



HAL
open science

GÉOMORPHOLOGIE ET MODÉLISATION STATISTIQUE POUR LA QUANTIFICATION DES PROCESSUS HYDRIQUES : APPROCHE A PARTIR DE L'ÉROSION PAR RAVINEMENT

Seydou Alassane Sow, Djibrirou Daouda Ba

► **To cite this version:**

Seydou Alassane Sow, Djibrirou Daouda Ba. GÉOMORPHOLOGIE ET MODÉLISATION STATISTIQUE POUR LA QUANTIFICATION DES PROCESSUS HYDRIQUES : APPROCHE A PARTIR DE L'ÉROSION PAR RAVINEMENT. Journal de la recherche scientifique de l'Université de Lomé, 2019, 21 (3), pp.53-66. hal-02582384

HAL Id: hal-02582384

<https://hal.science/hal-02582384v1>

Submitted on 14 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ISSN 1727 – 8651

JOURNAL
de la
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
de
L'UNIVERSITÉ DE LOMÉ



LOME - TOGO

Le Journal de la Recherche Scientifique de l'Université de Lomé est
référéncé dans African Journal on Line (AJOL) [www.inasp.org/ajol]

VOLUME 21
(2019)

Numéro 3

Journal de la Recherche Scientifique de l'Université de Lomé (Togo)

COMITE DE LECTURE:

Professeur M. GBEASSOR (Togo)
Professeur K. AHADZI-NONOU (Togo)
Professeur K. TCHAKPELE (Togo)
Professeur B. SINSIN, (Bénin)
Professeur T. T. K. TCHAMIE (Togo)
Professeur K. AKPAGANA (Togo)
Professeur A. K. C. JOHNSON (Togo)
Professeur M. L. BAWA (Togo)
Professeur K.M. NUBUKPO (Togo)
Professeur M. DAVID-PRINCE (Togo)
Professeur K. KOUMAGLO (Togo)
Professeur K. JONDO (Togo)
Professeur K. SANDA (Togo)
Professeur K. KADANGA (Togo)
Professeur K. KOKOU (Togo)
Professeur K. BATAWILA (Togo)
Professeur P. SANKARA (Burkina Faso)
Professeur M.GOEH-AKUE (Togo)
Professeur K. KOSSI-TITRIKOU (Togo)
Professeur M. MOUDACHIROU (Bénin)
Professeur B.TCHAM (Togo)
Professeur K. BEDJA (Togo)
Professeur K. KILI, (Togo)
Professeur G. DJANEYE-BOUNDOU (Togo)
Professeur G. TCHANGBEDJI, (Togo)
Professeur N. BIGOU-LARE (Togo)
Professeur A. SANTOS (Togo)
Professeur M. KPODAR (Togo)
Professeur A. VOVOR (Togo)
Professeur K. AMOUZOU (Togo)
Professeur B. GNON (Togo)
Professeur K. NUBUKPO (Togo)
Professeur E. AGBODJI (Togo)
Professeur A.-R. AGBERE (Togo)
Professeur D. DOSSEH (Togo)
Professeur K. A. BALOGOU (Togo)
Professeur M. A. MOHOU (Togo)
Professeur K. NAPO (Togo)
Professeur M. BANNA (Togo)

COMITE DE REDACTION:

Rédacteur en Chef : Dr Esohanam BATCHANA (Maître de Conférences)

Membres :

- Dr KOLEDZI K. Edem, MC (Maître de Conférences)
- Dr NAPO Gbati, MC (Maître de Conférences)
- Dr ADJONOU Kossi, MA (Maître Assistant)

Instructions aux auteurs

Le Journal de la Recherche Scientifique de l'Université de Lomé (Togo) est un journal international et pluridisciplinaire qui publie des travaux de recherche rédigés en français ou en anglais dans les domaines des Lettres et Sciences Humaines, des Sciences Fondamentales et Appliquées, des Sciences Juridiques, Economiques et de gestion. Le journal paraît quatre fois par an (quatre volumes par an).

Le journal reçoit des articles originaux, des revues de la littérature, des petites communications, des commentaires et critiques d'articles et des études de cas.

Soumission des contributions : Les manuscrits seront soumis exclusivement par voie électronique à l'adresse suivante : jresultg@gmail.com

Présentation du manuscrit : le manuscrit, saisi en format A4 avec 2,5 cm de marges (word : Times New Roman, 12, interligne 1,5), doit comprendre les parties suivantes :

- Titre de l'article : En majuscule, il doit être court et très explicite, en français et en anglais
- Les auteurs : Les noms et prénoms des auteurs (le nom en Majuscule et les initiales des prénoms ex : BELAKERO K. L.) et les affiliations (noms et adresse des institutions). Le nom de l'auteur répondant doit être identifié par un astérisque (*) et son adresse électronique fournie.
- Un résumé en français et en anglais : le résumé doit fournir les objectifs de l'étude, la méthodologie suivie, les principaux résultats obtenus (résultats qualitatifs et quantitatifs) et la conclusion. Il doit être court et précis.
- Les mots clés (keywords) en français et en anglais : au maximum six (6).
- Introduction : elle fait le point de la revue de la littérature récente sur le sujet, soulève de façon précise la problématique de la présente étude et énonce le plan du manuscrit.
- Matériel et méthodes : on y décrit clairement la méthodologie utilisée. Les références des méthodes d'analyse, des équipements et des produits chimiques doivent être fournies.
- Résultats : ce chapitre renferme les principaux résultats obtenus. On présentera les résultats sous forme de figure ou de tableau dans la mesure du possible. Toutes les illustrations doivent être claires et faciles à reproduire. Elles seront insérées dans le texte et à la bonne place. On évitera les couleurs dans les figures et les tableaux. Pour les équations, il est recommandé d'utiliser un éditeur d'équations compatible en traitement de texte word.

Les tableaux et les figures doivent être numérotés en chiffres arabes et doivent comporter une légende courte et explicite en français et en anglais. Les unités doivent être choisies dans le Système International. Il est souhaitable d'utiliser les puissances négatives à la place des barres (mg l^{-1} et non mg/l). Pour les noms scientifiques dans les systématiques, utiliser l'italique plutôt que souligner.

- Discussion : il est souhaitable de séparer la discussion des résultats. Dans la discussion, on apportera des interprétations approfondies des résultats, on montrera les liens de l'étude avec les travaux récents de la littérature et on mettra en évidence l'apport de la contribution.

Remerciements : les remerciements suivent le chapitre des discussions (remerciements des contributions techniques importantes et des sources de financement de l'étude).

Références bibliographiques : pour la présentation des références on distinguera les cas suivants :

- Dans le corps du manuscrit. On peut citer un ou deux noms : (KARNALITO, 2010) ou selon les travaux de KARNALITO (2010). A partir de trois auteurs, on utilisera « et al. » ; (KARNALITO et al., 2010), ou selon les travaux de KARNALITO et al., (2010). Pour un même auteur avec deux ou plus de références dans la même année, on utilisera : (KARNALITO, 2010a, 2010b).
- Liste des références bibliographiques. Elle sera dressée par ordre alphabétique en observant les recommandations suivantes :
 - Journal : AYRACI E., HODAN., 2005. Adsorption kinetics and isotherms of pesticides onto activated carbon-cloth. *Chemosphere*, 60(11), 1600-1607.
 - Livre : RODIER J., 2005. L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer. 8^{ème} édition, Dunod, Paris.
 - Chapitre d'un livre : CARDOT C., 1999. Elimination de l'azote. In Génie de l'Environnement : Les traitements de l'eau. *Edition Ellipses, Paris, 137-148.*
 - Article sur un site web : A n'utiliser que dans des cas exceptionnels ; préciser si possible les noms des auteurs. Exemple : OMS, 2004. Fluoride and arsenic in drinking water. *Inheriting the world: The atlas of children's health and environment.*
<http://www.who.int/water_sanitation_health/en/poster8.pdf>. *Date de consultation.*

Tirés-à-part: En principe, il n'y a pas de tirés-à-part. Les auteurs recevront une copie PDF de leur article.

I.2. Comité de Rédaction

Le comité de rédaction participe à la mise en œuvre de la politique éditoriale. Il est dirigé par un Directeur de Publication qui est le Directeur de la Recherche et un responsable de section.

Secretariat

Dr KOLEDZI K. Edem, MC

Dr NAPO Gbati, MC

Dr ADJONOU Kossi, MA

M. Komi AGBAVON

M. Tata Koffi KUWONU

M N N'SILE

Direction de la Recherche et de l'Innovation de l'Université de Lomé (UL); 01
B.P. 1515 Lomé 01 (Togo) Phone: (00228) 22 25 40 76, 90 13 44 72

Email: jrsultg@gmail.com ou rechercheul@gmail.com ou
essobatchana@gmail.com

Frais de publication : 30 000 F CFA

Toute correspondance concernant la publication doit parvenir, sans frais, à la :

Direction de la Recherche et de l'Innovation (DRI)

Université de Lomé

01 B.P. 1515 Lomé 01 (TOGO)

**JOURNAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
DE L'UNIVERSITE DE LOME (TOGO)**

VOLUME 21, Numéro 3, Spécial, (2019)

SOMMAIRE

Sciences et Technologie

1. OHIOMA Jerry O. & IKPONMWEN M. O. (Nigeria)
Interprétation de données aéromagnétiques des structures géologiques au Nigeria Centre-Nord., 1
2. SANGWA Hugues Mulungu & *al.*, (Congo)
Etude du peuplement ichtyologique des poissons captures au fleuve congo : cas de la ville de KINDU, 9

Lettres et Sciences Humaines

3. FEMI & *al.*, (Bénin)
Cartographie du potentiel en eau souterraine de la basse valle de l'Ouémé, 19
4. WAYACK-PAMBÈ Madeleine (Burkina Faso)
Migration des jeunes femmes célibataires à Ouagadougou : de la quête de meilleures conditions de vie au désir de s'affranchir de normes de genres inégalitaires. 29
5. BOUKPESSI Tchaa & *al* (Togo)
Richesse floristique, savoirs endogènes et importance des adventices des cultures céréalières en pays kabyè (nord-Togo), 41
6. SOW Seydou Alassane & BA Djibrirou Daouda (Sénégal)
Géomorphologie et modélisation statistique pour la quantification des processus hydriques : approche à partir de l'érosion par ravinement, 53
7. MAYEDA N. W. (Togo)
Le Révérend père Aloyse Riegert : un missionnaire-administrateur civil SMA hors-pair (1937-1960), 67
8. MOYEN Godefroy & NGAKOSSO Marphin Semarg (CONGO-BRAZZAVILLE)
L'égalité souveraine des Etats aujourd'hui ?, 93

9. KOUTOUA Amon Jean-Pierre & KOUAKOU Kouassi Éric (Côte d'Ivoire)	
Le non-respect du cadre juridique et réglementaire de la politique de décentralisation et ses conséquences sur le développement de la commune de Grand-Bassam en cote d'ivoire,	107
10. SAMBIENI Coffi (Togo)	
Culture et recherche en littérature, en sciences du langage, humaines et sociales en Afrique,	123
11. GNAKOU ALI Pitaloumani (Togo)	
Maladie chronique et ajustement des malades à leur statut,	133
12. KOTTIN Evariste Assogba & FANOU Codjo Charlemagne (Bénin)	
Contextualization of the tefl in beninese secondary schools: teachers' perceptions about teaching the language in context,	145
13. LAWSON-HELLU Latévi Senam (Togo)	
Développement durable et projets agricoles dans le canton de Badja au Togo : entre réticence et logiques paysannes,	155
14. AHODEKON Cyriaque S. C. ¹ & KPONOU Joseph (Bénin)	
Analyse des défis de l'école face à l'emploi au Bénin,	169
15. OUYI Badji (Togo)	
Harcèlement sexuel et stratégies de coping en milieu professionnel,	195
16. KPOTCHOU Koffi et ATTIOGBE Koffi Sétsrim (Togo)	
Recul des pratiques endogènes et difficultés des paysans en milieu Ouatchi au sud-est Togo,	207
17. KOUAME Kouakou Félicien (Côte d'Ivoire)	
Violence communautaire et réversibilité du sentiment d'insécurité chez des populations de Duékoué et d'Abobo, Côte d'Ivoire,	223
18. AZALOU TINGBE Emilia (Bénin)	
Femmes et microcrédit à Porto-Novo (Bénin),	235
19. TOHON Sètongninougbo Hermann Eric (Bénin)	
L'analyse stratégique pour une meilleure compréhension de la disparité socio-économique des artistes plasticiens des communes de Cotonou et d'Abomey-Calavi au Bénin,	247

Sciences Médicales

20. DJAGADOU Kodjo Agbeko & al (Togo)	
Evaluation des prescriptions antibiotiques au service des urgences médicales du Centre hospitalier Sylvanus Olympio de Lomé,	257

21. ASSENOUWE S. & al, (Togo)	
Arrêt cardiaque postopératoire à Lomé (Togo): aspects épidémiologiques, thérapeutiques et évolutifs,	263
22. N'DJESSAN J.J. & al., (Côte d'Ivoire)	
Les troubles de la conduction cardiaque dans le syndrome coronarien aigu avec sus-décalage de segment ST : étude de 53 cas,.....	275
23. MIKPONHOUÉ R.C.N. (Bénin)	
Evaluation de la gestion des produits et déchets phytosanitaires dans les ménages agricoles touchés par les intoxications aux pesticides au Bénin,	283
24. BAKOMA B. & al, (Togo).	
Evaluation de la qualité des poudres thérapeutiques à base de plantes dans les marchés de la ville de Lomé (Togo),	295
25. KOUASSI K. C. & al., (Côte d'Ivoire)	
Vérification sur site des performances du glucomètre <i>accu-check active</i> versus automate <i>selectra pro m</i> : étude comparative sur 263 cas colligés au CHU Campus de Lomé (Togo),	309

GEOMORPHOLOGIE ET MODELISATION STATISTIQUE POUR LA QUANTIFICATION DES PROCESSUS HYDRIQUES : APPROCHE A PARTIR DE L'EROSION PAR RAVINEMENT

GEOMORPHOLOGY AND STATISTICAL MODELING FOR QUANTIFICATION OF WATER PROCESSES: APPROACH FROM EROSION BY RAVINEMENT

SOW Seydou Alassane¹ & BA Djibrirou Daouda²

1- *Géographe, Laboratoire Leïdi « Dynamiques des territoires et développement » (DTD), section de Géographie, Université Gaston Berger (UGB) de Saint-Louis (Sénégal).*

Mail : sowseydoualassane@yahoo.fr

2- *Géographe, Laboratoire Leïdi « Dynamiques des territoires et développement » (DTD), section de Géographie, Université Gaston Berger (UGB) de Saint-Louis (Sénégal).*

Mail : djibrirouba@yahoo.fr

(Reçu le 23 Novembre 2018 ; 15 Juillet 2019 ; Accepté le 27 Juillet 2019)

RESUME

L'intégration des analyses géomorphologiques dans l'approche systémique poussent de plus en plus les géomorphologues vers la modélisation statistique. A cet effet, l'objectif de cet article est de mettre en perspective la modélisation statistique (Régression Linéaire Multiple, autocorrélation spatiale et interpolation) pour la quantification des processus hydriques, avec un accent sur l'érosion par ravinement. Le texte s'architecture en trois points : érosion des axes hydrauliques (ravins) par approche bilan par Régression Linéaire Multiple (RLM) ; morphologie spatiale du ravinement par approche par autocorrélation spatiale entre variables régionalisées et géomorphométrie des axes hydrauliques grâce à une approche par interpolation spatiale pour le suivi de la dynamique de ces surfaces topographiques. Ce couplage géomorphologie et modélisation statistique a permis de comprendre que les ravins fonctionnent comme un système auto-transformant (autocorrélation spatiale). L'intensité et la dynamique morphométrique des ravins dépendent des remaniements de largeurs et de profondeurs des ravins (interpolation spatiale). Ainsi, à l'échelle des axes hydrauliques, ces remaniements ont deux origines : ils peuvent être soit une production intrinsèque du ravin qui subit en ses différentes parties les effets de l'érosion pluviale ; ou soit dépendre des capacités d'ablation ou de transport des flux hydro-sédimentaires induits par les sollicitations pluviométriques en zone amont (RLM).

Mots clés : géomorphologie, modélisation statistique, érosion hydrique et ravinement.

ABSTRACT

The integration of geomorphological analyzes into the systemic approach is increasingly forcing geomorphologists to resort to statistical modeling. To this end, the objective of this paper is to put statistical modeling into perspective (Multiple Linear Regression, spatial autocorrelation and interpolation) for the quantification of hydric processes, with a focus on erosion by gully. The text is structured in three points: i) erosion of hydraulic axes (ravines) by balance approach by Multiple Linear Regression (MLR); ii) Spatial morphology of gully by spatial autocorrelation approach between regionalised variables and iii) Hydraulic axis geomorphometry using a spatial interplanar approach for monitoring geoform dynamics. This coupling geomorphology and statistical modeling made it possible to understand that the ravines function as a self-transforming system (spatial autocorrelation). The intensity and direction of the geometric modifications of the ravines depend on the evolution of their widths and depths, the reworkings themselves (spatial interpolation). Thus, at the scale of the hydraulic axes, these reworkings have two origins: they can be either an intrinsic production of the ravine which undergoes in its various parts the effective effects of the rain erosion, or is

depend on the capacities of ablation or transport of the flows coming from the pluviometric solicitations (MLR).

Keywords: geomorphology, statistical modeling, water processes, erosion, gully.

INTRODUCTION

La géomorphologie est une discipline qui étudie la création et l'évolution des modelés, formes qui relèvent du cinquième au huitième ordre de grandeur. A cette échelle qui rassemble des objets de taille kilométrique à métrique, voire centimétrique, les formes sont sculptées par des processus d'érosion divers, évoluant depuis des temps variables et plus ou moins différenciées selon les régions bioclimatiques. Les forces qui régissent ces mécanismes sont externes, les moteurs en sont l'énergie solaire et la gravitation universelle (Valadas, 2004).

La démarche du géomorphologue est d'abord d'ordre naturaliste. Elle implique de décrire les formes, d'en rechercher l'origine, de les relier entre elles, de les classer, de comprendre le sens et les vitesses d'évolution, de prévoir leur comportement et leur avenir à divers pas de temps. Elle conduit à une quantification des phénomènes et de plus en plus à des tentatives de modélisation.

L'utilisation des méthodes statistiques était encore rare dans le domaine de la géomorphologie, en particulier la géomorphologie dynamique. Au début, la discipline s'intégrait dans des paradigmes déterministes et mécanistes, qui font référence à l'observation et à la description des processus. Le faible recours aux méthodes statistiques peut s'expliquer également par le fait que la géomorphologie, produit souvent des jeux de données de petite taille (Aubray et Piéagy, 2001), issues des processus morphodynamiques dont la temporalité est réduite. Une lave de ravinement par exemple s'observe en quelques minutes, une montée de crue en quelques heures (Sow, 2018). Le temps long en géomorphologie, c'est surtout celui de la géomorphologie structurale qui crée, à l'échelle des millions d'années, les grandes formes en creux et en saillie qui forment les unités majeures du relief. En géomorphologie

dynamique, la temporalité est relativement réduite, surtout quand les dynamiques sont vives. A cet effet, se digitalisent parfois dans l'espace géographique des moments d'excessivité ou de crise, qui traduisent un danger pour les populations (Ciattoniet Veyret, 2003) : c'est l'aléa représenté par une inondation par exemple (Sow, 2018).

Ainsi, jusqu'à récemment, les études de géomorphologie font peu appel aux outils statistiques, exception faite des méthodes de régression. Cependant, avec le changement de paradigme, la modélisation statistique (statistique inférentielle y comprise), se révèle de plus en plus pertinentes dans les analyses en géomorphologie dynamique. Plusieurs facteurs peuvent l'expliquer :

- Les avancées en météorologie permettent de disposer d'une assez conséquente base de données s'étalant sur plusieurs périodes et désignées sous le nom de série stochastique. Il est devenu plus facile de mesurer le débit, voire les concentrations de flux hydriques en transit à l'échelle de plusieurs stations, et d'aboutir à des tentatives d'agrégation sur une petite échelle. Rickenmann (1997) et Liébault *et al.*, (1999) signalaient déjà qu'il est possible d'étendre géographiquement des recherches auparavant conduites essentiellement au niveau stationnel, ce qui se traduit par une augmentation de la quantité des données à traiter.

- Le positionnement d'emblée des réflexions géographiques dans l'analyse systémique conduit à élargir les problématiques du champ disciplinaire de la géomorphologie. Dans le cas de la géomorphologie dynamique, ce type d'analyse conduit à concevoir des recherches intégrées au sein de bassins versants (Schumm, 1977; Newson, 1994). Le bassin versant est l'unité de base sur laquelle travaille un géomorphologue ou un hydrologue. C'est à l'échelle de cette espace que se déroulent les processus de transferts (Valadas, 2004). A cet

effet, des compilations de données de grande taille peuvent être produits afin de mettre en lumière les

- liens bassin versant – réseau hydrographique (ravins, torrents, chenaux, cône de déjection,...).

- Les progrès technologiques en matière d'acquisition et de traitement de l'information expliquent le recours croissant à la télédétection et aux SIG (systèmes d'information géographique). Ces outils permettent d'acquérir des informations spatiales et géoréférencées relatives aux caractéristiques morphologiques et hydrologiques (Sow, 2018). Ce qui facilite l'analyse simultanée d'un ensemble de couches d'information géographique (par exemple en géomorphologie dynamique : les formes d'érosion, la position du réseau hydrographique, la pente, l'altitude ou la couverture végétale), afin de mettre en lumière les bilans d'érosion à l'échelle du bassin versant, établir des scénarios et les simuler.

La géomorphologie dynamique se veut être une géomorphologie quantitative, au sens plein du terme, attachée, non seulement à la mensuration des formes, mais aussi à l'estimation de la vitesse d'élaboration des processus à l'échelle de l'espace géographique. A cet effet, la plupart des variables considérées en géomorphologie ont pour caractéristique commune d'être « régionalisées », c'est-à-dire localisées dans l'espace géographique (Montgomery et al., 1998). En géomorphologie dynamique, cette localisation est unidimensionnelle, le long d'un chenal d'écoulement, ou d'un torrent ou même d'un ravin, ou bidimensionnelle, au sein d'un bassin versant. L'enjeu majeur réside dans le fait de l'adaptation des outils statistiques utilisés à la nature régionalisée des variables (quantitatives) recueillies sur le terrain. La modélisation statistique permettrait ainsi de mieux mettre en lumière ces grandeurs physiques (données), indicateurs performants de l'évolution en termes de bilan des géoformes (ravins).

L'objectif de cet article est de mettre en perspective la modélisation statistique (Régression Linéaire Multiple, autocorrélation spatiale et interpolation) pour la quantification des processus hydriques, avec une approche basée sur l'érosion par ravinement¹. L'article se structure en trois parties :

- Erosion des axes hydrauliques : approche bilan par RLM;

- Morphologie spatiale du ravinement : approche par autocorrélation spatiale entre variables régionalisées ;

- Géomorphométrie des axes hydrauliques : approche par interpolation spatiale pour le suivi de la dynamique des géoformes.

1. Erosion des axes hydrauliques : approche bilan par RLM

1.1. Théories et concepts

La modélisation par régression linéaire est une technique statistique qui permet de décrire la liaison entre la variable dépendante ou expliquée et une ou plusieurs variables explicatives. Il s'agit d'une analyse statistique dans un espace à plusieurs dimensions et constitue une simple extension de régressions polynomiales et d'analyse de tendances.

Soit une variable Y que l'on veut relier à m variables, X par le modèle linéaire suivant la formule (Holder, 1985) :

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + \dots + B_mX_m + \Sigma$$

Avec Y : la variable dépendante ; B_m : les coefficients de régressions partiels et m : le nombre de variables indépendantes.

Dans la RLM, le paramètre d'appréciation de la qualité du modèle au-delà des hypothèses inférentielles (H_0 et H_a) est le coefficient de détermination : le R^2 de Pearson. Il représente la proportion de la variation totale que subie la variable dépendante expliquée par la droite de régression, lorsqu'une variable indépendante quelconque est prise en compte. Il s'exprime comme le rapport de la variation expliquée à la variation totale. C'est un indice d'ajustement de la droite au nuage de points découlant de la

¹ A partir des exemples tirés d'un bassin versant sahélien du Sénégal (Ourosogui)

mise en relation des variables. La procédure de régression sert à déterminer la présence d'une relation statistiquement significative entre les variables : donné par le niveau de significativité et la proportion de variance de la variable dépendante, expliquée par la présence de la variable indépendante, avec laquelle elle est mise en relation. Le tout est mesuré avec une pente de régression ou coefficient de détermination (R^2).

1.2. Mise en pratique

A la suite d'une sollicitation pluviométrique, les flux hydriques en transit sont la plupart du

temps chargés en matières solides. Il y a donc une relation étroite entre transports liquide et solide. Les particules arrachées sur les versants et emportées par les eaux courantes sont déposées dans les zones dépressionnaires au gré des gradients de vitesse d'écoulement. Le système érosif est par conséquent un système complexe dont les mécanismes se déroulent à des échelles spatio-temporelles différentes (Sow, 2018). L'étude des relations entre débits solides et liquides permet de caractériser la réponse hydro-érosive des bassins versants. A cet effet, l'estimation des débits liquides a été



Photo 1 : Station hydrologique installé dans un bassin versant de Ourossogui

faite sur des hauteurs d'eau enregistrées soit par le thalimède installé à l'exutoire du bassin versant, soit celles lues directement sur les stations limnimétrique situés sur les ravins. La Régression Linéaire Multiple apparait ainsi comme une méthode d'analyse de ces relations

entre variables quantitatives. La figure 1 suivante permet de visualiser les régressions linéaires entre débits solides et liquides en 2015 dans un bassin versant sahélien du Sénégal : bassin versant de Ourossogui.

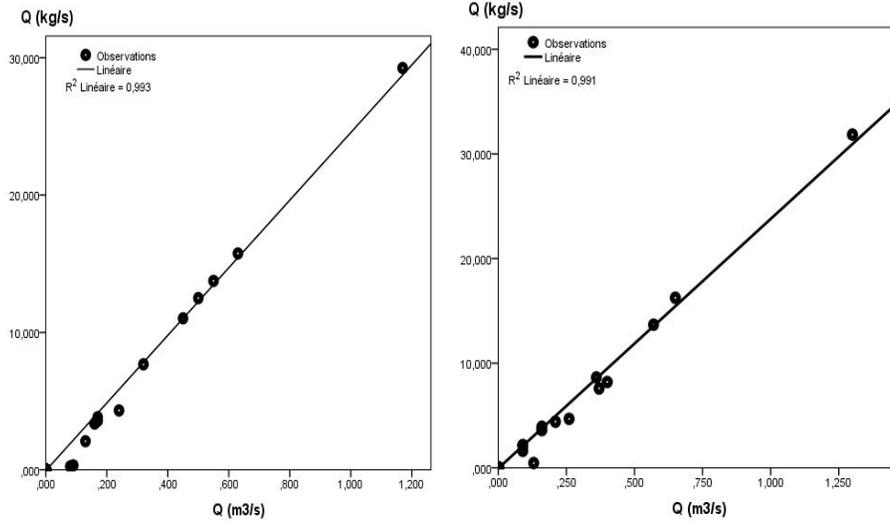


Figure 1 A- Ravin du Sud-est²

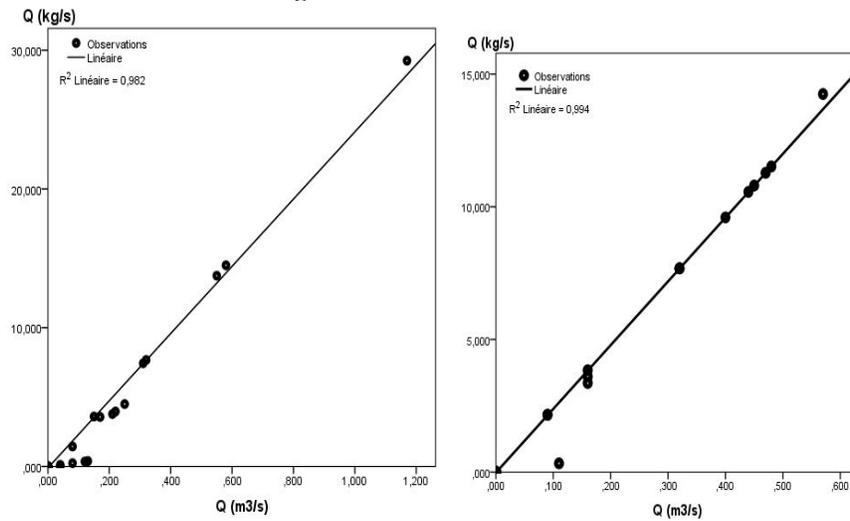


Figure 1 B- Ravin du Nord-est³

Figure 1 : Résultats des régressions linéaires entre débits solides et liquides au niveau des ravins du bassin versant de Ourossogui

² La figure à gauche représente les régressions en 2015, alors que celle à droite les régressions en 2016

³ La figure à gauche représente les régressions en 2015, alors que celle à droite les régressions en 2016

Durant les missions de terrain effectuées au niveau de la localité de Ourossogui (saison des pluies 2015 et 2016), une importante base de données sur les débits solide et liquide en transit dans les axes hydrauliques a été constituée. C'est ce qui a servi pour dérouler les régressions linéaires. Par année, le nombre moyen de crue ayant engendré un écoulement et un transport solide à travers les deux axes hydrauliques sur lesquels ont été installées des stations est de l'ordre d'une quinzaine. La quantification des débits solides s'est faite suivant l'observation de 29 crues dans le bassin versant. Les débits solides obtenus durant les jours de pluies s'étagent pour la plupart du temps entre 0,12 kg/s et 29,5 kg/s au niveau du ravin du Nord-est, et entre 0,2 kg/s et 31,85 kg/s au niveau du ravin du Sud-est.

La faiblesse des crues pourtant chargées en matières est un indicateur des réponses érosives aux épisodes pluvieux. Sur le ravin du Sud-est, les pics de charge sédimentaire se produisent en même temps que la pointe des hauteurs d'eau. Sur le ravin du Nord-est par contre, des phénomènes inverses se sont produits. En 2015, le pic des débits solides est apparu avant celui des hauteurs d'eau ; alors qu'en 2016, le cas contraire a été observé. Une relation de cause à effet existe ainsi entre les débits solides en transit et ceux liquides. Les graphs de régressions informent en intégralité que la variable débit solide est fortement influencée par celle débit liquide, en atteste d'ailleurs les forts coefficients de détermination qui sont tous supérieurs à 0,9.

Les réponses érosives aux épisodes pluvieux dans un bassin versant se caractérisent par des variations. Les écoulements sont liés à la pluviosité totale et à l'intensité de la pluie. Les taux de concentrations de sédiments en transit sont également variables selon la saison. Les concentrations maximales sont fortement liées aux intensités maximales de la pluie. Les phénomènes érosifs majeurs se produisent principalement durant les mois d'août et de septembre. Les épisodes érosifs de juillet sont

peu nombreux mais peuvent cependant être très productifs en apports sédimentaires. Ils correspondent à des pluies orageuses enregistrées au début de la saison des pluies. En plus de la RLM, l'approche par autocorrélation spatiale a permis de comprendre la morphologie spatiale de l'érosion par ravinement.

2. Morphologie spatiale du ravinement : approche par autocorrélation spatiale entre variables régionalisées

2.1. Théories et concepts

Soit W_δ , une matrice de poids spatiaux, qui peut être binaire (contiguïté) ou quantitative, fondée sur la distance entre les observations. Soit un échantillon spatial de N localités (ponctuelles ou aréolaires), la matrice W_δ est carrée, symétrique et de dimension n,n . Soit deux unités géographiques distinctes I et J , le poids spatial associé à cette paire se note w_{ij} . On produit plusieurs matrices d'influence. Chaque matrice de poids spatiaux W_δ est associée à une distance critique δ . Ses éléments sont nuls lorsque la distance entre I et J excède le seuil fixé, sinon, ils suivent une fonction d'influence qui dépend de la distance critique de recherche δ , et dont la forme et les paramètres (θ) sont laissés au choix de l'utilisateur parmi les fonctions dont le test de validation croisé est positif quelles que soient les constantes réelles arbitraires α_θ et α_j (Cressie, 1993).

A cet effet, les mesures de l'autocorrélation spatiale dépendent de l'échelle d'analyse et du niveau de résolution de la grille à travers laquelle une distribution est observée. Ces mesures sont des rapports entre la covariance mesurée pour un pas donné et la variance totale. Les indices les plus utilisés sont celui de Moran (1950) et de Geary (1954).

En géographie, Cliff et Ord (1969 et 1973) ont profondément remanié les statistiques de Moran et Geary. La version réécrite par Cliff et Ord du I de Moran est l'indicateur le plus utilisé aujourd'hui pour mesurer l'autocorrélation spatiale.

Géomorphologie et modélisation statistique pour la quantification des processus hydriques :
 approche à partir de l'érosion par ravinement.

$$I \text{ de Moran} = \frac{n}{m} * \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} (z_i - \bar{z})(z_j - \bar{z})}{\sum_i (z_i - \bar{z})^2}$$

$$C \text{ de Geary} = \frac{n-1}{2m} * \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} (z_i - \bar{z})^2}{\sum_i (z_i - \bar{z})^2}$$

X et y sont réservés aux coordonnées des entités géographiques

Z_i = valeur de la variable pour l'entité i ; sa moyenne est Z

I = entité géographique

j = voisins des entités « i »

n = nombre total de paires voisins

W = matrice de pondération, dont les éléments prennent, par exemple, la valeur "1" pour les "i,j" voisins et "0" autrement

Comme le montre l'équation précédente, le *I* de Moran compare l'écart de la valeur d'un individu à la moyenne de la valeur des voisins de ces individus à la moyenne. Plus les valeurs des individus et de leurs voisins sont éloignées de la moyenne et proches entre eux, et plus l'indice de Moran sera fort. L'indice évolue ainsi de -1 (autocorrélation spatiale négative) à 1 (autocorrélation spatiale positive) en passant par 0 (absence d'autocorrélation spatiale). On peut noter trois limites à cet indice. La première est qu'il donne une valeur globale, et que la même valeur de l'indice peut refléter deux configurations spatiales très différentes. La seconde est de prendre en compte l'écart à la moyenne, et de rester en quelques sortes « aveugles » aux individus voisins qui auraient des valeurs proches, mais proches aussi de la moyenne. Enfin, la troisième est récurrente en analyse spatiale : l'indice de Moran est sensible au niveau d'observation et au mode de voisinage choisi (Oliveau, 2010).

Au-delà de la question de savoir si l'autocorrélation est significative ou pas, ce qui intéresse le géomorphologue c'est de mesurer la portée de l'autocorrélation afin de déterminer l'échelle de la dépendance spatiale. Lorsque l'autocorrélation positive décroît avec la distance puis s'annule complètement, la portée est définie de façon stricte comme la distance à partir de laquelle l'autocorrélation est non significative. Lorsque l'autocorrélation décroît, s'annule, puis change de signe, la notion de portée perd de sa signification.

Les variables spatialisées ou régionalisées sont souvent soumises à des dépendances spatiales (ou interactions spatiales), qui sont d'autant plus fortes que les localisations sont plus proches. Les mesures d'autocorrélation spatiale permettent d'estimer la dépendance spatiale entre les valeurs d'une même variable en différents endroits de l'espace. L'autocorrélation spatiale s'appuie sur deux critères : la proximité spatiale et la ressemblance ou la dissemblance des valeurs de cette variable dans les unités spatiales de la zone d'étude.

2.2. Mise en pratique

Il faut faire la distinction entre la mesure de l'autocorrélation spatiale globale d'une variable dans un territoire donné et celle de l'autocorrélation locale dans chaque unité spatiale. Pour une problématique propre à la géomorphologie dynamique (érosion par ravinement), le bassin versant peut être un territoire important pour appliquer l'autocorrélation spatiale. A cet effet, les unités spatiales choisies sont des ravins, à l'échelle desquels ont eu lieu les mesures et suivi du ravinement : il s'agit donc d'une autocorrélation locale. Elle correspond à l'intensité et la significativité de la dépendance locale entre la valeur d'une variable dans une unité spatiale et les valeurs de cette même variable dans les unités spatiales environnantes.

Processus hydro-géomorphologique, le ravinement doit être étudié sur une maille paysagère contenant tous les segments ayant une influence sur la ravinogenèse, et pouvant

en expliquer le fonctionnement. On considère ainsi que les impluviums pluviométriques à l'amont et les ravins à l'aval sont liés par des relations fonctionnelles. Il en est de même que pour les dynamiques hydro-érosives.

La mise en évidence des relations entre les impluviums pluviométriques et le ravinement a été facilitée par l'application d'une régression

linéaire. Les résultats montrent que sur tous les deux ravins, l'évolution des largeurs s'explique statistiquement par les hauteurs totales annuelles des pluies tombées dans le bassin versant et / ou au niveau de sa périphérie. En atteste d'ailleurs les forts coefficients de détermination obtenus : 0,967 pour le ravin du Nord-est et 0,921 pour le ravin du Sud-est.

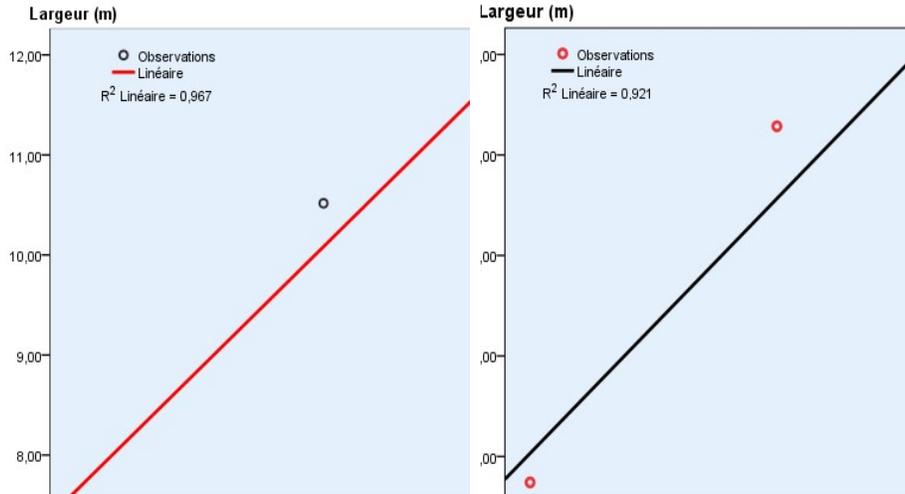


Figure 2 : Régressions linéaires entre largeurs de ravins et pluies totales annuelles dans le bassin versant de Ourossogui (à gauche = ravin du Nord-est et à droite, celui du Sud-est)

L'autocorrélation spatiale s'est faite grâce aux moyennes d'évolution en m des largeurs des deux ravins durant les trois campagnes de suivi du ravinement. L'analyse de la figure 3 montre que les indices ont des valeurs comprises entre -1 (indiquant une dispersion parfaite) à 1 (corrélation parfaite).

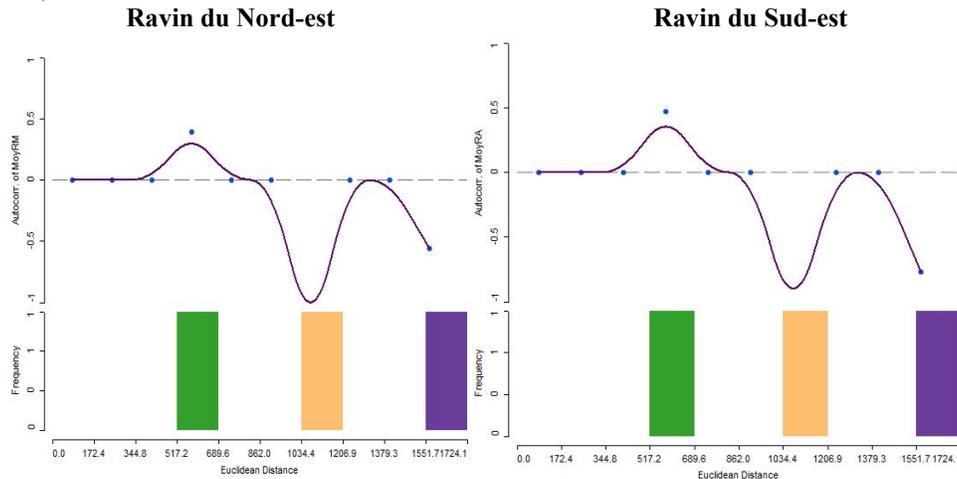


Figure 3 : Résultats de l'autocorrélation spatiale du ravinement dans le bassin versant de Ourossogui (sorties sur le logiciel Géoda)

L'analyse montre que la quasi-totalité des coefficients d'autocorrélation sont égales à 0. Ce qui signifie que l'évolution moyenne des largeurs de ces axes hydrauliques est parfaitement stochastique. A l'échelle de chaque ravin, le rythme d'évolution de la largeur varie suivant la section et la période où l'on se situe, au niveau des axes hydrauliques. Il y a par conséquent une anisotropie du phénomène étudié au sein du bassin versant : les propriétés du ravinement et des ravins varient donc suivant la direction des flux

hydriques en action. L'analyse de la morphologie spatiale du ravinement s'est faite aussi sur une base d'une interrogation de la dynamique de la forme des axes hydrauliques. A cet effet, le coefficient de forme, qui est le rapport entre la largeur (L) et la profondeur (P), rapport calculé sur les transects installés sur quelques berges de ravin a été utilisé. Les résultats de l'évolution moyenne des coefficients de forme des ravins sont présentés à travers le tableau 1 suivant.

Tableau 1 : Evolution moyenne des coefficients de forme du ravin du Sud-est

Années	T1	T2	T3	Moyennes
2014	3.33	6.98	7.76	6.02
2015	10.28	8.06	11.38	9.91
2016	10.53	4.46	10.55	8.52

L'analyse du tableau précédent permet de constater qu'en moyenne, le coefficient de forme du Sud-est est passé de 6,02 en 2014 à 8,52 en 2016, via 9,91 en 2015. La variation moyenne du coefficient de forme du Sud-est est de 2,5. Les faibles valeurs de L/P indiquent des sections étroites, correspondant alors à une plus forte concentration de l'énergie hydraulique dans le lit, donc à une dynamique érosive plus intense. Les grandes valeurs de L/P correspondent aux sections à lit large, délimitées par des versants courts à la faveur d'une accumulation justifiée par une importante dissipation de l'énergie des flux hydriques. Cette dynamique excessive s'explique par l'activité de l'hydrodynamisme dans les ravins, qui subissent par endroit les sapements des eaux pluviales érosives.

L'étude multi-échelle du ravinement grâce à la modélisation statistique intègre également le suivi des modifications géométriques de l'emprise des ravins.

3. Géomorphométrie des axes hydrauliques : approche par interpolation spatiale pour le suivi de la dynamique de ces géoformes

3.1. Théories et concepts

L'interpolation spatiale est une procédure qui consiste à estimer la valeur d'un attribut pour des sites non échantillonnés. Il existe de nombreuses méthodes d'interpolation parmi lesquels il faut faire un choix. Nous distinguerons deux familles :

- Les méthodes d'interpolation classiques basées sur des algorithmes purement déterministes.
- Les méthodes d'estimation géostatistiques qui s'appuient sur une modélisation probabiliste du phénomène étudié. Ces méthodes s'appliquent à des variables régionalisées, c'est-à-dire des fonctions numériques qui prennent leurs valeurs dans des régions délimitées de l'espace appelées champ.

Dans le cadre d'une interpolation spatiale la distance entre les lieux d'observations a une influence sur ce que l'on observe. Autrement dit, les valeurs dans deux localités voisines sont souvent plus semblables que dans deux localités éloignées. Les poids doivent donc tenir compte non seulement de la disposition des observations les unes par rapport aux autres, mais aussi de la distance entre le site à estimer et les sites observés.

Il existe cependant plusieurs techniques géostatistiques d'interpolation spatiale dont le krigeage. Il cherche à estimer la valeur d'une variable régionalisée z en un point s_0 quelconque du champ à partir des mesures observées $z(s_i)$, $i=1, \dots, n$ (n : nombre de points observés). Le krigeage est un interpolateur exact (la valeur estimée sur un point de mesure est égale à la valeur du point de mesure) et optimal (il minimise la variance sur l'erreur d'estimation). Il existe trois types de krigeage : le krigeage simple, le krigeage ordinaire et le krigeage universel. Le krigeage ordinaire est le plus fréquemment utilisé en pratique car les hypothèses de départ sont moins contraignantes que celle du krigeage simple. Seul le krigeage ordinaire sera théorisé ici car il répond aux besoins de notre problématique. Le modèle de base de cette méthode s'énonce comme suit :

$$Z(s) = \mu(s) + \delta(s)$$

Avec $s \in D$ (le champ), $\mu(s) = E(Z(s))$ quasi-constante inconnue et $\delta(s)$ fonction aléatoire stationnaire intrinsèque d'espérance nulle ($E(\delta(s)) = 0$) et de structure de dépendance connue ($\gamma(|s_i - s_j|)$ connu). Dans son mémoire

$$r(h) = \frac{1}{2} \text{Var}(Z(s+h) - Z(s)) = \frac{1}{2} E[(Z(s+h) - Z(s))^2] = C(0) - C(h)$$

$$\text{Avec : } C(0) = \text{Var}(Z(s)) \text{ et } C(h) = \text{Cov}(Z(s+h), Z(s))$$

Le variogramme est une fonction de h , croissante et souvent caractérisé par quatre paramètres :

- l'effet pépité (C_0) : le comportement à l'origine du variogramme reflète le degré de régularité spatiale de la variable régionalisée. Si le variogramme présente un saut abrupt à l'origine (effet de pépité), cela indique une absence partielle de corrélation entre les

(2005, p.31), S. Baillargeon explique que le caractère quasi-constant de $\mu(s)$ signifie que l'espérance n'est pas contrainte à demeurer la même partout dans le champ D . Elle doit par contre rester constante à l'intérieur de chaque voisinage de krigeage.

Le krigeage est un interpolateur linéaire sans biais. Il prend en compte la géométrie des données, les caractéristiques de la régionalisation et de la variance. Son but est de lisser les données. Ayant calculé les poids ω_i par la résolution du système précédent, nous pouvons écrire l'estimateur de la manière suivante :

$$\bar{Z}_1(s_0) = \sum_{i=1}^n \omega_i Z(s_i)$$

En principe, deux observations situées l'une près de l'autre devraient en moyenne se ressembler davantage que deux observations éloignées. La différence entre les valeurs prises par deux variables aléatoires est $Z(s) - Z(s+h)$. C'est également une variable aléatoire dont on peut calculer la variance. Cette variance devrait être plus petite lorsque les points sont rapprochés, et plus grande lorsque les points sont éloignés. On appelle variogramme la demi-variance de cette différence.

$$r(h) = \frac{1}{2} \text{Var}(Z(s+h) - Z(s))$$

Le variogramme mesure la « variabilité spatiale », c'est-à-dire la dissemblance entre les valeurs selon leurs séparations. Il décrit la continuité spatiale de la variable régionalisée. Le variogramme théorique est défini comme suit :

valeurs prises en deux sites très proches. C'est-à-dire qu'il y a une faible ressemblance entre les valeurs régionalisées très voisines.

- le palier ($C + C_0$) : Valeur du variogramme pour la distance égale à la portée.
- la portée (a) : Distance où deux observations ne se ressemblent plus du tout. Leur covariance est nulle.

3.2. Mise en pratique

Sur le terrain, l'outil de collecte de données tridimensionnelles utilisées est le *Differential Global Positioning System (DGPS) Trimble® R3*. Il permet un calage précis de moins de 1 cm et se compose de deux récepteurs qui

stockent l'information à partir de deux antennes capables de capter les signaux des satellites. Le logiciel utilisé dans le traitement des données est un *Trimble Digital Fieldbook (TDF)*. Les données collectées sont : X, Y, Z (longitude, latitude et altitude).



Figure 4 : L'appareil DGPS Trimble R³ utilisé pour les levées XYZ

L'interpolation a été effectuée pour faire un suivi de la variation géomorphométrique des axes hydrauliques du bassin versant sur la base d'une construction de Modèles Numérique de Terrain (MNT). Les MNT permettent la surveillance détaillée de la morphologie des ravins, et à l'analyse quantitative de leur évolution surfacique. Les levées sont effectuées grâce à des appareils de topographie sur un axe hydraulique du bassin versant qui permettaient de recueillir les données tridimensionnelles (XYZ). Les points ne sont pas choisis selon un maillage régulier mais en fonction des irrégularités du relief. Les lignes

perpendiculaires et adjacentes aux ravins sont prises en compte durant les levées. Des points complémentaires sont levés pour rendre compte des ruptures de pentes. Les MNT sont élaborés avec le logiciel de topobathymétrie *Surfer 9*, les courbes de niveau sont obtenues par krigeage et le ravin *stricto sensu* est délimité par un masque, qui suit la rupture de pente. Les variations de l'emprise du ravin sont obtenues par différence entre deux MNT limités par le même masque. Cette méthode est appliquée deux fois en deux ans, après chaque hivernage (où se produisent les événements érosifs importants).

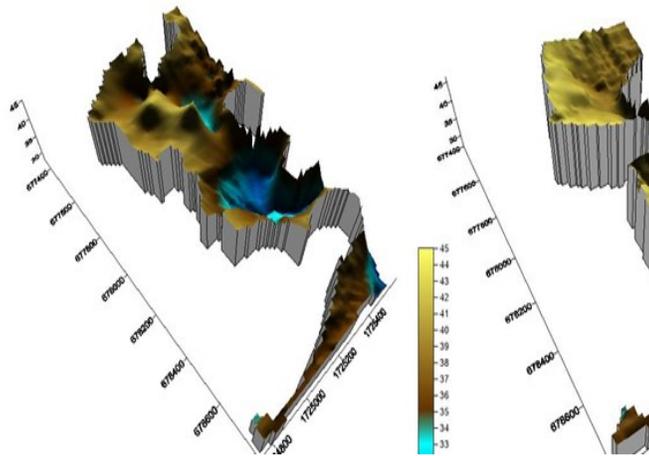


Figure 5 : Iso-volume du ravin du Sud-est en 2015

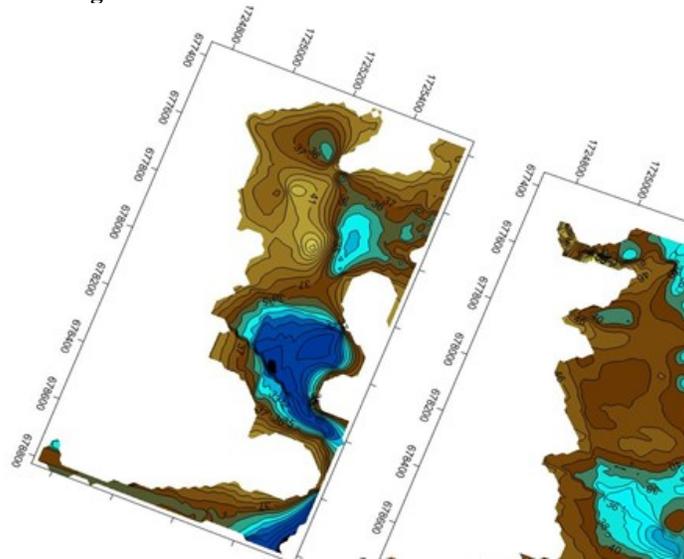


Figure 6 : Iso-volume du ravin du Sud-est en 2016

Ces MNT donnent des informations sur les bilans volumiques qui portent sur des surfaces développées par le ravin, et permet d'observer des remaniements selon des échelles temporelles. Les bilans volumiques globaux sont traduits les figures 5 et 6 qui précèdent, représentant des surfaces d'iso-remaniements. Sur l'ensemble du ravin, on constate que la position des aires contributives des apports et des départs de matériaux n'est pas stable d'une période à la suivante. Au niveau de ce ravin, entre la 1^{ère} campagne de mesure et la 2^{ème}, l'emprise de l'axe est passée de 0,56 km² à

0,77 km², soit une variation surfacique de l'ordre de 0,21 km². Les remaniements observés résultent d'une juxtaposition de processus d'ablation par des flux hydriques à fort potentiel d'érosion, et de processus de sédimentation liés à des flux très chargés. Les remaniements sont également différents selon les sections de ravins et selon les époques. On constate qu'entre octobre 2015 et août 2016, une dynamique très particulière de l'élargissement de la partie avale de la rive droite s'est produite. Le lit de ce ravin était cependant plus incisé en 2015 qu'en 2016. Cela s'explique par

les importants dépôts de sédiments en transit au niveau de l'axe.

CONCLUSION

La mise en pratique de la géomorphologie dynamique et la modélisation statistique par les approches bilan par RLM, indépendance spatiale par autocorrélation spatiale et interpolation spatiale par krigeage a permis de quantifier le processus du ravinement. Ce couplage géomorphologie et modélisation statistique a permis de comprendre que les axes hydrauliques fonctionnent comme un système auto-transformant (autocorrélation spatiale). Si l'intensité et le sens des modifications géométriques observées dépendent de l'évolution des largeurs et des profondeurs des unités, celles-ci sont également en partie engendrées par les remaniements eux-mêmes (interpolation spatiale). A l'échelle des axes, ces remaniements ont deux origines : ils peuvent être une production intrinsèque du ravin qui subit en ses différentes parties les effets efficaces de l'érosion pluviale, mais ils peuvent aussi dépendre des capacités d'ablation ou de transport des flux provenant des sollicitations pluviométriques (RLM). Il s'agit donc d'un système complexe nécessitant la prolongation des recherches, notamment sur les connexions entre les dynamiques pluviométriques et celle du ravinement. Différentes hypothèses de travail permettent déjà d'orienter les recherches sur les liens fonctionnels entre ces deux dynamiques et l'association de modèles fonctionnels (Beven, 2002).

Cependant, la modélisation spatiale a souvent trois effets principaux : soit elle relativise les effets surestimés de plusieurs variables, soit elle confirme l'importance de certaines variables dans la compréhension du phénomène, ou bien elle met en évidence un effet propre de la diffusion spatiale des phénomènes étudiés. A cet égard, l'une des limites de ce travail est le non recours aux intervalles de confiance établis par une procédure de permutation aléatoire des données. Elles permettraient de mieux appréhender la complexité spatiale des formes (morphologie de détail des axes hydrauliques) et leur structuration à différentes échelles. Par ailleurs, le processus géomorphologique étudié (ravinement) étant anisotrope, il conviendrait en perspective d'une meilleure amélioration de la modélisation statistique du ravinement, aller vers : *i)* l'identification sur chaque échelle d'observation la connectivité hydrologique du bassin versant grâce à un protocole rigoureux de collecte de données hydrologiques ; *ii)* l'identification des facteurs qui contrôlent cette connectivité hydrologique et *iii)* l'identification des liens entre les impulsions pluviométriques de l'amont et ceux de l'aval. Ceci est possible par une observation sur une maille paysagère plus fine du bassin versant le binôme pluviométrie-ravinement par couplage de données issues de la Télédétection de Haute Résolution Spatiale et de levées topographiques de terrain, grâce à des outils fournissant une meilleure précision sur les données recueillies (drone, technologies Lidar,...).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BEVEN K., 2002, « *Runoff Generation in Semi-arid Areas*, In BULL L.J., KIRKBY M.J. édit., *Dryland Rivers* », *Hydrology and Geomorphology of Semi-Arid Channels*, 57-105.
- CLIFF A.D. et Ord J.K., 1969, *The problem of spatial autocorrelation*, p. 25-55. In SCOTT A.J. édit., *London Papers in Regional Science*, Studies in Regional Science, Pion, London, 216p.
- CRESSIE N., 1993, *Statistics for Spatial Data*, New York : Wiley
- DESPAGNE W., 2006, Méthodes géostatistique pour l'interpolation et la modélisation en 2D/3D des données spatiales. Rapport de stage de Master 2, Université de Bretagne Sud, 68p.
- GEARY R.C., 1954, « The contiguity ratio and statistical mapping (with discussion) », *Incorporated Statistician*, 5, 115-145
- HOLDER L., 1985, *Multiple regression in hydrology*, Institute of hydrology, Wellingford, 147p.
- LIEBAULT F., Clement P., Piegay H et Landon N., 1999, « Assessment of bedload supply potentiality from the tributary watersheds of a degraded river: The Drôme (France) », *Antarctic and Alpine Research*, 31, 108-117
- MONTGOMERY D. R., DIETRICH W. E. et SULLIVAN K., 1998, *The role of GIS in watershed analysis*, p. 241-261, In LANE S.N.,
- RICHARDS K.S. & CHANDLER J.H., édit., *Landform, Monitoring, Modelling and Analysis*, Wiley, Chichester, 454p.
- MORAN P.A.P., 1948, « The interpretation of statistical maps », *Journal of the Royal Statistical Society*, Series B, 10, 243-251
- NEWSON M., 1994, *Sustainable integrated development and the basin sediment system: guidance from fluvial geomorphology*, p. 1-10, In KIRBY C. et W.R. WHITE, édit., *Integrated River Basin Development*, Wiley, Chichester, 537p.
- PIEGAY P.A.H., 2001, « Pratique de l'analyse de l'autocorrélation spatiale en géomorphologie : définitions opératoires et tests », *Géographie physique et Quaternaire*, 55, N°2, 111-129.
- RICKENMANN D., 1997, « Sediment transport in Swiss torrents », *Earth Surface Processes and Landforms*, 22, 937-951.
- SCHUMMS. A., 1977, *The Fluvial System*, Wiley, New York, 338p.
- SOW S. A., 2018, Morphodynamique hydrique par ravinement et ses conséquences dans le bassin versant de Ourosogui, nord du Sénégal. Thèse de doctorat, Université Gaston Berger de Saint-Louis du Sénégal, 321p.
- VALADAS B., 2004, *Géomorphologie dynamique*, Armand Colin, Paris, 192p.
- VEYRET Y., 2003, *Les risques*, SEDES, Paris, 255p.