



HAL
open science

Cartographie de l'aléa érosif dans le bassin sud du Litani-Liban

Hussein El Hage Hassan, Ghaleb Faour, Laurence Charbel, Laurent Touchart

► **To cite this version:**

Hussein El Hage Hassan, Ghaleb Faour, Laurence Charbel, Laurent Touchart. Cartographie de l'aléa érosif dans le bassin sud du Litani-Liban. *Revue Internationale de Géomatique*, 2019, 10.3166/rig.2019.00072 . hal-02387980

HAL Id: hal-02387980

<https://hal.science/hal-02387980>

Submitted on 24 May 2023

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

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

Cartographie de l'aléa érosif dans le bassin sud du Litani-Liban

Hussein El Hage Hassan¹, Ghaleb Faour², Laurence Charbel³, Laurent Touchart⁴

1. Université libanaise, CEDETE (EA 1210)
hussein.el-hage-hassan@ul.edu.lb
2. Centre national de télédétection CNRS Liban
gfaour@cnrs.edu.lb
3. Université libanaise
Laurence.charbel@gmail.com
4. CEDETE (EA 1210), Université d'Orléans
laurent.touchart@univ-orleans.fr

RÉSUMÉ. L'érosion hydrique est une forme de dégradation qui se traduit par le décapage des éléments minéraux et organiques du sol. Sous l'action des agents météoriques (pluie, vent) ce phénomène mondial, l'érosion, affecte la productivité des terres agricoles. L'absence d'un couvert végétal protecteur et les précipitations intenses ont fait du bassin du Litani une région vulnérable à l'érosion hydrique. L'absence de données climatiques nous a amenés à dresser la carte de l'aléa érosion en nous appuyant sur une méthode qualitative qui combine, à l'aide d'un SIG, les facteurs tels que l'érosivité du sol, la perméabilité des roches, le mode d'occupation du sol et l'intensité des précipitations. Les résultats montrent que l'aléa fort s'étale sur 39,3 % de la région d'étude. D'après la validation de terrain, la fiabilité est estimée à 80 % en se basant sur le décapage du sol, la taille des glissements de terrain et la profondeur des déchaussements de racines. Le modèle utilisé peut être applicable à d'autres régions similaires de Méditerranée.

ABSTRACT. Water erosion is a degradation form that results in the stripping of mineral and organic elements from the soil. Due to the impact of meteoric factors (rain, wind) this global phenomenon, soil erosion, affects the productivity of agricultural land. Water erosion is a global phenomenon that affects the productivity of agricultural land. The absence of a protective cover and intense precipitation made the Litani River Basin a vulnerable region to water erosion. Besides, the absence of climate data has brought about erosion hazard mapping using a qualitative method which combines factors such as tillage erosion, infiltration into the rocks, land tenure using GIS, and intensity of the precipitation. The results show that a high hazard extends over 39.3% of the study area. Field validation and reliability are estimated at 80% based on soil stripping, the size of landslides and the depth of the receding roots. The model used appears to be applicable to other similar regions in the Mediterranean.

MOTS-CLÉS : aléa érosif, cartographie, Liban, sensibilité, SIG.

KEYWORDS: erosion hazard, cartography, Lebanon, sensibility, GIS.

DOI: [10.3166/rieg.2019.00072](https://doi.org/10.3166/rieg.2019.00072) © 2019 Lavoisier

1. Introduction

L'érosion hydrique consiste en une ablation des particules du sol, qui sont transportées en aval. Ce processus naturel aggravé par l'activité humaine, peut-être contrôlé par la végétation qui présente un moyen indispensable de lutte contre l'érosion hydrique. Les effets de ce phénomène sont nombreux, tels que la réduction de la capacité du sol à stocker l'eau et les éléments nutritifs, l'augmentation de ruissellement (Salomon, 2001), la tendance des sols à perdre leur structure physique et les dégâts sur les terres agricoles. La structure du sol dépend de la texture et de la matière organique. Les structures fragmentaires arrondies, qui se forment par floculation ou par cimentation et qui offrent au sol une protection contre l'impact des gouttes de pluie, nécessitent une bonne teneur en matière organique. En revanche, l'enlèvement des particules fines et organiques, par l'érosion, mène à l'instabilité de la structure du sol. Le bassin du Litani, est considéré comme une région agricole importante au Liban. Grâce à la disponibilité en eau et à la température modérée, ce bassin est spécialisé dans une production importante d'un certain nombre de cultures, comme les céréales et le raisin de cuve. Malgré ces atouts, cette région est touchée par l'érosion hydrique, l'une des principales causes de la dégradation des terres, qui pose un problème majeur menaçant l'avenir agricole de cette région. En effet, dans la plaine de la Békaa, les sols sont relativement jeunes, et sujets à la dégradation, en particulier sur les montagnes et les collines de cette région. La rigidité du relief, l'intensité des précipitations et la quantité des eaux de ruissellement contribuent à l'intensification de l'érosion. Le taux érosif reste variable en fonction de l'intensité des précipitations, de la pente, du type de sol et de la couverture végétale. Pour essayer de résoudre ce problème, plusieurs approches sont possibles, mais il est ici proposé d'axer le propos sur une réflexion méthodologique. Dans le cas d'un manque de données sur l'intensité des précipitations et de lacunes dans les séries météorologiques, qui empêchent de travailler directement sur l'agressivité des pluies méditerranéennes au Liban, peut-on suggérer comme valable une approche fondée sur une cartographie SIG ? Quels facteurs sont disponibles et comment les pondérer pour obtenir une spatialisée de l'aléa qui puisse être validée sur le terrain ?

Pour tenter d'apporter quelques réponses, un secteur bien circonscrit a été choisi dans le bassin sud du Litani, afin de construire un modèle qualitatif associant les facteurs externes et internes disponibles, faisant la part belle à l'utilisation de classes de valeur. Il permet une cartographie de l'aléa érosif, qui pose alors la question de sa fiabilité et de sa validation. La présente étude, qui constitue une suite des travaux antérieurs des auteurs, fournit une base pour la production de travaux similaires dans d'autres secteurs du Liban, qui pourrait être concrétisée par la publication d'un atlas national : c'est aussi son intérêt.

2. Site d'étude

Situé au sein du bassin sud du Litani (2175 km²), entre 33° 33' et 33° 35' de longitude Est et 35° 40' et 35° 52' de latitude Nord, le secteur d'étude, qui avoisine les 13 km², est traversé par le fleuve du Litani qui se dirige vers le sud ouest pour se jeter

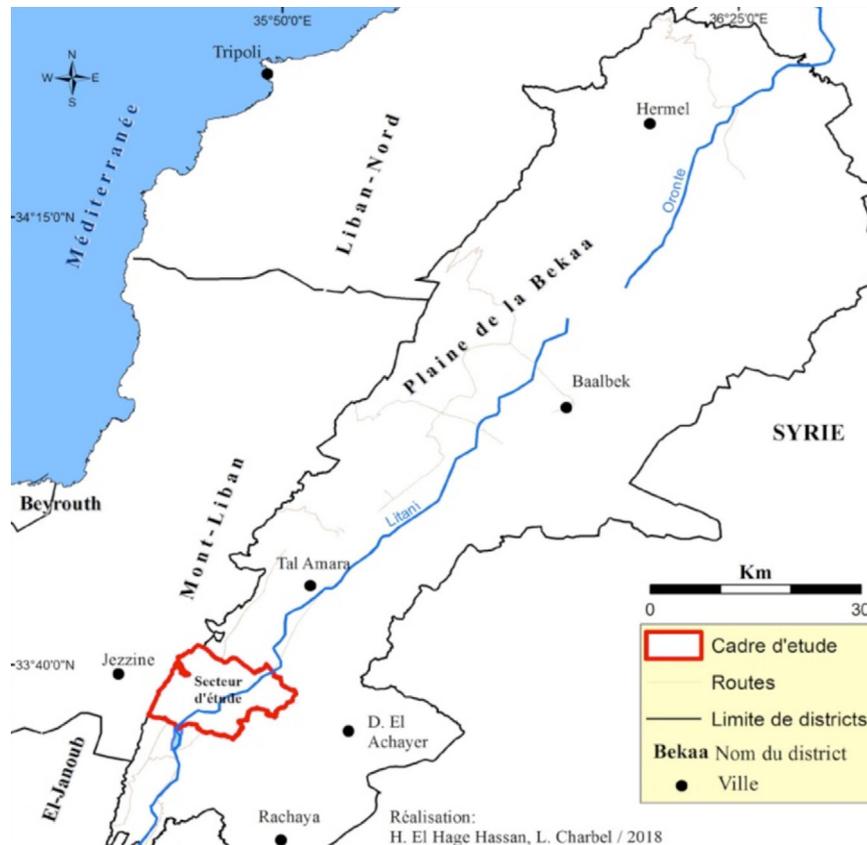


Figure 1. Situation géographique du site d'étude

dans le lac du Quaraoun avant de finir dans la Méditerranée (figure 1). Ce fleuve, autour duquel de multiples projets pivotent depuis plus de 40 ans, constitue environ 28 % du total des écoulements superficiels du pays (Comair, 2011).

C'est une région intérieure, où l'on peut remarquer des zones de piémont, limitée par les chaînes occidentales et orientales ; elle est à tendance climatique sèche et l'on note un risque d'érosion hydrique fort sur les versants du bassin. Cette région est marquée par l'aspect varié de son altitude et de sa géologie.

C'est une région peuplée, qui dispose d'un atout agricole important pour l'économie libanaise. Elle jouit d'un certain nombre de conditions favorables (climatiques, et pédologiques). L'agriculture y tient encore une place prépondérante, par rapport à d'autres régions libanaises, grâce à une production diversifiée, un milieu qui permet la spécialisation de certaines cultures et une vaste surface agricole irriguée par le Litani, dans les saisons sèches. L'enjeu est important dans cette région agricole, semi-aride du domaine méditerranéen oriental, où les pratiques culturales placent au centre des

préoccupations de développement rural la question de la dégradation des terres arables. De ce fait, il convient donc de s'intéresser au phénomène d'érosion hydrique.

Deux unités géomorphologiques sont distinctes : la plaine (où l'altitude débute à 817 m), qui s'oppose aux versants du Mont-Liban, dont le point culminant est à 1 940 m, et de l'Anti-Liban qui s'élève à 1 960 m.

Du point de vue géologique, cette région renferme plusieurs formations. Les calcaires du Jurassique moyen dominent les affleurements dans la chaîne occidentale. La faille de Yammouné, qui est une ramification principale de la faille bordière du fossé d'effondrement de la mer morte, sépare ce compartiment jurassique du bloc crétacé. L'affleurement de ce dernier, intègre les étages du Crétacé inférieur (Grès de base – Aptien) et du Crétacé moyen (Albien et Cénomaniens). Les couches du Crétacé supérieur (Sénonien) et de l'éocène inférieur affleurent sous forme de bandes longitudinales au pied du massif montagneux du Crétacé moyen. Enfin, les dépôts de type continental d'âge néogène et quaternaire dominent la plaine de la Békaa.

Caractérisée par le climat méditerranéen, la région connaît une période humide brutalement arrosée (Fox *et al.*, 2006) (novembre à avril) et une période sèche (mai à septembre). 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 pluviométrie moyenne annuelle avoisine les 600 mm et se trouve concentrée sur 120 jours de l'année (M.T.P.T, 1977).

À l'instar du centre et de la Békaa septentrionale, le secteur d'étude reçoit la quantité des précipitations la plus élevée grâce à la chaîne occidentale (moins élevée au sud) qui permet aux vents humides provenant de l'ouest de pénétrer vers le Bassin du Litani. Les températures moyennes sont maximales (30°) en juillet, août et minimales en janvier (8,5°) (El Hage Hassan *et al.*, 2018a). Le violent contraste entre les saisons sèches et pluvieuses contribue à la déstabilisation de la structure des sols, et favorise ainsi les processus naturels tels que l'érosion hydrique.

La végétation, naturelle de type méditerranéen, présente un étagement selon l'altitude sous forme de forêts de genévriers dégradées. Ici, on y pratique principalement des cultures pérennes et la culture des céréales. Le déboisement des forêts, qui couvraient les chaînes orientales et occidentales, est à l'origine de la dégradation du milieu.

Jusqu'à présent peu de tentatives ont été effectuées, sur cette région, pour estimer l'érosion hydrique du sol (El Hage Hassan *et al.*, 2013). C'est pourquoi il est important d'approfondir ces études physiques en lien avec le développement socio-économique de la plaine de Békaa, afin de limiter le risque érosif et construire une méthode qui pourrait être conseillée à d'autres terrains.

3. Méthode et matériels

Plusieurs modélisations ont été réalisées pour évaluer le risque d'érosion hydrique. Elles se différencient selon l'objectif de l'étude et la disponibilité des données. Les

approches quantitatives, essentielles pour appréhender l'érosion en permettant des estimations ponctuelles, exigent des données qui ne sont pas toujours disponibles. En revanche, les modèles qualitatifs, peuvent s'adapter en fonction de la disponibilité des données. Wischmeier et Smith (1960 ; 1978) ont proposé l'équation universelle des pertes en sol (USLE). De nombreuses modifications ont été apportées à cette approche : (El Swaify et Dangler, 1977 ; Auerswald, 1987 ; Roose et Sarraïlh, 1989 ; Renard *et al.*, 1997). À l'aide d'un SIG, plusieurs recherches ont réussi à modifier le modèle quantitatif d'USLE en un modèle qualitatif, PAP/RAC (2004). Pour cartographier l'aléa érosif dans la région en question, nous proposons d'utiliser un modèle qualitatif établi par les experts locaux du CNRSL, qui s'appuie sur la méthodologie déployée par la FAO et l'UNEP, en 1997, dans le cadre d'un plan d'action pour la Méditerranée. La différence globale entre tous les modèles qualitatifs utilisant l'approche SIG est dans la pondération des différents facteurs. Les modèles fondés sur l'expertise présentent une simplicité dans la lecture des résultats. En revanche, certaines difficultés peuvent être exposées. La classification des facteurs d'érosion entraîne une perte d'information et les résultats d'analyse vont fortement dépendre du nombre de classes utilisées (Van Der Knijff *et al.*, 2000). L'estimation des pondérations peuvent, aussi, varier selon les experts consultés (Cerdan *et al.*, 2006).

Le modèle, type système expert, utilisé à l'échelle du Liban, a été expérimenté et approuvé par les chercheurs locaux dans deux bassins versants représentatifs. Plusieurs travaux ont été menés sur l'érosion hydriques au Liban (Bou Kheir, 2002 ; El Hage Hassan, 2011) en appliquant une approche qualitative réalisée à partir d'un modèle additif. La méthodologie proposée ici a été élaborée et validée sur le terrain en 2015 (El Hage Hassan *et al.*, 2015 ; Charbel et El Hage Hassan, 2017). Cependant, son application est une évaluation qui s'appuie sur la pondération et l'identification des facteurs de l'érosion les plus représentatifs avant d'effectuer leur superposition.

Pour la suite, cette méthode requiert la hiérarchisation du rôle de chaque facteur, à l'échelle spatiale, à travers l'attribution d'un indice qui permet la discrimination entre les divers facteurs de l'érosion. Le rôle capital reconnu de la végétation contre l'érosion hydrique nous a conduits à retenir un coefficient plus élevé pour le couvert végétal. Cette méthode, qui permet d'estimer la probabilité d'arrachement et de transport des particules solides, nous apparaît comme un moyen d'aide à la décision : elle permet de délimiter les secteurs menacés par l'érosion.

L'approche utilisée est une estimation basée sur la pondération de chaque facteur. Par ailleurs, la difficulté de ce modèle réside dans la détermination des pondérations des facteurs d'érosion. Au-delà de l'étude bibliographique des travaux antérieurs (Cerdan *et al.*, 2006 ; Bou Kheir *et al.*, 2001a ; Lenthe et Krone, 1981 ; El Hage Hassan, 2011), les facteurs et leurs pondérations sont choisis à partir de plusieurs expériences effectuées au Liban. La pertinence a été jugée à 80 %. L'emploi de cette approche est rendu facile grâce au SIG qui combine les facteurs de l'érosion (érodibilité des sols, perméabilité des roches, pente, occupation des sols, érosivité des pluies, etc.).

Pour atteindre l'objectif de l'étude, nous avons suivi la démarche suivante :

– le prétraitement et la préparation d'une base de données cohérente, géoréférencée (projection Transverse Mercator) et calée (le système de coordonnées de référence de la zone) sous Arcgis 10.3. Les résultats de cette étape, sont des données vectorielles indispensables à la combinaison spatiale des facteurs de l'érosion.

– la disposition des facteurs intrinsèques au sol (érosivité des sols, perméabilité des roches) et des facteurs extrinsèques (pente, occupation des sols, érosivité des pluies, etc.) sous forme d'un indice de sensibilité à l'érosion, permet d'attribuer une valeur chiffrée pour chaque classe : très faible = 1, faible = 2, moyenne = 3, forte = 4 et très forte = 5. Cela doit permettre l'élaboration des cartes thématiques, qui correspondent à la sensibilité (rôle de chaque facteur dans l'érosion). Cette démarche a été réalisée en tenant compte des observations de terrain et de consultation des travaux antérieurs (Hudson, 1996 ; Garcia-Ruiz *et al.*, 1996 ; Poesen et Hooke, 1997 ; Dumas, 2010 ; Ake *et al.*, 2012 ; El Hage Hassan *et al.*, 2016).

– la cartographie d'aléa érosif à partir du croisement des cartes de sensibilité de chaque facteur à l'érosion et en appuyant sur l'approche qualitative du CNRSL, modifiée par El Hage Hassan et Charbel en 2015 :

$$\begin{aligned} & (\text{Indices du sol} * 0,19) + (\text{indices de la pente} * 0,19) \\ & + (\text{indices de la lithologie} * 0,19) + (\text{indices de la pluie} * 0,19) \quad (1) \\ & + (\text{indices de la couverture du sol} * 0,24) \end{aligned}$$

Ces pondérations ont été validées en s'appuyant sur la méthode d'analyse multicritère hiérarchique, créée par Saaty en 1980, qui permet de combiner les facteurs de l'érosion (érodibilité des sols, perméabilité des roches, pente, occupation des sols, pluies, etc.). La méthode est basée sur la comparaison des différentes caractéristiques, deux par deux. À partir de la construction d'une matrice carrée, on évalue l'importance relative d'une caractéristique par rapport à une autre en utilisant pour cela une échelle adéquate. Saaty (2008) propose d'utiliser l'échelle indiquée dans le [tableau 1](#). Une fois

Tableau 1. L'échelle fondamentale des nombres absolus

Degré d'importance	Définition
1	Importance égale
3	Faible importance d'une caractéristique par rapport à une autre
5	Importance forte ou déterminante
7	Importance très forte ou attestée
9	Importance absolue
2, 4, 6, 8	Valeurs associées à des jugements intermédiaires

Source : « Echelle de Saaty », adoptée par Saaty (2008).

que la matrice de comparaison est remplie, on calcule la valeur propre de chacune et le vecteur propre correspondant. Le vecteur propre indique l'ordre de priorité ou la hiérarchie des caractéristiques étudiées. Ce résultat est important pour l'évaluation de la probabilité, puisqu'il sera utilisé pour indiquer l'importance relative de chaque critère opérant. La valeur propre est la mesure qui permettra d'évaluer la cohérence ou la qualité de la solution obtenue, représentant ainsi, un autre avantage de cette méthode.

La cohérence de la matrice est définie par le calcul du ratio de cohérence (RC).

$$\begin{aligned} RC &= \frac{IC}{CA} \\ IC &= \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \end{aligned} \quad (2)$$

Où « n » est le nombre des critères, « λ_{\max} » est la valeur maximale d'Eigen value (Malczewski, 1999). Et « CA » est l'indice de cohérence aléatoire. L'indice CA est présenté dans le [tableau 2](#).

On considère comme acceptable un ratio de cohérence $< 0,10$ (Saaty, 1980 ; Saaty, 2008 ; Charbel *et al.*, 2017).

Afin de cartographier l'aléa érosif de la région d'étude, nous nous sommes servis des documents suivants :

- le mode d'occupation du sol à partir d'une image satellitaire WorldView, (résolution de 46 cm x 46 cm) (prise en août 2011) et deux images NDVI (résolution 30 m x 30 m) (1997 et 2013).

- la pluviométrie des stations de Beyrouth, Tripoli, Tal Amara (Békaa) et celles de l'Atlas climatique du Liban publiées par le ministère des Travaux publics (1977), (moyennes mensuelles et moyennes annuelles) sur une période de 20 ans.

- le sol, à partir des cartes des sols de Rachaya et Jezzine à 1/50 000^e publiées par le CNRS libanais en 2006.

- la carte des pentes est restituée à partir des cartes topographiques (Rachaya et Jezzine) de 10 m au 1/20 000^e, publiée en format raster par la [direction des affaires géographiques de l'armée libanaise](#) en 2004.

Tableau 2. Valeurs de CA pour $n = 1, 2, \dots, 11$

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
C.A	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

Source : établies par Saaty (1980).

– la lithologie à partir des cartes géologiques de Rachaya et Jezzine à 1/50 000^e, L. Dubertret et R. Wetzel (1951).

En raison de l'hétérogénéité du système de référence spatiale des documents précités, comme pour les cartes topographiques qui sont projetées selon un référentiel géographique local (Ellipsoïde de Clarke 1880-projection stériographique), il a été indispensable d'attribuer aux cartes thématiques un système de référence spatiale unique. Le système de coordonnées de référence Transverse Universelle de Mercator (UTM), (zone 36, N, datum WGS84), qui est une projection cartographique mondiale, permet la superposition adéquate des couches d'information (figure 2).

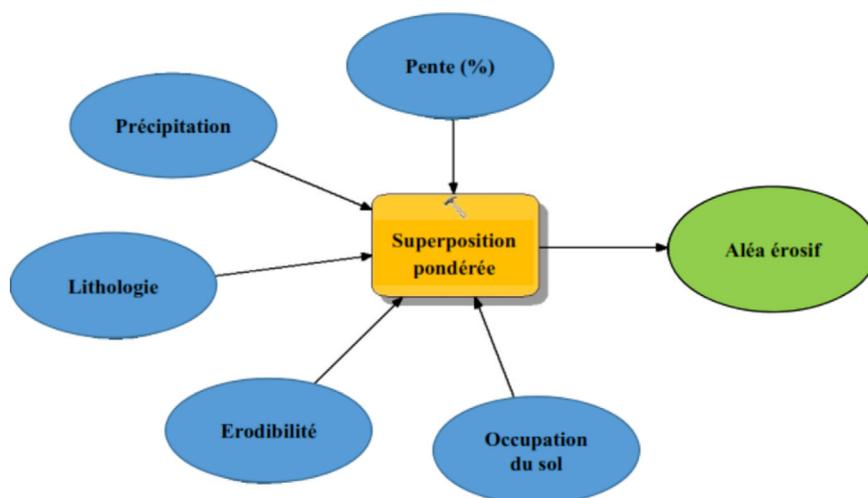


Figure 2. Modèle adopté pour déterminer l'aléa érosif. L'outil « superposition pondérée » requiert de convertir les données d'entrées en formats Raster. Le résultat est une carte de l'aléa érosif sous format Raster

4. Représentation du modèle

4.1. Les facteurs extrinsèques

4.1.1. L'érosivité des pluies

L'intensité de la pluie joue un rôle déterminant dans l'érosion hydrique des sols. L'indice d'érosivité des pluies (R) définit la force érosive des précipitations sur le sol Payet *et al.* (2012). La carence des données périodiques, sur l'intensité de pluie, a incité les chercheurs à développer des méthodes rigoureuses, pour calculer l'érosivité des pluies, par le biais des moyennes mensuelles des précipitations. Les données climatiques fournies par la station de Tal Amara (station la plus proche du secteur d'étude) indiquent que la région en question reçoit la même quantité de précipitations. La moyenne annuelle de précipitations avoisine 600 mm et les valeurs maximales de la pluie atteignent 64 mm en 24 h. En s'appuyant sur l'équation proposée par Fournier en 1960, modifiée par Arnoldus

en 1980, et à partir des moyennes mensuelles, l'agressivité des pluies est estimée à 30 pour la période (1983-2003). Une seule valeur de précipitations et un seul indice d'agressivité ne permettent pas la spatialisation du facteur climatique. Nous considérons que l'indice d'agressivité (IA) estimé à 30 peut engendrer une forte érosion sur la région.

$$I_A = \sum_{i=1}^{i=12} (P_i / P_{an}) \quad (3)$$

où P_i représente les précipitations du mois i et P_{an} les précipitations totales annuelles.

4.1.2. Le gradient de la pente

Une forte pente favorise les écoulements aux dépens de l'infiltration. En revanche, les secteurs les plus pentus ne sont pas forcément les plus érodibles (De Noni *et al.*, 2001). L'aptitude des sols à l'infiltration dépend de l'état de la surface du sol (type de sol, organisation superficielle du sol, végétation, etc.) (Casenave et Valentin, 1989 ; De Noni *et al.*, 2000). Le processus des états de surface, sous l'action combinée des pratiques culturelles et du climat, détermine l'évolution de l'infiltration et de ruissellement (Asseline *et al.*, 1995). La dégradation des états de surface, causée par l'intensité des précipitations, déclenche le ruissellement (Horton, 1941). Roose (1994) a souligné l'influence des états de surface sur le ruissellement qui est susceptible de diminuer avec la longueur de la pente. L'inclinaison de la pente est un facteur critique dans l'érosion hydrique (Savat et De Ploey, 1982). Ce facteur reste variable en fonction de la texture du sol (Maurer, 1968). Sur les pentes concaves, l'érosion est moins puissante que sur les pentes convexes et les pertes en terre sont beaucoup plus importantes sur les pentes convexes que sur les pentes rectilignes (Roose, 1999). La longueur de la pente n'est pas considérée comme importante dans les régions méditerranéennes (FAO, 1983 ; Roose, 1994 ; Bou Kheir *et al.*, 2001b ; El Hage Hassan *et al.*, 2009). En outre, pour Auzet (1987), l'influence de la longueur de la pente diminue avec l'augmentation du rôle de l'effet splash qui consiste au déplacement des particules du sol sous l'impact des gouttes de pluie. Mais Mutchler et Greer (1980) affirment qu'il s'accumule sur une pente longue, à précipitation égale, un plus grand volume d'eau et que le temps d'infiltration est plus élevé sur les parcelles longues (Duley et Ackerman, 1934 ; Bou Kheir *et al.*, 2001a).

La carte des pentes résulte de l'extraction des courbes de niveau, issues des cartes topographiques. Roose (1973) a étudié l'érosion en fonction des pentes et du couvert végétal. Pour une pente de 4,5 %, couverte en alternance de manioc puis d'arachide, l'érosion est de 18,8 t/ha/an. Nous avons ordonné les pentes en cinq classes (tableau 3), selon la façon dont elles sont susceptibles de favoriser l'érosion hydrique. Afin de discriminer le rôle de la pente, nous avons avantagé cinq classes, avec une amplitude de 5 %, selon la façon dont elles sont susceptibles de favoriser ou non l'érosion hydrique en se référant à d'autres études précédentes (El Hage Hassan *et al.*, 2015).

Cette hiérarchisation a permis de conquérir la carte de sensibilité de la pente à l'érosion hydrique (figure 3).

Dans la plaine, les pentes qui sont peu favorables à l'érosion (< 10 %) occupent 46% de la surface calculée (à l'exception des cultures sous abris, le tissu urbain, les

roches à nues, les retenues et cours d'eau). Les secteurs dominés par les gradients favorables et très favorables à l'érosion (pente > 15 %) se localisent sur les versants et sont estimés à 44,5 % de la surface. Ce qui explique la vulnérabilité des reliefs de cette région. Les pentes considérées moyennement favorables à l'érosion, ne couvrent que 9,5 % de la surface.

Tableau 3. Les classes de la pente

Pente (%)	0-5	5-10	10-15	15-20	> 20	WI	Sensibilité	Surface de la sensibilité (%)
0-5	1,00	0,67	0,33	0,20	0,11	0,05	très faible	29
5-10	1,50	1,00	0,67	0,25	0,17	0,07	faible	17
10-15	5,00	1,50	1,00	0,33	0,20	0,13	moyenne	9,5
15-20	5,00	4,00	3,00	1,00	0,33	0,25	forte	10,5
> 20	9,00	6,00	5,00	3,00	1,00	0,51	très forte	34

RC = 0,07.

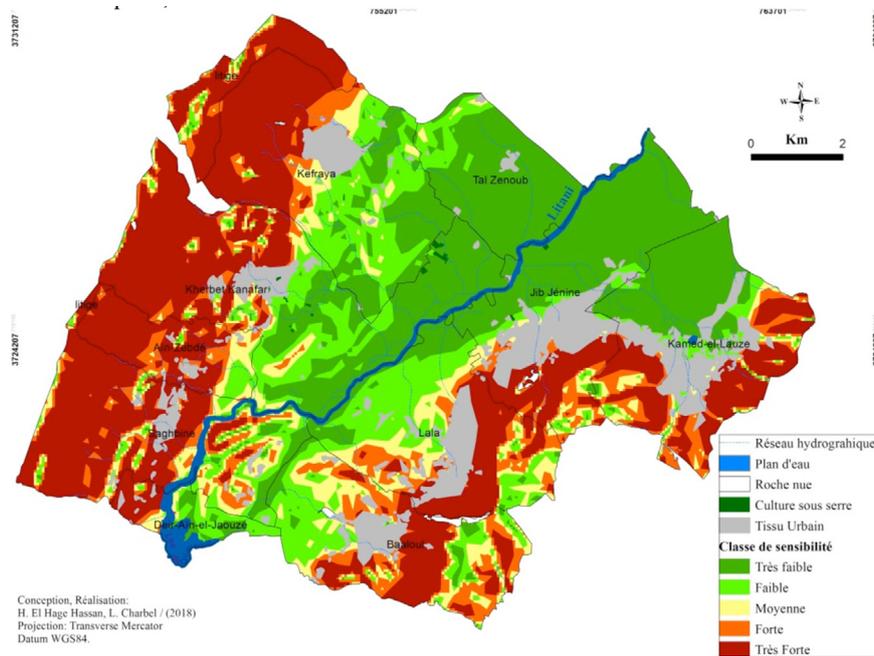


Figure 3. Influence de la pente sur le phénomène érosif

4.1.3. Le mode d'occupation du sol

L'érosion hydrique se rapporte au mode d'occupation du sol (Dumas, 2010 ; Soti *et al.*, 2005) qui reflète le rôle du facteur anthropique dans le couvert végétal. L'homme, par ses pratiques culturales et ses choix de cultures, détermine le niveau de protection et de dégradation du sol. Des études à l'échelle d'un bassin versant ont confirmé que les pertes en sol diminuent lorsque le taux du couvert végétal est élevé (Soutter *et al.*, 2007). En revanche, le déboisement et le surpâturage entraîne le phénomène d'érosion.

La végétation, réduit l'énergie cinétique de la pluie et intercepte les précipitations selon les critères phénotypiques (type de feuillage, etc.), et phénologiques (durée de la pousse). Elle limite le ruissellement, favorise l'infiltration et maintient la cohésion et la porosité du sol. Pour Neboit (1991), l'efficacité d'une averse dépend du degré de protection assuré par le type et la densité du couvert végétal.

Plusieurs documents, en plus des observations de terrain, ont été nécessaires pour connaître le mode d'occupation du sol et le couvert végétal (figure 4). Les images satellitaires jouent un rôle décisif pour suivre les variations interannuelles de la végétation. À partir de deux images Landsat (la première prise en mai 1997 et la seconde en mai 2013), nous avons étudié l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) pour le secteur d'étude. Le NDVI présente des valeurs comprises entre -1 et +1.

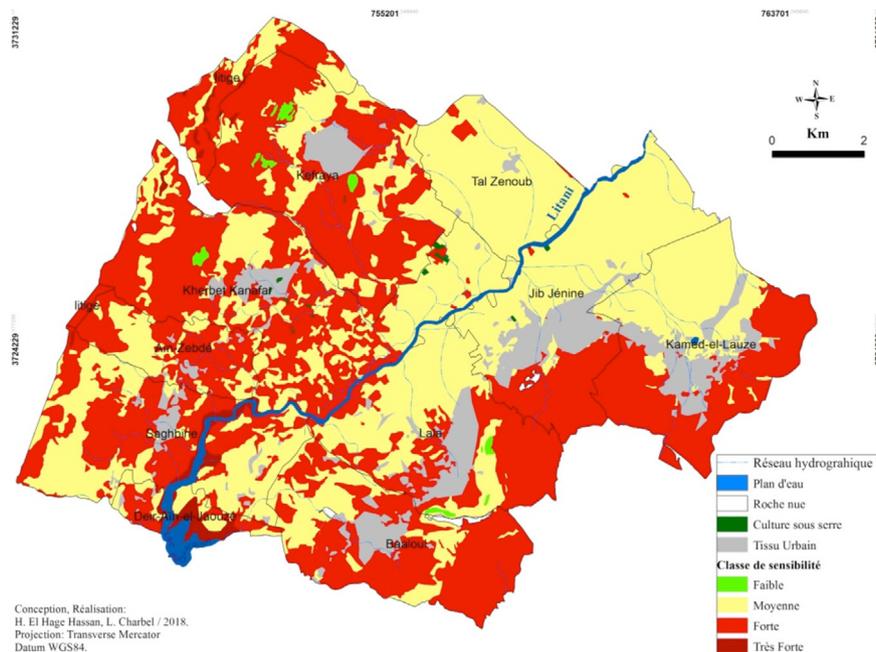


Figure 4. Rôle du couvert végétal dans l'érosion hydrique

Les valeurs concernant la végétation sont généralement comprises entre 0,05 et 1. Les valeurs du NDVI calculés sont comprises entre -0,75 et 0,72 pour l'année 1997 et -0,45 et 0,23 en 2013. La diminution de la valeur de NDVI de 0,72 à 0,23, généralement, révèle une dégradation du couvert végétale, mais le cas du secteur d'étude est différent, la décroissance de la valeur de NDVI résulte de l'absence de la rotation agricole dans la période où l'image satellitaire a été saisie. En revanche, des incertitudes associées aux valeurs indiquées concernant le NDVI sont liées aux erreurs de corrections d'images qui peuvent gommer certaines variations importantes d'un point de vue phénologique (Roussillon, 2016). Souvent la résolution spatiale n'autorise pas la définition des entités étudiées.

Pour analyser le couvert végétal, nous avons eu recours à une image « Worldview » ayant une résolution de 46 × 46 cm. Des études de terrain ont été indispensables pour la mise à jour de l'image satellitaire afin d'établir la carte d'occupation du sol. Le résultat d'analyse confirme la dégradation des surfaces boisées. En reprenant tous ces critères, nous avons proposé le classement suivant (tableau 4) :

– Non classés : les cultures sous abris (14 ha), le tissu urbain (1137,4 ha), les roches à nues (28 ha), les retenues et cours d'eau (128,7 ha).

– Classe 2 : les forêts denses de chênes, ayant un taux de couverture de 90 % et protectrices contre l'impact des gouttes de pluie, ont été classées en faible sensibilité à l'érosion. Malheureusement, ces surfaces ne dépassent pas les 51 hectares. L'absence des forêts denses, sur les versants du bassin engendre des pertes de sols et favorise la sédimentation sur les parcelles agricoles.

Tableau 4. Les classes du couvert végétal

Occupation du sol	Forêt clairsemée Arbre fruitier	Forêt dense (90 %)	Sol nu	Forêt (50-90 %) cult. de plein champ	WI	Sensibilité
Forêt dense (90 %)	0,50	1,00	0,14	0,67	0,08	faible
Forêt (50-90 %) culture de plein champ	0,67	1,50	0,17	1,00	0,11	moyenne
Forêt clairsemée Arbre fruitier	1,00	2,00	0,2	1,50	0,17	forte
Sol nu	5,00	7,00	1,00	6,00	0,66	très forte

RC = 0,08.

– Classe 3 : les forêts de chênes ayant un taux de couverture variant entre 50 et 90 % (139 ha) assurent une protection modérée pour le sol. À cette catégorie, nous rattachons les cultures de plein champ (3861 ha) comme le blé, l'orge et les cultures maraîchères. Ces cultures assurent une bonne protection, mais dans le bassin sud du Litani, malgré les pratiques de la rotation agricole (qui ne sont pas toujours adoptées), le sol reste à nu durant le mois de décembre et de janvier ce qui prouve que le sol n'est pas épargné par l'impact des précipitations. Quant à la végétation herbacée, elle peut être active contre l'érosion, en maintenant la couche superficielle et la cohésion du sol. Mais cette végétation, moyennement dense (1 707 ha), n'apparaît que du printemps à l'automne.

– Classe 4 : le couvert végétal qui assure une très faible protection comme : les arbres fruitiers (1 009 ha), les oliviers (118 ha) et les vignobles (919 ha), bien espacés, et qui perdent leurs feuilles en automne, assurent une faible couverture du sol (Roose *et al.*, 1993 ; Bou Kheir, 2002). Seules les branches permettent de briser la vitesse des pluies mais elles ne réduisent pas le ruissellement. À ceux-ci, nous associons les forêts dégradées et clairsemées (1 630 ha) et la végétation herbacée clairsemée (2 282 ha).

– Classe 5 : très favorable à l'érosion. La végétation est absente toute l'année, le sol ne dispose d'aucune protection contre les précipitations. Cette catégorie s'étend sur 166 hectares.

Le regroupement des différentes classes d'occupation du sol a permis de faire la description des états de surface.

4.2. Les facteurs intrinsèques

4.2.1. L'érodibilité des sols

L'érodibilité d'un sol détermine sa ténacité contre l'impact des précipitations. La réaction à la sensibilité à l'érosion est appropriée à chaque type de sol en fonction de ses propriétés physiques (texture, structure), chimiques (matière organique) en plus de sa profondeur. Toutefois l'agriculture intensive, en l'absence d'amendement, conduit à la décalcification de la solution du sol et du complexe absorbant. Également un déséquilibre en cation (ca ++) peut avoir des effets néfastes sur la structure du sol qui devient instable et moins résistante contre l'intensité des pluies. L'énergie cinétique des gouttes de pluie sera absorbée par la dispersion de particules agrégées de la surface du sol.

Nous avons classé la texture des sols selon le pourcentage de sable, d'argile et de limon (Le Bissonnais *et al.*, 1998). La matière organique a plutôt tendance à maintenir la structure du sol et à la rendre plus perméable et résistante au choc des gouttes de pluies (Duchaufour, 1970). Cependant, dans certains contextes, elle en diminue au contraire la mouillabilité (Jouany *et al.*, 1992). L'épaisseur du sol influence l'érodibilité. Plus le sol est profond, plus sa résistance contre l'érosion est forte (Ryan, 1982). Pour connaître ces paramètres, nous nous sommes basés sur les cartes des sols de Rachaya et Jezzine, qui englobent le secteur d'étude, à l'échelle du 1/50 000, et nous nous sommes servis des

Tableau 5. L'évaluation des paramètres d'érodibilité des sols

Paramètres d'érodibilité	Texture	Profondeur	Matière organique	WI
Texture	1	2	1,1	0,41
Profondeur	0,5	1	0,53	0,20
Matière organique	0,91	1,9	1	0,39

RC = 0,0002

analyses de sols effectuées par le CNRSL. Les éléments retenus, dans la présente étude, pour estimer l'érodibilité des sols sont : la texture, la teneur en matière organique et la profondeur (tableau 5).

En prenant en compte les particularités de la région d'étude, *en se référant à* différents travaux (Fanning et Fanning, 1989 ; Lamouroux, 1972 ; Darwish et Zurayk, 1997 ; FAO, 1977), nous avons attribué un poids majoritaire de 41 % à la texture, 39 % à la matière organique et 20 % à la profondeur. Quatre classes ont été retenues de faible à très fort (tableau 6). La basse teneur en matières organiques a été remarquable pour la majorité des sols (Rendzic leptosols, Hyperskeletal régosols, Lithic leptosols, Eutric arénosols, etc.). Pour vérifier les résultats, la comparaison avec des profils de sols analysés dans la région (étude par le CNRSL en 2006) a été indispensable. Cela nous a permis d'établir la carte d'érodibilité (figure 5) qui répartit les sols en fonction de leur sensibilité à l'érosion. Cette carte indique que la moyenne sensibilité est dominante, elle occupe 6 080 hectares. La très forte sensibilité s'étale sur 2 872 hectares, suivie par la forte sensibilité qui couvre 1 839 hectares. Quant à la faible sensibilité, elle occupe 1041 hectares.

Tableau 6. Les classes d'érodibilité des sols

Type de sol	Sensibilité
Lithic leptosols, eutric arénosols	Très forte
Areno-eutric leptosols, calcaric régosols, eutric régosols, haplic luvisols, hyperskeletal régosols	Forte
Calcaric cambisols, chromic luvisols, haplic calcisols, haplic luvisols, humi-eutric cambisols, rendzic leptosols, vertic leptosols	Moyenne
Calcaric fluvisols, calcaro hortico anthrosols, chromic cambisols, eutric gleysols, eutric fluvisols	Faible

Source : Darwish *et al.* (2006).

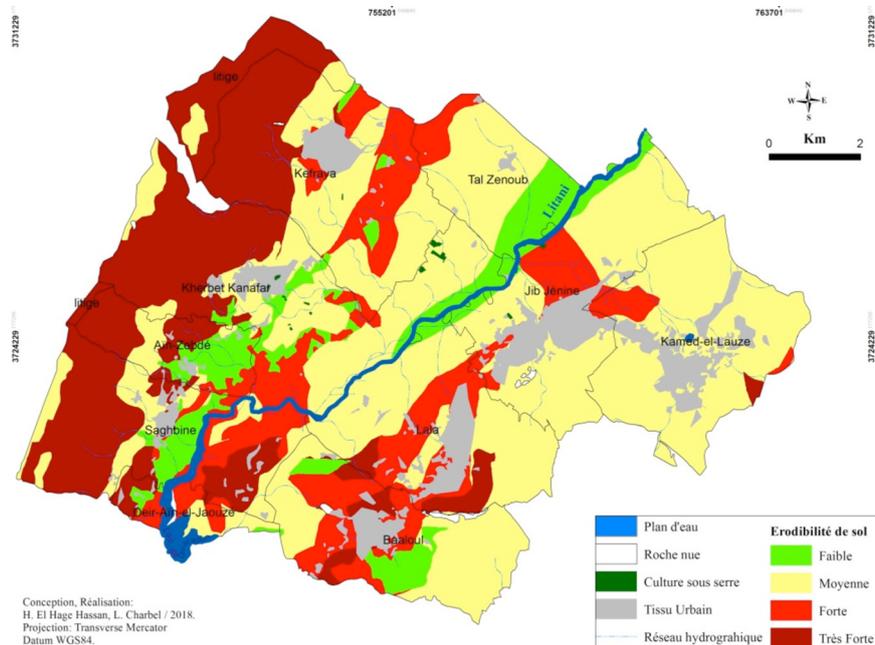


Figure 5. Érodibilité des sols

4.2.2. La lithologie

La capacité de l'eau à s'infiltrer dans les roches, qui exprime le degré de la sensibilité des roches à l'arrachement, dépend de plusieurs facteurs comme la nature des roches, la densité des fractures (Davis et Deweist, 1996 ; Abbud et Aker, 1986). Les roches imperméables favorisent le ruissellement. Par contre les roches perméables, qui permettent l'infiltration et la circulation, limitent le phénomène de l'érosion hydrique. La géologie du secteur d'étude a été déterminée à partir des cartes géologiques de Rachaya et jezzine (figure 6) à l'échelle de 1:50000, (Dubertret et Wetzel, 1951).

Trois classes ont été définies (figure 7 et tableau 7). La classe à faible sensibilité (6292 ha), relative aux roches du Jurassique (J4) (figure 6), du Cénomaniens (C4) et de l'Aptien supérieur (C2b). Ces formations sont perméables et apportent une protection contre l'érosion mécanique en surface. La moyenne sensibilité (2917 ha) englobe le grès de base (C1) du Crétacé inférieur, avec les calcaires marneux (C2a) de l'Aptien, les marno-calcaires et les calcaires crayeux du Lutétien (Nummulitique). La classe à forte sensibilité (2576 ha) renferme les formations du Quaternaire (limons, éboulis et éboulement), les marnes lacustres du Miocène (ml), les marnes crayeuses du Sénonien (C6) et les marnes de l'Albien (C3).

Le modèle utilisé, adapté à l'échelle locale, a permis d'affiner les résultats par la confrontation avec le terrain en se référant à des critères établis et validés

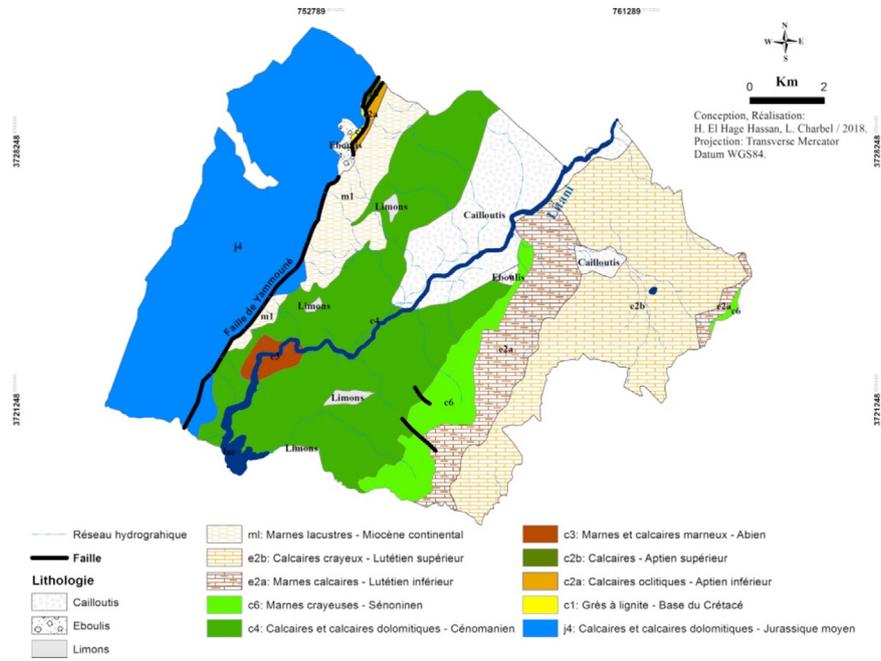


Figure 6. Carte géologique de la zone d'étude

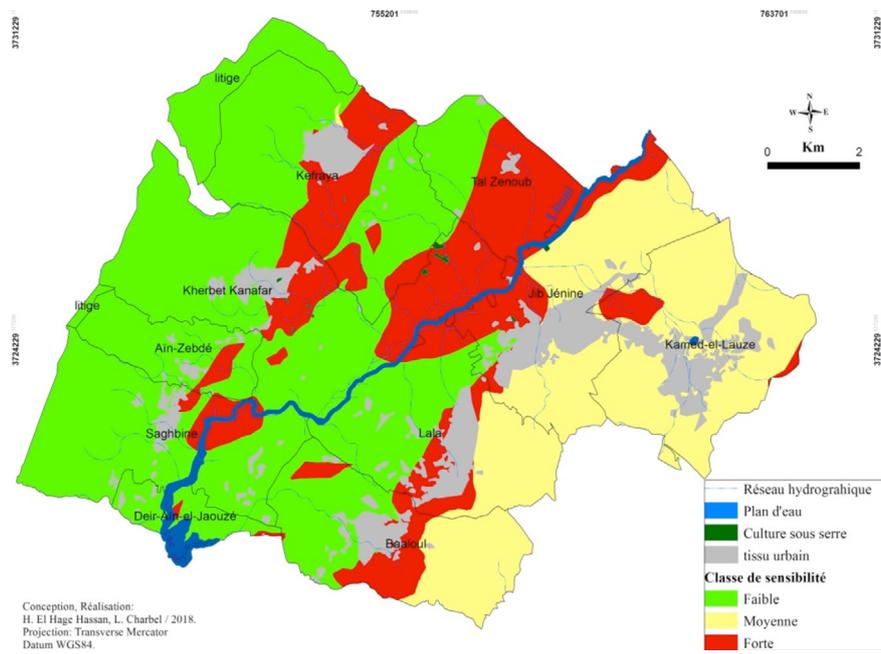


Figure 7. Sensibilité de la formation géologique à l'érosion

Tableau 7. Les classes de la sensibilité des roches à l'érosion

Lithologie	j4	c2b	c3	c2a	c4	c1	e2a	e2b	ml	Q - Eb	c6	WI	Sensibilité
c2b	1,00	1,00	0,33	0,66	1,00	0,65	0,65	0,66	0,33	0,34	0,33	0,05	faible
c3	3,00	3,00	1,00	1,97	3,00	2,00	1,99	1,98	1,00	1,10	1,00	0,14	forte
c2a	1,51	1,51	0,51	1,00	1,51	0,77	0,83	0,91	0,51	0,51	0,51	0,07	moyenne
c4	1,00	1,00	0,33	0,66	1,00	0,65	0,65	0,66	0,33	0,34	0,33	0,05	faible
c1	1,54	1,54	0,50	1,30	1,54	1,00	1,10	1,20	0,50	0,50	0,50	0,08	moyenne
j4	1,00	1,00	0,33	0,66	1,00	0,65	0,66	0,66	0,33	0,34	0,33	0,05	faible
e2a	1,53	1,53	0,50	1,20	1,53	0,91	1,00	1,10	0,50	0,51	0,50	0,07	moyenne
e2b	1,52	1,52	0,51	1,10	1,52	0,83	1,10	1,00	0,51	0,51	0,51	0,07	moyenne
ml	3,00	3,00	1,00	1,97	3,00	2,00	1,99	1,98	1,00	1,10	1,00	0,14	forte
Q - Eb	2,90	2,90	0,91	1,96	2,90	1,99	1,98	1,97	0,91	1,00	0,91	0,14	forte
c6	3,00	3,00	1,00	1,97	3,00	2,00	1,99	1,98	1,00	1,10	1,00	0,14	forte

RC = 0,09.

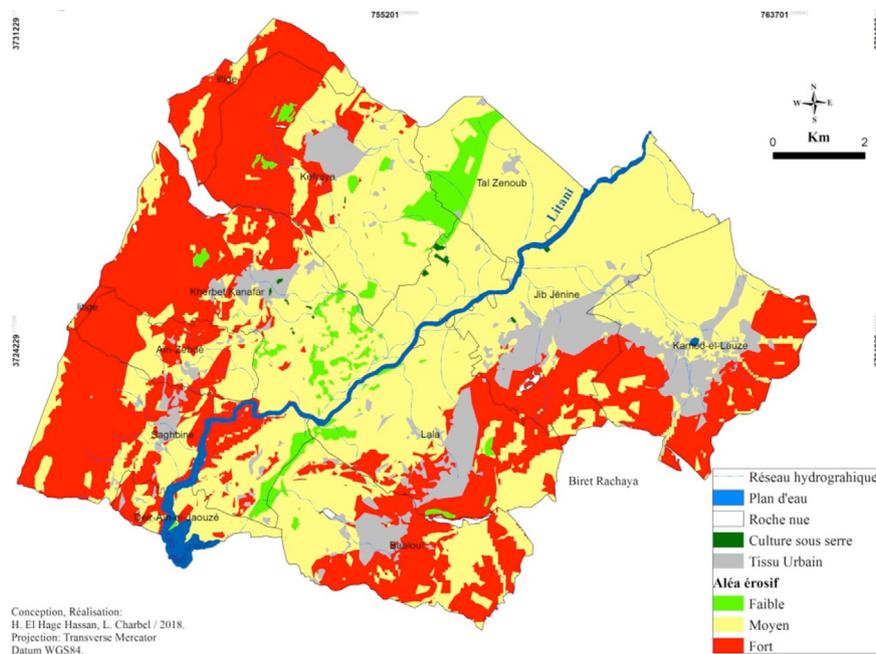


Figure 8. Distribution spatiale de l'aléa érosion

immédiatement par d'autres chercheurs au Liban (Bou Kheir *et al.*, 2001b). Les facteurs et leurs pondérations sont choisis en fonction de la disponibilité des données et à partir de plusieurs expériences effectuées sur le terrain. L'application des modèles quantitatifs (USLE), qui offrent des résultats plus précis, exigent des paramètres de calibration qui ne sont pas disponibles telle l'intensité des précipitations.

Une cinquantaine de points ont été sélectionnés, pour les secteurs susceptibles de subir une érosion représentée sur la carte synthétique (figure 8). Pour chacun de ces facteurs (sol, pente, végétation, géologie et pluviométrie), un indice de sensibilité à l'érosion des sols est affecté. Les facteurs ont été considérés comme étant de même impact dans l'occurrence de l'érosion à l'exception du couvert végétal, compte tenu de son influence et de son rôle dans la protection, nous lui avons attribué un poids de 0,24. Une valeur de 0,19 a été affectée aux autres facteurs. Selon la densité du couvert végétal, l'érosion hydrique est plus ou moins intense (Rey *et al.*, 2004). En adoptant ces pondérations, les valeurs résultantes du calcul, doivent contenir des nombres décimaux, qui varient entre 1 (très faible) et 5 (très fort).

Le résultat de ce travail est la carte d'aléa érosif. L'intégration des différents facteurs dans un système d'information géographique a permis de produire les diverses cartes thématiques correspondant aux facteurs retenus : l'érodibilité des sols, l'érosivité des pluies, le rôle du couvert végétal, la sensibilité de la lithologie et le rôle de la pente.

5. Résultats et discussion

À l'aide d'un SIG, nous avons croisé les différentes cartes thématiques. La carte résultante de la combinaison multicritère, apporte une spatialisation de l'érosion, hiérarchisée selon un niveau de vulnérabilité dans le bassin sud du Litani (figure 8). Trois classes ont été distinguées :

- malgré la valeur élevée (> 20 %) de la pente à certains endroits, le résultat du croisement dénote l'existence de plusieurs plages à faibles aléas (456 hectares). Cette catégorie concerne les surfaces boisées denses de chênes, qui assurent une protection permanente du sol contre l'intensité des précipitations. Dans cette catégorie, nous remarquons la présence de cultures de plein champ aménagées sur des faibles pentes et des sols peu érodables.

- le moyen aléa se manifeste sur une surface de 6 720 hectares. Cette délimitation correspond aux cultures de plein champ, au couvert végétal peu dense (forêts, végétation herbacée), voire aux arbres fruitiers et aux vignobles sur des sols et des pentes peu et moyennement favorables à l'érosion.

- les secteurs à l'aléa fort (4 657,5 hectares) sont essentiellement représentés sur les versants concaves, là où la pente est raide et le sol peu profond. L'absence du couvert végétal ou un couvert végétal très peu protecteur (arbres dispersés, végétation clairsemée), ainsi que les arbres fruitiers sur les pentes fortes, ont provoqué des ruissellements et l'érosion des sols. Le transport des particules solides, causé par l'énergie des eaux de pluie, et leur dépôt engendrent un risque sur les parcelles agricoles (Veyret, 2003).

À partir de la carte d'aléa érosif, (échelle de l'ordre du 1/50 000), nous constatons que les plages affectées par un aléa moyen sont dominantes puisque ce dernier couvre 56,7 % de la superficie de la région d'étude. Les zones ayant un aléa fort s'étendent sur 39,3 % et concernent majoritairement les secteurs sans ou à faible couverture végétale. Les zones à faible aléa, sont présentes sur une modeste surface 4 %.

La méthodologie utilisée a permis de mettre en évidence les secteurs les plus vulnérables à l'érosion, en se basant sur les facteurs les plus représentatifs. Afin d'analyser la pertinence du modèle utilisé, il était indispensable de faire des relevés *in situ*, qui ont exigé un système de positionnement par satellite (GPS), et de faire une interprétation visuelle d'une image satellitaire de haute résolution spatiale (*Worldview*).

La validation s'est portée sur deux unités géomorpho-dynamiques : les versants à moyenne et forte valeur de pente, où l'érosion en majorité de type « naturel » de montagne est causé par le déboisement, et le secteur à morphologie plane, caractérisé par l'érosion d'agro-système liée à la modification de l'occupation du sol et aux pratiques culturales. La confrontation des points sélectionnés sur la carte synthétique, pour les secteurs susceptibles de subir une érosion avec la réalité du terrain montre un taux élevé de concordances.

Certains critères déterminés au Liban, (Bou Kheir *et al.*, 2001b), pour estimer l'érosion hydrique, nous ont été utiles pour valider la carte de synthèse.

– les classes ayant un aléa érosif fort ont été identifiées par la présence de plages de couleur claire sur les versants décapés et la remontée des cailloux en surface, sous l'effet de l'intensité maximale des pluies qui déclenchent le ruissellement et engendrent la destruction des horizons superficiels. Le mouvement de sol, fort aléa d'érosion, d'un volume de plus de 1 m³, causé par la faible cohésion du sol sur les pentes déstabilisées par l'absence d'un couvert végétal protecteur, sont aussi des indicateurs d'un aléa érosif fort.

– les classes ayant un aléa érosif moyen sont déterminées par des racines d'arbres exposées à l'air sur 5 à 20 cm, des buttes de sol résiduel de 15 à 20 cm.

– le faible aléa est caractérisé par des racines d'arbres et d'arbustes exposées à l'air sur moins de 5 cm, des buttes de sol résiduel de moins de 10 cm.

6. Conclusion

Le modèle adopté correspond à une approche qualitative, qui a permis d'étudier l'aléa érosif dans une région semi-aride, topographiquement mouvementée et qui constitue un exemple représentatif de l'évolution de la plaine de la Békaa, que ce soit en termes d'agriculture ou d'augmentation des surfaces urbanisées. Ce modèle s'est basé sur l'intégration des agents érosifs dans un SIG sous format vectoriel, classés selon un indicateur de sensibilité en fonction de leur contribution à l'érosion. Les difficultés apparues sont liées aux choix de pondérations. Le coefficient le plus important a été attribué au couvert végétal, compte tenu de son rôle comme moyen de lutte contre l'érosion. Lors des observations de terrain, nous avons constaté, là où la végétation est absente et clairsemée, des décapages du sol et des ravinements qui mobilisent un volume important de terre et entraînent la dégradation de la production agricole. En revanche, la densité du couvert végétal a maintenu d'autres endroits. La cartographie réalisée permet d'appréhender la répartition spatiale de l'aléa érosion et de faire une comparaison entre les différents secteurs de la région d'étude. En matière d'érosion, deux risques sont à prendre en considération : en amont, les pertes de terre, et en aval, la sédimentation et l'atterrissement de la charge solide. Bien que cette approche permette de localiser les secteurs les plus sensibles aux pertes de terres, elle ne traite pas les zones d'accumulation de sédiments.

La cartographie d'aléa érosif participe aux décisions d'intervention ainsi qu'aux choix de conservation. Les résultats de la cartographie mettent en évidence l'importance du couvert végétal sur les pertes en sols. Les facteurs tels que la pente, les précipitations, ne sont pas modifiables à court terme. Par contre, nous pouvons contrôler le facteur humain qui agit dans le mode d'occupation et l'affectation du sol. Une intervention rapide de l'État devrait être mise en place afin de traiter le risque d'érosion en amont (restauration des terrains de montagnes) et de prendre en considération l'apparition des crues torrentielles, susceptibles de provoquer des dégâts importants. Par ailleurs, le sol de la région en question est marqué par la baisse des teneurs en matière organique. De ce fait il est important de former les agriculteurs à la gestion des résidus qui constituent un apport en matière organique et protègent le sol contre l'intensité des précipitations.

Les résultats, qui montrent une simplicité dans la lecture des résultats, ont mis en évidence les secteurs les plus vulnérables à l'érosion. Ce travail représente une base pour mettre en place des mesures de protection et de gestion pour les secteurs les plus sensibles à l'érosion. La logique floue est une méthode qui permet de ranger les objets selon des degrés d'appartenance qui montre une flexibilité importante dans les systèmes de hiérarchisation. En perspective, il serait important d'envisager des sondages sur des parcelles témoins pour chaque classe d'érodibilité afin d'examiner, à travers l'analyse de sensibilité, la stabilité des résultats par rapport à la variation des paramètres différents. L'analyse de robustesse dans l'aide à la décision multicritère est un sujet de recherche relativement récent. Ce travail n'empêche pas dans l'avenir l'adoption des modèles quantitatifs (USLE). L'amélioration de ce travail requiert des études situationnelles afin de mesurer les pertes de sol causées par l'érosion hydrique. Une analyse plus fine peut être faite lorsque l'on disposera de moyens et de données suffisantes. Certaines vérifications, basées sur la réponse spectrale des zones érodées (indice de brillance), pourraient être utiles, en utilisant une image satellitaire de haute résolution spatiale Ikonos (1 m), surtout pour les secteurs ayant un relief accidenté et difficilement accessible (El Hage Hassan *et al.*, 2018b). Des recherches devraient spécifier le lien entre les paramètres (pente, sols, etc.) et les indices d'érosion (glissement de terrain) afin de confirmer leur concordance. Cela permettra de réaliser un grand nombre de validations rapides sur le terrain (Bou Kheir *et al.*, 2001b).

Remerciements

Nous remercions le comité de rédaction, les relecteurs qui ont accepté de juger notre travail et Alice Rouquié, secrétaire de rédaction de la Revue internationale de géomatique. Également nous tenons à remercier Myriam Makke Traboulsi, Éliane Charbel et Ali Talal Haidar pour leur précieuse collaboration.

Bibliographie

- Abbud M., Aker N. (1986). The study of the aquiferous formations of Lebanon through the chemistry of their typical springs. *Lebanese Science Bulletin*, vol. 2, n° 2, p. 5-2.
- Ake G.E, Kouadio B.H., Adja M.G., Ettien J.B., Effebi K.R. Biemib J. (2012). Cartographie de la vulnérabilité multifactorielle à l'érosion hydrique des sols de la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire), *Physio-Géo*, [En ligne], Volume 6, 2012, mis en ligne le 26 février 2012, Consulté le 16 janvier 2015. URL: <http://physio-geo.revues.org/2285> ; DOI : 10.4000/physio-geo.2285.
- Arnoldus H.M.J. (1980). *An approximation of the rainfall factor in the USLE*, Assessment of Erosion, Wiley, Chichester, England, p. 127-132.
- Asseline J., De Noni G., Nouvelot J.F., Roose E. (1995). Caractérisation de l'érodabilité d'une terre de moyenne montagne méditerranéenne : sud Aveyron, France. *Bull. Réseau Erosion*, n° 15, p. 471-488.
- Auerswald K. (1987). Sensivitat erosions bestimmender Faktoren. *Wasser und Boden*, vol. 39, n° 1, p. 34-38.

- Auzet V. (1987). L'érosion des sols cultivés en France sous l'action du ruissellement. *Annales de géographie*, vol. 96, n° 537, p. 529-556. doi: [10.3406/geo.1987.20627](https://doi.org/10.3406/geo.1987.20627).
- Blanchet, G. (1965). Le climat de Beyrouth. *Revue de géographie de Lyon*, vol. 40, n° 2, p. 131-158. doi: [10.3406/geoca.1965.1778](https://doi.org/10.3406/geoca.1965.1778). DOI: [10.3406/geoca.1965.1778](https://doi.org/10.3406/geoca.1965.1778).
- 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.
- Bou Kheir R., Girard M.C., Khawle M., Abdallah C. (2001a). Érosion hydrique des sols dans les milieux méditerranéens. *Études et gestion des sols*, vol. 8, n° 4, p. 231-245.
- Bou Kheir R., Girard M.C., Shaban A., Khawle M., Faour G., Darwish T. (2001b). Apport de la télédétection pour la modélisation de l'érosion hydrique des sols dans la région côtière du Liban. *Télédétection*, vol. 2, n° 2, p. 79-90.
- Casenave A., Valentin C. (1989). *Les états de surface du sol dans la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration*, ORSTOM Paris.
- Cerdan O., Le Bissonnais Y., Souchere V., King C., Anton I.V., Surdyk N., Dubus I., Arrouays D., Desprats J.F. (2006). *Guide méthodologique pour un zonage départemental de l'érosion des sols*. Rapport n° 3 : Synthèse et recommandations générales, BRGM-RP-55104-FR. Orléans: BRGM, INRA.
- Charbel L., El Hage Hassan H. (2017). Modélisation de la perte de sol dans la forêt de Bkassine (Liban sud). *Geo-Eco-Trop.*, vol. 41, n° 31, n.s. p. 479-492.
- Comair F. (2011). *L'efficacité d'utilisation de l'eau et approche économique*. Rapport final du Plan Bleu. Centre d'Activités Régionales PNUE/PAM. 64 p.
- Darwish T., Khawle M., Jomaa I., Abou Daher M., Awad M., Masri T., Shaban A., Faour G., Bou Kheir R., Abdallah C., Haddad T. (2006). *Soil map of Lebanon 1/50000*, Liban: CNRS-Lebanon, Monograph Series 4.
- Darwish T., Zurayk R. (1997). Distribution and nature of Red Mediterranean soils in Lebanon along an altitudinal sequence. *Catena*, vol. 28, n° 3-4, p. 191-202.
- Davis S., Deweist R. (1996). *Hydrogeology*. John Willey and Sons Inc.
- De Noni G., Viennot M., Asseline J., Trujillo G. (2001). *Terres d'altitude, terres de risque. La lutte contre l'érosion dans les Andes équatorienne*. Éditions de l'IRD.
- De Noni G., Prah C., Quaniin P., Viennot M., Zebrowski C. (2000). Érosion et conservation, après récupération, des sols volcaniques indurés de l'Equateur et du Mexique. *Étude et Gestion des sols*, vol. 7, n° 1, p. 25-36.
- Direction des affaires géographiques et géodésique de l'armée libanaise. (1963). *Carte topographique de Rachaya et Jezzine au 1/20.000e*.
- Dubertret L., Wetzel R. (1951). *Carte géologique au 1/50000. Feuille de Rachaya et Jezzine au 50000e*. Ministère des Travaux publics, Beyrouth, avec notice (sous la direction de L. Dubertret), 56 p. + 12 planches photographiques.
- Duchaufour P. (1970). *Précis de pédologie*. Paris: Masson.

- Duley F.L., Ackerman F.G. (1934). Runoff and erosion from plots of different lengths. *Journal of Agricultural Research*, vol. 48, n° 6, p. 505-510.
- Dumas P. (2010). Méthodologie de cartographie de la sensibilité des sols à l'érosion appliquée à la région de Dumbéa à Païta - Bouloupari (Nouvelle-Calédonie), *Les Cahiers d'Outre-Mer*, 252, p. 567-584.
- El Hage Hassan H., Charbel L., Touchart L. (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* [En ligne], vol. 18, n° 1, mai.
- El Hage Hassan H., Charbel L., Touchart L. (2018b). Modélisation et cartographie du risque érosif à Rachaya (Liban). *Photo-Interprétation. European Journal of Applied Remote Sensing*, Editions Eska, vol. 54, n° 1, p. 16-27.
- El Hage Hassan H., Touchart L., Ardillier Carras F., Faour G. (2016). Lutte contre l'érosion et aménagement agricole dans la plaine de la Békaa (Liban). *M@ppemonde 117 (2015.1)*.
- El Hage Hassan H., Charbel L., Touchart L. (2015). Cartographie des conditions de l'érosion hydrique des sols au Mont-Liban : exemple de la région d'El Aaqouira. *Physio-Géo* [En ligne], vol. 9, p. 141-156. DOI : 10.4000/physio-geo.4572.
- El Hage Hassan H., Touchart L., Faour G. (2013). La sensibilité potentielle du sol à l'érosion hydrique dans l'ouest de la Békaa au Liban. *M@ppemonde 109 (2013.1)*.
- 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.
- El Hage Hassan H., Valadas B., Faour G. (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 Swaify S.A., Dangler E.W. (1977). Erodibilities of selected tropical soils in relation to structural and hydrologic parameters. *Soil Erosion: Prediction and Control Proceedings of the National Conference on Soil Erosion, mai 1976, West Lafayette, Indiana*. Foster G.R. dir., Ankeny (Iowa): Soil Conservation Society of America, coll. «Soil Conservation Society of America; Special publication - Soil Conservation Society of America.
- Fanning D., Fanning M.C. (1989). *Soil Morphology, genesis and classification*. New York: Wiley.
- FAO (2006). Global forest resources assessment 2005: report on fires in the Mediterranean region. Fire Management Working Paper, Rome.
- FAO, UNEP (1997). *Guidelines for mapping and measurement of rainfall-induced erosion processes in the Mediterranean coastal areas*. Split (Croatie): Priority Actions Programme Regional Activity Centre (PAP/RAC).
- FAO (1983). *Land Evaluation for Rain fed Agriculture. FAO Soils Bulletin*, 52, FAO, Rome.
- FAO (1977). Cadre pour l'évaluation des sols. *Bulletin pédologique de la FAO*, n° 32.
- Fournier F. (1960). *Climat et érosion*. Presses Universitaires de France, Paris.

- Fox D., Martin C., Grosso J., Morschel J. (2006). Etude et cartographie de l'érosion des sols dans un vignoble du Sud-Est de la France. *Etudes de Géographie Physique*, p. 23-32.
- Garcia-Ruiz J., Lasanta T., Ruiz-Flano P., Ortiza L., White S., Gonzalez C., Arti C. (1996). Land use changes and sustainable development in mountain areas: a case study in the Spanish Pyrenees. *Landscape Ecology*, vol. 11, n° 5, p. 267-277.
- Horton R. (1941). An approach toward a Physical Interpretation of Infiltration Capacity. *Soil Science Society of America Journal*. vol. 5, no. C. P. 399-417.
- Hudson N. (1996). Mesures de terrain de l'érosion et de l'écoulement des eaux de surface. *Bulletin pédologique de la FAO*, vol. 68, 153 p.
- Jouany C., Chenu C., Chassin P. (1992). Détermination de la mouillabilité des constituants du sol à partir de mesures d'angles de contact. *Science du sol.*, vol. 30, n° 1, p. 33-47.
- Lamouroux M. (1972). *Étude de sols formés sur roches carbonatées : pédogenèse fersiallitique au Liban*. Paris: Office de la recherche scientifique et technique outre-mer, coll. « Mémoires Orstom ».
- Le Bissonnais Y., Montier C., Daroussin J., King D., Morel B. (1998). *Cartographie de l'aléa Érosion des sols en France*. INRA.
- Lenthe H.R., Krone F. (1981). Groundwater exploration and soil resources. Pedology, Part C: Ecological land survey in key areas of Cyprus. Soil erosion losses on various geological deposits, case study. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Technical cooperation, project no 75 20 190, Hannover.
- Malczewski J. (1999). *GIS and Multicriteria Decision Analysis*. New York: John Wiley and Sons., ISBN 0-471-32944-4.
- Maurer G. (1968). *Les Montagnes du Rif central : étude géomorphologique*. Paris: Université de Paris, Faculté des lettres, thèse de doctorat en lettres.
- Mutchler C.K.Greer J.D. (1980). Effect of slope length on erosion from low slopes. *Transactions of the ASAE*. vol. 23 n° 4 p. 866-869, p. 876.
- M.T.P.T (1977). *Atlas climatique du Liban. Tome 1 : Pluie, température, pression, nébulosité*. Édit. Ministère des Travaux Publics et des Transports, Service Météorologique, Beyrouth (Liban), 45 p. + planches.
- 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 ».
- PAP/RAC (2004). *Improving Coastal Land Degradation Monitoring in Lebanon and Country Report: Syria*. Split: Priority Actions Programme.
- Payet E., Dumas P., Pennober G. (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], vol. 11, n° 3, décembre, mis en ligne le 20 septembre 2012. 24 p. ISSN électronique, p. 1492-8442.
- Poesen J., Hooke J. (1997). Erosion, flooding and channel management in Mediterranean environments of Southern Europe. *Progress in Physical Geography*, vol. 21, n° 2 p. 157-199.

- Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., Mccool D.K., Yoder D.C. (1997). Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), *Agriculture Handbook*, n° 703.
- Rey F., Ballais J.L., Marre A, Rovera G. (2004). Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface. *C. R. Geoscience* 336, p. 991-998. ISSN: 1631-0713.
- Roose E. (1999). Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bulletin Réseau Erosion*. 19, p. 11-25.
- Roose E. (1994). Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Rome: FAO, coll. 3 *Bulletin pédologique de la FAO*, no 70.
- Roose E., Arabi M., Brahamia K., Chebbani R., Mazour M., Morsli B. (1993). Érosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne algérienne. Réduction des risques érosifs et intensification de la production agricole par la GCES : synthèse des campagnes 1984-1995 sur un réseau de 50 parcelles d'érosion. *Cahiers ORSTOM, série Pédologie*, vol. 28, n° 2, p. 289-308.
- Roose E.J., Sarrailh J.M. (1989). Erodibility of some tropical soils - twenty years of records in some erosion plots under natural rainfall. *Soils Fert*, n° 25. Paru en français : Érodibilité de quelques sols tropicaux. Vingt années de mesure en parcelles d'érosion sous pluies naturelles. *Cahiers ORSTOM, série « Pédologie »*, vol. 25, n° 1-2, p. 7-30.
- Roose E. (1973). *Dix-sept années de mesure expérimentale de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse Côte d'Ivoire. Contribution à l'étude de l'érosion hydrique en milieu intertropical*. Abidjan: Université d'Abidjan, faculté des sciences, thèse de doctorat.
- Roussillon J. (2016). Développement de méthodes innovantes de cartographie de l'occupation du sol à partir de séries temporelles d'images haute résolution visible (NDVI). Mémoire présenté en vue d'obtenir le diplôme d'ingénieur cnam.
- Ryan J. (1982). *A perspective on soil erosion and conservation in Lebanon*. Beirut: American University of Beirut, "Publication", n° 69.
- Saaty T.L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process, *Int. J. Services Sciences*, 1, p. 83-98.
- Saaty T.L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority, Settings*. Resource Allocation, Mcgraw-Hill, New York, NY.
- Salomon J.N. (2001). Les pertes en sols dans les montagnes tropicales. Les montagnes tropicales [Texte imprimé]: identités, mutations, développement : table-ronde, Bordeaux-Pessac, 27 et 28 novembre 1998 / sous la dir. de François Bart, Serge Morin et Jean-Noël Salomon *et al.*, UMR 5064 DYMSET, Dynamiques des milieux et des sociétés dans les espaces tropicaux, p. 15-25.
- Savat J., De Ploey J. (1982). Sheetwash and rill development by surface flow. *Badland Geomorphology and Piping*. Bryan R., Yair A., dir., Norwich (Angleterre): Geo Books.
- Soti V., Botta A., Bégué A., Despinoy M., Colin F. (2005). Contribution de la télédétection au suivi de la sensibilité des sols à l'érosion à l'échelle d'un bassin versant (île de La Réunion). *Revue internationale de géomatique*, vol. 15, n° 4.
- Soutter M., Mermoud A., Musy A. (2007). *Ingénierie des eaux et du sol Processus et aménagements*. Presse polytechniques et universitaires romandes.

Van Der Knijff J.M., Jones R.J.A., Montanarella L. (2000). *Soil erosion risk assessment in Europe*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.

Veyret Y. (2003). *La France. Milieux physiques et environnement*. Armand Colin, coll. "Cursus. Série Géographie".

Wischmeier W.H., Smith D. (1978). Predicting rainfall erosion losses. A Guide To Conservation Planning. *Supersedes Agriculture Handbook*, No 282.

Wischmeier W.H., Smith D.D. (1960). A universal soil-loss estimating equation to guide conservation farm planning. *Actes du 7th International Congress of Soil Science*, vol. I, p. 418-425.