

Estimation expédiée du risque érosif dans l'amont du bassin versant du Nahr el Kalb

Hussein El Hage Hassan, Laurence Charbel and Ali Khyami

Volume 22, Number 3, December 2022

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/1101297ar>

DOI: <https://doi.org/10.4000/vertigo.39185>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Université du Québec à Montréal
Éditions en environnement VertigO

ISSN

1492-8442 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Hassan, H. E. H., Charbel, L. & Khyami, A. (2022). Estimation expédiée du risque érosif dans l'amont du bassin versant du Nahr el Kalb. *VertigO*, 22(3), 1–25.
<https://doi.org/10.4000/vertigo.39185>

Article abstract

Soil degradation by water erosion is a natural phenomenon that can be amplified by anthropogenic actions. The consequences of this phenomenon are harmful and can harm the intrinsic characteristics of the soil, and lead to its disappearance in certain cases. For mapping the erosion hazard upstream of Nahr el Kalb watershed, we have adopted a hierarchical approach, called MESALES, that combines the weighted parameters of erosion (land use, slope, soil erodibility and climate) using GIS. The soil erodibility was calculated from the equation of Wischmeier et Smith (1960; 1978) to take account of the specific environmental features. The results of this work show the predominant role of plant cover. 67% of the study area is undergoing strong and very strong erosion, mainly in sectors of either degraded plant cover or no plant cover. The overall accuracy of the model and the Kappa index resulting from it are estimated at 84% and 80% respectively.



Estimation expédiée du risque érosif dans l'amont du bassin versant du Nahr el Kalb

Hussein El Hage Hassan, Laurence Charbel et Ali Khyami

Introduction

- 1 Sous l'impact de la pression démographique et de l'extension des sols nus, qui sont considérablement accrus au détriment des surfaces boisées, le bassin versant du Nahr el Kalb (Liban) mérite une réflexion sur l'avenir de ses ressources naturelles. Dominés par un climat méditerranéen, le Mont-Liban en général et la région d'étude en particulier, présentent une vulnérabilité à l'érosion hydrique compte tenue de l'agressivité climatique, la rigidité de la pente, la fragilité du sol et l'absence d'un couvert végétal protecteur.
- 2 La mise à nu des sols, provoquée par la surexploitation de la végétation naturelle et la récurrence des feux de forêt, livrent les formations végétales à un véritable désastre qui peut prendre des proportions alarmantes tant pour la population que pour l'environnement (érosion, pollution, dégât économique, et cetera). Jadis, le Mont-Liban était réputé pour ses vastes surfaces forestières. Les surfaces boisées façonnaient le paysage du Mont-Liban qui devait sa situation politique, dans l'ancien Orient, à sa richesse en bois. Autrefois, le Mont-Liban, par le biais des Phéniciens, répondait aux besoins de l'Égypte, de la Mésopotamie et de l'Anatolie en bois. Les annales de Thoutmosis demeurent un témoin de l'importance du bois libanais pour les œuvres de sa majesté. Plus tard, au Moyen Âge (Harfouche et al., 2016), les résidents du Mont-Liban ont étendu leurs activités agricoles et pastorales aux zones forestières : le bois était utilisé pour l'énergie et la construction. Lors de la Seconde Guerre mondiale, le bois a été exploité pour la construction des chemins de fer. Après cela, il n'est resté que des surfaces fragmentées et discontinues de forêts.

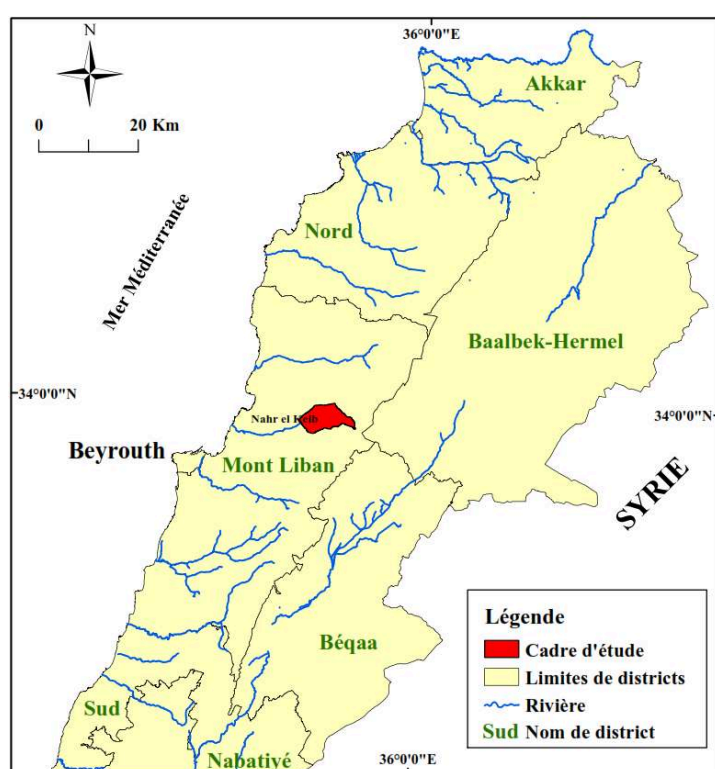
- 3 En outre, l'abus d'exploitation qui touche les surfaces naturelles entraîne une véritable menace, qui implique la modification du couvert végétal en favorisant les végétations herbacées aux dépens des strates hautes (Schaffhauser et al., 2015) et en minimisant la protection des sols. Autrefois, l'élevage constituait un élément important du système économique traditionnel qui a permis aux populations locales de gagner davantage et d'accroître leur nombre de bétails (caprins et ovins). Cette activité, qui fut indispensable à la survie des troupeaux en l'absence des mesures de substitution, implique des conséquences néfastes sur l'environnement et le paysage.
- 4 Afin d'étudier l'impact de l'absence du couvert végétal sur le paysage, il conviendrait de mettre en évidence les facteurs naturels (interactions entre espèces, climat) et anthropiques qui en sont à l'origine. Il s'agit d'analyser les causes et la dynamique du risque érosif et de faire l'inventaire des secteurs vulnérables.
- 5 Pour interpréter la question de l'aléa érosif et tenter de cartographier sa répartition spatiale, il est indispensable d'évaluer les paramètres les plus significatifs. Des modèles sont déjà éprouvés dans divers pays. Certains usent d'approches qualitatives (De Ploey et al., 1989 ; Le Bissonnais et al., 1998), d'autres d'approches quantitatives (Wischmeier et Smith, 1978 ; Frenette et Julien, 1986 ; De Jong et Riezebos, 1997 ; Kirkby et al., 2003). Pour la présente étude, il a été nécessaire de mettre au point un outil simple et performant par le biais d'un modèle qualitatif, MESALES, débouchant sur une cartographie au sein d'un Système d'information géographique (SIG). À l'échelle du travail, l'évaluation de l'aléa érosif apparaît à travers la hiérarchisation et la combinaison de plusieurs paramètres (la pente, le sol, le couvert végétal et la pluie). Le résultat en est une carte de synthèse qui expose les zones vulnérables aux risques érosifs. Cette carte doit permettre d'élaborer des plans de prévention et de protection afin de contrôler le processus d'érosion hydrique qui décape les couches supérieures des sols.
- 6 Après une présentation concise de la région d'étude, la méthodologie sera développée en s'appuyant sur l'équation de MESALES et en remplaçant l'indice de l'érodibilité de sol par la valeur du facteur K de la formule de Wischmeier et Smith (1978), qui requiert des données sur la granulométrie, la matière organique, la perméabilité et la structure du sol. L'estimation de l'aléa érosion sera exposée sous forme de résultats spatialisés, avant d'être discutée.

Cadre d'étude

- 7 Le cadre d'étude se trouve être une partie du bassin amont du Nahr el Kalb qui, relève administrativement des régions de Ftouh Kesrouane et Metn. Le secteur d'étude, qui occupe une superficie de 3976 hectares, est compris entre 33°56'42.73" et 34° 0'27.66" de latitude Nord et 35°44'25.71" et 35°51'47.25" de longitude Est (Figure 1). Ce bassin doit son nom à Nahr el Kalb, un fleuve côtier intermittent, alimenté par des précipitations automnales et hivernales. Nahr el Kalb, qui s'alimente principalement des hauts massifs de Jabal Sannine, parcourt une distance de 31 kilomètres pour finir dans la Méditerranée. C'est une région montagneuse, limitée par la chaîne occidentale, et l'on observe un risque d'érosion hydrique fort sur les versants. Cette région est caractérisée par une grande variété dans son altitude et sa géologie.

- 8 Du point de vue topographique, ce secteur associe plusieurs unités géomorphodynamiques :
- La partie inférieure, qui présente des reliefs assez modestes, a pour altitude minimale le seuil de 830 mètres ;
 - Les falaises fortement escarpées ;
 - Le plateau qui se situe entre 2000 mètres et le point culminant (2480 mètres). D'après la courbe hypsométrique (Figure 2), la pente moyenne y est de l'ordre de 28 degrés.
- 9 Le substratum géologique de la partie inférieure est formé essentiellement du grès de base et des formations argileuses et marneuses de l'aptien inférieur. Les falaises sont composées de calcaires et calcaires dolomitiques du jurassique moyen et supérieur et de l'aptien supérieur. D'autre part, le calcaire cénomani est présent dans le haut plateau.

Figure 1. Localisation de la zone d'étude



- 10 Le climat de type méditerranéen est associé à une irrégularité saisonnière des précipitations : un hiver brutalement arrosé et un été chaud et sec, ce qui favorise la fragilisation de la structure des sols, laquelle présente une certaine vulnérabilité à l'érosion et souffre de la faible teneur en matière organique. Les moyennes annuelles des précipitations dans le secteur d'étude varient avec l'altitude. Les quantités enregistrées à l'exutoire sont de 1100 millimètres. Cette quantité s'accroît vers l'est, pour atteindre les 1500 millimètres. En amont, les précipitations ont lieu sous forme de neige, ce qui assure, lors de la fonte, la recharge de l'aquifère karstique du cénomani. Globalement, le réseau hydrographique, qui demeure moyennement dense, est faible au niveau des affleurements calcaires et se renforce en croisant les formations marneuses, argileuses et gréseuses.

- 11 La végétation naturelle, qui s'étage selon l'altitude, est influencée par les caractéristiques physiques du milieu. Elle se présente sous forme de forêts de pin dégradées (Charbel et El Hage Hassan, 2021). Le déboisement serait à l'origine de l'extension des terrains incultes. On y pratique principalement les cultures pérennes.
- 12 Le territoire subit actuellement les effets de l'érosion hydrique. Il existe peu ou pas de recherches qui traitent la question de l'érosion à grande échelle. De ce fait, il est important, pour préserver le paysage, d'agir contre ce risque en adoptant une approche simple qui pourrait être mise en œuvre dans d'autres secteurs.

Matériels et méthodes

- 13 Différentes méthodes d'estimation, basées sur des modèles empiriques (quantitatifs et qualitatifs), ont été conçues pour évaluer l'érosion hydrique des sols. L'équation universelle des pertes en sol (USLE) établie par Wischmeier et Smith (1960, 1978) demeure le modèle empirique le plus utilisé dans le monde scientifique. Cette équation, qui connaît certaines limites, a fait l'objet de nombreuses analyses critiques (Roose, 1977, 1994 ; Bou Kheir et al., 2001a). Elle a connu une évolution avec les versions MUSLE et RUSLE. Par ailleurs, de nombreux modèles fondés sur l'expertise ont abouti à la spatialisation du risque érosif hydrique (PAP/RAC, 2004 ; El Hage Hassan, 2011 ; Charbel et El Hage Hassan, 2017). Cependant, la classification des données entraîne une perte d'informations et les résultats dépendront du nombre de classes utilisées (Van der Knijff et al., 2000).
- 14 La modélisation mise au point dans la présente étude est fondée sur le modèle qualitatif de type système expert MESALES (Modèle d'évaluation spatiale de l'aléa érosion des sols), conçu en 2000 par l'Institut national de la recherche agronomique (INRA, France). Cette approche, déjà adoptée pour estimer l'aléa érosif à différentes échelles (Souadi et al., 2000 ; Le Bissonnais et al., 2002 ; Le Bissonnais et al., 2004 ; Antoni et al., 2006), s'appuie sur un arbre de décision qui combine les paramètres de l'occupation du sol, du rôle de la pente, de l'érodibilité du sol, de la battance, et de l'érosivité des pluies dans l'ordre de leur importance vis-à-vis de l'aléa érosif. Ces paramètres sont hiérarchisés et pondérés à partir des acquis sur les différents types de fonctionnements érosifs. En revanche, compte tenu de la particularité locale du milieu, certaines modifications ont été apportées à ce modèle. L'érodibilité du sol a été déterminée à travers l'indice K de Wischmeier et Smith (1978). De même, l'absence de données climatiques régulières nous a menés à remplacer l'érosivité des pluies qui requiert le calcul du Rusa de Wischmeier par l'indice de Fournier (1960), modifié par Arnoldus (1980).
- 15 La méthodologie suivie doit aboutir, grâce à la construction d'une base de données numériques dans un SIG, à la cartographie de l'aléa érosif. Pour atteindre cet objectif, nous avons suivi la démarche suivante :
 - L'adoption de la classification hiérarchique du MESALES (Figure 3) qui nécessite de définir en amont le rôle de chaque facteur influençant les variations spatiales de l'aléa érosion, à travers l'attribution d'un indice qui varie entre 1 et 4, selon la classification suivante : rôle très faible = 1, faible = 2, moyen = 3 et fort = 4.
 - L'évaluation de la sensibilité potentielle du terrain à l'érosion à partir du croisement de l'occupation du sol, de la pente et de l'érodibilité du sol. À l'issue de cette combinaison, quatre classes ont été définies : 1 = très faible, 2 = faible, 3 = moyen, 4 = assez fort.

- L'intégration des données cartographiques et descriptives dans un SIG. Pour le bon déploiement de l'analyse spatiale, il est important de géoréférencer (selon la projection conique conforme de Lambert) et de caler (en fonction du système de coordonnées de référence de la zone) les données cartographiques. Les cartes en format vectoriel ont été transformées en format matriciel au sein duquel on a affecté une valeur numérique à chaque pixel. Les cultures sous abri, les roches à nues, les plans d'eau et les tissus urbains ont été exclus des analyses.
 - La production de la carte de l'aléa érosion hydrique, à partir de la combinaison de la sensibilité potentielle des terrains en format matriciel avec la carte de l'érosivité des pluies. MESALES nous a permis d'ordonner en quatre classes l'aléa érosif de la région d'étude.
- 16 Pour construire la carte d'aléa érosion du bassin versant du Nahr el Kalb, nous nous sommes appuyés sur les données suivantes :
- Les cartes des sols du Nahr el Kalb au 1/50000e, publiées par le CNRS libanais.
 - Les cartes topographiques couvrant la région d'étude à l'échelle 1/20000 et ayant une équidistance des courbes de niveau de 10 mètres, publiées en format matriciel par la direction des affaires géographiques de l'armée libanaise.
 - Une image satellite Ikonos à l'échelle 1/20 000, prise en août 2013, pour définir le mode d'occupation du sol.
 - Les données pluviométriques de la station de Faraya et celles de l'Atlas climatique du Liban (MTPT, 1977).

Érosivité de la pluie

- 17 L'érosivité de la pluie est définie par la somme des énergies cinétiques dispersées sur le sol (Collinet et Zante, 2002) et ce pouvoir érosif sera d'autant plus agressif que l'énergie cinétique des gouttes de pluie sera plus importante (Heusch, 1970 ; Roose, 1977). Il est communément admis que l'intensité de la pluie demeure le facteur principal qui agit sur la réaction de battance du sol. La taille et la vitesse des gouttes s'avèrent plus dévastatrices avec les pluies intenses (Fournier, 1969). Plusieurs méthodes ont été menées afin de juger l'aptitude des pluies à provoquer l'érosion des sols. Wischmeier et Smith (1978) ont déterminé le facteur R ($R = K E I^{30}$) par la combinaison de l'énergie cinétique des gouttes de pluie avec l'intensité maximale de la pluie pendant 30 minutes consécutives. D'autres formules alternatives ont été développées afin d'apprécier la brutalité des pluies (Fournier, 1960 ; Kalman 1970 ; Arnoldus, 1980). Cependant, ces index, qui emploient les précipitations mensuelles et annuelles, ont tendance à ajuster les variabilités dans le temps de la pluviosité (Zahar et Laborde, 2001).
- 18 La valeur de l'érosivité (R) est estimée dans certaines régions libanaises selon l'indice de Fournier (1960), modifié par Arnoldus (1980) à partir de l'équation suivante :
- 19 Où P_i représente les précipitations du mois i et P_{an} les précipitations totales annuelles.
- 20 Cet indice atteint 21,7 à Qartaba, située à 1500 mètres et à quelques kilomètres du secteur d'étude, qui reçoit une quantité annuelle de précipitations de 1500 millimètres. En revanche, cet indice est de 13,4 à Beyrouth et 12,2 à Tripoli.
- 21 L'irrégularité des données climatiques dans la région d'étude rend impossible l'application de ces formules. Les précipitations annuelles moyennes du bassin versant du Nahr el Kalb varient entre 1100 et 1500 millimètres. El Hage Hassan et al. (2015) et Touahir et al. (2018) ont considéré qu'une pluie moyenne annuelle de 1500 millimètres pouvait engendrer une forte érosion. La variation des moyennes annuelles permet

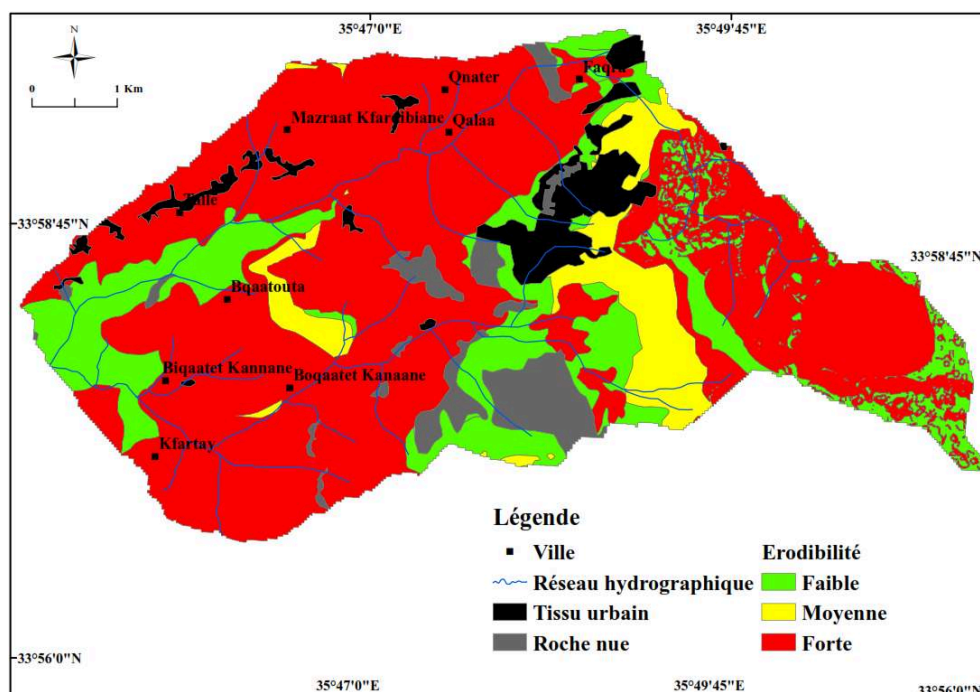
d'établir une discrimination à l'échelle de la région d'étude. Dans ces conditions, nous n'avons retenu que deux classes d'érosivité, correspondant à des conditions modérées (classe 3), qui s'étendent sur une superficie de 881 hectares, et des conditions favorables à l'érosion (classe 4) qui concernent 3095 hectares.

Le sol

- 22 L'érodibilité du sol se traduit par sa résistance à la fragmentation des agrégats sous le choc des gouttes de pluie. La conduite hydrologique du sol est régie par les caractéristiques physiques et chimiques qui influencent sa stabilité structurale, comme la minéralogie de l'argile, la texture, la perméabilité, la teneur en matière organique, le carbonate de calcium et les oxydes de fer et d'aluminium. La faible teneur en argile favorise l'érodibilité. En revanche, certains types d'argiles comme les smectites et les montmorillonites, qui possèdent une capacité d'échange cationique élevée, présentent un potentiel de gonflement élevé et une fragilité à la dispersion (Haghighi, 2012). Une bonne teneur en matière organique renforce la capacité de rétention de l'eau et améliore la structure et la cohésion du sol (Barthès et al., 1998). La décalcification du sol provoquée par l'agriculture intensive implique des conséquences sur la structure du sol et sa ténacité contre l'intensité des pluies. De même, la concentration des ions d'hydrogène H⁺ aboutit à la désagrégation des agglomérats des particules argileuses. La présence des oxydes de fer est aussi un paramètre à prendre en considération. Ces oxydes, qui agissent comme flocculant, augmentent la résistance à la désagrégation mécanique (Le Bissonnais et Le Souder, 1995).
- 23 Une bonne cohésion des matériaux du sol induit une opposition à la battance des gouttes de pluie. En l'absence d'une structure poreuse et friable, l'énergie de la pluie provoque la destruction des éléments structuraux et la mise en suspension des particules du sol, transportées par le ruissellement (Dumas, 1965).
- 24 Pour obtenir les données relatives au bassin versant du Nahr el Kalb, nous avons procédé à des mesures directes sur le terrain. Une douzaine d'échantillons, représentant les différentes unités de sols, ont été prélevés et analysés dans un laboratoire spécialisé. Ces données nous ont permis de déterminer la texture des sols, en nous basant sur le triangle des textures de l'USDA (United States department of agriculture, 1987), la teneur en matière organique (MO), la teneur en oxydes de fer et le potentiel hydrogène (pH) du sol.
- 25 Afin de déterminer la vulnérabilité du sol à être érodé, nous avons eu recours à l'équation proposée par Wischmeier et Smith (1978) qui nécessite des données sur la granulométrie : sable fin, sable grossier, limon fin, limon grossier et argile, la matière organique, la perméabilité et la structure du sol (Tableau 1).
- 26 $100K=2,1. M1,14*10^{-4} (12-a) + 3,25 (b-2) + 2,5 (c-3)$
- 27 M = facteur granulométrique = (% limon + % sable très fin) (100 - % argile),
- 28 a = matière organique,
- 29 b = code de la structure du sol,
- 30 c = code de la classe de perméabilité.
- 31 Selon l'équation de Wischmeier et Smith (1978), huit valeurs ont été obtenues : 0.8, 0.10, 0.12, 0.13, 0.15, 0.16, 0.18 et 0.20. En nous référant à des études précédentes (El Hage Hassan et al., 2018a ; 2019b), nous avons regroupé les résultats en trois classes (Figure

- 4). Pour les sols à faible sensibilité, qui occupent 857,3 hectares, K varie entre 0.08 et 0.10 : Il s'agit de sols Lithic Leptosols, Eutric Gleysols, Calcaric Gleysols.
- 32 Pour les sols moyennement fragiles, qui occupent 162,9 hectares, K varie entre 0.12 et 0.13 : Haplic Luvisols, Eutric Regosols.
- 33 L'érodibilité croît à 0.15, 0.16, 0.18 et 0.20 (2148 hectares) pour les sols les plus fragiles (Areno-Eutric Leptosols, Eutric Arenosols, Calcaro Hortic Anthrosols, Leptic Luvisols, Leptic Andosols). D'une manière générale, les valeurs de K montrent que les sols sont assez fragiles à l'érosion.

Figure 4. Distribution des valeurs de l'érodibilité

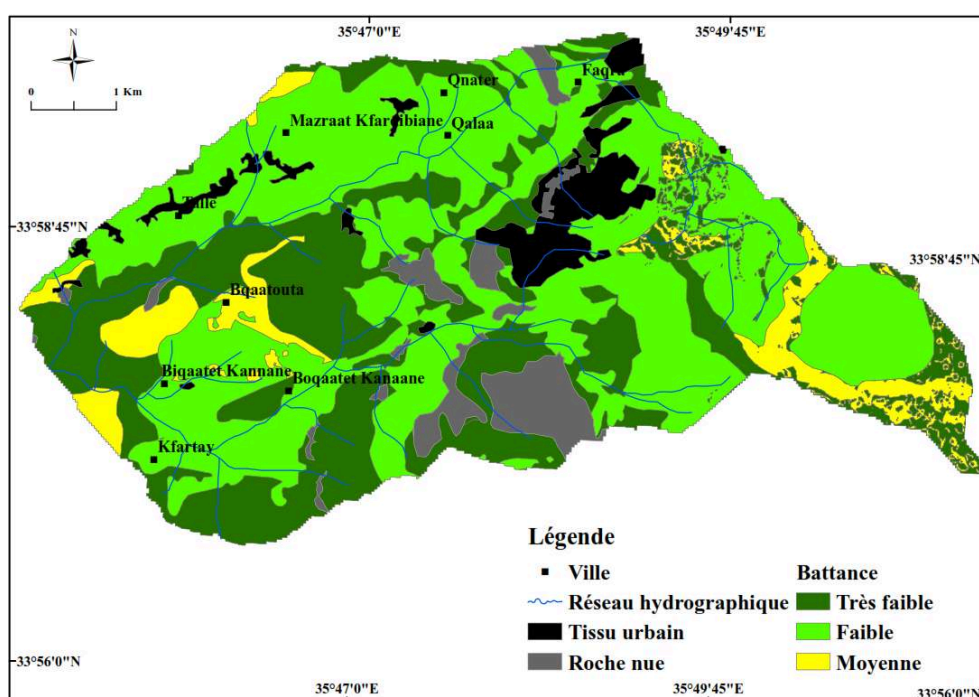


La sensibilité du sol à la battance

- 34 La sensibilité à la formation des croûtes des battances, qui limite l'infiltration et favorise les pertes des éléments fins de sol, dépend de la texture, de la teneur en matière organique et en fer, et de la perméabilité. Afin d'évaluer le degré de la sensibilité des sols à la battance, nous nous sommes servi des quatre règles de pédotransfert réalisées en milieu méditerranéen par Antoni et al. (2006) en se basant sur les études antérieures de Le Bissonais et al. (2002) et Daroussin et King (1996).
- ◦ La première règle prend en compte le taux des éléments grossiers. La présence d'éléments grossiers en surface protège efficacement le sol contre l'impact des gouttes de pluie et accroît l'infiltration au détriment du ruissellement.
 - La deuxième règle est estimée à partir de la texture de la strate de surface. Les sols limoneux ont une sensibilité plus forte à la battance.
 - La troisième règle s'appuie sur le taux de matières organiques qui permet une bonne absorption des précipitations et limite le ruissellement.
 - La quatrième règle prend en considération le taux de fer qui assure la liaison entre l'humus et l'argile, dans la couche superficielle du sol.

- 35 Les seuils retenus pour ces différents paramètres : 10 % et 50 % pour le taux de pierrosité, 2 % et 5 % pour la teneur en matières organiques et 3 % pour la teneur en fer.
- 36 À l'issue de l'application de ces règles, nous avons dressé le Tableau 2 qui montre la sensibilité du sol de la région d'étude à la battance. Les différents types de sols présentent une sensibilité qui varie entre très faible et moyenne (Figure 5). En effet, pour certains sols, la faible teneur en oxyde de fer peut être compensée par la teneur en matières organiques. Cela réduit la sensibilité des sols à la formation des croûtes de battance (Singer et Le Bissonais, 1998).

Figure 5. Distribution des valeurs de la battance

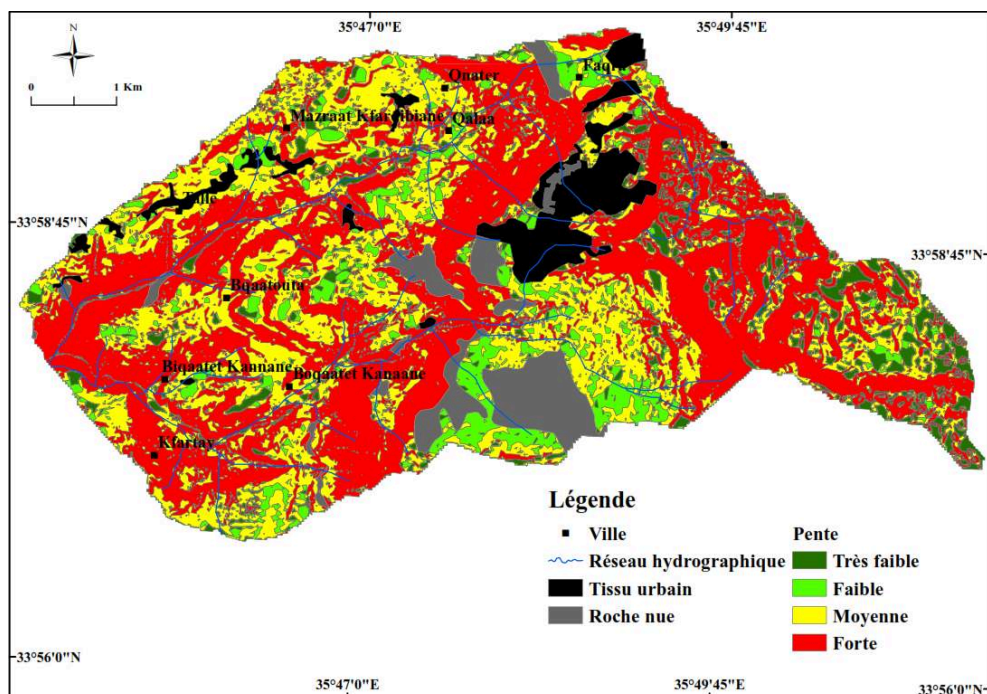


La morphologie du terrain

- 37 La rigidité du terrain accentue la force érosive des eaux ruisselées (El Hage Hassan et al., 2018b). L'action pluviale peut déclencher le phénomène érosif, même sur les faibles pentes (Fauck, 1956 ; Fournier, 1967). La forme de la pente contribue au mécanisme de l'érosion (Le Bissonais et al., 2004). Sur les pentes convexes, les pertes en terre sont plus importantes que sur les pentes concaves (Roose, 1999). La topographie intervient par le biais de la longueur et le gradient de la pente (Neboit, 1991). Cependant, le ruissellement augmente avec l'inclinaison de la pente (Zingg, 1940 ; Roose, 1994). Plusieurs études soulignent le rôle décisif de la déclivité de la pente (; Auzet, 1987 ; Bou Kheir et al., 2001b ; El Hage Hassan et al., 2009 ; Kelly, 1983). Le modèle d'élévation du terrain dressé à partir des courbes de niveau distantes de 10 mètres a permis de produire, à l'aide du logiciel ArcGIS version 10.7, la carte des pentes (Figure 6). Les valeurs résultantes ont été regroupées en 4 classes selon leur rôle dans l'érosion hydrique des sols et en se référant aux travaux de Le Bissonais et al. (2002) et Degan et al. (2015).

- 38 Les classes retenues sont les suivantes (Tableau 3) : 0-5% ; 5-15% ; 15-30% et > 30 %.
- 39 Les résultats de la carte indiquent que les pentes à forte contribution à l'érosion dominant sur 71% de la région d'étude.

Figure 6. Les classes des valeurs de la pente



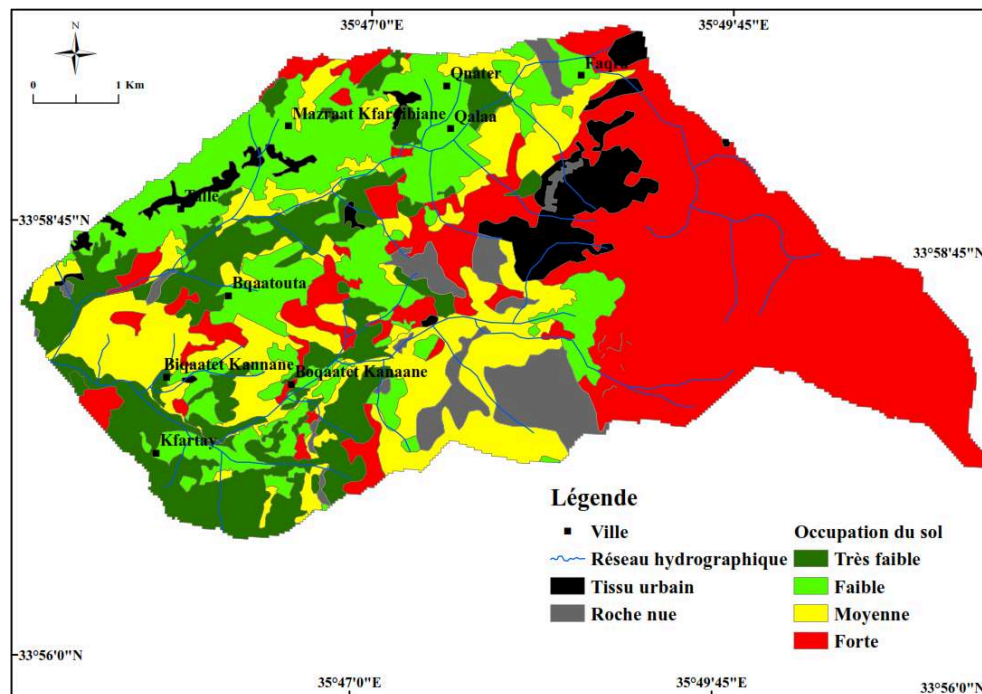
Couverture du sol

- 40 Il est évident que la dégradation du couvert végétal accentue la force vive des eaux. En revanche, les pertes en terre diminuent avec l'augmentation d'un couvert végétal (Battany et Grismer, 2000 ; Carroll et al., 2000) et la présence d'une couche superficielle riche en litière qui amortit l'énergie cinétique de pluie et redonne au sol de l'humus et des composés minéraux indispensables à sa stabilité structurale. De nombreuses publications ont mis en évidence le rôle modérateur du couvert végétal (Cohen et Rey, 2005 ; El Hage Hassan et al., 2016) qui demeure le moyen de lutte le plus actif dans la manifestation de l'érosion hydrique. Malgré son rôle important dans la protection, la fixation et le maintien d'une bonne porosité au sol, la végétation agit aussi dans la rétention partielle des sédiments (Roose, 1980 ; Roose, 1994 ; Nyssen et al., 2000 ; Abu-Zreig, 2001 ; Rey et al., 2005). Grâce à son action de régulateur hydrologique, la végétation intervient dans l'atténuation du ruissellement (Rey et al. 2004) en dissipant une partie des précipitations et en favorisant l'infiltration. Cependant, les formations végétales peuvent être plus ou moins opérantes pour contrôler les pertes en terre, puisqu'elles se différencient, selon des critères physiologiques (enracinement, type de feuillage, écartement des plants), phénologiques (durée de la pousse) et agronomiques (date des semis, type de labour) (El Hage Hassan et al., 2013). L'interprétation de l'efficacité de la végétation doit prendre en considération ses parties aériennes, mais également son système racinaire (Mathys et Poesen, 2005). Si les racines continuent à être nécessaires pour la cohésion du sol, une basse végétation serait plus efficace que

les hautes strates (Soutter et al., 2007). Les résultats expérimentaux de Wischmeier aux États-Unis (1978) et de Roose en Afrique (1983) ont montré que les pertes de sol sont réduites de 70 % si la canopée se trouve à 1 mètre du sol, tandis que cette réduction ne dépasse pas 25 % si la canopée complète est à 4 mètres du sol. Selon la densité de la couverture végétale, l'action du ruissellement est plus ou moins prépondérante. Un taux de végétation supérieure à 70%, qui ne subit aucune modification physiologique, favorise l'infiltration et limite le ruissellement (Ionesco, 1964).

- 41 Afin d'appréhender la répartition spatiale des différentes unités d'occupation du sol, nous avons eu recours à une image Ikonos de haute résolution prise en 2017. Les classes de référence ont été choisies sur l'image satellitaire et confirmées par des relevés de terrain et par le GPS. À l'issue de la classification, cinq unités d'occupation de sol ont été retenues (Tableau 4 et Figure 7) : les cultures pérennes, les surfaces boisées denses, les tissus urbains, les roches nues et les espaces naturels dégradés. Cette classification nécessite de déterminer le rôle de chaque unité dans l'érosion hydrique, en prenant en considération les critères précités et en se basant sur des études précédentes. Les espaces naturels dégradés, à forte sensibilité, occupent les surfaces les plus importantes (2026,5 hectares). Ce secteur souffre de l'absence d'un couvert végétal protecteur. La moyenne sensibilité peut contenir les cultures pérennes (784,1 hectares). Quant à la sensibilité faible et très faible, elle concerne 611,8 hectares et correspond à des zones de forêts.

Figure 7. Détermination du rôle du couvert végétal



Résultats et discussion

- 42 Les résultats apportés dans le cadre de cette étude permettent de mettre en évidence la répartition spatiale de l'aléa érosif dans le bassin versant du Nahr el Kalb. La combinaison des différents facteurs qui composent l'équation MESALES a permis de

produire la carte de l'aléa érosif à l'échelle de chaque pixel. La carte de synthèse (Figure 8) différencie quatre types de secteurs selon la conduite des facteurs (sol, pente, couvert du sol et agressivité climatique) concourant à l'érosion. Pour le classement des résultats, nous avons adopté les critères de terrain définis par Bou Kheir et al. (2001b) et validés par d'autres chercheurs au Liban (El Hage Hassan et al., 2015 ; 2019b) :

- ◦ Très faible aléa : pas de signe de perte de terre ;
- Faible aléa : les racines d'arbres et d'arbustes sont déchaussées de moins de 5 centimètres et où les buttes de sol résiduelles ont moins de 5 centimètres de hauteur ;
- Aléa moyen : racines d'arbres déchaussées de 5 à 20 centimètres et buttes de sol résiduelles de 5 à 20 centimètres de hauteur, des mouvements de sol d'un volume de 0,125 à 1 mètres³ et des ravines d'une surface de 0,01 à 0,16 mètres² (Photo 1).
- Aléa fort : racines d'arbres déchaussées de plus de 20 centimètres, pédicules d'érosion (colonnes de terre protégées par des pierres) de plus de 20 centimètres de hauteur, des glissements de sols de plus de 25 centimètres de profondeur, des mouvements de sol d'un volume de plus de 1 mètre³ et des ravines d'une surface de plus de 0,16 mètres² (Photos 2 et 3)

Photo 1. La dégradation du couvert végétal, combinée à un sol fragile, induit l'exposition partielle des racines à l'air, compte tenu de la perte moyenne du sol



Photo prise dans la région de Faraya

- ◦ Les secteurs à très faible aléa, qui occupent 370 hectares, s'observent sur les replats et les pentes concaves où le couvert végétal contrôle l'agressivité des pluies (Tableau 5).
- Les secteurs à faible aléa, qui concernent 1400 hectares, correspondent majoritairement aux forêts denses sur des terrains caractérisés par l'irrégularité topographique et des sols parfois fragiles.
- Les secteurs à moyen aléa qui couvrent 510 hectares. Ils correspondent aux vergers et aux forêts dégradées ainsi associés aux pentes modérées et aux sols moyennement fragiles à l'érosion.

- Les secteurs à fort aléa érosif (1230 hectares), qui sont occupés par des vergers et des formations naturelles dégradées, sont essentiellement représentés sur des terrains constitués de sols fragiles et de pentes raides où les pluies deviennent intenses. En effet, la dégradation du milieu par l'homme (déforestation), amplifiée par les précipitations agressives et par l'irrégularité topographique, favorise l'impact de l'érosion hydrique. La carte de synthèse expose la répartition spatiale de l'aléa érosif à partir du modèle qualitatif MESALES.
- 43 Pour la validation du résultat, une quarantaine de points ont été sélectionnés sur la carte d'aléa. Leur localisation sur le terrain a nécessité un système de positionnement par satellite (GPS). Pour évaluer la performance du modèle et la bonne concordance entre les prédictions et le terrain avoisinant, chaque classe affectée a été comparée avec la réalité du terrain par le biais d'une matrice de confusion. La précision globale du modèle est estimée à 84% (Tableau 6) et l'indice de Kappa à 80% (Tableau 7). L'estimateur Kappa, qui possède des valeurs qui varient entre 0 et 1, est considéré conventionnellement comme pertinent lorsqu'il dépasse 0,8 (80%) (Landis et Koch, 1977).

Tableau 6. Matrice de confusion pour l'évaluation de la carte d'aléa érosif

| Classe d'aléa | Fort | Moyen | Faible | Très faible | Totale | Précision utilisateur % |
|-------------------------|------|-------|--------|-------------|--------|-------------------------|
| Fort | 13 | 2 | 0 | 0 | 15 | 86,6 |
| Moyen | 2 | 10 | 1 | 0 | 13 | 76,9 |
| Faible | 0 | 2 | 8 | 0 | 10 | 80 |
| Très faible | 0 | 0 | 0 | 5 | 5 | 100 |
| Total | 15 | 14 | 9 | 5 | 43 | |
| Précision réalisateur % | 87 | 71 | 89 | 100 | | Précision globale |
| Erreur d'omission% | 13 | 29 | 11 | 0 | | 84 % |

Tableau 7. Indice de Kappa

| | |
|-------------------------|-----|
| Kappa | |
| N | 42 |
| $\sum x_n$ | 36 |
| $\sum x_i \cdot x_{ii}$ | 452 |
| Kappa | 0,8 |

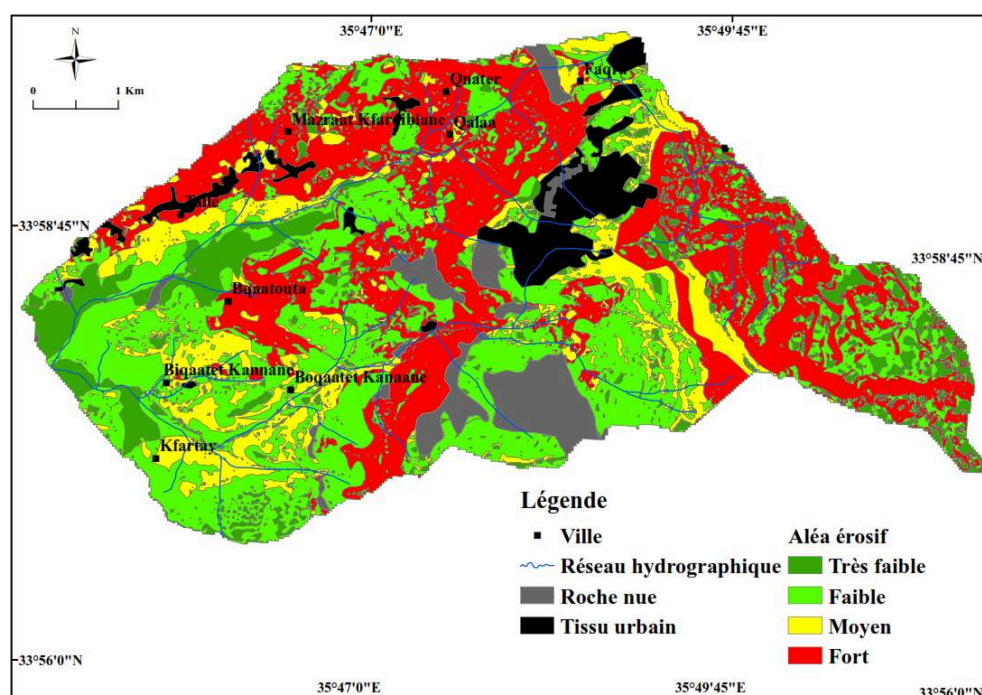
n le nombre de lignes de la matrice de confusion, x_{ii} le nombre d'observations dans la ligne i et la colonne i, x_{i+} et x_{+i} les totaux marginaux de la ligne i et la colonne i, N le nombre total d'observations.

- 44 Les secteurs fortement touchés par l'aléa érosif, qui s'accroît en se dirigeant vers l'ouest, concernent 34,8 % de la surface totale. Cela implique des suites néfastes, par les dépôts sédimentaires, sur les secteurs situés à proximité. Le climat méditerranéen, qui se caractérise par une période sèche suivie d'une autre pluvieuse, déstabilise la structure du sol. Le sol craquelé finit par être désagrégé et transporté par les eaux en ruissellement. Malgré la petite taille du secteur d'étude, deux valeurs d'érosivité ont été distinguées.
- 45 L'exploitation démesurée des surfaces boisées, engendrée par la demande accrue des besoins en bois (énergie et construction), a mené à la dégradation du milieu. La modification du couvert végétal a favorisé l'extension des surfaces dégradées aux dépens des forêts denses. Ces faits reflètent le rôle et l'impact des activités anthropiques dans la dégradation du milieu et dans l'amplification de l'aléa érosif. Pour traiter la fragmentation du paysage forestier, plusieurs actions nécessitent d'être rappelées. La loi 558 portant sur la protection des forêts au Liban a été mise en application en 1996. L'absence, avant 1996, d'un cadre juridique qui impose la protection de ces surfaces a mené à la détérioration des surfaces boisées (El Hage Hassan et al., 2019a).
- 46 De nombreux travaux soulignent le rôle crucial du couvert végétal pour lutter contre l'érosion hydrique, soit directement, en réduisant le ruissellement, soit en améliorant les propriétés du sol. Un couvert végétal dense agit comme un écran protecteur en absorbant l'énergie cinétique des gouttes de pluie surtout pour les mois où les gouttes de pluie sont les plus intenses (décembre et janvier). Sous les forêts denses, les sols peuvent retenir jusqu'à 2/3 de l'eau précipitée (Hunzinger, 2000). N'étant plus interceptés sur les versants par un couvert végétal protecteur, les sols peu épais qui reposent sur un horizon rocheux ou calcareux sont ameublés et finissent par être désagrégés et transportés (Vanara et Maire, 2008).
- 47 Pour étudier l'érodibilité des sols, nous nous sommes appuyés sur le facteur K de Wischmeier et Smith. Ce dernier ne tient pas compte du rôle du fer dans le sol. En revanche, d'autres indices de stabilité structurale, comme un sable très fin, doivent être pris en considération. Le traitement du facteur K a nécessité des mesures directes sur le terrain afin de diviser la granulométrie en quatre classes (sable fin, sable grossier, limon et argile). Pour déterminer la sensibilité du sol à la battance, nous avons adopté les règles de pédotransfert de Daroussin et King (1996) qui s'appuie sur la teneur en éléments grossiers, la texture du sol, la teneur en matière organique et la teneur en fer.
- 48 Par ailleurs, une teneur en matière organique inférieure à 2 % (Le Bissonais et Arrouays, 1997) engendre l'éclatement des agrégats du sol sous l'impact des pluies intenses. Le sol de la région d'étude est affaibli par la régression de la matière organique. 68% (2146 hectares) de la surface totale n'atteint pas les 2% en matière organique (0.7% pour l'Areno-Eutric Leptosols). D'autres facteurs peuvent intervenir dans le phénomène érosif, comme par exemple l'acidité du sol. L'analyse indique que l'Eutric Arenosol et le Leptic Andosol sont des sols acides ; cela peut déstabiliser la structure du sol. En revanche, l'analyse chimique du sol a montré que la région d'étude est caractérisée par une faible teneur en fer (< 3%), ce qui réduit la résistance à l'érosion.
- 49 Les conséquences du phénomène érosif sont remarquables sur les pentes dénudées. La modification de l'état de surface, sous l'effet des successions d'averses, provoque le

ruissellement et la détectabilité du sol compte tenu de la compaction de la surface liée aux paramètres de la texture (notamment les teneurs en limons). Cependant, il s'avère difficile de définir une valeur-seuil déterminante pour l'apparition de l'érosion hydrique. Cette valeur peut varier de 2 degrés pour un sol loessique et 12 degrés pour une texture limono-sableuse (Savat et De Ploey, 1982). De même, les caractéristiques de l'état de la surface (compaction, couverture, ouverture, et cetera) participent à la partition du ruissellement et l'infiltration (Bresson et Boiffin, 1990 ; Armand, 2009).

- 50 Dans le cas du bassin versant du Nahr el Kalb, les effets cumulatifs des conditions pédoclimatiques, la dégradation de la végétation naturelle et la topographie mouvementée seraient à l'origine de l'érosion. Cela a été confirmé à partir des observations de terrain. Ici, les techniques antiérosives, qui permettent de diminuer l'impact de la pente sur l'érosion et de fixer les sols, sont présentes. Les résidents locaux ont aménagé des terrasses agricoles pour les cultures pérennes. Ce moyen de lutte contre l'érosion contrôle le phénomène de ruissellement.

Figure 8. Répartition spatiale de l'aléa érosif



Conclusion

- 51 La région d'étude doit faire face à un risque de dégradation, en voie d'expansion spatiale du fait de la destruction du couvert végétal naturel (chêne, genévrier et autres). Une réflexion sur l'état de cette ressource naturelle mérite d'être effectuée. Sa dégradation découle principalement des actions anthropiques comme l'exploitation incontrôlée, accentuées par des facteurs naturels tels que l'érosion hydrique.
- 52 La charge pastorale inappropriée au pâturage a entraîné un processus contre-productif d'érosion. Étant donné que la région est soumise à la transhumance, la dégradation peut survenir à toutes les altitudes. Certains troupeaux caprins se nourrissent des jeunes pousses, ce qui nuit à la régénération naturelle.

- 53 Ces faits et ces facteurs ont mené à la diminution de certaines espèces végétales, à l'appauvrissement des sols en éléments fins et à une décroissance de la diversité de la faune sauvage. Ces mutations ont conduit à la déstabilisation du milieu.
- 54 La destruction des surfaces boisées implique l'absence de la litière qui constitue un apport en matière organique (Roose et al., 2012). En effet, la matière organique est un des paramètres indispensables pour déterminer la vulnérabilité du sol à l'érosion. En l'absence d'une bonne teneur en matière organique, les sols du haut massif sont sujets à la dégradation dès qu'on les dénude. Des observations précises, aujourd'hui, ont permis d'identifier des plages affectées par l'érosion hydrique et l'affleurement de la roche nue qui façonne le paysage.
- 55 L'effet conjugué de certains facteurs liés aux éléments naturels (précipitations, sol, pentes) et une pression notable sur ces espaces boisés s'avèrent déterminants sur la dynamique érosive qui a entraîné un processus contre-productif d'érosion. Tous ces facteurs sont à prendre en considération pour appréhender la répartition spatiale de l'aléa érosif.
- 56 La carte de l'aléa érosif a été produite grâce à l'approche qualitative MESALES qui a permis de différencier quatre classes d'aléa érosif. Ce modèle, qui requiert un SIG, offre une grande simplicité dans le traitement des résultats. Bien que MESALES soit largement utilisée en France, son application dans d'autres contextes géographiques nécessite des paramètres de calibration afin de l'adapter correctement à l'environnement local. Certaines rectifications ont ainsi été apportées pour l'indice de l'érodibilité et de l'érosivité des pluies. Par ailleurs, l'estimation des pondérations des facteurs représentatifs de l'érosion peut varier selon les experts consultés. La matrice de confusion établie nous a permis d'évaluer la qualité des résultats obtenus. Les valeurs de la précision globale et de l'indice de Kappa du modèle sont respectivement de 84 et 80 %, ce qui témoigne de la robustesse du modèle et confirme la validité du choix de la pondération.
- 57 La carte de l'aléa érosif constitue un outil d'aide à la décision permettant d'identifier les secteurs vulnérables et de participer par la suite aux choix des stratégies de conservation. Par la suite, il serait important d'envisager, pour l'amélioration de MESALES, des mesures directes in situ, à partir des bassins de rétention afin de mesurer systématiquement les dépôts de sédiments (Colmar et al., 2010). Pour conclure, il apparaît que nous pouvons agir sur le mode d'occupation et l'affectation du sol pour limiter le risque érosif du sol. Les efforts devraient avant tout porter sur la restauration des surfaces boisées. Par ailleurs, une régénération (6000 hectares) de certaines espèces marque le paysage de la région voisine (Kfardebian) entre 1984 et 2000. Le rôle déterminant de certaines organisations locales et internationales dans la restauration et la reforestation des montagnes a donc mené à accroître l'espace forestier pour atteindre 15,8% de la surface totale. Cette politique de restauration des montagnes a concerné les secteurs sensibles à l'érosion. Le couvert forestier dense, par son intervention dans l'interception et l'infiltration des pluies, est un moyen de lutte contre l'érosion hydrique. Les efforts ultérieurs devraient donc porter sur le suivi et le maintien des projets de restauration afin de répondre aux impératifs environnementaux.

BIBLIOGRAPHIE

- Abu-Zreig, M., 2001, Factors affecting sediment trapping in vegetated filter strips: simulation study using VFSMOD, *Hydrological Processes*, 15, 8, pp. 1477-1488.
- Antoni, V., Y. Le Bissonnais, J. Thorette, N. Zaidi, B. Laroche, S. Barthès, J. Daroussin et D. Arrouays, 2006, Modélisation de l'aléa érosif des sols en contexte méditerranéen à l'aide d'un Référentiel Régional Pédologique au 1/250 000 et confrontation aux enjeux locaux, *Étude et Gestion des Sols*, 13, 3, pp. 201-222.
- Armand, R., 2009, Étude des états de surface du sol et de leur dynamique pour différentes pratiques de travail du sol : mise au point d'un indicateur de ruissellement, Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg, Strasbourg, 208 p.
- Arnoldus, H. M. J., 1980, An approximation of the rainfall factor in the USLE, dans: M. de Boodt et D. Gabriels (dir.), *Assessment of erosion in USA and Europe*, Éd. John Wiley, Chichester, Angleterre, pp. 127-132.
- Auzet, V., 1987, L'érosion des sols cultivés en France sous l'action du ruissellement, *Annales de géographie*, 96, 537, pp. 529-556.
- Barthès, B., G. De Noni, E. Roose, J. Asseline, A. Albrecht, et M. Viennot, 1998, Pratiques culturales et érodibilité du sol dans les Rougiers de Camarès, Aveyron, *Étude et gestion des sols*, 5, 3, pp. 157-170.
- Battany, M.C. et M.E. Grismer, 2000, Rainfall runoff and erosion in Napa Valley vineyards: effects of slope, cover and surface roughness, *Hydrol. Processes*, 14, pp. 1289-1304.
- Bou Kheir, R., M.C. Girard, M. Khawle et C. Abdallah, 2001a, Érosion hydrique des sols dans les milieux méditerranéens, *Études et Gestion des Sols*, 8, 4, pp. 231-245.
- Bou Kheir, R., M. C. Girard, A. Shaban, M. Khawle, G. Faour et T. Darwish, 2001b, Apport de la télédétection pour la modélisation de l'érosion hydrique des sols dans la région côtière du Liban, *Télédétection*, 2, 2, pp. 79-90.
- Bresson L. et M. Boiffin, 1990, Morphological characterization of soil crust development stages on an experimental field, *Geoderma* 47, pp. 301-325.
- Carroll, C., L. Merton et P. Burger, 2000, Impact of vegetative cover and slope on runoff, erosion, and water quality for field plots on a range of soil and spoil materials on central Queensland coal mines, *Aust. J. Soil Res*, 38, pp. 313-327.
- Charbel, L. et H. El Hage Hassan, 2021, Variation spatio-temporelle (1962-2018) du couvert forestier du haut massif du Mont-Liban : rôle du facteur anthropique, *Physio-Géo* [En ligne], Volume 16 | 2021, mis en ligne le 27 avril 2021, consulté le 23 juin 2021. URL : <http://journals.openedition.org/physio-geo/12264>
- Charbel, L. et H. El Hage Hassan, 2017, Modélisation de la perte en sol dans la forêt de Bkassine (Liban sud), *Geo-Eco-Trop*, 41, 3, pp. 479-492.
- Cohen, M. et F. Rey, 2005, Dynamiques végétales et érosion hydrique sur les marnes dans les Alpes françaises du Sud, *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 11, 1, pp. 31-44.
- Collinet, J. et P. Zante, 2002, Le ravinement sur marnes gypseuses en Tunisie semi-aride. dans: Roose Eric (ed.), Sabir M. (ed.), De Noni Georges (ed.). Techniques traditionnelles de GCES en milieu méditerranéen, Bulletin - Réseau Erosion, 21, pp. 301-319, La Gestion Traditionnelle de

- l'Eau, de la Biomasse et de la Fertilité des Sols, Base d'une Nouvelle Approche de la Lutte Antiérosive dans les Montagnes Marocaines : Journées Scientifiques, Salé (MAR), 2002/02/08-09.
- Colmar, A., C. Walter, Y. Le Bissonnais et J. Daroussin, 2010, Démarche de validation régionale par avis d'experts du modèle MESALES d'estimation de l'aléa érosif. *Etude et Gestion des Sols, Association française pour l'étude des sols*, 17, 1, pp.19-32.
- Daroussin J. et D. King, 1996, A pedotransfer rules database to interpret the soil Geographical Database of Europe for environmental purposes. dans: *The use of pedotransfer in soil hydrology research in Europe, Workshop proceedings, Orléans, France, 10-12 octobre 1996*, pp. 25-40.
- Degan F., S. Salvador-Blane et O. Cerdan, 2015, Cartographie de l'aléa érosif sur le bassin Loire-Bretagne. Agence de l'Eau Loire-Bretagne, laboratoire Géo-Hydrosystèmes continentaux de l'Université François Rabelais de Tours, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, *Projet VERSEAU*.102p.
- De Jong, S.M. et H.T. Riezebos, 1997, SEMMED: a distributed approach to soil erosion modeling. dans: Spiteri, A. (Ed.), *Remote Sensing '96: Integrated Applications for Risk Assessment and Disaster Prevention for the Mediterranean*. Balkema, Rotterdam, pp. 199-204.
- De Ploey, J., 1989, A model for headcut retreat in rills and gullies. dans: A. Yair and S. Berkowicz (dir.), *Arid and Semi-arid Environments: Geomorphological and Pedological Aspects, Catena Suppl.* 14, pp. 81-86.
- Dumas, J., 1965, Relation entre l'érodibilité des sols et leurs caractéristiques analytiques, *Cah. ORSTOM Pédol.*, 3, 4, pp. 307-333.
- El Hage Hassan, H., B. Valadas et G. Faour, 2009, Apports d'une méthode SIG et de la télédétection pour l'étude de la limitation du risque érosif des terres agricoles, *Actes du congrès Geotunis*, Tunis, 16-20 décembre.
- El Hage Hassan, H., 2011, Les Apports d'un SIG dans la connaissance des évolutions de l'occupation du sol et de la limitation du risque érosif dans la plaine de la Békaa (Liban), Exemple d'un secteur du Békaa el Gharbi, Orléans : Université d'Orléans, thèse de doctorat en géographie, 381 p.
- El Hage Hassan, H., L. Touchart et G. Faour, 2013, La sensibilité potentielle du sol à l'érosion hydrique dans l'ouest de la Békaa au Liban, *M@ppemonde*, 109, 2013.1, [En ligne] URL : <http://mappemonde-archive.mgm.fr/num37/articles/art13104.html>.
- El Hage Hassan, H., L. Charbel et L. Touchart, 2015, Cartographie des conditions de l'érosion hydrique des sols au Mont-Liban : exemple de la région d'El Aaqôura, *Physio-Géo*, 9, pp. 141-156.
- El Hage Hassan, H., L. Touchart, F. Ardillier Carras et G. Faour, 2016, Lutte contre l'érosion et aménagement agricole dans la plaine de la Békaa, Liban, *M@ppemonde*, 117, 17 p. [En ligne] URL : <http://mappemonde-archive.mgm.fr/num45/articles/art15104.html>
- El Hage Hassan, H., L. Charbel et L. Touchart, 2018a, Modélisation de l'érosion hydrique à l'échelle du bassin versant du Mhaydssé. Békaa-Liban, *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, 18, 1, [En ligne] URL : <http://journals.openedition.org/vertigo/19804>
- El Hage Hassan, H., L. Charbel et L. Touchart, 2018b, Modélisation et cartographie du risque érosif à Rachaya (Liban), Photo-Interprétation, *European Journal of Applied Remote Sensing*, Editions Eska, 54, 1, pp. 16-27.
- El Hage Hassan, H., G. Faour, L. Charbel et L. Touchart, 2019a, Cartographie de l'aléa érosif dans le bassin sud du Litani-Liban, *Revue Internationale de Géomantique*, 29, 2, pp. 159-184.

- El Hage Hassan, H., F. Ardillier et L. Charbel, 2019b, Les changements de l'occupation des sols dans la Béqaa ouest (Liban) : le rôle des actions anthropiques, *Revue Cahiers Agricultures*, 28, 10. 10 p.
- Fauck, R., 1956, Conservation des sols et mise en valeur agricole en région tropicale, Congrès International de la Science du Sol, 6, Paris (FRA), pp. 591-595.
- Fournier, F., 1960, *Climat et érosion*, Éd. Presses Universitaires de France, Paris, 201 p.
- Fournier, F., 1967, Les facteurs de l'érosion du sol par l'eau ; les recherches sur la conservation du sol en Afrique et Madagascar, *Sols Africains*, 12, 1, pp. 6-51.
- Fournier, F., 1969, L'érosion hydrique et le climat, *Bulletin Technique d'Information, Météorologie et Agriculture*, 237, pp.111-115.
- Frenette, M. et P.Y. Julien, 1986, Un modèle pour prédire l'érosion des bassins et le transfert de sédiments dans les cours d'eau nordiques, Département de génie civil, Université de Laval Québec, Canada, 12, pp. 150-161.
- Haghighi, I., 2012, Caractérisation des phénomènes d'érosion et de dispersion : développement d'essais et applications pratiques, thèse de doctorat, Université Paris-Est, 203 p.
- Harfouche, R., P. Poupet, T. Darwish, A. Shaban, P. Verdin, G. Faour, C. Khater et A. Assakeret, 2016, La construction des territoires agraires et la forêt dans la montagne libanaise : impacts environnementaux et enjeux sociaux depuis l'Antiquité, dans : *Aménagement et environnement*, Presses Universitaires de Rennes, pp. 75-89.
- Heusch, B., 1970, L'érosion du Pré-Rif (Maroc), *Annales de la Recherche Forestière au Maroc*, 12, pp. 1-176.
- Hunzinger, H., 2000, Hidrología de las selvas montanas en la sierra de San Javier, dans : Breves contribuciones del IEG n°12, Instituto de Estudios geográficos, Universidad de Tucumán, pp. 51-67.
- Ionesco, T., 1964, Considérations générales concernant les relations entre l'érosion et la végétation du Maroc, *Rev. Géogr. Maroc*, 6, pp.17-28.
- Kalman, R., 1970, Ruissellement et érosion en nappe (Expérimentation au simulateur de pluie), Agriculture and Food (OMAFRA), *Annales de la Recherche Forestière au Maroc*, 12, pp. 177-287, [En ligne] URL : <http://www.giser.be/wp-content/uploads/2012/05/>
- Kelley, H.W., 1983, Keeping the Land Alive: Soil Erosion - its Causes and Cures. FAO Soils Bulletin No. 50. Rome.95 p. Kirkby, M.J., R.J.A. Jones, B. Irvine, A. Gobin, G. Govers, O. Cerdan, A.J.J. Van Rompaey, Y. Le Bissonais, J. Daroussin, D. King, L. Montanarella, M. Grimm, V. Vieillefont, J. Puigdefabregas, M. Boer, C. Kosmas, N. Yassoglou, M. Tsara, S. Mantel, G.J. Van Lynden et J. Huting, 2003, Pan-European Soil Erosion Risk Assessment: The PESERA Map, Version 1 October 2003. Explanation of Special Publication Ispra 2004 No.73 (S.P.I.04.73) (2004) EUR 21176 EN, pp. 20, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- Landis, J.R. et G.G. Koch, 1977, The measurement of observer agreement for categorical data, *Biometrics*, 33, 1, pp. 159-74.
- Le Bissonais, Y. et C. Le Souder, 1995, Mesurer la Stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion, *Etude Gestion Sol.*, 2, pp. 43-56.
- Le Bissonais, Y. et D. Arrouays, 1997, Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility. II. Application to humic loamy soils with various organic carbon contents, *European Journal of Soil Science*, 48, pp. 39- 48.

- Le Bissonnais, Y., C. Montier, J. Daroussin, D. King et B. Morel, 1998, *Cartographie de l'aléa Érosion des sols en France*, INRA, 77 p.
- Le Bissonnais, Y., J., Thorette, C. Bardet et J. Daroussin, 2002, *L'érosion hydrique des sols en France*, Rapport IFEN, INRA. 106 p.
- Le Bissonnais, Y., N. Dubreuil, J. Daroussin et M. Gorce, 2004, Modélisation et cartographie de l'aléa d'érosion des sols à l'échelle régionale. Exemple du département de l'Aisne, *Étude et Gestion des Sols*, 11, 3, pp. 307-321.
- Mathys, N. et J. Poesen, 2005, Ravinement en montagne : processus, mesures, modélisation, régionalisation, *Géomorphologie: relief, processus, environnement* [En ligne], vol. 11 - n° 1 | 2005, URL : <http://journals.openedition.org/geomorphologie/187>
- MTPT, 1977, *Atlas climatique du Liban. Tome 1 : Pluie, température, pression, nébulosité*, Édité. Ministère des Travaux Publics et des Transports, Service Météorologique, Beyrouth (Liban), 45 p. + planches (50 p.).
- Neboit, R., 1991, *L'Homme et l'érosion : l'érosion des sols dans le monde*, Clermont-Ferrand: Association des publications de la faculté des lettres, Publications de la Faculté des lettres de Clermont, 269 p.
- Nyssen, J., H., Mitiku, J. Moeyersons, J. Poesen et J. Deckers, 2000, Soil and water conservation in Tigray (northern Ethiopia): The traditional daget technique and its integration with introduced techniques, *Land Degradation and Development*, 11, 3, pp. 199-208.
- PAP/RAC, 2004, *Improving Coastal Land Degradation Monitoring in Lebanon and Country Report: Syria, Split: Priority Actions Programme*, 165p. ISBN: 953-6429-52-7.
- Rey, F., J.L. Ballais, A. Marre et G. Rovéra, 2004, Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface, *Comptes Rendus Géoscience*, 336, 11, pp. 991-998.
- Rey, F., F. Isselin-Nondedeu et A. Bédécarrats, 2005, Vegetation Dynamics on Sediment Deposits Upstream of Bioengineering Works in Mountainous Marly Gullies in a Mediterranean Climate (Southern Alps, France), *Plant Soil*, 278, pp. 149-158.
- Roose, E., 1977, *Érosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest: vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales*, Bondy: ORSTOM, coll. Travaux et documents, 108 p.
- Roose, E., 1980, Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. Etude expérimentale des transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétation naturelles ou cultivées, Thèse de doctorat, Université d'Orléans, 587 p.
- Roose, E., 1983, Ruissellement et érosion avant et après défrichement en fonction du type de culture en Afrique occidentale, *Cahiers ORSTOM, Série Pédologie*, 20, pp. 327-339.
- Roose, E., 1994, *Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES)*, Titre de série : Bulletin pédologiques de la FAO – 70 p.
- Roose, E., 1999, Evolution historique des stratégies de lutte antiérosive : vers la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols : (GCES). dans : L'influence de l'homme sur l'érosion : 1. A l'échelle du versant, *Bulletin - Réseau Erosion*, 19, 11-25 multigr. L'Homme et l'Erosion : Colloque International, Yaoundé (CMR), 1999/12/09-19.
- Roose, E., M. Saber, B. Arabi, M. Morsli et M. Mazour, 2012, Soixante années de recherches en coopération sur l'érosion hydrique et la lutte antiérosive au M. Maghreb, *Physio-Géo*, 6, 1, pp. 43-69.
- Savat J. et De Ploey, J., 1982, Sheetwash and rill development by surface flow. dans: Bryan R., Yair A., (dir.) *Badland Geomorphology and Piping. Norwich (Angleterre): Geo Books*, 408 p.

- Schaffhauser, A., F. Pimont, T. Curt, N. Cassagne, J.L. Dupuy et T. Tatoni, 2015, Effets de la récurrence des incendies sur le comportement du feu dans des suberaies (*Quercus suber* L.) et maquis méditerranéens sur les cinquante dernières années, *Comptes Rendus Biologies*, Elsevier Masson, 2015, 338, 12, pp. 812-824.
- Singer M.J. et Y. Le Bissonnais, 1998, Importance of surface sealing in the erosion of some soils from a Mediterranean climate, *Geomorphology*, 24, pp. 79-85.
- Souadi T., C. King, A. Bourguignon, P. Maurizot, L. Denis, Y. Le Bissonnais, V. Souchère et A. Lecour, 2000, *Cartographie Régionale de l'aléa érosif des sols en région Haute-Normandie*, BRGM - INRA, Rapport BRGM.
- Soutter, M., A. Mermoud et A. Musy, 2007, *Ingénierie des eaux et du sol. Processus et aménagements*, Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 294 p.
- Touahir, S., A. Asri, B. Remini et H. Saad, 2018, Prédiction de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Zeddine et de l'envasement du barrage Ouled Mellouk (Nord-Ouest algérien), *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 24, 2, pp. 167-182.
- USDA, 1987, *The second RCA appraisal. Soil, water, and related resources on nonfederal land in the United States*, USDA, Washington, DC, 112 p.
- Van Der Knijff, J.M., R.J.A. Jones et L. Montanarella, 2000, *Soil erosion risk assessment in Europe*, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 38 p.
- Vanara, N. et R. Maire, 2008, Déforestation et érosion des sols dans les montagnes karstiques du Guizhou, Chine, *Les Cahiers d'Outre-Mer*, 244, 4, pp. 507-532.
- Wischmeier, W.H. et D.D. Smith, 1960, A universal soil-loss estimating equation to guide conservation farm planning, *Actes du 7th International Congress of Soil Science*, vol. I, pp. 418-425.
- Wischmeier, W.H. et D.D. Smith, 1978, Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning, *Agriculture Handbook*, 537, 58 p.
- Zahar, Y. et J.-P. Laborde, 2001, Les précipitations journalières extrêmes de Tunisie : cartographie des gradex et valeurs exceptionnelles. dans MAHERAS P. (éd. sc.), Publications de l'Association internationale de climatologie, actes du 13e colloque : Cartographie des pluies, à fine échelle, Nice, 6-9 septembre 2000, Thessalonique : Département de météorologie et de climatologie, université de Thessalonique, 13, pp. 181-190.
- Zingg, A.W., 1940, Degree and length of land slope as it affects soil loss and runoff, *Agric. Eng.*, 21, pp. 59-64.

ANNEXES

Figure 2. Courbe hypsométrique du bassin amont du Nahr el Kalb

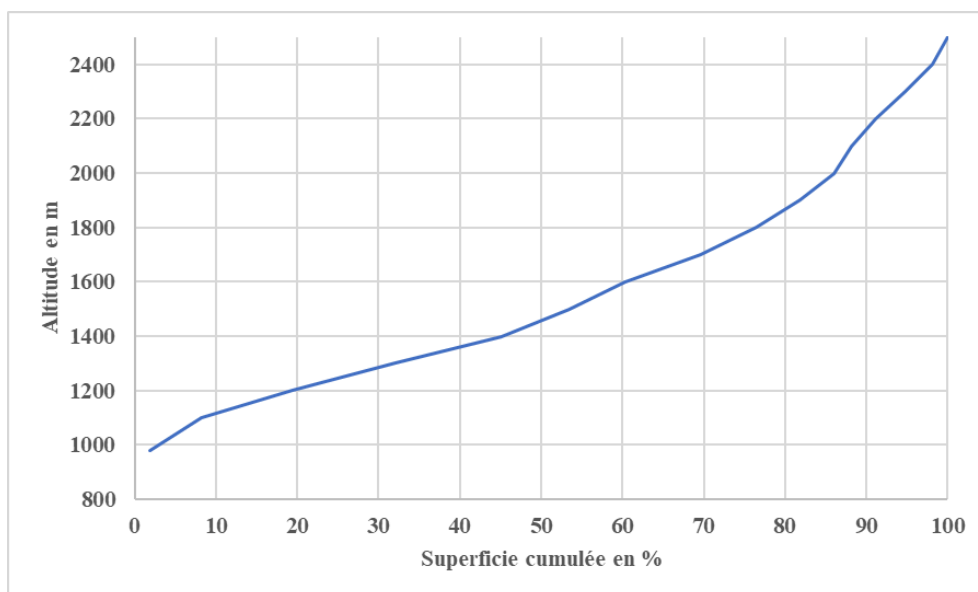


Figure 3. Représentation schématique de la méthode MESALES

| Couverture du sol | Battance | Pente % | Erodibilité | Facteur climatique | |
|------------------------|-----------|---------|-------------|--------------------|----|
| | | | | Q3 | Q4 |
| Culture perenne | 1 - 2 | 0 - 5 | 1 | 1 | 1 |
| | | 5 - 15 | 1 - 2 | 2 | 2 |
| | | | 3 - 4 | 2 | 3 |
| | 3 - 4 | > 15 | 1 - 2 | 3 | 3 |
| | | | 3 - 4 | 3 | 4 |
| | | 0 - 5 | 4 | 2 | 3 |
| Espace naturel dégradé | 1 - 2 - 3 | 5 - 10 | 4 | 3 | 4 |
| | | > 10 | 4 | 4 | 4 |
| | | 0 - 5 | 1 | 1 | 1 |
| Forêt | 1 - 2 - 3 | 5 - 30 | 2 | 2 | 2 |
| | | > 30 | 1-2-3 | 2 | 3 |
| | | | 4 | 3 | 4 |
| | < 15 | 15 - 30 | 1-2-3 | 1 | 1 |
| | | | 4 | 2 | 2 |
| | | > 30 | 1 - 2 | 1 | 1 |
| | 3 - 4 | 2 | 2 | | |

Tableau 1. La détermination du facteur K

| Sol | Texture | pH | Surface (ha) | | |
|------------------|------------|-----|--------------|--|--|
| Eutric Arenosols | Sandy clay | 6,4 | 461,6 | | |
| Eutric Gleysols | clay | 8,1 | 328 | | |

| Calcaric Gleysols | | | | clay | 8 | 62 | | |
|---------------------------|-------|-----------|--------|-----------------|-------------------|--------|---|-----------|
| Eutric Regosols | | | | clay loam | 7,8 | 101,5 | | |
| Leptic Luvisols | | | | Sandy clay loam | 7,3 | 129,6 | | |
| Lithic Leptosols | | | | clay | 8,1 | 467,3 | | |
| Leptic Andosol | | | | clay loam | 6,7 | 127,8 | | |
| Areno-Eutric Leptosols | | | | sandy clay loam | 7,4 | 467 | | |
| Calcaro Hortic Anthrosols | | | | clay loam | 7,6 | 1085,3 | | |
| Haplic Luvisols | | | | clay | 7,3 | 61,4 | | |
| Sol | Limon | Sable fin | Argile | Sable grossier | Matière oragnique | b | c | Facteur K |
| Areno-Eutric Leptosols | 12 | 18 | 27 | 43 | 0,79 | 3 | 2 | 0,15 |
| Eutric Gleysols | 29 | 10 | 50 | 11 | 2,37 | 1 | 4 | 0,10 |
| Eutric Regosols | 35 | 13 | 35 | 17 | 5,84 | 2 | 3 | 0,12 |
| Haplic Luvisols | 21 | 21 | 42 | 16 | 2,59 | 1 | 4 | 0,13 |
| Lithic Leptosols | 17 | 15 | 50 | 18 | 1,68 | 1 | 4 | 0,08 |
| Eutric Arenosols | 12 | 18 | 37 | 33 | 3,31 | 3 | 4 | 0,15 |
| Calcaro Hortic Anthrosols | 23 | 15 | 38 | 24 | 1,35 | 2 | 4 | 0,18 |
| Leptic Luvisols | 15 | 19 | 33 | 33 | 2,46 | 3 | 3 | 0,16 |
| Leptic Andosols | 29 | 14 | 29 | 28 | 1,77 | 2 | 3 | 0,20 |
| Calcaric Gleysols | 27 | 11 | 48 | 14 | 2,7 | 1 | 4 | 0,10 |

Tableau 2. La détermination de la battance

| Sol | Classe de Sensibilité à la battance |
|------------------------|-------------------------------------|
| Areno-Eutric Leptosols | 2 |
| Eutric Gleysols | 1 |
| Eutric Regosols | 2 |

| | |
|---------------------------|---|
| Haplic Luvisols | 1 |
| Lithic Leptosols | 1 |
| Eutric Arenosols | 2 |
| Calcaro Hortic Anthrosols | 2 |
| Leptic Luvisols | 3 |
| Leptic Andosols | 3 |
| Calcaric Gleysols | 2 |

Tableau 3. Les classes retenues du facteur pente

| Gradient de la pente | Surface en % |
|----------------------|--------------|
| 0-5% | 12,2 |
| 5-15% | 16,2 |
| 15-30% | 42,7 |
| 30-75% | 28,6 |

Tableau 4. Les différents types d'occupation du sol.

| Type d'occupation du sol | Surface | Pourcentage |
|--------------------------|---------|-------------|
| Tissus urbains | 217 | 5,5 |
| Espace naturel dégradé | 2026,5 | 50,9 |
| Culture pérenne | 784,1 | 19,7 |
| Forêt | 611,8 | 15,4 |
| Roche nue | 337 | 8,5 |

Tableau 5. Récapitulatif de l'aléa érosif.

| Risque | Surface (Km) | Pourcentage |
|-------------|--------------|-------------|
| Très Faible | 3,7 | 10,3 |
| Faible | 14,3 | 40,2 |

| | | |
|-------|------|------|
| Moyen | 5,1 | 14,4 |
| Fort | 12,3 | 34,8 |

Photo 2. Les racines exposées à l'air sur plus de 20 cm demeurent un témoin d'un fort aléa éro-sif.



Photo prise dans la région de Faraya.

Photo 3. L'état du sol dans la région de Baskinta provoqué par des fortes pentes et la dégradation du couvert végétale.



RÉSUMÉS

La dégradation du sol par l'érosion hydrique est un phénomène naturel qui peut être amplifié par les actions anthropiques. Les conséquences de ce phénomène sont néfastes et peuvent nuire aux caractères intrinsèques du sol, et entraîner sa disparition dans certains cas. Pour cartographier l'aléa érosion dans l'amont du bassin versant du Nahr el Kalb, nous avons adopté une approche hiérarchique, nommée MESALES, qui combine les paramètres pondérés de l'érosion (occupation du sol, pente, érodibilité du sol et climat) dans un Système d'information géographique (SIG). Afin de tenir compte des spécificités du milieu, l'érodibilité des sols a été calculée à partir de l'équation de Wischmeier et Smith (1960 ; 1978). Le bilan de ce travail montre le rôle prépondérant du couvert végétal. 67 % du périmètre d'étude subit une forte et très forte érosion, il s'agit essentiellement des secteurs ayant un couvert végétal dégradé ou en étant dépourvus. La précision globale du modèle et l'indice Kappa qui en sont ressortis sont estimés respectivement à 84 % et 80%.

Soil degradation by water erosion is a natural phenomenon that can be amplified by anthropogenic actions. The consequences of this phenomenon are harmful and can harm the intrinsic characteristics of the soil, and lead to its disappearance in certain cases. For mapping the erosion hazard upstream of Nahr el Kalb watershed, we have adopted a hierarchical approach, called MESALES, that combines the weighted parameters of erosion (land use, slope, soil erodibility and climate) using GIS. The soil erodibility was calculated from the equation of Wischmeier et Smith (1960; 1978) to take account of the specific environmental features. The results of this work show the predominant role of plant cover. 67% of the study area is undergoing strong and very strong erosion, mainly in sectors of either degraded plant cover or no plant cover. The overall accuracy of the model and the Kappa index resulting from it are estimated at 84% and 80% respectively

INDEX

Mots-clés : environnement, recherche, ressources naturelles, territoire, risque

Keywords : environment, research, natural resources, territory, risk

AUTEURS

HUSSEIN EL HAGE HASSAN

Enseignant chercheur, département de Géographie, Université Libanaise, Liban, Laboratoire de recherche CEDETE (EA 1210), Université d'Orléans, France, adresse courriel : hussein.el-hage-hassan@ul.edu.lb

LAURENCE CHARBEL

Enseignante chercheuse, département de Géographie, Université Libanaise, Liban, adresse courriel : laurence.charbel@ul.edu.lb

ALI KHYAMI

Doctorant, département de Géographie, Université Libanaise, Liban, adresse courriel : ali_khyami@hotmail.com