



OT4LAC KIVU

Évaluation et surveillance des paramètres d'érosion des sols dans le bassin transfrontalier du lac Kivu et de la rivière Ruzizi

Février 2022

Dr Stefanie Feuerstein, Zhiyuan Wang et Dr Felix Bachofer
Centre aérospatial allemand - Centre de données de télédétection allemand (DLR-DFD)
Münchener Str. 20
81241 Wessling, Allemagne



Co-funded by the European Union



giz Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

REMIS PAR:



Sommaire

1	Introduction	5
2	Zone d'étude	6
3	Activité de recherche et modules de travail	7
4	Module de travail 1 : Analyse de la dynamique de la végétation	8
4.1	Analyse de l'indice NDVI.....	8
4.1.1	Données du NDVI de MODIS.....	8
4.1.2	Modifications à long terme de la végétation.....	9
4.1.3	Dynamique saisonnière de la végétation.....	11
4.2	Informations sur la couverture terrestre captées par Copernicus.....	12
4.2.1	Carte de la couverture terrestre mondiale (<i>WorldCover</i>) de l'ESA.....	12
5	Module de travail 2 : Analyse des précipitations	14
5.1	Données CHIRPS version 2.0.....	14
5.2	Somme des précipitations annuelles moyennes.....	15
5.3	Événements de précipitations extrêmes.....	16
6	Analyse du risque d'érosion	17
7	Module de travail 3 : Analyse de la turbidité au lac Kivu	20
7.1	Données.....	21
7.2	Turbidité saisonnière.....	21
8	Comparaison de la carte du risque d'érosion et des simulations selon l'équation RUSLE (<i>Revised Universal Soil Loss Equation</i> - Équation universelle révisée de perte en sols)	24
9	Module de travail 4 : Simulation de la croissance urbaine pour les villes de Goma et Bukavu	26
9.0.1	Introduction au modèle SLEUTH.....	26
9.1	Zones d'étude.....	27
9.2	Données.....	27
9.3	Résultats et discussion.....	29
9.3.1	Agglomération urbaine de Goma en RDC.....	29
9.3.2	Agglomération urbaine de la ville de Goma au Rwanda.....	29
9.3.3	Agglomération urbaine de Bukavu en RDC.....	29
9.3.4	Agglomération urbaine de Bukavu en République du Rwanda.....	30

A Annexe	32
A.1 Module de travail 1 : Dynamique de la végétation.....	33
A.2 Module de travail 2 : Analyse des précipitations.....	37
A.3 Analyse du risque d'érosion	41
A.4 Module de travail 3 : Analyse de la turbidité	45
Bibliographie	49

Résumé analytique

Dans le cadre du projet OT4Lac Kivu, les données d'observation de la terre sont utilisées pour évaluer la capacité à analyser le risque d'érosion du point de vue d'un satellite. Ce projet OT4Lac Kivu complète l'analyse réalisée dans le cadre de *l'étude de base du bassin du lac Kivu et de la rivière Ruzizi* (Sher Consult, 2020) ainsi que des simulations selon le modèle RUSLE réalisées en ce sens. Le travail scientifique du projet OT4Lac Kivu est divisé en quatre modules de travail (MT). Les MT1 et MT2 analysent deux paramètres : la dynamique de la végétation et les événements de précipitations extrêmes. Ces deux paramètres se combinent pour révéler un indicateur de risque d'érosion. Les résultats montrent que dans certaines régions la couverture végétale est faible de saison en saison, comme le montre un indice NDVI faible. Ce constat s'applique particulièrement aux champs agricoles et aux prairies, comme l'a identifié la comparaison du NDVI avec la carte de la couverture terrestre mondiale (*WorldCover*) de l'ESA. Une couverture végétale assez faible caractérise particulièrement la plaine de la Ruzizi et les pentes du sud des volcans au nord de la zone d'étude, là où se situent les principaux champs agricoles.

L'analyse des précipitations n'a pas permis de déterminer un seul mois ni aucune région de point chaud. Cependant, une augmentation du nombre d'événements extrêmes est détectée pour les mois d'avril ou de mai, d'août et de novembre ou décembre la plupart des années. Le rapprochement de la dynamique de la végétation avec les événements de précipitations extrêmes permet d'identifier le risque d'érosion pour chaque saison des années 2016 à 2020. Les Hotspots du risque d'érosion diffèrent d'année en année et de saison en saison. Néanmoins, certaines zones à haut risque ont pu être repérées : la plaine de la Ruzizi, zone située entre la ville de Goma et la région volcanique du nord, les agglomérations urbaines de Goma et de Bukavu et les prairies à l'est du lac Kivu. Une comparaison de l'analyse du risque d'érosion par satellite et des résultats de la simulation du modèle RUSLE montre que les deux approches aboutissent à des résultats similaires (bien que la localisation et l'étendue de certains Hotspots ne concordent pas tout à fait). Cela sous-entend que les deux approches sont exploitables de manière complémentaire.

Dans le cadre du MT 4, les données sur la turbidité du lac Kivu sont utilisées pour déterminer si un risque d'érosion entraîne une augmentation de la turbidité du lac due à un apport accru de sédiments. La comparaison quantitative du risque d'érosion et de la turbidité ne révèle pas de lien clair entre les deux paramètres. Ceci est probablement dû à la courte durée et à la faible étendue de l'augmentation de la turbidité suite à des événements d'érosion du sol. L'augmentation de la turbidité peut se manifester uniquement dans les deltas des rivières et ne pas affecter les eaux des lacs plus éloignés de la côte. Un examen plus approfondi des données sur la turbidité à proximité du littoral et dans une résolution temporelle plus élevée pourrait donner des résultats plus probants.

Le MT 5 analyse un autre paramètre du risque d'érosion : la croissance démographique. En s'appuyant sur le World Settlement Footprint, la croissance des deux agglomérations urbaines de Goma et Bukavu est analysée. La ville de Goma, en particulier, a connu une forte croissance entre 1995 et 2005. Quant à Bukavu, seule une croissance mineure a été enregistrée au cours des dernières décennies. Ceci est probablement dû au terrain accidenté autour de la ville qui ne permet pas une croissance intense en dehors des faubourgs de la ville. La croissance illustrée entre 1995 et 2015 par le World Settlement Footprint sert de paramètre d'entrée pour le modèle SLEUTH afin de simuler la croissance de ces deux agglomérations jusqu'en 2050. La croissance urbaine attendue ne montre qu'une faible augmentation dans la ville de Bukavu. Cependant, il est probable que ceci soit dû aux pentes raides autour de la ville. Pour Goma, une croissance plus forte est prévisible dans la zone urbaine, notamment le long du réseau routier du côté rwandais de l'agglomération. Dans l'ensemble, on peut s'attendre à une croissance des villes dans la zone d'étude, entraînant un accroissement démographique, une augmentation des surfaces asphaltées à l'origine d'un ruissellement de surface plus important des précipitations et d'une hausse de la demande de produits agricoles. Ces facteurs sont susceptibles d'accroître encore la pression sur les sols de la zone d'étude et de provoquer une érosion et une dégradation des sols plus intenses.

Le projet OT4Lac Kivu démontre comment exploiter les données du satellite pour identifier les Hotspots de l'érosion sur une vaste zone. Les résultats laissent penser que les sols de la région sont en danger. Les menaces se révèlent être des pratiques d'utilisation des terres/des pratiques agricoles inadaptées à l'origine d'une couverture végétale temporairement faible. Un accroissement démographique peut intensifier la pression sur les surfaces de sol disponibles. Cependant, l'analyse montre également à quel point des mesures efficaces de conservation de la nature peuvent atténuer l'érosion des sols. Les grandes zones protégées de la région présentent un risque d'érosion très faible tout au long de l'année en raison d'une couverture végétale dense toute l'année. Ce résultat a été démontré à la fois par l'analyse de télédétection et la simulation du modèle RUSLE.

1. Introduction

Des sols sains sont l'atout d'écosystèmes fonctionnels. Ils constituent des habitats pour un grand nombre de micro-organismes et pour une diversité d'animaux et de plantes, ainsi qu'une base pour une agriculture productive. Cependant, les sols de notre planète sont menacés par la dégradation. Dans son *rapport sur l'état des ressources en sols dans le monde*, la FAO indique que la dégradation des sols s'étendrait à un rythme alarmant, en particulier en Afrique, où 65 % des sols des terres agricoles se sont dégradés depuis le milieu du XXe siècle (FAO et ITPS, 2015). La cause la plus fréquente de dégradation des sols africains est l'érosion par l'eau (FAO et ITPS, 2015). Ceci est particulièrement vrai pour la zone située autour de l'Équateur, qui figure parmi les trois principaux Hotspots où l'érosion est la plus forte et la plus intense au monde (Borrelli et al., 2017).

Le bassin du lac Kivu et de la rivière Ruzizi est situé dans cette zone à la frontière de la République du Burundi, de la République démocratique du Congo et de la République du Rwanda. Il se caractérise par un terrain montagneux allant de 1 400 m à plus de 4 000 m d'altitude. Ce caractère accidenté augmente le risque d'érosion naturelle. Le changement qui s'opère au niveau de la couverture terrestre est une raison supplémentaire qui illustre la menace d'érosion du sol dans cette zone. Celle-ci se caractérise principalement par la conversion de la végétation naturelle en terres agricoles ou en zones bâties au cours des dernières décennies. Karamage et al. (2016) ont démontré que les variations de l'utilisation des sols au Rwanda, l'un des pays les plus densément peuplés d'Afrique de l'Est, ont entraîné une diminution de 64,5 % et de 31,1 % de la couverture forestière et de la proportion des prairies, respectivement, entre 1990 et 2016. Tout particulièrement après 2010, le taux de déforestation observé était presque deux fois plus élevé qu'en 1990. Cette perte de couvertures terrestres naturelles s'explique principalement par l'augmentation des terres cultivées et des zones bâties (134 % et 304 % entre 1990 et 2016, respectivement). Ce bouleversement de l'occupation des sols vers des types d'utilisation et d'occupation des sols inadaptés est à l'origine d'une forte érosion dans le bassin versant du lac Kivu (Akayezu et al., 2020).

Outre la déstabilisation de la couche arable, l'intensification du ruissellement de surface due aux changements d'utilisation des sols et la variation du régime des précipitations régionales sont des facteurs qui entraînent une augmentation de l'érosion des sols (Karamage et al., 2016). En ce qui concerne la zone du lac Kivu, seule une légère augmentation des précipitations annuelles est prévue pour les années à venir. Toutefois, le schéma des précipitations intra-annuelles est susceptible de changer de manière significative. Compte tenu des scénarios du GIEC, une hausse des précipitations de novembre, décembre et janvier comprise entre 11 et 19 % est probable pour la région, ainsi qu'une diminution des précipitations d'environ 2 % en juillet (Sher Consult, 2020). Pour interpréter la manière dont les changements de la configuration des précipitations et de l'occupation des sols influencent l'érosion des sols dans la région du

lac Kivu, il est nécessaire de comprendre les risques et les activités d'érosion actuels.

L'Autorité du Bassin du Lac Kivu et de la rivière Rusizi (ABAKIR) créée par les trois pays de la région du bassin du lac Kivu et de la rivière Ruzizi, à savoir la République du Burundi, la République démocratique du Congo et la République du Rwanda, s'engage dans la gestion intégrée des ressources en eau du bassin du lac Kivu et de la rivière Ruzizi. L'*étude de base du bassin du lac Kivu et de la rivière Ruzizi* (Sher Consult, 2020) collecte des informations pertinentes sur la zone à cette fin. Cette étude est financée dans le cadre du projet GIZ (Agence de coopération internationale allemande pour le développement) dénommé « Soutien à la gestion des ressources en eau du lac Kivu et de la rivière Ruzizi ». L'étude de base comporte des informations détaillées sur le contexte administratif, socio-économique, physique et culturel, ainsi que sur les ressources en eau, l'utilisation des sols et les écosystèmes, mais aussi sur les risques environnementaux et naturels dans la région. Elle inclut également une enquête sur la dégradation des sols. Dans ce but, le modèle RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation* - Équation universelle révisée de perte en sols) a été utilisé pour estimer les niveaux d'érosion des sols dans le but d'évaluer les pertes de sols et d'identifier les zones à risque pour pouvoir mettre en place des mesures de conservation du sol. Le projet OT4Lac Kivu complète cette analyse en s'appuyant sur des séries chronologiques de données d'observation de la terre (OT ou EO pour *Earth Observation*, en anglais). Grâce à cela, une analyse complémentaire est réalisée pour identifier plus précisément les Hotspots du risque d'érosion et les paramètres dans la région.

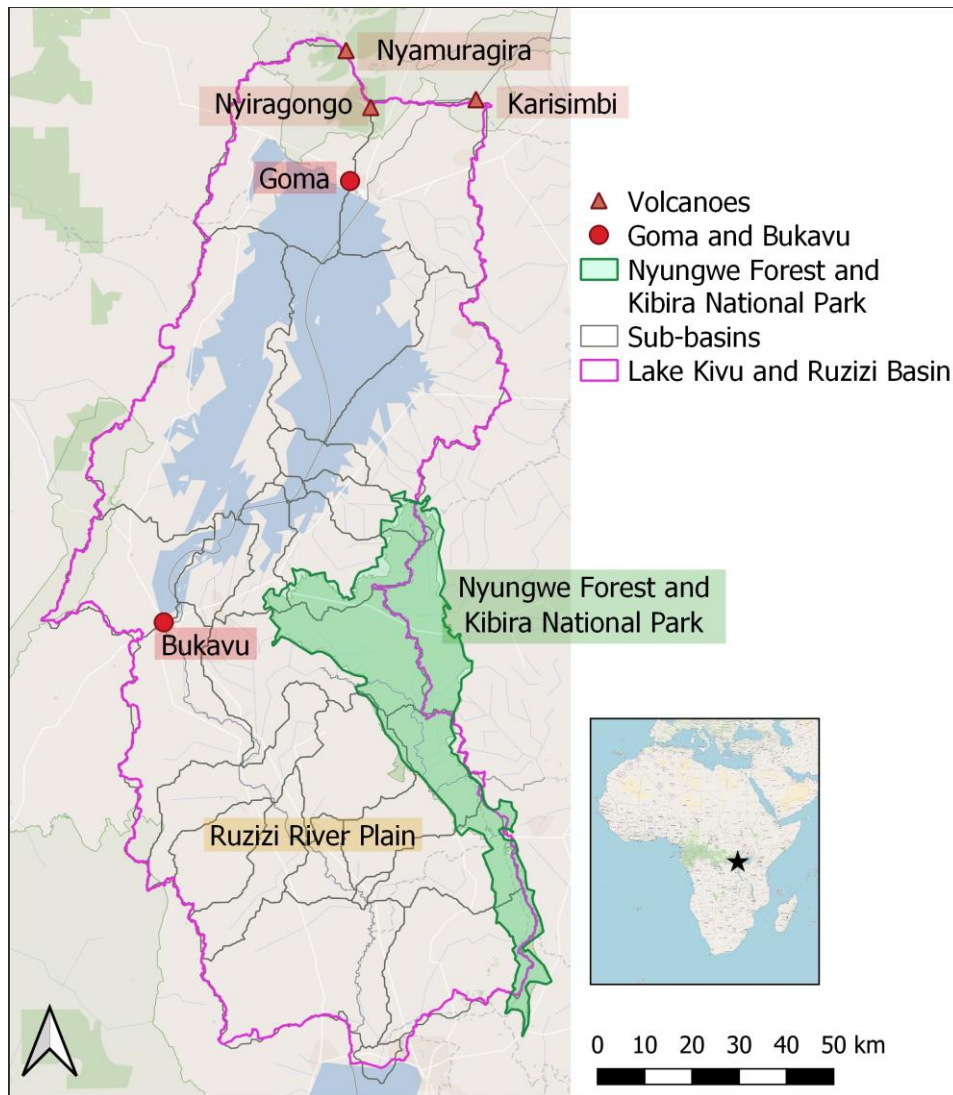
2. Zone d'étude

Vous trouverez une description détaillée de la zone d'étude dans l'*étude de base pour le bassin du lac Kivu et de la rivière Ruzizi* (Sher Consult, 2020). Ce rapport comporte seulement une brève description des caractéristiques les plus importantes auxquelles il est fait référence dans ce projet. La figure 2.1 donne un aperçu de la zone d'étude. Les contours du bassin du lac Kivu et de la Ruzizi coïncident avec les contours de la zone considérée dans l'étude de base et incluant la zone du modèle RUSLE.

La carte montre également les contours des sous-bassins situés dans la zone d'étude. Ces sous-bassins sont dérivés du jeu de données HydroBASINS niveau 8 (Lehner and Grill, 2013). La zone d'étude compte 25 sous-bassins. Ceux du nord se déversent principalement dans le lac Kivu. Les bassins du centre se déversent principalement dans la rivière Ruzizi et, de là, dans le lac Tanganyika. Les sous-bassins du sud se déversent directement dans le lac Tanganyika. À l'extrémité nord de la zone d'étude se dresse une très haute chaîne de montagnes qui se compose d'un certain nombre de volcans actifs et inactifs. Les volcans Nyiragongo, Nyamuragira et Karisimbi sont particulièrement intéressants pour l'analyse présentée, avec des altitudes allant jusqu'à plus de 4 000 m et une activité volcanique enregistrée au cours des derniers siècles. D'autres régions montagneuses se situent au sud-ouest et au sud-est de la zone d'étude, cette dernière étant principalement couverte de forêts et protégée comme la forêt de Nyungwe du côté rwandais et le parc de Kibira du côté burundais. Entre le lac Kivu et le lac Tanganyika se trouve la plaine de la rivière Ruzizi, qui a été formée par la rivière Ruzizi et qui relie les

deux lacs. Cette plaine représente une importante région agricole de dans cette zone.

Les villes de Goma et Bukavu sont situées sur les rives nord et sud du lac Kivu en République démocratique du Congo. Ces deux villes et leurs agglomérations environnantes feront l'objet de simulations de croissance urbaine dans le chapitre 9.



2.1 Zone d'étude et localisation des caractéristiques importantes mentionnées dans l'analyse des données.

3. Activité de recherche et modules de travail

Le travail scientifique s'articule autour de 4 modules de travail (MT). Les MT 1 à MT 3 utilisent les données d'observation de la Terre (OT) pour analyser le risque d'érosion dans la zone et identifier les régions qui peuvent être considérées comme des *Hotspots à haut risque d'érosion*. Pour cela, le MT 1 se concentre sur l'analyse de la dynamique de la végétation en tirant parti des longues séries temporelles d'informations de l'indice

NDVI. Les variations de végétation à long terme des deux dernières décennies sont analysées ainsi que les cycles saisonniers et interannuels de la couverture végétale. En outre, la couverture végétale est comparée aux informations sur l'utilisation des sols afin d'identifier les types de couvertures terrestres qui entraînent une forte variabilité de la couverture végétale au fil du temps et notamment les phases de couverture éparse ou de sol nu.

Le MT 2 analyse la configuration des précipitations dans la région. Il s'agit du deuxième paramètre considéré pour quantifier le risque d'érosion. L'analyse des précipitations utilise un produit quotidien pour identifier la répartition saisonnière des précipitations ainsi que les événements de fortes précipitations. Ces événements marquants sont capables d'entraîner un ruissellement de surface intense et de provoquer ainsi une érosion du sol. Les analyses du MT 1 et MT 2 sont combinées pour détecter les zones et les périodes pour lesquelles une faible couverture végétale et un nombre accru de fortes précipitations coïncident. La combinaison de ces deux facteurs permet d'obtenir une carte du risque d'érosion produite à l'échelle mensuelle pour les années 2016 à 2020. Dans le MT 3, les données sur la turbidité du lac sont utilisées pour vérifier si l'augmentation du risque d'érosion est liée à une augmentation de l'apport de sédiments dans le lac Kivu qui à son tour mène à une augmentation de la turbidité de l'eau du lac.

Le MT 4 se concentre sur un facteur indirect du risque d'érosion des sols : le changement au niveau de l'urbanisation de deux agglomérations de la région, à savoir Bukavu au sud et Goma au nord du lac Kivu. La croissance démographique des dernières décennies est analysée à l'aide du World Settlement Footprint (*Marconcini et al., 2020*), un jeu de données sur l'urbanisation basé sur les données d'observation de la Terre (OT). En outre, la croissance de la ville envisagée jusqu'en 2050 est simulée à l'aide d'un modèle de croissance urbaine.

4. Module de travail 1 : Analyse de la dynamique de la végétation

La dynamique de la végétation joue un rôle important dans l'estimation du risque d'érosion. Les produits du NDVI ont été utilisés dans des études précédentes pour analyser les risques d'érosion, par exemple dans *Hazarika et Kiyoshi (2001)* et *Sharma (2010)*. Un sol nu ou recouvert d'une végétation clairsemée est beaucoup plus sensible à l'érosion du sol qu'un sol recouvert d'une végétation dense. Dans la première étape de l'analyse de la végétation, un produit NDVI permet d'identifier les zones et les périodes à faible couverture végétale sujettes à l'érosion du sol. Dans un deuxième temps, l'indice NDVI est comparé aux données d'occupation des sols afin de recenser les couvertures de sol qui donnent lieu à de faibles valeurs de NDVI.

4.1. Analyse de l'indice NDVI

4.1.1. Données du NDVI de MODIS

Pour l'analyse de la dynamique de la végétation à long terme, les produits NDVI de MODIS version 6.1 MOD13Q1 (*Didan, 2021a*) dérivés de MODIS Terra, et MYD13Q1 (*Didan, 2021b*) dérivé de MODIS Aqua, sont utilisés. Ces produits sont disponibles pour toute la durée de vie des deux satellites Terra et Aqua lancés respectivement en 2000 et 2002. Les jeux de données ont une résolution temporelle de 16 jours et une résolution spatiale de 250 m. Pour chaque produit, la meilleure valeur de pixel disponible pour toutes les acquisitions de la période précédente de 16 jours est utilisée. Deux couches de végétation sont fournies avec chaque produit : les indices de végétation NDVI et EVI. Dans l'analyse présentée, nous utilisons exclusivement l'indice NDVI. Le NDVI a été choisi en raison de sa haute résolution temporelle et de la longue période couverte par ces deux produits. En outre, l'indice NDVI a prouvé sa pertinence et sa fiabilité pour surveiller la dynamique de la végétation, également dans la région d'Afrique de l'Est où se trouve la zone d'étude (p. ex. *La, 2013 ; Landmann et Dubovyk, 2014 ; Musau et al., 2018*).

Le produit à 16 jours est téléchargé depuis la plateforme EarthData de la NASA. À partir de là, les fichiers sont récupérés au format .hdf et dans une projection sinusoidale, ce qui est typique des produits de données MODIS. Le granule h20v09 couvre toute la zone d'étude. En premier lieu, les données sont reprojétées en projection géographique (EPSG : 4326) et converties au format GeoTIFF. Les données délivrées avec une couche de qualité. Cette couche de qualité donne des informations sur les données marginales et les pixels qui couvrent la neige/glace ou les nuages. Dans le cas du projet du lac Kivu, la couche de qualité est utilisée pour masquer les données marginales et les nuages du produit NDVI.

Les données de haute qualité repérées par les nuages sont ensuite utilisées pour extraire toutes les surfaces végétalisées à long terme. Ainsi, seuls les pixels qui couvrent les zones de végétation et les surfaces telles que l'eau, les rochers et les zones bâties, etc. sont utilisés pour l'analyse. Pour cela, on utilise une approche appliquée dans un certain nombre d'autres études, par exemple chez *Detsch et al. (2016)*, *Sarmah et al. (2018)* ou *Eastman et al. (2013)*. Sur la période complète de 20 ans (2001-2020), l'indice NDVI moyen est calculé et les zones pour lesquelles le NDVI à long terme est inférieur à 0,15 sont masquées. Ces zones sont considérées comme végétalisées à long terme et ne sont pas pertinentes pour l'analyse de la dynamique de la végétation. Les surfaces végétalisées restantes des années 2001 à 2020 sont ensuite agrégées en indices NDVI mensuels sur une grille hexagonale de 0,25°. Cette agrégation permet d'obtenir un aperçu plus généralisé et quantitatif de la dynamique de la végétation en réalisant une analyse pixel par pixel (voir *Jurasinski et Beierkuhnlein (2006)*).

4.1.2. Modifications à long terme de la végétation

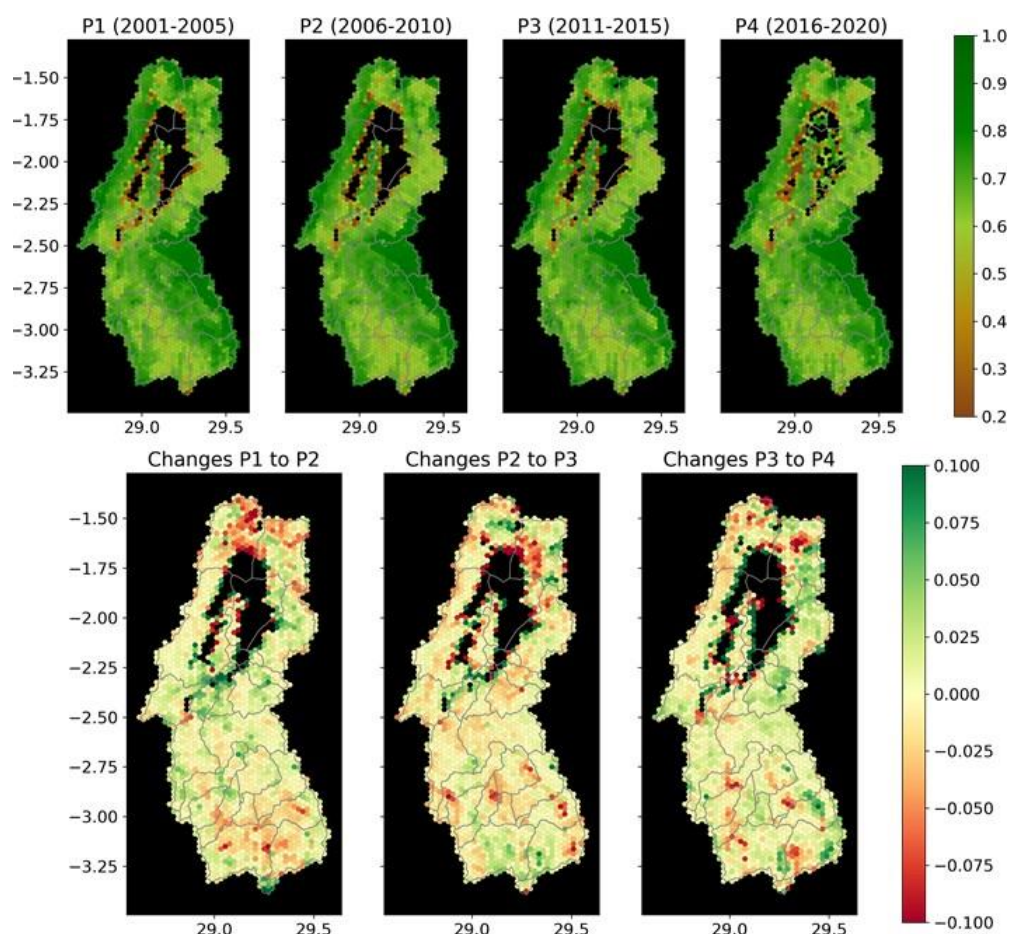
La longue série temporelle de MODIS permet d'analyser la dynamique de la végétation à long terme. À cette fin, la période complète est divisée en quatre sous-périodes : P1 (2001-2005), P2 (2006-2010), P3 (2011-2015) et P4 (2016-2020). Pour chaque période, une image médiane à long terme est créée à partir des médianes mensuelles. Le résultat est

présenté dans la partie supérieure de la figure 4.1. Il montre la médiane sur cinq ans pour chaque période, de P1 à P4. Les valeurs de NDVI les plus élevées et les plus fortes relevées au cours des quatre périodes peuvent être observées pour la région sud-est de la zone d'étude où se trouvent la forêt de Nyungwe (Rwanda) et le parc national de Kabiri (Burundi). Dans les plaines de la rivière Ruzizi, au sud de la zone d'étude, on peut observer des valeurs de NDVI plus faibles, autour de 0,5-0,6. Ceci est dû à la présence de champs agricoles dans la zone, pour lesquels la couverture végétale est faible pendant et après les phases de récolte. Au nord de la zone d'étude, autour du lac Kivu, où la topographie est plus extrême, on observe des valeurs de NDVI plus faibles. Pour visualiser l'évolution de la couverture végétale au fil du temps, la partie inférieure de la figure 4.1 montre le changement de végétation d'une période à une autre. La couleur rouge indique une diminution de la couverture végétale tandis que la couleur verte indique une augmentation.

Dans la partie nord de la zone d'étude, au nord de la ville de Goma, une forte diminution de la couverture végétale peut être observée, précisément entre la P1 et la P2. Cette zone est marquée par une topographie extrême et coïncide avec l'emplacement des volcans Nyamulagira, Nyiragongo et du Mont Karisimbi, dont l'altitude dépasse 4 500 m d'altitude AMSL. Les volcans Nyamuragira et Nyiragongo ont connu notamment de fortes activités au cours de la période couverte par l'analyse. Le déclin de la couverture végétale dans la zone du Nyamuragira de P1 à P2 et de P2 à P3 peut s'expliquer par les éruptions volcaniques des années 2006, 2010 et 2011, pour lesquelles des coulées de lave ont été localisées dans cette zone par *Head et al.* (2013).

Au sud de la région volcanique à l'extrémité nord du lac Kivu, il existe une autre zone pour laquelle un déclin de la végétation peut être observé sur toute la période. Ce déclin coïncide avec l'agglomération urbaine de Goma et peut s'expliquer par la croissance de cette agglomération. Ce sujet sera abordé plus en détail au chapitre 9. Cependant, la croissance urbaine illustrée par la figure 9.2 correspond à la diminution de la couverture végétale.

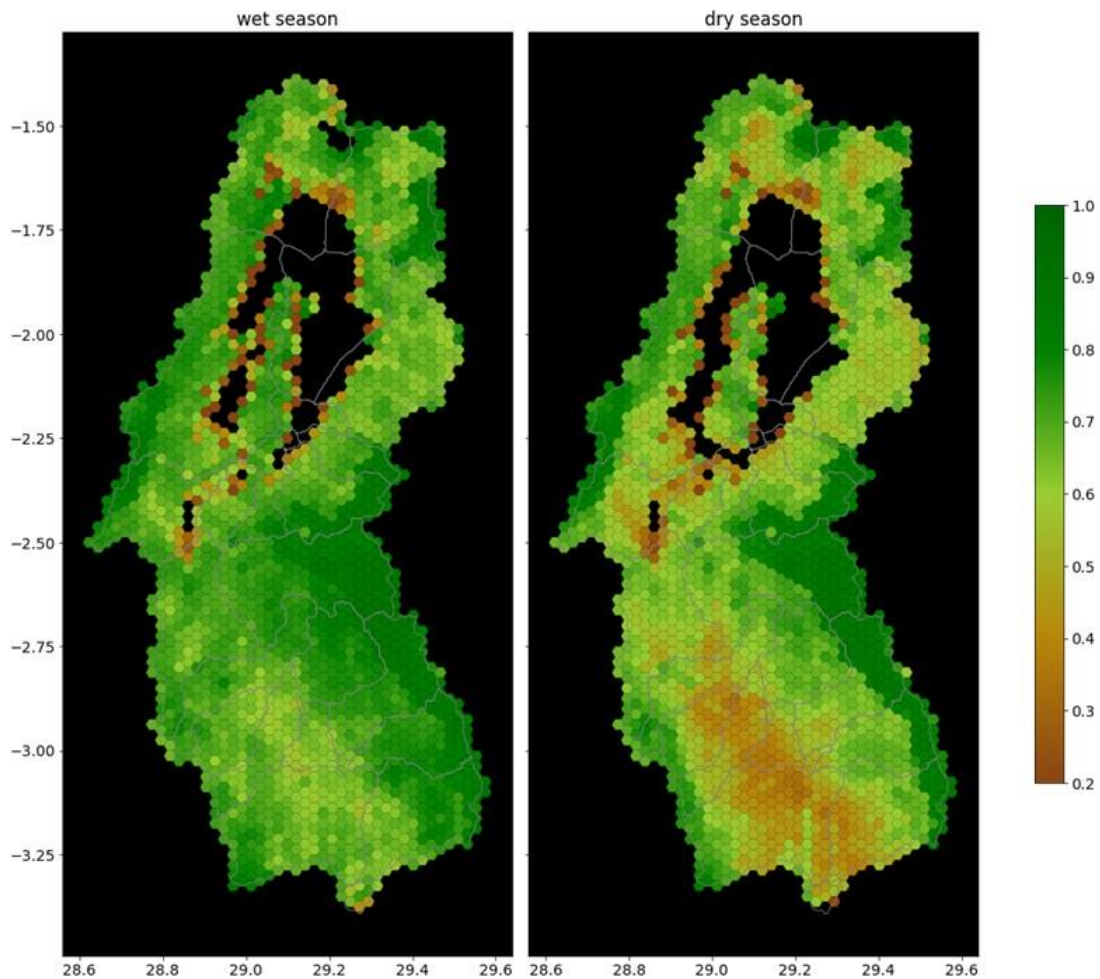
Dans la partie sud-est de la zone d'étude, où se trouve la forêt de Nyungwe (Rwanda) et le parc national de Kibira (Burundi), on observe des pertes de couverture végétale à la limite des zones de préservation de la P2 à la P3. Ces pertes peuvent être dues au défrichement des forêts dans les zones tampons du parc national, comme décrit par *Kayiranga et al.* (2016) et *Rutebuka et al.* (2018). Heureusement, une augmentation de l'indice NDVI de la P3 à la P4 est observée pour le parc national de la Kibira.



4.1 Analyse à long terme de la végétation. Au-dessus : Médiane des périodes de cinq ans sur une grille hexagonale de 0,25. En dessous : Changement d' une période à une autre.

4.1.3. Dynamique saisonnière de la végétation

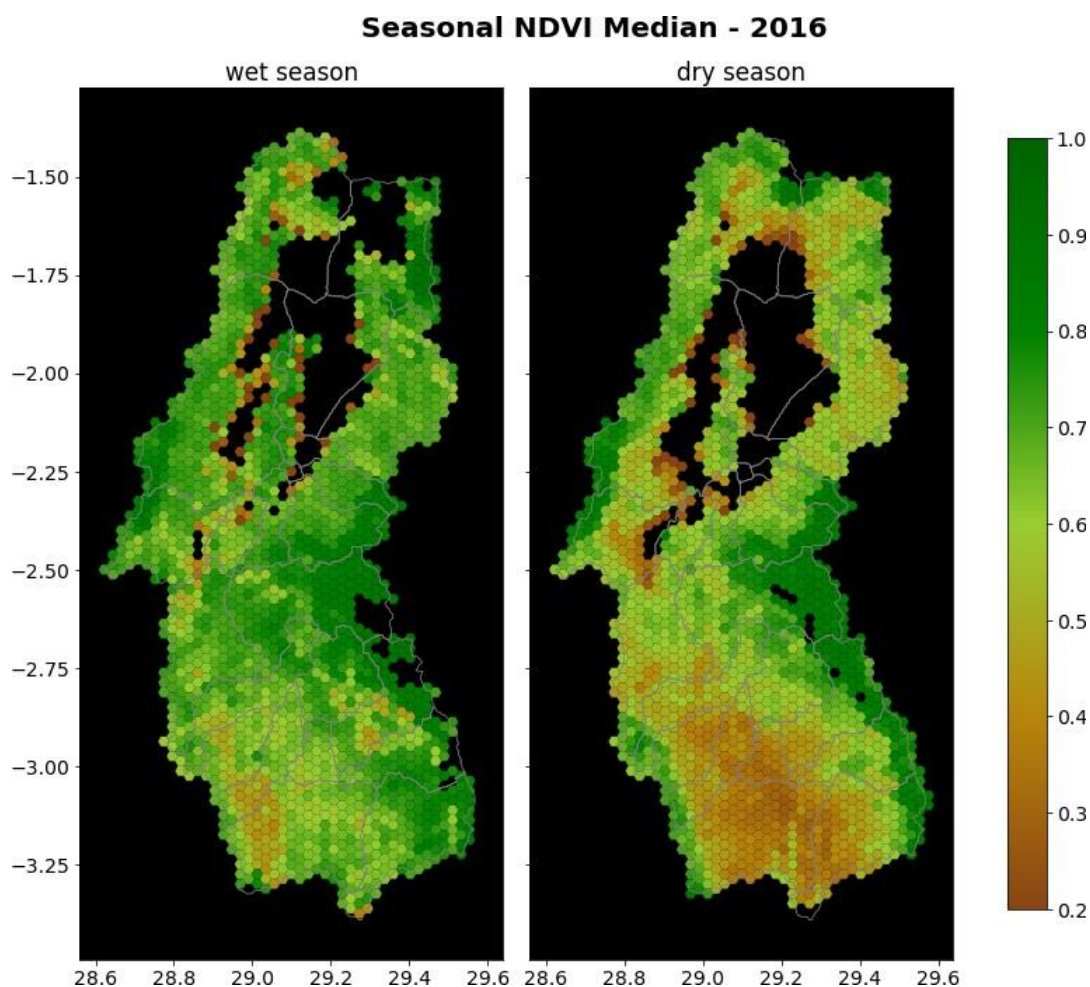
Afin d'analyser de plus près le cycle de végétation saisonnier et interannuel et de recenser des surfaces vulnérables à l'érosion du sol, un examen plus approfondi est effectué sur la période P4 de 2016 à 2020. En raison de la forte couverture nuageuse dans cette zone pendant une partie de l'année, la disponibilité des données est limitée certains mois, même si les satellites MODIS couvrent la zone (presque) quotidiennement. C'est pourquoi l'analyse intra-annuelle de la dynamique de la végétation est effectuée au niveau saisonnier. Pour cela, l'année est divisée en saison des pluies et saison sèche. La saison des pluies couvre les mois de janvier à mai et de septembre à décembre, tandis que la saison sèche s'étend de juin à août. La courte saison sèche de janvier n'est pas prise en compte ici.



4.2 Médiante du NDVI de 2016 à 2020 pour la saison sèche et la saison des pluies.

Comme illustré sur la figure 4.2, l'indice NDVI est beaucoup plus faible pour la saison sèche, surtout pour la région de la plaine de la Ruzizi. Le long du rivage du lac Kivu, une faible couverture végétale peut être observée à la fois pour la saison des pluies et la saison sèche. La raison principale en est probablement l'agrégation de pixels d'eau et de sol dans un même hexagone, mais elle peut aussi être due en partie à l'activité humaine, aux zones bâties et au mouvement du rivage du lac.

Ce NDVI saisonnier médian est ensuite calculé pour chaque année de 2016 à 2020. La figure montre le NDVI médian pour les saisons sèches et humides en 2016, tandis que les tracés respectifs pour les autres années se trouvent à l'annexe A.1. Des données sont disponibles pour la quasi-totalité de la zone d'étude pour chaque année. Cependant, il existe des régions pour chaque saison de chaque année pour lesquelles aucune donnée n'est disponible à partir de données du NDVI de MODIS. La couverture de données la plus faible se trouve dans les régions montagneuses du nord volcanique et de la crête montagneuse du sud-est, lorsque la couverture nuageuse est importante ou la qualité des données est marginale. Les informations saisonnières issues du NDVI de chaque année sont ensuite associées aux précipitations pour estimer le risque d'érosion à une échelle spatio-temporelle.



4.3 Médiane du NDVI de 2016 pour la saison sèche et la saison des pluies.

4.2. Informations sur la couverture terrestre issues de Copernicus

4.2.1. Carte de la couverture terrestre mondiale (*WorldCover*) de l'ESA

En octobre 2021, l'ESA a publié une nouvelle carte *WorldCover* (Zanaga et al., 2021). La carte *WorldCover* montre la couverture terrestre en 2020. Elle est basée sur les données SAR et les données de télédétection optique des deux satellites Sentinel-1 et Sentinel-2. Il s'agit d'un produit mondial librement accessible, d'une résolution de 10 m qui fournit 10 classes d'occupation du sol et une précision globale minimale de 75 %.

Sur le volet de droite de la figure 4.4, la couverture terrestre à 10 m est tracée pour la zone d'étude du lac Kivu. Les grandes forêts des parcs nationaux du sud-est sont clairement visibles sur la carte. En outre, des terres cultivées sont détectées le long de la rivière Ruzizi et au sud du lac Kivu. On trouve également une utilisation agricole intensive des sols sur le versant sud-ouest du volcan Karisimbi, au nord-est du lac Kivu. La plupart de la plaine fluviale de la Ruzizi, non utilisée pour l'agriculture, est couverte

de prairies et d'arbustes. Les agglomérations urbaines de Goma (au nord du lac Kivu) et de Bukavu (au sud du lac) sont clairement visibles. Des zones bâties plus importantes sont situées le long de la rivière Ruzizi.

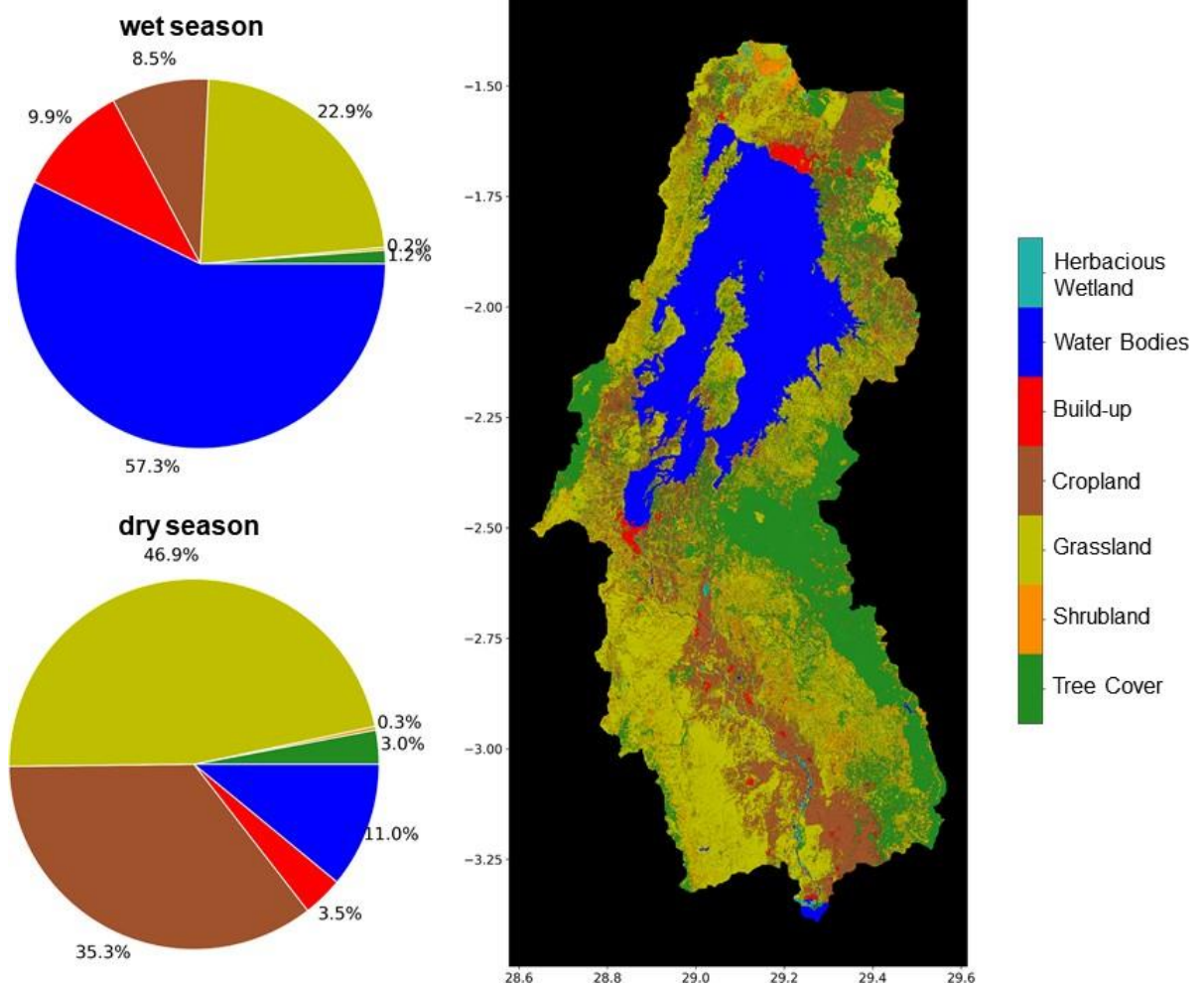
Les données de la carte *WorldCover* sont utilisées pour identifier les surfaces à faible couverture végétale (avec un NDVI inférieur à 0,5) pendant la saison des pluies ou la saison sèche. Ces surfaces sont susceptibles d'être mises en danger par l'érosion du sol. Le volet de gauche de la figure 4.4 combine l'analyse du NDVI des sections précédentes avec des informations sur l'occupation du sol : Pour la saison des pluies et la saison sèche de chaque année entre 2016 et 2020, la couverture des sols qui se trouve dans des hexagones dont le NDVI est inférieur à 0,5 est identifiée.

La figure montre que pendant la saison des pluies, les deux classes d'occupation du sol qui conduisent le plus souvent à de faibles valeurs de NDVI sont les plans d'eau permanents (57 %) et les prairies (23 %). Il n'est pas surprenant que les valeurs de NDVI les plus faibles soient trouvées pour la classe d'eau lorsqu'on regarde la figure 4.2, qui illustre le NDVI médian sur cinq ans. De nombreux hexagones situés le long du rivage du lac Kivu présentent une valeur de NDVI très faible. Cela est probablement dû à la taille des hexagones et au mélange de pixels d'eau et de sol qui en résulte dans l'hexagone. Une comparaison plus poussée de la médiane saisonnière du NDVI avec les classes d'occupation du sol montre que la plupart des prairies qui ont une faible valeur de NDVI pendant la saison des pluies se situent dans la plaine de la Ruzizi.

Au cours de la saison sèche, les deux classes d'occupation du sol les plus importantes qui donnent un NDVI inférieur à 0,5 sont les prairies (47 %) et les terres cultivées (35 %). Ceci est le résultat du faible NDVI pendant la saison sèche dans la plaine de la Ruzizi, mais aussi autour et au nord du lac Kivu, où se trouvent la plupart des prairies et des terres cultivées.

Outre la classe des zones humides herbacées, très rare dans l'ensemble de la zone d'étude, les zones arbustives et forestières sont celles qui présentent la plus faible proportion de valeurs de NDVI inférieures à 0,5, tant pour la saison des pluies que pour la saison sèche. Pour la zone arbustive, cela est probablement dû à sa faible abondance dans la zone d'étude, alors que pour la forêt à feuillage persistant, des valeurs de NDVI élevées sont recensées tout au long de l'année.

Les principaux résultats de l'analyse de l'occupation du sol ne sont pas surprenants : les forêts présentent une valeur de NDVI élevée tout au long de l'année, ce qui est susceptible de réduire considérablement le risque d'érosion. Pendant la saison des pluies, on peut observer des NDVI faibles le long des rives du lac, mais aussi pour les prairies, qui ne présentent pas une couverture végétale aussi dense que les autres couvertures de sols. Tout particulièrement pendant la saison sèche, la densité de la végétation ou du moins la verdure de ces surfaces diminue fortement en raison de la disponibilité de l'eau. De plus, les terres cultivées montrent une forte diminution du NDVI entre la saison des pluies et la saison sèche, en raison de la récolte des champs et du dessèchement des cultures, ce qui est également le résultat d'une faible disponibilité de l'eau.



4.4 Carte de l' occupation des sols pour la zone d' étude du lac Kivu basée sur la carte *WorldCover* de l' ESA (à droite) et classes d' utilisation des sols avec un NDVI inférieur à 0,5 pour la saison des pluies et la saison sèche de 2016 à 2020 (à gauche).

5. Module de travail 2 : Analyse des précipitations

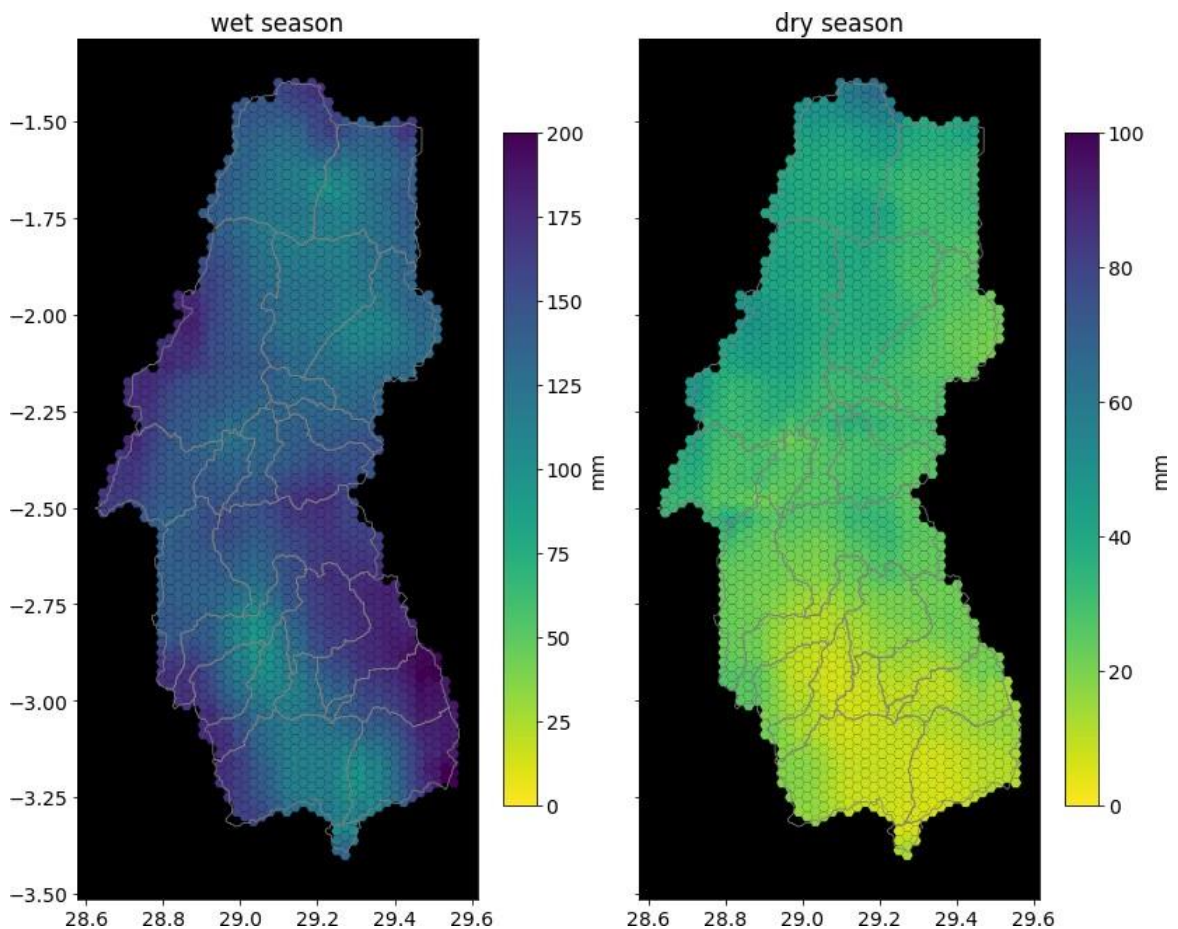
5.1. Données CHIRPS version 2.0

Pour analyser la répartition spatio-temporelle des précipitations dans la zone d'étude, le jeu de données CHIRPS v2.0 (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data) est appliqué (Funk et al., 2015). Les données sont téléchargeables depuis la page <https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/> et comprennent un jeu de données pluviométriques quasi global (de 50°S à 50°N) sur plus de 40 ans (de 1981 à aujourd'hui). Il est disponible dans une résolution spatiale de 0,05° et dans une résolution temporelle quotidienne, pentadique et mensuelle. Le jeu de données est une synthèse de données dérivées de satellites et de données in situ. Sa fiabilité a été validée et un certain

nombre d'études qui couvrent l'Afrique de l'Est (par exemple, *Dinku et al., 2018 ; Muthoni et al., 2019*) l'ont utilisé. Cette analyse utilise le produit quotidien, car il permet d'identifier les événements de fortes précipitations à court terme.

5.2. Somme des précipitations annuelles moyennes

La figure 5.1 montre les sommes des précipitations moyennes mensuelles pour la P4 (2016-2020) divisées en mois affectés à la saison des pluies (septembre à mai) et à la saison sèche (juin, juillet, août). Comme le montre la figure, les précipitations moyennes mensuelles sont 10 à 100 fois plus élevées pendant la saison des pluies que pendant la saison sèche. Dans les régions montagneuses de la zone d'étude en particulier, au sud-est et au sud-ouest, ainsi qu'au nord, les sommes des précipitations mensuelles atteignent jusqu'à 200 mm par mois pendant la saison des pluies. Dans la plaine de la Ruzizi, les sommes de précipitations sont beaucoup plus faibles et atteignent jusqu'à des sommes mensuelles de 100 mm. Cela devient plus extrême pendant la saison sèche, lorsque les sommes de précipitations mensuelles dans la plaine de la Ruzizi tombent à presque 0 mm. Pendant la saison sèche, la plupart des précipitations peuvent être observées à l'extrême nord de la zone d'étude, dans la région des hautes montagnes. Cette analyse montre qu'il y a une forte différence entre la saison des pluies très humide et les sommes des précipitations très faibles pendant la saison sèche.



5.3. Événements de précipitations extrêmes

Pour l'analyse du risque d'érosion, les sommes de précipitations mensuelles ne jouent qu'un rôle secondaire. Il est important d'identifier les événements de précipitations extrêmes qui peuvent être de courte durée et de faible étendue spatiale, mais qui sont capables de transporter les sédiments en raison de leur forte intensité. Pour cela, profitons de la résolution temporelle relativement élevée de ce jeu de données quotidiennes.

La première étape consiste à déterminer quelle somme de précipitations quotidiennes peut être considérée comme un événement de *précipitation extrême*. Pour cela, il est important de faire la différence entre la saison des pluies et la saison sèche. Cette différence s'explique par le fait que, pendant la saison des pluies, les précipitations sont susceptibles d'être plus courantes et plus fortes que pendant la saison sèche. Par ailleurs, les précipitations survenant pendant la saison sèche peuvent avoir un effet important, car les sols sont asséchés et la couverture végétale est rare à cette époque de l'année.

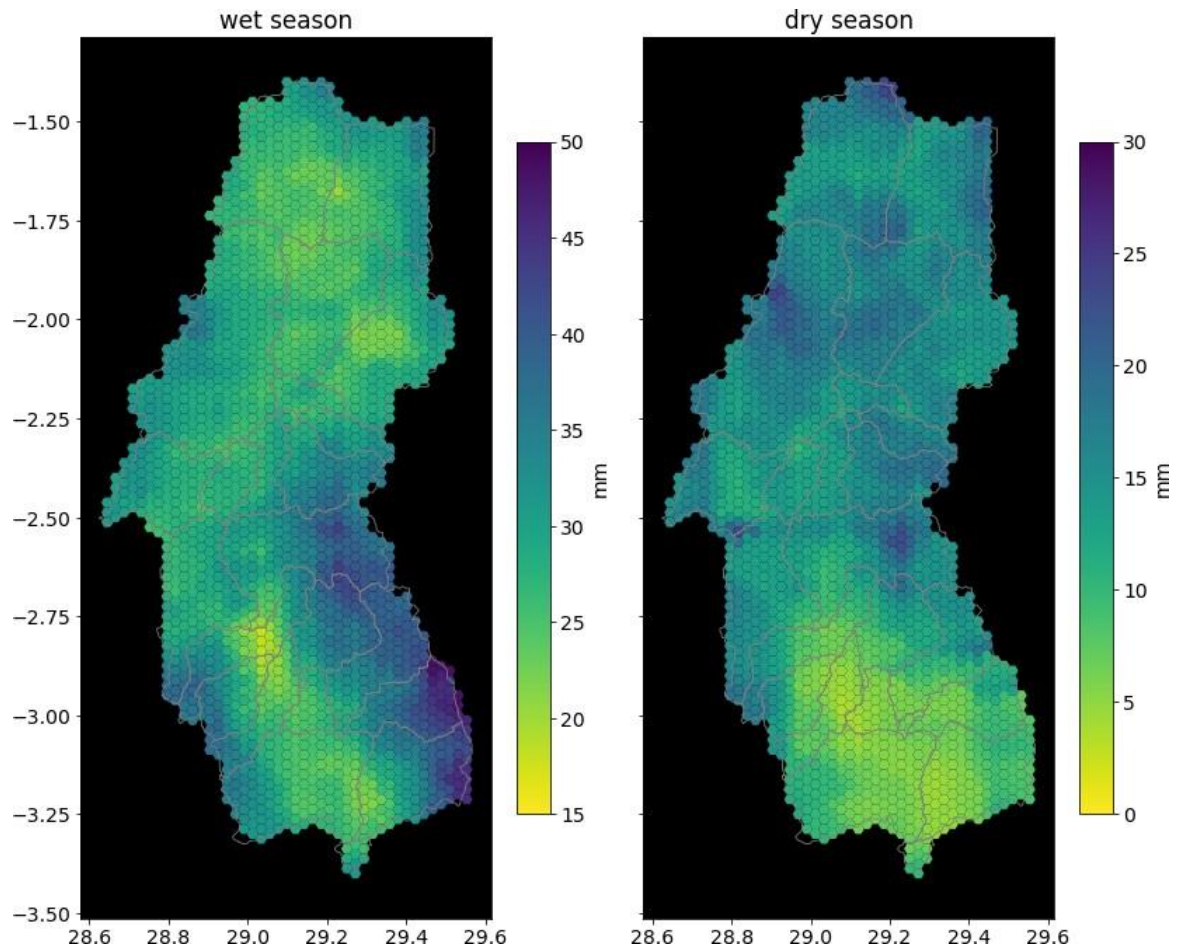
Le seuil qui détermine si une somme de précipitations quotidiennes peut être considérée comme un événement extrême est calculé en utilisant chaque jeu de données quotidiennes de la période 2016-2020 sur la grille hexagonale. Ces données sont réparties en fonction de la saison sèche et de la saison des pluies, et le 99^e percentile est calculé pour chaque hexagone. Le 99^e percentile donne la somme de précipitations seuil pour laquelle 99 % des sommes de précipitations quotidiennes sont inférieures et 1 % est supérieur est à cette valeur.

Le résultat de cette analyse est illustré à la figure 5.2. La figure montre des zones dans la plaine de la Ruzizi pour lesquelles des précipitations quotidiennes d'environ 15-20 mm sont suffisantes pour classer ce jour comme un *jour d'événement de précipitations extrêmes* pendant la saison des pluies. En outre, des précipitations quotidiennes d'environ 50 mm sont nécessaires dans la zone montagneuse du sud-est de la zone d'étude pour classer ce jour comme un jour de précipitations extrêmes au cours de la même saison. Quant à la saison sèche, le 99^e percentile est le plus bas pour le bassin de la rivière Ruzizi avec environ 5 mm. Dans le reste de la zone d'étude, les seuils sont répartis indépendamment de la topographie et vont jusqu'à 25-30 mm.

Les percentiles 99 servent à délimiter chaque hexagone parmi tous les jeux de données quotidiennes et extraire le nombre d'événements extrêmes pour chaque mois des années 2016 à 2020. Pour l'année 2016, la figure 5.3 illustre le nombre mensuel d'événements extrêmes par hexagone. Des chiffres similaires pour les années 2017-2020 sont présentés dans l'annexe A.2.

La répartition des événements de précipitations extrêmes dans la zone d'étude pour l'année 2016 montre un nombre accru d'événements de précipitations pendant les mois de mars, mai et décembre (saison des pluies) et pendant le mois d'août (saison sèche). Un phénomène identique s'observe pour les autres années où un plus grand nombre de fortes précipitations se produisent en avril/mai, août et novembre/décembre. La

répartition spatiale montre un point chaud d'événements extrêmes autour du lac Kivu en mai et dans le bassin de la Ruzizi en août 2016 avec jusqu'à 6 événements extrêmes dans un hexagone. Certains événements plus marqués ont également lieu en mai dans la région volcanique du nord.



5.2 Valeur du 99^e percentile pour chaque hexagone au cours de la saison des pluies et de la saison sèche dérivée de toutes les données quotidiennes entre 2016 et 2020.

6. Analyse du risque d'érosion

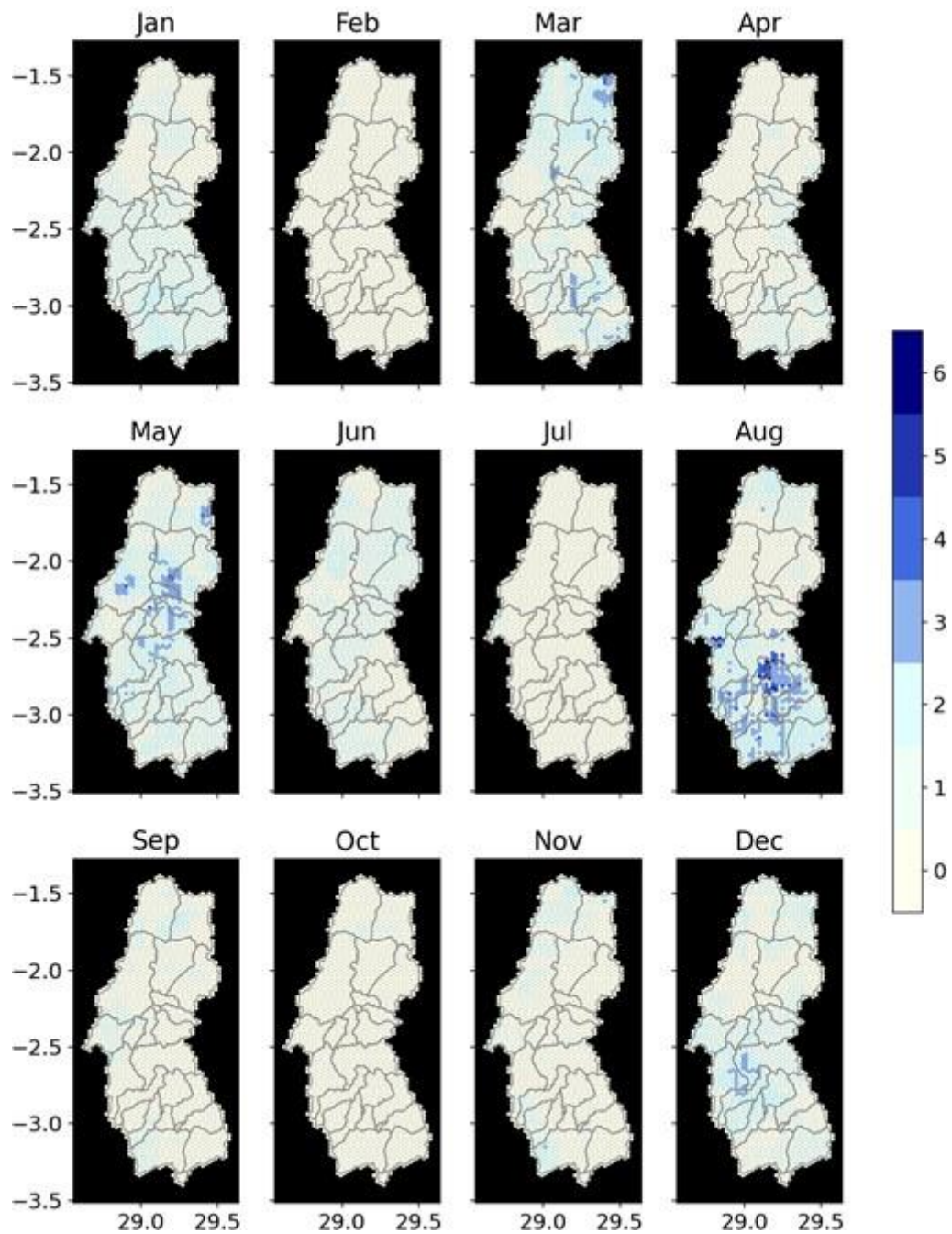
Les chapitres précédents ont illustré :

1. L'analyse de la dynamique de la végétation en termes d'analyse NDVI sur une grille hexagonale pour les années 2016-2020 à la fois pour la saison sèche et la saison des pluies.
2. L'analyse des événements de précipitations et l'identification des événements extrêmes sur la même grille hexagonale et pour la même période et les mêmes saisons.

Un risque d'érosion accru est prévu pour les hexagones et les périodes pour lesquels (1) la couverture végétale est faible et (2) un grand nombre d'événements extrêmes est observé. Afin d'identifier ces périodes à haut risque, les résultats de l'analyse de la végétation et des précipitations sont agrégés. Ceci se concrétise par une multiplication de la couche des événements mensuels de précipitations extrêmes avec le NDVI saisonnier spécifique. Pour cela, certaines adaptations de la couche d'indice NDVI doivent être envisagées : premièrement, les valeurs médianes de l'indice NDVI sont normalisées à une valeur comprise entre 0 et 1 et multipliées par -1. Une valeur de 1 est ajoutée au résultat. Ainsi, les grandes valeurs de NDVI (c'est-à-dire une couverture végétale dense) obtiennent une valeur proche de 0, tandis que les faibles valeurs de NDVI (c'est-à-dire une faible couverture végétale ou un sol nu) ont une valeur plus proche de 1. Cette plage de NDVI retournée est ensuite multipliée par les données sur les événements de précipitations extrêmes. En résumé, le paramètre de risque d'érosion est calculé à l'aide de la formule suivante ; *Risque d'érosion* = *Événements de précipitations extrêmes* * (*NDVI normalisé* * (-1) + 1)

Il en résulte une carte mensuelle du risque d'érosion qui indique les régions à risque d'érosion accru. Des valeurs plus élevées sont atteintes pour une faible couverture végétale et un grand nombre d'événements extrêmes. Pour l'année 2016, la carte des risques d'érosion est représentée par la figure 6.1 tandis que les chiffres respectifs pour les années 2017 à 2020 sont présentés dans l'annexe A.3.

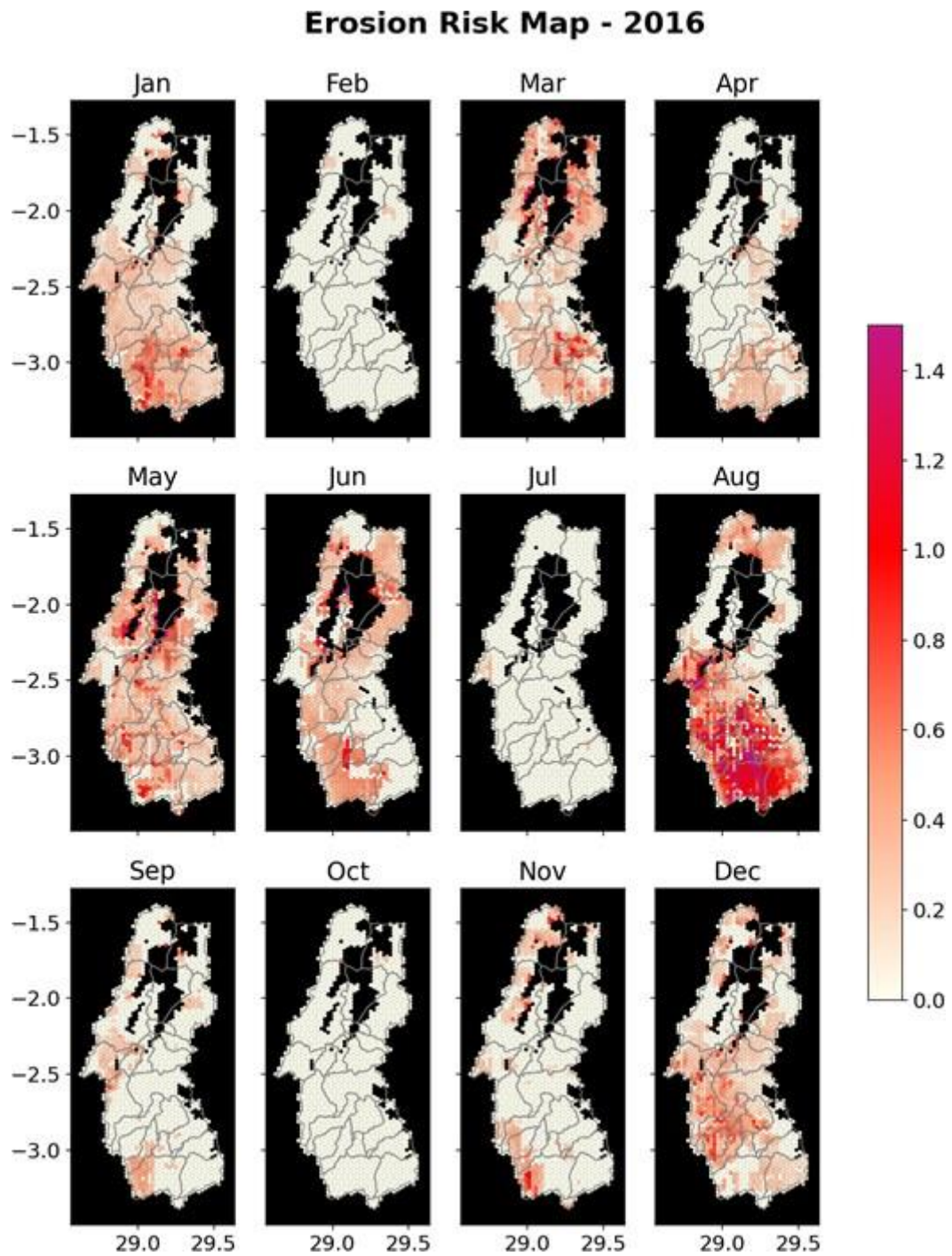
Precipitation Number of Extreme Events - 2016



5.3 Nombre mensuel moyen d'événements de précipitations extrêmes (c'est-à-dire supérieures au 99^e percentile) pour la saison sèche et la saison des pluies en 2016.

Pour 2016, l'analyse du risque d'érosion montre un risque d'érosion extrême pour la plaine de la Ruzizi au moins d'août en raison de faibles valeurs de NDVI et d'un grand nombre d'événements de précipitations extrêmes. En juin également, on constate une augmentation du risque d'érosion dans la plupart des parties de la zone d'étude. Au cours de la saison des pluies, les mois de janvier, mars, mai et décembre présentent un risque accru. Cependant, des valeurs aussi élevées que celles du mois d'août et pour une zone aussi vaste ne s'observent pas pendant le reste de l'année. Le long de la crête montagneuse boisée au sud-est, un risque d'érosion très faible à faible est calculé pour chaque mois en raison du NDVI élevé toute l'année. Pour l'année 2019, le risque d'érosion élevé le plus significatif peut se manifester en mai et couvrir presque toute la zone d'étude. En novembre, le risque est élevé sur les rives nord et est du lac Kivu. Contrairement à l'année 2016, les Hotspots du risque d'érosion sont situés autour du lac plutôt que dans le bassin de la rivière Ruzizi. Un autre point chaud pour les risques d'érosion extrême est observé pour juin 2019 avec des valeurs très élevées pour la plaine de la Ruzizi et la rive sud du lac Kivu.

Les résultats montrent qu'il n'y a pas une seule région de point chaud pour laquelle un risque d'érosion accru est annoncé. La répartition de l'augmentation du risque d'érosion dépend fortement de celle des événements de précipitations variables d'un mois à l'autre et d'une année à l'autre. En outre, le NDVI saisonnier ainsi que la répartition et la présence forte d'une couverture végétale basse varient chaque année. Cependant, il semble que deux zones principales présentent des risques d'érosion accrus, à savoir la plaine de la Ruzizi et la zone au nord et à l'est du lac Kivu. Ce point sera examiné plus en détail au chapitre 8.



6.1 Carte du risque d'érosion dérivé de la multiplication du NDVI et des précipitations pour la saison sèche et la saison des pluies en 2016.

7. Module de travail 3 : Analyse de la turbidité au lac Kivu

Dans ce chapitre, nous allons traiter le sujet de la turbidité du lac Kivu. L'objectif de l'analyse consiste à vérifier si la turbidité peut être utilisée comme indicateur d'une érosion antérieure du sol. De cette façon, les données sur la turbidité peuvent être reliées à l'analyse du risque d'érosion du chapitre précédent. L'hypothèse est la suivante : lorsque le risque d'érosion est accru, la turbidité du lac augmente en raison de l'apport supplémentaire de sédiments dans le lac.

7.1. Données

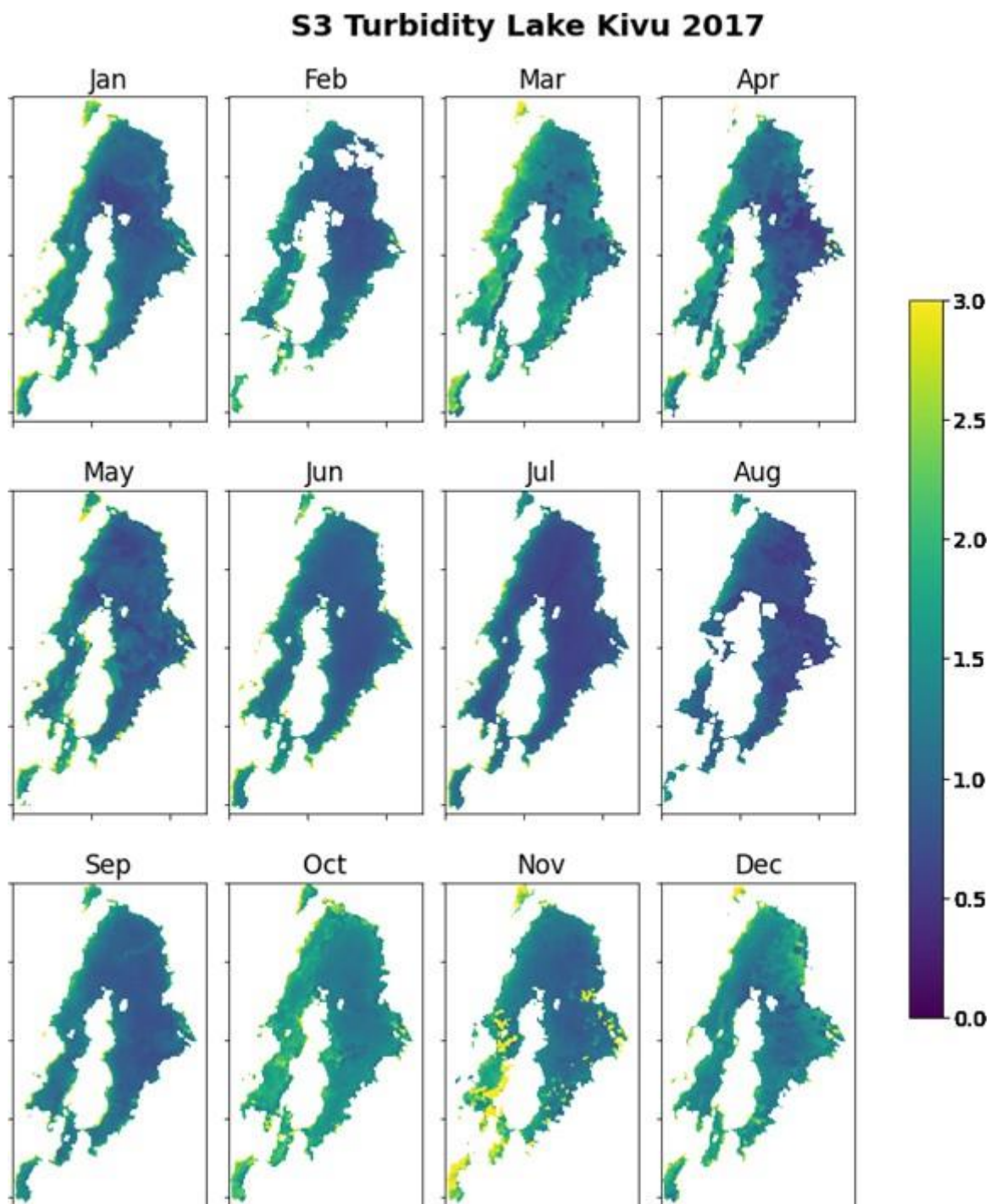
Pour l'analyse de la turbidité, le produit de turbidité basé sur l'OT (*Earth Observation, EO*) du CGLS (Copernicus Global Land Service, <https://land.copernicus.eu/global/products/lwq>) est utilisé. L'analyse concerne les mois de mai 2002 à mars 2012, et de mai 2016 à aujourd'hui. Au cours de la première période, le jeu de données est basé sur les données du capteur ENVISAT-MERIS, tandis que la dernière période se base sur les données de Sentinel-3. Comme la deuxième période à partir de 2016 correspond bien à la période considérée dans cette étude, l'analyse se concentre sur le produit issu de Sentinel-3. Un produit de données sort tous les 10 jours avec une résolution de 300 m. Les données sont agrégées en moyennes mensuelles pour les besoins de l'analyse.

7.2. Turbidité saisonnière

La figure 7.1 illustre la turbidité moyenne mensuelle basée sur l'ensemble des données de turbidité du CGLS pour l'année 2017. Comme on peut le voir sur la figure, une augmentation de la turbidité se produit souvent sur la côte du lac. L'une des raisons de ce phénomène peut être l'apport de sédiments amené par les rivières. D'autres causes de cette augmentation peuvent être la perturbation du fond du lac dans les eaux peu profondes à cause des vagues, des apports d'eau ou de l'activité humaine. Le cycle annuel de la turbidité dans le lac montre une tendance à l'augmentation de la turbidité pendant les saisons des pluies. En particulier en mars, en avril et d'octobre à décembre, les données montrent une augmentation de la turbidité avec un pic en novembre. Pendant la saison sèche, soit en juillet, août et septembre, la turbidité de l'eau est plus faible que pendant le reste de l'année. Ce cycle annuel s'observe également les autres années (voir les figures en annexe : 1.13, 1.14, 1.15 et 1.16) avec une turbidité minimale du lac en août et une turbidité accrue en mars/avril et d'octobre à décembre.

La figure 7.2 présente une comparaison entre le risque d'érosion (volet gauche) et la turbidité (volet droit) pour mai 2017. En mai 2017, un risque d'érosion très élevé est détecté pour la zone autour du lac Kivu. Le risque d'érosion est particulièrement élevé

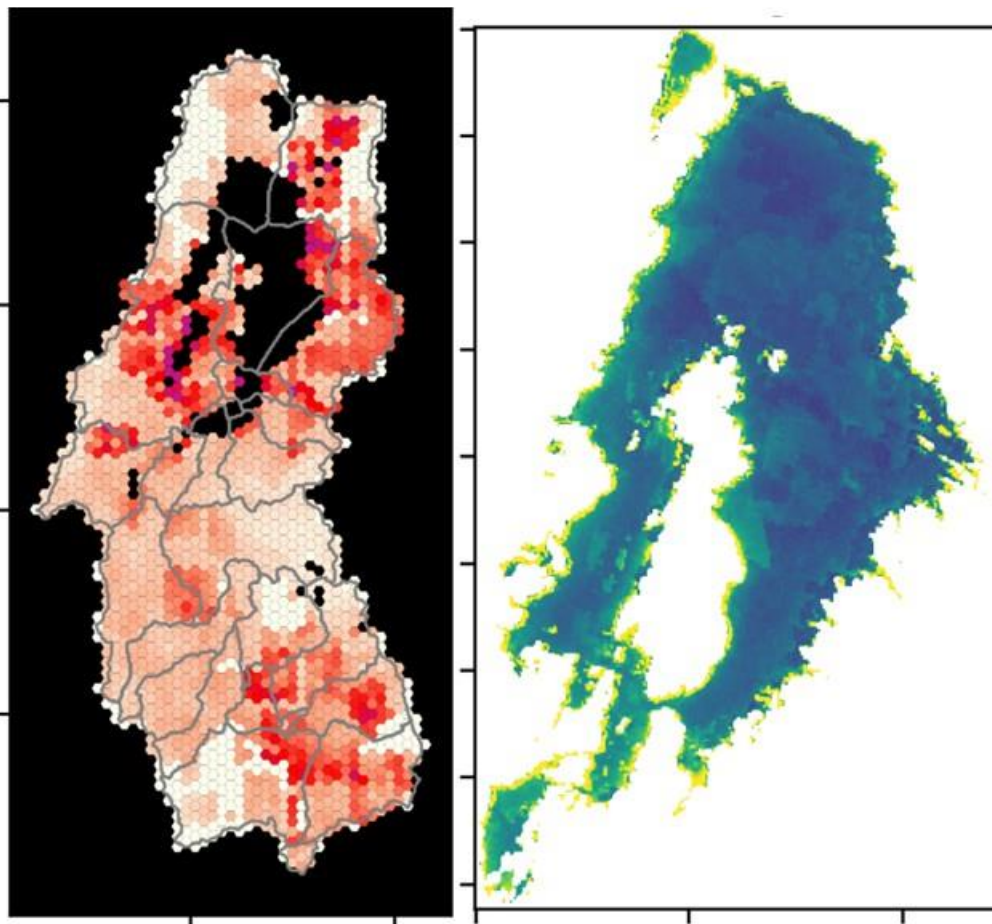
au sud-ouest du lac, mais aussi sur la côte est et nord-est. La turbidité sur la droite montre clairement des valeurs accrues le long d'une bonne partie du rivage. Une augmentation de la turbidité est particulièrement visible dans les deltas des rivières. Cela peut être un signe qu'une érosion accrue du sol pourrait avoir eu lieu en mai 2017.



7.1 Turbidité moyenne mensuelle pour 2017 du lac Kivu basée sur les données de turbidité de Sentinel-3.

Pour identifier le lien entre la turbidité du lac et l'érosion, une deuxième analyse plus

quantitative est effectuée. À cette fin, les sous-bassins autour du lac Kivu sont subdivisés en fonction de la partie du lac dans laquelle leurs principaux déversements aboutissent. Ainsi, chaque sous-bassin est affecté aux bassins nord, est, sud et ouest. Ceci est illustré par la figure 7.3.



7.2 Comparaison du risque d' érosion (à gauche) et de la turbidité (à droite) pour le mois de mai 2017

Le risque d' érosion mensuel de chaque bassin est calculé sur la base de la moyenne de chaque hexagone dans chaque bassin. Cette valeur est comparée à la turbidité moyenne mensuelle du lac sur le premier kilomètre autour du lac à partir de la rive, indiquée par la ligne rouge dans la zone du lac sur la figure

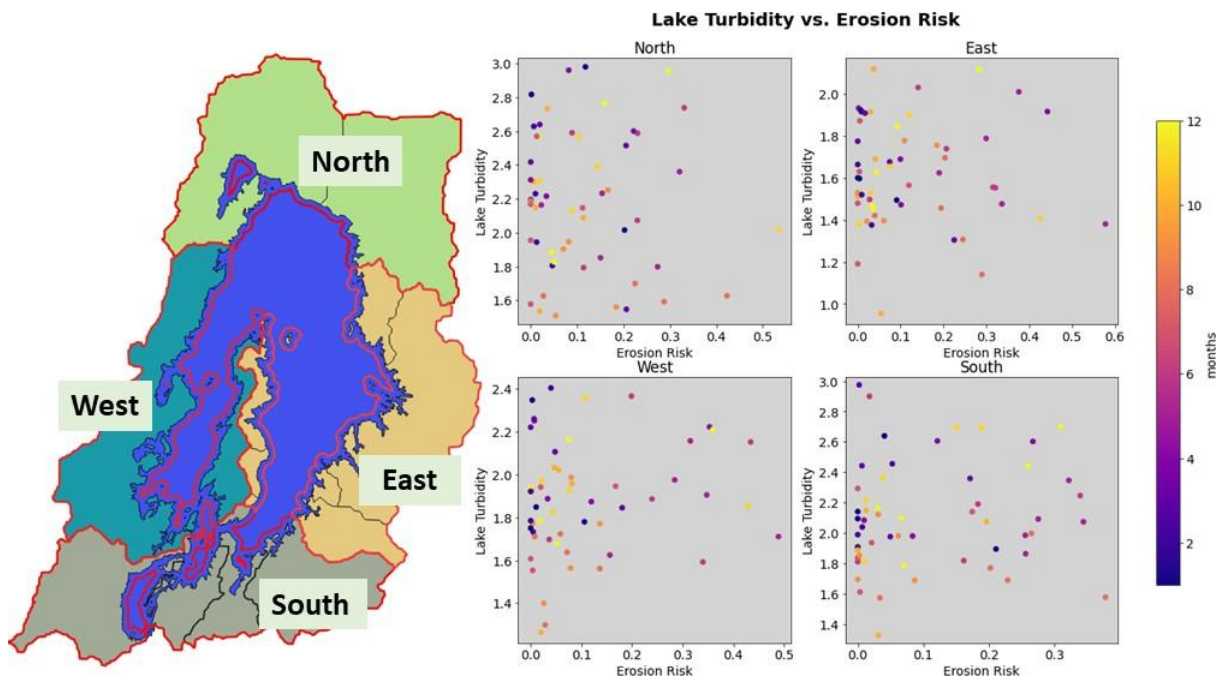
7.3 (gauche). Le volet droit de la même figure montre la corrélation entre le risque d' érosion moyen des bassins et la turbidité moyenne.

Comme on peut le constater sur les diagrammes de dispersion du volet droit de la figure 7.3, il n'y a pas de lien clair entre les deux paramètres. Cependant, pour la plupart des zones, à l'exception de la zone *nord*, il n'y a que quelques mois ne présentant aucun risque d'érosion et une faible turbidité du lac.

Dans l'ensemble, on peut conclure que le produit de turbidité du lac du CGLS Sentinel-3 présente une couverture et une résolution appropriées pour détecter les variations de la turbidité du lac. Dans ce projet, il pourrait être utilisé pour identifier les changements

saisonniers. Cependant, il est difficile d'établir un lien entre le risque d'érosion et la turbidité du lac. Cela peut s'expliquer par les raisons suivantes :

1. Bien qu'un risque d'érosion accru ait été identifié pour la région, il n'est pas certain qu'une érosion ait réellement eu lieu.
2. Le calcul de la moyenne de la turbidité à l'échelle mensuelle est susceptible de conduire à une dilution des événements d'apport en sédiments, car ils peuvent être de courte durée. Il en va de même pour l'agrégation spatiale, car les apports fluviaux sont de petite taille.



7.3 Subdivision des bassins versants autour du lac Kivu au nord, est, sud et ouest (à gauche) et diagramme de dispersion de la turbidité du lac en fonction du risque d'érosion pour chaque mois de 2016 à 2020.

3. La turbidité peut être influencée par un certain nombre de facteurs différents indépendants de l'érosion. Cela inclut le vent, les vagues ou l'activité humaine.

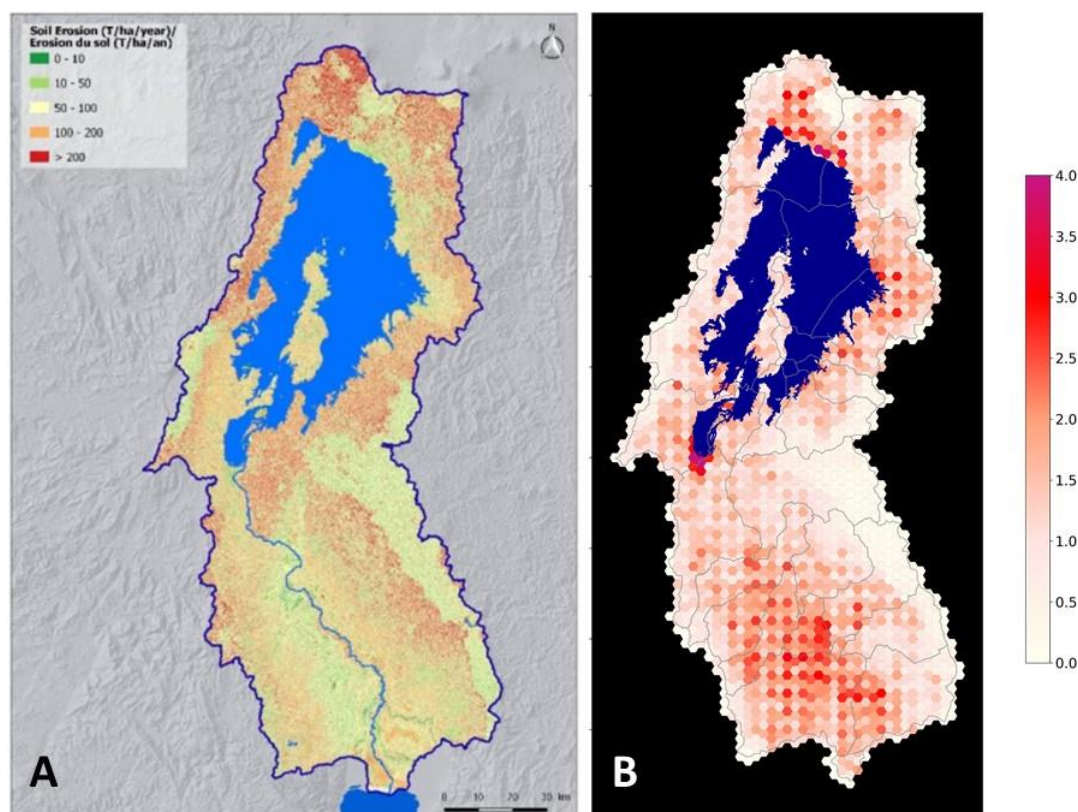
La généralisation des données dans l'espace et le temps était inévitable en raison de la grande échelle du lac et de l'intention d'effectuer l'analyse de manière automatisée pour toute la zone. En outre, la disponibilité des données du produit ne permet pas l'analyse en étapes temporelles plus courtes. Dans les futures analyses, il conviendrait d'examiner plus en détail les apports fluviaux à petite échelle. Par conséquent, les données sur la turbidité pourraient représenter un véritable atout pour identifier et valider les événements d'érosion.

8. Comparaison de la carte du risque d'érosion et des simulations selon le modèle RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation* - Équation universelle révisée de perte en sols)

Pour rendre la carte du risque d'érosion comparable aux résultats des simulations RUSLE obtenues dans le cadre de l'étude de base du bassin du lac Kivu et de la rivière Ruzizi (Sher Consult, 2020), une moyenne sur cinq ans est calculée à partir des résultats du chapitre 6. Pour cela, la somme de chaque mois des cinq années de 2016 à 2020 est calculée et divisée par cinq. Le résultat est illustré à la figure 8.1B). Sur cette carte, les principaux Hotspots sur la période complète sont identifiables et comparables aux résultats du modèle RUSLE décrits à la figure 8.1A). Les Hotspots du risque d'érosion de l'analyse des OT se situent

1. dans la plaine de la Ruzizi : cela tient à l' utilisation des terres agricoles et à la récolte et au labourage réguliers des champs agricoles caractéristiques de cette zone. De plus, de faibles précipitations sont observées dans cette zone pendant la saison sèche, ce qui entraîne un assèchement supplémentaire de la végétation dans la plaine fluviale
2. dans la zone située au nord du lac Kivu entre la ville de Goma et la zone volcanique. La zone est couverte de terres cultivées, ce qui donne lieu à nouveau à des périodes régulières de sol nu et peut provoquer une dégradation du sol.
3. dans les agglomérations urbaines de Goma et Bukavu. Pour cette zone, une faible couverture végétale est détectée, présageant un risque d' érosion accru. La faible couverture végétale est probablement le résultat des villes elles-mêmes, de leur croissance, des infrastructures et d' autres activités humaines, par exemple l' agriculture à petite échelle.
4. à l' est du lac Kivu, où les prairies sont nombreuses et où la couverture végétale diminue fortement pendant la saison sèche.

Il est évident que le risque d'érosion est très faible dans la zone de la forêt de Nyungwe et du parc national de Kibira. En raison de la couverture forestière, des valeurs de NDVI élevées sont observées tout au long de l'année. Le risque d'érosion est donc faible, bien que la région montagneuse connaisse quelques fortes précipitations. Cela montre à quel point la conservation des sols est essentielle pour maintenir ces écosystèmes dans un état sain et pour conserver des zones couvertes de végétation tout au long de l'année, en particulier dans les environnements humides.



8.1 A) Érosion du sol en t/ha/an dérivée des simulations du modèle RUSLE réalisées et décrites dans l' étude Sher Consult de 2020. B) Somme annuelle moyenne sur 5 ans du risque d' érosion dérivée de l' analyse des données d' OT.

Le modèle RUSLE aboutit à un résultat similaire à celui de l'analyse des données d'OT : Les principaux Hotspots sont situés dans la plaine de la Ruzizi (bien qu'un peu plus à l'est que dans l'analyse des données d'OT), au nord du lac Kivu dans la zone volcanique et le long des rives est et ouest du lac. Une très faible érosion est annoncée pour la chaîne de montagnes du sud-est où se trouvent les zones de conservation.

9. Module de travail 4 : Simulation de la croissance urbaine pour les villes de Goma et de Bukavu

9.0.1. Introduction au modèle SLEUTH

SLEUTH est l'acronyme anglais pour *Slope* (pente), *Land use* (utilisation des sols), *Exclusion* (zones non constructibles), *Urban extent* (extension urbaine), *Transportation* (transport) et *Hill shade* (ombre des pentes), qui sont les données d'entrée requises pour ce modèle. Il s'agit d'un modèle d'automate cellulaire (AC) de la croissance urbaine et du changement d'affectation des sols. Le modèle est basé sur le « modèle de croissance urbaine par automate cellulaire Clark » publié par *Clarke et al. (1997)*. Il se compose de deux modèles d'automates cellulaires couplés : l'un pour la modélisation de la croissance urbaine (UGM, *Urban Growth Modelling*) et l'autre pour la prédiction des changements d'utilisation des sols (ULC, *Land Use Change*). Dans ce cas de figure, l'UGM

a été appliqué aux zones d'étude. L'hypothèse de base du modèle est que chaque ville a son propre « ADN ». Cet « ADN » contrôle le processus de croissance de la ville. Sans aucune influence extérieure, la ville se développera toujours en fonction de son « ADN », comme elle l'a fait par le passé. Pour décrire le processus de croissance urbaine, quatre comportements de croissance sont définis :

- Croissance spontanée : cette croissance est décrite comme l'apparition d'un pixel réparti de façon aléatoire et qui est urbanisé.
- Croissance diffuse : elle définit si un pixel récemment urbanisé deviendra un nouveau centre d'expansion. Croissance organique : ce comportement définit l'urbanisation qui se produit en bordure d'un centre d'expansion.
- Croissance influencée par le secteur routier : définit la croissance urbaine le long du réseau routier.

Ces quatre comportements se basent sur la structure cellulaire d'une image, également connue sous le nom de pixel. Ils sont quantifiés et contrôlés par cinq coefficients différents :

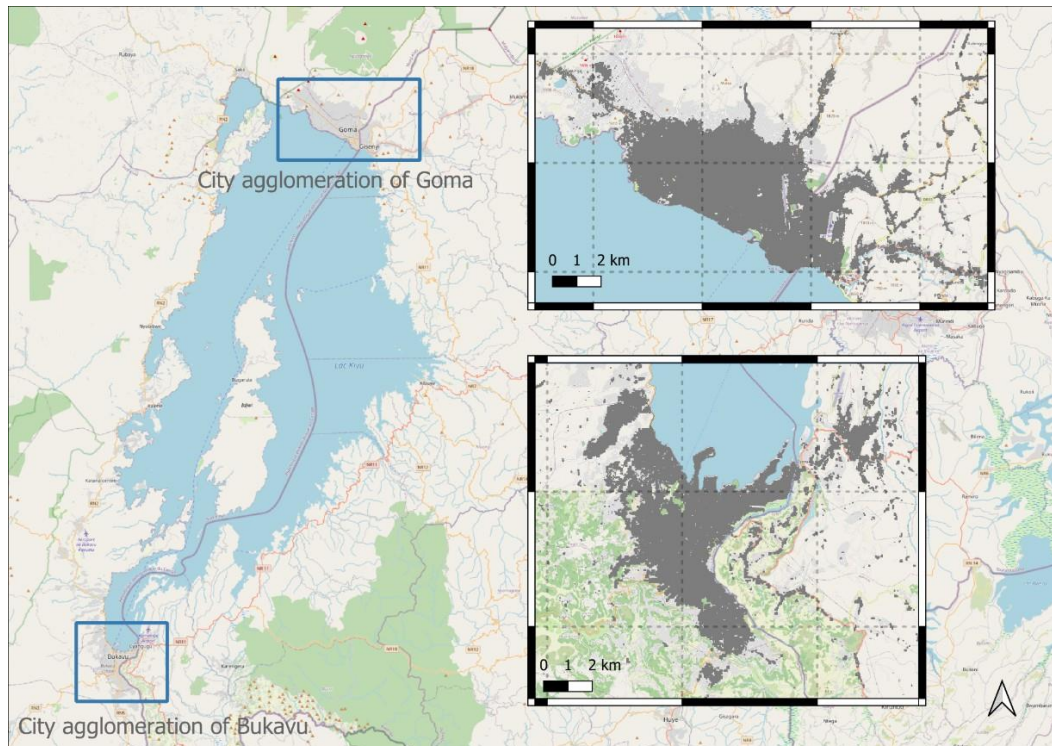
- Diffusion : ce coefficient définit le caractère dispersif de la répartition des cellules de la grille et le mouvement des nouvelles implantations vers la périphérie du réseau routier.
- Développement : il définit la probabilité qu'un nouvel établissement soit généré. Étalement : ce coefficient contrôle la portée de l'expansion organique vers l'extérieur.
- Résistance à la pente : elle représente une résistance aux pentes escarpées.
- Gravité en fonction de la route : elle définit la capacité d'attirer de nouveaux pixels urbains à proximité du système routier existant.

« L'ADN » d'une ville se retrouve dans ces cinq coefficients, car ils contrôlent directement ou indirectement les comportements de la croissance urbaine. Pour dériver un ensemble de combinaisons optimales de coefficients qui peuvent simuler la croissance urbaine historique de la ville, une phase de calibrage est nécessaire. Le calibrage traditionnel de SLEUTH comporte 3 étapes : le calibrage grossier, le calibrage fin et le calibrage final. Ces trois étapes sont définies par des échelles différentes de leurs entrées et sont connues sous le nom de « calibrage en force brute » (*Clarke et al., 1997*). Cette stratégie de calibrage a plus tard été remplacée par un algorithme génétique (*Clarke, 2017*). Les coefficients générés à partir du calibrage seront utilisés pour simuler la croissance urbaine future de la ville. Dans cette étude, le modèle SLEUTH basé sur un algorithme génétique (SLEUTHGA) a été appliqué.

9.1. Zones d'étude

Le modèle SLEUTH a été appliqué à deux agglomérations urbaines : l'agglomération de Goma et celle de Bukavu. L'agglomération de Goma est une région qui s'étend entre les

latitudes $1^{\circ}35' - 1^{\circ}42'S$ et la longitude $29^{\circ}60' - 29^{\circ}20'E$. Elle couvre la ville de Goma et comprend également des villes proches de celle-ci en République démocratique du Congo (RDC) et en République du Rwanda (Rwanda). L'agglomération de ville de Bukavu se situe entre les latitudes $2^{\circ}27' - 2^{\circ}35'S$ et la longitude $28^{\circ}47' - 28^{\circ}56'E$. Elle couvre la ville principale de Bukavu et des villes de la RDC et du Rwanda. Ces deux agglomérations urbaines se situent sur la rive du lac Kivu et sont les deux plus grandes agglomérations urbaines autour du lac.

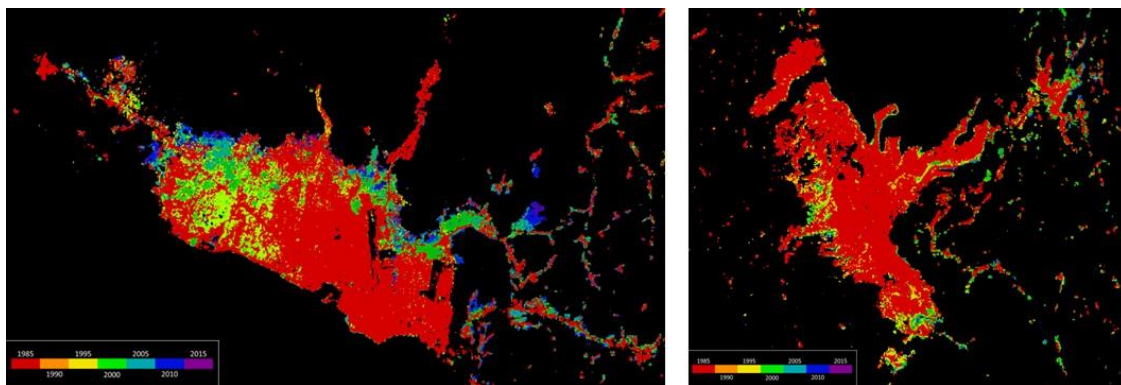


9.1 Grandes lignes des domaines pour lesquels des simulations SLEUTH sont effectuées.

9.2. Données

SLEUTH comporte deux modèles et requiert 6 types d'entrées pour simuler la croissance urbaine dans le futur. Pour le modèle UGM, 5 entrées suffisent. Il s'agit de la pente, la couche des zones exclues, les couches urbaines, les couches de trafic et la couche d'ombre des pentes. Afin de simuler la croissance d'une ville, il convient de prendre en considération l'histoire sous-jacente. La RDC et le Rwanda ont connu de guerres civiles qui ont débuté dans les années 1990 sur différentes périodes. Afin de mieux considérer les événements historiques locaux qui ont des effets sur la croissance urbaine historique dans les régions correspondantes, chacune des deux agglomérations urbaines a été séparée en deux parties le long de leurs frontières nationales. Le calibrage traditionnel en force brute nécessite au moins 4 couches urbaines historiques. Pour le modèle SLEUTH basé sur l'algorithme génétique, ce n'est plus obligatoire. La couche urbaine de l'année la plus ancienne sera automatiquement définie comme couche d'amorce, ce qui

signifie que toute croissance urbaine future se fera sur la base de l'étendue de la ville de cette année. Le reste des couches urbaines sera utilisé comme couches de référence pour contrôler la simulation de la croissance urbaine. Le World Settlement Footprint (WSF) (Marconcini *et al.*, 2020) est une série chronologique mondiale de données sur l'extension urbaine, avec une résolution temporelle d'un an, entre 1985 et 2015. Les couches urbaines utilisées dans cette étude ont été générées à partir des données du WSF. Compte tenu de la période de guerre des deux pays, nous n'avons utilisé que les couches urbaines historiques après 2000. Dans cette étude, les couches de 2000, 2002, 2005, 2008 et 2010 ont été utilisées pour le calibrage et la couche urbaine de 2015 a été utilisée comme référence pour l'évaluation.



9.2 WSF à code couleur de deux zones d'étude

Les zones exclues indiquent les endroits où la ville ne peut pas se développer à l'avenir, par exemple les zones d'eau, les zones naturelles préservées, les terrains à usage industriel ou militaire. Dans le cadre de cette étude, l'eau et les zones naturelles préservées ont été prises en considération. Les couches du masque eau pour les deux régions ont été générées à partir d'images prises par le satellite Sentinel-1. Les couches de zones naturelles préservées proviennent de la base de données mondiale sur les zones protégées (*World Database on Protected Areas, WDPA*) et d'autres mesures efficaces de conservation par zone (*Other Effective area-based Conservation Measurement, OECM*) (<https://www.protectedplanet.net/>). Ces deux couches ont été combinées en une seule couche binaire de zones exclues et ont servi d'entrées pour le modèle SLEUTH. La couche trafic donne des informations sur la localisation du réseau routier. Ces données sont essentielles pour le calcul du coefficient de gravité en fonction de la route. Le modèle SLEUTH nécessite au moins deux couches de routes concernant des époques différentes pour le calibrage. Dans cette étude, les couches de routes sont issues de la base de données du projet d'inventaire routier mondial GRIP (*Global Road Inventory Project*) (<https://www.globio.info/download-grip-dataset>). Les couches relatives aux pentes et à l'ombrage des pentes ont été générées à partir d'un modèle numérique d'élévation (MNE). Dans cette étude, le MNE de Copernicus à une résolution de 30 mètres (<https://panda.copernicus.eu/>) a été utilisé.

9.3. Résultats et discussion

Comme mentionné au point 2.2, les deux agglomérations urbaines ont été séparées en deux parties en fonction des frontières nationales. Au total, 4 modèles SLEUTH ont été calibrés par rapport à leurs régions. L'indicateur OSM (*Optimal SLEUTH Metric*) (Dietzel and Clarke, 2007) et une courbe ROC (*Receiver Operating Characteristic*, fonction d'efficacité du récepteur) ont été utilisés pour l'évaluation. Sur la base de la courbe ROC, l'aire sous la courbe (ASC) a été calculée. Une ASC supérieure à 0,75 signifie que le modèle correspondant présente une bonne capacité de prédiction. Après évaluation, une prédiction future de la croissance urbaine jusqu'en 2050 a été mise en œuvre sur la base d'une couche urbaine initiale de 2015.

9.3.1. Agglomération urbaine de Goma en RDC

L'agglomération urbaine de Goma du côté de la RDC comprend les villes de Goma, Nyiragongo, MasisiIdjwi et Kalehehas. Elle couvre une zone urbaine de 50,4135 km² (sur la base d'une résolution de 30 m) en 2015. L'évaluation des résultats de la simulation a donné un indicateur OSM de 70,16 % et une valeur ASC de 95,99 %, ce qui montre que SLEUTH a été bien calibré dans cette région. Après le calibrage, une prédiction jusqu'en 2050 a été appliquée à cette région. Le modèle SLEUTH produit une carte de probabilité pour l'extension urbaine annoncée, donnant une valeur de probabilité d'urbanisation pour chaque pixel. Pour mieux représenter et analyser l'extension urbaine future, un seuil de probabilité de 80 % a été choisi, en partant du principe que les pixels dont la probabilité est supérieure à 80 % seront définis comme des pixels urbains en 2050.

Les résultats montrent une croissance le long de la partie nord de la ville en raison du terrain aplani dans cette région. La partie nord-ouest semble avoir révélé une plus forte croissance que la partie ouest. Au total, la ville s'étendrait de 7,6887 km².

9.3.2. Agglomération urbaine de Goma au Rwanda

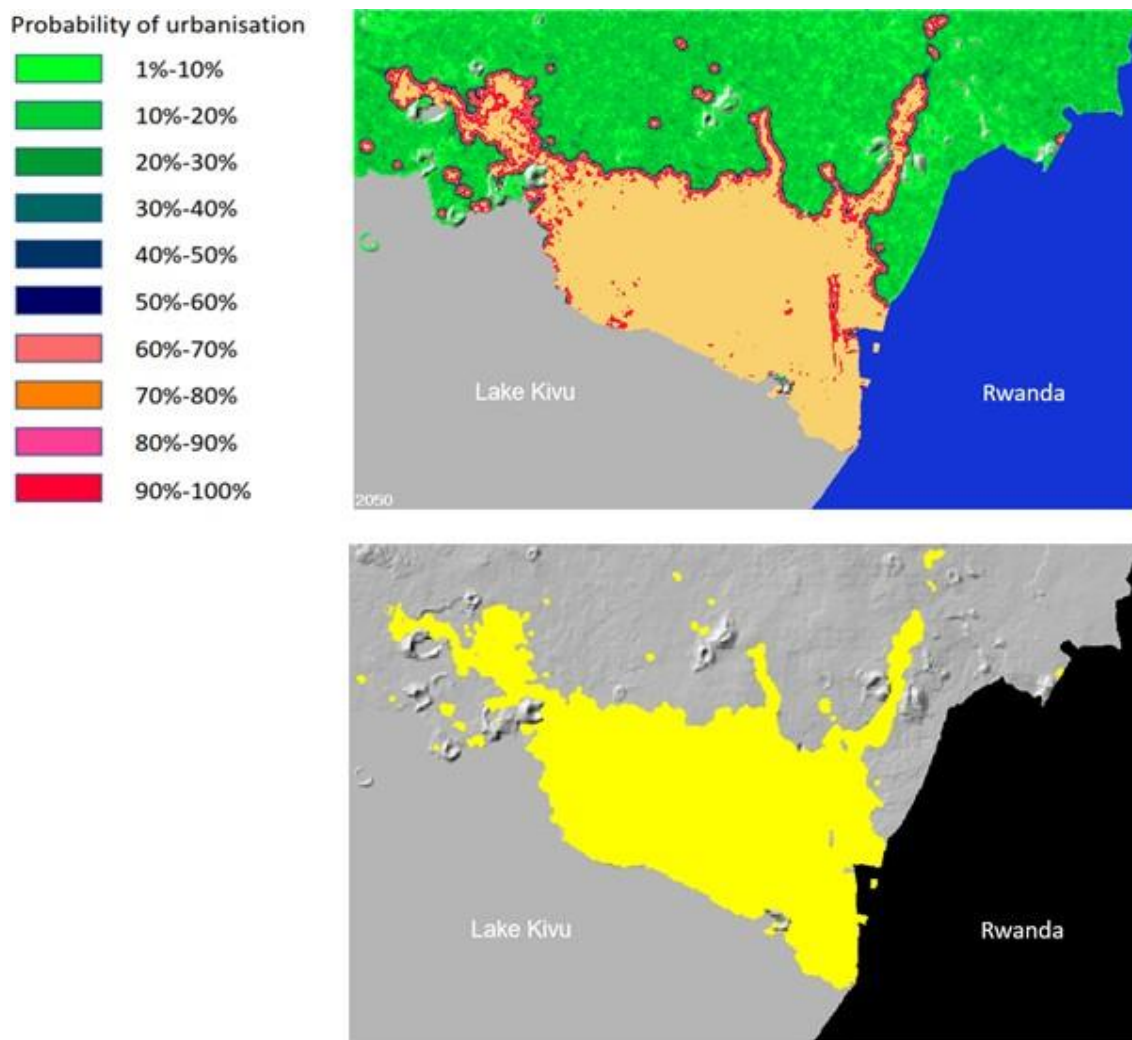
L'agglomération urbaine de Goma du côté rwandais englobe la ville de Gisenyi, Cyanzarwe, Busasamana, Nyundo, Nyamyumba, Nyakiriba, le lac Kivu et Rugerero. Elle couvre une zone urbaine de 20,403 km² en 2015. L'évaluation de la sortie du modèle SLEUTH pour cette région a donné un OSM de 45,41 % et une ASC de 92,39 %.

Les prévisions à l'horizon 2050 montrent un développement urbain rapide dans cette région : selon le modèle, la ville doublera de taille et s'étendra sur 26,1888 km². La plupart des agglomérations urbaines nouvellement développées s'observeront le long des agglomérations urbaines existantes et la proportion d'une telle croissance à proximité d'une route serait plus élevée que la croissance à proximité de l'agglomération urbaine d'origine du côté ouest.

9.3.3. Agglomération urbaine de Bukavu en RDC

L'agglomération urbaine de Bukavu en RDC est située au sud du lac Kivu. Cette région surplombe la ville de Bukavu, de Kabare, de Walungu et possède des zones urbaines de

33,4521 km² en 2015. Les résultats du calibrage montrent une forte résistance à la pente dans cette région, en raison de son terrain complexe. L'évaluation basée sur la carte de 2015 donne un OSM de 84,82 % et une ASC de 88,73 %.



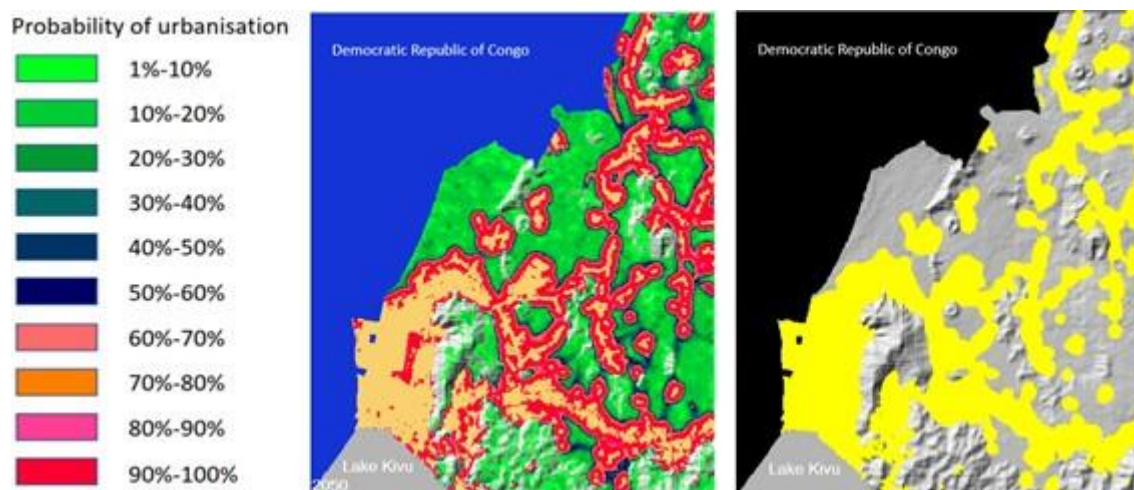
9.3 Carte de probabilité annoncée et carte d'extension urbaine prévue pour l'agglomération urbaine de Goma en RDC

Contrairement à la région de Goma, cette région est entourée d'une chaîne de montagnes. Comme le préréglage du modèle SLEUTH définit un seuil de pente de 21 degrés, le modèle ne simule pas la croissance de la ville sur une pente plus raide que ce seuil. Par conséquent, la carte de probabilité prévue pour 2050 montre une évolution lente à l'avenir. Toutefois, selon le modèle, il y aura encore quelques développements urbains mineurs dans les zones plates comme les régions côtières. Au total, ce sont 1,3878 km² de zones urbaines qui se développeront jusqu'en 2050.

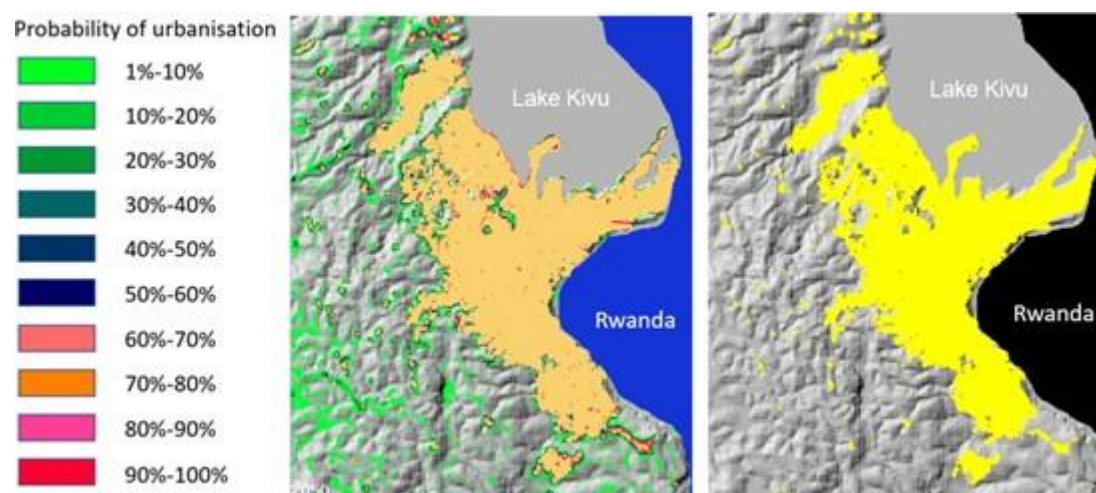
9.3.4. Agglomération urbaine de Bukavu en République Rwanda

L'agglomération urbaine du côté rwandais se répartit de manière éparse. Elle comprend la ville principale de Gihundwe, ainsi que des parties des villes de Gashonga, Giheke,

Kamembe, Mururu et Nyakarenzo. Le plus grand groupe de villes de cette région est celui de Gihundwe, Au total, cette région englobe des zones urbaines de 7,8552 km² en 2015. L'évaluation du modèle a donné un indicateur OSM de 74,84 % et une ASC de 82,45 %.



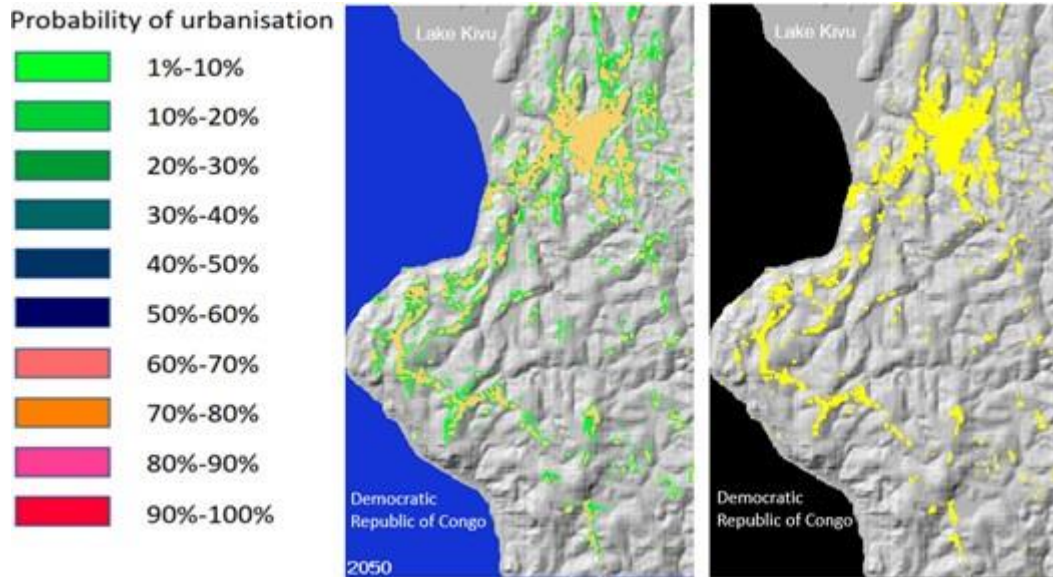
9.4 Carte de probabilité annoncée et carte d'extension urbaine prévue pour l'agglomération urbaine de Goma au Rwanda



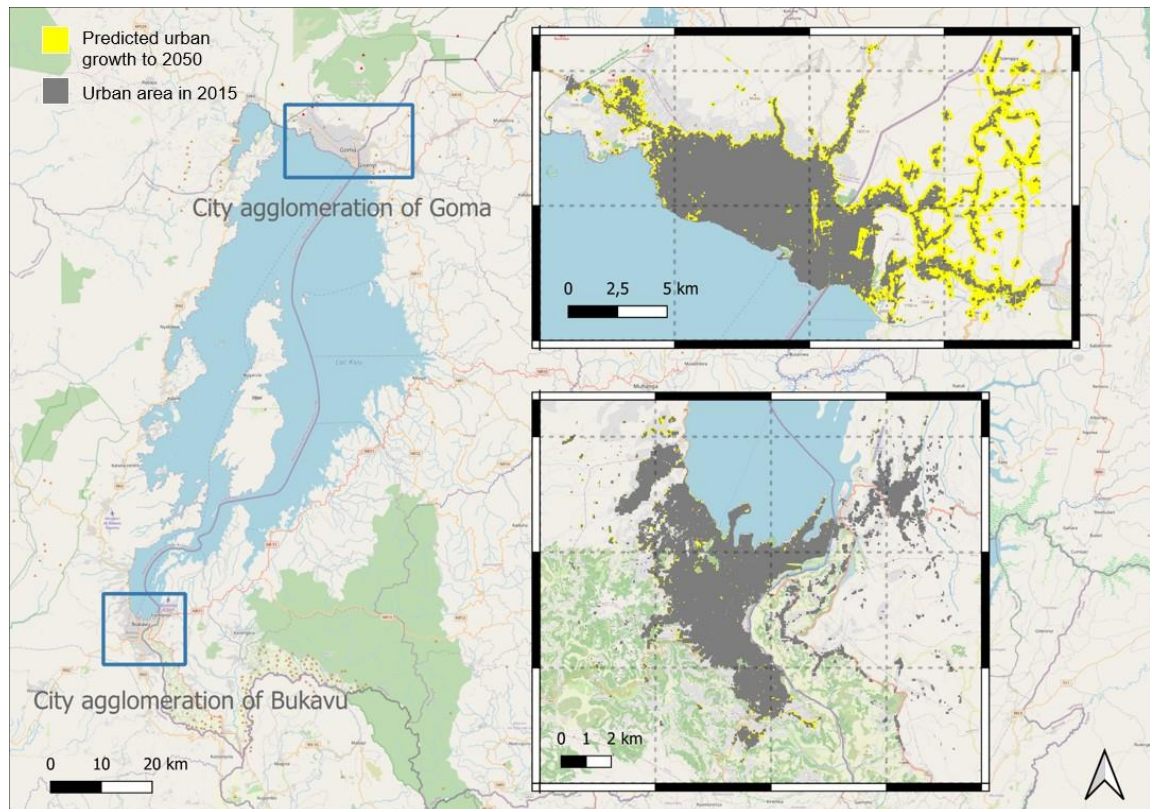
9.5 Carte de probabilité annoncée et carte d'extension urbaine prévue pour l'agglomération urbaine de Bukavu en RDC

La carte des probabilités annoncées montre qu'il n'y a pas de croissance dans cette région, bien que certaines zones aient le potentiel d'être urbanisées à l'avenir, la probabilité de cette croissance est généralement inférieure à 20 %. La première raison en est un taux de croissance extrêmement faible dans cette région entre 2000 et 2010. Puisque SLEUTH tire des enseignements de la croissance historique, le processus de croissance prévu sera également lent à l'avenir. Un autre facteur à prendre en compte est le terrain de cette région. En raison d'un coefficient élevé de résistance à la pente, la croissance de la ville est limitée sur les pentes escarpées. Ainsi, selon les prévisions, la ville ne changera pas de manière significative jusqu'en 2050.

La répartition de la croissance urbaine prévue jusqu'en 2050 de deux agglomérations urbaines est présentée à la figure 9.7.



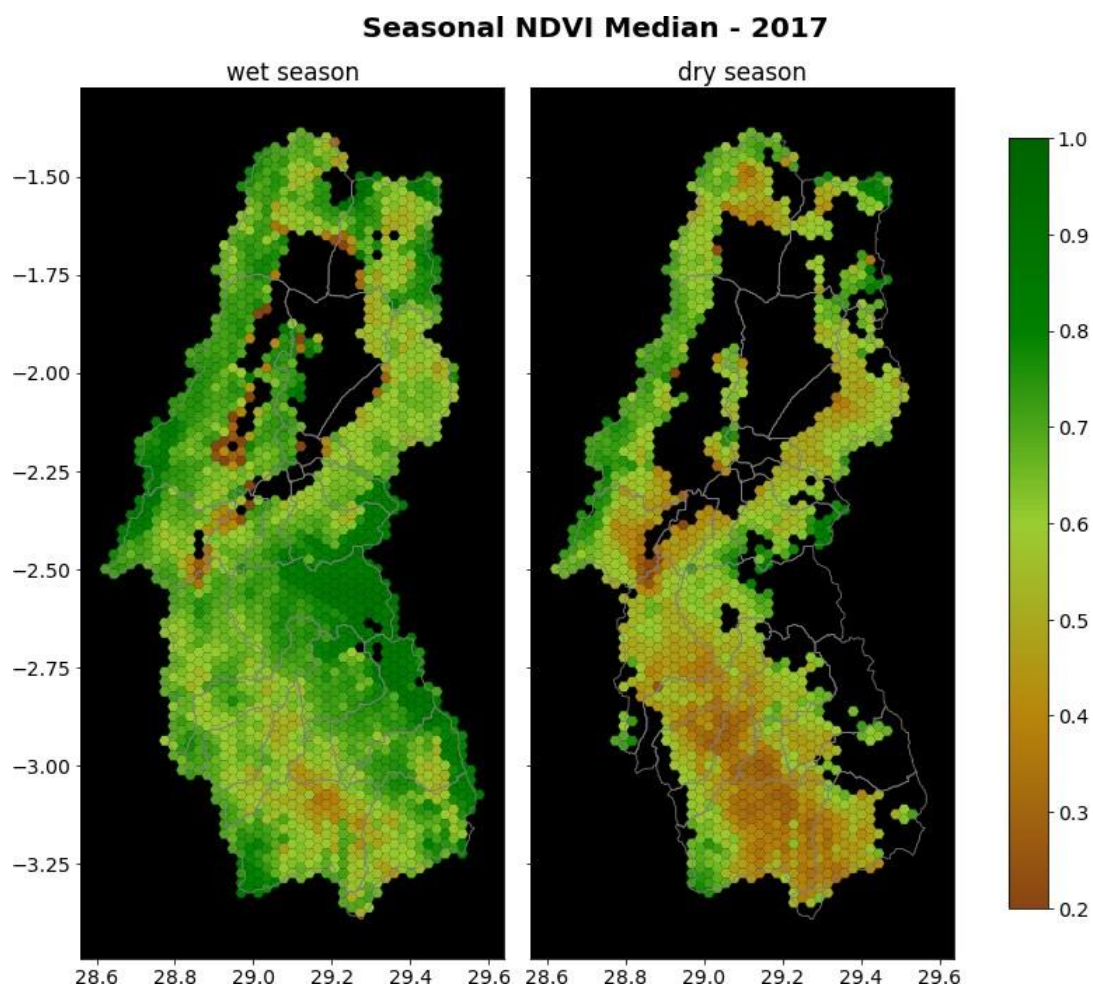
9.6 Carte de probabilité annoncée et carte d' extension urbaine prévue pour l' agglomération urbaine de Bukavu au Rwanda

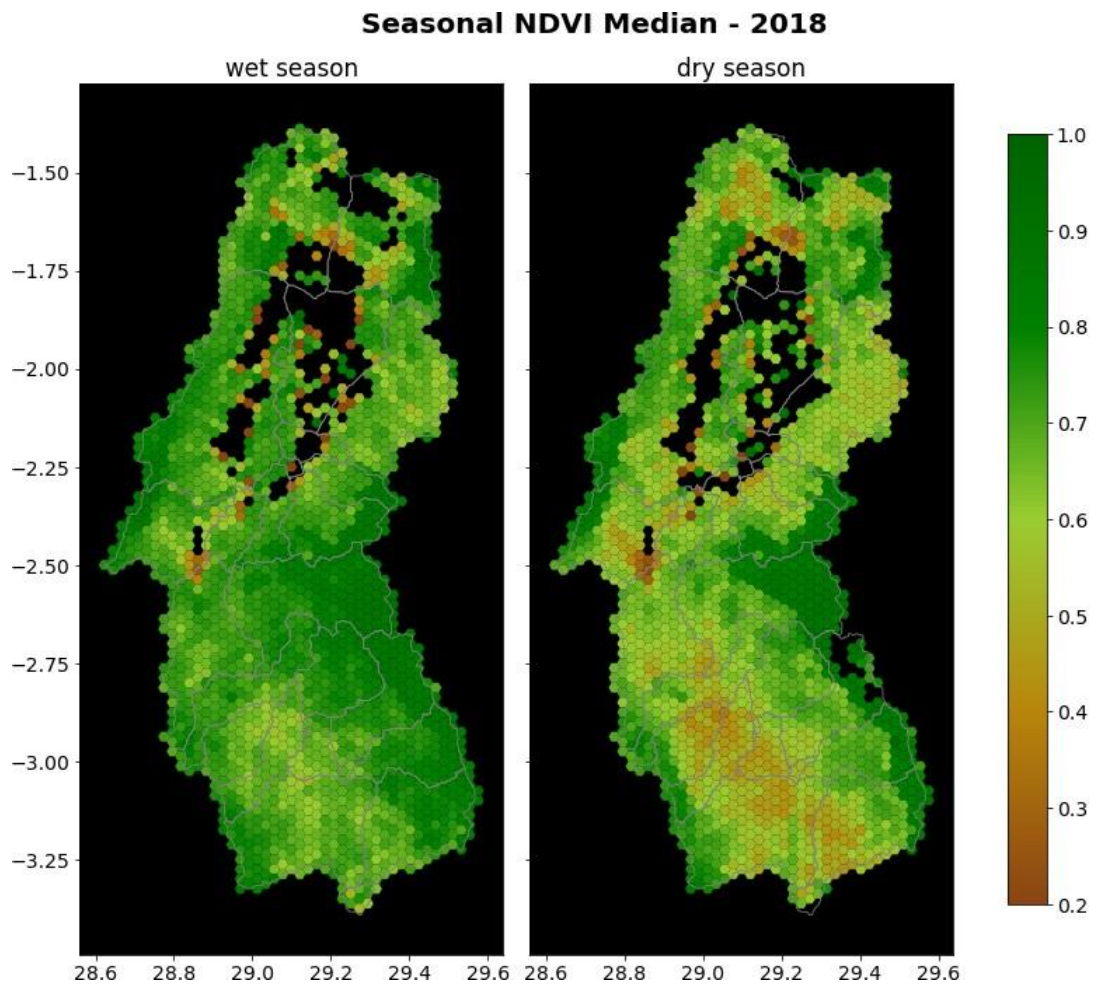


9.7 Prévision de la croissance urbaine jusqu' en 2050

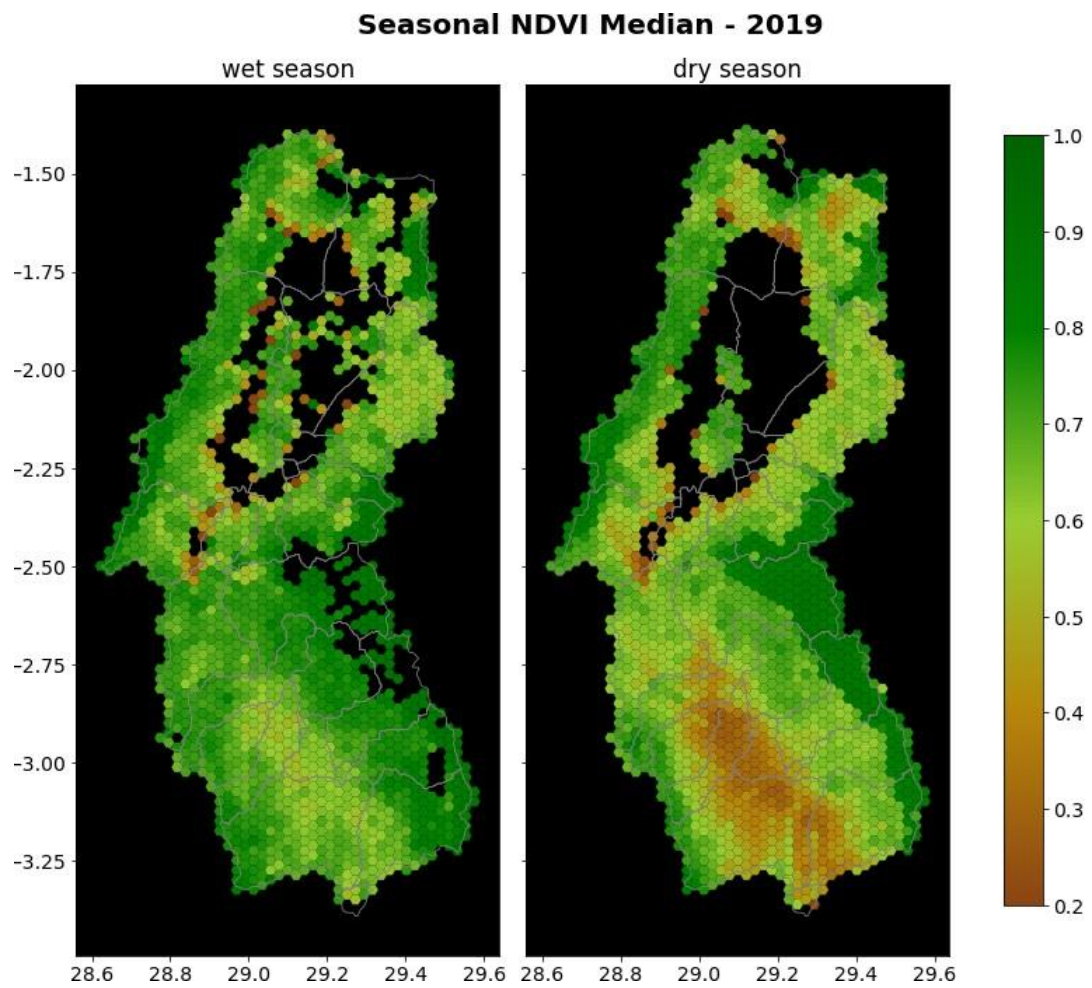
A. Annexe

A.1. Module de travail 1 : Dynamique de la végétation

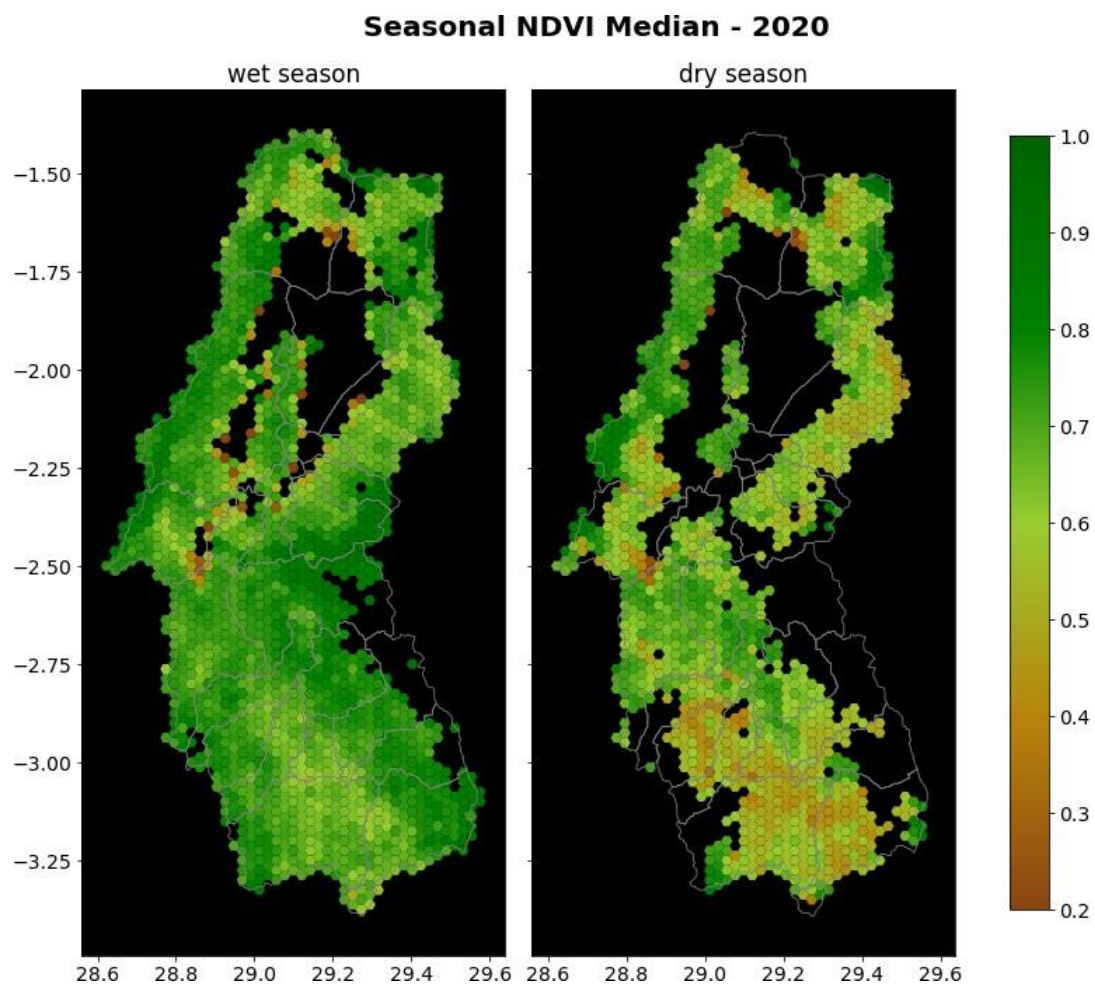




1.2 Médiante du NDVI de 2018 pour la saison sèche et la saison des pluies.

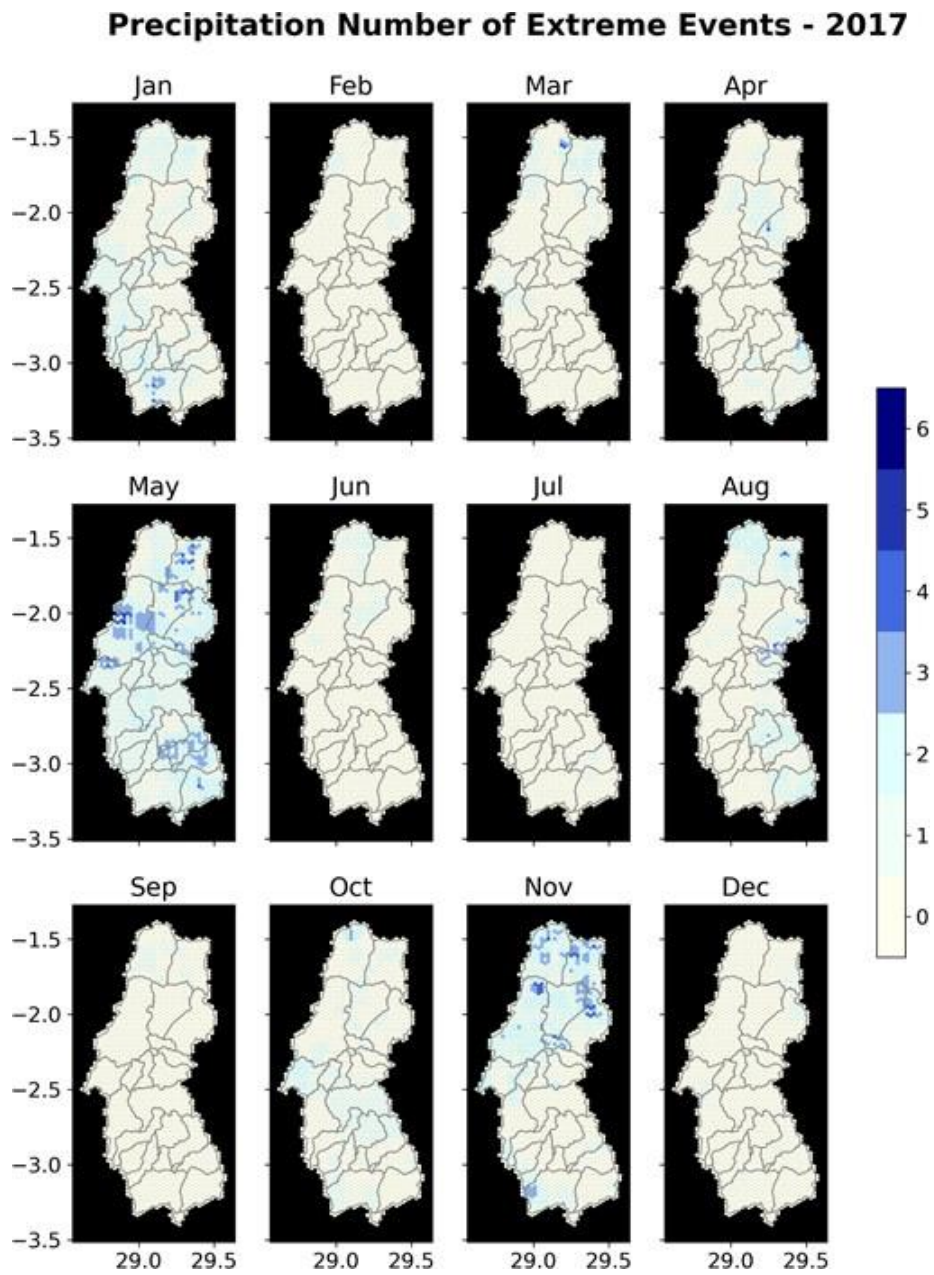


1.3 Médiane du NDVI de 2019 pour la saison sèche et la saison des pluies.

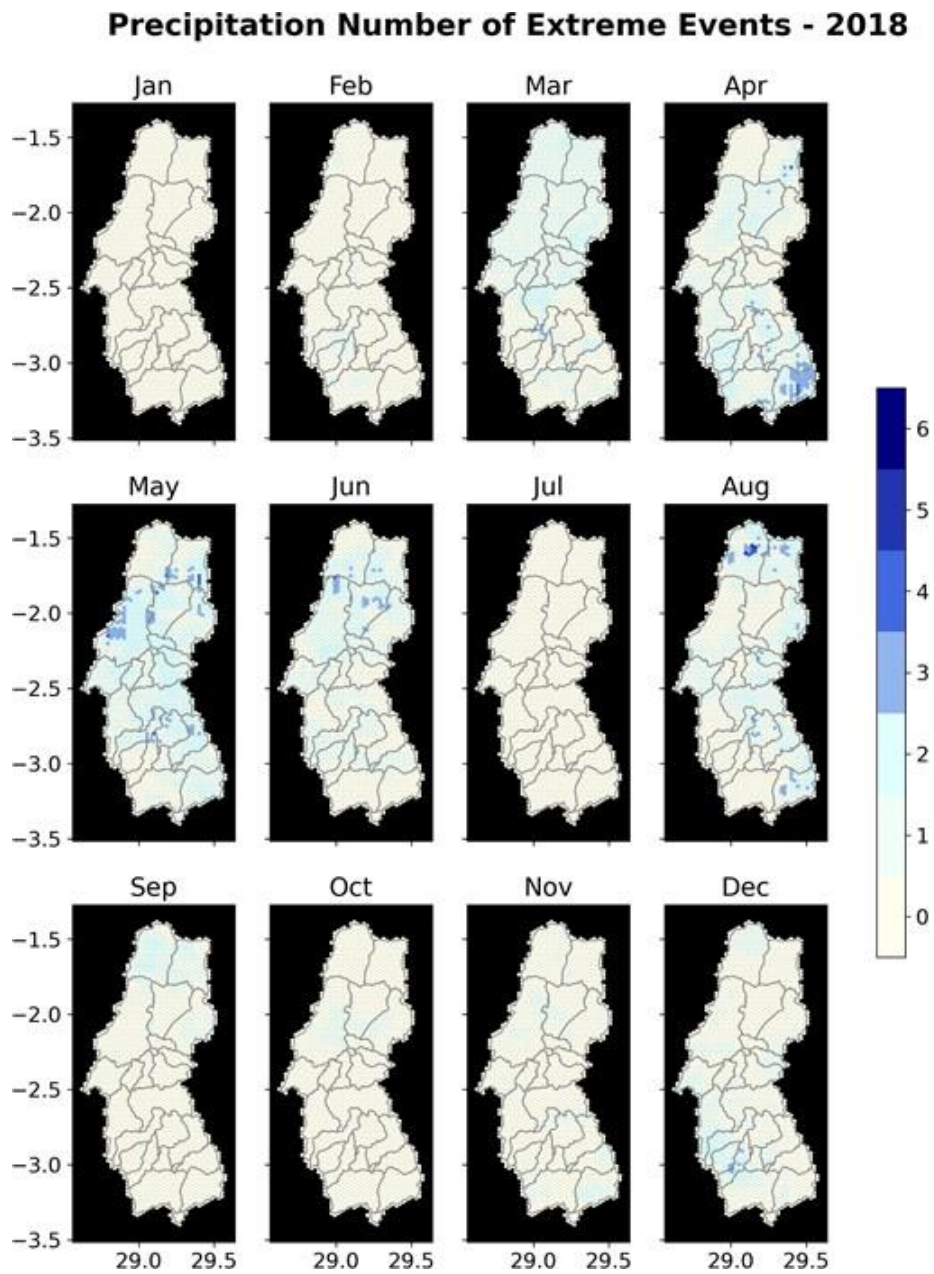


1.4 Médiante du NDVI de 2020 pour la saison sèche et la saison des pluies.

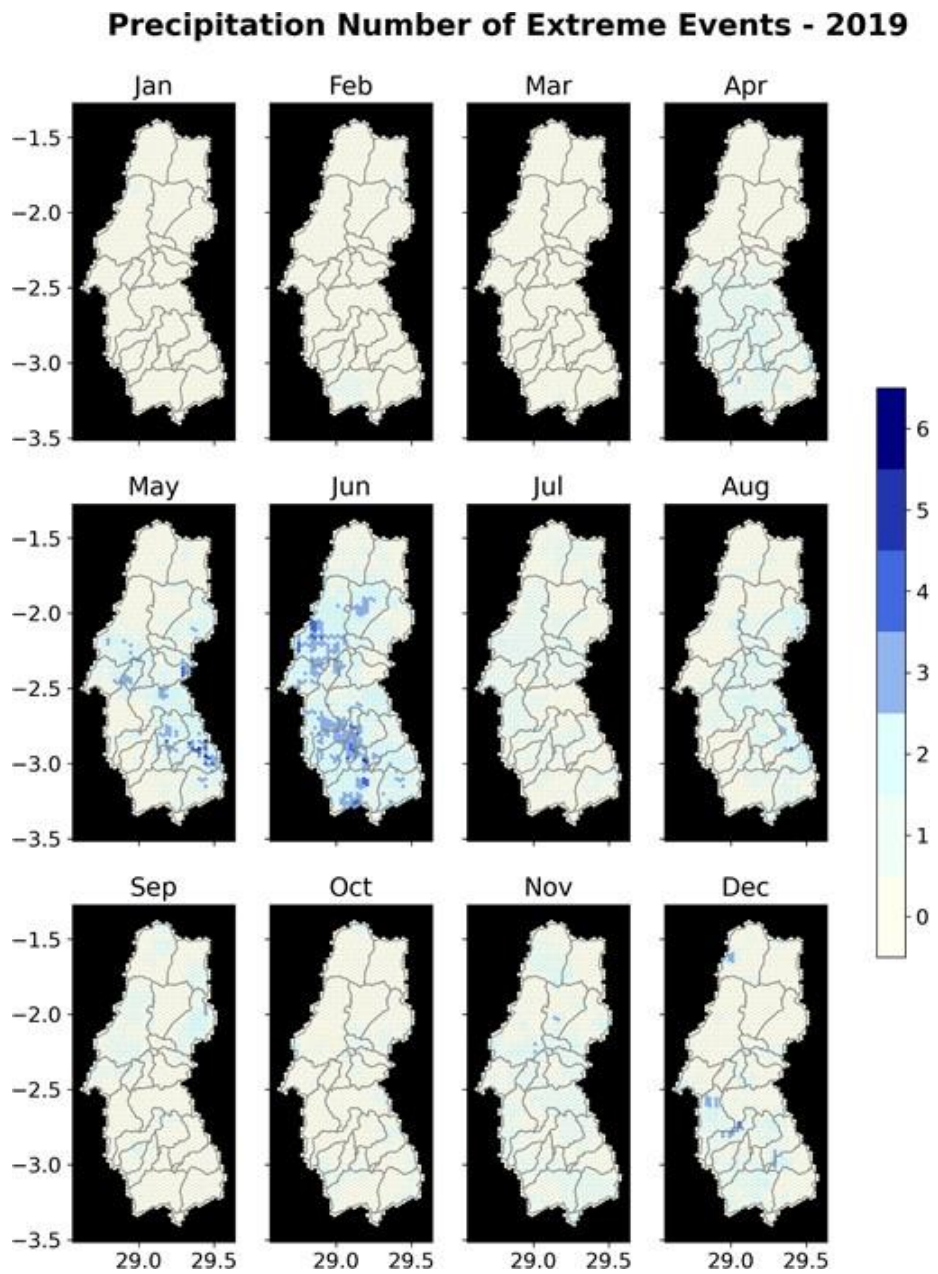
A.2. Module de travail 2 : Analyse des précipitations



1.5 Nombre mensuel moyen d' événements de précipitations extrêmes (c' est-à-dire supérieure au 99^e percentile) pour la saison sèche et la saison des pluies en 2017.

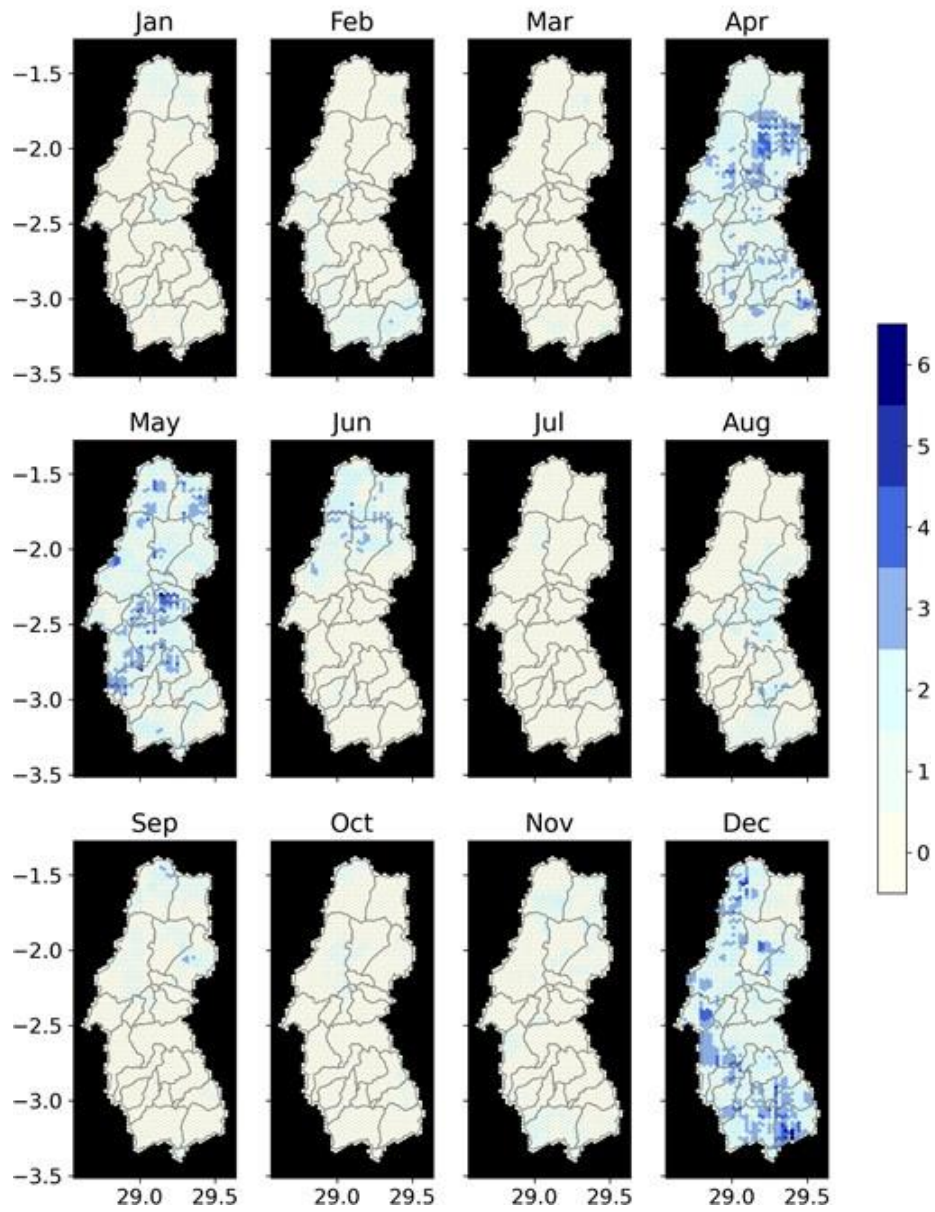


1.6 Nombre mensuel moyen d' événements de précipitations extrêmes (c' est-à-dire supérieure au 99^e percentile) pour la saison sèche et la saison des pluies en 2018.



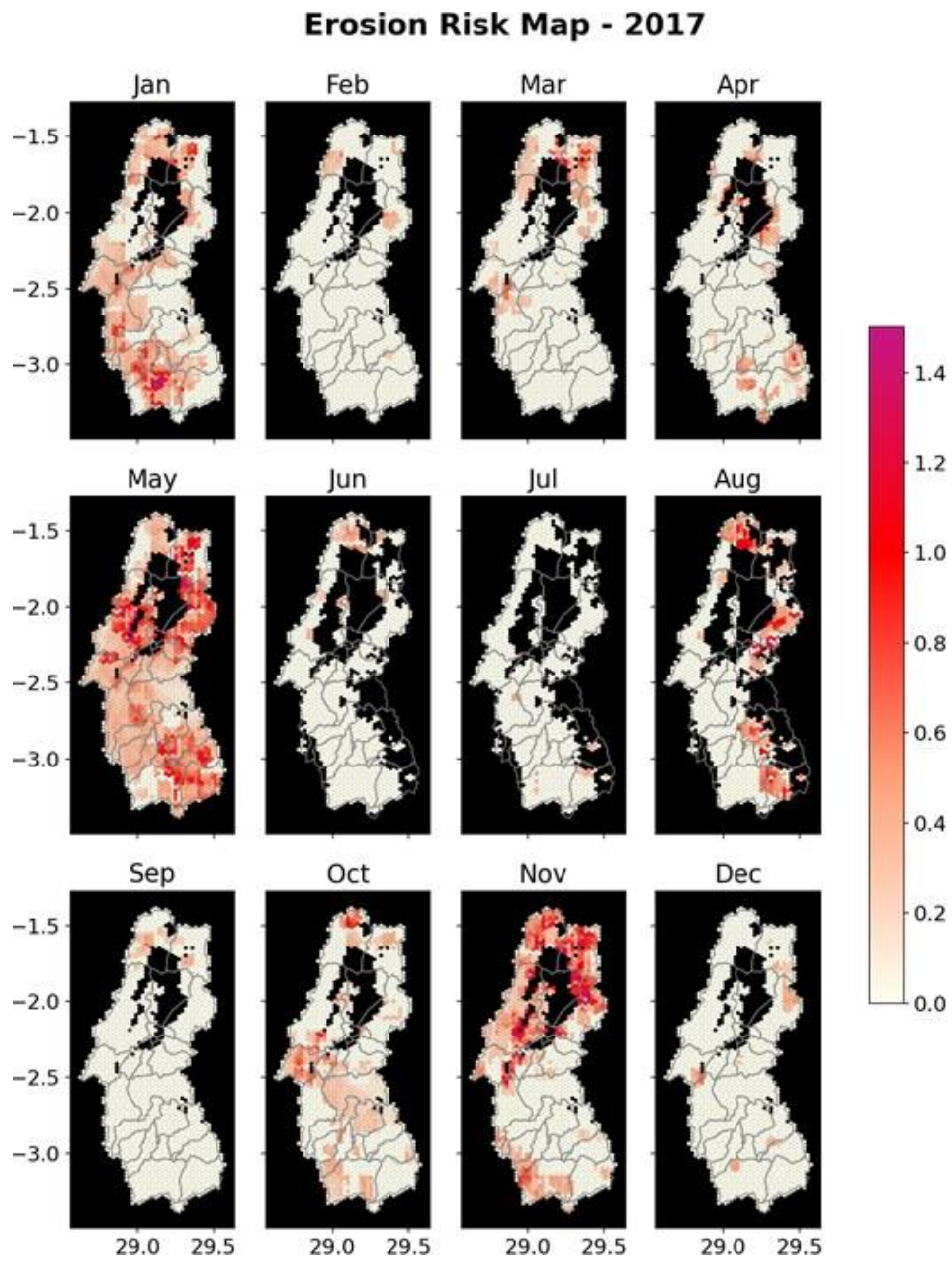
1.7 Nombre mensuel moyen d' événements de précipitations extrêmes (c' est-à-dire supérieure au 99^e percentile) pour la saison sèche et la saison des pluies en 2019.

Precipitation Number of Extreme Events - 2020

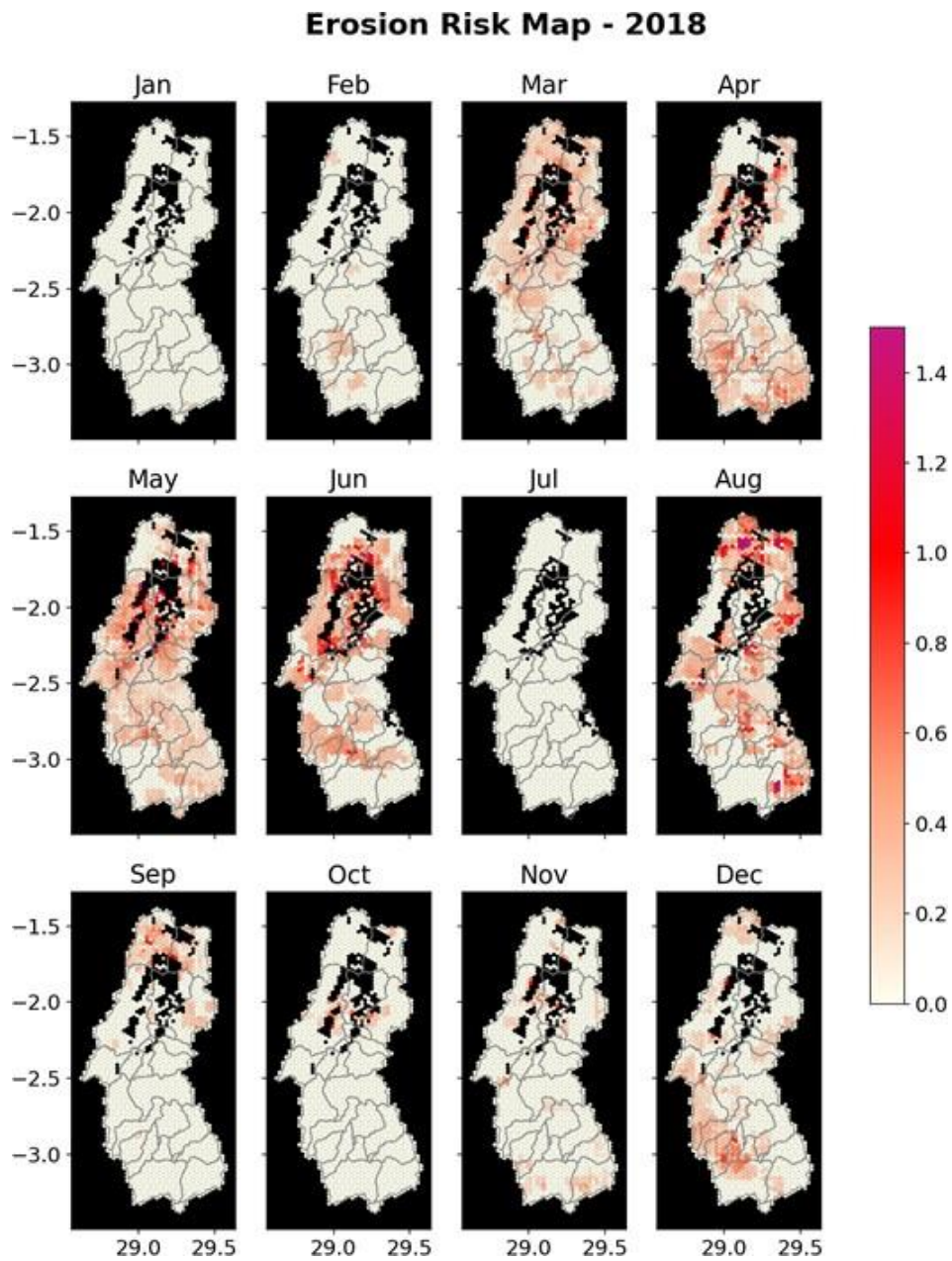


1.8 Nombre mensuel moyen d' événements de précipitations extrêmes (c' est-à-dire supérieure au 99^e percentile) pour la saison sèche et la saison des pluies en 2020.

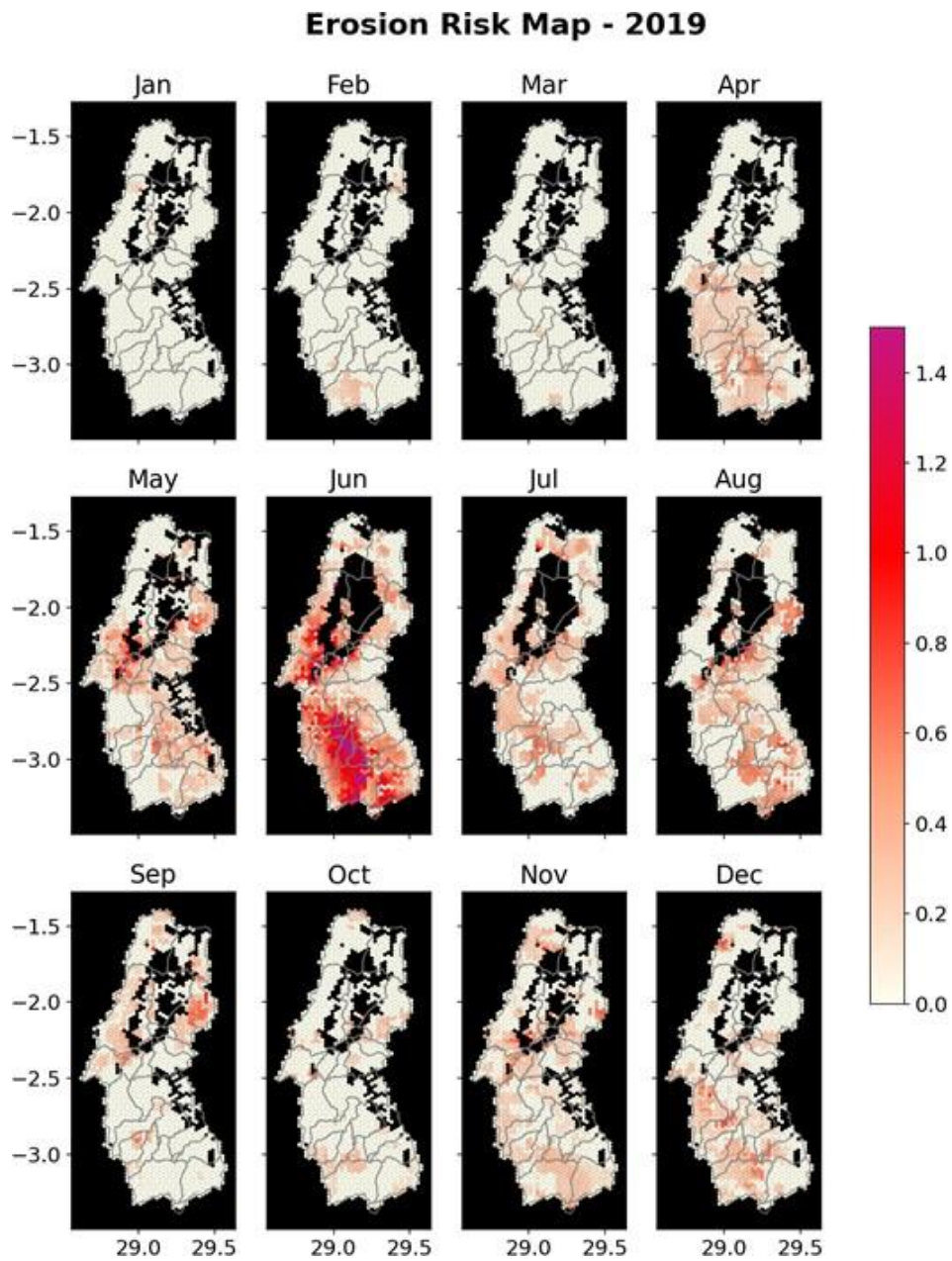
A.3. Analyse du risque d'érosion



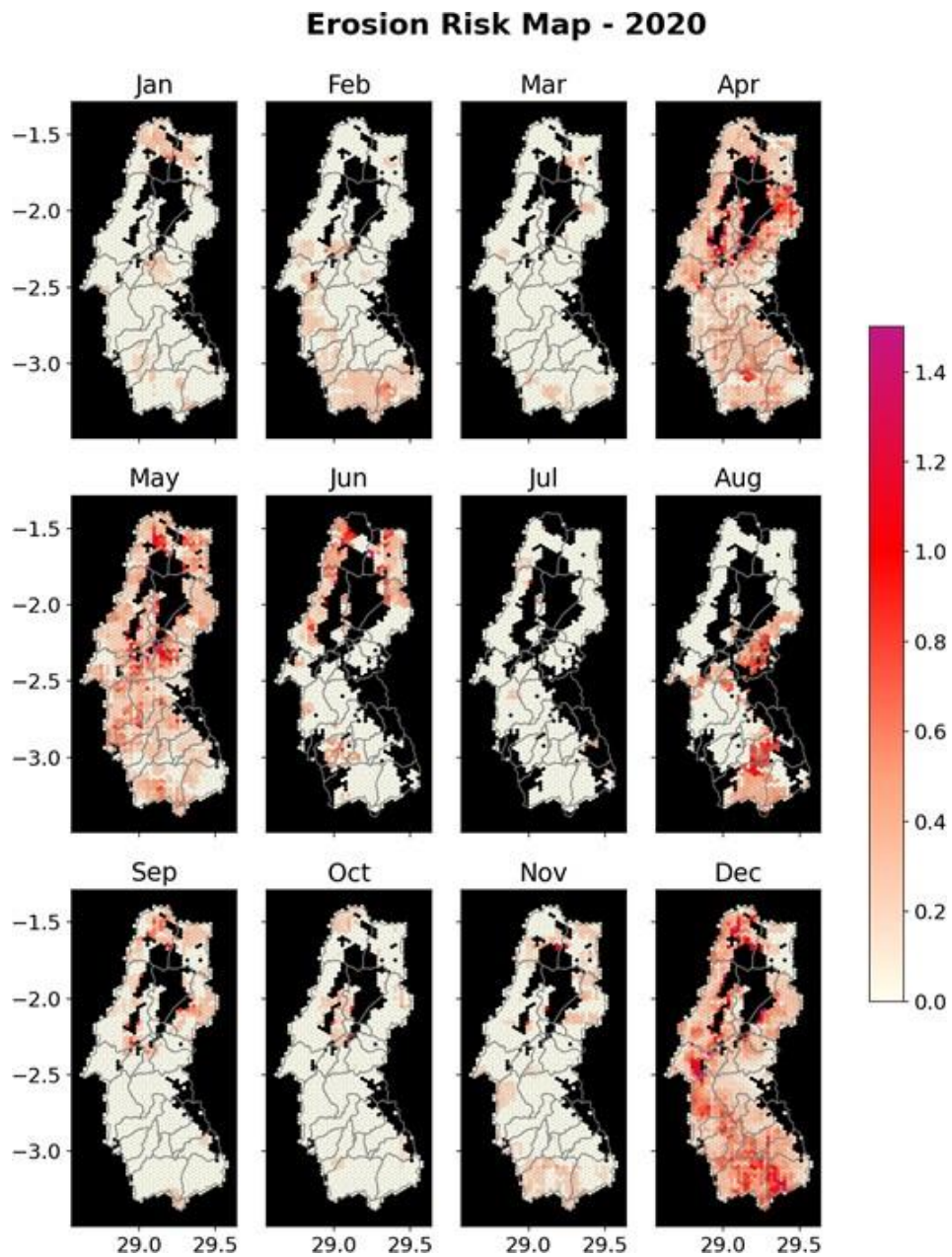
1.9 Carte du risque d'érosion dérivée de la multiplication du NDVI et des précipitations pour la saison sèche et des pluies de 2017.



1.10 Carte du risque d' érosion dérivée de la multiplication du NDVI et des précipitations pour la saison sèche et des pluies de 2018.

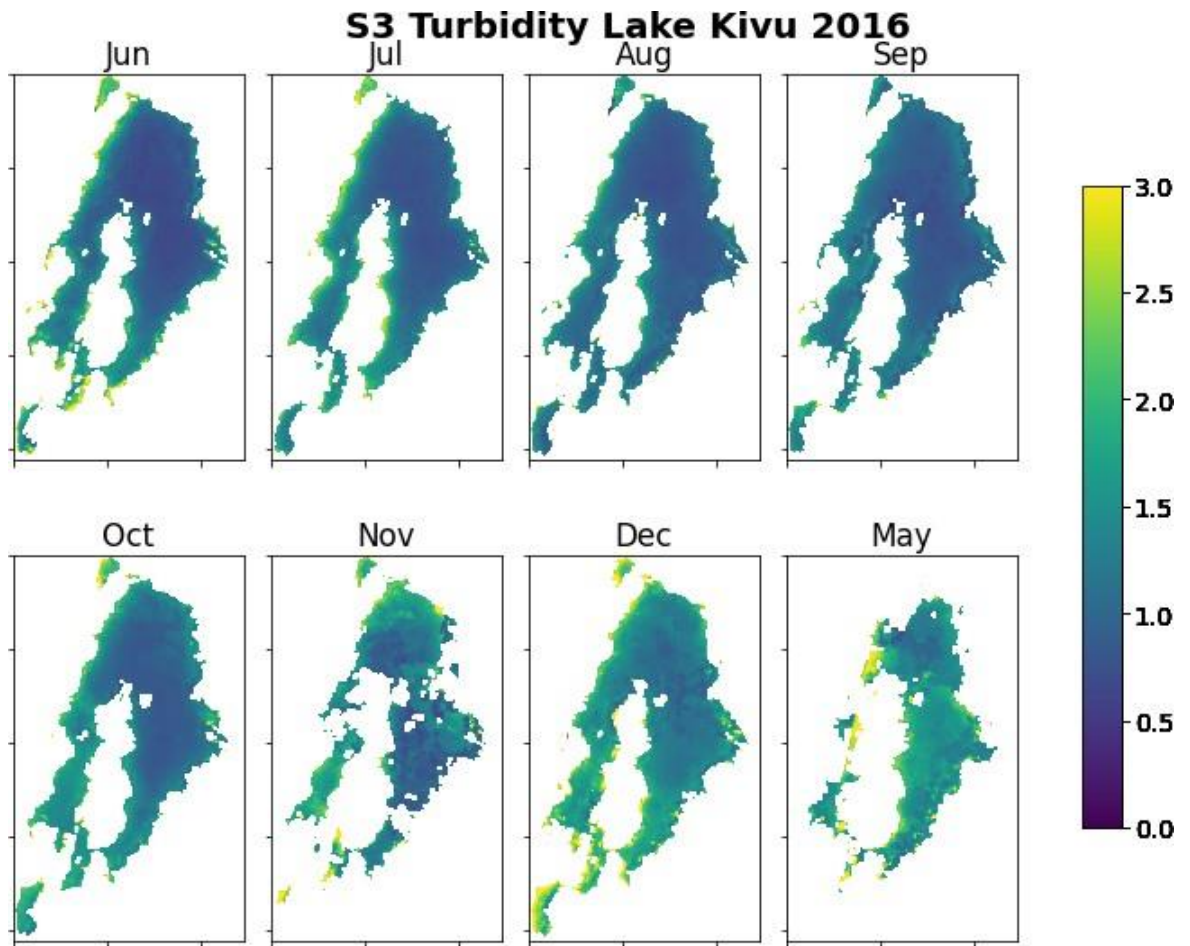


1.11 Carte du risque d' érosion dérivée de la multiplication du NDVI et des précipitations pour la saison sèche et des pluies de 2019.

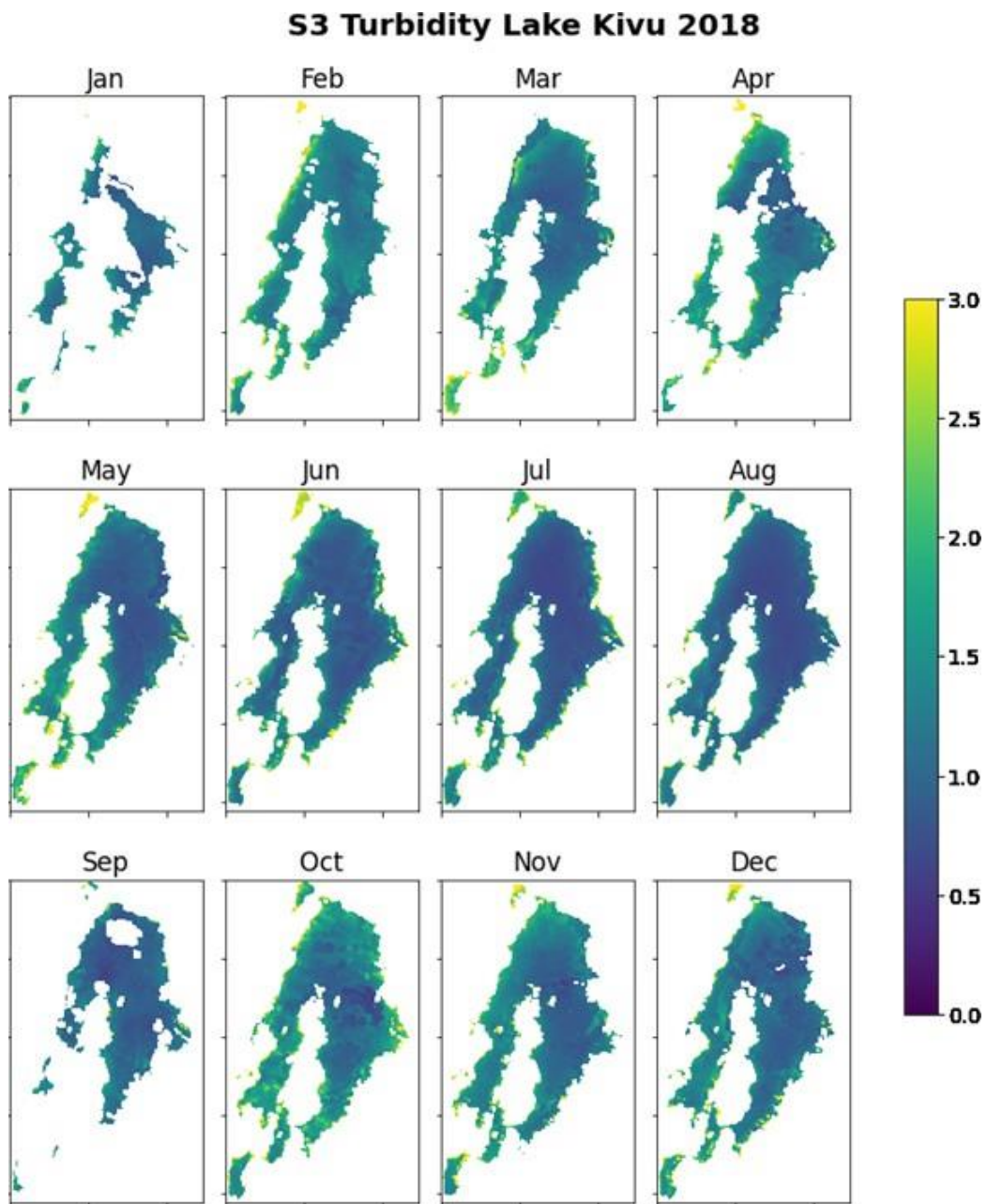


1.12 Carte du risque d' érosion dérivée de la multiplication du NDVI et des précipitations pour la saison sèche et des pluies de 2020.

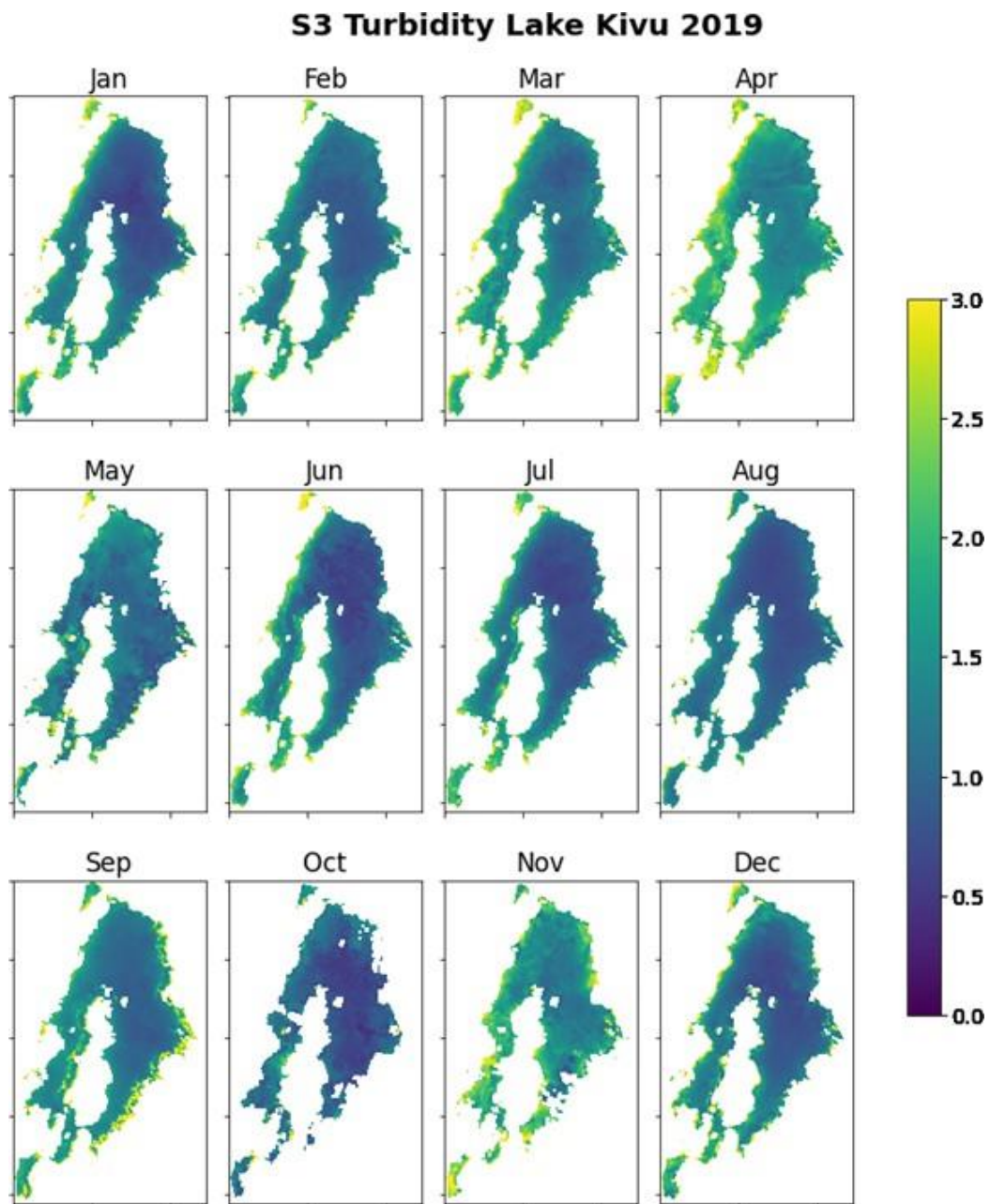
A.4. Module de travail 3 : Analyse de la turbidité



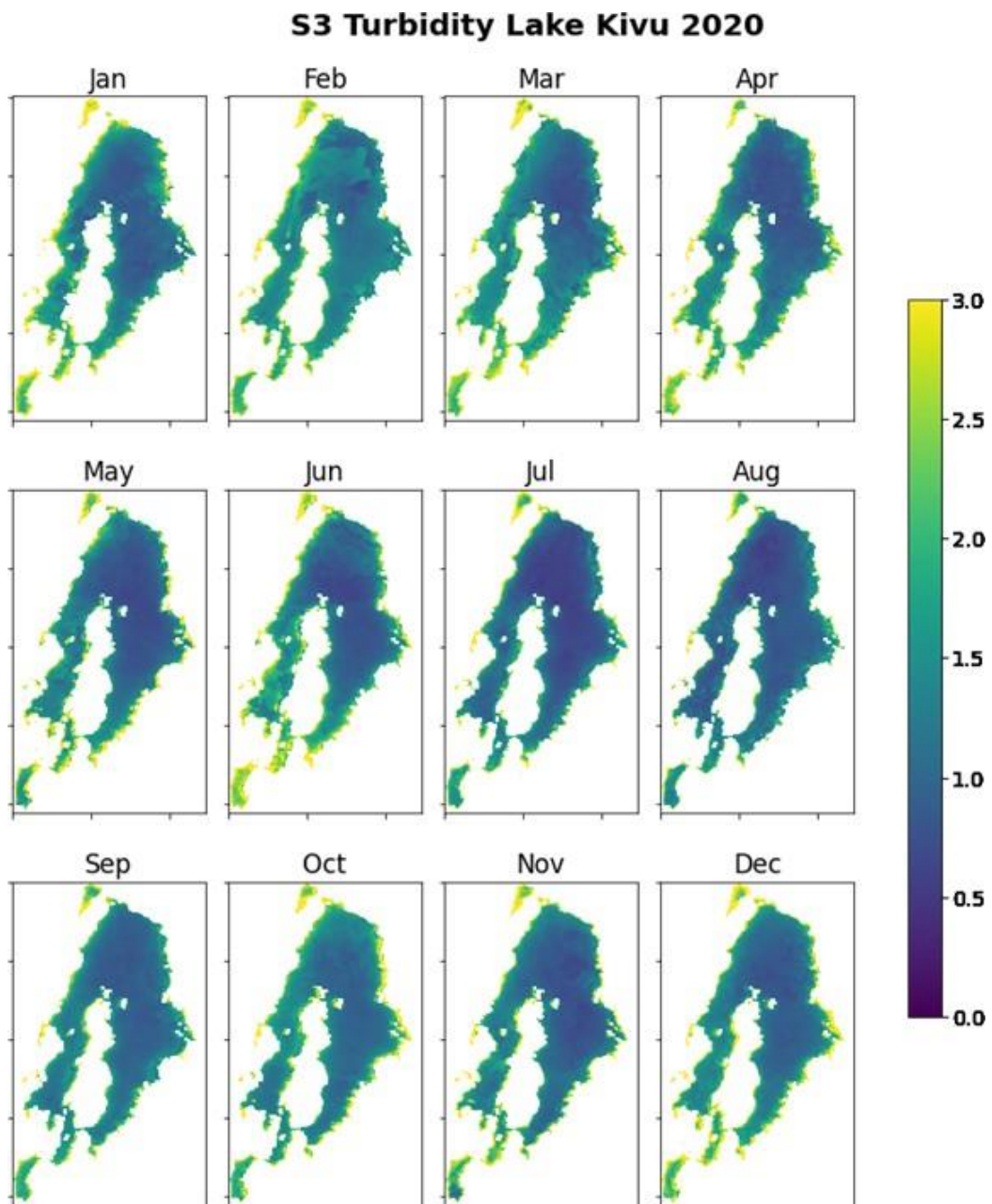
1.13 Turbidité moyenne mensuelle en 2017 pour le lac Kivu basée sur les données de turbidité de Sentinel-3.



1.14 Turbidité moyenne mensuelle en 2018 pour le lac Kivu basée sur les données de turbidité de Sentinel-3.



1.15 Turbidité moyenne mensuelle en 2019 pour le lac Kivu basée sur les données de turbidité de Sentinel-3.



1.16 Turbidité moyenne mensuelle en 2020 pour le lac Kivu basée sur les données de turbidité de Sentinel-3.

Bibliographie

- Akayezu, P., L. Musinguzi, V. Natugonza, R. Ogutu-Ohwayo, K. Mwathe, C. Dutton, and M. Manyifika (2020), Using sediment fingerprinting to identify erosion hotspots in a sub-catchment of lake kivu, rwanda.
- Borrelli, P., D. Robinson, Fleischer, and L. et al. (2017), An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion.
- Clarke, K. C. (2017), Improving sleuth calibration with a genetic algorithm, *Proceedings of the 3rd International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management (GISTAM 2017)*, 2, 319–326, doi:10.5220/0006381203190326.
- Clarke, K. C., S. Hoppen, and L. Gaydos (1997), A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the san francisco bay area, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24 (2), 247–261, doi:10.1068/b240247.
- Detsch, F., I. Otte, T. Appelhans, and T. Nauss (2016), A comparative study of cross-product ndvi dynamics in the kilimanjaro region—a matter of sensor, degradation calibration, and significance, *Remote Sensing*, 8 (2), doi:10.3390/rs8020159.
- Didan, K. (2021a), *MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V061*.
- Didan, K. (2021b), *MODIS/Aqua Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V061*.
- Dietzel, C., and K. Clarke (2007), Toward optimal calibration of the sleuth land use change model, *T. GIS*, 11, 29–45, doi:10.1111/j.1467-9671.2007.01031.x.
- Dinku, T., C. Funk, P. Peterson, R. Maidment, T. Tadesse, H. Gadain, and P. Ceccato (2018), Validation of the chirps satellite rainfall estimates over eastern africa, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 144 (S1), 292–312, doi:https://doi.org/10.1002/qj.3244.
- Eastman, J. R., F. Sangermano, E. A. Machado, J. Rogan, and A. Anyamba (2013), Global trends in seasonality of normalized difference vegetation index (ndvi), 1982–2011, *Remote Sensing*, 5 (10), 4799–4818, doi:10.3390/rs5104799.
- FAO and ITPS (2015), The status of the world’s soil resources (main report).
- Funk, C., P. Peterson, M. Landsfeld, D. Pedreros, J. Verdin, S. Shukla, G. Husak, J. Rowland, L. Harrison, A. Hoell, and J. Michaelsen (2015), The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes, *Scientific Data*, 2 (150066), doi:10.1038/sdata.2015.66.

- Hazarika, M., and H. Kiyoshi (2001), Estimation of soil erosion using remote sensing and gis, its valuation and economic implications on agricultural production, *Sustaining the Global Farm. Selected papers from the 10th International Soil Conservation Organization Meeting held May 24-29, 1999 at Purdue University and the USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory.*, pp. 1090–1093.
- Head, E. M., A. L. Maclean, and S. A. Carn (2013), Mapping lava flows from nyamuragira volcano (1967–2011) with satellite data and automated classification methods, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 4 (2), 119–144, doi:10.1080/19475705.2012.680503.
- Jurasinski, G., and C. Beierkuhnlein (2006), Spatial patterns of biodiversity—assessing vegetation using hexagonal grids, *Biology and Environment-proceedings of The Royal Irish Academy - BIOLOGY ENVIRONMENT*, 106, 401–411, doi:10.3318/BIOE.2006.106.3.401.
- Karamage, F., H. Shao, X. Chen, F. Ndayisaba, L. Nahayo, A. Kayiranga, K. Omifolaji, T. Liu, and C. Zhang (2016), Deforestation effects on soil erosion in the lake kivu basin, d.r. congo-rwanda, *Forests*, 7, 281, doi:10.3390/f7110281.
- Kayiranga, A., A. Kurban, F. Ndayisaba, L. Nahayo, F. Karamage, A. Ablekim, H. Li, and O. Ilniyaz (2016), Monitoring forest cover change and fragmentation using remote sensing and landscape metrics in nyungwe-kibira park, *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 04, 13–33, doi:10.4236/gep.2016.411003.
- La, H. (2013), Analysis of the relationship between modis ndvi, lai and rainfall in the forest region of rwanda, *International Journal of Digital Content Technology and its Applications*, 7, 559–569.
- Landmann, T., and O. Dubovyk (2014), Spatial analysis of human-induced vegetation productivity decline over eastern africa using a decade (2001–2011) of medium resolution modis time-series data, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 33, 76–82, doi:https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.04.020.
- Lehner, B., and G. Grill (2013), Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world’s large river systems, *Hydrological Processes*, 27 (15), 2171–2186.
- Marconcini, M., A. Metz-Marconcini, S. Üreyen, D. Palacios-Lopez, W. Hanke1, F. Bachofer, J. Zeidler, T. Esch, N. Gorelick, A. Kakarla, M. Paganini, and E. Strano (2020), Outlining where humans live, the world settlement footprint 2015., *Scientific Data*, 7 (242), doi:10.1038/s41597-020-00580-5.
- Musau, J., S. Patil, J. Sheffield et M. Marshall (2018), Vegetation dynamics and responses to climate anomalies in east africa, *Earth System Dynamics Discussions*, 2018, 1-27, doi:10.5194/esd-2017-123.



Immeuble de la CEPGL
GISENYI / RUBAVU - RWANDA
info@abakir.org

www.abakir.org