

Characterization and analysis in the territorial profile of the transport network in Romania. Case study: Constanța Port | **Urban sprawl and the role of Jakarta motorcycles in the process of integration of the urban peripheries of Ziguinchor (Senegal)** | The Assessment of the Impact of Installing Bus Information System (B.I.S) on Traffic Conditions in Dakar, Senegal | **Caractérisation hydrochimique des eaux souterraines de la zone de contact du bassin sédimentaire côtier et du socle du Précambrien inférieur au sud-ouest de la République du Congo** | L'anthropisation des milieux humides et dégradation de l'environnement en Tunisie septentrionale. Le cas du bassin-versant de Sébkhat Séjoumi | **Cartographie et prédiction des risques d'érosion hydrique dans le bassin versant de la Yewa (Benin)** | Radioscopie d'une ville religieuse : entre fabrique urbaine originale et défis de durabilité de la ville de Touba (Sénégal) | **Place de l'appareil de formation agricole dans l'environnement de l'unité de production agricole et son rôle dans l'épanouissement du monde rural et le développement du secteur productif agricole. Cas de l'Algérie**

Volume 10 / Numéro 21

Été 2020

ISSN et ISSN-L: 2247 – 2290

COMMISSION SCIENTIFIQUE / SCIENTIFIC COMMITTEE

Andreea-Loreta CERCLEUX

CICADIT / Faculté de Géographie, Université de Bucarest

El Mahjoub CHMOURK

ADES Dymset, UMR 5185/Univ. Michel de Montaigne Bordeaux 3

Laura COMĂNESCU

Faculté de Géographie, Université de Bucarest

Silviu COSTACHIE

Faculté de Géographie, Université de Bucarest

Traian DEMETER

Faculté de Géographie, Université de Bucarest

Robert DOBRE

Faculté de Géographie, Université de Bucarest

Florina GRECU

Faculté de Géographie, Université de Bucarest

Kamel HACHEMI

CNRS Laboratoire de Géographie Physique, UMR 8591, Meudon-Paris

Cristian IOJĂ

Faculté de Géographie, Université de Bucarest

Timur KANAPYANOV

Ministere de l'Education et de la Science, Kazakhstan

Bogdan MIHAI

Faculté de Géographie, Université de Bucarest

Alexandru NEDELEA

Faculté de Géographie, Université de Bucarest

Ion NICOLAE

Faculté de Géographie, Université de Bucarest

Constantin NITU

Faculté de Géographie, Université de Bucarest

Hamid OUHADDOU

Université Cadi Ayyad, Marrakech

Petru URDEA

Faculté de Géographie, Université d'Ouest de Timisoara

Daniela ZAMFIR

Faculté de Géographie, Université de Bucarest

Maral ZHANARSTANOVA

Université Agrotechnique S. Seifullin, Astana

ÉDITEURS EN CHEFS / EDITORS-IN-CHIEF

Daniel IOSIF

Mirela PARASCHIV

cinqcontinents@yahoo.com

Cinq Continents
Volume 10, Numéro 21
Été 2020

Cinq Continents est une revue indexée dans les bases de données internationales (BDI) et nationales



Les auteurs se sont engagés de l'originalité des résultats d'études.

Copyright 2020 Cinq Continents - Revue Roumaine de Géographie. Tous droits réservés.
Editée à Bucarest. Faculté de Géographie, Université de Bucarest.

6. Revue Roumaine de Géographie "Cinq Continent" Indexing

Zenodo



CiteSeerX



Mendeley



OpenAIRE



Research Bible



CiteFactor



Web of Science ResearcherID



SOMMAIRE

Characterization and analysis in the territorial profile of the transport network in Romania. Case study: Constanța Port

GHEORGHE LIXĂNDRESCU, NICOLAE MOCANU, ANDREI BĂRȘOIANU, MANUELA BĂRBĂRIE
5-19

Urban sprawl and the role of Jakarta motorcycles in the process of integration of the urban peripheries of Ziguinchor (Senegal)

JOSEPH SAMBA GOMIS, MAMADOU THIOR, IDRISSE CISSÉ, SÉCOU OMAR DIEDHIOU
20-35

The Assessment of the Impact of Installing Bus Information System (B.I.S) on Traffic Conditions in Dakar, Senegal

EL HADJI MALICK DIENG, DJIBY SOW
36-59

Caractérisation hydrochimique des eaux souterraines de la zone de contact du bassin sédimentaire côtier et du socle du Précambrien inférieur au sud-ouest de la République du Congo

MÉDARD NGOUALA MABONZO
60-85

L'anthropisation des milieux humides et dégradation de l'environnement en Tunisie septentrionale. Le cas du bassin-versant de Sébkhat Séjoumi

ABDELHAMID BEN GHAZI, HAJER ABDELLAOUI
86-124

Cartographie et prédiction des risques d'érosion hydrique dans le bassin versant de la Yewa (Benin)

OLUWATOYIN PIERRE TOUNDOH, ERIC ALAIN MAHUGNON TCHIBOZO
125-150

Radioscopie d'une ville religieuse : entre fabrique urbaine originale et défis de durabilité de la ville de Touba (Sénégal)

DJIBY SOW
151-169

Place de l'appareil de formation agricole dans l'environnement de l'unité de production agricole et son rôle dans l'épanouissement du monde rural et le développement du secteur productif agricole. Cas de l'Algérie

SEDDIK HAICHOIR
170-190

Cartographie et prédiction des risques d'érosion hydrique dans le bassin versant de la Yewa (Benin)

Oluwatoyin Pierre TOUNDOH, **Eric Alain Mahugnon TCHIBOZO**

Laboratoire des Applications Géomatique et Gestion de l'Environnement (LA2GE) /
Faculté des Sciences Humaines et Sociales (FASHS-Adjarra), Département de Géographie
et Aménagement du Territoire (DGAT), Université d'Abomey-Calavi (UAC), Bénin

Sommaire :

1. INTRODUCTION.....	127
2. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	128
3. METHODOLOGIE	129
3.1 Données et matériels	129
3.2 Méthodes	130
4. RESULTATS	135
4.1 Simulation de l'écoulement de l'eau.....	135
4.2 Simulation des transports de sédiments.....	140
5. DISCUSSION.....	144
6. CONCLUSIONS	147
7. ACKNOWLEDGEMENTS	147
8. REFERENCES	147

Citer ce document :

TOUNDOH, O.P., TCHIBOZO, E.A.M. 2020. Cartographie et prédiction des risques d'érosion hydrique dans le bassin versant de la Yewa (Benin). *Cinq Continents* 10 (21): 125-150

Cartographie et prédiction des risques d'érosion hydrique dans le bassin versant de la Yewa (Benin)

Oluwatoyin Pierre TOUNDOH, Eric Alain Mahugnon TCHIBOZO

Mapping and prediction of water erosion hazards in the yewa watershed (Benin). Water erosion is the most common type of soil degradation in the Yéwa watershed and has been recognized as a major problem. The objective is to study the vulnerability of soils to erosion in the Yéwa watershed using the SIMWE model. Using a GIS, allowing to spatialize and cross a digital terrain model, a directional flow gradient, excess precipitation rate, the roughness coefficient, the runoff depth, the soil erodibility, the coefficient transport capacity and critical shear stress, this study made it possible to predict the sensitivity to water erosion. The prediction result shows that 55.23% (480.64 km²) of the watershed has a low to moderate sensitivity to erosion for 3.84% (33.45 km²) severe to very severe sensitivity. As for the deposit, 18.58% (161.71 km²) of the basin area reveals a low to moderate deposit for 3.90% (33.98 km²) of high to very high deposit with a positive balance of around 4120.44 t / ha / year. Lesser soil losses are associated with dense cover such as dense forests in the southern part of the basin and, conversely, higher values are associated with bare soil or degraded undercover. This study could constitute the starting point for the implementation of a coordinated management of erosion control actions and contribute to the understanding of current dynamics.

Keywords: Yéwa, water erosion, GIS, SIMWE, Benin.

Cartographie et prédiction des risques d'érosion hydrique dans le bassin versant de la Yéwa (Bénin). L'érosion hydrique est le type le plus répandu de dégradation des sols dans le bassin de la Yéwa et a été reconnu comme étant un important problème. L'objectif est d'étudier la vulnérabilité des sols à l'érosion du bassin versant de la Yéwa au moyen du modèle SIMWE. A l'aide d'un SIG, permettant de spatialiser et de croiser un modèle numérique de terrain, un gradient directionnel de débit, taux de précipitation excédentaire, le coefficient de rugosité, la profondeur de ruissellement, l'érodibilité des sols, le coefficient de capacité de transport et la contrainte de cisaillement critique, cette étude a permis de prédire la sensibilité à l'érosion hydrique. Le résultat de la prédiction montre que 55,23% (480,64 km²) de la superficie du bassin versant ont une sensibilité faible à modérée à l'érosion pour 3,84 % (33,45 km²) de sensibilité sévère à très sévère. Quant au dépôt, 18,58% (161,71 km²) de la superficie du bassin révèle un dépôt faible à modéré pour 3,90% (33,98 km²) de dépôt élevé à très élevé avec un bilan positif d'environ 4120,44 t/ha/an. Les pertes de sols moins importantes sont associées au couvert dense telles que les forêts denses de la partie sud du bassin et à l'inverse les valeurs plus élevées sont associées aux sols nus ou aux sous couverts dégradés. Cette étude pourrait constituer le point de départ à la mise en œuvre d'une gestion coordonnée des actions de lutte contre l'érosion et contribuer à la compréhension des dynamiques actuelles.

Mots clés : Yéwa, érosion hydrique, SIG, SIMWE, Bénin.

1. INTRODUCTION

La question de la dégradation des terres est aujourd'hui au cœur des dix-sept Objectifs de Développement Durable (ODD). Les parcelles agricoles sont en Afrique les plus en proie à cette dégradation. L'agriculture qui constitue le pilier de l'économie africaine, compte pour approximativement 20% du PIB du continent, 60% de sa main d'œuvre, 20% de la totalité des exportations et représente la principale source de revenu pour les populations rurales (FAO, 2016).

Au Bénin, l'érosion des sols touche plusieurs régions et plus particulièrement les parcelles agricoles. La dynamique de l'érosion est fonction des rapports entre la capacité érosive de la pluie, du ruissellement, de la susceptibilité du sol à être érodé et des activités humaines (Eténe, 2017 ; Agoïnon, 2012 ; Amoussou, 2010 ; FAO, 2005 ; Domingo, 1996). Les cours d'eau sont particulièrement attractifs pour les populations du fait de la diversité des activités économiques qu'ils permettent. Le bassin de la Yéwa n'échappe pas à cette réalité. Il présente une économie essentiellement rurale avec plus de 80% de la population qui pratique l'agriculture (Adéaga, 2005). Avec l'expansion agricole et les pratiques culturales, couplé à la perte du couvert végétal et à l'agressivité climatique et la pente, le bassin est sensible au processus d'ablation et d'accumulation de sédiment. Ce bassin est confronté aux risques de ruissellement et d'érosion dus au comportement hydrologique du sol et en particulier à la capacité d'infiltration qui dépend des états de surface et des types de sols. L'érosion est le type le plus répandu de dégradation des sols dans le bassin et a été reconnu comme étant un important problème. Le processus de dégradation des sols dans le bassin comprend la perte de la couche arable par l'action de l'eau, la détérioration chimique, la dégradation physique, la détérioration biologique des ressources naturelles, y compris la réduction de la biodiversité du sol (Junge *et al.*, 2008 ; Lal, 2001 ; Ologe 1988 ; Stamp, 1938).

Depuis une trentaine d'années, les études sur l'érosion hydrique suivent, deux trajectoires différentes selon des méthodes et des échelles de mesures, ce qui a modifié la nature et la portée des résultats obtenus (Collinet, 1988 ; FAO et ITPS, 2015). Cette recherche a pour objectif d'étudier la vulnérabilité des sols aux phénomènes d'érosion hydrique dans le bassin de la Yéwa au Bénin. Dans ce cadre, l'évaluation des risques d'érosion hydrique dans le bassin versant a nécessité la cartographie des différents facteurs intervenant dans le processus de ruissellement et la prédiction des quantités de terres érodées et déposées. Une intégration de données multisources à un Système d'Information Géographique (SIG) a été réalisée grâce au modèle SIMWE (SIMulated Water Erosion) implémenté dans le SIG GRASS (Toundoh, 2015).

2. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Le bassin versant de la rivière transfrontalière, la Yéwa, est à cheval sur le Bénin et le Nigéria. La partie Sud-ouest du bassin est un sous-bassin de la rivière Yéwa qui couvre la plus grande partie de la plaine inondable et la dépression d'adjarran (Toundoh, 2015). Cette partie du bassin fera uniquement l'objet de notre étude. Il se présente sous une forme allongée avec une orientation NNW-SSE et est situé entre 6°26' et 6°57' Nord et entre 2°31' et 2°47' Est (Figure 1). Il couvre une superficie de 882,60 km².

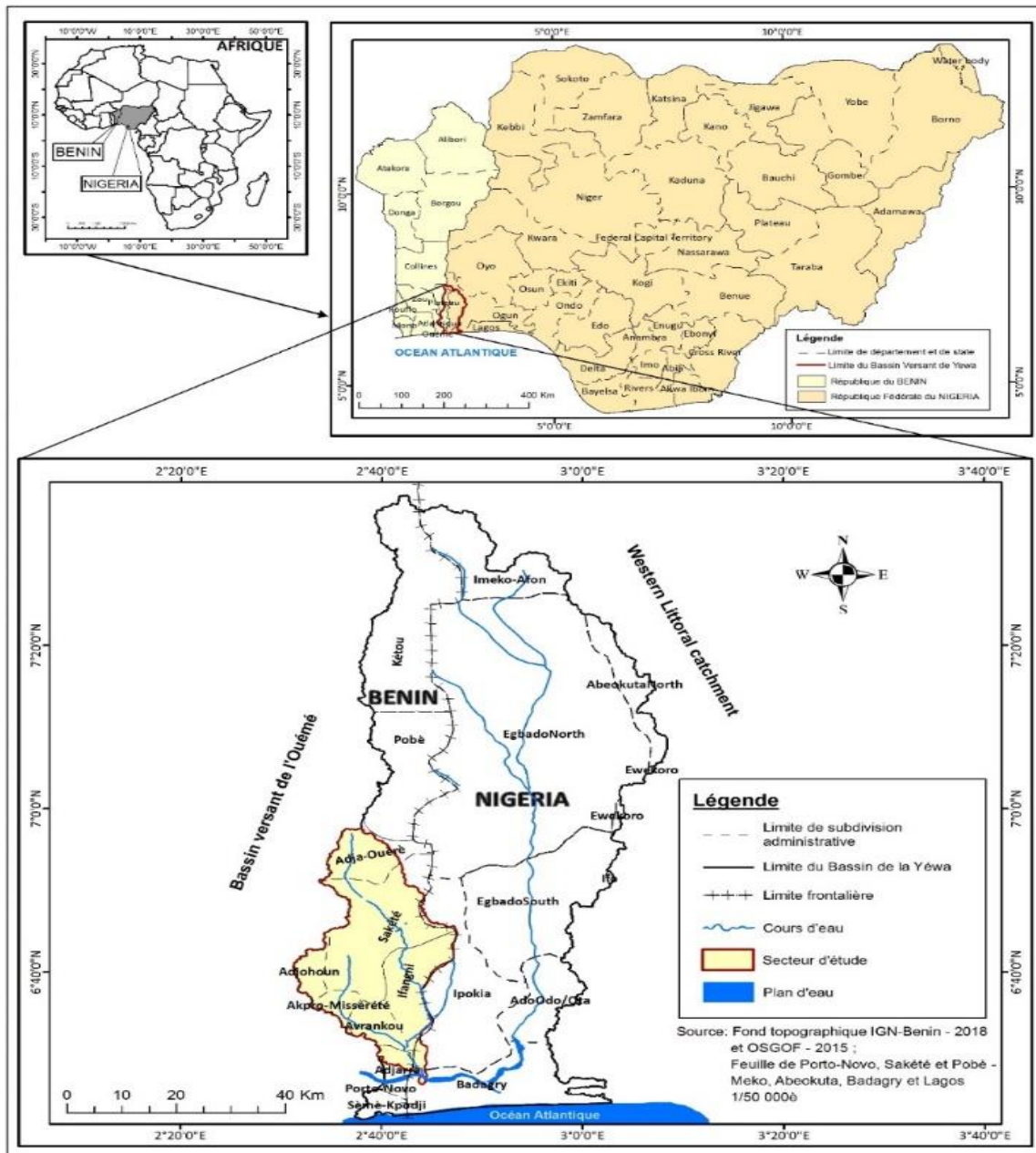


Figure 1. Localisation du secteur d'étude

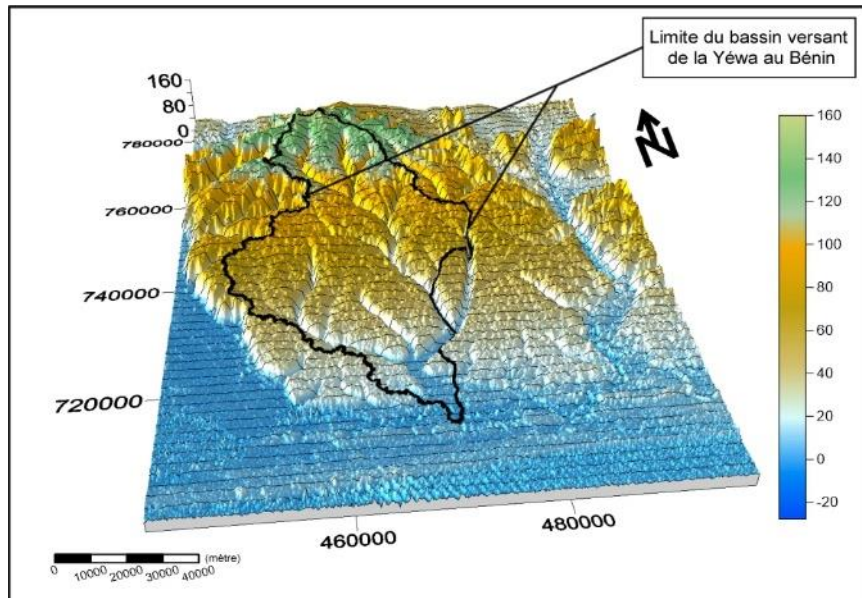


Figure 2. MNT du bassin de la Yéwa
Source : Image SRTM, 2014

Sur le plan administratif, ce sous bassin s'étend sur deux départements du Bénin à savoir l'Ouémé et le Plateau. Du Nord au Sud, les communes situées dans son emprise sont : Adja-Ouèrè, Sakété, Adjohoun, Ifangni, Akpro-Missérété, Avrankou, Adjarra et Dangbo. Le bassin est caractérisé par un climat subéquatorial constitué de deux saisons pluvieuses (avril à juillet et octobre à novembre) qui alternent avec deux saisons sèches (août à Septembre et décembre à mars) (Amoussou, 2010). Les surfaces représentées sous formes de classes de couleurs différentes (Figure 2) en partant de la classe de basse altitude dont le point le plus bas présente une altitude égale à - 6 m jusqu'à celle de haute altitude dont le point culminant se tient à 164 m et une altitude moyenne est de 69,20 m. La géologie du bassin s'étend sur deux (02) formations : le bassin sédimentaire côtier et le socle cristallin. L'altération de ces différentes formations et leur évolution ont donné plusieurs types de sols : les sols ferralitiques et les sols hydromorphes.

3. METHODOLOGIE

3.1 Données et matériels

Le matériel est composé d'un GPS, des logiciels de SIG (ENVI, QGIS, SIG GRASS et libre office) et des données qui proviennent de la télédétection, de la cartographie, de levés terrain, et des travaux publiés antérieurement sur la zone d'étude. Les caractéristiques de ces données sont présentées comme suit :

- Les cartes topographiques de l'Afrique de l'Ouest, feuilles de Porto-Novo NB-31-XV et de Zagnanado NB-31-XXI au 1/200000 l'IGN-Bénin de 1992.

- Les données administratives sur la zone d'étude sont au format vecteur (.shapefile). Elles sont obtenues sur le géoportail de l'IGN-Bénin (<https://www.geobenin.bj/fr/>).
- Les fichiers vecteurs portant des informations pédologiques et géologiques ont été obtenus au Centre National d'Agro-Pédologie (CENAP) et à l'Office Béninois des Mines (OBEMINES).
- Les images satellites sont constituées des scènes de Sentinel-2B (Scène T31NDH) et de l'image SRTM DEM. Sentinel-2B, a permis de fournir des images à 10, 20 et 60 mètres de résolution de Janvier 2019 (Ouattara, 2017). Pour la classification, seules les bandes 2, 3, 4 et 8 de 10 mètres de résolution ont été utilisés. Ces bandes du visible et du proche infrarouge ont permis d'identifier les classes d'occupation du sol (forêt dense humide, forêt claire, savane arbustive, agglomération, sols nus, cultures et jachères ainsi que les plans d'eau et cours d'eau). L'image satellite de 2019 a permis de réaliser la carte d'occupation des sols pour le calcul des facteurs impliquants la couverture végétale au niveau du modèle SIMWE.

Le modèle Numérique de Terrain (MNT SRTM) de format (.tif), obtenu sur le site (<http://earthexplorer.usgs.gov/>) de la NASA, a permis de délimiter le bassin versant et d'effectuer le calcul des facteurs topographiques.

- Les coordonnées GPS ont aidé à la validation de la classification de 2019 et à la localisation des échantillons des mesures sur le terrain.
- Les données climatiques utilisées ici ont été les hauteurs de pluie pour la modélisation de l'érosion hydrique. Les séries pluviométriques mensuelles de l'année 2018 sont recueillies à l'Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar (ASECNA) de Cotonou et au Nigerian Meterological Agency (NIMET) de Lagos. Au total, huit (08) stations de mesure sont identifiées (Pobè, Porto-Novo, Sakété, Adjohoun, Cotonou-Port, Bonou, Sèmè) dont une située au Nigéria (Badagry).

3.2 Méthodes

La modélisation de l'érosion hydrique à partir du modèle à base physique SIMWE (Mitas et Mitasova, 1998) consiste à simuler le ruissellement hydrologique et le transport des sédiments en utilisant une méthode d'échantillonnage. SIMWE est un modèle qui décrit avec précision les processus d'érosion, de transport et de dépôt dans des conditions variables dans l'espace. Dans le cadre de cette étude, les modules *r.sim.water*, *r.sim.sediment*, et *r.slope.aspect*, *r.mapcalc* et *v.to.rast* du SIG Open Source - GRASS ont été utilisés pour la prédiction. Les deux modules, *r.sim.water* pour simuler l'écoulement de l'eau de surface et *r.sim.sediment* pour la simulation du transport des sédiments

représentent les deux grandes étapes de la modélisation (Mitasova et al., 1997). On distingue :

3.2.1 La simulation de l'écoulement de l'eau

La simulation de l'écoulement de l'eau (*r.sim.water*) est un modèle de simulation du ruissellement à l'échelle du paysage conçu pour les terrains et variables en fonction de paramètres tels que, le sol, la couverture et les conditions de précipitations excédentaires. Les données d'entrée comprennent : un modèle numérique de terrain, un gradient directionnel de débit, le taux de précipitation excédentaire, et le coefficient de rugosité de Manning (Mitasova et al., 1997) cité par (Toundoh, 2015). Trois paramètres permettent de contrôler la simulation : le nombre de walkers, le nombre d'itérations et la diffusion. La simulation comprend un nombre d'itérations pour estimer la densité de probabilité de la variable de sortie du modèle. L'itération consiste en la répétition d'une séquence d'instructions, ou d'une partie de programme, un nombre de fois fixé à l'avance, dans le but de reprendre un traitement sur des données différentes. Le nombre d'itérations contrôle la durée de l'événement simulé. Dans le cas de ce modèle, le nombre d'itération est 15 et correspond à une année. Le walker représente la taille de la fenêtre glissante qui représente ici le double du nombre de pixels (avec une résolution spatiale de 30m). Le walker représente l'élément pour lequel le modèle SIMWE calcule la direction de déplacement de particules pendant une itération, en fonction de la configuration du relief. La diffusion tend à lisser les résultats du modèle (Mitas et Mitasova, 1998). Dans le cadre de cette étude, ce paramètre a été laissé par défaut (Figure 3). Nous avons :

- **Les gradients directionnels de débit (dx et dy)** donné par le premier ordre de dérivées partielles de dx / dz et dy / dz . Les dérivées partielles sont déterminées grâce au gradient de débit de surface, la direction et le débit d'eau. Le gradient de débit a été calculé en utilisant le module *r.slope.aspect* avec une image MNT comme donnée d'entrée.

- **Taux de précipitations excédentaires (Tpe)** est estimé par :

$$Tpe = \text{hauteurs de pluie} - \text{infiltration} - \text{facteur C}$$

où les hauteurs de pluie sont obtenues grâce aux stations couvrant la zone d'étude, l'infiltration a été calculée à partir du module *r.mapcalc* basé sur les données pédologiques et les travaux d'Azontondé (1991) sur la texture et les valeurs du taux d'infiltration des sols béninois (Tableau 1). Le facteur C a été déduit de la carte d'occupation du sol et de la table de référence fournie par Roose (1977) utilisé pour le calcul du facteur C. Ce paramètre influe sur la grandeur des taux d'érosion / dépôt. Plus les excédents de précipitations augmentent, plus les taux d'érosion et de dépôt augmentent. Mais il n'influe pas sur la répartition spatiale des processus d'ablation et

d'accumulation. Les données pluviométriques ont été recueillies à partir des huit (8) stations localisées au niveau du bassin et ont été ensuite interpolé par la méthode de Krigeage du SIG ArcGis. Les hauteurs de précipitation excédentaire sont donc obtenues à la suite d'une opération de soustraction entre les hauteurs de pluie interpolées, le taux d'infiltration et la couverture végétale à l'aide du module *r.mapcalc* du SIG GRASS.

Tableau 1. Valeur d'infiltration par type de sol présent dans le bassin

Type de sol	Infiltration (mm/hr)
Sols ferrallitiques	80
Sols hydromorphes	50

Source : Adapté de Azontonde (1991)

- **Coefficient de rugosité de surface de Manning (n)** influe sur la vitesse du courant et des flux de sédiments. La détermination de ce coefficient dépend de la couverture du sol et du processus d'infiltration. La couverture du sol qui n'est rien d'autre que le facteur C, est extraite donc de la carte d'occupation du sol du bassin de l'année 2019. La carte d'infiltration est déduite des données pédologiques. Les valeurs du coefficient ont été obtenues à partir d'expériences et sont disponibles dans le guide pratique d'aménagement des bassins versant fourni par la FAO (1994)(Tableau 2). La variation de la rugosité de la surface change la configuration spatiale de l'érosion et de la sédimentation. Le Tableau 2 montre les valeurs de ce paramètre en fonction de chaque combinaison (unité d'occupation - texture de sol).

Tableau 2. Les valeurs du coefficient de rugosité de Manning

Type d'occupation du sol \ Texture	Sablo - Argileuse	Argileuse
Forêt dense humide, Forêt claire	0.1	0.1
Savane arbustive, Cultures et Jachères, Plantation	0.05	0.09
Agglomération	0.025	0.022
Sol nu	0.01	0.01
Plan d'eau, marécage	0.99	0.99

Source : adapté de FAO, 1994

Les différents paramètres ayant été cartographiés à la même résolution spatiale (30 m), les résultats obtenus sont introduits dans le module *r.sim.water* du SIG GRASS. Cette première partie de la prédiction calcule la répartition de la profondeur de ruissellement.

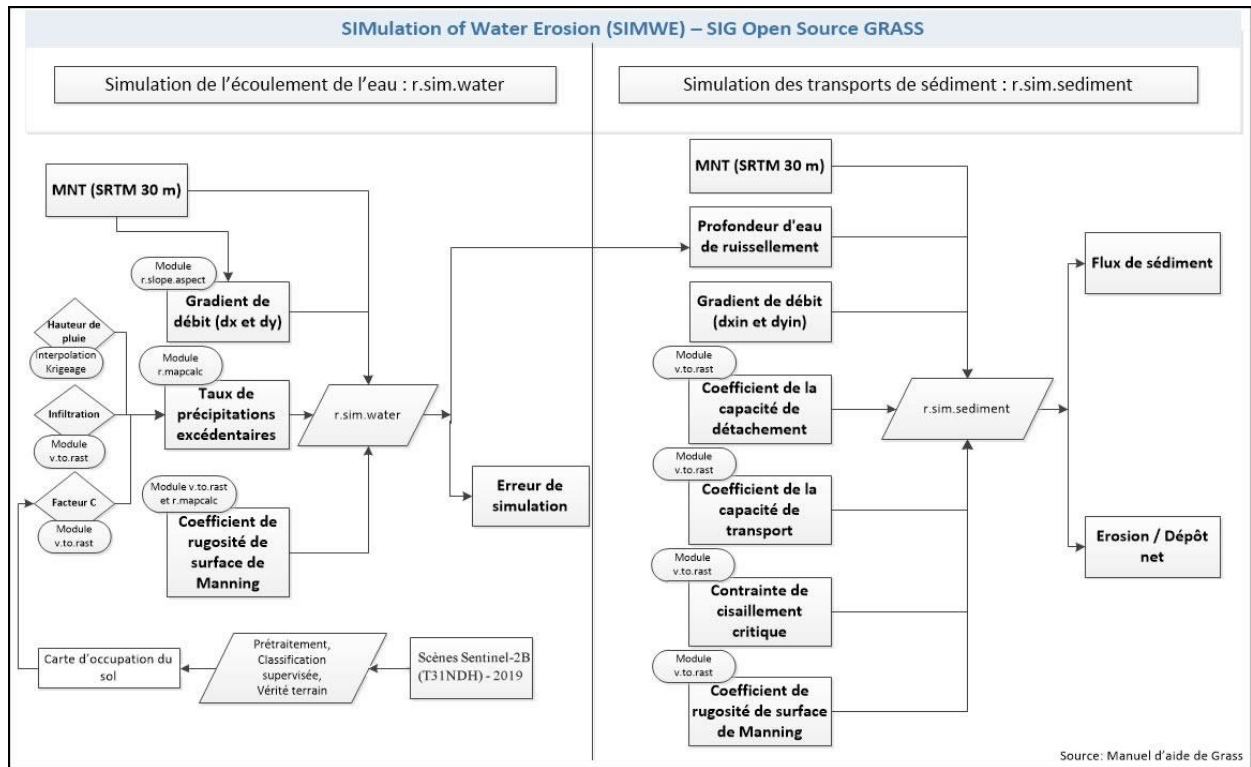


Figure 3. Processus de prédiction de l'érosion hydrique au moyen de SIMWE

3.2.2 La simulation des transports de sédiment

La simulation de transport de sédiment (*r.sim.sediment*) est un modèle de simulation du transport des sédiments et des dépôts liés à l'érosion hydrique. Elle a été conçue pour les terrains variables dans l'espace en fonction de paramètres tels que le sol, et l'occupation du sol. Le modèle de l'érosion des sols est basé sur le modèle WEPP de l'érosion des versants. Les données d'entrée comprennent : le modèle numérique de terrain, le gradient directionnel de débit, la profondeur de ruissellement, la capacité de détachement, la capacité de transport, la contrainte de cisaillement critique et le coefficient de rugosité de surface de Manning (Mitasova et *al.*, 1997) cité par (Toundoh, 2015).

Profondeur de ruissellement est extraite des résultats de la simulation de l'écoulement de l'eau par le module de *r.sim.water*.

Coefficient de la capacité de détachement (érodibilité K) est une mesure de la sensibilité du sol au détachement de particule causé par le ruissellement. La modification des valeurs de l'érodibilité change la répartition spatiale de l'érosion et des dépôts, mais l'impact sur l'ampleur de la charge de sédiments dans les cours d'eau est faible (Ministère de l'Environnement du Nouveau-Brunswick, 2012). Au Bénin, des études ont été conduites sur l'érodibilité des sols par Azontondé (1991). Les valeurs du coefficient par type de sol du Bénin sont alors extraites des travaux d'Azontondé. Le Tableau 3 montre les différentes valeurs de K telles que calculées par l'auteur. En se basant sur les

caractéristiques des sols, les valeurs de K ont été utilisées pour la cartographie de l'érodibilité des sols. Pour la conversion en unité Système Internationale (SI), il faut multiplier K par 0,1317. Le module utilisé pour réaliser l'érodibilité des sols du bassin de la Yéwa au Bénin est le *r.recode* dans le SIG GRASS (Toundoh, 2015).

Tableau 3. Les valeurs de K en fonction du type de sol du bassin de la Yéwa

Types de Sol	Sols ferrallitiques	Sols alluviaux hydromorphes et Vertisols
Valeur de K	0,07	0,1

Source : Adapté de Azontondé (1991)

Coefficient de la capacité de transport (kt) : C'est une mesure de la capacité de l'écoulement de l'eau à transporter les particules de sédiment. Il est fonction des propriétés du sol, mais peut aussi être influencé par la végétation. Ce paramètre a un impact profond sur le processus d'érosion, car il influence aussi bien la distribution spatiale et l'ampleur des flux de sédiments et le taux d'érosion / dépôt. La capacité de transport pour les processus d'érosion décrit la capacité de ruissellement à transporter des sédiments. Les valeurs du coefficient sont disponibles dans le manuel d'utilisation du modèle WEPP (Flanagan et Nearing, 1995).

Contrainte de cisaillement critique (tc) représente la résistance du sol aux forces de cisaillement liées au ruissellement. Elle est fonction des caractéristiques pédologiques et de l'occupation du sol dans le milieu. Ce paramètre a un impact sur la tendance des taux d'érosion / de dépôt. Ce paramètre peut réduire l'étendue spatiale de l'érosion et peut aussi augmenter l'amplitude des taux d'érosion sur les pentes raides et dans les zones où les flux de sédiments sont concentrés. Les valeurs du coefficient sont disponibles dans le manuel d'utilisation du modèle WEPP (Flanagan et Nearing, 1995). Le Tableau 4 présente les valeurs de la contrainte de cisaillement critique par texture de sol présent dans le bassin de la Yéwa (Toundoh, 2015) au Bénin.

Coefficient de rugosité de surface de Manning (n)

Ce facteur est le même qu'au niveau de la première partie (*r.sim.water*) de la simulation.

Le transport des sédiments et l'érosion nette / dépôt sont simulées par le module *r.sim.sediment* du SIG Grass. L'intégration des différents facteurs (profondeur de ruissellement, coefficient de la capacité détachement, coefficient de la capacité de transport, contrainte de cisaillement critique et le coefficient de rugosité de surface de Manning) (Toundoh, 2015) dans ce module a permis de calculer les diverses cartes thématiques notamment celle du flux de sédiment et celle de l'érosion / dépôt net.

Tableau 4. Les valeurs du coefficient de la capacité de transport et de cisaillement critique par texture de type de sol

Texture	k_t	t_c
Argileuse	0.1	0.01
Sablo-Argileuse	0.0005	0.8
Sableuse	0.005	0.1

Source : Adapté de Flanagan et Nearing (1995)

4. RESULTATS

4.1 Simulation de l'écoulement de l'eau

La simulation de l'écoulement de l'eau est la première étape du processus de calcul du modèle SIMWE. A cette étape du travail, quatre paramètres ont été déterminés : le modèle numérique de terrain, les gradients directionnels de débit dx et dy , les hauteurs de précipitations excédentaires, et le coefficient de rugosité de surface de Manning (Toundoh, 2015).

Le modèle numérique de terrain (MNT) utilisé aux niveaux des deux étapes de la simulation du modèle SIMWE, permet d'avoir une répartition spatiale des altitudes dans l'ensemble du bassin. Ce facteur fait référence aux données numériques de la topographie du bassin de la Yéwa au Bénin.

Les gradients directionnels de débit dx (Figure 4) et dy (Figure 5) permettent de déterminer la direction et l'amplitude de la vitesse d'écoulement de l'eau. Ces paramètres représentent des mesures de changement d'altitude et sont les dérivées partielles dans une direction est-ouest (dx) et nord-sud (dy) de la topographie du bassin. Les Figures 4 et 5 montrent comment la surface change en termes de gradient et de courbure dans une direction constante. L'amplitude ou la taille du gradient est la pente, tandis que la direction dans laquelle la valeur maximale de cette amplitude se produit est connue comme l'aspect. Ils ont été utilisés pour la simulation de l'écoulement ainsi que du transport de sédiments.

Les hauteurs de précipitations excédentaires. La hauteur de précipitation excédentaire est définie par les hauteurs de pluie en excès après les processus d'infiltration au niveau des sols et d'interception par le couvert végétal.

Les hauteurs de pluie permettent d'intégrer le comportement des précipitations dans la prédiction de l'érosion hydrique. Les valeurs des hauteurs de pluie sont comprises entre 700 et 1600 mm avec une moyenne de 1185 mm (Figure 6). Pour 60% de la surface du bassin versant, les valeurs des hauteurs de pluie sont supérieures à la moyenne. Les

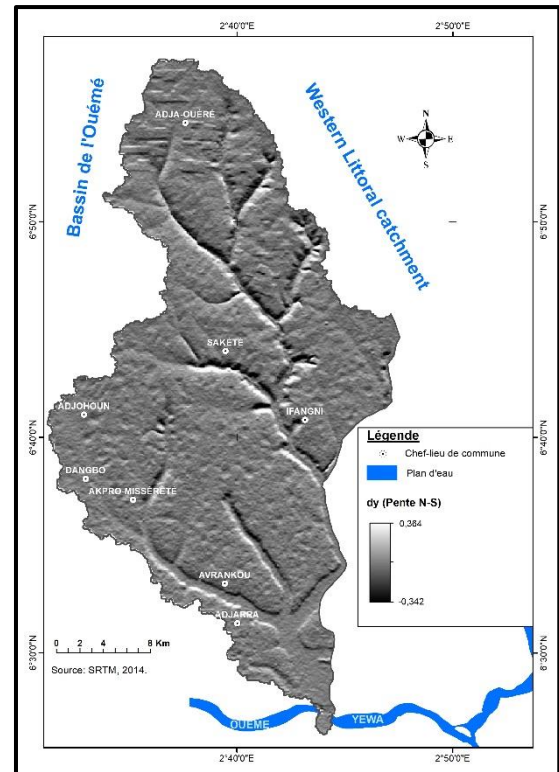
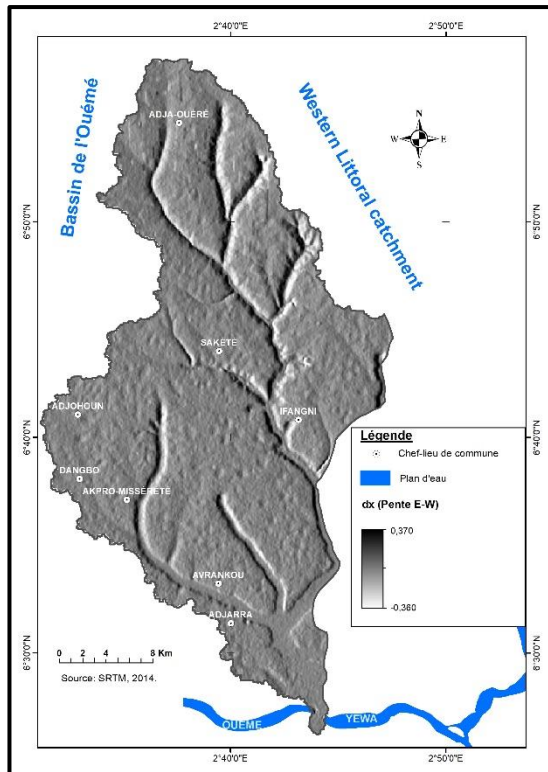


Figure 4. Gradient directionnel de débit dx (Pente E-W) Figure 5. Gradient directionnel de débit dy (Pente N-S)

valeurs les plus faibles (700 à 1100 mm) s'établissent sur le plateau où sont situées les communes d'Adja-Ouèrè et de Sakété. Les valeurs les fortes (1100 à 1600 mm) sont attribuées à la plaine située au Sud du bassin.

Le processus d'infiltration au niveau des sols est indispensable dans le calcul des précipitations excédentaires. La Figure 8 montre la répartition spatiale des valeurs d'infiltration pour chaque type de sol (Figure 7) selon leur texture. Les valeurs de l'infiltration varient entre 50 et 80 mm/hr. Environ 70% du bassin est constitué de sols ferrallitiques et correspond à la plus forte valeur d'infiltration (80 mm/hr). Et le reste du bassin abritant des sols hydromorphes correspond à la plus faible valeur d'infiltration (50 mm/hr).

Le couvert végétal protège la surface de la battance, prolonge ainsi la durée d'infiltration et réduit le volume ruisselé. Ce paramètre représente le facteur C d'occupation du sol. Le calcul du facteur d'occupation du sol C propose une estimation globale de la sensibilité de la couverture des sols (Figure 9) sur le bassin versant de la Yéwa. La carte de répartition du facteur C (Figure 10) montre la sensibilité et la contribution des différents types d'occupation du sol vis-à-vis des processus érosifs. Le facteur C varie entre 0 et 1. On peut distinguer six (06) types d'occupations majeures (Sol nu et Agglomération, Forêt claire, Savane arbustive, Mosaïque de cultures et plantation, forêt dense humide et plan d'eau) qui occupent le territoire du bassin. Les zones les plus

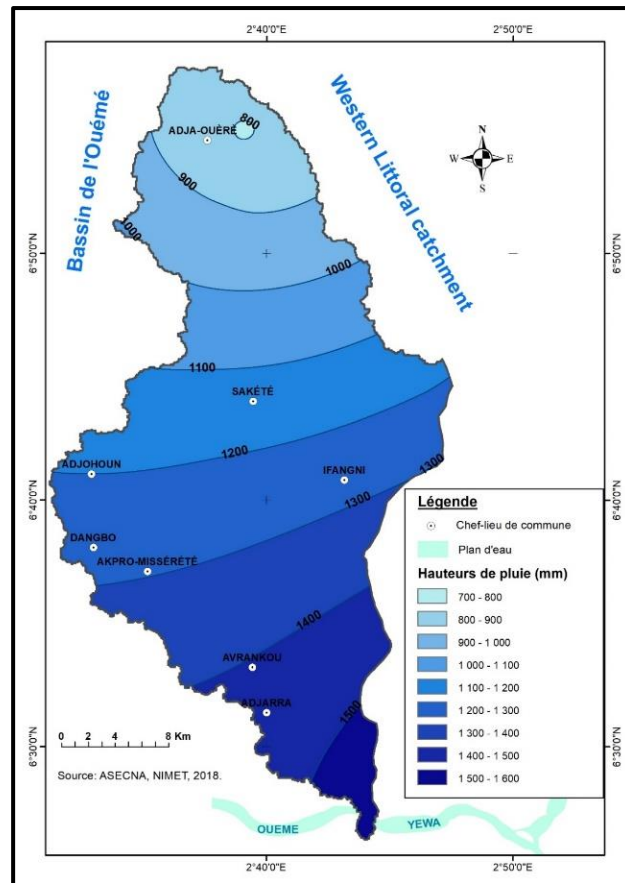


Figure 6. Hauteurs pluviométriques

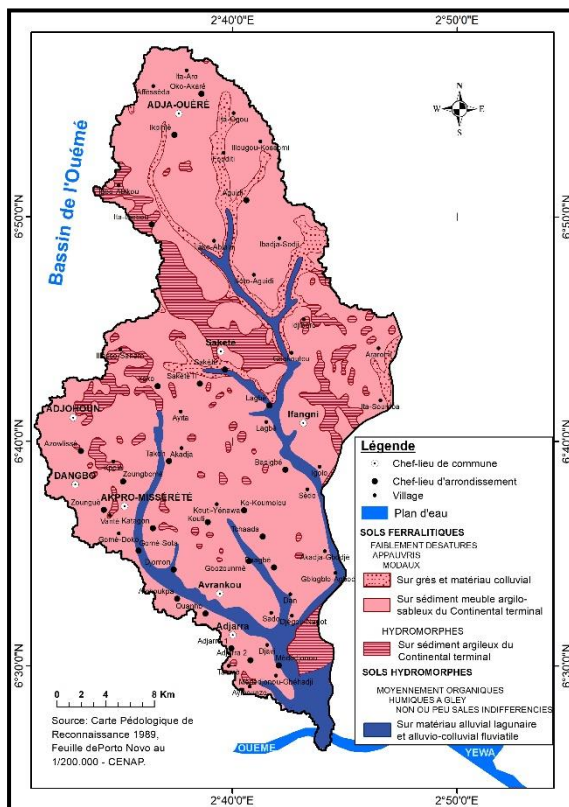


Figure 7. Pédologie du bassin de la Yéwa

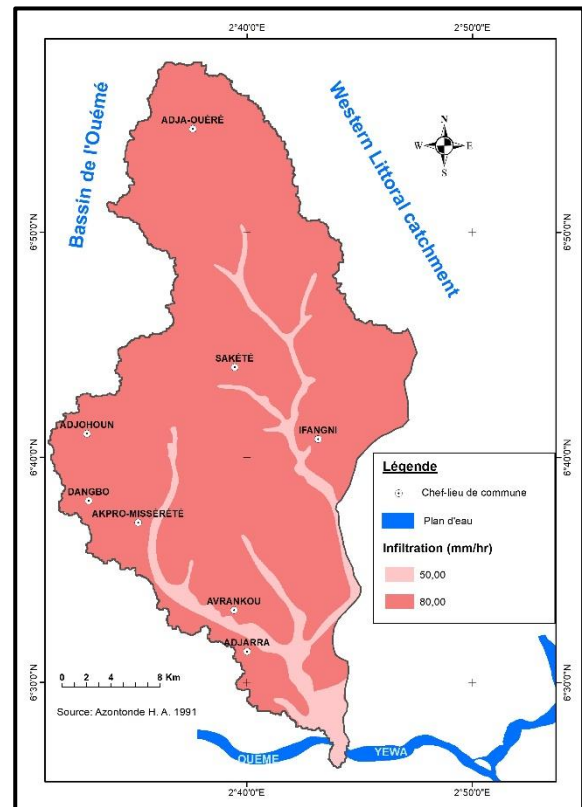


Figure 8. Taux d'infiltration par type de sol

vulnérables à l'érosion sont attribuées aux sols nus et aux agglomérations. Les valeurs les plus faibles sont attribuées aux types d'occupation du sol tels que les plans d'eau, les forêts denses humides, les forêts claires et les savanes arbustives. Les fortes sensibilités à l'érosion sont associées à la présence étendue de formations végétales secondaire de type savane arbustive dégradée et aux zones de cultures. Les sols nus correspondent au type d'occupation du sol le plus vulnérable à l'érosion. Cette classe est cependant sous-représentée sur l'ensemble du bassin de la Yéwa.

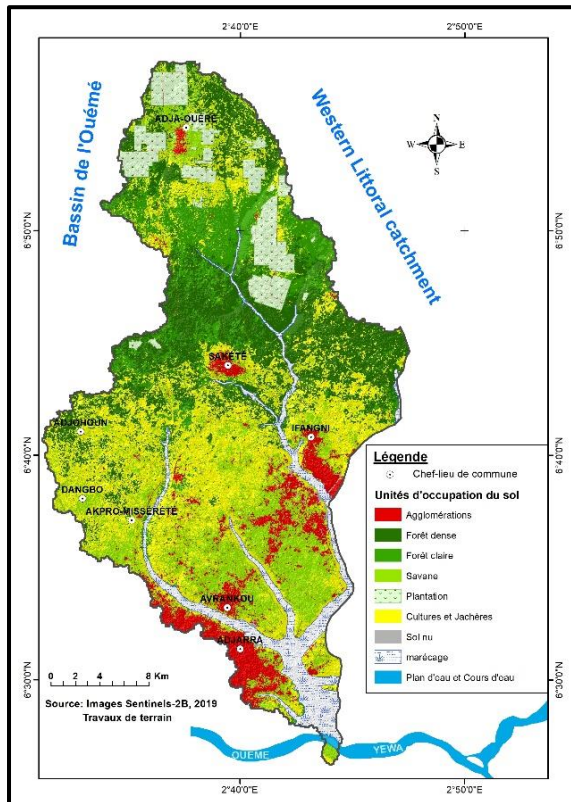


Figure 9. Occupation du sol du bassin de la Yéwa

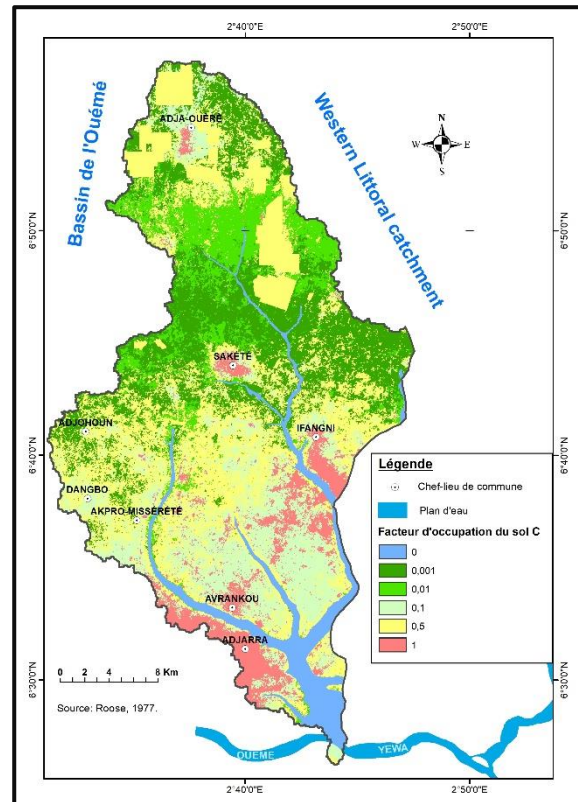


Figure 10. Facteur C du bassin de la Yéwa

Les hauteurs de précipitation excédentaire (Figure 11), obtenues à partir d'une analyse SIG raster, présente les hauteurs de pluies excédentaires de l'année 2018 dans le bassin de la Yéwa au Bénin. Les valeurs des hauteurs de pluies excédentaires augmentent d'aval en amont du bassin de la Yéwa. Les valeurs varient entre 912,73 et 1356,29 mm/hr avec une moyenne établie à 1134,51 mm/hr. Les valeurs les plus faibles s'établissent sur le plateau où sont situées les communes Adja-ouère, sakété et Adjohoun alors que les valeurs les plus fortes sont attribuées à la région de plaine où sont situées les communes d'adjarra et avrankou.

Le coefficient de rugosité de surface de Manning (n)

La rugosité de surface, représentée par le coefficient de Manning, dépend de la couverture végétale ainsi que des propriétés du sol et ses valeurs dans différents cas de figure ont été obtenus à partir des travaux de la FAO (1994). Un croisement entre les couches d'occupation du sol et des types de sols par texture a été effectué. Ce qui donne donc une carte raster représentant une spatialisation du coefficient de rugosité de surface de Manning (Figure 12). Le tableau ci-après montre les valeurs de ce paramètre en fonction de chaque combinaison (texture de sol - unité d'occupation).

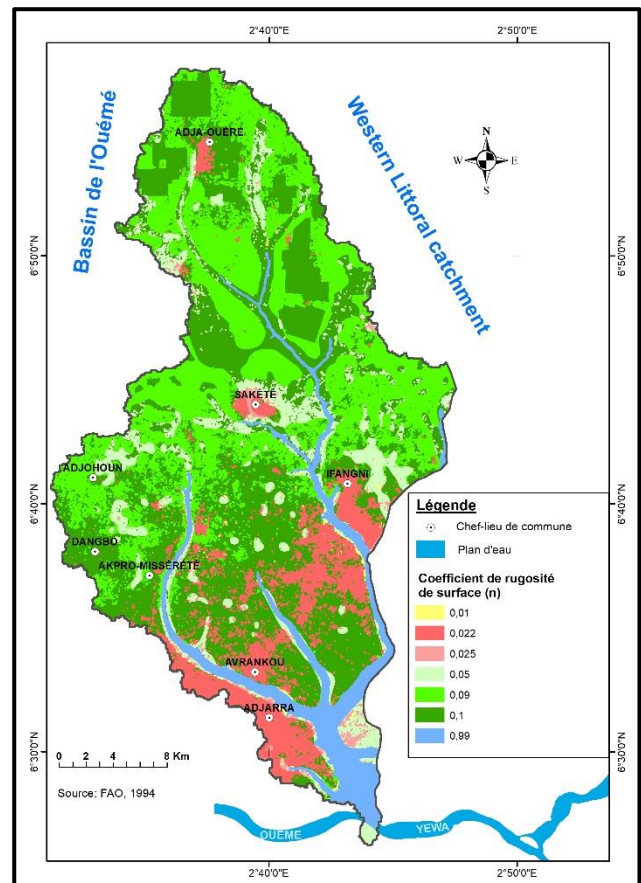
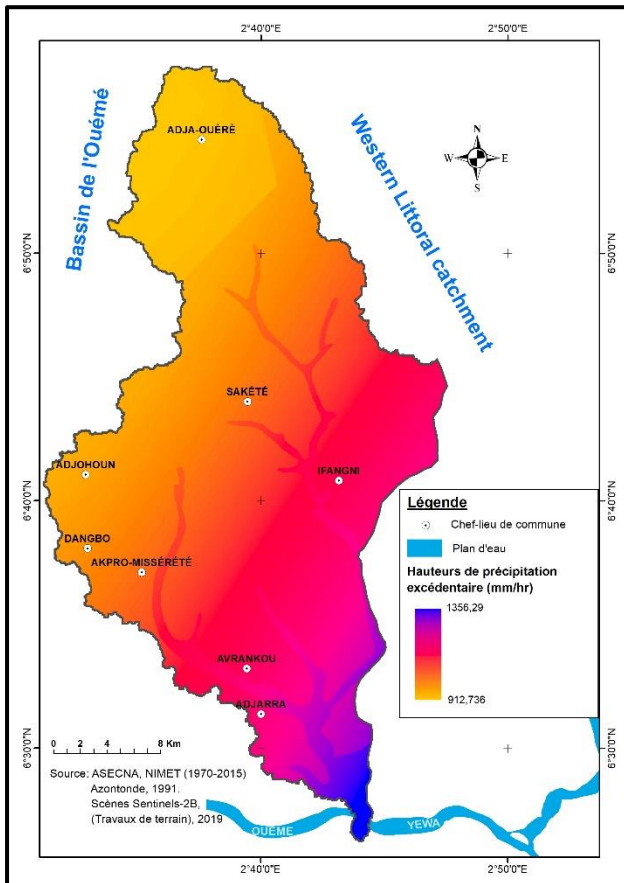


Figure 11. Hauteurs de précipitation excédentaire

Figure 12. Coefficient de rugosité de surface de Manning

Résultat de la simulation de l'écoulement de surface

Les différents paramètres ayant été cartographiés à la même résolution (30 m), les résultats obtenus sont introduits dans le module *r.sim.water* du SIG GRASS. Cette première partie de la modélisation calcule la répartition de la profondeur de ruissellement. La profondeur de ruissellement sera utilisée pour la simulation des transports de sédiments. La Figure 13 présente le résultat de la simulation. Le résultat est utilisé pour la simulation des transports de sédiments.

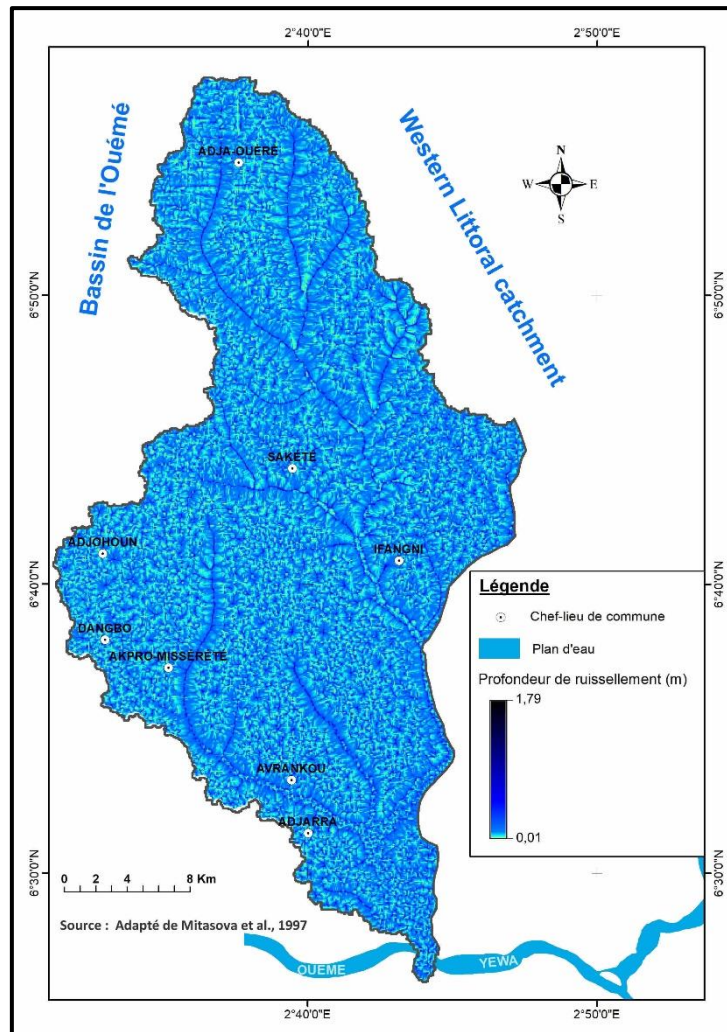


Figure 13. Profondeur de ruissellement

4.2 Simulation des transports de sédiments

Les cartes raster de sortie de la seconde étape de simulation du modèle d'érosion distribués sont les flux de sédiments et l'érosion / dépôt net. La simulation des transports de sédiments nécessite implication de sept (07) facteurs essentiels :

- La profondeur de ruissellement : Elle a été obtenue au cours de l'étape précédente. Elle est en format matriciel (raster).
- Coefficient de la capacité de détachement (l'érodibilité K) : les valeurs du coefficient par type de sol du Bénin sont extraites des travaux d'Azontondé (1991). La correspondance entre la texture des sols et l'érodibilité des sols a permis de mettre en évidence les sols les plus érodibles de bassin de la Yéwa. Le facteur K varie entre 0,07 à 0,1 t.ha.h/ha.MJ.mm pour les sols de notre zone d'étude. La distribution spatiale du facteur K (Figure 14) montre que les valeurs de K sont globalement m dans le bassin de la Yéwa au Bénin. Le bassin est constitué des sols hydromorphes et ferrallitiques. Les sols hydromorphes qui

occupent environ 20% du bassin de la Yéwa au Bénin, sont les sols les plus érodibles. Ensuite, viennent les sols ferralitiques qui occupent une proportion d'environ 80% du bassin de la Yéwa au Bénin. les sols ferralitiques ont une bonne résistance à l'érosion mais le type de précipitations qu'ils reçoivent la facilite grandement (Boyer, 1992).

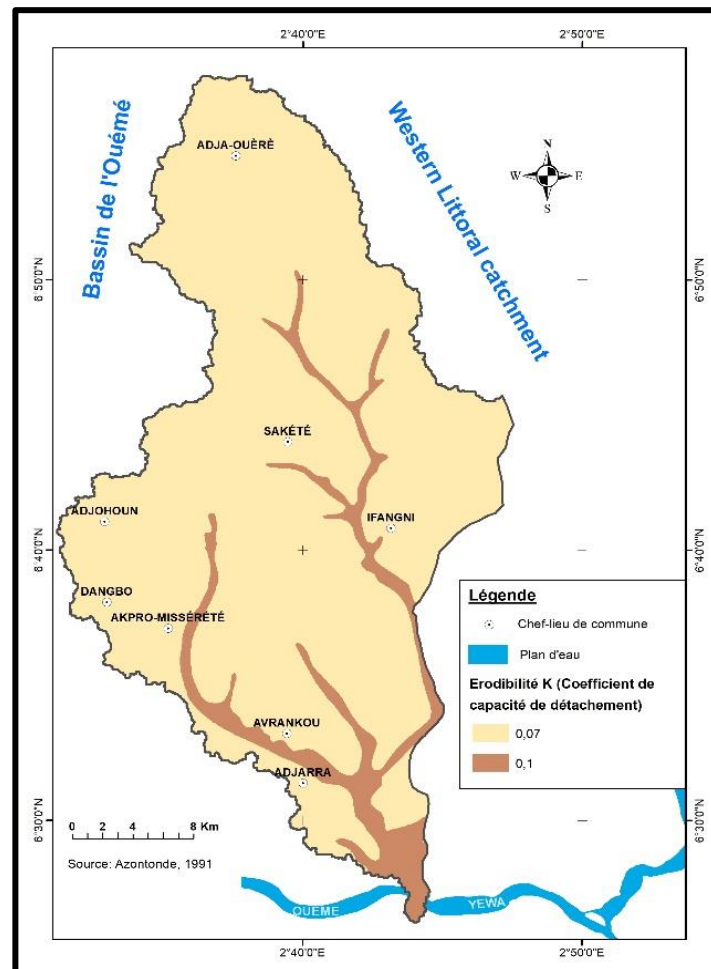


Figure 14. Erodibilité des sols

Coefficient de la capacité de transport (k_t)

Le coefficient de la capacité de transport dépend des propriétés du sol, mais est souvent influencé par la végétation. Le résultat obtenu est une carte raster présentant une spatialisation des coefficients de capacité de transport dans l'ensemble du bassin (Figure 15). La répartition spatiale de ce facteur montre que les valeurs les plus élevées du coefficient de transport se retrouvent au niveau des dépressions.

Contrainte de cisaillement critique (t_c)

Ce facteur représente la résistance du sol à des forces de cisaillement pendant le ruissellement de l'eau. Ce paramètre a un impact sur le fait qu'un sol soit plus favorable ou non à l'érosion ou au dépôt. La répartition de ce facteur nous montre que la valeur

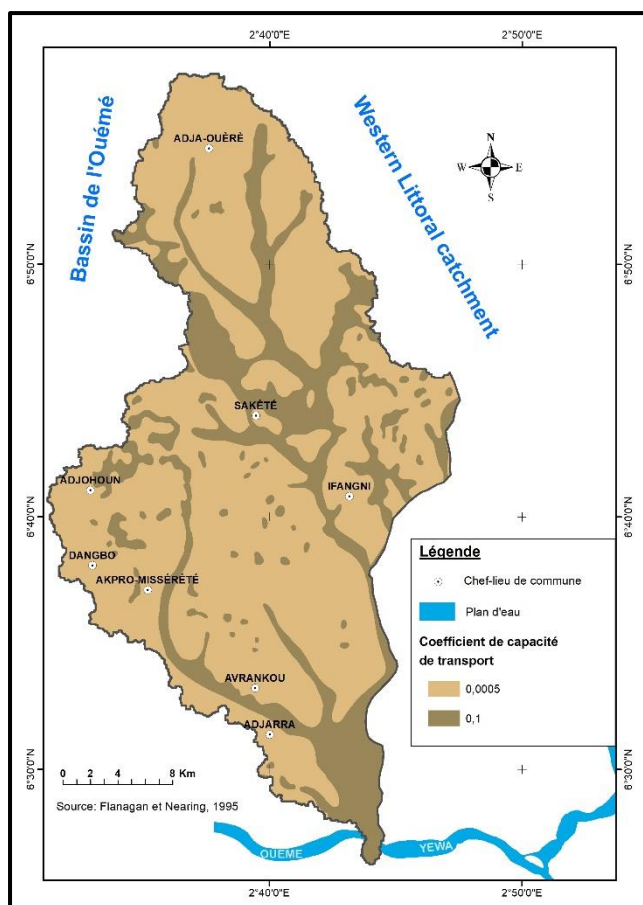


Figure 15. Capacité de transport de sédiment

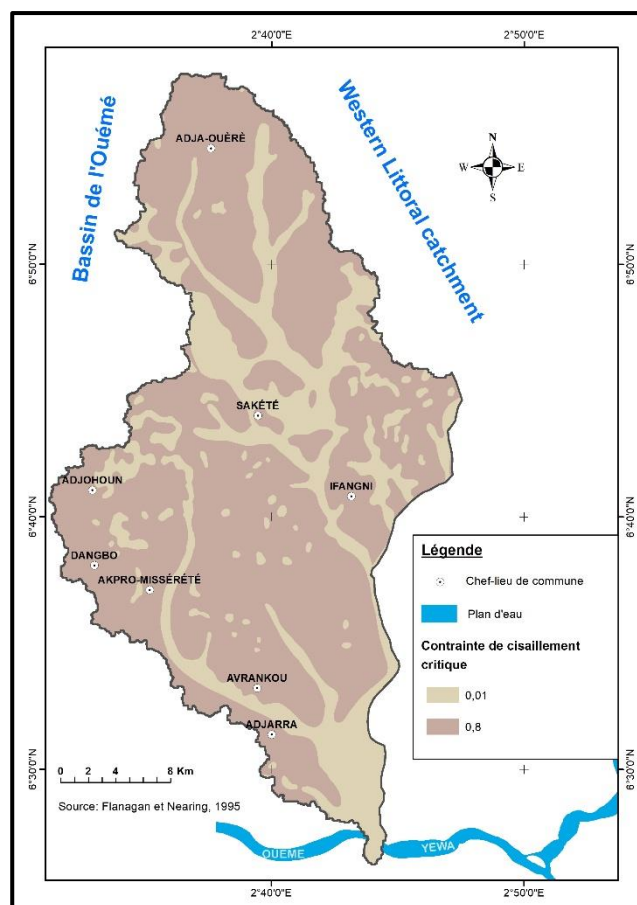


Figure 16. Contrainte de cisaillement critique

élevée de cisaillement critique est présente sur plus de la moitié de la zone d'étude (Figure 16). L'eau n'étant pas un fluide parfait, la présence des particules solides génère des contraintes de cisaillement (liées au gradient de débit).

Résultat de la simulation des transports de sédiments

Le transport des sédiments et l'érosion nette / dépôt a été calculé avec les différents facteurs. L'intégration des différents facteurs (profondeur de ruissellement, coefficient de la capacité détachement, coefficient de la capacité de transport, contrainte de cisaillement critique et le coefficient de rugosité de surface de Manning) dans ce module a permis de réaliser les diverses cartes thématiques notamment celle du flux de sédiment (Figure 17) et celle de l'érosion / dépôt net (Figure 18).

La Figure 17 montre la dynamique de l'érosion, c'est-à-dire, le flux de sédiments, mais c'est le bilan de ce flux qui est particulièrement intéressant pour pouvoir identifier les zones d'ablation et d'accumulation. Les flux de sédiments vont de 0 à 5,5 kg/m/s dans

le bassin. Ce flux représente la quantité de sédiments déposés dans un bassin en fonction du temps.

La Figure 18 présente une répartition des risques d'érosion et de dépôts dans le bassin en t/ha/an. On peut observer les pertes et les dépôts de sédiments maximaux soit respectivement - 4420t/ha/an et 4522t/ha/an.

Afin de pouvoir différencier et catégoriser l'érosion et le dépôt de sédiment et à partir des variables du milieu permettant d'apprécier l'érosion hydrique des sols, quatre classes d'érosion et de dépôt ont été définies de la manière suivante :

Les très sévères ou très élevés caractérisées par une érosion et/ou dépôt variant respectivement entre -4420 à -50 t/ha/an et 50 à 4522 t/ha/an,

Les sévères ou élevés caractérisées par une érosion et/ou dépôt variant respectivement entre -50 à -5 t/ha/an et 5 à 50 t/ha/an,

Les modérées caractérisées par une érosion et/ou dépôt variant respectivement entre -5 à -1 t/ha/an et 1 à 5 t/ha/an,

Les faibles caractérisés par une érosion et/ou dépôt variant respectivement entre -1 à -0.1 t/ha/an et 0.1 à 1 t/ha/an, et le stable est celle dont l'érosion et/ou dépôt varie entre -0.1 à 0.1 t/ha/an.

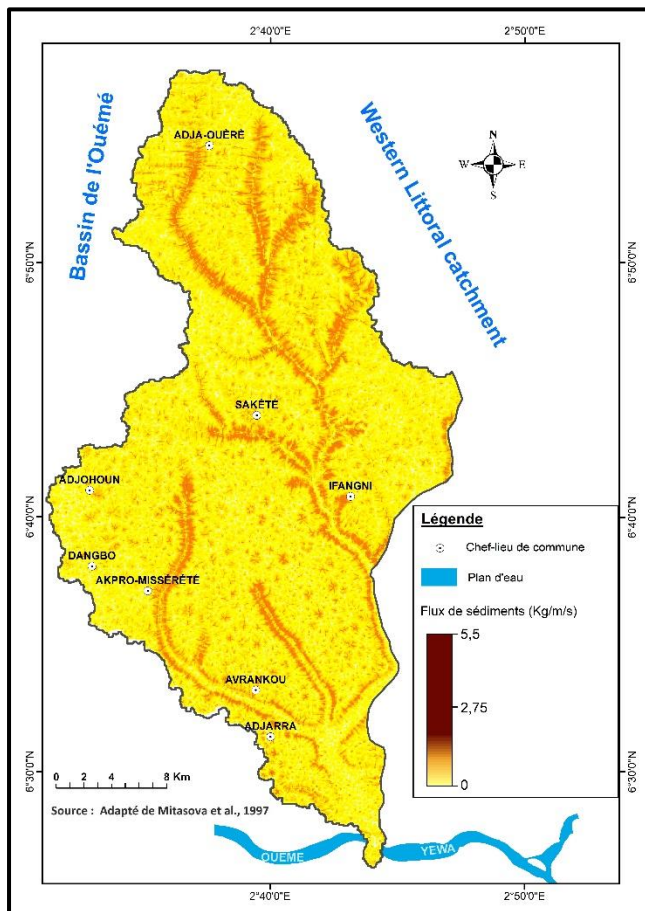


Figure 17. Flux de sédiments

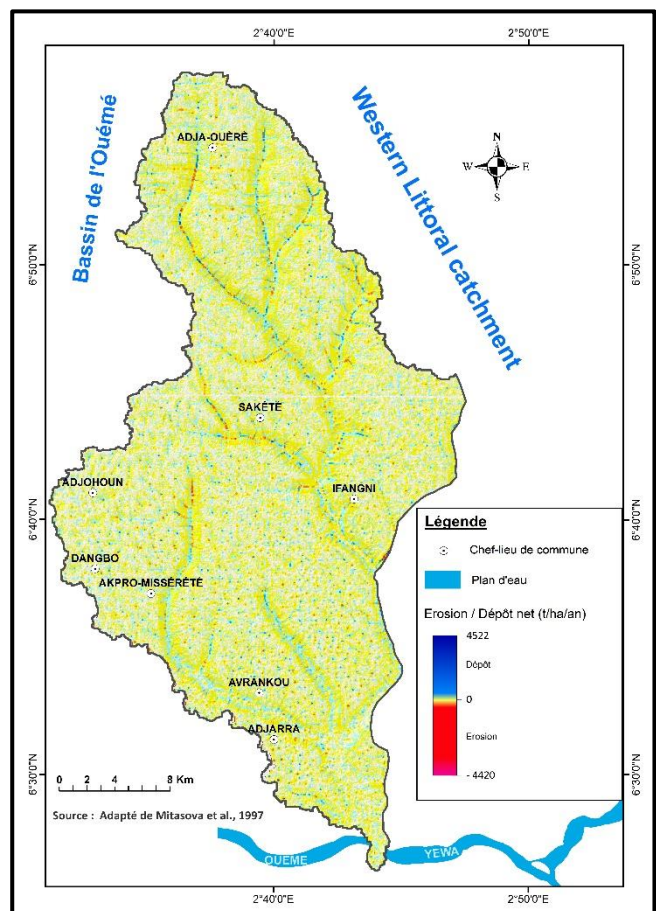


Figure 18. Erosion / Dépôt net

Les résultats obtenus après analyse de la distribution statistique montrent que 55,23% soit 480,64 km² de la superficie du bassin versant de la Yéwa révèle une sensibilité du faible à modérée à l'érosion pour 3,84 % soit 33,45 km² de sensibilité sévère et très sévère. En ce qui concerne les dépôts, 18,58% soit 161,71 km² de la superficie du bassin révèle un dépôt faible à modéré pour 3,90 % soit 33,98 km² de dépôt élevé et très élevé (Figure 19, Figure 20).

Avec le module r.univar du SIG GRASS, le bilan total d'érosion et de déposition a été calculé. Le résultat du calcul nous montre que le bassin de la Yéwa enregistre un bilan positif avec une perte totale d'environ 4120,44 t/ha/an. Les pertes de sols moins importantes sont associées au couvert dense telles que les forêts denses de la partie sud du bassin et à l'inverse les valeurs plus élevées sont associées aux sols nus ou aux sous couverts dégradés. Les facteurs climatiques conditionnent notamment l'importance du couvert végétal qui s'oppose au ruissellement en absorbant l'eau. L'eau ruisselle lorsque la vitesse d'arrivée de l'eau sur le sol est supérieure à la vitesse d'infiltration. Le volume d'eau excédentaire à la surface dépend de l'intensité (hauteur d'eau par rapport à une durée) de la pluie et du volume total précipité. Il est donc possible d'émettre l'hypothèse que les particules et débris enlevés et entraînés se déposeraient au fond des cours d'eau ou encore en dehors du bassin par le biais d'un chenal qui se jette dans l'océan atlantique. L'érosion faible à modérée peut s'accroître très rapidement si la couverture végétale disparaît. Il en ressort l'importance de la protection et du maintien de cette couverture, d'autant que les zones les plus touchées sont les formations végétales et les cultures (érosion faible à modérée) et suivi des sols nus et les agglomérations (sévere et très sévère). Pour assurer une conservation durable des sols, il sera donc nécessaire de protéger les formations végétales sans oublier d'autres pratiques agricoles non durables. Ces résultats de ce modèle montrent aussi que la vulnérabilité à l'érosion dans la région d'étude est essentiellement contrôlée par la densité du couvert végétal et à la topographie.

5. DISCUSSION

L'érosion hydrique est l'un des risques majeurs observés dans le bassin versant de la Yéwa. Les résultats obtenus corroborent de façon générale les nombreuses études menées dans la sous-région, en Afrique et dans le monde. C'est notamment celles réalisées par : Collinet (1988), Mitas et Mitasova, (1998), Mitasova et *al.*, (1999, 2002), Boko (2009), Koco (2011), Fernandes et *al.*, (2014), Toundoh, (2015), Fernandes et *al.*, (2015), Yadjemi, (2016), qui ont donné des résultats similaires à ceux obtenus dans le bassin versant de la Yéwa.

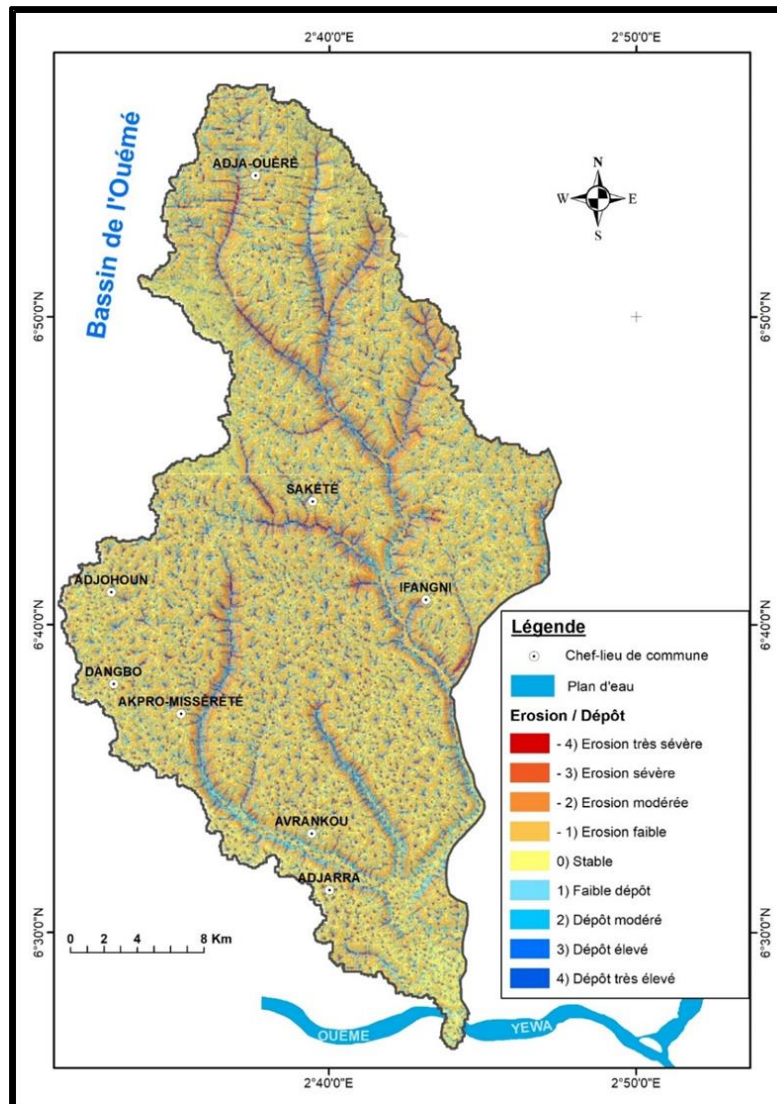


Figure 19. Risques d'érosion et de dépôt

Pour la présente étude, les applications des méthodes et techniques géospatiales ont permis de modéliser l'érosion hydrique et d'avoir une idée du rythme d'érosivité dans le bassin de la Yéwa au Bénin. La mise en œuvre du modèle à base physique SIMWE apporte une information intéressante sur les processus (ruissellement, Erosion et dépôt de sédiment) en cours sur le bassin versant de la Yéwa. Certains auteurs l'ont utilisé et sont parvenus à des résultats concluants notamment : Mitasova et *al.*, (2002) a expérimenté une simulation plus détaillée des impacts de l'utilisation des terres sur le processus de l'érosion hydrique sur un bassin pilote de l'Etat Illinois à l'aide du Modèle SIMWE ; La méthodologie décrite est illustrée ici par des études sur l'impact de l'utilisation des sols sur les schémas d'érosion et de dépôt dans un bassin versant pilote en Illinois et dans une

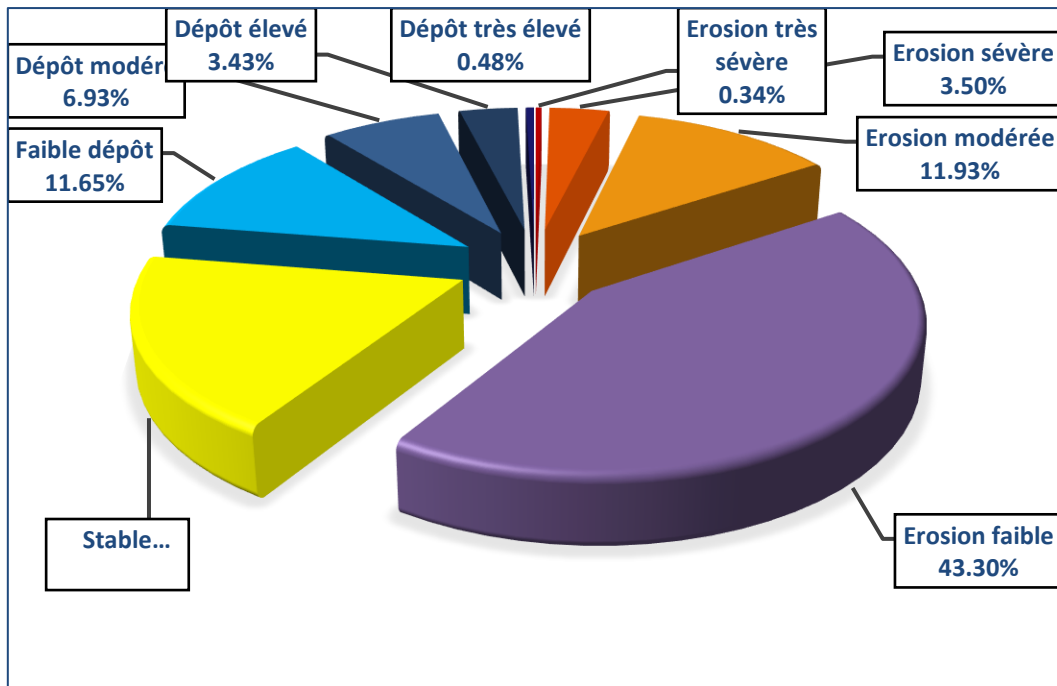


Figure 20. Proportion des risques d'érosion et de dépôt

ferme expérimentale en Allemagne ; Koco (2011) a utilisé le modèle SIMWE pour la simulation des conséquences de l'érosion ravine sur le bassin de Šarišský. Les résultats la simulation ont montré les situations réelles dans le bassin. Le processus de simulation correspondait effectivement aux connaissances théoriques sur le développement du ravin et a montré le potentiel de la méthode pour prédire efficacement la genèse des ravines.

La mise en œuvre du modèle SIMWE a permis de prévoir avec précision l'érosion des sols et les dépôts de sédiments, aussi bien spatialement que sur le plan volumique à diverses échelles. Dans l'applicabilité du modèle SIMWE, il est observé une perte de précision sur une grande échelle parce qu'il est conçu pour des zones ayant une superficie maximale de quelques centaines d'hectares. Les difficultés apparues concernent essentiellement l'acquisition de données nécessaires pour alimenter les modèles, en particulier, la détermination des coefficients et les contraintes de cisaillement critique. Les résultats pourraient être améliorés en utilisant des données sur l'intensité et la durée des averses et l'évapotranspiration. On observe également une absence de validation des résultats du modèle. Pour pallier à ce problème, les perspectives futures de la recherche devront inclure cela. Il s'agit là donc d'une piste pour poursuivre la recherche afin de comparer l'érosion et dépôt estimée à celle effectivement observée sur le terrain.

6. CONCLUSIONS

L'étude de l'érosion et du transport des sédiments à l'échelle des bassins versants exige l'emploi d'outils d'analyse de plus en plus sophistiqués. Les résultats de cette étude montrent l'intérêt de l'utilisation de la technologie de la télédétection et des SIG dans l'évaluation de la sensibilité des sols à l'érosion hydrique dans le bassin de la Yéwa. Ils donnent une information sur la répartition spatiale de l'érosion hydrique. La carte du risque d'érosion et de dépôt de sédiment élaborée pourrait constituer un document de base à différentes propositions d'aménagement.

L'évaluation de la sensibilité des sols à l'érosion hydrique dans le bassin de la Yéwa a été effectuée par méthode de prédiction à l'aide du modèle SIMWE. Le résultat du calcul du modèle SIMWE, nous montre que le bassin de la Yéwa enregistre un bilan positif donc une perte totale d'environ 4120,44 t/ha/an. De façon générale, les pertes de sols moins importantes sont associées au couvert dense telles que les forêts denses de la partie sud du bassin et à l'inverse les valeurs plus élevées sont associées aux sols nus ou aux sous couverts dégradés. Il ressort que l'érosion dans la région d'étude est essentiellement contrôlée par la densité du couvert végétal et la topographie.

Le modèle SIMWE apporte une aide importante aux décideurs et aux aménageurs pour simuler des scénarios d'évolution du bassin et planifier les interventions de lutte contre l'érosion, surtout dans les zones où l'érosion en nappe est prédominante sur l'érosion linéaire suivie d'une importante perte de sédiment. Elle permet aussi de suivre l'impact de l'utilisation des sols et des aménagements.

Pour finir, les résultats obtenus ici sur le bassin de la Yéwa sont d'autant plus importants que les études et mesures de l'érosion hydrique dans cette zone étaient très rares voire inexistantes.

7. ACKNOWLEDGEMENTS

Ce travail a pu être mené grâce à l'appui technique du Laboratoire des Applications Géomatiques et Gestion de l'Environnement (LA2GE). Les auteurs remercient également le Dr Olusegun ADEAGA de l'Université de Lagos (UNILAG) et le Dr Gildas Jr. BOKO.

8. REFERENCES

ADEAGA, O. 2005. Modelling Rainfall-Runoff Relationship in Ungauged Basins: A Case Study of Yewa Basin. In: Theses presented en AMMA since 2002, Newsletter Internationale AMMA n°. 10, pp. 1-238.

- AGOÏNON, N. 2012. Etude morphodynamique du bassin versant du Zou à l'exutoire de Domè (Bénin), Thèse de doctorat unique, de l'université d'Abomey-Calavi, Bénin, pp. 1-239.
- AMOUSSOU, E. 2010. Variabilité pluviométrique et dynamique hydro-sédimentaire du bassin versant du complexe fluvio-lagunaire Mono-Ahémé-Couffo (Afrique de l'Ouest). Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, pp. 1-315.
- AZONTONDE, H. A. 1991. Propriétés physiques et hydrauliques des sols au Bénin, Soil Water Balance in the Sudano Sahelian Zone (Proceedings of the Niamey Workshop, February 1991). IAHS Publ. no. 199, pp. 249-258p.
- BOKO, G. JR. 2009. Cartographie du risque érosif en utilisant l'USLE et les SIG : cas du bassin béninois du Niger, Mémoire de DEA, EDP/FLASH, UAC, pp.1-96.
- BOYER, J. 1982. Les sols ferrallitiques Tome X - Facteurs de fertilité et utilisation des sols, initiations-documentations techniques n°52, office de la recherche scientifique et technique outre-mer (orstom), pp 1-396.
- COLLINET, J. 1988. Étude expérimentale de l'érosion hydrique de sols représentatifs de l'Afrique de l'Ouest, Cahier ORSTOM, série pédologie, vol. XXIV, no 3, pp. 235-254.
- DOMINGO, E. 1996. Pression agricole et risques d'érosion dans le bassin versant du Lomon, affluent du Mono (département du Mono-Bénin) Université Nationale du Bénin, pp. 181-194.
- ETÉNÉ, C. G. 2017. Erosion ravinante dans l'Arrondissement de Togba au Bénin, Climat et Développement, Laboratoire Pierre PAGNEY : Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement (LACEEDE), de l'Université d'Abomey-Calavi (Bénin). ISSN: 1840-5452, ISBN-10: 99919-58-64-9. pp. 41-56.
- FAO. 2005. Special event on impact of climate change, pests and diseases on food security and poverty reduction. 31st Session of the Committee on World Food Security. Rome, pp. 1-11
- FAO. 2009. Profil du bassin de l'Ouémé et caractérisation des sites pilotes (analyse des données) : PROJET GCP/GLO/207/ITA, pp. 1-64.
- FAO. 2016. Déclaration d'Abuja sur les engrais au cadre de gestion durable des sols pour la sécurité alimentaire et nutritionnelle en Afrique à l'horizon 2030 : Stimuler les sols africains, Partenariat Mondial Sur Les Sols. Rome. pp. 1-16.
- FAO. 2019. Soil erosion: the greatest challenge to sustainable soil management. Global Soil Partnership, Rome. pp. 1-100.
- FAO, ITPS. 2015. Status of the World's Soil Resources (SWSR) - Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy, pp. 1-41.

- FERNADES, J., BATEIRA, C., SOARES, L., OLIVEIRA, A., FARIA, A., HERMENEGILDO, C., TEIXEIRA, M., MOURA, R., ET GONÇALVES, J. 2015. Aplicação do modelo simwe na definição de áreas suscetíveis à erosão linear: estudo de caso na Região Demarcada do Douro (rdd), VII Congresso Nacional de Geomorfologia, Geomorfologia 2015, pp. 247-253.
- FERNANDES, J., SOARES, L., BATEIRA, C., OLIVEIRA, A., FARIA, A. 2014. Aplicação do modelo SIMWE à definição de áreas suscetíveis à formação de ravinas: estudo de caso no Alto Douro Vinhateiro. Planeamento e Gestão dos Recursos Naturais. Homenagem Professora Doutora Celeste Coelho. Universidade de Aveiro, Aveiro. pp. 190 - 203. ISBN: 978-972-789-432-1.
- FLANAGAN, D. C., NEARING M. A. 1995. USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope profile and watershed model documentation. NSERL Report No. 10. West Lafayette, Ind.: USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, pp. 1-7.
- JUNGE B., ABAIDOO R. C., CHIKOYE D., STAHR K. 2008. Soil Conservation in Nigeria: Past and present on-station and on-farm initiatives, Soil and Water Conservation Society Ankeny, Iowa, pp. 1-34.
- KOCO, Š. 2011. Simulation of gully erosion using the SIMWE model and GIS, Landform Analysis, Vol. 17, pp. 81-86.
- LAL, R. 2001. Soil Degradation by Erosion. Land Degradation and Development 12: pp. 519-539.
- MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT DU NOUVEAU-BRUNSWICK. 2012. Direction de développement durable, planification et évaluation des impacts - Directives techniques de la modification des cours d'eau et des terres humides, pp. 1-137.
- MITAS L., MITASOVA H. 1998. Distributed soil erosion simulation for effective erosion/deposition modeling and enhanced dynamic visualization. Water Resources Research 34: pp. 505 - 516.
- MITASOVA H., BROWN W. M., MITAS L., WARREN S. 1997. Gis environment for simulation and analysis of landscape processes, Illinois GIS and Mapnotes Fall, pp.7-14.
- MITASOVA, H., HOFIERKA, J., ZLOCHA, M., IVERSON, L. R. 1996. Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS, Int.J. Geographical Information Systems, vol. 10 n°5, pp. 629-641,
- OLOGE, K.O. 1988. Soil erosion characteristics, processes and extent in the Nigerian savanna. In Proceedings of the Conference on Ecological Disasters in Nigeria: Soil Erosion. Owerri, September 1986, Lagos: Federal Ministry of Science and Technology, pp. 26-47.
- OUATTARA, T. A. 2017. Cartographie de l'occupation du sol de la Région de la Mé. Rapport Etc Terra – Rongead - Projet REDD+ de la Mé. pp. 1-28.

- ROOSE, E. 1977. Érosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. Vingt années de mesures en petites parcelles. Édit. ORSTOM, Paris, série Travaux et Documents, n°78, pp. 1-107.
- STAMP, L. D. 1938. Land utilization and soil erosion in Nigeria. *Geographical Review* 28: pp. 32-45.
- YADJEMI, H. O. 2016. Modélisation du Processus D'érosion dans la Basse Vallée du Mono, Bénin. Projet de recherche de fin de formation pour l'obtention du diplôme de Master of Sciences (M.Sc), Centre Régional de Formation aux Techniques des Levés Aérospatiaux (RECTAS), pp. 1-135.
- TOUNDOH, O. P. 2015. Susceptibilité des sols à l'érosion hydrique dans le bassin versant transfrontalier de la Yéwa (Bénin - Nigéria). Projet de recherche de fin de formation pour l'obtention du diplôme de Master of Sciences (M.Sc), Centre Régional de Formation aux Techniques des Levés Aérospatiaux (RECTAS), pp.1-144.