



HAL
open science

Vulnérabilité des espaces agricoles aux changements climatiques au Rwanda. Etudes des enjeux environnementaux et sociaux au district de Nyabihu

Morgane Grondin

► **To cite this version:**

Morgane Grondin. Vulnérabilité des espaces agricoles aux changements climatiques au Rwanda. Etudes des enjeux environnementaux et sociaux au district de Nyabihu. Géographie. 2022. dumas-03808109

HAL Id: dumas-03808109

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03808109>

Submitted on 10 Oct 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

VULNÉRABILITÉ DES ESPACES AGRICILES FACE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES AU RWANDA

Etudes des enjeux environnementaux et sociaux au district de Nyabihu

GRONDIN Morgane

Sous la direction de Monsieur BROU Yao Téléphore Professeur des universités,
université de La Réunion

Soutenu le 13 juin 2022 devant un jury composé de :

Madame VAUGIEN Martine, maître de conférence à l'Université de La Réunion
Monsieur RWANYIZIRI Gaspard, Directeur en géographie et aménagement au CGIS du Rwanda
Monsieur BROU Yao Téléphore, professeur à l'Université de La Réunion

Sommaire

SOMMAIRE	3
REMERCIEMENTS	4
GLOSSAIRE	5
RÉSUMÉ	6
INTRODUCTION	7

Première partie :

PRÉSENTATION DU CONTEXTE CLIMATIQUE ET DE L'ACTIVITÉ VÉGÉTALE

Chapitre 1 - Données et méthodes adoptées dans l'étude	20
Chapitre 2 - Étude des relations pluies et couvert végétal de 2000 à 2021 à l'échelle du Rwanda à partir des images basses résolution spatiales NDVI-MODIS et TRMM	30

Deuxième partie :

LE DISTRICT DE NYABIHU : ENTRE DÉFIS ENVIRONNEMENTAUX, SOCIAUX ET AGRICOLES

Chapitre 3 - Modification de la couverture végétale en relation avec les activités humaines à l'échelle locale : district de Nyabihu	61
CONCLUSION GENERALE	76
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	78
LISTE DES PHOTOGRAPHIES	84
LISTE DES FIGURES	86
LISTE DES TABLEAUX	87

Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier mon directeur de mémoire, Monsieur Yao Téléphore BROU, Professeur des universités à l'université de La Réunion, pour le temps conséquent qu'il m'a accordé, ses qualités pédagogiques et scientifiques. J'ai beaucoup appris à ses côtés et je lui adresse ma gratitude pour tout cela. J'adresse de chaleureux remerciements à mon directeur de stage, Monsieur Gaspard RWANYIZIRI, Directeur et chercheur en géographie au CGIS pour son accueil au Rwanda.

Je ne saurais oublier toute l'équipe du CGIS : Monsieur Elias NYANDWI, Monsieur Theodimir MUGIRANEZA, Monsieur Emmanuel MUYOMBANO, Monsieur Jean-Pierre HITIMANA, Monsieur Ernest UWAYEZU, et Madame Clarisse KAGOYIRE, pour leur convivialité et l'aide qu'ils ont pu m'apporter au Centre pour les systèmes géographiques et la télédétection (CGIS). J'exprime mon profond respect à Monsieur Joseph TUYISHIMIRE, sans lui mes observations sur le terrain n'auraient pas été possibles et pour cela je le remercie sincèrement.

Je tenais également à remercier Monsieur Davis BUGINGO, responsable de la division de la gestion des inondations et du développement du stockage de l'eau au Rwanda Water Resources Board (RWB), Monsieur Hervé MURENZI, agrométéorologue, Monsieur Janvier HITIMANA, responsable de mandat à ARCOS et Monsieur Jean de Dieu IRADUKUNDA, agent de maintenance cadastrale pour l'accueil et le temps qu'ils m'ont accordé.

Enfin, je remercie ma famille, et tous ceux que je ne nomme pas ici, mais qui se reconnaîtront.

Glossaire

ARCOS	Albertibe Rift Conservation Society
CAE	Communauté de l'Afrique de l'Est
CCNUCC	Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques
CC	Changement climatique
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Indice de végétation par Différence Normalisée
OMM	Organisation météorologique mondiale
PANA	Programme d'action national d'adaptation au changement climatique
PIB	Produit Intérieur Brut
PMA	Pays les moins avancés
SIG	Système d'Information Géographique
TIMESAT	Time-series of Satellite sensor data
TRMM	Tropical Rainfall Monitoring Mission
ZCIT	Zone de Convergence Intertropicale

Résumé

Le Rwanda est un pays majoritairement rural et dépend d'une économie basée essentiellement sur l'agriculture, logiquement vulnérable au changement climatique. La vulnérabilité des zones agricoles au changement climatique est un problème important qui nécessite une attention urgente. L'agriculture est l'un des secteurs les plus sensibles au changement climatique, car elle dépend des conditions et des modèles météorologiques qui peuvent changer rapidement. Ainsi, l'objectif consiste à étudier les facteurs socio-économiques, climatiques et sociaux qui sont identifiés comme l'un des principaux impacts du changement climatique. La population est dépendante des ressources naturelles et l'activité économique est directement dépendante des conditions climatiques, la prévision des facteurs pluviométriques est donc impérative. Cette étude du district de Nyabihu dans le secteur de Mukumira montre que des précipitations anormales et des sécheresses fréquentes peuvent causer des dommages directs aux cultures et perturber les activités humaines.

Mots clés : Variabilité climatique, TRMM, LANDSAT, vulnérabilité de la végétation, pluviométrie, NDVI MODIS, Rwanda

Abstract

Rwanda is a predominantly a rural country with an economy based on agriculture, and logically vulnerable to climate change. The vulnerability of agricultural areas to climate change is an important issue that requires immediate attention. Agriculture is one of the most sensitive sectors to climate change, because it depends on weather conditions and patterns that can change rapidly. Thus, the objective is to study the socio-economic, climatic and social factors that are identified as one of the main impacts of climate change. The population is dependent on natural resources and economic activity is directly dependent on climatic conditions. Therefore, forecast of rainfall factors is imperative. This study of Nyabihu district in Mukumira sector shows that abnormal rainfall and frequent droughts can cause direct damage to crops and disrupt human activities.

Keywords : Climate variability, TRMM, LANDSAT, vegetation vulnerability, rainfall, NDVI MODIS, Rwanda

Introduction

1.1 Contexte, problématiques et objectifs

L'Afrique est souvent perçue comme le continent le plus vulnérable face aux impacts du changement climatique. Les changements climatiques globaux pourraient se traduire par une augmentation de la température annuelle moyenne en Afrique (+de 2°) à l'horizon 2050, voire atteindre entre 3° et 6°C d'ici à la fin du siècle (Hazard, 2015). En conséquence, la concurrence pour les ressources (eau, terres arables) et l'affaiblissement des systèmes agricoles s'accroîtront dans les régions semi-arides.

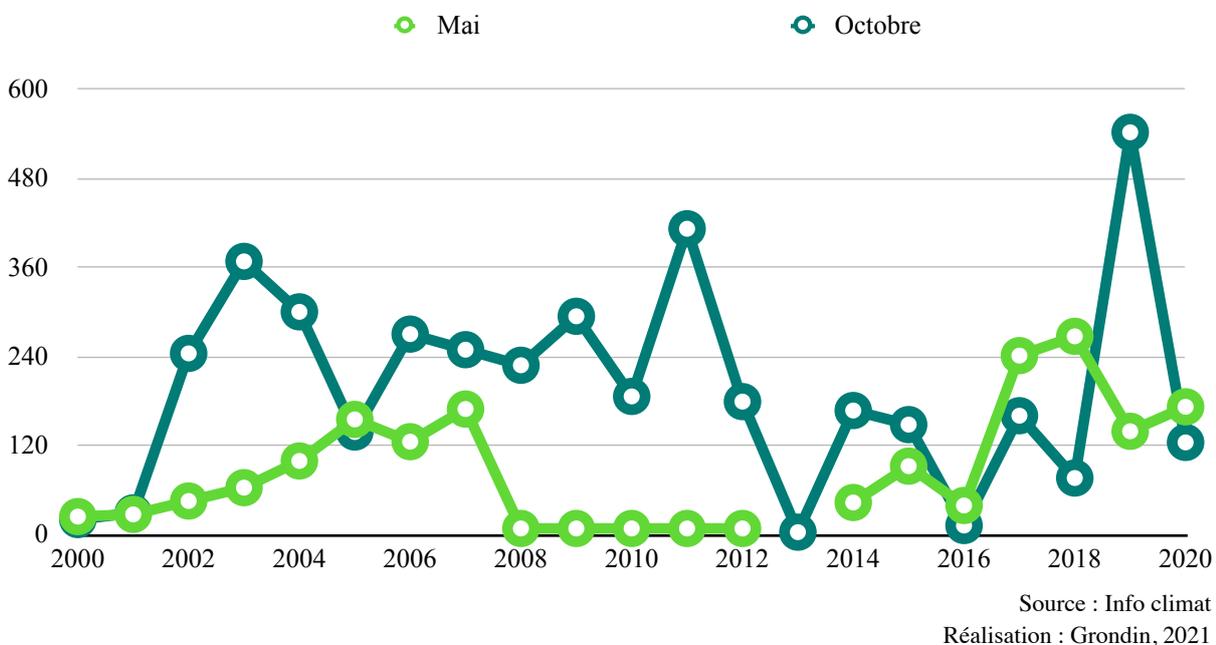
Aujourd'hui, le changement climatique a été identifié comme l'un des principaux moteurs des problèmes sociaux et environnementaux dans le monde. Dans les pays du sud, l'impact du changement climatique sur le secteur agricole est particulièrement important, en raison de la forte dépendance de l'agriculture de ces pays à l'environnement (par exemple, l'immense majorité des surfaces agricoles africaines sont non irriguées), ce qui la rend plus vulnérable, et parce que les conditions économiques ne permettent pas de mettre en place des schémas d'agriculture intensive (Perret S. et al., 2018). Dans leurs contributions déterminées au niveau national (NDC, Nationally Determined Contributions) et présentées par l'ensemble des pays de la planète lors de l'accord de Paris en 2015 (COP 21), tous les pays d'Afrique subsaharienne citent le secteur agricole parmi les options retenues pour l'adaptation au changement climatique.

En effet, l'Afrique de l'est est très sensible à l'augmentation des phénomènes météorologiques extrêmes. À Djibouti, on a eu l'équivalence de deux années de pluie en une seule journée (M. Douet, 2019). Des régions comme la Somalie ont été recouvertes d'eau. Aujourd'hui, les thèmes du changement climatique et de la variabilité climatique constituent un véritable débat. Le changement climatique exprime, selon le GIEC, « une variation statistiquement significative de l'état moyen du climat ou de sa variabilité, persistant sur une période prolongée de plus d'une décennie » (Steffen et al., 2001). La variabilité climatique fait, quant à elle, référence « aux variations de l'état moyen et d'autres variables statistiques (écarts-types, apparition d'extrêmes...) du climat à toutes les échelles temporelles et spatiales autres que les phénomènes météorologiques particuliers » (Steffen et al., 2001). Les futurs changements climatiques pourraient exacerber les effets de la variabilité climatique et entraîner de nouveaux risques. Par conséquent, il est important de s'adapter et de renforcer la résilience des populations vulnérables face aux risques climatiques.

Selon le rapport publié par la FAO (2012), sur les 2,5 milliards de personnes vivant dans les pays les moins avancés (PMA), 1,5 milliard de personnes dépendent de la petite agriculture, qui est généralement plus sensible aux catastrophes liées au changement climatique tel que des sécheresses plus fréquentes et plus longues et des inondations graves.

La ville de Meru dans la province orientale du Kenya en est un bon exemple. Les précipitations saisonnières en mai sont insuffisantes pour la quatrième année consécutive. En effet, de 2008 à 2012, il n'y eu que 8 mm de précipitations [voir fig.1]. En revanche, de mai 2017 à 2020, les pluies saisonnières ont provoqué de graves inondations et des glissements de terrain à travers le Kenya, affectant inévitablement l'agriculture.

Figure 1 : Les précipitations mensuelles annuelles à Meru de mai à octobre sous la période de 2000 à 2020



En conséquence, l'Afrique de l'est connaît des perturbations inhabituellement élevées pendant la courte saison des pluies qui frappe la région chaque octobre. En octobre 2019 les précipitations enregistrées n'ont jamais été aussi conséquentes. En effet, près de 543 mm de pluies y sont tombées en moyenne ; en comparaison si l'on prend toute la période 2000-2020 la moyenne de pluies recensées était seulement de 198 mm. En 2020, 2018, 2011, et 2003, des averses de plus de 400 mm. En revanche, les précipitations en 2013 ont diminué de 3 mm. De toute évidence, les précipitations fluctuent considérablement d'une année à l'autre.

L'Afrique de l'est a une population estimée à plus de 445 millions d'habitants, et les projections démographiques pour la région sont quelque peu problématiques, car les impacts du changement climatique associés à la croissance démographique affectent la région de manière imprévisible (Cooper et al 2013) et (FAO 2012a). Ainsi, le changement climatique pose inévitablement un énorme défi à l'agriculture, car ces pays dépendent des revenus de l'industrie primaire où travaille la majeure partie de la main-d'œuvre [cf. tableau 1].

Tableau 1 : Part du secteur agricole dans les pays étudiés

	Part de la population rurale (%)	Part de l'agriculture dans le PIB (%)
Djibouti	24 %	4 %
Érythrée	64 %	24 %
Somalie	54,44 %	40 %
Ouganda	73,63 %	23,05 %
Soudan	66 %	30 %
Éthiopie	78,77 %	37,2 %
Tanzanie	70 %	28,74 %
Burundi	86,63 %	39,6 %
Kenya	72,49 %	34,15%
Rwanda	82,68 %	23,54 %

Source : la Banque mondiale Réalisation : Grondin, 2021

De ce fait, les changements et la variabilité climatique entravent considérablement le développement de l'Afrique de l'est. Nul ne peut rester sourd à la gravité de l'enjeu environnemental et climatique qui frappe de plus en plus fort à la porte de notre humanité. Les conséquences sont désastreuses, les migrations liées au réchauffement de la planète s'annoncent massives. Les conséquences humaines, économiques, écologiques, seraient sans précédent : multiplication des catastrophes naturelles, raréfaction de l'eau, déplacement de populations.

Il est donc intéressant de comprendre le contexte climatique et comment la croissance rapide de la population couplée à la variabilité climatique actuelle et l'extension incontrôlée des espaces de cultures, rendent la sécurité alimentaire de plus en plus complexe au Rwanda. Le Rwanda est un

pays de l'Afrique centrale situé au sud de l'Équateur, dominé par l'agriculture et l'élevage avec une forte densité rurale. Ce pays très densément peuplé laisse donc peu de place à la flore.

Mais alors, les actions humaines envers l'environnement jouent-elles un rôle dans l'évolution des phénomènes de sécheresse et d'inondation ? Au-delà de l'influence de la variabilité climatique, l'action humaine sur l'environnement a également joué un rôle important dans la modification des phénomènes de sécheresse et d'inondations (Afrique de l'est, 2020).

Le changement climatique, la surpopulation et une préparation inadéquate aux catastrophes augmentent le risque d'inondations et de glissements de terrain futurs, menaçant la vie de 295 000 habitants dans la région de Nyabihu au Rwanda (PNUD, 2014). Il s'agira donc d'identifier le contexte et les enjeux territoriaux autour de cet espace, connu pour son grand potentiel de fertilité et de comprendre les pressions anthropiques ainsi que les conséquences de l'action humaine qui ont fragilisé le district mais affectent aussi directement l'agriculture.

L'objectif de ce travail reste d'abord de mêler l'environnement au social qui y joue un rôle primordial dans sa transformation et sa protection, mais aussi de comprendre les enjeux principaux qui sous-tendent l'étude telle que les enjeux climatiques sur le territoire étudié.

L'augmentation rapide de la population et l'évolution de l'utilisation des terres sont deux facteurs clés qui ont contribué à ce problème. Ainsi, les effets des changements climatiques pourraient prendre des proportions dramatiques dans les années à venir. L'agriculture pluviale qui reste un pilier de la sécurité alimentaire en milieu rural oriente l'adoption de choix de développement et d'adaptation face à la nouvelle donne climatique (J. Bendriss, 2018).

Par conséquent, plusieurs problèmes spécifiques à l'agriculture sont exacerbés par le changement climatique, notamment les sécheresses, les inondations, la variabilité accrue des conditions météorologiques et les ravageurs et les maladies qui s'adaptent de plus en plus aux conditions changeantes.

Le changement climatique a donc des conséquences négatives sur la production agricole (Tubiello et al., 2007; IPCC, 2014; Torquebiau, 2015). L'agriculture a un rôle essentiel à jouer pour assurer la sécurité alimentaire et le bien-être d'une population mondiale croissante (Tripathi et al., 2016; Vogel et Meyer, 2018; Leisner, 2020). C'est l'une des activités humaines les plus liées au climat et elle est particulièrement affectée par le changement climatique. La relation entre changement climatique et agriculture est double : l'agriculture contribue de manière significative à la fois à la dégradation des terres et aux émissions anthropiques mondiales (P. Brabant, 2008). En effet, elle est responsable de 25% des émissions de carbone (causé essentiellement par la déforestation). Mais des efforts sont

aujourd'hui en cours pour comprendre comment l'agriculture pourrait être une des solutions au changement climatique. Enfin, la question retenue est la suivante : Face aux risques climatiques comment s'adapter et renforcer la résilience des espaces agricoles au Rwanda ?

1. 2 - Contexte climatique au Rwanda

1.2.1 - Situation géographique

Le Rwanda est un pays de l'Afrique centrale situé au sud de l'Equateur, entre 1°04' et 2°51 ' de latitude sud et entre 28°53', et 30°53' de longitude est. Le pays couvre une superficie de 26 338 kilomètres carrés et il est bordé par l'Ouganda au nord, la Tanzanie à l'est, et le Congo et le Burundi au sud. Sans accès à la mer, le Rwanda est ainsi enclavé et se situe, à vol d'oiseau, à 1 200 km de l'océan Indien et à 2 000 km de l'océan Atlantique (Atlas de l'Afrique, 2013).

Le relief du Rwanda, d'ouest en est, est compartimenté en trois zones : la crête du Congo-Nil bordée au nord par une chaîne volcanique, le plateau balsamique au sud-ouest, la région des collines au centre, les hautes terres de Gicumbi et de Buberuka au nord qui ferment l'espace, et enfin les plateaux et cuvettes de l'est (Atlas de l'Afrique, RWANYIZIRI.G, 2013). Le Rwanda est morphologiquement lié aux hautes terres d'Afrique centrale et orientale, avec une topographie vallonnée et une altitude moyenne de 1700 mètres. Sa topographie accidentée et ses microclimats font de lui un territoire exceptionnel.

1.2.2 - Cadre climatique

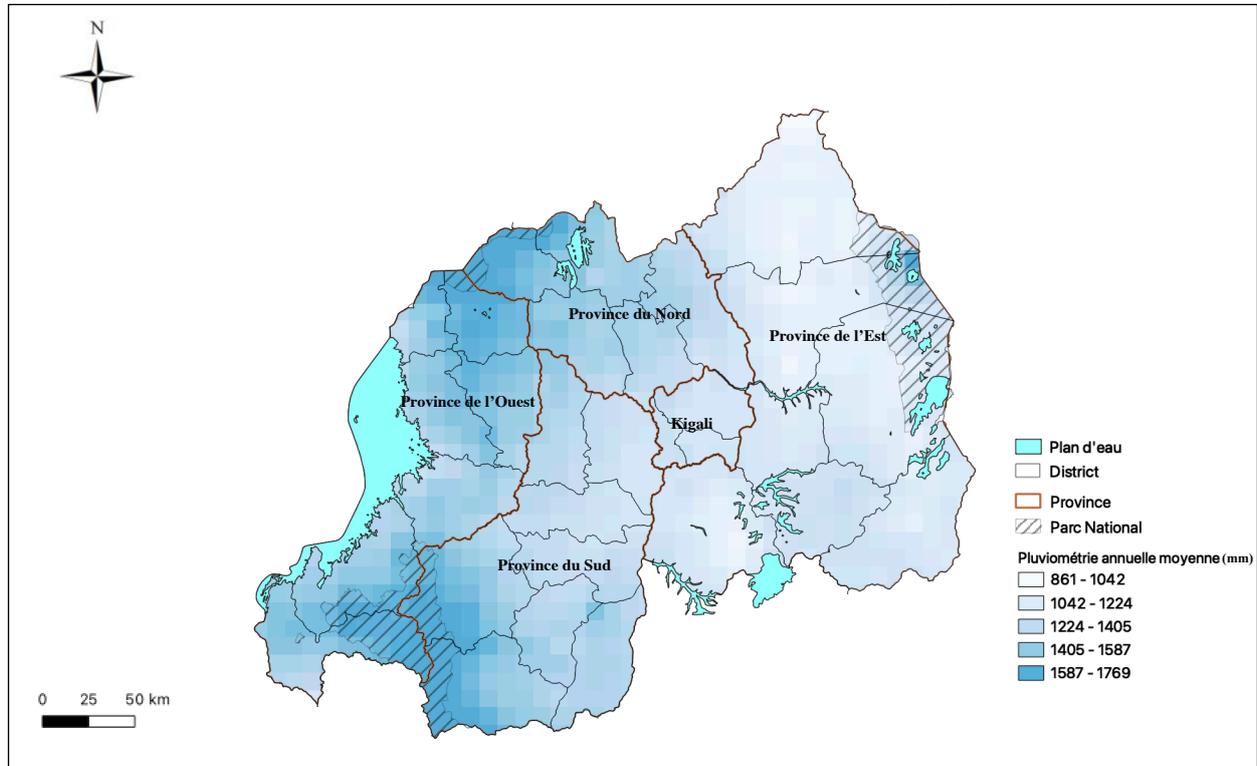
Au Rwanda, les caractères climatiques sont profondément modifiés par le relief du pays (PANA, 2006). En effet, les alizés du sud-est passent sans altération sur les plaines orientales du pays, puis légèrement sur les collines de la région centrale, avant d'atteindre le sommet du Nil Congo, où leur ascension rapide déclenche des pluies. Les températures douces et les pluies modérées font du Rwanda un milieu très différent des autres régions équatoriales chaudes et humides.

Le climat du Rwanda est subéquatorial, influencé par l'altitude, et présente les mêmes caractéristiques que les montagnes de l'Afrique de l'est et ses vallées du rift. Grâce à la présence de ces hautes montagnes, celle-ci échappe à l'aridité ou semi-aridité propres à des régions situées à la même latitude ou presque, comme celles que l'on observe dans le sud de la Somalie, où l'agriculture n'est possible que dans la zone d'inondation des fleuves (Atlas de l'Afrique, RWANYIZIRI.G, 2013).

Concernant les précipitations, le total pluviométrique annuel augmente d'est en ouest avec l'altitude. Ainsi, la province de l'est reçoit moins de 900 mm de pluie par an à la frontière de la Tanzanie et, à l'approche de Kigali, les précipitations augmentent progressivement jusqu'à atteindre environ 1000 mm [voir fig.2]. La région centrale du pays, depuis la frontière de l'Ouganda au nord jusqu'à celle du Burundi au sud, reçoit des précipitations comprises entre 1000 et 1200 mm d'eau

par an, de même que les régions basses de la crête du Congo-Nil. Les sommets de la crête, la chaîne des volcans et les Parcs nationaux sont les zones les plus arrosées avec plus de 1500 mm de pluie par an.

Figure 2 : Les précipitations annuelles au Rwanda



Source : CHIRPS précipitations annuelles 2010, QGIS
Réalisation : Grondin, 2022

Concernant la température moyenne annuelle du Rwanda, elle varie selon la topographie, et décroît d'est en ouest avec l'augmentation de l'altitude. Dans les hautes terres de la crête Congo-Nil et de la chaîne des volcans, la température annuelle moyenne varie entre moins de 15°C et 17°C (Météo Rwanda, 2020). Dans la chaîne des volcans, des températures proches de 0°C peuvent être observées ainsi que dans certaines vallées intra-montagnardes, ce qui se traduit par l'assèchement de culture observable surtout dans la plantation de thé. Les températures moyennes annuelles les plus chaudes se trouvent dans les basses terres orientales (20 - 21°C) et la vallée de Bugarama (23 - 24°C), et les températures plus fraîches dans les altitudes plus élevées du plateau central (17,5 - 19°C) et les hautes terres (moins de 17°C). Les températures varient peu tout au long de l'année (Météo Rwanda, 2010).

Cependant, la hausse des températures et l'irrégularité des précipitations sont révélatrices du changement climatique. Il est bien connu que les caractéristiques des précipitations au Rwanda présentent une grande variabilité temporelle et spatiale en raison de la topographie variable et de la présence de grandes masses d'eau à proximité du pays (Agence Météorologique du Rwanda, 2009). La variabilité temporelle des précipitations à certaines occasions a entraîné des événements

extrêmes tels que les inondations du phénomène El-Niño de 1997/98 et des sécheresses fréquentes qui ont des impacts socio-économiques considérables sur le pays (S. Verrier, 2011).

En effet, les districts Ruhengeri, Kamembe et Butare affichent une moyenne de précipitations particulièrement bien marquées pour l'année 2020 [voir fig.19]. De plus, les pluies torrentielles dans ces zones (plus de 200 mm) sont une indication claire de son anomalie, avec des précipitations moyennes généralement comprises entre 170 et 180 mm. Il a été observé que l'indice de sécheresse indiquait une période très humide. Les cultures ont été donc dévastées, en autres, les plantations de riz, patates douces, cannes à sucre ont été durement touchées voire certaines sont totalement inexploitable. À l'inverse en 2016, la sécheresse a touché plusieurs districts comme Ruhengeri, Kamembe, Kirehe, Nyanza, Kigaliaéroport, Butare, Nyamata et Gisenyi qui ont affiché des indices de sécheresse très négatifs [voir fig.17]. Près de 23.488 hectares de cultures ont été affectés (Afrique, 2021).

Nous verrons que le changement climatique, la surpopulation et une préparation inadéquate aux catastrophes aggravent le risque d'inondations et de glissements de terrain futurs, mettant en péril la vie des 295 000 habitants au district de Nyabihu (PNUD, 2014).

1.3 Contexte climatique dans le district de Nyabihu

Le district de Nyabihu a un climat généralement doux ; la température moyenne est de 15° et les précipitations annuelles sont de 1 400 mm. Son altitude varie entre 1 460 mètres et 4 507 mètres, ses points culminants étant Karisimbi et le mont Muhe. Il est dominé par des pentes raides, faisant du district l'endroit le plus fortement exposé aux glissements de terrain (MIDIMAR, 2015a ; Nahayo et al., 2017 ; Dibanga & Gatera, 2017 ; Nyabihu, 2013).

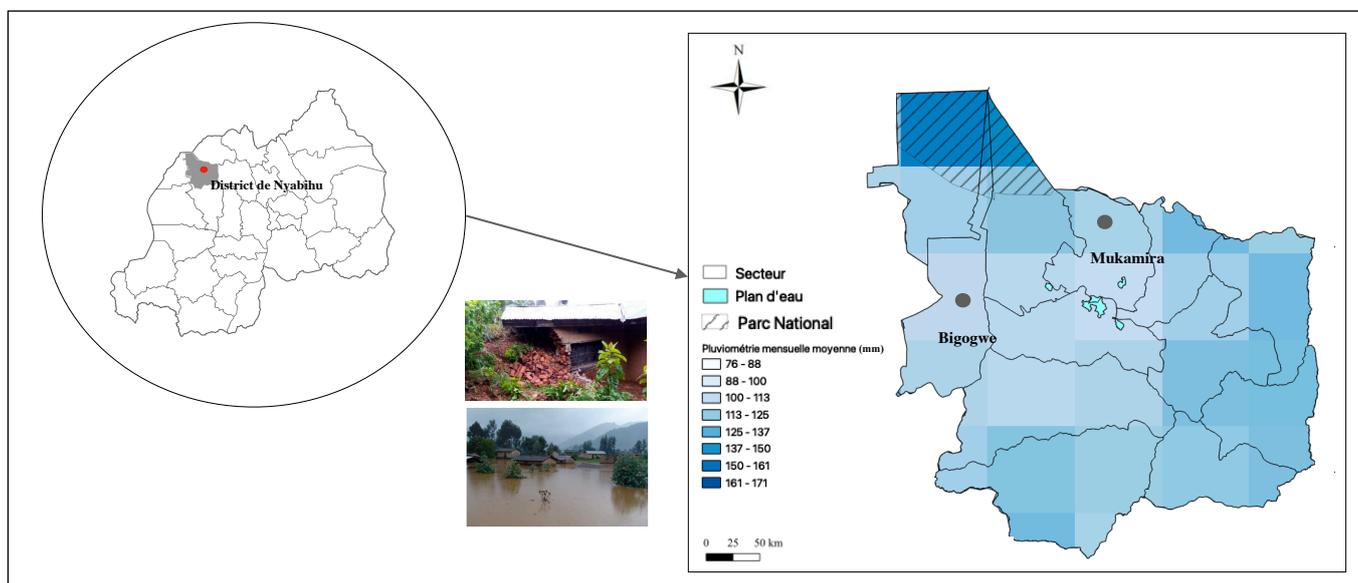
Les régions à risque fortement impactées par les inondations et les glissements de terrain sont situées dans les provinces du nord, de l'ouest et du sud, qui ont une topographie très accidentée. Ces fortes précipitations ont entraîné de graves érosions, des inondations et des glissements de terrain dans les régions du nord-ouest, entraînant des pertes de production alimentaire et des déplacements de population, laissant les habitants sans abri et sans nourriture (Mutabazi et al., 2013).

Des glissements de terrain dévastateurs se sont produits en 1988, 2006, 2007, 2010 et 2011, principalement dans les provinces du nord et de l'ouest où l'intensité des inondations dans le pays a contraint de nombreuses familles à quitter leur domicile (PANA, 2012). Les zones considérées comme des zones à haut risque comprennent des ménages situés sur des pentes abruptes, dans des marécages ou d'autres zones voisines pouvant être affectées. Aujourd'hui, des mesures préventives

et des mesures de préparation doivent être prises pour réduire le risque de changement climatique en renforçant la résilience des écosystèmes.

Lors des fortes inondations, le 7 mars 2007, dans le district de Nyabihu, 562 familles ont dû être déplacées dans les secteurs de Mukamira et Bigogwe [voir fig.3], de plus 20 personnes dans le district de Nyabihu sont mortes. D'après le PANA, situés dans une zone classée très vulnérable, au moins 10 000 ménages dans le secteur de Nyabihu seraient affectés. Ainsi, plus de 300 ménages ont été temporairement réinstallés pour s'assurer que les ménages ne seront pas exposés à de futures inondations et pour permettre de réduire les pressions humaines sur l'écosystème endommagé.

Figure 3 : carte de localisation du district de Nyabihu et des paysages inondés en mars 2007



1.3.1 - Evolution de la population

L'affaiblissement de la couverture forestière est en lien avec la dynamique de la population. En effet, le déplacement massif après le génocide a exacerbé la rareté des terres et les conditions météorologiques imprévisibles, l'érosion et les glissements de terrain n'ont pas aidé. Le génocide rwandais a été l'un des crimes les plus odieux de l'histoire ; il a fait plus de 800 000 morts et plus de deux millions de déplacés en raison des tueries massives ciblant les Tutsis par les Hutus. Aujourd'hui, la population rwandaise a doublé après le génocide de 1994, passant de 5, 936 millions à 13 millions en 2022. Le district de Nyabihu, dans l'ouest du Rwanda, compte qu'en à lui 12 secteurs, 73 cellules et 474 villages (Imidugudu), et a une superficie de 515, 2 kilomètres carrés (Zimmerman & Byzigiuro, 2012).

Tableau 2 : Taux de croissance démographique dans les secteurs du district de Nyabihu

Années/Secteurs	Homme/Femme	Homme	Femme	Densité/hab
Rwanda	13 508 424	5 064 868	5 451 105	492
Province Ouest	2 471 239	1 168 445	1 302 794	420
District Nyabihu	295 000	137 799	156 941	555
Bigogwe	31 657	15 167	16 490	606
Jenda	34 648	16 357	18 291	724
Jomba	20 610	9 471	11 139	588
Kabatwa	18 971	8 921	10 050	365
Karago	25 681	11 969	13 712	674
Kintobo	15 379	7 107	8 272	561
Mukamira	28 675	13 313	15 362	744
Muringa	22 876	10 656	12 220	335
Rambura	28 484	13 170	15 314	448
Rugera	24 236	11 265	12 971	588
Rurembo	23 689	11 109	12 580	597
Shyira	19 834	9 294	10 540	588

Source : Rwanda 4th Population and Housing Census, 2012 (NISR)

Le 4^{ème} Recensement de la Population et de l'Habitat du Rwanda (PHC4) a dénombré 295 000 habitants du district de Nyabihu, qui représentent 11,9 % de la population totale du province de l'ouest. Les secteurs les plus peuplés sont Bigogwe et Jenda et les secteurs les moins peuplés sont Kintobo, Kabatwa, et Shyira [cf. tableau 2]. Comme on peut le constater, les populations sont mal réparties et les secteurs sont densément peuplés au kilomètre carré.

1.3.2 - Densité de la population

Le Rwanda constitue le pays le plus densément peuplé d'Afrique avec ses 492 habitants/km² qui en fait un territoire exceptionnel. Pourtant, il s'agit d'un pays faiblement urbanisé, soit de 17,43%. La population se concentre donc dans le milieu rural (82,57%), et elle est dépendante des terres agricoles. Ceci entraîne une dégradation excessive de l'environnement suite à la surexploitation des ressources naturelles (PANA, 2006).

Tableau 3 : Répartition de la population résidente au district de Nyabihu

Secteurs	Urbain	Rural	Urbain (%)	Rural (%)
Rwanda	2 257 829	10 694 380	17,43	82,57
Province de l'Ouest	301 312	2 169 927	12,2	87,8
District Nyabihu	40 673	254 067	13,8	86,2
Bigogwe	12 015	19 642	38	62,1
Jenda	10 465	24 183	30,2	69,8
Jomba	0	20 610	0	100
Kabatwa	0	18 971	0	100
Karago	0	25 681	0	100
Kintobo	798	14 581	5,2	94,8
Mukamira	15 101	13 574	52,7	47,3
Muringa	0	22 876	0	100
Rambura	2 294	26 190	8,1	92
Rugera	0	24 236	0	100
Rurembo	0	23 689	0	100
Shyira	0	19 834	0	100

Source : Rwanda 4th Population and Housing Census, 2012 (NISR)

La population du district de Nyabihu est principalement rurale, représentant 86,2%. Seuls cinq secteurs ont des zones urbanisées : Mukamira (52,7%), Bigogwe (38%), Jenda (30,2%), Rambura (8,1%) et Kintobo (5,2%). De ce fait, le district est dominé par l'agriculture, en particulier la partie centrale du district, une utilisation des terres connue pour être le plus souvent et intensément perturbée au Rwanda (Karamage et al., 2016 ; Mugabowindekwe & Rwanyiziri, 2020).

1.3.3 - Pressions anthropiques et foncières

La région est connue pour son grand potentiel de fertilité et ses rendements agricoles élevés en raison des cendres volcaniques déposées sur le mont Nyabihu. Les pentes des volcans deviennent le terreau du rayonnement dans la région. Le volcan fertilise la terre de manière naturelle. Au départ le volcan a façonné le paysage humain dans les vallées mais à mesure que la région s'est étendue c'est l'humain qui s'est mis à façonner le paysage volcanique.

Jusqu'à récemment, la plupart des agriculteurs de Nyabihu n'avaient pas cultivé de manière coordonnée. La plantation aveugle de cultures inadaptées sur des pentes abruptes conduit non

seulement à un potentiel agricole inexploité, mais augmente également le risque d'érosion des sols, le risque d'inondations et le risque de destruction des cultures et des moyens de subsistance.

En effet, les principales cultures pratiquées dans le district de Nyabihu sont les haricots, les pommes de terre irlandaise et le maïs, ainsi que divers légumes. L'impact de la sécheresse, des inondations, de l'érosion des sols, alliée à de mauvaises pratiques de l'eau, de conservation des sols et d'utilisation des terres sont des facteurs majeurs contribuant à la dégradation des terres et à la baisse de la productivité agricole dans le district. Les infrastructures ont également été affectées par les sécheresses et les inondations, étant donné qu'on constate des dommages sur les routes, les ponts, et sur d'autres installations vitales.

« The hard destiny of demographic reality in Rwanda ». C'est un proverbe qui résume bien la pression sur l'environnement au Rwanda en raison de son taux de croissance démographique. Depuis les années 1950, les zones agricoles et pastorales couvrent plus de 70 % de la superficie du pays, et les réserves naturelles ont perdu plus de 50 % de leur superficie originelle.

Mais comment expliquer que des populations puissent s'installer dans des zones vulnérables ? L'augmentation des illégaux (maisons construites sur des pentes, des rizicultures) pourrait résulter principalement de l'absence de mécanisme clair d'application de la loi. En effet, d'après Monsieur Iradukunda Jean de Dieu, agent de maintenance cadastrale, « la planification urbaine existait mais la mise en œuvre des politiques et des stratégies n'était pas renforcée. En 2002, ils ont commencé à différencier l'urbanisation, la croissance urbaine et l'expansion urbaine, c'est le moment où nous pouvons dire qu'une planification claire a commencé. »

Selon le PANA, les zones de fortes densités de population sont donc caractérisées actuellement par des terres surexploitées pour l'agriculture et un couvert végétal sévèrement altéré. La région est victime d'une mauvaise gestion des ressources naturelles. Le district est souvent endommagé par des glissements de terrain.

Ces dernières années, les pluies anormales et les sécheresses ont été des problèmes récurrents au Rwanda avec des impacts négatifs sur les humains et la nature. En effet, l'ouest du Rwanda a connu une irrégularité imprévisible des précipitations, qui se sont accentués au cours de la dernière décennie. Kamembe, situé en province de l'ouest, recense des valeurs très négatives durant les années 1991-2005. Concernant, le district Nyabihu à Rwankeri, 1989-1991 l'indice de sécheresse affiche des périodes très sèches, suivi par des années très excédentaires avec le phénomène El-Niño. Ces dérèglements climatiques ont donc entraîné la mort de dizaines de personnes et ont détruit des infrastructures laissant d'innombrables personnes sans abri. De ce fait, la production agricole s'est

réduite significativement et a donc provoqué d'importants dommages économiques, environnementaux, sociaux, ceci ayant des conséquences sur la sécurité alimentaire.

PREMIÈRE PARTIE :

Présentation du contexte climatique et de l'activité végétale

Chapitre 1 - Données et méthodes adoptées dans l'étude

1.1 - Les données satellites disponibles

Les mots pour désigner les données d'observation de la Terre sont nombreux (données de télédétection, produits satellitaires, imagerie spatiale...). Techniquement, il est important de retenir que l'acquisition et le traitement de toutes ces données s'appuient sur un même principe, le principe de télédétection (J. Fisher, 2020). Ainsi, grâce aux progrès technologiques liés à la télédétection au cours des dernières décennies, les données d'observation de la Terre par des capteurs embarqués à bord d'avions ou d'engins spatiaux sont de plus en plus diverses (suivi des ressources végétales, des précipitations, de l'atmosphère..) et disponibles rapidement (Toukiloglou, 2007 ; Dubreuil, 2010 ; Diwakar et al., 2013). Dans le cadre des systèmes d'informations géographiques (SIG), la télédétection fait référence à l'analyse des images acquises par les capteurs embarqués sur les différents types de plateforme : avions, drones, ou satellites d'observation de la Terre. Cette technique repose sur la mesure des rayonnements du spectre électromagnétique (p.ex. optique, micro-ondes). La télédétection est dite passive quand le capteur n'émet aucune énergie (p.ex. capteur optique passif avec les canaux Rouge, Vert, Bleu), et active lorsque le capteur émet sa propre source d'énergie avant réception (p.ex. capteur RADAR (« Radio Detection and Ranging ») en bandes L, C, ou X).

De ce fait, la télédétection permet d'acquérir des informations sur la surface de la Terre. On peut par exemple cartographier et suivre l'évolution de la végétation, des surfaces bâties, des parcelles agricoles, obtenir des informations sur la température de surface de la Terre, sur l'humidité des sols, les précipitations, etc. Autant d'informations utiles pour établir des diagnostics sur certains aspects tels que la vulnérabilité des populations liées aux aléas climatiques (M, Escorihuela, 2007).

Les données fournies par les satellites d'observation de la Terre sont surtout définies par trois principales caractéristiques (Caloz et Collet, 2001) :

- La résolution spatiale : correspond au niveau de détail d'un jeu de données. C'est donc l'aptitude du capteur à distinguer deux objets rapprochés. Elle s'exprime en terme de taille de pixel. En mode raster, la résolution spatiale correspond à la taille de la cellule de la grille. En

mode vecteur, la résolution spatiale est la surface ou la longueur de la plus petite entité réelle que l'on est supposé trouver dans la base de données. Dans le domaine civil, quatre catégories de résolution se distinguent (Source : Centre canadien de télédétection) :

- > la base résolution (> 100m) ; Capteur de MODIS
- > la moyenne résolution MR (80 m) ; Capteur LANDSAT TM
- > la haute résolution HR (5 à 30 m) ; Capteur SPOT
- > la très haute résolution spatiale THR (inférieur à 5 m) ; capteur Pléiades HR

- La résolution temporelle : désigne la durée minimale pouvant être mesurée entre deux évènements. C'est donc le temps que prend un satellite pour effectuer un cycle orbital complet c'est-à-dire généralement de quelques jours. Il faut donc quelques jours à tel satellite pour qu'il puisse observer de nouveau exactement la même scène à partir du même point dans l'espace. La résolution temporelle absolue du système de télédétection est donc égale à cette période. Cette résolution ne dépend pas du capteur mais de l'orbite et du mode de manœuvre du satellite. (Source : Centre canadien de télédétection) :

- La résolution spectrale : c'est la plus petite largeur de la bande spectrale enregistrée par le capteur. Strictement parlant, la "résolution" spectrale se réfère à la "largeur" d'une bande de fréquence spectrale utilisée pour générer une bande d'image. Il est plus utile de considérer le "nombre", la "position" et la "largeur" de toutes les bandes de fréquences spectrales comprises dans une image. Quatre régions spectrales se distinguent généralement (Source : Centre canadien de télédétection) :

- > le visible (V) : 0,4 μm à 0,7 μm ;
- > le proche infrarouge (PIR) : 0,7 μm à 1,5 μm ;
- > le moyen infrarouge (MIR) : 1,5 μm à 3 μm ;
- > l'infrarouge lointain (FAR-IR) : 3 μm à 15 μm .

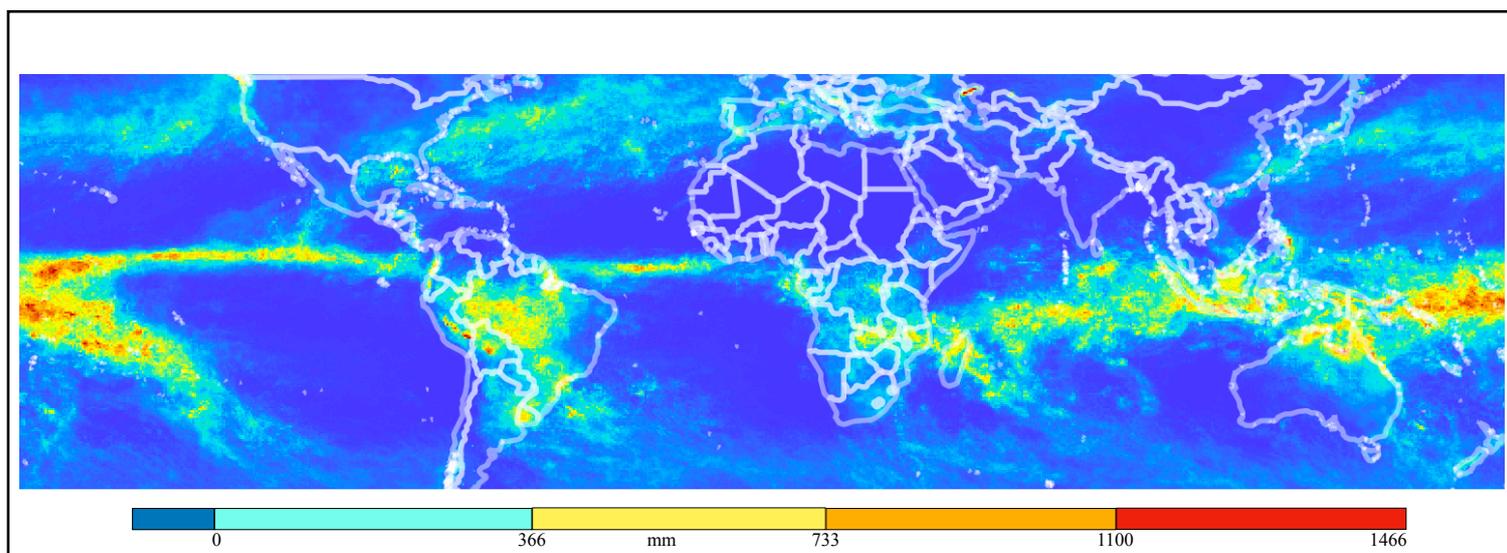
Ainsi, la télédétection est le seul outil actuellement capable de fournir à un pas de temps court, et à presque toutes les échelles spatiales, des informations sur l'état des phénomènes ou des surfaces naturelles (atmosphère, océan ou surface de la terre).

1.1.2 - Les données climatiques

1.1.2.1 - Données d'estimation des pluies tropicales par satellite (TRMM)

Le Tropical Rainfall Monitoring Mission (TRMM) est un satellite de recherche en opération de 1997 à 2015, conçu pour améliorer notre compréhension de la distribution et de la variabilité des précipitations dans les tropiques dans le cadre du cycle de l'eau dans le système climatique actuel (NASA, 1999). En coordination avec d'autres satellites du système d'observation de la Terre de la NASA, TRMM fournit d'importantes informations sur les précipitations à l'aide de plusieurs instruments spatiaux pour accroître notre compréhension du climat terrestre. En effet, les tropiques sont couverts à 75% par les océans, les précipitations dans cette région ne peuvent être mesurées indirectement que par satellite (Simpson et al, 1996). L'imageur hyperfréquence (TMI) du satellite TRMM, qui mesure les pluies tropicales, est un capteur hyper spectral passif conçu pour fournir des données quantitatives sur la pluviosité recueillie dans un large couloir de fauchée. En mesurant soigneusement les quantités minimales d'énergie hyperfréquence émises par la Terre et son atmosphère, le TMI peut quantifier la vapeur d'eau, l'eau nuageuse et l'intensité des précipitations dans l'atmosphère. L'algorithme de traitement TRMM fournit les estimations de précipitations à une résolution de $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ depuis l'espace (Huffman et al., 2007 ; Arvor et al., 2006). Les précipitations mondiales sont mesurées toutes les trois heures, et les accumulations totales et moyennes sont présentées sur une base quotidienne, hebdomadaire ou mensuelle (Huffman et al., 2007).

Figure 4 : Exemple de cartographie du cumul pluie mensuel (mm)



Source : données TRMM 3B43 à 0.25 ° de résolution entre janvier 2010 et février 2010
Réalisation : Grondin, 2022

Dans cette étude, les données utilisées sont les synthèses mensuelles (TRMM 3B43) acquises depuis 2001 à une résolution spatiale de 0.25°. Les données TRMM mensuelles sont téléchargeables sur le site de la NASA gratuitement, pour la période 2000 à 2021. Malgré leur résolution spatiale assez faible (0.25°), elles conviennent à spatialiser et à observer les variations saisonnières des pluies au Rwanda (Climate Engine, 2020).

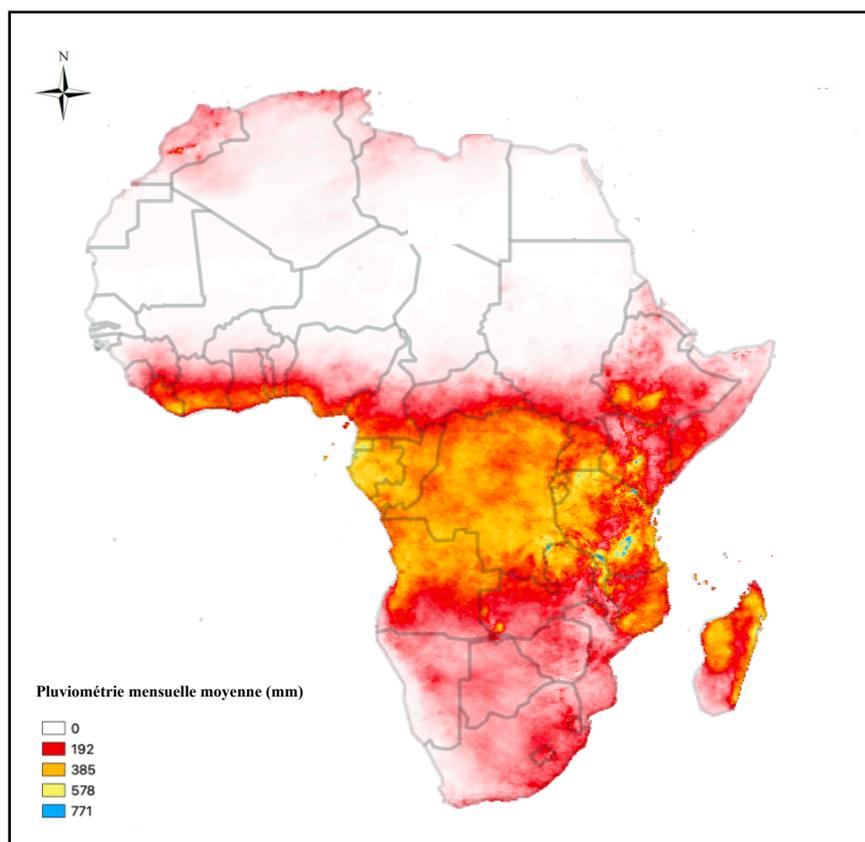
1.1.2.2 - Climate Engine, données météorologiques et observations terrestres par satellite

Climate Engine permet aux utilisateurs d'analyser et d'interagir avec les observations climatiques et terrestres pour une aide à la décision liée à la sécheresse, à l'utilisation de l'eau, à l'agriculture, aux incendies de forêt et à l'écologie. Le moteur climatique permet de traiter et visualiser rapidement les observations terrestres par satellite et les données météorologiques maillées pour la surveillance de l'environnement et d'améliorer l'alerte précoce en cas de sécheresse, d'incendie et de risque de mauvaise récolte (OMM, 2022).

La plateforme fournit des informations sur les températures et les précipitations au niveau national et régional [voir fig.5]. Il organise également les informations climatiques par bassin versant. Les informations sont disponibles pour les projections historiques et futures. Il permet également aux utilisateurs de télécharger les données climatiques. Des profils de pays, contenant des informations détaillées sur les impacts du changement climatique et la vulnérabilité aux risques naturels, sont également disponibles pour certains pays de la région (A. Gilles, 2004). *Climate Engine* peut être utilisée pour créer des cartes et des graphiques à la demande à partir de données satellitaires et climatiques.

Cette base de données climatique en ligne a choisi la meilleure résolution, il s'agit de la résolution native du jeu de données lorsqu'il est ingéré dans Google Earth Engine, à savoir 4800 m (1/20-deg). Cependant, nombreuses régions du globe ne revoient pas de données telles que les précipitations avec CHIRPS-Pentad Précipitation, puisque les produits de précipitation CHRPS ne couvrent que 50°S-50°N (et toutes les longitudes). Les cartes et les séries chronologiques de *Climate Engine* aident à voir et à étudier les données d'observation de la Terre.

Figure 5 : Exemple de cartographie de CHRIPS- Pentad Précipitation entre mars 2015 et avril 2015



Source : *Climate Engine*, QGIS
Réalisation : Grondin, 2022

1.1.3 - Les données de végétation

1.1.3.1 - Indices de végétation

Les indices de végétation ont été créés afin de suivre l'état de santé de la végétation. Ils expriment le contraste entre les comportements spectraux de la végétation chlorophyllienne et des sols nus dans le rouge (R) et le proche infrarouge (PIR). Ces deux canaux concentrent la part d'information la plus importante sur le couvert végétal, soit plus de 90 % (Baret et Guyot, 1991). Le rouge et l'infrarouge sont particulièrement bien adaptés pour décrire l'activité photosynthétique de la végétation, tandis que l'infrarouge IRCL (InfraRouge de Courte Longueur d'onde, qualifié quelquefois de moyen infrarouge) traduit plutôt le taux d'humidité du sol et de la végétation (Iona-Toroimac et al., 2006; Thomson, 1984).

Deux indices de végétation principaux peuvent être considérés, mais le NDVI est l'indice de végétation le plus couramment utilisé en analyse d'images satellites et est utilisé dans cette présente étude grâce à la forte réflectance dans le proche infrarouge de la chlorophylle, cet indice permet de

détecter de manière efficace l'état vert des plantes. Il prend des valeurs entre -1 (eau) et 1 (végétation intense) (G. Skupinski, 2009). Les très faibles valeurs (-0,9 à 0) surviennent dans les régions dépourvues de végétation (les zones rocheuses, les sols nus, l'eau, la neige) ou alors, si la végétation est sénescente (Pettorelli et al., 2005). Les valeurs modérées (0,2 à 0,3) représentent les zones arbustives et la plupart des types de cultures alors que les valeurs élevées (0,5 à 0,9) traduisent une végétation dense abondante (Pettorelli et al., 2005). Il se calcule en utilisant les bandes NIR (proche infrarouge) et R (rouge), selon la formule suivante :

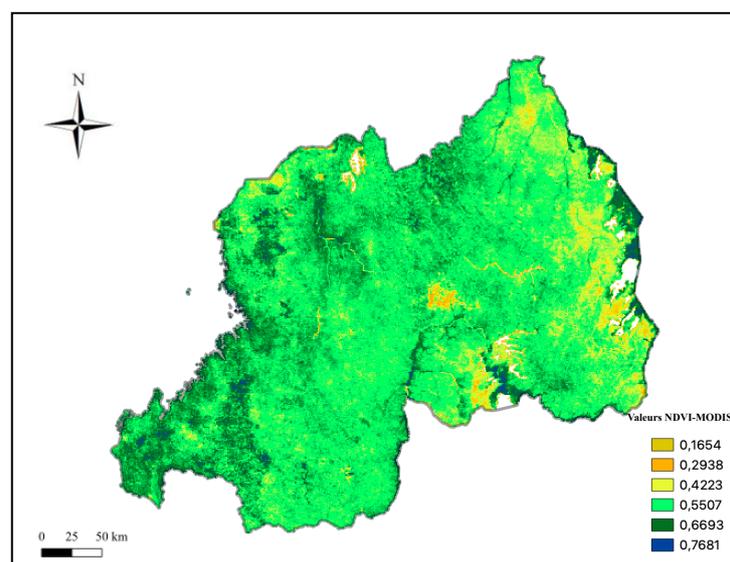
$$\text{NDVI} = (\text{PIR} - \text{R}) / (\text{PIR} + \text{R})$$

Il a été créé initialement pour des usages dans l'agriculture et la foresterie, donc au niveau des zones non urbaines. Il est bien adapté pour l'étude de leur variabilité spatiale et temporelle (Philippon et al., 2006).

1.1.3.2 - Les données NDVI MODIS

Le capteur MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) est une série d'instruments d'observation scientifique couplés à un système embarqué satellitaire, lancé par la NASA à bord du satellite Terra en 1999, puis à bord du satellite Aqua (deux satellites de l'EOS - Earth Observing System) destinés à l'observation à long terme des sols, biosphère, atmosphère et océans de la Terre (N. Djamai, 2010). Les images MODIS utilisées dans cette étude sont des images d'indice de végétation normalisée NDVI issus des produits MODIS du capteur Terra-MODIS à de résolution spatiale de 250m et de résolution temporelle de 16 jours (Tucker, 1979).

Figure 6 : Exemple de cartographie de NDVI de l'année 2015 au Rwanda



Les images sont archivées de 2000 à 2021. L’outil MODIS permet de sélectionner les variables de végétation souhaitées, ainsi cet outil permet également de les convertir en format GeoTIFF.

1.1.4 - Les images hautes résolutions spatiales

1.1.4.1 - Données LANDSAT

Pour des analyses à l’échelle locale, la très haute résolution spatiale est privilégiée dans cette étude. Nous présentons ainsi, les images à très haute résolution spatiale qui serviront à analyser les états de changements de surfaces (C. Kergomard). Il s’agit des données LANDSAT.

LANDSAT représente la plus longue et importante collection au monde acquise en continu de données de télédétection spatiale à résolution modérée. LANDSAT a lancé la révolution de la télédétection terrestre à résolution moyenne dans les années 1970. Les missions et les capteurs LANDSAT ont évolué avec la technologie. Sept satellites LANDSAT ont été lancés entre 1972 et 1999 et un huitième le 11 février 2003 (C. Kergomard). Les archives des satellites LANDSAT ont permis de capturer plusieurs millions d’images (NASA, 2002 ; Chander et al., 2009). Celles-ci constituent des ressources uniques pour l’étude des changements climatiques, l’utilisation des sols, la cartographie, la gestion de l’habitat, etc. Les images LANDSAT ont une résolution variable, partant de 120 à 15 mètres. Les images LANDSAT sont téléchargeables sur le site de la NASA: <http://earthexplorer.usgs.gov>.

Tableau 4 : Caractéristiques des images LANDSAT ETM

Bandes ETM+	Bandes spectrales	Résolution spatiale (m)	Longueur d’onde (µm)
Bande 1	Bleu	30	0,45-0,52
Bande 2	Vert	30	0,52-0,6
Bande 3	Rouge	30	0,63-0,69
Bande 4	Proche infra rouge	30	0,75-0,9
Bande 5	Moyen infra rouge	30	0,5-1,7
Bande 6	IR thermique/lointain	60	10,4-12,5
Bande 7	IR moyen	30	2,08-12,5
Bande 8	Panchromatique	15	520-900nm

Source : <https://landsat.usgs.gov/what-are-band-designations-landsat-satellites>

L'ensemble des images satellites dans l'étude est synthétisé dans le tableau 5

Tableau 5 : Récapitulatifs des images satellites de l'étude

Satellite	Période couverte	Nombre total d'images
TRMM (0,25°)	2000 - 2021	50
MODIS (250m)	2000 - 2021	21
LANDSAT (30m)	1995 - 2015 - 2020	3
CHRIPS (4800m)	2000 - 2021	21

Source : Grondin, 2022

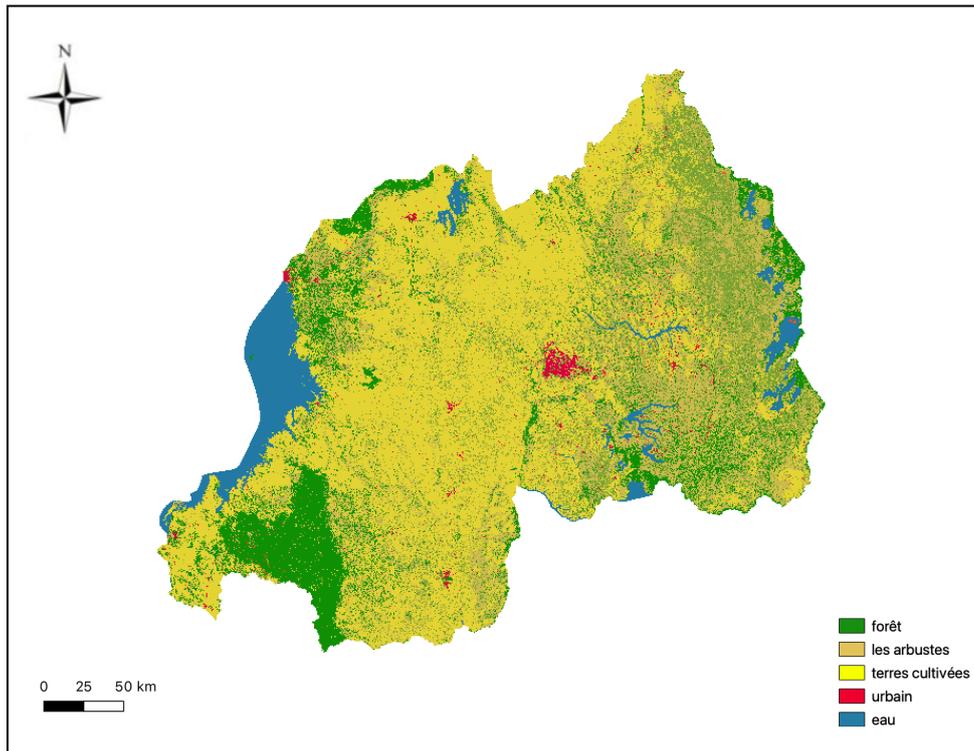
1.2 - Autres données

1.2.1 - Données d'occupation des sols en 2016 au Rwanda (RCMRD GEOPORTAL)

Pour avoir une idée globale de l'état des surfaces végétales du Rwanda, nous avons eu recours aux données d'occupation de sol disponibles gratuitement sur le web. Les données ont été acquises à partir de RCMRD GeoPortal de résolution spatiale de 10 m avec Sentinel 2, publié en 2016. RCMRD GeoPortal est une plateforme de diffusion d'ensemble de données géospatiales ouvertes et de cartes pour la région de l'Afrique orientale et australe. Les données ont été téléchargées sur le site en format ZIP, afin de modifier la légende qui ne correspondait pas à certaines classes.

On distingue 5 grandes classes d'occupation des sols répartis sur l'ensemble du pays [voir fig.7]. La distribution des classes se fait selon la zone géographique. Ainsi, une grande partie du pays est dominée par des terres cultivées, qui recouvrent 82% de l'ensemble du territoire. En ce qui concerne l'est, une majeure partie est dominée par des zones de couvertures arbustes. De plus, nous retrouvons les parcs nationaux qui sont couverts par la forêt et comportant très peu d'espaces urbains, qui ne recouvrent que 17% du territoire.

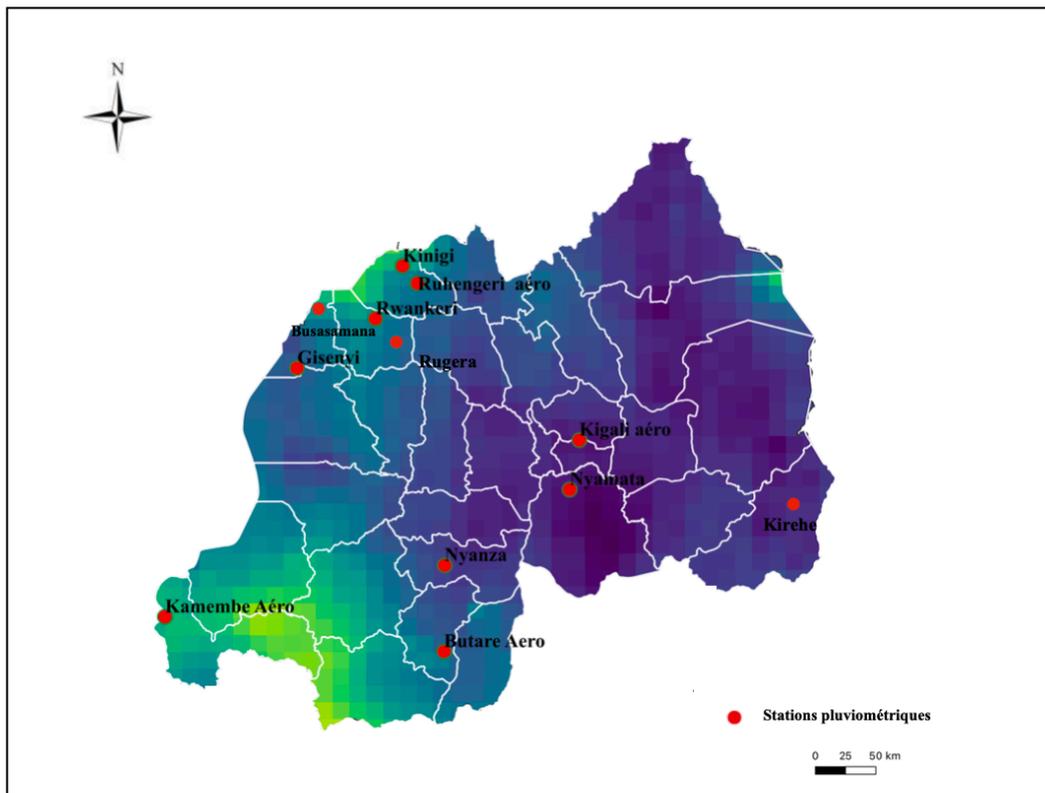
Figure 7 : carte d'occupations des sols du Rwanda en 2016



1.2.2 - Données pluviométriques issues des stations au sol

Pour valider les données d'estimation de pluie par satellite (TRMM), nous avons récolté sur le terrain les données de pluies pour 12 stations pluviométriques réparties sur l'ensemble du territoire [voir fig.8]. Les données proviennent de la direction de météorologie du Rwanda. Le pays possède un réseau de stations météorologiques constitué d'environ 146 stations manuelles et 156 automatiques, qui enregistrent de manière quotidienne la quantité des pluies tombées. Cependant, de nombreuses stations ont été endommagées lors du génocide. L'une des stations les plus importantes est Shyira, puisqu'elle possède de nombreuses zones sensibles aux glissements de terrain, cependant, sa station météo a été endommagée et les données pluviométriques sont donc perdues.

Figure 8 : Localisation des stations pluviométriques retenues pour l'étude au Rwanda



Source : Le fond de carte est l'image TRMM 2016 au Rwanda, QGIS

Réalisation : Grondin, 2022

Chapitre 2 - Étude des relations pluie et couvert végétal de 2000 à 2021 à l'échelle du Rwanda à partir des images basses résolution spatiales NDVI-MODIS et TRMM

En raison de leurs répercussions immédiates et durables sur le milieu naturel et sur l'Homme, les questions de changement et de variabilité climatique sont placées depuis quelque temps au centre des préoccupations des scientifiques et des décideurs politiques dans le monde (A. Kouassi, et al, 2010).

Les précipitations représentent le facteur le plus important du climat tant pour les populations que pour les écosystèmes (A. Faty, et al, 2015). Caractériser l'impact de la variabilité climatique sur les régimes pluviométriques saisonniers devient alors indispensable pour proposer des solutions adaptées aux projets de développement (A. Faty, et al, 2015).

Mais alors quelle est l'importance de l'étude du climat ? Les résultats de nombreuses études révèlent que les changements climatiques auraient des effets importants sur l'agriculture, notamment l'élevage. L'importance de la recherche sur le climat réside dans la capacité de prévoir les zones de sécheresses fréquentes et d'inondations extrêmes, qui pourraient affecter de nombreuses zones agricoles et forcer des millions de familles à fuir. C'est pourquoi, il est aujourd'hui urgent d'approfondir les connaissances sur l'état de l'environnement en général, et le climat en particulier, sur les modes d'adaptation prévalant au niveau local et pouvant servir à approfondir les connaissances à l'échelle régionale et globale (D. Hamndou, M. Desjardins, 2008).

À l'aide des outils climatologiques, on peut s'appuyer sur des données solides puisque la grande difficulté est ici le peu de connaissances sur l'évolution du climat (P. Meira, 2016). Il s'agit dans un premier temps d'étudier les précipitations aux échelles annuelles, interannuelles et saisonnières sur la période de 2000-2021 sur l'ensemble du Rwanda. Dans un second temps, il sera question d'étudier la variabilité saisonnière de la végétation afin de déterminer les paramètres végétatifs comme les dates de début, fin et longueurs de saisons végétatives.

2.1 - Analyse spatio-temporelle des précipitations à l'échelle du Rwanda à partir des images basses résolutions spatiales NDVI MODIS et TRMM sur la période 2000-2021

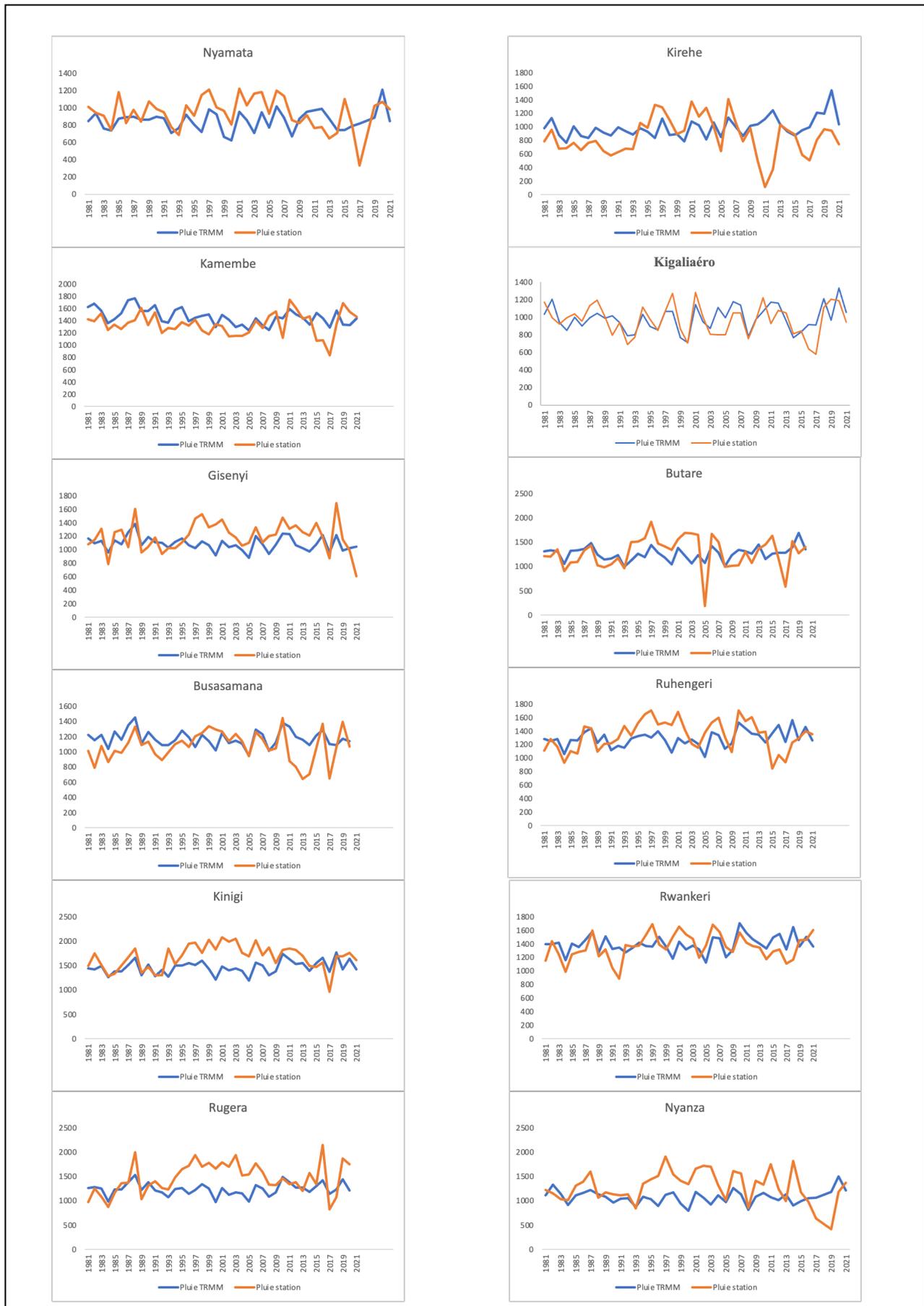
2.1.1 - Les données d'estimation de pluie par satellite (TRMM)

Les données d'estimation de pluies TRMM nécessitent une étape importante, qui consiste à comparer les estimations issues de satellite avec les données météorologiques *in situ*. Les données TRMM est l'un des meilleurs produits disponibles pour cartographier les tendances pluviométriques d'un territoire. De nombreuses études, ont montré la fiabilité des données TRMM, pour le suivi saisonnier, annuel et interannuel des précipitations pour des régions ne disposant pas d'un réseau des stations climatiques au sol (Dubreuil et al., 2007). Ainsi, pour le Rwanda (absence d'un réseau de stations climatiques dense), les données TRMM sont utilisées et validées à partir de 12 stations pluviométriques pour lesquelles nous disposons des mesures sur la période de 1981-2021.

Le graphique des pluies TRMM et des données issues des stations montrent une forte relation entre ces deux types de données [voir fig.9]. Cette forte relation se confirme pour les stations Kigali, Rwankeri, Kamembe et Busasamana. Cependant, on constate que l'année 2017 les pixels TRMM au niveau de toutes les stations montrent une sur-estimation des pluies, excepté la station Gisenyi. Concernant la station Rugera, on constate que les données TRMM et les données pluviométriques se superposent bien de 1981 à 1986. En revanche, de 1987 à 2008, les données estimées par le TRMM montrent un écart avec les données pluviométriques. Les erreurs sont relativement faibles pour l'ensemble des stations, ce qui permet de dire que les données d'estimation de pluie par satellite sont proches des données enregistrées au sol pour les stations retenues, à l'exception de Nyanza, Rugera, Kinigi, et Kirehe.

D'une manière générale, on observe au Rwanda que les données d'estimation de pluies TRMM et stationnelles se superposent relativement bien malgré quelques différences enregistrées pour certaines périodes telles que 2001-2015 pour Busasamana, 1997-2003 pour Ruhengeri ou encore l'année 2017 pour l'ensemble des stations. Cette étape de validation permet par la suite du travail, l'utilisation des données d'estimation de pluie par satellite.

Figure 9 : Graphique comparant la variabilité des précipitations annuelles à partir des données TRMM et des données *in situ* des stations principales du Rwanda sur la période de 1981-2021

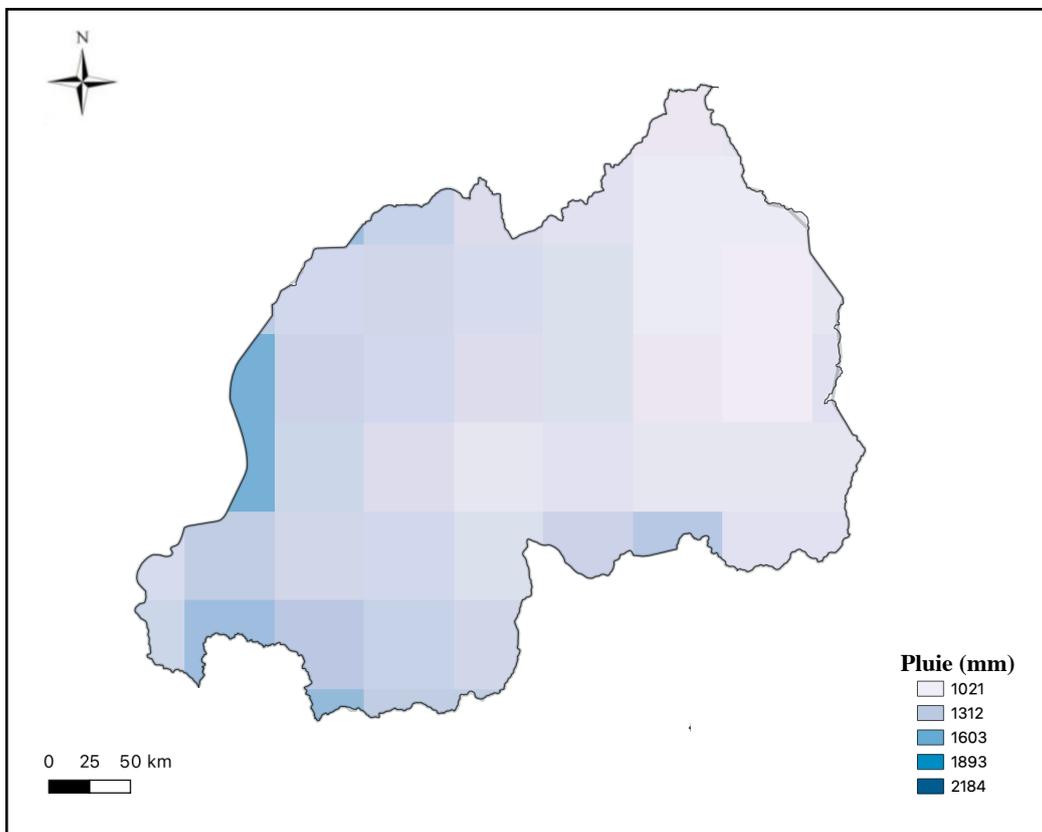


Source : Stations météo, données TRMM, Classeur Excel
Réalisation : Grondin, 2022

2.1.2 - Spatialisation des précipitations à l'échelle du Rwanda sur la période de 2000-2019

Un des premiers traitements des données TRMM est une cartographie moyenne annuelle des pluies sur la période d'observation (2000-2019). La cartographie fait apparaître une zonation des précipitations des régions à faible pluviométrie (à l'est) et des régions à forte pluviométrie (au nord-ouest et sud-ouest). Le total pluviométrique augmente d'est en ouest avec l'altitude. Ainsi, l'est reçoit 1000 mm de pluie par an, à Kigali les précipitations sont en moyenne de 1300 mm de pluie. Les parties nord-ouest et sud-ouest près de la frontière de la République Démocratique du Congo sont des zones particulièrement arrosées avec plus de 1600 mm de pluie par an.

Figure 10 : Spatialisation des précipitations annuelles moyennes du Rwanda calculées à partir des données TRMM sur la 2000-2019



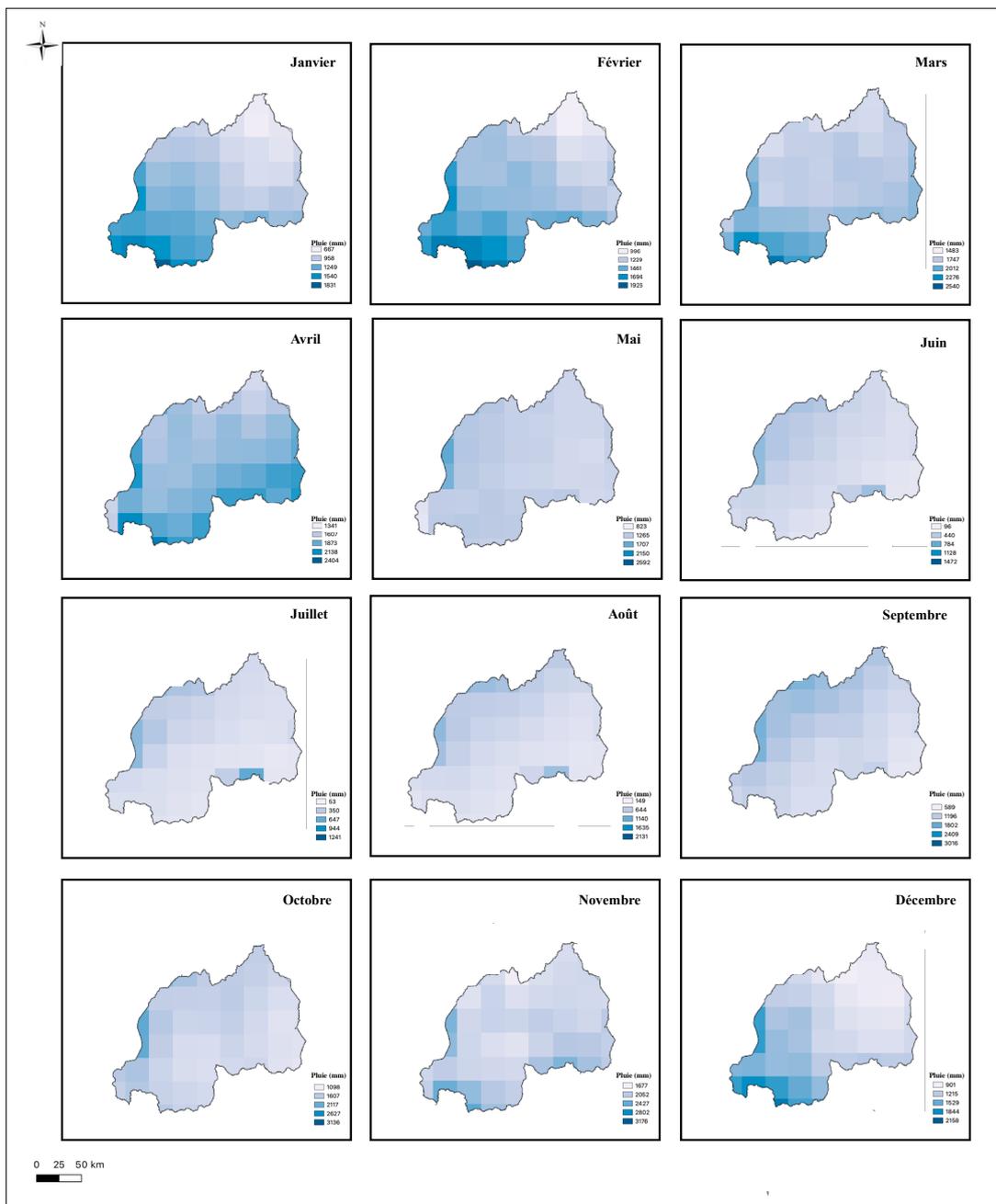
Source : Giovanni NASA, données TRMM, QGIS
Réalisation : Grondin, 2022

2.1.3 - Variabilité saisonnière des précipitations au Rwanda

Afin de connaître la saisonnalité des précipitations au Rwanda, une synthèse mensuelle des précipitations a été effectuée sur les données TRMM. Le résultat permet d'observer les variations saisonnières des pluies sur la période 2000-2019. Les cartes [voir fig.11] permettent de voir une

alternance entre les mois à faible précipitation (inférieur à 100 mm) et à des mois à forte pluviométrie (supérieur à 1000 mm).

Figure 11 : Précipitations moyennes mensuelles du Rwanda estimé à partir des données TRMM sur la période 2000-2021



Source : Giovanni NASA, données TRMM, QGIS
Réalisation : Grondin, 2022

Le mois de juin à septembre sont des mois secs (1000 mm), mais avec des pluies bien réparties sur l'ensemble du territoire. À l'inverse, les mois d'octobre à décembre sont particulièrement abondantes, avec plus de 1 800 mm de précipitations dans des zones comme la rive

nord du lac Kivu, qui borde la République démocratique du Congo. Dans le sud-ouest, les précipitations augmentent de manière exponentielle en décembre, avec plus de 2 158 mm de précipitations sur le mont Lugura. Janvier et février sont des mois avec des saisons sèches courtes, surtout dans l'est où la saison sèche ne dépasse pas 900 mm. En revanche, dans le sud et le sud-ouest, les précipitations sont supérieures à 1400 mm. Mars-avril correspond à la saison des pluies, avril étant le mois le plus humide du sud-ouest du Rwanda avec plus de 2000 mm de pluie.

Par conséquent, nous rappelons que le Rwanda est une région relativement pluvieuse avec une pluviométrie annuelle moyenne de 1000 mm (Meteo Rwanda, 2010). Cependant, il y a une zone en particulier avec moins de précipitations. C'est le cas, par exemple, dans l'est du pays. Le sud-ouest, quant à lui, reçoit en moyenne 1300 mm de précipitations. Cette variabilité des précipitations observée dans le pays est causée par une variété de facteurs, tels que la topographie ou la convergence des courants d'air. Il convient donc de noter que la variation saisonnière des précipitations au Rwanda est identique au mouvement de la Zone de Convergence Tropicale (ZCIT). C'est cette migration de la ZCIT au cours de l'année qui a provoqué les précipitations.

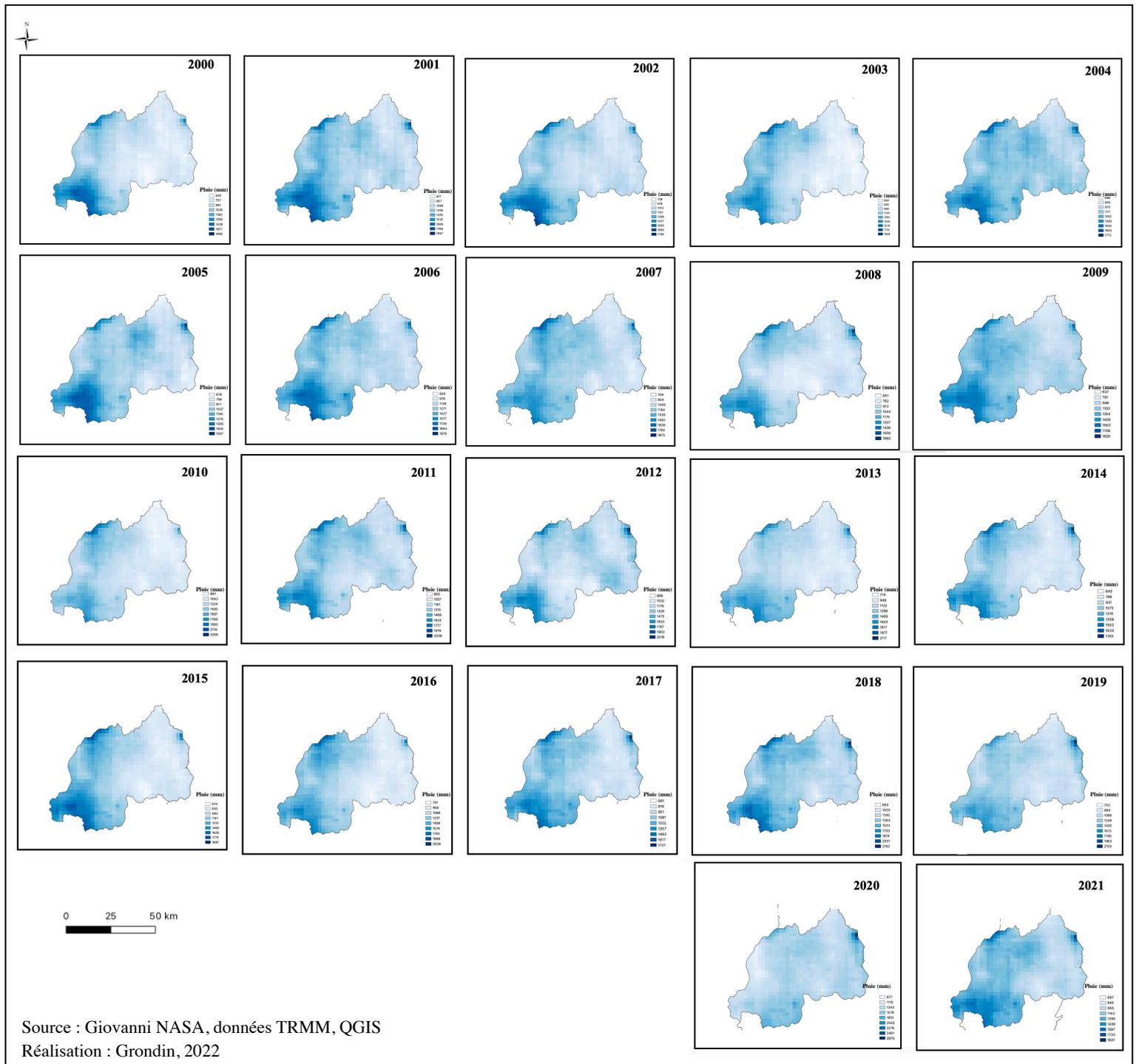
2.1.4 - Variation interannuelle des précipitations au Rwanda entre 2000 et 2021

Au Rwanda, le degré élevé de variabilité climatique interannuelle et inter décennal et le manque de données historiques ont rendu les tendances climatiques dans le pays difficile à déterminer. Les variations des précipitations d'une année à l'autre sont analysées à partir des moyennes annuelles des pluies sur la période de 2000-2021 [voir fig.12]. D'une façon générale, la cartographie permet de distinguer 3 groupes d'années : les années à faible pluviométrie (<1000 mm), les années à forte pluviométrie (> 1500 mm), et les années à pluviométrie intermédiaire (entre 1000 et 1500 mm).

Les années à faible pluviométrie sont considérées comme les années où la pluie annuelle est inférieure à 1000 mm sur une grande partie de la province de l'est et orientale, le district de Nyagatare est celui qui a été le plus touché par la sécheresse. Les années concernées sont les années 2000, 2003, 2010 et 2016. La période de sécheresse de 2016 a été la plus longue sécheresse au Rwanda, celle-ci a frappé les districts de Kayonza, Nyagatare et Kirehe dans la province de l'est. L'année 2000 a été marquée par une sécheresse décennale suivie de deux années de pluies exceptionnellement excessives (PANA, 2006). Des inondations extrêmes dans l'ouest ont entraîné de graves dommages économiques, environnementaux et sociaux (par exemple, des déplacements

de populations). Les précipitations sont d'environ 1700 et 1800 mm. On a donc eu des excès pluviométriques en 2001 et 2002

Figure 12 : Cartographie des précipitations interannuelles du Rwanda sur la période de 2000-2021 à partir des données TRMM



Source : Giovanni NASA, données TRMM, QGIS
Réalisation : Grondin, 2022

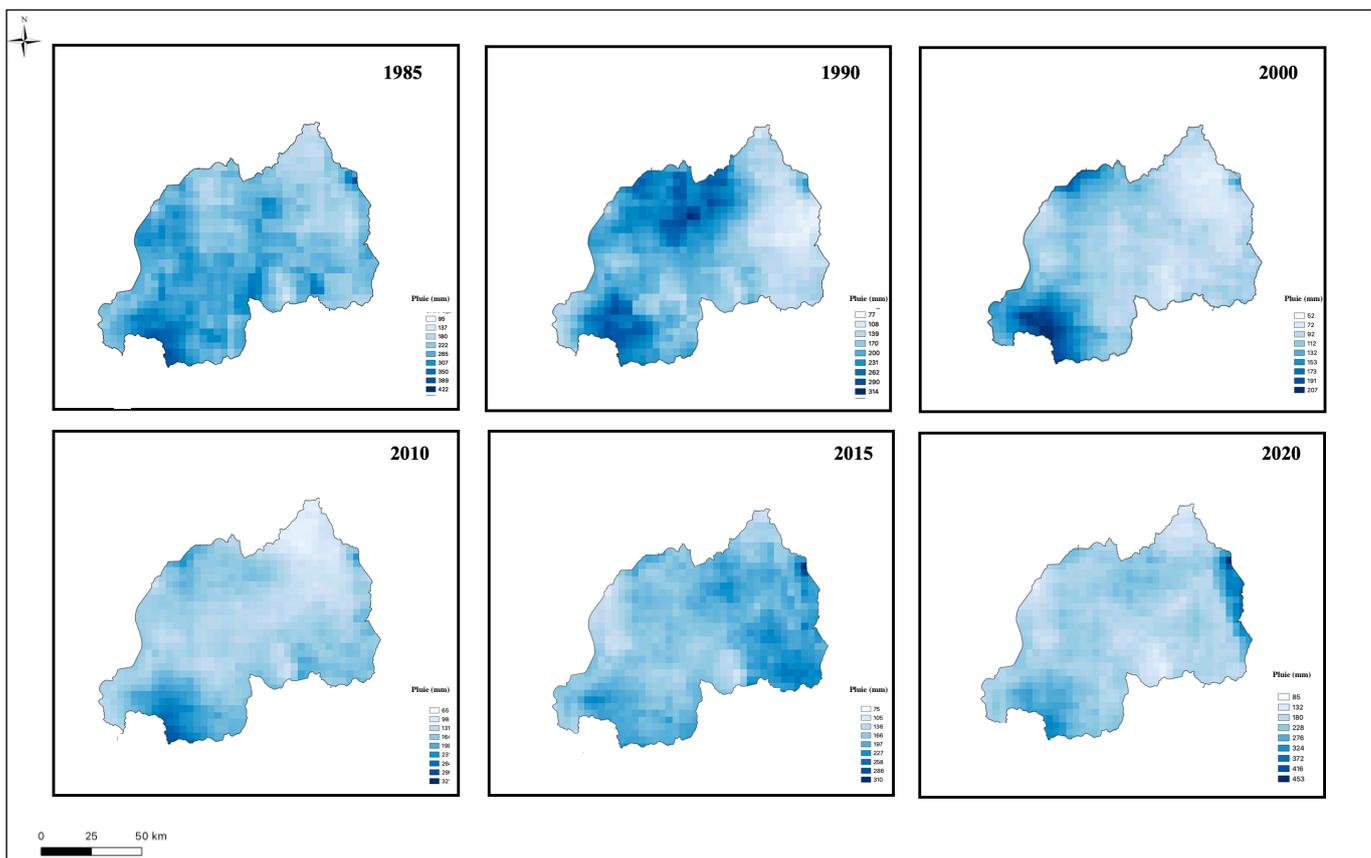
Les années à fortes précipitations, sont 2006, 2007, 2008, 2009, 2012, 2019, 2020 et 2021. L'année 2018 se distingue par des fortes valeurs pluviométriques supérieures à 2000 mm dans les

régions de Nyabihu, Rubavu et Musanze (province nord), Nyaruguru et Nyamagabe (province sud) et le parc National de Nyungwe. Enfin, les années à pluviométrie intermédiaire se caractérisent par une hétérogénéité spatiale des pluies qui varient entre 1000 et 1500 mm au cours d'une année. Il s'agit des années 2004, 2011 et 2013.

2.1.5 - Analyse de la variabilité saisonnière des pluies au Rwanda

L'analyse de la pluviométrie mensuelle et annuelle semble afficher de fortes fluctuations. Au cours de ces périodes, on peut constater que les précipitations sont changeantes [voir fig.13].

Figure 13 : Cartographie des précipitations moyennes mensuelles du Rwanda au mois d'avril estimé à partir des données par TRMM



Source : Giovanni NASA, données TRMM, QGIS

Réalisation : Grondin, 2022

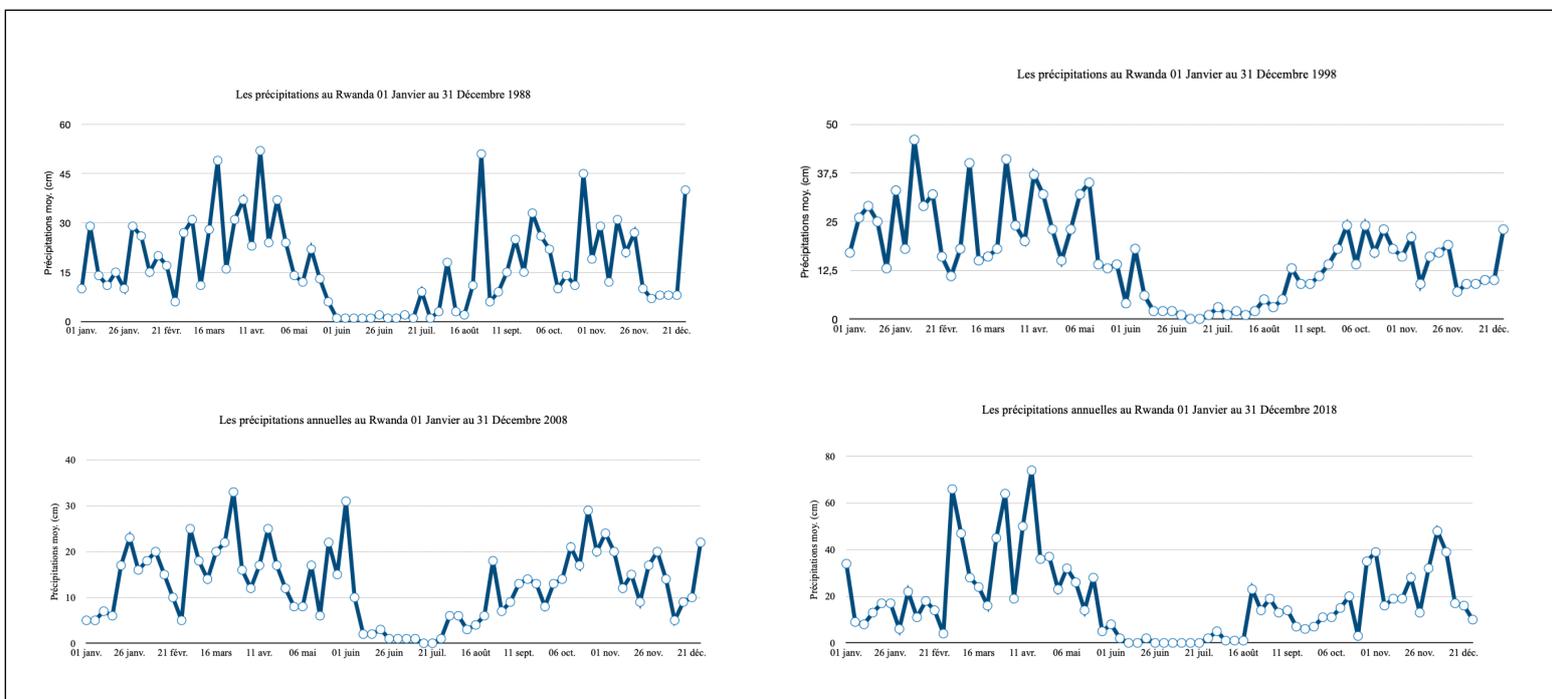
Les mois d'avril font partie des mois les plus pluvieux de la saison des pluies, ainsi dans la province méridionale de Nyaruguru, 389 mm de précipitations ont été enregistrés en 1985. En 2000, 153 mm, en 2010 de 164 mm, en 2015 de 166 mm, et enfin une légère augmentation de 180 mm en 2020. De plus, nous constatons une diminution significative des précipitations en avril, mais une augmentation significative dans la province de l'est, qui est située dans les lacs Rwanyakizinga et Mihindi. En 1985, les précipitations étaient de 350 à 389 mm, en 1990 de 200 à 231 mm et en 2000,

il y a eu une forte diminution de l'ordre de 153 mm. Dix ans plus tard, elles étaient de 231 mm, en 2015 elles étaient de 310 mm, et enfin en 2020 les précipitations ont augmenté de façon exponentielle jusqu'à environ 453 mm. On remarque bien son caractère anormal qui semble montrer une nette tendance à la baisse de 1985 à 2010, puis une remontée de 2015-2020. Ces observations ont montré également un déficit marqué en 1990 (77 mm), en 2000 (52 mm) et en 2010 (65 mm), tous situés dans la province de l'est au district de Nyagatare et des excès de pluviométriques en 1990 dans la province du nord et de l'ouest (district de Nyabihu et Rubavu).

2.1.6 - Les précipitations annuelles au Rwanda

Les stations météorologiques actuellement opérationnelles ne sont pas suffisamment représentatives pour donner une image fidèle de la variabilité climatique. Cependant, les observations et l'analyse des données montrent qu'au cours des 40 dernières années, le Rwanda a connu des irrégularités inhabituelles dans les régimes climatiques. Les précipitations annuelles au Rwanda ont affiché de forts changements de 1988 à 2018 [voir fig.14]. Au cours de cette période, les précipitations moyennes ont considérablement augmenté.

Figure 14 : Les précipitations annuelles au Rwanda de 1988-2018, données CHIRPS pour les années 1988, 1998, 2008 et 2018



Source : données CHIRPS, Numbers
Réalisation : Grondin, 2022

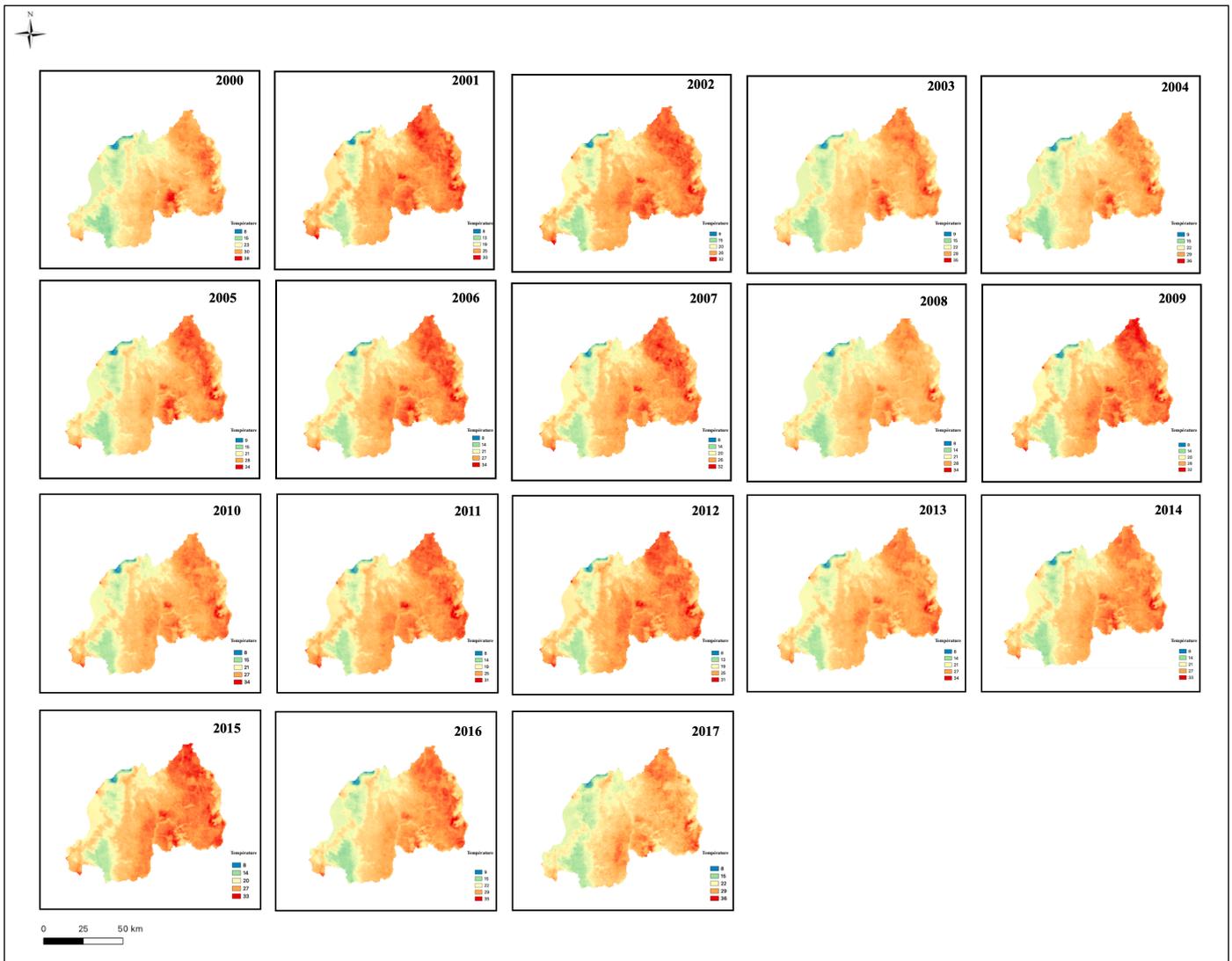
L'année 1988 a été marquée par des précipitations excessives, en effet, de janvier à mai, les précipitations ont varié de 13 mm à 49 mm. En 1998, les précipitations ont varié de 1 mm à 46 mm. Cependant, en 2008, nous avons eu de moindres précipitations parce que l'année fut touchée par une importante sécheresse. En effet, la plus forte précipitation a été de 33 mm (26 mars). Ces faibles précipitations ont eu un impact sur les moyens de subsistance dans plusieurs régions du Rwanda. La durée et l'intensité de la dégradation des terres ont également affaibli la résilience des terres. L'année 2008 sur ces divers graphiques nous montrent que ce fut l'une des périodes les plus sèches. En revanche, en 2018, on constate clairement une augmentation des précipitations, atteignant 66 mm. Les changements dans la fréquence et l'intensité des précipitations, et la persistance d'événements extrêmes tels que les fortes pluies et les sécheresses, nous montrent son irrégularité. En effet, août a été un mois particulièrement sec, alors qu'en 1988 nous avons eu plus de 51 mm de précipitations le 26 août. Les précipitations ont fortement chuté en 1998 (5 mm), en 2008 (18 mm) et enfin en 2018 (14 mm), accentuant ainsi l'anormalité de la fréquence des pluies. Enfin, avril est un mois avec une saison des pluies plus longues et on note que 2008 a été une année particulièrement sèche, le 16 avril (25 mm), contrairement aux autres années : 1988 (52 mm), 1998 (32 mm) et 2018 (74 mm).

2.1.7- Variabilité de température

Les sécheresses et les inondations ont joué un rôle important dans le déclin de la production agricole au Rwanda. Les dommages aux cultures dus à ces événements ont entraîné une détérioration de la sécurité alimentaire et une réduction de la production agricole. Les cultures qui consomment beaucoup d'eau - telles que le maïs, le manioc et le café - ont été les plus touchées, car elles ont besoin d'un niveau élevé d'humidité pour pousser. Cela a entraîné une pénurie de nourriture dans le pays et une augmentation conséquente des prix des denrées alimentaires. Les infrastructures ont également été affectées par les sécheresses et les inondations, car elles ont causé des dommages aux routes, aux ponts et à d'autres installations vitales.

Pour mieux comprendre les tendances climatiques, il s'agit maintenant d'étudier la température annuelle et de voir s'il y a eu une évolution de 2000 à aujourd'hui. Cette étude est faite à l'échelle nationale pour avoir une vision plus globale de ce phénomène de sécheresse au Rwanda. Les observations montrent que la température moyenne au Rwanda a augmenté au cours des dix-huit dernières années [voir fig.15].

Figure 15 : Cartographie des variations des température moyennes annuelles sur la période 2001-2017 à partir des données Google Earth Engine



Source : Google Earth Engine, Classeur Excel
Réalisation : Grondin, 2022

Ce constat est visible sur les cartes de la figure 15, où les périodes particulièrement sèches recensent des températures supérieures à 32°C, telles que les années suivantes : 2000 (36°), 2004 (36°), 2005 (34°), 2006 (34°), 2007 (32°), 2008 (34°), 2009 (32°), 2010 (34°), 2013 (34°), 2014 (33°), 2015 (33°), 2016 (35 °) et 2017 (36°). Ces régions sont principalement situées dans la province orientale et à Kigali, où les sécheresses sont fréquentes. L'année 2016 a connu notamment la plus longue saison sèche du Rwanda en l'espace de soixante ans, affectant ainsi la sécurité alimentaire. En effet, les précipitations de la figure 12 montrent que la province orientale, la province du sud et Kigali ont reçues moins de 731 mm. Les districts de Kayonza, Nyagatare et Kirehe dans la province orientale sont les plus touchés. En 2000, la province de l'est, Kigali et certaines parties de la province du nord ont reçu un déficit pluviométrique de 653 mm. On a eu un

climat très sec et certaines régions reçoivent trop de pluie, comme les régions de Rusizi, Nyaruguru, Kamembe et Nyamasheke (1655 mm). L'année 2017 a été particulière, avec des températures dépassant les 36°C et plus de 1721 mm de précipitations dans la zone où se situent les lacs Rwanyakizinga et Mihindi.

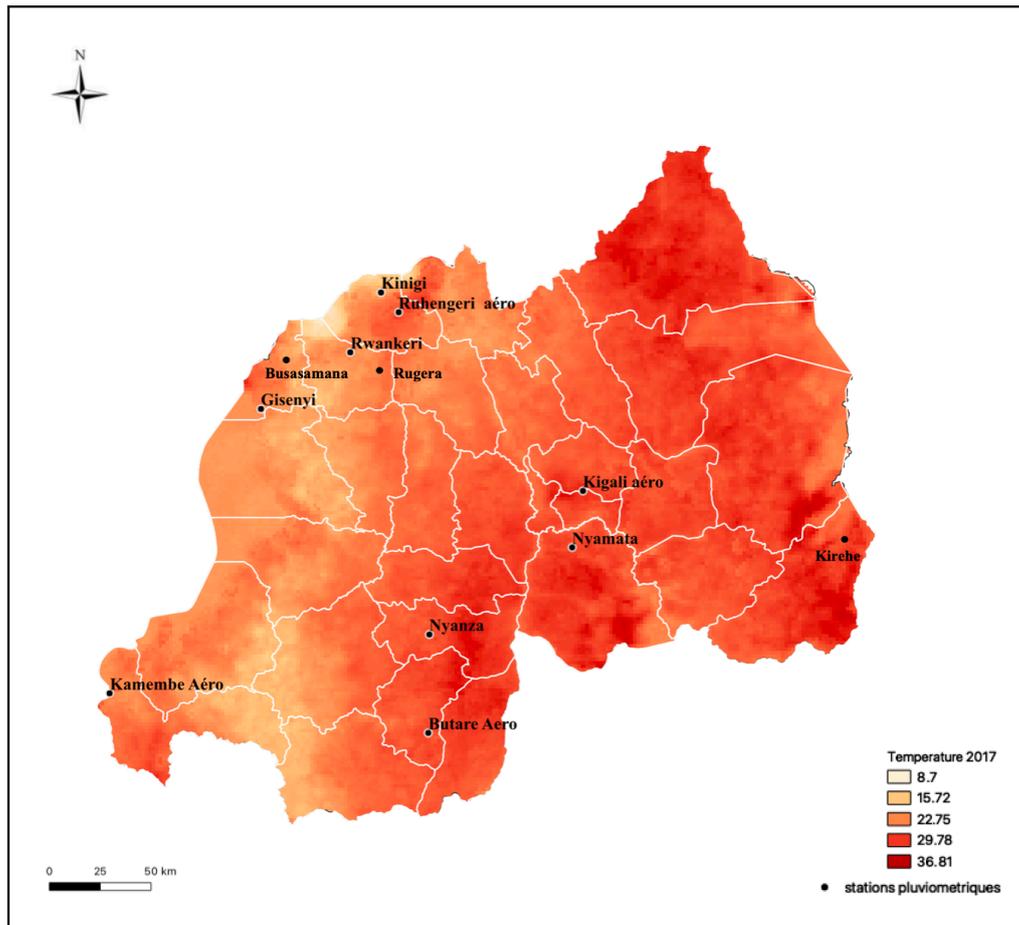
Ces observations nous ont montré un déficit marqué, car 2006 a montré que la saison sèche (janvier, février, juillet, août, septembre et octobre) était plus chaude que la moyenne sur 32 ans et inférieure à la moyenne sur 32 ans pour les saisons sèches, et les saisons des pluies (mars, avril, mai, novembre et décembre) (MINITERE, 2006). La région de l'est a connu un manque de pluie, contrairement à certaines régions qui ont eu trop de pluie.

Pour conclure, une variabilité interannuelle accrue au cours des dernières décennies a également été observée, pour exemple l'augmentation de la température moyenne de 2012 à 2014 a augmenté de 0,79°C (Météo Rwanda, 2010). C'est une bonne indication de la vulnérabilité des régions agricoles au changement climatique, compte tenu du manque de précipitations observé et des températures exponentielles sur une année. À l'inverse, des précipitations excessives avec des températures similaires peuvent être observées l'année suivante, elles caractérisent donc son anomalie, et se manifestent ici par une dégradation des sols, une érosion et des glissements de terrain sans précédent.

2.1.8 - Evolution de l'indice de sécheresse de 1981 à 2021 au Rwanda

Afin de bien comprendre les variations interannuelles sur la période d'observation, nous avons calculé l'indice de sécheresse (Indice de Nicholson) dans le but d'identifier les années pluvieuses (humides) et non pluvieuses (sèches) [voir fig.17]. Ainsi, pour mieux comprendre les fluctuations des régimes pluviométriques en relevant les périodes humides, normales et sèches, nous avons une carte représentative montrant la localisation des stations pluviométriques [voir fig.16]. 12 stations sont représentées.

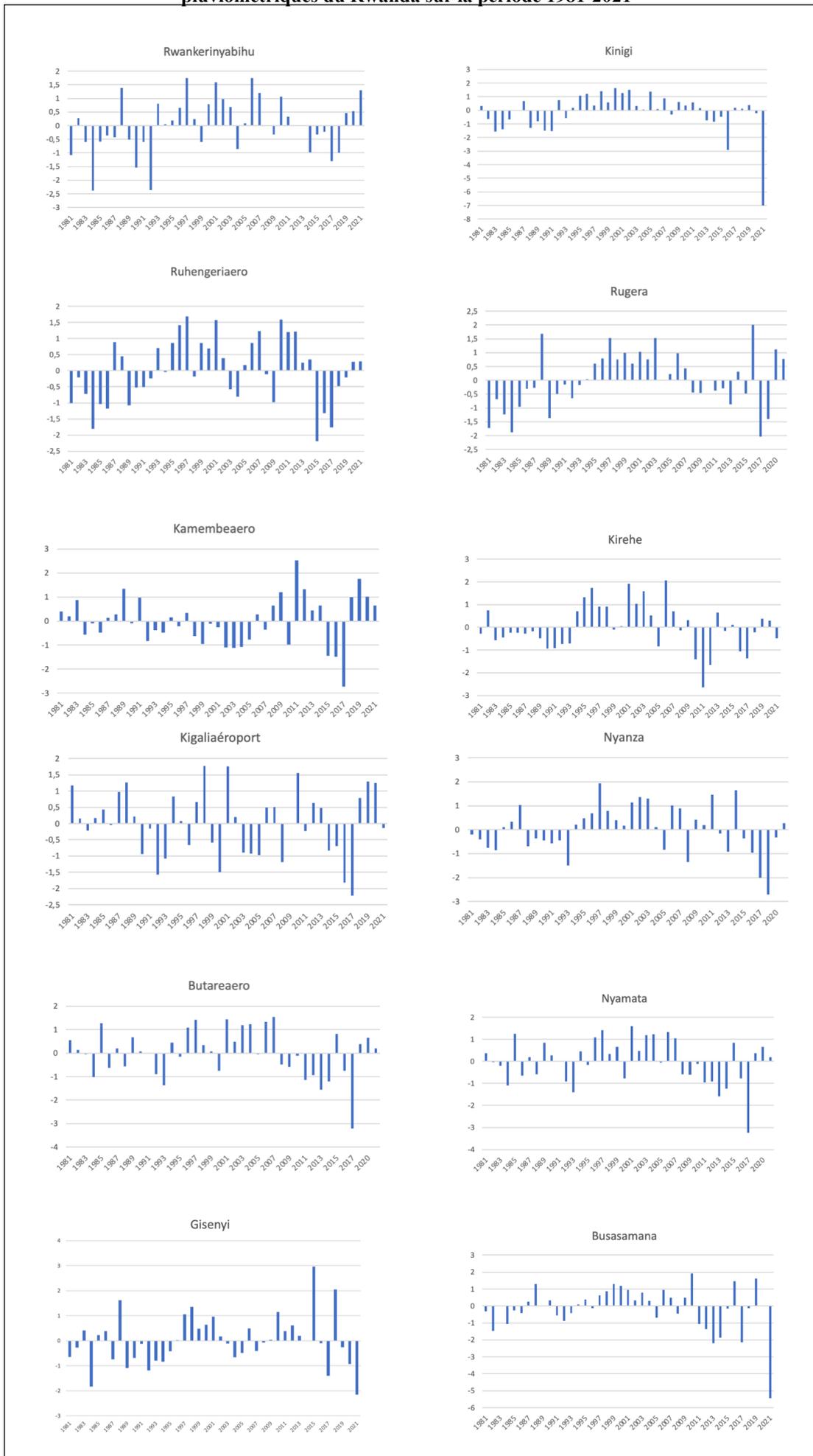
Figure 16 : Localisation des stations pluviométriques retenues pour l'étude. Le fond de carte est une image LANDSAT 2017 du Rwanda en pseudo-couleur à bande unique



Source : Google Earth Engine 2017, QGIS
Réalisation : Grondin, 2022

La province de l'ouest compte de nombreux districts tels que Rusizi (Kamembeaero), Rubavu (Bussamana et Gisenyi) et Nyabihu (Rwankeri et Rugera). Il existe deux stations dans le district de Musanze de la province du nord, Ruhengeri et Kinigi. La province méridionale de la région de Butare est située dans le district de Huye. Bugesera est le nom de l'un des sept districts de la province orientale du Rwanda et abrite la station de Nyamata. La station Kigaliaéro dans la ville de Kigali est située dans le district de Nyarugenge.

Figure 17 : Identification des années sèches et des années humides à partir des stations pluviométriques du Rwanda sur la période 1981-2021



Source : Stations météos, Classeur Excel
 Réalisation : Grondin, 2022

Les douze stations sont réparties sur l'ensemble du territoire. L'analyse des stations interannuelles a pour but d'étudier à travers l'approche spatio-temporelle la répartition des pluies tombées au Rwanda et découvrir l'origine des pluies de ces différentes régions climatiques à savoir :

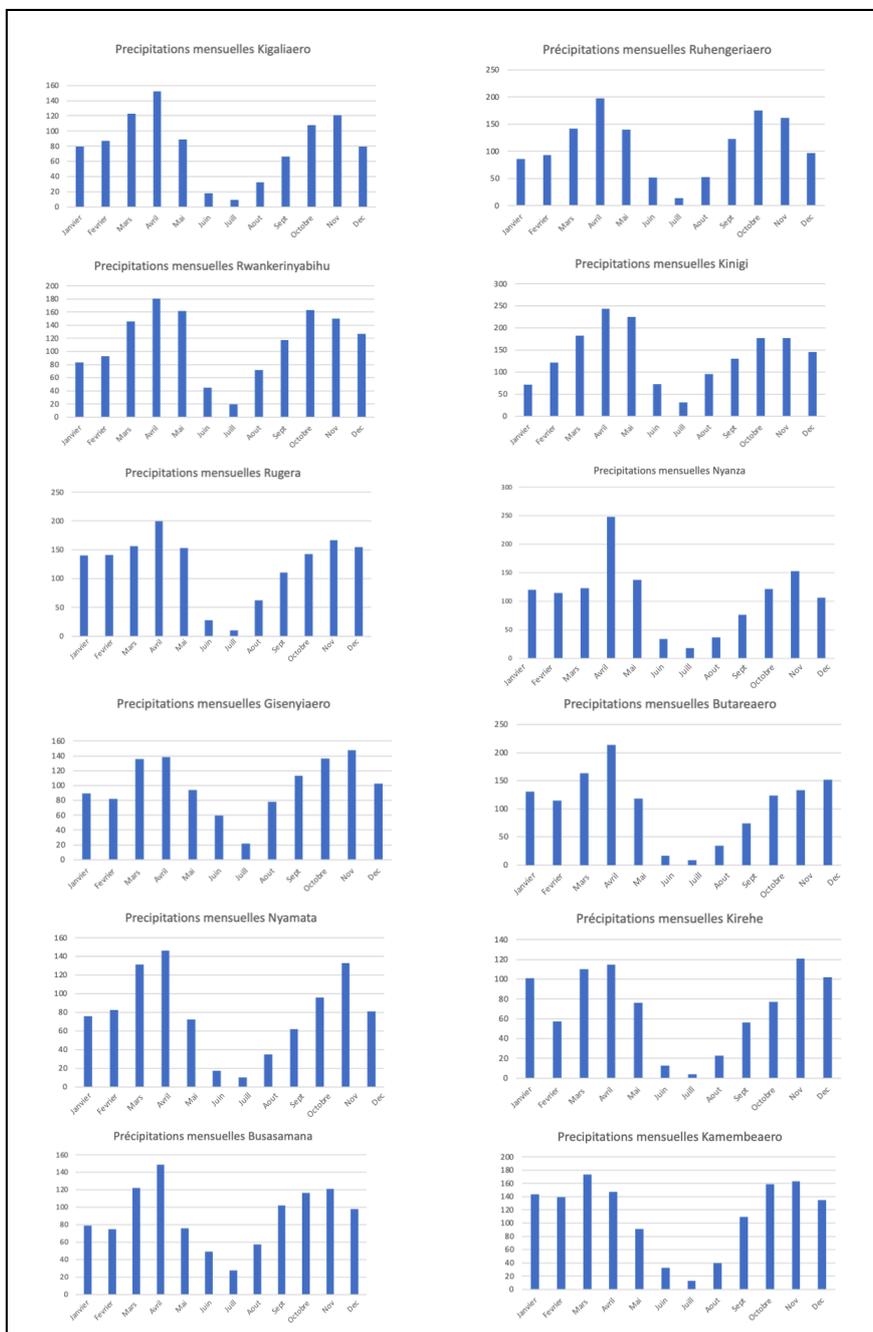
- La région bordière du lac Kivu (1500-2000 m), qui abrite deux stations dont Kamembe-aéroport et Gisenyi, situées entre 1450 et 1800 m
- La région de la crête Congo-Nil (1800-3000 m), qui héberge cinq stations se nommant Kinigi, Rwankeri, Busasamana, Ruhengeri-aéroport et Rugera. À laquelle nous rattachons les hautes terres du nord (Ruhengeri, Kinigi) dont les stations se situent entre 1800 et 2312 m
- La région du plateau central (1500-2000 m) avec deux stations dont Nyanza et Butare-aéroport
- La région des bas plateaux de l'Est (1000-1500 m, avec quelques sommets isolés allant jusqu'à 1750 m), les stations sont Nyamata et Kirehe, ainsi que le centre du pays Kigali-aéroport. Leurs stations se situent entre 1403 et 1750 m.

On observe alors une variabilité interannuelle accrue, caractérisée par une alternance inattendue d'années humides et sèches. Nous avons donc eu une période relativement humide en 1998 due à El Niño (supérieur à 1). L'année 2001 a été considérée comme humide et a concerné les stations de Ruhengeri, Rwankeri, Kinigi, Rugera, Nyamata, Butare et Nyanza (supérieure à 1). La station de Kirehe a atteint 1,9. Comme on peut le voir, sur 12 stations, 8 ont été considérés comme des années particulièrement humides. De plus, en 2010, de graves inondations se sont produites aux stations de Kigali, Gisenyi, Ruhengeri et Busasamana. La spatialisation de l'indice de sécheresse au Rwanda fait ressortir des années sèches (1981-1985) pour les stations Rwankeri, Kinigi, Ruhengeri, Rugera, Kirehe, Nyanza, Gisenyi et Busasamana. Ensuite, l'année 2017 a été une année dramatique avec des températures enregistrées de plus de 36°C [voir fig.16] et l'indice de sécheresse a montré que les stations Rwankeri et Kirehe ont obtenu -1 et Rugereri -1,76. Des zones très arides sont également observables comme Kigali, Gisenyi, Kamembe, Busasamana, Rugera et Nianza (-2). Pendant que d'autres atteignent des records jamais observés en 40 ans soit Butare et Nyamata (-3). Ces histogrammes permettent de voir qu'en réalité, aucune année n'est réellement sèche ou humide au Rwanda. En effet, ce territoire avec ces montagnes accidentées et sa topographie montre que certaines régions restent humides, c'est le cas de Kinigi en 2017 (0,18) quand la grande majorité du pays est sèche et vice-versa. De même pour l'année 2016, la station Rugera connaît une année humide (2) alors qu'au même moment elle est très sèche pour Kinigi (-2,96).

2.1.9 - Analyse de la variabilité des régimes pluviométriques au Rwanda

Pour mieux comprendre la structure de la distribution des précipitations au Rwanda, nous examinerons le cycle saisonnier des régimes pluviométriques au Rwanda.

Figure 18 : Cycle saisonnier des régimes de précipitations moyennes mensuelles du Rwanda sur la période 1981-2021



Source : Stations météos, Classeur Excel
Réalisation : Grondin, 2022

Le graphique fait ressortir 12 régimes pluviométriques sur l'ensemble du territoire Rwandais. L'observation des régimes pluviométriques de la figure 18 permet de confirmer que le Rwanda possède quatre saisons de durée inégale. La petite saison pluvieuse d'octobre à décembre, où les précipitations sont de 100 mm en moyenne, excepté les stations Nyamata

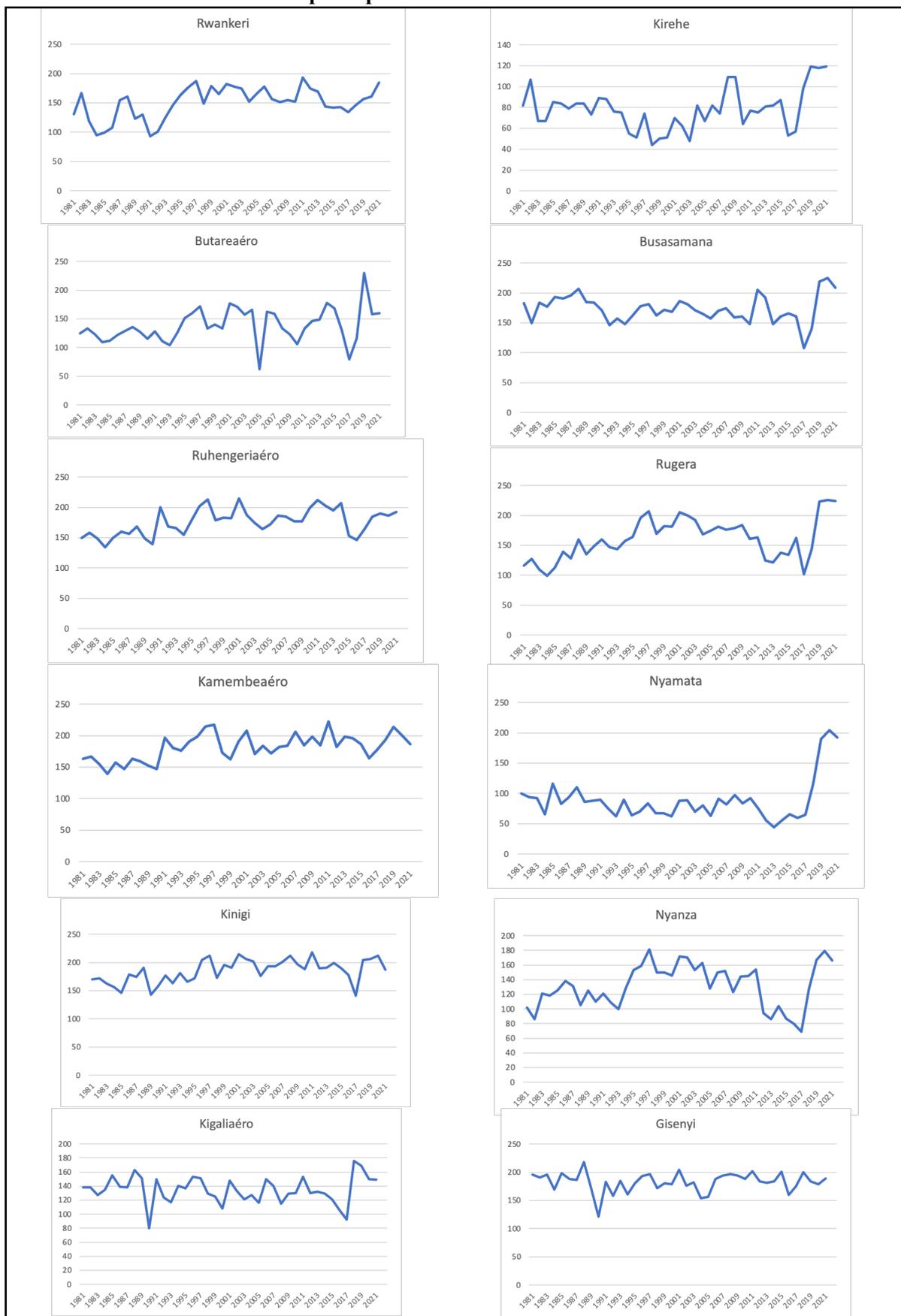
et Kirehe, qui affichent 80 mm. D'autres stations comme Kamembaero, Gisenyi, Rwankerinyabihu et Ruhengeriaero varient entre 120 et 160 mm. Concernant la petite saison sèche, elle se situe de janvier à février, et les précipitations varient de 71 à 80 mm. En revanche, les stations Rugera, Nyanza, Butareaero, Kamembaero et Kirehe recensent elles entre 100 et 140 mm de pluies. On observe également à la région bordière du lac Kivu à Kamembaero, la région du plateau central à Nyanza et Butareaero, la région de l'est à Kirehe et la crête du Congo à Rugera, que la petite saison des pluies est plus longue dans ces régions. Ces régions réparties aux quatre coins du Rwanda montrent des problématiques similaires. La grande saison humide quant à elle débute de mars à mai, où l'on constate que le mois d'avril est celui qui possède les plus fortes précipitations, excepté la station Kamembaero où c'est le mois de mars le plus pluvieux. La plus grande valeur pluviométrique pour cette grande saison humide est Nyanza avec 250 mm. Enfin, une grande saison sèche est observée de juin à septembre, lorsque les stations de Nyamata et Kirehe et l'aéroport de Kigali reçoivent entre 3 et 60 mm de précipitations. Les neuf stations restantes sont de 20 à 100 mm.

La variabilité saisonnière observée dans les régimes de pluies au Rwanda varie considérablement dans l'espace et le temps, avec une variation plus élevée observée pendant la grande saison des pluies (AM. Kouassi, 2010). L'analyse des résultats permet de mieux comprendre la distribution des pluies dans le territoire Rwandais qui dépend non seulement de la topographie et le relief, mais aussi des mouvements de la zone de convergence intertropicale (ZCIT).

Le suivi des précipitations est aujourd'hui incontournable pour la gestion des zones agricoles. Cependant, la mesure des précipitations sert aussi à anticiper le débit des cours d'eau pour faire face aux risques d'inondations. Prévoir la pluie et les intempéries est très utile. Les stations météorologiques sont donc des ensembles d'instruments qui permettent de connaître précisément le climat (M. Pierrot, 2016). Ainsi, s'intéresser au suivi des pluies en temps réel est important. En observant la Figure 19, on constate que la fréquence des pluies par année est irrégulière. En effet, pour la station Butareaero les années 2005 et 2017, ont été les années les plus sèches soit de 52 et 79 mm. En revanche, l'année 2019 est marqué par des précipitations élevées de 250 mm. On observe pour la station Rugera, que des baisses montrent un score de 100 mm, au contraire des années 2019, 2020 et 2021 où les précipitations sont supérieures à 200 mm. La courbe de la station Gisenyi, nous montre une courbe régulière avec une baisse de précipitation pour l'année 1991. En revanche, la courbe de Nyanza est irrégulière et on constate des précipitations anormales pour les années 2019 à 2021. L'année 2017, est l'année observée la plus déficitaire pour

la station Nyanza en 40 ans soit de 69 mm. Pour la station Ruhengeri et Kinigi, on observe également une baisse pluviométrique pour l'année 2017.

Figure 19 : Variabilité interannuelle du nombre de jours de pluie sur la période 1981-2021 des principales stations du Rwanda



Source : Stations météo, Classeur Excel

Réalisation : Grondin, 2022

On constate que l'année 2017 est exceptionnellement moins pluvieuse pour certaines stations. D'ailleurs la topographie accidentée du pays peut être à l'origine de la faible pluviométrie observable dans certaines stations. En observant, la courbe de la station Nyamata on peut apercevoir que de 2019 à 2021 il y a eu de fortes précipitations de l'ordre de 190 mm. Pour la station Kamembe, les précipitations sont supérieures à 180 mm, avec une courbe régulière. Des courbes anormales sont constatées comme pour les stations Kirehe et Kigali, où de fortes précipitations ont été observées. On constate à la fois des précipitations irrégulières, régulières et anormales, ces contrastes entre les régions varient d'une année à l'autre. En observant, les cumuls de précipitations des 12 stations météorologiques du Rwanda des anomalies sont visibles et on remarque que l'indice de sécheresse nous confirme bien cette anomalie, en nous affichant les périodes très humides et très sèches.

Il sera maintenant question dans la suite de ce travail de voir comment l'activité végétale varie aussi spatialement et temporellement en considérant les mêmes échelles (spatiales, temporelles) que celles utilisées pour l'étude des précipitations (saisonniers et annuelles).

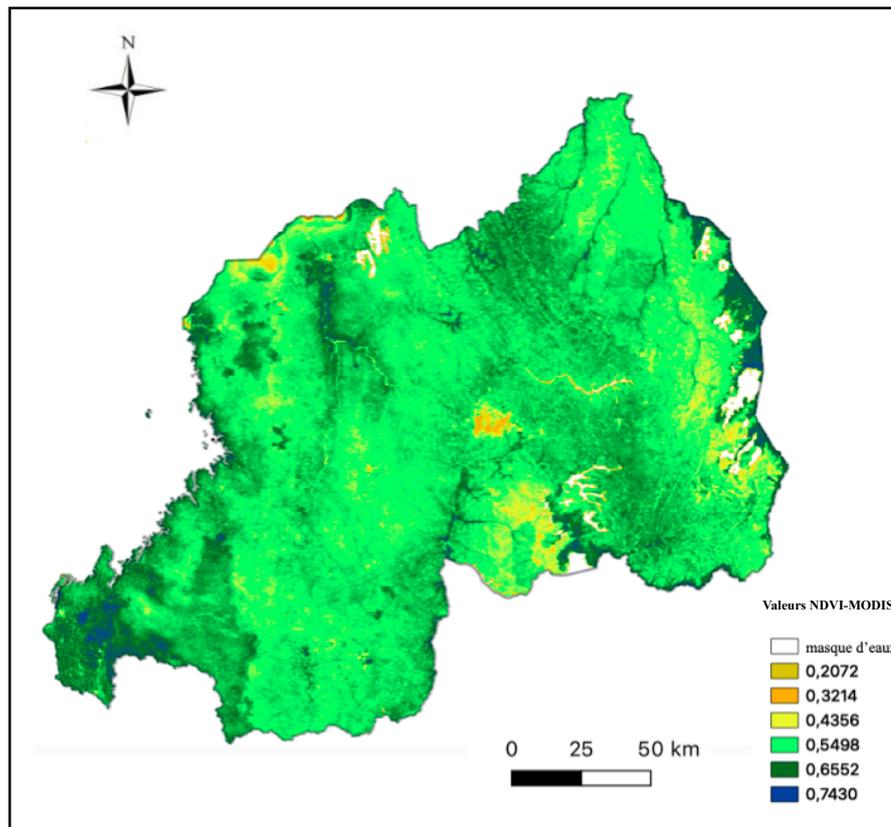
2.2 - Variabilité de l'activité végétale à partir de l'indice de végétation au Rwanda

2.2.1 - Analyse spatio-temporelle de la végétation au Rwanda

La figure ci-dessous nous montre la cartographie moyenne annuelle de NDVI sur la période de 2000 à 2021. On distingue ainsi :

- > NDVI faible, inférieur à 0.43 : localisé principalement au district de Bugesera à l'est, mais aussi dans la partie nord-ouest du pays et à l'est où se situe le parc Akagera. La ville de Kigali représente également une faible valeur de NDVI, ainsi qu'une partie du parc National des volcans.
- > NDVI moyen compris entre 0.43 et 0.65 : qui se trouve dans la partie nord-ouest du pays, dans le district de Nyabihu, à l'est une partie du district de Burera et au sud, au district de Ngororero.
- > NDVI fort supérieur à 0.65 : au parc Nyungwe, aux districts de Rusizi, Kamembe, Nyamasheke et à Rubavu.

Figure 20 : Evolution interannuelle des classes d'occupation des sols de NDVI du Rwanda sur la période 2001-2021



Source : Climate Engine, données NDVI MODIS, QGIS
Réalisation : Grondin, 2022

2.2.2 - Variabilité interannuelle du NDVI sur la période d'étude

D'une manière générale, la zonation du NDVI moyen dans le pays est observable chaque année durant la période d'étude. On note néanmoins des différenciations dans la répartition de l'intensité de l'activité végétale d'une année à l'autre. Les années de forte valeur de NDVI (0,70) sont celles de 2001, 2003, 2007, 2010, 2011, 2014, et 2019. En effet, la valeur du NDVI est élevée (0,70) dans la majeure partie de la province orientale, notamment Ruhengeri, Gisenyi et Kamembe en bordure de la bande côtière. Kinigi et Ruhengeri ont également des valeurs fortes sur la dorsale du Congo.

Figure 21 : Carte moyenne annuelle de NDVI-MODIS du Rwanda sur la période 2001- 2021



Source : Climate Engine, données NDVI MODIS, QGIS
 Réalisation : Grondin, 2022

À l'inverse, on note des années avec des valeurs de NDVI inférieures à 0,43. Ce fut le cas en 2003, 2006, 2007, 2012, 2013, 2015, 2016, 2017 et 2020. Nous avons observé des régions très sèches en 2012, où l'indice de sécheresse de Kirehe était très négatif (-2,64). L'année 2017 a été une année record, avec de faibles valeurs de NDVI réparties sur toute la dorsale Congo Nil et d'autres régions, ainsi que Kinigi, Rugera et Busasamana avec un indice de sécheresse supérieur à -2. Nyamata, qui se situe dans la région des bas plateaux de l'est a une valeur de -3,23. Les valeurs de

NDVI varient dans leurs distributions spatiales tout en restant dans une zone précise. Cependant, nous avons remarqué que dans la ville de Kigali, la valeur a été faible au fil des ans. Selon l'année, on suppose déjà que c'est dû à des saisons végétatives plus ou moins longues.

2.2.3 - Etude à l'échelle locale : district de Nyabihu

2.2.2.1 - Évolution interannuelle des classes d'occupation des sols NDVI

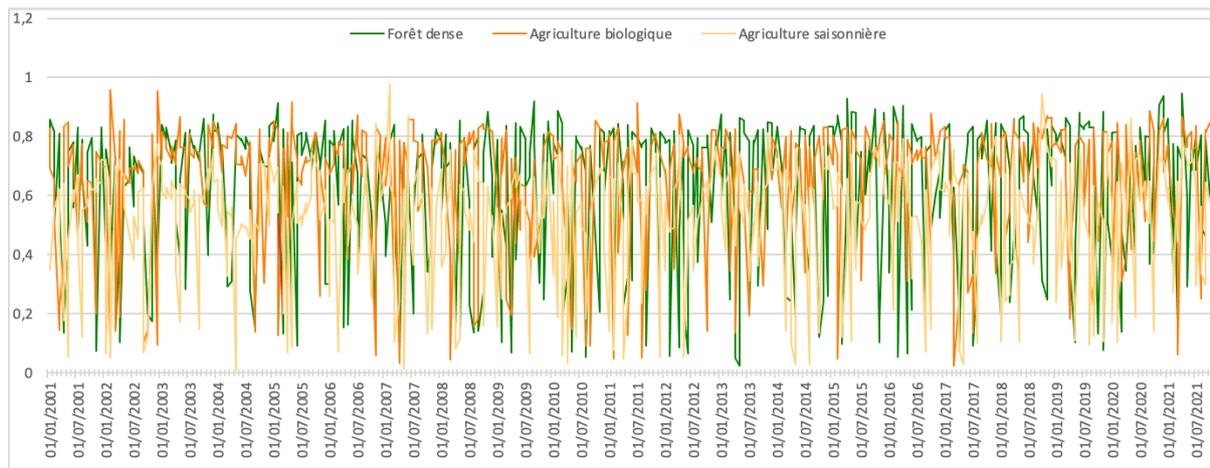
Les données à moyenne résolution spatiale sont définies comme une résolution intermédiaire entre la haute résolution spatiale et la basse résolution kilométrique. Seuls les capteurs MERIS et MODIS peuvent être qualifiés de capteur à moyenne résolution. La taille du pixel, avoisine les 250-300 m, cela devrait permettre d'envisager une étude des paysages fragmentés (Townshend *et al.*, 1988).

Le capteur MODIS a été placé sur la plateforme mise en orbite au début de l'année 2000. On peut alors regrouper 5 classes d'occupation des sols au Rwanda qui correspondent aux classes NDVI suivantes :

- Classe 1 : forêt dense
- Classe 2 : agriculture biologique
- Classe 3 : agriculture saisonnière
- Classe 4 : espace ouvert ou en herbe
- Classe 5 : forêt dégradée

Les fluctuations interannuelles de l'activité végétale par classe sont observées par la méthode d'extraction des profils temporels de NDVI. La Figure 22 et la Figure 23 montrent les profils temporels des 5 classes de NDVI identifiées sur la période d'observation. Ces dernières se suivent relativement avec une variabilité plus au moins marquée selon les années. Ainsi, les classes ont été séparées en deux graphiques afin de mieux visualiser l'évolution interannuelle des classes d'occupation des sols NDVI.

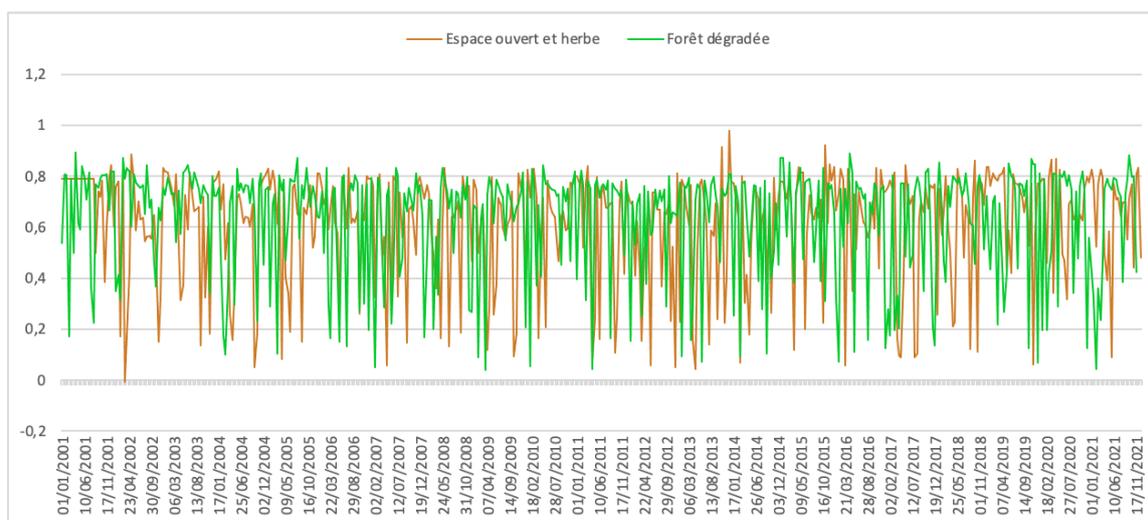
Figure 22 : Évolution interannuelle des classes d'occupation des sols du district de Nyabihu sur la période de 2001-2021 à partir des données NDVI



Source : Climate Engine, données NDVI MODIS, Tableau Excel
Réalisation : Grondin, 2022

Les profils temporels des classes de végétation sur la période d'étude permettent de voir que les valeurs oscillent entre 0 et 1. La figure 22 permet de voir que pendant toute la période d'étude l'agriculture biologique conserve les plus fortes valeurs de NDVI et l'agriculture saisonnière les plus faibles. Les années avec de fortes valeurs ont été observées en 2002 et 2007 (supérieur à 0,9). Pendant la période d'observation, les valeurs de NDVI ont été faibles pendant deux ans, proches de 0, comme l'agriculture saisonnière en 2004 et l'agriculture biologique en 2017. Comme son nom l'indique, l'agriculture saisonnière est très sensible aux aléas climatiques. En effet, il dépend du climat et change en fonction de la saison des pluies et de la sécheresse.

Figure 23 : Évolution interannuelle des classes d'occupation des sols du district de Nyabihu sur la période de 2001-2021 à partir des données NDVI



Source : Climate Engine, données NDVI MODIS, Tableau Excel
Réalisation : Grondin, 2022

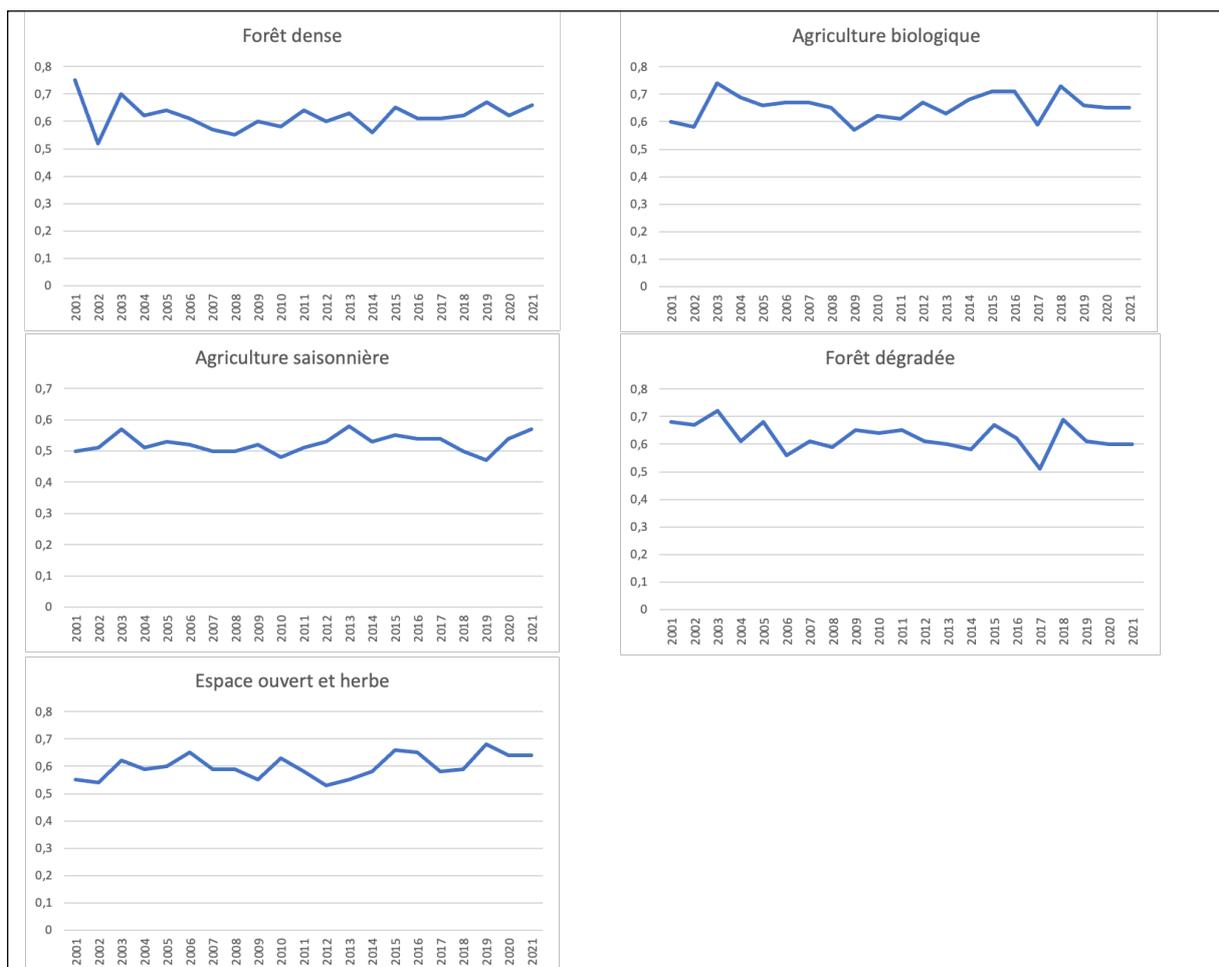
Sur ce graphique [voir fig.23], les classes de végétation présentent des valeurs de NDVI fluctuant entre -1 et 1. Les graphiques montrent que les espaces ouverts ou en herbes détiennent les valeurs NDVI les plus élevées, et les forêts dégradées détiennent les valeurs les plus faibles. La forte saison des pluies d'avril 2016 a entraîné la valeur la plus élevée pour les forêts dégradées (0,89). On peut également observer que le NDVI pour un espace ouvert ou en herbe atteint 0,97 en 2013. L'espace ouvert ou en herbe contient les valeurs positives les plus fortes mais aussi les valeurs négatives les plus faibles.

2.2.4 - Caractérisation des saisons végétatives du NDVI par classe

2.2.4.1 - Les classes de NDVI

Les graphiques temporels par classe [voir fig.24] permettent d'observer au cours de la période d'étude, les fluctuations interannuelles des NDVI MODIS.

Figure 24 : Fluctuation interannuelle des classes de végétation NDVI au district de Nyabihu sur la période 2001-2021



Source : Climate Engine, Tableur Excel

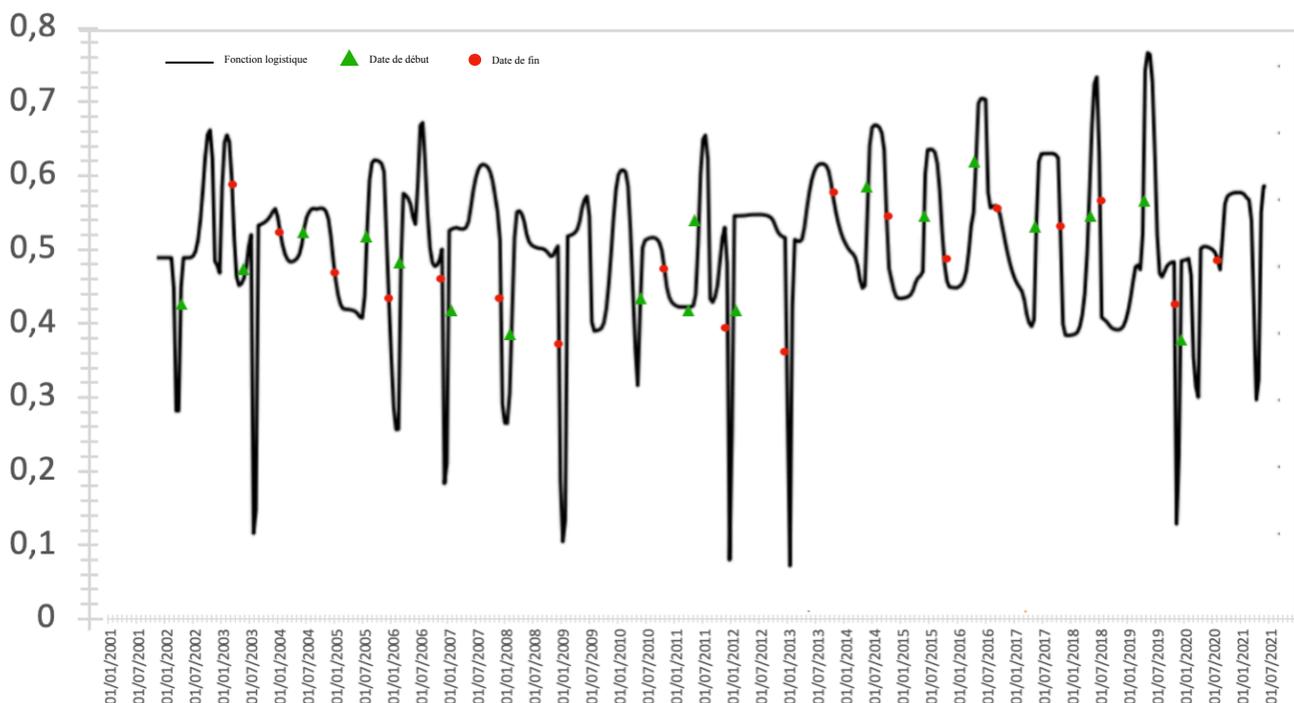
Réalisation : Grondin, 2022

On observe des valeurs élevées de 0,70 pour l'agriculture biologique en 2003, 2006 et 2018. On remarque, une augmentation des valeurs de NDVI en 2019 pour la forêt dense, l'espace ouvert ou en herbe et la forêt dégradée. Ces fluctuations sont très variables d'une classe à l'autre, mais néanmoins des similitudes existent en observant les courbes. Par exemple, 2017 nous a montré une baisse des valeurs de NDVI pour l'agriculture biologique, alors que nous avons vu l'inverse pour les forêts dégradées, avec une légère augmentation dans les classes restantes. On observe pour l'ensemble des classes que les fluctuations sont très variables. Ainsi, les fluctuations interannuelles observées peuvent être attribuées à de nombreux facteurs, comme des facteurs météorologiques. On peut également lier cette fluctuation annuelle au rythme et à la distribution des pluies au cours de l'année.

2.2.4.2 - Caractéristiques de la saison végétative : date de début, date de fin et longueur de la saison végétative

La mise en évidence des dates de début, de fin et longueur de la saison végétative est effectuée à partir du logiciel TIMESAT.

Figure 25 : La phénologie saisonnière du NDVI-MODIS sur la période 2001-2021 pour la classe nommée X



Source : données Climate engine, logiciel Timesat
Réalisation : Grondin, 2022

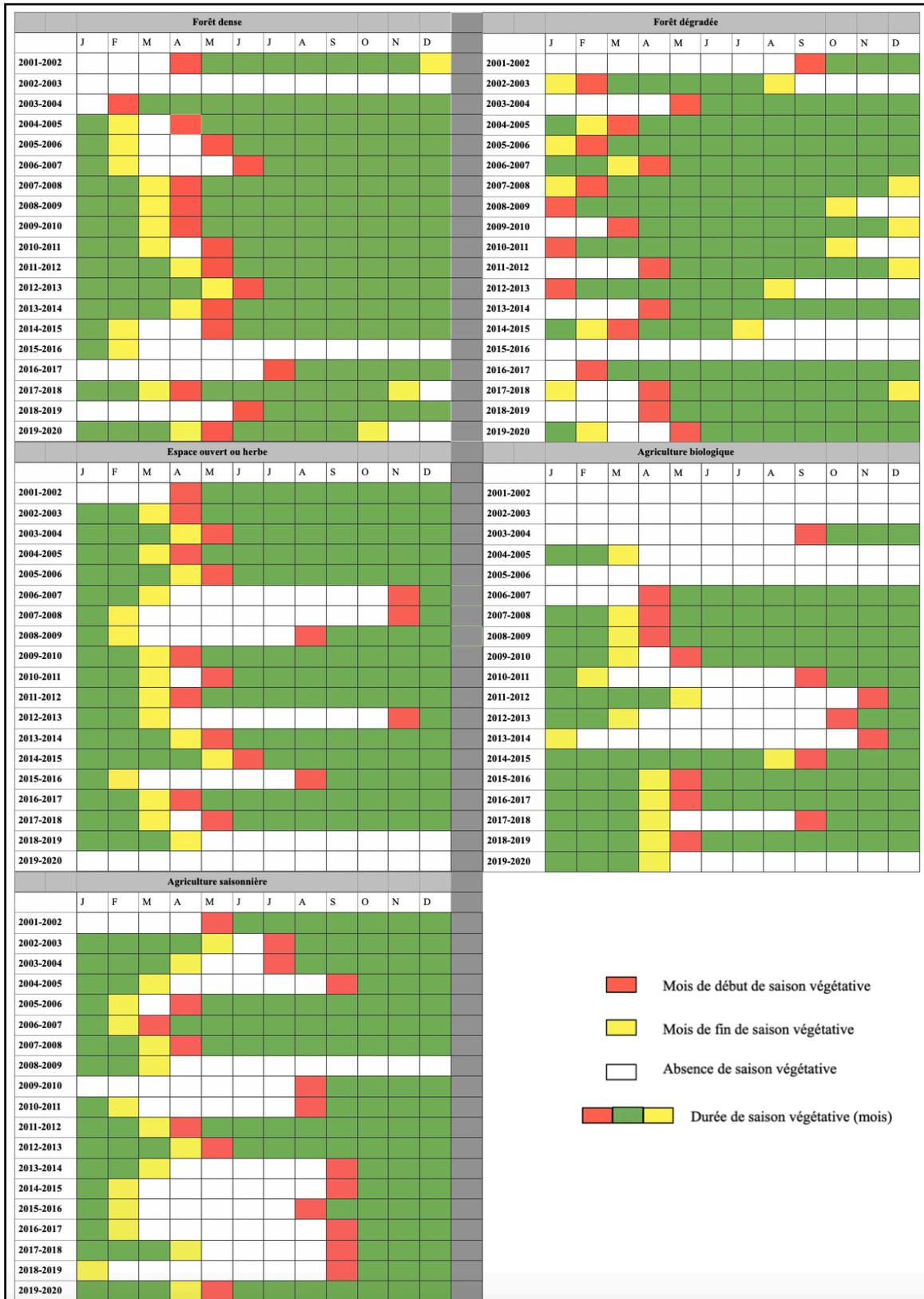
La Figure 25 montre un exemple de traitement des données NDVI réalisé avec le logiciel TIMESAT (Jönsson and Eklundh 2004). Ce logiciel permet, à partir d'une série de données de NDVI, de caractériser la saison végétative. On note les dates de début (en triangle vert) et fin (en rond rouge) ainsi que la courbe de lissage (noire).

Ainsi, pour chacune des 5 classes de NDVI, nous avons observé les paramètres de saisonnalité (date de début et de fin de la saison végétative) et donc mieux caractériser le comportement de la saison végétative. Ceux-ci sont présentés dans la Figure 26. Cette figure montre qu'une variation de la date et de la fin de la saison de végétative a été observée dans chaque classe. Dans l'ensemble, nous avons remarqué que les forêts denses et les espaces ouverts ou en herbes sont restés stables pendant les premiers mois de la saison végétative ou, à l'inverse, les forêts dégradées ont montré une instabilité pendant les premiers mois de la saison de végétative. Pour différencier les phases phénologiques des classes de végétations, nous nous intéressons aux phases de début et de fin de saison de végétative. La saison végétative est en moyenne de février à mai, mais varie selon la classe.

Pour les forêts denses et les espaces ouverts ou en herbes, le début de la saison de croissance oscille entre février et avril. L'agriculture saisonnière et biologique commence d'avril à septembre. Dans les forêts dégradées, en revanche, le début de la saison de croissance se situe entre janvier et avril. L'agriculture saisonnière, la forêt dense et l'espace ouvert ou en herbe ont une fin de saison précoce (février) tandis que l'agriculture biologique a une fin tardive (mars), et pour finir la forêt dégradée a une fin de saison très tardif (août).

Les démarrages, fins précoces ou tardifs ont une influence sur la durée de la saison. En effet, il est évident que pour une classe, comme celle de l'agriculture saisonnière par exemple, le démarrage est précoce et a une fin tardive en 2006, la saison sera alors plus longue que celle qui a un démarrage tardif et une fin précoce (agriculture biologique en 2003) ou encore un démarrage tardif et une fin précoce (forêt dégradée en 2001). Il a été observé que la variation du NDVI dans les forêts dégradées restait faible, contrairement aux autres classes.

Figure 26 : Dates de débuts et fins de saisons végétatives des classes de NDVI au district de Nyabihu sur la période de 2001-2019

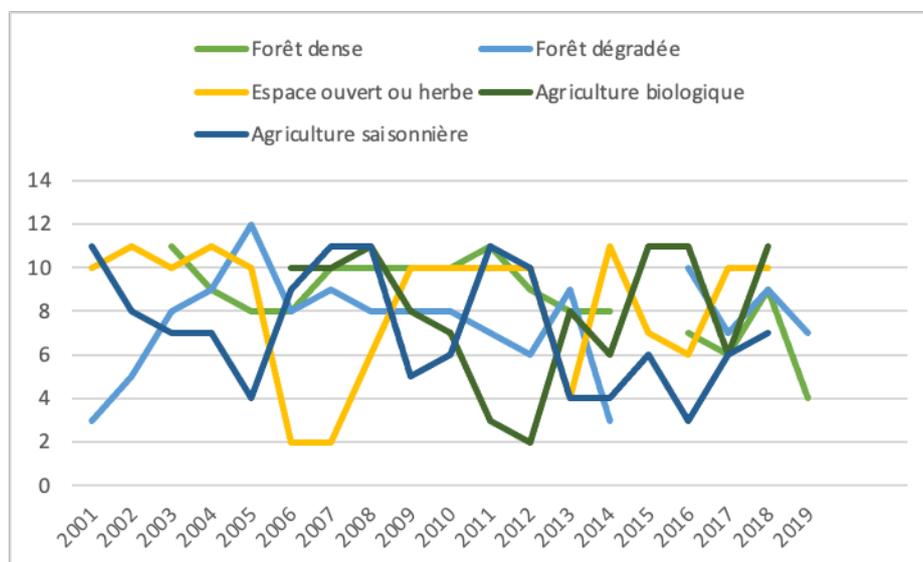


Source : Climate Engine, TIMESAT

Réalisation : Grondin, 2022

Pour les classes forêts denses et agriculture saisonnière, une augmentation de la durée de mois végétatif est observée en 2012 [voir fig.27]. Au contraire de l'agriculture biologique et de la forêt dégradée où une baisse significative est observée. La classe forêt dégradée, nous montre une courbe irrégulière, avec une forte valeur végétative en 2005, suivi de l'espace ouvert ou en herbe en 2014. En comptant les classes par les longueurs de la saison végétative, c'est la classe forêt dégradée qui enregistre la plus longue durée soit 12 mois, suivis des classes forêts denses, espace ouvert ou en herbe, l'agriculture saisonnière et biologique avec 11 mois.

Figure 27 : Variation de la durée de saison végétative par classe au district de Nyabihu sur la période 2001-2021



Source : Climate Engine, TIMESAT, Tableur Excel
Réalisation : Grondin, 2022

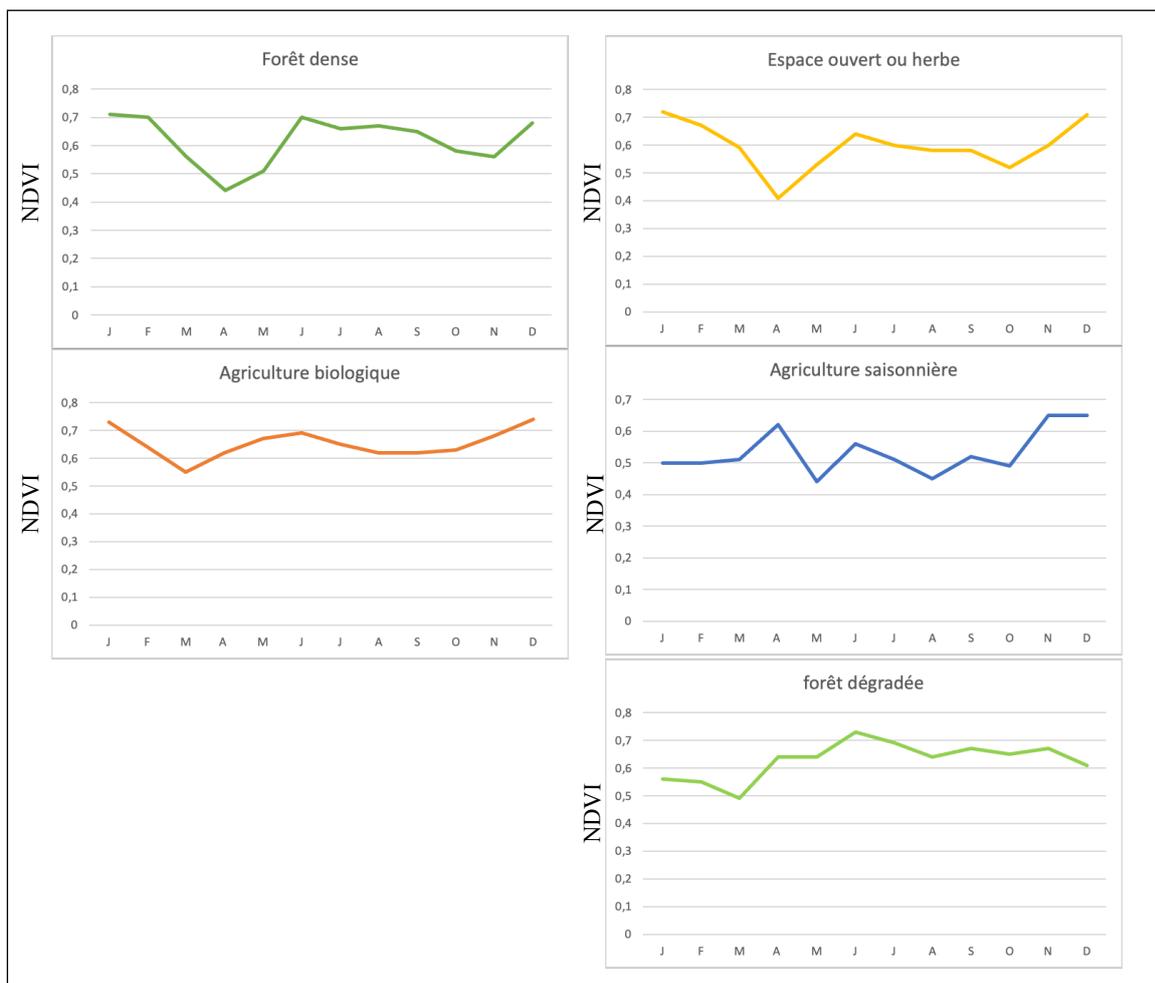
2.2.4.3 - Analyse du cycle saisonnier NDVI

Les cycles saisonniers associés aux catégories de NDVI permettent d'observer les variations saisonnières d'une catégorie à l'autre entre 2001 et 2021. Par conséquent, nous observons :

- Le cycle saisonnier de l'agriculture saisonnière montre peu de variation du NDVI tout au long de l'année. Les valeurs NDVI vont de 0,43 à 0,66. Il y a eu de légères augmentations en avril, juin, novembre et décembre. La saison végétative dure 11 mois.

- Le cycle saisonnier des forêts dégradées a également montré un changement moyen de 0,5 à 0,70. À l'exception de juin, les valeurs ont été relativement stables. Une baisse a été enregistrée en mars. La période de croissance est de 12 mois.
- La répartition saisonnière des classes forêts denses, espace ouvert ou en herbe et agriculture biologique a montré une forte variation, fluctuant entre 0,45 et 0,71 pour la forêt dense, entre 0,40 et 0,73 pour l'espace ouvert ou herbe et entre 0,56 et 0,74 pour la fluctuation de l'agriculture biologique. Les espaces ouverts ou herbes et forêts denses déclinent en avril, tandis que l'agriculture biologique culmine en mars. L'agriculture biologique et les espaces ouverts ou en herbe ont légèrement diminué en octobre. La saison de croissance est de 11 mois.

Figure 28 : L'analyse des cycles saisonniers de NDVI par classe sur la période 2001-2021 au district de Nyabihu



Source : Climate Engine sur la période de 2001-2020, Tableau Excel
Réalisation : Grondin, 2022

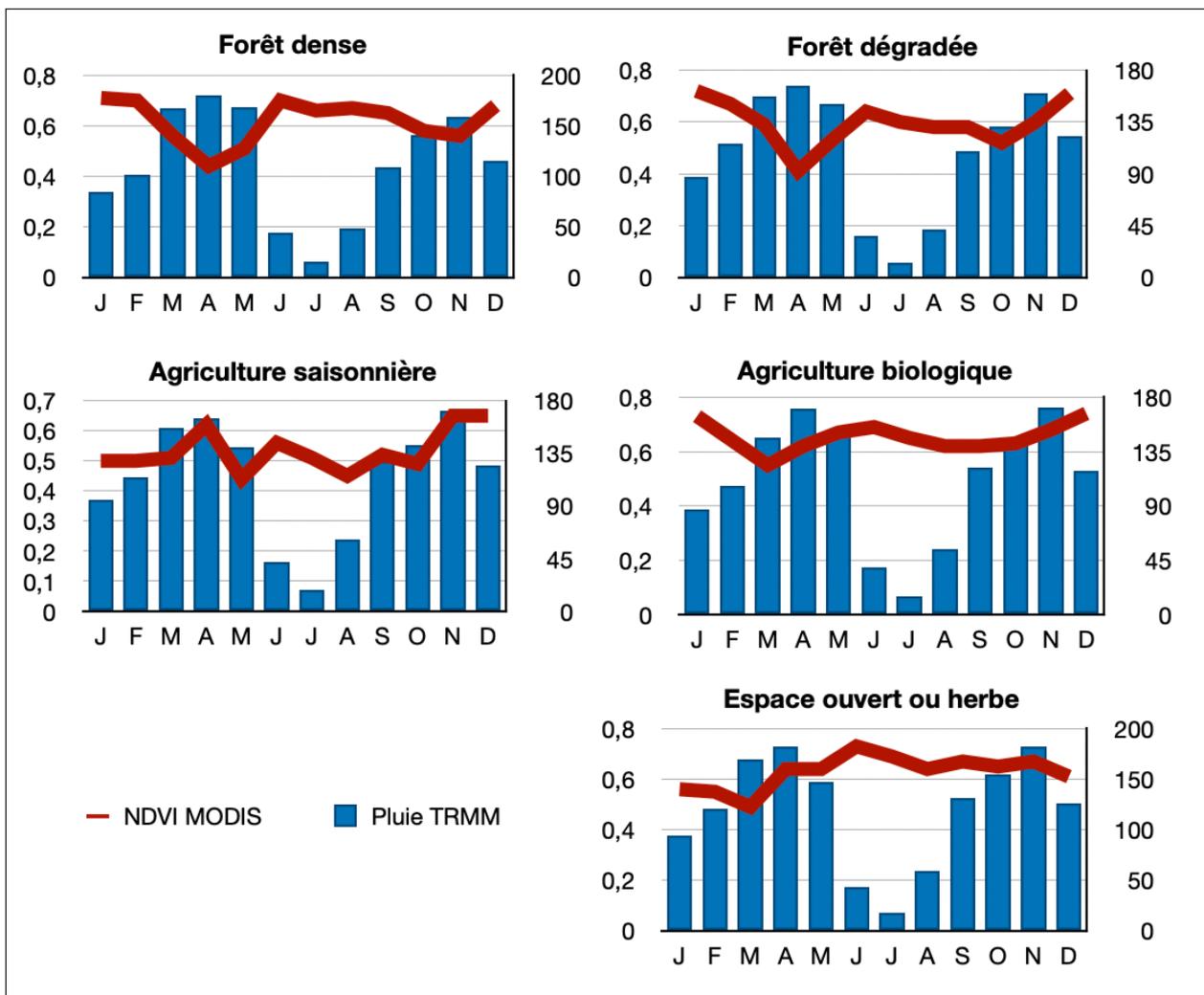
Les analyses spatio-temporelles des précipitations et de l'activité végétale suggèrent un lien étroit entre la pluie TRMM et le NDVI. En effet, il a été observé des évolutions interannuelles presque similaires entre la pluie et le NDVI.

2.2.5 - Relation pluie-NDVI

2.2.5.1 - Le lien entre les classes NDVI et précipitations

On note que toutes les classes ne suivent pas les mêmes variations de précipitations de leurs zones géographiques [voir fig.29]. C'est-à-dire que pendant les périodes de faibles précipitations, la valeur du NDVI continue d'augmenter (de juin à septembre). Mais pour les autres mois, la courbe suit à peu près la même résolution, mais décalée de deux ou trois. Le graphique confirme que les fortes variations du NDVI correspondent bien aux zones de précipitations importantes.

Figure 29 : Comparaison entre les variations saisonnières de NDVI et les pluies mensuelles sur la période de 2001-2021



De plus, nous avons remarqué que certaines végétations étaient plus sensibles à la présence ou à l'absence d'eau pendant de courtes périodes (mensuelles). Le temps de réponse végétale est quasi instantané au signal pluviométrique pour l'agriculture saisonnière et l'espace ouvert ou en herbe. D'autre part, les paysages forestiers et l'agriculture biologique, en raison de leurs réserves en eau, réagissent plus tardivement aux précipitations. Cette étude montre que la pluie seule ne peut pas expliquer tous les changements observés dans la région, et d'autres paramètres, comme la température, la topographie, doit être considérée pour mieux expliquer les changements de NDVI dans certaines régions.

Pour conclure cette partie, l'indice de végétation NDVI a permis de montrer clairement la variabilité de l'activité végétale de la zone où des changements se sont opérés en vingt ans. Il est vrai que certaines classes ont des taux élevés, comme la forêt dense, ou, à l'inverse, une densité végétale faible et erratique, comme l'agriculture saisonnière. Ces changements saisonniers ont de nombreuses conséquences, telles que des interruptions dans la phase de plantation. Par exemple, des pluies tardives retardent la maturation et la récolte.

Deuxième partie :

Le district de Nyabihu : entre défis environnementaux, sociaux et agricoles

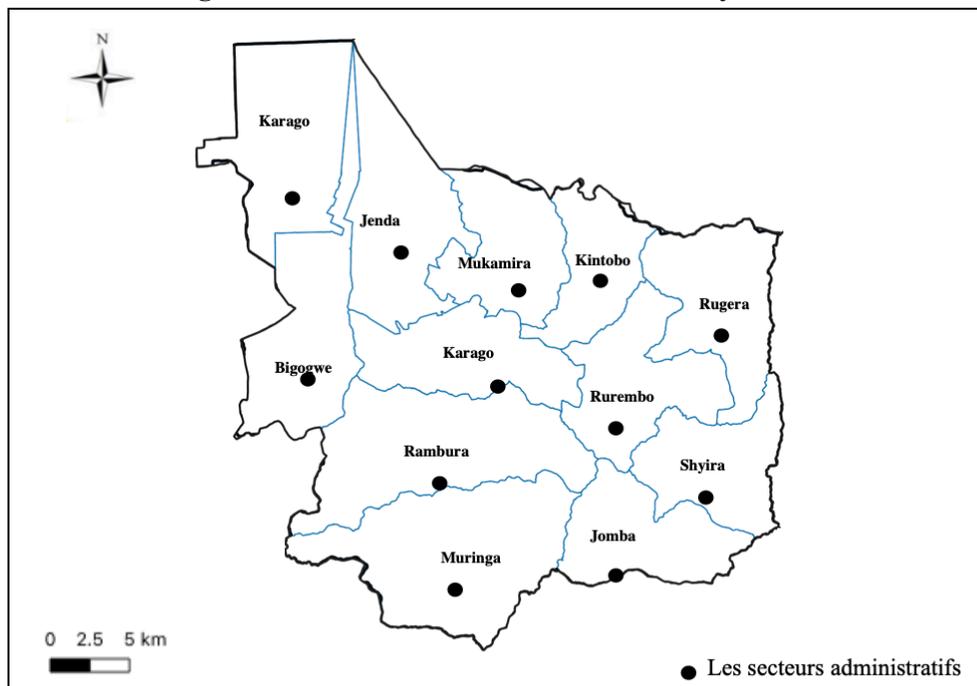
Chapitre 3 - Modification de la couverture végétale en relation avec les activités humaines à l'échelle locale : district de Nyabihu

3.1 - Données et méthodes d'analyse au district de Nyabihu dans le secteur Mukamira

3.1.1 - Impacts de la variabilité et du changement climatique

Le secteur agricole est le moteur de développement économique pour le Rwanda. Le district de Nyabihu, situé dans la province de l'ouest, abrite une population 100% rurale pour certains secteurs, ce qui montre la vulnérabilité des terres agricoles face au changement climatique. Ainsi, nous allons nous centrer sur deux cellules : Kanyové et Rungeri qui se trouve dans le secteur de Mukamira [voir fig.30].

Figure 30 : Les districts administratifs de Nyabihu



Source : QGIS

Réalisation : Grondin, 2022

Le changement climatique a un impact croissant sur les rendements agricoles. L'agriculture est dominée par les petits exploitants et l'agriculture de subsistance dépend des précipitations. Les populations rurales de la région de Nyabihu sont particulièrement vulnérables aux aléas climatiques menacés par les impacts résultant du changement climatique. L'intensité des précipitations est l'un des facteurs les plus forts pour les occurrences de glissement de terrain (Wood, Harrison, Turkington & Reinhardt, 2016 ; Hidalgo, Vega & Obando, 2017 ; Augusto, Vega & Obando, 2018). Étant donné la contrainte des terres au Rwanda, la dégradation des terres représente une menace pour la performance du secteur agricole. Les données pluviométriques annuelles moyennes pour le district de Nyabihu seront collectées à l'aide des données météorologiques de l'Agence météorologique du Rwanda : les stations de Rugera et Rwankeri.

En effet, ces stations nous permettent de constater des anomalies. On observe que les années 2018 à 2021, les cellules Kanyové et Rungeri sont touchées par des fortes pluies qui entraînent des glissements de terrain. La Figure 19, nous montre que les jours de pluie ont significativement augmenté pendant ces périodes. L'indice de Nicholson indique des années très humides pour la station Rwankeri.

Photographie 1 : cellule Rungeri, village de Rutovu



Clichés Grondin, 2022

De plus, les terres agricoles ont été inondées et les agriculteurs de cette cellule ne pouvaient plus produire de nourriture autosuffisante pour subvenir à leurs besoins. Les rizières qui dominent le paysage nous montrent désormais des terres dégradées par des précipitations excessives [voir photo.1]. L'irrégularité imprévisible des précipitations a provoqué d'importants dommages économiques, environnementaux, sociaux et avec des conséquences sur la sécurité alimentaire. En

effet, le champ de pommes de terre sur la photographie 2, nous montre un espace inondé et inutilisable.

Photographie 2 : cellule Rungeri, village de Rutovu



Clichés Grondin, 2022

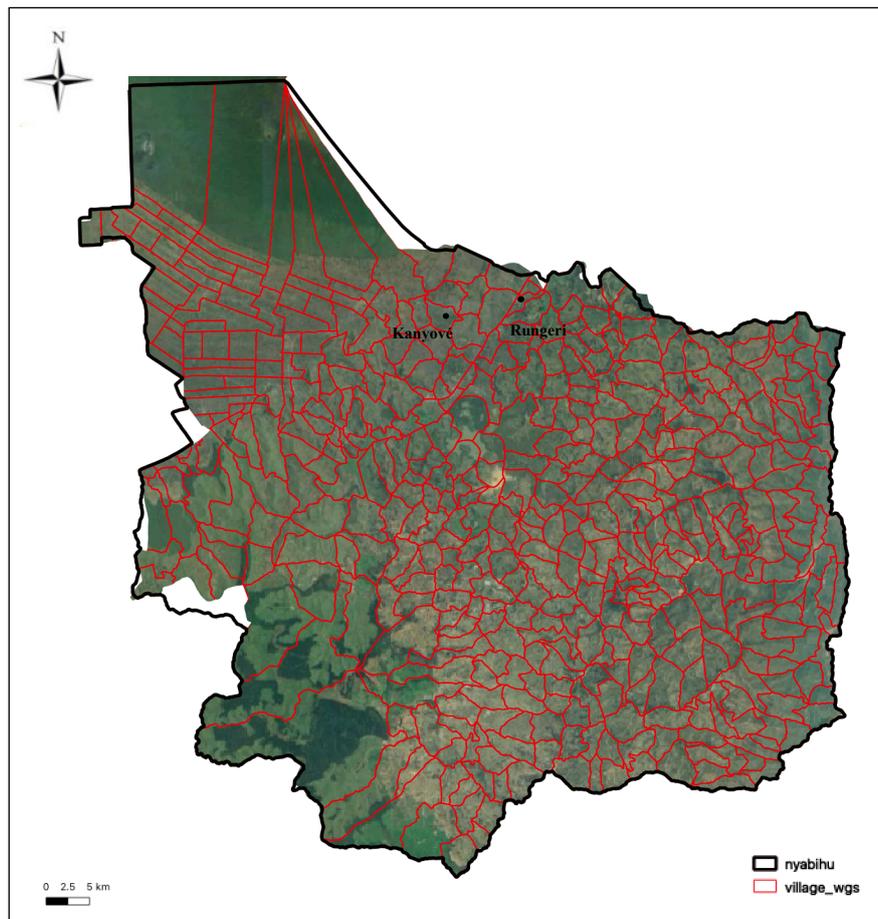
De même, les conséquences immédiates observées comprennent le déplacement des maisons. Par exemple, sur la photographie 1 avant les pluies torrentielles qui s'y sont abattues, deux autres maisons s'y trouvaient. Des dommages ont été observés sur ses propriétés telles que les maisons, les infrastructures et les terres cultivées [voir photo.3]. Les changements de température, de précipitations et de vents causent des dommages directs aux cultures ainsi que des perturbations dans les activités humaines.

Photographie 3 : cellule Rungeri, village de Rutovu



Clichés Grondin, 2022

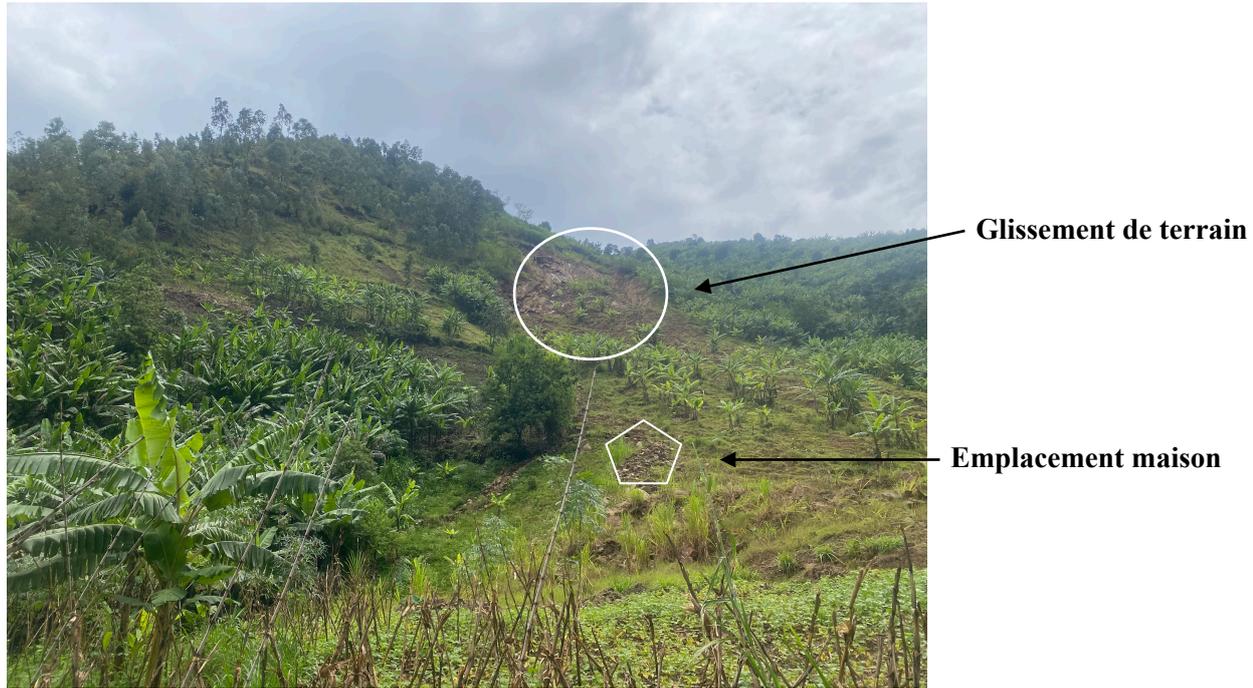
Figure 31 : Localisation des cellules Rungeri et Kanyové



Source : QGIS
Réalisation : Grondin, 2022

Contrairement, au village Rutovu, le village Kanyové est exposé aux glissements de terrain comme on peut l'observer sur la photographie 4. Ces zones sont dominées par des pentes raides très sujettes aux glissements de terrain, qui engendrent des pertes agricoles, l'érosion des sols et la dégradation de l'environnement. D'autre part, les plantations de bananes ont été durement touchées par des glissements de terrain et des précipitations excessives ces dernières années. Les maisons ont dû être déplacées afin qu'elles ne soient plus touchées par le glissement de terrain. Selon le chef du village, plusieurs champs de bananes à flanc de colline ont été réduits au fil des ans. Ces catastrophes sont souvent causées par les changements climatiques.

Photographie 4 : Glissement de terrain au village Kanyové



Clichés : Grondin, 2022

Les maisons aux toits bleus ont dû être déplacées car elles étaient sujettes aux glissements de terrain. Les plantations de bananes cèdent désormais la place à la canne à sucre au bord d'un lac asséché [voir photo.5].

Photographie 5 : Secteur de Mukamira



Clichés : Grondin, 2022

La cellule Rungeri a déjà vu le déménagement de trois maisons, et trente-sept autres déménageront prochainement. La cellule de Kanyove a vu 10 maisons démolies par des glissements de terrain. Ces catastrophes sont souvent causées par les changements climatiques.

Par conséquent, la configuration des terres est le principal facteur limitant la production au Rwanda, mais ces facteurs continueront d'être présents avec les changements dans les précipitations (annuelles et saisonnières ainsi que la sécheresse) et les niveaux actuels de variabilité. L'économie est donc fortement dépendante de l'agriculture. Mais la pression démographique a dégradé l'écosystème et la productivité des terres serait en déclin. Les principales cultures cultivées dans la région sont les haricots, les pommes de terre irlandaises et le maïs. Ainsi, l'érosion des sols, associée à une mauvaise conservation des sols et de l'eau et à des pratiques d'utilisation des terres, sont les principaux contributeurs à la dégradation des terres et à la réduction de la productivité agricole dans la région de Nyabihu.

3. 2 - L'évolution de l'occupation des sols entre 1995, 2015 et 2021

3.2.1 - Validation des classifications des images LANDSAT

Le résultat des classifications des images LANDSAT permet de distinguer 9 classes d'occupation des sols [cf. tableau 6, 7 et 8]. Ainsi, pour les classifications des images de 1995, 2015 et 2021, le coefficient kappa était de 96,2% (96,8% précisions globales), 92,9% (94,5% précisions globales) et 93,8% (95% précisions globales). Cependant, la confusion entre certaines classes est présente.

Tableau 6 : Matrice de confusion classification image LANDSAT 1995

Classes	Agriculture Perennial	Agriculture Seasonal	Dense Forest	Open Areas or Grass	Sparse Forest	Water	Wetlands	Clouds	Shadows
Agriculture Perennial	69	0	0	3	0	0	0	0	0
Agriculture Perennial	0	154	0	0	0	0	0	0	0
Dense Forest	0	0	152	0	0	0	0	0	2
Open Areas or Grass	0	0	0	95	15	0	0	0	0
Sparse Forest	0	0	0	0	72	0	0	0	0
Water	0	0	0	0	0	42	0	0	0
Wetlands	0	0	0	0	0	0	8	0	1
Clouds	0	0	0	0	0	0	0	30	0
Shadows	0	0	0	0	0	0	0	0	20
Total	69	154	152	98	87	42	8	30	23

Tableau 7 : Matrice de confusion classification image LANDSAT 2015

Classes	Agriculture Perennial	Agriculture Seasonal	Dense Forest	Open Areas or Grass	Sparse Forest	Water	Wetlands	Clouds	Shadows
Agriculture Perennial	30	0	0	0	0	0	0	0	0
Agriculture Seasonal	0	180	1	0	1	0	0	0	0
Dense Forest	0	0	90	0	3	0	0	0	27
Open Areas or Grass	0	0	0	168	0	0	0	0	0
Sparse Forest	0	0	0	0	20	0	0	0	0
Water	0	0	0	0	0	30	0	0	0
Wetlands	0	0	0	0	0	0	9	0	0
Clouds	0	0	0	0	0	0	0	16	0
Shadows	0	0	0	0	0	0	0	0	4
Total	30	180	91	168	24	30	9	16	31

Source : Textout Multispec
Réalisation : Grondin, 2022

Tableau 8 : Matrice de confusion classification image LANDSAT 2021

Classes	Agriculture Perennial	Agriculture Seasonal	Dense Forest	Open Areas or Grass	Sparse Forest	Water	Wetlands	Clouds	Shadows
Agriculture Perennial	54	0	0	0	2	0	0	0	0
Agriculture Seasonal	0	66	0	0	15	0	0	0	0
Dense Forest	0	0	36	0	0	0	0	0	0
Open Areas or Grass	2	0	0	178	2	0	0	0	0
Sparse Forest	0	5	0	0	85	0	0	0	0
Water	0	0	0	0	0	36	0	0	0
Wetlands	0	0	0	0	0	0	16	0	0
Clouds	0	0	0	0	0	0	0	9	0
Shadows	0	0	0	0	0	0	0	0	15
Total	56	71	36	178	104	36	16	9	15

Source : Textout Multispec
Réalisation : Grondin, 2022

Les coefficients kappa se diminuent au fur et à mesure qu'on évolue dans le temps. En effet, on remarque que la classification de 1995 présente, moins de classes confuses dans la matrice de confusion [cf. tableau 6] que les deux autres classifications [cf. tableau 7 et 8].

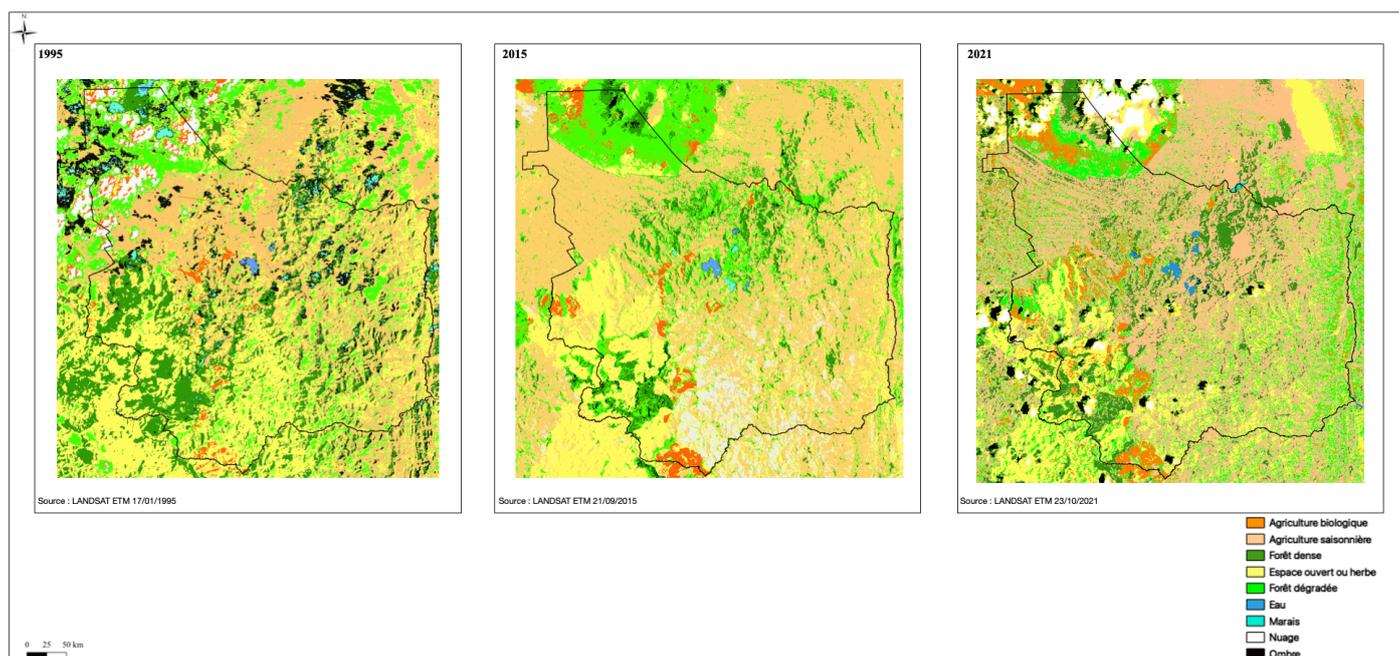
3.2.1.2 - Dynamique d'occupation des sols dans le district de Nyabihu

La région est victime d'une mauvaise gestion des ressources naturelles. Elle est régulièrement dévastée par des glissements de terrain. Un phénomène qui, avec la modernisation galopante, touche aussi les zones rurales les plus reculées. La forte densité rurale entraîne progressivement la dégradation de l'environnement et l'épuisement des ressources naturelles. Le poids démographique, l'intensification de la production agricole sont d'autres sources de menaces qui s'ajoutent aux variations climatiques et accentuent la fragilité de ces espaces agricoles (B. Doukpolo, 2014).

Ainsi, cinq types de milieux naturels et/ou aménagés sont représentés sur la carte : l'agriculture biologique, l'agriculture saisonnière, l'espace ouvert ou en herbe, la forêt dégradée et la forêt dense. On tient ici à distinguer l'agriculture biologique et celle dite saisonnière. L'agriculture biologique est un mode de production qui utilise des pratiques agricoles et d'élevage respectueuses de l'équilibre de la nature. L'agriculture pluviale est une agriculture qui dépend entièrement des précipitations pour l'approvisionnement en eau. Au cours de la période, on constate de plus en plus de surface de type biologique [voir fig.32]. De plus, les changements les plus notables dans la couverture du sol entre 1995 et 2021 résident dans la perte de l'agriculture saisonnière. En revanche, entre 1995 et 2021, les forêts denses ont augmenté. Enfin, les changements les plus notables dans la couverture du sol entre 1995 et 2021 résident dans la perte de l'agriculture saisonnière [voir tab.9].

Le district de Nyabihu a connu une croissance démographique rapide au cours des deux dernières décennies, en grande partie à cause du génocide de 1994. En conséquence, la colonisation a empiété sur les zones de ressources naturelles et le schéma traditionnel d'utilisation des terres du district a été remis en question.

Figure 32 : Carte d'occupation des sols au district de Nyabihu au Rwanda sur la période de 1995, 2015, 2021



Source : Multispec

Réalisation : Grondin, 2022

Tableau 9 : Occupation des sols et taux d'évolution au district de Nyabihu entre 1995 et 2021

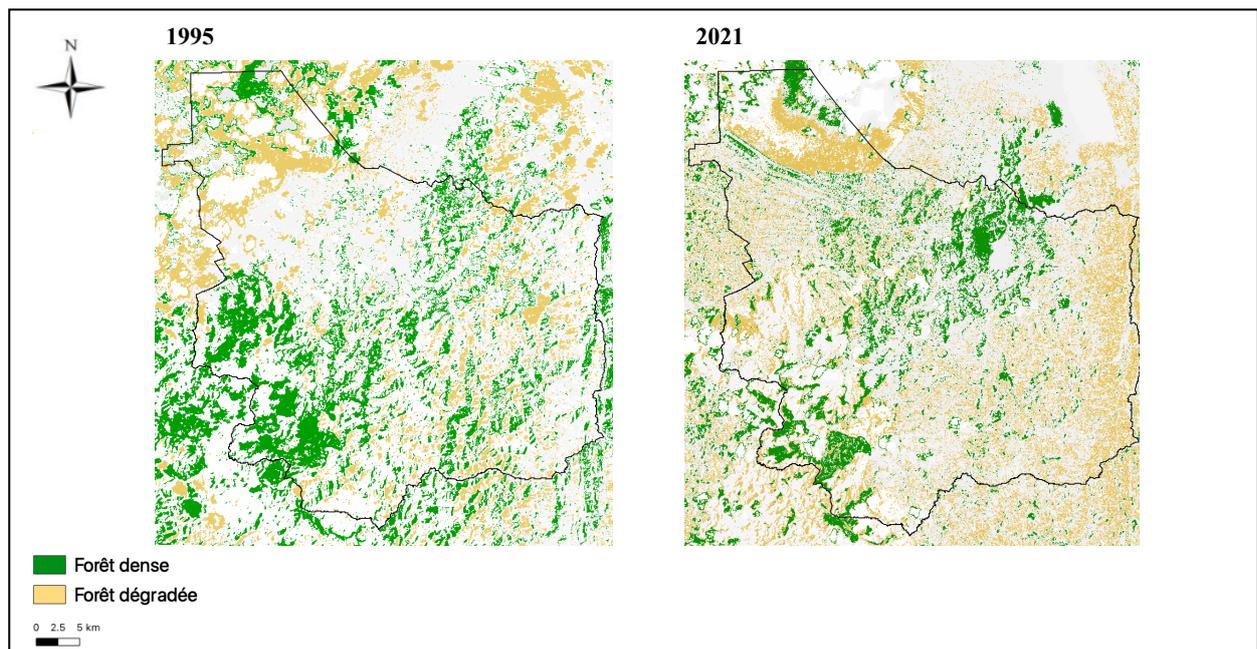
Classes	1995		2015		2021		Changement %	
	Ha	%	Ha	%	Ha	%	1995-2015	2015-2021
Agriculture Perennial	1,854.5	1,78	2,553.570	2,39	8,248.320	6,94	0,61	4,55
Agriculture Seasonal	32,983.1	31,65	51,476.940	48,27	49,932.000	42,04	16,62	-6,23
Dense Forest	17,812.7	17,09	6,652.170	6,23	12,727.800	10,71	-10,86	4,48
Open Areas or Grass	29,082.8	27,91	20,322.450	19,05	19,037.250	16,03	-8,86	-3,02
Sparse Forest	13,769.5	13,21	20,242.260	18,98	24,273.990	20,44	5,77	1,46
Water	107.6	0,10	133.020	0,12	272.790	0,23	0,02	0,11
Wetlands	1,073.9	1,03	90.900	0,08	51.030	0,04	-0,95	-0,04
Clouds	2,538.5	2,44	4,841.100	4,54	2,694.510	2,26	-2,1	-2,28
Shadows	4,977.4	4,78	316.440	0,29	1,509.840	1,27	-4,49	0,98
Total	104,199.8	100	106,628.85	100	118,747.53 0	100		

Source : Textout Multispec

Réalisation : Grondin, 2022

Enfin, lorsque nous comparons l’image LANDSAT 1995 et 2021, nous constatons que la forêt dégradée s’est répandue dans le secteur Shiya, Rugera, Kintobo, Rurembo, Kabatwa, ainsi qu’au sommet du volcan Karisimbi à Jenda. À l’inverse, les surfaces de forêts denses se sont vues diminuées dans le secteur Rambura et Bigogwe. On observe également dans le secteur Mukamira, Jenda, et Kintobo, que la forêt dense, au contraire a augmenté.

Figure 33 : Carte des dégradations de forêts au district de Nyabihu sur la période de 1995 et 2021



Source : Multispec
Réalisation : Grondin, 2022

3.3 - Posture des différents acteurs sur la question du changement climatique

3.3.1 - Les solutions adoptées

Les populations rurales dans la province de l’ouest du Rwanda sont particulièrement exposées aux aléas climatiques et menacées par les effets attendus du changement climatique. Dans ce contexte, comprendre et anticiper les fluctuations climatiques ainsi que leurs conséquences sur l’agriculture constituent des enjeux majeurs pour le développement économique et la sécurité alimentaire (A. Bourque, 2000).

L’interrogation de plusieurs acteurs, notamment en météorologie, nous montre à quel point il est nécessaire de voir dans quelle mesure la science météorologique peut être utilisée de façon opérationnelle pour prévenir aux besoins des agriculteurs. Ainsi, il s’agit d’injecter l’information

météorologique ou climatologique appropriée de façon à ce que l'information agrométéorologique résultante soit formulée dans le langage du paysan (DNM, 2008). La sensibilisation des agriculteurs se fait par le biais d'ateliers, de formations, de réunions, des médias et lors de la diffusion des prévisions saisonnières. Après un échange avec Monsieur Murenzi Hervé, agrométéorologue, tous les 10 jours, ils diffusent le bulletin agrométéorologique qui informe les agriculteurs sur les mesures à prendre et tous les mois, ils produisent le bulletin de suivi des cultures pour mettre en évidence l'état des cultures. La connaissance des indices agroclimatiques est donc essentielle pour prévoir les chocs du changement climatique sur l'agriculture.

Les changements climatiques ont des impacts sur les ressources en eaux de surface et souterraine. D'après Monsieur Bungingo Davis, responsable de la division de la gestion des inondations et du développement du stockage de l'eau au Rwanda Water Resources Board (RWB), nous ont dit que le climat actuel présente de graves pénuries ou excès pour la gestion de l'eau, en particulier là où la variabilité naturelle est élevée. En effet, une liste des principales infrastructures affectées par les fortes pluies de la nuit du 16 au 17 mars 2020 a été observée dans la ville de Kigali. Cependant, il existe des mesures d'atténuation qui peuvent réduire le risque d'inondation, tel que les digues de protection des rivières, l'herbe à éléphant, etc. Pour les habitants des zones agricoles, les fortes pluies peuvent être associées à des inondations et surtout des coulées de boue, mais l'herbe à éléphant est une solution pour contrôler les coulées de boue.

Les exemples d'impacts du changement climatique sur l'agriculture abondent : saisonnalité irrégulière, des précipitations changeant dans le temps ou dans la distribution, événements extrêmes, changements de température dans les dates de récolte, ravageurs plus actifs, etc. Mais nous essayons maintenant de comprendre comment l'agriculture (et l'utilisation plus large des terres, y compris la foresterie) peut être l'une des solutions au changement climatique, car le potentiel de séquestration du carbone dans le sol et la végétation et certaines pratiques telles que l'utilisation intensive modifiée d'engrais synthétiques pourraient être réduites les émissions agricoles.

Ainsi, de nombreuses options pour minimiser les impacts probables des inondations et la planification d'infrastructures résistantes aux inondations sont progressivement mises en place. D'autres organismes comme la Société de Conservation du Rift Albertin (ARCOS) ont des projets pour renforcer la résilience au changement climatique et des moyens de subsistance durables dans les agro-écosystèmes du Rwanda. En effet, le projet d'agroforesterie vise à atténuer les impacts de la dégradation des terres, des agro-écosystèmes et les risques liés au changement climatique. Les arbres contribuent à la protection du sol, augmentent la fertilité du sol, et aident à la filtration d'eau.

Photographie 6 : Glissement de terrain au bord de route, district de Musanze



Clichés : Grondin, 2022

Sur cette photo, on observe un glissement de terrain dû aux fortes précipitations. Avec des eucalyptus en arrière-plan, nous avons vu que le glissement de terrain s'était arrêté. Dès lors, la végétalisation de ces pentes abruptes par des espèces adéquates représente donc une solution intéressante pour la lutte contre les glissements de terrain. Il convient de mentionner que les espèces plantées, principalement en agroforesterie compte aussi l'eucalyptus.

ARCOS fournit également des semences certifiées aux agriculteurs pour faire face au changement climatique. Ce sont des exemples concrets où les agriculteurs pratiquent de l'agriculture durable et témoignent ensuite de l'importance des pratiques d'utilisations durables des terres, et avec la recherche de la sécurité alimentaire, les agriculteurs se tournent maintenant vers une utilisation durable des terres, déclare Monsieur Hitimana Janvier, responsable de mandat à ARCOS. Aujourd'hui, grâce à différentes recherches, des cultures résistantes au climat ont été développées, y compris les cultures tolérantes à la sécheresse, en particulier les variétés de maïs (ARCOS, 2020). Les données climatiques aident les agriculteurs à anticiper les fluctuations climatiques par la surveillance du climat et la gestion des cultures.

Des progrès notables ont été réalisés dans le cadre de la prévention et la réduction de la dégradation des sols par le biais de cultures en terrasses. Le renforcement de la résilience au changement climatique et des moyens de subsistance durables est nécessaire dans les agrosystèmes du Rwanda. Le projet établit des tranchées antiérosives et la protection de ses affluents en plantant des arbres agroforestiers indigènes et exotiques est l'initiative ARCOS.

Photographie 7 : Agriculteurs établissant des tranchées anti-érosives en province de l'est



Clichés : ARCOS, 2021

La Société de Conservation du Rift Albertin (ARCOS) a été fondée en 1995 comme la seule organisation régionale de conservation qui se concentre uniquement sur la conservation de la biodiversité du Rift Albertin. Comment procède ARCOS ? Ils posent des questions aux différents agriculteurs pour les sensibiliser le problème « Nous essayons d'ajouter différents engrais, mais nous n'obtenons pas beaucoup de résultats en matière de récoltes », selon un agriculteur. C'est par le biais de la diffusion de ces différents messages d'agriculteurs que travaille la Société ARCOS. Les défis que rencontrent les agriculteurs dans leurs activités agricoles sont divers et variés. Ainsi, les méthodes principales sont l'agroforesterie, où 600 486 arbres ont été plantés sur 2 478 hectares à Bugesera et à Rulindo. Les espèces présentes sont les Ficus, l'Eucalyptus, les Grevillea, etc. L'agroforesterie adopte le système de zéro-pâturage pour le bétail et enseigne les gestes appropriées pour augmenter la production agricole.

Photographie 8 : province du nord à Rulindo



Clichés : ARCOS, 2021

Dans la province du nord à Rulindo, les gestes durables ont été approuvés et appropriés par les habitants du village. En plus de fournir des formations et des conseils sur l'agriculture durable, ARCOS donne aux agriculteurs l'accès à des semences résistantes au climat comme une approche proactive pour renforcer la capacité des agriculteurs à faire face à l'impact du changement climatique.

Photographie 9 : province du Nord à Rulindo



Clichés : ARCOS, 2021

Les femmes jouent également un rôle essentiel en améliorant l'accès à des aliments nutritifs et à d'autres ressources de subsistance. Le rôle des femmes est souvent sous-évalué en comparaison à celui de l'homme, et pourtant les femmes agricultrices au Rwanda sont nombreuses. Les femmes ont depuis toujours joué un rôle crucial dans la vie des exploitations (J. Pelletier, 2007). Ainsi, sensibiliser l'ensemble de la population est bien plus pratique, cela est à la fois bénéfique à l'environnement, mais surtout aux populations rurales qui luttent contre les changements climatiques.

L'agriculture est liée au changement climatique de trois manières. Elle participe au réchauffement climatique, elle en subit les conséquences et elle offre des solutions permettant de s'adapter à ce changement et de l'atténuer. Pour être plus résilient face aux changements, il est possible de diversifier les cultures est de cultiver de nombreuses variétés. Ainsi si une des variétés est attaquée par un ravageur par exemple, d'autres cultures peuvent compenser les pertes associées. L'agriculture doit évoluer en utilisant des solutions basées sur la nature afin de s'adapter et d'atténuer les changements climatiques tout en assurant l'alimentation des 9 milliards d'habitants que la terre comptera en 2050. Une stratégie pour résoudre les problèmes environnementaux et spatiaux du Rwanda nécessite une action concertée de tous les secteurs, y compris le gouvernement, le secteur privé et la société civile.

Enfin, l'éducation joue également un rôle crucial pour préparer les jeunes aux défis qui les attendent. Par conséquent, nous devons fournir aux gens les informations, les idées et les compétences pratiques dont ils ont besoin pour comprendre la biodiversité. Les jeunes sont l'avenir de notre planète : « Il ne peut y avoir de plus bel héritage que de donner aux jeunes les outils dont ils ont besoin pour sauver notre planète », de Sir David Attenborough. De plus, la pousse de l'avocatier sur la photo a été révélée comme fruit résistant en cas de sécheresse [voir photo.10]. Cela peut donc inclure, par exemple, des investissements dans d'autres cultures plus résistantes à la sécheresse.

Photographie 10 : La province du nord à Musanze



Clichés : Grondin, 2022

Conclusion et discussion

La science ne fait pas concurrence au changement climatique. Les deux font partie du système naturel et travailler ensemble peut produire des avantages pour la société dans son ensemble. Cependant, la question que nous devons nous poser maintenant est la suivante : comment faire face à cette réalité ? Comment la science peut-elle nous aider à prendre les meilleures décisions pour aller de l'avant ? Des outils comme l'indice de végétation ont été utilisés afin de voir les dates de démarrage des pluies. L'indice de végétation est considéré comme l'indicateur climatique le plus important pour les agriculteurs puisqu'il conditionne la date de semis des cultures. En l'absence d'information ou de prévision de la date de démarrage des pluies, les agriculteurs prennent ainsi le risque de perdre leurs semences si cette première pluie est provoquée par un événement isolé et se trouve suivie d'un épisode sec de plus de 7 jours après le semis (B. Sultan. et al., 2021). Si les agriculteurs connaissent à l'avance la date de début, ils peuvent non seulement réduire les pertes de semences et le temps de travail associé aux échecs de plantation, mais peuvent également augmenter les rendements en alignant mieux les cycles de culture sur la saison des pluies.

Les pratiques agricoles doivent être repensées pour permettre de mieux appréhender et de faire face aux effets pervers des changements climatiques (S. Bianco, 2018). La zone observée est une bonne illustration des aléas climatiques qui entraînent des inondations, des glissements de terrain, des pertes humaines, des déplacements de personnes, des dommages aux infrastructures (routes et bâtiments). Force est de constater que le district Nyabihu est victime d'une mauvaise gestion des ressources naturelles. L'impact de ces changements sur l'agriculture impose des contraintes supplémentaires aux systèmes de production déjà vulnérables au changement climatique actuel et confronté à une croissance démographique rapide. Ce sont les systèmes agricoles riches en biodiversité et en biomasse qui faciliteront la contribution de l'agriculture et de la foresterie à l'atténuation du changement climatique grâce à la séquestration du carbone.

L'agro-écologie a été et reste souvent de nos jours absente de l'enseignement agricole. On doit sans doute incriminer aussi l'absence de référence à l'agro-écologie dans la majorité des politiques publiques (P. Roudier. Et al., 2019). L'examen (tardif) de l'agriculture par l'organe officiel de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques a-t-il changé de cap depuis la COP 23 (CCNUCC, 2021) ?

L'agro-écologie est rarement citée au Rwanda mais ce sont des pratiques qui sont historiquement employées pour résoudre les aléas climatiques (agriculture biologique).

Il est évident que les changements climatiques sont devenus un problème mondial. Elle constitue une menace pour le bien-être humain, les ressources naturelles et la stabilité économique. La prise de conscience accrue du problème et de ses conséquences a conduit à mettre davantage l'accent sur les stratégies d'adaptation et d'atténuation. Pour conclure, il faut améliorer le secteur agro-alimentaire et créer des variétés plus productives mais aussi résistantes. Il faut trouver un équilibre entre le désir de qualité et le désir de performance. Mais si les producteurs sont payés pour la quantité plutôt que pour la qualité, comment équilibrer cela ?

Références bibliographiques

Ayabagabo, P., 2016. « Analyse empirique des précipitations saisonnières et ses effets associés sur les majeurs rendements des cultures alimentaires au Rwanda ». P.1-116. https://www.meteorwanda.gov.rw/fileadmin/user_upload/Ayabagabo_Empirical_Analysis_Of_Seasonal_Rainfall_Variability_And_Its_Associated_Effects_On_Major_Food_Crop_Yields_In_Rwanda.pdf

Alemayehu.A., Benitez.P., 2020. « Gestion des eaux pluviales : les inondations à Kigali montrent la nécessité d'une planification et d'une rénovation urbaines intégrées ». Banque Mondiale. <https://blogs.worldbank.org/fr/nasikiliza/gestion-des-eaux-pluviales-les-inondations-kigali-montrent-la-necessite-dune>

AFP, AP., 2006. « *Les inondations font plus de 200 morts en Ethiopie* ». International. <https://www.lefigaro.fr/international/2006/08/07/01003-20060807ARTWWW90303>
[les_inondations_font_des_certaines_de_morts_en_ethiopie.php](https://www.lefigaro.fr/international/2006/08/07/01003-20060807ARTWWW90303)

Alemayehu.A., Benitez.P., 2020. « Gestion des eaux pluviales : les inondations à Kigali montrent la nécessité d'une planification et d'une rénovation urbaines intégrées ». Banque Mondiale. <https://blogs.worldbank.org/fr/nasikiliza/gestion-des-eaux-pluviales-les-inondations-kigali-montrent-la-necessite-dune>

Boussougou.G., 2017. « Vulnérabilité des paysages forestiers en relation avec les activités humaines et la variabilité climatique en Tanzanie ». P1-202.

Browne, S et al.2011. « Activité de zonage des moyens d'existence au Rwanda ». Rapport spécial du réseau de système d'alerte précoce (FEWS NET). P. 1-55. https://fews.net/sites/default/files/documents/reports/rw_livelihooddescriptions_FR.pdf

Bahimba and Bishenyi Wetlands ». University of Rwanda. P.1-86. http://dr.ur.ac.rw/bitstream/handle/123456789/472/Final%20Thesis%20MA_LIBRARY%20DEPOSIT%2010.08.2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Blavignat. Y., AFP agence., 2020. « *Une invasion historique de criquets pèlerins menace la sécurité alimentaire en Afrique de l'Est* ». International. <https://www.lefigaro.fr/international/une-invasion-historique-de-criquets-pelerins-menace-la-securite-alimentaire-en-afrique-de-l-est-20200211>

Bronkhorst. S., 2012. « *Rareté de ressources et conflit entre pasteurs et agriculteurs au Sud-Kordofan, Soudan* ». Openédition Journals. P. 111-132. <https://journals.openedition.org/conflits/18589>

Cournil. C., Mazzega. P., 2007. « *Réflexions prospectives sur une protection juridique des réfugiés écologiques* ». Openedition Journals. P. 1-27. file:///Users/morgane/Downloads/remi-3541.pdf

Cournil .C., 2018. « *Les réfugiés écologiques. Quelle(s) protection(s), quel(s) statut(s) ?* ». Hal archives-ouvertes. P.1-33. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01096664/document>

Cournil. C., 2009. « *L'émergence d'un droit pour les personnes déplacées internes* ». Persée. P. 1-25. https://www.persee.fr/doc/rqdi_0828-9999_2009_num_22_1_1154

Chemillier-Gendreau. M., 2006. « *Faut-il un statut international de réfugié écologique ?* ». Persée. P.446-452. https://www.persee.fr/doc/reden_1283-8446_2006_num_10_4_1905

Cournil. C., 2010. « *Les "réfugiés environnementaux" : enjeux et questionnements autour d'une catégorie émergente* ». Cairn. P.67-79. <https://www.cairn.info/revue-migrations-societe-2010-2-page-67.htm>

Cournil. C., 2018. « *Les défis du droit international pour protéger les "réfugiés climatiques" : réflexions sur les pistes actuellement proposées* ». Hal archives-ouvertes. 18p. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01096672/document>

Cambrézy. L., Lassailly-Jacob.V., 2011. « *Réfugiés climatiques, migrants environnementaux ou déplacés ?* ». Revue Européenne des migrations internationales. P.203-205. https://journals.openedition.org/remi/5495#xd_co_f=ZDQyZjk3OGEtM2RmYy00ODk1LWlZyJMtN2QzOTA1YmIwNmM0~

Chauvet, A., 2014. « *Kenya : Le changement climatique pourrait assoiffé le pays* ». <https://www.20minutes.fr/planete/1494699-20141204-kenya-changement-climatique-pourrait-assoiffer-pays>

« *Changement climatique : la jeunesse africaine mobilisée* », Le Point Afrique. https://www.lepoint.fr/afrique/changement-climatique-la-jeunesse-africaine-mobilisee-20-09-2019-2336913_3826.php

Cometti, G., 2011. « *Réchauffement climatique et migration forcées : le cas de Tuvalu* ».

Douet. M., 2019. « *Au Kenya, la sécheresse et la faim frappent le nord du pays* ». Le monde Afrique. https://www.lemonde.fr/afrique/article/2019/04/10/au-kenya-la-secheresse-et-la-faim-frappent-le-nord-du-pays_5448208_3212.html

Diop.E.S., et al. 2001. « *Incidences de l'évolution du climat dans les régions : évaluation de la vulnérabilité* ». GIEC. P1-62. <https://archive.ipcc.ch/ipccreports/sres/regional/pdf/africa.pdf>

- Exbalin, J., 2014. « *Le réchauffement climatique et ses impacts* ». L'Harmattan, 292 p.
- Faye.L., Dembele.S., et Alagbe.L., « L'agroforesterie, une pratique viable dans l'adaptation aux changements climatiques en Afrique de l'Ouest ». https://www.sifee.org/static/uploaded/Files/ressources/actes-des-colloques/niamey/simultanee-7/3_ADESSOU_comm.pdf
- Gascon.T., 2017. « Impact de la résolution spatiale et temporelle des entrées pluviométriques pour la modélisation hydrologique en Afrique de l'Ouest et implication dans l'utilisation des produits satellitaires : Etude de cas sur le Bassin de l'Ouémé au Bénin ». Hal open science. P.1-240. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01633466/document>
- Gwladys. J., 2019. « *Tanzanie : les inondations ont coûté 100 millions à Dar es Salaam en 2018* ». Public agence ecofin. <https://www.agenceecofin.com/economie/0410-69822-tanzanie-les-inondations-ont-coute-100-millions-a-dar-es-salaam-en-2018>
- Goodwin-Gill. G-S., McAdam. J., 2017. « *L'UNHCR et le changement climatique et les déplacements humains* ». L'Agence des Nations Unies pour les réfugiés. P. 1-40. <https://www.unhcr.org/fr/5a8d47d04.pdf>
- Guterres. A., 2008. « *Changements climatiques, catastrophes naturelles et déplacement humain : une perspective du HCR* ». Haut Commissariat des Nations Unies pour les réfugiés. P.1-12. <https://www.unhcr.org/fr/4b151c14e.pdf>
- Houssou-Goe, S.,2008. « Agriculture et changements climatiques au Bénin : Risques climatiques, vulnérabilité et stratégies d'adaptation des populations rurales du département du Couffo ». UAC. P.1-160. <https://idl-bnc-idrc.dspacedirect.org/bitstream/handle/10625/44965/IDL-44965.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Hochet-Bodin, N., 2020. « *Éthiopie: le nord du pays victime du changement climatique* », Reportage Afrique. <https://www.rfi.fr/fr/podcasts/reportage-afrique/20201213-%C3%A9thiopie-le-nord-du-pays-victime-du-changement-climatique>
- Helland, J., 2007, « *Régime foncier pastoral en Éthiopie* », Openedition Journals. <https://journals.openedition.org/vertigo/1427>
- IDMC., 2019. « *Rapport mondial sur le déplacement interne 2019* ». <https://www.internal-displacement.org/global-report/grid2019/french.html>
- Jaurès, J., 2015. « *L'atlas de la révolution climatique* ». Humanité, 162 p.
- Koité, M., 2008. « *Changement climatique : Le levier de l'information météorologique* », Afribone. <https://www.afribone.com/changement-climatique-le-levier-de-linformation-meteorologique/>

Kasuku. A., 2018. « *Le Kenya fait face à des pluies torrentielles* ». RFI. <https://www.rfi.fr/fr/afrique/20180507-reportage-le-kenya-fait-face-inondations>

Lecerf.R., 2008. « Suivi des changements d'occupation et d'utilisation des sols d'origine anthropique et climatique à l'échelle régionale par télédétection moyenne résolution ». Hal open science. P.1-327. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00337099/file/theseLecerf.pdf>

Legous, L., 2010. « *Les migrants climatiques et l'accueil des réfugiés en France et en Europe* ». <https://www.cairn.info/revue-tiers-monde-2010-4-page-55.htm>

Lavergne, M., 2010. « *Le réchauffement climatique à l'origine de la crise du Darfour ?* », Cairn. <https://www.cairn.info/revue-tiers-monde-2010-4-page-69.htm>

« *Les migrations internes vont-elles recomposer l'Afrique?* ». 2021,. Diplomatie humanitaire et gestion des crises internationales. <https://diplomatie-humanitaire.org/les-migrations-internees-vont-elles-recomposer-lafrique/>

Lemoalle. J. « *Chapitre 5. Les caractéristiques physiques et chimiques* ». Openedition Books. P. 53-68. <https://books.openedition.org/irdeditions/27267?lang=fr#illustrations>

Mballo.I., Sy.O., Barry.B., 2021. « Vulnérabilités et stratégies d'adaptation des paysans face aux changements socio-environnementaux en Haute Casamance (Sud-Sénégal) ». OpenEdition. P. <https://journals.openedition.org/belgeo/48429>

Ministère de l'Agriculture et des ressources animales, 2018. « Plan stratégique pour la transformation agricole 2018-2024 ». https://www.minagri.gov.rw/fileadmin/user_upload/Minagri/Publications/Politiques_and_strategies/PSTA_4_-_French_Version.pdf

Ministère des terres et de l'environnement, des forêts, de l'eau et des mines.République du Rwanda., 2006. « PANA-Rwanda ». PNUE. P1.-89. <https://unfccc.int/resource/docs/napa/rwa01f.pdf>

Malm, A., 2017. « *L'anthropocène contre l'histoire* ». La fabrique Eds, 242 p. Durand, F., 2020. « *Le réchauffement climatique : enjeu crucial du XXIe siècle* ». Ellipses, 192 p.

Mérenne-Schoumaker, B., 2020. « *Les migrations environnementales : un nouvel objet d'enseignement* », Géoconfluences. <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/informations-scientifiques/dossiers-thematiques/changement-global/articles-scientifiques/migrations-environnementales>

Moorhead et al. 2007. « *Gestion du risque climatique en Afrique : ce que la pratique nous enseigne* ». International Research Institute for Climate and Society. P.1-117. https://iri.columbia.edu/wp-content/uploads/2013/07/Climate-and-Society-No1_fr_lr.pdf

Nicod. J., Rossi. G., 1979. « *Données nouvelles sur l'hydrologie du lac Victoria* ». Persée. P.459-466. https://www.persee.fr/doc/geo_0003-4010_1979_num_88_488_19886

Ndong, J et. 2015. « *Étude des sécheresses pluviométriques et hydrologiques en Afrique tropicale : caractérisation et cartographie de la sécheresse par indices dans le haut bassin du fleuve Sénégal* ». OpenEdition. P.17-35. <https://journals.openedition.org/physio-geo/4388>

Oxford., 2018. « *Migration forcés* ». Centre d'études sur les réfugiés. P. 1-68. <https://www.fmreview.org/sites/fmr/files/FMRdownloads/fr/Principesdirecteurs20.pdf>

Oxfam., 2017. « *Un climat en crise : comment le changement climatique aggrave la sécheresse et la situation humanitaire en Afrique de l'Est* ». Document d'information médias.

OCHA., 2011. « *Afrique de l'Est : plus de 8 millions de personnes ont besoin d'aide alimentaire* ». ONU Info. <https://news.un.org/fr/story/2011/03/213142-afrique-de-lest-plus-de-8-millions-de-personnes-ont-besoin-daide-alimentaire>

OCHA. 2020. « *Des pluies saisonnières meurtrières au Kenya et en Éthiopie* ». Infos Météo et Climat. <https://www.cycloneoi.com/archives-blog/infos-diverses/des-pluies-saisonniere-meurtrieres-au-kenya-et-en-ethiopie.html>

Penicaud. M., 2017. « *L'adaptation de l'agriculture au changement climatique : quelles échelles territoriales d'action et de planification ?* ». Hal archives-ouvertes. P. 1-73. <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01457088/document>

Piguet et al. 2011. « *Changements climatiques et migrations : quels risques, quelles politiques ?* ». Cairn. P. 86-109. <https://www.cairn.info/revue-l-information-geographique-2011-4-page-86.htm>

Piguet. F., 2006. « *Les migrations internes en Éthiopie : État de la question et perspectives* ». Persée. P.179-218. https://www.persee.fr/doc/ethio_0066-2127_2006_num_22_1_1488

Petitjean. O., 2009. « *Les modèles de développement à l'épreuve de la sécheresse et du climat. L'exemple du Kenya* ». Partage des eaux. <https://www.partagedeseaux.info/Les-modeles-de-developpement-a-l-epreuve-de-la-secheresse-et-du-climat-L>

Paugy. D., Lévêque.C., 2018. « *Le lac Victoria : un écosystème bouleversé par l'homme* ». Édition des archives contemporaines. 282p. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers19-05/010074595.pdf

PAM., FAO., 2001. « *Rapport spécial : mission FAO/PAM d'évaluation des récoltes et des disponibilités alimentaires en Éthiopie* ». http://www.fao.org/3/x9320f/x9320f00.htm#P114_25068

Parker, L et al.2019. « Vulnérabilité du secteur agricole au changement climatique : le développement d'une évaluation pantropicale de la vulnérabilité aux risques climatiques pour éclairer la prise de décision infranationale ». Plos One. https://journals-plos-org.translate.google.com/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0213641&_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=fr&_x_tr_hl=fr&_x_tr_pto=sc

PAM., FAO., 2001. « *Rapport spécial : mission FAO/PAM d'évaluation des récoltes et des disponibilités alimentaires en Éthiopie* ». http://www.fao.org/3/x9320f/x9320f00.htm#P114_25068

Siméoni, P., 2012. « *Le mythe des premiers réfugiés climatiques : mouvements de populations et changements environnementaux aux îles Torrès (Vanouatou, Mélanésie)* ». <https://www-cairn-info.elgebar.univ-reunion.fr/revue-annales-de-geographie-2012-3-page-219.htm>

Servat. É et al. 2021. « *De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne* ». Revue des sciences de l'eau., 26p. <https://www.erudit.org/fr/revues/rseau/1999-v12-n2-rseau3296/705356ar.pdf>

Taithe, A., 2014. « *Le changement climatique dans la région des Grands Lacs* ».

Takouleu. J-M., 2021. « *Kenya : confronté à la sécheresse, l'État va restaurer des terres dans 11 comtés* ». Afrik 21. <https://www.afrik21.africa/kenya-confronte-a-la-secheresse-letat-va-restaurer-des-terres-dans-11-comtes/>

UNFCCC. République du Rwanda. « *Deuxième communication nationale relative à la convention cadre des nations unies sur les changements climatiques* ». P1-200. <https://unfccc.int/resource/docs/natc/rwanc2f.pdf>

Wiggers, P., 2017. *Sécheresse en Afrique de l'Est : « Si la pluie ne vient pas aucun de nous ne survivra »*. <https://www.oxfam.org/fr/secheresse-en-afrique-de-lest-si-la-pluie-ne-vient-pas-aucun-de-nous-ne-survivra>.

Liste des photographies

<i>Photographie 1 : cellule Rungeri, village de Rutovu</i>	<i>62</i>
<i>Photographie 2 : cellule Rungeri, village de Rutovu</i>	<i>63</i>
<i>Photographie 3 : cellule Rungeri, village de Rutovu</i>	<i>63</i>
<i>Photographie 4 : Glissement de terrain au village Kanyové</i>	<i>65</i>
<i>Photographie 5 : Secteur de Mukamira</i>	<i>65</i>
<i>Photographie 6 : Glissement de terrain au bord de route, district de Musanze</i>	<i>72</i>
<i>Photographie 7 : Agriculteurs établissant des tranchées anti-érosives en province de l'est</i>	<i>73</i>
<i>Photographie 8 : province du nord à Rulindo.....</i>	<i>73</i>
<i>Photographie 9 : province du nord à Rulindo. Clichés ARCOS, 2021.....</i>	<i>74</i>
<i>Photographie 10 : province du nord à Musanze</i>	<i>75</i>

Liste des figures

<i>Figure 1 : Les précipitations mensuelles annuelles à Meru de mai à d'octobre sous la période de 2000 à 2020</i>	8
<i>Figure 2 : Les précipitations moyennes annuelles au Rwanda</i>	13
<i>Figure 3 : Carte de localisation du district de Nyabihu et des paysages inondés en mars 2007</i>	15
<i>Figure 4 : Exemple de cartographie du cumul pluie mensuel (mm)</i>	22
<i>Figure 5 : Exemple de cartographie de CHRIPS- Pentad Précipitation entre Mars 2015 et Avril 2015</i>	24
<i>Figure 6 : Exemple de cartographie de NDVI de l'année 2015 au Rwanda</i>	26
<i>Figure 7 : carte d'occupations des sols du Rwanda en 2016</i>	28
<i>Figure 8 : Localisation des stations pluviométriques retenues pour l'étude au Rwanda</i>	29
<i>Figure 9 : Graphique comparant la variabilité des précipitations annuelles à partir des données TRMM et des données in situ des stations principales du Rwanda sur la période de 1981-2021</i>	32
<i>Figure 10 : Spatialisation des précipitations annuelles moyennes du Rwanda calculées à partir des données TRMM sur la 2000-2019</i>	33
<i>Figure 11 : Précipitations moyennes mensuelles du Rwanda estimée à partir des données TRMM sur la période 2000-2021</i>	34
<i>Figure 12 : Cartographie des précipitations interannuelles du Rwanda sur la période de 2000-2021 à partir des données TRMM</i>	36
<i>Figure 13 : Cartographie des précipitations moyennes mensuelles du Rwanda au mois d'avril estimée à partir des données par TRMM</i>	37
<i>Figure 14 : Les précipitations annuelles au Rwanda de 1988-2018, données CHIRPS pour les années 1988, 1998, 2008 et 2018</i>	38
<i>Figure 15 : Cartographie des variations des température moyennes annuelles sur la période 2001-2017 à partir des données Google Earth Engine</i>	40
<i>Figure 16 : Localisation des stations pluviométriques retenues pour l'étude. Le fond de carte est une image LANDSAT 2017 du Rwanda en pseudo-couleur à bande unique</i>	42
<i>Figure 17 : Identification des années sèches et des années humides à partir des stations pluviométriques du Rwanda sur la période 1981-2021</i>	43
<i>Figure 18 : cycle saisonnier des régimes de précipitations moyennes mensuelles du Rwanda sur la période 1981-2021</i>	46
<i>Figure 19 : Variabilité interannuelle du nombre de jours de pluie sur la période 1981-2021 des principales station du Rwanda</i>	47

<i>Figure 20 : Evolution interannuelle des classes d'occupation des sols de NDVI du Rwanda sur la période 2001-2021</i>	49
<i>Figure 21 : Carte moyenne annuelle de NDVI-MODIS du Rwanda sur la période 2001- 2021</i>	50
<i>Figure 22 : Evolution interannuelle des classes d'occupation des sols du district de Nyabihu sur la période de 2001-2021 à partir des données NDVI</i>	52
<i>Figure 23 : Evolution interannuelle des classes d'occupation des sols du district de Nyabihu sur la période de 2001-2021 à partir des données NDVI</i>	52
<i>Figure 24 : Fluctuation interannuelle des classes de végétation NDVI au district de Nyabihu sur la période 2001-2021</i>	53
<i>Figure 25 : La phénologie saisonnière du NDVI-MODIS sur la période 2001-2021 pour la classe nommée X</i>	54
<i>Figure 26 : Dates de débuts et fins de saisons végétatives des classes de NDVI au district de Nyabihu sur la période de 2001-2019</i>	56
<i>Figure 27 : Variation de la durée de saison végétative par classe au district de Nyabihu sur la période 2001-2021</i>	57
<i>Figure 28 : L'analyse des cycles saisonniers de NDVI par classe sur la période 2001-2021 au district de Nyabihu</i>	58
<i>Figure 29 : Comparaison entre les variations saisonnières de NDVI et les pluies mensuelles sur la période de 2001-2021</i>	59
<i>Figure 30 : Les districts administratives de Nyabihu</i>	61
<i>Figure 31 : Localisation des cellules Rungeri et Kanyové</i>	64
<i>Figure 32 : Carte d'occupation des sols au district de Nyabihu au Rwanda sur la période de 1995, 2015, 2021</i>	69
<i>Figure 33 : Carte des dégradations de forêts au district de Nyabihu sur la période de 1995 et 2021</i>	70
<i>Figure 34 : Carte des dégradations de forêts</i>	75

Liste des tableaux

<i>Tableau 1 : Part du secteur agricole dans les pays étudiés</i>	9
<i>Tableau 2 : Taux de croissance démographique dans les secteurs du district de Nyabihu</i>	16
<i>Tableau 3 : Répartition de la population résidente au district de Nyabihu</i>	17
<i>Tableau 4 : Caractéristiques des images LANDSAT ETM+ (Source : https://landsat.usgs.gov/what-are-band-designations-landsat-satellites)</i>	26
<i>Tableau 5 : Récapitulatifs des images satellites de l'étude</i>	27
<i>Tableau 6 : Matrice de confusion classification image LANDSAT 1995</i>	66
<i>Tableau 7 : Matrice de confusion classification image LANDSAT 2015</i>	67
<i>Tableau 8 : Matrice de confusion classification image LANDSAT 2021</i>	67
<i>Tableau 9 : Occupation des sols et taux d'évolution entre 1995 et 2015</i>	65