

Modélisation de l'érosion hydrique et des facteurs causaux, Cas de l'oued Sahla, Rif Central, Maroc

HAYTAM MESRAR, ABDELHAMID SADIKI, ANA NAVAS, ALI FALEH,
LAURA QUIJAN, and JAMAL CHAAOUAN

avec 7 figures et 6 tableaux

Résumé. Ce travail est le résultat d'une évaluation des états érosifs et des facteurs causaux du risque de l'érosion des sols dans le bassin versant de l'oued Sahla (Région de Taounate) par le modèle PAP/CAR. Ce bassin versant est à vocation agricole et le risque d'érosion des sols est une des principales contraintes à son développement. Des examens basés sur le changement des paramètres du PAP/CAR dans sa version classique par d'autres empruntés à d'autres modèles qui semble expliquer mieux le risque d'érosion, ont été effectués pour savoir le ou les paramètres qui contrôlent davantage l'érosion des sols. Le modèle PAP/CAR utilise la pente et la friabilité des faciès lithologiques pour déterminer la susceptibilité à l'érosion. Dans ce travail, ces deux paramètres ont été remplacés respectivement par le facteur topographique de WISCHMEIER & SMITH (1978) et par les types de sols. Ces deux paramètres ont été classifiés selon les directives du PAP/CAR et ont été intégrés au modèle. Les facteurs causaux principaux du risque de l'érosion hydrique, leur interaction et de leur répartition ont été définis grâce à l'analyse des corrélations. Ces résultats ont permis de détecter les facteurs et les zones nécessitant une intervention rapide et efficace pour contrecarrer l'effet de l'érosion hydrique. Les résultats peuvent constituer un document à la disposition des aménageurs pour l'aide à la décision dans les projets d'aménagement et de gestion du contrôle de l'érosion.

Mot-clés: Érosion des sols, PAP/CAR, Érodibilité, Facteurs causaux

Summary. *Soil erosion and causal factors modeling, case of the Sahla catchment, Central Rif, Morocco.* – This work is the result of an assessment of erosion level and causal factors of soil erosion risk in the Sahla catchment (Taounate region) by using the PAP/RAC model. This watershed is an agricultural vocation and soil erosion risk is a major constraint to its development. Examinations based on replacing the PAP/RAC parameters in its classic version by others borrowed from other models that explain more erosion risks, were made to determine the parameter which controls more soil erosion. The study of erodibility in the PAP/RAC model is based on the slope and lithologic friability. In this study, these two parameters have been replaced respectively by the topographic factor WISCHMEIER & SMITH (1978) and soil types. These two parameters were classified as directed by the PAP/RAC and had been incorporated into the model. The main causal factors of soil erosion risk, their interactions, and their distributions had been defined through correlations analysis. These last had detected the factors and the part requiring fast and effective intervention to counteract the effect of soil erosion. These results can be an available document as support in projects of planning and erosion control management.

Key words: Soil erosion, PAP/RAC, Erodibility, Causal factors

1 Introduction

Le Maroc, pays dont l'économie est basée pour une grande part sur l'agriculture, fait face à de nombreuses contraintes qui menacent les ressources agricoles. Le secteur contribue avec près de 20 % du PIB du Maroc. Ce secteur montre une certaine fragilité qui se manifeste par une tendance au déclin de la productivité à long terme dans les zones montagneuses en grande partie lié à la dégradation des sols.

La combinaison de facteurs tels que la vulnérabilité des sols, la topographie accidentée, le climat agressif et l'utilisation intensive des terres interagissent pour déclencher et amplifier les processus d'érosion hydrique. Les activités anthropiques de déforestation et de surpâturage contribuent également à l'accélération de la dégradation des sols. A l'échelle de la parcelle agricole, la fertilité du sol diminue par la perte de sa fraction fine et ses éléments nutritifs, ce qui provoque la réduction de sa capacité de rétention d'eau et l'augmentation du coefficient de ruissellement créant ainsi un déséquilibre du régime hydrique. A l'échelle du bassin versant, l'augmentation du ruissellement induit des effets néfastes tels que des inondations et l'envasement des barrages. La dégradation générale des ressources en sols a des conséquences graves pour le développement durable de la région (SADIKI 2007). Le phénomène de l'érosion hydrique est une contrainte majeure au développement durable du bassin versant de l'Oued Sahla. Il est en étroite liaison avec les problèmes de dégradation des ressources naturelles (forêts, eau, sols et biodiversité).

La technique PAP/CAR, PNUE/PAM/PAP (2000) pour l'évaluation de la dégradation des sols est un outil méthodologique et une source d'information pratique. Cependant pour améliorer ses performances, ce travail expose les résultats de tests d'utilisation de nouveaux paramètres dans le modèle pour étudier et cartographier l'érodibilité des sols. Il s'agit du facteur topographique (facteur LS) de WISCHMEIER & SMITH (1978) et des types de sols tirés de la carte pédologique DREFT (1994) en remplacement respectif de la pente et de la lithologie. Outre l'application de cette technique un essai de démêlement de l'interdépendance des facteurs causaux du risque a été entrepris par l'analyse des corrélations entre les paramètres.

2 Présentation de la zone d'étude

Le Rif est une chaîne de montagne qui occupe une position clé dans le système orogénique de la ceinture alpine. Il forme le flanc sud de l'Arc de Gibraltar, qui se poursuit en Espagne par la Cordillère Bétique (MICHARD 2008). La topographie y est et très accidentée et les faciès sont très friables.

Le bassin versant de l'Oued Sahla est situé sur le versant sud du Rif (Fig. 1). Il est allongé nord – sud, sur environ 35 km de long et une moyenne de 6 km de large. L'Oued Sahla façonne en son centre la grande voute anticlinale de la ride de Taounate orienté est-ouest par une vallée très encaissée où est construit le barrage Sahla. Il couvre une superficie de 173,89 km². Avec une altitude moyenne de 562 m il a un climat méditerranéen à étés secs et hivers pluvieux. La pluviométrie est très irrégulière d'une année à l'autre. La moyenne annuelle des précipitations est de 600 mm.

Au niveau de la zone sud du bassin, les terrains de la ride orientée est-ouest de Taounate, sont constitués par une série jurassico-crétacées de marnes surmontées par une formation molassique composée de grès et de conglomérats (MARÇAIS 1966).

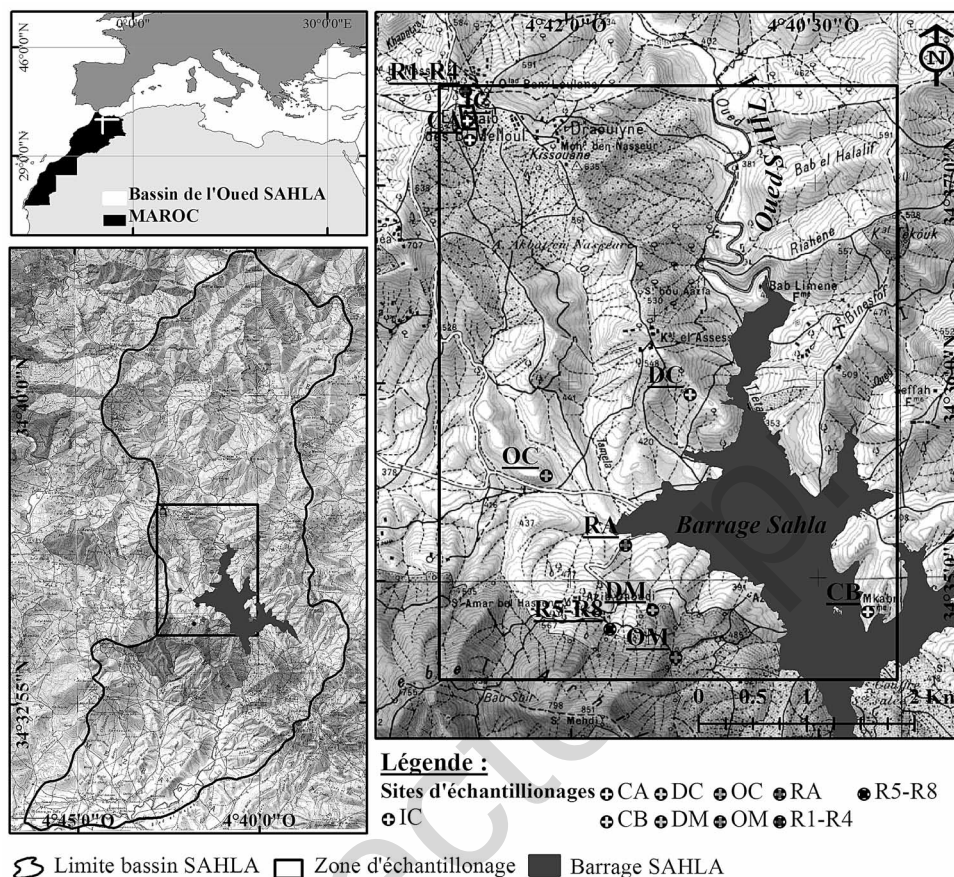


Fig. 1. Geographical situation of the watershed Sahla sites and soil sampling.

La partie nord du bassin versant est la zone intrarifaine formée par deux nappes de charriage; les unités de Ketama et de Tanger. Elles se présentent sous forme de formations para-autochtones constituées par des éléments allant du Trias jusqu'au Tortonien inférieur. L'unité de Ketama comporte un flysch schisto-gréseux du Crétacé inférieur épais de quelques kilomètres. L'unité de Tanger est formée par des schistes et des calcaires du Crétacé moyen et supérieur.

3 Méthodologie

La méthode classique PAP/CAR (1998) et PNUE/PAM/PAP (2000) préconise une démarche méthodologique consistant en trois phases.

La première est prédictive pour identifier, évaluer et intégrer les paramètres physiques (la pente, la lithologie, le couvert végétal) dans le but de tirer des hypothèses préliminaires concernant le risque d'érosion. L'objectif de cette phase est le traitement de données pour la hiérarchisation du terrain selon la vulnérabilité des sols à l'érosion

hydrique appelé par le modèle «états érosifs» en se basant sur le comportement des facteurs. Une carte d'érodibilité est dérivée de la superposition des cartes de pentes et lithologique. Une carte de protection des sols est ensuite réalisée à partir de la superposition des cartes d'occupation du sol et du couvert végétal. L'exécution de la carte des états érosifs est déduite enfin à partir de la superposition des cartes d'érodibilité et de protection des sols.

La seconde phase est descriptive. Elle consiste à décrire par voie cartographique les formes d'érosion réelle et les processus actuels et actifs se produisent sur le terrain. Elle est réalisée par l'observation et l'examen direct sur le terrain. Cette approche fournit la réalité du terrain et permet soit de consolider, soit de rectifier les diagnostics concernant l'érosion potentielle et d'identifier les particularités locales, tels les facteurs causaux du risque d'érosion.

La superposition des paramètres d'entrée consiste à les mettre en relation selon des matrices définies par les directives du PAP/CAR (Tab. 1).

Ces matrices ont été obtenues à travers des études des ateliers et des expériences au niveau d'un certain nombre de pays méditerranéens afin de tirer les différentes cor-

Tableau 1. Les Matrices PAP/CAR.

Table 1. PAP/RAC Matrices.

A: Matrice générant le degré d'érodibilité

Classe de Pente	Classe de lithofaciès				
	1	2	3	4	5
1	1	1	1	1	2
2	1	1	2	3	3
3	2	2	3	4	4
4	3	3	4	5	5
5	4	4	5	5	5

B: Matrice générant le degré de protection des sols

Occupation du sol	Densité de Couvert			
	1	2	3	4
1	5	5	4	4
2	5	5	4	3
3	3	2	1	1
4	4	3	2	1
5	5	4	3	2
6	5	4	3	2

C: Matrice générant Les états érosifs

Degré de protection des sols	Degré d'érodibilité				
	1	2	3	4	5
1	1	1	1	2	2
2	1	1	2	3	4
3	1	2	3	4	4
4	2	3	3	5	5
5	2	3	4	5	5

Tableau 2. Classification des paramètres d'entrée.

Table 2. Results of erodibility analysis (K adjusted) of the sites.

Classe	États	Type
Pente	Inclinaison	Degré °
1	Très faible	0–3
2	Faible	3–12
3	Moyenne	12–20
4	Fort	20–35
5	Extrême	> 35
Lithofaciès	Résistance	Type de roche
1	Très forte	Calcaires marneux
2	Fort	Marnes massives
3	Moyenne	Flysch à grès
4	Faible	Flysch à calcaires
5	Très faible	Flysch marneux
Occupation du sol	Protection	Type de couverture
1	Très faible	Culture sèche
2	Faible	Culture en ligne
3	Moyenne	Irrigation
4	Fort	Forêts
5	Très Fort	Matorral claire
6	Extrême	Matorral dense
Densité de couvert	Protection	% de densité
1	Faible	Inférieur à 25 %
2	Moyenne	25–50 %
3	Fort	50–75 %
4	Extrême	Supérieur à 75 %

relations entre les paramètres mis en jeu PAP/RAC (1998), PAM/PNUE (2000), PAP/RAC (2000), ABOULABBAS (2005) et ATTIA (2005).

Les paramètres d'entrées sont classés selon leur degré de risque (Tab. 2). Il s'agit de l'inclinaison de la pente qui est répartie en 5 classes du très faible (0–3) à extrême (> 35), ce classement tient compte du fait que les pentes fortes favorisent la dynamique des eaux. La résistance mécanique à l'altération pour les lithofaciès, ainsi les calcaires sont les plus résistants et les flysch marneux sont les moins résistants. Le degré de protection des sols dépend d'une part du type de l'occupation en question (Matorral, Forêt ou culture) classé en fonction du degré de protection. D'autre part de la densité de couverture répartie en quatre classes du moins dense (< 25 %) au plus dense (> 75 %).

Les paramètres de sortie (Tab. 3), notamment l'érodibilité, la protection des sols et les états érosifs sont répartis selon 5 classes de l'état faible présentant le minimum de susceptibilité au risque à l'état Extrême qui traduit la susceptibilité élevée.

Après avoir réalisé la démarche classique et évalué ses résultats sur plusieurs bassins notamment celui de l'Oued Amzaz (MESRAR 2013), de l'Oued Larbaa (SADIKI 2012) et enfin l'Oued Sahla et pour accroître l'efficacité des résultats, le facteur topo-

Tableau 3. Classification des paramètres de sortie.

Table 3. Pearson product-moment correlation coefficient (r) between the causal factors and erosion status.

Érodibilité		Protection des sols		États érosifs	
Classes	États	Classes	États	Classes	États
1	Faible	1	Faible	1	Faible
2	Notable	2	Notable	2	Notable
3	Moyenne	3	Moyenne	3	Moyenne
4	Fort	4	Fort	4	Fort
5	Extrême	5	Extrême	5	Extrême

graphique «LS» de l'équation universelle des pertes en sol de WISCHMEIER & SMITH (1978) a été emprunté pour remplacer le facteur pente. Ce qui paraît plus significatif puisque la longueur de pente prise en compte dans ce facteur favorise l'accélération de l'écoulement par la gravité ce qui augmente l'agressivité de la nappe d'eau écoulée. Le facteur topographique a été calculé par la formule:

$$LS = \left(\frac{L}{22,13} \right)^m \cdot (0,065 + 0,045 \theta + 0,0065 \theta^2) \quad \text{Équation 1}$$

L: longueur de pente en mètre

θ : Pente en pourcent

$m = 0,2$ si $\theta < 1$, $m = 0,3$ si $1 \leq \theta < 3$, $m = 0,4$ si $3 \leq \theta < 5$, $m = 0,5$ si $\theta \geq 5$

La lithologie du modèle PAP/CAR a été ensuite remplacée par les types de sols à partir de la carte pédologique DREFT (1994). Les sols ont été classés en cinq classes selon leur résistance au détachement des particules.

Pour valider ces tests, une série d'analyses des sols a été effectuée pour mesurer l'érodibilité selon l'équation universelle des pertes en sol de WISCHMEIER & SMITH (1978) appelé «facteur K». Ce facteur inclue différents paramètres intrinsèques au sol qui permettent de déterminer la cohésion et la résistance du sol à l'érosion. Les sites d'échantillonnages sont indiqués sur la figure 1. L'équation pour calculer l'érodibilité des sols, se présente comme suit:

$$100 K_i = 2.1 M^{1.4} \cdot 10^{-4} (12-a) + 3.25 (b-2) + 2.5 (c-3) \quad \text{Équation 2}$$

M: est calculé par la formule $M = (\% \text{ sable fin} + \text{limon}) * (100 - \% \text{ argile})$,

a: est le pourcentage de matière organique,

b: est le code de la perméabilité,

c: est le code de la structure.

Pour compléter certaines lacunes notamment la réduction de l'effet «splash» et de la vitesse du ruissellement par les éléments grossiers, l'équation de DUMAS (1965) in SADIKI (2004) a été adoptée pour effectuer l'ajustement nécessaire à l'équation 2 et K devient:

$$K_{ajuste} = K(0,983 - 0,0189 X + 0,0000973 X^2) \quad \text{Équation 3}$$

X : est le pourcentage des éléments grossiers de taille > 2 mm en surface.

K : est calculé par l'équation de WISCHMEIER & SMITH (1978).

La justification de cette méthode repose sur l'obligation et la nécessité ressentie d'une démarche systématique, qui va permettre d'allier les différents paramètres, et de pallier au caractère interdépendant des facteurs influençant l'état érosif d'un sol. L'issue peut être utilisée comme un outil aussi bien décisionnel que prévisionnel. Ce schéma consolidé est mis en parallèle avec des études de terrain des analyses physico-chimiques et de la photo-interprétation, afin de mettre en valeur les contraintes spécifiques et représentatives de l'érosion locale.

4 Présentation et discussion des résultats

4.1 Phase prédictive

4.1.1 Les facteurs causaux du risque de l'érosion hydrique

Après l'arrangement des paramètres mis en jeu en classes (Fig. 2) selon les directives du PAP/CAR les résultats montrent que:

La topographie est accidentée, il y a une proportion élevée des pentes fortes (20° à 35°) et moyennes (12° à 20°) avec 35 % et 28 % respectivement, cela témoigne d'un relief accidenté favorisant l'activité hydrique et rendant le bassin plus vulnérable.

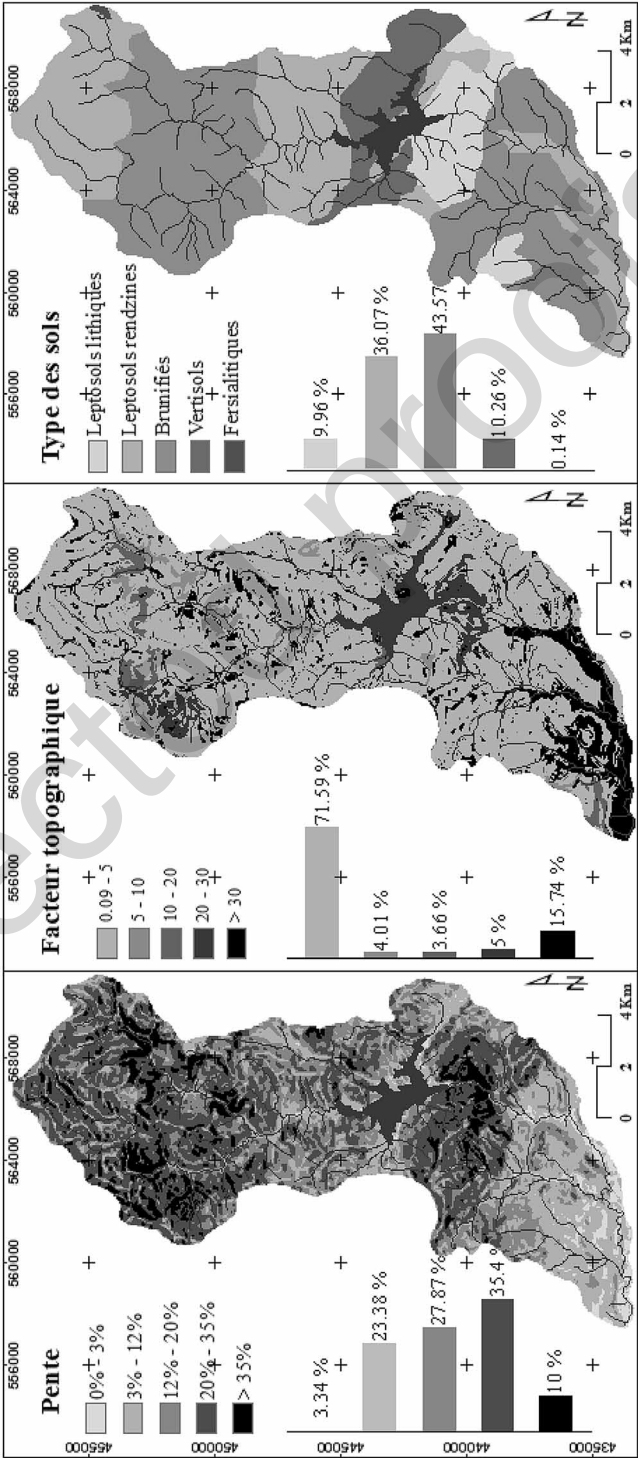
Pour le facteur topographique, il traduit à la fois l'inclinaison de la pente et sa longueur, la classe la plus représentative et celle des valeurs très faible (0,09 à 5) avec une surface couvrant 72 % du bassin versant.

Le classement des types de sol est basé sur le degré de développement ainsi les mieux développés sont les plus résistants et vis versa. Selon ce critère les classes dominantes sont moyennement résistantes, il s'agit des leptosols lithique et rendzine

La lithologie est classée selon le degré relatif de cohésion et de résistance mécanique à l'érosion. Les classes des roches de fort à très fort degré de résistance couvrent environ 33 % du bassin versant, elles se localisent dans la partie centrale et nord du bassin versant. Les classes de faible à très faible résistance présentent de pourcentages de 22 % et 20 % respectivement, la classe dominante est celle du degré moyen de résistance avec 25 % de la superficie totale.

L'occupation des sols témoigne d'une forte présence des classes de risque faible (matorral claire) et extrême (culture sèche) avec 28 % et 33 %. Les classes de degré fort et très fort occupent 30 % (irrigation et culture en ligne), localisé dans la partie centrale.

La densité de la couverture est un facteur qui joue un rôle clé, dans le maintien de la résistance des sols, car plus le couvert végétal est dense plus forte est la protection du sol et plus faible est l'action des précipitations. La classe la plus fréquente est celle de densité faible ($< 25\%$) avec 49 % de la superficie totale, localisé dans la partie aval et au nord du barrage. Les classes 2 et 3 ne dépassent pas 17 %. La classe de forte densité ($> 75\%$) évoque 27 % de la superficie total, il se trouve jalonnant le barrage et dans la partie la plus au nord du bassin.



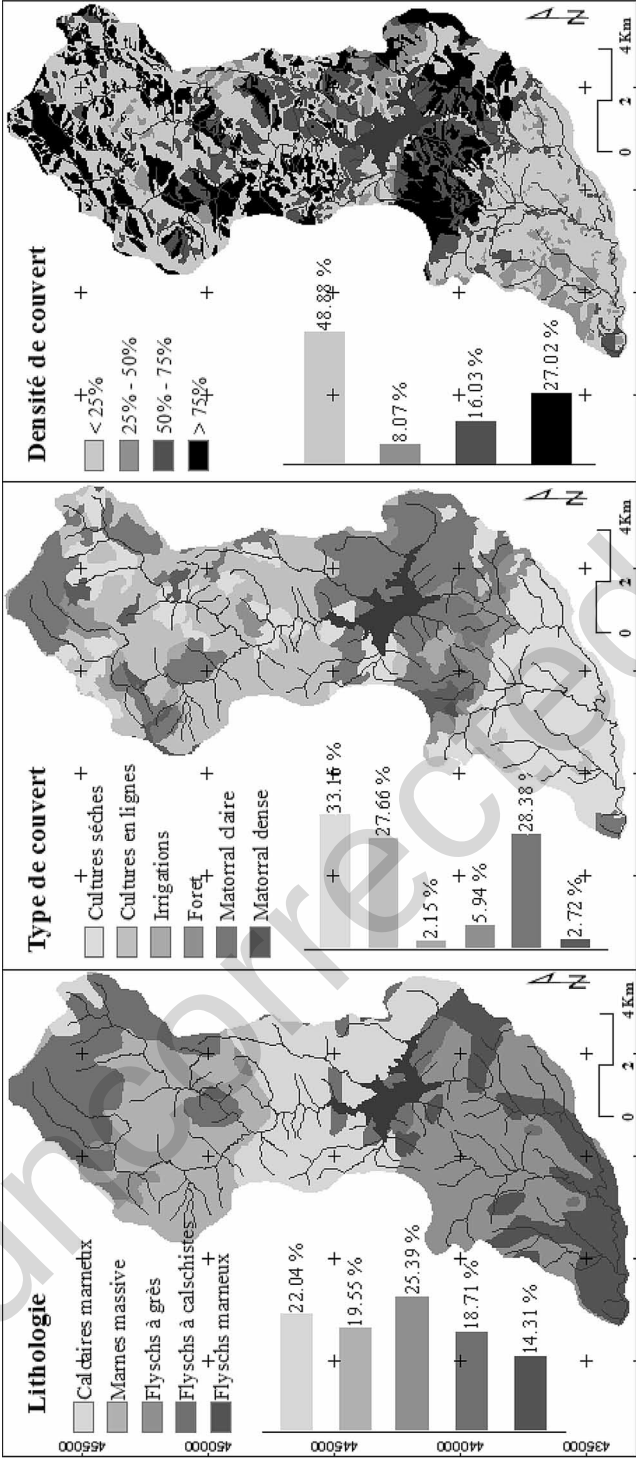


Fig. 2. Factors involved in modeling PAP/RAC modified.

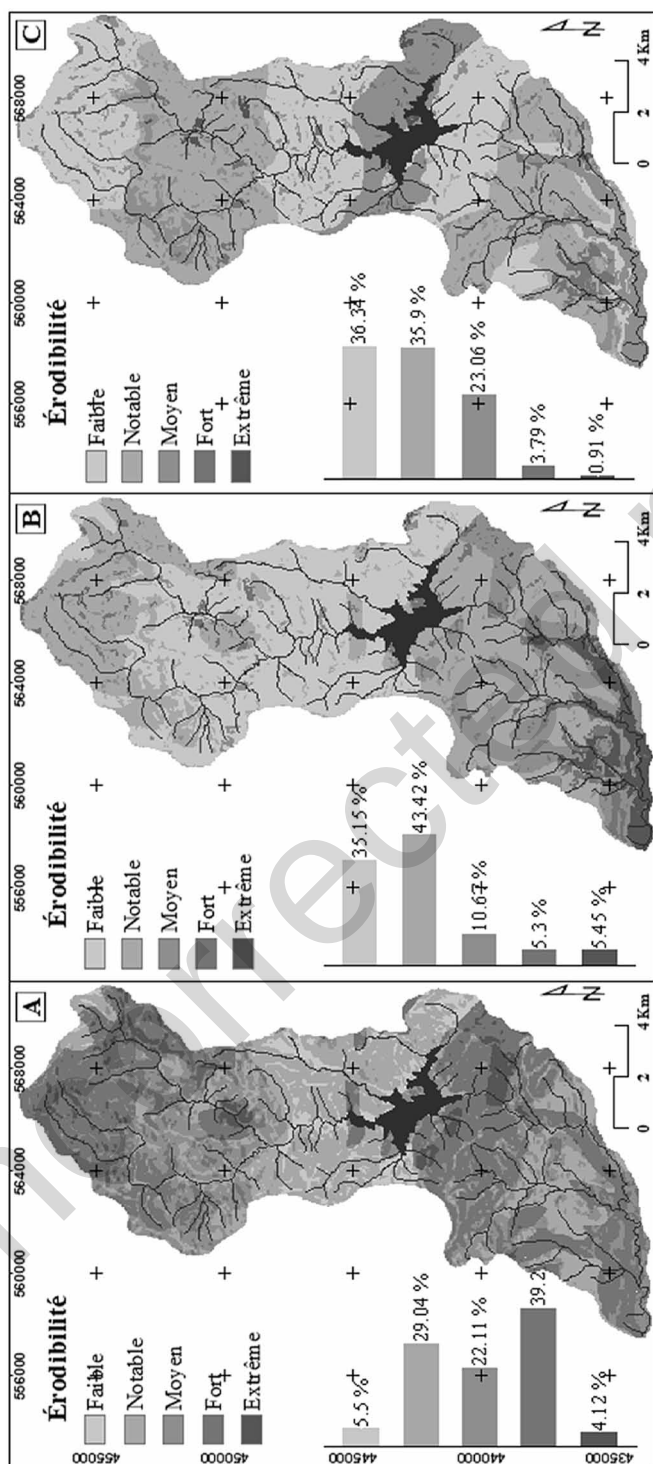


Fig. 3. Maps erodibility: A – classical modeling; B – Modeling by introducing topographique factor; C – modeling by introducing the type of soil.

4.1.2 L'érodibilité

La carte de l'érodibilité selon l'approche classique est le résultat de la superposition de la carte des pentes et la carte des lithofaciés classés selon leur résistance à l'altération et l'ameublissement. Les polygones résultants des deux paramètres de référence sont arrangés selon la matrice (Tab. 1-A).

Le résultat de la modélisation classique (Fig. 3-A) montre que l'érodibilité suit en quelque sorte le canevas dessiné par la carte des pentes et des lithofaciés, là où la pente est forte et/ou le terrain est de faible résistance, l'érodibilité est toujours extrême et vis versa. 30 % des surface son faiblement érodables et 40 % sont fortement érodables.

L'introduction du facteur topographique avec la lithologie (Fig. 3-B), montre une répartition différente à la première modélisation. Les degrés d'érodibilité deviennent de plus en plus faibles. Cela est lié à la correction apporté par ce facteur pour le quel, une pente longue et plus exposée au risque d'érosion qu'une pente courte. L'érodibilité de 78 % des terrains est faible à notable soit une augmentation de 43 %. L'érodibilité fort à extrême affecte 11 % des surfaces correspondant à une diminution d'environ 32 %.

L'introduction du facteur type de sol et du facteur topographique (Fig. 3-C) montre que plus de 72 % des terrains présentent une érodibilité faible à notable et environ 5 % forte à extrême. La comparaison des proportions, montre que la méthode classique surestime le degré d'érodibilité. L'introduction du facteur topographique a provoqué une régression des degrés forts à extrêmes d'érodibilité d'environ 33 %. L'introduction du type de sol avec le facteur topographique a accentué cette régression d'environ 6 %.

Pour valider ces résultats, des analyses ont porté sur 138 échantillons prélevés dans une zone restreinte et représentative du bassin versant au niveau de 16 sites (Fig. 1). Les analyses ont porté sur la matière organique, la granulométrie, la perméabilité et la structure des sols. Elles ont permis de calculer l'érodibilité des sols (facteur K) selon (WISCHMEIER 1978).

Le Tableau 4 montre les résultats d'analyse des paramètres entrant en jeu pour la mesure du facteur K ajustée. Les valeurs de K trouvées varient entre 0,02 et 0,33. Ces valeurs témoignent d'une érodibilité faible à moyenne.

Le site IC présente l'érodibilité la plus élevé ($K = 0,33$). Cette valeur coïncide avec la présence d'un sol Fersialitique sous culture intensive avec le taux de matière organique le plus faible (0,9 %).

Les sites CA est aussi un sol Fersialitique mais il présente une érodibilité moins importante ($K = 0,2$). On constate qu'il ya plus d'argile et plus de matière organique (1,33 %) dans ce sol.

Les sites OC et DC sont pris sur des Vertisols. Le facteur K témoigne d'une érodibilité comparable à celle du site CA. Les sols de ces sites présentent autant de matière organique mais une fraction sableuse négligeable et plus d'argile.

Au niveau du site CB l'érodibilité enregistré est faible ($K = 0,17$). Le sol est peu évolué mais le pourcentage de la matière organique devient plus au moins élevé (3 %), ainsi que celui de la fraction sableuse (38 %).

Les valeurs enregistrées au niveau des sites DM et OM témoignent d'un sol résistant. Cela est lié surtout à la granularité fine limono-argileuse des sols peu évolué et peu évolué à minéraux brutes.

Tableau 4. Résultats d'analyse et érodibilité (K ajusté) des sites.

Table 4. Test results of conformity.

Sites	MO%	Sable%	Limon%	Argile%	> 2 mm% < 2 mm% K		K ajusté
IC	0,90	24,19	59,09	16,71	11,73	87,24	0,42
CA	1,33	17,76	60,62	21,62	21,11	78,62	0,34
OC	1,13	1,90	72,77	25,33	1,45	97,86	0,29
DC	1,75	0,85	71,50	27,65	5,74	93,78	0,24
RA	1,07	0,00	48,87	51,13	2,61	97,41	0,02
CB	2,78	37,53	43,83	18,65	31,27	58,62	0,30
DM	4,49	3,58	69,38	27,04	21,12	77,93	0,15
OM	1,43	0,85	69,40	29,75	20,14	77,98	0,22
R1	5,00	0,00	70,92	29,08	32,37	64,20	0,10
R2	4,98	2,02	73,29	24,69	3,22	94,59	0,14
R3	6,57	9,20	67,95	22,85	2,91	96,11	0,09
R4	11,62	5,80	70,96	23,24	4,60	93,45	0,12
R5	7,17	6,90	66,80	26,30	22,81	76,62	0,04
R6	4,84	14,20	64,40	21,40	22,15	77,85	0,18
R7	4,33	17,30	61,20	21,50	37,19	62,81	0,20
R8	2,88	31,00	55,80	13,20	23,56	76,44	0,36

Les sites R (1–8) et RA enregistrent des valeurs d'érodibilité très faibles avec un minimum de 0,02 et un maximum de 0,22. Ceci est surtout lié à une granularité fine et un pourcentage élevé de matière organique qui peut aller jusqu'à 11,62 %.

Les résultats du facteur K témoignent d'une érodibilité très faible à moyenne ce qui confirme la diminution de l'érodibilité montré par l'introduction du facteur topographique et celui des types de sols par rapport aux résultats de l'érodibilité déterminée par le modèle PAP/CAP classique.

L'analyse des résultats de l'ajustement du modèle linéaire, a permis la description de la relation entre l'érodibilité mesurée et celle potentielle. Il montre que la modélisation classique (Fig. 4-A), présente une relation assez faible entre l'érodibilité mesurée et potentielle. La valeur de régression enregistrée indique que le modèle explique 53 % de la variabilité dans l'érodibilité mesurée. Le coefficient de corrélation est égal à 0,53, ce qui indique un rapport relativement faible entre les variables.

L'introduction du facteur topographique au lieu de la pente (Fig. 4-B) montre que la relation entre l'érodibilité mesurée et l'érodibilité potentielle est modérément forte. La valeur de régression calculée indique que le modèle explique 74,06 % de la variabilité dans l'érodibilité mesurée. Après introduction du facteur type de sol au lieu de la lithologie (Fig. 4-C) avec le facteur topographique, la valeur de régression enregistrée montre que le modèle explique 90 % de la variabilité dans l'érodibilité mesurée. La relation est significative entre l'érodibilité mesurée et potentielle. Le coefficient de corrélation est égal à 0,93, ce qui vérifie que la relation relativement forte entre les variables.

On déduit que la corrélation n'est pas assez bonne en ce qui concerne la modélisation classique et que l'introduction du facteur topographique au lieu de la pente et du type de sol au lieu de la lithologie présente la meilleure corrélation.

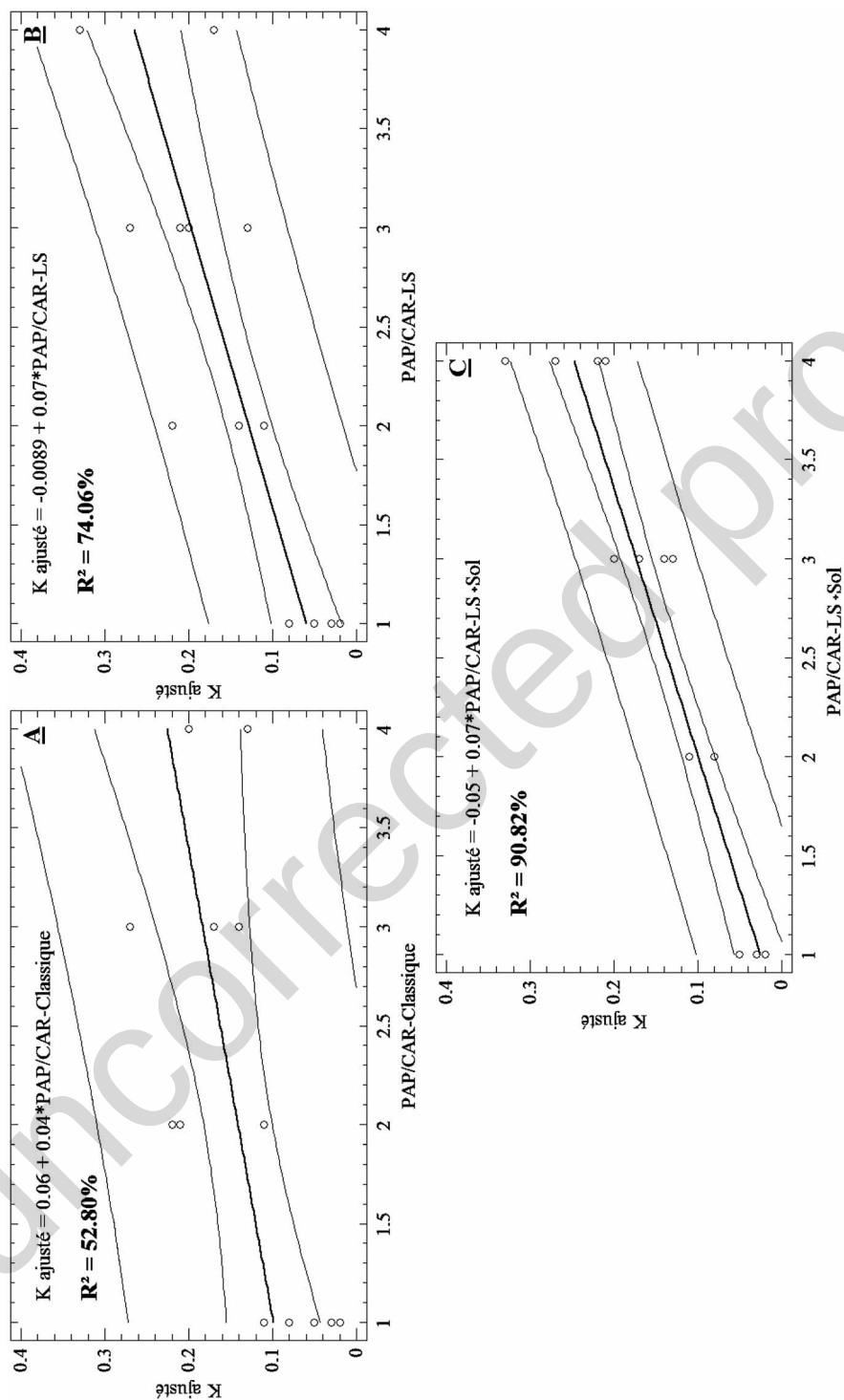


Fig. 4. Regression curves measured erodibility and potential erodibility. A – Classical modeling; B – modeling by introducing the topographic factor; C – modeling by introducing the type of soil.

4.1.3 La protection des sols

Selon REY (2004) La végétation protège d'une part les sols de l'ablation par réduction de l'énergie des agents érosifs, d'autre part en réduisant l'énergie de l'érosion pluviale par interception des gouttes de pluie, grâce aux parties aériennes des plantes. Au sol, la végétation permet de lutter contre le ruissellement, en augmentant l'infiltration de l'eau CERDÀ (1998). Mais L'effet de la végétation peut être différent selon les formations végétales, il peut dépendre du type de végétation ou de l'utilisation du sol (KIM 1998). Pour cela le rôle de cette étape s'avère indispensable dans la mesure où elle permet d'apercevoir les zones à faible ou à forte protection et par conséquent les zones affectées qui nécessitent des interventions urgentes et rapides pour fixer et stabiliser le sol.

La carte de protection des sols a été réalisée à partir de la superposition de la carte d'occupation des sols et celle des densités de recouvrement. La matrice qui va permettre cette superposition ne peut pas être appliquée ailleurs, car elle est adaptée aux conditions bioclimatiques méditerranéennes. Les degrés de protection des sols sont obtenus grâce à l'application de la matrice présentée dans le (Tab.1-B).

La figure 5, montre que le bassin versant de l'Oued Sahla est modérément protégé. Les classes les plus représentatives sont celles de protection faible et notable avec des pourcentages de 42 % et 17 % de la superficie total du bassin, localisées surtout dans la partie aval et quelques domaines au nord du barrage. En ce qui concerne les zones bien protégées, elles ne dépassent pas 15 % localisées aux alentours et à l'amont du barrage.

4.1.4 Les états érosifs

La figure 6 montre les cartes des états érosifs réalisée par la superposition de la carte de protection des sols avec successivement les trois cartes d'érodibilité issue des dif-

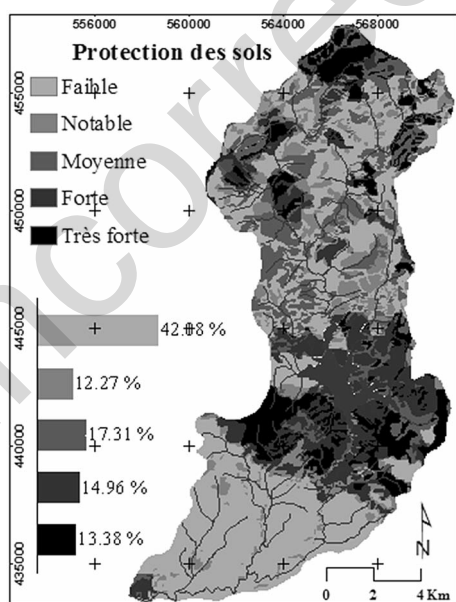


Fig. 5. Map of soil protection.

Tableau 5. Coefficient de corrélation de Pearson (r) entre les facteurs causaux et les états érosifs.

Table 5. Pearson correlation coefficient (r) between causal factors and erosion status.

États érosifs	0,395	0,273	0,569	0,455	-0,009	-0,077
Pente		-0,425	0,789	0,475	0,228	0,397
Lithologie			-0,420	-0,052	-0,277	-0,657
Facteur topographique				-0,053	0,150	0,299
Type de sol					0,130	0,200
Occupation de sols						0,205
Densité de couvert						

férentes modélisations. Les résultats ont été analysés dans un premier temps par voie statistique, ensuite ils vont être comparés avec le terrain pour identifier le paramètre le plus significatif au moyen du test conformité.

La modélisation des états érosifs réalisée par introduction du facteur topographique au lieu de la pente montre une diminution des états fort et extrême de 16 %, par rapport à ceux obtenue par le modèle classique (56 %), par contre les états faibles et notables ont enregistré une augmentation de 14 %.

L'introduction du type de sol avec le facteur topographique a montré une diminution de 2 % des superficies des états fort et extrême et une hausse de 1 % des états faibles.

L'analyse de corrélation au moyen du coefficient de Pearson (r) (Tab. 5), a permis la mesure de la force de relation linéaire entre les variables. Cette mesure est normalisée, et elle est définie entre $-1 \leq r \leq 1$. Le tableau 5 montre les corrélations entre les états érosifs et les facteurs causaux.

Les variables disposants des coefficients statistiquement significatifs à l'égard des états érosifs montrant une liaison linéaire, positive sont respectivement, le facteur topographique ($r = 0,569$) et le type de sol ($r = 0,455$). Cela veut dire que la connaissance de ces variables (facteur topographique et type de sol) explique mieux la valeur des états érosifs.

La densité de couvert, et le type de couvert montrent eux aussi des coefficients statistiquement significatifs, mais à l'inverse de la première la relation est négative avec des coefficients $r = -0,009$, et $r = -0,077$, respectivement.

L'étude des relations entre les différentes variables permet de dégager les facteurs explicatifs des états érosifs, dont le contrôle peut être en faveur de la réduction de l'érosion. L'ordre d'influence des différents facteurs sur le risque d'érosion hydrique est: – facteur topographique – types de sols – pente – lithologie suivant une relation linéaire positive. L'ordre des paramètres qui sont en relation linéaire négative est densité de couvert végétal – occupation des sols.

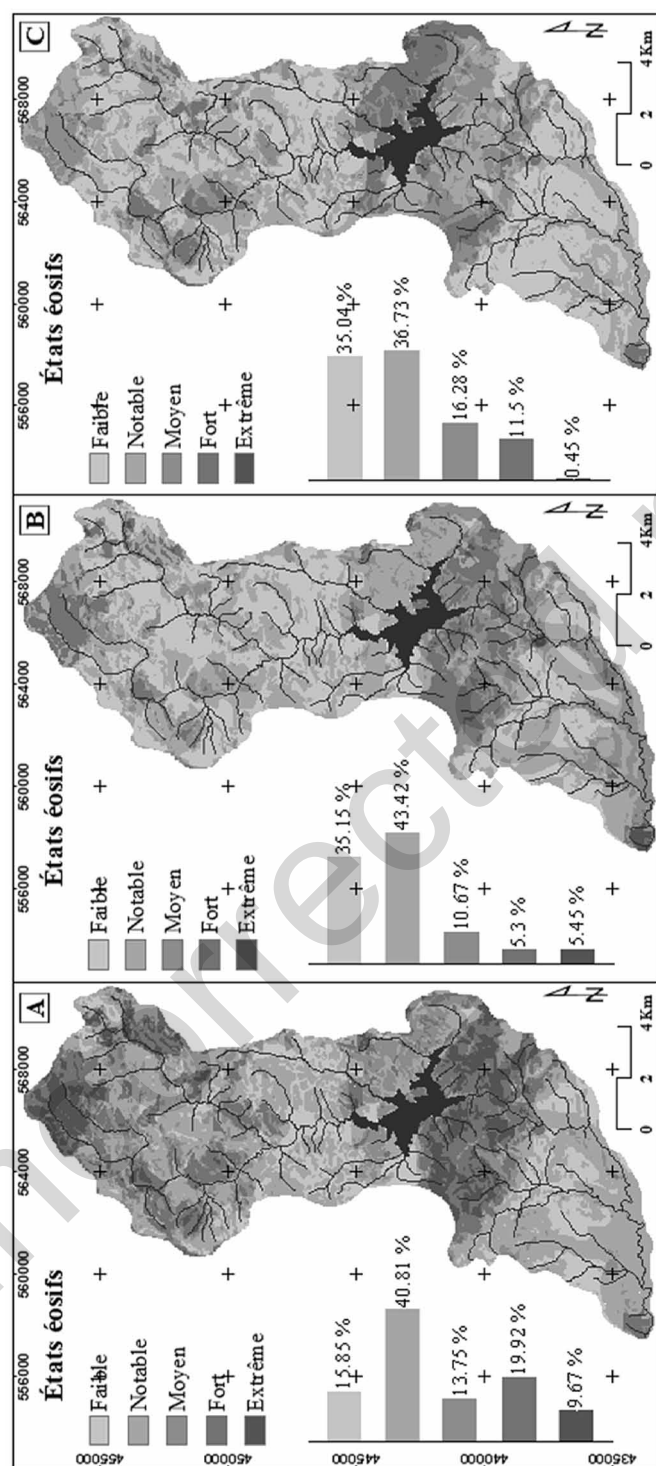


Fig. 6. Maps of erosion status: A – classical modeling; B – Modeling with introduction topographic factor; C – modeling by introducing the type of soil.

4.2 Phase descriptive

4.2.1 Érosion réelle

La répartition des formes de l'érosion dans le bassin versant de l'Oued Sahla, a été cartographiée selon les directives du PAR/CAR en affectant des lettres majuscules aux formes de l'érosion et des chiffres au degré atteint par le processus. La figure 7, montre que la dégradation se manifeste par différents processus de l'érosion hydrique. On assiste à une perte de sol de différentes manières:

- L'érosion en nappe et le décapage (L) touche 75 %. Elle se manifeste par des plages de couleur claire qui montrent que le sol est peu développé et que la quantité des éléments nutritifs essentiels à la croissance des végétaux est très faible.
- L'érosion en rigole et ravins (D) apparaît en automne dans les sols labourés après chaque averse importante. Ces formes sont effacées par les labours suivants. Elle touche annuellement une moyenne de 2,06 % des terrains. Si elles apparaissent sur des terrains non exploitables, elles évoluent généralement en formes plus importantes.

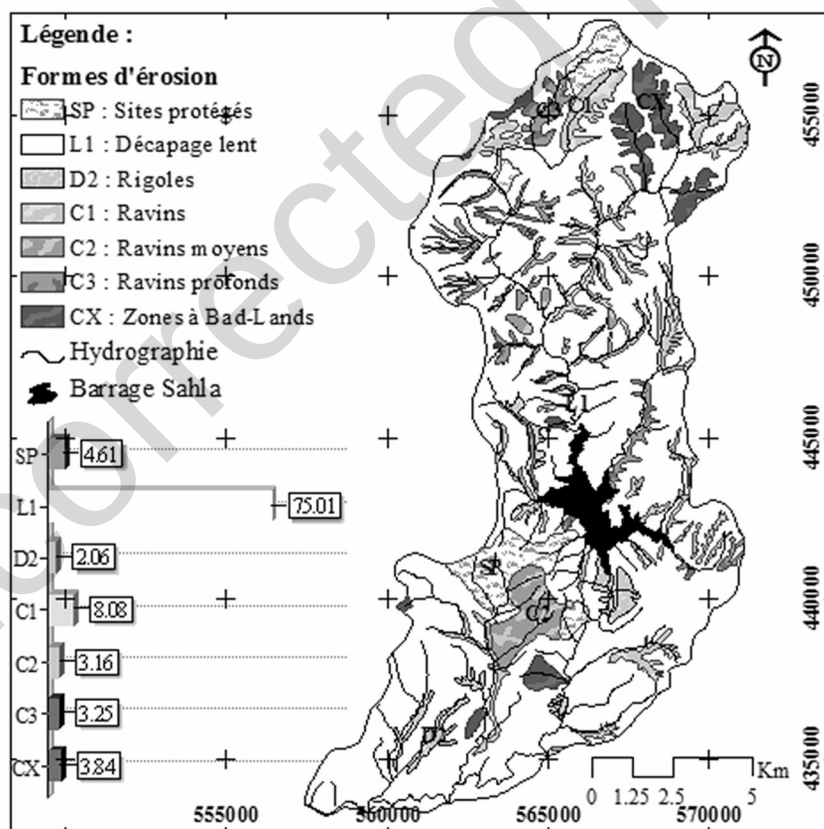


Fig. 7. Proportion of area distribution and erosion forms.

- L'érosion en ravins (C1–2) se fait au dépend des terrains de culture des matériaux meubles à pente raide qui entraîne l'incision de ravins par les eaux de ruissellement. Elle intéresse à peu près 11,24 % des terrains.
- Le ravinement généralisé ou bad-lands (C3 et Cx) atteint une surface que ne dépasse pas 4 %, localisée surtout sur des marnes à intercalation de calcaire à pente abrupte.

Ces observations rejoignent ceux trouvés au niveau de l'Oued Rmel (ATTIA 2005) présentant les mêmes caractéristiques climatique et édaphique que le bassin de l'Oued Sahla. Là où la forme d'érosion prédominante est le décapage. Reste à vérifier que les pentes commandent le fonctionnement de l'érosion dans ce bassin versant.

4.2.2 Analyse de Conformité

L'évaluation de la conformité consiste à intégrer tous les données issues des phases prédictives et descriptives. Pour avoir l'état érosif le plus tangible qui se rapproche le mieux de la réalité du terrain. Des vérifications de conformité avec ce qui se passe actuellement au niveau du bassin versant de l'Oued Sahla ont été réalisés. Vingt cinq emplacements ont été choisis au hasard pour servir de repère de comparaison. Sur ces emplacements on a comparé les états érosifs issus des différentes testes avec les formes d'érosion réel. Le pourcentage de conformité, a été calculé à travers la comparaison et l'examen in-situ des états érosifs potentiels avec les états réels. Le tableau 6 montre les résultats d'analyse réalisés.

La conformité est faible pour les états érosifs obtenus par le modèle PAP/CAR classique. Seulement 56 % des sites sont conformes. L'introduction du facteur topographique a élevé cette proportion de 16 % pour atteindre 72 %. Le remplacement de la lithologie par les types de sol et de la pente par le facteur topographique a amélioré la conformité pour atteindre 88 %.

5 Conclusion

La modélisation des états du risque de l'érosion hydrique basée sur les paramètres physiographique et biogéographique a permis la détection des zones vulnérables et la détermination des facteurs qui contrôlent en grande partie les états érosifs.

La carte d'érodibilité du modèle PAP/CAR réalisée après utilisation du facteur topographique et des types de sol, en remplacement de la pente et de la lithologie, a

Tableau 6. Résultats du test de conformité.

Table 6. Conformity test results.

Modèle	Classique		Introduction de LS		Introduction du sol	
	Conforme	Non conforme	Conforme	Non conforme	Conforme	Non conforme
Nombre de site	14	11	18	7	22	3
% de conformité	56	44	72	28	88	12

montré une bonne corrélation allant jusqu'à 91 % entre l'érodibilité potentielle et celle mesurée.

La carte des états érosifs qui résulte du modèle modifié fait ressortir cinq états, environ 35 % des terrains présentent une faible prédisposition à l'érosion hydrique, l'érosion moyenne et notable touche 53 %. Les états d'érosion forts et extrêmes affectent respectivement 11 % et moins de 1 % de la superficie du bassin versant.

L'approche descriptive a montré que cette dégradation se manifeste par différents processus. On assiste à une perte de sol de différentes manières. L'érosion en nappe qui emporte les particules nutritives essentielles pour le développement de la végétation affecte 75 % de la surface du bassin versant. L'érosion en rigole et ravines touche 12,06 %. L'érosion en ravins se fait au dépend des terrains de culture et peuvent évoluer en ravinement généralisé est présente sur environ 11,24 % du terrain. Le stade «badlands» de l'érosion est atteint sur une surface de 4 %, ces terrains sont généralement abandonnés.

La superposition des trois cartes des états érosifs avec celle de l'érosion réelle a permis de montrer que le modèle PAP/CAR classique surestime les effets de l'érosion hydrique et que l'introduction dans ce modèle de facteurs incluant l'analyse d'autres paramètres qui contrôlent la dynamique des écoulements en surface améliore l'évaluation de l'érosion hydrique.

L'analyse et la définition des facteurs causaux, de leur interaction et de leur répartition au moyen de outils statistique (Corrélation) permet de détecter sur quel facteur il faut intervenir pour rétablir l'équilibre de la zone concernée. Le facteur le plus important est le facteur topographique où on peut agir sur la pente et sa longueur en créant des structures antiérosives qui diminuent l'effet ce facteur (banquettes, terrasses).

Devant ce pronostic des interactions des différents facteurs, Il s'avère nécessaire d'intervenir pour lutter contre l'érosion hydrique, selon une approche intégrale et novatrice pour concevoir des stratégies efficaces de conservation des sols, afin de concilier entre les exigences importantes d'une population qui ne cesse de s'accroître et les potentialités limitées des ressources naturelles qui s'appauvrissent. Ainsi la méthodologie adoptée peu aider à la décision et par conséquence minimiser les coûts et le temps liés aux études de gestion de contrôle de l'érosion hydrique.

Remerciements

Les analyses physico-chimiques des sols ont été faites au laboratoire du Groupe d'Érosion et Évaluation des Sols et Eaux de la Station Expérimentale de Aula Dei, CSIC, Saragosse (Espagne). Remerciement au projet AECID (AP/037737/11, 2011)

Références

- ABOULABBAS, O., BENCHEKROUN, F. & MERZOUK, A. (2005): Application des Directives CAR/PAP pour la formulation d'un programme de gestion de contrôle de l'érosion et de la désertification, Cas du bassin versant de Beni Boufrah. – Programme d'Actions Prioritaires Centre d'Activités Régionales, Rabat, pp. 55.
- ATTIA, R., SADOK, A. & HÉDI, H. I. (2005): Application des Directives CAR/PAP pour la formulation d'un programme de gestion de contrôle de l'érosion et de la désertification Cas du bassin versant de l'Oued Rmel. – Programme d'Actions Prioritaires, Centre d'Activités Régionales, Tunisie, pp. 72.

- CERDÀ, A. (1998): The influence of aspect and vegetation on seasonal changes in erosion under rainfall simulation on a clay soil in Spain. – *J. Soil Sci.* **78**: 321–330.
- DREFT (1994): Plan d'aménagement anti-érosif du bassin versant de l'Oued Ouergha en amont du barrage al Wahda. Royaume du Maroc; Ministère de l'agriculture et de la mise en valeur agricole; Administration des eaux et forêts et de la conservation des sols, pp. 218.
- DUMAS, J. (1965): Relation entre l'érodibilité des sols et leurs caractéristiques analytiques. – Tunis: O.R.S.T.O.M, service pédologie, Vol. **3**, pp. 307–333.
- KIM, K. & JEONG, Y. (1998): Hydrological variations of discharge, soil loss and recession coefficient in three small forested catchments Environ. – *Forest Sci.* **54**: 431–438.
- MARÇAIS, J. & SUTER, G. (1966): Aperçu structural de la région du Rif oriental, n° 58. – *Notes Serv. Géol. Maroc* **27**, p. 198.
- MESRAR, H., SADIKI, A. & JABRANER, A. (2013): Le risque de l'érosion hydrique «Etude et modélisation». Cas du bassin versant de l'Oued Amzaz (Rif, Maroc). – Edition universitaire européennes, pp. 114.
- MICHARD, A., SADDIQI, O., CHALOUAN, A. & LAMOTTE, D. (2008): Continental Evolution: The Geology of Morocco. Structure, Stratigraphy, and Tectonics of the Africa-Atlantic-Mediterranean Triple Junction. – *Lecture Notes in Earth Sciences* **116**, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008, p. 203.
- PAM/PNUE (2000): Formulation et mise en oeuvre des projets du PAC: Guide pratique. Athènes-Split.: CAR/PAP-PAM. p. 125.
- PAP/CAR (1998): Directives pour la cartographie et la mesure des processus d'érosion hydrique dans les zones côtières méditerranéennes. PAP-8/PP/GL.1.Split, Centre d'activités régionales pour le Programme d'actions prioritaires (PAM/PNUE), en collaboration avec a FAO. pp. xii + 72.
- PAP/RAC (2000): National reports on problems and practices of erosion control management in the Mediterranean region. – PAP/RAC, Split. pp. vi + 64.
- PNUE/PAM/PAP (2000): Directives pour la gestion de programmes de contrôle d'érosion et de désertification plus particulièrement destinées aux zones côtières méditerranéennes. – Split, Programme d'actions prioritaires. p. 127.
- REY, F., BALLAIS, J. L., MARRE, A. & ROVÉRA, G. (2004): Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface. – Cemagref; Institut de Géographie Alpine Grenoble. *Comptes rendus géoscience*, vol. **336**, pp. 991–998.
- SADIKI, A., FALEH, A., NAVAS, A. & BOUHLASSA, S. (2007): Assessing soil erosion and control factors by the radiometric technique in the Boussouab catchment, Eastern Rif, Morocco. – *Sciencedirect* **71**: 13–20.
- SADIKI, A., MESRAR, H. & FALEH, A. (2012): Modélisation et cartographie des risques de l'érosion hydrique: cas du bassin versant de l'Oued Iarbaa, Maroc. – *Papeles de geografía*, vols. **179–188**, pp. 55–56.
- SADIKI, A., BOUHLASSA, S., AUJJAR, J., FALEH, A. & MACAIRE, J. (2004): Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'Equation universelle des pertes en sol dans le Rif oriental (Maroc). – Rabat: Bulletin de l'Institut Scientifique, section Sciences de la Terre, Vol. **26**: 69–79.
- WISCHMEIER, W. H. & SMITH, D. D. (1978): Prediction rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: a guide for selecti. – p. 65.

Manuscript received: November 2014; accepted: December 2014.

Adresses des auteurs: HAYTAM MESRAR, ABDELHAMID SADIKI, Université Sidi Mohammed Ben Abdellah, Faculté des Sciences Dhar Mahraz-Fès, Département des sciences de la terre, B.P. 1796 Fès – Atlas, Maroc. E-Mail: haytam.mesrar@usmba.ac.ma – ANA NAVAS, LAURA QUIJAN, Estación Experimental de Aula Dei. EEAD-CSIC, Avda. Montañana 1005, 50059 Zaragoza, España. – ALI FALEH, JAMAL CHAAOUAN, Laboratoire des Études Géographiques, Aménagement et Cartographie, Faculté de Lettres saïs Fès, Maroc.