



HAL
open science

La sensibilité potentielle du sol à l'érosion hydrique dans l'ouest de la Bekaa au Liban

Hussein El Hage Hassan, Laurent Touchart, Ghaleb Faour

► To cite this version:

Hussein El Hage Hassan, Laurent Touchart, Ghaleb Faour. La sensibilité potentielle du sol à l'érosion hydrique dans l'ouest de la Bekaa au Liban. *M@ppemonde*, 2013, 109. hal-01962928

HAL Id: hal-01962928

<https://hal.science/hal-01962928>

Submitted on 14 Feb 2019

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.

La sensibilité potentielle du sol à l'érosion hydrique dans l'ouest de la Bekaa au Liban

Hussein El Hage Hassan, Laurent Touchart, Ghaleb Faour

*Université d'Orléans, Laboratoire CEDETE (EA 1210)
Centre national de télédétection, Liban*

Résumé.— Cet article étudie la sensibilité potentielle du sol à l'érosion hydrique, dans la Bekaa Ouest, à partir d'une approche qualitative qui permet de croiser, à l'aide d'un SIG, les données telles que : l'érodibilité et la battance du sol, le gradient de la pente et l'influence du couvert du sol à l'érosion. Le résultat de la cartographie identifie les secteurs menacés par l'érosion hydrique afin de les protéger. Les trois quarts du secteur étudié ont une sensibilité forte ou très forte. Il s'agit ici de montrer une méthode qui peut être appliquée à d'autres terrains.

Bekaa • Érosion • Liban • SIG

Abstract.— This article examines the potential sensitivity of the soil to water erosion in the West Bekaa from a qualitative approach. Using a GIS, it allows to cross data such as: the erodibility and crusting of the soil, slope gradient and soil cover influence on erosion. The result of the mapping allows to identify areas threatened by erosion in order to protect them. Three-quarters of the study area have a high or very high sensitivity. For us, it is to present a method that can be applied to other fields.

Bekaa • Erosion Lebanon • S.I.G.

Resumen.— Este artículo estudia la sensibilidad potencial del suelo a la erosión hídrica, en la Bekaa occidental, a partir de un enfoque cualitativo. Permite cruzar, con la ayuda de un SIG, datos tales como: la erosionabilidad y la nivelación del suelo, el gradiente de la pendiente y la influencia de la cobertura del suelo a la erosión. El resultado de la cartografía permite identificar los sectores amenazados por la erosión hídrica con el fin de protegerlos. Los tres cuartos del sector estudiado tienen una sensibilidad fuerte o muy fuerte. Para nosotros se trata de mostrar un método que se pueda aplicar sobre otros terrenos.

Bekaa • Erosión • Líbano • S.I.G.

L'érosion des sols est l'une des formes de dégradation des terres arables qui se traduit par l'enlèvement de particules minérales et organiques. L'agent de l'ablation peut être le vent ou l'eau. Dans ce dernier cas, l'érosion hydrique dépend de caractères actifs (intensité des précipitations, etc.) et passifs (texture du sol, couverture végétale, valeur de pente, etc.). En termes de risque, les caractères actifs peuvent être assimilés à l'aléa et les caractères passifs à une partie de la vulnérabilité qu'il est possible de regrouper sous l'appellation de sensibilité à l'érosion. L'enjeu est particulièrement important dans les régions agricoles du Proche-Orient. Les caractères semi-arides de la marge orientale du climat méditerranéen, la présence ou la proximité de la montagne et des piémonts, les pratiques culturelles concourent

à placer au centre des préoccupations de développement rural la question de l'érosion des terres arables. De nouvelles études géodynamiques peuvent-elles aider à une meilleure gestion des productions agricoles par la connaissance accrue des potentialités du sol, voire à la reconquête raisonnée de terres abandonnées dans ces régions ?

Pour tenter de répondre à ces questions, il convient d'apprécier les méthodes déjà éprouvées dans divers endroits du monde, dont certaines ont des approches qualitatives en lien avec des travaux d'expertise (De Ploey *et al.*, 1989 ; Le Bissonnais *et al.*, 1998), d'autres quantitatives (USLE, 1958 ; LAVSED, 1985 ; Silsoe, 1982 ; MEDALUS, 1995 ; SEMMED, 1997 ; PESERA, 2003). Dans le cas du Liban et, plus précisément de la Bekaa, la démarche quantitative, pourtant nécessaire, est freinée par le manque de données climatiques, ce qui ne permet pas d'effectuer des recherches concernant l'intensité des précipitations, leur énergie cinétique et leur érosivité. Un travail plus approfondi sur la sensibilité à l'érosion s'impose alors d'autant plus.

Il s'agira d'abord de présenter le terrain d'étude : une portion de la dépression de la Bekaa et des versants encadrants. La méthodologie sera ensuite développée en faisant ressortir son originalité par rapport aux démarches existantes. Puis l'estimation de la sensibilité potentielle du sol à l'érosion hydrique sera présentée sous forme de résultats spatialisés, avant d'être discutée.

1. Choix du terrain

Notre choix s'est porté sur un pays de la Méditerranée orientale, le Liban, dans la mesure où l'agriculture y tient encore une grande place, y compris dans des secteurs de marge climatique semi-désertique.

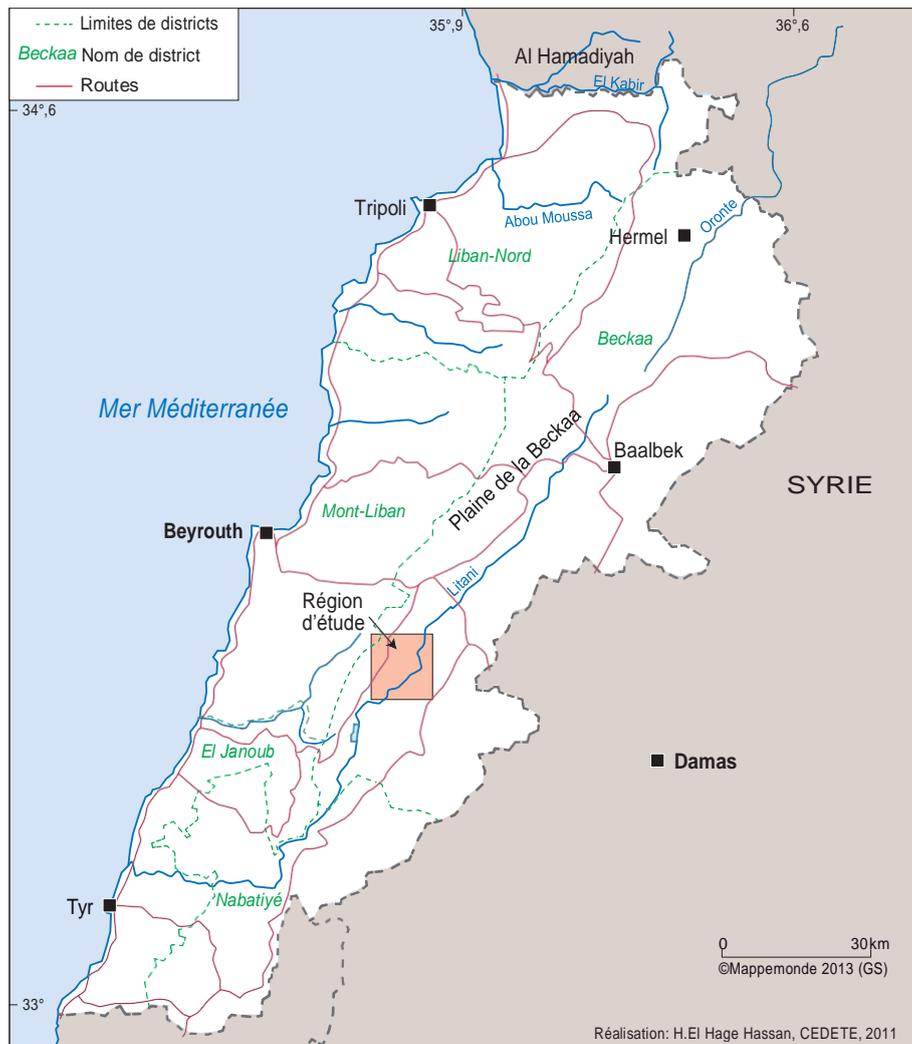
Nous avons étudié une zone de la Bekaa ouest, d'une surface de 136 km², située entre 35°N et 33°E (fig. 1). À l'intérieur de cette région, nous nous sommes intéressés à des secteurs de plus petite taille pour lesquels nous disposons d'informations plus abondantes. Cette dépression s'insère entre les chaînes occidentales (Mont-Liban) et orientales (Anti-Liban). À ses extrémités nord et sud, l'altitude peut varier entre 500 et 900 m, offrant ainsi un paysage légèrement vallonné, sous un climat à tendance sèche.

Cette région intérieure présente deux types d'unités géomorpho-dynamiques :

- les versants du Mont-Liban et de l'Anti-Liban à forte valeur de pente, à lithologie différenciée et affleurante dans certains endroits du fait de l'érosion hydrique, aux sols peu profonds, à la végétation clairsemée, avec des chenaux d'écoulement, qui posent des problèmes sur les parcelles agricoles ;
- la plaine caractérisée par sa platitude, par l'épaisseur des sols et l'absence d'affleurement géologique, et surtout par l'agriculture.

À l'échelle locale, il s'agit de distinguer les types d'érosion dans un système « naturel » de montagne, de ceux d'un agro-système.

En dépit de sa petite taille, la région étudiée est parfaitement représentative de l'évolution observée dans la plus grande partie de la Bekaa (climat, fonctionnement socio-économique...).



1. Localisation de la région d'étude

2. Méthodologie

Walter H. Wischmeier et Dwight David Smith (1978) ont été les premiers à proposer l'équation universelle des pertes en sol (USLE). Karl Auerswald (1987) a proposé une version révisée en introduisant le facteur K (érodabilité du sol) dans l'équation USLE. Plusieurs améliorations ont été apportées à l'application de cette équation universelle (El-Swaify, Dangler, 1977 ; Roose, Sarrailh, 1989 ; Renard *et al.*, 1997). Bien que l'équation USLE soit largement utilisée dans le monde scientifique, son application nécessite des paramètres de calibration qui ne sont pas disponibles pour la région orientale de la Méditerranée. Pour cela plusieurs études ont été menées afin de convertir le modèle quantitatif d'USLE en modèle qualitatif, en intégrant les différents facteurs d'érosion dans un SIG (PAP/RAC, 2004). Le résultat de ces modèles est une carte de risque d'érosion dont les unités spatiales sont réparties en plusieurs classes, du plus faible au plus fort. Cette carte du risque érosif constitue un outil d'aide à la décision en permettant la localisation des zones prioritaires et la proposition de scénarios d'intervention.

L'approche utilisée pour la cartographie de l'aléa « érosion » est une évaluation qui s'appuie sur la pondération de chaque facteur avant d'effectuer leur superposition. La différence globale entre tous les modèles qualitatifs utilisant l'approche SIG est dans

la pondération des différents facteurs. Les facteurs et leurs pondérations sont choisis à partir de plusieurs expériences effectuées dans la région d'étude, permettant ainsi d'établir une méthode commune.

Au Liban, plusieurs projets ont été menés dans la région côtière et dans la plaine de la Bekaa. Ils ont permis aux experts locaux, notamment les chercheurs du CNRS libanais, de valider la méthodologie utilisée dans leurs publications (FAO, UNEP, 1997 ; Bou Kheir, 2001 ; PAP/RAC, 2004). Le modèle proposé s'appuie sur la méthodologie développée par la FAO et l'UNEP dans le cadre du plan d'action pour la Méditerranée. Cette méthodologie a été adaptée par le CNRS libanais. Un travail de terrain poussé a été effectué dans deux bassins versants représentatifs. La précision a été estimée à environ 80 %.

Les modèles fondés sur l'expertise sont nombreux. Conçus en fonction de la disponibilité des bases de données, ils offrent une simplicité dans la lecture des résultats. Mais certains problèmes peuvent être rencontrés lors de leur application. La classification des données entraîne une perte d'information et les résultats d'analyse vont fortement dépendre du nombre de classes utilisées (Van der Knijff *et al.*, 2000). Un autre problème est l'estimation des pondérations qui peuvent varier selon les experts consultés (Cerdan *et al.*, 2006).

En revanche, les approches quantitatives essaient de relier de façon rigoureuse des paramètres mesurables à des phénomènes physiques (Cerdan *et al.*, 2006). Mais ces modèles, coûteux, exigent un grand nombre de données qui ne sont pas toujours disponibles.

Malheureusement, l'absence de données sur l'intensité des précipitations nous a empêchés d'étudier l'aléa de l'érosion du sol dans la région. En revanche, certaines études (Bou Kheir, 2001, 2002) déterminent le risque de l'érosivité de la pluie par rapport à la quantité des précipitations. Nous notons que la totalité de la région d'étude est soumise à la même valeur de précipitations, variant entre 600 et 700 mm.

Nous avons ainsi étudié la sensibilité potentielle du sol à l'érosion hydrique, en adoptant l'approche qualitative établie par les chercheurs du CNRS libanais :

- a) identification des facteurs qui interviennent dans l'érosion hydrique en fonction de la disponibilité des données : couverture ou mode d'occupation du sol, sol et pente ;
- b) évaluation de la favorisation ou de la sensibilité de chaque facteur à l'érosion hydrique. Pour chacun de ces paramètres, une reclassification des données a été réalisée sous forme d'un indicateur de sensibilité ou de favorisation à l'érosion (**tableau 1**) : très faible, faible, moyenne, forte ou très forte. Le but de cette évaluation consiste à donner une valeur chiffrée pour chaque classe, ce qui nous a permis, à l'aide d'un SIG, de produire les diverses cartes thématiques qui correspondent à ces classes chiffrées ;

1. Classification suivant la contribution à l'érosion hydrique	
Classe	Sensibilité ou favorisation
1	Très faible
2	Faible
3	Moyen
4	Fort
5	Très fort

c) application du modèle qualitatif qui combine les cartes thématiques précitées :

**(Classes de la sensibilité du sol *50 + classes de la favorisation de la pente *50) *50
+ (classes de la favorisation du couvert du sol)*50.**

Ces pondérations respectives ont été définies et discutées par des chercheurs du CNRS libanais (G. Faour, T. Darwish) et font référence à des études précédentes (Morgan, 1986 ; Luken, Krone, 1989 ; Bou Kheir, 2001). La couverture du sol joue le rôle le plus important. L'efficacité d'une averse dépend du degré de protection que le couvert végétal peut assurer pour préserver le sol (Neboit, 1991). Cela nous a conduits à augmenter les coefficients du rôle du couvert du sol jusqu'à 50 %. Les valeurs résultant du calcul précédent contiennent des nombres décimaux qui varient entre 1 et 5 ;

d) réalisation de la carte de la sensibilité potentielle du sol à l'érosion à partir des valeurs résultantes citées ci-dessus : 1= très faible, 2= faible, 3= moyen, 4= fort, 5= très fort. Le modèle utilisé est qualitatif et adapté aux particularités locales. Il permet d'estimer la probabilité d'arrachement et de transport des particules solides, issues elles-mêmes de l'interaction de divers facteurs de l'érosion les plus représentatifs. Il nous apparaît comme un moyen d'aide à la décision : il permet de localiser les secteurs menacés par l'érosion, afin de les protéger. De plus, il contribue à la simulation de l'impact du changement du mode d'occupation sur l'érosion des sols.

3. Traitement des données

Le processus de l'érosion du sol est affecté par des facteurs naturels et humains. Les facteurs physiques ont été définis à la suite de discussions avec des pédologues et des agronomes spécialisés, ainsi qu'en fonction de la disponibilité des données. Ces facteurs sont les suivants :

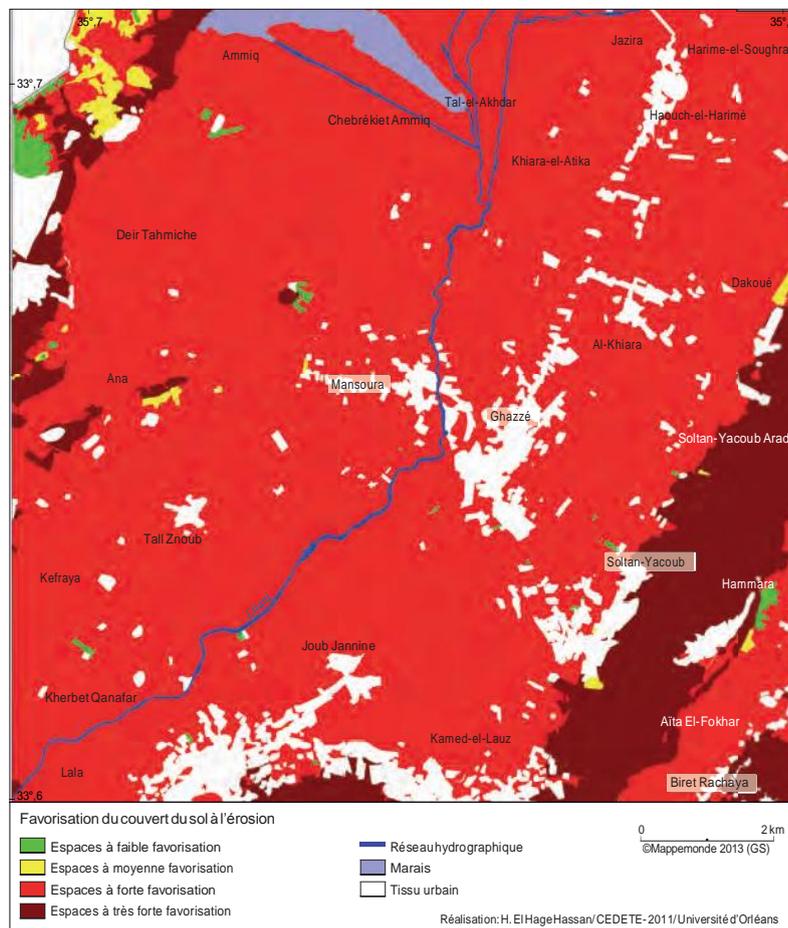
- la couverture du sol — ou mode d'occupation du sol (c'est-à-dire la relation de l'homme avec son environnement, Bou Kheir, 2002) — étudiée à partir d'une image satellite Ikonos prise en août 2005 à l'échelle du 1/20 000^e ;
- le sol, à partir de la carte des sols de Rachaya au 1/50 000^e, publiée par le CNRS libanais ;
- la pente a été extraite du modèle numérique de terrain d'une précision de 10 m.

3.1. L'influence du couvert végétal sur l'érosion

Le couvert du sol est considéré comme efficace contre l'érosion lorsqu'il absorbe l'énergie cinétique des gouttes de pluie (Roose, 1994 ; Duchaufour, 1970), « qui détache les particules du sol » (Kayser, 1957), et protège le sol, surtout dans la période de l'année où les précipitations sont les plus intenses. Cela signifie que l'efficacité du couvert végétal contre l'érosion hydrique n'est pas toujours la même (Duchaufour, 1970). On distingue des secteurs qui ont un couvert végétal toute l'année, des secteurs où les cultures laissent les sols à nu pendant plusieurs mois et des secteurs où les cultures assurent une protection dense et régulière tout au long de l'année.

La couverture du sol cultivé facilite ou réduit l'érosion hydrique, selon différents critères physiologiques (enracinement, type de feuillage, écartement des plants) ou selon des critères phénologiques (durée de la pousse), ainsi que selon des critères agronomiques (date des semis et des récoltes, sarclage, désherbage, type de labours).

Le couvert végétal a été divisé en quatre classes selon qu'il favorise ou non l'érosion (fig. 2). Cette classification a été établie en fonction de la densité et de la durée de vie du couvert végétal. Le couvert du sol, ou le mode d'occupation du sol, est un élément variable qui dépend de plusieurs facteurs, parmi lesquels les facteurs socio-économiques, qui sont des indicateurs de poids de l'activité humaine dans la favorisation ou la limitation du risque érosif.



2. L'influence du couvert végétal sur l'érosion hydrique

En reprenant tous ces critères, nous avons proposé la classification suivante :

- **Classe n° 1** : le couvert végétal est complet toute l'année. Cette classe, considérée comme peu favorable à l'érosion hydrique, correspond aux forêts denses (pins, chênes) qui couvrent environ 90 % du sol et ne subissent aucune modification physiologique durant l'automne et l'hiver, périodes où l'intensité des précipitations est la plus forte. Ce couvert végétal protège le sol, en limitant l'impact des gouttes de pluie (Bou Kheir, 2002).

Les forêts jouent le rôle d'un écran protégeant le sol contre l'intensité des précipitations et permettant de réduire le décapage des horizons superficiels du sol (Veyret *et al.*, 2002). Dans les forêts denses (pins, chênes), où le sol est protégé toute l'année, la sensibilité à l'érosion et le ruissellement sont faibles (Neboit, 1991 ; Veyret, 1998), à l'exception de certains endroits où la pente est forte.

- **Classe n° 2** : elle est moyennement favorable à l'érosion hydrique. Elle correspond aux végétations qui couvrent entre 65 % et 90 % du sol comme les forêts claires et les surfaces boisées peu denses, n'assurant pas une protection complète du sol.

- **Classe n° 3** : elle favorise fortement l'érosion hydrique. Elle correspond aux arboricultures et aux vergers (Roose *et al.*, 1993 ; Bou Kheir, 2002), qui n'assurent qu'une faible couverture du sol, selon l'espacement des arbres. Seules les branches permettent de réduire l'impact des précipitations. La chute des feuilles au moment où les pluies sont les plus fortes, à l'automne et en hiver, favorise le ruissellement. Les céréales (blé, orge) et les cultures maraîchères jouent un grand rôle dans la protection du sol, mais seulement durant une certaine période. Si les semailles ont lieu à la fin de l'automne, le couvert végétal, peu dense, ne protège pas complètement le sol contre l'impact et l'effet d'éclaboussure des gouttes de pluie les plus agressives de l'année (décembre et janvier). Si c'est en avril, le sol reste à nu pendant l'hiver, ce qui favorise l'érosion hydrique.

Les cultures maraîchères (pommes de terre), plantées à partir d'avril pour une récolte l'été, ne constituent pas un couvert protecteur durant les mois d'hiver. La rotation agricole permet certes une meilleure préservation du sol, à condition que les semailles soient faites en automne et qu'elles soient suivies de cultures maraîchères. Cela permet de couvrir le sol pour une durée plus longue, notamment durant les mois les plus pluvieux. Le blé, plutôt couvrant, peut être classé parmi les cultures à sensibilité moyenne. Mais les travaux de terrain nous ont montré que les agriculteurs de la plaine de la Bekaa pratiquent rarement la rotation, et une partie des terrains reste à nu pendant l'hiver ; ainsi quand les précipitations dépassent un certain seuil on constate l'inondation des parcelles et la formation des croûtes de battance.

Quant aux vergers et aux vignobles (fig. 3) qui perdent leurs feuilles en automne, ils ne forment pas un couvert protecteur du sol contre l'érosion hydrique, et les gouttes attaquent directement le sol, favorisant ainsi la naissance des saillies. Nous avons considéré le sol couvert par des vergers, comme un sol à forte sensibilité à l'érosion hydrique et à la battance.



3. Les vignobles dans la région de Kefraya (cliché: H. El Hage Hassan, avril 2009)

- **Classe n° 4** : elle représente la végétation herbacée. Mais cette végétation ne pousse que du mois d'avril jusqu'au début de l'automne, le sol restant presque nu pendant les mois les plus pluvieux de l'année, de décembre à mars. Ainsi, nous avons considéré les végétations herbacées comme très favorables à l'érosion hydrique.

3.2. Le rôle de la pente

La complexité du relief favorise l'érosion, ce qui nous a amenés à utiliser le facteur gradient de pente. Celui-ci a été extrait du modèle numérique de terrain d'une précision de 10 m.

La longueur de la pente n'est pas considérée comme importante dans les régions méditerranéennes (Roose, 1994 ; Bou Kheir, 2002). Anne-Véronique Auzet (1987) a

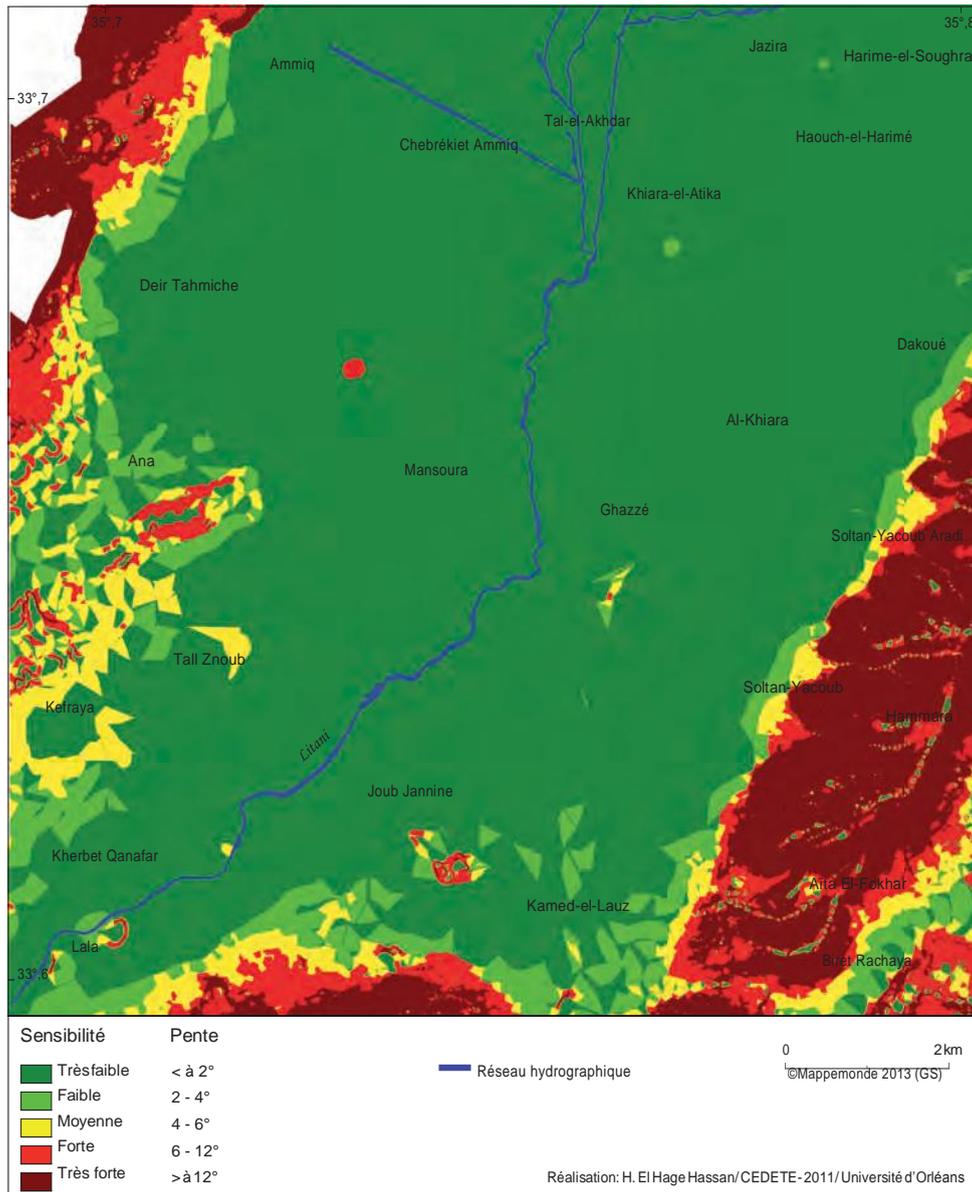
même écrit que « l'influence de la longueur de pente est probablement nulle en l'absence de ruissellement et lorsque le splash est le processus actif ». L'inclinaison de la pente est certes le facteur déterminant dans l'apparition des rigoles (Savat, De Ploey, 1982), mais ce facteur varie en fonction de la texture du sol (Maurer, 1968). Après avoir pris l'avis de plusieurs chercheurs et experts (1), nous nous sommes référés à Denis Baize (2000) et à l'étude de l'érosion hydrique des sols en France effectuée par Yves Le Bissonnais, Jacques Thorette, Cécile Bardet et Joël Daroussin (2002) ainsi qu'à Éric Roose (1973) qui a étudié l'érosion (t/ha/an) et le ruissellement 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. Les conditions climatiques ne sont certes pas les mêmes mais cela donne une idée quant à la classification des pentes. Nous avons divisé les pentes en cinq classes, selon la façon dont elles sont susceptibles de favoriser ou non l'érosion hydrique (El Hage Hassan *et al.*, 2009) (tableau 2). Nous avons tenu compte du contexte méditerranéen, de la répartition saisonnière des précipitations, de la durée de la période sèche (3 mois au moins en été), et d'une période pluvieuse en automne-hiver qui atteint son apogée au mois de janvier, ce qui favorise l'érosion hydrique des sols.

2. Les classes des pentes			
Classe	Pente en pourcentage	Sensibilité à l'érosion	Pourcentage de la Surface générale
1	< 3.5%	Très faible	72%
2	3.5 - 7%	Faible	7%
3	7 – 10.5%	Moyenne	6%
4	10.5 – 21%	Forte	4%
5	> 21%	Très forte	11%

À partir de cette classification, nous avons établi la carte de la sensibilité de la pente à l'érosion hydrique (fig. 4) qui montre que 72 % de la région d'étude sont plats, avec une pente inférieure à 2°. L'effet de la pente sur la sensibilité à l'érosion hydrique des sols est donc très faible pour une grande partie de la région, ce qui ne signifie pas l'absence de la sensibilité à la battance. En effet, il se peut que « l'érosion se [produise] sur les faibles pentes lors de certains événements pluvieux » (Penven *et al.*, 2000) .

Ainsi, lorsque l'on fait des observations précises sur le terrain, on peut noter localement des plages affectées par l'érosion aréolaire qui cause la dégradation et la diminution de l'épaisseur du sol et laisse la roche à nu sur de vastes surfaces (fig. 5).

Des mesures de protection sont à prendre pour sauver les versants, concaves dans la région d'étude, pour lutter contre le transport des particules solides, causé par l'énergie des eaux de pluie, et leur dépôt sur les parcelles agricoles. En fait, les modifications des pratiques culturales et l'arrachage des haies peuvent provoquer le ruissellement et l'érosion du sol même sur une pente très faible (Veyret, 2003).



4. L'érodibilité du sol de la région d'étude



5. L'érosion hydrique causée par une pente raide et un sol peu profond à Deir Tahmiche (cliché : H. El Hage Hassan, avril 2009)

3.3. La sensibilité du sol à l'érosion

Pour l'étude du sol, les deux facteurs pris en compte sont la battance (2) et l'érodibilité (3). Ces deux facteurs ont été estimés à partir des données pédologiques : la texture, le taux de matière organique et la profondeur.

La sensibilité du sol à l'érosion hydrique dépend de ces facteurs (Ryan, 1982 ; Roose *et al.*, 1993). La texture fine du sol empêche l'infiltration de l'eau et permet le déclenchement du ruissellement. Cela ne signifie pas que la texture fine est plus sensible à l'arrachement que la texture moyenne (fig. 6). Les sols riches en matière organique subissent moins l'érosion hydrique (Roose, 1994). En effet, la matière organique améliore la structure du sol et, en permettant l'association des agrégats du sol, augmente la porosité (Bou Kheir, 2002). Elle joue le rôle de ciment qui maintient la structure du sol et le rend, par conséquent, plus perméable (Duchaufour, 1970 ; Neboit, 1991) à l'eau et plus résistant au choc des gouttes de pluie. De même, un sol profond a une forte résistance à l'érosion, à l'inverse des sols superficiels (Ryan, 1982).

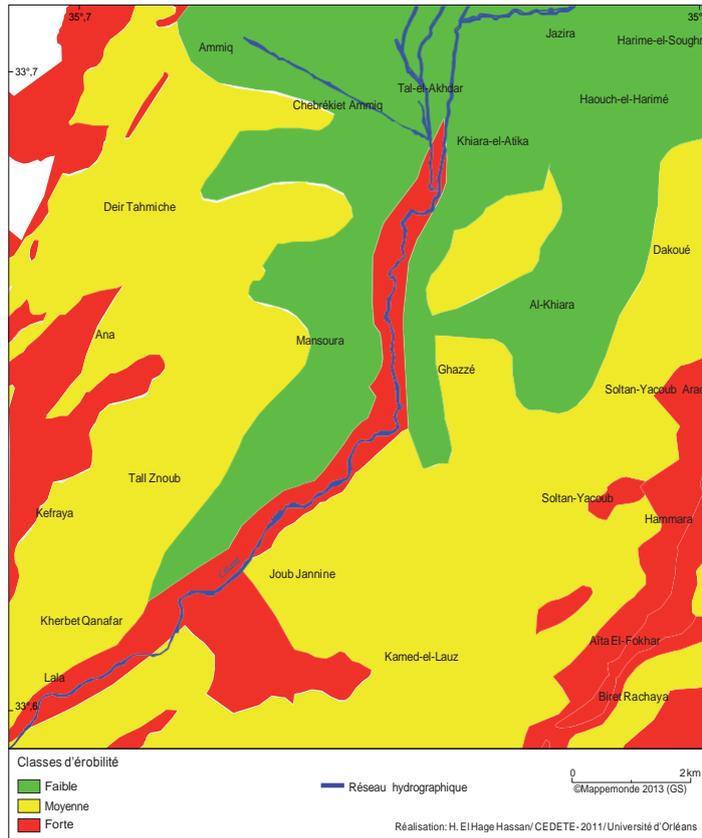


6. État d'un sol limoneux nu après une faible pluie à Lala (cliché : H. El Hage Hassan, avril 2009)

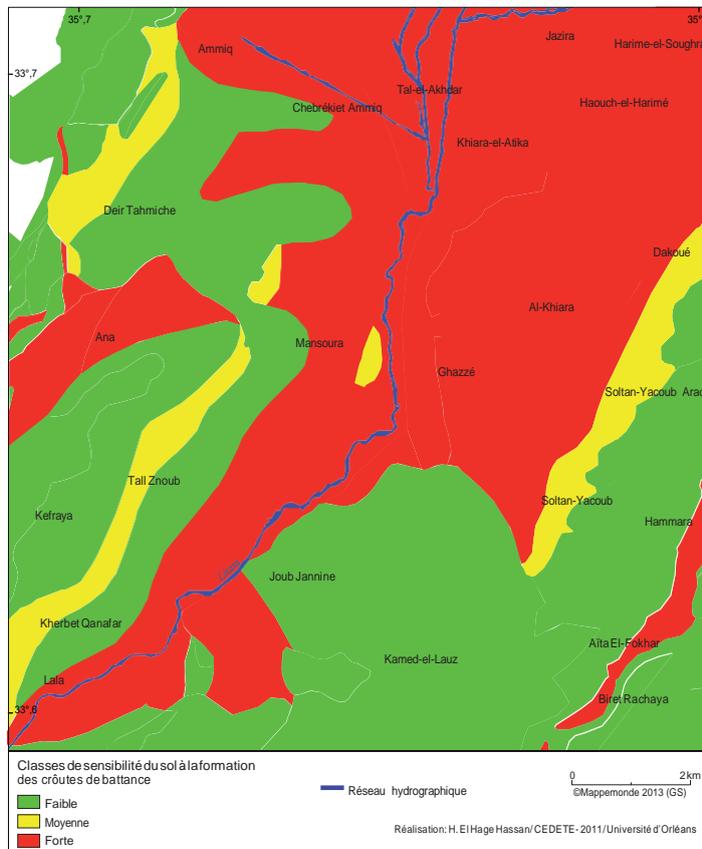
Pour connaître ces paramètres, nous nous sommes servi des analyses d'échantillons réalisées sur plusieurs profils de sol dans la région d'étude par la FAO (1969), par les pédologues du CNRSL (Darwish *et al.*, 2006), par Rania Bou Kheir qui a travaillé dans une bande géographique qui va de la côte jusqu'à la plaine de la Bekaa et par des agronomes du CNRSL (M. Abou Daher, T. Masri) et de l'Institut national des recherches agronomiques du Liban (S. Haj Hassan).

Le classement des sols selon l'érodibilité et la battance a été mené en collaboration avec Bernard Valadas. Plusieurs éléments ont été retenus : la texture (40 %), la teneur en matière organique (40 %) et la profondeur (20 %) pour estimer l'érodibilité des sols (Bou Kheir, 2001) ; la texture (50 %) et la teneur en matière organique (50 %) pour estimer la sensibilité à la battance. Ces éléments ont donné un poids majoritaire à la texture et à la matière organique, pour évaluer la sensibilité du sol à l'érosion hydrique (Bou Kheir, 2001).

Ce résultat a été vérifié par certains chercheurs du CNRSL. Ces derniers ont déjà travaillé sur l'érosion du sol au Liban et ont fait référence à différents travaux (Fanning, Fanning, 1989 ; Finke *et al.*, 1998 ; Lamouroux, 1972 ; Darwich, Zurayk, 1997 ; FAO, 1977). Pour ces chercheurs, la stabilité de la structure qui détermine la sensibilité du sol à l'érosion hydrique dépend de la matière organique et de la texture (Bou Kheir *et al.*, 2001). Une dernière vérification a été faite, par comparaison avec des profils de sols analysés dans la région d'étude par le CNRSL en 2006. Cela nous a permis d'établir la carte d'érodibilité (fig. 7) et celle de la battance (fig. 8) et de répartir les sols en fonction de leur sensibilité à l'érosion hydrique en trois classes : faible, moyenne et forte.



7. L'érodibilité de la région d'étude



8. La battance du sol dans la région d'étude

4. L'estimation de la sensibilité potentielle à l'érosion hydrique

Le modèle adopté est composé de deux parties, avec un poids identique : une partie regroupe le sol et la pente ; une autre partie correspond à la couverture du sol. Le couvert végétal joue le rôle le plus important. Selon la densité du couvert végétal, l'érosion hydrique est plus ou moins intense (Browning, 1948 cité par Bou Kheir, 2002).

**(Classe de la sensibilité du sol *50 + classe de la favorisation de la pente *50) *50
+ (classe de la favorisation du couvert du sol)*50**

À partir de ce modèle, nous avons étudié :

- la sensibilité potentielle des versants à l'érosion en croisant les classes d'érodibilité des sols, les classes de la favorisation de la pente et les classes de la favorisation du couvert végétal ;
- la sensibilité potentielle à l'érosion des champs de grandes cultures, pour les surfaces où les pentes sont inférieures à 4°, surtout l'érosion automnale et hivernale par concentration du ruissellement. Les facteurs principaux qui déterminent ce type de sensibilité sont la sensibilité à la battance et l'absence d'un couvert végétal protecteur pendant les mois d'automne et d'hiver.

Le résultat du croisement, en ce qui concerne les versants avoisinant les 3000 hectares, dénote l'absence de la faible sensibilité. Ce sont 6 % de cette surface qui sont classés en moyenne sensibilité, là où la pente est forte, mais où le couvert végétal assure une protection contre l'intensité des précipitations. De plus, nous pouvons remarquer que la sensibilité moyenne est également présente sur les terrasses agricoles bien entretenues. Cela aide à limiter la sensibilité à l'érosion.

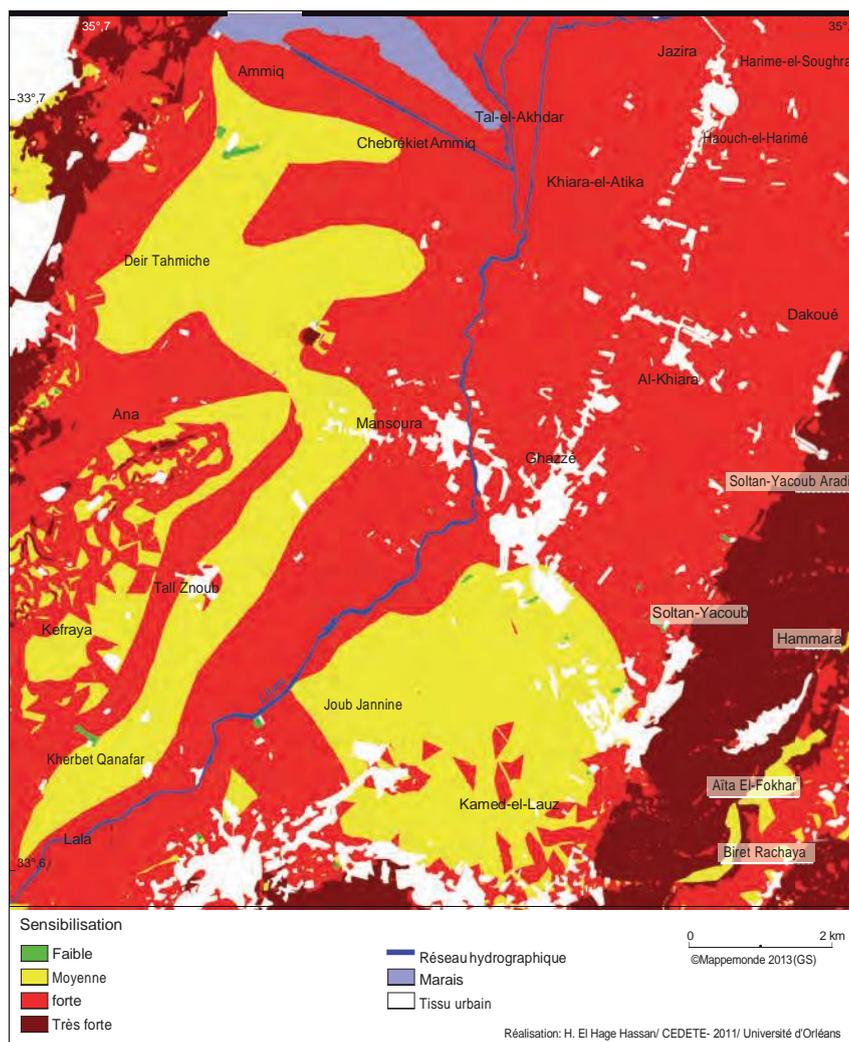
La combinaison des divers facteurs précités fait que la forte sensibilité couvre 23,7 % de la surface. Le sol fragile, le rôle de la pente qui varie entre moyennement favorable et très favorable à l'érosion et le couvert végétal, qui assure une faible protection du sol, sont la cause de cette forte sensibilité.

Enfin, l'absence d'un couvert végétal protecteur du sol, ou la présence d'un couvert peu dense, surtout pendant l'hiver, font que le sol subira directement les précipitations, ce qui augmente la sensibilité potentielle à l'érosion. À cela s'ajoutent la pente forte et la présence d'un sol superficiel. La combinaison de tous ces facteurs fait que la surface à très forte sensibilité domine sur 70 % de la surface totale des versants.

À partir de la combinaison des classes de la sensibilité à la battance du sol, avec les classes de la favorisation de la pente et les classes de la favorisation du couvert végétal, et en appliquant le modèle précité, nous avons pu estimer la sensibilité potentielle à l'érosion des champs de grandes cultures. Sur une surface qui avoisine les 10 600 hectares, nous constatons l'absence des classes de faible sensibilité (à l'exception de quelques hectares) et de très forte sensibilité. La forte sensibilité domine 70,5 % de la surface étudiée en raison principalement de la texture du sol dans ces endroits. La place de la sensibilité moyenne, qui couvrent 29 %, s'explique par l'absence de couvert végétal pendant les mois les plus pluvieux de l'année.

Au total, nous constatons à partir de la carte de la sensibilité potentielle de la région d'étude (échelle de l'ordre du 1/50 000), que la forte sensibilité à l'érosion est dominante dans la région d'étude, puisqu'elle couvre 63 % (fig. 9), suivie par la sensibilité moyenne qui couvre 24 % de la surface totale. Ces pourcentages touchent majoritairement les secteurs sensibles à la formation des croûtes de battance. La sensibilité très forte, qui couvre 12 % de notre région, se localise sur les fortes pentes.

Ce pourcentage touche les secteurs sensibles à l'érodibilité. Quant à la sensibilité faible, sa présence est très modérée, elle ne dépasse pas les 0,2 % de la surface générale.



9. La sensibilité potentielle de la région d'étude à l'érosion

Conclusion

La partie étudiée de la plaine de la Bekaa présente, d'après les principaux résultats de nos travaux, une forte sensibilité à l'érosion, notamment à cause de la pente, pour ce qui est des versants, et à cause du couvert végétal pour les parties basses exploitées par l'agriculture. Plus précisément, en termes de classes, les sensibilités fortes et très fortes couvrent, de façon cumulée, les trois quarts de la région d'étude. Les premières proviennent avant tout de la battance, les secondes de l'érodibilité. Certes, la combinaison de plusieurs facteurs détermine les différentes sensibilités, mais le mode d'occupation du sol est le facteur dominant, qui met en évidence le rôle de l'homme dans l'érosion. Dans cette région, notre étude pourrait aider à une meilleure préservation des sols en proposant des formations végétales plus couvrantes pendant les pluies hivernales. Les céréales à semences d'automne pourraient ainsi voir leur part augmenter.

Notre travail pourrait être généralisé à l'ensemble de la plaine de la Bekaa ; le modèle que nous avons suivi, tout en le spatialisant et en l'adaptant aux particularités locales, poursuit d'ailleurs l'approche du CNRS libanais, qui l'avait conçu sous cette

forme qualitative. Au-delà, l'avantage de cette méthode est son caractère rapide et peu coûteux, qui convient aux pays en difficulté. Il nous a semblé adapté au Liban, au vu de sa situation économique, et politique.

L'application complète d'un modèle quantitatif exigerait, elle, beaucoup de temps et de moyens, mais pourrait être envisagée, en particulier en ajoutant des études en stations afin de mesurer les pertes de sol causées par l'érosion hydrique.

Bibliographie

- 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. http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/geo_0003-4010_1987_num_96_537_20627. doi: 10.3406/geo.1987.20627
- BAIZE D. (2000). *Guide des analyses en pédologie*. Paris : INRA, coll. « Techniques et pratiques », 267 p. ISBN: 978-2-7592-0221-8
- BOU KHEIR R., GIRARD M. C., SHABAN A., KHAWLE M., FAOUR G., DARWISH T. (2001) « 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. <http://www.teledetection.net/upload/TELEDETECTION/pdf/20030107144618.pdf>
- BOU KHEIR R. (2002). *Étude des risques d'érosion hydrique des sols par télédétection et SIG. Application à une région représentative du Liban*. Paris : Institut national agronomique Paris-Grignon, thèse de doctorat en sciences biologiques fondamentales et appliquées, 262 p.
- CERDAN O., LE BISSONNAIS Y., SOUCHERE V., KING C., ANTONI 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, 85 p. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-55104-FR.pdf>
- 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. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816296000379>. doi: 10.1016/S0341-8162(96)00037-9
- DARWISH T., KHAWLIE 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*. 367 p. Liban : CNRS-Lebanon, Monograph Series 4
- DE PLOEY J., AUZET A.-V., SALA M. (1989). « Soil erosion map of western Europe ». Cremlingen-Destedt (Allemagne de l'Ouest), Lawrence (Kansas) : Catena Verlag, carte en coul., 60 x 84 cm.
- DUCHAUFOUR P. (1970). *Précis de pédologie*. Paris : Masson, 481 p.
- 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 2009. <http://www.geotunis.org/2009/file/communication%20%20de%20geotunis%20009-hussein%20hage%20hassen%282%29.pdf>
- 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-SWAIFY S.A., DANGLER E.W. (1977). « Erodibilities of selected tropical soils in relation to structural and hydrologic parameters ». In FOSTER G.R., dir., *Soil Erosion: Prediction and Control Proceedings of the National Conference on Soil Erosion, mai 1976, West Lafayette, Indiana*. Ankeny (Iowa) : Soil Conservation Society of America, coll. « Soil Conservation Society of America.; Special publication - Soil Conservation Society of America, 393 p.
- FAO (1977). « Cadre pour l'évaluation des sols ». *Bulletin pédologique de la FAO*, n° 32, 64 p. ISBN: 92-5-200111-5. <http://www.fao.org/docrep/003/X6084F/x6084f00.htm>
- 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), 72 p. ISBN : 953-6429-08-X. <http://www.pap-thecoastcentre.org/pdfs/SoilErosioneng.pdf>
- FANNING D., FANNING M.C. (1989). *Soil. Morphology, genesis and classification*. New York : Wiley, 395 p. ISBN : 0-471-89248-3
- FINKE P., HARTWICH R., DUDAL R., IBANEZ J., JAMAGNE M., KING D., MONTANARELLA L., YASSOGLOU N. (1998). *Georeferenced soil database for Europe*. Italy : Manual of procedures, European Soil Bureau, 170 p. Version 1.0.
- KAYSER B. (1957). « Problèmes de l'érosion du sol ». *Annales de Géographie*, vol. 66, n° 355, p. 255-257.
http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/geo_00034010_1957_num_66_35_5_18280
- LAMOUREUX 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 », 266 p.
http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_2/memoires/05457.pdf
- LE BISSONNAIS Y., MONTIER C., DAROUSSIN J., KING D., MOREL B. (1998). *Cartographie de l'aléa Érosion des sols en France*. INRA, 77 p. ISBN 2-911089-17-0.
- LE BISSONNAIS Y., THORETTE J., BARDET C., DAROUSSIN J. (2002). *L'érosion hydrique des sols en France*. Rapport IFEN/INRA, 106 p.
http://erosion.orleans.inra.fr/rapport2002/Download/erosion_hydrique_2002.pdf
- LUKEN H., KRONE F. (1989). « Calcareous soils of Cyprus: five years erosion measurements (1981-1986) ». *Pedology, hydrochemistry and non metallic mineral resources*, vol. 5, 17 p.
- MAURER G. (1968). *Les Montagnes du Rif central : étude géomorphologique*. Paris : Université de Paris, Faculté des lettres, thèse de doctorat en lettres, 499 p.
- MORGAN R. (1986). *Soil erosion and conservation*. Harlow : Longman Scientific & Technical, 298 p. ISBN : 0-582-30158-0
- NEBOIT R. (1991). *L'Homme et l'érosion: l'érosion des sols dans le monde*. Clermont-Ferrand : Association des publications de la faculté des lettres, coll. « Publications de la Faculté des lettres de Clermont », 269 p. ISBN : 2-84516-062-3
- PAP/RAC (2004). *Improving Coastal Land Degradation Monitoring in Lebanon and Country Report : Syria*. Split : Priority Actions Programme, 165 p. ISBN : 953-

- 6429-52-7. <http://www.pap-thecoastcentre.org/pdfs/CoLD%20SYRIA%20-%20Country%20Report.pdf>
- PENVEN M.-J., MUXART T., COSANDY C., ANDRIEU A. (2000). *Contribution du drainage agricole enterré à l'érosion des sols en région tempérée (Brie)*. ORSTOM, vol. 20, 17 p. <http://www.beep.ird.fr/collect/bre/index/assoc/HASH7227.dir/20-128-144.pdf>
- 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. <http://www.techtransfer.osmre.gov/nttmainsite/Library/hbmanual/rusle/ah703toc.pdf>
- 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, 125 p. http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_6/b_fdi_37-38/01828.pdf
- ROOSE E. (1994). Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Rome : FAO, coll. « Bulletin pédologique de la FAO, n° 70 », 420 p. ISBN : 92-5-203451-X
- 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. http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/cahiers/PTP/10009097.PDF
- 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, 23 p. Paru en français : «Érodibilité de quelques sols tropicaux Vingt années de mesure en parcelles d'érosion sous pluies naturelles». *Cahiers ORSTOM, série Pedologie*, vol. 25, n° 1-2, p. 7-30. http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/cahiers/PTP/30456.PDF
- RYAN J. (1982). A perspective on soil erosion and conservation in Lebanon. Beyrouth : American University of Beirut, « Publication » n° 69, 68 p..
- SAVAT DE PLOEY J. (1982). « Sheetwash and rill development by surface flow ». In BRYAN R., YAIR A., dir. *Badland Geomorphology and Piping*. Norwich (Angleterre) : Geo Books, 408 p. ISBN : 0-86094-114-0
- 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, 38 p. http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/pesera/pesera_cd/pdf/ereurnew2.pdf
- VEYRET Y. (2003). *La France. Milieux physiques et environnement*. Paris : Armand Colin, coll. « Cours. Série Géographie », 192 p. ISBN : 2-200-26584-0
- VEYRET Y., dir. (1998). *L'Érosion entre nature et société*. Paris : SEDES, coll. « DIEM Dossiers des images économiques du monde », 344 p. ISBN 2-7181-9189-9

- VEYRET Y., VIGNEAU J.J, DUBOIS J.J., KERGOMARD C., LAGEAT Y., MIOSSEC A. (2002). *Géographie physique. Milieux et environnement dans le système terre*. Paris : Armand Colin, coll. « U. Série Géographie », 368 p. ISBN : 2-200-25236-6
- WISCHMEIR W.H., SMITH D. (1978). « Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning ». *Agriculture Handbook*, n° 537, 58 p.
<http://naldc.nal.usda.gov/download/CAT79706928/PDF>

Notes

1. Ghaleb Faour, directeur du département de la télédétection au Conseil national de la recherche scientifique.
2. La sensibilité des sols à la fermeture de la porosité, formant une croûte superficielle qui réduit l'infiltration l'eau.
3. La sensibilité d'un sol à l'arrachement et au transport des particules.

Adresses des auteurs

Hussein El Hage Hassan, Université d'Orléans, Laboratoire CEDETE (EA 1210). Courriel : hussein.el-hage-hassan@univ-orleans.fr

Laurent Touchart, Université d'Orléans, Laboratoire CEDETE (EA 1210). Courriel : laurent.touchart@univ-orleans.fr

Ghaleb Faour, Centre national de télédétection, Conseil national de la recherche scientifique, Liban. Courriel : gfaour@cnrs.edu.lb