

Sensibilité Potentielle du Bassin Versant de la Sota à l'Erosion Hydrique

[Potential Sensitivity of the Sota Watershed to Water Erosion]

AYENA Ayédon Abraham^{1,3*}, TOTIN VODOUNON Sourou Henri^{2,3}, VISSIN Expédit Wilfrid^{1,3}

¹Département de Géographie et Aménagement du Territoire ; Université d'Abomey-Calavi, Bénin
B.P. 526 Cotonou, Bénin

²Département de Géographie et Aménagement du Territoire, Université de Parakou, Bénin
B.P. 123 Parakou, Bénin,

³Laboratoire Pierre PAGNEY "Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement"
03 BP 1122, Cotonou, Bénin



Résumé - L'érosion hydrique est un phénomène complexe qui résulte des actions conjuguées d'agresseurs internes et externes à la structure du patrimoine sol. Cette étude vise à identifier les zones actives d'érosion hydrique dans le bassin versant de la Sota. La méthode utilisée est basée sur l'exploitation des données multi-sources (données pluviométriques sur la période 1971-2015, carte pédologique et images satellitaires). Ces données ont permis de modéliser à travers une analyse multicritères, la sensibilité potentielle du secteur à l'érosion hydrique. Les résultats obtenus montrent que les zones de sensibilité à l'érosion hydrique sont réparties en quatre classes : les zones à faible sensibilité (72 %), les zones à sensibilité moyenne (21 %), les zones fortement sensibles (3 %) et les zones à très forte sensibilité (4 %). Ainsi, la proportion des zones de sensibilité moyenne à très forte est assez significative (28 %) et pourrait connaître une augmentation si la tendance à l'anthropisation du bassin est maintenue. Cette sensibilité à l'érosion hydrique des sols, résultant de la combinaison des facteurs érosivité des pluies, érodibilité des sols, pente topographique et couverture végétale, s'étend majoritairement dans le centre et la partie nord. La carte de sensibilité générée, aidera à la prise de décision pour l'attribution des zones de cultures et des sites pouvant abriter des infrastructures socio-économiques.

Mots clés - Sota, pressions anthropiques, sensibilité, érosion hydrique, SIG, lutte antiérosive.

Abstract - Water erosion is a complex phenomenon resulting from the combined actions of internal and external aggressors to the structure of the soil heritage. This study aims to identify active areas of water erosion in the Sota catchment area. The method used is based on the exploitation of multi-source data (rainfall data over the period 1971-2015, soil map and satellite images). These data made it possible to model, through a multi-criteria analysis, the potential sensitivity of the sector to water erosion. The results obtained show that the areas of sensitivity to water erosion are divided into four classes: low sensitivity areas (72%), medium sensitivity areas (21%), high sensitivity areas (3%) and very high sensitivity areas (4%). Thus, the proportion of medium to very high sensitivity areas is quite significant (28%) and could increase if the trend towards anthropisation of the basin is maintained. This sensitivity to soil water erosion, resulting from the combination of rainfall erosivity, soil erodibility, topographical slope and vegetation cover, extends mainly in the central and northern parts. The sensitivity map generated will help in decision-making for the allocation of cultivation areas and sites for socio-economic infrastructure.

Keywords - Sota, anthropogenic pressures, sensitivity, water erosion, GIS, erosion control.

I. INTRODUCTION

Le bassin du fleuve Niger subit depuis quatre décennies une dégradation de son écosystème qui, aujourd'hui, atteint la côte d'alerte [1]. L'une des formes les plus récurrentes de cette dégradation de l'environnement est l'érosion hydrique des sols [2, 3, 4 et 5] qui, se traduit par l'enlèvement des particules minérales et organiques [4]. Ce phénomène résulte de la combinaison de plusieurs facteurs. Outre les facteurs naturels, la démographie et la crise économique pérennisent des facteurs aggravants et d'ordre anthropique comme le surpâturage, la pratique des brûlis et la déforestation [6] qui impliquent la conquête continue de nouvelles terres.

Au Bénin, les évolutions des surfaces agricoles de ces dernières années ont fortement modifié les paysages des territoires du bassin versant de la Sota. On peut notamment citer l'homogénéisation de l'occupation du sol [7, 8], la rupture des équilibres des écosystèmes [9, 10] ou encore la vulnérabilité des parcours naturels [11]. Aujourd'hui, l'impact de ces évolutions se manifeste notamment par la présence de ruissellements superficiels plus importants [12], de dépôts de sédiments intra-cuvette [13] et du comblement du cours d'eau [14, 15]. Pour [16, 17], ces actions sont souvent perceptibles sur différentes facettes topographiques depuis les sommets jusqu'aux bas-fonds. Malgré la connaissance de ces menaces qui pèsent sur l'environnement naturel des milieux humides, la dynamique spatiale du phénomène d'érosion est peu abordée dans la littérature scientifique [18, 19, 5].

Dans une perspective de développement durable où la préservation de l'environnement devrait être intégrée dans les activités rurales, cette étude a pour but d'analyser le rythme de sensibilité du bassin versant de la Sota à l'érosion hydrique et d'identifier les zones prioritaires d'intervention.

Le bassin versant de la Sota est le principal affluent du fleuve Niger au Bénin. Il est situé au Nord-Est du Bénin et est localisé entre 9°54' et 11°55' de latitude nord et entre 3°33' et 3°46' de longitude est (*Fig. 1*). Sa superficie couvre 13410 km², soit 11 % de celle du Bénin et regroupe les sous bassins versants de la Sota à Gbassè (8300 km²) et de la Sota à Coubéri (13410 Km²). Le bassin de la Sota s'étend sur deux formations géologiques : les formations du socle et des grès sédimentaires de Kandi [20, 7]. Au sud de Gbassè, dans le bassin supérieur, s'étend des formations du socle granito-gneissique précambrien composées essentiellement de gneiss-migmatite, de micaschiste, de diorite et de quelque quartzite accompagné localement de granite. Ce socle s'abaisse graduellement vers le nord-est et est surmonté en discordance par une pente de 20 % d'un ensemble gréseux appelé grès de Kandi [20, 7]. L'inclinaison des plateaux présente des altitudes variant entre 125 m et 450 m, avec une moyenne de 296 m. Ces plateaux sont drainés par un cours principal long de 254 km. La partie sud est dominée par la pénéplaine dahoméenne, unité de relief dont deux éléments marquent le paysage : une dorsale d'orientation est-ouest et une série de collines correspondant aux roches les plus dures du Dahomeyen. Les roches du socle sont imperméables, en dessous d'une zone d'altération importante. Les matériaux originels constituant les sols ont des origines variées. Il s'agit, soit de matériau d'apport d'origine alluviale ou colluviale récent, soit de matériau sédimentaire ancien, soit de matériau d'altération dérivant du socle granito-gneissique sous-jacent [21]. D'après [21, 20], les sols des bassins du Nord-Bénin résultent essentiellement de processus de ferralitisation et de ferruginisation. Trois types de remaniement s'ajoutent : le lessivage, l'érosion et l'induration.

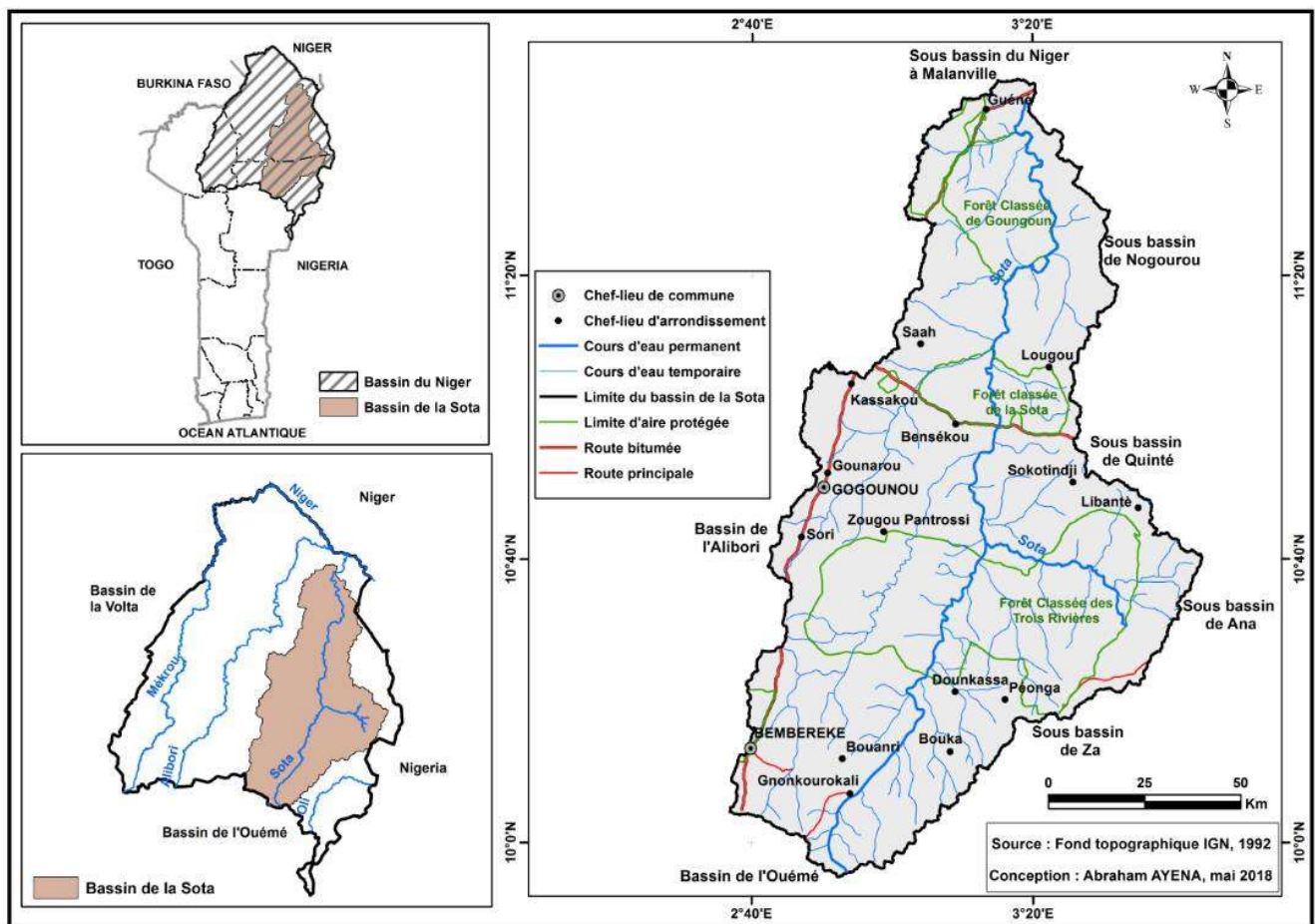


Fig. 1. Localisation du bassin versant de la Sota

II. DONNEES ET METHODE

A. Données

Les données de cette étude sont composées de données climatiques, de données cartographiques et d'images satellitaires. Les hauteurs de pluies annuelles de dix stations situées à l'intérieur ou proche du bassin versant de la Sota de la période 1971-2015, sont essentiellement les données climatiques utilisées et l'esquisse pédologique du bassin est le document cartographique exploité. Les images satellitaires sont de deux types : l'image Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), qui a permis l'établissement du modèle numérique de terrain (MNT) et l'image Landsat OLI-TIRS de 2018, qui a servi à la caractérisation de l'occupation du sol.

B. Méthode

Le modèle utilisé pour identifier les zones de sensibilité à l'érosion, est qualitatif et adapté aux particularités locales. Il est basé sur une analyse multicritère inspirée de [22] combinant les facteurs de l'érosion les plus représentatifs. Pour [4], il apparaît comme un moyen d'aide à la décision car, non seulement il permet de localiser les secteurs menacés par

l'érosion, afin de les protéger, mais aussi, il contribue à la simulation de l'impact du changement du mode d'occupation sur l'érosion des sols. Ainsi, pour cette approche, l'étude de la sensibilité du bassin versant de la Sota à l'érosion hydrique a été faite en trois (3) étapes.

1) *Identification des facteurs qui interviennent dans l'érosion hydrique* : En fonction des données disponibles et des réalités du secteur d'étude, quatre principaux facteurs ont été retenus dans cette recherche. Il s'agit des facteurs intrinsèques au sol (érodibilité des sols) et des facteurs extrinsèques (pente topographique, érosivité de la pluie, occupation des sols).

a) *l'érodibilité des sols (facteur K)* : L'érodibilité d'un sol est fonction de ses propriétés physiques, texture et structure notamment. Elle se traduit par la résistance inhérente au détachement et au transport des particules par l'eau [6]. Le facteur d'érodibilité du sol (K) est habituellement estimé à partir de la formule de [22]. Plus adaptée aux USA (pour lesquels l'équation USLE a été initialement conçue), cette formule produit des résultats peu sûrs quand on l'applique aux sols, avec des textures aussi extrêmes que les sols agrégés. Par

conséquence, elle n'est pas vraiment valable dans les conditions béninoises [23]. Dans ces conditions, tout comme [24], [23] et [4], l'estimation de l'érodibilité des sols s'est faite en retenant les caractéristiques suivantes : la texture (40 %), la teneur en matière organique (40 %) et la profondeur (20 %). Ces éléments ont donné un poids majoritaire à la texture et à la matière organique pour évaluer la sensibilité du sol à l'érosion hydrique [24]. En effet, les horizons de surface ayant une texture fine sont sensibles à l'érosion hydrique ainsi que les sols relativement pauvres en matière organique [23, 4]. Aussi, la résistance à l'érosion hydrique est plus faible pour les sols superficiels que pour les sols profonds [25]. Ainsi, lorsque les sols superficiels sont saturés par la pluie, la terre s'écoule vers le bas de la pente, même si celle-ci est très faible. Les résultats des travaux de [26], [20] et [7] et de la connaissance de terrain, ont permis de déterminer la texture, le taux de matière organique et la profondeur des types de sols dans le bassin versant de la Sota (tableau I).

b) la pente topographique (facteur LS) : Toutes les études qui ont été réalisées sur l'érosion hydrique ont montré que le phénomène s'intensifie avec la pente. La longueur, la forme et surtout l'inclinaison de pente sont des paramètres qui influencent considérablement l'érosion des sols [27]. Mais, Les facteurs L (longueur de pente) et S (angle ou inclinaison de la pente en %) sont le plus souvent combinés en un facteur unique adimensionnel LS afin de définir l'effet de l'érosion en nappe et en rigoles [6]. Les pertes en terre varient de façon exponentielle avec l'inclinaison de la pente. De même, selon [23], plus la pente est longue, plus le ruissellement s'accumule et prend de la vitesse et de l'énergie ; ce qui se traduit par une érosion massive. Cependant, l'influence de la longueur de la pente sur le ruissellement est moins nette : elle est tantôt positive, tantôt négative ou nulle. Pour [27], la longueur de la pente a des effets plus incertains. De ce fait, il n'en a pas été tenu compte dans cette étude. Le facteur "angle ou inclinaison" a été estimé à partir du modèle numérique de terrain (MNT) du secteur de recherche.

c) l'occupation du sol (facteur C) : La présence de végétation réduit l'intensité de la pluie atteignant le sol [28], assure le ralentissement du ruissellement et de l'infiltration [6]. Ainsi, pour une végétation basse, les pertes de sols diminuent avec l'augmentation du couvert [6]. La carte d'occupation du sol a été établie à partir de l'image Landsat ETM+ par la classification du maximum de vraisemblance. A la suite des observations de terrain et de la consultation de plusieurs études sur le sujet [7, 9, 11], la classification des différents modes d'occupation du sol a été établie.

d) l'érosivité des pluies (facteur R) : La pluie est l'un des principaux facteurs de l'érosion des sols, ceci se produit

lorsque les eaux pluviales ne peuvent plus s'infiltrer dans le sol et arrachent les particules du sol en emportant des éléments [29]. L'érosivité est de ce fait, un indicateur de l'agressivité des pluies [30]. Elle est fonction de l'intensité et de la fréquence des précipitations. L'estimation du facteur R selon la formule de [22], nécessite la connaissance des énergies cinétiques (E_c) et de l'intensité moyenne sur 30 minutes (I_{30}) des gouttes de pluie de chaque précipitation. Les seules données disponibles concernant les précipitations dans le bassin versant de la Sota sont des moyennes mensuelles et annuelles. Certains auteurs ont développé des formules alternatives qui n'impliquent que les précipitations annuelles pour déterminer le facteur R. C'est le cas de [3] qui a effectué ses travaux dans le bassin versant du lac Togo, une région frontalière dont les caractéristiques physiques sont similaires à celles du Bénin et du secteur de recherche en particulier. Ainsi la formule (1) adoptée par [3], est celle utilisée.

$$R = 0,5 \times P \times 1,735 \quad (1)$$

Où P représente les précipitations annuelles en mm. La spatialisation de l'érosivité des pluies a été donc faite sur la base de l'interpolation des résultats obtenus par cette formule à partir des précipitations de chaque station considérée sur la période 1971-2015.

Les critères définis pour chaque facteur sont résumés dans le tableau I.

TABLEAU I : Facteurs et critères du modèle utilisé

Facteurs	Critères
Erodibilité des sols	Texture
	Teneur en matières organiques
	Profondeur du sol
Pente topographique	Valeur de la pente en pourcentage
Occupation du sol	Types d'occupation du sol
Erosivité des pluies	Hauteur moyenne annuelle de pluie

Source : Adapté de Ganhouegnon, 2012

2) Hiérarchisation des différents facteurs d'érosion à l'échelle spatiale : Pour chaque facteur identifié, une reclassification des données a été réalisée sous forme d'un indicateur de sensibilité ou de favorisation à l'érosion (tableau II) : Faible, Moyenne, Forte ou Très forte. Cette classification des différents facteurs d'érosion en fonction de leur implication dans l'occurrence du phénomène a été établie en tenant compte des observations de terrain et de connaissances bibliographiques [26, 20, 7, 30, 28, 3, 6, 23, 31, 32, 33, 9, 11]. Le but est de donner une valeur chiffrée pour chaque classe ; ce qui a permis à l'aide d'un SIG, de produire diverses cartes

thématiques qui correspondent à ces valeurs chiffrées des différents facteurs d'érosion.

TABLEAU II : Classes établies suivant la contribution à l'érosion hydrique

Classe	Sensibilité ou favorisation
1	Faible
2	Moyenne
3	Forte
4	Très forte

3) *Etablissement de la carte synthèse des conditions à l'érosion hydrique* : La modélisation de l'érosion hydrique dans le bassin versant de la Sota a été faite par la combinaison des quatre facteurs environnementaux retenus (l'érodibilité des sols, l'érosivité des pluies, l'occupation du sol et les pentes). Ces facteurs ont été considérés comme étant de même importance dans l'occurrence de l'érosion. Ainsi, le modèle est appliqué comme suit : [Classe de sensibilité du sol] + [classe de la favorisation des pluies] + [classe de la favorisation de la pente] + [classe de la favorisation du couvert végétal]. Pour faciliter cette opération, des codes ont été assignés aux différentes classes (Tableau III). Par ordre de sensibilité croissante à l'érosion au sein de chaque classe de facteurs, ils sont de 1000, 2000, 3000 et 4000 dans le cas de l'érodibilité du sol, de 100, 200, 300 et 400 dans celui de l'inclinaison de la pente, de 10, 20, 30 et 40 pour l'occupation des sols et de 1, 2, 3 et 4 pour l'érosivité des pluies. Après combinaison, la distinction est ainsi facilitée, car on saisit aisément, que la classe "4122", par exemple, provient du croisement des classes "4000", "100", "20" et "2". Les quatre facteurs considérés n'étant pas hiérarchisés, la sensibilité à l'érosion hydrique du secteur d'étude est évaluée en sommant les quatre chiffres constitutifs du code représentatif de ce secteur. Ainsi, pour la classe 4122, l'indice est de 9 (4+1+2+2). En définitive, quatre classes de sensibilité sont définies : faible (indices 4 à 6),

moyenne (indices 7 à 9), forte (indices 10 à 12) et très forte (13 à 16).

TABLEAU III : Classification des facteurs de sensibilité du BVS à l'érosion hydrique

Facteurs	Déclinaison des facteurs	Sensibilité à l'érosion hydrique	Code
Typologie des sols	Sols hydromorphes	Faible	1000
	Sols faiblement ferralitiques	Moyen	2000
	Sols ferrugineux tropicaux	Fort	3000
	Sols minéraux bruts et peu évolués	Très fort	4000
Pentes	< 2 %	Faible	100
	2 - 4 %	Moyen	200
	5 - 10 %	Fort	300
	≥ 11 %	Très fort	400
Occupation du Sol	Végétation très dense	Faible	10
	Végétation de densité moyenne	Moyen	20
	Terrain cultivé	Fort	30
	Terrain nu	Très fort	40
Erosivité des pluies	$R < 803$	Faible	1
	$803 \leq R < 889$	Moyen	2
	$889 \leq R < 952$	Fort	3
	$R \geq 952$	Très fort	4

La confrontation des résultats obtenus aux observations de terrain réalisées en quelques points d'observation, géoréférencés à l'aide d'un GPS (Global Positioning System), permet de valider la carte finale. Cette démarche d'évaluation de la sensibilité à l'érosion hydrique a été adoptée par [31]. La Fig. 2 résume la procédure générale appliquée pour la cartographie de la sensibilité du bassin versant de la Sota à l'érosion hydrique.

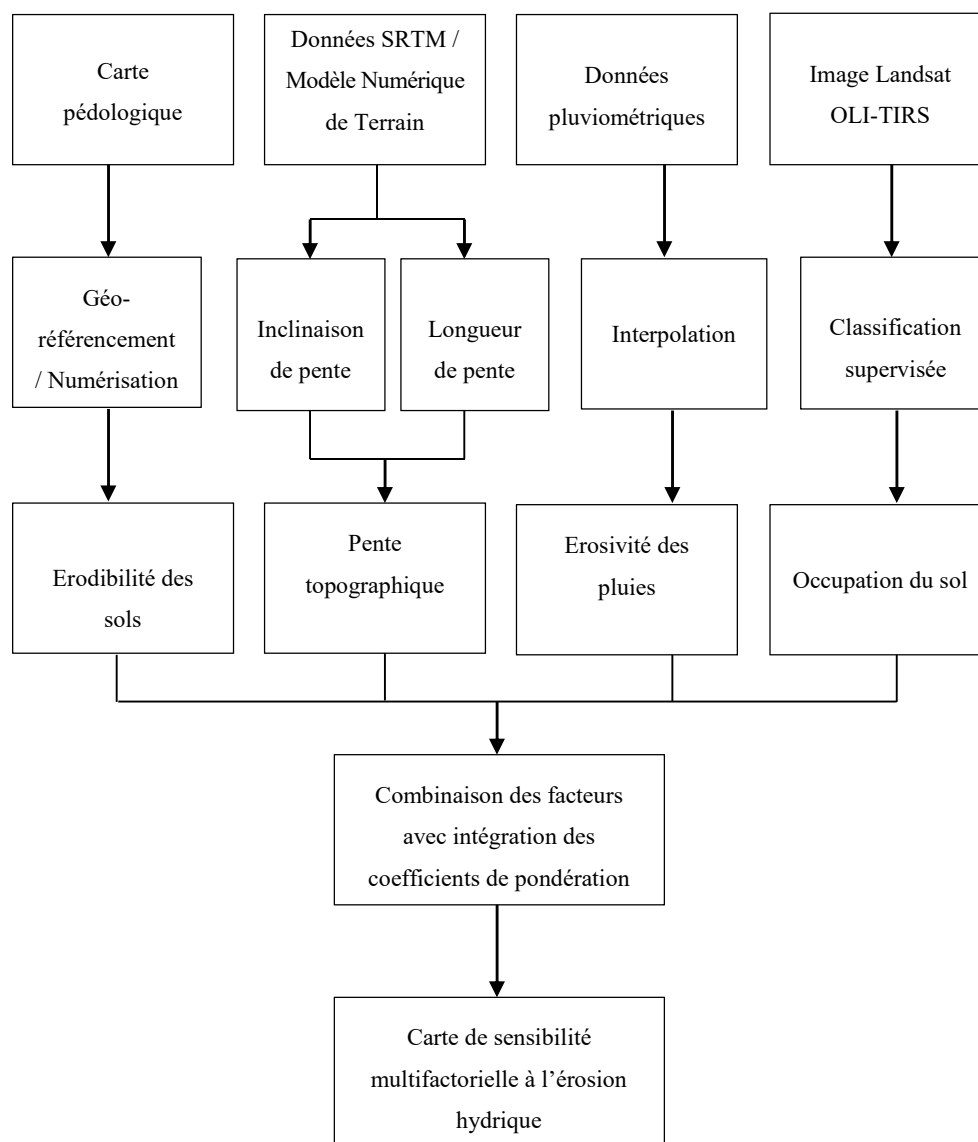


Fig. 2. Différentes étapes de la cartographie de la sensibilité du bassin versant de la Sota à l'érosion hydrique

III. RESULTATS ET DISCUSSION

Indépendamment du modelé du relief, tous les sols sont naturellement soumis à l'érosion. Néanmoins, le degré de sensibilité diffère en fonction des réalités du terrain. Dans le bassin versant de la Sota, l'identification des zones sensibles à l'érosion hydrique passe par la combinaison de quatre facteurs indépendants qui peuvent être hiérarchisés comme suit : l'érosivité des pluies, l'érodibilité des sols, l'inclinaison et la longueur des pentes et l'influence du couvert végétal.

A. Erosivité des pluies : facteur *R*

La carte d'érosivité (Fig. 3), synthétisée à partir de la spatialisation des différentes stations pluviométriques, montre que les valeurs de *R* varient entre 688,46 MJ.mm/ha.h.an à

Malanville et 998,59 MJ.mm/ha.h.an à Parakou. Les plus élevées sont enregistrées au sud du bassin (Ina, Nikki, Parakou), alors que les valeurs les plus faibles sont enregistrées à l'aval au nord (Alfakoara et Malanville). Les valeurs de *R* subissent de fait, un gradient décroissant du sud vers le nord, qui traduit l'importance de la zone d'influences des stations et donc celle de l'agressivité des pluies.

La proportion de chaque classe d'érosivité des pluies selon leur importance est présentée dans le tableau IV.

TABLEAU IV : Répartition des différentes classes d'érosivité des pluies

Classes d'érosivité	Proportion (%)
Faible	1,47
Moyenne	45,42
Forte	52,52
Très forte	0,59

possèdent une érodibilité élevée. Toutefois, la répartition des classes d'érodibilité au niveau du bassin est inégale (tableau V).

TABLEAU V : Répartition des classes d'érodibilité des sols

Classes d'érodibilité	Proportion (%)
Faible	0,09
Moyenne	1,62
Forte	94,01
Très forte	4,28

Les zones d'érodibilité (Fig. 4) correspondantes à chaque classe se présentent ainsi qu'il suit :

Les zones à érodibilité faible s'observent pour la plupart sur les sols hydromorphes. Elles ne couvrent que 0,1 % du secteur de recherche. Ce sont des lieux de dépôt de sédiments arrachés et transportés par les eaux de ruissellement.

Les zones à érodibilité moyenne couvrent 1,6 % de la superficie du bassin. Elles sont majoritairement localisées au sud-ouest et sont exclusivement constituées de sols faiblement ferrallitiques. Ces formations, sous l'influence d'une forte pluviométrie, sont soumises à une intense altération.

Les zones à érodibilité forte représentent 94 % du secteur de recherche. Elles couvrent l'ensemble du bassin. Les sols en présence ici sont les sols ferrugineux tropicaux avec une texture sablo-argileuse.

Les zones à érodibilité très forte (4,3 % de la zone) sont représentées un peu partout dans le bassin avec une concentration dans la partie nord, sur des terrains constitués de sables fins (sols bruts et peu évolués), offrant une faible cohésion entre les grains et donc sensibles à l'érosion hydrique.

Les auteurs [31] ont trouvé des résultats similaires dans la région de Bonoua (sud-est de la Côte d'Ivoire). De même [3] dans ses analyses, est parvenu à la conclusion selon laquelle 70 % du secteur étudié est soumis à une érodibilité élevée où $K > 0,07$. Cette classe d'érodibilité (érodibilité élevée) couvre plus de la moitié (59 %) des sols du bassin versant de l'Oum Er-Rbia [34]. Toutefois, 80 % de la superficie du bassin versant de l'Oued Larbaa au Maroc ont une érodibilité moyenne, forte à extrêmes [35]. Ainsi, la répartition des classes d'érodibilité dépend du type de sol en présence dans le secteur étudié.

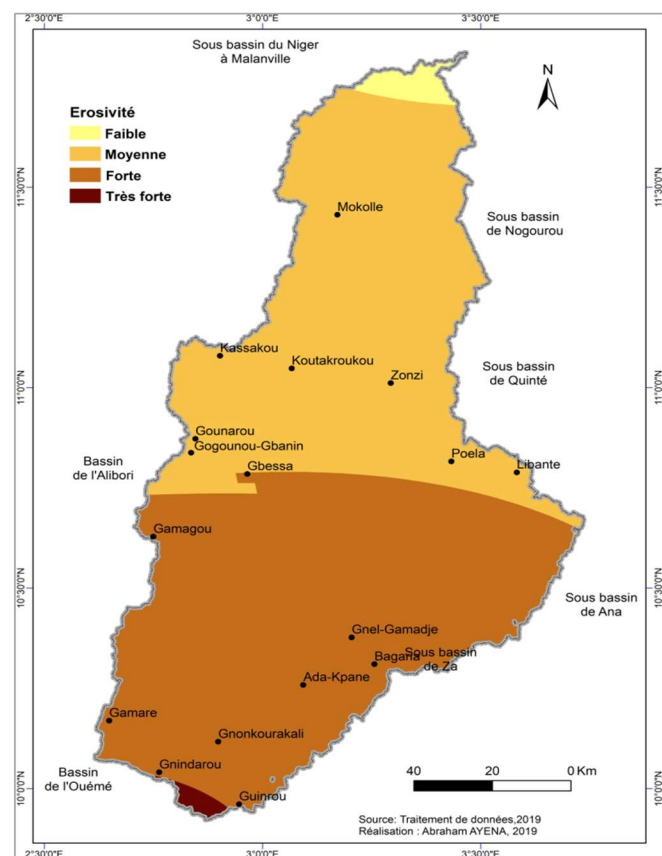


Fig. 3. Carte de l'érosivité des pluies dans le bassin versant de la Sota

Les classes de faible et de très forte érosivité ne représentent à eux deux, que 2 % du bassin. Par contre, l'érosivité modérée et érosivité forte sont assez répandues et représentent respectivement 45 % et 53 %. Ces résultats sont semblables de ceux de [3] dans le bassin versant du lac Togo où la valeur de R (891,1 MJ.mm/ha.h.an) est très prononcée dans 8 villages sur 13 et dans les autres, elle est assez faible avec 711,9 MJ.mm/ha.h.an. Bien que [17] ait trouvé également des résultats proches, la valeur de l'érosivité estimée dans la basse vallée de l'Ouémé varie de 499,68 MJ.mm/ha.h.an à 2579,08 MJ.mm/ha.h.an.

B. Effet de l'érodibilité des sols

Le traitement et l'analyse des bases de données, montrent que plus de 2/3 des sols du bassin versant de la Sota (94 %)

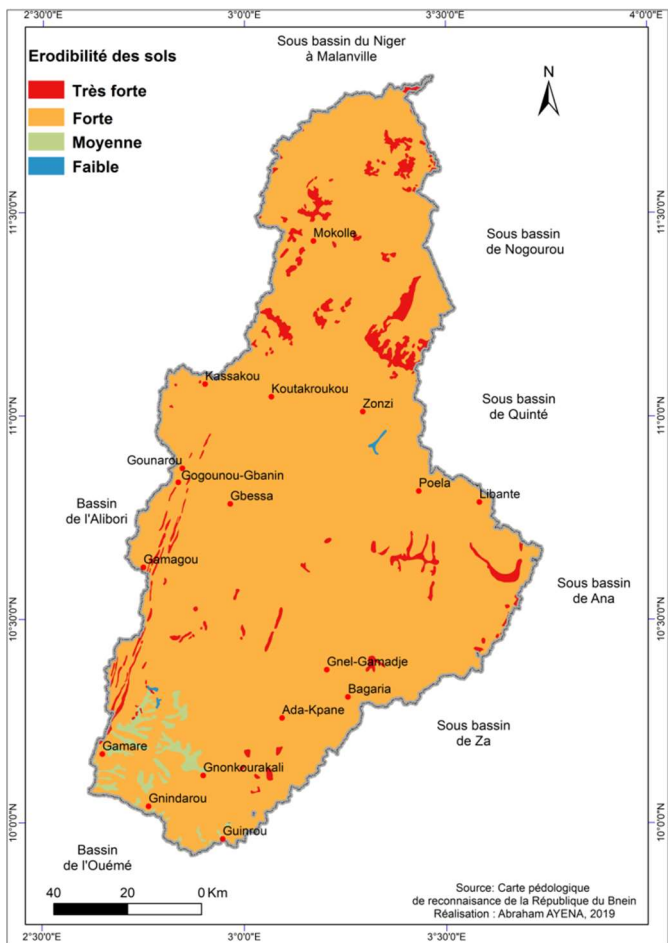


Fig. 4. Carte d'érodibilité des sols du bassin versant de la Sota

C. Rôle de la pente

La sensibilité du bassin versant de la Sota à l'érosion en fonction de l'inclinaison des pentes est présentée par la Fig. 5.

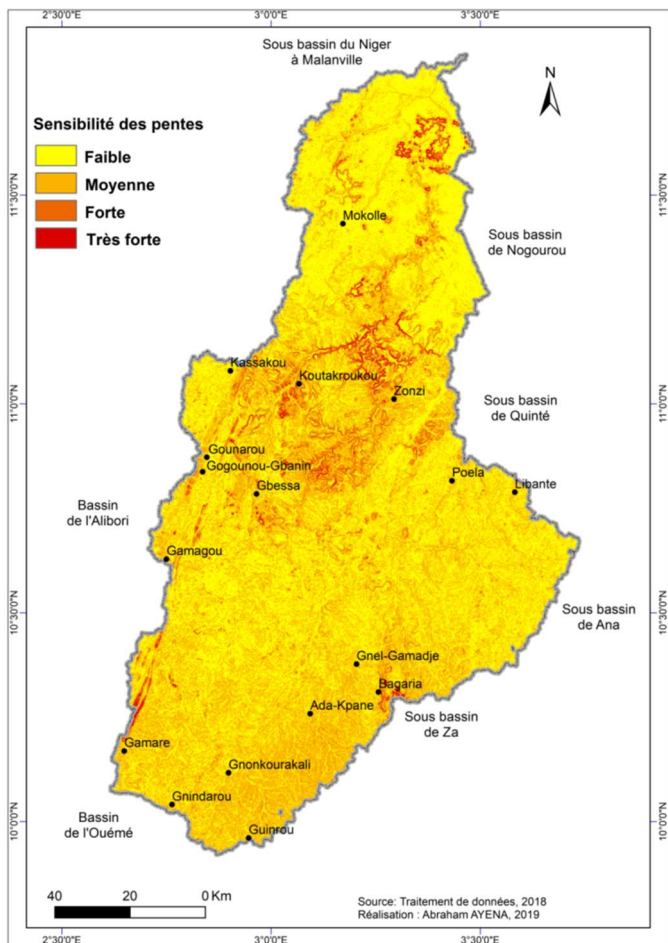


Fig. 5. Carte de sensibilité en fonction de l'inclinaison des pentes à l'érosion hydrique

Quatre classes distinctes sont identifiées. Elles couvrent respectivement :

- 1) 66 % du secteur de recherche pour les pentes entre 0 et 2 % ;
- 2) 25 % pour celles entre 2 % et 5 % ;
- 3) 4 % pour celles entre 5 et 10 % ;
- 4) 5 % pour celles supérieures ou égales à 11 %.

La synthèse de cette répartition est présentée dans le tableau VI selon la nature de la classe de sensibilité.

TABEAU VI : Répartition des classes de sensibilité à l'érosion en fonction de l'inclinaison des pentes

Sensibilité selon la pente	Proportion (%)
Faible	66
Moyenne	25
Forte	4
Très forte	5

La proportion de l'inclinaison des pentes de classe faible (pente de 0-2 %) est élevée (66 %). En conséquence, l'effet de la pente sur la sensibilité à l'érosion hydrique des sols est donc faible pour une grande partie du bassin, ce qui ne signifie pas l'absence de sensibilité à la battance. Ce résultat est en cohérence avec ceux d'autres travaux similaires [3, 31, 23, 4]. Cependant, [32] a montré que les pentes forte et très forte sont assez significatives et représentent 22,88 % de la surface du bassin versant du Bouregreg (Maroc). De même, pour [36], seulement 13 % du terrain d'étude ont une pente faible et 35 %, une pente forte ; ce qui n'est pas le cas dans cette recherche.

Par ailleurs, tous les auteurs s'accordent sur l'importance de l'inclinaison des pentes sur l'érosion et ont montré que les pertes en terre varient de façon exponentielle avec l'inclinaison de la pente [3, 6, 23, 32, 37, 36]. Ainsi, selon [23], dès que la pente atteint 7 %, il peut apparaître des rigoles évasées et les transports de sédiments s'organisent. Lorsque la pente dépasse 20 %, les particules de toute taille (5 à 10 mm) peuvent être emportées par le ruissellement, ce qui fait que la surface devient accidentée ; les rigoles deviennent plus profondes (20 cm) voire même plus.

D. Influence du couvert végétal

Plusieurs unités d'occupation du sol coexistent dans le bassin versant de la Sota. Ces unités sont réparties en différentes classes selon leur niveau de sensibilité à l'érosion. La proportion de chaque classe est illustrée par le tableau VII.

TABLEAU VII : Répartition des classes de sensibilité à l'érosion selon l'occupation du sol

Sensibilité selon l'occupation du sol	Proportion (%)
Faible	23,82
Moyenne	35,81
Forte	39,87
Très forte	0,51

Le bassin versant de la sota est caractérisé essentiellement par la classe de sensibilité forte (39,87 %), où sont représentées les terres arables. La dominance de cette classe dans le secteur est expliquée par l'existence d'un relief peu accidenté, favorable à l'agriculture. Cette classe s'oppose à la classe de sensibilité très forte (0,51 %), la moins représentée. La spatialisation de l'ensemble des classes (*Fig. 6*), a permis de mieux apprécier les disparités.

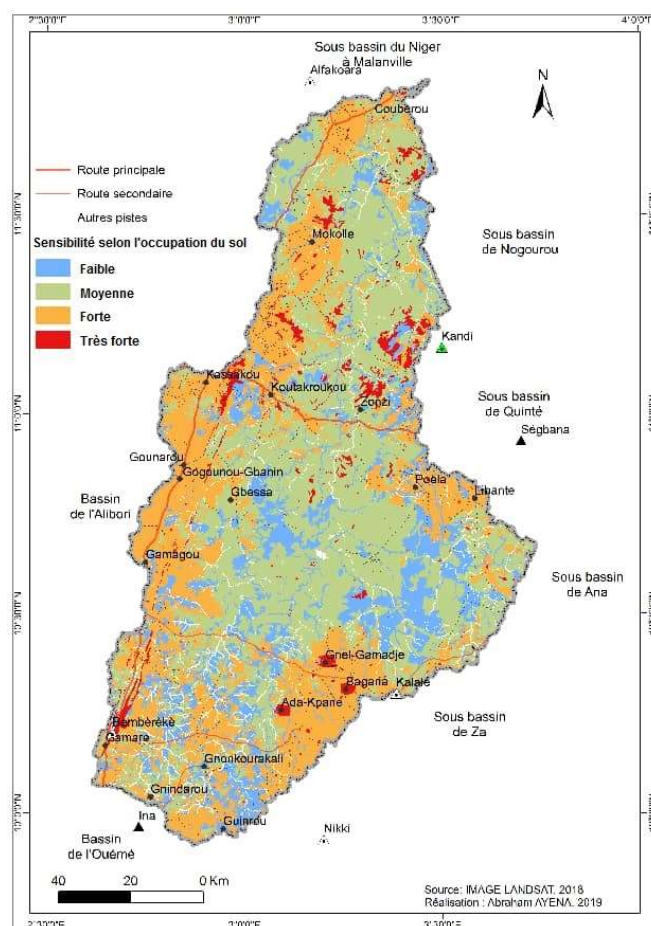


Fig. 6. Carte de la sensibilité à l'érosion selon l'occupation du sol

Les zones de sensibilité faible selon l'occupation du sol, représentent 23,82 % du bassin versant de la Sota et regroupent les forêts denses, les forêts galeries et les forêts claires et savanes boisées. Le couvert végétal, très dense, réduit à presque rien les pertes de sol.

Les zones de sensibilité moyenne couvrent 35,81 % du bassin et englobent les savanes arborées et arbustives, à couverture végétale moins dense que la classe précédente.

Les zones de sensibilité forte occupent 39,87 % du secteur de recherche. Elles concernent les mosaïques de cultures et jachères. Les zones de cultures vivrières sont plus sensibles, car le sol y est périodiquement à nu.

Les zones de sensibilité très forte occupent quant à elles 0,51 % du secteur et regroupent les sols nus et les zones urbaines.

La classification par le maximum de vraisemblance utilisée pour évaluer la contribution de ce facteur dans la caractérisation des processus de ruissellement et d'érosion a été validée lors de missions sur le terrain. En effet, celles-ci ont permis de procéder à la description des états de surface au

niveau des différentes classes d'occupation du sol, ainsi qu'à la vérification de leur localisation à l'aide d'un GPS, tel que procédé par [31]. En conséquence, les discriminations des classes effectuées reflètent qualitativement les modes d'occupation du sol du bassin.

E. Sensibilité potentielle à l'érosion hydrique

Le croisement des cartes de l'érosivité des pluies, de l'érodibilité des sols, de l'inclinaison des pentes et du couvert végétal, fait apparaître quatre classes de sensibilité potentielle à l'érosion hydrique (tableau VIII) dans le bassin versant de la Sota avec des proportions distinctes.

TABLEAU VIII : Répartition des classes de sensibilité du bassin de la Sota à l'érosion hydrique

Sensibilité à l'érosion	Proportion (%)
Faible	71,88
Moyenne	21,39
Forte	2,79
Très forte	3,93

Plus de la moitié du bassin de la Sota est faiblement sensible à l'érosion. La proportion de la sensibilité moyenne à très forte (28,12 %) est assez significative et mérite qu'une attention particulière soit accordée à la gestion des terres de ce secteur. La carte obtenue (Fig. 7) à l'issue du croisement des facteurs précise les différentes zones de sensibilité potentielle pour une surface qui avoisine 1.327.953 ha.

Les zones à faible sensibilité potentielle à l'érosion hydrique représentent 71,88 % du secteur de recherche. Elles sont présentes dans tout le bassin, essentiellement sur les terrains couverts de forêts denses, galeries (forêts classées de la Sota et des Trois Rivières) où le sol bien protégé facilite l'infiltration et limite les risques de ruissellement agressif et d'érosion. Ces zones ont une pente généralement comprise entre 0 à 2 %. Les études de [27] ont montré que même sur une pente inférieure à 1 %, l'érosion peut se produire. Il s'agit d'une érosion en nappe, sans formation de rigoles ou de ravines, les eaux de ruissellement ne parvenant pas à se concentrer. Les dépressions (les plaines inondables) dans lesquelles se trouvent ces zones, constituent des secteurs favorables au dépôt des matériaux arrachés sur les hauts plateaux.

Les zones à moyenne sensibilité potentielle à l'érosion hydrique concernent 21,39 % du bassin et se trouvent un peu partout, mais avec une prédominance dans la partie nord. Elles sont relativement sensibles à l'agressivité des pluies. A la différence de [4] pour qui, la sensibilité moyenne est présente

dans les terrasses agricoles bien entretenues où la pente est forte, cette classe associe majoritairement dans le bassin de la Sota les zones de savanes, où les pentes sont de l'ordre de 2 à 5 %. La zone des terrasses agricoles identifiée par [4] pour cette classe de sensibilité est marquée par le développement de l'agroforesterie et donc, apparaît comme une évidence.

Les zones à forte sensibilité potentielle à l'érosion hydrique ne couvrent que 2,79 % du milieu étudié. Elles sont présentes au centre, au nord-est et dans une moindre mesure, au sud-est du bassin avec une pente de 5 à 10 %, couvert des mosaïques de cultures et de jachère. Ces zones sont caractérisées par les versants des vallées où la faible cohésion des sables et leur texture très fine, sont très érodables. La battance pour l'ensemble des sols de cette classe est forte et l'érodibilité varie entre moyenne et très forte.

Les zones à très forte sensibilité potentielle à l'érosion hydrique représentent 3,93 % du bassin. Eparpillées dans le secteur, elles sont liées aux zones de concentration humaine (agglomération) et des sols nus où il est noté l'absence du couvert végétal pendant les mois les plus pluvieux de l'année. D'après [4], l'absence d'un couvert végétal protecteur du sol ou la présence d'un couvert peu dense, surtout pendant l'hiver, font que le sol subira directement les précipitations, ce qui augmente la sensibilité potentielle à l'érosion. Ces conditions concourent à dégrader les sols du fait de pentes supérieures ou atteignant 11 %, qui sont favorables à l'érosion. La proportion des classes à sensibilité très élevée se trouve dans la même fourchette (3 %) dans le bassin versant du barrage de Béni Amrane et concerne les terrains à fortes pentes, à cultures ou à couvert végétal absent ou/et à formations superficielles peu résistantes [36].

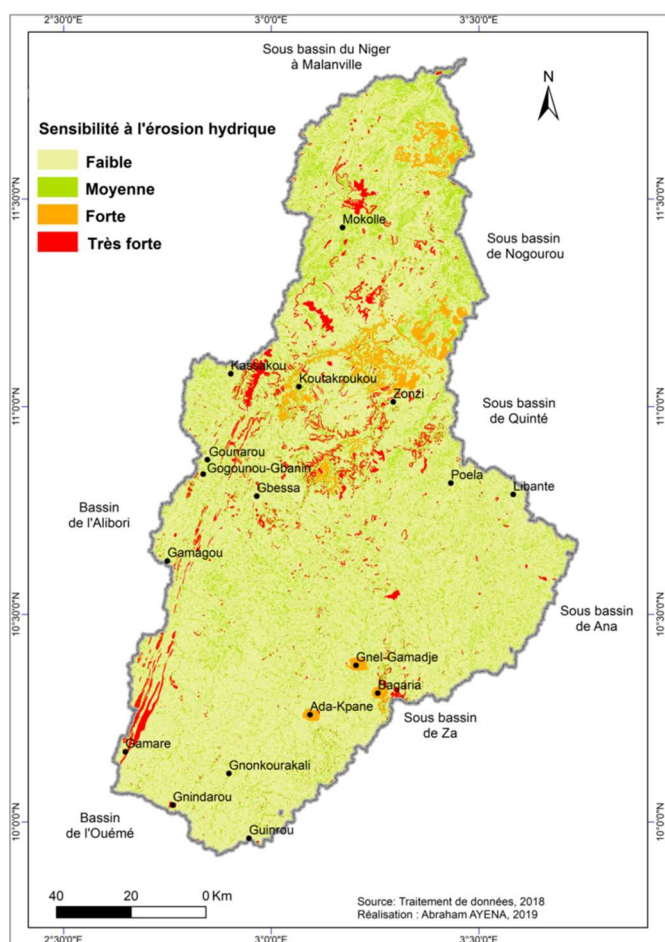


Fig. 7. Carte de sensibilité du bassin versant de la Sota à l'érosion hydrique

Au regard des caractéristiques de chaque zone, le mode d'occupation du sol est le facteur dominant, qui met en évidence le rôle de l'homme dans l'érosion bien que la combinaison de plusieurs facteurs détermine les différentes sensibilités. Pour [38], quelque soient les valeurs d'agressivité climatique, d'érodibilité du sol, de l'inclinaison du degré de la pente, leurs effets sont insignifiants, si le terrain est préservé par un bon couvert végétal qui freine le ruissellement pour faciliter l'infiltration et empêcher le déclenchement de l'érosion. Toutefois, ces résultats dépendent des conditions locales (climat, type du sol et gestion des terres, etc.) qui influencent les propriétés du sol.

IV. CONCLUSION

La dynamique érosive du bassin versant de la Sota est très active. Quatre zones correspondant à différentes classes d'érosion hydrique ont été identifiées : les zones de sensibilité faible, moyenne, forte et très forte. Les zones de sensibilité moyenne à très forte couvrent de façon cumulée 28 % du secteur et sont majoritairement concentrées dans sa partie nord ; ce qui montre que le secteur est moyennement sensible

à l'érosion hydrique. Cette sensibilité est due, pour l'essentiel, à une forte pression anthropique, à caractère agricole, qui provoque la réduction du couvert forestier au profit des cultures. Les types de sols (souvent sablo-argileux) et des formations superficielles contribuent à l'efficacité des processus d'érosion sur les terres agricoles. L'apport des Systèmes d'Information Géographiques (SIG) dans l'évaluation quantitative et qualitative du risque d'érosion a été d'une importance capitale. Ils ont permis non seulement de diviser le secteur de recherche selon son degré de sensibilité au phénomène avec un degré de précision appréciable, mais surtout de dégager assez facilement les zones prioritaires d'intervention. Cette détermination des zones sensibles à l'érosion est une étape importante dans la mise en place d'une stratégie de lutte contre l'érosion des sols. Bien que la validité d'évaluation de la méthode utilisée soit sujette à discussion, elle apporte une aide importante aux décideurs et aux aménagistes pour simuler des scénarios d'évaluation antiérosive et planifier les interventions de lutte contre l'érosion.

REFERENCES

- [1] ABN, "Plan Opérationnel 2016-2024," Programme Intégré de développement et d'adaptation aux Changement Climatiques dans le Bassin du Niger, 2016, www.abn.ne
- [2] I. Mamadou, "Erosion et ensablement dans les koris du Fakara-Degre carre de Niamey-Niger," Mémoire de DEA en Géographie, Université Abou Moumouni, 2006.
- [3] D. Ahiekpor, "Impact de l'occupation des sols sur l'érosion hydrique dans le bassin versant du Lac Togo," Mémoire de Master II, Université de Lomé, Lomé, Togo, 2011, 53 p.
- [4] H. El Hage Hassan, L. Touchart, G. Faour, "La sensibilité potentielle du sol à l'érosion hydrique dans l'ouest de la Bekaa au Liban," *M@ppemonde*, vol.109, n°37, 2013, 17 p.
- [5] R. Yonaba, H. Karambiri, A. Biaou, A.L. Mounirou, D. Niang, P. Queloz, "Modélisation de l'érosion hydrique à l'échelle du versant et du bassin versant dans un contexte sahélien : cas du bassin de Tougou au Nord du Burkina Faso," Doctoriales 2iE, 2016.
- [6] E. Payet, P. Dumas and G. Pennober, "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*, vol.11, n°3, 2012, 26 p.
- [7] E.W. Vissin, "Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du

- bassin béninois du fleuve Niger," Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, 2007, 267 p.
- [8] J. Vodounnon, "Impacts des systèmes culturels sur la biodiversité, les états de surface et les écoulements dans le bassin versant de la Sota," Mémoire pour l'obtention du Diplôme d'Etudes Supérieures Spécialisées (DESS), 2010, 92 p.
- [9] D. H. Koumassi, "Risques hydroclimatiques et vulnérabilités des écosystèmes dans le bassin versant de la Sota à l'exutoire de Couberi," Thèse de Doctorat unique, EDP/FLASH, 2014, 244 p.
- [10] E. Amoussou, S.H. Totin Vodounon, A. Hougni, E.W. Vissin, C. Houndenou, G. Mahe, M. Boko, "Changements environnementaux et vulnérabilité des écosystèmes dans le bassin-versant béninois du fleuve Niger," *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, vol.10, n°5, 2016, pp. 2183-2201.
- [11] S. Zakari, "Vulnérabilité des parcours naturels aux changements climatiques dans le bassin de la Sota à l'exutoire de Couberi (Bénin)," Thèse de Doctorat de l'Université d'Abomey-Calavi, 2015, 203 p.
- [12] T.T. Adjaka, "Gestion des risques hydro-pluviométriques dans la vallée du Niger au Bénin : cas des inondations des années 2010, 2012 et 2013 dans les communes de Malanville et de Karimama," Thèse de doctorat, Université d'Abomey-Calavi, 2016, 289 p.
- [13] S. Ibouaraïma, "Comblement des retenues d'eau d'abreuvement en zone agropastorale soudano-sahélienne : Dynamique, bilan et impact de la sédimentation intra-cuvette. Cas du Département de l'Alibori (Nord-Est du Bénin - Afrique de l'Ouest)," Thèse de Doctorat, Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 2005, 221 p.
- [14] PNUD-Bénin, "Programme Intégré d'Adaptation aux changements climatiques par le développement de l'Agriculture, du transport fluvial, du tourisme dans la vallée du Niger au Bénin," Document de formulation, 2014, 247 p.
- [15] A.A. Ayéna, S.H. Totin Vodounon, E. Amoussou, E.W. Vissin, "Rythme pluvio-hydrologique et morphodynamique de la vallée du Niger au Bénin," *J. Rech. Sci. Univ. Lomé* (Togo), vol. 20, n°4, 2018, pp. 183-199.
- [16] N. Agoïnon, H.C.F. Tchibozo et T.T.K. Tchamie, "Etat du sol et érosion dans le bassin versant de l'Agbado (Bénin en Afrique de l'Ouest)," *LaRBE. Rev. Env.*, vol.6, 2010, pp. 43-60.
- [17] S. Agbomahénan, "Erosion hydrique et dynamique des états de surface dans la Basse Vallée de l'Ouémé," Thèse de doctorat, Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 2016, 247 p.
- [18] C.L. Zhang, X.Y. Zou, J.R. Gong, L.Y. Lui, Y.Z. Liu, "Aerodynamic roughness of cultivated soil and its influences on soil erosion by wind in a wind tunnel," *Soil and Tillage Research*, vol.75, 2004, pp. 53-59.
- [19] M.A. Summerfield, "The changing landscape of geomorphology," *Earth Surface Processes and Landforms*, vol.30, n°6, 2005, pp. 779-781
- [20] Le Barbé, *et al.*, "Les ressources en eau superficielle de la république du Bénin," Rapport d'étude, EX-DGH/MMEH, Editions ORSTOM, 1993, 540 p.
- [21] M. Viennot, "Notice explicative de la carte pédologique de reconnaissance de la République Populaire du Bénin A 1/200.000, Feuille de Bembèrèkè," ORSTOM, Paris, France, 1978, 45 p.
- [22] W.H. Wischmeier et D.D. Smith, "Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning," *Agr. Handbook*, n°537, 1978, 58 p.
- [23] S. Ganhouégnon, "Analyse du risque d'érosion à l'aide de la télédétection et du SIG à Cotonou-Est au Bénin," Master en Sciences de la Géo-information, RECTAS/Université Obafemi Awolowo, Nigéria, 2012, 97 p.
- [24] R. Bou Kheir, M.C. Girard, A. Shaban, M. Khawlie, G. Faour et T. Darwich, "Apport de la télédétection pour la modélisation de l'érosion hydrique des sols dans la région côtière du Liban," *Télédétection*, vol.2, n°2, 2001, pp. 79-90.
- [25] J. Ryan, "A perspective on soil erosion and conservation in Lebanon," Publication n° 69, American University of Beirut, 1982, pp. 15-38.
- [26] H.A. Azontondé, "Propriétés physiques et hydrauliques des sols au Bénin," *In Soil Water Balance in the Sudano Sahelian Zone* (Proceedings of the Niamey Workshop, February 1991). IAHS, n°199, 1991, pp. 249-258.
- [27] E. Roose, "Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES)," Bulletin pédologique de la FAO n°70, Rome, 1994, 420 p.
- [28] C. Paul-Hus, "Méthodes d'étude de l'érosion et gestion des sites dégradés en Nouvelle-Calédonie," Essai présenté en vue de l'obtention du grade de maître en environnement (M. Env.), Université de Sherbrooke, 2011, 127 p.

- [29] Y. Le Bissonnais, J. Thorette, C. Bardet, J. Daroussin, "L'érosion hydrique des sols en France," Rapport IFEN/INRA, 2002, 106 p.
- [30] L.B. Cheikha et M. Gueddari, "Le bassin versant du Jannet (Tunisie): évaluation des risques d'érosion hydrique," *M@ppemonde*, vol.90, n°18, 2008, 16 p.
- [31] G.É. Aké, B.H. Kouadio, M.G. Adja, J.B. Ettien, K.R. Effebi et J. Biémi, "Cartographie de la vulnérabilité multifactorielle à l'érosion hydrique des sols de la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire)," *Physio-Géo - Géographie Physique et Environnement*, vol.6, 2012, pp. 23-42.
- [32] Y. El Hadraoui, "Etude diachronique de l'occupation du sol et de modélisation des processus érosifs du bassin versant du Bouregreg (Maroc) à partir des données de l'Observation de la Terre," *Sciences de l'ingénieur*, 2013, 89p.
- [33] M. Boughalem Kasmi, "Impact des systèmes de gestion sur la vulnérabilité des sols à l'érosion ; cas du bassin versant de l'Isser-Tlemcen (Algérie)," Thèse de Doctorat en Sciences Forestières, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2013, 215 p.
- [34] M. Yjjou, R. Bouabid, A. El Hmaidi, A. Essahlaoui, M. El Abassi, "Modélisation de l'érosion hydrique via les SIG et l'équation universelle des pertes en sol au niveau du bassin versant de l'Oum Er-Rbia," *International Journal Of Engineering And Science*, vol.3, n°8, 2014, pp. 83-91.
- [35] A. Sadiki, H. Mesrar, A. Faleh et J. Chaaouan, "Modélisation et cartographie des risques de l'érosion hydrique: cas du bassin versant de l'oued Larbaa, Maroc," *Papeles de Geografía*, n°55-56, 2012, pp. 179-188.
- [36] K. Khenter, "Vulnérabilité multifactorielle à l'érosion hydrique du bassin versant du barrage de Béni Amrane (W. Boumerdès)," Master en Hydraulique, Ecole Nationale Supérieure de l'hydraulique-ARBAOUI Abdallah, 2017, 60 p.
- [37] A. Markhi, N. Laftouhi, A. Soulaïmani, F. Fniguire, "Quantification et évaluation de l'érosion hydrique en utilisant le modèle RUSLE et déposition intégrés dans un SIG : application dans le bassin versant N'fis dans le haut atlas de Marrakech (Maroc)," *European Scientific Journal*, vol.11, n°29, 2015, pp. 340-356.
- [38] A. Sadiki, A. Faleh, J.L. Zêzere et H. Mastass, "Quantification de l'érosion en nappes dans le bassin versant de l'oued Sahla, Rif central Maroc," *Cahiers Géographiques*, n°6, 2009, pp. 59-70.