

Estimation de l'Erosion Potentielle dans le Bassin Versant de la Rivière N'djili (Kinshasa) par Intégration de l'Equation de Wischmeier au Système d'Information Géographique et de la Télédétection.

MUKANU KASIALA Arsène* et MITI TSETA Felicien

Paper History

Received : December 02, 2020

Revised : February 15, 2021

Accepted : February 25, 2021

Published : March 27, 2021

Keywords

Remote Sensing, potential erosion, universal equation, erodibility, erosivity.

ABSTRACT

Estimation of the Potential Erosion in the N'djili River (Kinshasa) Watershed by Integration of the Wischmeier Equation in the Geographic Information System and Remote Sensing.

This study was conducted in the watershed of N'djili river, in order to identify and quantify the risks of water erosion for a sustainable land management. Specifically, it's important to rate the major factors and potential erosion using the Universal Soil Loss Equation (USLE), coupled with GIS and remote sensing on this watershed.

The calculated results indicate the order of magnitude of parameters which generate the rain erosivity varying from 124 to 151 MJ.mm/ha/h/year while soil erodibility rises to 0.2. In some parts of the land, topographic factor reach the value of 30.89. Following cultural practices in bands, the cropping factor can reach the maximum value of 1 unit while conservative factor ranges from 0.25 to 0.45.

As far as the potential erosion is concerned, calculated soil loss spread from 2 to about 180t/ha/year. Data analysis show that over 99 % of the watershed surface is near the threshold of soil loss in the intertropical region estimated as 20 t/ha/ year. However, it appears that 1 % of the watershed area is gullied on uncovered surface or on urbanization area. It is certain that through this study, some control methods could be considered in order to assume soil conservation.

Laboratoire de Géomorphologie, Télédétection et SIG, Département des Géosciences, Faculté des Sciences, Université de Kinshasa, B/P. 190, Kinshasa XI., R.D. Congo.

*Corresponding author, e-mail: mkarsene@gmail.com

INTRODUCTION

Cette étude est réalisée sur le bassin versant de la rivière N'djili (Kinshasa) en vue d'évaluer les facteurs et de quantifier l'érosion potentielle au moyen de l'équation de **WISCHMEIER ET SMITH [1978]**, couplée au Système d'Information Géographique (SIG) et à la Télédétection, avec le logiciel ArcGIS 10.3.1 comme principal outil de modélisation et de cartographie de la distribution des zones à risques d'érosion.

L'équation universelle de pertes de sol permet d'évaluer les pertes moyennes de sol par l'érosion superficielle. Elle ne tient pas compte du ravinement et des pertes de sol hors des champs.

Cependant, elle est utilisée pour la prédiction de l'érosion potentielle dans le but de prévention antiérosive avant la mise en valeur des zones à risques. C'est-à-dire que l'application de ce modèle sur le bassin de la N'djili ne manquera pas de poser de problèmes en raison notamment de la carence de données pluviométriques et pédologiques spécifiques, de l'absence de mesures *in situ* sur l'érosion réelle et, du fait que le ravinement constitue la principale forme d'érosion la plus grave sur ce bassin. Toutefois, grâce à l'apport du SIG et de la Télédétection, les principaux paramètres physiques du terrain seront estimés pour être incorporés dans le modèle en vue de la détermination de l'érosion potentielle [**WISCHMEIER et al., 1958**].

MATERIEL ET METHODES

Description du Bassin Versant de la rivière N'djili

La rivière N'djili est l'un des plus importants affluents du fleuve Congo coulant sur l'aire de la ville de Kinshasa. Longue de 30 km, elle prend naissance dans le Kongo Central et traverse la ville de Kinshasa où elle se jette dans le fleuve Congo. Son bassin versant a une superficie d'environ 2.217 km² (Figure 1) et s'étend

entre la longitude 15°9' et 15°39' Est et la latitude 4°22' et 4°59' Sud.

Le bassin versant de la N'djili jouit du climat de Kinshasa. Du type Aw₄, le climat de Kinshasa est chaud et humide à deux saisons : une saison des pluies de septembre à mai et une saison sèche de mai à septembre soit au total près de 117 jours, environ 4 mois (Figure 2).

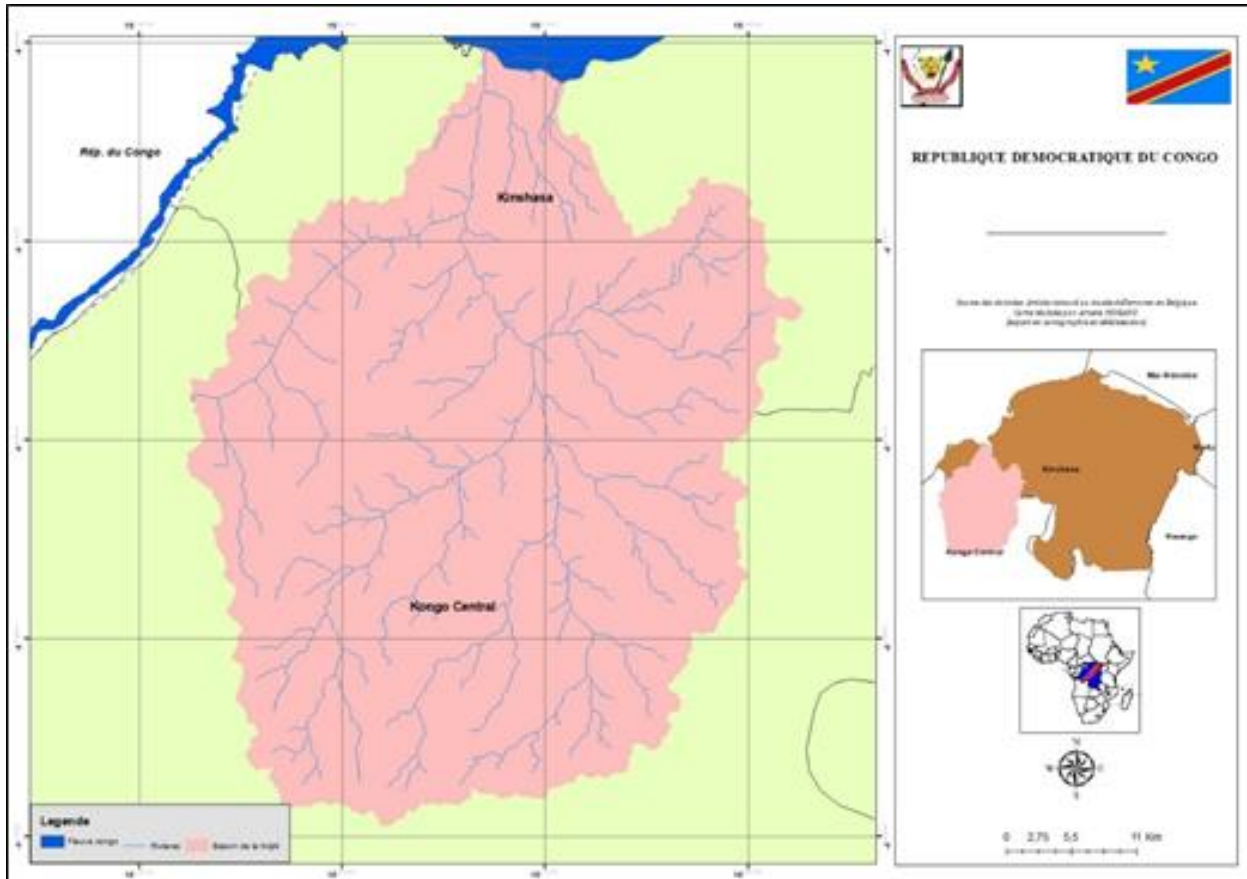


Figure 1. Bassin hydrographique de la rivière N'djili.

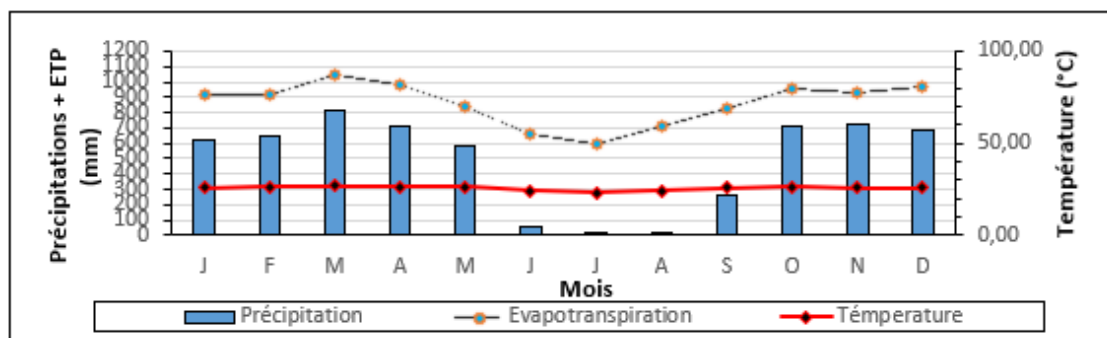


Figure 2. Éléments du climat relevés à la station de Kinshasa/N'djili sur 15 ans (1999 à 2013).

Matériel

Images satellitaires

L'analyse des paramètres physiques et géo-spatiaux du bassin versant et la génération des données géo-localisées induites via le SIG et la Télédétection nécessitent l'utilisation des

images satellitaires. Dans le cadre de ce travail les images utilisées sont :

- SRTM 2012, image à 30 m de résolution, elle a été utilisée pour générer le MNT du bassin versant de la rivière N'djili;

- Landsat 2014, de 30 m de résolution, elle a servi à la classification du sol et a été utilisée pour générer les facteurs intervenant dans la résolution de l'équation universelle de perte de sols.

Logiciels

Le traitement et l'analyse des images ont été effectués au moyen des logiciels ci-dessous :

- Le logiciel ArcGIS 10.3 a été utilisé pour numériser le réseau hydrographique et évaluer les pertes de sol à travers certaines extensions comme le « 3D analyst », le « spatial analyst » et « Arc Hydro ».
- Le logiciel Envi 5.0 a permis de faire la classification par segmentation, sur la base de laquelle l'occupation du sol a été déterminée.

Méthodes

Plusieurs approches sont généralement utilisées pour la quantification et la cartographie de l'érosion potentielle. En ce qui concerne la présente étude, la démarche suivante a été suivie :

- **Mesure directe** des dimensions du phénomène d'érosion et relevé des coordonnées avec des

instruments et dispositifs appropriés *in situ* (ruban décimètre, gps ...);

Estimation indirecte de perte de sols par la modélisation (Équation Universelle de Perte de terres ou USLE). L'USLE est développée à partir des données sur l'érosion, accumulées depuis les années 1930, par des chercheurs américains dont les principaux contributeurs sont WISCHMEIER ET SMITH [1965, 1978]. Elle s'exprime sous la forme suivante : $A = R.K. LS.C. P$ (1) avec A = perte annuelle de sol, R = indice d'érosivité potentielle de la pluie, K = indice d'érodibilité du sol, LS = facteur topographique du terrain en fonction de l'inclinaison de la pente et sa longueur, C = facteur de pratiques culturales, P = facteur de conservation et d'aménagement du sol. Cette équation a connu des applications diverses dans plusieurs régions du monde [MAKOKO ET MANANGA, 1986 ; KNAPEN *et al.*, 2007]. Comme ailleurs, elle permet, en dépit de carence des mesures *in situ*, d'estimer l'érosion potentielle à partir de données physiques générées par le SIG et la Télédétection.

Intégration de l'USLE dans le SIG. La Figure 3 montre les procédures d'intégration de l'équation de Wischmeier dans le Système d'Information Géographique.

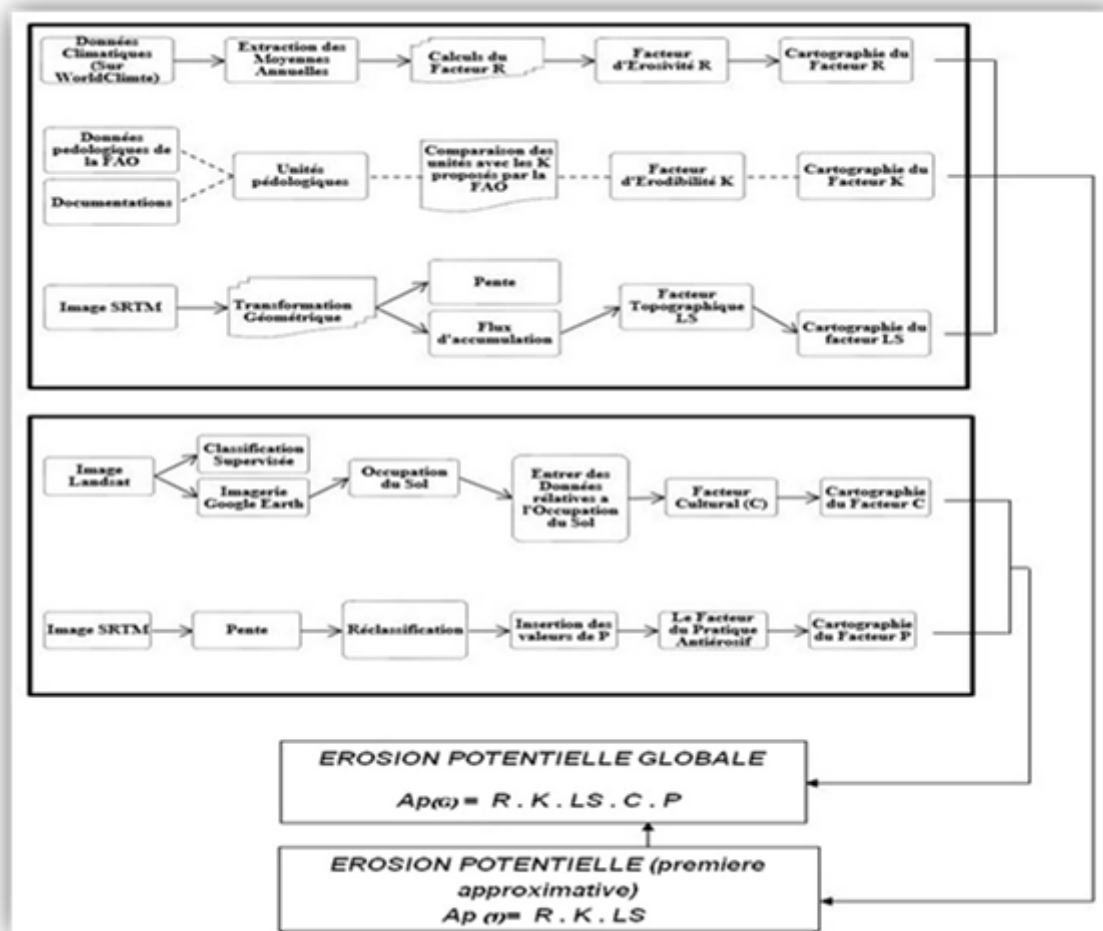


Figure 3. Schéma de BONN *et al.*, [1994], modifié pour l'intégration des paramètres de l'USLE dans un SIG

RESULTATS

Estimation des paramètres de l'érosion selon l'USLE

Détermination de la valeur de l'agressivité des pluies (R)

Le facteur R est la capacité potentielle de la pluie à produire l'érosion pluviale. Il a été calculé avec l'équation (2), proposée par RENARD *et al.* [1991] en fonction des précipitations annuelles ou l'indice Fournier [KALMAN, 1970 ; ROOSE, 1977], en utilisant les moyennes mensuelles des précipitations compilées telles que :

$$R = 0,0483 * P^{1,610} \quad (2)$$

Dans laquelle R = agressivité ou érosivité des pluies, P = Moyenne des précipitations annuelles en millimètres [MORSCHER ET FOX, 2004 ; SADIKI *et al.*, 2001 ; EL GAROUANI *et al.*, 2008]. En remplaçant P par les moyennes des pluies enregistrées sur le site, on obtient les valeurs moyennes de R.

Les valeurs d'érosivité (R) obtenues ont permis d'élaborer la carte d'érosivité (Figure 4). L'érosivité varie de 124 à 151 MJ. mm/ha.h.an sur le bassin versant. La carte visualise les différentes zones d'érosivité.

Estimation de l'érodibilité du sol (K)

Le facteur érodibilité des sols exprime la vulnérabilité d'un sol à être érodé par la pluie. La vulnérabilité d'un sol dépend de sa structure, de sa texture, de sa teneur en matière organique et de sa perméabilité [BROWN, 2003 ; ROOSE ET SARRAILH, 1990].

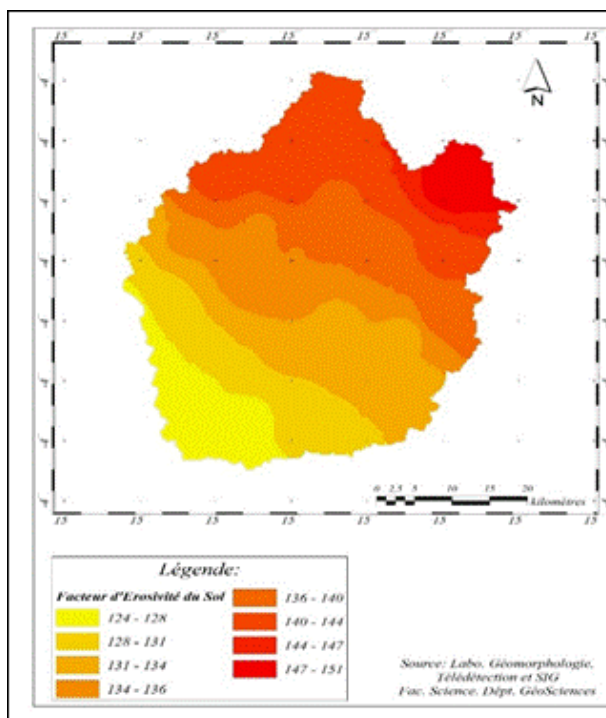


Figure 4. Répartition de l'érosivité des pluies sur le bassin versant de la N'djili

Le facteur K permet de caractériser la résistance spécifique d'un sol en fonction de ses propriétés physico-chimiques.

D'après WISCHMEIER ET SMITH [1978], l'érodibilité des sols se calcule par la formule suivante :

$$K = 2,1 M^{1,4} * 10^{-4} (12 - a) + 3,25 (b - 2) + 2,5 (c - 3) \quad (3)$$

Dans laquelle K= facteur d'érodibilité, a = pourcentage de matière organique, b = indice de structure du sol, c = perméabilité du sol, M = (% sable fin + limon) x (100 - %argile) [WISCHMEIER *et al.*, 1971].

Les données obtenues sur la base de cette équation ont permis l'élaboration de la carte d'érodibilité (Figure 5). Les valeurs estimées de K sont inférieures à 0,2. La carte (Figure 5) en montre la répartition à travers la superficie du bassin.

Les valeurs de R les plus élevées, soit de 136 à 151 MJ. mm/ha.h.an, sont localisées dans la partie du bassin en couleur rouge (Fig.5). Globalement l'érosivité diminue en remontant de cette zone vers le relief le plus élevé du bassin versant. Il y a lieu de voir dans cette variation l'impact de l'effet de Foehn bien connu des climatologues par lequel les pluies diminuent en s'élevant sur le relief à cause de la perte d'humidité.

Calcul du Facteur Topographique (LS)

La topographie est une donnée capitale dans l'occurrence de l'érosion pluviale en ce qu'elle influence la vitesse de l'écoulement des eaux pluviales sur la pente [ROOSE, 1994]. Le facteur topographique dérive du relief du terrain construit à partir de l'image SRTM. Du relief, on extrait les pentes dont la combinaison entre l'inclinaison et la longueur génère le facteur topographique.

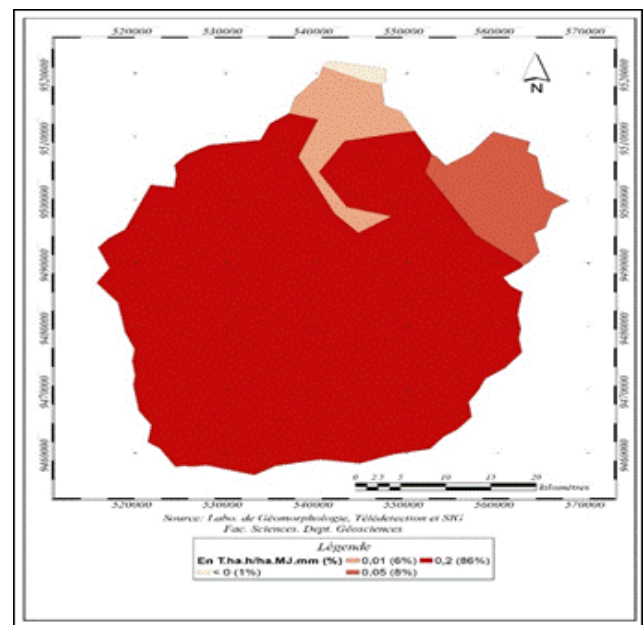


Figure 5. Indice d'érodibilité du sol

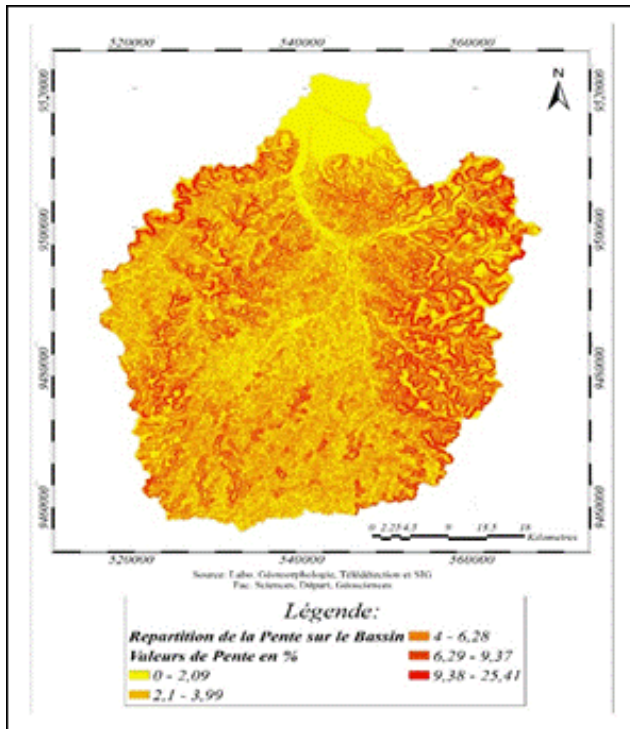


Figure 6. Configuration des pentes du bassin versant de la N'djili

Le facteur topographique est donc composé de deux éléments de la pente : la longueur (L) et l'inclinaison (S). Il est calculé par la formule de WISCHMEIER ET SMITH [1978] :

$$LS = (\lambda/22.1)^m * (65.41 \sin^2 \theta + 4.56 \sin \theta + 0.065) \quad (5)$$

tels que LS = le facteur topographique, λ = la longueur de la pente exprimée en mètre, θ = l'angle de la pente (%), m = un exposant qui dépend du degré de la pente. La valeur de l'exposant m est définie en fonction de la pente θ de sorte que m = 0,5 si $\theta \geq 5$ % ; m = 0,4 si $3,5 \leq \theta < 5$ % ; m = 0,3 si $1 \leq \theta < 3,5$ % ; m = 0,2 si $\theta < 1$ %.

Le critère de pente est utilisé pour mettre en évidence la capacité d'un ruissellement à détacher et transporter des particules de sol. Plus la valeur de la pente est élevée, plus le ruissellement est rapide et plus il développe une énergie érosive importante et donc plus il érode le sol.

La Figure 6 donne la configuration des pentes du bassin versant de la N'djili qui influence les processus de l'érosion. En rouge, les 2 zones de plus fortes pentes.

Les valeurs du facteur LS vont jusqu'à 30,89 allant des zones à faible potentiel érosif aux zones à fort potentiel érosif.

L'estimation du Facteur Cultural (C)

Le Facteur cultural « C » est souvent estimé de manière empirique. Dans notre cas, C a été déterminé en fonction de l'occupation du terrain par des éléments naturels ou anthropiques. Selon la littérature, les valeurs de C sont définies en fonction de l'occupation du sol (Tableau 1).

Tableau 1. Valeurs du facteur C en fonction de l'occupation du sol.

Classe d'occupation du sol	Valeur de C
Eaux / Zones marécageuses	0
Végétation	0,001
Sols Nus	1
Végétation Dégradée	0,7
Zones Urbaines	0,2

ROOSE [1994], WISCHMEIER [1960]

L'analyse de l'occupation du sol du bassin versant de la N'djili sur la base du Tableau 1 fait ressortir les zones suivantes reportées sur la Figure 7 :

- Les eaux superficielles en bleu;
- Les zones marécageuses, localisées plus aux abords des cours d'eaux en gris;
- Des zones couvertes par la forêt en vert foncé;
- Les zones de mosaïque « forêt-savane » dégradé en vert clair;
- Les sols dénudés en chocolat et
- Les zones d'occupations urbaines en jaune.

A l'aide de l'outil « Raster to Polygone » d'ArcGIS, les données sur l'occupation de sol ont permis d'obtenir la carte de la Figure 7. La rastérisation de cette carte a servi à la transformation des données en valeurs de l'indice cultural C (Figure 8).

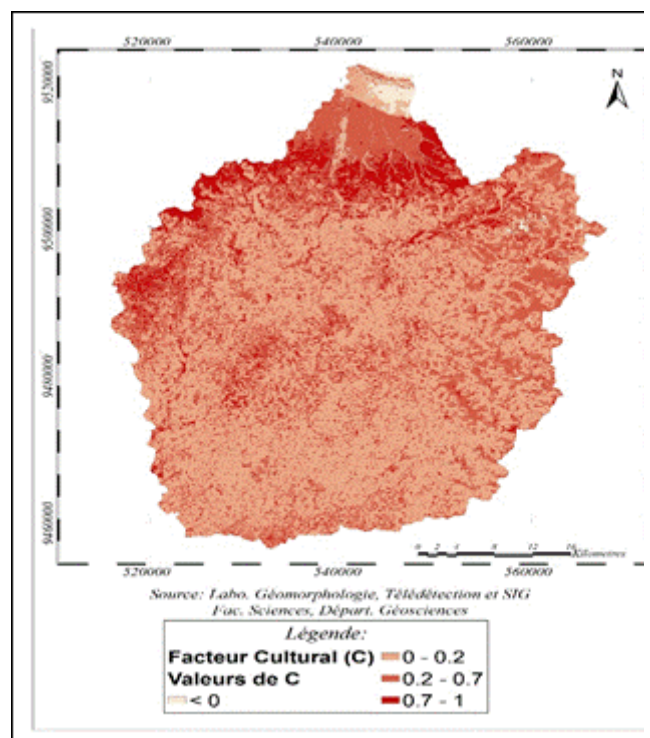


Figure 7. La carte d'occupation du Sol du bassin versant de la N'djili (2015)

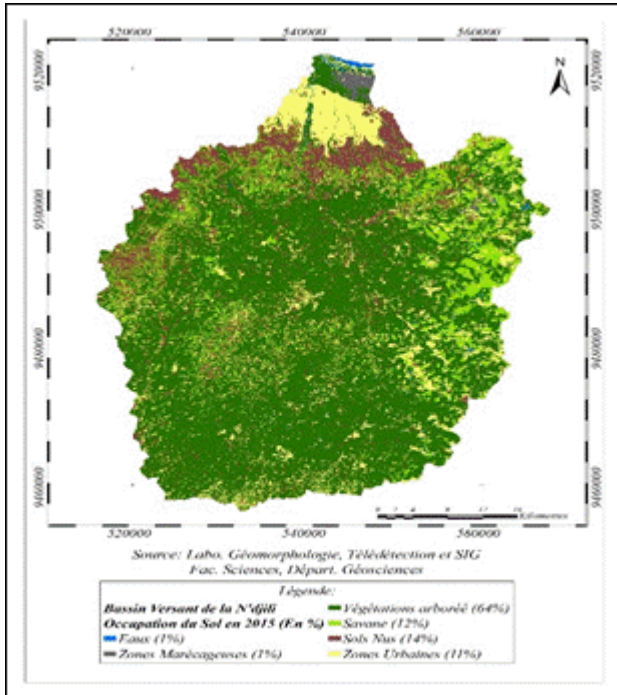


Figure 8. Répartition du facteur Cultural (C) du Bassin Versant

L'indice cultural détermine 3 domaines :

- Les zones fortement végétalisées sont associées aux valeurs d'érosion les plus faibles (< 0,2). Ce sont là les zones les mieux protégées contre l'érosion.
- Les zones comprises entre 0,2 et 0,7 sont des zones à potentiel érosif modéré, correspondant aux zones de diverses activités humaines.

Les coefficients les plus élevés c'est-à-dire les zones entre 0,7 et 1 sont des zones à fort potentiel érosif correspondant à la partie urbaine à surfaces fortement dénudées SCHWAB et al. [1966].

Le calcul du Facteur d'Aménagement Antiérosif (P)

Le Bassin versant de la N'djili connaît une certaine mise en valeur. Des aménagements agricoles et urbains y sont mis en œuvre. L'occupation du sol nécessite des techniques de préservation et de protection contre les dégradations de l'environnement. Si ces techniques ne sont pas mises en œuvre, l'érosion survient comme conséquence à la suite des écoulements pluviaux. Le facteur antiérosif (P) est déterminé à partir des données sur les aménagements existants (Tableau 2). Le facteur P varie en fonction du type d'aménagement effectué sur les versants.

Une fois les pentes ré-classifiées (Figure 9), elles ont été converties en fichier en forme des « polygones » pour l'insertion des valeurs de P dans le SIG. Les valeurs de P trouvées sont ensuite reconverties en fichier de forme « raster » par l'outil d'analyse spatial « Feature to Raster ». Le résultat de cette transformation donne une carte suggérant des aménagements

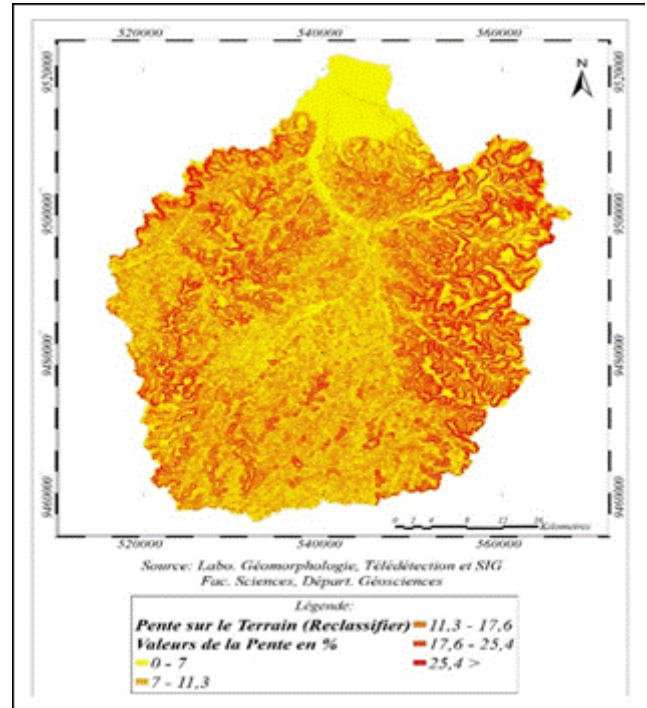


Figure 9. Carte de pentes ré-classifiées en 5 classes

antiérosifs adéquats (Figure 10) à implanter sur le bassin versant en vue de sa préservation.

L'estimation de l'érosion potentielle

En remplaçant les facteurs de l'USLE (A = R. K. LS. C. P) par les valeurs estimées, on obtient l'estimation de l'érosion potentielle. L'intégration des valeurs de différents paramètres dans le SIG aboutit à une carte d'érosion potentielle (Figure 11).

L'érosion est tout naturellement variable en fonction des paramètres physiques du terrain notamment la pente, le couvert végétal et l'occupation du sol. Les valeurs de l'érosion potentielle obtenue s'élèvent au maximum à 500 t/ha/an. Une estimation quasi normale en zone tropicale humide. En effet, des valeurs comparables ont été rapportées ailleurs en conditions semblables aux nôtres par WISCHMEIER Et SMITH [1978], SHIN [1999].

Tableau 2. Valeur du facteur P en fonction de la pente et des aménagements

Pentes en %	Facteur P pour l'aménagement en contours	Facteur P pour les Cultures en bandes	Facteur P pour les terrasses
<7,0	0,55	0,27	0,1
7,0-11,3	0,6	0,3	0,12
11,3-17,6	0,8	0,4	0,16
17,6-26,8	0,9	0,45	0,18
>26,8	1	0,5	0,2

Source : SCHWAB et al. [1966]

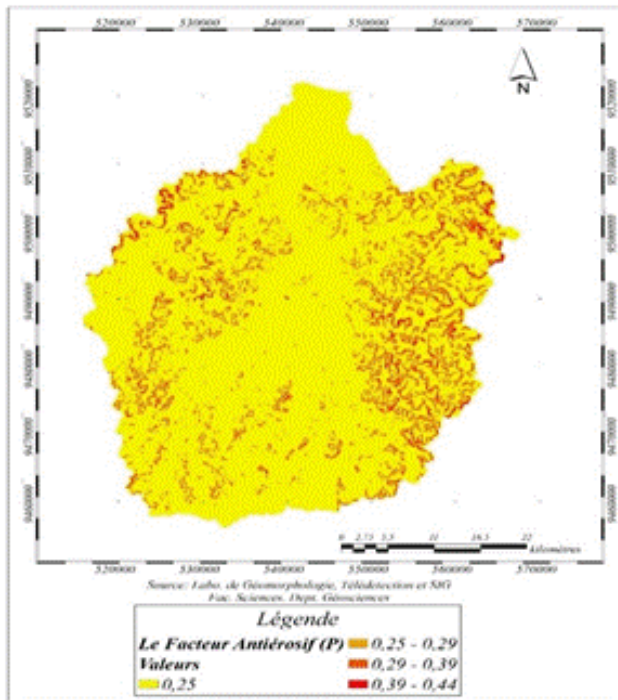


Figure 10. Carte d'aménagement antiérosif du bassin versant de la rivière N'djili.

DISCUSSION

L'érosivité (R)

Les valeurs de R les plus élevées, soit de 136 à 151 MJ. mm/ha.h.an, sont localisées dans la partie basse. Globalement l'érosivité diminue en remontant de cette zone vers le relief le

plus élevé du bassin versant. Il y a lieu de voir dans cette variation l'impact de l'effet de Foehn bien connu des climatologues par lequel les pluies diminuent en s'élevant sur le relief à cause de la perte d'humidité. En effet, les pluies qui s'abattent dans cette partie semblent indiquer une direction nord-est sur la plaine vers sud-ouest dans la zone des collines. La combinaison de cette énergie avec les diverses dégradations du milieu est à l'origine de la forte érosion dans ces zones.

L'indice d'érodibilité (K)

Cet indice est faible sur le bassin versant de la N'djili. Il ne reflète pas la susceptibilité des sols sableux de la région. Cependant, il ne s'agit là que des valeurs provenant de la première estimation basée uniquement sur la texture du sol. Un calcul plus poussé intégrant la texture du sol avec la teneur en matière organique, la structure et la perméabilité du sol, non comprises ici, pourrait donner des valeurs sans doute plus élevées, supérieures à 0,3.

Le facteur topographique (LS)

Les pentes et le facteur topographique déterminent deux zones à partir de la valeur 8 % de pente. En deçà de cette pente, l'érosion est très faible, essentiellement caractérisée par la forme d'érosion diffuse ou en faibles incisions. Par contre, au-delà de 8 % de pente, l'érosion prend la forme de ravins immenses. Dans les détails, on a reconnu, comme FLOURIOT *et al.* [1975] et VAN CAILLIE [1983], des zones de faible érosion sur les pentes inférieures à 8 %, celle de 8 à 12 % comme zone de ruissellement diffus et de rigoles, et la zone de pente supérieure à 12 % comme domaine de forte érosion, essentiellement de l'érosion ravinante.

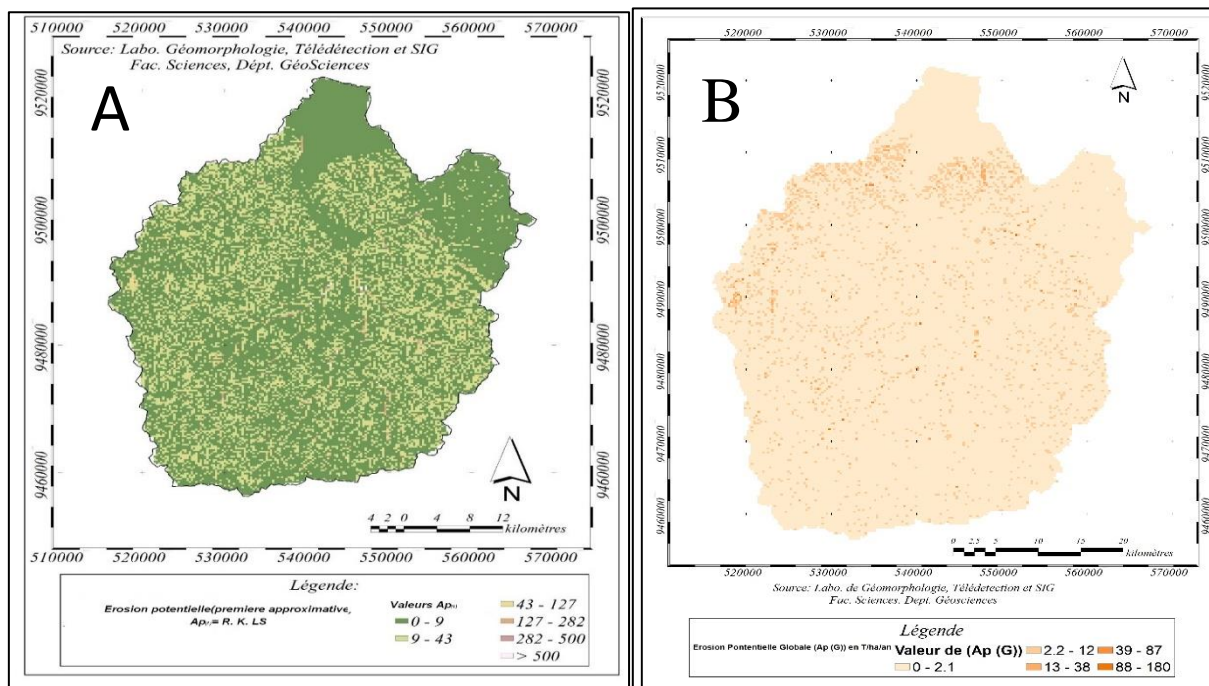


Figure 11. Carte d'érosion potentielle du bassin versant de la rivière N'djili en première approximation (A) et en estimation globale (B).

Le Facteur Cultural (C)

Le bassin comporte des zones d'habitat urbain, des forêts naturelles et des domaines d'exploitation rurale. L'estimation du facteur C n'est pas facile. Faute de réelle mise en valeur agricole, le calcul de ce facteur est basé sur l'occupation de terrain. Les valeurs obtenues définissent, comme ci-dessus, 3 classes correspondant aux 3 zones d'érosion déterminées précédemment.

Le facteur P

Il n'y a pas de dispositifs antiérosifs volontairement implantés dans le bassin versant de la N'djili. Ce facteur ne peut être estimé que de manière indirecte. Toutefois, certaines pratiques agricoles traditionnelles comme les billons ou les cultures à plat sont employées par la population en relation avec la pente du terrain. Ces façons culturales pourraient être considérées comme compatibles avec la conservation du sol. Les zones à forte valeur de P sont celles où des dispositifs antiérosifs sont indispensables. Les données obtenues indiquent que ces zones coïncident avec les espaces à forte sensibilité érosive.

L'érosion potentielle (Ap)

Les facteurs décisifs de l'érosion sur le bassin versant de la rivière N'djili sont la pluviométrie, le facteur cultural et l'occupation du Sol. En superposant les cartes de chacun de ces facteurs, l'érosion potentielle est plus élevée dans la partie urbaine du bassin versant. C'est donc sur ces facteurs que les interventions doivent être focalisées pour lutter contre l'érosion pluviale en nappe.

Placés dans le cadre de la ville de Kinshasa, les taux d'érosion les plus élevés sont localisés dans les communes de Kisenso, Lemba sud, Nsele, Kimbanseke, Mont-Ngafula et le territoire de Kasangulu tandis que les communes de Limete, Matete, N'djili et Masina montrent un taux tolérable d'érosion. Pour pallier à la carence en données scientifiques, il faudra penser à :

- L'installation des stations météorologiques relais afin d'obtenir les valeurs d'érosivité des pluies spécifiques du bassin versant de la rivière N'djili ;
- L'établissement de parcelles expérimentales avec les différentes structures de conservation des sols afin de déterminer plus spécifiquement les valeurs des facteurs P et C pour le bassin versant de la rivière N'djili ;
- L'installation de collecteurs de sédiment afin de comparer l'érosion estimée à partir de l'intégration des paramètres de l'USLE dans un SIG à celle effectivement observée.

Les valeurs des paramètres et de l'érosion obtenues ne sont pas des données absolues. Elles représentent des indications importantes pour la planification de mise en valeur des sols du bassin. Toutefois, il faudra poursuivre la recherche en vue d'obtenir des données plus proches de la réalité en affinant les

méthodes et techniques in situ en ce qui concerne les facteurs R et K du modèle USLE. De même, il incombe aux chercheurs d'implanter sur le terrain des dispositifs expérimentaux susceptibles de produire des données pour la validation des résultats.

CONCLUSION

À la lumière des résultats obtenus on retiendra que :

- Le bassin versant de la rivière N'djili a un haut potentiel érosif de par la forte pluviométrie et la sensibilité érosive des sols. Sur une superficie totale de 2.218 ha, une grande partie du bassin versant dont sa partie urbaine possède un potentiel érosif énorme de plus de 500 t/ha/an.
- Il existe plusieurs systèmes de production permettant de réduire l'érosion hydrique des sols au niveau du bassin versant de la N'djili. Parmi les scénarios d'aménagement envisagés, la mise en place d'un système agroforestier vigoureux est le plus efficient.
- Une grande partie du bassin versant sous couvert végétal connaît un taux d'érosion faible ; néanmoins les aires urbaines sont très ravinees.
- En observant la carte d'érosion potentielle (Figure 11), avec un taux d'érosion potentielle de plus 500 t/ha/an, tout porte à croire que le bassin versant de la rivière N'djili est très érodé si on prend en compte l'érosion par ravinement.

RESUME

Cette étude est réalisée dans le bassin versant de la N'djili, dans le but d'identifier et de quantifier les risques d'érosion hydrique pour une gestion durable des terres. Concrètement, il est question d'évaluer, sur ce bassin versant, la pertinence des facteurs majeurs et l'érosion potentielle, en utilisant l'équation universelle de perte en terres (USLE), couplée au SIG et à la télédétection.

Les résultats donnent les ordres de grandeur des paramètres générateurs de l'érosivité variant de 124 à 151 MJ.mm/ha/h/an tandis que l'érodibilité (K) remonte jusqu'à 0,2. Dans certaines parties du terrain, le facteur topographique peut atteindre la valeur de 30,89. A la suite des pratiques culturales en bandes, le facteur cultural peut atteindre la valeur maximale de 1, par contre le facteur antiérosif oscille entre 0,25 et 0,45. En ce qui concerne l'érosion potentielle, les pertes des terres calculées se situent entre 2 et 180 t/ha/an.

L'analyse des données montre que plus de 99 % de la surface du versant se trouve dans le seuil de tolérance de perte des sols en région intertropicale soit 20 t/ha/an. Cependant, il apparaît que 1 % du bassin versant est raviné dans les parties moins couvertes par la végétation, spécialement dans des zones occupées par l'urbanisation incontrôlée. C'est ainsi qu'au terme

de cette étude, quelques méthodes de lutte antiérosive sont préconisées afin de conserver le sol.

Mots clés


Télédétection, Érosion potentielle, Équation universelle, érodibilité, érosivité.

REMERCIEMENTS

Nous sommes reconnaissants à A. MAKI SAFARI et R. MBO MUNDILA (Finalistes en Géomatique) de l'aide précieuse qu'ils nous ont apportée.

REFERENCES

- BONN F., BYR L.H., CHKROUM H. [1994]. Une modélisation spatiale des pertes de sol liées à l'érosion hydrique. In BONN F., Télédétection de l'environnement dans l'espace francophone, Presse de l'Université de Québec
- BROWN R.G. [2003]. Soil Texture, Soil and Water Science Department, Florida Cooperative Extension service institute of food and Agricultural Sciences, University of Florida, Fact Sheet SL29, p8.
- EL GAROUANI A., CHEN H., LEWIS L., TRIBACK A., OZER M. [2008]. 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, 193-201.
- FLOURIOT J., De MAXIMY R., PAIN M. [1975]. Atlas de Kinshasa, Bureau du Président de la République, IGC, TPAT et BEAU, Kinshasa.
- KALMAN R. [1970]. Ruissellement et érosion en nappe (expérimentation au simulateur de pluie). Annales de la recherche forestière au Maroc, 12, 177-287.
- KNAPEN A., POESEN J., GOVERS G., GYSSELS G., NACHTERGAELLE J. [2007]. Resistance of soils to concentrated flow erosion: a review. *Earth Science Reviews*, 80, 75-109.
- MAKOKO M., MANANGA M. [1986]. Étude préliminaire de l'érosion hydrique dans la ville de Kinshasa, in *Revue zaïroise des sciences nucléaires*. 7, 2, 88-109.
- MORSCHER J., FOX D. [2004]. Une méthode de cartographie du risque érosif : application aux collines du terrefort Lauragais. *Mappemonde*, n°76, 11p.
- RENARD K.G., FOSTER G.R., WEESIES G.A., MCCOOL D.K., YODER D.C. [1991]. Predicting Soil Erosion by Water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). US. Department of Agriculture, Washington. *Agriculture Handbook*.
- ROOSE E., SARRAILH J.-M. [1990]. Erodibilité de quelques sols tropicaux-vingt années de mesure en parcelles d'érosion sous pluies naturelles. *Cah. ORSTOM, Ser. Pédol.*, 15, 1-2, 1989-90.
- ROOSE E. [1977]. Application of the universal soil loss equation of Wischmeier and smith in west Africa. *Soil conservation society of America*, Ankeny, Iowa.
- ROOSE E. [1994]. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bulletin Pédologique* FAO, Rome, N°70.
- SADIKI S., BOUHLASSA J., AUJJAR A., FALEH, MACAIRE J. [2001]. Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'Équation universelle des pertes en sol dans le Rif oriental (Maroc): cas du bassin versant de l'oued Boussouab, *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre*, 26, 69-79.
- SCHWAB G.O., FREVERT K.K., EDMINSTER T.W., BARNES K.K. [1966]. *Soil and water conservation engineering*. John Wiley and Sons, New York.
- SHIN G.J. [1999]. The analysis of Soil erosion analysis in watershed using GIS. Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, Gang-won National University.
- VAN CAILLIE X. [1983]. Hydrologie et érosion dans la région de Kinshasa - Analyse des interactions entre les conditions du milieu, les érosions et le bilan hydrologique, (s.e.), OHAIN, 1983, 49 p.
- WISCHMEIER W.H., SMITH D.D. [1978]. Predicting Rainfall Erosion Losses – a guide to Conservation Planning. *Agriculture Handbook*, n°537 Department of Agriculture Science and Education Administration, Washington, District of Columbia USA, U.S.
- WISCHMEIER W.H., JOHNSON C.B., CROSS B. V. [1971]. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites" *Journal of soil and water conservation*, vol. 26, 189 -193.
- WISCHMEIER W.H., SMITH D.D. [1965]. Predicting rain fall erosion losses from crop land east of the Rocky Mountains. *Agricultural Handbook* No. 282, USDA, Washington.
- WISCHMEIER W.H. [1960]. Cropping-management factor evaluations for universal soils loss equation. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 24:322-326.
- WISCHMEIER W.H., SMITH D.D., UHLAND R.E. [1958]. Evaluation of factors in soil loss equation. *Agr. Eng. ASAE* 39,8, 458-464.

 This work is in open access, licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons license, unless indicated otherwise in the credit line; if the material is not included under the Creative Commons license, users will need to obtain permission from the license holder to reproduce the material. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>