STAGE EN SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE (SIG) LIBRE

Promotion 2020-2021

SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE POUR LA GESTION DURABLE DES TERRES DU BASSIN VERSANT DU MONO (BÉNIN ET TOGO)

Nom de l'auteur : Mikhaïl Jean de Dieu Dotou **PADONOU**
Institution : Benin Ecotourism Concern (Eco-Benin)

Encadré par : David **CAMMAERTS**

Vitrine de compétences : https://bit.ly/3EmpTSL

Évaluation des compétences personnelles : https://bit.ly/3lsW8by

Projet d'application : https://bit.ly/3pqOOxY

Table des matières

1 Contexte....3
1.1. Contexte général....3
1.2. Contexte du projet d'application....4
1.3. Milieu d'étude....6
2 Objectifs....8
2.1. Objectifs généraux....8
2.2. Objectifs opérationnels....8
3 Apport bibliographique....8
4 Méthodologie conceptuelle....9
5 Données....11
5.1. Données nécessaires....11
5.3. Critique des données....12
6 Méthodologie concrète....13
6.1. Modélisation de l'érosion hydrique....13
6.2. Identification et spatialisation des mesures de gestion durable des terres....17
6.3. Mise en place d'un géo-portail....17
7 Résultats....18
7.1. Résultats de la modélisation de l'érosion hydrique....18
7.2. Identification des mesures de gestion durable des terres et géoportail....23
8 Application du projet dans le bassin versant....25
8.1. Intérêts du projet d'application....25
8.2. Limites du projet d'application....25
8.3. Démarche de mise en place du SIG....26
9 Bibliographie....27
Annexes....28
Annexe 1: Schéma de la méthodologie concrète du projet d'application....28
Annexe 2: Modèle graphique des analyses RUSLE réalisé sous QGIS....29

Liste des figures

Figure 1: Bassin versant du Mono....7
Figure 2: Schéma de la méthodologie conceptuelle....10
Figure 3: Schéma de flux du calcul de l'indice d'érosivité R....14
Figure 4: Schéma de flux du calcul du facteur de déclivité LS....14
Figure 5: Schéma de flux du calcul de l'indice d'érodibilité K....15
Figure 6: Schéma de flux du calcul du facteur de végétation C....16
Figure 7: Schéma de flux du calcul du facteur de soutien P....16
Figure 8: Variation de l'indice d'érosivité des pluies dans le bassin versant du Mono....18
Figure 9: Variation de l'indice d'érodibilité des pluies dans le bassin versant du Mono....19
Figure 10: Variation du facteur topographique dans le bassin versant du Mono....20
Figure 11: Variation du facteur de végétation dans le bassin versant du Mono....21
Figure 12: Variation du facteur de soutien dans le bassin versant du Mono....22
Figure 13: Estimation des pertes en sol dans le bassin versant du Mono....23
Figure 14: Mesures de gestion durable des terres dans le bassin versant du Mono....24

1 Contexte

1.1. Contexte général

L'érosion du sol se définit comme un enlèvement de la partie superficielle du sol par l'eau, le vent ou le travail du sol. Elle constitue plus de 80 % de la dégradation des terres en Afrique subsaharienne, affectant environ 22 % des terres agricoles et touchant tous les pays de la région (Montanarella *et al.*, 2016). Bien qu'il n'y a pas encore de consensus sur l'ampleur, la gravité et les impacts de la dégradation des sols dans la région, il a été estimé que sur les 494 millions d'hectares de terres en Afrique au sud du Sahara touchées par la dégradation des sols, 46 % sont affectés par l'érosion hydrique, 38 % par l'érosion éolienne, 12 % par la dégradation chimique et 4 % par la dégradation physique (Montanarella *et al.*, 2016). Ainsi, l'érosion hydrique est la forme d'érosion majoritaire observée dans la région. Cette forme d'érosion s'observe lorsque l'écoulement de surface transporte des particules de sol détachées par l'impact des gouttes ou le ruissellement, ce qui entraîne souvent la présence de chemins clairement définis, comme des ruisselets ou des ravines (Montanarella *et al.*, 2016).

L'érosion des sols est causée par plusieurs facteurs naturels tels que le climat, la topographie, la couverture végétale, mais est exacerbée par les interventions humaines, incluant notamment des pratiques agricoles et de gestion des terres inadéquates, la déforestation, *etc* (Zhang *et al.*, 2017).

Quel qu'en soit le type, l'érosion des sols est un processus naturel qui a des impacts sur place (c'est-à-dire la perte de sols et de nutriments, en particulier sur les terres agricoles) et des impacts hors site (c'est-à-dire le dépôt de sédiments sur les champs de culture, la sédimentation dans les réservoirs, la pollution de l'eau, *etc*) (Zhang *et al.*, 2017).

Dans les zones érodées, la dégradation des sols entraîne des effets négatifs importants sur la production alimentaire et les moyens d'existence. En Afrique subsaharienne, les pertes de rendements attribuées à l'érosion vont de niveaux modérés (2 % de baisse sur plusieurs décennies) à des niveaux catastrophiques (plus de 50 %), selon la culture, le type de sol, le climat et les systèmes de production, avec la plupart des études faisant état de pertes importantes (Lal, 1993).

Dans les cours d'eau et plans d'eaux, le dépôt des sédiments provenant des processus d'érosion a des effets négatifs importants sur la qualité de l'eau (turbidité accrue, apports de nutriments…) et sur la faune benthique (colmatage des fonds). On estime que l'érosion des sols par l'eau dans le monde transporte hors des terres agricoles 23 à 42 millions de tonnes d'azote et 15 à 26 millions de tonnes de phosphore (Montanarella *et al.*, 2016). La fraction de nutriments perdus par les terres agricoles qui atteint les cours d'eau varie considérablement en fonction des caractéristiques des bassins versants, mais dans de nombreuses régions, elle est assez importante pour provoquer une

eutrophisation significative. Les masses d'eau touchées vont des petites zones humides intégrées dans les paysages agricoles jusqu'à de vastes zones qui, suite à un processus d'eutrophisation alimenté par cet apport en nutriment, basculent dans un état d'hypoxie. Cela concerne par exemple les zones « mortes » dans les sites marins proches du rivage. L'érosion des sols des paysages agricoles contribue également à la sédimentation dans les lacs et les réservoirs, ce qui réduit leur durée de vie effective (Montanarella *et al.*, 2016).

Le bassin versant du fleuve Mono, situé à cheval sur les territoires du Bénin et du Togo, est lui aussi impacté par l'érosion hydrique. Entre 1985 et 2000, du fait de la dégradation des terres dans ce bassin versant, de la légère reprise pluviométrique et de la modification du régime hydrologique du Mono, causée par les lâchers d'eau du barrage Nangbéto situé en amont, le lit du système lagunaire de la basse vallée dudit bassin a subi un processus de comblement à un rythme de 1,6 mm par an. Ceci a eu comme corollaire une réduction de 4 % des superficies des plans d'eau du bassin versant (Amoussou, 2010). Par conséquent, les rendements des terres agricoles situées en amont du bassin versant (au Togo) sont affectés (à cause du lessivage des sols désormais nus) tandis qu'en aval (delta du fleuve Mono au Bénin) l'envasement (par transport de la terre érodée vers les plans d'eaux) réduit sensiblement la production halieutique, impactant les moyens d'existences des communautés de pêcheurs. Sous l'effet des pressions anthropiques, ainsi que des changements climatiques, cette tendance pourrait s'exacerber dans les prochaines décennies. Il est donc important de développer des stratégies intégrées et participatives pour réduire l'érosion hydrique dans le bassin versant du fleuve Mono. C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent projet d'application intitulé : « Système d'information géographique pour la gestion durable des terres du bassin versant du Mono (Bénin et Togo). »

1.2. Contexte du projet d'application

Le bassin versant du Mono, partagé entre le Bénin et le Togo, abrite une diversité d'écosystèmes dont l'exploitation génère des revenus pour les populations riveraines du Bénin et du Togo. L'agriculture (principalement extensive), l'urbanisation et la surexploitation des ressources ligneuses, combinés aux changements climatiques, entraînent une déforestation qui a pour conséquence l'érosion des sols du bassin (Guedegbe, Sinsin et Doukkali, 2018). Ces pertes de sols impactent durement les moyens d'existences des agriculteurs et des pêcheurs.

Pour réduire l'érosion du bassin versant et donc les multiples impacts négatifs sur les eaux et les sols, la gestion durable des terres (GDT), incluant le reboisement, est l'une des mesures préconisées par l'Autorité du Bassin du Mono. Ladite autorité a été créée par la Convention portant statut du fleuve Mono et création de l'Autorité du Bassin du Mono dénommée « Convention

ABM » qui a été signée par les Chefs d'État du Bénin et du Togo, le 30 décembre 2014. Elle vise à promouvoir la coopération entre le Bénin et le Togo et à assurer un développement intégré et durable du bassin du Mono.

Plusieurs institutions développent des initiatives pour implémenter directement ou indirectement des mesures relevant de la GDT. Benin Ecotourism Concern (Eco-Benin) est une ONG béninoise à but non lucratif et apolitique créée en 1999. Pour le quinquennat 2020-2025, l'organisation a prévu dans son plan stratégique de « protéger et améliorer le cadre de vie et les services essentiels » à travers différents projets, dont la gestion intégrée des bassins versants hydrographiques. Ainsi, dans la basse vallée du bassin versant du Mono, elle œuvre notamment à la réduction de l'envasement des plans d'eaux par la restauration des mangroves, des plantations de bois de feu et aussi la diffusion des foyers (à bois) économes. Toutefois, pour adresser de manière conséquente les problèmes d'érosion du bassin versant du Mono, il est nécessaire que les acteurs inscrivent leurs interventions de GDT à une échelle spatiale favorisant un dialogue entre les utilisateurs situés en amont du bassin versant (les agriculteurs au Togo principalement) et ceux situés en aval. Le présent projet s'inscrit dans cet objectif. Il vise à doter les acteurs du bassin versant du Mono actifs dans la préservation et la GDT d'un système d'information géographique d'aide à la décision (SIG-AD) pour optimiser leurs projets de GDT dans ledit bassin. Cet outil facilitera les interventions des acteurs et orientera efficacement les ressources mobilisées par ces derniers, autorisant ainsi des économies importantes. Il permettra de spatialiser et prioriser les initiatives de gestion durable des terres en fonction des caractéristiques physico-géographiques, écologiques et humaines des zones d'intervention, lesquelles varient d'un point à un autre du bassin versant. Le SIG-AD permettra de définir avec précision et d'orienter efficacement les projets de GDT sur l'ensemble du territoire du bassin versant.

1.3. Milieu d'étude

Le bassin versant du Mono (figure 1) est situé entre les longitudes 0° 40'11,3681" E et 1° 57'2,9431" E et les latitudes 6° 14'27,8287" N et 9° 18'56,9401" N. D'une superficie d'environ 24126 km², il est situé sur les territoires du Bénin et du Togo (ce dernier recouvre 88 % de la surface du bassin versant). Avec un indice de compacité de Gravelius (qui est le rapport du périmètre du bassin versant à celui d'un cercle de même surface) égal à 2, il a une forme nettement allongée.

Le réseau hydrographique est d'une densité (le quotient de la somme des longueurs de tous les cours d'eau à la superficie du bassin drainé) de 1,05 km/km² et marquée par le fleuve Mono qui s'écoule sur 527 km du nord vers le sud. Son débit maximum de 409,7 m³/s est atteint en septembre et son débit d'étiage de 52,6 m³/s est observé en mars (Amoussou, 2010).

L'ensemble du bassin versant est inscrit sur des terrains d'une pente moyenne de l'ordre de 7 %. Il comporte un bassin sédimentaire côtier au sud, structuré en plaines littorales et plateaux. Ses plus hauts reliefs, situés au nord-ouest, sont constitués des monts Atacora et des monts du Togo (Amoussou, 2010) culminant à 937 m d'altitude.

Le bassin versant du Mono est caractérisé par deux types de climats. Le climat subéquatorial au sud avec un régime bimodal et le climat soudanien au nord avec un régime unimodal. La moyenne des précipitations annuelle dans le bassin versant est de 1776 mm (Amoussou, 2010).

Le bassin versant du Mono s'étend sur deux unités géologiques. Le socle cristallin au nord, constitué d'un mélange de roches métamorphiques et éruptives de l'Atacorien et du Dahoméen, occupe deux tiers du bassin. Les formations sédimentaires et de terre de barre au sud sont composées de faciès argilo sableux et marneuses (Amoussou, 2010).

Les champs et les jachères sont les unités d'occupation du sol qui dominent dans le bassin versant. Ils couvrent 70 % de la surface du bassin. La végétation naturelle, qui représente 28 % de la surface du bassin, est concentrée au nord-ouest et au sud. La densité moyenne de la population dans le bassin versant est estimée à 90 habitants par kilomètre carré.

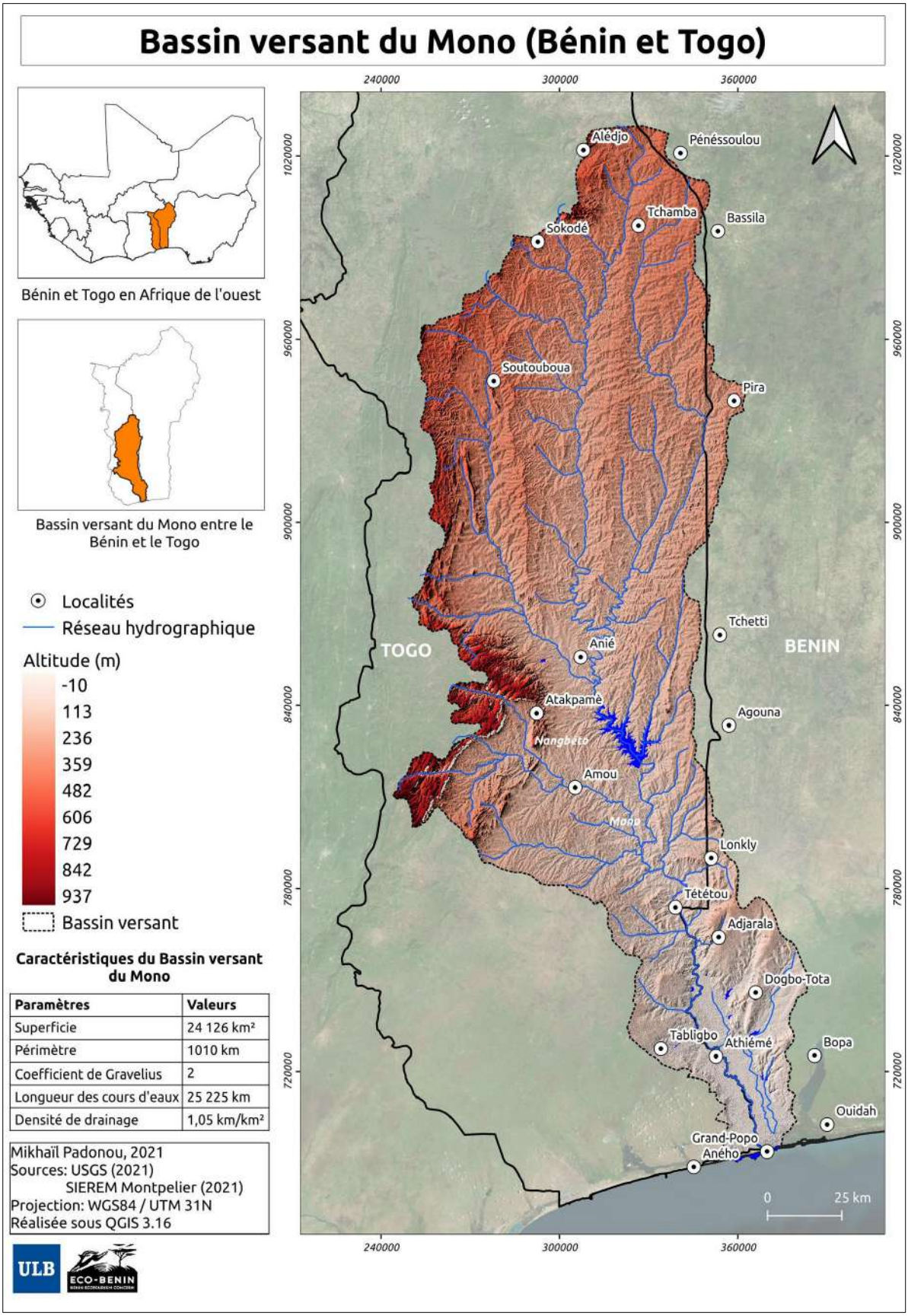


Figure 1: Bassin versant du Mono

2 Objectifs

2.1. Objectifs généraux

La finalité du projet d'application est de réaliser une modélisation spatiale de l'érosion hydrique des sols dans le bassin versant du Mono (Bénin et Togo) (OG1), prérequis à l'identification des mesures de gestion durable des terres les plus pertinentes selon des critères spatiaux (OG2), ceci afin de réduire les impacts de l'érosion. À terme, cette modélisation pourrait s'intégrer dans un système d'information géographique d'aide à la décision.

2.2. Objectifs opérationnels

■ **OO_1 :** Réaliser une carte des zones sensibles à l'érosion hydrique dans les différents territoires administratifs (communes ou préfectures) du bassin versant du Mono (Bénin et Togo). Cela implique : la conception d'une carte des pertes en sol annuel par unité de surface dans l'ensemble du bassin versant du Mono.

■ **OO_2 :** Réaliser une carte des mesures de gestion durable des terres adaptées à chaque territoire administratif du bassin versant du Mono (Bénin et Togo) selon le niveau de sensibilité à l'érosion hydrique des sols. Cela implique : (i) l'identification des mesures de gestion durable des terres adaptées à chaque zone selon les critères suivants : pentes, pluviométrie et occupation du sol ; (ii) la conception d'un géoportail interactif des mesures de gestion durable des terres et des pertes en sols adaptées à chaque territoire administratif du bassin versant du Mono (Bénin et Togo).

3 Apport bibliographique

- ***Payet, E., Dumas, P. & Pennober, G. (2012). Modélisation de l'érosion hydrique des sols sur un bassin versant du sud-ouest de Madagascar, le Fiherenana. VertigO, 11 (3).***

Cet article scientifique se base sur la méthode de modélisation USLE (Universal Soil Loss Équation) pour évaluer l'érosion hydrique dans un bassin versant du sud-ouest de Madagascar, érosion qui contribue à l'hyper sédimentation des littoraux. Cette méthode a permis de concevoir un modèle spatialisé et quantitatif de l'érosion hydrique potentielle sur le bassin versant. En utilisant des données relatives à la topographie, l'occupation du sol, la climatologie et la pédologie, l'équation USLE a permis de fournir une estimation des volumes de particules de sol susceptibles d'être arrachées et de spatialiser les zones les plus sensibles à l'érosion en nappe, cependant sans prise en compte des dynamiques de transport/sédimentation des matières terrigènes.

Selon le modèle USLE, l'érosion est une fonction multiplicative tenant compte du pouvoir érosif (érosivité) des pluies et de la résistance du milieu. Cinq facteurs servent à calculer les pertes en sol (A) : l'agressivité des précipitations (R) ; l'érodibilité du sol (K) ; la topographie (LS) ; le couvert végétal (C) et les pratiques antiérosives (P). L'équation USLE se présente sous la forme :

$$A = R*K*LS*C*P$$

- ***Ndiaye, D. S., & Touré, A. (2010). Best Practices: Recueil expériences de gestion durable des terres au Sénégal. Dakar : CSE.***

Ce recueil des bonnes pratiques en gestion durable des terres propose plusieurs formes de mesures adoptées au Sénégal selon le type de dégradation observée. Il décrit également pour chaque mesure de gestion durable des terres : les problèmes d'utilisations des terres, les conditions écologiques nécessaires pour la mise en place de la mesure, les étapes de mises en place pour lesquelles la mesure est adéquate, l'analyse des impacts, le niveau d'adoption au Sénégal, les points faibles et les points forts de chaque mesure. Ce recueil servira de guide dans l'identification des mesures de gestion durable des terres en fonction des critères qui seront retenus au terme de notre analyse.

- ***Ives Malongo, (2019). Digitalisation de données géologiques de la banque de données du Centre de Recherches Géologiques et Minières : République Démocratique du Congo (Cas de degrés carrés Mitwaba, Sampwe) de Ex-Province du Katanga. IGEAT, ULB***

Ce rapport de stage rédigé par un stagiaire (Stage IGEAT en SIG Libres) détaille les procédures de création de géoportails. Ce rapport servira donc de guide pour le développement de webmap et le partage des différentes cartes du projet.

4 Méthodologie conceptuelle

Le but du projet d'application est de rendre disponible un outil d'aide à la décision ouverte pour permettre aux institutions intervenant dans le bassin versant du Mono, aussi bien au Bénin qu'au Togo, de mieux planifier les interventions visant à réduire l'érosion hydrique dans ledit bassin. Pour y arriver, le travail sera structuré en trois grandes étapes synthétisé dans la figure 2 :

- ***Modélisation de l'érosion hydrique des sols***

Cette étape consiste à rassembler les données géospatiales (vectorielles et matricielles) nécessaires pour appliquer le modèle USLE, dont le principal extrant est la carte des pertes de sols. Une série de vérification sera faite pour s'assurer que les données reflètent les réalités de terrain. Il s'agira spécifiquement d'utiliser les fonds de carte satellite proposés par QuickMapServices pour vérifier les types de reliefs et l'adéquation des classes d'occupation des sols dans l'ensemble du bassin versant. Après ces vérifications, à l'aide notamment de la calculatrice raster, les cinq facteurs constituant les termes de l'équation USLE de perte de sols seront calculés. Il s'agit : (i) du facteur de déclivité (LS), dérivé du modèle numérique de terrain (SRTM) du bassin versant (ii) de l'indice de pouvoir érosif (érosivité) des pluies (R), dérivé de données pluviométriques (iii) de l'indice de sensibilité à l'érosion (érodibilité) des sols (K), obtenu à parti des données pédologiques (iv) du facteur de végétation (C), extrait des données d'occupation des sols et (v) du facteur de pratique de soutien (P), qui représente la protection du sol et les pratiques antiérosives réduisant la vitesse de ruissellement.

- ***Identification et spatialisation des mesures de gestion durable des terres***

Il s'agira à cette étape de concevoir une base de données PostGIS (Figure 1) simple dont la finalité est de créer, à travers des opérations de jointure et de requêtes spatiales, une carte qui spatialise différentes mesures de gestion durable des terres en fonction des pertes de sols. Les facteurs qui seront pris en compte dans cette analyse sont : (i) les mesures de gestion durable des terres et leurs conditions de mise en œuvre (ii) les taux de pertes en sol annuels (issues de la première étape) (iii) le type d'occupation du sol (iv) les pentes et (v) la pluviométrie.

Un géo-portail interactif a été réalisé pour présenter par unité administrative les mesures de gestion durable des terres retenues en lien avec les pertes en sol.

- ***Mise en place d'un géoportail***

L'ensemble des données géospatiales obtenues lors des deux premières étapes seront intégrées à un géoportail connecté à QGIS pour faciliter la visualisation par différents utilisateurs à l'aide de qgis2web.

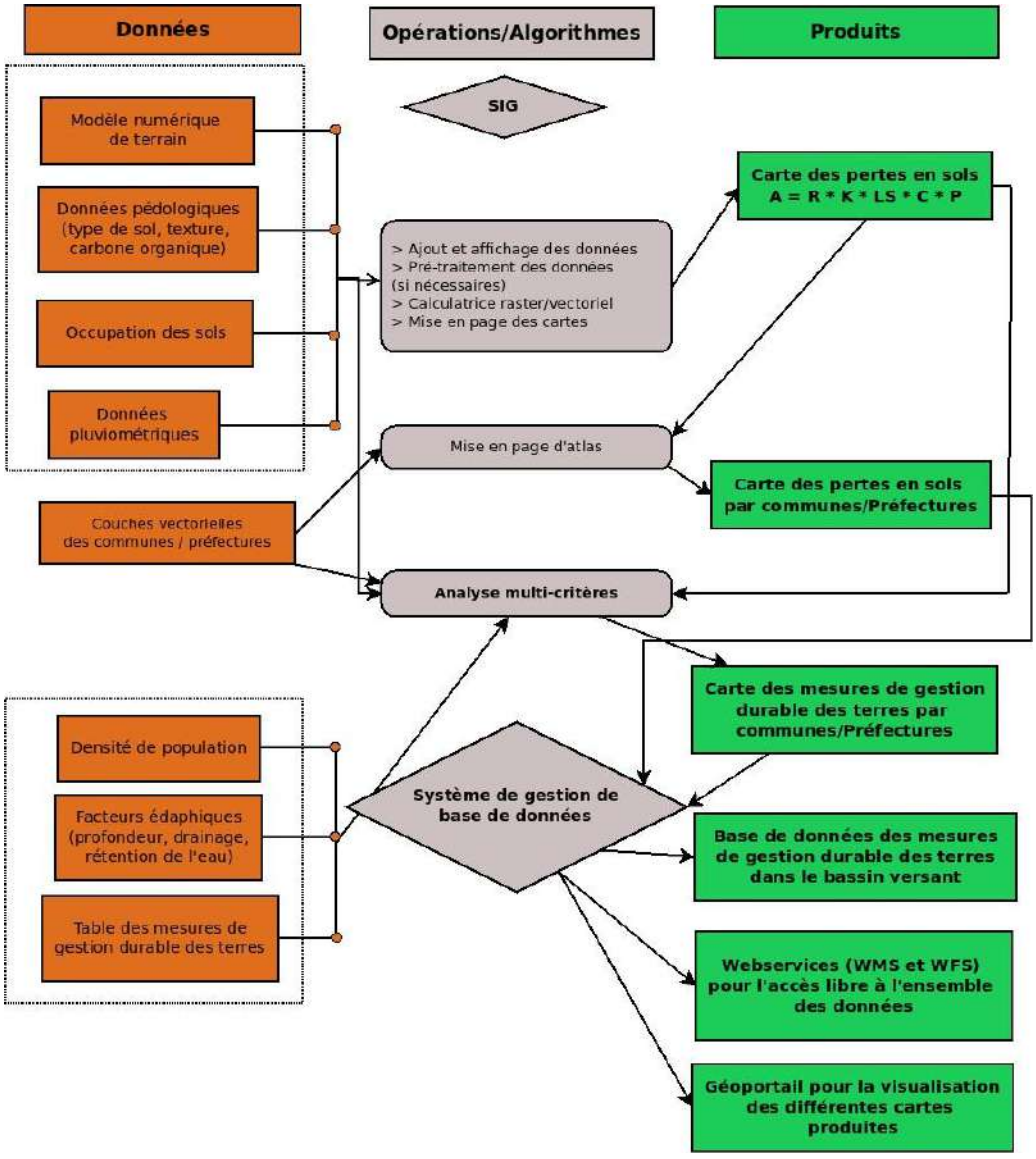


Figure 2: Schéma de la méthodologie conceptuelle

5 Données

5.1. Données nécessaires

L'atteinte des objectifs du projet d'application passe par la disponibilité des données. Le tableau ci-après fait un état des lieux de la disponibilité des données nécessaires.

Tableau 1 : Analyse des données disponibles

Données	Disponibilité	Source	Formats	Échelle/Taille du pixel	Année
Limites du bassin versant du Mono	Oui	Carte topographique de Lomé, d'Abomey et de Sokodé IGN France	Shapefile	1/200 000	1963
Stock de carbone dans le sol	Oui	SRIC - World Soil Information	GeoTIFF	250 m	2015
Communes du Bénin	Oui	Humanitarian Data Exchange v1.54.3	Shapefile	1/200 000	2021
Préfectures du Togo	Oui	Humanitarian Data Exchange v1.54.3	Shapefile	1/200 000	2021
Modèle Numérique de Terrain	Oui	USGS	GeoTIFF	30 m	2014
Occupation des sols	Oui	Esri 2020 Land Cover	GeoTIFF	10 m	2020
Précipitation	Oui	Worldclim	GeoTIFF	920 m	1972-2000
Textures des sols	Oui	SRIC - World Soil Information	GeoTIFF	250 m	2015
Pourcentage de sable	Oui	SRIC - World Soil Information	GeoTIFF	250 m	2015
Pourcentage de limon	Oui	SRIC - World Soil Information	GeoTIFF	250 m	2015
Pourcentage d'argile	Oui	SRIC - World Soil Information	GeoTIFF	250 m	2015
Répertoires de mesures de gestion durable des terres	Oui	World Overview of Conservation Approaches and Technologies (Wocat)	Site web	NA	2010

5.3. Critique des données

La qualité des données géospatiales disponibles pour réaliser la modélisation de la perte en sol dans le bassin versant du Mono peut représenter des limites. Le tableau ci-après présente une analyse critique des données selon les sources.

Tableau 2 : Critique des données disponibles

Sources	**Données**	**Qualité**
ISRIC - World Soil Information	Textures ; Stock de carbone ; Pourcentage de sable ; Pourcentage de limon ; Pourcentage d'argile	Ce sont des données prédictives issues d'analyse Random Forest. Cette prédiction est basée sur plus de 85 000 échantillons de sols collectés dans 28 000 emplacements en Afrique. La précision des variations expliquées par ce modèle est comprise entre 40 et 85 %. Toutefois il est important de signaler qu'il s'agit de données prédictives qui peuvent être éloignés de la réalité de terrain.
Worldclim	Précipitations	Ce modèle climatique global est réalisé à partir de différentes bases de données compilées (FAO, WMO, CINAT, Hydronet et de bases de données secondaires locales compilées par le Global Historic Climatologic Networks). La modélisation inclut la prise en compte de l'altimétrie puisqu'elle s'appuie sur le SRTM. Le modèle consiste en l'interpolation de données climatiques mensuelles moyennes de stations météorologiques, sur une période d'au moins 10 ans. La résolution de ces données varie de 10 minutes d'arc à 30 secondes d'arc. La résolution des données à utiliser dans le cadre de ce travail est d'environ 1 km, ce qui n'est pas favorable à une analyse fine (à l'échelle des parcelles agricoles). Toutefois, à l'échelle du bassin versant qui couvre une superficie de 24 000 km² environ, cette résolution est acceptable.
Esri 2020 Land Cover	Occupation des sols	Obtenue par la méthode « Deep Learning », cette classification a une précision de 86 % pour une résolution de 10 m. Néanmoins, une préanalyse des images sur le bassin versant du Mono a permis de constater que sur certaines classes d'occupation des sols, la précision n'est pas bonne. Il est donc important de procéder à une transformation de certaines classes avant de procéder à la modélisation.

6 Méthodologie concrète

6.1. Modélisation de l'érosion hydrique

Pour modéliser l'érosion hydrique dans le bassin versant du Mono, le modèle empirique USLE de Wischmeier et Smith (1978) est utilisé. Il permet d'estimer le taux de perte en sol selon l'équation

A = R * K* LS * C * P

avec :

A = pertes en sol annuels moyennes potentielles à long terme (t. ha.an)

R = indice d'érosivité des pluies ($MJ.mm.ha^{-1}.h^{-1}.an^{-1}$)

K = indice d'érodibilité des sols ($t.\ ha.h.ha^{-1}.MJ^{-1}.mm^{-1}$)

LS = facteur topographique (adimensionnel)

C = facteur de couverture (adimensionnel)

P = facteur de pratique de soutien (adimensionnel)

t : tonne ; ha : hectare ; MJ : méga joule ; mm : millimètre ; h : heure.

En raison de l'hétérogénéité de la résolution spatiale des données géospatiales à notre disposition et utilisées pour modéliser l'érosion, un ré-échantillonnage selon la méthode du « Plus proche voisin » a été effectué à l'aide de l'outil « Projection Warp » afin d'aligner toutes les couches géographiques à une maille de 920 m. Cette méthode de rééchantillonnage permet de mettre en cohérence l'ensemble des données à la même résolution spatiale. Cette étape permet le croisement des données pixel à pixel et la superposition parfaite des couches d'informations (Payet, Dumas et Pennober, 2012).

Hormis le facteur de déclivité qui a été déterminée grâce à l'algorithme « LS factor » suivant la méthode implémentée dans SAGA GIS version 7.3.0 (Moore et al. 1991), tous les autres paramètres ont été calculés ou déterminé à l'aide de différentes algorithmes de QGIS version 3.16.4-Hannover.

➔ ***Calcul de l'indice d'érosivité des pluies (R)***

L'indice d'érosivité (R) des pluies rend compte du pouvoir érosif des pluies sur les sols. L'augmentation de l'indice d'érosivité se traduit par une plus grande vulnérabilité des sols à l'érosion. Pour calculer l'indice R, la formule utilisée est celle de Renard et Freimund (1994).

$R = 0.0483*P^{1.610}$, où P = Moyenne des précipitations annuelles en mm. La figure 3 présente le schéma de flux du calcul de l'indice d'érosivité R.

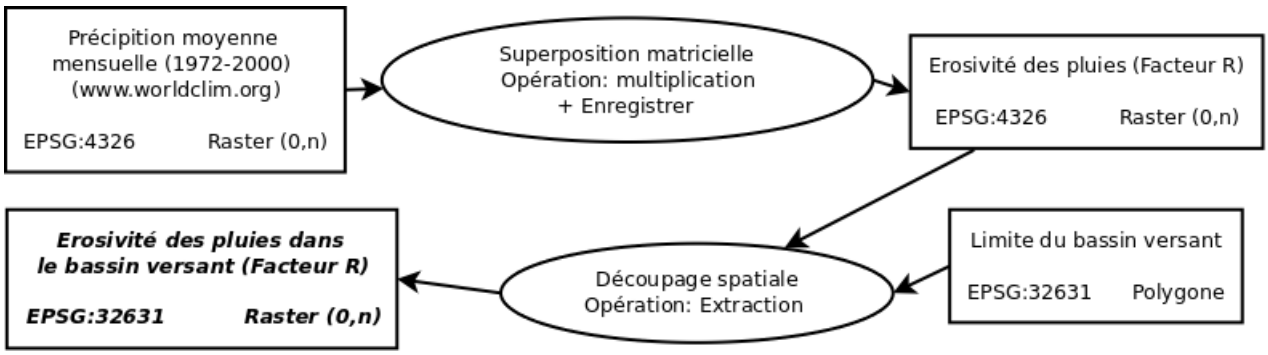


Figure 3: Schéma de flux du calcul de l'indice d'érosivité R

➔ ***Calcul du facteur de déclivité (LS)***

L'indice de déclivité (LS) informe sur la morphologie du terrain. Il intègre la longueur des pentes (L) et l'angle de la pente (S). Ces deux paramètres influencent fortement les processus d'érosion. L'indice LS a été calculé à l'aide de l'outil « LS Factor » du logiciel SAGA GIS selon la méthode de Moore et al. (1989) (figure 5).

LS = $(\lambda/\psi)^m$ * $(\sin \beta/0{,}0896)^n$ * Z avec : λ = flux d'accumulation ; ψ = 22,13 ; β = pente ; m = 0,4 ; n = 1,3 ; Z =1,12



Figure 4: Schéma de flux du calcul du facteur de déclivité LS

➔ ***Calcul de l'indice d'érodibilité des sols (K)***

L'indice d'érodibilité des sols (K) caractérise leur résistance à l'érosion. Les valeurs élevées de K correspondent à des résistances plus fortes des sols. Elle a été calculée selon la méthode de Wischmeier et Smith (1978). **$K = 2{,}1 * M^{1.14} * 10^{-6} (12 - MO) + 0{,}0325 * (b-2) + 0{,}025 * (c-3)$**

où *$M = (\%\ sable\ fin + \%\ limon) * (100 - \%\ argile)$*. Elle a été déterminée à l'aide du triangle de texture de Brown (2003).

MO = Teneur de la matière organique. Elle a été dérivée de la carte des stocks de carbone organique du sol de la FAO selon l'équation : MO = Stock de carbone * 1,72/10[1]

b = Indice de structure du sol

c = Perméabilité du sol.

1 http://www.agro-transfert-rt.org/wp-content/uploads/2016/02/M%C3%A9mento_sols_et_mati%C3%A8re_organique.pdf

Les deux derniers indices ont été déterminés à l'aide du triangle de texture développé par Ontario Centre for Soil Resource Evaluation, (1993)[2]. La figure 4 présente le schéma de flux du calcul de l'indice d'érodibilité K.

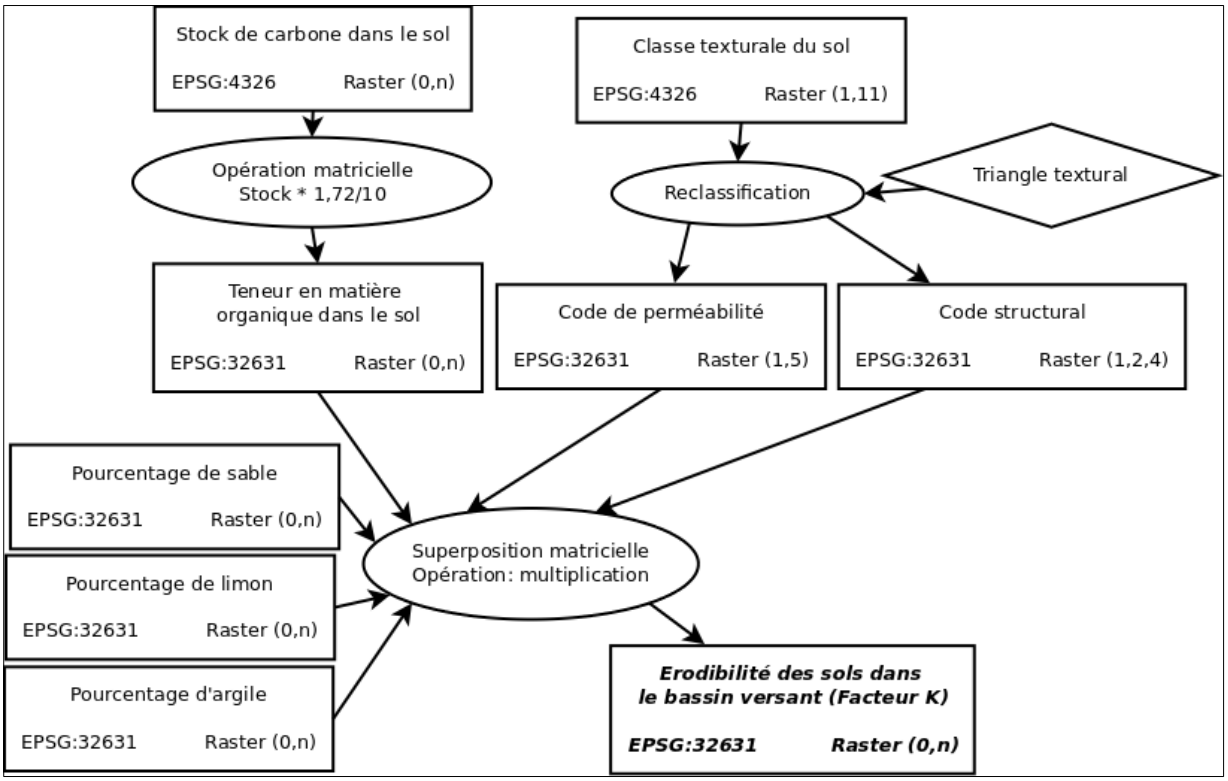


Figure 5: Schéma de flux du calcul de l'indice d'érodibilité K

➔ ***Calcul du facteur de couverture (C)***

Le facteur de couverture (C) permet d'évaluer la densité du couvert végétal. Les valeurs de C varient entre 0 et 1. Les plus faibles valeurs sont associées à des densités de végétation élevées. Les valeurs de C ont été dérivées à partir de la carte d'occupation des sols, elle-même extraite du land use/land cover map 2020[3] produite par la société ESRI suivant deux étapes. La première étape a consisté en la reclassification des classes d'occupation « Zone agricole » et « Arbuste » qui ont été fusionnées en une seule, nommée « Champs et jachères », après vérification « de terrain » des classes à l'aide des images satellitaires proposées par Google via l'interface logicielle Google Earth. La reclassification a été effectuée à l'aide de l'algorithme « Reclassification par table » de QGIS. À la seconde étape, des valeurs de C ont été attribuées à chaque classe d'occupation des sols (Tableau 3) selon les indications de Payet et al. (2012) et Roose (1977).

2 https://sis.agr.gc.ca/siscan/publications/manuals/2002-92/rusle-can.pdf
3 https://www.arcgis.com/home/item.html?id=d6642f8a4f6d4685a24ae2dc0c73d4ac

Tableau 3 : Facteur de végétation C selon le type d'occupation du sol

Type d'occupation du sol	Facteur C
Plan d'eau	0
Forêt	0,001
Savane	0,01
Végétation inondée	0,28
Champs et jachères	0,5
Agglomération	0,2
Sol nu	1

D'après Roose 1977 et Payet et al. 2012

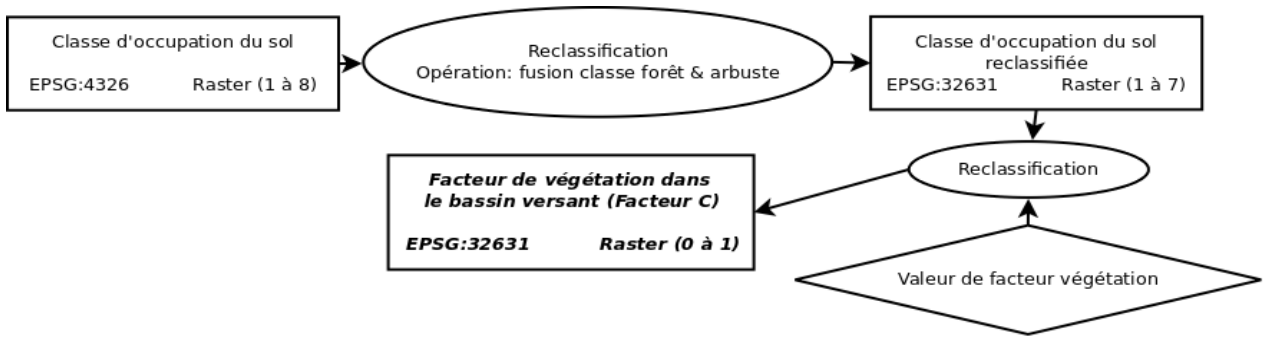


Figure 6: Schéma de flux du calcul du facteur de végétation C

➔ ***Calcul du facteur de soutien (P)***

Les valeurs de P sont obtenues à partir de la reclassification de la carte d'occupation des sols suivant la revue de (Ghosal et Bhattacharya, 2020). La valeur 0 a été attribué aux classes d'occupations suivantes :plan d'eau, forêt, savane, végétation inondée et agglomération. On considère donc que ces classes réduisent les risques d'érosion par opposition aux classes champs et jachères et sols nus qui ont la valeur 1.

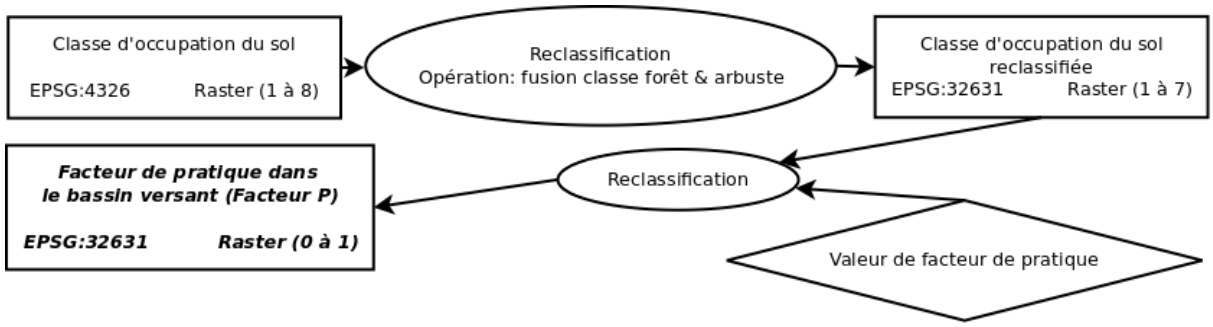


Figure 7: Schéma de flux du calcul du facteur de soutien P

6.2. Identification et spatialisation des mesures de gestion durable des terres

L'identification des mesures de gestion durable des terres a été réalisée en trois étapes. La première étape a consisté à la sélection de technologies de gestion durable des terres dans la base de données mondiale sur la gestion durable des terres du World Overview of Conservation Approaches and Technologies (WOCAT)[4]. Au total 32 mesures déjà expérimentée et documentée au Togo, au Bénin, au Burkina Faso et au Niger ont été répertoriées. Pour chaque mesure, les conditions pluviométriques et les pentes optimales pour l'implémentation ont été relevées.

Dans un second temps, le bassin versant a été subdivisé en 1084 carreaux d'une résolution spatiale de 5 km afin de mieux prendre en compte les variations des pertes en sol à l'échelle des territoires du bassin versant. Dans chacun des carreaux, la pluviométrie moyenne annuelle, la pente dominante, les zones de champs et jachères ont été déterminés à partir des données matricielles de précipitations et d'élévation, à l'aide de l'algorithme « statistique de zone ». L'ensemble des données issues des deux étapes précédentes a été importé dans une base de données Postgis. Et à l'aide d'une requête spatiale incluant la fonction d'agrégat « ARRAY_AGG », les mesures de gestion durable des terres dont les attributs (pluviométrie, pente, classe d'occupation du sol) sont compatibles avec celles des carreaux ont été sélectionnées.

6.3. Mise en place d'un géo-portail

La carte représentant les pertes de sols moyennes ainsi que les mesures de gestion durable des terres adaptées aux pentes et à la pluviométrie moyenne par carreaux a été combinée à la carte des limites des communes/préfectures situées dans le bassin versant du Mono afin de concevoir un géoportail interactif. L'extension qgis2web a été utilisée pour la réalisation du géoportail. Des fonds de cartes ont été ajoutés pour faciliter l'exploration de la localisation des mesures de gestion durable des terres par zone. Pour rendre publique la carte de spatialisation des mesures de gestion durable des terres dans le bassin versant, un compte github[5] a été créé. L'ensemble des dossiers et du fichier HTML générés par l'extension qgis2web ont été téléversés dans un dépôt créé sur le compte github puis publié.

4 https://qcat.wocat.net/fr/wocat/list/
5 https://github.com/

7 Résultats

7.1. Résultats de la modélisation de l'érosion hydrique

Les résultats détaillent dans un premier temps le calcul des différents paramètres de l'équation universelle d'érosion (USLE) et dans un second temps l'estimation et la spatialisation des pertes de terres dans le bassin versant du Mono suivant une maille spatiale de 10 m.

- **Indice d'érosivité des pluies (R)**

L'indice d'érosivité (R) varie dans le bassin versant du Mono entre 42,07 et 116 MJ.mm/ha.h.an avec une moyenne de 31,64 MJ.mm/ha.h.an. Pour 49 % de la surface du bassin versant du Mono, les valeurs de R sont inférieures à la moyenne. Les valeurs les plus élevées (supérieures à 100 MJ.mm/ha.h.an) de R concernent 1 de la superficie % du bassin.

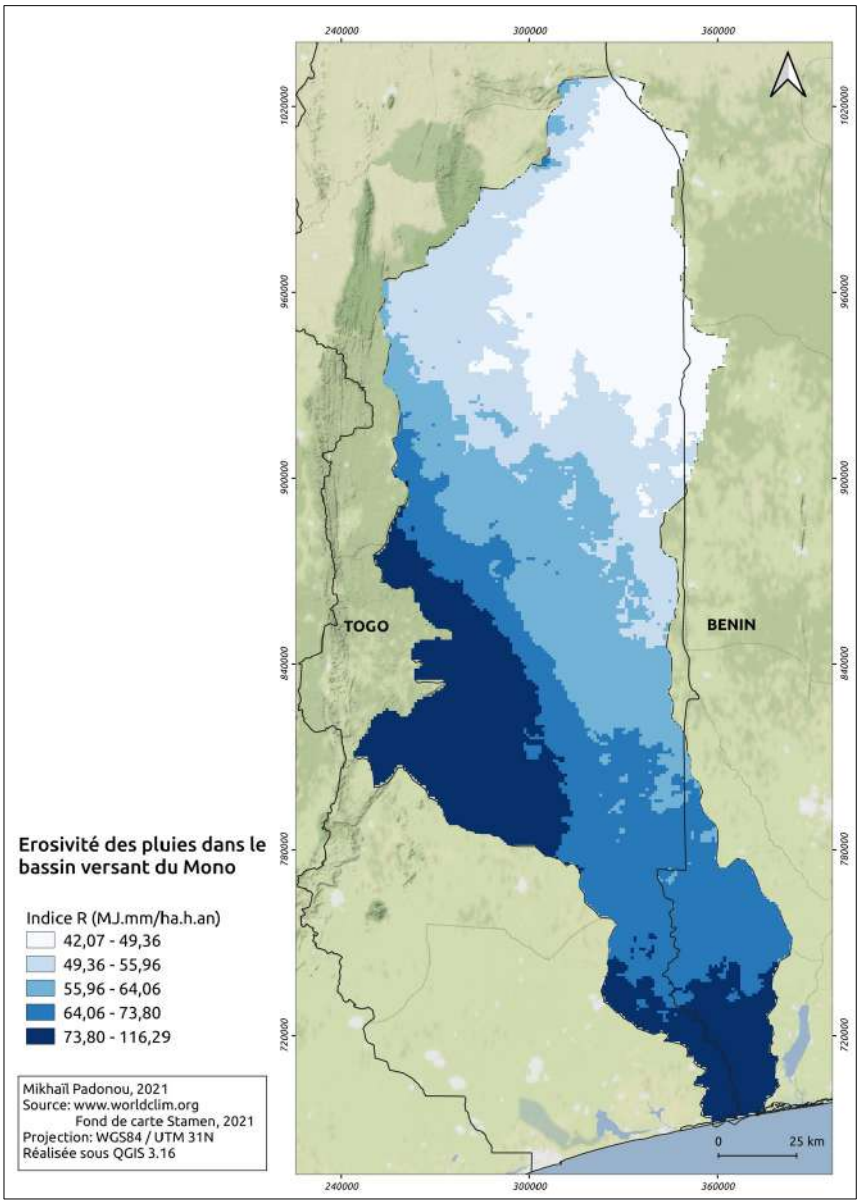


Figure 8: Variation de l'indice d'érosivité des pluies dans le bassin versant du Mono

- **Indice d'érodibilité des sols K**

L'indice d'érodibilité K au sein du bassin versant du Mono est compris entre 0,06 t.ha. h/ha.MJ.mm et 0,70 t. ha. h/ha.MJ.mm. Pour 60 % de la surface du bassin versant du Mono, les valeurs de K sont supérieures à 0,44 t. ha. h/ha.MJ.mm.

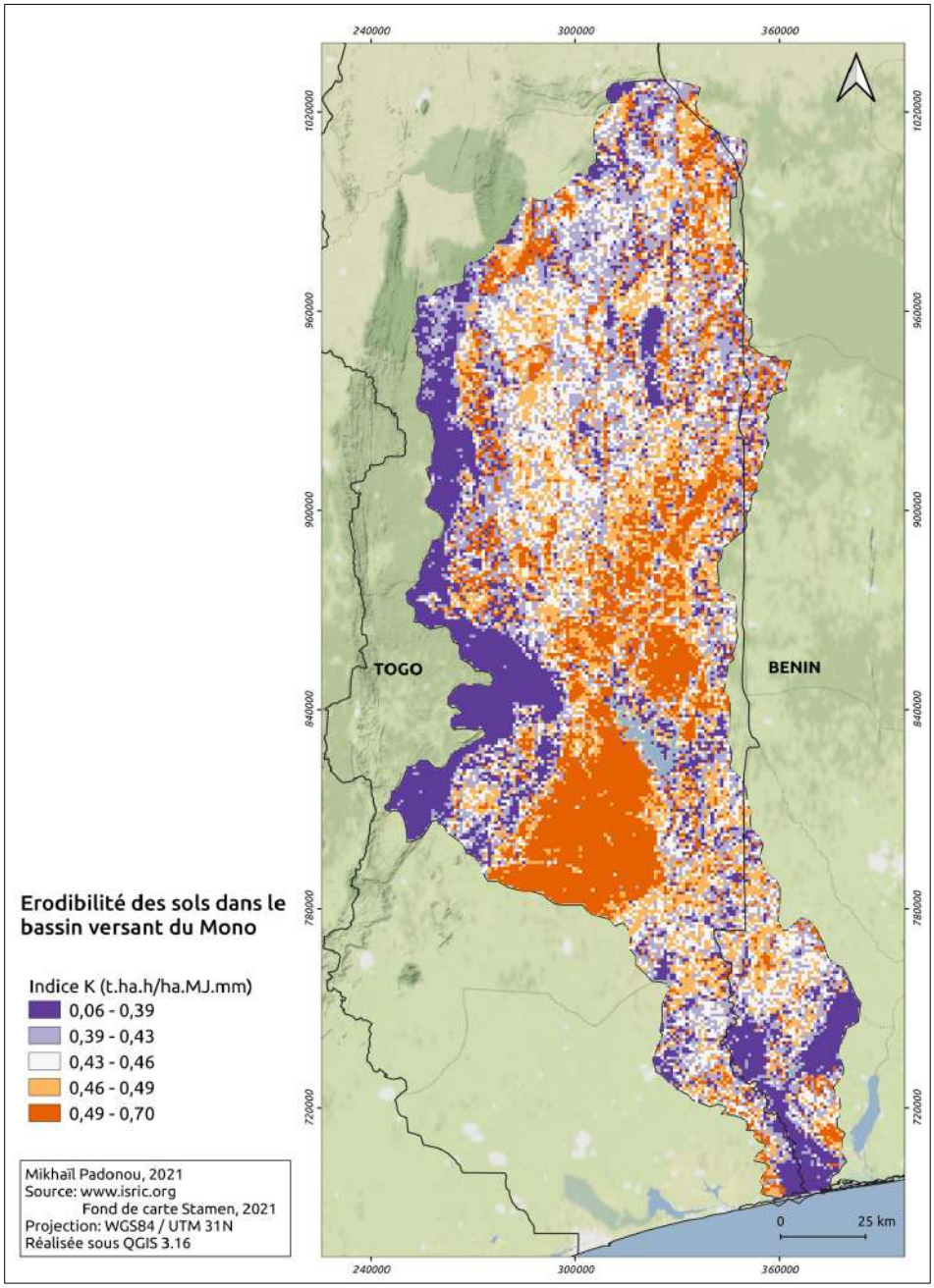


Figure 9: Variation de l'indice d'érodibilité des pluies dans le bassin versant du Mono

- **Facteur topographique LS**

Les résultats obtenus pour le facteur topographique LS varient entre 0 et 35. Les valeurs les plus élevées sont concentrées dans les zones d'altitudes élevées au nord-ouest du bassin versant. Les valeurs les plus faibles sont localisées surtout dans la basse vallée du bassin.

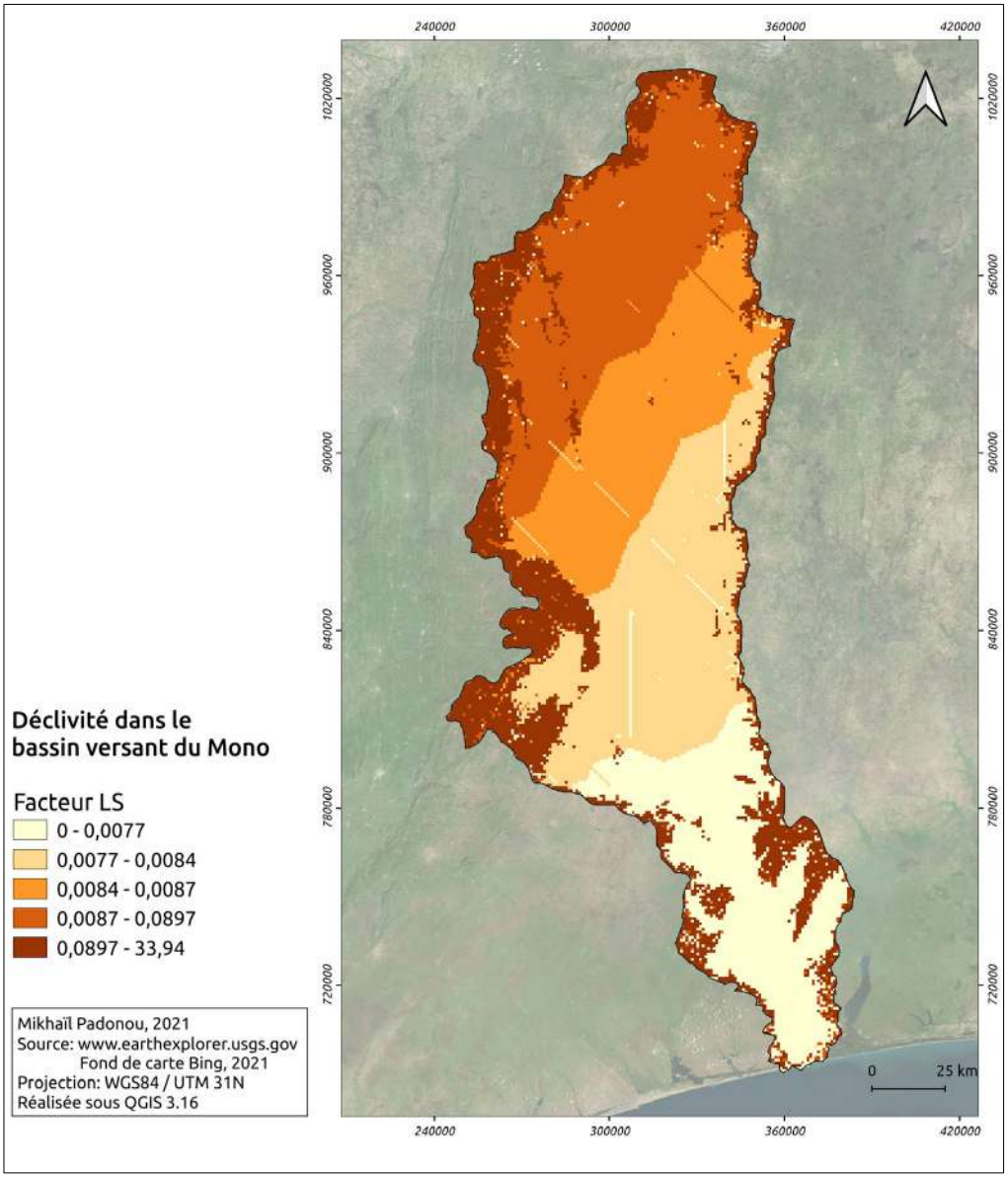


Figure 10: Variation du facteur topographique dans le bassin versant du Mono

- **Facteur de végétation C**

Dans le bassin versant du Mono, le facteur C varie entre 0 et 1 avec une fréquence importante des valeurs de C = 0. Les valeurs les plus élevées sont observées au nord, au nord-ouest puis au sud du bassin versant. Rappelons qu'une faible valeur de C indique une couverture végétale dense, de type forestier.

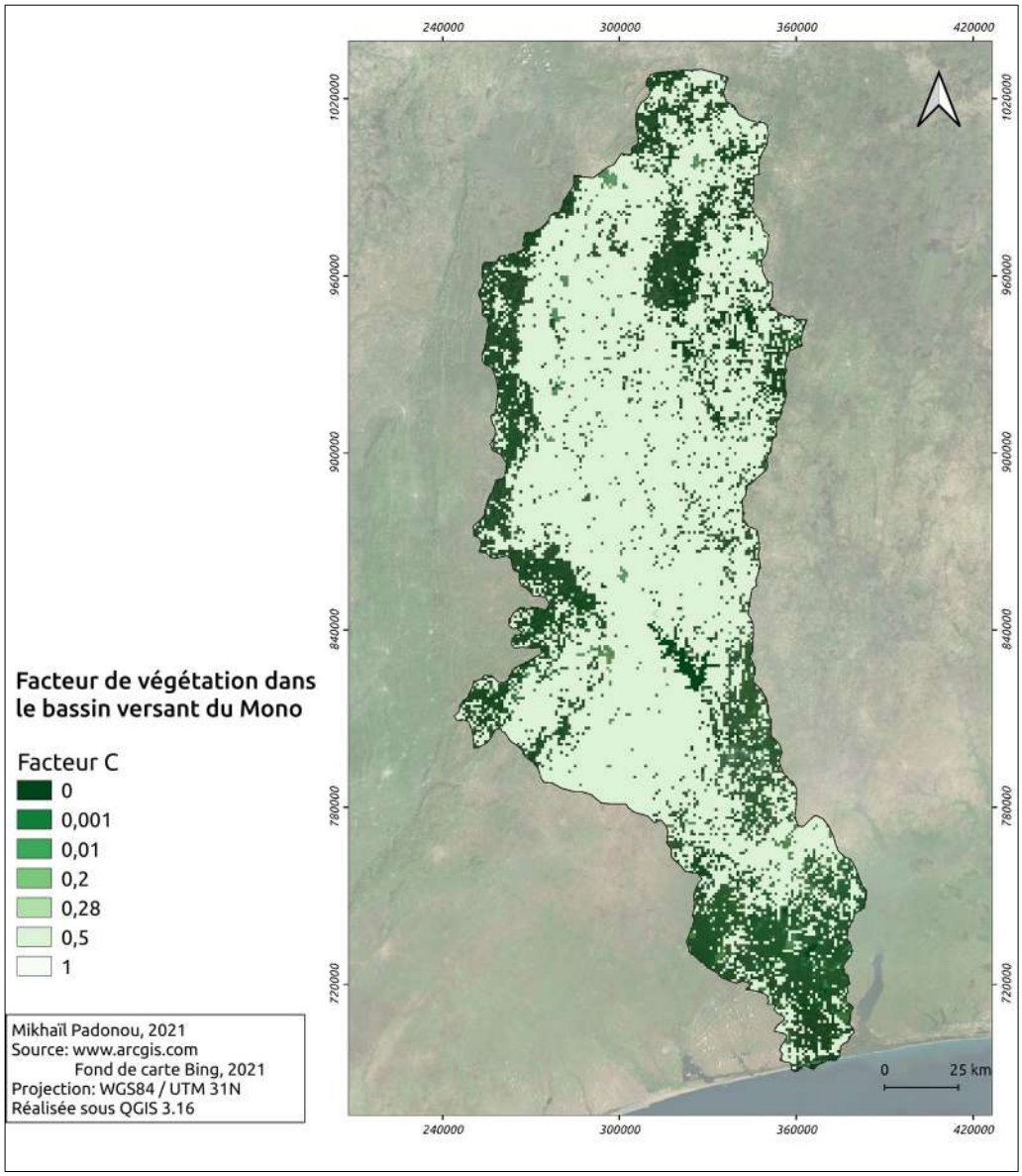


Figure 11: Variation du facteur de végétation dans le bassin versant du Mono

- **Facteur de soutien P**

Le facteur de soutien (P) varie entre 0 et 1 dans le bassin versant du Mono, avec une fréquence importante des valeurs de C = 1. Les valeurs les plus faibles sont observées au nord, au nord-ouest, dans les zones d'altitudes élevées, ainsi qu'au sud du bassin versant.

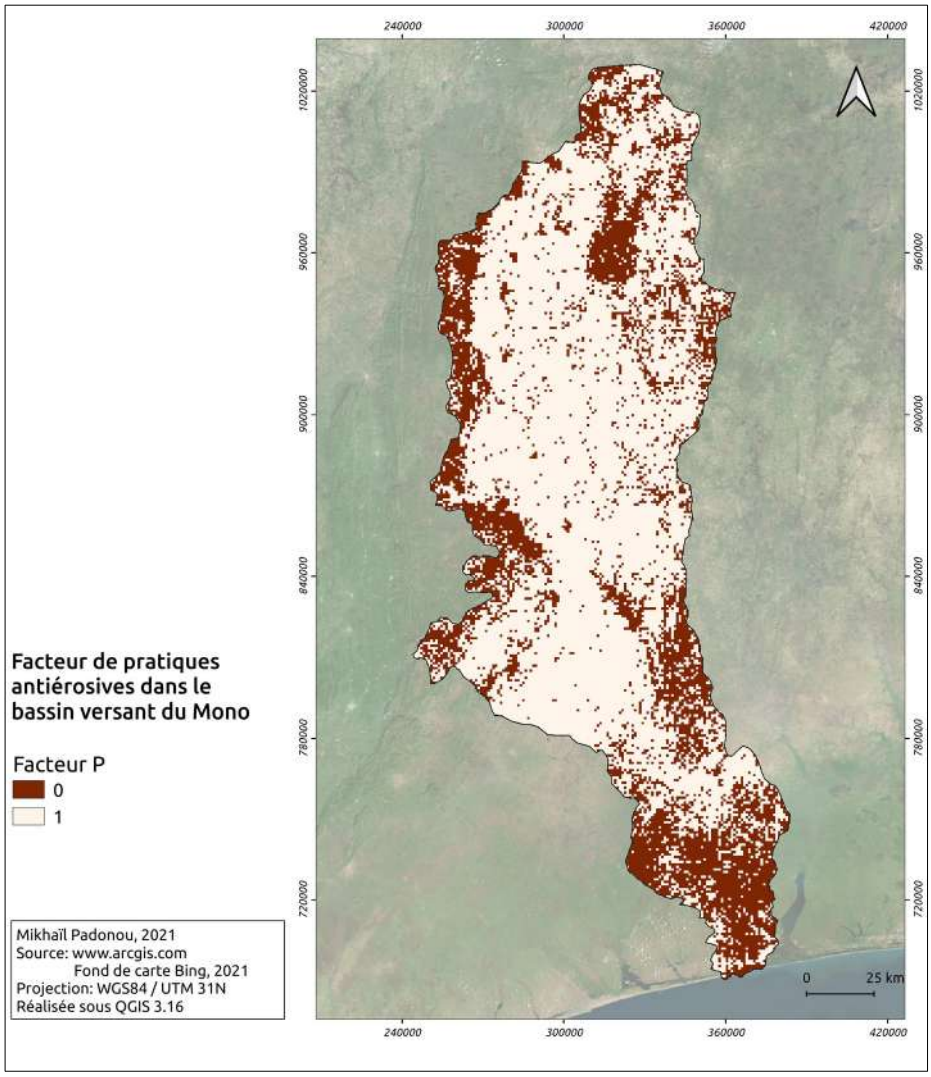


Figure 12: Variation du facteur de soutien dans le bassin versant du Mono

- **Estimation des pertes de sols**

Les estimations de pertes de sols au sein du bassin versant du Mono varient entre 0 et 532 t/ha/an, avec une moyenne estimée à seulement 2,02 ± 13,32 t/ha/an.

Les pertes en sol sont très faibles (0 à 0,09 t/ha/an) dans 39 % et faibles (0,09 à 0,13 t/ha/an) également dans 40 % de la surface du bassin versant. Les pertes moyennes par an y sont estimées respectivement à 17 602 et 101 786 tonnes. Elles sont élevées (0,13 à 2,02 t/ha/an) et très élevées (2,02 à 532 t/ha/an) dans respectivement 13 % et 8 % de la superficie du bassin versant avec des pertes moyennes annuelles estimées respectivement à 84 179 et 4 600 846 tonnes.

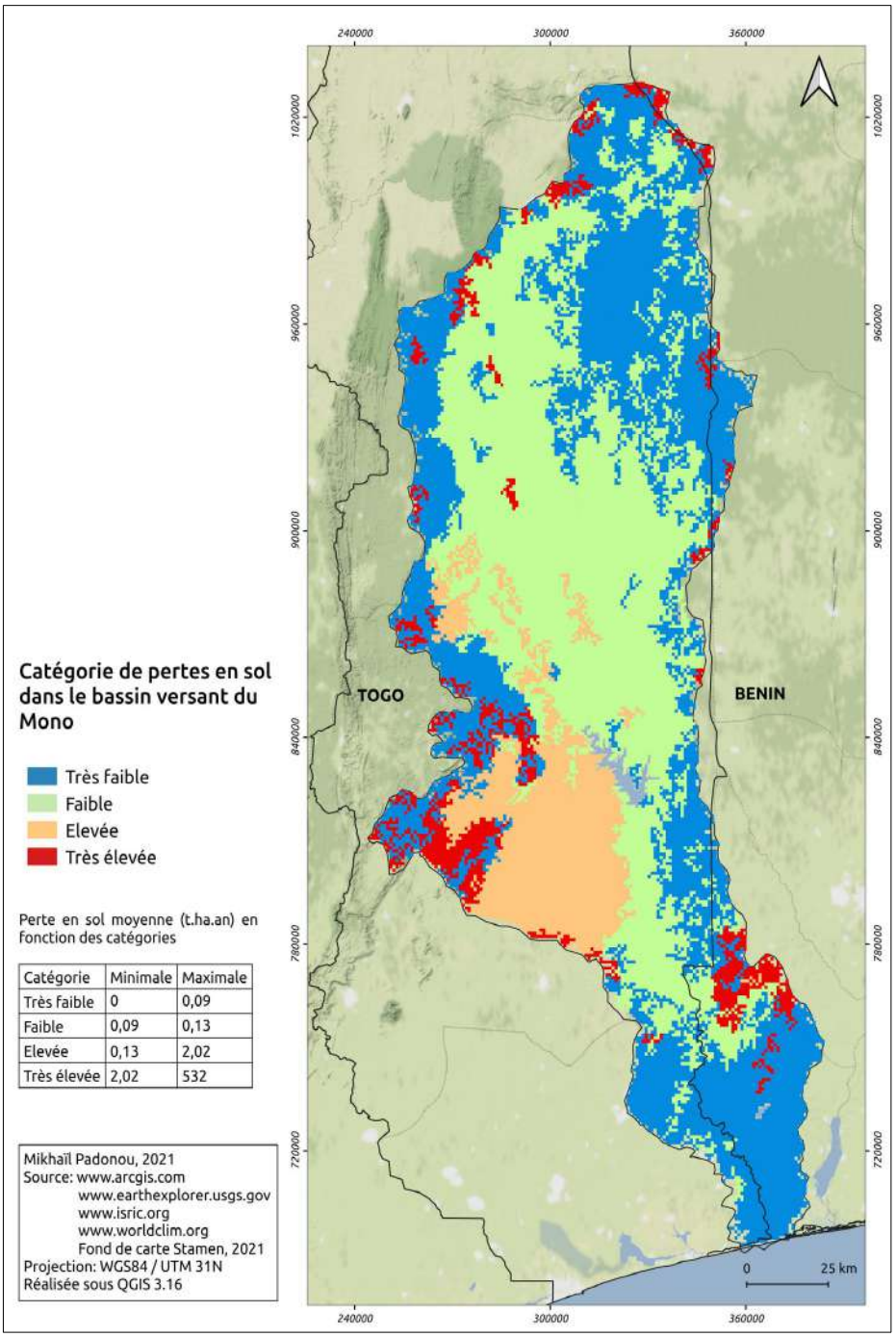


Figure 13: Estimation des pertes en sol dans le bassin versant du Mono

7.2. Identification des mesures de gestion durable des terres et géoportail

Parmi les 32 mesures de gestion durable des terres répertoriées, 14 ont été compatibles avec les valeurs moyennes de pente, et de précipitation des carreaux. Le nombre de mesures de gestion durable des terres compatible par carreau varie entre 1 et 7. La figure 14 présente la répartition spatiale des mesures dans le bassin versant en fonction des carreaux et des moyennes de perte en sol.La protection et le reboisement des forêts (Ensemble 10) est la mesure majoritairement

compatible avec les zones enregistrant des pertes en sol (moyennes) les plus élevées. Par ailleurs, pour la majorité du bassin versant, ce sont les mesures de l'ensemble 1 qui sont les plus compatibles.

La carte de spatialisation des mesures de gestion durable des terres en fonction des communes et des zones de pertes en sol (carreaux) a été publiée via github et est disponible en ligne à partir du lien : https://mikdotou.github.io/gdt-bvm/ .

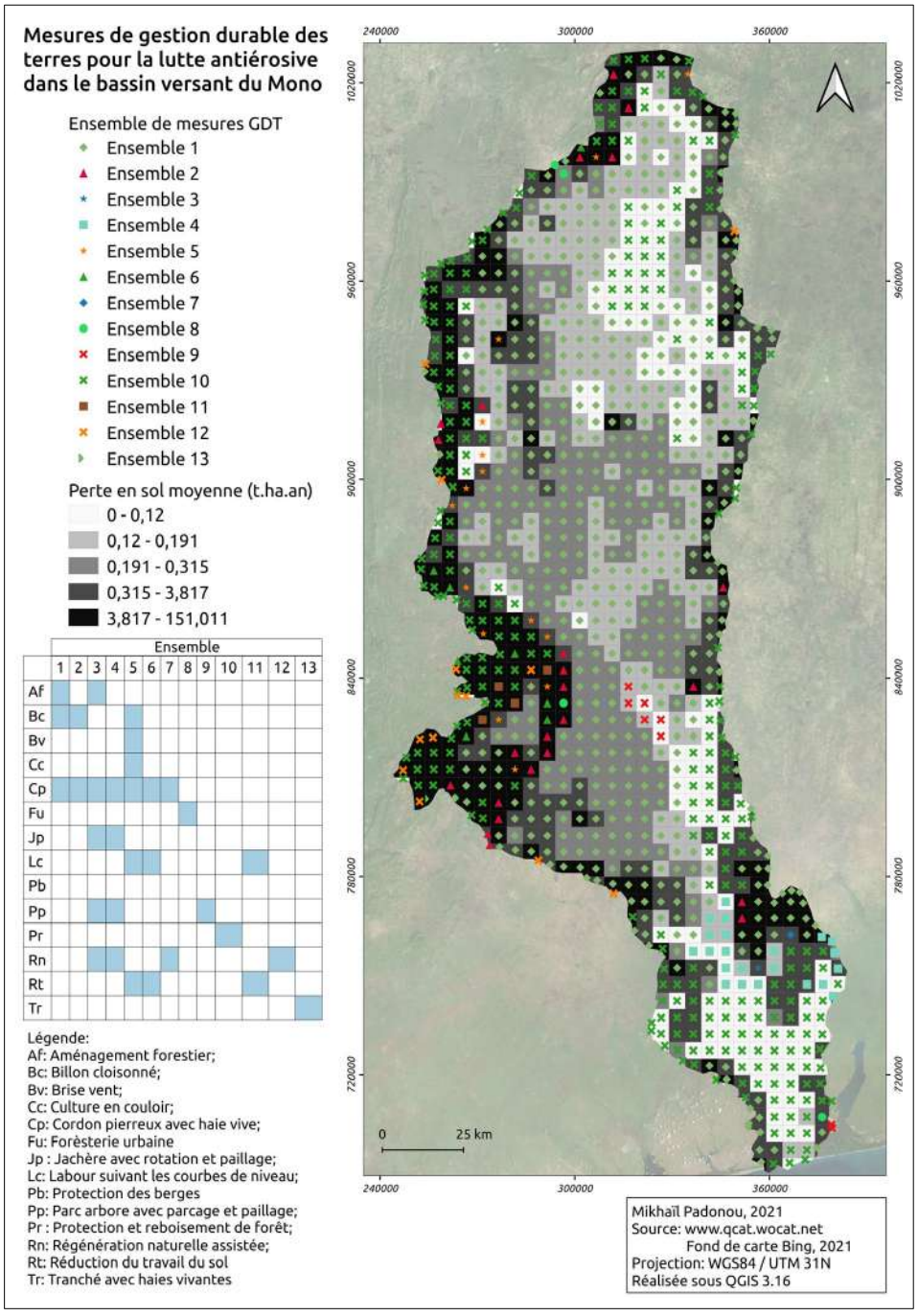


Figure 14: Mesures de gestion durable des terres dans le bassin versant du Mono

8 Application du projet dans le bassin versant

8.1. Intérêts du projet d'application

La réalisation d'un SIG-AD pour l'optimisation des projets de gestion durable des terres a pour finalité la réduction de l'érosion hydrique dans le bassin versant du Mono. Elle est une contribution de l'ONG Eco-Benin aux objectifs de l'ABM dont la principale mission est d'assurer un développement intégré et durable dudit bassin.

Elle permet également à l'ONG de disposer d'un outil de base pour développer son projet stratégique relatif à la gestion intégrée des bassins versants hydrographiques. En effet, la carte de spatialisation des mesures de gestion durable des terres est l'un des résultats majeurs du projet d'application. Elle peut servir de point de départ pour les dialogues entre les différentes parties prenantes sur les questions relatives à la conservation des eaux et des sols du bassin versant affectée par l'érosion hydrique.

Enfin, les résultats du projet d'application peuvent être intégrés dans les processus de mobilisation des ressources pour le déploiement de solutions fondées sur la nature en vue de préserver les terres agricoles et les écosystèmes aquatiques qui sont la base de la sécurité alimentaire pour la majorité des habitants du bassin versant.

8.2. Limites du projet d'application

Les limites du projet se situent au niveau des données utilisées et de la méthodologie d'analyse.

- **Données** : l'estimation des pertes de sol dans le bassin versant du Mono a été réalisée exclusivement avec des données géospatiales libres d'accès. Ces données sont des résultats d'analyses prédictives et d'interpolations réalisées à grandes échelles et ne tenant pas forcément compte des réalités du terrain. Par exemple, les données d'occupation du sol provenant de Esri 2020 Land Cover à une résolution très fine de 10 m ont montré des limites quant à la classification des champs et jachères qui sont confondus avec les savanes arbustives. Il en est de même pour la classe des forêts où les données matricielles d'Esri Land Cover ne permettent pas de distinguer les forêts-galeries et les cours d'eau malgré leurs grandes précisions spatiales.

En outre, les données pluviométriques utilisées pour calculer l'indice d'érosivité couvrent la période de 1972 à 2000. Or il a été observé une tendance pluviométrique à la hausse, notamment sur la décennie 2000-2010. Ainsi, les indices d'érosivités ont probablement évolués. De ce qui précède, il est alors important d'améliorer continuellement les résultats en se basant sur des données plus précises et mieux intégrées aux réalités du bassin versant du Mono.

- **Méthodologie** : les limites sont situées au niveau de la modélisation de la perte des sols et de l'identification des mesures de gestion durable des terres (GDT).

La modélisation est basée sur la méthode RUSLE qui a été développée à la base pour de petites parcelles ou des bassins versants de petite taille. Il est donc probable que les résultats contiennent certains biais qu'il serait important d'identifier et de corriger à travers la confrontation des résultats avec les réalités de terrain. Par ailleurs, une analyse comparative plus approfondie des différentes méthodes de calcul des paramètres du modèle s'avère nécessaire pour une meilleure précision dans l'estimation des pertes en sol.

Le facteur P de soutien, par exemple, a été calculé sur la base d'un postulat, relatif aux classes d'occupations des terres. Cependant, rien ne permet de confirmer localement ce postulat. En outre, le calcul de ce facteur P ne tient pas compte d'autres techniques potentiellement mises en œuvre par les agriculteurs ni du fait qu'un sol agricole nu sera toujours plus sensible à l'érosion qu'un sol couvert de végétation, quelles que soient par ailleurs les techniques anti-érosives mises en œuvre.

L'identification des mesures GDT a été basée sur la pente et la pluviométrie. Même si, ce sont des facteurs déterminants de l'érosion, il est nécessaire de prendre en compte d'autres paramètres pour une identification plus précise des mesures. Par ailleurs, ces mesures ont été identifiées pour des zones ayant une superficie moyenne de 25 km². Ceci est très élevé si l'on considère que ces mesures s'appliquent en réalité à une échelle spatiale beaucoup plus grande, qui est l'échelle des parcelles agricoles. Il est donc important de préciser que l'outil présenté ici doit être implémenté à l'échelle des unités territoriales élémentaires (arrondissements, villages, etc.) pour tenir compte des conditions réelles de terrain.

8.3. Démarche de mise en place du SIG

Au terme du stage, une présentation des résultats sera faite à l'équipe technique d'Eco-Benin. Un focus sera mis sur les limites du modèle ainsi que sur les besoins de précisions nécessaires pour mieux l'adapter aux réalités du bassin versant du Mono. Une stratégie d'acquisition continue de données sera définie et mise en œuvre pour développer périodiquement de nouvelles versions d'estimation des pertes en sol et affiner l'outil d'aide à la décision relative au choix des mesures de GDT les plus pertinentes localement.

À l'aide du modeleur graphique de QGIS, l'ensemble des traitements réalisés dans le cadre de ce projet sera automatisé et documenté. Le résultat du modeleur sera ensuite utilisé pour réaliser des formations entièrement gratuites.

Par ailleurs, un cours en ligne sera développé sur la plateforme ECOBENIN Training (https://training.ecobenin.org/) autour des résultats du projet d'application. Il contiendra de courts modules qui permettront aux participants d'acquérir des connaissances pratiques sur : (i) les sources d'acquisition de données géospatiale libres pour l'estimation des pertes de sol ; (ii) les techniques de préparation des données pour l'analyse USLE ; (iii) les algorithmes utilisés pour

réaliser l'estimation ; (iv) la mise en page des différentes cartes issues du modèle ; (v) le processus d'identification et de spatialisation des mesures GDT puis (vi) la publication des résultats en ligne grâce au géo-portail.

9 Bibliographie

Amoussou, E. (2010) *Variabilité pluviométrique et dynamique hydrosédimentaire du bassin versant du complexe fluviolagunaire Mono-Ahémé-Couffo (Afrique de l'Ouest)*. PhD Thesis. Dijon.

Brown, R. (2003) 'Soil texture. Fact Sheet SL-29', *Soil and Water Science Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. Date first printed: April 1990. Reviewed: April 1998, September 2003. http://edis. ifas. ufl. edu* [Preprint].

Lal, R. (1993) 'Tillage effects on soil degradation, soil resilience, soil quality, and sustainability', *Soil and tillage Research*, 27(1–4), pp. 1–8.

Montanarella, L. *et al.* (2016) 'État des Ressources en Sols dans le Monde (Résumé technique)'. Food and agriculture organization of the united nations.

Moore, I.D. *et al.* (1993) 'Soil attribute prediction using terrain analysis', *Soil science society of america journal*, 57(2), pp. 443–452.

Parveen, R. and Kumar, U. (2012) 'Integrated Approach of Universal Soil Loss Equation (USLE) and Geographical Information System (GIS) for Soil Loss Risk Assessment in Upper South Koel Basin, Jharkhand', *Journal of Geographic Information System*, (4), pp. 588–596. doi : http://dx.doi.org/10.4236/jgis.2012.46061.

Payet, E., Dumas, P. and Pennober, G. (2012) 'Modélisation de l'érosion hydrique des sols sur un bassin versant du sud-ouest de Madagascar, le Fiherenana', *VertigO: la revue électronique en sciences de l'environnement*, 11 (3).

Renard, K.G. and Freimund, J.R. (1994) 'Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE', *Journal of hydrology*, 157(1–4), pp. 287–306.

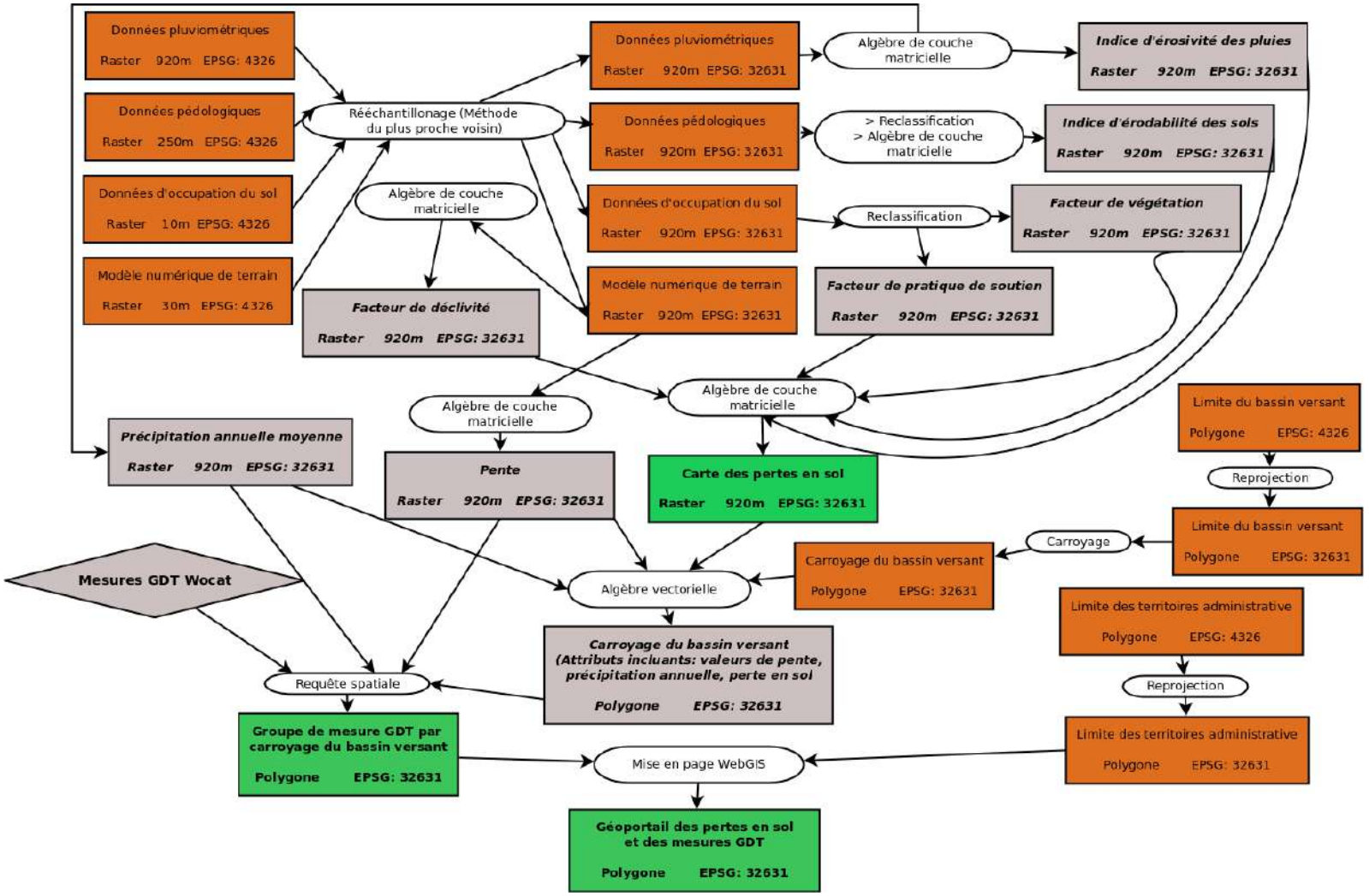
Roose, E. (1977) 'Application of the universal soil loss equation of Wischmeier and Smith in West Africa', in *Soil Conservation and Management in the Humid Tropics; Proceedings of the International Conference*.

Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. (1978) *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. Department of Agriculture, Science and Education Administration (537).

Zhang, S. *et al.* (2017) 'The influence of changes in land use and landscape patterns on soil erosion in a watershed', *Science of the Total Environment*, 574, pp. 34–45.

Annexes

Annexe 1: Schéma de la méthodologie concrète du projet d'application



Annexe 2: Modèle graphique des analyses RUSLE réalisé sous QGIS

