30 - 40%	6
	40 - 50%	4
	50 - 75%	3
	75% - 100%	2
	>100%	1

2.3.6. Pondération

Chaque facteur a un taux d'influence différent sur l'ensemble de la zone. Ainsi afin de prendre en considération ce degré d'influence, des valeurs de pondération ont été introduites dans le modèle. Les valeurs de pondération choisies se basent sur les enquêtes et la répétitivité des contraintes liées à l'accès à l'eau.

La première étant la proximité aux citernes, puis l'accès à celles-ci via des parcours et en dernier la pénibilité du parcours (donc lié à la pente et à l'état des chemins).

Néanmoins les valeurs ont été ajustées au mieux en faisant plusieurs tests dans le but d'obtenir l'équation de pondération la plus pertinente pour la zone d'étude. Les tests étaient vérifiés par observation des cartes et du raster à l'aide de la connaissance terrain et d'experts (Prévil *et al.*, 2003).

$$GT = 0.6 * ProxCiterne + 0.3 * AccesCiterne + 0.1 * PenteGradient$$

2.4. Croisements et vérifications des données

Les données quantitatives sur l'utilisation de l'eau (par culture, par surface par agriculteur sur un cycle cultural) calculées dans les besoins en eau pour l'agriculture, ont été ajoutées en tant que shapefile sur le raster des prédispositions de l'accès à l'eau sur QGIS 3.16. Ces données ont été croisées parmi les échelles de prédisposition et référencées dans un tableau de croisement de données. Cela a pour but de vérifier la véracité du traitement avec la réalité terrain.

Les données qualitatives ont été rajoutées aux croisements des données terrains – SIG, afin de prendre en compte plusieurs facteurs plus relatifs à la réalité terrain. Des études de cas ont ensuite été réalisées afin de comprendre certaines données qui semblent être biaisées.

3. Résultats

3.1. Zones agricoles principales et caractérisation

Les résultats de cette partie, sont issus des enquêtes et de dires d'experts.

La figure 16 ci-dessous représente les 5 zones agricoles issues du zonage et qui ont été utilisées pour l'analyse multicritère et le traitement des besoins et disponibilités en eau.

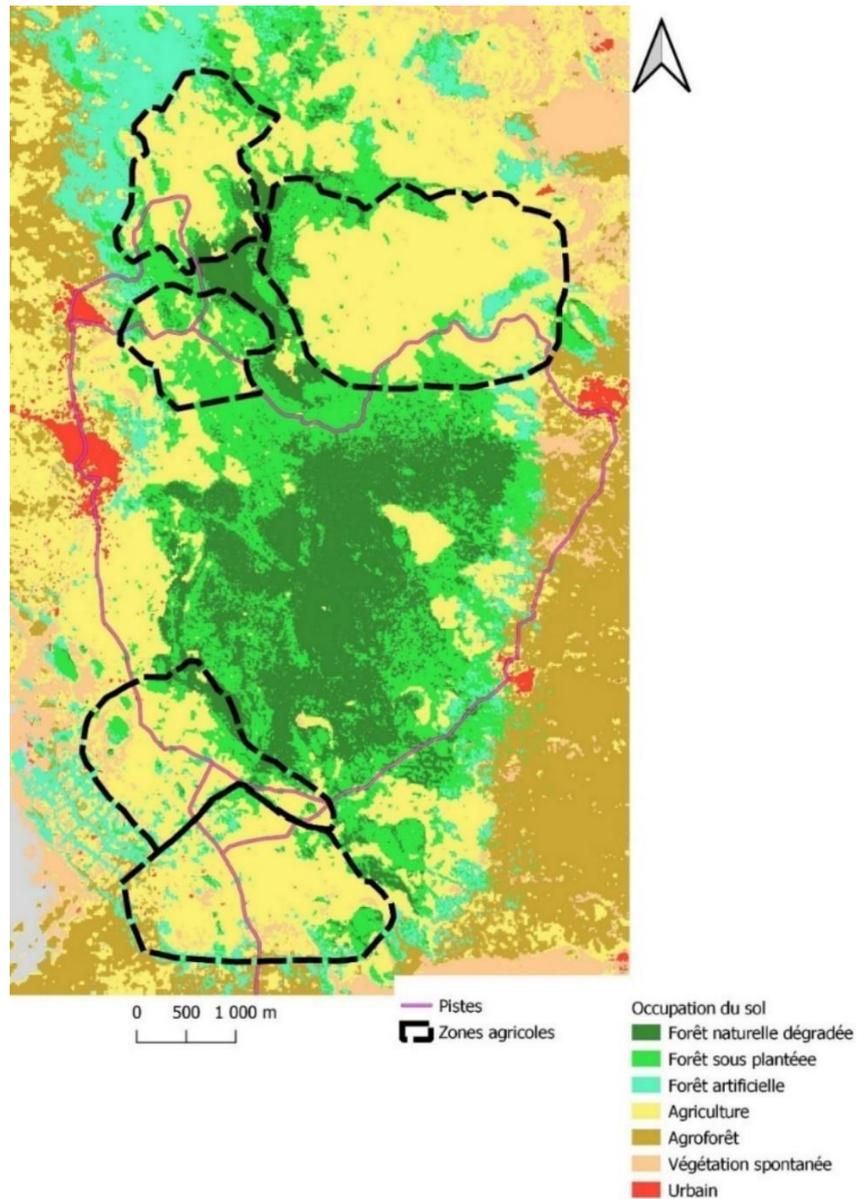
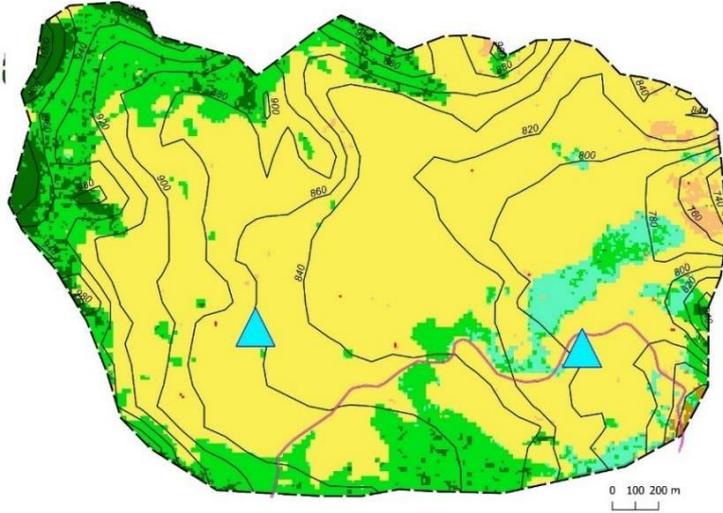


Figure 16 : Carte des zones agricoles principales retenues issues du zonage

Tableau 17 : Caractérisation des zones agricoles

<p>La Grille</p>	<p>Surface : 133 ha dont 46 ha d'agriculture</p> <p>Agriculteurs de Ivembéni et Maouéni</p>	<p>Plateau agricole au dessus de Maouéni. Avant l'indépendance c'était une zone forestière. Certains agriculteurs commençaient à défricher sous les arbres afin de sous planter des bananiers (début de la forêt sous plantée) car les autres parcelles agricoles étaient dominées par les colons français. Après l'indépendance, la déforestation a continué, passant de forêt à forêt sous plantés et de forêt sous plantés à zone agricole ouverte.</p> <p>Remarque : il y a beaucoup de forêts sous plantées. On voit bien que l'agriculture est récente et prend le pas sur la forêt de plus en plus.</p>	
<p>Maroni Gawani</p>	<p>Surface : 217 ha dont 132 ha d'agriculture</p> <p>Agriculteurs de Maouéni et Helendje</p>	<p>Cette zone agricole se situe sur un plateau de 800 à 900 m d'altitude sur pente douce. Il y a des fonds de vallées et des collines qui dessinent la topographie de cette zone. Avec l'analyse diachronique, on sait que cette zone était autrefois (avant 1950) peuplée de broussailles et de prairies. Elle a ensuite été d'une part reforestée par une forêt artificielle puis mise en culture au fur et à mesure que la population grandissait.</p> <p>Remarque : il y a des changements de topographie. Sur les zones à pentes on remarque de la forêt ou de la forêt sous plantées. Les parties agricoles sont plutôt sur les zones planes</p>	

<p>Plateau de Dimadjou</p>	<p>539 ha dont 388 ha d'agriculture</p> <p>Agriculteurs de Dimadjou</p>	<p>C'est un grand plateau agricole où la principale culture est la pomme de terre.</p> <p>L'occupation du sol est principalement agricole et sur les pentes qui encerclent le plateau, on remarque principalement de la forêt sous plantée.</p>	
<p>Bandassamlini / Sangani</p>	<p>584 ha</p> <p>Agriculteurs de Diboini, Batou, Ivembéni, Mélésemi, Mbambani</p>	<p>Cette zone a été délimitée par les colons français. C'était la zone agricole principale. Les colons ont fait des analyses du sol sur plusieurs zones. Bandassamlini était la zone avec le meilleur sol pour l'agriculture. L'autre atout de cette zone est que c'est une zone de transition entre plusieurs régions. Suite à ça, elle a été mise en culture et délimités par des lignes d'eucalyptus. Après l'indépendance Bob Dénard a rénové plusieurs infrastructures hydrauliques. Aujourd'hui ces terres appartiennent à l'Etat. C'est une terre de projets par le PNUD et le CRDE, et également la principale zone de maraichage de l'île.</p>	

3.2. Besoins en eau agricole

3.2.1. Principales cultures

Les cultures vivrières sont les cultures consommées par les ménages comoriens. Elles ne produisent qu'un très faible revenu, dans les cas où les excès sont vendus. Elles ne nécessitent également aucune trésorerie. Les cultures maraichères, ne sont pas consommées par les ménages mais revendues par des revendeurs sur les marchés des villages côtiers et principalement sur la capitale. Ce sont les seules cultures qui nécessitent des intrants (notamment en eau) et de la trésorerie (Ni, 2019).

Ce sont donc les cultures maraichères qui vont être étudiées pour quantifier les besoins en eau pour l'agriculture.

Sur le tableau 18, est représenté le nombre d'agriculteurs pratiquant chacune des cultures notées ci-dessous en tant que principale culture. Et combien d'agriculteurs cultive chacun de ces produits maraichers en général.

Tableau 18 : Nombre d'agriculteurs pratiquant la culture de pommes de terre, choux, tomates, laitues et autres.

	Nombre d'agriculteurs interrogés	Pommes de terre	Chou	Tomates	Laitue	Autres
Nombre d'agriculteurs ayant pour culture principale	35	22	6	4	2	1
Nombre d'agriculteurs cultivant cette culture	63	33	29	24	20	6

Selon le tableau 18, on peut établir le fait que les principales cultures maraichères cultivées sur les zones agricoles du massif de la Grille sont respectivement ; la pomme de terre, le chou, la tomate et la laitue. Ce sont les 4 cultures principales qui sont ressorties des enquêtes, ce sont donc ces cultures qui seront analysées pour calculer les besoins en eau agricole pour le maraichage.

Les enquêtes montrent également les principales cultures en fonction des zones agricoles : à Maroni la culture principale est le chou et la tomate tandis qu'à La Grille ce sont les associations de carottes – laitues. A Bandassamlini on observe principalement des pommes de terre et des tomates, et à Sangani ce sont la laitue et les choux que l'on retrouve. Sur le plateau de Dimadjou on retrouve en grande majorité de la pomme de terre. C'est en effet, la zone principale de production de pomme de terre.

3.2.2. Volumes d'eau utilisés pour le maraichage

A noter : il est difficile de recueillir des données sur la quantité d'eau moyenne utilisée par les agriculteurs. En effet le volume d'eau utilisé pour l'agriculture dépend de beaucoup de facteurs qui ne peuvent être prémédités et qui sont fluctuants.

Sur 63 entretiens, 56 des agriculteurs vont chercher l'eau à la citerne la plus proche. Ils vont chercher l'eau généralement à pied, avec des bidons d'eaux portés sur la tête ou dans une brouette. Ils font plusieurs allers-retours en fonction des besoins en eau à un moment T.

Le tableau 19 représente les valeurs moyennes, minimales et maximales des volumes d'eaux utilisées pour chaque culture étudiée.

Tableau 19 : Volume d'eau utilisés par cultures par saisons cultural selon les questionnaires

Volume d'eau utilisé par cycle cultural	Pomme de terre	Choux	Tomates	Laitue
Minimum (L/100m ²)	4,5 L	12 L	18 L	2 L
Maximum (L/100m ²)	900 L	1800 L	2400 L	600 L
Moyenne (L/100 ²)	156 L	263 L	311 L	109 L

Ces données sont à prendre avec leurs limites. D'un agriculteur à un autre le volume d'eau par culture varie très fortement. Il en est de même pour un même agriculteur d'une année à une autre.

On remarque sur le tableau 19 que l'écart entre les valeurs minimales et maximales sont très fortes, ainsi la moyenne n'est pas complètement représentative.

Il y a de nombreux facteurs qui influencent l'utilisation de l'eau pour l'agriculture. En effet, selon les enquêtes le volume d'eau utilisé par cycle culturel change d'une année à une autre en fonction de :

- Des précipitations
- Du temps disponible de l'agriculteur et donc de ses autres activités
- De sa force et son énergie pour aller chercher l'eau
- De l'actif familial qui peut changer d'une année à une autre
- Des moyens, qui peuvent changer d'une année à une autre

Sur 63 agriculteurs, 54 énoncent le fait que s'ils pouvaient arroser plus fréquemment et avec plus de volume d'eau, ils le feraient. La plupart énoncent le fait qu'ils arroseraient 3 fois plus que ce qu'ils arrosent aujourd'hui ou qu'ils arroseraient 2 fois par jour jusqu'à récolte. Ils évoquent également que le principal problème dans la pratique du maraichage est le manque en eau et que cela a un impact direct sur les rendements.

Etudes de cas 1 :

Pour une citerne privée d'un volume de 3,24m³ et une surface à arroser de 4275m² :

L'agriculteur arrose 672 L pour 100 grammes de tomates plantées, 192 L pour 100kg de pommes de terre plantées, 192 L pour 50g de choux plantés, 20 L pour 50g de laitue plantée, 192 L pour 50g de poivrons plantés et 192 pour 50 g d'haricots plantés.

Donc pour un cycle culture, l'agriculteur utilise 1460 L d'eau, soit 1,460m³ sur une surface en tout de 4000m².

Sa citerne est parfois à sec, elle n'est donc pas suffisante, il doit faire des allers-retours pour la remplir avec l'eau des citernes du village. S'il pouvait, il aurait une citerne de 7m³ sur chacun de ses parcelle (6) et il arroserait tous les jours et il ferait de la contresaison.

Donc : Il faudrait des citernes de 9000m³ qui servirait pour une petite dizaine de personne, 1000m³ / personne.

Etude de cas 2 :

Pour une citerne de 2m³, un autre agriculteur utilise 1,770m³ d'eau par cycle cultural sur 1640m². Selon lui, il lui faudrait une citerne de 6m³, pour répondre à ses besoins.

Etude de cas 3 :

Pour une citerne privée de 6m³, cet agriculteur utilise 1,440m³ d'eau. Néanmoins sa citerne est souvent à sec, il lui faudrait une citerne de 9m³.

Après analyse des enquêtes, on remarque que ceux qui arrosent le plus ont souvent les plus grands moyens ou un accès à l'eau par proximité aux citernes principales. On constate aussi que la grande majorité des agriculteurs aimerait pouvoir arroser plus dans l'objectif d'avoir de meilleurs rendements. Le besoin n'est donc pas comblé.

Il n'est pas possible de quantifier les volumes exacts de l'utilisation de l'eau et des besoins en agriculture, que ce soit par culture, par surface ou par quantité de semences semées. Néanmoins, il est possible de déterminer les facteurs influençant l'utilisation de l'eau.

A noter : les parcelles situées sous couvert forestier, ne demande pas d'intrants chimiques ou d'intrants en eau. Les agriculteurs avec une parcelle proche des arbres, n'utilisent aucun intrant, tandis que sur leurs autres parcelles à ciel totalement ouvert, il y a une utilisation d'intrants.

3.2.3. Problématiques évoquées par les agriculteurs

Les problématiques récurrentes énoncées lors des enquêtes étaient :

- Un revenu du maraichage insuffisant
- Manque d'eau
- Accès à l'eau compliqué : bidons d'eau à pied au village ou prochaine citerne
- Transports des productions jusqu'aux marchés
- Achat et procuration des semences
- Manque d'outillages et de mécanisation pour les travaux agricoles

3.3. Disponibilité en eau

L'irrigation agricole est totalement constituée d'eaux pluviales. Ainsi la disponibilité en eau dépend directement de la pluviométrie mais aussi de la capacité à la capter et la stocker. Elle dépend donc des infrastructures hydrauliques. C'est dans cette idée que l'inventaire des infrastructures a été réalisé.

3.3.1. Inventaire des infrastructures hydrauliques

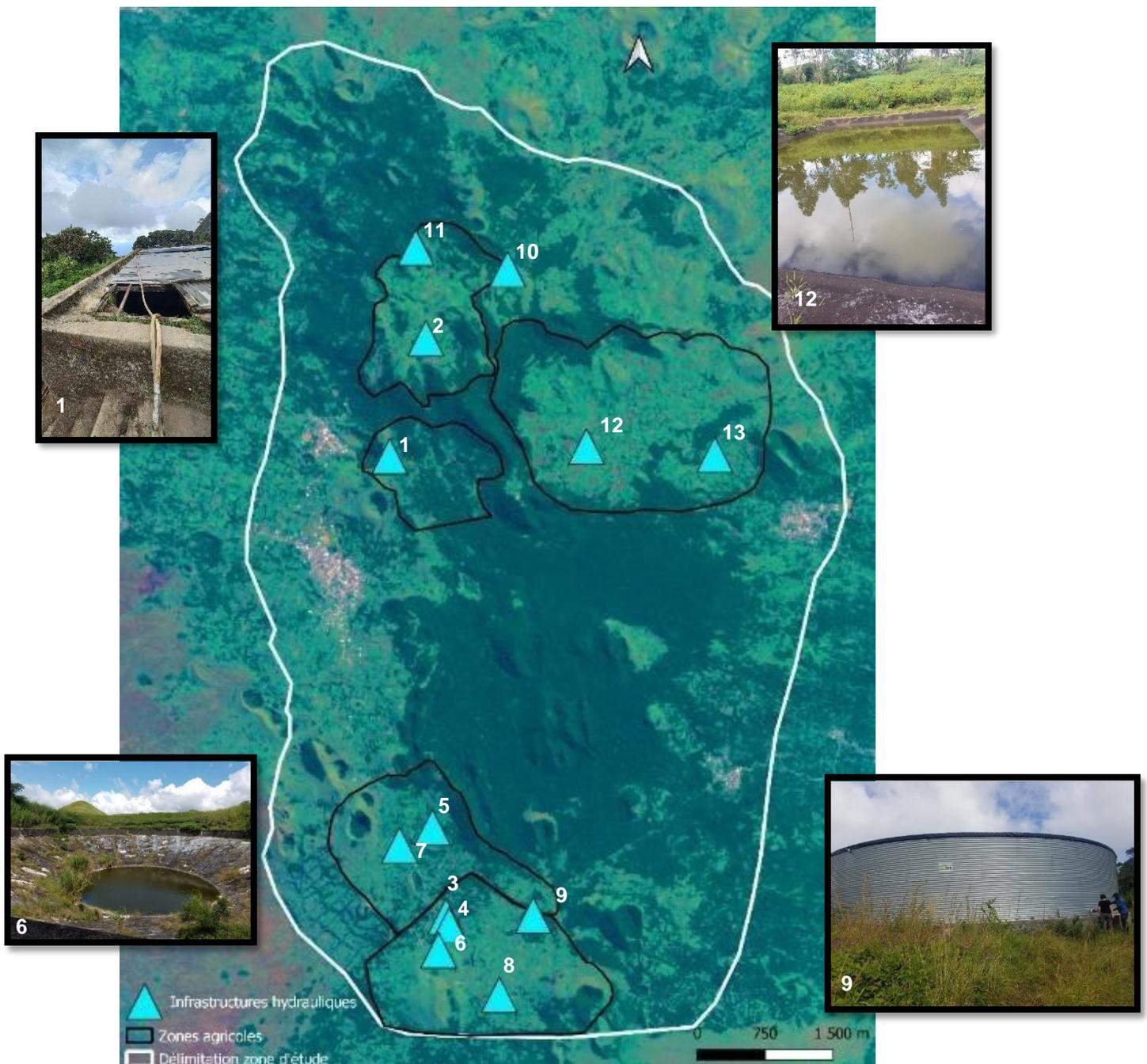


Figure 17: Carte de l'inventaire des infrastructures hydrauliques sur le massif de la Grille

Tableau 20 : Caractéristiques des différentes infrastructures hydrauliques répertoriées

Numéro	Nom des infrastructures	Volume des citernes (m ³)	Auteurs de la construction	Date de construction	Date de rénovation	Auteur de la rénovation
1	Citerne de la Grille	74	Société Humblot	Période coloniale	2013	PNDH FIDA
2	Citerne de Maroni	129	Société Humblot	Période coloniale	2021	FIDA
3	Citerne de Bandassamlini 1	1280	Société Humblot	Période coloniale	1980	Bob Dénard
4	Citerne de Bandassamlini 2	296	Société Humblot	Période Coloniale	1980	Bob Dénard
5	Citerne de Bandassamlini 3	1030	PNUD	2021		
6	Impluvium de Bandassamlini 1	707m ²	Société Humblot	Période coloniale	1980	Bob Dénard
7	Impluvium de Bandassamlini 2	237m ²	Société humblot	Période coloniale		
8	Citerne de Sangani 1	90	PNUD	2021		
9	Citerne de Sangani 2	1030	PNUD	2021		
10	Citerne de Gawani	1030	PNUD	2021		
11	Impluvium de Gawani	472	Société Humblot	Période coloniale		
12	Impluvium de Dimadjou 1	3020	?	2010		
13	Impluvium de Dimadjou 2	2524	?	2010		

On répertorie 13 citernes fonctionnelles sur les zones d'études agricoles avec des volumes différents.

La plupart des infrastructures ont été construites durant la période coloniale puis rénovées par le FIDA. Sur Bandassamlini / Sangani, les infrastructures ont été rénovées par Bob Dénard. Ces dernières années le PNUD en collaboration avec le CRDE, plusieurs citernes et impluviums ont été mis en place sur plusieurs secteurs. Certaines ne sont pas encore fonctionnels et toujours en cours de constructions.

3.3.2. Volume d'eau disponible par zones

Selon les études du PNUD et une source sûre (dires d'experts, documents confidentiels), un écotank de 1030m³ fournit 20 ha de cultures maraichères en eau pendant la saison sèche (4 à 5 mois). (Communication personnelle). Donc 51,1m³ par hectare sur une période de 4 à 5 mois. Cela est confirmé par l'analyse des besoins faits précédemment.

Sur la zone de **La Grille**, la citerne (1) est de 74m³ pour 46 ha de surface agricole pour tous les agriculteurs. Si l'on prend comme référence les données du PNUD et les études déjà réalisées sur la question des besoins en eau du maraichage, la citerne peut couvrir 1,4 ha au total, soit 3% de la zone de La Grille. Ce résultat est faible et justifie que beaucoup d'agriculteurs vont chercher l'eau au village de Maouéni.

Sur **Maroni**, la zone dispose premièrement d'une citerne principale (2) de 129m³ qui peut couvrir 2,5

ha de surface agricole, soit 3,7% de la zone agricole. Sur les contres bas vers **Gawani**, il y a deux infrastructures, la citerne du PNUD était cassée lors des investigations terrains, mais lorsqu'elle sera réparée, il y aura une disponibilité de 1502 m³ en tout pouvant couvrir 22% de Maroni-Gawani.

Sur le **plateau de Dimadjou**, il n'y a que deux impluviums, pouvant contenir en tout 5 500 m³ d'eau pour 388 ha et ne couvrant pas toute la surface du plateau. Ces deux impluviums peuvent couvrir 101 ha, soit 26 % du plateau. Néanmoins à Dimadjou, la plupart des agriculteurs ont leurs cabanes sur leurs parcelles avec un système de captage d'eau de pluies avec leurs toits en taules et des bidons de stockage de l'eau pluviale (annexe 4).

La zone de **Bandassamlini/Sangani** est celle disposant du plus d'infrastructures hydrauliques, grâce aux rénovations de Bob Dénard mais aussi aux citernes mises en place pour le PNUD très récemment. La disponibilité de cette zone agricole est de 4200 m³ au total pour 408 ha. Ces citernes couvrent 82 ha, soit 20 % de la zone.

On remarque donc qu'il y a un grand problème en termes de disponibilité de l'eau pour le maraichage. Les pourcentages sont assez faibles surtout pour le plateau de la Grille et la zone de Maroni (sans compter les contrebas vers Gawani). Néanmoins il faut noter, que les surfaces agricoles ne sont jamais entièrement maraichères et qu'il y a également des forêts, des haies, des jachères et des champs vivriers. Donc le pourcentage est censé être plus élevé.

3.4. Carte des susceptibilités

3.4.1. Critères d'accès à l'eau

Les critères favorisant l'accès à l'eau ont été définis suite aux résultats des questionnaires.

Sur 63 agriculteurs interrogés ; 32 énoncent le fait que c'est la proximité à la citerne, 9 que c'est le manque de moyens, 7 que c'est le problème d'accès par chemin et l'état, 10 que c'est le manque de force et d'énergie (lié au fait que ce soit loin) et 5 signifie qu'ils n'ont pas de problème, ces personnes ont une faible surface d'agriculture, possèdent une citerne privée ou se situent à moins de 200 m d'une citerne.

Les critères d'accès à l'eau énoncés lors des entretiens ne peuvent pas tous être pris en considération pour l'analyse SIG. En effet, il n'est pas possible de représenter la force et l'énergie, les moyens, et l'aide familiale sur une analyse multicritère spatiale.

Mais il est possible de représenter ; la proximité à la citerne, l'accessibilité à celle-ci par des pistes et la pénibilité du chemin par pentes.

3.4.2. Hiérarchisation

La hiérarchisation des critères s'est faite par la récurrence du critère énoncé lors des enquêtes.

Comme nous l'avons vu précédemment, le critère de la proximité à la citerne est énoncé 32 fois, le critère d'accès aux pistes et route a été répété 7 fois. Le critère de la pente est compris dans l'état et la pénibilité du chemin.

Ainsi le calcul de pondération s'est axé sur le critère de la proximité comme étant le facteur prédominant à la prédisposition de l'accès à l'eau pour les agriculteurs, puis l'accès aux routes et le critère de la pénibilité représenté par le gradient des pentes est le plus faible.

3.4.3. Résultats de la carte

La carte suivante représente les zones avec une prédisposition plus ou moins forte à l'accès à l'eau pour l'agriculture en fonction des proximités aux citernes, de l'accès aux pistes et des pentes.

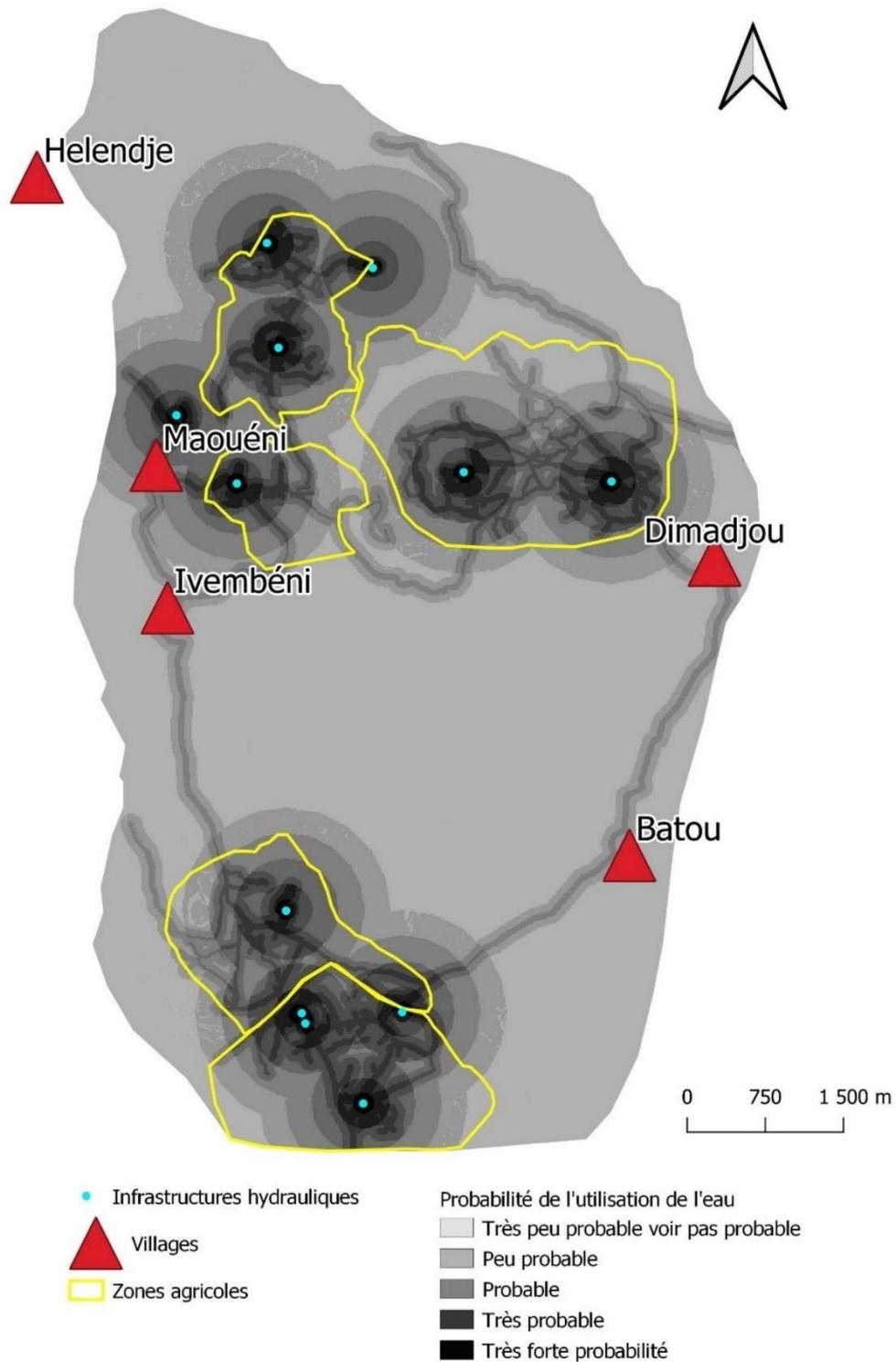


Figure 18: carte des prédispositions à l'accès à l'eau sur le massif de la Grille

3.5. Croisements des données terrains et de la carte

La carte des probabilités a été croisée avec les données récoltées auprès des agriculteurs sur le terrain.

Les données croisées sont les volumes d'eau totaux par 100 m² utilisés par agriculteur pour leurs cultures de maraichages sur une saison. Elles vont être utilisées afin de confirmer les prédispositions du traitement SIG et d'identifier si les facteurs d'accès à l'eau choisis sont caractéristiques de la réalité terrain.

Tableau 21 : Croisements des données de volume d'eau utilisés sur l'échelle de prédispositions

Probabilités	Volume d'eau / agriculteurs / 100 m ² en fonction des échelles de probabilités								MOYENNE
3 - 4	0								X
5	320 L	420 L	157 L	30					200 L
6 - 7	10 L	67 L	96 L	59 L	162 L	102	107	75	86L
8	200 L	366 L	328 L	234 L	100 L	500 L	114 L	107 L	298 L
9 - 10	960 L	52 L	51 L	2640 L	24140 L	332 L			354 L

Les moyennes de chaque classe de prédispositions devraient être croissantes de la classe 3 à 10. Néanmoins on remarque dans les résultats du tableau 21 que ce n'est pas le cas.

Si on regarde l'ensemble des données on peut observer une tendance à l'augmentation des volumes d'eau en fonction des prédispositions les plus fortes.

Il faut prendre en compte le fait que certaines données sont biaisées par d'autres facteurs qui n'ont pas pu être représentés sur le traitement.

Premièrement, il n'y a que 24 données / 63 entretiens qui ont pu être utilisées pour ce traitement. En effet les données, afin d'être exploitables devaient :

- Avoir des points de coordonnées, donc que les enquêtes soient faites sur les parcelles
- Avoir des données de volume d'eau utilisées correctes
- Avoir un rapport d'échelle par rapport au volume d'eau (L/100 m²), donc une connaissance de la surface irriguée.

Comme expliquer précédemment, les agriculteurs n'étaient pas tous en mesure de répondre au questionnaire et pas toutes les données pouvaient être récoltées. Certains résultats ont été biaisés car certains n'ont pas pu se faire sur les lieux de la parcelle et d'autres agriculteurs ne connaissaient pas la surface de production ou des quantités semées. Les résultats des enquêtes ont donné parfois des volumes d'eau sans échelle car pas calculable, changeant ou donnée inconnue. Ainsi ces données sont inexploitables.

L'autre facteur de la limite de ce tableau, est les critères qualitatifs qui n'ont pas pu être pris en compte dans le traitement multicritère, mais qui se sont relevés lors des enquêtes :

L'accès à l'eau dépend de la possibilité à aller chercher l'eau dans les infrastructures hydrauliques, de la transporter ou bien d'avoir une citerne ou un moyen de captage d'eau de pluie dans son champ.

Cet accès ne dépend donc pas que de l'accès à une route ni de la proximité à l'infrastructure. D'autres facteurs rentrent en jeu :

- **L'âge de l'agriculteur** : En effet, plus l'agriculteur est âgé moins il aura de temps et d'énergie pour travailler et faire les allers-retours jusqu'à la citerne la plus proche. Ces allers-retours demandent de la force d'autant plus qu'il faut parfois aller les chercher bidons par bidons, porter sur la tête, à pied.
- **Les moyens financiers et matériels de l'agriculteur** : Certains agriculteurs, ayant des moyens financiers payent d'autres personnes pour aller chercher l'eau au village ou aux citernes, d'autres construisent une citerne privée dans leur parcelle leur facilitant la tâche. Certains agriculteurs disposent de moyens matériels, tels que des moyens de transports comme une mobylette, une voiture ou encore une brouette. Les moyens permettent aussi d'avoir plusieurs bidons d'eau et donc plus de moyens de stockage de l'eau de pluie.
- **L'aide**, souvent familiale, peut se relever précieuse. En effet les enfants participent souvent aux tâches agricoles. Pour les périodes de pics de travail (par exemple lors des récoltes), ou pour aller chercher l'eau aux citernes cela permet de diminuer les allers-retours par individu et ainsi avoir plus d'aides.
- **L'acheminement de l'eau** est coûteux en **temps**. En effet les allers retours peuvent prendre beaucoup de temps, parfois jusqu'à 2 heures. Plus l'agriculteur a du temps, plus il peut aller chercher des bidons d'eau. Cela dépend donc de s'il a un autre travail ou des occupations autres.
- La **force, l'énergie** et donc la **santé de l'agriculteur** sont un critère très important pour l'accès à l'eau. La plupart du temps, l'acheminement se fait à pied, les bidons sur la tête. Beaucoup d'agriculteurs énoncent le fait qu'ils vont chercher l'eau et font des allers-retours jusqu'à ce qu'ils n'aient plus de force. Cela est donc difficile à estimer.

Autres facteurs limitants ; les volumes d'eaux utilisés par les agriculteurs de Dimadjou dépendent moins de la proximité car la plupart ont des cabanes de récupération d'eau de pluies qu'ils utilisent majoritairement pour l'irrigation. De plus la plupart font des grandes cultures de pommes de terre, cultures qui nécessitent plus d'intrants chimiques que les autres. Cette zone n'est donc pas représentative du contexte maraicher du territoire et de l'étude.

Bandassamlini est une zone particulière, bénéficiant de plus d'infrastructures et d'aides que les autres zones. Elle n'est donc pas représentative de la totalité de la zone d'étude.

Ainsi les zones agricoles de Maroni et La Grille sont plus représentatives et seront utilisées pour l'analyse plus précise des résultats et le croisement des données.

On va s'axer pour prendre les exemples au cas par cas sur la zone de Maroni et La Grille.

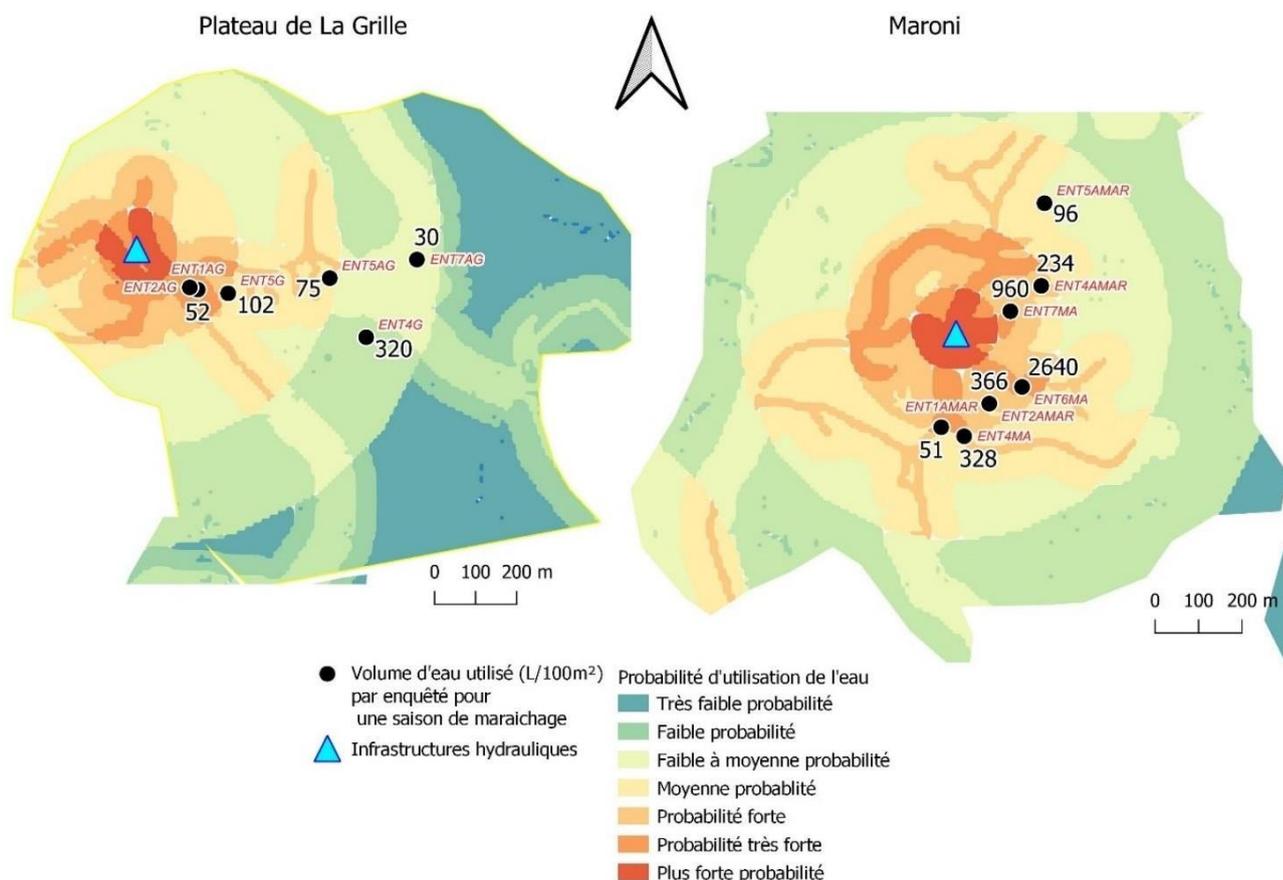


Figure 19: Cartes des prédispositions à l'accès à l'eau sur les zones agricoles du plateau de La Grille et de Maroni, croisées avec les données des volumes d'eau utilisés par les agriculteurs sur leurs parcelles respectives

Tableau 22 : Données des volumes d'eau utilisés pour Maroni et La Grille croisées avec l'échelle de prédisposition

Echelle de probabilité	Maroni			La Grille		
	Vol d'eau (L/100 ² /saisons)	MOYENNE		Vol d'eau (L/100 ² /saisons)	MOYENNE	
5				320L	30	
6 - 7	96 L			102	75	
8	366	328	234	200 L		
9 - 10	960	51	2640	52 L		

On remarque quelques données aberrantes sur le tableau 22 et figure 19.

Pour le plateau de La Grille, les données ENT1AG, 5AG et 4G sont à étudier de manière plus détaillée afin de comprendre ces résultats.

Enquête 1AG : Agricultrice travaillant seule et qui s'occupe également du foyer. Elle a dans la cinquantaine et dit n'avoir pas assez de force pour faire plusieurs allers retours malgré sa proximité avec la citerne de La Grille.

Enquête 5AG : Agriculteur ayant dans la soixantaine qui n'a pas de grande surface. De plus il a d'autres parcelles, faisant qu'il répartit son temps de travail sur d'autres zones.

Enquête 4G : L'agriculteur ayant dans la trentaine est à temps plein sur son travail d'agriculteur. Il dispose également de bidons personnels avec un système de captage d'eau de pluies pouvant contenir au total 280 L. Quand ses bidons sont vides, il part faire 3 allers retours par semaine pour les remplir. Cela explique, que malgré son éloignement à la citerne de La Grille et à la route, il arrose plus que la moyenne.

Pour le plateau de Maroni, les résultats semblent plutôt corrects.

Enquête 1AMAR : l'utilisation de volume d'eau, plus faible que la moyenne, s'explique car c'est une agricultrice qui travaille seule et qui doit également s'occuper du foyer : elle n'a donc pas beaucoup de temps à consacrer à l'irrigation et l'acheminement de l'eau. Elle ne produit pas non plus de culture très demandeuse en eau (pomme de terre et laitue principalement).

Enquête 6MAR : Très gros producteur de légumes, jeune et qui travaille à temps plein sur ses champs. Production de tomates, choux, concombres, etc. Il fait beaucoup d'allers-retours (30 min) par semaine afin d'avoir assez d'eau pour l'irrigation. Il possède assez de bidons pour stocker également l'eau.

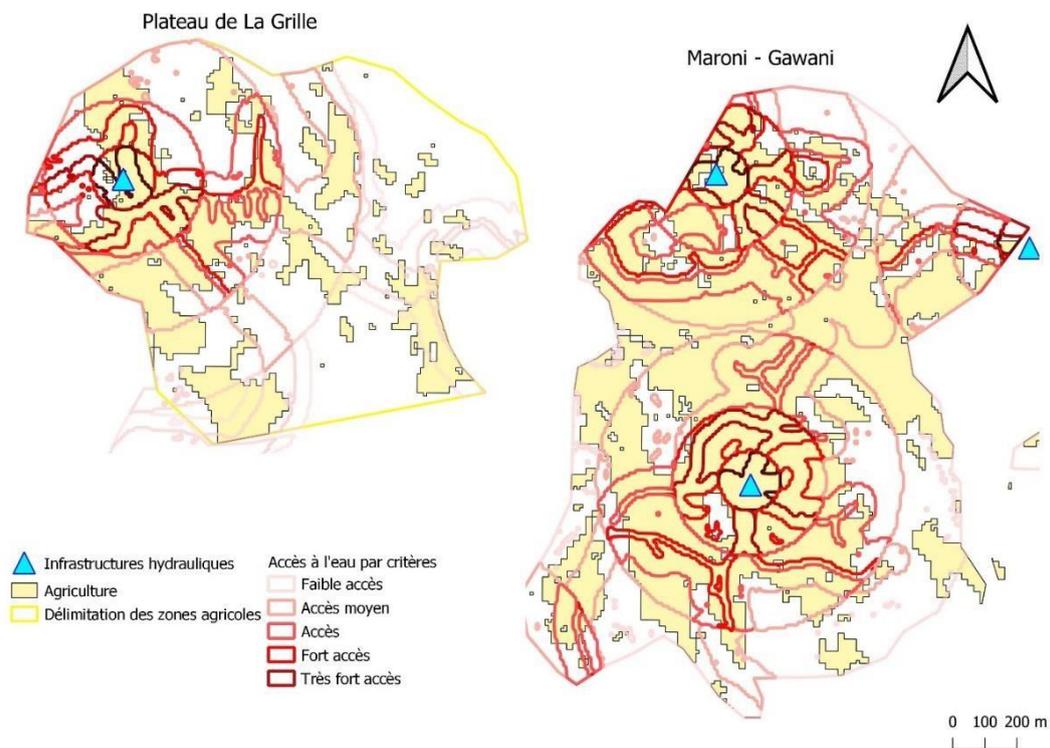


Figure 20: Carte des prédispositions à l'accès à l'eau croisée avec l'occupation du sol agricole sur le plateau de La Grille et Maroni – Gawani

On part du postulat que pour une bonne irrigation des terres agricoles il faut 51m²/ha.

La surface agricole du plateau de la Grille est de 46 ha sur 133 ha avec une citerne de 74m³. Ainsi la citerne de La Grille peut couvrir seulement 1,4 ha de parcelles maraichères sur 46 ha de surface agricole.

La surface agricole de Maroni – Gawani est de 132 ha. Maroni représente la moitié de cette surface donc 66ha. La citerne de Maroni à elle-même est de 129m³ et peut donc couvrir 2,5 ha de surface agricole elle seule sur environ 66 ha.

Ainsi, comme vu précédemment, sur la zone de la Grille, seulement 74 m³ pour 46 ha de surface agricole et 129 m³ pour Maroni est disponible pour tous les agriculteurs, ce qui est trop faible et qui justifie que beaucoup d'agriculteurs vont chercher leur eau au village de Maouéni ou arrose largement en dessous des besoins des plantes.

Sur la figure 20, on voit une corrélation entre l'occupation agricole et les zones à probabilité forte d'irrigation, soit à la proximité des citernes et à l'accès aux routes.

Partie III : Analyse et discussion

1. Analyses et interprétation des résultats

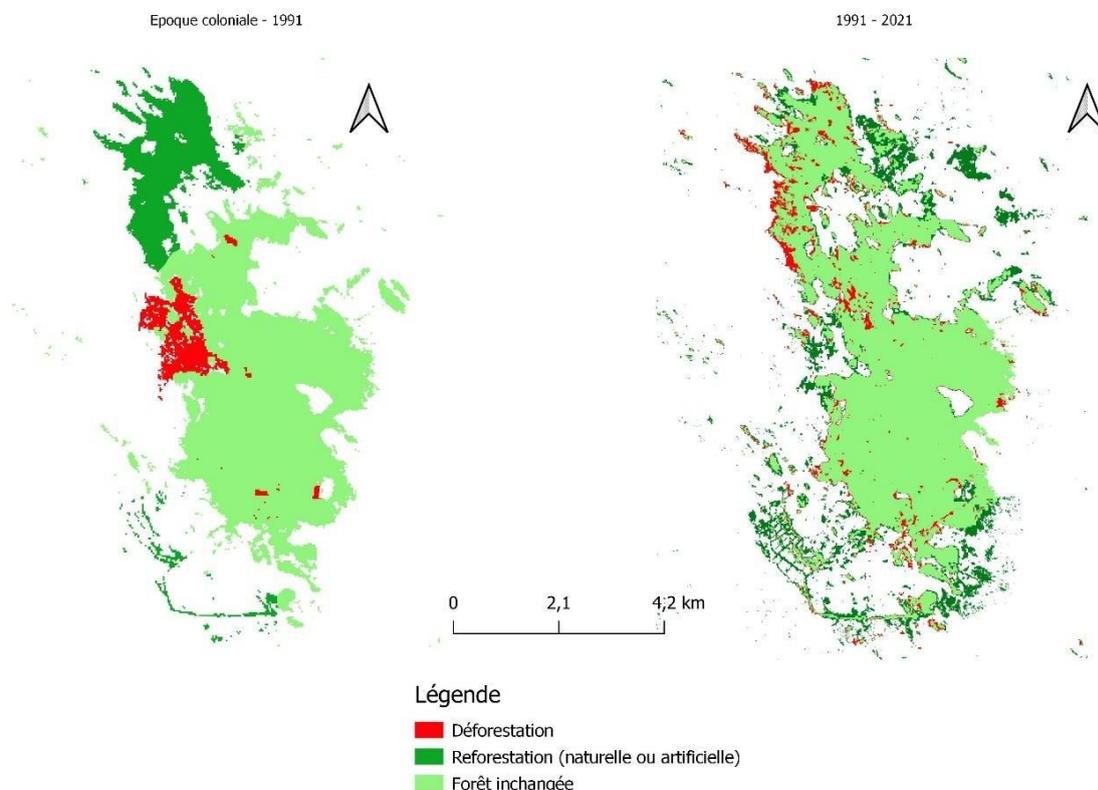
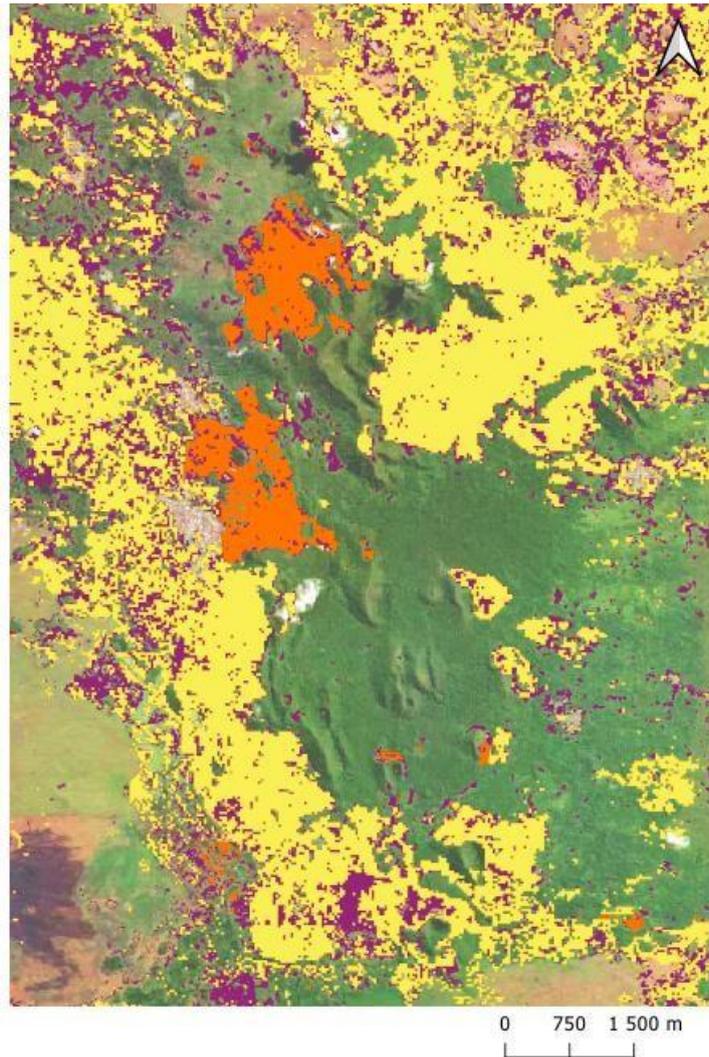


Figure 21: Zones déforestées et reforestées entre 1960 et 2021

La zone déforestée sur la période de 1960- 1991, a subi ce phénomène de déforestation après l'indépendance lorsque la forêt n'était plus protégée, les agriculteurs ont pu continuer à défricher jusqu'à ce qu'elle devienne un plateau agricole, aujourd'hui étant le plateau agricole de La Grille. C'est aussi dû à la création de la route sur cette partie de la zone d'étude durant la période coloniale. La reforestation est artificielle, peuplée d'eucalyptus.

A partir de 1991, les phénomènes de reforestation et de déforestation se font progressivement sur l'étendue de la zone d'étude.

La forêt s'est donc agrandie dans le temps et les phénomènes de déforestation n'ont pas touché le couvert forestier à proprement parler.



Légende

- Zones d'agriculture inchangées
- Mise en culture 1991
- Mise en culture 2021

Figure 22: cartes des zones mises en culture de 1960 à 2021

On peut voir que les zones qui ont été mises en culture avant 1991, correspondent aujourd'hui au plateau de la Grille et au plateau de Maroni – Gawani. La Grille a remplacé une partie de la forêt de la Grille, tandis que Maroni a remplacé des champs qui étaient laissés en végétation spontanée. Après 1991, les mises en culture se sont faites par agrandissement des zones déjà cultivées. L'agriculture prend de plus en plus de place et elle dépend de l'augmentation de la population et empiète sur les autres types d'occupation du sol.

La diminution de la forêt dépend donc de l'augmentation de l'agriculture, qui dépend de l'augmentation en besoin agricole évoluant en fonction de l'augmentation de la démographie sur l'île.

Selon les estimations, la population comorienne va augmenter de plus en plus au cours des prochaines décennies (Ministère du Développement Rural, de la Pêche, de l'Artisanat et de l'Environnement, 2006). On peut donc prédire que la forêt va subir de plus en plus de phénomène de déforestation.

Néanmoins l'augmentation du maraîchage, un produit agricole de plus en plus demandé, dépend de la possibilité en trésorerie et en intrants. Ici nous nous intéressons aux intrants en eau avec ou sans traitements chimiques.

L'utilisation de l'eau est mal gérée car les volumes d'eau sont très peu disponibles. Ainsi les rendements sont plus faibles. Les rendements étant faibles, les cultures s'étalent afin d'avoir assez de production pour gagner un revenu potable.

Augmenter les rendements sur une parcelle avec la disponibilité en eau permettrait de limiter la prise de l'agriculture sur la forêt. D'autant plus que la forêt offre une humidité au sol qui permet de meilleurs rendements et moins de besoins en eau.

La disponibilité en eau, comme vu précédemment est faible et couvre entre 3 et 26 % des surfaces agricoles des zones agricoles étudiées.

Les besoins sont forts et la disponibilité faible, ainsi pour répondre à ces besoins il faudrait plus d'infrastructures hydrauliques avec des moyens facilitant l'accès.

La citerne de La Grille couvre déjà 1,4 ha. Une citerne de 1030m³ peut subvenir en eau pour la saison sèche 20,2 ha. La surface agricole de La Grille étant de 46 ha. Il faudrait 2 de ces citernes situées sur les zones en hauteur afin de pouvoir faire un système d'acheminement de l'eau avec des tuyaux et à proximité des pistes pour un accès facilité.

Les 3 citernes de la zone de Maroni – Gawani peuvent couvrir 29 ha sur 132 ha d'agriculture. Il reste donc environ 100 ha à couvrir, il faudrait donc encore 5 autres citernes de 1030 m³.

Dimadjou est une zone agricole importante pour la culture de la pomme de terre. Les deux citernes peuvent couvrir 101 ha sur 388 ha d'agriculture. Il reste donc 287 ha à couvrir, qui pourraient l'être avec 14 citernes de 1030 m³ éparpillées sur le plateau.

Bandassamlini et Sangani ont beaucoup d'infrastructures hydrauliques fonctionnelles (5) et beaucoup sont en construction. 82 ha sont couverts par les citernes sur 408 ha. Il faudrait donc 16 autres infrastructures de 1030 m³ pour couvrir tous les besoins.

2. Discussion

Les résultats de cette étude sont discutables et à remettre en question en fonction de leur contexte et des données disponibles.

Analyse diachronique

Les données utilisées pour construire les cartes d'occupation du sol sur différentes périodes dépendaient de beaucoup de facteurs.

Les résultats de la carte d'occupation du sol de 2021, présentent des biais sur l'occupation de la forêt naturelle / dégradée / artificielle. Ces classes sont difficilement discriminantes par classification supervisée car étant sous couvert forestier. Ainsi les résultats ne sont pas exacts, surtout pour la forêt naturelle.

Pour la carte de 1991, n'ayant pas d'image aérienne, les vecteurs d'entraînements se sont basés sur ceux de la carte de 2021 en gardant les polygones où l'on est sûr qu'il n'y a pas eu de changements en parallèle avec les images satellites et les indices spectraux.

Pour la carte de la période coloniale, les seuls changements sont sur les zones où les agriculteurs avaient connaissance des changements. Cette carte se base uniquement sur la perception des agriculteurs et donc n'est pas très précise et réaliste.

En général, l'analyse diachronique ne peut pas évaluer les sous-classes de forêt, ne pouvant être discriminées sur les périodes antérieures, par manque de données et connaissances du terrain à ces périodes. Les phénomènes de déforestation ont aussi lieu sous les couverts forestiers, c'est-à-dire de forêt naturelle à dégradée à forêt sous plantée. Cela n'est donc pas visible sur cette étude, mais il aurait été intéressant de montrer les changements de sous-classes de forêt.

Données quantitatives

L'étude se basait sur une approche quantitative des besoins et disponibilités de la ressource hydrique.

Pour les besoins, la récolte de données a eu plusieurs biais. Le premier biais était la barrière de la langue et de la culture. Les autres biais concernent la possibilité des agriculteurs de répondre aux besoins de l'étude. En effet, les informations quantitatives et temporelles ne sont pas forcément connues par les agriculteurs. Il a fallu donc trouver des stratégies afin de récolter les données quantitatives qui se sont révélées ne pas être toutes exploitables.

Un autre biais des enquêtes est l'échantillon des personnes interrogées qui a été fait par « bouche à oreille » et par investigations directes sur le terrain. Cet échantillon n'était pas forcément représentatif de tous les territoires.

L'utilisation de l'eau, dépend de beaucoup de facteurs qui ne peuvent être pas contrôlés ni déterminés. Elle dépend des profils des agriculteurs au cas par cas et des événements extérieurs non relatés à l'étude. Ainsi il est impossible de donner un chiffre précis sur les besoins et les volumes d'eau utilisés pour l'agriculture.

Analyse multicritère

Les résultats de l'analyse multicritère sont aussi à questionner. En effet, comme nous l'avons démontré cette analyse ne prenait pas en compte les facteurs extérieurs et qualitatifs malgré leur importance. Ces données ne peuvent pas être prises en compte dans une analyse spatiale multicritère.

Conclusion et recommandation

L'analyse diachronique du paysage du massif de La Grille sur une période de 60 ans a démontré l'augmentation des surfaces agricoles empiétant sur les autres types d'occupation du sol. La tendance évolutive des surfaces agricoles suit celle de la démographie et influe l'évolution des besoins en eau. La démographie étant vouée à augmenter, il faut donc prédire une évolution des surfaces agricoles et donc des besoins en eau.

Si l'analyse diachronique ne prouve pas de baisse de l'occupation du sol par la forêt vis-à-vis du couvert forestier, les investigations de terrain et la carte d'occupation du sol actuelle démontrent une place prépondérante des forêts sous plantées, soit des forêts avec une forte présence d'agriculture sous le couvert forestier. On observe également une faible proportion de forêt naturelle. Si l'analyse diachronique ne peut pas évaluer les phénomènes de déforestation sous la canopée, on peut émettre l'hypothèse d'une prise de la forêt sous plantée sur la forêt naturelle comme étant un phénomène de déforestation.

Les enquêtes ont pu faire ressortir un problème majeur en termes d'accès à l'eau pour les agriculteurs dans la pratique du maraîchage. L'irrigation pour l'agriculture provient uniquement d'eaux pluviales captées par des systèmes de captages ou par des citernes et impluviums. Ainsi l'utilisation de l'eau d'irrigation dépend directement de la pluviométrie et des moyens de la capter. Elle est donc soumise aux variations climatiques et à la capacité des infrastructures.

L'accès à l'eau représente un majeur problème dans la pratique de l'agriculture maraîchère. La distance et les chemins à parcourir sont très problématiques ainsi l'accès à l'eau pour les agriculteurs est limité. Les besoins en eau des végétaux ne sont pas assurés par faute de moyens à l'accès à l'eau. Cela provoque ainsi un fort déficit en termes de rendements agricoles.

Hormis les facteurs limitant l'accès à l'eau, la disponibilité via les infrastructures hydrauliques reste faible par rapport aux besoins. L'ensemble des infrastructures ne couvrent qu'une faible partie des surfaces agricoles, empêchant ainsi une utilisation de l'eau plus forte et régulière. Les analyses démontrent que chaque zone agricole maraîchère étudiée aurait besoin de nouvelles infrastructures hydrauliques afin de pallier ce manque en eau.

Connaissant les prédictions climatiques futures, une baisse des précipitations et une dérégulation des saisons sont à prévoir.

Tandis que les besoins augmenteront par la croissance démographique, la disponibilité diminuera. Les besoins n'étant déjà pas comblés aujourd'hui, les phénomènes actuels sont certainement voués à s'accroître. Si le stockage en eau lors de la saison des pluies, où la ressource est la plus disponible, n'évolue pas, des déficits hydriques sont à prévoir tant pour l'eau potable que pour l'eau agricole.

Les zones agricoles ont besoin de plus d'infrastructures hydrauliques pouvant contenir de large volume d'eaux de pluies, et mieux réparties sur les zones agricoles, avec un système d'acheminement de l'eau par tuyaux sur les parcelles maraîchères.

Il serait également intéressant d'évaluer le rôle des arbres dans la préservation de la ressource hydrique ou dans les rendements agricoles.

Bibliographie

- Ali D.B., Mgomri H.** s.d. Le grand mariage et ses implications dans le développement humain. 111 p.
- Bates B., Kundzewicz Z.W., Palutikof J., Wu S.** 2008. Le changement climatique et l'eau. Genève, Suisse : GIEC, 236 p.
- Bonnot E.** 2020. Analyse diachronique du tracé des cours d'eau et des aménagements en zone inondable dans le bassin de la Moselle aval depuis le XIXème siècle: étude réalisée dans le cadre du Programme d'Action et de Prévention des Inondations de la Moselle aval. France : Université de Lorraine,
- Bourhane A.** 2014. Méthodes d'investigation de l'intrusion marine dans les aquifères volcaniques (La Réunion et La Grande Comore). France : Université de La Réunion, 187 p.
- Bourhane A., Comte J.-C., Join J.-L., Ibrahim K.** 2016. Groundwater Prospection in Grande Comore Island—Joint Contribution of Geophysical Methods, Hydrogeological Time-Series Analysis and Groundwater Modelling. In: Bachelery P., Lenat J.-F., Di Muro A., Michon L. (eds). *Active Volcanoes of the Southwest Indian Ocean*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg : p. 385-401 (Coll. Active Volcanoes of the World).
- Charlotte P.R.** s. d. Soutenu publiquement : l e 20 avril 20095.
- Charmoille A.** 2013. EBAUCHE DU FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE DE L'ÎLE D'ANJOUAN (COMORES) (Technical Report). ONG AVSF, ONG Dahari
- Cindy Schmidt** 2020. NASA ARSET: Introduction to Land Cover Classification and QGIS, Part 1/2
- CNES** 2022. Features – Orfeo ToolBox [consulté le 05 septembre 2022]. <https://www.orfeo-toolbox.org/features-2/>
- Comte J.-C., Cassidy R., Obando J., Robins N., Ibrahim K., Melchioly S., Mjemah I., Shauri H., Bourhane A., Mohamed I., Noe C., Mwega B., Makokha M., Join J.-L., Banton O., Davies J.** 2016. Challenges in groundwater resource management in coastal aquifers of East Africa: Investigations and lessons learnt in the Comoros Islands, Kenya and Tanzania. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, **5** : 179-199. doi: 10.1016/j.ejrh.2015.12.065.
- DGME** 2013. PROJET D'ALIMENTATION EN EAU POTABLE ET D'ASSAINISSEMENT (AEP) DANS LES 3 ILES DE L'UNION DES COMORES. 102 p.
- Diédhiou I., Mering C., Sy O., Sané T.** 2020. Cartographie par télédétection l'occupation du sol et ses changements. *EchoGéo*, (54) : doi: 10.4000/echogeo.20510. [consulté le 05 septembre 2022] url: <https://journals.openedition.org/echogeo/20510>.
- EarthExplorer** 2022. [consulté le 26 septembre 2022]. <https://earthexplorer.usgs.gov/?fbclid=IwAR1nEVDbPiBrs1WBcYvX-M8ra9dA1sAYwRdEj3zrYbnL4fF9gfWyS1T3lu0>
- EI HADRAOUI Y.** 2013. Étude diachronique de l'occupation du sol et de modélisation des processus érosifs du bassin versant du Bouregreg (Maroc) à partir des données de l'Observation de la Terre. 88 p.
- FAO** 1997. Chapitre 2: Concepts et définitions. In: *Zonage Agro-écologique - Directives*. (Coll. Bulletin Pédologique de la FAO).
- GCCA+** 2021. Le programme AMCC-Comores: contribution à une agriculture résiliente au changement climatique. Moroni : Union Européenne : 24 p.

- Grizonnet M., Michel J., Poughon V., Inglada J., Savinaud M., Cresson R.** 2017. Orfeo ToolBox: Open source processing of remote sensing images. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, **2** (1) : 1-8.
- IDB - List of available Indices** 2022. [consulté le 05 septembre 2022]. <https://www.indexdatabase.de/db/i.php?&order=-rcount>
- La cartographie sociale - 474 Mots | Etudier** 2022. [consulté le 26 septembre 2022]. <https://www.etudier.com/dissertations/La-Cartographie-Sociale/218481.html>
- Landsat 5 | U.S. Geological Survey** 2022. [consulté le 26 septembre 2022]. <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-5>
- Leroux L., Congedo L., Bellón B., Gaetano R., Bégué A.** 2018. Land Cover Mapping Using Sentinel-2 Images and the Semi-Automatic Classification Plugin: A Northern Burkina Faso Case Study. In: Baghdadi N., Mallet C., Zribi M. (eds). *QGIS and Applications in Agriculture and Forest*. Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, Inc. : p. 119-151
- Louise L.** 2012. Analyse diachronique de la dynamique paysagère sur le bassin supérieur de l'Ouémé (Bénin) à partir de l'imagerie Landsat et MODIS– Cas d'étude du communal de Djougou62.
- Ministère du Développement Rural, de la Pêche, de l'Artisanat et de l'Environnement** 2006. Programme d'Action National d'Adaptation aux changements climatiques (PANA). Comores : Union des Comores : 92 p.
- Moinard S.** 2018. Télécharger une image du satellite Sentinel 2 sur la plateforme de Copernicus
- Montoya S.** 2022. How many Spectral Bands have the Sentinel 2 Images? Hatari Labs. [consulté le 05 septembre 2022]. <https://hatarilabs.com/ih-en/how-many-spectral-bands-have-the-sentinel-2-images>
- Ni L.** 2019. Diagnostic agricole à Maweni Mbude (Mémoire). France : AgroParisTech : 91 p.
- Nougier J., Cantagrel J.M., Karche J.P.** 1986. The Comores archipelago in the western Indian Ocean: volcanology, geochronology and geodynamic setting. *Journal of African Earth Sciences* (1983), **5** (2) : 135-145. doi: 10.1016/0899-5362(86)90003-5.
- Oszwald J., Antoine L., Arnauld de Sartre X., Marcello T., Gond V.** 2010. Analyse des directions de changement des états de surface végétaux pour renseigner la dynamique du front pionnier de Maçaranduba (Brésil) entre 1997 et 2006. *Teledetection*, **9** (2) : 97-111.
- PNUD** 2010. Programme d'appui à la finance inclusive aux comores
- Prévil C., Thériault M., Rouffignat J.** 2003. Analyse multicritère et SIG pour faciliter la concertation en aménagement du territoire: vers une amélioration du processus décisionnel? *Cahiers de géographie du Québec*, **47** (130) : 35-61. doi: 10.7202/007968ar.
- Ritchie H., Roser M.** 2017. Water Use and Stress. *Our World in Data*, [consulté le 23 septembre 2022] url: <https://ourworldindata.org/water-use-stress>.
- Semi-Automatic Classification Plugin** 2022. ResearchGate. [consulté le 26 septembre 2022]. <https://www.researchgate.net/project/Semi-Automatic-Classification-Plugin>
- sklearn.ensemble.RandomForestClassifier** 2022. Scikit-Learn. [consulté le 26 septembre 2022]. <https://scikit-learn/stable/modules/generated/sklearn.ensemble.RandomForestClassifier.html>
- Tassi A., Gigante D., Modica G., Di Martino L., Vizzari M.** 2021. Pixel- vs. Object-Based Landsat 8 Data Classification in Google Earth Engine Using Random Forest: The Case Study of Maiella National Park. *Remote Sensing*, **13** (12) : 2299. doi: 10.3390/rs13122299.

Liste des annexes

Annexe 1 – Questionnaires des enquêtes auprès des agriculteurs	77
Annexe 2 – Evolution de la surface forestière sur 60 ans	78
Annexe 3 – Indices spectraux utilisés pour la classification supervisée	80
Annexe 4 – Photo du système de captage d'eau de pluies avec cabanes en taules	81
Annexe 5 – Toposéquences des différents étages agroécologiques de la région de Maweni Mbude (Ni, 2019)	82
Annexe 6 – Carte géologique de la Grande Comore	83

Annexes

Annexe 1 – Questionnaires des enquêtes auprès des agriculteurs

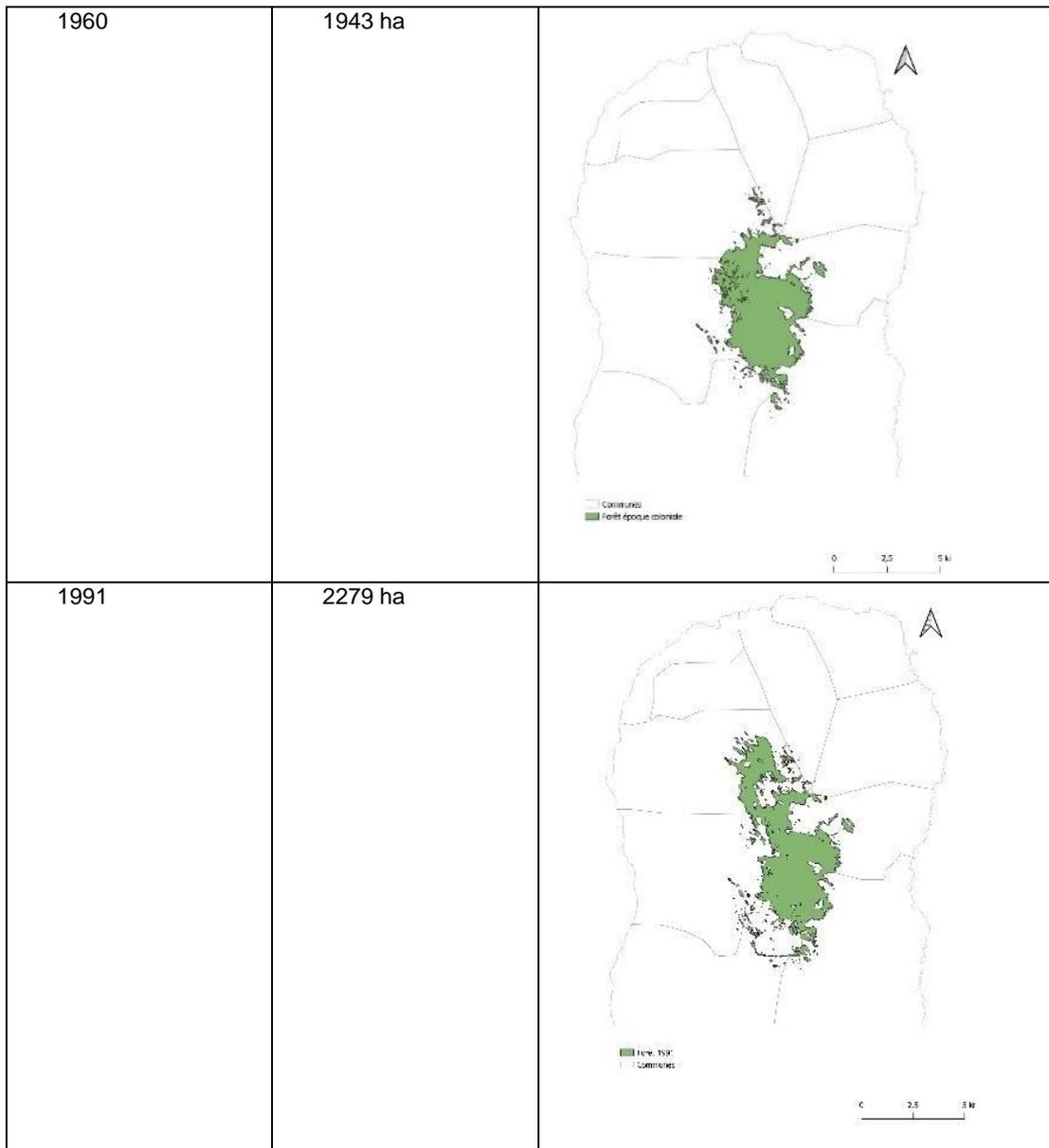
N°	Nom :	Village :	ZONE :	Numéro :
----	-------	-----------	--------	----------

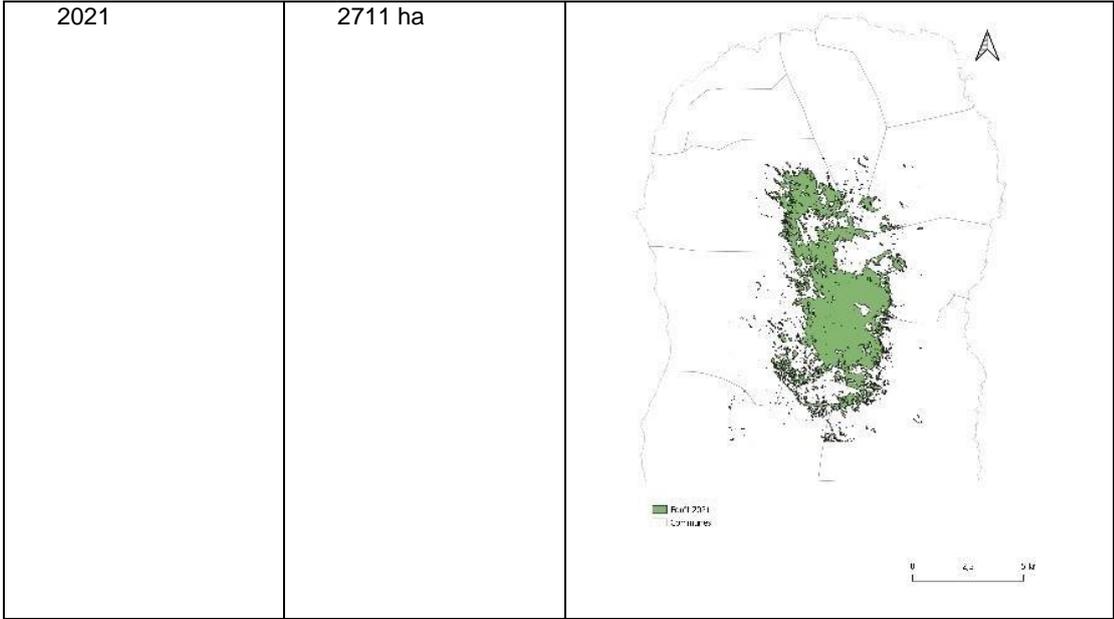
PARCELLES		H=hérité / AC= Acquisition	MAR / VIV / AG / BANTA		X=non / V=oui		
Lieu-dit	Surface	Cultures	Acquisition	Irrigation	Citernes	Temps de marche	Acheminement

P = principale R=+ rentable Cultures (P/R)	VENTES			Irrigation			
	Destination :	Qt produit (rdt)	Salaires	VOL BIDONS :	Quantité d'eau	Fréquence	Intrants
Tomates (T)	Semé (sachet/boite)			Irrigation			
PDT							
Choux (CH)							
Carotte (C)							
Laitue (L)							

BESOINS

Annexe 2 – Evolution de la surface forestière sur 60 ans





Annexe 3 – Indices spectraux utilisés pour la classification supervisée

ARVI <i>Atmospherically Resistant Vegetation Index</i>	$\frac{(NIR - RED - \gamma * (RED - BLUE))}{(NIR + RED - \gamma*(RED-BLUE))}$ $\gamma = 0.069;$	Indices plus résistants face aux effets topographiques. Outil très efficace pour les régions montagneuses tropicales. Très résistant aux régions à forte teneur en aérosol
EVI 2 <i>Enhanced Vegetation Index 2</i>	$2.4 * (NIR - RED) / (NIR + RED + 1)$	Indice de végétation amélioré qui corrige les résultats du NDVI pour les influences atmosphériques et les signaux de fond du sol, en particulier dans les zones de couvert forestier dense. Pratique pour analyser les zones avec de grandes quantités de chlorophylle.
SIPI 3 <i>Structure Intensive Pigment Index 3</i>	$(NIR - BLUE) / (NIR - RED)$	Indice de pigmentation insensible à la structure. Efficace pour l'analyse de la végétation à structure de canopée variable.



Annexe 5 – Toposéquences des différents étages agroécologiques de la région de Maweni Mbude (Ni, 2019)

