Télédétection, 2003, vol. 3, n° 2-3-4, p. 151–163
Droit de photocopie soumis à l'autorisation

© 2003 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions scientifiques GB*
Imprimé en France

MEH-SAFER : UN NOUVEAU MODÈLE D'ÉROSION HYDRIQUE POUR LES MILIEUX SEMI-ARIDES DE FORTE ÉNERGIE À PARTIR D'IMAGES MULTISOURCES ET DE DONNÉES AUXILIAIRES

OUATTARA TIDIANE *, JEAN-MARIE M. DUBOIS, et Q. HUGH J.

Centre d'applications et de recherches en télédétection (CARTEL)
Université de Sherbrooke, Sherbrooke, J1H2R1

(soumis le 28 avril 2002 ; révisé le 25 juillet 2002 ; accepté le 13 septembre 2002)

Les modèles de risques d'érosion hydrique concernant les milieux semi-arides surtout de forte énergie de relief sont quasi inexistants. Dans cette étude, nous proposons donc une modélisation des risques d'érosion hydrique pour ce type de milieu en utilisant des données de télédétection : le MEH-SAFER (Modèle d'Érosion Hydrique en milieu Semi-Aride de Forte Énergie de Relief). Il s'agit d'adapter un modèle, développé en zone semi-aride de faible énergie de relief (Burkina faso), à un milieu semblable mais de forte énergie de relief (Bolivie). Pour cela, nous avons conçu une méthode d'exploitation d'images satellitaires multisources (RSO de RADARSAT-1, ETM+ de Landsat-7 et HRV de SPOT-4) et un nouveau modèle de cartographie de la vulnérabilité topographique qui repose sur le MNT (modèle numérique de terrain) et l'analyse discriminante. La combinaison des potentiels de ruissellement et de la vulnérabilité topographique montre que 73 % de la superficie du bassin a une susceptibilité à l'érosion hydrique comprise entre 0,25 et 0,50 sur un maximum de 1. Le MEH-SAFER est robuste et donne une précision de 80 %.

Mots-clefs : Télédétection ; SIG ; MNT ; érosion hydrique ; forte énergie de relief ; milieux semi arides.

MEH-SAFER : A NEW MODEL OF HYDROUS EROSION FOR THE SEMI-ARID MEDIUMS OF STRONG ENERGY STARTING FROM MULTI-SOURCE IMAGES AND AUXILIARY DATA

Virtually no erosion risk models have been developed in semi-arid regions with high relief. In this study we propose a new model for this type of milieu in which we use remote sensing data: the MEH-SAFER (Hydro Erosion Model in Semi Arid High Relief Areas). We have adapted a model, developed in a semi-arid region (Burkina Faso) to a similar region but with high relief in Bolivia. We have incorporated the results of multisources satellite data (RADARSAT-1, Landsat 7 and SPOT-4 and a new method for mapping topographic vulnerability based on a DEM and using Discriminate Analysis to select the dominant parameters. The combination of the potential for surface wash and the topographic vulnerability reveals that 73 % of the drainage basin has an erosion susceptibility coefficient of between 0.25 and 0.50 of a maximum of 1.0. The MEH-SAFER is robust in a sensitivity analysis and gives an overall accuracy of 80 %.

Keywords : Remote sensin ; GIS ; DEM ; water erosion ; high relief ; semi-arid environment.

1. INTRODUCTION

En 1990, l'Agence canadienne de développement international, a édifié un barrage dans le bassin du lac Laka-Laka (Bolivie) afin d'accroître la production et le revenu agricoles à l'année grâce à l'amélioration et à l'extension de l'irrigation ainsi qu'à la disponibilité d'une retenue d'eau importante. Cinq ans plus tard, Northwest Hydraulic Consultants Ltd. (1995) a mesuré une surprenante sédimentation (110 000 à 150 000 m³/an) dans le lac, d'où une menace de réduction importante de la quantité d'eau disponible dans le réservoir. Face à ce problème, une perspective de gestion du barrage et des terres passe nécessairement par une meilleure connaissance des zones à risques d'érosion hydrique (Metternicht, 1996 ; Zimmerer, 1993).

Il existe plusieurs modèles d'érosion hydrique qui se regroupent en deux grandes catégories : les modèles paramétriques (Morgan *et al.,* 1998 ; Beasley *et al.*, 1980 ; Foster *et al.*, 1977 ; Wischmeier and Smith, 1958) et les modèles déterministes (Dimitrios

* Correspondant principal

and Evangelos, 1999). La majorité de ces modèles d'érosion hydrique est empirique c'est-à-dire élaborée à partir de parcelles expérimentales (Cooke and Doornkamp, 1990). Ils prennent le processus d'érosion soit comme un tout, soit le séparent en volets ruissellement et topographie. Généralement développées sur des parcelles agricoles expérimentales homogènes, on transpose ces équations (modèles) sur une zone plus grande. Cette transposition est peu évidente surtout pour les paysages fragmentés, tel le milieu semi-aride à végétation éparse, composés d'une mosaïque d'unités (agricoles et non agricoles, sols nus, pâturages, forte pierrosité) se comportant différemment en termes d'érosion (Pickup and Marks, 2000 ; Bryan, 2000). En outre, les sols à forte pierrosité ne sont pris en compte par aucun des modèles (Bryan, 2000) car l'influence des graviers et des éléments plus grossiers vis-à-vis du ruissellement et, par conséquent, de l'érosion est difficile à appréhender (Inbar and Llerena, 2000 and Le Bissonnais *et al.*, 1998).

Les modèles d'érosion hydrique présentent des difficultés quant à leur application dans les milieux de forte énergie de relief (énergie supérieure à 500 m) qui présentent généralement des topographies complexes. En effet, les modèles ont généralement été développés sur des zones de pentes uniformes, faibles à modérées (inférieures à 18 %), ce qui fait, qu'en pratique, ils sont rarement applicables aux zones de forte énergie de relief (Di Stefano *et al.*, 2000). Dans ces modèles, on considère l'érosion en fonction du trajet des flux d'eau linéaires et sans référence aux flux convergents et divergents (Mitasova *et al.*, 1996). En outre, ces modèles ne prennent pas en compte l'érosion en ravin (Weltz *et al.*, 1998). Quant aux rares modèles adaptés aux zones de forte énergie de relief, ils présentent des limites paramétriques qui ne mettent pas en évidence la complexité topographique (Mitasova *et al.*, 1996).

Face à l'absence de modèles spécifiques au milieu semi-aride de forte énergie de relief et à végétation éparse, l'approche développée par Lamachère et Guillet (1996) présente une alternative. Bien qu'étant développée dans une zone de faible énergie de relief, cette approche porte sur un milieu semi-aride tropical non seulement à végétation éparse mais ayant des totaux pluviométriques, une répartition des pluies et une pédogenèse identiques à celles de notre zone (Russian Academy of Sciences, 1998 ; Demangeot, 1994 ; Zimmerer, 1993), d'où une adaptation nécessaire mais aussi rendue possible. Cette approche caractérise aussi bien les surfaces agricoles que naturelles. La dissociation du ruissellement et de la topographie favorise et facilite l'intégration de paramètres hydromorphométriques liés aux zones de forte énergie de relief. À partir d'expériences faites au Burkina-Faso sur un petit bassin versant, Lamachère et Guillet (1996) ont développé une approche de cartographie des risques d'érosion hydrique : le modèle de Lamachère et Guillet (MLG). Le MLG a été appliqué en début de saison des pluies, en fin de saison des pluies et sur toute l'année. L'approche consiste, d'une part, à créer une carte de potentiel de ruissellement par intégration de données hydropluviométriques et des unités géoécologiques (Ouattara *et al.*, 2002a) et, d'autre part, à combiner cette carte à l'esquisse géomorphologique (prise comme carte de vulnérabilité topographique). L'utilisation de l'esquisse géomorphologique comme carte de vulnérabilité est une simplification du paysage qui ne prend réellement pas en compte la complexité topographique (Ouattara *et al.*, 2002b). Outre l'amélioration du volet topographique, la télédétection et le système d'information géographique (SIG) permettent une meilleure acquisition et une intégration rigoureuse des données géoécologiques.

Plusieurs études de cartographie et de suivi des terres érodées ont été faites par télédétection en utilisant généralement les images optiques (ETM^+, HRV, AVIRIS, IRIS-1A) (Dwivedi *et al.*, 1997; Kumar *et al.*, 1996). Rarement l'image radar a été utilisée à cette fin (Solberg, 1992). Pourtant, l'utilisation combinée des données radar et optiques présente beaucoup d'intérêt car elles sont complémentaires (Rebillard *et al.*, 1992). Les images radar sont utilisables et efficaces en présence de couvertures nuageuses contrairement aux images optiques (Solberg, 1992). Cela fait que les images radar constituent un outil pertinent et efficace en régions tropicale et intertropicale régulièrement couvertes de nuages. Mais, dans le cadre de la cartographie de l'érosion hydrique, lorsque plusieurs images sont utilisées conjointement, la plupart des techniques utilisées consistent à faire une fusion des images avant de faire la classification (Dwivedi *et al.*, 1997 ; Metternicht, 1996 ; Kumar *et al.*, 1996 ; Solberg, 1992). L'inconvénient dans cette méthode est que les valeurs spectrales des pixels des différentes images d'origine sont détériorées (midifiées) avant la classification, d'où une perte d'information (Bloch et Maitre, 1994). Ainsi donc, dans le cadre de la cartographie des risques d'érosion hydrique dans un milieu semi-aride de forte énergie de relief, nous voulons montrer, d'une part, l'utilisation d'images multisources en minimisant la perte d'information et, d'autre part, l'utilité du MNT (modèle numérique de terrain), d'où un nouveau modèle : le MEH-SAFER (modèle d'érosion hydrique pour les milieux semi-arides de forte énergie de relief).

2. SITE D'ÉTUDE

Située en Bolivie, dans la Haute Vallée au sud de la Ville de Cochabamba, la zone d'étude est le bassin versant du lac Laka-Laka qui couvre 57 km^2 (figure 1) D'après CIDRE (1990), la séquence stratigraphique dans la région à l'étude présente une succession de roches sédimentaires de l'Ordovicien et de formations meubles quaternaires (fluviolacustres, colluvions et alluviales). Elles sont constituées de cailloux, de gravier, de sable, de silt et d'argile. Le bassin se trouve à une altitude de 2 800 m à 3 600 m avec des pentes de 20 % en moyenne (Northwest Hydraulic Consultants Ltd, 1995). Le système hydrographique qui débouche sur le réservoir du lac Laka-Laka est constitué de deux sous-bassins : les bassins de la rivière Calicanto et celui de la rivière Viscachani. Ces deux cours d'eau maintiennent un débit relativement important pendant les mois pluvieux et deviennent intermittents en période d'étiage (Northwest Hydraulic Consultants Ltd., 1995). Pendant l'été (décembre à mars) on enregistre 80 % des précipitations annuelles dont la moyenne est de l'ordre de 556,2 mm/an (CIDRE, 1990). Les températures maximale et minimale sont respectivement de 29,9°C et de –4,9°C, ce qui donne une moyenne annuelle de 12,5°C (Northwest Hydraulic Consultants Ltd., 1995).

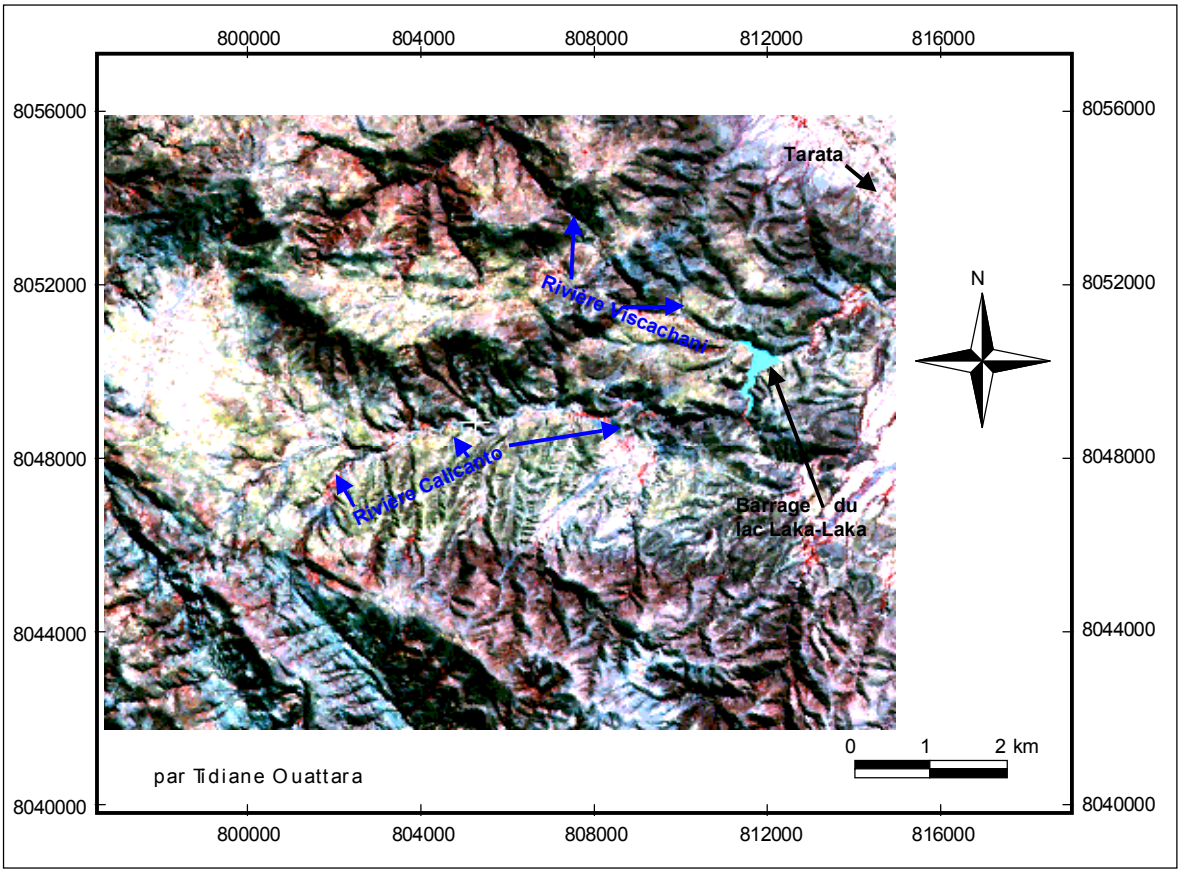


FIGURE 1 Bassin versant du lac Laka-Laka (image HRV du 8 juillet 1994). *Catchment area of the lake Laka-Laka (image HRV of July 8, 1994).*

3. MÉTHODOLOGIE

3.1 Principe du MEH-SAFER

Le MEH-SAFER repose sur la combinaison des potentiels de ruissellement et de la vulnérabilité topographique selon le principe du MLG (figure 2). En effet Ouattara *et al.* (2002a), ont utilisé la méthode exhaustive qui a consisté à faire la classification pour toutes les bandes de toutes les images disponibles (*RSO de RADARSAT-1, ETM+ de Landsat-7 et HRV de SPOT-4*) et cela, sans les fusionner au préalable, afin d'obtenir la carte des potentiels de ruissellement. Cette méthode a pour avantage de prendre en considération les spécificités spectrale et spatiale de chacune des images pour une meilleure caractérisation du milieu semi-aride qui présente un environnement très hétérogène. Ensuite, en utilisant les paramètres topographiques et grâce au MVT (modèle de vulnérabilité topographique), Ouattara *et al.*, (2002b) élaborent la carte de vulnérabilité topographique qui prend en compte la complexité des zones de forte énergie de relief. Dans cet article, nous intégrons les cartes de vulnérabilité topographique et de ruissellement (sous forme numérique) par un opérateur additif, ce qui donne le MEH-SAFER, d'où la carte des zones de risques d'érosion hydrique.

3.2 Validation du MEH-SAFER

Pour donner une idée sur la fiabilité et la robustesse du MEH-SAFER, nous avons fait une analyse sur deux plans : la précision et l'étude de sensibilité.

3.2.1 Précision du MEH-SAFER

Nous avons fait une estimation de l'erreur globale à travers celles des cartes du potentiel de ruissellement et de la vulnérabilité topographique. Il s'agit non seulement d'estimer les erreurs (incertitudes) liées à chaque couche d'information mais aussi à leur cumul. Cependant, ce cumul est perçu dans le sens d'une approche probabiliste (Le Bissonnais *et al.*, 1998). Cette approche s'appuie sur le fait que la probabilité de simultanéité des pires cas est très faible. Elle considère aussi l'erreur de l'ensemble comme égale à celle de la pire composante du système, soit la composante ayant la plus grande erreur. Selon Ouattara *et al.* (2002a), l'erreur liée au ruissellement devient la plus grande de celles liées aux différents intrants (formations meubles, taux de couverture végétale, occupation du sol, pluviométrie). Quant à la vulnérabilité topographique, Ouattara *et al.* (2002b) ont considéré l'erreur obtenue lors de la validation du modèle d'intégration des paramètres hydromorphométriques. Ainsi, la plus grande des erreurs liées au ruissellement et à la vulnérabilité topographique est celle estimée du résultat du MEH-SAFER.

3.2.2 Sensibilité du MEH-SAFER

Le principe de l'évaluation de la sensibilité consiste à vérifier la robustesse du modèle. En considérant les formations meubles et la topographie comme peu variables à court terme, nous avons fait la vérification à travers différents seuillages de l'inclinaison et de la longueur de la pente. En effet, contrairement au MEH-SAFER pour lequel des valeurs continues ont été utilisées dans l'élaboration de la carte de vulnérabilité (Ouattara *et al.*,2002b), il est coutume dans l'étude de l'érosion hydrique d'utiliser l'inclinaison et la longueur de la pente subdivisées en classes suivant une échelle nominale. Il s'agit de voir le comportement du MEH-SAFER lorsque l'inclinaison et la longueur de la pente sont intégrées sous forme de classes nominales dans l'élaboration de la carte de vulnérabilité topographique. Pour ce faire, nous utilisons le seuillage de l'inclinaison et la longueur de la pente en classes nominales en utilisant les travaux antérieurs et l'histogramme (Ouattara, 2002). En ce qui concerne l'approche basée sur les travaux antérieurs, nous avons choisi les classes d'inclinaison de pente de la FAO (1990). Pour la longueur de la pente, il est admis que les longueurs minimale et maximale sur lesquelles les modèles d'érosion hydrique peuvent s'appliquer sont respectivement 10 m et 150 m (Weltz *et al.*, 1998). Nous avons d'abord retenu les longueurs nulles qui sont en fait des zones de pente nulle caractérisées par une érosion nulle à très faible (FAO, 1990). Ensuite, vu la résolution de travail (30 m), nous avons fait des classes avec des pas de 1 pixel. Pour ne pas avoir trop de classes, nous avons considéré, comme dernière classe, tous les pixels de 90 m et plus car, à partir de cette valeur, l'effet de l'érosion hydrique reste pratiquement constant selon Weltz *et al.* (1998). L'approche par histogramme a consisté à faire un seuillage de l'inclinaison et de la longueur de la pente en utilisant leurs histogrammes basés sur le regroupement de leurs valeurs intrinsèques.

En utilisant l'inclinaison et la longueur de la pente sous forme nominale, nous rendons ainsi discrets ces deux paramètres qui sont, au départ, continus. Dans le principe de l'analyse discriminante (Ouattara *et al.*, 2002b), les variables indépendantes peuvent être sous forme discrète à condition qu'elles soient binaires (0 et 1). Cela rend le modèle d'intégration interprétable (Cadieux, 1999). Alors, nous avons binarisé les deux paramètres à travers le processus d'extraction d'évidences. Et, puisqu'il est recommandé d'avoir la même échelle d'appréciation de toutes les variables indépendantes impliquées dans le développement du modèle (Hair *et al.*, 1995), nous avons seuillé tous les autres paramètres hydromorphométriques afin de distinguer des évidences et afin de procéder à leur binarisation.

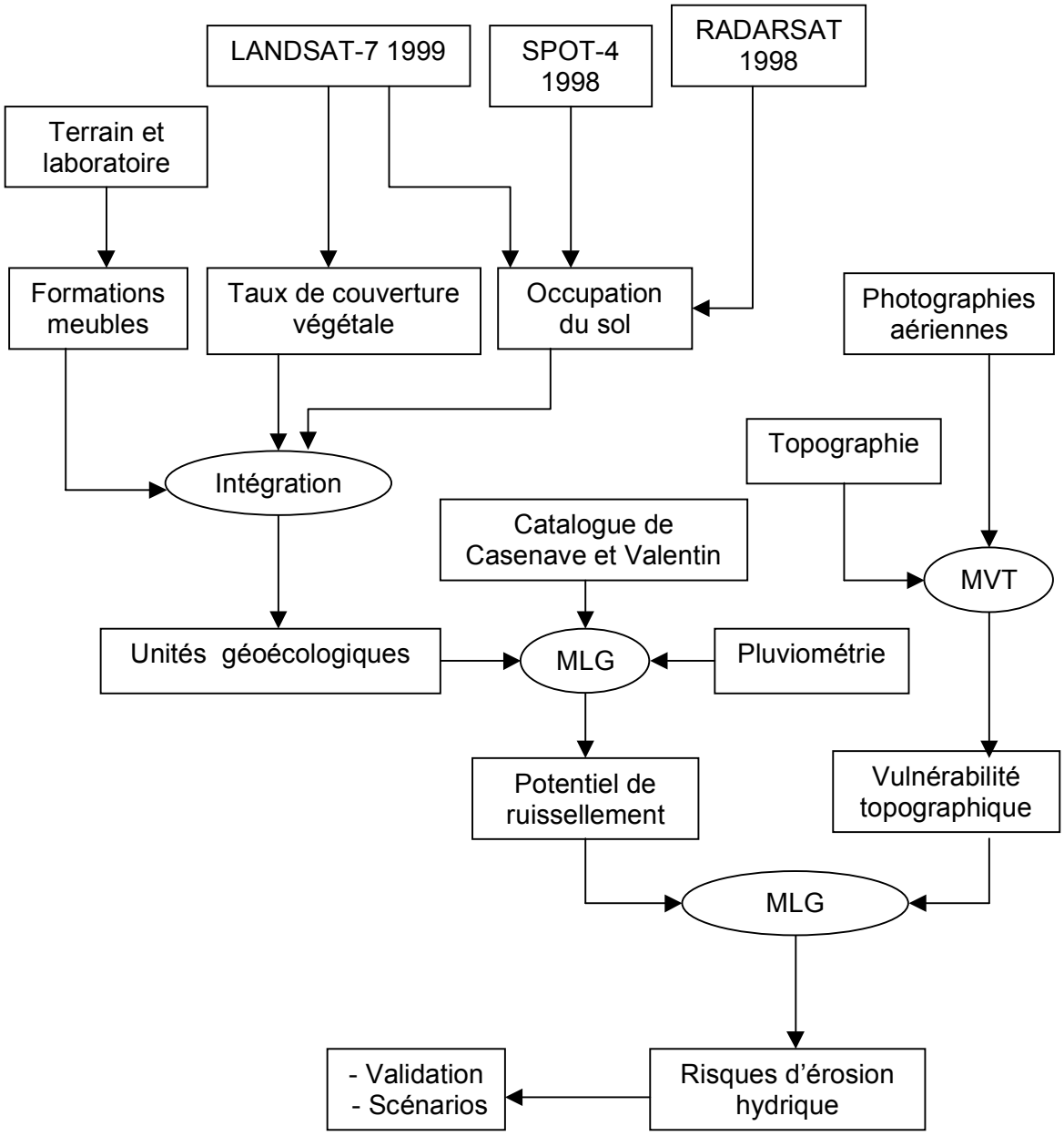


FIGURE 2 Méthodologie générale du MEH-SAFER. *General methodology of the MEH-SAFER.*

Le MNT a été subdivisé avec un pas de 100 m. Cette distance a été choisie afin que nous ayons non seulement un pas de seuillage minimal supérieur à la marge d'erreur (± 80 m) obtenue lors de la délimitation des placettes (ayant servi aux prélèvements sur le terrain) mais aussi divisible par l'équidistance sur la carte topographique (20 m) utilisée (Ouattara, 2002). Quant à l'orientation de la pente, chaque pixel a une valeur qui est comprise entre 0 et 359°. Étant donné que chaque valeur correspond à une direction géographique donnée, nous avons identifié ainsi les orientations de tous les pixels de l'image afin de les regrouper par classes. En conformité avec la signification des valeurs selon Florinsky (2000), nous avons reclassifié les courbures topographiques en fonction des classes mobilisation, transit et accumulation. Le sens de l'écoulement a été subdivisé en tenant compte de la classification de Jenson et Domingue (1988). En tenant compte de l'étude comparative faite par Beven et Kirkby (1979) entre l'indice topographique (IT) et la saturation du sol en eau, nous avons établi une classification de l'indice topographique. La classification de l'indice d'énergie de l'eau (IEE) est faite d'après Dymond et Harmsworth (1994) en classes faible, moyen et fort.

Outre l'inclinaison et la longueur de la pente, des autres paramètres hydromorphométriques, nous avons extrait 34 évidences et donc autant de cartes binaires. Pour un paramètre hydromorphométrique donné, une évidence est considérée comme l'existence ou non d'une classe, d'où une carte binaire de 0 et 1. Par exemple, pour le paramètre « inclinaison de la pente », d'après les travaux antérieurs (FAO, 1990), nous avons quatre évidences (pentes faible, moyenne, forte et très forte), d'où quatre cartes binaires. Lorsque nous prenons en compte chaque type de seuillage de l'inclinaison et de la longueur de la pente, nous avons au total 43 évidences.

Nous avons d'abord déterminé la vulnérabilité topographique en fonction de chaque approche de seuillage de l'inclinaison et de la longueur de la pente. Le principe reste le même que lors du développement du MVT (Ouattara *et al.*, 2002b). Nous procédons à la validation du modèle d'intégration de chaque approche de la même manière que celle du MVT. Enfin, en utilisant le MEH-SAFER, la carte de vulnérabilité topographique issue de chaque approche est combinée séparément avec la carte de ruissellement pour obtenir deux cartes des risques d'érosion hydrique : l'une en fonction du seuillage préconisé dans les travaux antérieurs et l'autre en fonction du seuillage par l'histogramme. Ces résultats sont comparés à celui obtenu avec les valeurs continues (Ouattara *et al.*, 2002b) afin d'évaluer la sensibilité du MEH-SAFER.

4. RÉSULTATS

La vulnérabilité topographique (figure 3) combinée au potentiel de ruissellement (figure 4) permet de voir que les risques d'érosion hydrique (figure 5) supérieurs à 0,75 occupent environ 6 % du bassin soit 342 ha. Ceux inférieurs à 0,50 couvrent 4 902 ha, soit 86 % du bassin avec spécifiquement 13 % pour la classe 0 à 0,25 et 73 % pour 0,25 à 0,50. En considérant les erreurs liées aux différents paramètres, le ruissellement a été déterminé avec une erreur maximale de 20 %. En ce qui concerne la vulnérabilité topographique, la validation du modèle ayant servi à son élaboration a donné 13 % d'erreur. En prenant toutes ces erreurs en compte, celle liée au résultat du MEH-SAFER a été estimée, au maximum, à 20 %..

En général, le bassin versant a une vulnérabilité inférieure à 0,25 (tableau 1). Cependant, les méthodes utilisant les valeurs continues et l'histogramme sont statistiquement semblables. Elles donnent respectivement 87 % et 86 % pour les vulnérabilités inférieures à 0,50 et 12 % et 13 % pour celles supérieures à 0,50. Pour les vulnérabilités inférieures à 0,50, la méthode « par les travaux antérieurs » montre que 97 % du bassin versant est concerné contre 2 % pour les vulnérabilités supérieures à 0,50.

Si statistiquement la méthode « par les valeurs continues » et celle « par l'histogramme » n'ont pas une démarcation nette, qualitativement il en est autrement. À l'analyse visuelle des cartes de vulnérabilité topographique (figures 3, 6, 7), nous constatons que celle issue de la méthode utilisant les valeurs continues des données (figure 3) est la plus nuancée. Sur une telle carte (figure 3), les zones considérées comme ayant une vulnérabilité maximale (1) sont en partie considérées comme nulles (0) sur celle issue de l'histogramme (figure 6). Sur la carte obtenue par la méthode « par les travaux antérieurs » (figure 7), ces mêmes zones présentent une vulnérabilité nulle. En outre, la carte issue de la méthode utilisant les travaux antérieurs (figure 7) présente tout le bassin comme ayant une vulnérabilité pratiquement nulle. Statistiquement et qualitativement, ces constats sont les mêmes en ce qui concerne les risques d'érosion hydrique (figures 8 et 9).

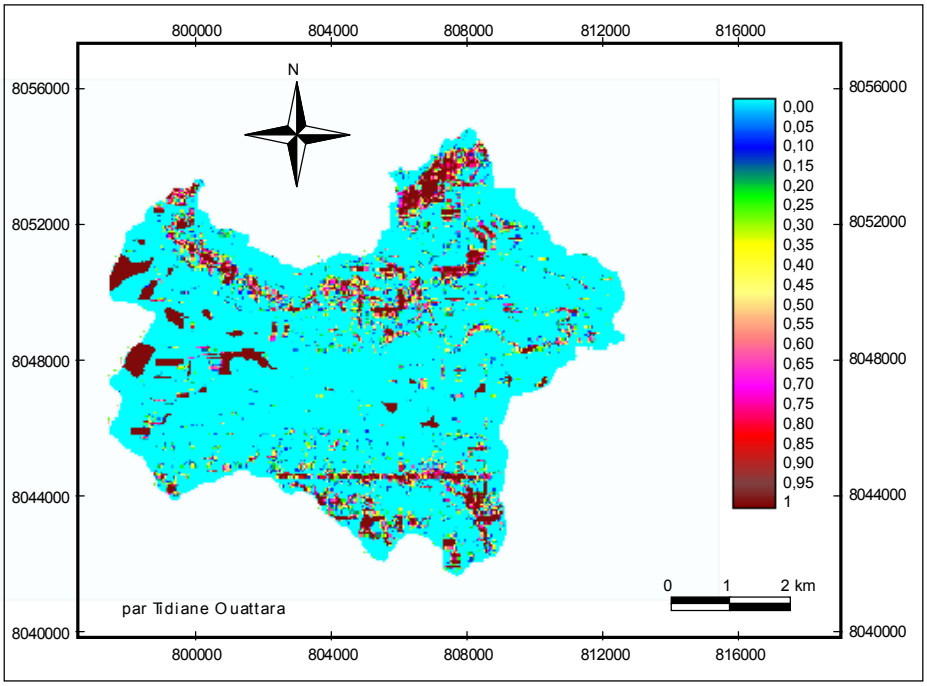


FIGURE 3 Vulnérabilité topographique du bassin du lac Laka-Laka à partir des valeurs continues. *Topographic vulnerability of the basin of the lake Laka-Laka starting from the continuous values.*

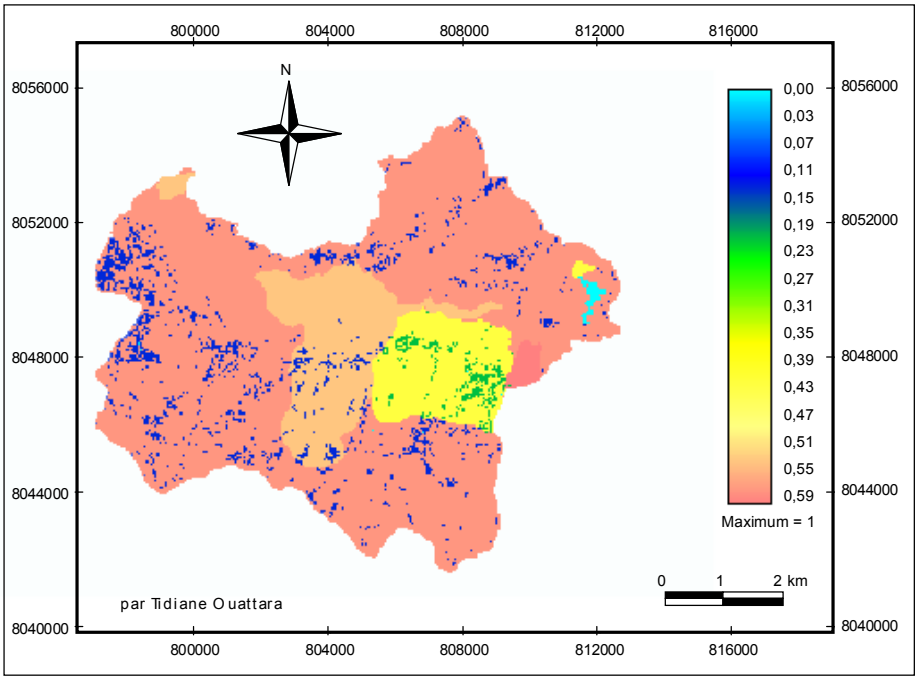


FIGURE 4 Potentiel de ruissellement annuel dans le bassin du lac Laka-Laka à partir des valeurs continues. *Potential of annual streaming in the basin of the lake Laka-Laka starting from the continuous values.*

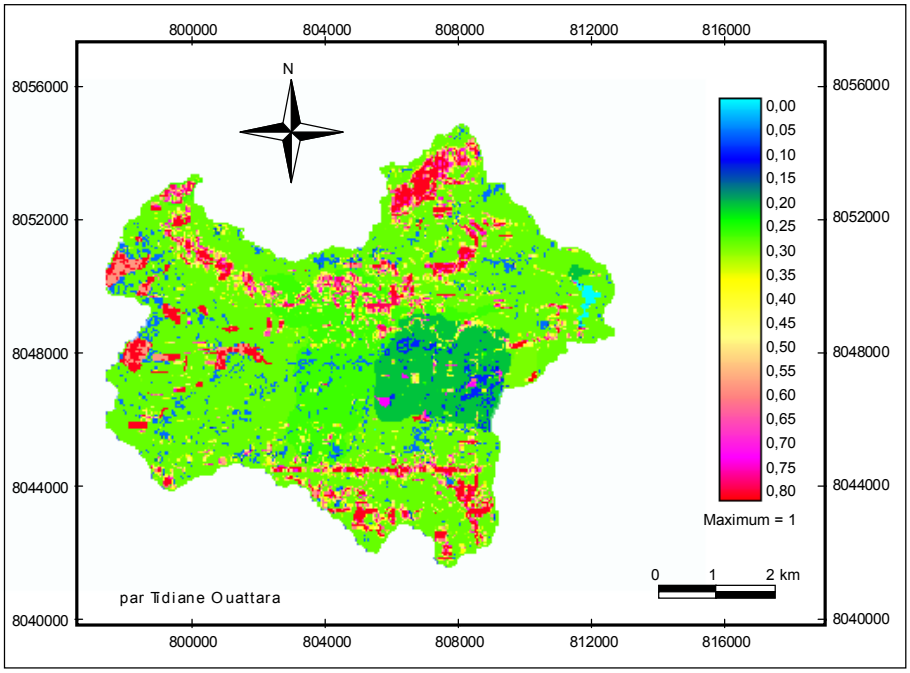


FIGURE 5 Risque d'érosion hydrique dans le bassin du lac Laka-Laka à partir des valeurs continues. *Risk hydrous erosion in the basin of the lake Laka-Laka starting from the continuous values.*

TABLEAU 1 Comparaison des résultats issus des valeurs continues et des différentes méthodes de seuillage. *Comparison of the results resulting from the continuous values and the various methods of thresholding.*

	Superficie (%) par thème et par méthode de seuillage					
	Vulnérabilité topographique			Risques d'érosion hydrique		
	Méthodes			Méthodes		
Échelle d'évaluation (de 0 à 1)	Valeurs continues	Histogramme	Travaux antérieurs	Valeurs continues	Histogramme	Travaux antérieurs
0 - 0,25	83	85	97	13	14	15
0,25 - 0,50	4	1	0	73	73	82
0,50 - 0,75	3	1	1	7	7	1
0,75 - 1	9	12	1	6	5	1
Eau	1	1	1	1	1	1
Total	100	100	100	100	100	100

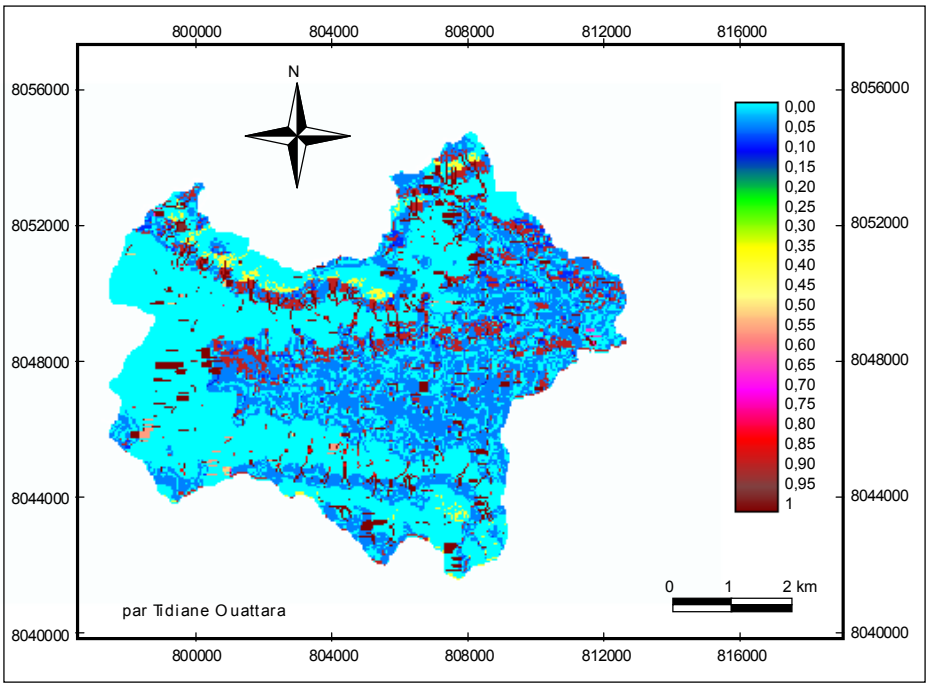


FIGURE 6 Vulnérabilité topographique selon la méthode par histogramme. *Topographic vulnerability according to the method by histogram.*

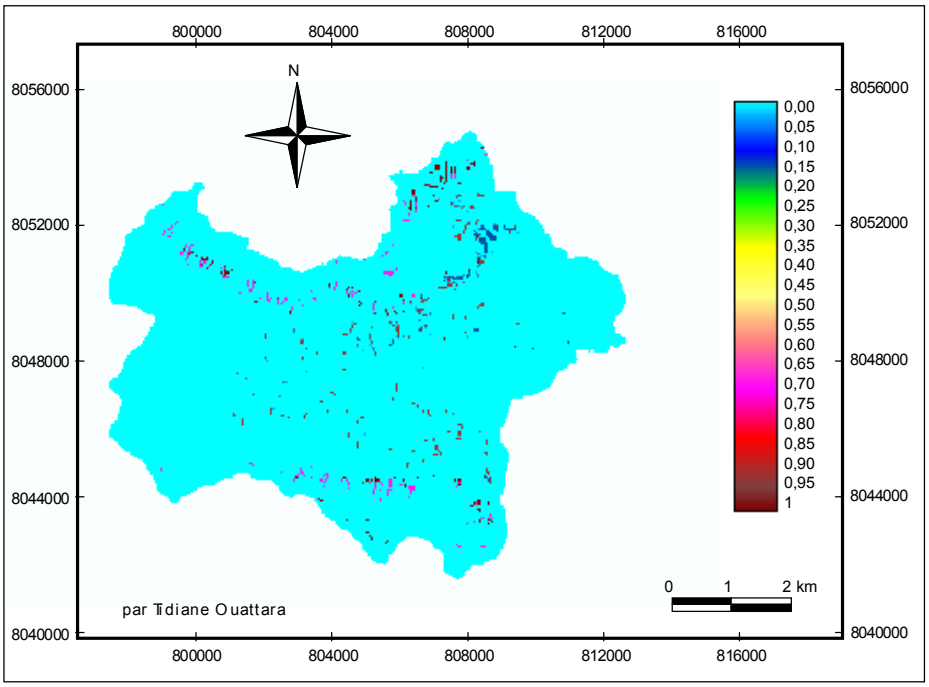


FIGURE 7 Vulnérabilité topographique en fonction du seuillage à partir des travaux antérieurs. *Topographic vulnerability according to the thresholding starting from former work.*

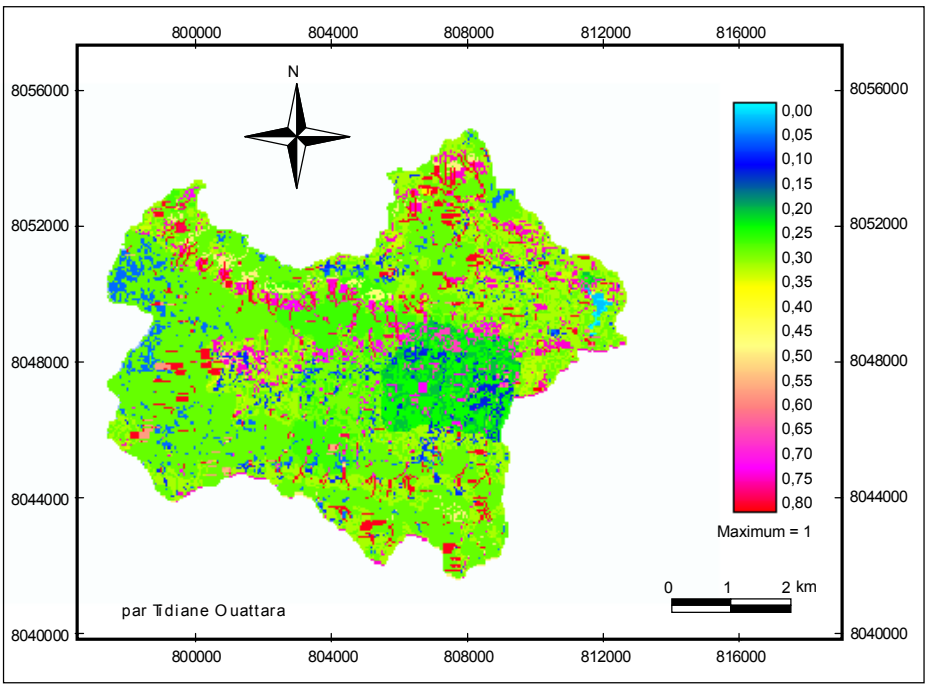


FIGURE 8 Risque d'érosion hydrique en fonction de la méthode par histogramme. *Risk hydrous erosion according to the method by histogram.*

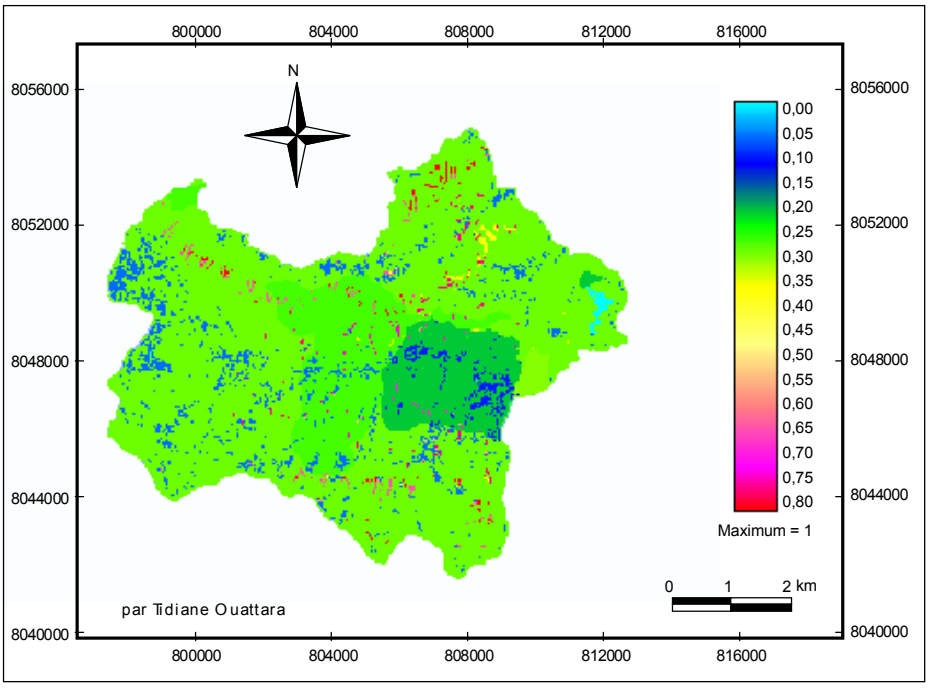


FIGURE 9 Risque d'érosion hydrique en fonction du seuillage à partir des travaux antérieurs. *Risk hydrous erosion according to the thresholding starting from former work.*

5. INTERPRÉTATION ET DISCUSSION

En appliquant le MEH-SAFER à la région andine bolivienne, il est possible d'adapter un modèle de risques d'érosion hydrique développé en milieu semi-aride de faible énergie de relief à un autre milieu semi-aride de forte énergie de relief. De façon particulière, nous avons adapté le modèle de Lamachère et Guillet au bassin du lac Laka-Laka à travers le développement du MEH-SAFER. En plus de sa robustesse, l'erreur liée aux résultats du MEH-SAFER est estimée au maximum à 20 %. L'utilisation de seuillages basés sur les travaux antérieurs et sur l'histogramme des données d'inclinaison et de longueur de la pente met en évidence le fait que le modèle ne fournit pas de résultats aux antipodes. Avec les nuances qu'elle apporte aux résultats finaux, la méthode utilisant les valeurs continues est appropriée aux études opérationnelles. Par contre, celle de l'histogramme est appropriée aux études décisionnelles. À travers cette étude, nous démontrons la possibilité de développer une méthodologie permettant de maximiser l'extraction d'informations issues d'images multisources et de les intégrer à des données auxiliaires et topographiques dans le but de cartographier les risques d'érosion hydrique.

Dans l'ensemble, le bassin versant du lac Laka-Laka est moyennement fragile. Sa susceptibilité à l'érosion hydrique est principalement comprise entre 0,25 et 0,5, ce qui pourrait être considéré comme étant relativement bas. En somme, le résultat obtenu avec le MEH-SAFER concernant la superficie à risque d'érosion modéré à fort (86 % du bassin) va dans le sens que le résultat obtenu (70 %) par Fabri (1991) dans la vallée de Tarija qui est voisine au bassin du lac Laka-Laka. Les risques d'érosion hydrique sont en général plus élevés sur les pentes très fortes que sur les sommets et sur les bas de pente.

Nous avons démontré que l'utilisation habituelle des données sous forme de classes est moins efficace et entraîne un éloignement significatif de la réalité de terrain. Cet éloignement est plus important surtout pour la classification basée sur les travaux antérieurs. Cependant, à défaut d'utiliser les données brutes dans une forme continue, nous conseillons le seuillage par histogramme qui est plus pertinent que celui fait selon les travaux antérieurs.

Dans le cadre de cette recherche, la généralisation liée aux paramètres hydromorphométriques issus du MNT et à la spatialisation des phénomènes de ruissellement a une répercussion sur le résultat du MEH-SAFER. Cela pourrait s'expliquer par la résolution de travail de 30 m qui nous est imposée par l'image ETM$^+$. En effet, nous ne pouvons extraire et mettre en évidence toutes les informations pertinentes identifiables et discriminables dans l'intervalle de 0 m à 30 m. Cependant, la méthodologie que nous avons développée est applicable à toutes les résolutions spatiales. Par ailleurs, la pluie est considérée comme uniforme sur tout le bassin versant, ce qui est une simplification de la réalité surtout en milieu de forte énergie de relief où les pluies varient généralement en altitude. Au-delà de la simplification, il faut voir l'utilisation de la pluviométrie dans le cadre purement méthodologique.

Les modèles de localisation et de quantification des pertes de sol et de production de sédiments (Fabbri,1991 ; Ouattara, 1996 ; Morgan *et al.*, 1998) n'étant pas objectivement applicables aux milieux semi-arides de forte énergie de relief, le MEH-SAFER constitue un outil précurseur car il donne des indications sur les superficies des zones à risques d'érosion hydrique. Le MEH-SAFER est une première étape dans le processus d'élaboration d'un modèle de localisation et de quantification de l'érosion hydrique en milieu semi-aride de forte énergie de relief. Enfin, nous pouvons conclure sur la base du travail de terrain qu'il n'y a aucune érosion active reliée directement à la création du barrage et du lac Laka-Laka.

Au terme de ce travail, nous venons d'ouvrir une voie méthodologique sur l'utilisation conjointe radar/optique dans la modélisation des risques d'érosion hydrique. Notre méthodologie pourra servir de base à d'autres recherches sur l'érosion nécessitant l'utilisation d'images multisources. L'innovation que nous avons apportée avec l'utilisation de paramètres hydromorphométriques pour l'étude de la vulnérabilité topographique et des risques d'érosion hydrique est une autre voie à explorer. D'autres recherches pourront en effet évaluer l'utilisation d'autres paramètres hydro-morphométriques et d'autres méthodes statistiques à ces mêmes fins. De ce fait, notre recherche implique une orientation des futurs travaux vers le développement de modèles de plus en plus flexibles, tels le MEH-SAFER et le MVT, applicables à plusieurs milieux naturels différents. Enfin, les résultats obtenus encouragent l'utilisation des données brutes (valeurs continues) ou seuillées à partir de leur histogramme dans les travaux futurs concernant l'érosion hydrique.

6. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Le MEH-SAFER permet de délimiter les zones à haut risque, ciblant de ce fait la superficie sur laquelle les décideurs et les gestionnaires doivent

s'activer. D'autres moyens appropriés pourraient donc être utilisés afin de ressortir plus de nuances sur cette surface à haut risque. Dans cette optique, l'utilisation d'un MNT moins généralisé serait d'un apport significatif. Le MEH-SAFER pourrait être revu dans le sens de l'intégration des capacités de localisation et de quantification des pertes de sols et aussi de production de sédiments.

Remerciements

Nous remercions le Gouvernement ivoirien, le CISTEL en Bolivie, l'AUCC ainsi que le CRSNG (4250) pour le soutien financier et matériel ayant permis la réalisation de ce projet.

Références bibliographiques

Beasley, D. B., Higgins, L. F. and Monke, E. J. (1980) ANSWERS : A model for watershed planning. Transaction American Society of Agricultural Engineers, n°23, p. 938-944.

Beven, K. J. and Kirkby, M. J. (1979) A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. Hydrological Sciences Bulletin, vol. 24, n°1, p. 43-69.

Bloch, I. et Maitre, H. (1994) Fusion de données en traitement d'images : modèles d'information et de décisions. Traitement du signal, vol. 11, n°6, p. 435-446.

Bryan, R. B. (2000) Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. Geomorphology, vol. 32, p. 385-415.

Cadieux, J. (1999) Traitement statistique des données. Notes de cours MQG 810, Université de Sherbrooke, 232 p.

Casenave, A. et Valentin, C. (1989) Les états de surfaces de la zone sahélienne, Influence sur l'infiltration. Éditions ORSTOM, Paris, 229 p.

CIDRE (Centro de Investigacion y Desarrollo Regional) (1990) Proyecto multiple de recursos hidricos Laka-Laka. Cochabamba, Bolivia, 56 p.

Company-Remond, A. (1996) Images SAR : possibilité d'extraction d'un paramètre physique du ruissellement, la rugosité (modélisation et expérimentation). Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, 254 p.

Cooke, R. U. and Doornkamp, J. C. (1990) Geomorphology in environmental management. A New Introduction. Clarendon Press, Oxford, 410 p.

Demangeot, J. (1996) Les milieux naturels du globe. Armand Colin, Paris, 337 p.

Di Stefano, C., Ferro, V., Porto, P. and Tusa, G. (2000) Slope curvature influence on soil erosion and deposition processes. Water Ressources Research, vol. 36, n°2, p. 607 - 617.

Dimitros, A. E. and Evangelos, I. F. (1999) Modified quantitative estimation model of erosion and degradation in four mountainous basins. Integrated methods in catchment hydrology-tracer, remote sensing and new hydrometric techniques. Proceedings of IUGG 99 Symposium HS4, IAHS Publication, n° 258, Birmingham, p. 275-279.

Dwivedi, R. S., Ravi Sankar, T., Venkataratnam, L., Karale, R. L., Gawande, S. P., Seshagiri Rao, K. V., Senchaudhary, S., Bhaumik, K. R. and Mukharjee, K. K. (1997) The inventory and monitoring of eroded lands using remote sensing data. International Journal of Remote Sensing, vol. 18, n°1, p. 107-119.

Dymond, J. R. and Harmsworth, G. R. (1994) Towards automated land ressource mapping using digital models. ITC Journal, n°2, p. 129-138.

Fabbri, K. (1991) The use of geographic information systems and remote sensing analysis for the assessment of soil erosion hazard : a case study in central Bolivia. M.sc. Thesis, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, Enschede, 141 p.

FAO (1990) Guidelines for soil description. Rome, 70 p.

Florinsky, I. V. (2000) Relationships between topographically expressed zones of flow accumulation and sites of fault intersection : analysis by means of digital terrain modelling. Environmental Modelling and Software, vol. 15, p. 87-100.

Foster, G. R., Meyer, L. D. and Onstad, C. A. (1977) An erosion equation derived from basic erosion principles. Transaction of The ASAE, vol. 20, n°4, p. 672-682.

Hair, J. F., Anderson, R. E., Tatham, R. L. and Black, W. (1995) Multivariate data analysis. 4th edition, Prentice-Hall, London, 745 p.

Inbar, M. and Llerena, C. A. (2000) Erosion processes in high mountain agricultural terraces in Peru. Mountain Research Development, University of California Press, California, vol. 20, n°1, p. 72-79.

Jenson, S. K. and Domingue, J. O. (1988) Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 54, n°11, p. 1593-1600.

Kumar. A. B., Dwivedi, R. S. and Tiwari, K. N. (1996) The effects of image scale on delimitation of eroded land using remote sensing data. International Journal of Remote Sensing, vol. 17, n°11, p. 2135-2143.

Lamachère, J.-M. et Guillet, F. (1996) Télédétection, états de surface et cartographie des risques d'érosion en zone soudano-sahélienne (Bassin versant de Samniwéogo, province du Yatenga, Burkina Faso). Réseau érosion, Bulletin 16, ORSTOM, Montpellier, p. 375-390.

Le Bissonnais, Y., Montier, C., Daroussin, J. et King, D. (1998) Cartographie de l'aléa «Érosion des sols» en France. Collection Études et Travaux, n°18, INRA, Paris, 72 p.

Metternicht, I. G. (1996) Detection and monitoring land degradation features and processes in the Cochabamba valleys, Bolivia. A synergestic approach. Thèse de Doctorat, Université de Ghent (Belgique), 390 p.

Mitasova, H., Hofierka, J., Zlocha, M. and Iverson, L. R. (1996) Modelling topographic potentiel for erosion and deposition using GIS. International Journal Geographical Information System, vol. 10, n°5, p. 629-641

Morgan, R.P.C., Quinton, J.N., Smith, R.E., Govers, G., Poesen, J.W.A., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D. and Styczen, M.E. (1998) The european soil erosion model (EUROSEM) : a process-based approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. Earth Surface Processes and Landforms, n°23, p. 527-544.

Northwest Hydraulic Consultants Ltd. (1995) Assessment of sedimentation of the Laka-Laka reservoir, Bolivia. Northwest Hydraulic Consultants Ltd, North Vancouver, 107 p.

Ouattara, T. (1996) Système d'information géographique et impacts agricoles sur l'environnement : cas d'un bassin versant. Mémoire de maîtrise, Département de géographie, Université de Sherbrooke, 120 p.

Ouattara, T. (2002) Modélisation de l'érosion hydrique en milieu semi-aride de forte énergie de relief à partir de données de télédétection : application à la Bolivie. Thèse de doctorat, Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke, 170 p.

Ouattara, T., Gwyn, Q. Hugh J., Dubois, J.-M. M (2002a) Development of a topographic vulnerability model using a digital Elevation model of (DEM) and air photographs. Earth Surface Processes and Landforms, 15 p. (soumis)

Ouattara, T., Gwyn, Q. Hugh J., Dubois, J.-M. M (2002b) Evaluation of potential runoff in high relief semi-arid regions using remote sensing data in Bolivia. Canadian Journal of Remote Sensing, 17 p. (soumis)

Pickup, G. and Marks, A. (2000) Identifying large-scale erosion and deposition processes from airborne gamma radiometrics and digital elevation models in a weathered landscape. Earth Surface Processes and Landforms, vol. 25, p. 535-557.

Rebillard, Ph., Dallemand, J. F., Reichert, P., Lichtenegger, J. et Soussi, A. (1992) Utilisation de données micro-ondes et optiques pour la cartographie de l'utilisation du sol en Tunisie centrale. Photo-interprétation, n°92-1, p. 37-39.

Russian Academy of Sciences (1998) Resources and Environment World Atlas. Institute of Geography, First edition, Ed. Hölzel, Vienna, 2 tomes, 190 p.

Solberg, R. (1992) Monitoring soil erosion in agricultural fields by ERS-1 SAR. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 5, p. 1356-1359.

Weltz, M. A., Kidwell, M. R. and Fox, D .H. (1998) Influence of abiotic and biotic factors in measuring and modelling soil erosion on rangelands : state of knowledge. Journal of Range Management, n°51, p. 482-495.

Wischmeier, W. H. and Smith, D. D. (1958) Rainfall energy and its relationship to soil loss. Transactions American Geophysical Union, vol. 39, p. 285-291.

Zimmerer, K. S. (1993) Soil erosion and labor shortages in the Andes with special reference to Bolivia, 1953-1991 : implications for "conservation-with-development ". World Development, vol. 21, n°10, p. 1659-1675.