CARTOGRAPHIE DES ZONES À RISQUE D'ÉROSION HYDRIQUE : EXEMPLE DU HAUT ATLAS MAROCAIN

Bahija BACHAOUI[1], El Mostafa BACHAOUI[1*], Abderrazak EL HARTI[1], Abderrazak BANNARI[2] et Abderrahmène EL GHMARI[1]

[1] Équipe de recherche en télédétection et SIG appliqués aux géosciences et à l'environnement, Faculté des sciences et techniques, B.P. 523, Béni Mellal, Maroc.
Téléphone : 212 66 92 81 04 ; télécopieur : 212 23 48 52 01 ; courriel : b_bachaoui@yahoo.fr ; bachaoui@fstbm.ac.ma ; elharti@fstbm.ac.ma ; a.ghmari@fstbm.ac.ma
[2] Département de géographie, Université d'Ottawa (Ontario) K1N 6N5, Canada.
Téléphone : 613-562-5800, poste 1042 ; télécopieur : 613-562-5145 ; courriel : abannari@uottawa.ca

Soumis le 19 décembre 2006 ; révisé le 17 janvier 2007 ; accepté le 26 avril 2007- © *Revue Télédétection*, 2007, vol. 7, n° 1-2-3-4, p. 393-404

Résumé

L'objectif de cette étude est de développer une méthodologie utilisant la télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG) pour cartographier les zones à risque d'érosion hydrique dans le cadre de l'Atlas de la ville de Béni Mellal (haut Atlas, Maroc) et de produire une carte de risque qui peut être utilisée comme document de référence pour les décideurs. La méthodologie présentée consiste à intégrer, dans SIG, trois facteurs contrôlant l'érosion : la pente, la friabilité des matériaux et l'occupation des terres. La carte de risque d'érosion qui en est dérivée montre quatre zones de vulnérabilité à l'érosion hydrique : faible, moyen, fort et très fort. Les zones à risque d'érosion fort et très fort couvrent plus de 50 % de la zone montagneuse en amont de la ville de Béni Mellal et correspondent bien aux observations effectuées sur le terrain. La méthodologie présentée dans cette étude peut être généralisée à toutes les zones du piémont du haut Atlas, où les risques d'érosion constituent une menace pour les agglomérations.

Mots-clés : Érosion hydrique ; haut Atlas du Maroc ; méthodologie ; télédétection ; SIG.

MAPPING OF WATER-EROSION RISK AREAS: THE CASE STUDY OF THE MOROCCAN HIGH ATLAS

Abstract

The objective of this study is to develop a methodology using remote sensing and geographical information systems (GIS) to map zones presenting risks of water erosion in the Beni Mellal Atlas (high Atlas of Morocco) and to produce a risk map that can be used as a reference document for planners. The methodology presented consists in integrating into a GIS, three factors that control erosion: slope, material friability and land use. The derived erosion risk map shows four areas of vulnerability to water erosion: weak, medium, high, and very high. The high and very high areas cover more than 50% of the mountain area uphill from the city of Beni Mellal and correspond very well to field observations. This methodology presented in this study can be applied to other areas of high Atlas, were erosion risk constitutes a serious threat to agglomerations.

Key-words: water erosion ; high Atlas of Morocco ; methodology ; remote sensing ; GIS.

1. INTRODUCTION

Les études récentes sur la vulnérabilité aux changements climatiques dans la région méditerranéenne indiquent une tendance à un accroissement de l'aridité qui accélère l'érosion hydrique (De Ploey *et al*., 1991). 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 continue à prendre des proportions considérables de sol, en particulier sur les pentes, à cause de la nature torrentielle des pluies, de la forte vulnérabilité des terrains (roches tendres, sols fragiles, pentes fortes et dégradation du couvert végétal) et de l'impact défavorable des activités humaines (déforestation, incendies, mauvaise

conduite des travaux agricoles, urbanisme chaotique, surexploitation des carrières, etc.). D'après une étude de la FAO (1990), la situation continue à se détériorer : 40 % des terres au Maroc sont menacées par l'érosion hydrique.

La télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG) sont de plus en plus utilisés pour l'étude des phénomènes de surface et forment des outils essentiels dans les systèmes interactifs d'aide à la décision et opérationnels pour des opérations de gestion du risque (Wachal and Hudak, 2000 ; Shrimalil *et al*., 2001 ; Lee, 2004 ; Bou Kheir *et al*., 2006). L'exécution des mesures efficaces de conservation de sol doit d'abord être précédée par une évaluation dans l'espace du risque d'érosion (Moussa *et al*., 2002 ; Souchère *et al*., 2005).

Pour estimer le taux ou l'état de l'érosion, plusieurs méthodes sont adoptées, dont les plus utilisées sont : l'équation universelle de perte de sol (Wischmeier and Smith, 1978), sa version modifiée (Foster et *al.*, 1996) et la technique de prédiction de l'érosion hydrique (Laflen *et al*., 1991). Le choix du modèle dépend de la variabilité de la surface du bassin, de la disponibilité des données ponctuelles et des données de précipitations (Bonn, 1998). Cependant, lorsque ces méthodes de calcul des pertes de sol, qui sont établies sur une base parcellaire, sont extrapolées à des échelles plus englobantes, il en résulte généralement certaines contraintes d'utilisation qui ne sont pas toujours respectées (Chakroun, 1993).

Depuis quelques années, les méthodes de calcul des pertes de sol sont associées aux SIG et à la télédétection. Il est vrai, qu'avec ces méthodes modernes, on découvre progressivement l'intérêt de la spatialisation des méthodes de calcul des pertes de sol, de la cartographie pour représenter les résultats des pertes de sol sur de grandes étendues et de la création de scénarios pour les interventions humaines sur le milieu (Bonn, 1998). Dans notre zone d'étude, le paysage est complexe : il se compose d'une mosaïque d'unités de paysage, dont chaque groupe d'unités peut réagir différemment aux actions érosives de l'eau. La cartographie de l'érosion hydrique à l'aide d'une de ces méthodes de pertes de sol reste très difficile et demande de lourds investissements, sans compter sur la carence des données pluviométriques à cause de l'absence de stations climatiques dans le secteur d'étude.

Si les problèmes de l'eau sont surtout ressentis à travers les sécheresses, le territoire marocain, malgré son caractère semi-aride, est soumis, comme tous les pays méditerranéens, à des crues importantes des cours d'eau et à du ruissellement en nappe (Direction générale de l'hydraulique, 2005). Ces phénomènes sont aujourd'hui ressentis de façon plus tangible en raison des forts développements démographique, économique, urbain, agricole et industriel (Direction générale de l'hydraulique, 2005). Le développement urbain s'est souvent fait à proximité des cours d'eau et l'expansion des communes a tendance à se faire également dans des zones inondables plus faciles et moins coûteuses pour la construction (Direction générale de l'hydraulique, 2005). À la suite de forts orages d'été, de crues torrentielles et du ruissellement en nappe, des dégâts énormes aussi bien en perte de vies humaines qu'en destruction d'habitats et d'infrastructures peuvent se produisent. L'exemple caractéristique est l'événement sur le site touristique de la vallée d'Ourika (région de Marrakech). Ainsi, après une forte averse sur la montagne, le débit de l'oued Ourika est passé de 1 m^3 à 1 000 m^3 en une période de 15 min, faisant 242 morts et d'importants dégâts matériels (Aresmoud, 2005).

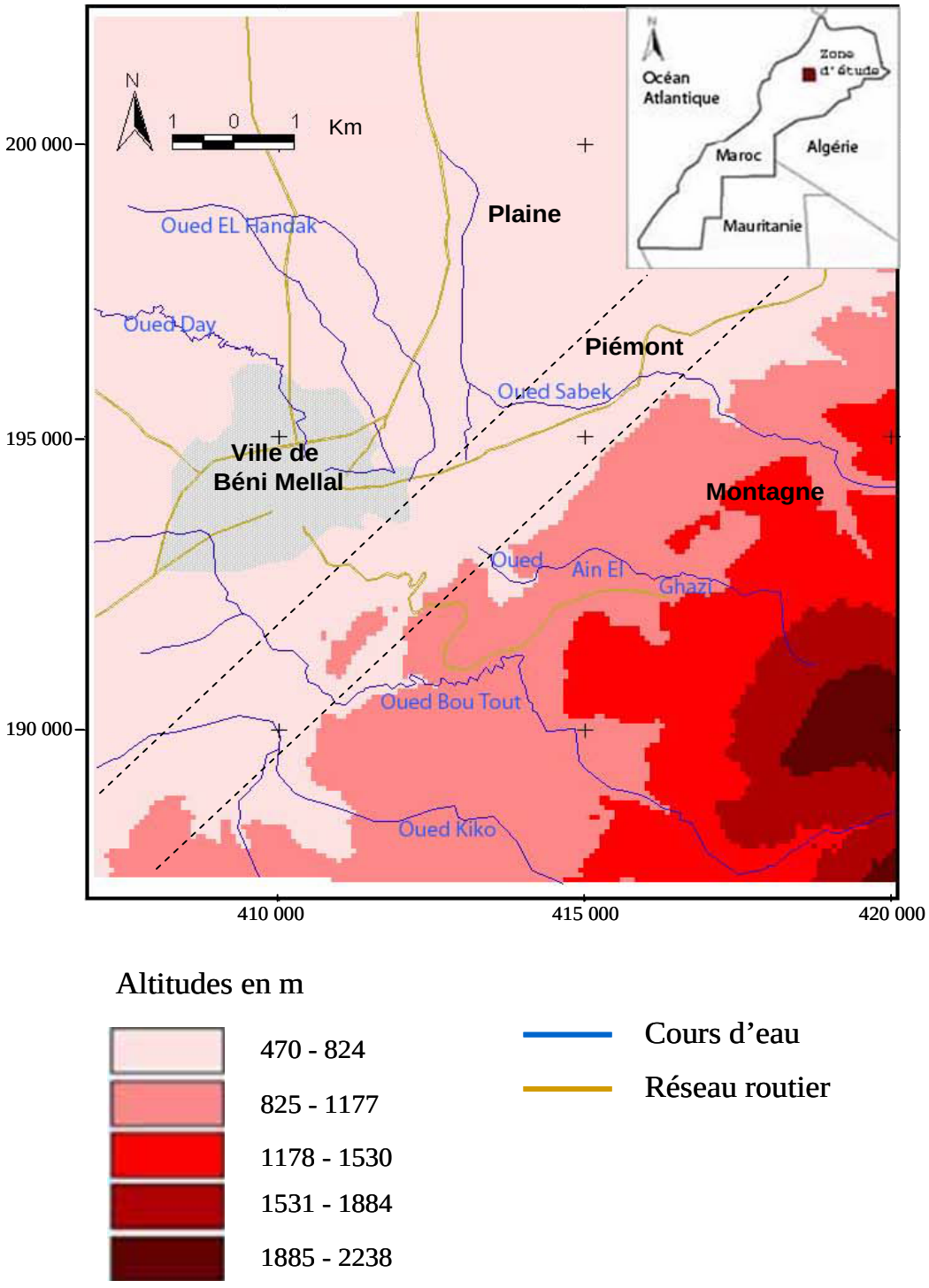
La ville de Béni Mellal, sujet de cette étude, compte parmi les premières agglomérations du Maroc les plus touchées par les inondations. Le dernier événement en ce sens est survenu au mois d'août 2006 causant de nombreux dégâts matériels (El Hajjam, 2006). La charge solide emportée par les oueds traversant la ville, causent de sérieux dommages aux infrastructures et aussi à la propreté de la ville, et ce malgré les efforts effectués dans l'aménagement des lits des cours d'eau et du réseau d'assainissement.

Dans ce travail, nous proposons une méthodologie cartographique pour les zones vulnérables à l'érosion hydrique qui constituent la source des matériaux solides arrachés et transportés par l'eau, en se basant sur des données de terrain, des données de télédétection et des données topographiques. Le SIG développé nous a permis de superposer et d'analyser plusieurs facteurs, tels que la pente, la nature des matériaux affleurants et le couvert végétal. La carte de risque déduite a été ensuite confrontée à la réalité de terrain pour validation. Celle-ci pourrait constituer un document de base pour les planificateurs et les décideurs dans l'aménagement de l'Atlas de Béni Mellal.

2. ZONE D'ÉTUDE

Le secteur étudié se trouve au centre du Maroc (latitude : 32° 20' N ; longitude : 6° 20' O), à la jonction entre le haut et le moyen Atlas. Ce secteur comprend plusieurs agglomérations, dont la principale est la ville de Béni Mellal. Des points de vue géologique, géomorphologique et climatique, le secteur d'étude est représentatif du haut Atlas central (Piqué, 1994). Il est composé de trois grands ensembles : la plaine, le piémont et la montagne (figure 1). La plaine de Tadla, caractérisée par ses terres irriguées, se situe au nord-ouest de la zone d'étude et fait partie d'une vaste dépression dans laquelle se sont accumulés d'importants dépôts d'âge allant du Miocène au Quaternaire (Verset, 1988). Au sud-est, la zone montagneuse est caractérisée par des reliefs variant de 600 m à plus de 2 000 m d'altitude. Les affleurements rocheux sont constitués principalement de calcaires et de marnes (Monbaron, 1985). Les calcaires jurassiques du piémont sont recouverts par des dépôts alluvionnaires, essentiellement conglomératiques datant du Miocène, du Pliocène et du Quaternaire. Du point de vue tectonique, la zone est marquée par de nombreuses failles qui longent la limite entre la plaine et la montagne (Monbaron, 1985). Le climat est de type continental, caractérisé par une période humide qui dure environ sept mois (d'octobre à avril) et une période sèche qui dure cinq mois (mai à septembre) avec

une pluviométrie moyenne annuelle de l'ordre de 536 mm (moyenne pour la période entre 1920 à 2000), mal répartie le long de l'année (données de l'Agence du bassin d'Oum Er Rbiâ). Cette mauvaise répartition s'accentue d'année en année, favorisant ainsi certaines catastrophes, telles les inondations, les mouvements de masse et l'effondrement de vieilles maisons. La température annuelle moyenne minimale est de 11,1 °C, avec des valeurs inférieures au point de congélation en hiver (données de l'Agence du bassin d'Oum Er Rbiâ). La température annuelle moyenne maximale est de 30,4 °C, avec des valeurs extrêmes de 45 °C en été (données de l'Agence du bassin d'Oum Er Rbiâ). La zone montagneuse est constituée de petits bassins versants d'environ 30 km^2 de superficie et dont le temps de concentration est de l'ordre de l'heure (Agence du Bassin d'Oum Er Rbiâ, 2002). Certains cours d'eau, comme les oueds El Handak, Bou Tout et Ain El Ghazi, traversent la ville causant des inondations après les fortes précipitations (El Hajjam, 2006).



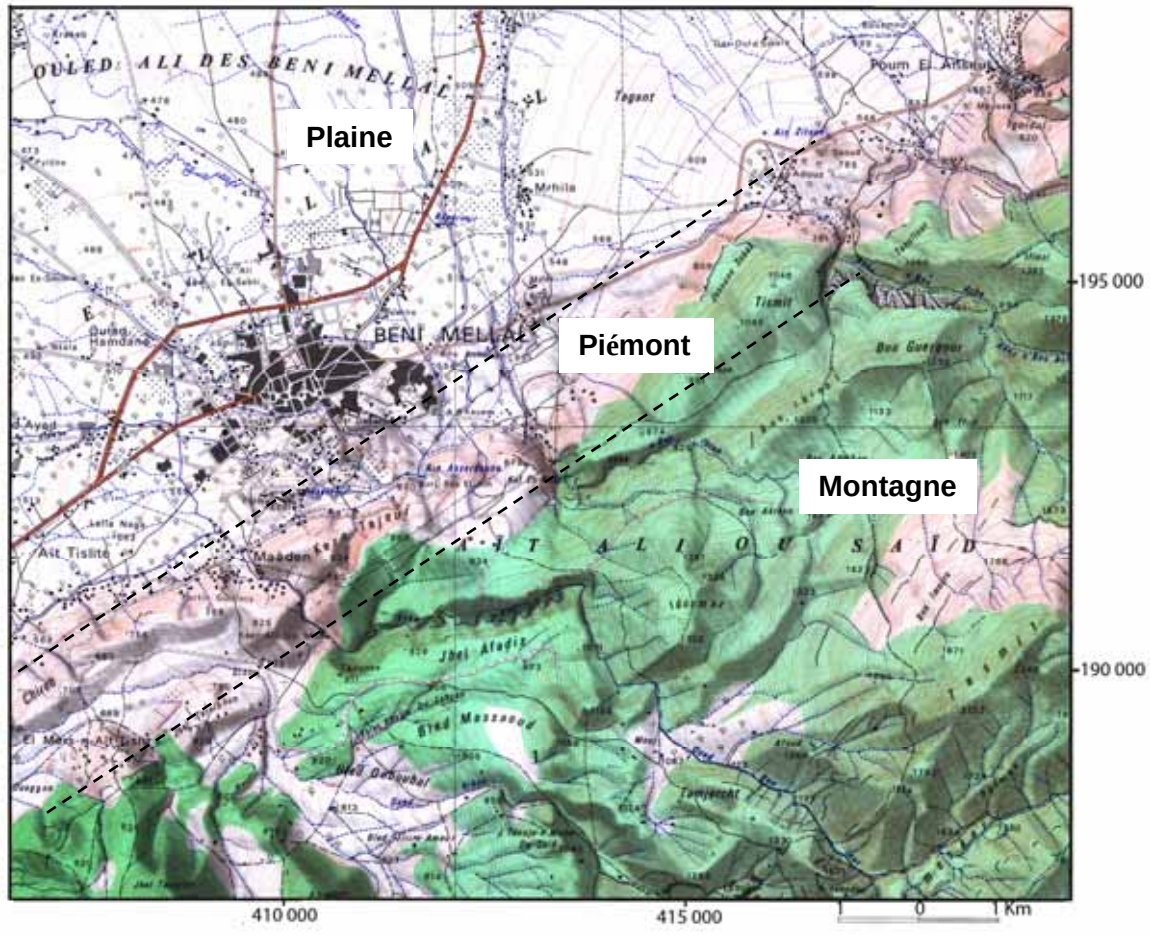


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude**.** *Location of the study area.*

3. MATÉRIEL ET MÉTHODE

La méthodologie suivie au cours de cette étude repose sur des données satellitaires, topographiques, géologiques ainsi que sur des mesures et des observations effectuées sur le terrain. Ces données sont ensuite intégrées et analysées dans un environnement SIG pour la restitution et la cartographie des zones exposées à l'érosion hydrique (figure 2).

- une image ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)* 1B du satellite TERRA, acquise le 28 juillet 2000 ; ce capteur est justement conçu pour les études géologiques (Abrams, 2000) ; il a une résolution spatiale élevée (15 m) dans le visible et le proche infrarouge (VPIR) ainsi que la possibilité d'observation stéréoscopique dans la bande 3 ; il possède aussi une bonne résolution spectrale dans l'infrarouge moyen (IM) ;

- une carte topographique au 1 : 50 000 de la région, de 1982 avec une équidistance des courbes de niveau de 10 m ; cette carte a été numérisée et géopositionnée en fonction de la projection conique conforme de Lambert de la zone nord du Maroc ;

- une carte géologique au 1 : 100 000 de la région (Monbaron, 1985), numérisée et géopositionnée en fonction de la projection conique conforme de Lambert de la zone nord du Maroc ;

- des observations effectuées sur le terrain pendant la saison pluvieuse de l'année 2005 : sur une vingtaine de sites bien répartis sur la zone d'étude et couvrant les différents états d'érosion, on a relevé les paramètres qui contrôlent celle-ci, comme la pente, la friabilité du sol et le couvert végétal ; chaque site d'observation correspond à une parcelle de superficie de l'ordre de 2 500 m^2.

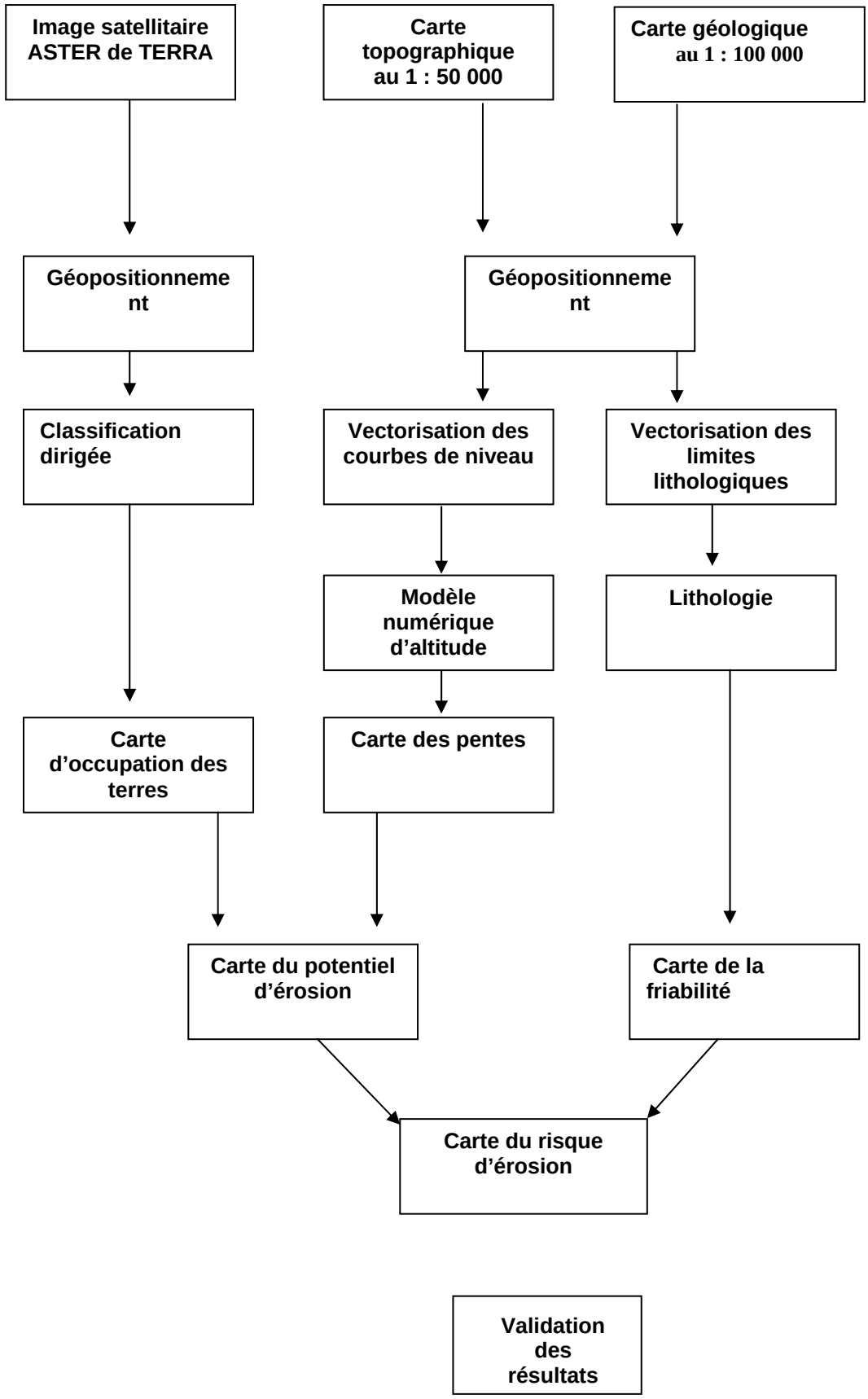


Figure 2 : Organigramme de la méthodologie suivie dans cette étude. *Diagram of the methodology followed in this study.*

3.1. Données

Les données utilisées dans cette étude comprennent :

3.2. Traitement d'image

Le logiciel utilisé dans le traitement de l'image est *Erdas Imaging*. Dans une première étape, l'image a été géopositionnée en fonction de la projection conique conforme de Lambert et calée en fonction du système de coordonnées de référence de la zone Merchich. De la carte topographique au 1 : 50 000, une vingtaine de points bien visibles ont été choisis pour caler l'image : croisements de routes, de pistes et de cours d'eau. La précision planimétrique est de l'ordre de 0,31 pixel selon l'axe X et 0,34 selon l'axe Y. Cette précision a été calculée à la suite du géopositionnement à l'aide d'une transformation polynomiale du deuxième ordre avec 22 points de contrôle et elle devait se situer à moins de 1 pixel.

3.3. Carte de friabilité

Avec notre connaissance du terrain et la description de la nature des roches sur la carte géologique, nous avons déterminé la friabilité des matériaux affleurants. On peut ainsi distinguer quatre classes de matériaux (tableau 1) : résistants, moyennement résistants, vulnérables et très vulnérables. À chaque classe est assigné un indice variant entre 1 et 4, 1 étant affecté aux matériaux moins exposés à l'érosion et 4 aux matériaux les plus exposés à l'érosion.

Tableau 1 : Classes de la friabilité des matériaux et indices attribués. *Classes of material friability and corresponding indices.*

Faciès	Friabilité des matériaux	Indice attribué
Calcaires	Matériaux résistants	1
Calcaire pédogénétique de la plaine du Tadla	Matériaux moyennement résistants	2
Marnes, grès, marno-calcaires, dolomies saccharoïdes	Matériaux vulnérables	3
Épandages d'éboulis et d'alluvions, argiles, limons et éluvions	Matériaux très vulnérables	4

3.4. Modèle numérique d'altitude et carte des pentes

À l'aide du logiciel *Arc View*, la vectorisation des courbes de niveau de la carte topographique au 1 : 50 000 a permis de produire un modèle numérique d'altitude (MNA). Celui-ci a servi à produire la carte des pentes, qui a été subdivisée en quatre classes de pentes : 0 à 5°; 5 à 15°; 15 à 35° et 35 à 90°. Pour chaque classe de pente est assigné un indice variant entre 1 et 4 (tableau 2), 1 étant affecté aux pentes faibles (< 5°) et 4 aux pentes fortes (> 35°). Les classes de pentes sont définies à partir des mesures de pente reliées aux observations sur l'état de l'érosion sur le terrain pendant la saison pluvieuse.

Tableau 2 : Classes des pentes et indices attribués. *Slope classes and corresponding indices.*

Degré de pente (°)	Indice attribué
0-5	1
5-15	2
15-35	3
35-90	4

3.5. Carte d'occupation des terres

La classification dirigée par la méthode de maximum de vraisemblance, basée sur l'observation directe des catégories d'utilisation des terres, a permis d'obtenir une carte d'occupation des terres. Cinq classes sont ainsi identifiées : les terrains cultivés, terrains nus, végétation très dense, végétation éparse ou de densité moyenne et le périmètre urbain. Chaque classe est assignée à une valeur entre 1 et 4, 1 étant affecté à la classe la moins vulnérable et 4 à la classe la plus vulnérable

Tableau 3 : Occupation des terres et indices attribués. *Land occupation and corresponding indices.*

Occupation des terres	**Indice attribué**
Végétation très dense	1
Végétation éparse ou de densité moyenne	2
Terrain cultivé	3
Terrain nu	4

4. RÉSULTATS

La méthodologie développée dans cette étude utilise des règles qualitatives, des évaluations et une hiérarchisation des paramètres intervenant dans l'érosion hydrique : occupation des terres (figure 3), friabilité des matériaux (figure 4) et degré de pente (figure 5). L'ensemble de ces données est intégré dans un SIG pour une meilleure gestion de l'information. La combinaison de ces cartes, suivant la règle de décision mentionnée sur le tableau 4, a permis de produire une carte thématique appelée carte du potentiel d'érosion (figure 6). Celle-ci comprend quatre classes : faible (16 %), moyen (53 %), fort (16 %) et très fort (15 %). Les zones à vulnérabilité faible ou moyen à l'érosion se trouvent dans la plaine où le degré de pente est faible (< 5°). En revanche, sur le piémont et dans la haute montagne, les terrains à pente forte (> 15°), dont le couvert végétal est absent, sont les plus exposés à l'érosion hydrique.

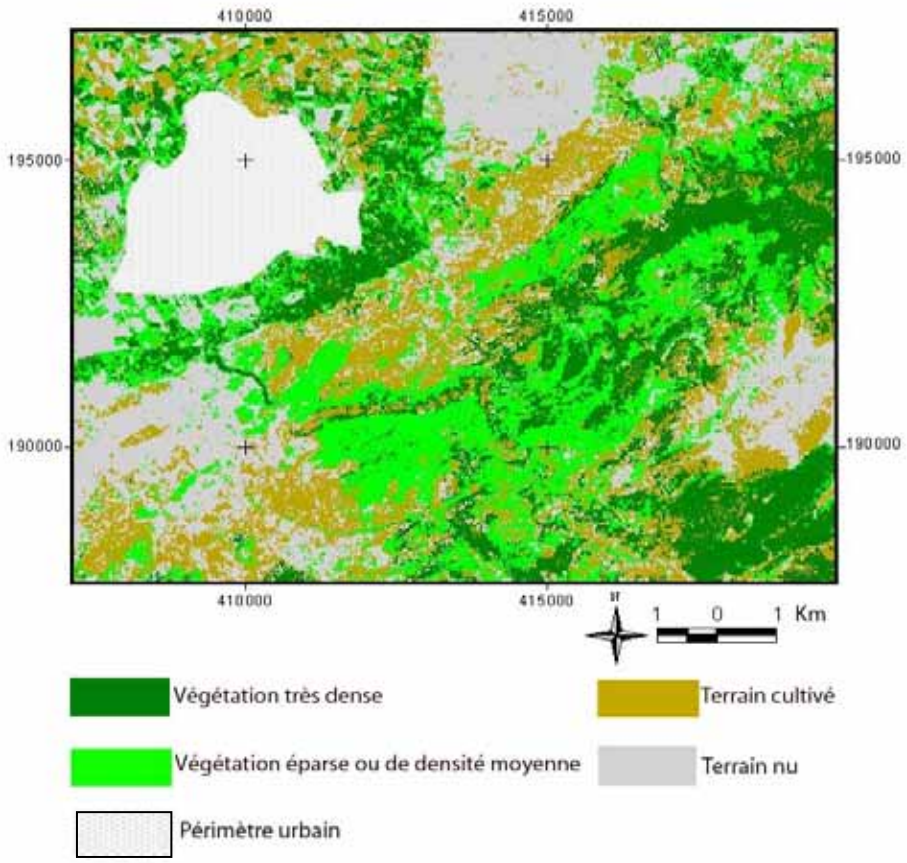


Figure 3 : Carte de l'occupation des terres. *Land cover map*.

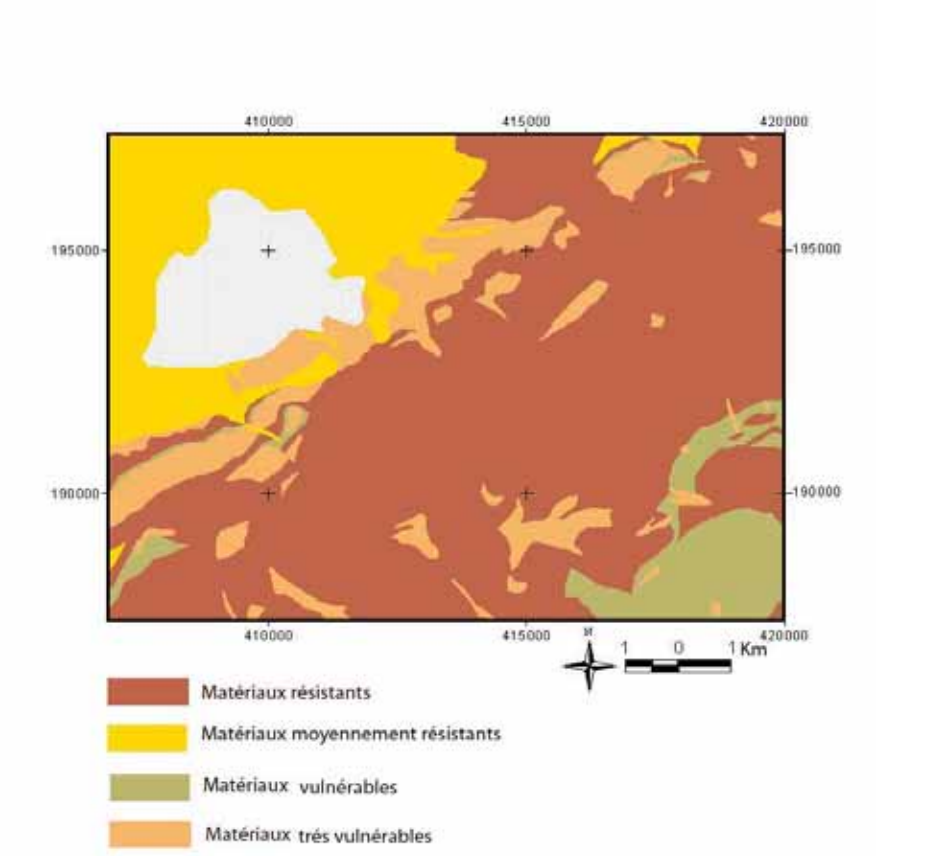


Figure 4 : Carte de la friabilité des matériaux. *Material friability map.*

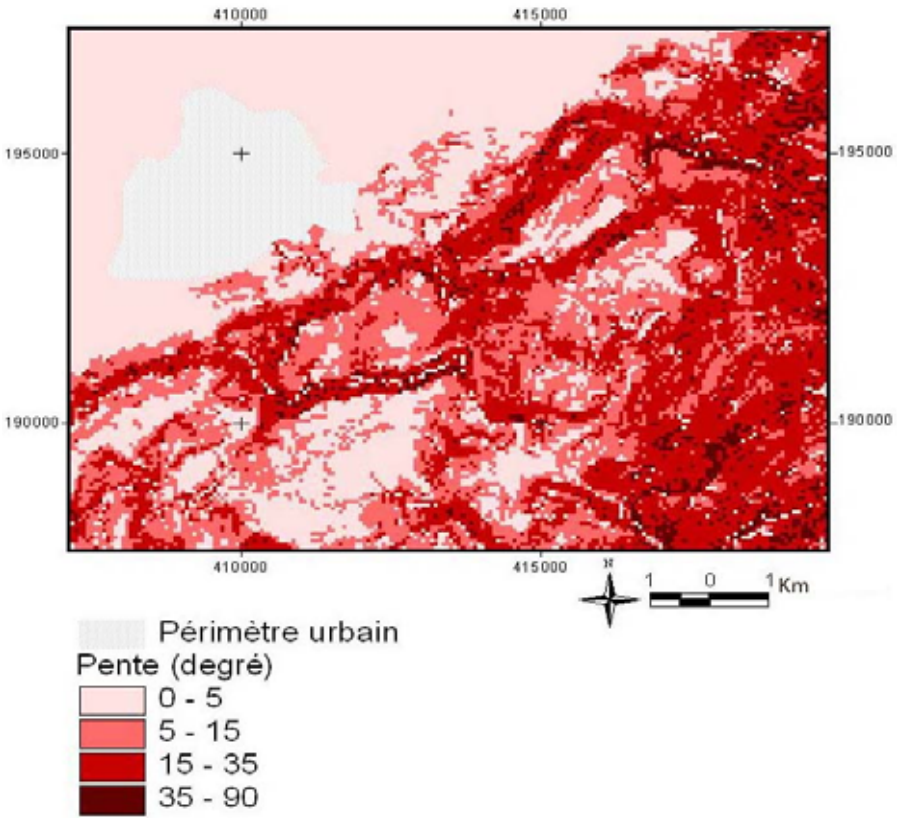


Figure 5 : Carte des pentes. *Slope map.*

Tableau 4 : Règle de décision du potentiel d'érosion. *Decision rule of erosion potential.*

Potentiel d'érosion		**Pente (°)**			
		1 (0-5)	**2** (5-15)	**3** (15-35)	**4** (35-90)
Occupation des terres	1	1	2	3	3
	2	1	2	3	3
	3	2	3	3	4
	4	2	4	4	4

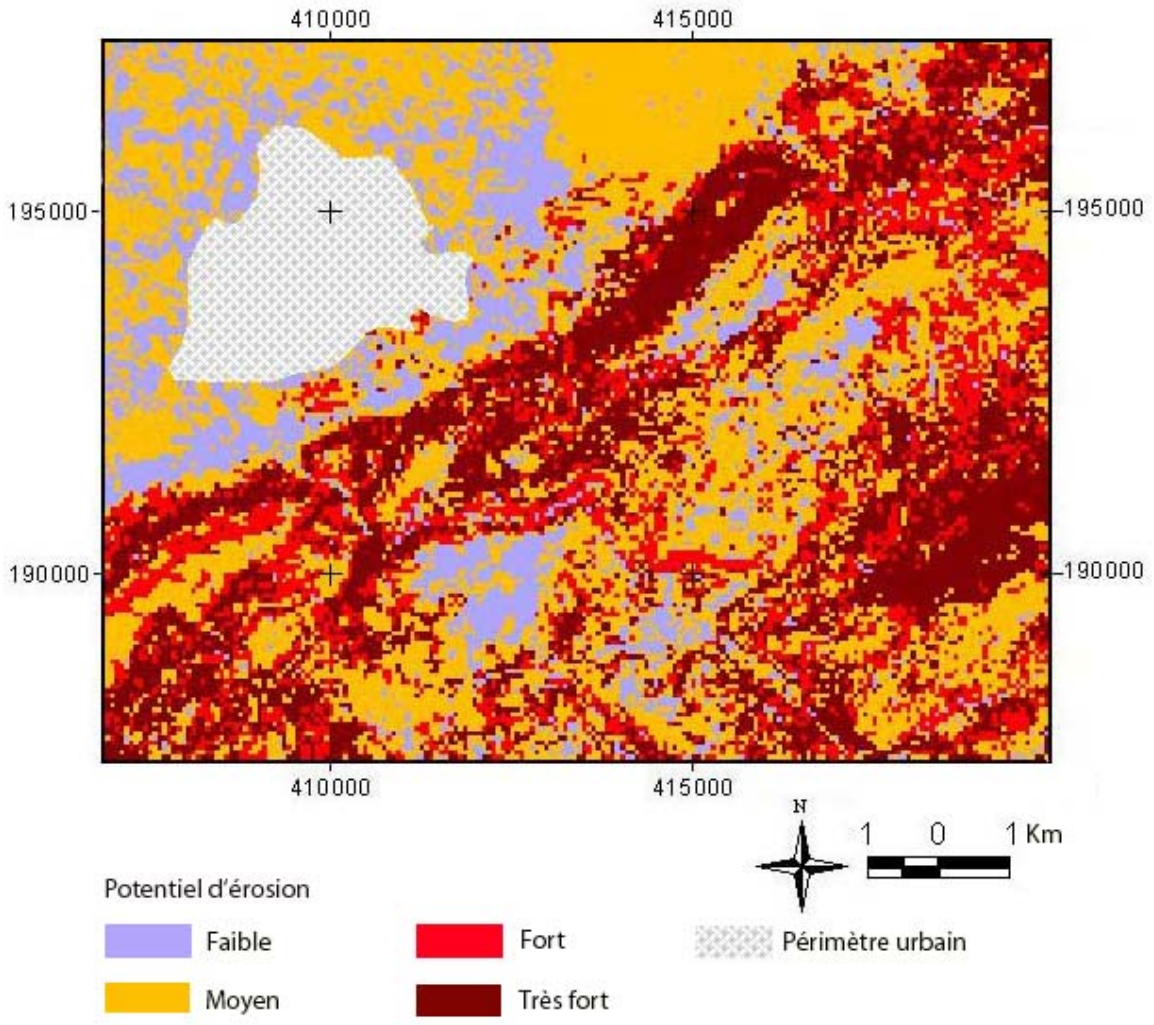


Figure 6 : Carte du potentiel d'érosion. *Erosion potential map*.

La carte de risque d'érosion (figure 7) a été élaborée par l'interaction entre le potentiel d'érosion et la friabilité des matériaux, à l'aide de la règle de décision présentée dans le tableau 5. Quatre classes aussi de risque d'érosion sont délimitées : faible (16 %), moyen (50 %), fort (16 %) et très fort (19 %).

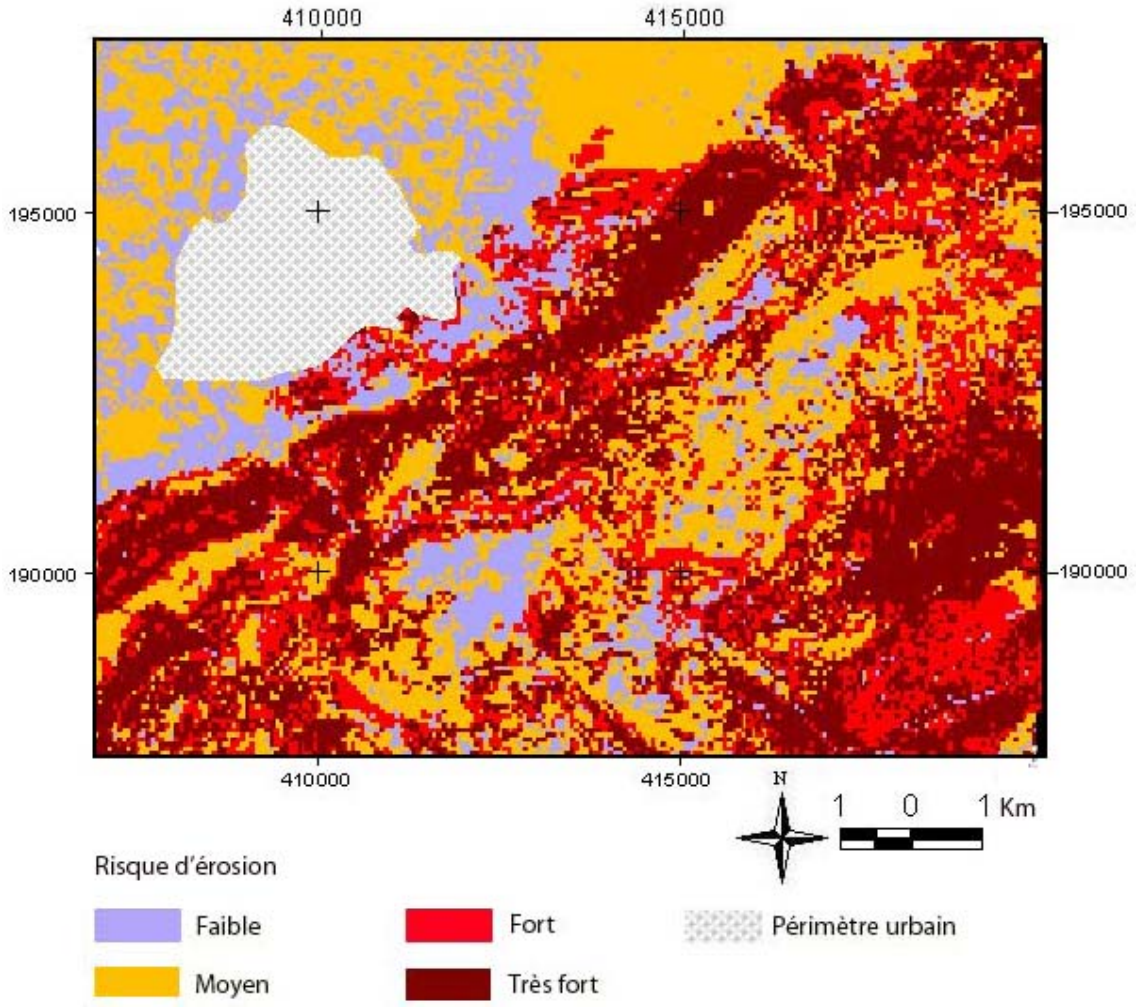


Figure 7 : Carte du risque d'érosion. *Erosion risk map.*

Tableau 5 : Règle de décision du risque d'érosion. *Decision rule of erosion risk.*

Risque d'érosion		**Friabilité des matériaux**			
		1	**2**	**3**	**4**
Potentiel d'érosion	1 (faible)	1	1	1	2
	2 (moyen)	1	1	2	3
	3 (fort)	2	2	4	4
	4 (très fort)	3	4	4	4

Les cartes thématiques de potentiel et de risque d'érosion montrent que les superficies des quatre classes sont comparables avec une légère augmentation de 4 % pour les zones à très fort risque d'érosion. Ceci est dû aux pratiques agricoles sur des terrains à fort degré de pente (> 35°). Ces résultats montrent aussi que la vulnérabilité à l'érosion dans la région d'étude est essentiellement contrôlée par la densité du couvert végétal et le degré de pente. Quant à l'influence de la friabilité sur l'érosion hydrique, elle est déclenchée par l'action humaine suite aux pratiques agricoles sur les terrains à fortes pentes (> 15°).

5. DISCUSSION

La méthodologie adoptée dans cette étude a permis de réaliser une carte du risque d'érosion. En l'absence de travaux antérieurs, la validation a été faite par confrontation directe avec la réalité de terrain. Le taux d'exactitude a été évalué à environ 80 % lors d'une mission sur le terrain à la suite de la production de la carte de risque, et ce en examinant le résultat à une vingtaine de points bien répartis sur le territoire et couvrant les différentes classes d'érosion. Aussi, ces points étaient différents de ceux qui avaient été choisis lors de l'acquisition des données.

Les zones détectées à risque d'érosion fort et très fort sont riches en argiles et en débris de roches calcaires. Elles sont traversées par plusieurs entailles fluviatiles. Celles-ci se connectent aux principaux cours d'eau, en l'occurrence les oueds Bou Tout, El Ghazi et Sabek. La charge solide en suspension ainsi transportée est véhiculée depuis la montagne jusqu'à la plaine, en passant notamment par la ville de Béni Mellal. La canalisation des oueds traversant la ville est sous dimensionnée, ce qui provoque des inondations et des déversements des charges solides dans le périmètre urbain lors de fortes pluies ou du ruissellement en nappe. Plusieurs points de la ville sont devenus célèbres pour leurs inondations aussi bien pendant la saison pluvieuse que lors des orages d'été (Agence du Bassin d'Oum Er Rbiâ, 2002). Les premiers points touchés de la ville sont les principaux carrefours et croisements de voies de communication. La circulation est souvent coupée lors des fortes averses, et ce malgré les aménagements des tronçons des cours d'eaux traversant la ville que la municipalité essaie d'effectuer avant chaque saison pluvieuse pour palier ce problème (curage des charges solides accumulées sur le lit des cours d'eau, renforcement des berges, nettoyage des regards du réseau d'assainissement). Actuellement, la ville de Béni Mellal demeure toujours menacée par les inondations. Un aménagement en zone montagneuse, en amont de la ville, s'impose. En effet, afin de minimiser les risques d'inondation qui menacent de plus en plus la ville de Béni Mellal, dans une étude hydraulique, l'Agence du bassin d'Oum Er Rbiâ (2002) a recommandé l'installation de barrages d'écrêtement en amont de la ville de Béni Mellal sur les principaux cours d'eau (oueds Bou Tout, Ain El Ghazi, Sabek). L'érection de ces barrages favoriserait une meilleure protection de la ville contre les inondations. Cependant, ils seraient condamnés à l'envasement à moyen et à long terme si on ne procède pas à un aménagement des zones à risque d'érosion par l'interdiction des pratiques agricoles sur les pentes (> 15°), la protection de la forêt, le reboisement des zones dénudées, l'installation des murs de soutènement et la construction de terrasses qui conservent les terrains pour l'agriculture.

6. CONCLUSION

Les résultats de ce travail montrent l'intérêt de l'utilisation de la technologie de la télédétection et des SIG dans l'évaluation de la vulnérabilité à l'érosion en zone montagneuse. La carte du risque d'érosion élaborée pourrait constituer un document de base pour tout aménagement proposé. La méthode utilisée a permis d'identifier des zones à risque d'érosion dans l'Atlas entourant la ville de Béni Mellal. Elle peut être généralisée sur tout le piémont de la région qui connaît actuellement une prolifération accrue des habitations construites dans des zones à risque d'érosion et sur le lit des cours d'eau. Elle peut être aussi transposable à d'autres régions montagneuses du haut Atlas central vu la similitude géologique, géomorphologique et climatique. Néanmoins, il serait intéressant de l'appliquer sur d'autres régions montagneuses où des travaux de cartographie de l'état de l'érosion par les méthodes conventionnelles sont disponibles afin de comparer les résultats obtenus.

DÉDICACE

Ce travail est dédié à la mémoire du regretté professeur Ferdinand Bonn, décédé l'été 2006 au Maroc, lors d'une mission de recherche. Nous avons eu l'occasion de rencontrer ce grand monsieur de la science lors des manifestations scientifiques au Maroc comme à l'étranger. Sa personnalité incarne un homme sage, serviable et prêt à soutenir tous les chercheurs ou étudiants chercheurs dans leurs travaux de recherche en télédétection. Ses bouquins, dont le *Précis de télédétection*, et ses publications nous ont été d'un grand soutien scientifique.

Références

Abrams, M. (2000) The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) : data products for the high spatial resolution imager on NASA's Terra platform. International Journal of Remote Sensing, vol. 21, p. 847-859.

Agence du Bassin d'Oum Er Rbiâ (2002) Étude hydraulique et définition des travaux d'aménagement de la province de Béni Mellal. Rapport interne, Beni Mellal, 89 p.

Aresmoud, M. (2005) Gestion des risques liés aux inondations système de prévision et d'alerte aux crues du bassin de l'Ourika, Marrakech. Séminaire du réseau international des organismes de bassin (RIOB) : gestion intégrée des ressources en eau dans les régions méditerranéennes et en Afrique du Nord, 23-26 mai 2005, Marrakech (Maroc), 40 p. http://www.riob.org/remoc/marrakech2005/marakech_2005f.htm.

Bonn, F. (1998) La spatialisation des modèles d'érosion des sols à l'aide de la télédétection et des SIG : possibilités, erreurs et limites. Sécheresse, vol. 9, n° 3, p.185-192.

Bou Kheir, R., Girard, M.-C., Khawlie, M. et Abdallah, C. (2001) Érosion hydrique des sols dans les milieux méditerranéens : une revue bibliographique. Étude et gestion des sols, vol. 8, n° 4, p. 231-245.

Bou Kheir, R., Cerdan, O. et Abdallah, C. (2006) Regional soil erosion risk mapping in Lebanon. Geomorphology, vol. 82, p. 347–359

Chakroun, H. (1993) Intégration d'un modèle hydrologique conçu pour la télédétection et d'un modèle de perte de sol dans un système d'information géographique. Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke. Sherbrooke, 93 p.

De Ploey, J., Imeson, A. and Oldeman, L.R. (1991) Soil erosion, soil degradation and climatic change. P. 275-292, *in* Brouwer, F.M., Thomas, A.J., Chadwick, M.J. (réd.) Land use changes in Europe. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 528 p.

Direction générale de l'hydraulique (2005) Problématique générale des inondations sur le territoire marocain. Rabat, 23 p. http//www.emwis.org/documents/doc/20050428_PDI-SIG.doc

El Hajjam, M. (2006) Les inondations de oued El Handak : questions sur l'aménagements de l'espace. Milafat-Tadla, n° 110-111 (octobre), p. 12.

Foster, G.R., Meyer, L.D. and Onstad, C.A. (1996) An erosion equation derived from basic erosion principles. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, vol. 20, p. 672-687.

FAO (Food and Agriculture Organisation) (1990) Conservation des sols et des eaux dans les zones semi-arides. Rome, Bulletin pédologique, n° 57, 182 p.

Laflen, J.M., Leonard, J.L. and Foster, G.R. (1991) WEPP : A new generation of erosion predicting technology. Journal of Soil and Water Conservation, vol. 46, p. 34-38.

Lee, S. (2004) Soil erosion assessment and its verification using the universal soil loss equation and geographic information systems : a case study at Boun Korea. Environmental Geology, vol. 45, p. 457-465.

Monbaron, M. (1985) Carte géologique au 1/100 000 de Beni Mellal. Notes et Mémoires du Service géologique du Maroc n° 341.

Moussa, R., Voltz , M. and Andrieux, P. (2002) Effects of the spatial organization of agricultural management on the hydrological behaviour of a farmed catchment during floods events. Hydrological Processes, vol. 16, p. 393-412.

Piqué, A. (1994) Géologie du Maroc. Édition Pumag, Marrakech (Maroc), 384 p.

Shrimalil, S.S., Aggarwalz, S.P. and Samra, J.S. (2001) Prioritizing erosion-prone areas in hills using remote sensing and GIS - a case study of the Sukhna Lake catchment (Northern India). International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, vol. 3, p. 54-60.

Souchère, V., Cerdan, O., Dubreuil, N., Le Bissonnais, Y. and King, C. (2005) Modelling the impact of agri-environmental scenarios on overland flow in a cultivated catchment (Normandy, France). Catena, vol. 61, p. 229-240.

Verset, Y. (1988) Mémoire explicatif de la carte géologique du Maroc au 1/100 000, feuille de Qasbat-Tadla. Notes et mémoires du Service géologique du Maroc n° 340bis, 132 p.

Wachal, D.J. and Hudak, P.F. (2000) Mapping landslide susceptibility in Travis Country, Texas, USA. GeoJournal, vol. 51, p. 245-253.

Wischmeier, W.H. et. Smith. D.D (1978) Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning. U.S. Department of Agriculture,Washington D.C., Agricultural Handbook n° 537, 58 p.