

Modélisation de l'érosion hydrique à l'échelle du bassin versant du Mhaydssé. Békaa-Liban

Hussein el Hage Hassan, Laurence Charbel et Laurent Touchart

Volume 18, numéro 1, mai 2018

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/1058444ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Université du Québec à Montréal
Éditions en environnement VertigO

ISSN

1492-8442 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

el Hage Hassan, H., Charbel, L. & Touchart, L. (2018). Modélisation de l'érosion hydrique à l'échelle du bassin versant du Mhaydssé. Békaa-Liban. *VertigO*, 18(1).

Résumé de l'article

Le Liban des hautes plaines subit une érosion hydrique qui tend à décaper ses sols et menacer ses activités agricoles. L'effet conjugué des actions anthropiques (conduites culturales, déboisement, surpâturage) et des facteurs naturels (agressivité climatique, versants abrupts, sol), fragilise le sol et menace les parcelles agricoles par le dépôt des sédiments. Mhaydssé est un village concerné par le problème, représentatif des conditions naturelles et anthropiques du sud-est de la Békaa. L'étude utilise les SIG et l'équation universelle des pertes en terre (USLE). Pour remplacer l'intensité des précipitations, l'indice d'agressivité a été calculé à partir de l'équation de Renard et Freimund. Cinq types de sols ont été échantillonnés, pour lesquels la granulométrie a été analysée en cinq classes. La topographie (pente), le couvert végétal et les pratiques anti-érosives sont les autres facteurs qui ont été quantifiés. Sur les 1800 hectares du terrain d'étude, la perte moyenne en terre est de 46 t/ha/an. Cette valeur élevée est issue d'une grande hétérogénéité spatiale. Les versants dénudés subissent des taux supérieurs à 300 t/ha/an, tandis que le fond de la plaine n'est pratiquement pas touché. Les grandes différences spatiales sur de petites distances confirment le bienfondé d'une analyse précise de la texture des sols.



Modélisation de l'érosion hydrique à l'échelle du bassin versant du Mhaydssé. Békaa-Liban

Hussein el Hage Hassan, Laurence Charbel et Laurent Touchart

Introduction

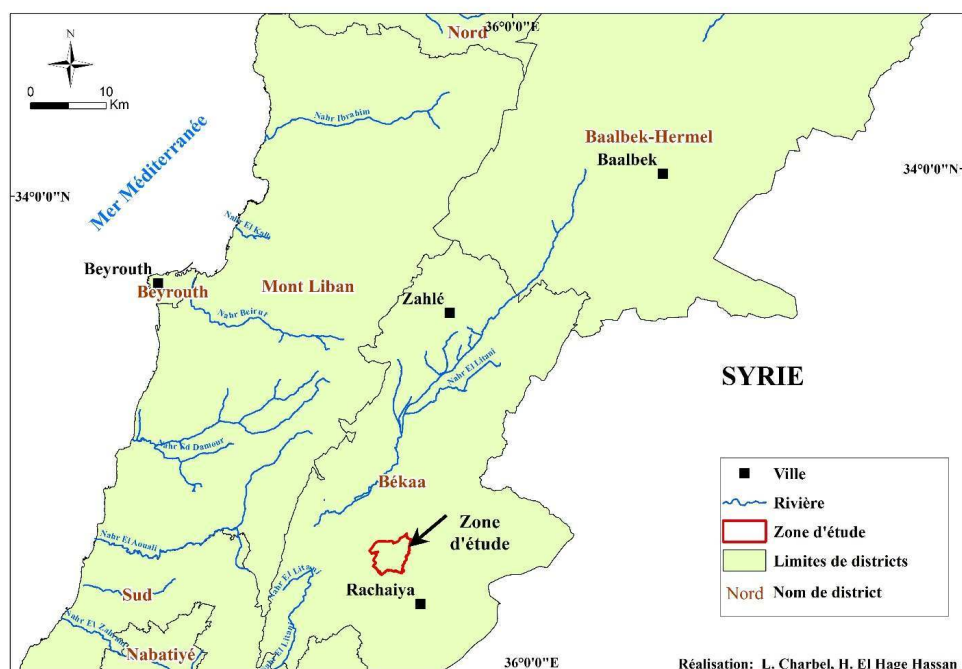
- 1 L'érosion hydrique consiste en un enlèvement des particules du sol, qui sont transportées plus loin en aval. Il s'agit d'une forme de dégradation des sols, qui varie dans le temps et dans l'espace. Cet ensemble de processus provient de l'interaction de facteurs actifs, en particulier l'agressivité climatique passive, notamment la texture du sol, la couverture végétale, la valeur de pente. À la complexité du phénomène physique vient s'ajouter la conduite des activités humaines, accentuant l'érosion ou luttant contre elle.
- 2 Formant les hautes terres agricoles du Liban, entre les deux chaînes de montagnes qui la dominent, la plaine de la Békaa connaît des conditions environnementales fragiles, là où le climat méditerranéen d'abri se dégrade en climat semi-désertique et où les ruptures de pentes sont nombreuses. Au sud-est de celle-ci, la région de Rachaya, qui s'insinue dans l'Anti-Liban, reçoit des apports d'eau suffisants pour pratiquer l'agriculture, cependant que l'urbanisation n'est pas absente, son chef-lieu ayant le statut de ville et s'enorgueillissant de la riche histoire de sa citadelle. Le territoire souffre néanmoins des dégâts de l'érosion hydrique, si bien que l'un des villages de la contrée, Mhaydssé, s'en est récemment inquiété officiellement, appelant à une expertise scientifique.
- 3 Le présent article a un double objectif. Il s'agit d'abord, sur le plan méthodologique, de montrer que l'équation universelle des pertes en terre (USLE) de Wischmeier et Smith (1960, 1978) peut être utilisée dans les régions où il manque certaines données, notamment l'intensité des précipitations, en remplaçant celle-ci par un indice d'agressivité (Renard et Freimund, 1994), et aussi d'apporter dans les équations les données granulométriques provenant d'analyses d'échantillons de sols récoltés sur le terrain. Nous proposons d'améliorer ces calculs par le croisement avec un SIG à toutes les

étapes. Le second objectif est d'appliquer cette méthode à un périmètre d'étude de petite taille, mais hétérogène, afin de cartographier les pertes en terre de façon précise. Cette nouvelle démarche doit pouvoir apporter des réponses plus exactes et nuancées que d'autres études précédentes, y compris des mêmes auteurs, sur l'érosion des sols dans la Békaa.

Le site d'étude du village de Mhaydssé et son environnement

- 4 Le site d'étude se trouve être le village de Mhaydssé, qui est une partie du territoire administratif de Rachaya (Figure 1). Le besoin pratique d'une meilleure connaissance de l'érosion hydrique par les autorités pour atteindre à une plus grande efficacité des décisions locales d'aménagement du territoire coïncide ici avec la représentativité de ce terrain pour l'étude scientifique de la Békaa méridionale, tant pour ses totaux pluviométriques que ses conditions géomorpho-pédologiques et son mode d'occupation du sol agricole. Même regardés par un non-spécialiste, les versants dénudés offrent un paysage dans lequel le risque érosif apparaît manifestement. À l'intérieur de ce village, nous avons choisi un secteur accessible, d'une superficie d'environ 1800 hectares, compris entre 33°32'15" et 33°35'15" de latitude Nord et 35°46'30" et 35°49'55" de longitude Est, qui permettait la prise d'échantillons de sols.

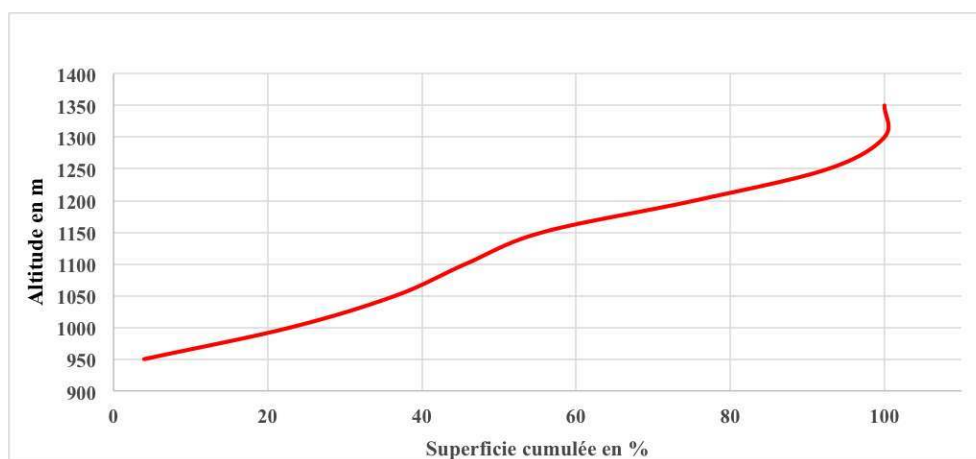
Figure 1. Localisation de la zone d'étude. Location of the study area.



- 5 La pente moyenne est de l'ordre de 16% et l'altitude varie entre 960 à l'exutoire et 1350 m, pour le point culminant, lui conférant ainsi deux unités morphologiques :
 - Les versants, localisés à l'ouest, à forte valeur de pente (sol peu profond et lithologie affleurante aux endroits les plus découpés).

- La partie est, la plaine, caractérisée par l'épaisseur des sols et l'absence d'affleurement géologique.
- 6 L'interprétation de la courbe hypsométrique (Figure 2), qui expose la maturité du bassin versant, permet de séparer deux sections:
- La zone de basse altitude, comprise entre 960 et 1100 mètres, occupe 40% de la superficie du bassin versant. Cette section ayant un gradient de pente relativement faible s'avère une zone d'accumulation des sédiments. Toutefois, lors des événements pluvieux, même de faible importance, cette zone subit des inondations fréquentes.
 - La zone de haute altitude, au-delà de 1150 mètres, couvre 60% de sa superficie totale du bassin. Cette section se distingue par un gradient de pente relativement élevé.

Figure 2. La courbe hypsométrique de la zone d'étude / hypsometric curve of the study area.



- 7 Le substratum géologique des versants est composé de roches du Tertiaire, principalement, de marnes et de calcaires sub-récifaux et couvert par un manteau de Lithic Leptosol et de l'Eutric Regosol (IUSS Working Group WRB, 2014) qui y sont largement répandus. Cependant, dans la plaine, d'autres unités pédologiques profondes recouvrent la structure composée de calcaires, de calcaires dolomitiques, de marnes et de marno-calcaires blanc du Crétacé moyen et supérieur.
- 8 Le climat local, de type semi-aride, se caractérise par un contraste saisonnier, un hiver brutalement arrosé et un été chaud et sec, ce qui contribue à la déstabilisation de la structure des sols. Au Liban, les variations interannuelles des moyennes des précipitations sont remarquables (FAO, 2006) et peuvent atteindre 23,6 % de la quantité annuelle (Blanchet, 1965). La saison humide, à Mhaydssé, s'étend de novembre à avril avec une moyenne annuelle de pluie avoisinante les 800 mm. L'humidité relative varie entre 60 et 75 %. Les températures moyennes sont maximales (30°) en juillet, août et minimales en janvier (8,5°). L'évapotranspiration annuelle est calculée à 1175 mm.
- 9 La végétation naturelle présente un étagement selon l'altitude, elle se présente sous forme de forêts de genévriers dégradées. La déforestation serait à l'origine de la dégradation du milieu naturel. Ici on y pratique principalement des cultures pérennes et des céréales, les terrains incultes et abandonnés sont clairement discernables.
- 10 La destruction des couches superficielles, provoquée par l'érosion en nappe combinée à l'érosion aratoire, favorise la modification de l'état de surface qui sera d'autant plus vulnérable que le taux de la végétation sera faible (Ben Cheikha et Gueddari, 2008). À

l'échelle locale, il s'agit d'apprécier l'érosion aréolaire, qui décape l'horizon humifère, et pose des problèmes de sédimentation sur les parcelles agricoles.

Une méthodologie fondée sur l'équation universelle des pertes en terre et les SIG

11 Wischmeier et Smith (1960 - 1978) ont proposé l'équation universelle des pertes en terre (USLE) pour prédire l'érosion hydrique à l'échelle du champ cultivé et des petits bassins versants. Ce modèle relatif aux conditions de milieux des États-Unis vise à relier les paramètres mesurables à des phénomènes physiques (Cerdan *et al.*, 2006). L'équation USLE réunit les facteurs qui déterminent les pertes en sol (A) : la topographie (LS), l'agressivité climatique (R), l'érodibilité du sol (K), le couvert végétal (C), les techniques antiérosives (P). Bien qu'USLE soit largement utilisée dans le monde scientifique, cette équation connaît certaines limites et elle nécessite des paramètres de calibration qui ne sont pas toujours disponibles. De plus elle ne s'applique qu'à l'érosion en nappe. La méthode utilisée dans la présente étude s'appuie sur la formule de Wischmeier et Smith qui a déjà été employée par de nombreux auteurs dans la région méditerranéenne (Raissouni *et al.*, 2016 ; El Garouani *et al.*, 2005). La méthodologie adoptée doit aboutir, à travers de la construction d'une base de données numérique dans un SIG, à la cartographie du risque érosif. Pour atteindre l'objectif, nous avons suivi la démarche suivante :

- Le traitement des données collectées des différents facteurs du modèle USLE et la représentation cartographique de toutes les couches d'informations requises. Pour le bon déploiement de l'analyse spatiale, les cartes thématiques ont été géoréférencées (selon la projection conique conforme de LAMBERT) et calées (en fonction du système de coordonnées de référence de la zone) ensuite transformées en format Raster afin d'affecter une valeur numérique à chaque maille. Les cultures sous abri, les roches à nues, les plans d'eau et les tissus urbains ont été exclus des analyses.
- La quantification de l'érosion hydrique, à partir de la combinaison des cartes thématiques en format raster (l'agressivité climatique, l'érodibilité du sol, la topographie, l'occupation des sols et les pratiques anti-érosive). USLE nous a permis de mesurer la répartition spatiale du taux de pertes en terre pour chaque pixel, exprimé en t/h/an.

12 La méthodologie suivie requiert des données relatives aux facteurs érosifs. Pour mener l'étude, nous avons utilisé des documents suivants :

13 Données cartographiques :

- Les cartes des sols de Rachaya à 1/50000, publiées par le CNRS libanais.
- Les cartes topographiques (Rachaya) à 1/20000 et ayant une équidistance des courbes de niveau de 10 m, publiées en format raster par la direction des affaires géographiques de l'armée libanaise.
- Image satellitaire Worldview (prise en août 2011) avec une résolution de 2,5cm x 2,5cm.

14 Données climatiques :

15 La pluviométrie à partir des données de Lebanon Reforestation Initiative (LRI), celles de l'Atlas climatique du Liban, IRAL (Institut de Recherche Agronomique Libanais) et de la station météorologique de l'aéroport de Beyrouth.

Le pouvoir érosif des pluies (R)

16 L'agressivité climatique favorise l'érosion, ce qui amène à accorder au climat un effet dévastateur (Bou Kheir, 2001). L'action des précipitations amplifie les forces motrices nécessaires à l'arrachement des particules du sol. L'indice (R) exprime la capacité des pluies à éroder. Les pluies, par leur intensité et leur énergie, sont le facteur principal déterminant des pertes en terres. Wischmeier et Smith (1978) ont déterminé l'érosivité de la pluie pour un épisode pluvieux par l'équation suivante :

17 $R = KE * I^{30}$

18 KE = l'énergie cinétique des gouttes de pluie en Joules.

19 I = l'intensité maximale de la pluie pendant 30 minutes consécutives exprimée en mm / h.

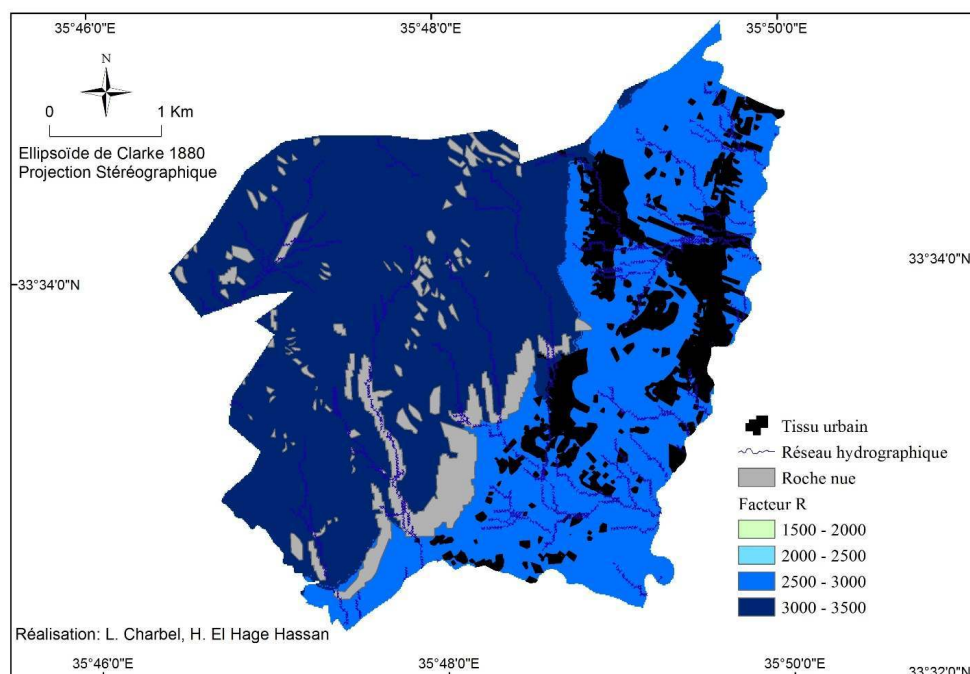
20 L'absence de régularité dans le temps des données climatiques est un frein à l'utilisation de cette équation. En revanche, des études précédentes (Payet et *al.*, 2011 ; Morschel et Fox, 2004; Sadiki *et al.*, 2004) ont intégré des formules alternatives, basées sur les moyennes mensuelles et annuelles, proposées par Renard et Freimund (1994) ; Arnoldus (1980) ; Heusch (1970) ; Kalmen (1970) et Fournier (1960) dans l'équation universelle des pertes en sol (USLE). Pour pallier le manque de données climatiques, nous avons calculé l'indice d'agressivité R sur la base de l'équation de Renard et Freimund qui établit une relation entre (R) et la hauteur de pluie annuelle moyenne (P) :

21 $R = 0.0483P^{1.610}$, si $P \leq 850$ mm

22 $R = 0.004105P^2 - 1.249P + 587$, si $P > 850$ mm

23 La carte des précipitations moyennes mensuelles du secteur d'étude, extraite de celle du Liban, a été dressée par le LRI à partir des données climatiques multi-sources issues de plusieurs stations météorologiques (Tal Amara, Aéroport de Beyrouth, Rachaya..., 1950-2012). Cette carte a été produite en s'appuyant sur l'interpolation Spline du logiciel ArcGis 10.3 et à partir d'un fond topographique (équidistante des courbes de niveau de 10 mètres). Les informations fournies par cette carte notent que P varie entre 690 et 999 mm. À partir de cet intervalle, nous avons réalisé la carte en format raster montrant la répartition spatiale de l'indice d'agressivité des pluies. Les valeurs résultantes pour chaque pixel varient entre 1797 et 3436 (Figure 3).

Figure 3. Distribution des valeurs du facteur R / Distribution of the values of R factor.



L'érodibilité du sol (K)

- 24 Les sols méditerranéens ont tendance à se dégrader dès qu'on les dénude et en l'absence d'un apport suivi de litière (Roose *et al.*, 2012). Plusieurs paramètres sont indispensables pour déterminer la vulnérabilité du sol à l'érosion. Il s'agit de la capacité d'infiltration, la texture de rétention et la susceptibilité à l'arrachement. L'infiltration et la cohésion élevée des matériaux accroissent la résistance du sol à l'arrachement et au ravinement. La faible teneur en argile favorise l'érodibilité. Le taux élevé du limon et du sable fin déstabilise la structure du sol et le rend sensible à l'agressivité climatique. De même, pour la matière organique, qui améliore les propriétés physiques et chimiques (cohésion, stabilité structurale, porosité) du sol, elle augmente la capacité à retenir l'eau et renforce la résistance à l'érosion (El Hage Hassan, 2011 ; Barthès *et al.*, 1998). Pour connaître ces paramètres, nous avons consulté la carte de Rachaya au 1/50 000, et les analyses réalisées sur plusieurs profils de sol effectuées par le CNRSL (Darwish *et al.*, 2006). L'étude pédologique du CNRSL décrit les propriétés des différentes subdivisions de sol.
- 25 Le pourcentage du sable fin n'étant pas fourni pour l'ensemble des profils de sols, nous étions dans l'obligation de procéder au prélèvement et d'analyse de nouveaux échantillons, dans un laboratoire spécialisé, pour compléter les données. Ce travail a été opéré en collaboration avec les chercheurs de l'Institut de recherches agronomiques du Liban (IRAL).
- 26 Un seul échantillon a été prélevé par type de sol. En revanche, pour le Lithic Leptosol qui occupe 70% de la surface d'étude, deux échantillons ont été réalisés afin d'appréhender sa variabilité spatiale. Ces échantillons, qui ont été traités par la suite dans le laboratoire spécialisé de l'IRAL, nous ont servi à diviser la granulométrie en cinq classes (sable fin, sable grossier, limon fin, limon grossier et argile).

- 27 La texture du sol, qui s'avère en majorité argileuse, a été évaluée à l'aide du triangle de texture (Brown, 2003). La valeur du facteur K est calculée selon la formule de Wischmeier et Smith (1978), qui requiert des données sur la granulométrie, la matière organique, la perméabilité et la structure du sol (Figure 4 et tableau 1).
- 28 $100K = 2,1 \cdot M^{1,14} \cdot 10^{-4} (12-a) + 3,25 (b-2) + 2,5 (c-3)$
- 29 $M = \text{facteur granulométrique} = (\% \text{ limon} + \% \text{ sable très fin}) (100 - \% \text{ argile})$
- 30 $a = \text{matière organique}$
- 31 $b = \text{code de la structure du sol}$
- 32 $c = \text{code de la classe de perméabilité.}$

Figure 4. Distribution des valeurs du facteur K. Distribution of the values of K factor.

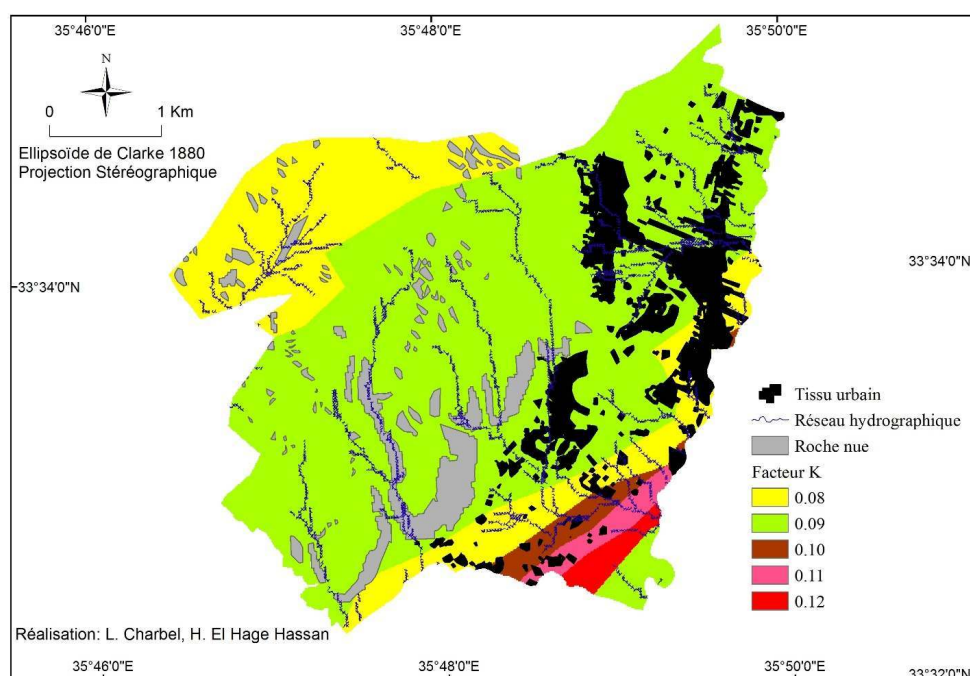


Tableau 1. La détermination du facteur k.

SOL	TEXTURE	K	Surface en hectares	Pourcentage
Areno-Eutric Leptosols	clay loam	0.109	26	1.7
Eutric Gleysols	clay	0.104	32.2	2.1
Eutric Regosols	clay	0.08	400	24
Haplic Luvisols	clay	0.12	21.5	1.4
Lithic Leptosols	clay	0.09	1060	70.7

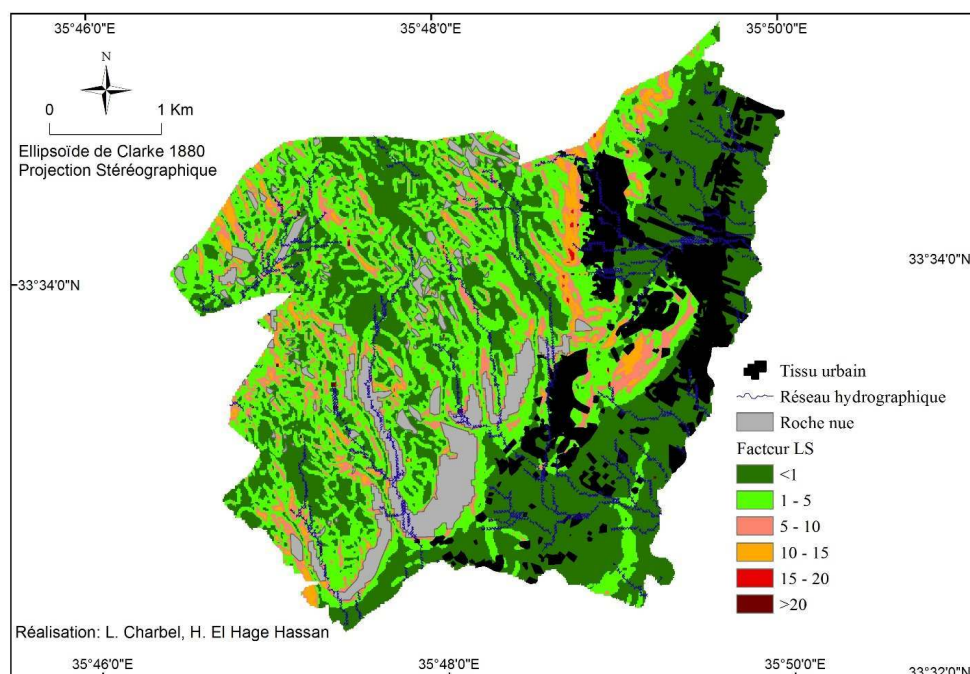
- 33 L'indice d'érodibilité (K), qui démontre la vulnérabilité du sol à être érodé dépend des propriétés intrinsèques du sol : la granulométrie, l'agrégation, la structure, et la teneur

en matière organique. Les résultats obtenus affichent une faible variabilité du facteur K découlant des caractéristiques physico-chimiques proches des différents types de sols. K croît de 0.08 et 0.09 pour les sols les moins sensibles : Eutric Regosols et Lithic Leptosols, à 0.10 et 0.12 pour les sols les plus fragiles : Eutric Gleysols, Arenic Eutric Leptosols et Haplic Luvisols. D'une manière générale, les valeurs de K montrent que les sols sont assez résistants à l'érosion.

Les facteurs topographiques

- 34 La topographie influence largement le mécanisme d'érosion hydrique. Plusieurs éléments sont à prendre en considération pour juger le rôle du facteur topographique. Il s'agit de la longueur et l'angle de la parcelle, l'état de surface, la position topographique et la forme de la pente. La rigidité de la pente accentue la force érosive des eaux ruisselées. La longueur de la pente privilégie les écoulements aux dépens de l'infiltration et cause des incisions importantes (Neboit, 1991). Toutefois, les impacts de la longueur de la pente sont incertains (De Noni, 2001 ; Roose, 1994) et le comportement des sols vis-à-vis de l'infiltration dépend de la texture et de l'état de la surface (Casenave et Valentin, 1989). Sur une pente faible, les modifications des pratiques culturales peuvent occasionner les pertes en terre.
- 35 Pour l'équation universelle des pertes en sol (USLE), l'action du relief est appréciée à travers la longueur et l'inclinaison de la pente et ne tient pas compte des interactions avec les autres éléments (Heusch, 1970).
- 36 $LS = (\lambda/22, 1)^m (65,4 \sin\theta^2 + 4,56 \sin\theta + 0,065)$
- 37 λ = La longueur de pente en mètre,
- 38 θ = L'inclinaison de la pente en %,
- 39 m = Le facteur établi en fonction de la pente
- 40 ($m = 0,5$ si la pente est $> 5\%$, $m = 0,4$ si la pente est de $3,5$ à $4,5\%$, $m = 0,3$ si la pente est de 1 à 3% et $m = 0,2$ si la pente est $< 1\%$).
- 41 La mise en place de cette équation exige la création de deux cartes, une pour la longueur de la pente et l'autre pour l'inclinaison, avant de les associer afin d'évaluer les valeurs du facteur LS. À partir des courbes de niveaux distantes de 10 m, et à l'aide d'ArcGis 10.3, nous avons dressé le MNT du terrain. Cette carte, transformée par la suite en format Raster, a permis de calculer le gradient de la pente pour chaque pixel.
- 42 L'effet de la longueur (L) sur l'érosion est défini par le moyen d'une carte MNA (modèles numériques d'altitude). Nous avons extrait les flux du réseau hydrographique et calculé la longueur de la pente. La combinaison des deux cartes en format raster a permis de produire une carte (Figure 5) composée d'une centaine d'unités, chaque unité expose une valeur du facteur LS. Les valeurs résultantes, réparties entre 0,1 et 28, ont été regroupées en 5 classes.

Figure 5. Les classes des valeurs du facteur LS. . The classes of the values of LS factor.



Le couvert végétal

- 43 Le couvert végétal est le facteur le plus actif, à notre portée, pour contrôler le risque d'érosion hydrique. Il fournit au sol une protection mécanique contre l'ablation en diminuant la force vive des eaux. La végétation agit comme un écran protecteur face à l'agressivité climatique en interceptant l'énergie libérée par les gouttes de pluie (Bou Kheir, 2002). L'effet de la végétation, qui maintient le sol par le biais du système racinaire, varie selon le mode d'occupation du sol. La physionomie (caractère du feuillage, écartement des plants) et la phénologie des plants (durée de la pousse) ainsi que les critères agronomiques (date des semis, type de labours) sont les paramètres les plus opérationnels qui permettent de diminuer ou contribuer à la dégradation des sols (El Hage Hassan *et al.*, 2013; Rey *et al.*, 2004). La mise à nu des sols par le déboisement et le surpâturage diminue l'infiltration et favorise le ruissellement qui peut devenir abondant sur les versants. Des études menées à l'échelle du bassin versant ont montré que les pertes en terre accroissent quand la végétation diminue (Battany *et al.*, 2000). Les secteurs dénudés sont soumis à l'érosion, tandis que les secteurs végétalisés sont protégés (Reid *et al.*, 1999). La divergence du mode d'occupation du sol, dans le secteur d'étude, intervient sur son action protectrice vis-à-vis de l'érosion. Afin de produire la carte des valeurs «C», il a fallu identifier le mode d'occupation du sol. La discrimination des terrains cultivés repose sur le type de culture. À partir d'une image satellitaire Worldview de haute résolution, en plus des observations de terrain, nous avons établi la carte d'occupation du sol du Mhaydssé.
- 44 En tenant compte des tableaux de Wischmeier et Smith (1978), basés sur la hauteur de la végétation ainsi que le taux de recouvrement, et en s'appuyant sur les études antérieures réalisées dans la région méditerranéenne (Sadiki *et al.*, 2009 ; El Garouani *et al.*, 2008),

nous avons accordé à chaque type de couverture de sol une valeur qui lui est propre. « C » varie de 1 sur le sol nu où les pertes sont intensifiées, à 0,7 sous les forêts dégradées, à 0,45 sous la végétation herbacée clairsemée et à 0,4 avec les céréales compte tenu du calendrier cultural où le sol est privé d'une protection pendant les mois les plus arrosés. Le facteur C diminue jusqu'à 0,34 sous les vergers et les vignobles, qui n'assurent pas une protection continue, jusqu'à 0,28 sous les oliveraies (Figure 6 et Tableau 2).

Figure 6. Détermination des valeurs du facteur C. Determination of the values of C factor.

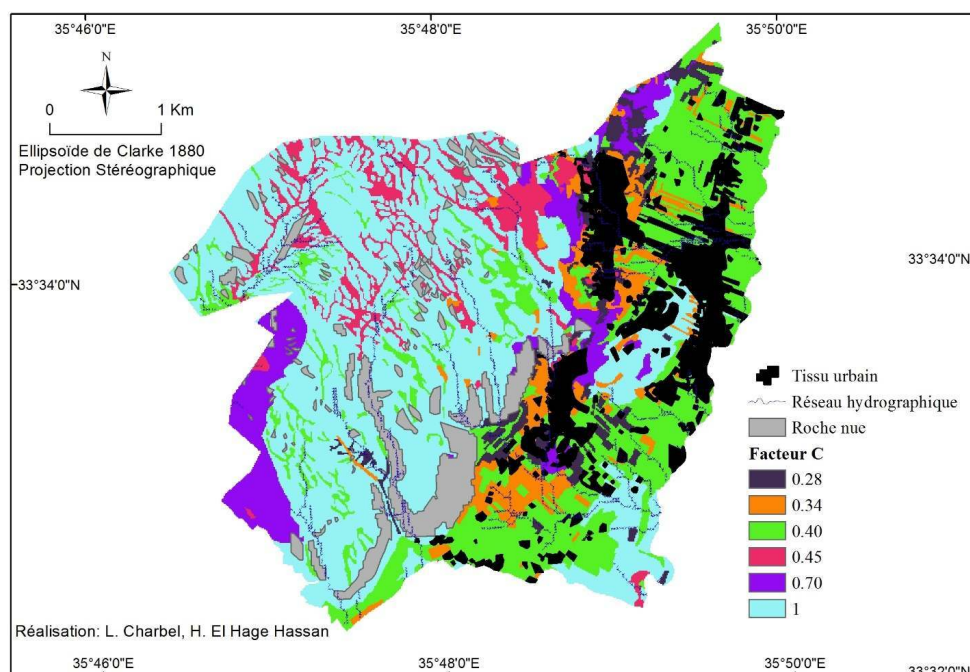


Tableau 2. Les différents types d'occupation du sol.

Type d'occupation du sol	surface	Pourcentage	Facteur c
Céréales	374	25	0,4
Forêt dégradé	116,4	8	0,7
Olivier	62	4	0,28
Terrain inculte	705,5	48	1
Vergers, vigne	113	7,6	0,34
Végétation herbacée	97	6,6	0,45

Pratiques anti-érosives

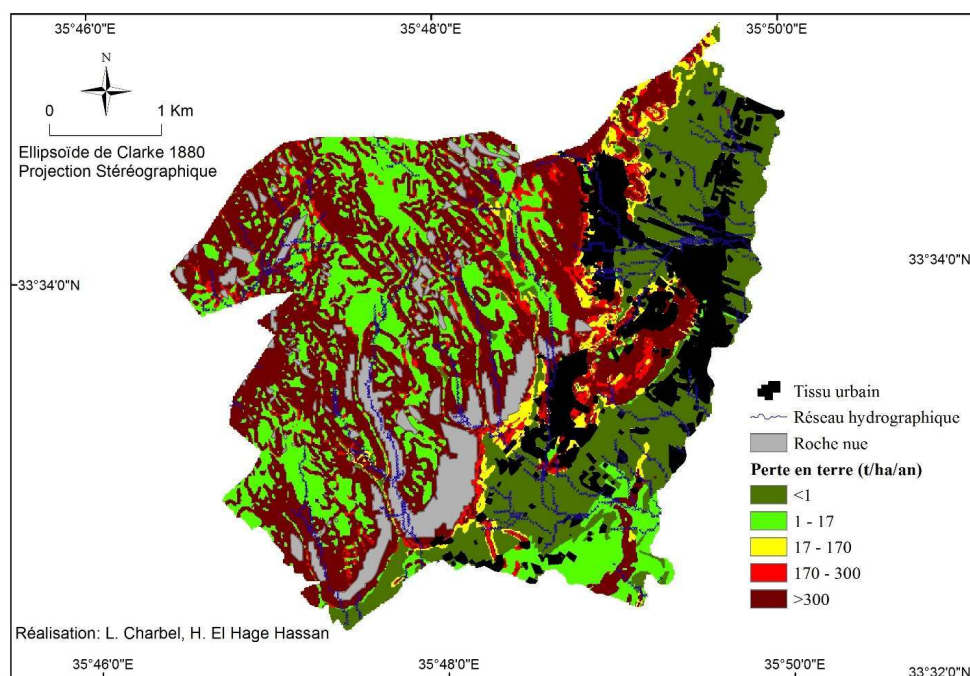
- 45 Il s'agit du facteur P qui exprime l'impact des pratiques tentant de modérer l'intensité de l'érosion. Les incidences des pratiques antiérosives permettent de minimiser l'action du

ruissellement en modifiant sa direction et en réduisant l'inclinaison et la longueur de la pente et, par conséquent, limiter l'ablation et le transport de particules du sol. Nombreuses techniques anti-érosives ont été adoptées telles que les terrasses agricoles, le labour en courbes de niveau, le buttage.... La mise en œuvre de ces pratiques semble opérationnelle dans la mesure où elles sont suivies. Le facteur P a été fixé à la valeur 1 sur la majorité du secteur d'étude puisque les dispositifs anti-érosion sont inexistant, à l'exception d'une superficie modeste occupée par des cultures en bandes suivant les courbes de niveau pour lesquelles nous lui avons attribué une valeur de 0,25 (Stone et Hilborn, 2000).

Résultat et Discussion

- 46 La combinaison des différents facteurs qui composent l'équation universelle (USLE) a permis de produire la carte des pertes moyennes potentielles en terre (Figure 7). L'analyse de la carte a permis d'identifier les pertes de terre pour chaque pixel. Le modèle adopté, USLE, expose la dynamique d'érosion en nappe et sa variabilité entre les zones distinctes selon la conduite des facteurs (R, K, LS, C, P) concourant à l'érosion. La moyenne en perte de terre est évaluée à 46 t/ha/an, ce qui est jugé comme élevé (Payet, 2012 ; Ranivoson, 2007; Sadiki *et al.*, 2004). Afin d'apporter des explications pour les valeurs hétérogènes obtenues comprises entre 0 et 600 t/ha/an, leur confrontation avec les valeurs de chaque facteur a été indispensable.

Figure 7. Répartition spatiale des pertes en terre. Spatial distribution of soil losses.



- 47 Les surfaces les plus vulnérables représentent 640,5 hectares et peuvent délivrer des quantités de pertes supérieures à 300 t/ha/an. En effet, la fragilisation du milieu par l'homme (déforestation, pratiques culturales), accentuée par les précipitations agressives et par l'irrégularité topographique favorise l'emprise de l'érosion hydrique. Ici, les versants dénudés sont les plus marqués par le phénomène érosif.

- 48 Les valeurs de pertes comprises entre 17 et 170 t/ha/an, affectent une superficie de 58 hectares. Ces valeurs s'observent sur les pentes moins fortes associées à un couvert végétal plus ou moins protecteur où les pluies deviennent moins intenses.
- 49 L'érosion hydrique devient modérée sur les replats et les pentes concaves où le couvert végétal participe au contrôle de l'agressivité climatique, les pertes ont été évaluées entre 1 à 17 t/ha/an. Dans cette catégorie, les pertes deviennent marginales et tolérées.
- 50 Les valeurs proches de zéro, qui occupent une superficie de 359 hectares, correspondent généralement au secteur de sédimentation. Ce processus menace les terrains réservés aux cultures annuelles et à l'arboriculture. Néanmoins, il s'avère nécessaire de discuter des résultats de cette étude. Bien que l'USLE soit largement employée par de nombreux auteurs pour chiffrer les pertes en sol, il est nécessaire de reconnaître ses limites. Le modèle empirique ne s'applique que sur les pentes inférieures à 25% (Roose et De Noni, 2004), et ne tient pas compte des secteurs de sédimentation voire de certaines interactions entre les facteurs les plus représentatifs de l'érosion.
- 51 Le couvert végétal augmente la protection du sol en interceptant une partie des précipitations (El Hage Hassan *et al.*, 2015). Les pertes de terre varient selon la densité et le type de végétation. Le secteur d'étude a été affaibli par la régression du couvert végétal, le facteur C y varie entre 0,7 et 1 pour 818 hectares de la surface du secteur. Les techniques antiérosives, qui permettent de diminuer l'impact de la pente sur l'érosion et de fixer les sols, sont absentes à l'exception de quelques hectares aménagés en terrasses agricoles. La carence des moyens de lutte contre l'érosion tant par un couvert végétal dense que par des pratiques culturales adaptées met en lumière l'insuffisance de la protection contre l'agressivité du facteur R qui atteint 3436.
- 52 L'exploitation excessive des surfaces boisées, afin d'assurer les besoins en bois de chauffage et en charbon de bois, a entraîné l'apparition du processus d'érosion sur une surface importante là où le sol repose sur un horizon peu développé. L'érosion aréolaire a provoqué l'élimination de l'horizon humifère, l'affaiblissement de l'épaisseur du sol et l'apparition de la roche nue. Des mesures de protection doivent être envisagées pour réduire les pertes en terre. De nombreux travaux scientifiques soulignent le rôle du couvert végétal pour lutter contre l'érosion (El Hage Hassan *et al.*, 2016). Ici, l'érosion n'est pas uniquement due à l'absence de couvert végétal. Les effets cumulatifs des conditions pédoclimatiques, la disparition de la végétation sur des sols fragiles, la topographie accidentée et l'absence de pratiques anti-érosives seraient à l'origine de l'érosion. Cela a été clairement confirmé à partir des observations de terrain. Tous ces facteurs sont à prendre en considération pour expliquer la répartition spatiale de l'érosion.
- 53 La carte de synthèse expose la répartition spatiale de l'érosion en nappe dans le village de Mhaydssé. L'équation USLE est conçue pour prédire les pertes moyennes en terre sur une période de 20 ans. La validation de ce modèle requiert des mesures régulières des pertes au fil des années ce qui permet d'estimer l'effet conjugué de la pente, le sol et la végétation dans l'érosion. Étant donné qu'aucune étude précédente au Liban ne s'est basée sur des méthodes quantitatives, cela rend la confirmation des résultats difficile. En revanche, les observations de terrains ont permis de repérer des pédicules d'érosion (colonnes de terre protégées par des pierres), surtout sur les versants dénudés, alors que les agents d'érosion ont balayé le sol autour de ces pédicules. Certaines vérifications, basées sur la réponse spectrale des zones érodées (indice de brillance) ont été effectuées,

en utilisant l'image satellitaire de haute résolution spatiale Ikonos (1 m), surtout pour les secteurs ayant un relief accidenté et difficilement accessible, qui révèle une précision globale du traitement de l'ordre de 85 %.

- 54 Cependant, afin d'appréhender l'hétérogénéité des résultats ordonnés de la carte de synthèse, un indice qualitatif est assigné à chaque classe en allant du faible à fort. Dans ce contexte, l'équation USLE permet de simuler l'extension de l'érosion aréolaire dans l'avenir et son impact sur l'environnement. Cela permettra aux décideurs locaux de mettre en place des mesures de protection en amont.

Conclusion

- 55 La mise en œuvre de l'Équation universelle de pertes en sol à l'aide d'un système d'information géographique a permis une estimation quantitative des espaces érodés sur un terrain d'étude du sud-est de la Békaa représentatif des hautes terres agricoles du Liban.
- 56 L'agressivité climatique est d'autant plus vigoureuse qu'elle s'exerce sur des sols déstabilisés et craquelés, par la sécheresse, et en l'absence d'un couvert végétal dense (Hugonie, 1999). L'absence des données précises sur l'intensité des précipitations nous a amenés à employer l'équation de Renard et Freimund (1994). Malgré la petite taille du secteur d'étude, les valeurs évaluées du facteur R sont variables compte tenu de l'effet orographique et de l'exposition. Les versants du Mhaydssé, qui dominent la plaine, sont exposés au vent humide en provenance de l'ouest et reçoivent les précipitations les plus abondantes. En revanche les précipitations régressent en se dirigeant vers l'Est. Les études antérieures basées sur la formule de Renard et Freimund ont présenté des résultats convaincants par rapport aux données mesurées.
- 57 L'effet du processus d'érosion est remarquable sur les pentes dénudées. Les observations précises sur le terrain ont montré que sur les versants, où le sol a été enlevé, des plages affectées par l'érosion aréolaire laissent la roche à nue. En liant les deux cartes, la longueur et le gradient de la pente ont permis de calculer la valeur LS pour chaque unité. Certaines d'entre elles atteignent une valeur de 76. Ces valeurs élevées se croisent avec les roches nues qui sont exclues de l'analyse de la carte.
- 58 Le rôle du couvert végétal ainsi que le mode d'occupation du sol, impliquant une gestion raisonnée des activités humaines vis-à-vis de l'érosion hydrique, ont été confirmés dans cette étude. L'homme, par les pratiques exercées, provoque la destruction, totale ou partielle, de la structure superficielle du sol et, par conséquent, accentue le phénomène érosif. La végétation intervient face à l'érosion de deux façons, soit directement en limitant le ruissellement et protégeant le sol, soit en améliorant les propriétés du sol (Cohen et Rey, 2005). On sait par ailleurs que sous les forêts denses, les sols peuvent retenir jusqu'aux 2/3 de l'eau précipitée (Hunzinger, 2000). En revanche la destruction de la végétation nuit à l'environnement et accroît le risque érosif. L'étude détaillée du mode d'occupation du sol étant dès lors indispensable, nous avons donc utilisé une image Worldview de haute résolution, à laquelle nous avons associé des travaux de terrain nécessaires à son actualisation.
- 59 Enfin, pour déterminer la valeur du facteur K, il faut disposer de données récentes et complètes sur la granulométrie. Or les données pédologiques disponibles au Liban ne permettent pas l'application du modèle empirique USLE. L'érodibilité du sol, qui diffère

selon les saisons, les techniques culturales et l'état des surfaces, dépend de la granulométrie, de la perméabilité et de la teneur en matière organique. La généralisation des données peut aboutir à des valeurs d'érodibilité erronées. Pour un travail à grande échelle cartographique d'un secteur précis comme nous l'avons fait et être utile aux actions concrètes d'aménagement du territoire, le facteur K doit être spécifique à chaque milieu. C'est la raison pour laquelle nous avons effectué des prélèvements in situ pour chaque type de sol. De fait, ce facteur est sans doute celui qui se prête le moins à une extrapolation et à un changement d'échelle géographique.

Remerciements

- 60 Nous remercions les relecteurs qui ont accepté de juger notre travail. Tout d'abord, remercions Éliane Charbel. Également nous tenons à remercier infiniment les chercheurs : Myriam Makke Traboulsi et Ghaleb Faour pour leur précieuse collaboration. De même nous remercions, Laëtitia Lafarge, Nidale El Hachem, Leyla Grizi et les membres du laboratoire LARI.

BIBLIOGRAPHIE

- Arnoldus, H.M.J., 1980, An approximation of the rainfall factor in the USLE. In: Assessment of erosion in USA and Europe, M. de BOODT et D. GABRIELS édit, Édit. John WILEY, Chichester (Angleterre), pp. 127-132.
- Barthes, B., De G. Noni, E. Roose, J. Asseline, A. Albrecht et M. Viennot, 1988, Pratiques culturales et érodibilité du sol dans les Rougiers de Camarès (Aveyron). *Étude et gestion des sols*, vol. 5, n°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 (2000), pp. 1289-1304.
- Ben Cheikha, L. et M. Gueddari, 2008, *Le bassin versant du Jannet (Tunisie): évaluation des risques d'érosion hydrique*. M@ppemonde, n°90, 15 p.
- Blanchet, G., 1965, Le climat de Beyrouth. In: *Revue de géographie de Lyon*, vol. 40, n°2, pp. 131-158; doi : 10.3406/geoca.1965.1778.
- Bou Kheir, R., A. Shaban, M. Khawlie et MC. Girard, 2001, Impact des activités humaines sur l'érosion hydrique des sols dans la région côtière montagneuse du Liban. *Science et changements planétaires / Sécheresse*. 12(3), pp. 157-66.
- Bou Kheir, R., 2002, *Étude des risques d'érosion hydrique des sols par télédétection et SIG. Application à une région représentative du Liban*. Paris: Institut national agronomique Paris-Grignon, thèse de doctorat en sciences biologiques fondamentales et appliquées, 262 p.
- Brown, R.B., 2003, Soil Texture, Soil and Water Science Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, Fact Sheet SL29, 8 p.

- Casenave, A. et C. Valentin, 1989, Les états de surface du sol dans la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. ORSTOM Paris, 229 p.
- Cerdan, O., Y. Le Bissonnais, V. Souchère, C. King, V. Antoni, N. Surdyk, I. Dubus, D. Arrouays et J.F. Desprats, 2006, Guide méthodologique pour un zonage départemental de l'érosion des sols. Rapport numéro 3 : Synthèse et recommandations générales. Rapport BRGM-RP-55104-FR, Orléans, 85 p.
- Cohen, M. et F. Rey, 2005, Dynamiques végétales et érosion hydrique sur les marnes dans les Alpes françaises du Sud, *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 11 - n°1 | 2005, pp. 31-44.
- Darwish, T., M. Khawlie, I. Jomaa, M. Abou Daher, M. Awad, T. Masri, A. Shaban, G. Faour, R. Bou Kheir, C. Abadallah et T. Haddad, 2006, Soil map of Lebanon 1/50000. Édit. CNRS-Lebanon, Monograph Series 4, Liban, 367 p.
- De Noni, G., M. Viennot, J. Asseline et G. Trujillo, 2001, Terres d'altitude, terres de risque. La lutte contre l'érosion dans les Andes équatorienne. Éditions de l'IRD, 216 p.
- El Garouani, A., A. Merzouk, R. Jabrane, et M.R. Boussema, 2005, Analyse spatiale de l'érosion en nappe et de l'infiltrabilité des sols dans le Pré-Rif marocain. Télédétection, vol. 5, n° 1-2-3, pp. 69-80.
- El Garouani, A., A. Chen, L. Lewis, A. Tribak et M. Abharour, 2008, Cartographie de l'utilisation du sol et de l'érosion nette à partir d'images satellitaires et du sig idrisi au nord-est du Maroc. Télédétection, Editions scientifiques GB, 2008, 8 (3), pp. 193-201.
- 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), 17 p.
- 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* [En ligne], Volume 9, p. 141-156, DOI : 10.4000/physio-geo.4572.
- El Hage Hassan, H., L. Touchard, F. Ardillier-Carras et G. Faour, 2016, Lutte contre l'érosion et aménagement agricole dans la plaine de la Békaa (Liban). M@ppmonde-N°117, 17 p.
- Roose, E., M. Saber, M. Arabi, B. Morsli et M. Mazour, 2012, Soixante années de recherches en coopération sur l'érosion hydrique et la lutte antiérosive au Maghreb, *Physio-Géo*, Volume 6 | -1, pp. 43-69.
- Food and Agriculture Organization (FAO), 2006, Global forest resources assessment 2005: report on fires in the Mediterranean region. Fire Management Working Paper, Rome.
- Fournier, F., 1960, Climat et érosion. Édit. Presses Universitaires de France, Paris, 201 p., DOI: 10.1097/00010694-196108000-00029.
- Heusch, B., 1970, L'érosion du Pré-Rif (Maroc). Annales de la Recherche Forestière au Maroc, vol. 12, pp. 1-176.
- Hugonie, G., 1999, L'aggravation des problèmes d'environnement dans les pays méditerranéens: l'exemple de la Sicile. In: L'information géographique, volume 63, n°5, pp. 207-218.

- 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.
- IUSS Working Group WRB, 2014, World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, Rome, 3rd, ISBN 978-92-5-108370-3
- Kalman, R., 1970, Ruissellement et érosion en nappe (Expérimentation au simulateur de pluie), Agriculture and Food (OMAFRA), Annales de la Recherche Forestière au Maroc, vol. 12, Rabat, pp. 177-287, [En ligne] URL: <http://www.giser.be/wp-content/uploads/2012/05/>
- Morschel, J. et D. Fox, 2004, Une méthode de cartographie du risque érosif : application aux collines du Terrefort Lauragais, M@ppemonde, n°76, 11 p, [En ligne] URL : <http://mappemonde.mgm.fr/num4/articles/art04404.pdf>.
- 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, coll. «Publications de la Faculté des lettres de Clermont», 269 p., ISBN: 2-84516-0623.
- Payet, E., P. Dumas et G. Pennober, 2012, Modélisation de l'érosion hydrique des sols sur un bassin versant du sud-ouest de Madagascar, le Fiherenana Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement [En ligne], Volume 11 Numéro 3 | Décembre 2011, en ligne depuis 20 September 2012, URL : <http://journals.openedition.org/vertigo/12591> ; DOI : 10.4000/vertigo.12591
- Raissouni, A, L. K. Issa, K. Ben Hamman Lech-Hab et A. El Arrim, 2016, Water Erosion Risk Mapping and Materials Transfer in the Smir Dam Watershed (Northwestern Morocco). SCIEDOMAIN international. Journal of Geography, Environment and Earth Science International 5(1), pp. 1-17, Article no.JGEESI.20061.ISSN: 2454-7352.
- Ranivoson, T.A., 2007, *Cartographie systématique du risque d'érosion selon RUSLE à Madagascar*, Mémoire de Master, Ecole Supérieure Polytechnique Départementale Hydraulique, Université de Tananarive, 125 p.
- Reid, K.D., B.P. Wilcox, D.D. Breshears et L. MacDonald, 1999, Runoff and erosion in a Pinon-Juniper woodland: influence of vegetation patches, Soil Sci. Soc. Am. J. 63, pp. 1869-1879.
- Renard, K.G. et J.R. Freimund, 1994, Using monthly precipitation data to estimate the R factor in the revised USLE, *Journal of Hydrology*, n° .157, pp. 287-306.
- Roose, É., 1994, Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bulletin pédologique de la FAO*, vol. 70, Rome (Italie), 420 p.
- Roose, É. et G. De Noni, 2004, Recherches sur l'érosion hydrique en Afrique : *revue et perspectives, sécheresse*, vol. 15, n° 1, pp. 121-129.
- Sadiki, A., S. Bouhlassa, J. Auajjar, A. Faleh et J.J. Macaire, 2004, Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'Équation universelle des pertes en sol dans le Rif oriental (Maroc) : cas du bassin versant de l'oued Boussouab. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre*, n°26, pp. 69-79.
- Sadiki, A., A. Faleh, J.L. Zêzere et H. Mastass, 2009, Quantification de l'érosion en nappe dans le bassin versant de l'oued Sahla Rif Central Maroc. *Cahiers Géographiques* n°6. 12 p.
- Stone, R.P. et D. Hillborn, 2000, Universal Soil Loss Equation, Ontario, Canada, Ontario Ministry of Agriculture and Food (OMAFRA), [En ligne] URL : <http://www.giser.be/wp-content/uploads/2012/05/USLE-infosCanada.pdf>.

Wischmeier, W.H. et D.D. Smith, 1978, *Predicting rainfall erosion losses*. A guide to conservation planning. Édit. US Department of Agriculture, Agriculture Handbook, vol. 537, 58 p.

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.

RÉSUMÉS

Le Liban des hautes plaines subit une érosion hydrique qui tend à décaper ses sols et menacer ses activités agricoles. L'effet conjugué des actions anthropiques (conduites culturales, déboisement, surpâturage) et des facteurs naturels (agressivité climatique, versants abrupts, sol), fragilise le sol et menace les parcelles agricoles par le dépôt des sédiments. Mhaydssé est un village concerné par le problème, représentatif des conditions naturelles et anthropiques du sud-est de la Békaa. L'étude utilise les SIG et l'équation universelle des pertes en terre (USLE). Pour remplacer l'intensité des précipitations, l'indice d'agressivité a été calculé à partir de l'équation de Renard et Freimund. Cinq types de sols ont été échantillonnés, pour lesquels la granulométrie a été analysée en cinq classes. La topographie (pente), le couvert végétal et les pratiques anti-érosives sont les autres facteurs qui ont été quantifiés. Sur les 1800 hectares du terrain d'étude, la perte moyenne en terre est de 46 t/ha/an. Cette valeur élevée est issue d'une grande hétérogénéité spatiale. Les versants dénudés subissent des taux supérieurs à 300 t/ha/an, tandis que le fond de la plaine n'est pratiquement pas touché. Les grandes différences spatiales sur de petites distances confirment le bienfondé d'une analyse précise de la texture des sols.

The high plains of Lebanon are subject to water erosion which tends to strip its soils and threaten its agricultural activities. The combined effect of anthropogenic actions (cultural management, deforestation, overgrazing) and natural factors (climatic aggressiveness, steep slopes, soil), weakens the soil and threatens agricultural parcels by depositing sediments. Mhaydssé is a village concerned by this problem and its representative of the natural and anthropogenic conditions of the Békaa's southeast. The study uses GIS and the Universal Earth Loss Equation (USLE). To replace the intensity of precipitation, the aggressiveness index was calculated from the equation of Renard and Freimund. Five soil types were sampled, for which the soil granulometry was analyzed in five classes. The topography (slope), the vegetation cover and the anti-erosion practices are the other factors that have been quantified. Of the 1800 hectares of the study area, the average loss of land is 46 t / ha / year. This high value comes from a high spatial heterogeneity. The barren slopes are subject to rates above 300 t /ha /yr, while the bottom of the plain is practically untouched. Large spatial differences over small distances confirm the thoroughness of an accurate analysis of soil texture.

INDEX

Mots-clés : érosion hydrique, USLE, SIG, Békaa, Liban

Keywords : soil erosion, USLE, GIS, Békaa, Lebanon

AUTEURS

HUSSEIN EL HAGE HASSAN

Laboratoire de recherche: CEDETE (EA 1210), Université d'Orléans, Université Libanaise,
Beyrouth, Département de Géographie, Liban, courriel : hussein.el-hage-hassan@univ-orleans.fr,

LAURENCE CHARBEL

Université Libanaise, Beyrouth, Département de Géographie, Liban, Courriel :
laurence.charbel@gmail.com

LAURENT TOUCHART

Laboratoire de recherche : CEDETE (EA 1210), Université d'Orléans, Orléans, France, courriel :
laurent.touchart@univ-orleans.fr