



Section : Environmental and water Sciences
Publication type : full Paper

Impact of water erosion in the sub-catchments of the Aghien lagoon (Bété and Djibi) located on the periphery of Abidjan Impact de l'érosion hydrique dans les sous bassins versants de la lagune Aghien (Bété et Djibi) situés à la périphérie d'Abidjan

Received 22 Dec. 2022
Accepted 26 Feb. 2023
On line 30 March 2023

Ehouman Serge KOFFI¹, Amidou DAO¹, Djibril Dabissi NOUFE¹, Seydou DIALLO¹, Bamory KAMAGATE¹, Rose Kôkôh EFFEBI¹, Droh Lanciné GONÉ¹, Jean Emmanuel PATUREL³, Jean-Louis PERRIN³ and Luc SEGUIS³, Zamblé Armand TRA BI²

(1) Laboratoire Géosciences et Environnement (LGE), UFR Sciences et Gestion de L'environnement (SGE) Université Nangui Abrogoua (UNA), 02 BP 801 Abidjan 02, Côte d'Ivoire City, State, Country

Email : ehoumankoffiserge@gmail.com

(2) Département de Géographie, UFR Communication Milieu et Société (CMS), Université Alassane Ouattara (UAO), 02 BP V 18 Bouaké 01, Côte d'Ivoire Email :

(3) HydroSciences Montpellier, IRD-Université de Montpellier, Montpellier, France

KEY WORDS

Geomatics, GIS, Aghien watershed, soil loss, silting

MOTS CLES

Géomatique, GIS, Bassin versant Aghien, Pertes en sol, ensablement

Abstract The objective of this manuscript is to show the impact of water erosion in the Bété and Djibi river catchments. The methodological approach is based on the Universal Soil Loss Equation incorporated into Geographic Information Systems. This equation takes into account five key factors: rainfall erosivity, soil erodibility, slope steepness and length, land cover and soil conservation practices. The combination of these five factors made it possible to draw up maps of annual soil losses in the catchment areas of the Bété and Djibi rivers, the main tributaries of the Aghien lagoon. The results obtained show soil losses ranging from 0 to 245 t/ha/year and from 0 to 1046 t/ha/year respectively in 2016 and 2017 in the Bété watershed. In the Djibi catchment, the trend is upwards with soil losses ranging from 0 to 290 t/ha/year in 2016 and between 0 and 306 t/ha/year in 2017. Annual soil losses to the lagoon in 2016 and 2017 were 5.2 t/ha/yr and 6.58 t/ha/yr respectively on the Bété and 7.08 t/ha/yr and 9.66 t/ha/yr on the Djibi. However, the highest soil losses were observed in 2017 in the Bété and Djibi catchments with values of 124362 t/yr and 68045.04 t/yr respectively. The high values recorded are the consequence of the degradation of the land cover in favour of urbanisation.

Résumé Ce manuscrit a pour objectif de montrer l'impact de l'érosion hydrique dans les bassins versants de la rivière Bété et Djibi. L'approche méthodologique est basée sur l'Équation Universelle des Pertes des Sols incorporée aux Systèmes d'Informations Géographiques. En effet, cette équation prend en compte cinq facteurs clés : l'érosivité des précipitations, l'érodibilité des sols, l'inclinaison et la longueur des pentes, le couvert végétal et les pratiques de conservation des sols. La combinaison de ces cinq facteurs a permis d'élaborer les cartes des pertes annuelles de sols dans les bassins versants des rivières Bété et Djibi, principaux tributaires de la lagune Aghien. Les résultats obtenus, laissent transparaître des pertes de sols variant de 0 et 245 t/ha/an et entre 0 et 1046 t/ha/an respectivement en 2016 et 2017 sur le bassin versant de la Bété. Sur le bassin versant de la Djibi, la tendance est à la hausse avec des pertes de sol allant de 0 à 290 t/ha/an en 2016 et entre 0 et 306 t/ha/an en 2017. Les pertes annuelles de sol vers la lagune en 2016 et 2017 respectivement de 5,2 t/ha/an et 6,58 t/ha/an sur



la Bété et de 7,08 t/ha/an et 9,66 t/ha/an sur la Djibi. Cependant, les pertes de sols les plus élevées s'observent en 2017 sur les bassins versants de la Bété et de la Djibi avec des valeurs respectives de 124362 t/an et 68045,04 t/an. Les fortes valeurs enregistrées sont la conséquence de la dégradation du couvert végétal au profit de l'urbanisation.

1. Introduction

L'érosion est un processus naturel gouvernée par deux principaux phénomènes que sont le vent et les précipitations. Toutefois, les activités anthropiques sont des catalyseurs qui peuvent modifier profondément la structure des sols. Ainsi les activités humaines, à travers les pratiques agricoles, les exploitations forestières, le pâturage, la transhumance ou la construction des routes et bâtiments tendent à modifier les phénomènes d'érosion, en l'accéléralant souvent de façon considérable [1]. À l'échelle planétaire, l'érosion hydrique est un processus majeur de dégradation des sols. Toutefois, l'érosion hydrique est l'imperméabilisation ou un défaut d'infiltration lié à une dégradation de la surface des sols sous l'action des pluies. Par ailleurs, l'érosion résulte du grignotage des surfaces du sol par la goutte de pluie. Elle est une source d'appauvrissement des sols en arrachant les terres arables du sol, mais aussi, elle participe au comblement des cours d'eau, des retenues, des barrages par le dépôt en aval des particules qu'elle transporte [2], [3]. Les pays africains sont confrontés à ce phénomène qui réduit le rendement des productions agricoles et contribue à la destruction des ouvrages d'assainissement, des routes voire des habitations. Aussi, ces pays ont une économie tributaire de l'agriculture pluviale, ce faisant au détriment de la forêt. En Afrique du Nord, le phénomène de l'érosion hydrique est également très répandu, la majorité des bassins versants étant caractérisée par de fortes dégradations spécifiques dépassant 2000 t/km²/an, ce qui entraîne un envasement moyen annuel des retenues des barrages à raison de 125 millions de m³ [4].

La Côte d'Ivoire ne se dérobe pas de cette réalité. Les travaux menés par [5] dans la région du DENGUELE entre 1986 et 2000 ont montré que le taux de sols transportés y est respectivement de 12 t/ha/an à 14 t/ha/an. Par ailleurs, [6] a montré que dans le bassin versant d'Ayamé 1 au Sud du pays, plus de 29,43 millions de tonnes de sol ont contribué au comblement du barrage hydroélectrique D'Ayamé 1. En outre, des études sur l'érosion hydrique menées dans la commune d'Attécoubé (Abidjan) par [7], dans de la région de Bonoua par [2] ont mis en évidence une forte dégradation des sols du fait de l'érosion hydrique. Ce triste constat s'étend à toute la ville d'Abidjan qui est une mégapole de dix communes dont la population connaît une forte croissance [8].

Depuis sa fondation en 1903, Abidjan, la capitale économique de la Côte d'Ivoire, à l'instar de la plupart des

villes du monde, ne cesse de s'étendre. Mais, comme pour la majorité des grandes villes africaines, cette évolution spatiale est mal maîtrisée. Les espaces occupés par les populations ne sont pas lotis au préalable. La ville d'Abidjan ou le district autonome d'Abidjan connaît une très forte croissance démographique due la crise qu'a traversée le pays. En effet, sa population de 3133608 habitants en 1998 est passée à 4707404 habitants en 2014. Son taux d'accroissement moyen annuel est de 2,7%. Le bassin versant de la lagune Aghien, bassin périurbain du district autonome d'Abidjan, se composant de deux sous bassins versants que sont le bassin versant de la Bété et la Djibi, n'échappe pas au phénomène de l'érosion hydrique. Ces sous bassins versants sont entaillés de ravinement qui menace les habitations de la population. Cette situation constitue une grande préoccupation aussi bien pour les autorités du district que pour les populations qui en sont les principales victimes. Cette réflexion pose le diagnostic du phénomène de l'érosion dans les sous bassins versants de la Bété et la Djibi, à travers non seulement la détermination des facteurs explicatifs mais aussi la quantification du phénomène. Les bassins versants de la Bété et la Djibi n'ont pas encore fait l'objet d'une telle approche. Cette étude est sans doute la première qui met l'accent sur ces variables explicatives.

1.1 Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude comprend le bassin versant d'alimentation de lagune Aghien. Le bassin versant de la lagune Aghien est situé au Sud de la Côte d'Ivoire, dans le District autonome d'Abidjan entre les longitudes (UTM) 375 000 et 410 000 m Ouest et les latitudes (UTM) 598 000 et 619 000 m Nord. C'est un bassin périurbain à cheval sur trois (03) communes du même district. Il est urbanisé, englobant les quartiers les plus peuplés de la commune d'Abobo. Sa superficie est de 365 km². Il associe notamment 2 bassins drainés par les rivières Djibi et Bété tributaires de la lagune Aghien. Le bassin de la Bété à une superficie de 216 km² et celui de la Djibi en couvre 78 km² (Fig. 1).

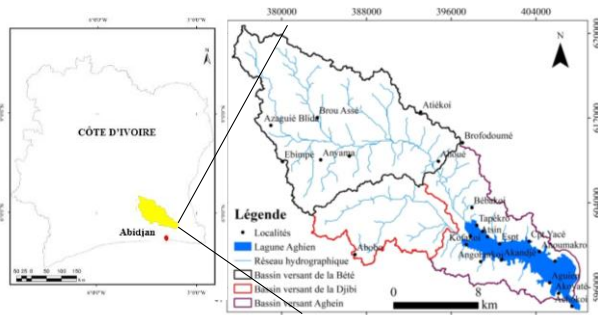


Fig. 1 : Localisation de la zone d'étude

Le bassin versant de la lagune d'Aghien est à cheval sur deux formations géologiques (Fig. 2) constituées du bassin sédimentaire côtier et du socle (cristallin et cristallophyllien). Ce bassin se compose de deux sous bassins versants que sont le bassin versant de la Bété et la Djibi. Dans ce bassin versant de la lagune Aghien on y distingue deux types d'aquifères. L'aquifère du sédimentaire et du socle. Le bassin versant de la Djibi est logé dans l'aquifère continu du bassin sédimentaire constitué des aquifères du Quaternaire et du Mio-Pliocène (Continental Terminal). En outre, celui de la Bété est à cheval sur les deux formations, l'aquifère discontinu et constitué des aquifères d'altérites fissurés et aussi d'aquifère continu du bassin sédimentaire constitués des aquifères du Quaternaire et du Mio-Pliocène (Continental Terminal). Les formations du sédimentaire qui affleurent sont attribuées aux quaternaire et tertiaire. Les sols du tertiaire sont constitués des sables grossiers, des argiles bariolées, des grès ferrugineux à minerais de fer de bas plateaux. Les formations sédimentaires d'âge quaternaire sont constituées de sables, de sables graveleux, de vases ou d'argile, de sables vaseux et de vases sableuses ou silteuses [9]. La région appartient au secteur ombrophile du domaine guinéen caractérisé par des groupements végétaux particuliers répondant à des conditions écologiques différentes [10] : la mangrove, le secteur ombrophile, la forêt mésophile ou semi-décidue et la zone de contact forêt-savane caractérisée principalement par la présence de lambeaux de forêts mésophiles et de larges mailles de savane séparées par des forêts galeries. La forêt a fait place à des plantations de palmiers à huile et d'hévéa [11].

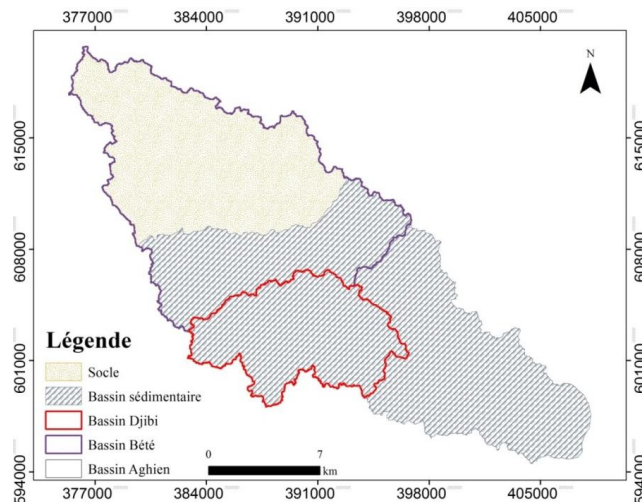


Fig. 2 : Carte géologique

La zone d'étude est couverte par le climat équatorial de transition (climat Attiéen), caractérisé par quatre saisons dans l'année : deux saisons pluvieuses et deux sèches. Les précipitations moyennes annuelles avoisinent 1500 mm en 2016 et 2500 mm en 2017

2. Matériel et Méthodes

2.1. Matériel

2.1.1. Données

Les données sont constituées d'une carte pédologique du bassin sédimentaire de la Côte d'Ivoire 1/200000 [12]. D'un modèle numérique de terrain (MNT) d'un arc de cercle avec une résolution de 30 m. Des images Landsat 8 OLI de 2016 et 2017 ; des données de pluies issues des six stations pluviométriques installées sur le bassin versant sur la période de 2016-2017.

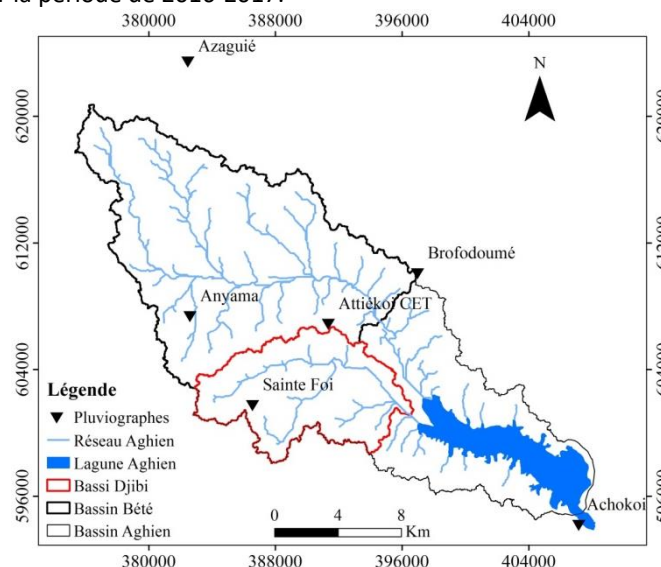


Fig. 3 : Réseau de pluviographes

Les images satellitaires sont de deux types :

L'image "Shuttle Radar Topography Mission" (SRTM) de 2000, de résolution 30 m, a servi à établir la carte des pentes.

L'image OLI de Landsat 8, résolution de 30 m (28,5 m sur le site), est issue de la scène p195-r056. Elle a permis de réaliser les cartes thématiques. Les caractéristiques des images sont consignées dans le tabl. 1.

Tabl. 1 : Caractéristiques des images Landsat 8 OLI

	Résolution spatiale	Nombre de Bandes	Données de scènes
2016	30 m x 30 m	11 bandes	156-56

2.1. Méthodes

2.1.1. Evaluation des pertes de sols des sous bassins versants

Cinq grands facteurs servent au calcul des pertes de terre en un endroit donné.

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

A : exprime les pertes de terre annuelles moyennes possibles à long terme en tonnes par are par année. Cette valeur peut ensuite être comparée aux limites de « pertes de terre tolérables ». ($t. ha^{-1} an^{-1}$) ;

R : correspond au facteur de pluie et de ruissellement par secteur géographique. Plus les précipitations sont intenses et plus elles durent longtemps, plus grands sont les risques d'érosion ($MJ mm ha^{-1} h^{-1} an^{-1}$) ;

K : représente le facteur d'érodibilité du sol ($t ha^{-1} MJ^{-1} mm^{-1} ha h$) ;

LS : est le facteur de longueur (L) et d'inclinaison de la pente (S) ;

C : correspond au facteur de culture (végétation) et de gestion. Ce facteur sert à déterminer l'efficacité relative des systèmes de gestion du sol et des cultures en termes de prévention des pertes de terre ;

P : correspond au facteur de pratique de conservation. Il reflète les effets des pratiques qui réduisent la quantité d'eaux de ruissellement et la vitesse de ruissellement et qui réduisent de ce fait l'importance de l'érosion.

La méthodologie utilisée est le croisement dans un SIG des paramètres sous forme de combinaison logique avec pour finalité l'élaboration de la carte de vulnérabilité à l'érosion hydrique. L'analyse spatiale, la combinaison des données, l'édition des cartes thématiques et la mise en place du SIG ont été effectuées avec le logiciel ArcGis 10.2.2 selon la fig. 4

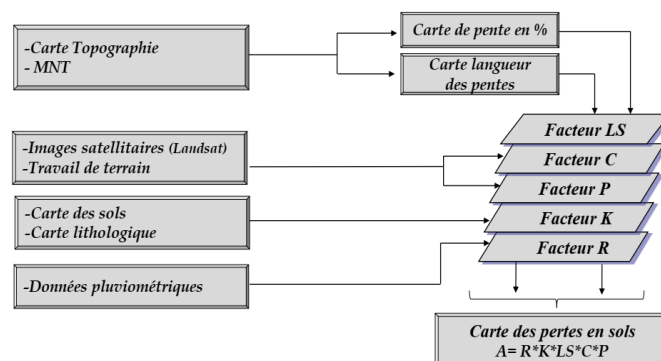


Fig. 4 : Méthodologie adoptée pour l'évaluation de l'érosion hydrique [13]

2.1.1.1. Estimation de l'indice d'agressivité des pluies sur le bassin-versant (facteur R)

[14] a proposé une formule modifiée qui n'implique que les précipitations moyennes mensuelles et annuelles [15], [16] :

$$R = \sum_{n=1}^{12} (P_i^2) / P$$

Pi : Pluie moyenne mensuelle (mm) ;

P : Pluie annuelle (mm).

Le facteur R a été calculé par station, puis les résultats ont été interpolés par la méthode IDW (Inverse Distance Weighting) afin d'établir la carte du facteur d'érosivité des sous bassins versants. IDW est une méthode déterministe locale qui calcule la valeur d'un point en effectuant la moyenne des valeurs des points situés dans le voisinage pondéré par l'inverse de la distance au carré au point calculé : plus les points sont proches, plus la pondération affectée est forte [17].

2.1.1.2. Erodibilité du sol (facteur K)

Le facteur K a été établi à l'aide du tableau de correspondance de [18], après détermination des textures des sols de la zone d'étude. La détermination des textures a canalisé au choisi des correspondances. Le manque d'information sur la teneur en matière organique nous a orienté à choisir les valeurs moyennes de K. Les valeurs de la perte de terre moyenne sont en tonnes/acre (système US), ces valeurs doivent être ramenées en système international (SI), pour ce faire un facteur multiplicateur de 0,1317 est utilisé (Tabl. 2)

En règle générale, les sols à forte teneur en limon et en sable très fin, à faible teneur en matières organiques à structure faible et à perméabilité très faible seront les plus sensibles aux agents d'érosion, en tenant compte uniquement des caractéristiques des sols.

Tabl. 2 : Sensibilité générale de la texture des sols à l'érosion [18]

Classe du sol de surface	Sensibilité relative à l'érosion hydrique	Teneur en matières organiques			Correspondance des sols du bassin versant Aghien
		< 2 %	> 2 %	Moyenne	
Sable très fin	Très forte	0,061	0,049	0,057	
Sable très fin loameux		0,058	0,033	0,051	
Loam limoneux	Forte	0,054	0,049	0,050	
Loam sableux très fin		0,054	0,044	0,046	
Loam limono-argileux		0,046	0,040	0,042	
Loam argileux		0,044	0,037	0,040	
Loam		0,045	0,038	0,040	
Argile limoneuse	Modérée	0,036	0,034	0,034	Sol ferrallitique argilo-sableux
Argile		0,032	0,028	0,029	Sol hydromorphe
Loam sablo-argileux		-	0,026	0,026	
Argile lourde		0,025	0,020	0,022	
Sable loameux		0,007	0,005	0,005	Sol ferrallitique sablo-argileux
Sable fin loameux	Légère	0,020	0,012	0,015	Sol ferrallitique complexe
Sable fin		0,012	0,008	0,011	
Loam sableux grossier		-	0,009	0,009	Sol ferrallitique sableux
Loam sableux	Très légère	0,018	0,016	0,017	
Sable		0,001	0,003	0,001	

2.1.1.3. Carte d'occupation du sol (facteur C)

L'indice de végétation NDVI se calcule comme un rapport entre les valeurs de la bande du rouge (R) et de la bande du proche infrarouge (PIR), qui reflète la fraction du rayonnement photosynthétique actif absorbé.

$$NDVI = (PIR - R) / (PIR + R)$$

Les valeurs du NDVI varient entre -1 et 1, où les valeurs les plus élevées reflètent la végétation verte et dense et les valeurs faibles représentent les sols nus ou les plans d'eau. La relation entre le NDVI et C est déterminé par l'équation 4 de [19], [20], [21], [22], [23].

$$C = e^{-(\alpha NDVI / \beta - NDVI)}$$

α et β : paramètres déterminant la forme de la courbe de NDVI ($\alpha = 2$ et $\beta = 1$) [5], [24]

Les différentes classes de végétation et/ou occupation du sol ont été cartographiées à partir de la classification supervisée d'une image satellitaire multispectrale LANDSAT 8 ORLI. Après la création sur l'image des zones d'Intérêt (ROI), une classification supervisée de type maximum de vraisemblance a ensuite été réalisée. Une visite sur terrain a été effectuée pour la validation de la carte.

2.1.1.4. Pratique culturale antiérosive (facteur P)

Les valeurs de P sont comprises entre 0 et 1, dans lequel la valeur 0 représente un très bon milieu de résistance à l'érosion d'origine humaine et la valeur 1 montre une absence de pratique anti érosive [25]. Les valeurs des cultures en bande ont été utilisées pour l'établissement de la carte du facteur P (Tabl. 3)

Tabl. 3 : Facteurs de conservation des sols recommandés [26],

Pente (%)	En contours	En bande	Terrasse avec cultures en contour
0,0-7,0	0,55	0,27	0,10
7,0-11,3	0,60	0,30	0,12
11,3-17,6	0,80	0,40	0,16
17,6-26,8	0,90	0,45	0,18
26,8 >	1,00	0,50	0,20

2.1.1.5. Topographie du sol (facteur LS)

Le calcul de facteur LS, des tributaires la lagune Aghien, est effectué sur un support SIG, Ce dernier utilise le MNT (Module Numérique de Terrain) pour le calcul de la pente en degré, l'orientation et la longueur cumulative. La combinaison du facteur L et S donne le facteur LS. Le facteur LS représente un rapport des pertes de terre sous des conditions données. Les pertes de terre en un endroit sont caractérisées par une inclinaison « standard » de 9 % et une longueur de pente de 22,1 m. Plus la pente est forte et longue, plus élevé est le risque d'érosion [27].

2.1.1.5.1. Facteur L

La formule ci-dessous a été développée par [28]

$$L = ((A + D^2)^{(m+1)} - A^{(m+1)}) / (X^m D^{(m+2)} * 22.13^m)$$

m et F s'obtient par l'équation 6 et 7 [29], [6]

$$m = F / (1 + F)$$

$$F = ((\sin("pente" * 0,01745) / 0,0896) / (3 * \text{power}(\sin("pente" * 0,01745), 0,8) + 0,56))$$

2.1.1.5.2 Facteur S

Dans ce travail. Il est évalué au moyen de la formule suivante [6] :

$$S = \text{con}(\tan(\theta * 0,01745) < 0,09, (10,8 * \sin(\theta * 0,01745) + 0,03), (16,8 * \sin(\theta * 0,01745) - 0,5))$$

A est l'accumulation du flux ; D la résolution du pixel ; X un coefficient de forme (X=1) et θ est l'inclinaison de la pente (degré) converti en radian par une grandeur multiplicative de 0,01745.

Le facteur topographique s'obtient par la formule suivante

$$LS = L * S$$

3. Résultats et Discussion

3.1. Résultats

Le maximum pluvieux est atteint en juin pour des hauteurs de pluies supérieures à 500 mm en 2017. Exception faite en 2016 où le maximum est atteint en mars à la Djibi avec une hauteur de pluie de supérieure à 200 mm. En revanche à la Bété la hauteur maximale s'observe en octobre avec une valeur de 309 mm.

3.1.1 Caractérisation des facteurs constituant l'équation de Wischmeier

3.1.1.1. Occupation du sol

L'analyse diachronique des cartes d'occupation du sol (Fig. 5) a regroupé les unités paysagères en 4 classes que sont : la forêt dégradée, la zone agricole, le sol nu et l'eau. Les différentes proportions de l'évolution de 2016 et de 2017 du couvert végétal sont consignées dans les tabl. 4 et 5. Les deux cartes mettent en exergue la dynamique spatio-temporelle de l'évolution de la couverture végétale. Cette dynamique du couvert végétal montre une régression de la superficie de la forêt dégradée qui laisse place à la zone agricole. Le sol nu gagne du terrain avec un taux d'évolution de 31,24 % sur la Djibi et 29,43 % à la Bété. La zone agricole diminue en superficie sur la Djibi, elle est passée de 44,03 % à 34,62 % soit un taux de régression de 27,21 %. Cette pression sur le couvert végétal au niveau du bassin de la Djibi résulte de l'urbanisation galopante des communes qui se partage ce

bassin. Aussi, les activités agricoles contribuent à la dégradation du couvert végétal, La superficie de la forêt dégradée a baissé de 2016 à 2017 à la Djibi (35,51 %) ainsi qu'à la Bété (28,14 %).

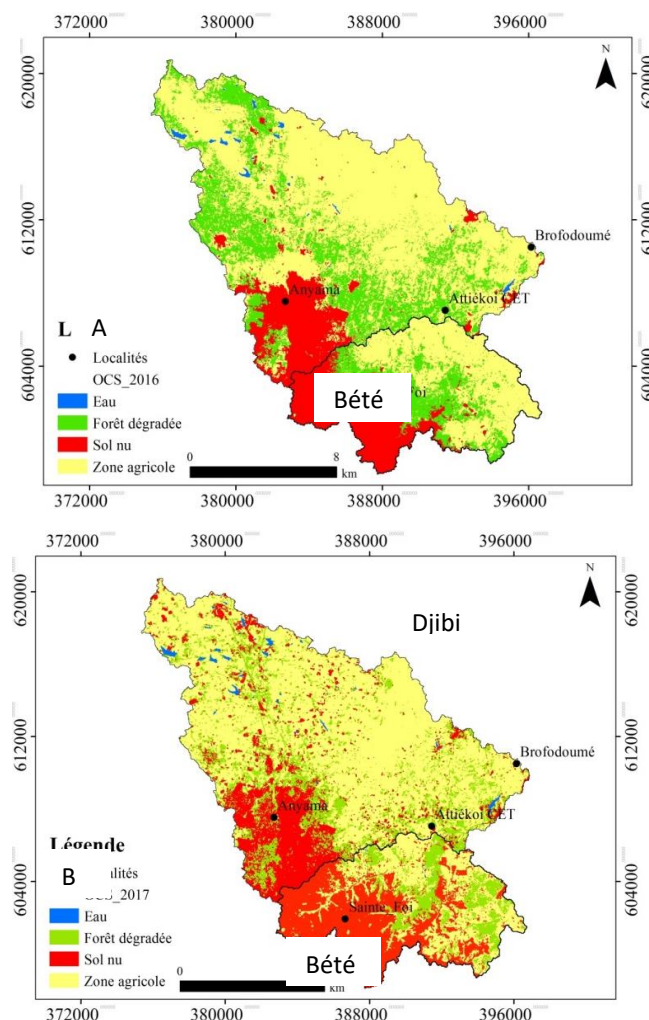


Fig. 5 : Carte de l'occupation du sol dans les sous bassins versant Bété et Djibi de (A) 2016 et (B) 2017

Tabl. 4 : Classe des entités paysagères de l'année 2016

Unité paysagère	Djibi	Bété
Zone agricole	44,03 %	62,68 %
Forêt Dégradée	22,44 %	24,78 %
Sol nu	33,52 %	11,91 %
Eau	0 %	0,62 %

Tabl. 5 : Classe des entités paysagères de l'année 2017

Unité paysagère	Djibi	Bété
Zone agricole	34,62 %	63,05 %
Forêt Dégradée	16,56 %	19,34 %
Sol nu	48,75 %	16,87 %
Eau	0 %	0,74 %

2.1.1.6. Energie d'agressivité de la pluie ou facteur R

Le facteur R a été calculé pour chaque station, puis les résultats ont été interpolés par la méthode d'interpolation IDW, afin d'obtenir la carte d'érosivité du bassin. Le traitement des enregistrements pluviométriques des stations de la Bété et la Djibi de 2016 a permis de caractériser l'agressivité du climat (Fig. 6 et 7). Elle diminue de 227 MJ.mm/ha.h.an à l'amont et de 168 MJ.mm/ha.h.an à l'aval sur la Bété. A la Djibi elle croît de 168 MJ.mm/ha.h.an à 200 MJ.mm/ha.h.an de l'amont à l'aval. Cette répartition spatiale de l'agressivité climatique montre une fois de plus le caractère hétérogène de la pluie et donc du facteur R. Les valeurs

de l'indice de l'érosivité les plus élevées correspondent aux précipitations élevées et se situent dans le Nord-Ouest du bassin de la Bété précisément à la station d'Anyama où les quantités les plus énormes sont de 227 MJ.mm/ha.h.an. Cette forte pluviométrie, en l'absence du couvert végétal, peut entraîner la dégradation des particules moites par leur impact sur les sols et par le ruissellement, charriant ainsi les sédiments vers la lagune Aghien. A la Djibi ces valeurs se localisent plus au Nord à la station d'Attiékoi CET. Cette agressivité climatique est faible dans les stations de Brofodoumé et d'Attiékoi CET 168 MJ.mm/ha.h.an à la Bété où les pluies sont relativement faibles.

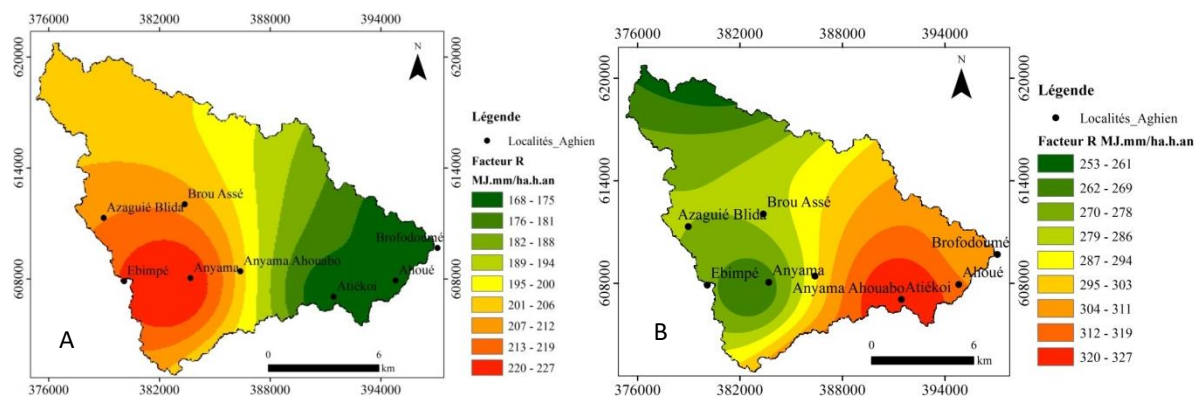


Fig. 6 : Carte du facteur d'agressivité de la pluie dans les sous bassins versant Bété A :2016 et B : 2017

Tabl. 6 : Tableau comparatif de l'érosivité de 2016 à 2017 à la Bété

Catégorie	2016			2017		
	Classe	Aire (ha)	(%)	Classe	Aire (ha)	(%)
B						
Très faible	168-181	3653	19,33	253-272	3671	19,42
Faible	181-195	2955	15,64	272-285	5944	31,42
Moyenne	195-206	6447	34,11	285-299	3243	17,16
Elevée	206-216	3285	17,38	299-313	382	20,21
Très élevée	216-228	256	13,55	313-327	2223	11,76

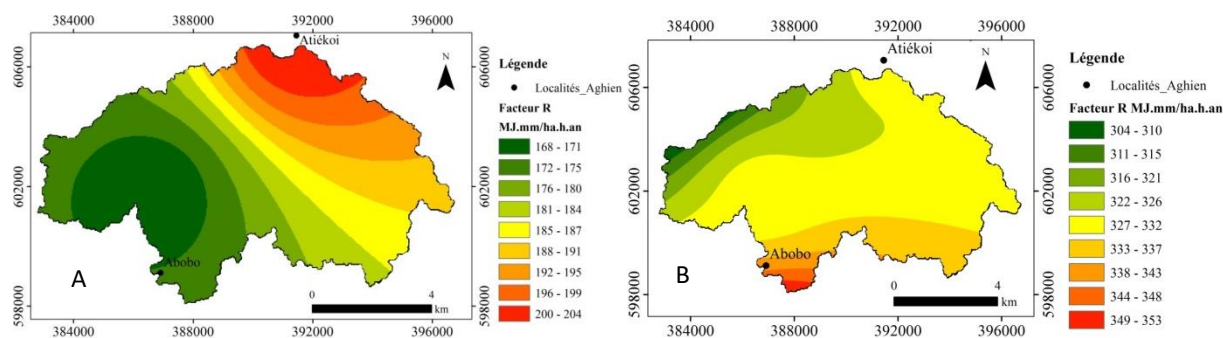


Fig. 7 : Carte du facteur d'agressivité de la pluie dans les sous bassins versant de la Djibi A : 2016 et B : 2017

Tabl. 7 : Tableau comparatif de l'érosivité de 2016 à 2017 à la Djibi

Catégorie	2016			2017		
	Classe	Aire (ha)	(%)	Classe	Aire (ha)	(%)
Très faible	168-175	2641	37,51	305-320	402	5,71
Faible	175-182	964	13,7	320-326	1034	14,69
Moyenne	182-188	1411	20,05	326-331	3844	54,61
Elevée	188-195	1246	17,69	331-339	1546	21,96
Très élevée	195-204	778	11,05	339-354	214	3,05

2.1.1.7. Erodibilité du sol ou Facteur K

La correspondance entre la texture et l'érodibilité des sols a permis de mettre en évidence les sols les plus susceptibles d'être érodés des tributaires de la lagune Aghien. Les classes retenues varient de 0,04 et 0,26 t.ha.h/ha.MJ.mm (Fig. 8). La carte du facteur K montre que plus de 91,3% de la superficie la Bété (composée en majeure partie par les sols ferrallitiques complexes) et 44,59% (constituée des sols ferrallitiques sablo-argileux) de celle de la Djibi possède une érodibilité comprise entre $(0,4 < K \leq 0,26)$. La distribution spatiale du facteur K indique une hétérogénéité dans les sous bassins versants. Les sols moyennement sensibles à l'érosion (0,04 t.ha.h/ha.MJ.mm) se rencontrent autour du bassin de la Bété et de la Djibi. Par contre les valeurs 0,07 t.ha.h/ha.MJ.mm se rencontre uniquement au Sud-Ouest de la Djibi. Le reste des sous bassins est couvert de sols légèrement sensible à des sols modérément sensible à l'érosion avec des valeurs comprises entre 0,11 à 0,26 t.ha.h/ha.MJ.mm (Tabl. 8). Les valeurs élevées de l'érodabilité prédisposeraient les sous bassins versants à l'érosion lors des précipitations.

Tabl. 8 : Répartition de l'érodibilité en pourcentage des unités structurales du sol

Catégorie	Classe	Bété		Djibi	
		Aire (ha)	%	Aire (ha)	(%)
Très faible	0,04	1638	8,67	2696	38,30
Faible	0,07	-	-	1205	17,12
Moyenne	0,11	13697	72,47	841	11,95
Elevée	0,22	-	-	-	-
Très élevée	0,26	3564	18,86	2297	32,63

2.1.1.8. Pratiques antiérosives Facteur P

La carte du facteur P résumée en cinq classes de 0,27 à 0,5 (Fig. 9 A et B). Illustre la répartition spatiale des pratiques antiérosives par l'homme sur les sites d'étude. Ces pratiques sont pour la plupart réalisées sur les pentes. C'est d'ailleurs pour ce fait que les plus faibles et

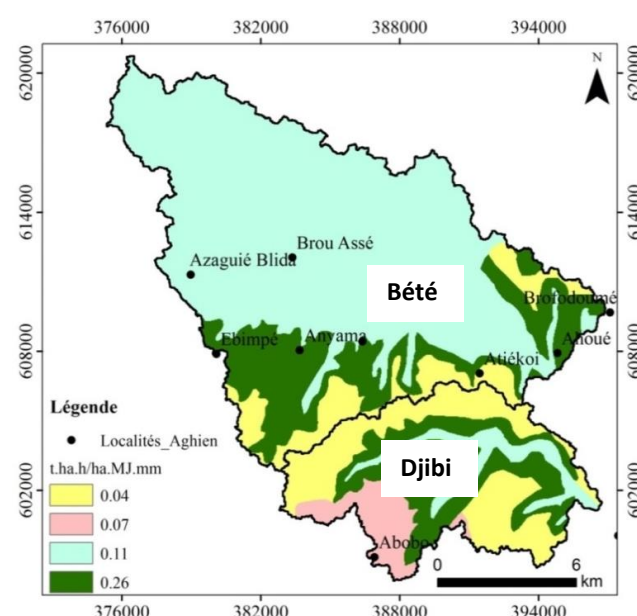


Fig. 8 : Carte d'érodibilité du sol des sous bassins versants de la Bété et la Djibi.

moyennes valeurs du facteur P se retrouvent dans les zones à pentes faibles et modérées. Les valeurs comprises 0,27 et 0,30 (sans unités) se situent généralement en amont des bassins versants. Ces pratiques sont intensifiées vers l'exutoire des tributaires à cause des fortes pentes qu'on y rencontre correspondent à des fortes valeurs du facteur p qui varie 0,3 à 0,45.

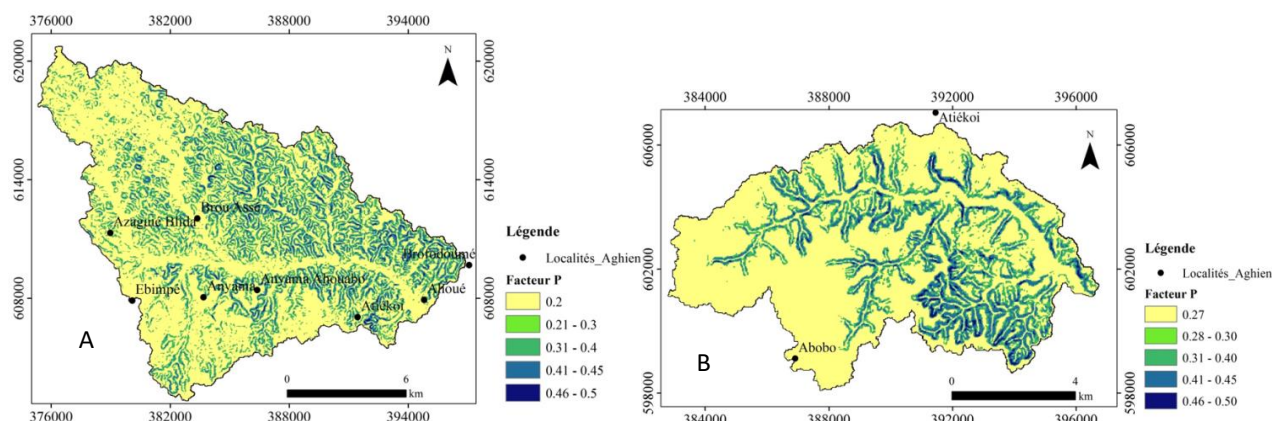


Fig. 9 : Carte des pratiques antiérosives dans les tributaires de la lagune Aghien. A : la Bété ; B : la Djibi.

Tabl. 9 : Pourcentage et superficie occupés par les pratiques antiérosives dans les sous bassins versants

Catégorie	Valeurs de P	Bété		Djibi	
		Aire (ha)	(%)	Aire (ha)	(%)
Très faible	0-0,2	12665	66,4	4927	69,95
		8			
Faible	0,2-0,3	0	0		
Moyenne	0,3-0,4	446	23,6	1204	17,09
Elevée	0,4-0,45	1772	9,38	807	11,46
Très élevée	0,45-0,5	104	0,55	106	1,51

En se référant au tabl. 9, les zones où les pratiques antiérosives sont faibles occupent une importante superficie des bassins versants 66,48 % à la Bété contre 69,95 % à la Djibi. Cependant, les zones à forte pratiques antiérosives se localisent sur les versants, dans les talwegs ou les dépressions 0,55 % et 1,51 % respectivement à la Bété et Djibi.

2.1.1.9 Couverture végétale ou Facteur C

Les cartes des NDVI des sous bassins versants ont été élaborées à partir des images Landsat 8 (OLI) de 2016 et de 2017. La fig. 10 et 11 illustre l'évolution du couvert végétal dans les sous bassins de la lagune Aghien en 2016

et en 2017. Les zones claires représentent les fortes valeurs de C et sont situées au sud à la Bété et sud est à la Djibi et les couleurs les plus sombres (noires) sont les faibles valeurs. Les zones noires sont les zones où la couverture végétale est abondante due à une forte activité chlorophyllienne synonyme d'un développement végétatif, cependant les zones gris foncé à claires se localisent dans les aires couvertes par les forêts peu denses et espacées. Par contre les parties clairsemées sont peu couvertes en végétaux les zones claires sont constituées de sols nus, des retenues d'eau et des habitats.

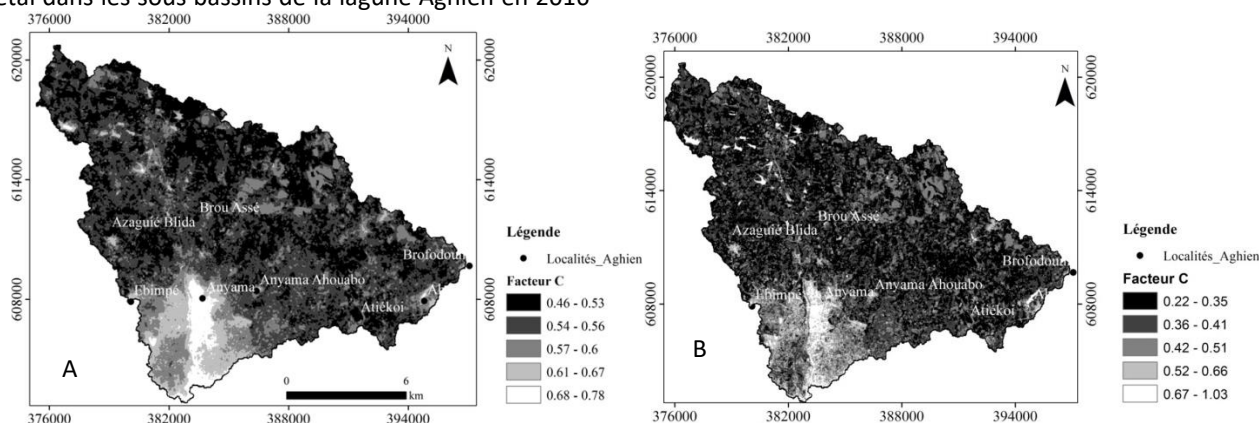


Fig. 10 : Facteur couvert végétal dans le sous bassin de la Bété, A : 2016 et B : 2017

Tabl. 10 : Pourcentage et superficie occupés par la couverture végétale à la Bété

Catégorie	2016			2017		
	Classe	Aire (ha)	(%)	Classe	Aire (ha)	(%)
Très faible	0,46-0,53	5914	31,29	0,22-0,36	7093	37,53
Faible	0,53-0,56	8323	44,04	0,36-0,42	7409	39,2
Moyenne	0,56-0,6	2823	14,94	0,42-0,52	2928	15,48
Elevée	0,6-0,67	1200	6,35	0,52-0,66	984	5,21
Très élevée	0,67-0,78	563	2,98	0,66-1,03	412	2,18

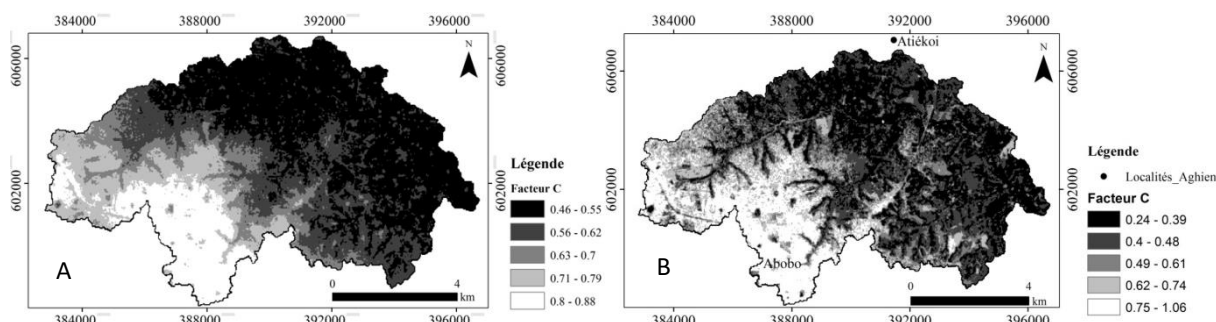


Fig. 11 : Facteur couvert végétal dans le sous bassin de la Bété, A : 2016 et B : 2017

Tabl. 11 : Pourcentage et superficie occupés par la couverture végétale à la Djibi

Catégorie	2016			2017		
	Classe	Aire (ha)	(%)	Classe	Aire (ha)	(%)
Très faible	0,46-0,55	2921	41,46	0,24-0,39	2167	30,76
Faible	0,55-0,62	1589	22,56	0,39-0,49	1976	28,06
Moyenne	0,62-0,7	747	10,60	0,49-0,62	936	13,29
Elevée	0,7-0,79	844	11,98	0,62-0,75	872	12,37
Très élevée	0,79-0,88	944	13,40	0,75-1,06	1093	15,51

L'exploitation des tabl. 10 et 11 révèle que, de 2016 à 2017, les zones à catégorie très faible caractérisées occupent des aires respectives de 59,14 km² et 70,93 km² pour des proportions de 31,29 % et 3,53 %, est en pleine expansion à la Bété avec un gain de couverture végétale de 16,63 %. Une baisse à la catégorie très élevée que sont les sols nus et habitats ont une superficie de 5,63 km² en 2016, elle passe à 4,15 km² avec un taux de réduction de 36,65 %.

Le phénomène inverse s'observe à la Djibi nous assistons à une régression à la catégorie très faible de 29,21 km² en 2016, elle passe à 21,67 km² soit une baisse de 35 %, la baisse de la couverture a induit une augmentation des sols nus et habitats 9,44 km². Cette augmentation est de 10,93 km² soit une hausse de 13,63 %. Les fortes sensibilités à l'érosion sont donc associées à la présence des forêts dégradées et aux zones de cultures. Les sols nus sont les plus vulnérables à l'érosion. Cette classe est cependant sous-représentée sur l'ensemble du bassin versant.

2.2.1.10. Topographique fonction de la longueur et de la pente des versants ou Facteur LS

Les valeurs issues du calcul du facteur LS ont été regroupées en cinq classes de 0 à 179 à la Bété et de 0 à 42 à la Djibi. Les plus fortes valeurs s'observent à la Djibi (Fig. 12). L'inclinaison et la longueur de pente influence très peu le processus de l'érosion dans les versants des bassins de la Bété et moyennement à la Djibi. Le facteur LS est important sur les versants des cours d'eau.

L'analyse des tabl. 12 et 13 révèlent que les fortes inclinaisons et les longueurs des pentes sont concentrées sur les versants 21,51 % à la Djibi et moins de 1 % à la Bété. Elles sont localisées sur les versants des cours d'eau. Les faibles valeurs du facteur LS occupent toutes la superficie des sous bassins 99,73 % à la Bété et 78,49 % à la Djibi.

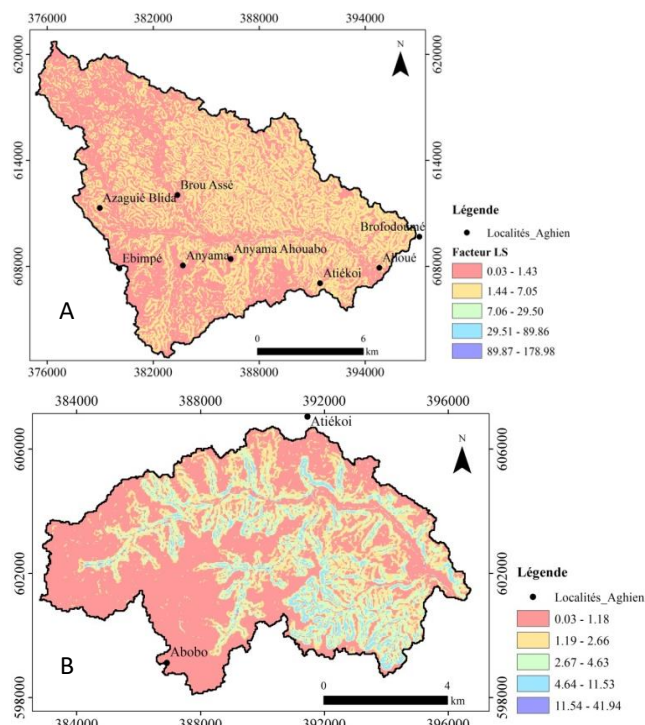


Fig. 12 : Facteur topographique LS des sous bassins de la Bété et Djibi

Tabl. 12 : Pourcentage et superficie occupés par le facteur topographique à la Bété

Catégorie	Classe	Aire (ha)	(%)
Très faible	0-2	10067	53,26
Faible	2-7	8783	46,47
Moyenne	7-30	48	0,26
Elevée	30-90	2	0,01
Très élevée	90-179	0	0

Tabl. 13 : Pourcentage et superficie occupés par le facteur topographique à la Djibi

Catégorie	Classe	Aire (ha)	(%)
Très faible	0-2	4034	57,26
Faible	2-3	1495	21,23
Moyenne	3-5	1137	16,14
Elevée	5-12	373	5,30
Très élevée	12-42	5	0,07

2.1.2. Estimation des pertes en sol dans les sous bassins versants

Les fig. 13 et 14 sont les croisements des cartes thématiques des principaux facteurs intervenant dans l'érosion hydrique des sols. Les cartes de pertes de sols obtenues sont regroupées en cinq classes de 0 à 245 t/ha/an à la Bété et de 0 à 290 t/ha/an pour la Djibi en 2016 et 0 à 1046 t/ha/an à la Bété et 0 à 306 t/ha/an à la Djibi en 2017. Sur la Bété, la perte en sol à lieu sur tout le bassin, par contre à la Djibi les pertes s'accroissent plus

dans les talwegs. La sensibilité potentielle des terrains dans les sous bassins a été regroupée en 5 classes selon la prédominance de l'érosion

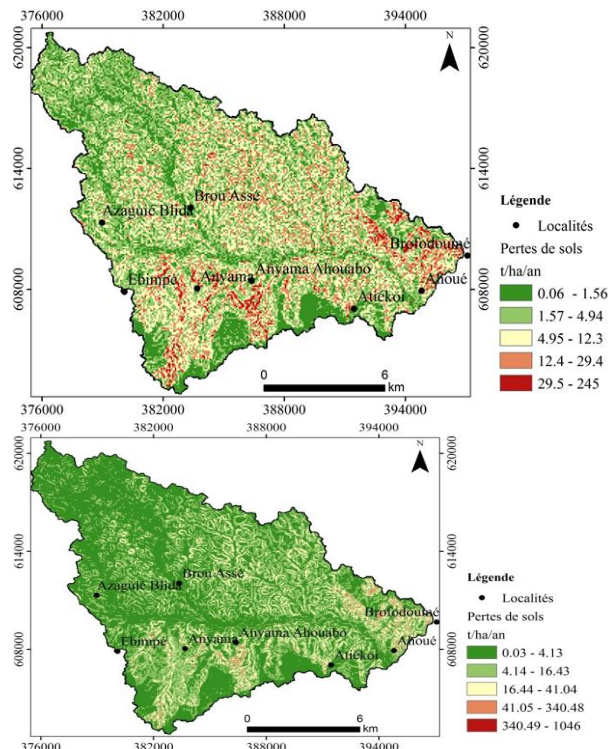


Fig. 13 : Estimation des pertes de sols du sou bassin de la Bété, A : 2016 et B : 2017

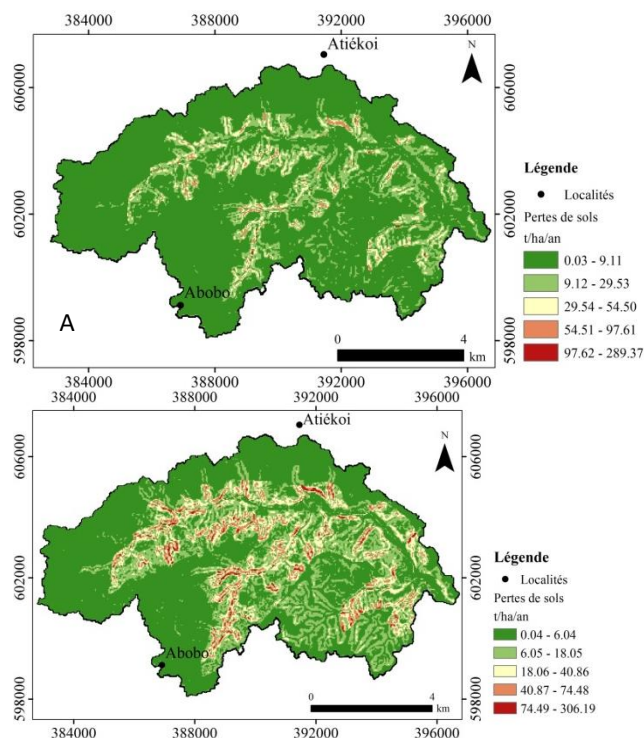


Fig. 14 : Estimation des pertes de sols du sou bassin de la Djibi, A : 2016 et B : 2017

Tabl. 14 : Répartition des pertes en sols dans le bassin versant de la Bété de 2016 et 2017

Catégorie	2016			2017		
	Classe (t/ha/an)	Aire (ha)	(%)	Classe (t/ha/an)	Aire (ha)	(%)
Très faible	0-2	3673	19,43	0-5	10176	53,84
Faible	2-5	7182	38,00	5-17	66,89	35,39
Moyenne	5-12	5315	28,12	17-41	1786	9,45
Elevée	12-29	2374	12,56	41-340	248	1,31
Très élevée	29-245	357	1,89	340-1046	000	0

Tabl. 15 : Répartition des pertes en sols dans le bassin versant de la Djibi de 2016 et 2017

Catégorie	2016			2017		
	Classe (t/ha/an)	Aire (ha)	(%)	Classe (t/ha/an)	Aire (ha)	(%)
Très faible	0-10	5506	78,17	0-6	4212	59,80
Faible	10-30	1143	16,23	6-18	1718	24,38
Moyenne	30-55	309	4,39	18-41	702	9,97
Elevée	55-98	82	1,16	41-75	336	4,78
Très élevée	98-290	3	0,04	75-306	75	1,07

L'analyse des Tabl. 14 et 15, à la Bété, se fera suivant les années. Elle indique que la stabilité de l'aléa érosion très faible (de 0-2 t/ha/an et de 0-5 t/ha/an), à faible (de 2-5 t/ha/an et de 5-17 t/ha/an) sont très répandus et occupent des superficies considérables (19,43 % et 38 %) en 2016 et (53,84 % et 35,39 %) en 2017. Ainsi, les situations intermédiaires correspondent aux zones où l'érosion moyenne occupe des superficies de 53,15 km² et 17,86 km². Cependant, les zones de fortes vulnérabilités occupent de petites aires des sous bassins soit environ 12,56 % et 1,31 %. Les zones les plus vulnérables couvrent une surface de 3,57 km² soit environ 1,89 % de la superficie totale de la zone d'étude. Ces zones sont inexistantes en 2017 (Tabl. 14).

A la Djibi, en revanche, nous assistons à un accroissement de la sensibilité des sols à l'érosion de 2016 à 2017, l'analyse se fera dans le même ordre chronologique, nonobstant la chute de la classe très faible. Les zones où l'érosion est très répandue couvrent une très faible partie du bassin versant.

2.1.3. Sensibilité des surfaces à l'érosion

La carte de sensibilité à l'érosion (Fig. 15 et 16) indique que les zones à érosion très faible sont généralisées dans tout le bassin et dans le lit mineur. Par contre les zones à faible densité d'érosion à très élevées se concentrent sur les versants et dans les talwegs.

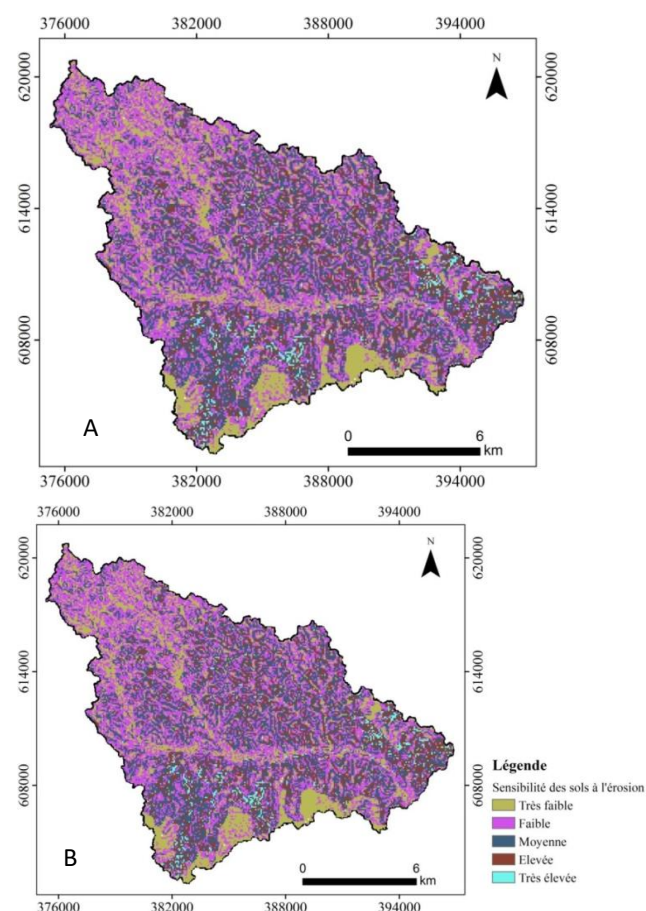


Fig. 15 : Sensibilité des surfaces des bassins versant à l'érosion sur la Bété : (A) : 2016 et (B) : 2017

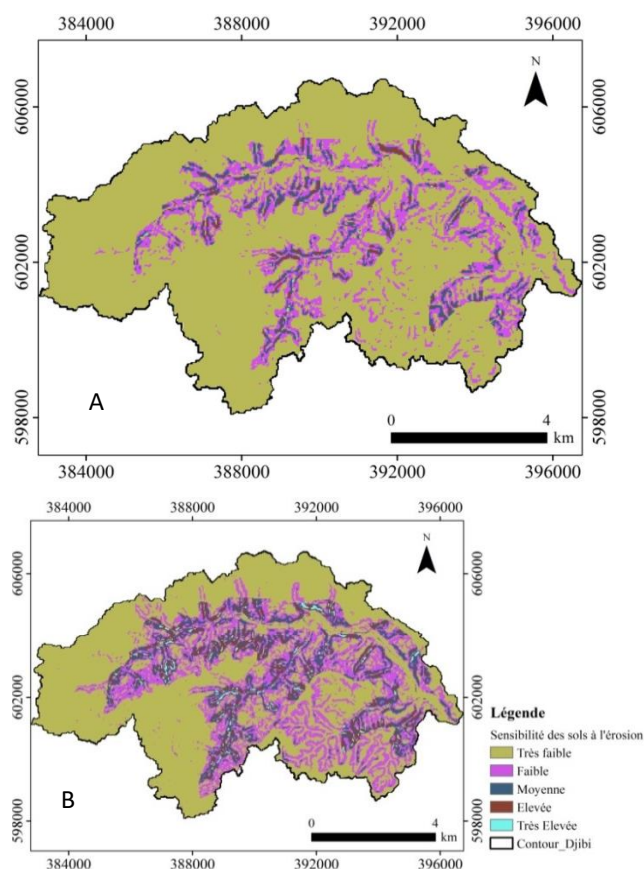


Fig. 16 : Sensibilité des surfaces des bassins versant à l'érosion sur la Djibi (A) : 2016 et (B) : 2017

L'analyse du tabl. 16 montre une évolution des pertes moyennes annuelles de sol au cours de 2016 à 2017 sur la Bété comme à la Djibi. Ces pertes ont occasionné des totaux annuels importants pendant l'année 2016 de 98 280 t/an à la Bété et 49 871 t/an à la Djibi. En 2017. L'érosion qu'a subie les bassins a arraché à la Bété des quantités considérables des terres 124 362 t/an et seulement 68 045 t/an à la Djibi.

Tabl. 16 : Evaluation des pertes de sol de la zone d'étude

Station s	Ann ées	Ai re (ha)	Pertes spécifiques moyenn es de sol (tha/an)	Pertes totales annuelles de sol (t/an)
Bété	2016	18900	5,2	98280
	2017		6,58	124362
Djibi	2016	7044	7,08	49871,5
	2017		9,66	68045

2.1.2. Discussion

Des cartes des pertes de sol, il ressort des observations faites que les zones où l'érosion est peu dominante (très faible à moyenne), sont très répandues, couvrent de

grande surface, soit environ 85,55 % en 2016 et de 98,68 % en 2017 de la superficie totale du bassin versant de la Bété et la Djibi, elle représente 98,79 % en 2016 et de 94,15 % en 2017. Elles sont caractérisées par une certaine stabilité qui peut être expliquée par la présence d'une végétation abondante [1] surtout à la Bété et des pentes faibles. Cependant, les zones fortement vulnérables occupent une infime partie du bassin sur la Bété soit environ 12,56 % en 2016 et chute brusquement à 1,31 % en 2017. La chute du risque de l'érosion dans le bassin versant pourrait s'expliquer par la reprise de la couverture végétation qui est le moyen le plus efficace de lutte contre l'érosion [30]. En outre, à la Djibi on observe une faible hausse de la vulnérabilité de 1,16 % en 2016. Elles sont caractérisées par des fortes pentes, de l'occupation anarchique du sol, caractérisé par une urbanisation galopante [8], un surpâturage entraînant la destruction de la végétation, une transhumance des bétails et d'une végétation très faible [31]. Aussi, cette dégradation expose le bassin de la Djibi à un très fort ruissellement et une très faible infiltration [32]. Le sol déplacé par érosion transporte des nutriments, des pesticides et autres produits chimiques nocifs vers les rivières et le plan d'eau lagunaire. Le dépôt dans les systèmes d'eau contribue à la pollution et l'envasement causant ainsi, la réduction drastique des volumes des réserves d'eau superficielle [33]. L'érosion des sols peut également entraîner des glissements de terrain, des coulées de boues dont les dégâts matériels et financiers des pertes en vie humaine [17]. La carte d'érosion fournit des informations synthétiques et systématiques sur la nature, l'intensité et la répartition spatiale de l'érosion. En effet, la mesure des risques d'érosion apporte les données tant quantitatives et que qualitatives, qui sont indispensables à la gestion intégrée [34]. L'évaluation a donné des pertes moyennes de 5,2 t/ha/an en 2016 et 6,58 t/ha/an en 2017 à la Bété et de 7,08 t/ha/an en 2016 et 9,66 t/ha/an en 2017 à la Djibi. Ces valeurs sont comprises entre le seuil de tolérance qui est de (1 à 12 t/ha/an) fixé par [28]. Les sols nus sont les plus exposés. L'érosion passe de 0,11 t/ha/an en zone forestière à 138 t/ha/an sur un sol nu et le ruissellement de 21 mm/an à 630 mm/an. L'érosion la plus importante est due aux averses de forte intensité et de faible étendue, aux pluies continuelles de longue durée de moindre intensité et d'extension régionale, et aux périodes de réchauffement brusque accompagnées de précipitations [35]. Cependant, Le sol provenant de l'érosion hydrique est déposé dans les dépressions, les zones de basses altitudes (cours d'eau ou retenue d'eau)

3. Conclusion

L'équation universelle des pertes en terre (USLE) combinée aux techniques de SIG et les données provenant de la télédétection ont été utilisées avec succès pour déterminer les facteurs d'érosion des sols, y compris l'érosivité des pluies (R), l'érodibilité des sols (K),



l'occupation de sol (c), longueur et inclinaison de la pente (LS) et les pratiques antiérosives (P). La carte d'érosion des sols fournit de nombreuses informations concernant le potentiel de production de sédiments par l'érosion des versants et la localisation des zones susceptibles d'être érodée. Les valeurs du taux de l'érosion potentielle (t/ha/an) obtenues à l'échelle du bassin ont ensuite été regroupées suivant cinq classes que sont les risques très faibles, faibles, moyens, élevés, et très élevés, L'évaluation a donné des pertes moyennes de 5,2 t/ha/an en 2016 et 6,58 t/ha/an en 2017 à la Bété et de 7,08 t/ha/an en 2016 et 9,66 t/ha/an en 2017 à la Djibi, Bien que la taille des bassins semble influencer ces valeurs, le bassin de à la Djibi est relativement le plus touché par ce phénomène, alors qu'il n'est pas le plus grand bassin, Par ailleurs, les pertes de terre annuelle sont énormes 98280 t/an et 124362 t/an à la Bété et de 49871,52 t/an et 68045,04 t/an à la Djibi de 2016 à 2017. De ces observations, il en ressort que l'érosion hydrique est présente et visible dans les sous bassins versants de la Bété et la Djibi, mais plus prononcée sur les versants et réduite dans les plaines, les plateaux et les vallées, La comparaison des valeurs de dégradation spécifique révèle une très forte disparité spatiale du taux d'érosion des sols. Cette disparité résulte principalement de la lithologie, du couvert végétal, de la pente et de la taille des bassins versants.

Remerciement

Nos remerciements vont à l'endroit du « Contrat de Développement et Développement » (C2D) entre la France et la Côte d'Ivoire qui a financé les activités de recherche du projet "lagune AGHIEN" à travers le PReSeD-CI1 (Partenariat rénové pour la recherche au service du développement de la Côte d'Ivoire Phase 1). Ce partenariat a été une très bonne collaboration entre les chercheurs de l'Université Nangui Abrogoua (UNA), en particulier ceux du Laboratoire de géosciences et environnement (LGE) et les chercheurs de l'Institut français de Recherche pour le Développement (IRD) en Côte d'Ivoire.

Références bibliographiques

- [1] S. G. Eblin, A. B. Yao, K. A. Anoh et N. Soro, "Cartographie de la vulnérabilité multifactorielle aux risques d'érosion hydrique des sols de la région d'Adiaké, Sud-Est côtier de la Côte d'Ivoire". *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 197 – 216pp, (2017).
- [2] G. É. Aké, B. H. Kouadio, M. G. Adja, J. B. Ettien, K. R. Effébi 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, 42p, 2012).
- [3] A. Ouallali, M. Moukhchane, HAassoumi, F. Berrad, et I. Dakir, "The mapping of the soils' degradation state by adaptation the PAP/RAC guidelines in the watershed of Wadi Arbaa Ayacha, Western Rif, Morocco". *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 4(07), 77p, 2016.
- [4] W. Remini, et B. Remini, "La sédimentation dans les barrages de l'Afrique du nord". *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-978*, N°2, 45-54pp, 2003.
- [5] N. Coulibaly, "Conception d'un outil d'aide à la décision pour la gestion intégrée des ressources en eau dans la région du Denguélé (Côte d'Ivoire)". Thèse de Doctorat. Université Nangui Abrogoua. Abidjan. Côte d'Ivoire. 155p, 2009.
- [6] N'D. H. Mélédeje, "Modélisation de la dynamique hydrologique et du flux des sédiments dans le lac du barrage hydroélectrique d'Ayamé 1". Thèse de Doctorat. Université Nangui Abrogoua. Abidjan. Côte d'Ivoire. 194p. 2016.
- [7] B. E. N'Dri, Y. A. N'Go, H. N. Kadio, A. Ouattara, B. Touré et J. Biémi, "Effect of soil slope and cover on runoff and rate soil loss from experimental plots in area of Attécoubé". *European Journal of Scientific Research*, Vol. 21, N° 3, 459 – 470pp, 2008.
- [8] S. Diallo, D. E. Noufé, Z. A. TRA Bi, D. L. Goné, E. S. Koffi & K. J. T. Koffi, "Effets De La Dynamique Du Couvert Végétal Sur Les Écoulements Dans Le Bassin Versant De La Lagune Aghien En Côte d'Ivoire". *European Scientific Journal* édition Vol.14, 312-332pp, 2018.
- [9] N. Soro, T. Lasm, B. H. Kouadio., G. Soro et K. E. Ahoussi, "Variabilité du régime pluviométrique du Sud de la Côte d'Ivoire et son impact sur l'alimentation de la nappe d'Abidjan". *Sud Sciences et Technologies*. N° 14, 30-40pp, 2004.
- [10] Avenard, J. M., Eldin, M., Girard, G., Sircoulon, J., Touchebeuf Pguillaum, J. L., Adjanohoun, E. et Perraud, A., "Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire : Aspect de la géomorphologie, le climat, aperçu sur les régimes hydrologiques, la végétation, les sols". *Mémoires ORSTOM*, N° 50, ORSTOM, PARIS391 p, 1971.
- [11] Delor, C., Diaby, I., Yao, B., Siméon, Y., Tastet, J-P., Vidal Mchiron, J-C. et. Dommangnet, A., "Notice explicative de la carte géologique de la Côte d'Ivoire à 1/200.000, feuille Grand Bassam", *Mémoire de la Direction de la géologie (Abidjan/Côte d'Ivoire)*, N°4, 30 p, 1992.
- [12] E. Roose, M. Chéroux, F. X. Humbel, et A. Perraud, Les sols du bassin sédimentaire de Côte d'Ivoire. *Cahiers ORSTOM, série pédologie*, 4, 51-92pp, 1966.
- [13] E. H. Driss et A. Brahim, "Quantification De L'érosion Hydrique En Utilisant Le Modèle Rusle Et Déposition



- Intégrée Dans Un Sig, Cas Du Bassin Versant De L'oued Isly (Maroc Oriental)". *European Scientific Journal*, 14 (5), 1857 - 7881pp, 2018.
- [14] H. M. J. Arnoldus, "An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation". An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation., 127-132pp, 1980.
- [15] K. M. Darwish, W. A. M. Abdel KAWY et R. Zölitz, "Estimating the Rainfall Erosivity for Management Planning in the Eastern Desert. Egypt". *Geocarto International*. 25p, 2016.
- [16] K. Maamar-Kouadri, L. Kouri et Y. Chebouti, Utilisation de l'Indice d'Arnoldus pour cartographier les risques d'érosivité des pluies dans le Tell oranais (Algérie). *Geo-Eco-Trop.*, 40(4), 287-296pp, 2016.
- [17] L. Khali Issa, K. Ben Hamman Lech-Hab, A. Raissouni, et A. El Arrim, "Cartographie quantitative du risque d'érosion des sols par approche SIG/USLE au niveau du bassin versant Kalaya (Maroc Nord Occidental)". *J. Mater. Environ. Sci*, 7, 2778-2795pp, 2016.
- [18] R. P. Stone, et D. Hilborn, Universal Soil Loss Equation (USLE), Agricultural and Rural Ministry of Agriculture. Food and Rural Affairs, Ontario, Canada. 2000.
- [19] I. Z. Gitas, K. Douros, C. Minakou, G. N. Silleos et C. G. Karydas, "Multi-temporal soil erosion risk assessment in N. Chalkidiki using a modified USLE raster model". *EARSeL eProceedings* 8, 40-52pp, 2009.
- [20] [20] P. Zhou, O. Luukkanen, T. Tokola, et J. Nieminen, Effect of vegetation cover on soil erosion in a mountainous watershed. *Catena*, 75(3), 319-325pp, 2008.
- [21] M. Kouli, P. Soupios, et F. Vallianatos, Soil erosion prediction using the revised universal soil loss equation (RUSLE) in a GIS framework, Chania, Northwestern Crete, Greece. *Environmental Geology*, 57(3), 483-497pp, 2009.
- [22] A. Markhi, N. E. aftouhi, A. Soulaïmani & F. Fnigui, "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*, 11(29). (2015).
- [23] A. Zouagui, M. Sabir, M. Naimi, M. Chikhaoui, et M. Benmansour, Modelisation du risque d'érosion hydrique par l'équation universelle des pertes en terre dans le Rif occidental: cas du bassin versant de Moulay Bouchta (Maroc). *European Scientific Journal*, 14(3), 524-544pp, 2018.
- [24] M. Meliho, A. Khattabi, N. Mhammdi, et Z. Hongming, "Cartographie Des Risques De L'érosion Hydrique Par L'équation Universelle Révisée Des Pertes En Sols, La Télédétection Et Les SIG Dans Le Bassin Versant De L'Ourika (Haut Atlas, Maroc)". *Eur Sci J*, 12(32), 227-297pp, 2016.
- [25] A. El Garouani, H. Chen, L. Lewis, A. Tribak, et M. Abharour, "Cartographie de l'utilisation du sol et de l'érosion nette à partir d'images satellitaires et du SIG Idrisi au nord-est du Maroc". *Télédétection*, 8(3), 193-201pp, 2008.
- [26] Shin, G. J. The analysis of soil erosion analysis in watershed using GIS. Department of Civil Engineering, Gang-won National University, Gangwon-do, South Korea, Ph. D. dissertation. 345p, (1999).
- [27] V. H. Wischmeier et D. D. Smith, "Predicting rainfall erosion losses- a guide to conservation planning". United States Department of Agriculture. Washington. *Agriculture Handbook* No. 282. 1978.
- [28] P. J. J. Desmet & G. Govers, "A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units". *Journal of soil and water conservation*, 51(5), 427-433pp, 1996.
- [29] G. R. Foster., L. D. Meyer and. C. A. Onstad, "A runoff erosivity factor and variable slope length exponents for soil loss estimates". *Trans. Am. Soc. Agric. Engrs*. 20(4):683-688pp, 1977.
- [30] S. Benkaci, D. Abir, A. Oumellal et B. Remini, "Modélisation de l'érosion du bassin haut et moyen Chelif par l'application Model builder sur ArcGis". *J Mater Eng Struct*, 5, 81-93pp, 2018.
- [31] C. PAUTROT, "Érosion et dégradation des sols", Mémoires de l'Académie Nationale de Metz, 203 – 221pp, 2012.
- [32] W. E. 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. France : Université de Bourgogne, 285p, 2007.
- [33] K. J. P Koffi, Y. A. N'Go, K. M. Yéo, D. Koné & I. Savané, "Détermination des périmètres de protection de la lagune Aghien par le calcul du temps de transfert de l'eau jusqu' à la lagune". *Larhyss Journal* 2 19. 19–35 pp, (2014)
- [34] E. H. MOKHTARI, "Impact de l'érosion hydrique sur l'envasement du barrage Ghrib". Thèse de Doctorat. Université Hassiba Benbouali de Chlef, 227p, 2017.
- [35] L. STARKEL, "The role of extreme (catastrophic) meteorological events in contemporary evolution of slopes". *Geomorphology and climate*, 203-246pp, 1976.