

# Prédiction de l'érosion ravinante en Algérie : vers une nouvelle approche probabiliste à l'aide de données multisources.

M. Daoudi<sup>1</sup>, M. Salmon<sup>1</sup>, O. Dewitte<sup>2</sup>, P. Gérard<sup>3</sup>, A. Abdellaoui<sup>4</sup>, A. Ozer<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Géomorphologie et Télédétection, Département de Géographie, Faculté des Sciences, Université de Liège, Allée du 6 Août, 2-B11, Liège (Belgique), [madaoudi@yahoo.fr](mailto:madaoudi@yahoo.fr), [msalmon@ulg.ac.be](mailto:msalmon@ulg.ac.be), [aozer@ulg.ac.be](mailto:aozer@ulg.ac.be)

<sup>2</sup> European Commission - Joint Research Centre, Institute for Environment & Sustainability, Land Management & Natural Hazards Unit, Via E. Fermi, 2749 - TP 280 I-21027 Ispra (VA), Italy, [olivier.dewitte@jrc.ec.europa.eu](mailto:olivier.dewitte@jrc.ec.europa.eu)

<sup>3</sup> Département de mathématique, Faculté des Sciences, Université de Liège, Belgique, [paul.gerard@ulg.ac.be](mailto:paul.gerard@ulg.ac.be)

<sup>4</sup> Département de Géographie Humaine, Université de Paris 12, France, [abdellaoui@univ-paris12.fr](mailto:abdellaoui@univ-paris12.fr)

**Résumé** — Pour faire face à la complexité de l'érosion ravinante dans la région tellienne, le présent travail propose l'utilisation d'une approche probabiliste basée sur des données multisources dont des images de télédétection. Un modèle de régression logistique a été élaboré pour la prédiction du processus de ravinement dans le bassin versant de l'oued Isser. Dans un premier temps, il expose les facteurs contrôlant l'érosion linéaire et dans un deuxième temps, il génère des cartes prédictives des zones propices au ravinement.

**Mots clefs** — Ravinement, régression logistique, données multisources.

## I. Introduction

Les problèmes concernant l'érosion des sols sont largement répandus dans les pays du bassin de la Méditerranée. L'érosion ravinante est un risque sérieux et aggravé pour certaines régions, par divers facteurs tels que le climat, la lithologie, les caractéristiques des sols et l'utilisation des terres [1], [21], [22]. Elle représente une source importante de sédiments dans les domaines semi-arides et arides, contribuant en moyenne pour 60 % de leur production par l'érosion hydrique [2].

Le processus de ravinement est un phénomène complexe qui touche particulièrement le nord de l'Algérie et qui aggrave l'envasement des réservoirs d'eau, diminue la potentialité des sols et dégrade les infrastructures (routes, pistes et ports en aval). La prévention et la lutte contre l'érosion en Algérie est devenue une préoccupation prioritaire pour de nombreux chercheurs et les gestionnaires de plusieurs organismes nationaux. Les enjeux sont de protéger les populations et les infrastructures principalement menacées par l'envasement rapide des réservoirs d'eau et les pertes en surfaces cultivables [24].

En Algérie, il n'existe qu'un très petit nombre de travaux sur le ravinement qui concerne la totalité du territoire. Pour évaluer le processus de ravinement de manière quantitative, on étudie traditionnellement les facteurs environnementaux. On a souvent accès à des données cartographiques de présence « 1 » / absence « 0 » de ravinement, associées à des données du milieu physique.

Parmi les techniques de détermination directe des relations entre la présence / absence du processus de ravinement et les variables environnementales, nous pouvons mentionner le modèle de régression logistique, actuellement le plus utilisé [1], [3], [4], [5], [6], [7], [25]. Il s'agit d'une technique paramétrique, flexible qui permet d'étudier des variables

qualitatives et quantitatives séparément ou simultanément, et de les traiter facilement avec des logiciels de statistique. Le traitement des données que nous avons collectées dans le cadre de nos recherches s'appuie fortement sur le modèle de régression logistique [29]. Ce modèle n'a pas encore été appliqué par d'autres chercheurs à l'échelle des bassins hydrologiques du sud de la Méditerranée.

## II. Matériels et méthode

### II.1. Secteur d'étude

Le présent travail est mené sur le bassin versant de l'oued Isser. Il est encadré par quatre bassins : le bassin côtier algérois au nord-est et à l'ouest, le bassin de Chellif au sud-ouest, le bassin de Chott Hodna au sud-est et le bassin de Soummam à l'est. Le bassin de l'Isser présente des ensembles naturels variés, avec une superficie totale est de 4149 km<sup>2</sup> soit 0,17 % de la superficie de l'Algérie.

La région étudiée fait partie de l'ensemble géologique de l'Atlas tellien, une zone plissée alpine de l'Afrique du Nord. L'étude géologique du bassin versant de l'oued Isser a mis en évidence une structure tectonique complexe, constituée par un empilement de nappes imbriquées, et déterminant chacune un domaine structural propre à lithologie variée.

L'analyse minéralogique par diffraction aux rayons X montrent que les types d'argiles sont constitués principalement de kaolinite, d'illite, de chlorite, de vermiculite et de smectite, dans des proportions relatives différentes qui favorisent l'érosion ravinante. Le bassin versant de l'oued Isser est soumis à un climat de type méditerranéen contrasté, avec une aridité estivale marquée et un hiver froid, présentant un régime pluviométrique fortement influencé par les orages. Ce régime présente une grande variabilité spatiotemporelle, caractérisée par un gradient positif des précipitations du sud au nord sur l'ensemble du bassin versant.

Le bassin versant de l'oued Isser est particulièrement confronté au problème de dégradation du sol, notamment par ravinement. Ce dernier y est très répandu et constitue un problème majeur qui se manifeste surtout dans la partie amont. Les figures 2 et 3 montrent à titre d'exemple dans la zone de Beni Slimane, la naissance d'une ravine suite au labour parallèle à la pente et une ravine liée à la présence d'une route. On notera aisément l'impact négatif de l'évolution de la ravine sur l'activité agricole.

Dans cette recherche, nous étudions un transect Nord-Sud

qui correspond à trois sous-bassins versants : oueds El Had « Tablat », Alayem « Beni Slimane » et Mohamed Ben Saad « Souagui » dont le choix est fait en raison des différences dans le potentiel naturel de leur paysage, d'un domaine bioclimatique varié entre le semi-aride et le sub-humide, d'un régime contrasté de pluies et irrégulières, le plus souvent orageux, et d'une lithologie tendre généralement marneuse. Le choix de ces zones-test répond également à quatre critères définis dans notre méthode d'approche : la représentativité, l'homogénéité, la disponibilité de données antérieures et enfin, l'accessibilité.

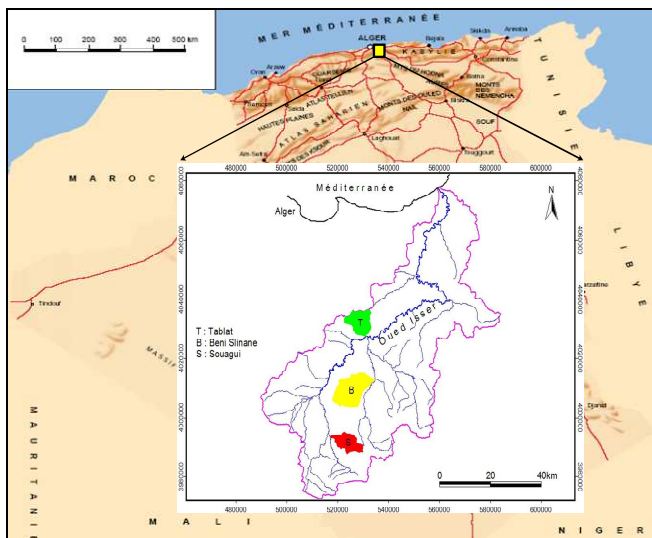


Fig.1 Localisation de la région d'étude

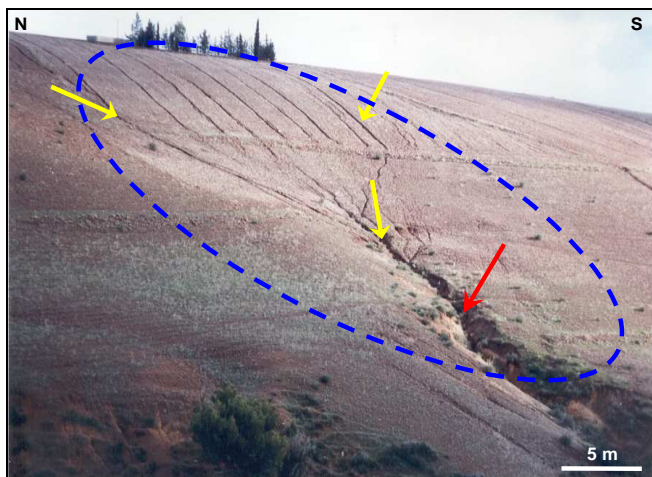


Fig.2 Impacts du ravinement sur les terres agricoles : naissance de ravines liées au labourage parallèle à la pente - Beni Slimane 2005

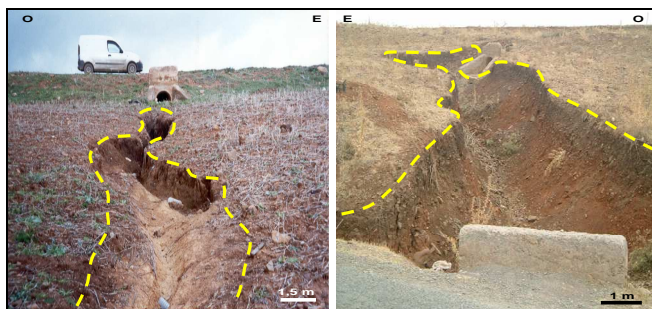


Fig.3 Ravine liée à la présence d'une route - Beni Slimane 2005

## II.2. Acquisition des données de base et calcul des variables spatiales utilisées pour la modélisation

L'acquisition de données multisources qui représente une collection des informations non redondantes est une étape fondamentale dans toutes les études environnementales. Les données, spatialement référencées agissent comme un modèle de la réalité. Leur fiabilité est essentielle pour la qualité des résultats [26], [27], [28].

Le choix des variables (facteurs) explicatives associées au ravinement est basé d'une part sur les composantes du milieu physique, c'est-à-dire le domaine du développement du processus de ravinement et d'autre part sur les interactions entre ces différentes composantes [31].

Trois types de données de base ont été exploitées pour générer l'ensemble des variables utilisées dans la prédiction du ravinement. Ces données sont de format vecteur et raster. Certains de ces facteurs sont extraits des cartes topographiques ou thématiques précédemment vectorisées : il s'agit des paramètres pente, orientation, altitude, courbure en profil, courbure en plan, lithologie, faille, morphopédologie, route et source. D'autres paramètres peuvent être estimés à partir des images satellitaires (SPOT-HRV 2007, TERRA-ASTER 2005, LANDSAT-ETM+ 2001, SPOT-HRV 1998 et LANDSAT-TM 1987) ou des photographies aériennes ; il s'agit de la couverture des sols et de la localisation des ravines [30]. Enfin d'autres facteurs seront déterminés directement à partir de mesures réalisées sur le terrain ; il s'agit de l'agressivité des précipitations.

La méthodologie proposée est schématisée dans la figure 4, qui synthétise les sources de données et paramètres que nous pouvons en extraire pour la présente étude. Cette approche consiste en l'intégration et la représentation des informations qualitatives et quantitatives nécessaires sur les trois sous-bassins versants étudiés.

## II.3. Echantillonnage : choix et caractérisation d'unité spatiale

Le choix d'unité spatiale appropriée dépend de plusieurs facteurs, notamment (i) le type de phénomène qui doit être étudié, (ii) l'échelle d'investigation, (iii) la qualité, la résolution, l'échelle et le type d'information requise, et (iv) la disponibilité des outils d'analyse de l'information [8], [9].

Pour réaliser cette étude, nous nous proposons de combiner un nombre important d'informations géographiques intimement liées à l'espace dont elles doivent donner la représentation la plus fidèle. Deux contraintes conditionnent cette exigence de représentativité : l'échantillonnage (découpage de l'espace) et le codage (passage de l'information géographique à la donnée à traiter et analyser). L'unité représente une surface qui maximise l'homogénéité interne, c'est-à-dire dans laquelle on ne distingue aucune variabilité. A chaque cellule de grille, est assignée une valeur pour chaque facteur.

Le processus de ravinement et les variables (facteurs) explicatives sont décrits dans l'unité spatiale. Cette méthode apporte beaucoup d'informations sur la structuration du terrain, mais elle offre peu de possibilités pour mesurer les relations fonctionnelles entre les facteurs. La prédiction de l'érosion ravinante implique de choisir au préalable une unité spatiale pour cartographier les zones à risque du processus de ravinement. Cette unité doit être identifiable sur

l'entièreté de la région étudiée et traiter comme un domaine spatialement homogène. Le choix de l'unité spatiale commune (grille de 20 m x 20 m) pour les trois sous-bassins versants est basé d'une part sur la résolution du Modèle Numérique de Terrain et d'autre part sur la surface minimale du bassin versant nécessaire pour assurer une unité de longueur de chenal [1], [10].

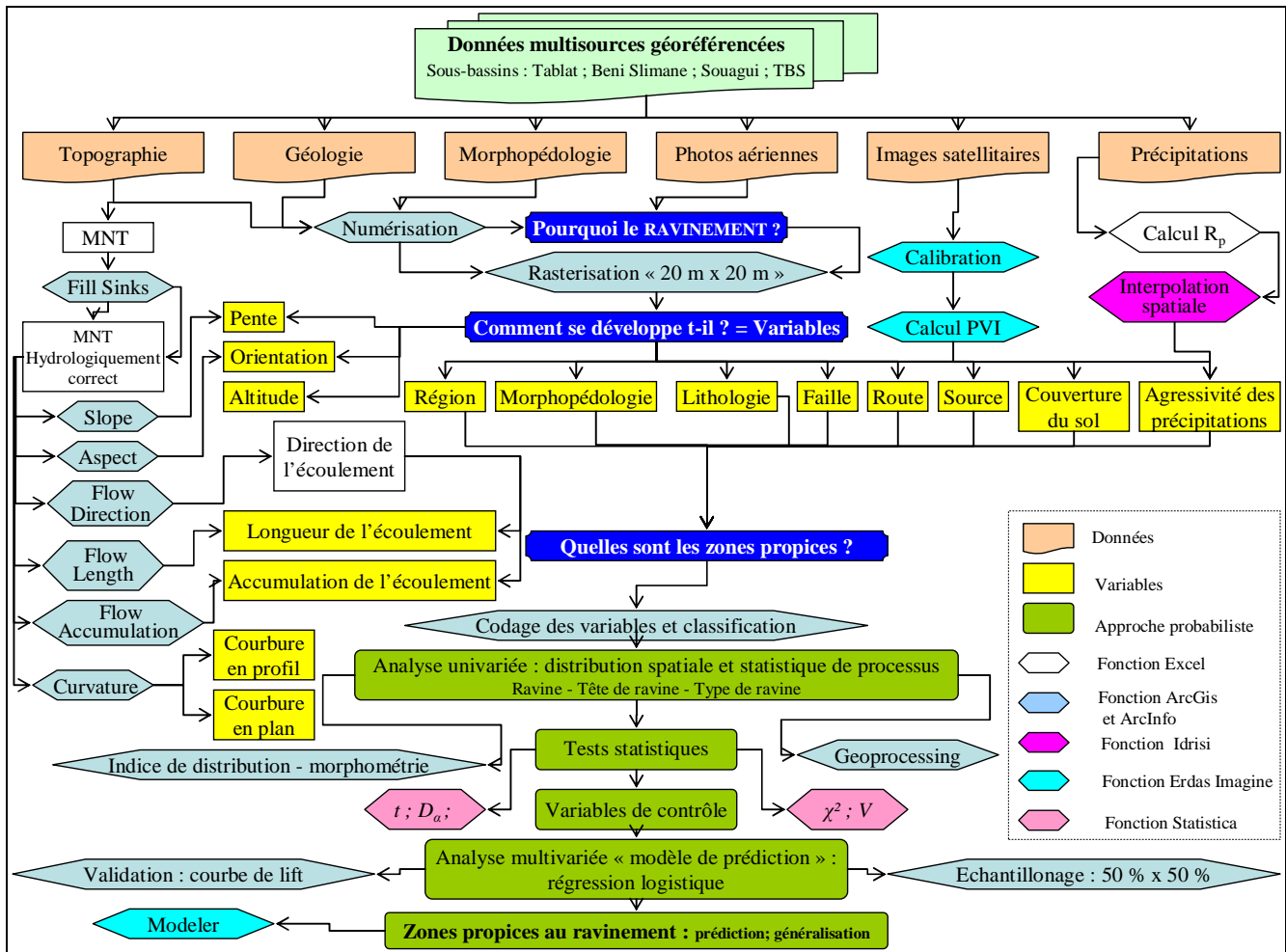


Fig.4 Organigramme de la méthodologie d'étude

#### II.4. Codage de l'information géographique

Le codage de l'information géographique présente un caractère fondamental dès que l'on met en œuvre des traitements permettant une transformation de critères dits qualitatifs vers des variables quantitatives structurées en un ordre hiérarchique logique [11]. Les données de grille ont été converties en format ASCII incluant les coordonnées UTM de chaque cellule, et importées vers le logiciel de statistique (Statistica) pour les traitements et l'analyse.

Dans cette recherche, tous les calculs ont été réalisés avec les logiciels : ArcView 3.2, ArcMap 9.2, ArcInfo, Erdas Imagine 8.7, Idrisi Kilimanjaro, Statistica 7.1, Surfer 7 et utilisés comme outils d'analyse et traitements des données multisources. Certaines des couches de données quantitatives sont exploitées sous la forme de classes afin de les rendre mieux interprétables : pente, orientation et indice de végétation. Les données ainsi acquises peuvent être combinées et utilisées de multiples façons qui seront détaillées dans la suite du présent travail.

### III. Résultats et discussion

#### III.1. Facteurs de contrôle

Pour déceler l'influence d'une variable sur le processus de ravinement, on teste si la distribution de la variable explicative considérée est la même dans le cas où  $R = 1$  (présence de ravinement) et dans le cas où  $R = 0$  (absence de ravinement).

L'analyse univariée « liaison facteur-processus » a mis en évidence l'influence d'une variable sur le processus de ravinement [31]. Une analyse statistique pour les différentes variables a été appliquée. Les variables quantitatives ont été soumises au test paramétrique t de Student et au test de Kolmogorov-Smirnov, tandis que le test de Chi carré ( $\chi^2$ ) a été utilisé pour les variables qualitatives, afin de déterminer les facteurs qui contrôlent le processus du ravinement.

Les résultats obtenus nous ont permis d'une part, de hiérarchiser les variables et de connaître leur degré d'influence, et d'autre part, d'identifier les unités ou les classes de chaque facteur les plus propices à l'érosion ravinante et qui nécessitent une priorité d'intervention pour réduire au maximum ce fléau.

Le calcul du coefficient  $V$  de Cramer permet de déterminer une hiérarchie des variables qui influencent le processus de ravinement à l'échelle des trois sous-bassins versants. Le coefficient de Cramer donne une bonne évaluation de l'association, indépendamment de la taille de l'échantillon. Il est actuellement le plus utilisé des indices d'association basés sur la distance de  $\chi^2$  [1], [6]. L'examen des liens entre les différentes variables et le processus de ravinement permet de mettre en lumière les interactions d'influence facteurs-processus.

Le coefficient de Cramer indique la force relative de chaque facteur sur le ravinement, il est compris entre 0 et 1. Nos résultats sont présentés sur la figure 5.

Pour la zone de Tablat, trois facteurs influent de façon particulière sur le ravinement : en premier lieu la lithologie puis l'altitude et enfin l'agressivité des précipitations.

Pour le sous-bassin de Beni Slimane deux facteurs ressortent : la morphopédologie et la lithologie.

Pour la zone de Souagui, également deux facteurs sont significatifs : l'agressivité des précipitations et l'altitude. Enfin pour les trois sous-bassins versants globalement : l'agressivité des précipitations et la lithologie sont présentés avec un coefficient relativement important alors que le coefficient concernant la pente est fort pour Tablat et Souagui et relativement faible pour Beni Slimane.

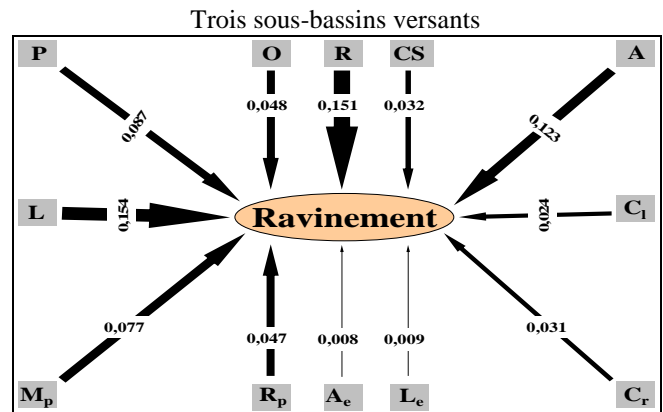
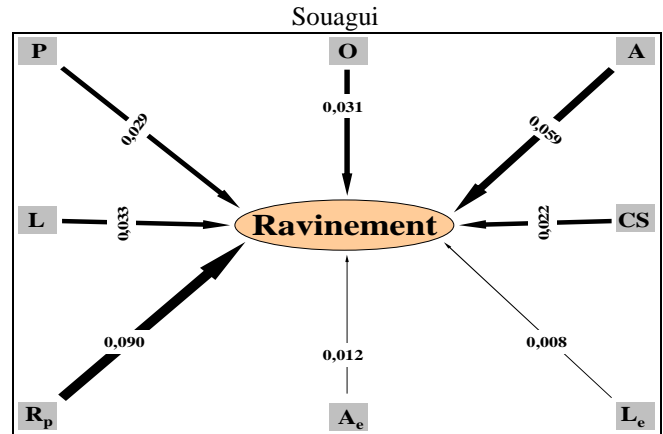
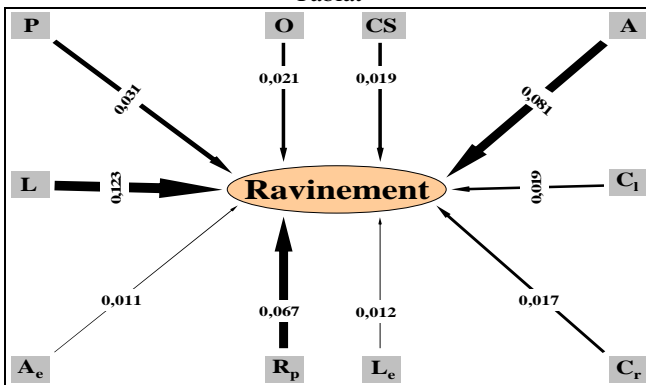


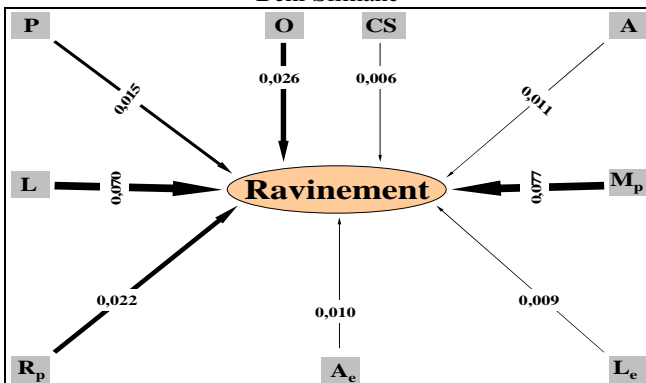
Fig.5 Hiérarchisation et degré d'influence des variables sur le processus de ravinement suivant le coefficient de Cramer

*P* : pente ; *O* : orientation ; *A* : altitude ; *C<sub>r</sub>* : courbure en profil ; *C<sub>1</sub>* : courbure en plan ; *L<sub>e</sub>* : longueur de l'écoulement ; *A<sub>e</sub>* : accumulation de l'écoulement ; *L* : lithologie ; *M<sub>p</sub>* : morphopédologie ; *CS* : couverture du sol ; *R<sub>p</sub>* : indice d'agressivité des précipitations ; *R* : région.

Tablat



Beni Slimane



### III.2. Prédiction du processus de ravinement par le modèle de régression logistique

Le modèle de Régression Logistique (RL) et les méthodes associées comme l'analyse probit, l'analyse discriminante, sont très utiles lorsque l'on veut prédire ou modéliser la liaison entre une variable nominale  $y$  (variable à expliquer) et un ensemble de  $n$  variables explicatives ( $x_1, x_2, \dots, x_p$ ). La régression logistique a été appliquée à plusieurs domaines [32] notamment dans les risques d'érosion, un des principaux champs d'application de ce modèle ; le ravinement [1], [4], [12]. La régression logistique suppose que la variable à expliquer  $y$  soit binaire (1/0, présence/absence de processus « RAVINEMENT »). La technique ne modélise pas directement la variable  $y$ , mais un rapport de probabilités associées aux valeurs de  $y$ . Il s'écrit alors :

$$\pi(x_1, \dots, x_p) = \frac{e^{(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p)}}{1 + e^{(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p)}} \quad (1)$$

Dans cette équation,  $\beta_0$  et les  $\beta_i$  ( $i=1, \dots, n$ ) sont les coefficients de la régression.

Le but de la régression logistique consiste alors à rechercher une estimation des paramètres  $\beta_i$  ( $i=0, \dots, p$ ) et à trouver le meilleur modèle convenable, afin de décrire le rapport entre la probabilité de présence et donc aussi celle d'absence du

processus de ravinement (variable dépendante) et un ensemble de variables indépendantes ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ). Le modèle de régression logistique est donc caractérisé par le fait que son *logit* est une fonction linéaire.

Le principe fondamental de la régression logistique est basé sur l'analyse multivariée, dans lequel un résultat mesuré avec des variables dichotomiques (telles que 0 et 1 ou absence et présence) est déterminé à partir d'un ou plusieurs facteurs indépendants.

L'ajustement d'un modèle de régression logistique, c'est estimer les coefficients  $\beta_0$  et  $\beta_i$  du modèle sur base d'un échantillon de taille  $n$ . Pour cela, on utilise la méthode du maximum de vraisemblance qui vise à fournir une estimation des paramètres qui maximise la probabilité d'obtenir les valeurs réellement observées sur l'échantillon [6], [9].

L'application du modèle de régression logistique permet de prendre en compte les variables significatives, produites des équations qui calculent la probabilité  $\pi$  de l'existence de ravinement.

L'équation du modèle :

$$\text{logit}(\pi) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p \quad (2)$$

En prenant l'exponentielle de chaque membre de l'équation (2), on obtient l'équation (1). Elle exprime la probabilité  $\pi$  en fonction des variables explicatives. Si le coefficient de régression  $\beta_i$  qui accompagne une variable, prend une valeur positive, cela signifie que cette variable contribue à augmenter la probabilité du processus de ravinement, lorsqu'elle augmente ; inversement, si le coefficient de la régression est négatif, la probabilité de ravinement diminue lorsque la variable augmente.

### III.3. Validation opérationnelle du modèle

La validation du modèle de régression logistique est graphiquement représentée sur une courbe de Lift Cette courbe fournit une synthèse visuelle de l'information apportée par un modèle statistique dans la prévision d'une variable sortie binaire. La courbe de Lift indique dans un repère cartésien, pour chaque pourcentage  $x$ , le rapport entre d'une part la proportion des zones de ravinement parmi les  $x$  % de zones où le processus est jugé le plus probable par le modèle, et d'autre part la proportion des zones de ravinement dans l'ensemble de toutes les zones. Plus précisément, la courbe synthétise les gains auxquels on peut s'attendre en utilisant le modèle prédictif respectif, par rapport à l'utilisation de l'information de référence uniquement [13], [14].

### III.4. Cartographie de la prédiction du processus de ravinement

L'application de l'analyse multivariée par la combinaison de plusieurs variables (Fig.6) nous a permis de comprendre que l'érosion ravinante, d'une manière générale, augmente du nord au sud. Les résultats des courbes de Lift nous permettent d'affirmer que le modèle offre la meilleure prédiction. Nous l'utilisons pour éditer les cartes des zones propices au ravinement pour nos trois zones d'étude. Les extraits d'images satellitaires haute résolution fournies par Google Earth 2008, présentés à la figure 7 et qui sont localisés sur chacun des trois sous-bassins versants (Fig. 8 « exemple ») illustrent la fiabilité du modèle.

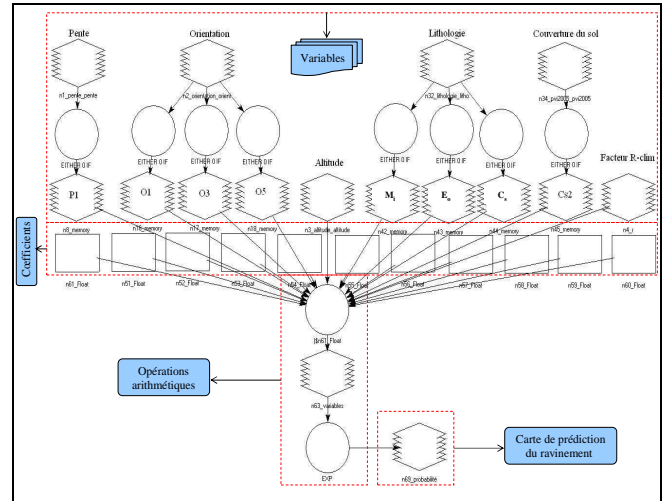


Fig.6 Exemple d'un modèle de calcul de la probabilité du ravinement

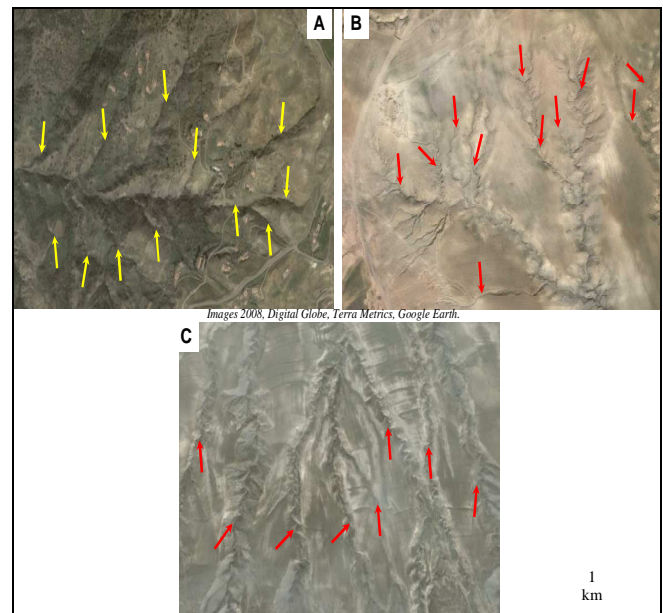


Fig.7 Extraits d'images satellitaires sur des zones de prédiction élevée de ravinement dans les trois sous-bassins versants

Les résultats obtenus sont illustrés sous forme de cartes de prédiction spatiale en quatre classes de probabilité qui varient entre 0 et 1. Ces cartes ont été réalisées suivant une classification par des intervalles égaux : très faible « 0-25 % », faible « 25-50 », moyenne « 50-75 » et élevée « 75-100 » basées sur les histogrammes de fréquence [1], [7]. L'examen des cartes de synthèse fait ressortir une distribution spatiale inégale des zones propices au ravinement dans les trois sous-bassins versants, qui résulte de l'interaction probable entre les différents facteurs qui contrôlent le processus d'érosion ravinante.

Le sous-bassin versant de l'oued Mohamed Ben Saad - Souagui présente une répartition différente, cette zone apparaît comme la plus menacée des trois sous-bassins versants, la figure 8 confirme ce dernier résultat. Il ressort de la figure 8 une prédominance de la classe élevée de probabilité, qui représente la moitié (50 %) de la superficie du sous-bassin versant. 12 % des terrains sont moyennement propices au ravinement. Le reste de la superficie (38 %) est réparti entre

les classes faibles et très faibles. En amont du sous-bassin de Souagui (Djebels Saraouet, Tourba et Chaaba), la concentration des eaux accumulées à l'occasion des fortes intensités de précipitations, sur des sols nus, contribue à la formation et au développement des ravines. La nature tendre de la lithologie (marnes) et certaines caractéristiques des matériaux argileux, en plus de la déclivité de la pente qui dépasse 12 %, contribuent également au développement des ravines [16], [17], [18]. Les résultats indiquent que les autres facteurs topographiques (l'altitude et l'orientation, particulièrement les versants nord, est, sud et ouest) favorisent aussi la présence du processus de ravinement.

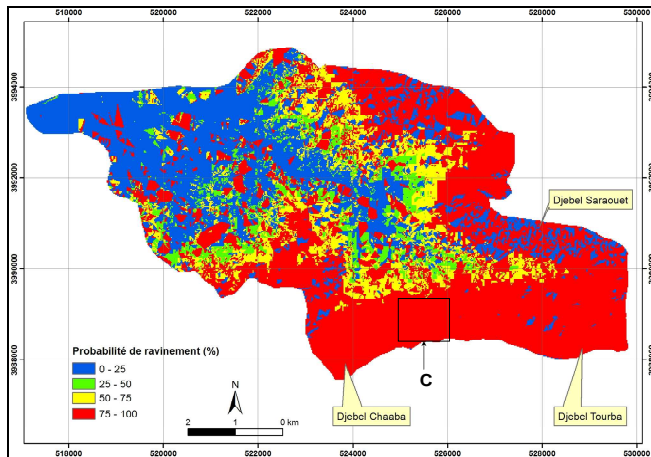


Fig.8 Carte des zones propices au ravinement. Exemple de la zone de Souagui

Pour le sous-bassin versant de l'oued Alayem - Beni Slimane, nous retrouvons également la classe 0,75 - 1 de prédiction des ravines avec une très forte concentration spatiale sur la partie supérieure du sous-bassin, la partie inférieure est également touchée. Dans cette zone, la probabilité élevée du processus (45 %), localisée sur les versants exposés au nord et au sud de Djebels Tchaif et Mechtet El Leboukh est due principalement à la variabilité spatiale de l'agressivité des précipitations, associée à la pente et l'altitude. Cette situation est favorisée par une lithologie à résistance faible composée de marnes et des argiles du Miocène supérieur. La limite nette est-ouest de la classe élevée est probablement liée à une faille qui divise les piedmonts des versants et les glacis (Fig.9).

D'après Raunet (1974) cité par Bock (1984), cette limite est un contact morpholithologique de lambeaux encroûtés sur des argiles ou cailloutis. Cette structure s'explique d'après l'auteur par une faille liée à des mouvements tectoniques d'âge quaternaire et aurait également permis à l'érosion de dégager les formations du Crétacé. La catégorie moyenne qui couvre 40 % du sous-bassin est localisée sur les glacis. Le reste de la superficie du sous-bassin (15 %) est caractérisé par une probabilité variée entre faible et très faible dans la partie inférieure du sous-bassin versant [16], [17].

Nous réalisons également un drapage de ces cartes sur des compositions fausses couleurs d'images satellitales correspondantes (Fig.9). Le résultat permet de localiser des zones de prédiction forte des ravines en fonction de l'occupation du sol, notamment de l'activité agricole ou des surfaces urbanisées et les infrastructures. A titre d'exemple l'image du sous-bassin versant de l'oued Alayem fait apparaître les

menaces du processus de ravinement. La ville de Beni Slimane et les zones d'activité agricole se trouvent toutes deux en contre bas de la zone de ravines, subissant de ce fait l'apport de sédiments provenant de cette zone, et par conséquent les problèmes de transfert de boues lors des orages, et les inondations par les affluents qui alimentent l'oued principal [15].

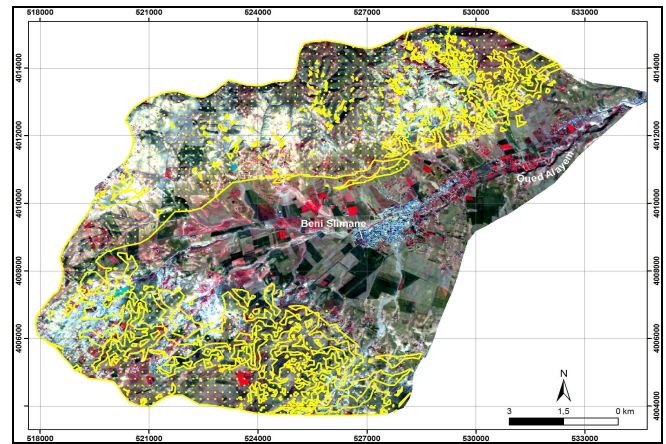


Fig.9 Classe de prédiction élevée de ravinement (en jaune) et l'image HRV de SPOT5 du 7 janvier 2007 : Beni Slimane

Pour le sous-bassin versant de l'oued El Had - Tablat, la probabilité de ravinement supérieure à 0,75 qui représente 23% de la superficie totale est particulièrement concentrée au nord-est (Djebels Tamasguida et El Fernane) et au nord-ouest (Djebel El Tolba). Nous noterons cependant que, c'est la partie supérieure du sous-bassin qui est la plus touchée. 66 % du secteur d'étude présente une susceptibilité très faible (exemple : zone de banquettes) ; pour le reste, les catégories moyennes et faibles représentent respectivement 4 et 7 % [16], [17]. Cette situation s'explique en premier lieu, par l'agressivité des précipitations ( $R_p$ ) conjuguée à une lithologie dominée par les formations de marnes et de schistes du Crétacé moyen et des sols nus ou une couverture végétale faible et moyennement dense. L'altitude et l'exposition des versants (sud et nord-ouest) par rapport aux précipitations accentuent également les risques d'érosion ravinante. Tandis que les classes de pente peuvent être très variables en rapport avec l'existence du phénomène.

#### IV. Conclusion

Le modèle de la régression logistique proposée est une technique paramétrique de modélisation efficace et robuste pour prédire le processus de ravinement. Le principe mathématique de la méthode est la sélection des variables significatives. La représentation des modèles est illustrée sous forme de cartes de prédiction spatiale en quatre classes. La validation et la pertinence des modèles sont évaluées à l'aide des courbes de Lift. Bien que la méthode proposée soit fondée sur une approche probabiliste, sa pertinence a pu être justifiée lors de plusieurs travaux dans des régions méditerranéennes.

A travers la modélisation prédictive du processus de ravinement, la sur-représentation de certaines variables, l'échantillonnage est une approche fondamentale pour améliorer la prédiction des modèles. Dans ce contexte, nous souhaitons illustrer le besoin d'une connaissance plus approfondie des facteurs majeurs qui régissent le développe-

ment des ravines, mais également prendre en compte d'autres données empiriques qui concernent les variables comme les mesures sur le terrain de la morphométrie des ravines et leur dynamique, la pente critique pour le développement des ravines, les caractéristiques des formations superficielles « lithopédologiques », l'érodibilité des sols, les techniques culturales et le cadre socio-économique. Ceci permettra d'affiner la portée prévisionnelle du modèle [23] et de corriger la localisation des zones propices au phénomène de l'érosion ravinante.

## V. Bibliographie

- [1] A. Meyer & J.A. Martinez-Casasnovas, "Prediction of existing gully in vineyard parcels of the NE Spain: a logistic modelling approach", *Soil et Tillage Research* 50, 1999, 319-331.
- [2] J. Poesen, L. Vandekerckhove, J. Nachtergaele, D. Oostwoud Wijdenes & G. Verstraeten, "Gully erosion in Dryland Environments", *Dryland Rivers: Hydrology and geomorphology of Semi-arid Channels*, 2002, 229-262.
- [3] F.C. Dai, C.F. Lee, L.G. Tham, K.C. Ng & W.L. Shum, "Logistic regression modelling of storm-induced shallow landsliding in time and space of natural terrain of Lantau Island, Hong Kong", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 63, 2004, 315-327.
- [4] J.A. Martinez-Casasnovas, M.C. Ramos & J. Poesen, "Assessment of sidewall erosion in large gullies using multitemporal DEMs and logistic regression analysis", *Geomorphology*, 58, 2004, 305-321.
- [5] S. Lee, "Application of logistic regression model and its validation for landslide susceptibility mapping using GIS and remote sensing data journals", *International Journal of Remote Sensing*, 26(7), 2005, 1477-1491.
- [6] M. Van Den Eeckhaut, T. Vanwalleghem, J. Poesen, G. Govers, G. Verstraeten & L. Vandekerckhove, "Prediction of landslide susceptibility using rare events logistic regression: A case-study in the Flemish Ardennes (Belgium)", *Geomorphology* 76, 2006, 392-410.
- [7] L. Ayalew & H. Yamagishi, "The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakudayahiko Mountains, Central Japan", *Geomorphology*, 65, 2005, 15-31.
- [8] F. Guzzetti, *Landslide hazard and risk assessment. Concepts, methods and tools for the detection and mapping of landslides, for landslide susceptibility zonation and hazard assessment, and for landslide risk evaluation*, Thesis of doctorate, Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2005, 389 p.
- [9] O. Dewitte, *Cinématique de glissement et prédiction de leur activation : approche probabiliste dans la région d'Oudenaarde*, Thèse de doctorat en Sciences, Université de Liège, Faculté des Sciences, Département de Géographie, 2006, 216 p.
- [10] S.M. Moreiras, "Landslide susceptibility zonation in the Rio Mendoza Valley, Argentina", *Geomorphology* 66, 2005, 345-357.
- [11] J.P. Dedieu & P. Nicolas, "Utilisation de la télédétection dans les SIG à grande échelle : exemple de programme appliqué aux risques naturels et anthropiques en zone de montagne, Savoie, France", *Bulletin de, S.F.P.T.*, n°122, 1991, 35-39.
- [12] T. Vanwalleghem, M. Van Den Eeckhaut, J. Poesen, G. Govers & J. Deckers, "Spatial analysis of factors controlling the presence of closed depressions and gullies under forest : Application of rare event logistic regression", *Geomorphology* 95, 2008, 504-517.
- [13] J. Clech, *Contribution méthodologique à la fouille de données complexes*, Thèse de doctorat en informatique, Université Lumière Lyon 2, 2004, 201 p.
- [14] N. Fischer, *Fusion statistique de fichiers de données*, Thèse de doctorat en informatique, Conservatoire National Des Arts Et Métiers, Paris, 2004, 130 p.
- [15] E. Roose, R. Chebbani & L. Bourouga, "Ravinement en Algérie. Typologie, facteurs de contrôle, quantification et réhabilitation", *Sécheresse*, volume 11, Numéro 4, 2000, 317-326.
- [16] M. Daoudi, *Analyse et prédiction de l'érosion ravinante par une approche probabiliste sur des données multisources. Cas du bassin versant de l'oued Isser, Algérie*, Thèse de doctorat en Sciences, Université de Liège, Faculté des Sciences, Département de Géographie, 2008, 287 p.
- [17] M. Daoudi, O. Dewitte, P. Gérard, Y. Cornet, J. Nicolas, A. Abdellaoui & A. Ozer, "Controlling factors of gully erosion in the upper part of the Isser River watershed (Algiers, N Algeria)", *European Geosciences Union (EGU) Vienna, Austria*, 2007.
- [18] O. Dewitte, M. Daoudi & A. Ozer, "Mapping gully erosion susceptibility at the regional scale using a likelihood-ratio-based approach : the Isser River area (N Algeria)", *European Geosciences Union (EGU) Vienna, Austria*, 2008.
- [19] M. Raunet, "Étude morphopédologique dans la région des Béni Slimane (Algérie), contraintes pour la mise en valeur", *Revue d'agronomie tropicale*, 2-3, V. 29, 1973, 258-299.
- [20] L. Bock, *L'intégration chronospatiale des accumulations calcaires. Approche morphopédologique et géochimique dans un paysage semi-aride de l'Atlas tellien (Algérie)*, Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques, Faculté des Sciences Agronomiques de l'Etat à Gembloux (Belgique), 1984, 448 p.
- [21] R. Bou Kheir, J. Chorowicz, C. Abdallah & D. Dhont, "Soil and bedrock distribution estimated from gully form and frequency: A GIS-based decision-tree model for Lebanon", *Geomorphology* 93, 2008, 482-492.
- [22] H. Bouchnak, M.S. Felfoul, M.R. Boussema & M.H. Snane, "Étude de l'évolution du ravinement en fonction de la lithologie dans les bassins versants des oueds El Hammam et Rmel en Tunisie centrale", *Télédétection*, vol. 4, 1, 2004, 75-93.
- [23] J. De Ploey, "Bassins versants ravinés : analyse et prévisions selon le modèle E<sub>s</sub>", *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 27, 1991, 448-459.
- [24] J. Poesen, J. Nachtergaele, G. Verstraeten & C. Valentin, "Gully erosion and environmental change: importance and research needs", *Catena* 50, 2003, 91-133.
- [25] P.V. Gorsevski, P.E. Gessler & R.B. Foltz, "Spatial prediction of landslide hazard using logistic regression and GIS", In: *Proceedings 4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modelling*, Alberta, Canada, 2000, 9 p.
- [26] A. Capra, L.M. Mazzara & B. Scicolone, "Application of the EGM model to predict ephemeral gully erosion in Sicily, Italy", *Catena* 59, 2005, 133-146.
- [27] A. Sidorchuk, "Dynamic and static models of gully erosion", *Catena* 37, 1999, 401-414.
- [28] C.F. Chung, A.G. Fabbri & C.J. Van Westen, "Multivariate regression analysis for landslide hazard zonation", *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*, 1995, 107-133.
- [29] D.W. Hosmer & S. Lemeshow, *Applied logistic regression*, Wiley, New York, 2000, 375 p.
- [30] K. Hyde, S.W. Woods & J. Donahue, "Predicting gully rejuvenation after wildfire using remotely sensed burn severity data", *Geomorphology* 86, 2007, 496-511.
- [31] C. Valentin, J. Poesen & Y. Li, "Gully erosion: Impacts, factors and control", *Catena* 63, 2005, 132-153.
- [32] J. Richard, & R.J. Aspinall, "Use of logistic regression for validation of maps of the spatial distribution of vegetation species derived from high spatial resolution hyperspectral remotely sensed data", *Ecological Modelling* 157, 2002, 301-312.