



Numéro spécial

Modélisation de la perte de sol dans la forêt de Bkassine (Liban sud)

Modeling of soil loss in Bkassine forest (South Lebanon)

Laurence CHARBEL¹ & Hussein EL HAGE HASSAN²

Abstract: This study addresses the problem of water erosion and landslides in the forest of Bkassine. From a qualitative approach based on the method of Analytic Hierarchy Process (AHP) using GIS, we combined data such as: soil erodibility, slope and aspect, influence of vegetation cover, lithology and drainage. The result of the mapping highlights the areas affected by the erosion and landslide risks and shows that the average and high sensibilities classes dominate the study area.

Key-words: Forest, soil erosion, landslide, AHP, Bkassine, Lebanon

Résumé: La présente étude évoque le problème de l'érosion hydrique et du glissement de terrain dans la forêt de Bkassine. A partir d'une approche qualitative basée sur la méthode d'Analyse Multicritère Hiérarchique (AHP) et à l'aide d'un SIG, nous avons combiné les données telles que: l'érodibilité du sol, la pente et son exposition, l'influence du couvert végétal, la lithologie et le drainage. Le résultat de la cartographie met en évidence les secteurs vulnérables aux risques érosifs et aux glissements de terrain et montre que les classes moyennes et fortes sensibilités dominent le secteur d'étude.

Mots clés : Forêt, érosion hydrique, glissement de terrain, AHP, Bkassine, Liban

INTRODUCTION

La dégradation des sols menace la forêt de Bkassine. Le terrain d'étude, qui se situe au cœur de cette région, doit faire face à l'érosion hydrique qui attaque la qualité des sols. De même, un autre problème diagnostiqué dans cette région concerne les glissements de terrain. Le secteur en question connaît un certain nombre de conditions favorisant ces risques : le caractère semi-aride du climat méditerranéen, l'agressivité climatique, la texture du sol, le couvert végétal, les versants à forte valeur de pente et la lithologie différenciée et affleurante. Le couvert du sol est fortement occupé par les pins mais le taux de recouvrement du sol varie d'un secteur à l'autre. Cela signifie que l'efficacité du couvert végétal contre la dégradation des sols n'est pas partout la même (DUCHAUFOR, 1970). Notre but est d'évaluer la sensibilité du sol à l'érosion hydrique et aux glissements de terrain. Pour répondre à ces questions, il s'agit d'employer des approches qualitatives, déjà éprouvées dans divers pays, basées sur la méthode de l'Analyse Multicritère Hiérarchique (AHP – Analytic Hierarchy Process). Après la présentation du site d'étude, il s'agira de développer la méthodologie en mettant en évidence son caractère par rapport aux démarches existantes. La cartographie du risque érosif et du glissement de terrain sera étayée sous forme de résultats spatialisés, avant d'être discutée.

¹ Université Libanaise, Beyrouth, Département de Géographie, Liban
laurence.charbel@gmail.com

² Laboratoire de recherche: CEDETE (EA 1210), Université d'Orléans, Université Libanaise, Beyrouth, Département de Géographie, Liban.
hussain.el-hage-hassan@univ-orleans.fr ; hussain.1978@hotmail.fr

CADRE D'ÉTUDE

Notre choix d'étude s'est porté sur la forêt de Pin pignon (*Pinus pinea* L.) de Bkassine (Liban sud) qui s'étale sur 1261 ha et demeure la plus étendue au Proche-Orient (Figure 1). Cet espace forestier, localisé majoritairement sur les pentes supérieures à 11° (maximum : 61° et minimum 0.02°), se trouve à une altitude moyenne de 850 m (minimum 465 m et maximum 1210 m). Sous l'effet d'un climat de type méditerranéen, cette région se particularise par des précipitations annuelles moyennes variant entre 800 mm et 1 200 mm. La saison humide va de novembre à avril. Le nombre annuel de jours de pluie est de 120 en moyenne.

La région d'étude se développe sur une formation de grès ferrugineux du Crétacé inférieur. L'épaisseur de cette couche atteint les 220 m. La stratification est en couches lenticulaires variant de 0,20 à 1 m d'épaisseur. Les grains sont alternativement des grains fins et grossiers. Des argiles sont inter-stratifiées dans le grès. Ce secteur est parcouru par un réseau hydrographique alimenté par une vingtaine de sources jaillissantes dans la forêt. La végétation est de type méditerranéen, le pin est la formation végétale dominante, mais cette forêt est marquée par la dégradation de sa surface boisée.

Les versants à forte valeur de pente, la lithologie différenciée et la dégradation des surfaces boisées ont contribué à la dégradation du sol de cette région. De ce fait, il est intéressant d'étudier l'aléa érosif et le glissement de terrain pour une région dont nous disposons d'informations abondantes.

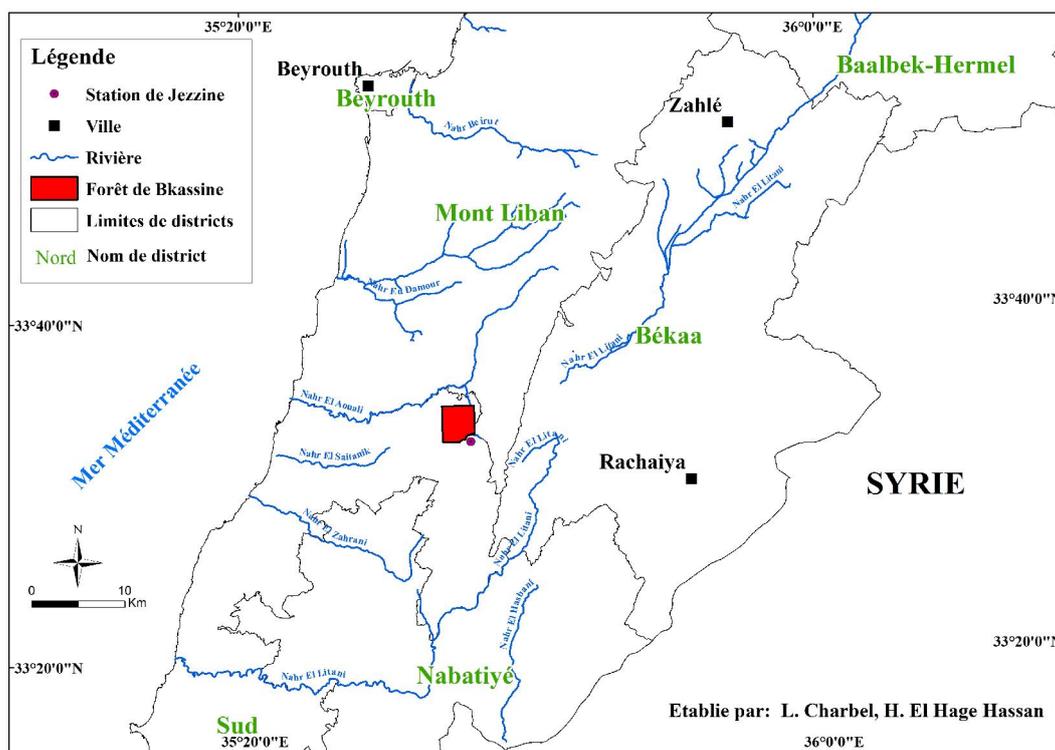


Figure 1 – Localisation de la zone étudiée.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

Plusieurs méthodes (quantitatives et qualitatives) existent pour étudier le phénomène érosif et le glissement de terrain. Les approches quantitatives (WISCHMEIER & SMITH, 1960 ; 1978), qui offrent des mesures précises, requièrent beaucoup de données et un suivi sur plusieurs années. Par contre, les modèles qualitatifs, peuvent s'adapter en fonction de la disponibilité des données et des particularités locales (EL HAGE HASSAN *et al.*, 2013). Pour cartographier ces risques, nous avons adopté un modèle qualitatif basé sur la méthode d'Analyse Multicritère Hiérarchique, créée par SAATY en 1980, employée par plusieurs chercheurs pour évaluer la probabilité de l'érosion hydrique (CORREIA, 2007) et le glissement de terrain (RAMOS *et al.*, 2014). Cette méthode permet de

combiner les facteurs de l'érosion (érodibilité des sols, infiltrabilité des roches, pente, occupation des sols, pluies...) et les facteurs du glissement de terrain (la lithologie, la pente, l'occupation du sol, la quantité des pluies, le drainage et l'exposition des pentes).

Afin de déterminer cette étude, nous avons suivi la démarche suivante :

1. L'adoption de la méthode d'Analyse Multicritère Hiérarchique qui consiste en :
 - La représentation d'un problème de prise de décision par l'organisation de ses critères en une structure hiérarchique,
 - L'évaluation de l'importance relative des critères (dans un arbre hiérarchique), puis des alternatives de chaque critère; cela se fait par la construction de matrices de comparaison de paires. Par exemple, un problème de décision simple avec 3 critères et 5 alternatives nécessitera une matrice 3×3 de comparaison à être construite pour la pondération des critères et trois 5×5 matrices de comparaison pour évaluer les critères alternatifs,
 - La synthétisation de l'analyse en calculant la somme pondérée des scores des alternatives basées sur les poids de leurs nœuds parents dans l'arbre hiérarchique.

Les comparaisons par paires de critères sont faites en utilisant une échelle de jugements absolus, communément appelé l'échelle de Saaty, qui indique dans quelle mesure un élément prédomine sur l'autre par rapport à un attribut donné. Cette échelle transforme les évaluations qualitatives en valeurs numériques de 1 à 9 (Tableau 1) qui sont utilisées pour remplir les matrices de comparaison par paires. Les échelles de priorité sont alors établies en calculant le vecteur propre associé à la valeur propre principale de chaque matrice de comparaison (SAATY, 1980).

Tableau 1 : L'échelle fondamentale des nombres absolus ("Echelle de Saaty", adoptée par SAATY, 2008).

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

Le jugement est transféré dans une matrice de comparaison par paires comme le montre la formule générale (1).

$$A = [r_{ij}] = \begin{bmatrix} 1 & r_{12} & \dots & r_{1j} \\ 1/r_{12} & 1 & \dots & r_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/r_{1j} & 1/r_{2j} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Une comparaison par paires constitue, à la fin, une matrice carrée dans laquelle chaque valeur d'élément est comprise entre 1/9 et 9. Les éléments diagonaux de la matrice sont toujours égaux à 1, tandis que les éléments non diagonaux saisissent l'importance relative perçue des alternatives correspondantes.

En pratique, il est irréaliste d'attendre des décideurs afin de fournir la comparaison des matrices de paires qui sont exactement conformes, en particulier dans les cas où il y a un assez grand nombre d'alternatives. La cohérence de la matrice est déterminée par le calcul du ratio de cohérence (CR). Ceci est obtenu en calculant le produit matriciel de la matrice de comparaison par paires et les poids des vecteurs, puis en ajoutant tous les éléments du vecteur résultant. Après cela, un indice de cohérence (I.C.) est calculé en utilisant la formule suivante:

$$I.C. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

où "n" est le nombre des critères et « λ_{\max} » est la valeur maximale d'Eigen value (MALCZEWSKI, 1999).

Pour déterminer si les comparaisons sont conformes ou non, on a recours au calcul du ratio de cohérence (R.C.) selon la formule:

$$R.C. = \frac{I.C.}{C.A}$$

où C.A est l'indice de cohérence aléatoire. L'indice CA, présenté dans le Tableau 2 est issu d'un échantillon de 500 matrices réciproques positives gérées de façon aléatoire, dont la taille atteint 11 par 11.

On considère comme acceptable un ratio de cohérence < 0,10.

Tableau 2 : Valeurs de CA pour n=1, 2,...,11 (établie par SAATY, 1980).

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

- Hiérarchisation des facteurs d'érosion et de glissement de terrain sous forme d'indice de sensibilité et attribution des valeurs chiffrées pour chaque classe (très faible = 1, faible = 2, moyenne = 3, forte = 4 et très forte = 5) afin de dresser les cartes thématiques des différents facteurs.

Toutefois, ce classement a nécessité l'avis des experts pour être validé.

- La production des cartes de susceptibilité de glissement de terrain et de sensibilité du sol à l'érosion à partir de la combinaison des facteurs représentatifs du modèle dans l'outil « Model Builder » du logiciel ArcGIS 10.3. Cet outil combine par le biais de la fonction « Weighted Overlay » les paramètres précités et classifiés en format Raster (Figure 2). Ces paramètres tiennent compte des classements inter-facteurs et des poids de chaque facteur calculés par la méthode AHP (Tableaux 3 & 4).

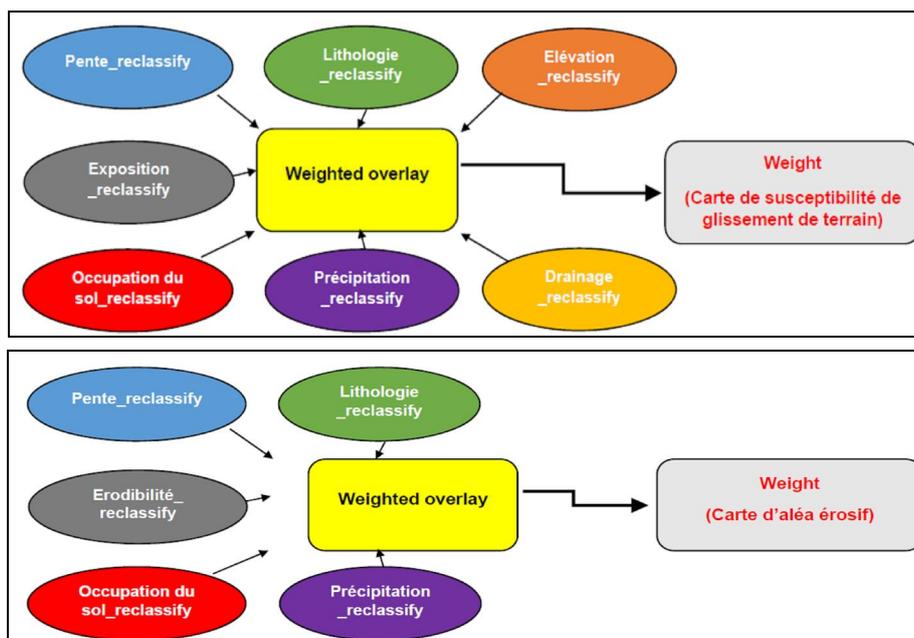


Figure 2 : Modèles adoptés pour la réalisation des cartes de susceptibilité de glissement de terrain et de l'aléa érosif .

Tableau 3 : Calcul de la pondération des différents critères pour le modèle du glissement de terrain.

Paramètre	Précipitation	Occupation du sol	Lithologie	Drainage	Pente	Exposition	Élévation	WI
Précipitation	1.00	1.50	0.33	1.50	0.33	5.00	3.00	0.14
Occupation du sol	0.67	1.00	0.67	0.67	0.33	4.00	5.00	0.13
Lithologie	3.00	1.50	1.00	1.50	0.67	4.00	5.00	0.21
Drainage	0.67	1.50	0.67	1.00	0.33	5.00	3.00	0.14
Pente	3.00	3.00	1.50	3.00	1.00	3.00	5.00	0.29
Exposition	0.20	0.25	0.25	0.20	0.33	1.00	1.50	0.05
Élévation	0.33	0.20	0.20	0.33	0.20	0.67	1.00	0.04

Tableau 4 : Calcul de la pondération des différents critères pour le modèle de l'aléa érosif.

Paramètre	Précipitation	Occupation du sol	Lithologie	Pente	Érosivité du sol	WI
Précipitation	1.00	0.80	1.00	1.00	1.00	0.19
Occupation du sol	1.25	1.00	1.25	1.25	1.25	0.24
Lithologie	1.00	0.80	1.00	1.00	1.00	0.19
Pente	1.00	0.80	1.00	1.00	1.00	0.19
Érosivité du sol	1.00	0.80	1.00	1.00	1.00	0.19

LES DONNÉES EMPLOYÉES

Le processus de dégradation du sol qui affecte notre terrain de recherche résulte de l'interaction de plusieurs facteurs. Pour conduire cette étude, nous nous sommes servis des documents suivants :

- Une image satellitaire WorldView (résolution de 46cm x 46 cm, 2011), interprétée et classée à l'aide de l'«outil de classification» du logiciel Arc GIS 10.3 pour définir le mode d'occupation du sol.
- Le modèle numérique d'élévation (DEM), dressé à partir d'un modèle de réseau triangulé irrégulier (TIN), en se référant à la carte topographique de Jezzine de 10 m au 1/20 000^e publiée en format raster par la Direction des affaires géographiques de l'armée libanaise.
- Les données pluviométriques (moyennes mensuelles) issues de Lebanon Reforestation Initiative (LRI), de l'Institut de Recherche Agronomique Libanais (IRAL) et de la station météorologique de Jezzine (Figure 1).
- La carte géologique de Jezzine à l'échelle de 50.000^{ème} (DUBERTRET & WETZEL, 1951).
- La carte des sols de Jezzine au 1/50000, publiée par le CNRSL (DARWISH *et al.*, 2006). Cette carte est accompagnée d'un ouvrage, portant un certain nombre de paramètres (texture, matière organique...).

LES ÉLÉMENTS DU MODÈLE

Le couvert végétal

La végétation, par son action dynamique, protège le sol de l'érosion hydrique et cela de plusieurs façons : intercepte l'énergie cinétique des pluies, améliore ses propriétés physiques et chimiques, favorise l'infiltration et freine le ruissellement (REY *et al.*, 2004). La densité du couvert végétal, quant à elle, détermine l'ordre de protection attribué au sol. Toutefois, de nombreux critères sont à prendre en considération pour déterminer l'impact de la végétation sur la protection du sol, tels :

l'écartement des plants, la durée de la pousse, la date des semis et des récoltes, le sarclage, le désherbage, le type de labours, l'enracinement et les pratiques culturales (EL HAGE HASSAN, 2011). Plusieurs formations végétales sont différenciées dans la région d'étude. Cela signifie que le rôle de la végétation, contre la dégradation du sol varie d'un secteur à l'autre. On distingue à la fois des secteurs qui ont un couvert végétal toute l'année (forêt) et d'autres où le sol reste à nu pendant plusieurs mois assurant une protection discontinue. Pour mettre en évidence le couvert végétal, nous avons eu recours à une image satellitaire WordView, en plus des travaux de terrain pour valider la carte d'interprétation.

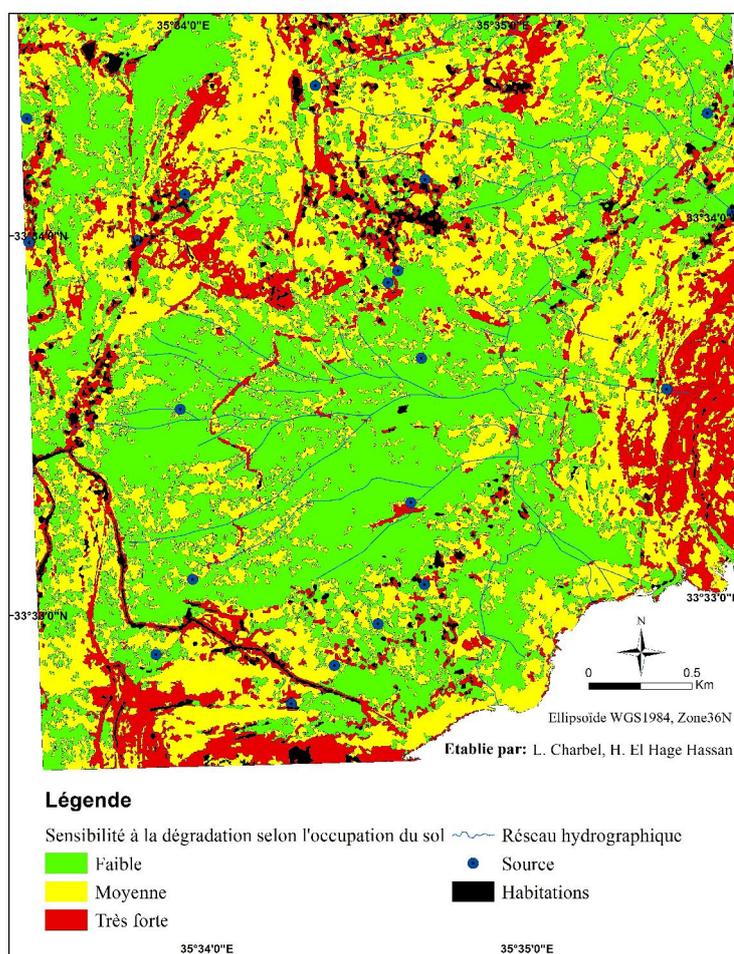


Figure 3 : Influence du couvert végétal sur l'érosion hydrique.

Trois classes ont été distinguées (Tableau 5 et Figure 3) :

- La classe à faible sensibilité correspond aux forêts denses qui ne subissent aucun changement physiologique. Cette végétation, qui couvre 551 ha, se trouve associée à une couverture herbeuse qui agit comme un écran protecteur pour le sol (BOU KHEIR, 2002).
- La classe à moyenne sensibilité correspond aux arbres dispersés qui occupent 477.5 hectares. Cette formation fournit un taux de couverture inférieur à 70%. A cela nous ajoutons les terrasses agricoles qui occupent 14 hectares.
- La classe à très forte sensibilité : elle correspond au sol nu qui occupe une surface de 182 hectares, où le couvert végétal est absent toute l'année et ne possède aucun moyen de lutte contre les précipitations.

Toutefois, les habitations (36.5 ha) ont été exclues de l'analyse.

Tableau 5 : Calcul de la pondération du critère “occupation du sol”.

Occupation du sol	Arbres dispersés	Forêt dense	Sol nu	Terrasses cultivées	WI	Sensibilité
Forêt dense	0.33	1.00	0.20	0.50	0.08	Faible
Arbres dispersés	1.00	3.00	0.25	1.50	0.20	Moyenne
Terrasses cultivées	0.67	2.00	0.25	1.00	0.15	Moyenne
Sol nu	4.00	5.00	1.00	4.00	0.57	Très forte

CR=0.04

Érodibilité du sol

L’aptitude du sol à être érodé est liée à plusieurs facteurs ; la stabilité structurale, la granulométrie, la perméabilité, la teneur en matière organique et la profondeur (DUMAS, 1965 ; ROOSE *et al.*, 1993 ; LE BISSONNAIS, 2002).

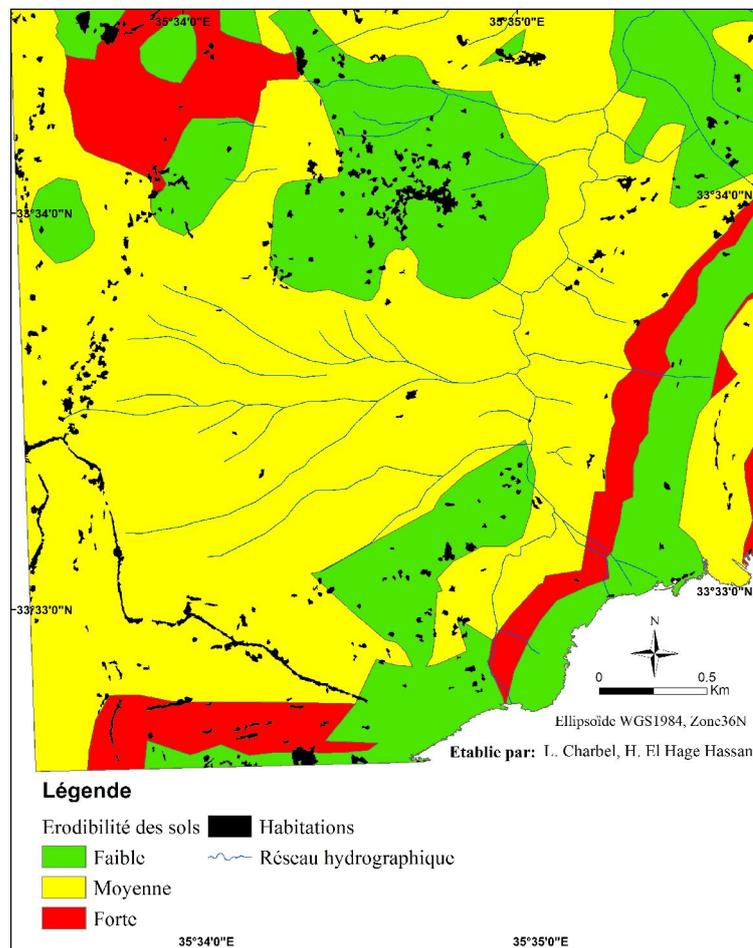


Figure 4 : Érodibilité des sols.

Afin d’étudier la conduite de ces facteurs vis-à-vis de l’érosion, nous nous sommes basés sur la carte de Jezzine au 1:50 000. La texture fine favorise le ruissellement, en revanche les éléments grossiers permettent l’infiltration (NEBOIT, 1991). Les sols limoneux sont plus sensibles à l’arrachement que les sols argileux. La faible teneur en matière organique et la faible cohésion contribuent au phénomène érosif. La capacité du sol à infiltrer et à retenir l’eau est aussi un paramètre différent pour expliquer la susceptibilité du sol à l’érosion hydrique (SABIR *et al.*, 2004). Un sol profond permet une absorption facile de l’eau et réduit le ruissellement.

Pour évaluer la sensibilité du sol à l'érosion nous sommes appuyés sur les informations relatives à la texture (40%), la teneur en matière organique (40%) et la profondeur (20%). Les poids attribués aux facteurs retenus sont basés sur des travaux antérieurs (BOU KHEIR *et al.*, 2001b; EL HAGE HASSAN *et al.*, 2016). Trois classes de sensibilité ont été remarquées (Figure 4). La sensibilité moyenne (indice = 3) qui correspond aux Eutric Arenosols (55%), Haplic Cambisols (2,1%) et Calcaric Regosols (1,6%) domine la plus grande surface du secteur d'étude. La classe à faible sensibilité qui occupe la deuxième place, correspond aux Calcaro-Hortic Anthrosols (22,5%) et Calcaric fluvisols (6%). La forte sensibilité qui occupe une surface étroite correspond quant à elle aux: Hypoluvic Arenosols (7%), Lithic Leptosols (2,7%), Rendzic Leptosols (2,5%) et Leptic Andosols (0,2%).

Le facteur topographique

En effet, les versants ouest et sud-ouest sont plus exposés au risque érosif compte tenu de la direction du vent humide. Le gradient de la pente demeure décisif dans l'apparition des rigoles (SAVAT & DE PLOEY, 1982). Plusieurs études dans les pays méditerranéens ont uniquement déterminé le rôle de l'indice topographique dans l'érosion à partir du gradient de la pente (FAO, 1983 ; ROOSE, 1994 ; GAY, 1996 ; EL HAGE HASSAN *et al.*, 2009 , 2015). Les secteurs les plus pentus ne sont pas forcément les plus érodibles (DE NONI *et al.*, 2001). L'érosion hydrique peut être remarquée sur les pentes faibles (FOURNIER, 1967). En effet, l'impact de la pente dans le phénomène érosif reste variable en fonction de la texture du sol et l'état de surface.

Pour caractériser la morphologie de notre région d'étude, nous avons travaillé sur la carte des pentes comme un facteur important dans l'érosion hydrique. La carte topographique de Jezzine à l'échelle de 1/20 000 nous a permis de réaliser une étude détaillée indispensable pour certains secteurs de notre terrain d'étude. En plus, elle nous a permis de travailler à grande échelle et d'étudier d'une façon précise la variation, l'exposition de la pente et l'altitude. Cinq classes ont été retenues, selon la façon dont elles sont susceptibles de favoriser l'érosion hydrique (Tableau 6).

Tableau 6 : Les classes de sensibilité de la pente à l'érosion hydrique.

Pente (°)	<5	5 - 10	10 - 15	15 - 20	> 20	WI	Sensibilité
<5	1.00	0.67	0.33	0.20	0.11	0.05	Très faible
5 - 10	1.50	1.00	0.67	0.25	0.17	0.07	Faible
10 - 15	5.00	1.50	1.00	0.33	0.20	0.13	Moyenne
15 - 20	5.00	4.00	3.00	1.00	0.33	0.25	Forte
> 20	9.00	6.00	5.00	3.00	1.00	0.51	Très forte

RC=0.07

Pour les glissements de terrain, cinq classes ont été retenues pour la sensibilité de la pente et quatre classes pour l'altitude (Tableau 7). En revanche, les experts locaux ont proposé un classement pour la pente différent de celui de l'érosion hydrique comme le montre le tableau 8.

Tableau 7 : Calcul de la pondération du critère "Altitude".

Élévation	<600 m	600-800 m	800-1000 m	>1000 m	WI	Favorisation
<600	1.00	0.67	0.33	0.20	0.10	Très faible
600-800	1.50	1.00	0.67	0.33	0.16	Faible
800-1000	3.00	1.50	1.00	0.67	0.28	Moyenne
>1000	5.00	3.00	1.50	1.00	0.46	Forte

RC=0.004

Tableau 8 : Calcul de la pondération du critère “pente”.

Pente (°)	0-15	15 - 25	25 - 35	35 – 45	> 45	WI	Sensibilité
0-15	1.00	0.67	0.33	0.20	0.11	0.05	Très faible
15 - 25	1.50	1.00	0.67	0.25	0.17	0.07	Faible
25 - 35	5.00	1.50	1.00	0.33	0.20	0.13	Moyenne
35 - 45	5.00	4.00	3.00	1.00	0.33	0.25	Forte
> 45	9.00	6.00	5.00	3.00	1.00	0.51	Très forte

RC=0.07

L’agressivité climatique

L’énergie cinétique, déchargée par les pluies abondantes, est le déclencheur du phénomène érosif. L’agressivité destructrice des agrégats dépend de l’intensité de la pluie (ROOSE *et al.*, 2010). Plus les pluies sont excessives, plus le risque érosif est éminent (BOU KHEIR, 2001b). En ce qui concerne la mesure de l’intensité des précipitations, nous avons rencontré des difficultés pour la déterminer en raison de l’absence de mesure. Pour évaluer l’impact climatique sur les glissements de terrain et l’érosion hydrique, nous nous sommes servis des moyennes annuelles des pluviosités disponibles pour la période étalée de 1970 à 2005. Deux classes ont été distinguées : la moyenne et la forte sensibilité (Tableau 9). La quantité des précipitations atteint un maximum de 1250 mm, ce volume est susceptible de favoriser un risque important.

Tableau 9 : Calcul de la pondération du critère “précipitation”

Précipitation (mm)	832 - 1000	1000 - 1220	WI	Favorisation
850-1000	1.00	0.67	0.4	Moyenne
1000-1250	1.50	1.00	0.6	Forte

RC=0

La lithologie

La forêt de Bkassine se développe sur les affleurements géologiques du Crétacé inférieur et moyen. L’affleurement majeur est celui du grès de base (C1), très riche en fer et en lignite. Les falaises, qui contournent la forêt, sont constituées par des marno-calcaires de l’Aptien inférieur (C2a) et du calcaire compact de l’Aptien supérieur (C2b), surmonté de marnes vertes de l’Albien (C3) et de calcaires du Cénomaniens (C4). Des éboulis de pente (Eb) et des éboulements rocheux (Q) issus des falaises reposent sur le C1. Aucune faille ne traverse la forêt. Les petites failles présentes affectent le contact lithologique entre le C2a et le C2b. Quatre classes de sensibilité ont été définies (Tableau 10) :

- La classe à faible sensibilité, correspondant aux calcaires durs du Cénomaniens (C4) et de l’Aptien supérieur (C2b), occupe une superficie de 7% (88,4 ha).
- La classe de moyenne sensibilité englobant les calcaires marneux et les marnes argileuses de l’Aptien inférieur (C2a), et les marnes de l’Albien (C3), s’étale sur 11,3% (141,2 ha) de la superficie totale.
- La classe à forte sensibilité contient les dépôts du Quaternaire (Q) qui occupent 13,4% de la surface totale (168,5 ha).
- La classe à très forte sensibilité, regroupant les grès du (C1) et les zones de glissements de terrain, s’étend sur 68,4% (862,9 ha) du terrain d’étude.

Tableau 10 : Calcul de la pondération du critère "lithologie".

Lithologie	C2b - C4	C3	C2a	C1	Q - Eb	WI	Sensibilité
C2b - C4	1.00	0.67	0.67	0.17	0.25	0.07	Faible
C3	1.50	1.00	1.00	0.25	0.67	0.12	Moyenne
C2a	1.50	1.00	1.00	0.25	0.67	0.12	Moyenne
Q - Eb	4.00	1.50	1.50	0.33	1.00	0.20	Forte
C1	6.00	4.00	4.00	1.00	3.00	0.49	Très forte

CR=0.01

Réseau hydrographique

La forêt de Bkassine, est incisée par un réseau hydrographique peu dense à écoulement irrégulier parcourant les couches perméables et semi-perméables de l'Aptien (C2a et C2b), et sillonnant les couches semi-perméables du grès de base (C1). En amont, ce réseau culmine à 1200 m, alors que son talweg atteint 460 m d'altitude. La carte de l'ordre des cours d'eau a été déterminée à l'aide d'ArcGis 10.3 et à partir de l'«Outil Hydrologie» de l'extension «Spatial Analyst» selon la méthode de STRAHLER, 1957.

Tableau 11: Calcul de la pondération du critère "ordre du drainage".

Drainage	1	2	3	4	WI	Favorisation
1	1.00	0.67	0.50	0.25	0.12	Très faible
2	1.50	1.00	0.67	0.33	0.16	Faible
3	3.00	1.50	1.00	0.67	0.28	Moyenne
4	4.00	3.00	1.50	1.00	0.44	Forte

RC=0.04

RÉSULTATS

Le modèle appliqué dans la présente étude permet de déterminer les secteurs sensibles à la dégradation du sol. En se basant sur les classes de la sensibilité des facteurs les plus représentatifs des phénomènes érosifs (les pentes, la géologie, l'érodibilité du sol, le couvert végétal et l'agressivité climatique) et des glissements de terrain (la lithologie, la pente, l'occupation du sol, la quantité de pluies, le drainage et l'exposition des pentes), nous avons établi la carte de la sensibilité du sol à l'érosion et la carte de la susceptibilité aux glissements de terrain.

La combinaison des divers facteurs précités donne trois classes d'érosion (Figure 5) : la classe à faible sensibilité (0,2% de la superficie totale, soit 2,9 ha), la classe à sensibilité moyenne (50,7% de la superficie totale, soit 639 ha) et la classe à forte sensibilité (49,1 % de la superficie totale, soit 619,1 ha). Le sol fragile, le rôle de la pente et le couvert végétal qui fournit une faible protection du sol, font que le risque fort domine la région d'étude. Là où le couvert végétal assure une bonne protection au sol, le risque érosif devient modéré.

De même, trois classes sont issues de la carte de susceptibilité aux glissements de terrain (Figure 6) : la classe à risque faible qui occupe 7,8% de la superficie totale, la classe à risque moyen qui englobe la superficie majeure (85,5%) de la zone étudiée et la classe à risque fort qui s'étale sur 6,7% de la superficie totale. Les zones à risque fort se localisent aux bas des falaises qui contournent la forêt ainsi que sur les pentes raides des vallons.

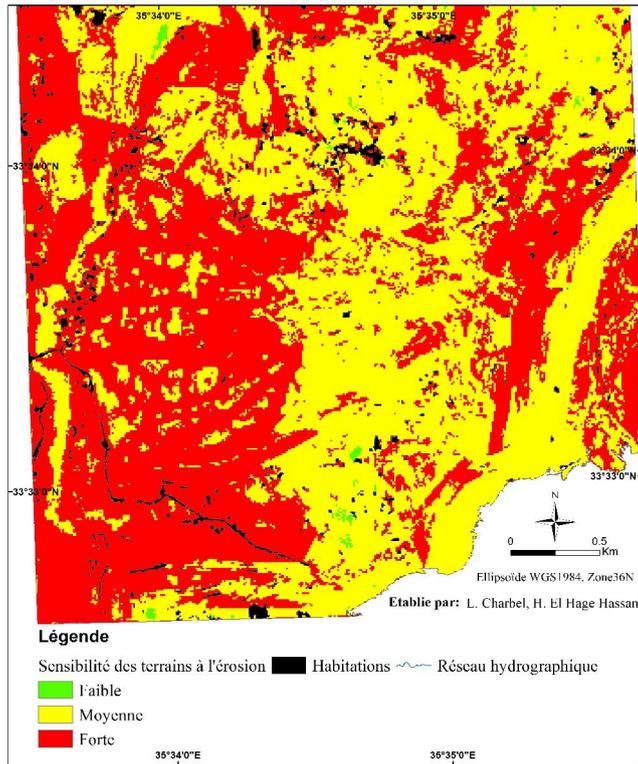


Figure 5 : Sensibilité des terres à l'érosion.

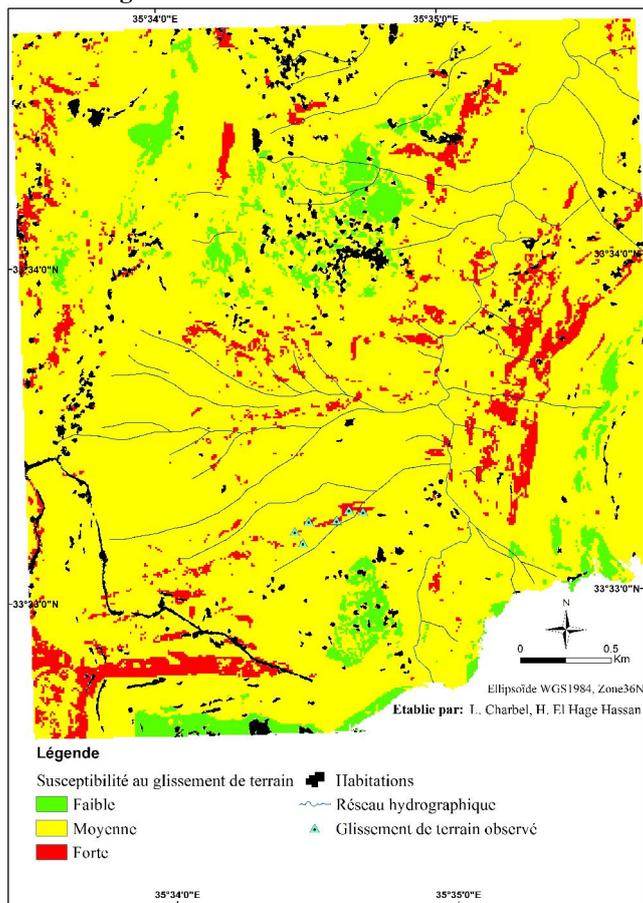


Figure 6 : Susceptibilité aux glissements de terrain.

VALIDATION DES RÉSULTATS

Plusieurs points ont été sélectionnés sur les cartes de synthèse qui couvrent les différentes classes d'aléa érosif et les secteurs susceptibles d'être affectés par le glissement de terrain afin d'effectuer une comparaison avec la réalité du terrain. Le taux d'exactitude a été évalué à environ 90%. Certaines vérifications ont été effectuées en utilisant une image satellitaire de haute résolution spatiale. Au Liban, plusieurs variables de terrain ont été déterminées pour estimer l'érosion hydrique des sols (BOU KHEIR, 2001a ; EL HAGE HASSAN *et al.*, 2015). Ces variables nous ont été nécessaires pour valider les cartes de synthèses.

- Les plages classées à un aléa fort ont été distinguées par des racines d'arbres exposées à l'air sur plus de 20 cm (Photo1), des ravines d'une surface de plus de 1,6 m² (Photo 2) et des glissements de sols de plus de 25 cm de profondeur (Photo 3).

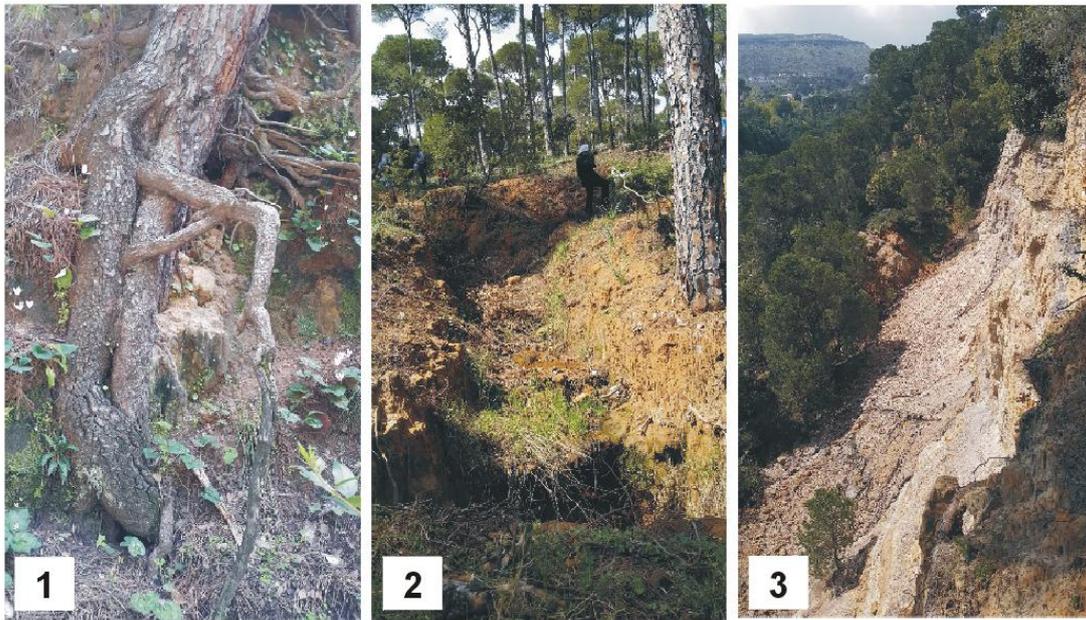


Photo 1 : Racines d'arbres exposées à l'air de plus de 20 cm.

Photo 2 : Ravin de surface de plus de 1,6 m².

Photo 3 : Zone affectée par un glissement de terrain.

- Les plages classées à un aléa moyen sont déterminées par des racines d'arbres exposées à l'air sur 5 à 20 cm, des glissements de sols de 10 à 25 cm de profondeur et 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 pédicules d'érosion de moins de 10 cm et des glissements de sols de moins de 10 cm de profondeur.

CONCLUSION

Cette étude propose une approche qualitative fondée sur trois concepts: la décomposition hiérarchique du problème traité en sous-problèmes, le classement des éléments selon leur importance relative et la cohérence logique des avis utilisés. Le poids identifié pour chaque critère est issu d'une formulation mathématique qui utilise une échelle de comparaison binaire. Le résultat obtenu est évalué par rapport à un indice de cohérence aléatoire. Les valeurs obtenues, inférieures à 0.1, ont permis de valider les matrices de comparaison. Grâce au système d'information géographique, nous avons pu cartographier l'aléa érosif et le mouvement du terrain d'une région semi-aride et topographiquement escarpée. D'après les principaux résultats de ce travail, les sensibilités moyennes et fortes couvrent, de façon cumulée, une surface importante de la région d'étude. Les classes à

moyenne sensibilité sont dominantes, selon les cartes d'aléa érosif et le glissement du terrain. La forte sensibilité, qui occupe la deuxième place, est due à la rigidité de la pente et au couvert végétal peu protecteur. La combinaison de plusieurs facteurs détermine les différentes sensibilités, mais le mode d'occupation du sol est le facteur prépondérant qui met en évidence le rôle de l'homme dans l'érosion. Dans cette région, notre étude peut contribuer à la préservation des sols en proposant des formations végétales plus couvrantes pour contrôler les pluies hivernales.

REMERCIEMENTS

Nous remercions LRI (Lebanon Reforestation Initiative - un projet financé par l'USAID et mis en œuvre par les programmes internationaux du Service des Forêts aux États-Unis (USFS)) pour leur soutien et pour le financement de ce projet.

BIBLIOGRAPHIE

- BOU KHEIR R., 2002 - Étude des risques d'érosion hydrique des sols par télédétection et SIG. Application à une région représentative du Liban. Thèse de Doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon, 262 p.
- BOU KHEIR R., GIRARD M.C., KHAWLE M. & ABDALLAH C., 2001a - Érosion hydrique des sols dans les milieux méditerranéens. *Études et Gestion des Sols*, 8, 4 : 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*, 2, 2 : 79-90.
- CORREIA, R. B., 2007 - Modelação cartográfica em ambiente SIG de suscetibilidade à erosão hídrica dos solos, caso da bacia da Ribeira dos Picos, Santiago (Cabo Verde). Tese de Mestrado. Universidade de Coimbra. 162 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. Édit. CNRS-Lebanon, Monograph Series 4, Liban, 367 p.
- DE NONI G., VIENNOT M., ASSELINE J. & TRUJILLO G., 2001 - Terres d'altitude, terres de risque. La lutte contre l'érosion dans les Andes équatoriennes. Éditions de l'IRD. 216p.
- DIRECTION DES AFFAIRES GEOGRAPHIQUES ET GEODESIQUES DE L'ARMEE LIBANAISE., 1962 - Carte topographique de Rachaya au 1/20000 (équidistance des courbes de niveau : 10 m).
- DUBERTRET L. & WETZEL R., 1951 - Carte géologique au 1/50000. Feuille de Jezzine au 50000e. Ministère des Travaux Publics, Beyrouth, avec notice (sous la direction de L. Dubertret).
- DUCHAUFOR P., 1970 - Précis de pédologie. Masson et Cie. 481p.
- DUMAS J., 1965 - Relation entre l'érodibilité des sols et leurs caractéristiques analytiques. *Cahiers ORSTOM*, série Pédologie, III, 4 : 307-333.
- 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 Bekaa (Liban). Exemple d'un secteur du Bekaa el Gharbi. Orléans: Université d'Orléans, Thèse de doctorat en géographie, 381 p.
- 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 Aaqoura , *Physio-Géo*, 9 –1 : 141-156.
- EL HAGE HASSAN H., TOUCHART L. ARDILLIER-CARRAS F & FAOUR G., 2016 - Lutte contre l'érosion et aménagement agricole dans la plaine de la Bekaa (Liban). *M@ppemonde*, n° 117. (2015.1).17p.
- 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 4^{ème} Congrès Geotunis* (Tunis, Tunisie), 16 p.
- EL HAGE HASSAN H., TOUCHART L. & FAOUR G., 2013 - La sensibilité potentielle du sol à l'érosion hydrique dans l'ouest de la Bekaa au Liban. *M@ppemonde*, n° 109 (2013-1), 17 p.
- FAO., 1983 - Garder la terre en vie : L'érosion des sols, ses causes et ses remèdes. *Bulletin pédologique*, 50. 62 p.
- FOURNIER F., 1967 - Les facteurs de l'érosion du sol par l'eau ; les recherches sur la conservation du sol en Afrique et Madagascar. *Sols africains*, XII, 1 :6-51.
- GAY, M., 1996 - Gestion régionale des sols et sensibilité à l'érosion. Laboratoire de télédétection et de cartographie numérique, École Supérieure de Purpan, Toulouse : 1-8
- LE BISSONNAIS Y., THORETTE J., BARDET C. & DAROUSSIN J., 2002 - L'érosion hydrique des sols en France. Rapport IFEN/INRA, 106 p.
- MALCZEWSKI, J., 1999 - GIS and Multicriteria Decision Analysis (New York: Wiley).
- NEBOIT R., 1991 - L'homme et l'érosion: l'érosion des sols dans le monde. 270 p.

- RAMOS A., CUNHA L. & CUNHA P.P., 2014 - Application de la Méthode de l'Analyse Multicritère Hiérarchique à l'étude des glissements de terrain dans la région littorale du centre du Portugal : Figueira da Foz – Nazaré. *Geo-Eco-Trop*, 38, 1: 33-44.
- REY F., BALLAIS J.-L., MARRE A & ROVÉRA G., 2004 «Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface. *Comptes Rendus Geoscience*, 336, 11 : 991-998.
- 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*, Rome (Italie), 70 : 420 p.
- 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*, 28, 2 : 289-308.
- ROOSE E. (ed.), SABIR M. (ed.), LAOUNA A. (ed.), BENCHAKROUN F. (collab.), AL KARKOURI J. (Collab.), LAURI P. (Collab.), QARRO M. (Collab.), 2010 - Gestion durable des eaux et des sols au Maroc : valorisation des techniques traditionnelles méditerranéennes : 47-78. ISBN 978-2-7099-1683-7
- SAATY, T. L., 1980 - The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority, Settings. Resource Allocation, McGraw-Hill, New York, NY. 287 p.
- SAATY, T. L. 2008 - Decision making with the analytic hierarchy process, *Int. J. Services Sciences*, 1 : 83-98
- SAVAT J. & DE PLOEY J., 1982 - Sheetwash and rill development by surface flow. Badland geomorphology and piping, Bryan R. and Yair a. (eds), Geobooks Norwich (Angleterre) : 113- 126.
- SABIR M., BARTHES B. & ROOSE E., 2004 - Recherche d'indicateurs des risques de ruissellement et d'érosion sur les principaux sols des montagnes méditerranéennes du Rif occidental (Maroc). *Sécheresse*, 15: 105-110.
- STRAHLER, A. N., 1957 - "Quantitative analysis of watershed geomorphology", *Transactions of the American Geophysical Union* 38 (6): 913–920, doi: 10.1029/tr038i006p00913.
- WISCHMEIER W.H. ET SMITH D.D., 1960 - A universal soil-loss estimating equation to guide conservation farm planning. Actes du 7th International Congress of Soil Science, I: 418-425.
- WISCHMEIER W.H., SMITH D., 1978 - Predicting rainfall erosion losses. A GUIDE TO CONSERVATION PLANING. Supersedes *Agriculture Handbook*, 282 : 66 p.