

PRISE EN COMPTE DES GLISSEMENTS DE TERRAIN DANS LA QUANTIFICATION DES PERTES EN SOLS DANS LE BASSIN VERSANT NAKHLA (TELEDETECTION ET SIG)

**Lahsen AÏT BRAHIM^{*}, Faïçal SOSSEY ALAOUI^{*}, Houda SITERI^{*}, Ikram
EL HAMDOUNI^{*}, Mostafa TAHRI^{**}, Bouamar BAGHDAD^{***}**

^{*} Université Mohammed V, Faculté des Sciences de Rabat, Département des Sciences de la Terre, Avenue Ibn Battouta B.P. 1014 Agdal, Rabat, MAROC ; Tel/Fax : +212 37 77 19 57 ;
e-mail: aitbrahi@challa.fsr.ac.ma

^{**} Direct. Planification des Aff. Econ, Avenue Hassan II Km 4, station DEBBAGH ; Rabat

^{***} Inst. Agron. et Véter. Hassan II, Département des Sciences du Sol, Rabat-Riad; MAROC

RESUME

L'objectif de cette étude réside dans la quantification de l'érosion dans le bassin versant Nakhla, par l'intégration de l'équation universelle de pertes en sols de Wischmeier dans un Système d'Information Géographique ; puis, par la prise en considération des glissements de terrains pour évaluer le taux de sédimentation dans le barrage. Nous avons pu ainsi; d'une part, évaluer les pertes en sol annuelles au niveau du bassin versant Nakhla et d'autre part, identifier et cartographier les surfaces des terres arables nécessitant la plus grande priorité d'intervention pour la protection du sol afin de réduire les apports solides au niveau de la retenue du barrage.

L'analyse des résultats nous a permis à l'aide du modèle USLE d'évaluer la dégradation spécifique moyenne pondérée à 38.7 t/ha/an qui avec un ratio de sédimentation d'environ 14%, livre à l'exutoire une quantité de sédiment moyenne de 5.6 t/ha/an. Cette dernière a été ajustée à 16.5 t/ha/an par le calcul de la quantité de sédiments délivrée par les glissements de terrain plus particulièrement par sapement de berges lors des périodes de crues. Ceci peut être expliqué éventuellement par le fait que le modèle USLE est plus particulièrement adapté pour l'érosion en nappe et en rigoles à l'échelle de la parcelle. En plus le secteur d'étude se trouve dans une région montagneuse (la chaîne rifaine) qui présente des pentes fortes, une pluviométrie intense et des argiles de mauvaise qualité géotechnique qui arrive très vite à saturation occasionnant un nombre important de glissements de terrains.

Mots clés : Maroc, Rif, Télédétection, Erosion, Glissement de terrain, SIG, USLE, Bathymétrie, Quantification

ABSTRACT

The aim of this study lies in the quantification of erosion in Nkhla watershed, by the integration of the Wischmeier's Universal Soil Loss Equation in a Geographical Information System; coupled to the landslides study in order to evaluate the rate of sedimentation at the outlet. The average specific degradation in the Nakhla watershed is 38.7 t/ha/year and with a sedimentation ratio of 14.5 %, the quantity of the sediment which is delivered at the outlet is the 5.6 t/ha/year. This later value considered too small in comparison with the bathymetry value (18.18 t/ha/year), was corrected to 16.5 t/ha/year by the study of landslides that occur during 1989-1999. This can be explained by the fact that the Universal Soil Loss Equation of Wischmeier is designed for the rill and sheet erosion and not for the debris flows, which are caused by landslides, frequently met in the Rif mountains.

Keywords : Morocco, Rif, Remote Sensing, Erosion, Landslide, GIS, USLE, Bathymetry,

INTRODUCTION

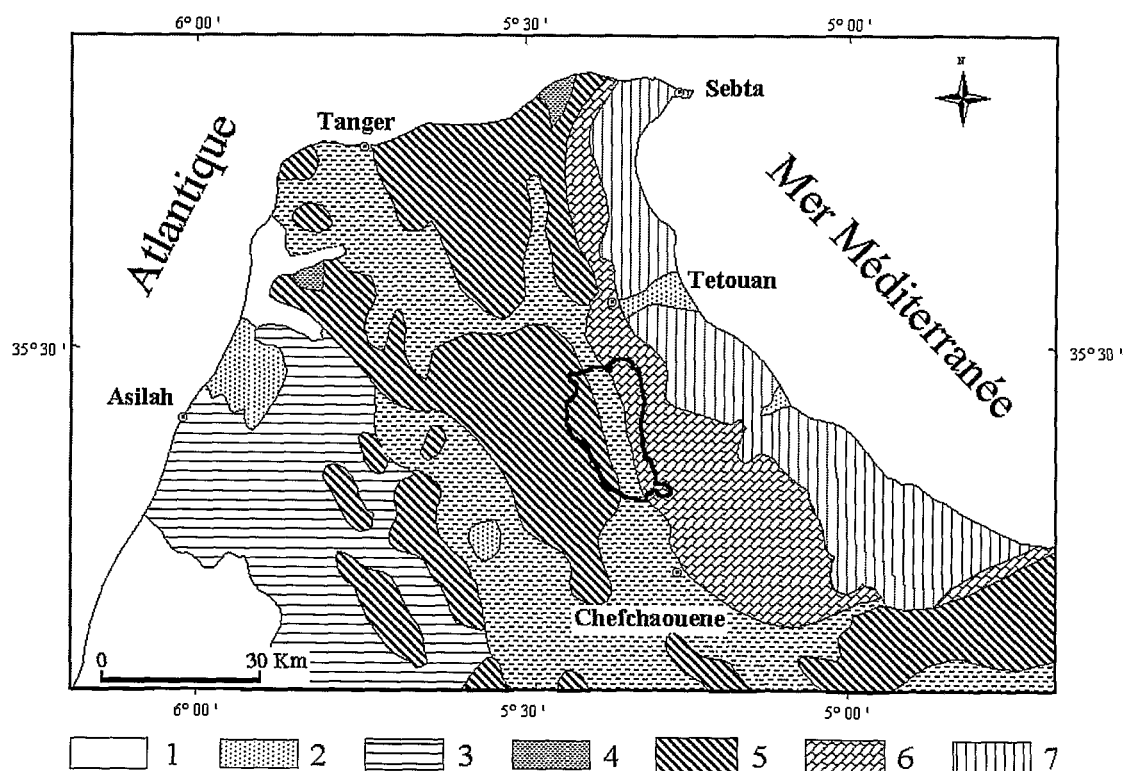
Le Rif marocain est très connu non seulement par ses instabilités de terrains (El Gharbaoui, 1981 ; Aït Brahim, 1991) et sa sismicité (Aït Brahim, 1991 ; Tadili, 1991), mais aussi par ses phénomènes d'érosion (Heush, 1970 ; Arnoldus, 1977) du fait de la forte agressivité climatique et anthropique sur des terrains dont la lithologie et le relief prêtent à accentuer ces phénomènes d'érosion.

Dans le Rif, les bassins versants représentent le meilleur reflet de l'érosion hydrique. Ils sont caractérisés par des relations fonctionnelles très étroites entre les différentes entités physiques du bassin (Tayaa, 1994 ; Moukchane, 1999). La zone amont connaît une dénudation et un appauvrissement de la partie arable des sols, alors que la partie aval souffre d'un surplus hydrique entraînant des inondations et par conséquent un apport sédimentaire important. Suite à cette dégradation, l'ensemble du bassin versant perd de sa capacité d'infiltration et d'emménagement de l'eau. Le réseau de drainage devient alors surchargé par un grand volume d'eau augmentant ainsi l'effet érosif des cours d'eau et par conséquent, le taux d'envasement des réservoirs.

L'objectif de ce travail est de quantifier d'une part l'érosion hydrique pour mettre en évidence les tranches de terres perdues en tonne par hectare et par an (t/ha/an) au niveau du bassin versant Nakhla; et d'autre part, de compléter les résultats obtenus par l'étude des glissements de terrains ayant affectés le secteur d'étude durant la décennie 1989-1999.

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Le Bassin versant Nakhla est situé dans la partie Nord-Ouest de la chaîne Rifaine à une vingtaine de kilomètres au Sud de la ville de Tétouan (Fig. 1). Il couvre une superficie de 11171 hectares pour 80 000 habitants et présente un relief très accidenté avec des dénivelées atteignant les 1600 m par endroits.



- 1- Quaternaire. 2- Néogène. 3- Préif. 4- Nappes de Flyschs. 5- Unité de Tanger.
6- Dorsale calcaire. 7- Nappes paléozoïques du domaine interne.

Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude

Les données climatologiques (Tayaa, 1994) montrent que la zone d'étude est caractérisée par un climat méditerranéen à deux saisons : une saison sèche allant du mois de juin à septembre et une saison pluvieuse allant de septembre à mars. La région de Nakhla est classée selon le diagramme d'Emberger dans l'étage bioclimatique sub-humide à humide.

Les sols du bassin Nakhla, sont caractérisés par une distribution spatiale très complexe liée à la lithologie, à la topographie et à la végétation. L'étude pédologique effectuée (Naïmi et Bouabid, 1997), révèle quatre classes de sols dominantes à savoir : les sols minéraux bruts, les sols peu évolués, les sols calcimagnésiques et les sols à sesquioxydes de fer ou de manganèse.

MATERIEL ET METHODE

Données utilisées

- Carte topographique au 1/50 000 feuille de Larbaâ Beni Hassan;
- Photographies aériennes au 1/20 000 (1986) et au 1/40 000 (1990);
- Carte pédologique au 1/50 000 du bassin Nakhla (Naïmi et Babid, 1997)
- Carte lithologique au 1/50 000 du bassin Nakhla (Tayaa, 1994)
- Image SPOT XS 2B (033-279) datant du 30/07/93
- Précipitations et températures enregistrées dans les stations du Barrage Nakhla de Jbel Timezzouk et de Larbaâ Beni Hassan sur des durées respectives de 1971-95, 1980-95 et 1983-95 (Tayaa, 1994)
- Composition granulométrique des unités pédologiques (Naïmi et Bouabid, 1997);

Méthodologie

La présente étude s'appuie sur l'application de l'Equation Universelle de Pertes en Sol (USLE) établie par Wischmeier en 1976.

La moyenne annuelle de pertes en sols (A) est calculée comme suit : $A=R*K*LS*C*P$ et est déterminée à partir du produit des cinq facteurs suivants:

- Le facteur d'agressivité des précipitations (R). La formule la plus adaptée pour les régions marocaines est celle développée par Heusch en 1970 et qui prend en considération les précipitations moyennes annuelles P et les précipitations maximales en 24 h pour une période de retour de 20 ans (P_{24}) et s'écrit sous la forme: $R = 143 \log (P * P_{24} * 10^{-6}) + 89,7$
- Le facteur d'érodabilité des sols en t/ha/an (K) est calculé à partir de la formule de Barril (1988) : $1000 K = 2,1 * 10^{-4} (12 - \%MO) * M^{1,4} + 3,25(S - 2) + 2,5 (P - 3)$, avec : MO = Matière Organique ; M = (%Sables Fins + %Limons)*(100 - %Argiles) ; S = Code pour la structure du sol (USDA, 1951) ; P = Classe de perméabilité (en mm/h) (USDA, 1951).

L'érodabilité des sols ainsi déterminée ne prenant en considération que les éléments fins (fraction < 2 mm), il a fallu donc apporter des corrections qui puissent tenir compte de la présence ou non des éléments grossiers dont la fraction est > à 2 mm. La formule suivante développée par l'USDA en 1980 permet alors de réduire la susceptibilité à l'érosion :

$K_a = K * (0,983 - 0,0189X + 0,0000973X^2)$, avec : K_a = Erodabilité ajustée et X = pourcentage des éléments grossiers (> 2 mm) en surface du sol

- Le facteur caractérisant l'effet du relief (LS). Pour calculer les deux composantes du facteur topographique à savoir la longueur de pente (L) et le degré de pente (S), on a du

établir un Modèle Numérique d'Altitude (MNA) généré à partir de la numérisation des courbes de niveau et des points cotés de la carte topographique au 1/50 000.

D'après Wischmeier & Smith (1978), le facteur topographique est obtenu comme suit :

$LS = (L/22,15)^m * (65,41\sin^2S + 4,56 \sin S + 0,065)$, où : L = longueur de la pente (en m) ; S = degré de la pente ; m =0.5 pour S>5% ; m =0.4 pour 3.5<S<4.5% ; m =0.3 pour 1<S<3% ; m =0.2 pour S<1%.

- Le facteur du couvert végétal (C). Dans l'équation universelle de pertes en sol, l'action de la végétation traduite par le facteur C (sans dimension) constitue le paramètre le plus déterminant et le plus dynamique pour les bassins versants Marocains (Renard et al. in Dahman, 1994). En effet l'occupation du sol est très instable suite aux multiples interventions climatiques et anthropiques.

Pour la cartographie de ce facteur, nous avons eu recours dans un premier temps à une image SPOT XS orthoréctifiée et rehaussée radiométriquement pour la cartographie de l'occupation du sol. Une première classification multispectrale n'a pas donné de résultats satisfaisants car nous avons eu des pourcentages très élevés dans le chevauchement des signatures spectrales. Ce qui nous a poussé à décorrélérer les canaux et à intégrer le MNA aux données images de telle sorte que l'on puisse tenir compte de la distribution des réponses spectrales des différents végétaux aussi bien en fonction des canaux optiques qu'en fonction de l'altitude.

L'application de cette méthode, nous a permis de passer d'une classification ayant une précision de l'ordre de 67 % à une précision avoisinant les 91 %.

- Le facteur (P) des pratiques culturales antiérosives (caractérisant l'effet des pratiques culturales sur le taux de l'érosion par aménagements antiérosifs), a été considéré équivalent à 1, puisque ces dernières sont absentes dans ce secteur.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Calcul de l'agressivité des précipitations (R)

Stations	P (mm)	P24 (mm)	Facteur R
Barrage Nakhla	804	88.8	204
Jbel Timezzouk	772	148.8	266
Béni Hassan	659	88.8	192

Tableau 1: Valeurs du facteur R pour le bassin versant Nakhla

Calcul du facteur de l'érodabilité des sols (Ka)

Pour cela, nous avons eu recours à la carte pédologique du bassin Nakhla et aux résultats de l'analyse granulométrique effectuée sur chaque type de sol (Naïmi et Bouabid, 1997). Les résultats sont donnés par le (Tableau 2)

Caractéristiques des unités pédologiques	Erodabilité (K)	% en éléments grossiers	Erodabilité ajustée (Ka)
Sols Minéraux bruts non climatiques, squelettique, affleurement rocheux continu.	0.018	-	0.018
Sols Minéraux bruts non climatiques, squelettique, affleurement en pitons.	0.037	-	0.037
Sols Minéraux bruts non climatiques, très peu profonds, affleurement des marnes et flyschs.	0.154	47.2	0.047
Sols Peu évolués humifères, très peu profonds à texture limono-argileuse.	0.849	53.3	0.214
Sols Peu évolués non climatiques, peu profonds à moyennement profonds, texture sableuse à sablo-limoneuse et caillouteux.	0.136	61.0	0.026
Sols Peu évolués non climatiques, moyennement profonds à texture limoneuse.	0.154	47.2	0.047
Complexes de sols Peu évolués d'érosion régosoliques et des sols fersiallitiques sur matériaux gréseux.	0.395	37.4	0.163
Sols Peu évolués non climatiques peu profonds, argileux à argilo-limoneux, caillouteux.	0.420	37.4	0.173
Sols Peu évolués non climatiques moyennement profonds à profonds, limono-argileux.	0.137	-	0.137
Sols Peu évolués non climatiques moyennement profonds à profonds, graveleux et caillouteux à texture limono-argilo-sableuse.	0.120	-	0.120
Sols à sesquioxydes de Fer ou de Manganèse, fersiallitiques, moyennement profonds à profonds, limono-sableux à argilo-sableux, peu graveleux et peu caillouteux.	0.137	-	0.137
Sols à sesquioxydes de Fer ou de Manganèse, fersiallitiques, très profonds, sableux, peu graveleux et peu caillouteux.	0.264	97.9	0.017
Sols Calcimagnésiques carbonatés, très peu profonds à texture limono-argileuse.	0.137	-	0.137
Complexe de sols Peu évolués d'érosion régosoliques et de sols calcimagnésiques sur marnes et flyschs calcaires.	0.106	47.2	0.033
Complexe de sols Minéraux bruts d'érosion Lithosols et de sols calcimagnésiques sur calcaire dur massif et calcaire dolomitique.	0.054	56.0	0.012
Sols à sesquioxydes de Fer ou de Manganèse, fersiallitiques, peu à moyennement profonds, texture limono-argileuse.	0.371	-	0.371

Sols à sesquioxydes de Fer ou de Manganèse, fersiallitiques, moyennement profonds, sableux et peu caillouteux.	0.297	70.0	0.041
Complexe de sols Minéraux bruts d'érosion Lithosols et de sols fersiallitiques sur calcaire dur massif et calcaire dolomitique.	0.036	56.0	0.008
Complexe de sols Peu évolués humifères et sols Peu évolués d'érosion régosoliques sur matériaux gréseux.	0.634	45.3	0.207
Complexe de sols Peu évolués humifères, de sols Peu évolués d'érosion régosoliques et de sols fersiallitiques sur matériaux gréseux.	0.540	45.3	0.176

Tableau 2: Erodabilité (K) et érodabilité ajustée (Ka) des sols

Calcul des facteurs du couvert végétal (C) et des pratiques culturales (P)

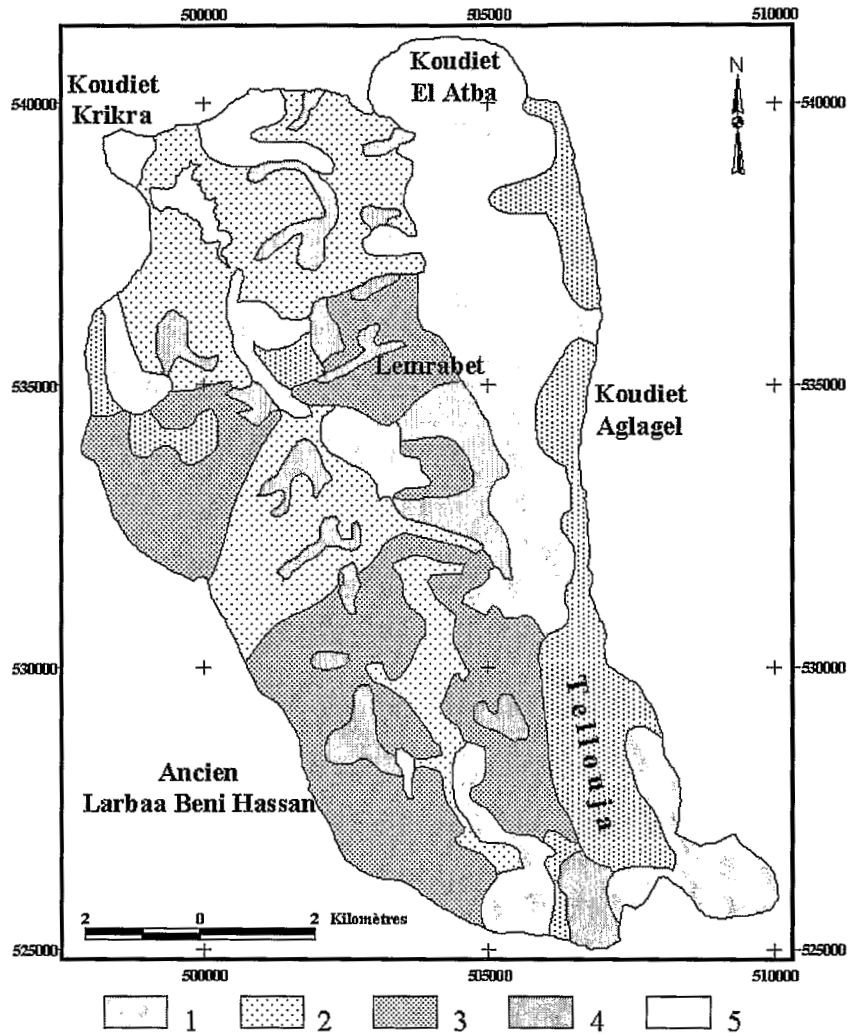
Une fois que la carte de l'occupation des sols a été produite à partir de l'imagerie Spot XS, on a procédé au codage de chaque type d'occupation par le facteur C lui correspondant. Pour cela, on s'est référé aux résultats de Kalman (1967) obtenus pour le Maroc et dont les résultats sont donnés par le (Tableau 3) :

Type de Culture	Indice C	Superficie (ha)	Superficie (%)
Matorral dense	0.11	1326.3	11.9
Matorral moyennement dense	0.15	4401.4	39.4
Matorral clair	0.20	1012.6	9.1
Terrains de culture	0.60	2936.0	26.3
Terrains incultes	0.70	1405.0	12.6

Tableau 3 : Valeurs de l'indice C pour le bassin versant Nakhla

Calcul des pertes en sols

Après avoir calculé et spatialisé les différents facteurs de l'Equation Universelle de Pertes en Sols. La dégradation spécifique ainsi que les pertes en sols estimées en t/ha/an sont alors calculées (Fig. 2) par superposition multiplicative dans un SIG.



1- Inférieur à 10 t/ha/an, 2- de 10 à 50 t/ha/an, 3- de 50 à 100 t/ha/an,
 4- Plus de 100 t/ha/an, 5- Retenue du barrage Nakhla

Figure 2 : Carte d'évaluation des pertes en sols dans le bassin versant Nakhla

Les tableaux suivants illustrent les résultats de pertes en sol en utilisant dans un premier temps l'indice K (Tableau 4) et dans un deuxième temps l'indice Ka (Tableau 5). Et afin de réduire le nombre de classes, les données sont regroupées en 4 classes de pertes en sol. Chose qui nous permettra de délimiter les zones critiques les plus érodables nécessitant une intervention antiérosive.

Classes (t/ha/an)	Superficie (ha)	Superficie (%)	Pertes correspondantes (t/an)	% des pertes	Classes
0-10	4521.9	40.5	22609.6	18.7	Faible
10-50	3094.5	27.7	92834.4	7.7	Assez forte
50-100	1458.8	13.0	72940.0	6.0	Forte
>100	2095.8	18.8	878123.4	67.6	Très forte
Total	11171	100	1066507.4	100	

Tableau 4 : Répartition de la dégradation spécifique des sols dans le bassin Nakhla

Classes (t/ha/an)	Superficie (ha)	Superficie (%)	Pertes (t/an)	% des pertes	Classes
0-10	5944.5	53.2	29722.6	6.9	Faible
10-50	3619.3	32.4	108577.2	25.2	Assez forte
50-100	1028.4	9.2	51422.0	11.8	Forte
>100	578.8	5.2	242500.4	56.1	Très forte
Total	11171	100	432222.2	100	

Tableau 5 : Répartition des pertes en sol dans le bassin Nakhla en utilisant l'indice Ka

L'analyse des résultats obtenus nous a permis d'évaluer la dégradation spécifique moyenne pondérée dans le bassin versant Nakhla en utilisant le K et le Ka respectivement à 95,5 et à 38,7 t/ha/an. Cette dernière est très voisine des résultats obtenus par la méthode du ^{137}Cs (Mokhchane, 1999) et qui est de l'ordre de 39,6 t/ha/an, pour seulement une superficie de 8383 ha. Ce qui peut être expliqué par le fait que la méthode du ^{137}Cs ne prend pas en considération les apports dus aux glissements de terrains (au sens large) et surtout aux sapements de berges très fréquents dans le bassin versant Nakhla (Fig. 3).

Au niveau de la carte des pertes en sols, les zones d'érosion sont localisées dans les secteurs à pentes fortes (comprises entre 12 et 40 degrés pour des altitudes allant de 300 à 800 m); là où le réseau hydrographique est dense (excepté au niveau de Koudiet El Atba, qui est une zone à forêt dense). Ces zones d'érosion sont situées essentiellement au niveau des terres cultivées, constituées par des sols peu évolués et calcimagnésiques recouvrant l'Unité de Tanger.

Le taux de perte en sols calculé au niveau du bassin se limite à la quantité de sédiments détachés. Or, seulement une partie de ces pertes arrive à la retenue du barrage et contribue à son envasement. La quantité de sédiments transportée jusqu'au barrage (Tableau 6) sera déduite alors à partir du taux de délivrance des sédiments. Pour cela, on a eu recours à la

courbe de pourcentage de délivrance des bassins en fonction de leur superficie de la Soil Conservation Service et au tableau de Robinson (1979) qui donnent respectivement un taux de délivrance moyen de 14.5 % pour notre cas d'étude.

Superficie (ha)	Perte moyenne en sol (t/ha/an)	Perte en sol dans le bassin (t/an)	Taux de Délivrance moyen (%)	Quantité délivrée par le bassin (t/an)	Quantité moyenne délivrée (t/ha/an)
11171 (K)	95.47	1066507.40	14.5	154643.57	13.84
11171 (Ka)	38.69	432222.24	14.5	62672.22	5.61

Tableau 6 : Quantité de sédiments délivrée à l'exutoire

D'après Mokchane (1999), la Direction Générale de l'Hydraulique (DGH), a déterminé par des mesures bathymétriques un taux d'érosion spécifique à l'exutoire de 18,2 t/ha/an ajusté à 23,6 t/ha/an. Valeurs qui restent très supérieures aux résultats obtenus. Ceci est dû aux apports des glissements de terrains et surtout des sapements de berges très fréquents dans les terrains marno-calcaires et grésopelitiques de l'Unité de Tanger qui fournissent d'importantes quantités de sédiments qui sont véhiculés lors des périodes de crues vers la retenue.

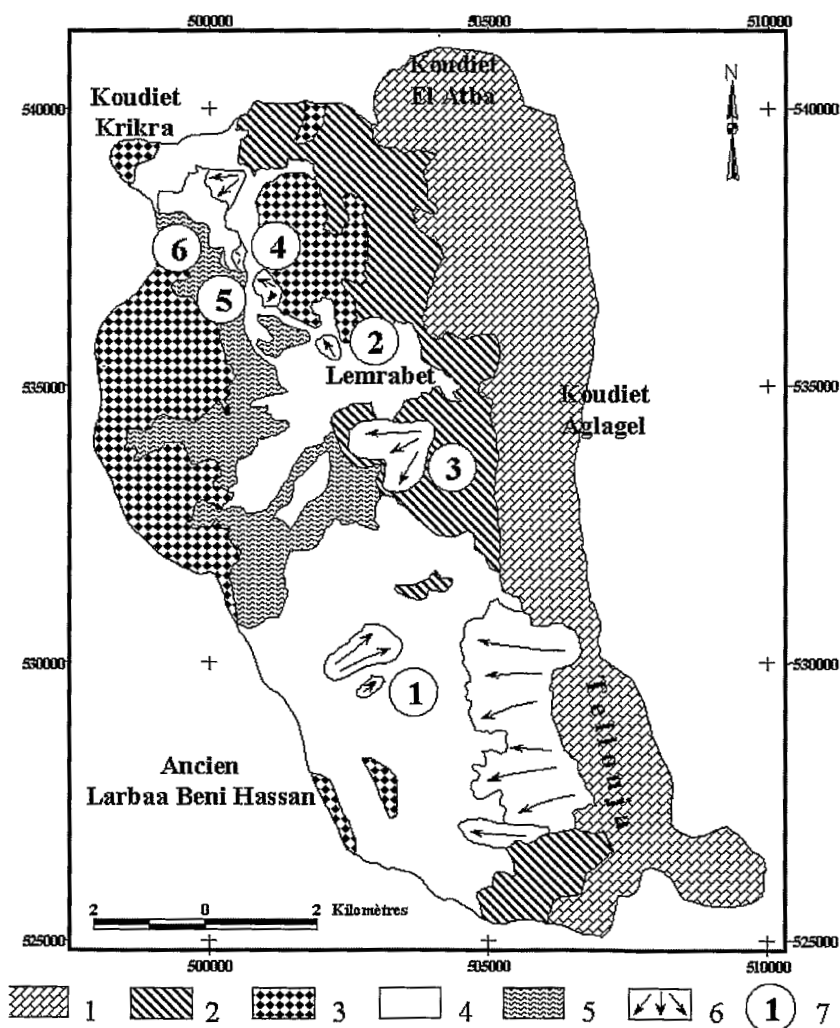
L'étude des glissements qui ont eu lieu sur la dernière décennie (1989-1999), nous a donné les résultats suivants (Tableau 7 ; Fig. 3):

N°	Type de glissement	Terrains affectés	Masse mise en mvt (en t)	Superficie (en ha)	Pertes moyennes (en t/ha)	Taux de délivrance (en %)	Qté moy délivrée au barrage (en t/ha)
1	Coulée boueuse	Marno-calcaire de l'UT*	32.65	1	32.65	14.5	4.7
2	Coulée boueuse	Alternance grésopelitique du Pd**	10.49	0.54	19.43	14.5	2.8
3	Coulée boueuse	Alternance grésopelitique du Pd**	378.56	8.24	45.94	14.5	6.7
4	Sapement de berges	Marno-calcaire de l'UT*	32.79	1.54	21.29	100	21.3
5	Sapement de berges	Marno-calcaire de l'UT*	12.76	0.46	27.74	100	27.7

6	Sapement de berges	Marno-calcaire de l'UT*	15.34	0.34	45.12	100	45.1
Quantité de sédiments déplacée par glissements de terrain sur durant la décennie (1989-1999)							108.4 t/ha
Quantité de sédiments moyenne déplacée par année (méthode de Bishop, 1955)							10.84 t/ha/an
Quantité moyenne délivrée en utilisant le K dans le modèle d'USLE							13.84 t/ha/an
Quantité moyenne délivrée en utilisant le Ka dans le modèle d'USLE							5.61 t/ha/an
Taux d'érosion spécifique à l'exutoire par étude bathymétrique (DGH in Mokchane, 1999)							18.18 t/ha/an
Taux d'érosion spécifique à l'exutoire par étude bathymétrique corrigé (DGH in Mokchane, 1999)							23.64 t/ha/an

* Unité de Tanger, ** Prédorsalien

Tableau 7 : Récapitulatif des calculs du taux d'érosion à l'exutoire du barrage Nakhla



1- Dorsale calcaire, 2- Prédorsalien, 3- Nappes de Flyschs, 4- Unité de Tanger, 5- Anciens glissements stabilisés par reboisement, 6- Instabilité de terrain, 7- Situation et numéro du glissement cartographié

Figure 3 : Cadre géologique et emplacement des glissements cartographiés durant la décennie 1989-1999

Ainsi, sur les résultats obtenus on a pu corriger la quantité de sédiment délivrée au barrage calculée par le modèle d'USLE à 16,5 t/ha/an en utilisant le Ka et à 24,7 t/ha/an en utilisant le K ; valeurs qui sont très proches de celles calculées en se basant sur l'étude bathymétrique.

CONCLUSION

Les travaux que nous avons effectués dans le bassin versant Nakhla (combinant traitement de l'imagerie satellitale, données pédologiques et climatologiques dans un SIG), nous ont permis d'identifier et de cartographier les surfaces des terres cultivées nécessitant la plus grande priorité d'intervention pour la protection du patrimoine sol afin de réduire les apports solides au niveau de la retenue du barrage. En appliquant le modèle d'USLE, nous avons pu évaluer dans le bassin versant Nakhla, un taux d'érosion spécifique respectivement en utilisant le K puis le Ka à 95,5 t/ha/an réajusté à 38,7 t/ha/an (Siteri, 2000). Quant à la quantité de sédiments moyenne délivrée à l'exutoire avec un taux de délivrance de 14.5 %, elle est de 13,8 t/ha/an ajustée à 5,6 t/ha/an en tenant compte des éléments grossiers en surface. Ces valeurs restent très faibles en comparaison avec le taux d'érosion spécifique à l'exutoire obtenue par bathymétrie (Mokhchane, 1999) (18,2 t/ha/an ajustée à 23,6). Chose à laquelle on s'attendait étant donné que le modèle d'USLE ne prend pas en considération un paramètre important (qui a attiré notre attention lors des différentes missions effectuées sur le terrain) à savoir : les glissements de terrains et plus particulièrement les sapements de berges très fréquents dans le bassin versant de Nakhla (au niveau des terrains marno-calcaires et grésopelitiques de l'Unité de Tanger). D'où, l'idée de compléter cette approche par l'étude des glissements de terrains et des sapements de berges dans la zone d'étude (domaine Rifain), qui présente des pentes fortes, une pluviométrie intense (El Gharbaoui, 1981 ; Tayaa, 1977 ; Siteri, 2000) et un matériel détritique de mauvaise qualité géotechnique qui arrive très vite à saturation (Ait Brahim, 1991).

Ainsi, le modèle d'USLE appliqué au bassin versant Nakhla nous permis essentiellement de cartographier les zones nécessitant un aménagement antiérosif et d'évaluer le taux de dégradation des sols. Cependant, il a fallu compléter cette évaluation par la prise en compte de la quantité de sédiments délivrée par les glissements de terrains et plus particulièrement les sapements de berges ; puis véhiculée vers la retenue lors des périodes de crue. Cette approche (USLE et Erosion en masse) pourrait être étendue à d'autres bassins versants du Rif Marocain

ayants des caractéristiques climatologiques, morphologiques et pédo-géologiques similaires à celles du bassin versant Nakhla.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier MM NAIMI et TAYAA de l'Institut Agronomique Vétérinaire pour avoir mis à notre disposition les données pédologiques et climatologiques ainsi que pour leurs corrections combien constructives de la version définitive de cet article.

BIBLIOGRAPHIE

- Ait Brahim L., 1991.** Tectonique cassante et état de contraintes récents du Maroc Nord, contribution à l'étude du risque sismo-tectonique au Maroc. Faculté des Sciences, Rabat : Thèse d'Etat; 300 p.
- Arnoldus H., 1977.** Prédiction des pertes en terres par érosion en nappe et en griffe. Aménagement des bassins versants. Rome : Bull. Pédol. F.A.O. : 121-149.
- Barril P., 1988.** Notes de cours choisies sur l'érosivité des pluies (à l'I.N.A.T.). Lausanne : Ecole polytechnique fédéral de Lausanne. Institut du Génie Rural.
- BISHOP A. W., 1955.** The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. Géotechnique, Vol, 5, N°1 : 7-17.
- Dhman L., 1994.** Modélisation des pertes en sols par l'érosion hydrique basée sur l'utilisation d'un SIG et des images satellitales Spot (XS). Application au bassin versant de Tleta (Rif occidental). IAV Hassan II, Rabat : Mémoire de troisième cycle ; 135 p.
- El Gharbaoui, 1981.** La terre et l'Homme dans la péninsule Tangitane. Travaux de l'Institut Scientifique. Faculté des Sciences Humaines, Rabat : Thèse d'Etat ; 378 p.
- Heusch B., 1970b.** Estimation et contrôle de l'érosion hydraulique. Soc. Sc. Phys. Maroc; N° spécial : 41-54.
- Kalman R., 1967.** Le facteur climatique de l'érosion dans le bassin du Sebou. Rabat, projet Sebou, 40 p.
- Moukhchane M., 1999.** Contribution à l'étude de l'érosion hydrique dans le Rif occidental. Applications des méthodes expérimentales du ¹³⁷CS et de la susceptibilité magnétique aux bassins versants Nakhla, El Hachef et Smir. Faculté des Sciences, Tétouan : Thèse de doctorat d'état; 260 p.
- Naïmi M. et Bouabid M., 1997.** Bassin Versant Nakhla. Etude Pédologique au 1/50 000. IAV Hassan II, Rabat : Rapport et Cartes, 90 p.

- Robinson A.R., 1979.** Sediment Yield as function of upstream Universal Soil Loss Equation. Soil. Science Society of America ; SSSA Special Publication No 8, 45 p.
- Sitteri N.H., 1999.** Apports de la télédétection et des SIG à la cartographie et à la quantification de l'érosion hydrique dans le bassin versant Nakhla (Rif Septentrional). Faculté des Sciences, Rabat : Mémoire de DESA ; 170 p.
- Tadili B., 1991.** Etude du risque sismique dans le Maroc Nord. Faculté des Sciences, Oujda : Doctorat; 250 p.
- Tayaa M., 1997.** Bassin versant de Oued Nakhla. Caractéristiques physiques, hydrologiques et détermination du taux d'érosion. Rabat : Projet PREM - Ministère de l'Environnement et Agence Américaine pour le Développement International (USAID); 74 p.
- Wischmeier W.H., 1976.** Use and Misuse of the Universal Soil Loss Equation. Journal Soil and Water Conservation ; 31 : 5-9.
- Wischmeier W.H. and Smith D.D., 1978.** Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning. Washington D.C. : Agr. Handbook, No. 537, USDA; 58 p.



Pour citer cet article / How to cite this article

Aït Brahim, L.; Sossey Alaoui, F.; Siteri, H.; El Hamdouni, I.; Tahri, M.; Baghdad, B. - Prise en compte des glissements de terrain dans la quantification des pertes en sols dans le bassin versant Nakhla (téléédétection et SIG), pp. 267-280, Bulletin du RESEAU EROSION n° 21, 2002.

Contact Bulletin du RESEAU EROSION : beep@ird.fr