

**ÉVALUATION PAR ANALYSE MULTICRITÈRES  
DE LA VULNÉRABILITÉ DES SOLS À L'ÉROSION :  
CAS DU BASSIN VERSANT  
DE L'ISSER – TLEMEN – ALGÉRIE**

**BOUGHALEM M.<sup>1</sup>, MAZOUR M.<sup>1</sup>, GRECU F.<sup>2</sup>,  
ABDELLAOUI A.<sup>3</sup> HAMIMED A.<sup>4</sup>**

The drainage basin of Isser, space weakened by the periods of drought and characterized by exposures of marls and very fragile clays, presents a high sensitivity to erosion. In addition to the deterioration of the quality of water, the erosion phenomenon in this zone presents risks of depletion of topsoil, loss of fertility, loosening of plants and pollution by pesticides dissolved in surface water runoff.

The erosion results from the conjunction of many permanent factors (as those related to the soil or to the topography), that are evolving or presenting a random character (such as precipitations) and intervene at different levels in erosion processes. The purpose of the work is to produce a map of soil vulnerability to the erosion by integrating field data, different thematic maps and satellite images through GIS solution. This map should be a basis for the development of the anti-erosive land use plan adapted to the specific context of the drainage basin of Isser. We do integrate four factors which determine the erosion: precipitations, topography, lithology, and vegetation cover. For combining these different factors, we use a cutting space in regular meshes. The resulting map of the vulnerability to the erosion should reveal homogeneous areas for priority interventions.

**Keywords:** Isser, Algeria, erosion, soil vulnerability, grid analysis.

### **Introduction**

L'érosion des sols par la pluie et le ruissellement est un phénomène largement répandu dans les différents pays méditerranéens (Bou Kheir *et al.*, 2001). Elle résulte de l'intensification agricole, de la dégradation des terres et de très fortes variations climatiques.

En Algérie, les régions de montagnes présentent un enjeu socio-économique important (agriculture, forêt, patrimoine, ...). Elles sont très vulnérables au

---

<sup>1</sup> Laboratoire de conservation de l'eau, des sols et des forêts, Univ. Tlemcen, Algérie;  
Corresponding author : boughalem\_2000@yahoo.fr

<sup>2</sup> Faculté de Géographie, Université de Bucarest, Roumanie

<sup>3</sup> EEEA et Univ. Paris XII, Département de Géographie, France

<sup>4</sup> Laboratoire d'Analyse des Systèmes Biologiques et de Géomatique, Univ. Mascara, Algérie

phénomène de l'érosion hydrique. Les relations entre la végétation, le sol et l'eau y sont largement perturbées (Benchetrit, 1972). Dans certains endroits, l'érosion a atteint un niveau d'irréversibilité et par endroit elle a transformé le paysage en «badlands ». En Algérie, environ 6 millions d'hectares sont exposés aujourd'hui à une érosion active et en moyenne 120 millions de tonnes de sédiments sont emportés annuellement par les eaux. Les pertes annuelles des eaux dans les barrages sont estimées à environ 20 millions de m<sup>3</sup> dues à l'envasement (Remini, 2000). La subsistance des populations est de plus en plus menacée par les pertes en sol.

L'apport des aménagements agro-sylvo-pastoraux dans les bassins versants où les risques d'érosion sont les plus intenses aura d'autant plus d'efficacité que les facteurs du milieu naturel sont bien connus. Or, les problèmes de dégradation des sols ne se posent pas avec la même acuité dans les différentes parties de la zone (Boughalem *et al.*, 2012). C'est pourquoi il est utile de délimiter des zones d'aménagements prioritaires.

Dans ce contexte, la présente étude a pour objet la réalisation d'une carte de vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique sur le bassin versant de l'Isser. Le risque peut se définir par le croisement de deux dimensions : aléa x vulnérabilité. L'aléa est le phénomène physique aléatoire, par définition à l'abri ou à l'écart de toute installation ou enjeu humain. Ce dernier aspect se traduit par la vulnérabilité qui est le pendant, en termes économiques ou en termes de vies humaines, de l'aléa en question (Glossary, 1992).

En réalité, la vulnérabilité des sols peut être définie comme leur fragilité face aux agressions extérieures telles que le climat et les actions anthropiques. Elle dépend donc de facteurs intrinsèques et extrinsèques. Elle peut être hiérarchisée en fonction du degré d'exposition aux risques. L'érosion des sols dépend ainsi de nombreux facteurs. Pour le présent travail, quatre facteurs principaux ont été considérés : le climat (plus exactement les précipitations), la topographie, la lithologie et le couvert végétal. Ce choix est fait en nous appuyant sur des études régionales relatives à l'érosion des sols (Mazour, 2004; Morsli *et al.*, 2004; Roose *et al.*, 1996; Talbi *et al.*, 2002). Ces mêmes auteurs s'accordent pour considérer les facteurs déclenchant de l'érosion cités plus haut, comme étant les plus pertinents et les plus discriminants. En effet, les précipitations constituent l'élément climatique essentiel par leur variabilité spatio-temporelle aussi bien annuelle que mensuelle. Ce sont les gouttes de pluie et les eaux de ruissellement sur les terrains en pente qui détachent et entraînent les particules terreuses en favorisant la fermeture du sol et la formation de croûtes de battance. Pour la zone d'étude, les versants nord sont plus arrosés que les versants sud. Les mois les plus pluvieux de l'année sont généralement Février, Mars et Avril. Les pluies maximales journalières dépassent assez souvent 60 mm (Mazour, 2004).

De même, le couvert végétal intervient sur le volume ruisselé et les pertes en terre. La végétation protège le sol contre la battance des pluies, donc maintient l'ouverture du sol et réduit le ruissellement. Sa litière entretient la mésofaune (laquelle creuse la macroporosité) et absorbe une grande quantité d'énergie du ruissellement. Le phénomène d'érosion se manifeste sur le bassin versant de l'Isser chaque année pendant les épisodes pluvieux hivernaux, lorsque les sols sont encore peu couverts, ou lors des violents orages de fin d'été et d'automne sur des sols que les récoltes laissent également peu couverts. Les résidus de culture et la végétation protègent le sol de l'impact des gouttes de pluie, tendent à ralentir la vitesse de l'eau de ruissellement et permettent une meilleure infiltration (Bannari *et al.*, 1999; Roose, 1994).

En plus des facteurs favorisant le ruissellement, l'entraînement des particules du sol est facilité par les caractères du sol comme sa texture, sa minéralogie et sa stabilité structurale. La lithologie est considérée comme le facteur principal contrôlant la stabilité des versants. La succession de roches dures et tendres (marnes et grès) ; là où les roches sont résistantes, on trouve les pentes les plus fortes et des transports des sédiments faibles ; mais sur les roches argileuses tendres et les marnes on peut trouver des pentes relativement modérées et des transports abondants de sédiments (Heusch, 1970). Ce sont les zones marneuses du Miocène au nord du bassin qui sont les plus exposées aux différents processus d'érosion (Mazour, 2004).

Sur ces terrains, lorsque les sols sont sensibles à la battance, une petite augmentation locale de pente peut être à l'origine d'une aggravation importante de l'aléa érosion. Selon Roose (1994), la longueur de la pente est moins importante que son inclinaison et sa forme. Lorsque l'inclinaison de la pente augmente, l'énergie cinétique des pluies reste constante mais le transport s'accélère vers le bas, car cette énergie augmente et l'emporte sur l'énergie cinétique des pluies dès que les pentes dépassent 15%.

Les variables d'analyse sont connues à diverses échelles et selon divers découpages de l'espace ; afin d'homogénéiser l'appréciation des paramètres, nous avons opté pour un découpage du territoire en mailles régulières ; ce type de découpage a été testé pour d'autres régions et plusieurs thématiques par Abdellaoui *et al.* (2010), Abdellaoui *et al.* (2012), Grecu (2002) et Huzui *et al.* (2011). Ceci nous a permis de réaliser une carte faisant ressortir des zones homogènes d'intervention par ordre de priorité. Ce modèle n'a pas encore été appliqué au niveau du bassin hydrologique étudié.

## LA ZONE D'ÉTUDE

Le bassin versant de l'Isser se situe au nord ouest algérien, entre les longitudes 1° 20' 31" W et 0° 52' 28" W et les latitudes 34° 41' 22" N et 35° 9' 37" N. Il s'étend sur une superficie de 1122 km<sup>2</sup> pour un périmètre de 207,7 km (*Fig. 1*).

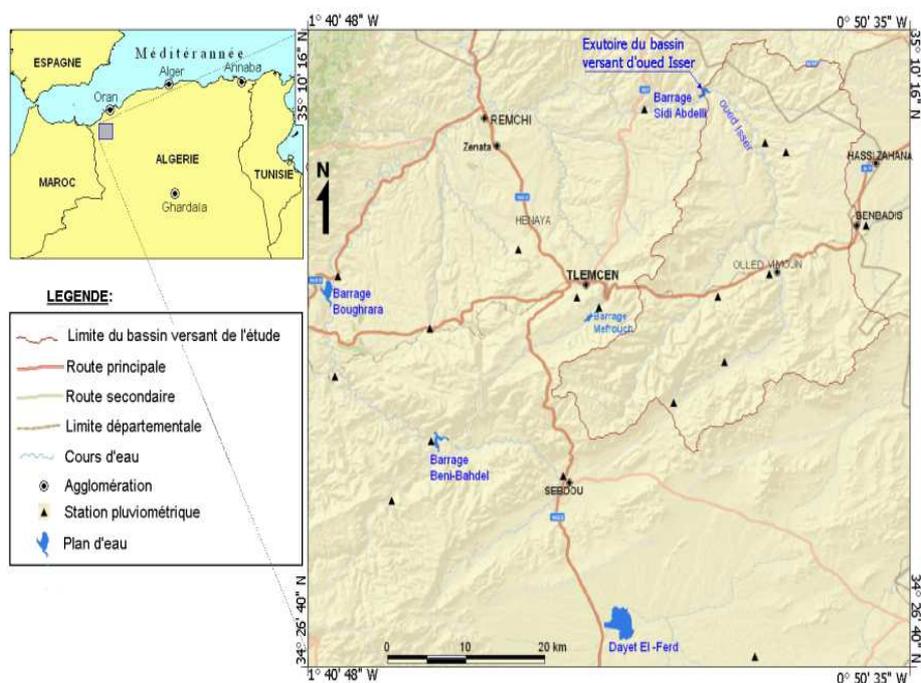


Fig. 1. Carte de situation de la zone d'étude

Affluent rive droite de la Tafna, l'oued Isser est long de 81 km. Il prend sa source à Ain Isser au Sud d'Ouled Mimoun. Il est caractérisé par :

- Un climat de type méditerranéen semi-aride avec des pluies annuelles qui varient de 280 mm à 500 mm. Ces pluies sont déterminées par une irrégularité spatio-temporelle et par un régime de courte durée et à forte intensité (l'intensité maximale peut atteindre 84 mm/h en 30 mn) ;
- Un relief très escarpé et fortement disséqué, ayant souvent de fortes pentes et un réseau de drainage très dense ;
- Une lithologie définie par des roches en majorité tendres (marnes et grés tendres) ce qui prédispose ces zones aux différents processus d'érosion ;
- Des formations végétales très dégradées, caractérisées par de faibles densités de recouvrement et de mauvaises conditions de régénération.

Le paysage est complexe et se compose d'une mosaïque d'unités réagissant différemment aux actions érosives de l'eau. La zone nord du bassin est à vocation céréalière (notamment blé et orge). Sur le massif rocheux du Jurassique subsistent encore quelques forêts (Zerdeb et Fougahal). Par ailleurs, la superficie occupée par un couvert forestier dégradé ou mort est de 39% de la surface totale du bassin.

Le phénomène d'érosion se manifeste sur le bassin versant de l'Isser, chaque année pendant les épisodes pluvieux. Environ 75% des gabions construits dans la région ont été affouillés ou emportés par les eaux de pluie (Mazour, 2004). La plupart des seuils de correction torrentielle en terre présentent des anomalies (rupture des digues, des talus, déversoir endommagé) (Fig. 2A).

Parmi les formes d'érosion rencontrées sur le bassin versant, nous notons :

- l'érosion en nappe qui se traduit par une diminution de la fertilité ; cette forme d'érosion se manifeste par la présence de plages de couleur claire aux endroits les plus décapés (Fig. 2B);
- les nappes ravinantes (10 à 20 cm de profondeur) et les ravines (plus de 50 cm de profondeur);
- l'érosion par suffosion se développe sur des pentes faibles, dans un matériau fissuré en surface, sur des marnes riches en gypse ou en d'autres minéraux solubles (Fig. 2C) ; les fissures du sol dans lesquelles s'engouffre le ruissellement hypodermique se transforment progressivement en tunnels, lesquels s'effondrent et forment des ravines régressives qui peuvent progresser de quelques dizaines de mètres au cours des grosses averses (Fig. 2D).



Fig. 2. Impact de l'érosion dans le bassin de l'Isser: seuil de correction torrentielle en terre avec déversoir endommagé (A), zone de décapage et d'érosion sélective (B), phénomène de tunneling (C), érosion hydrique en ravines (D) (Photos B, C et D : Boughalem, 2010 ; photo A :Mazour, 2006)

## Approche quantitative et modélisation

### 1. Définition des variables

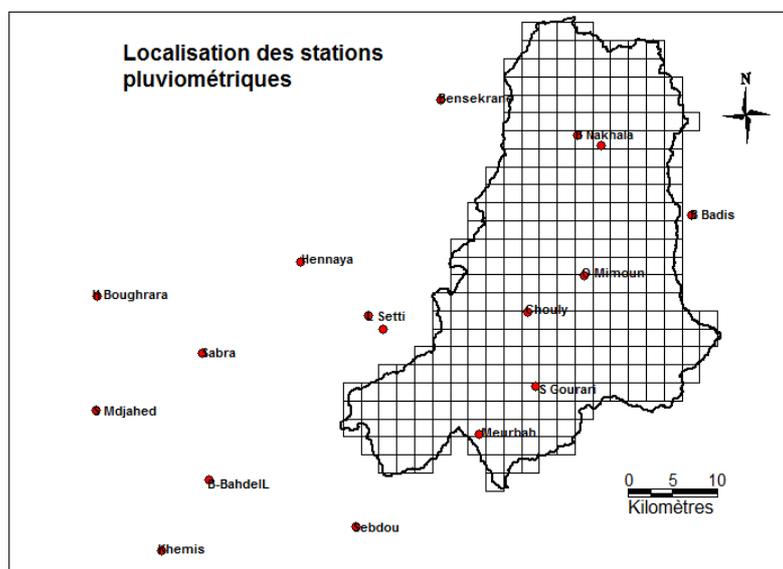
Comme nous l'avons déjà signalé, l'étude du processus érosif sera réalisée au travers de quatre facteurs (climat, topographie, lithologie et couvert végétal) dans l'optique de déterminer une carte de vulnérabilité à l'érosion. Pour cela nous définissons, pour chaque facteur, des classes codées de façons à traduire l'influence de chacun dans l'estimation de la vulnérabilité.

#### 1.1. Les précipitations

La carte des précipitations (*Fig. n° 6a*), obtenue à partir des valeurs relevées sur un ensemble de 17 stations pluviométriques du bassin et de ses environs immédiats (tableau n° 1), permet de délimiter quatre classes de pluies annuelles.

- classe 1: 270-350 mm ;
- classe 2 : 350-450 mm ;
- classe 3 : 450-550 mm ;
- classe 4 : 550-650mm.

La *Fig. 3* montre que les stations sont bien réparties sur toute la zone d'étude.



*Fig. 3.* Localisation des stations pluviométriques

*Tableau 1*

**Pluies, altitudes, exposition et distance à la mer (de 1979 à 2005)**

| Station     | Code     | Pluie moyennes annuelles (mm) | Altitude (m) | Exposition (degré) | Distance à la mer(km) |
|-------------|----------|-------------------------------|--------------|--------------------|-----------------------|
| B-Bahdell   | 16 04 03 | 394,9                         | 643,53       | 130,93             | 51,87                 |
| Khemis      | 16 04 06 | 367,7                         | 894,23       | 336,91             | 56,49                 |
| Chouly      | 16 06 01 | 383,5                         | 772,31       | 30,92              | 53,79                 |
| Meurbah     | 16 06 02 | 357,9                         | 1118,56      | 119,54             | 63,66                 |
| O Mimoun    | 16 06 07 | 318,5                         | 717,58       | 14,57              | 53,33                 |
| S Gourari   | 16 06 08 | 391,6                         | 970,81       | 159,62             | 61,70                 |
| B Nakhala   | 16 06 10 | 333,2                         | 429,36       | 231,53             | 40,34                 |
| B Badis     | 11 03 07 | 318,1                         | 726,48       | 325,83             | 55,30                 |
| L Setti     | 16 07 05 | 498,2                         | 995,24       | 5,34               | 45,60                 |
| Mefrouch    | 16 07 01 | 550,2                         | 1108,17      | 91,65              | 47,84                 |
| S Heriz     | 16 06 09 | 322                           | 530,18       | 345,20             | 42,90                 |
| S Mjathed   | 16 04 07 | 268,4                         | 390,51       | 306,96             | 39,22                 |
| Sebdou      | 16 04 01 | 362                           | 879,82       | 328,67             | 64,12                 |
| H Boughrara | 16 05 01 | 216,5                         | 253,05       | 130,30             | 28,32                 |
| Sabra       | 16 05 02 | 368,3                         | 620,36       | 54,99              | 38,72                 |
| Hennaya     | 16 05 16 | 379                           | 520,18       | 83,12              | 36,17                 |
| Bensekrane  | 16 07 02 | 351,1                         | 248,29       | 300,19             | 28,27                 |

### ***1.2. Le couvert végétal***

La carte d'occupation du sol (*Fig. 6b*) a été établie à partir de l'image Landsat TM par classification du maximum de vraisemblance (sous Erdas imagine). À la suite des observations de terrain, cette carte laisse apparaître quatre classes de couverture végétale, codées de 1 à 4, en fonction de leur capacité de protection du sol à l'érosion (*Fig. 4*):

- classe 1: couvert végétal non protecteur ;
- classe 2 : couvert végétal peu protecteur ;
- classe 3 : couvert végétal moyennement protecteur ;
- classe 4 : couvert végétal protecteur.

La classe 1 correspond aux parcours et aux sols entièrement dénudés et non cultivés (bad lands, pistes...). La classe 2 comprend les cultures annuelles (céréales, agriculture extensive) ; La classe 3 appréhende l'arboriculture et la viticulture et la classe 4 comprend quelques espèces pérennes : *Chamaerops humilis* ; *Asparagus stipularis* ; *Lycium europoeum* ainsi que les maquis et reboisements.

### ***1.3. La topographie***

Dès que la pente est suffisante pour permettre à l'eau de ruisseler, le terrain est vulnérable à l'érosion hydrique (Boukheir *et al.*, 2001). La zone d'étude présente un large éventail de valeurs de pentes allant de 0.3% à 80%. La carte des pentes (*Fig. 6d*), générée à partir du modèle numérique d'altitude (MNA), montre que les pentes les plus abruptes, très fortes à fortes, se concentrent dans les parties nord-ouest et sud du bassin versant. Elles sont caractérisées par un relief accidenté. Les pentes modérées ainsi que les pentes faibles à très faibles sont réparties sur l'ensemble du bassin. La longueur de la pente n'a pas pu être prise en compte. Les valeurs de pentes ont été regroupées en quatre classes et les limites ont été choisies en fonction des connaissances de terrain :

- classe 1 : « 0-3% » : correspond à un relief de plaines, aux terrasses alluviales et aux replats structuraux que l'on trouve dans la zone montagneuse ;
- classe 2 « 3-2% » : représente la zone de piémont, relief de glacis, collines ;
- classe 3 « 12-25% » : correspond à une zone mixte qui regroupe le haut de piémont et les montagnes ;
- classe 4 « 25-80% » : représente un relief moyennement accidenté à accidenté et les escarpements rocheux.

La *Fig. 4* fournit les caractéristiques des classes pour chacun des trois facteurs principaux engendrant le phénomène d'érosion

| couvert végétal                         |                        | pente           |  |               | précipitations  |             |        |
|---|------------------------|-----------------|--|---------------|-----------------|-------------|--------|
| nature du couvert                       | protection             | limites classes | terrain                                  | impact érosif | limites classes | érosivité   | classe |
| sol nu ou parcours                      | non protecteur         | 0% - 3%         | plaine, terrasses alluviales et replats  | très faible   | 270 - 350mm     | très faible | 1      |
| céréaculture/ agriculture extensive     | peu protecteur         | 3% - 12%        | zone de piedmont, glacis, collines       | faible        | 350 - 450mm     | faible      | 2      |
| arboriculture et viticulture            | moyennement protecteur | 12% - 25%       | hauts de piedmonts et montagnes          | moyen         | 450 - 550mm     | moyen       | 3      |
| maquis, reboisement et espèces pérennes | protecteur             | 25% - 80%       | reliefs accidentés, escarpements rocheux | fort          | 550 - 650mm     | fort        | 4      |

Fig. 4. Définition des paramètres (couvert végétal, pente, précipitation)

#### 1.4. La lithologie

La carte lithologique (*Fig. 6c*), réalisée après digitalisation de six cartes géologiques (Tlemcen, Bensakrane, Terni, Beni Smaïel, Sidi Boussidi et Ouled Mimoune), montre que sur toute la partie sud du bassin versant affleurent des calcaires d'âge jurassique qui s'étendent dans la direction nord. A l'Est sont localisés des alluvions sur terrasse du pliocène. Dans la zone nord, les versants sont constitués de substrats tendres (marnes) avec intercalations gréseuses ; ils ont une forme concavo-convexe et occupent la plus grande partie du relief. D'autre part, la dominance et l'importance des alternances de marnes et grès en pente, augmentent les potentialités érosives du bassin. Notre connaissance du terrain et l'analyse de la carte géologique nous ont permis de distinguer trois classes de matériaux affleurant (Très résistants, résistants et vulnérables).

Par ailleurs, pour cette étude de la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique, le facteur lithologie se différencie des trois autres facteurs cités précédemment en ce sens que le sol subit les effets des facteurs érosifs et réagit en fonction de sa nature en accentuant (sols peu résistants) ou en atténuant, voire en annulant (sols très ou super résistants) ces effets. Pour traduire cette situation particulière, nous utilisons une échelle plus large des contributions des classes de sol. La *Fig. 5* précise ces valeurs.

| lithologie  |                |        |
|---|----------------|--------|
| nature du sol   | érodibilité    | classe |
| banc de dolomie, calcaire sub lithographique, grès et poudingue | très résistant | 1      |
| alluvions du pliocène, alluvions anciennes                      | résistant      | 2      |
| marne, argile gypsifères, argiles et grès                       | vulnérable     | 3      |

| Lithologie         |              |
|--------------------|--------------|
| Facteur spécifique |              |
| classe             | contribution |
| 1                  | 1            |
| 2                  | 5            |
| 3                  | 10           |

*Fig. 5.* Nature et contribution des classes de sols

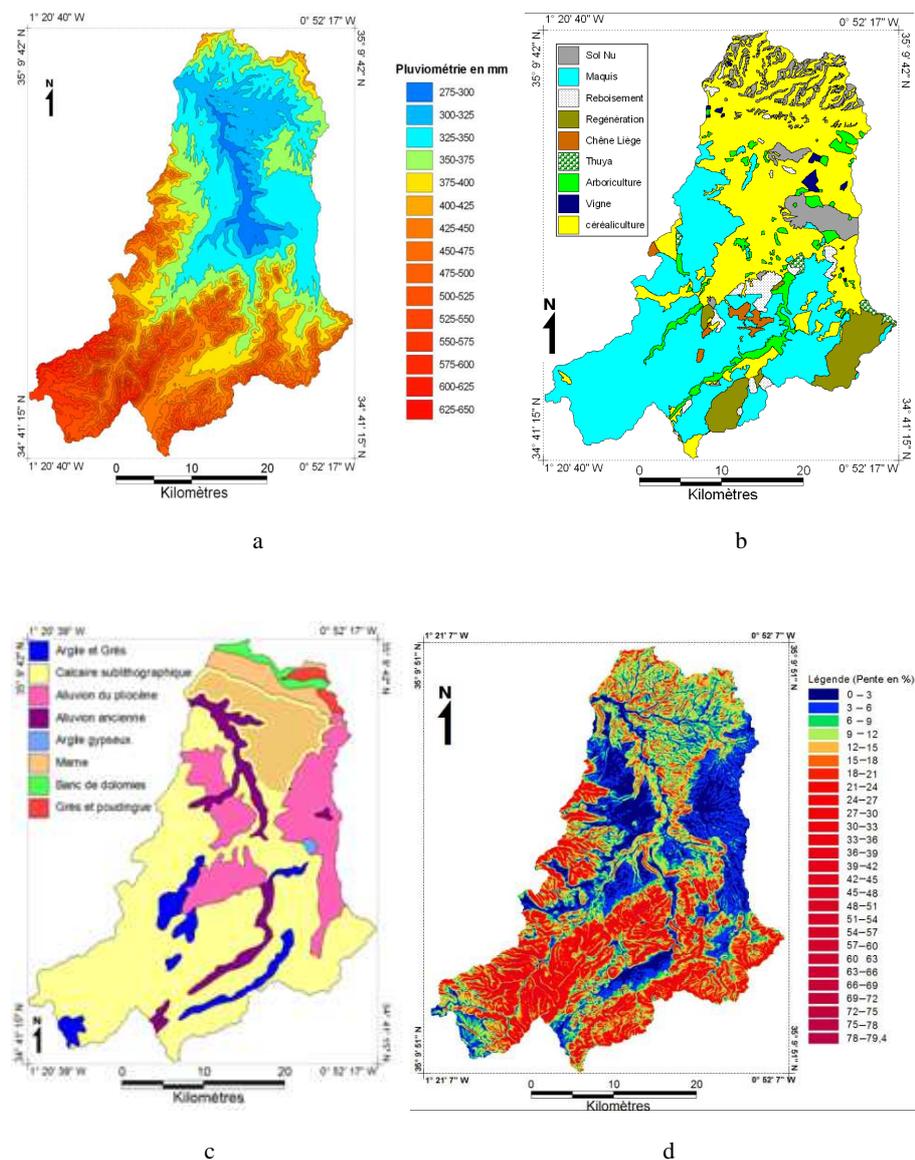


Fig. 6. Paramètres utilisés pour obtenir la carte à risque : a) pluviométrie, b) pentes, c) couvert végétal, d) lithologie

## 2. Combinaison des facteurs

La combinaison des facteurs d'érosion hydrique est réalisée en deux étapes pour tenir compte de l'effet particulier de la lithologie faisant apparaître le sol comme élément à double implication à la fois résultat de la dégradation et cause d'atténuation ou de dilatation. Nous calculons pour cela un premier indice tenant compte des effets des trois paramètres externes au sol (couvert végétal, précipitation et pente) sur la vulnérabilité par la formule :

$$IV_1 = \sum \sum p_i f_{ij} \quad (1)$$

Dans cette formule :

- $p_i$  représente la pondération du paramètre (i), avec i variant de 1 à 3 (précipitation, végétation, pente)
- $f_{ij}$  est l'implication de la classe (j) pour le facteur  $f_i$ .

Les valeurs de pondération  $p_i$  peuvent influencer sur les choix d'aménagement anti érosif. Pour fixer ces valeurs, nous nous sommes inspirés de la connaissance du terrain et des principes généraux utilisés par Le Bissonnais (Le Bissonnais *et al.*, 2004). La pondération la plus forte est attribuée au facteur « couvert végétal », considéré comme le facteur dominant et la plus faible à la précipitation car nous ne disposons pas des intensités des pluies, mais seulement des hauteurs moyennes annuelles. La Fig. 7 montre les valeurs de pondération des facteurs.

| couvert végétal |              | pente  |              | précipitations |              |
|-----------------|--------------|--------|--------------|----------------|--------------|
| poids           | 3            | poids  | 2            | poids          | 1            |
| classe          | contribution | classe | contribution | classe         | contribution |
| 1               | 4            | 1      | 1            | 1              | 1            |
| 2               | 3            | 2      | 2            | 2              | 2            |
| 3               | 2            | 3      | 3            | 3              | 3            |
| 4               | 1            | 4      | 4            | 4              | 4            |

Fig. 7. Poids des facteurs et contributions des classes

Nous calculons par la suite l'indice de vulnérabilité pour chaque classe de sols (j)  $IVS_j$  par la formule :

$$IVS_j = p_j IV_1 \quad (2)$$

Dans cette formule,  $p_j$  représente l'effet de dilatation ou d'atténuation de l'érosion.

### 3. Découpage de l'espace de travail

L'étude de la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique suppose, comme nous l'avons précisé plus haut, la combinaison de plusieurs facteurs ; rappelons que nous nous sommes limités ici à trois facteurs externes dominant en plus de la lithologie à la fois effet et cause. La valeur des paramètres d'estimation des facteurs est obtenue à partir de mesures (en station pour la pluviométrie), de calculs à partir d'un modèle numérique (cas de la pente) ou de traitements spécifiques de l'imagerie satellitaire (extraction du couvert végétal). Des méthodes d'interpolation spécifiques permettent ensuite de déterminer les valeurs des paramètres en dehors des points de mesure c'est-à-dire pour l'ensemble de la zone étudiée. Afin d'homogénéiser ces déterminations et faciliter la combinaison des paramètres, un découpage de l'espace en mailles régulières nous semble le plus approprié. Nous nous inspirons pour cela des travaux d' Abdellaoui *et al.* (2010), Abdellaoui *et al.* (2012), Grecu (2002) et Huzui *et al.* (2011). Dans ce type de découpage de l'espace, le choix de la taille de la maille est toujours le résultat d'un compromis entre plusieurs contraintes notamment la finesse d'analyse et les échelles d'estimation des facteurs (évidemment différentes à cause du nombre de point de mesures, des méthodes d'interpolation etc.). Notons que plus la taille de la maille est petite, plus la finesse d'analyse est grande et donc des interventions plus ciblées ; cependant, une trop petite taille peut perdre toute signification réelle de l'estimation des valeurs des paramètres ; une trop grande taille peut conduire à ignorer certains effets locaux des facteurs (Fig. 8, 9 et 10).

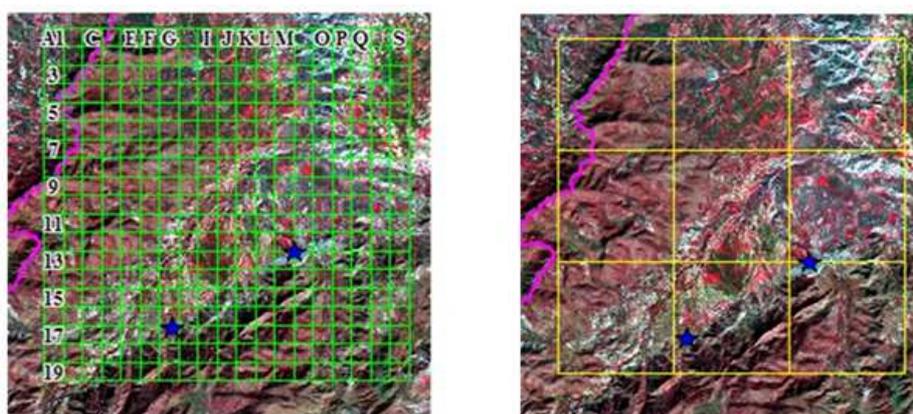


Fig. 8. Choix de la maille et estimation de la couverture végétale à partir d'image satellitaire

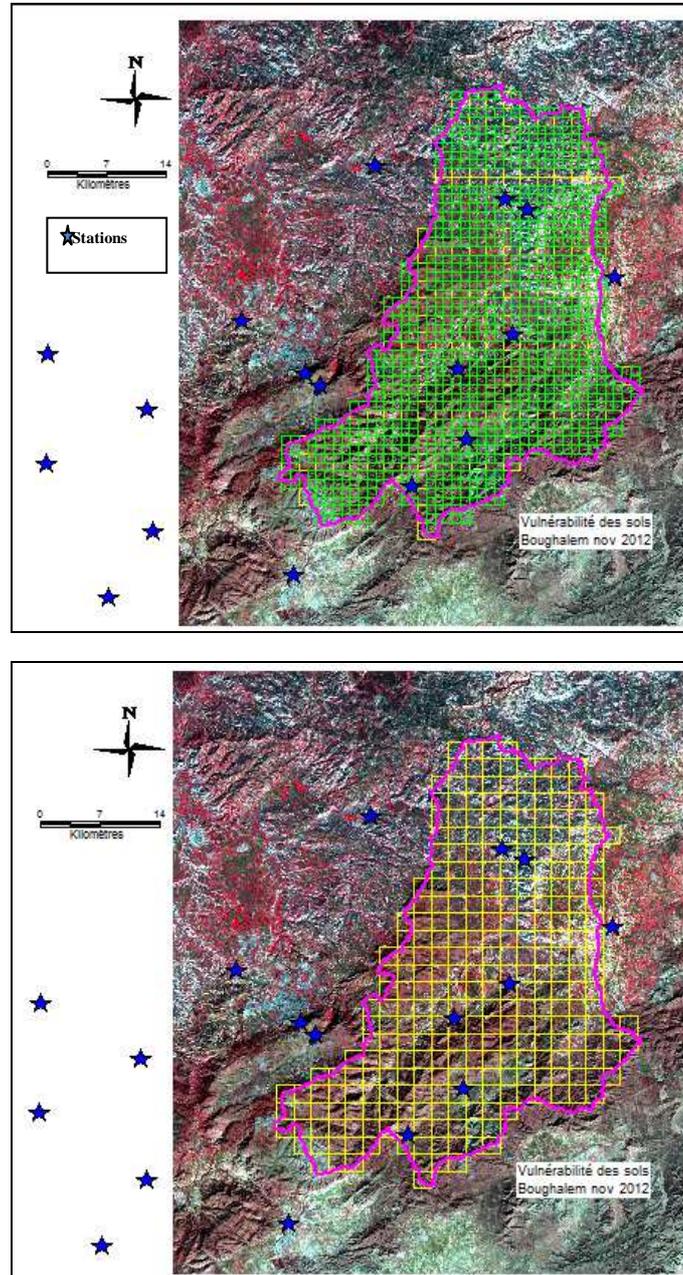


Fig. 9. Application de la grille sur l'ensemble du bassin versant (à gauche : maille de 1km de côté, à droite : maille de 6,25 km de côté)

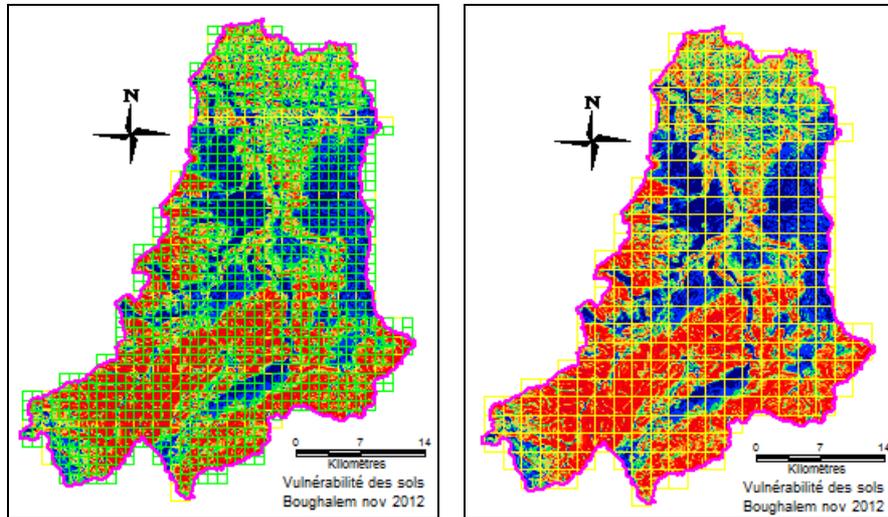


Fig. 10. Découpage de la carte des pentes : la précision de la grille d'analyse est en fonction de la taille de la maille (à gauche : maille de 1km de côté, à droite : maille de 6,25 km de côté)

De façon concrète, le choix de la dimension de la maille dépend de plusieurs paramètres qui doivent conduire à apprécier et estimer au mieux les facteurs intervenant dans l'analyse du phénomène de dégradation des sols, à savoir la lithologie, les précipitations, la végétation et la pente. Parmi ces paramètres :

- Les méthodes d'extrapolation ou de classification des facteurs à partir des valeurs acquises : les valeurs de précipitation sont extrapolées à partir des valeurs relevées sur un nombre réduit de stations ; les valeurs de pente sont obtenues à partir des courbes de niveaux puis une classification (donc un regroupement) en un nombre réduit de classes ; la végétation est obtenue à partir du calcul du NDVI et une classification de ces valeurs.
- La configuration du terrain et son degré d'homogénéité spatiale relativement aux facteurs : la Fig. 11 nous montre que les facteurs pente et précipitations (Fig. 11b et Fig. 11c) sont relativement homogènes du point de vue spatial (exception faite de la partie Nord plus hétérogène).
- La part des mailles hétérogènes ou ambiguës par rapport au nombre total de mailles couvrant la région d'étude. Une maille sera dite hétérogène ou ambiguë dans les deux cas suivants : i) elle comporte plusieurs classes pour un facteur donné ; ii) elle comporte deux classes de couverture (dans la maille) égale à une valeur voisine de 50% ; c'est le cas des mailles mises en évidence en rouge sur la figure (Fig. 11.d).
- Enfin le compromis entre la taille de la maille et le nombre total de mailles qui influe directement sur la préparation de la base de données.

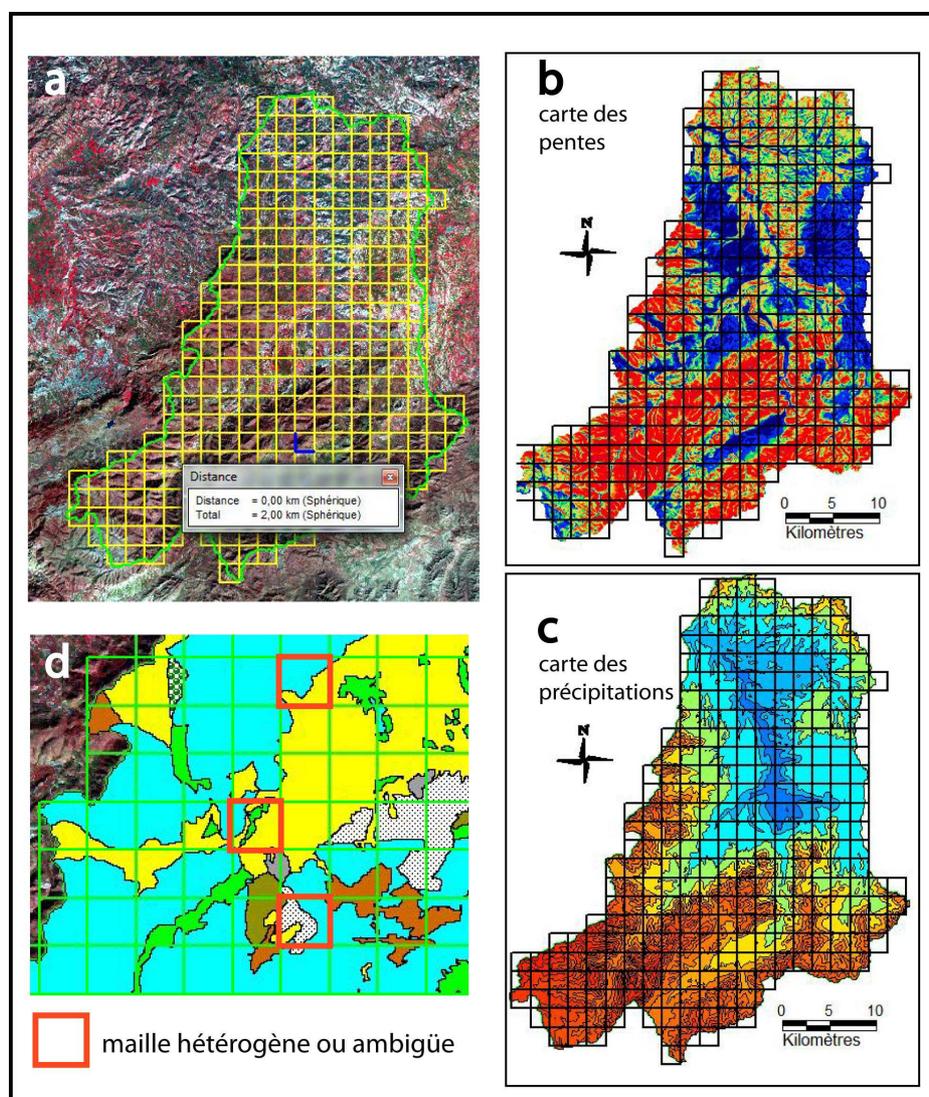


Fig. 11. Représentation spatiale des facteurs pente et précipitations

À partir de ces considérations, nous avons opté pour le choix d'une maille régulière de 2 km de côté ; ceci est montré sur la Fig. 11a. La grille couvrant la région d'étude comporte ainsi un total de 301 cellules. Dans cette configuration, le pourcentage de cellules hétérogènes ou ambiguës est alors de : 7% pour le facteur pente, 7,6% pour le facteur précipitations et 14,9% pour le facteur végétation obtenu à partir de l'imagerie satellitale, donc sur une couverture plus grande et une résolution meilleure (28,5 m).

Pour le couvert végétal, on a une image satellitale Landsat de 30 m de résolution, donc fournissant des informations sur l'équivalent d'un maillage à 30 m sans méthode d'interpolation. Lors de l'utilisation d'une grande maille, les petites surfaces de végétation sont ignorées et on a convenu d'affecter 1 pixel au thème ayant une couverture > 50%. Une grille fine est plus intéressante car elle nous permet une meilleure appréciation du facteur.

Pour le thème « précipitation », les deux dimensions de maille donnent la même appréciation car la valeur calculée est issue d'une méthode d'interpolation sur un même ensemble de points pivots (stations de mesures).

L'estimation des classes de pente est également issue d'une méthode d'interpolation ; une maille plus fine n'améliore pas l'appréciation.

Donc pour la majorité des facteurs (lithologie, pente et précipitation), l'utilisation d'une maille plus fine n'ajoute rien à la précision d'analyse.

Nous choisissons pour la présente étude un découpage de l'espace en mailles carrées de 2 km de côté résultant d'un bon compromis ente les échelles d'estimation des paramètres et les schémas d'aménagement et de lutte contre l'érosion pratiqués sur des régions semblables à la zone d'étude. La Fig. 12 donne, à titre d'exemple, un aperçu du découpage et de l'affectation des valeurs du facteur « couvert végétal ».

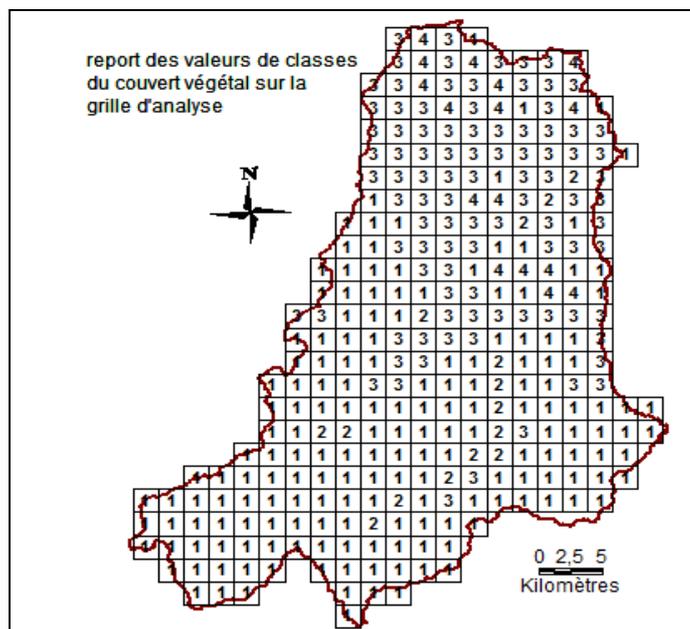


Fig. 12. Exemple de report des valeurs des classes sur la grille d'analyse  
(Classe 1 : couvert végétal non protecteur ; Classe 2 : couvert végétal peu protecteur ; Classe 3 : couvert végétal moyennement protecteur ; Classe 4 : couvert végétal protecteur)

## RESULTATS ET DISCUSSION

L'intégration des différentes variables dans un système d'information géographique (sous logiciel MapInfo 7.8) a permis de produire les diverses cartes thématiques correspondant aux divers facteurs étudiés (Fig. 6). Le découpage par maille du bassin, nous a permis d'étudier l'impact des différents facteurs sur la vulnérabilité des sols (Fig. 13, 14, 15 et 16) et d'obtenir une carte de vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique (Fig. 17).

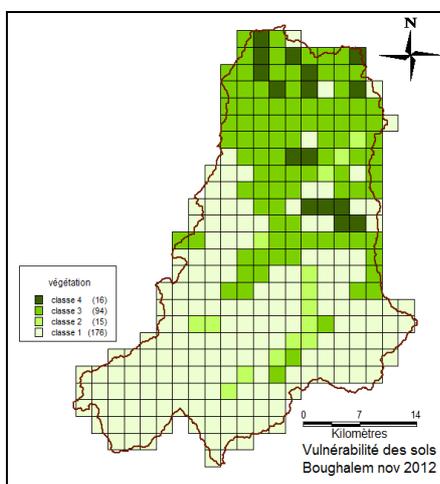


Fig. 13. Impact du couvert végétal sur la vulnérabilité

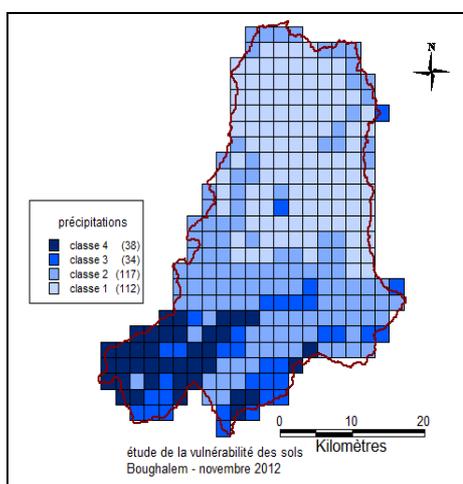


Fig. 14. Impact de la précipitation sur la vulnérabilité

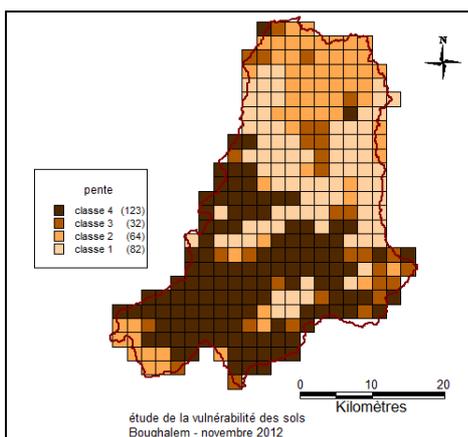


Fig. 15. Impact de la pente sur la vulnérabilité

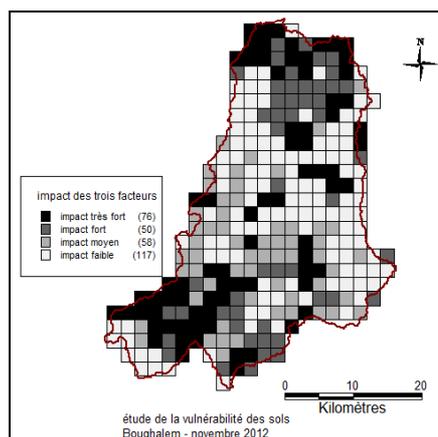


Fig. 16. Impact des trois paramètres (végétation, pente, précipitation) sur la vulnérabilité

Les *Fig. 13, 14 et 15* font ressortir, sur le bassin, deux parties séparées par une ligne NO-SE ; les deux parties occupent respectivement 47% (partie nord) et 53% du bassin (partie sud). La *Fig. n° 13* concerne l'impact du couvert végétal sur la vulnérabilité des sols à l'érosion. La partie sud est quasiment homogène avec une prédominance de la classe 1 (environ 79%) c'est-à-dire un couvert végétal protecteur, ce qui conduit à une vulnérabilité faible si l'on ne considère que le facteur « couvert végétal ». La partie nord du bassin est plutôt hétérogène avec tout de même une prédominance de la classe 3 (65%) ; nous sommes donc en présence d'un espace fortement vulnérable ; les autres classes (1, 2 et 4) se retrouvent de façon aléatoire.

La *Fig. 14* concerne l'impact des précipitations sur la vulnérabilité. L'hétérogénéité apparaît ici sur la partie Sud ; la partie Nord, dominée par la classe 1 (cette classe occupant 87% de la partie Nord) a une vulnérabilité faible pour le facteur climat. Sur la partie Sud toutes les classes sont présentes bien que la classe 1 n'occupe que 13%. Nous sommes donc en présence d'un espace à la fois hétérogène avec une érosivité des pluies forte à moyenne.

La *Fig. 15* montre l'impact du facteur pente. Pour ce facteur, les deux parties paraissent hétérogènes. Toutefois, la classe 4 (pentes fortes, et donc vulnérabilité, forte) se concentre dans la partie sud du bassin versant. Les pentes modérées ainsi que les pentes faibles (classes 1 et 2) sont réparties sur l'ensemble du bassin en étant plus présentes sur la partie Nord.

La *Fig. 16* montre l'impact combiné des trois facteurs végétation, pente et climat sur la vulnérabilité à l'érosion. La vulnérabilité faible semble apparaître sur la ligne de séparation des deux parties du bassin. Les mailles correspondantes à une très forte vulnérabilité occupent 25% de la totalité du bassin.

La *Fig. 17* représente la carte de la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique. Une forte vulnérabilité correspond à un espace nu (ou faiblement couvert), de pente et d'érosivité fortes et de sol peu ou pas résistant. Cette figure montre que la partie Nord est fortement vulnérable à l'érosion hydrique. Sur la partie sud, toutes les classes de vulnérabilité apparaissent. Les programmes de lutte anti érosive doivent différer sur les deux parties du bassin.

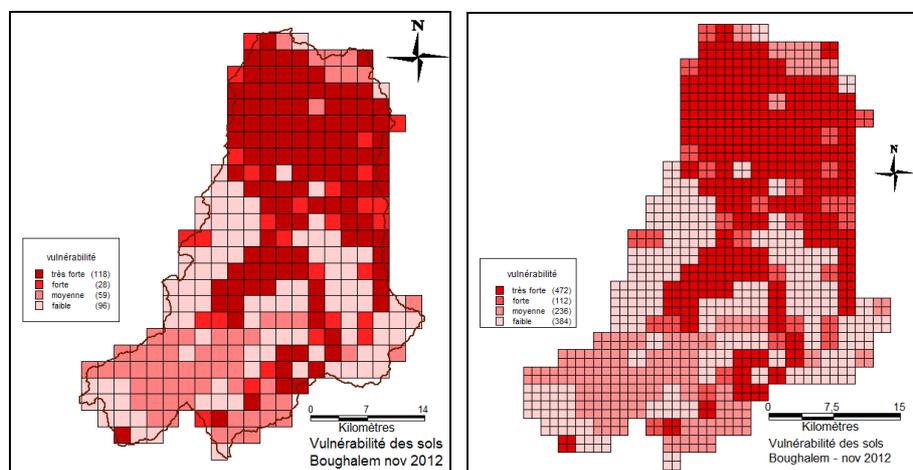


Fig. 17. Carte de vulnérabilité des sols ; la maille choisie permet de minimiser le nombre de cellules tout en gardant une bonne précision.

## CONCLUSION

Pour élaborer la carte de la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique nous avons pris en compte les trois facteurs dominants (climat, pente et couvert végétal) ; ceci nous a permis d'estimer l'agressivité résultante en affectant un poids spécifique à chacun des trois facteurs en nous inspirant de la littérature scientifique spécialisée et en consultant les experts de terrain travaillant sur le bassin versant de l'Isser. L'introduction du facteur lithologie nous a conduit par la suite à déterminer des classes de vulnérabilité en fonction de la capacité du sol à résister à l'agressivité des facteurs.

Pour la présente étude, nous avons opté pour un découpage régulier de l'espace en mailles carrées. Une solution SIG sous MapInfo a été réalisée pour intégrer l'ensemble des informations et permettre un échange facile de données et de résultats entre les divers opérateurs.

La carte finale de vulnérabilité permet de mettre en évidence trois grandes régions de vulnérabilités respectives : i) forte à moyenne principalement localisée au nord du bassin mais s'étendant localement vers le centre ou le sud ; ii) faible, essentiellement sur une partie du sud du bassin et iii) très faible ou nulle principalement au centre et au sud du bassin versant.

L'étude d'un phénomène tel que la dégradation des sols fait intervenir divers paramètres (naturels ou anthropiques) dont la représentation dans l'espace dépend à la fois de la mesure (à tout point de l'espace dans le cas de l'image, ou en des points particuliers dans le cas de stations d'acquisition) et de l'estimation finale généralement en classes de valeurs. Dès lors, les régions

d'estimation des facteurs sont différentes et donc non superposables. Leur combinaison devient ainsi problématique. Pour remédier à cet inconvénient, quatre solutions sont envisageables :

- Ramener l'estimation des facteurs à un découpage administratif genre cadastral (qui n'est pas toujours disponible ou à jour dans les pays en développement) ou communal (ce découpage n'est pas suffisamment précis, les communes rurales étant de manière générale de grande superficie) ;
- Ramener cette estimation à un découpage en « sous régions naturelles » dans le cas où une définition en sous régions suffisamment petite et homogène est possible ;
- Ramener cette estimation au découpage induit par la classification des valeurs du facteur connu avec la meilleure précision ; si on utilise l'image satellitale pour un facteur, cela suppose que l'on devrait utiliser un découpage au pixel (30m pour l'image Landsat) ; ce découpage nous paraît trop fin et non adapté à l'estimation des autres facteurs prédominants (pluviométrie et pente) ;
- Définir un découpage régulier indépendant des facteurs et des définitions purement administratives mais tenant compte d'un compromis de précision d'estimation des facteurs intervenant dans l'étude du phénomène étudié ; c'est ce dernier découpage que nous avons adopté.

La solution SIG mise en place a pris en compte les principaux facteurs intervenant dans la dégradation des sols dans la région d'étude ; elle offre d'autres possibilités en permettant :

- des extensions thématiques : prise en compte d'autres facteurs, tels que socioéconomiques (qualité et contraintes de vie des agriculteurs, modes d'utilisation du sol) ;
- ou spatiales (autres finesses du découpage, maille de côté plus petit si les contraintes d'aménagement l'exigent ou si les procédés d'acquisition des informations de base le permettent).

## BIBLIOGRAPHIE

- Abdellaoui, A., L. Vişan, Ileana Pătru Stupariu (2010), „Étude de la viabilité du paysage par analyse de grille dans la région Sous Carpatique de la Vallée de Prahova (Roumanie)”, *Revista de geomorfologie*, vol. 12, 2010, 81-90.
- Abdellaoui, A., M. Boughalem (2012), „SIG, image satellitaire et risques en zones urbaines et péri urbaines ; aspects méthodologiques”, *Colloque international « Géomatique et gestion des Risques naturels »*, 6, 7 et 8 mars, Oujda, Maroc, Sous Presse.
- Bannari, A., D. Haboudane, F. Bonn (1999), „Potentiel des mesures multispectrales pour la distinction entre les résidus de cultures et les sols nus sous-jacents”, *21<sup>st</sup> Canadian Symposium on Remote Sensing* (June 1999, Ottawa, Ontario, Canada), 359-366, Université d'Ottawa, Canada.

- Benchetrit, M., (1972), *L'érosion actuelle et ses conséquences sur l'aménagement en Algérie*, Paris, PFU, 126 p.
- Boughalem, M., M. Mazour, M. Zaagane (2012), Utilisation des SIG pour l'aménagement du bassin versant de l'Isser (Nord Ouest de l'Algérie). Lutte antiérosive, réhabilitation des sols tropicaux et protection contre les pluies exceptionnelles, IRD Editions Marseille, 2012, 79-90.
- Boukheir, R., M.-C. Girard, A. Shaban, M. Khawlie, G. Faour, T. Darwich (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, 79-90.
- Cyr, L., F. Bonn, A. PESANT (1995), „Vegetation Indices Derived from Remote Sensing for an Estimation of Soil Protection Against Water Erosion”; *Ecol. Modelling*, 79, 277-285.
- Greco, F. (2002), „Risk-Prone Lands in Hilly Regions: Mapping Stages”, *Applied Geomorphology: Theory and Practice*, Edited Alisson, John Wiley & Sons, Ltd, 49-64.
- Heusch, B. (1970), „Estimation et contrôle de l'érosion hydrique”, *Soc. Sc. Nat. Phys. Maroc ; special*, 41-54.
- Huzui, A. H., A. Abdellaoui, Pătru Stupariu, Ileana Georgeta (2011), „Analyzing Urban Dynamics Using Multi-Temporal Satellite Images in the Case of a Mountain Area, Sinaia (Romania)”, *International Journal of Digital Earth*, pp. 1-17, URL: <http://mc.manuscriptcentral.com/>, 1-29.
- Internationally Agreed Glossary of Basic Terms Related to Disaster Management, United Nation, Departement of humanitarian Affair, IDNDR, DHA, Geneva, 83 p.
- Le Bissonnais, Y., N. Dubreuil, J. Daroussin, M. Gorce (2004), „Modélisation et cartographie de l'aléa d'érosion des sols à l'échelle régionale. Exemple du département de l'Aisne”, *Étude et Gestion des Sols*, vol. 11, 3, 307-321.
- Mazour, M., (2004), „Etude des facteurs de risque du ruissellement et de l'érosion en nappe et conservation de l'eau et du sol dans le bassin versant de l'Isser – Tlemcen”, *Thèse de Doctorat D'Etat*, Université de Tlemcen, 184, 131 pp.
- Morsli, B., M. Mazour, N. Mededjel, E. Roose (2004), „Influence de l'utilisation des terres sur les risques de ruissellement et de l'érosion sur les versants semi-arides du nord-ouest de l'Algérie”, *Sécheresse*, vol. 15, no 1, 96-104.
- Remini, B. (2000), L'envasement des barrages en Bull Réseau érosion, vol. 20, 165-171.
- Roose, E. (1994), „Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES)”, *Bulletin pédologique*, FAO, 420 p.
- Roose, E., M. Arabi, K. Brahamia, R. Chebbani, M. Mazour, B. Morsli (1996), „Recherches sur la réduction des risques d'érosion par la GCES en moyenne montagne méditerranéenne algérienne”, *Ch. Orstom, Seri. Pédol.*, vol XXXVIII, no 2, 289-307.
- Talbi, O., A. Mendas, A., BENSALIM, M. A., TRACHE (2002), „Mise en place d'un système d'information géographique pour le suivi et la quantification de l'érosion hydrique: application au bassin versant de l'Isser (Tlemcen)”, *Sécheresse*, vol. 13, no 3, 175-179.