



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE



RESUME ETENDU

Présenté par

Monsieur TOUMI Samir

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'ECOLE NATIONALE SUPERIEURE

D' HYDRAULIQUE

Domaine :
Hydraulique

Sujet de la thèse :

**APPLICATION DES TECHNIQUES NUCLEAIRES ET LA
TELEDETECTION A L'ETUDE DE L'EROSION HYDRIQUE
DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUED MINA**

Mr MEDDI Mohamed
Mr MAHE Gil

Professeur
Directeur de recherche

Directeur de thèse
Co-Directeur de thèse

Année Universitaire 2012/2013

Cette thèse a été réalisée dans le cadre du projet :



INTRODUCTION

L'érosion hydrique est un phénomène géologique naturel qui a façonné la surface de la terre au cours des âges géologiques (White, 1986). Les changements climatiques et des paysages sous l'influence de la pression démographique et l'extension des cultures d'exploitation, ont contribué à l'augmentation de l'exposition des terres au processus de ruissellement, et par conséquent, à la dégradation des sols par l'érosion (Vezena et Bonn, 2006). Diverses sortes d'activités humaines, pratiques agricoles, exploitations forestières, pâturages, construction des routes et bâtiments tendent à modifier les phénomènes d'érosion, en l'accéléralant souvent de façon considérable (Wachal, 2007). Elle résulte du détachement, sous l'effet de l'énergie cinétique des gouttes de pluie, et du transport de fragments ou de particules de sol ou de roches de leur emplacement initial par l'eau, dégradant la qualité des eaux et la fertilité des sols et réduisant la capacité des réservoirs.

En Algérie, l'érosion est un problème majeur, son intensité varie d'une zone à l'autre, elle devient, en effet, dangereuse dès qu'elle dépasse le seuil tolérable. Elle a été reconnue comme un moyen de problème environnemental dans les années 1930 par les colons et les agronomes (Aubert G. 1986). Plus de 120 millions de tonnes de sédiments sont rejetées en mer chaque année réduisant la durée de vie des barrages (Demmak.1989). Ces effets sont néfastes sur la fertilité des sols et la qualité des eaux. D'après Demmak (1982) et Achite *et al.*, (2006), Le taux de sédimentation a évolué ces dernières années, du fait de la forte érosion des bassins versants, particulièrement à l'Ouest du pays où l'érosion touche 47 % de l'ensemble des terres. Au début des années quatre vingt, environ 120 millions de tonnes de sédiments arrachés annuellement au niveau des bassins versants du nord algérien (Demmak, 1982). Une partie de cette masse se dépose dans les 57 grands barrages que détient l'Algérie.

Compte tenu de la gravité de l'érosion du sol et de ses impacts, il est nécessaire que des mesures de gestion appropriées soient prises. Pour ce faire, une bonne connaissance des variations spatiales de l'érosion des sols est nécessaire lors de la planification des efforts de conservation (Tamene *et al.*, 2006). En raison du coût élevé de conservation et les objectifs de productions concurrentes tels que l'augmentation de la population, le développement des infrastructures et la dégradation des terres, il est nécessaire de cibler les solutions et les ressources dans les zones à haut risque, plutôt que de les répartir équitablement entre le paysage (Shiferaw, 2011). Différents scénarios de gestion et de planification de l'utilisation des terres peuvent alors être mises en œuvre pour faire face aux divers problèmes de dégradation des terres. Ces tentatives doivent prendre en considération les conditions biophysiques et socio-économiques des sites.

La cartographie de l'érosion est un outil fondamental pour connaître la répartition et l'ampleur géographique du phénomène, ainsi que pour sa caractérisation qualitative (Okoth, 2003). Dans une image raster intégrée dans un SIG, le modèle USLE peut prédire le potentiel d'érosion sur une base d'un pixel. Cela présente des avantages distincts lorsque l'on tente d'identifier les schémas spatiaux de la perte des sols présents dans une grande région (Van der Knijff *et al.*, 2000). Le SIG peut ensuite être utilisé pour isoler et interroger les bases de données constituées pour obtenir des informations vitales sur le rôle des variables individuelles. L'équation empirique qui a été développé pour prédire les taux d'érosion des sols dans les champs agricoles aux États-Unis d'Amérique (Wischmeier et Smith, 1978) a été largement utilisée dans le monde entier sous sa forme originale ou modifiée (Shi *et al.*, 2002, Nasir *et al.*, 2006, Terranova *et al.*, 2009, Fistikoglu et Harmancioglu 2002), y compris au Maghreb et en Algérie (Touaibia *et al.*, 1990, Touaibia *et al.*, 1999, El Garouani *et al.*, 2003). Ce modèle est simple, il exige de données

limitées et peut donc être pratique pour les grands bassins versants où les données peuvent être manquantes (Kinnell, 2001; Renschler et Harbor, 2002, Sadiki *et al.*, 2004). Ces données peuvent être recueillies par la télédétection. En effet, la télédétection fournit des données homogènes sur de vastes régions avec une capacité répétitive régulière, et peut donc contribuer grandement à l'évaluation régionale de l'érosion. Ainsi, quand on veut sélectionner un modèle d'érosion à l'échelle régionale ou nationale, c'est la disponibilité des données-sources qui est probablement la plus importante à prendre en considération. Utiliser un modèle sophistiqué n'aurait aucun sens sans des données-sources disponibles.

Cette étude s'inscrit dans le projet SIGMED (Approche Spatialisée de l'Impact des activités agricoles au Maghreb sur les transports solides et les ressources en Eau Des grands bassins versants) qui a pour objectif général l'étude de la relation entre les activités humaines et en particulier agricoles-, les transferts d'eau et le transport de sédiments dans les bassins-versants de deux grands barrages : le Bouregreg au Maroc et l'Oued Mina en Algérie (Mahe et al., 2013).

Le bassin versant de l'oued Mina est confronté à un grave problème de dégradation du sol, comme pratiquement toute la région du tell occidental Algérien. L'érosion hydrique est plus forte dans cette région, en partie du fait que les précipitations annuelles proviennent majoritairement de pluies d'orages, très intenses et qui ont un fort pouvoir érosif en début de saison de pluies. Cela s'explique aussi par la présence d'un couvert végétal peu dense. Ce problème provoque l'envasement rapide du barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda situé dans la partie septentrionale du bassin et Bakhada au sud. Cela touche également l'agriculture locale, en provoquant des pertes énormes en terres cultivables, ce qui amène les paysans à l'exode vers les villes. Les facteurs naturels (précipitations, topographie, géologie, lithologie, végétation) ont joués un rôle important dans les processus érosifs dans la région d'étude, mais il n'en demeure pas moins que l'accélération de ces phénomènes dépend largement des formes de gestion et de l'utilisation de l'espace.

L'objectif général de cette thèse est de développer et de présenter une méthode qui peut être utilisée pour évaluer le risque d'érosion hydrique dans les différents niveaux du système de paysage en utilisant l'équation universelle des pertes en sol USLE dans le bassin versant de l'Oued Mina. L'approche utilisée est basée sur l'intégration de données issues du traitement d'images satellitaires des capteurs « Thematic Mapper » TM4 et TM5 du satellite Landsat et de données cartographiques dans un système d'information géographique (SIG) pour l'identification et la cartographie des zones à risques d'érosion hydrique. La méthodologie suivie repose sur l'utilisation des données de la télédétection pour une analyse spatiale et temporelle des causes et des facteurs intervenant dans le processus érosif (occupation et utilisation des sols, couvert végétal,). Ces données qui peuvent être analysées avec d'autres types de données (terrain, cartes géologiques et lithologiques, MNT..) et croisées dans un système d'information géographique permettent de définir les zones d'intervention prioritaire (Boukheir *et al.*, 2008).

L'utilisation du modèle prédictif USLE à une échelle unique dans un environnement SIG offre une opportunité pour l'évaluation des risques d'érosion (Roose, 1993). Les données sur l'érosion par rapport à certains indicateurs sont collectées, calibrées et sont entrées dans une base de données SIG, après quoi elles seront spatialement modélisées pour représenter le risque d'érosion des sols dans n'importe quel élément du paysage.

Notre travail est développé en trois parties. La première est consacrée à l'évaluation de l'érosion dans le bassin de l'Oued Mina. L'approche utilisée a consisté dans un premier temps à détecter les facteurs déclenchant l'érosion et à les spatialiser en utilisant les images satellitaires Landsat-TM. Ces images sont choisies car leur définition de 30 m de résolution au sol est adaptée à l'échelle de travail (1:750 000). Les données de télédétection multi-temporelles et les SIG sont utilisés pour évaluer et cartographier chaque facteur individuellement. La modélisation prédictive par l'USLE dans un environnement SIG offre une opportunité pour l'évaluation des risques d'érosion. Les données sur l'érosion par rapport à certains indicateurs sont collectées, calibrés et sont entrés dans une base de données SIG, après quoi il est spatialement modélisé pour représenter le risque d'érosion des sols dans n'importe quel élément du paysage choisi. Des couches individuelles ont été créées pour chaque paramètre de l'USLE et sont ensuite combinées par une procédure de modélisation dans la grille ArcGIS 9.3.

La deuxième partie expose le traitement des séries temporelles des images satellites, pour extraire les informations relatives aux changements d'occupation et l'utilisation du sol sur le bassin versant de l'Oued Mina, plus précisément sur l'évolution de la couverture végétale. Il comprend d'une part l'estimation de taux de changement à partir de l'application du modèle « Landchange modeler » du logiciel IDRISITM sur les images du capteur Landsat TM prise durant trois périodes différentes (1987, 2002 et 2009). La méthode utilisée permet la détection de changements sur ces variables, en l'occurrence les classifications qui permettent de déterminer et localiser les changements d'occupation et d'utilisation des sols. En effet, l'analyse multi-spectrale et multi-temporelle des données satellitaires peut déboucher sur une cartographie évolutive des paysages, utile à la connaissance des processus d'érosion.

D'autre part, il comprend l'étude de la variation spatio-temporelle de la végétation à partir des données décennales de NDVI du SPOT-VEGETATION ainsi que l'extraction de profils moyens des valeurs de NDVI, et expliquer ces variations, notamment en fonction de paramètres climatiques. Elle permet aussi, le calcul de métriques temporelles de variables biophysiques qui servent respectivement à caractériser finement les variations de la végétation.

La dernière partie concerne la validation des résultats obtenus dans la première partie. Les résultats de l'estimation de l'érosion dans le bassin versant de l'Oued Mina seront comparés avec ceux obtenus par la technique isotopique, par l'utilisation du radio-isotope le Césium-137.

Description de la région d'étude :

DESCRIPTION DE LA REGION D'ETUDE :

1. Situation géographique

Le bassin de l'Oued Mina se situe dans la partie Nord-Ouest de l'Algérie. Il fait partie du grand bassin versant « Chélif » et compte parmi les principaux affluents de l'Oued Cheliff. D'une superficie de 8200 km², il est encadré par le moyen Chélif à l'Est, le bassin de la Macta à l'Ouest, le massif de Dahra au Nord et le Chott Ech Chergui au Sud. La partie septentrionale s'insère dans le Tell occidental et comprend la retombée sud-orientale de l'Ouarsenis, à l'Est. À l'Ouest, il est limité par les Monts des Béni-Chougrane. Il est situé entre les latitudes Nord de 36° 1' et 34° 41' et les longitudes Est de 0° 16' et 1° 30' (figure 1).

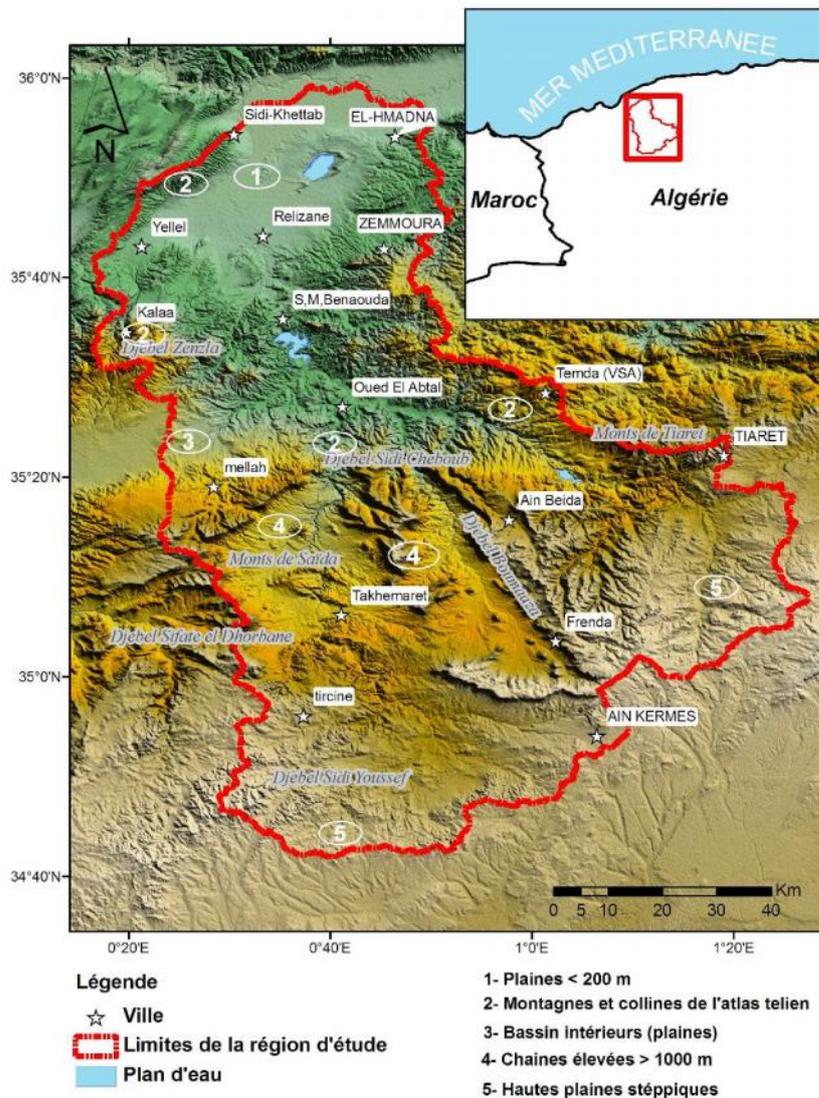


Fig. 1: Limites et unités géographiques de la région d'étude. Les chiffres correspondent aux unités géographiques et les étoiles correspondent aux villes.

Description de la région d'étude :

2. Aspect climatique

Le bassin versant de l'oued Mina 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.

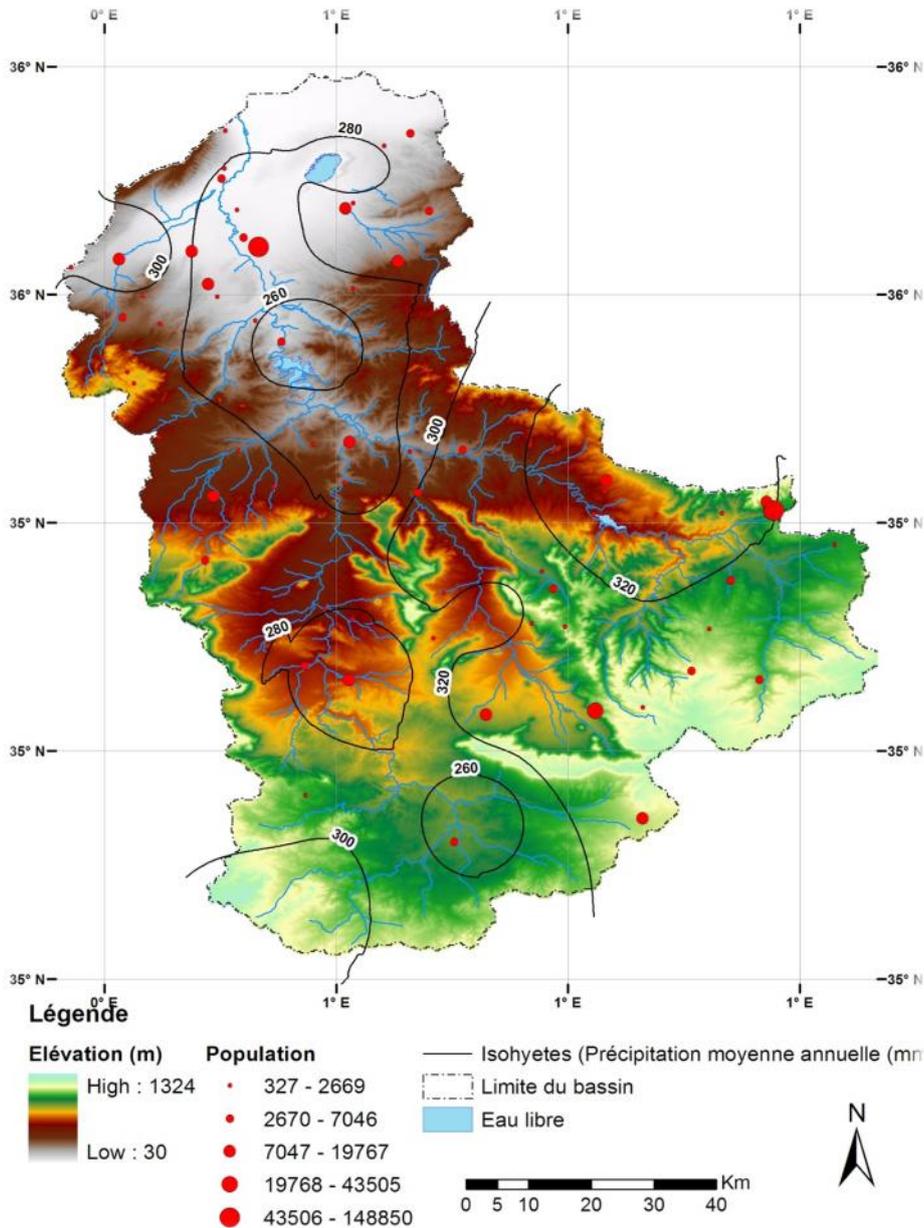


Fig. 2: Représentation du modèle numérique de terrain, les isohyètes des précipitations moyennes annuelles et la répartition des grandes agglomérations dans la région d'étude.

Description de la région d'étude :

Les précipitations : dans la partie Nord, les précipitations annuelles varient entre 200 et 300 mm en moyenne. La pression de l'agriculture est importante, le relief est plat (plaine du Bas Chélif), sans érosion et, par conséquent, avec beaucoup de surface agricole utile (grands périmètres d'irrigation). Les précipitations moyennes mensuelles varient de 5 mm au mois de juillet à 51 mm au mois de mars. Sur une base annuelle, la précipitation journalière maximale dans la région du bassin versant de S.M. Ben-Aouda atteint en moyenne 30 mm (figure 2).

La température : Les températures moyennes de la région subissent des variations régionales et saisonnières. Le contraste saisonnier est bien marqué entre l'hiver et l'été. Les minima thermiques sont généralement atteints en janvier, les maxima en juillet / août. Les données disponibles sont relevées à partir des cartes de températures moyennes mensuelles éditées par l'ANRH. Les températures moyennes annuelles les plus élevées sont enregistrées dans les plaines du nord du bassin, elle est de 17 degrés à Relizane. Les plus basses sont enregistrées dans les altitudes ; elle atteint 13°C. Les valeurs mensuelles maximales et minimales moyennes sont respectivement de 27°C et 10°C.

L'évapotranspiration : le total potentiel évaporatoire annuel serait de 1200 à 1600 mm d'après l'ANRH, soit plus du double du total pluviométrique, avec un maximum de 1626 mm à la station de S.M. Ben Aouda. En saison froide, l'évapotranspiration décroît progressivement jusqu'au moment où elle atteint des valeurs inférieures à celles des précipitations.

3. Aspect hydrologique

Deux barrages ont été construits sur l'Oued Mina; Bakhadda, mis en service en 1936 sur le cours supérieur qui draine un sous-bassin de 1300 km² et le barrage de S.M. Ben Aouda en aval de Bakhadda avec une capacité de 237 millions de m³. Ce dernier doit répondre à des besoins d'approvisionnement en eau potable des villes en aval et des besoins agricoles par le développement de l'irrigation sur un périmètre de 23000 hectares situés dans la plaine de la Mina et du Bas Chélif. D'après les études antérieures dans le bassin versant de S.M. Ben Aouda, les apports du barrage sont estimés à 120 hm³ et le débit moyen annuel est de 3.8 m³/s. Pour le barrage de Bakhadda, l'apport annuel est de 61.4 hm³.

4. Aspect morphologique

Les données numériques d'élévation sont introduites dans un modèle hydrologique intégré dans un SIG afin de délimiter le bassin et les sous bassins drainés par les différents cours d'eau existants. Deux modèles différents ont été utilisés dans le cadre de notre étude :

- Watershed Modeling System (WMS) qui est un SIG permet de délimiter les lignes de partage entre les bassins et de déterminer les différentes caractéristiques morphométriques.
- Soil and Water Assessment Tool. Cet outil permet de deviser un grand bassin versant en des sous bassins selon les caractéristiques physiques et l'état de surface.

La figure 3 représente les résultats de la modélisation. Le bassin de l'Oued Mina est divisé en trois sous bassins qui drainent les cours d'eau jusqu'aux barrages : trois sous bassins contrôlés par les stations hydrométriques utilisées par la suite de l'étude.

Description de la région d'étude :

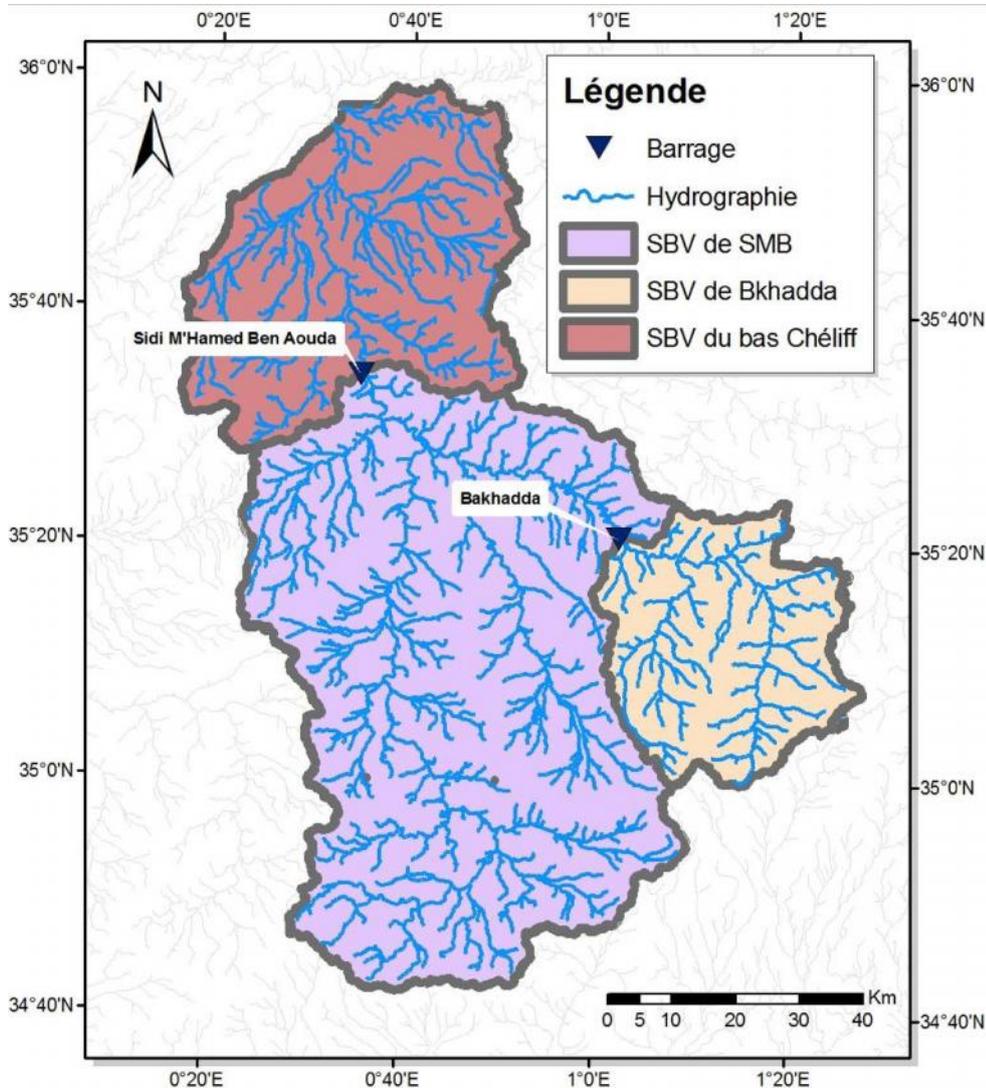


Fig. 3: Sous bassins des barrages existant dans la région d'étude.

Réseau hydrographique :

Le bassin de l'Oued Mina draine une superficie de 8200 km² comprise depuis les hautes terres (monts de Frenda) jusqu'à la mer Méditerranée par le biais du Oued Chélif (33 m). Les principaux affluents prenant naissance à partir des montagnes et se déversant dans l'Oued Mina sont :

- Oued Abd, prend naissance des monts à partir des monts de Sidi Youcef et Boudfir et draine le djebel de Argoub, Toukiret, Moualek et Djebel Maida.
- Oued Tat draine les monts de Kaf Safsaf passant par les monts de Keskas et Coulamzan.
- Oued Haddad draine les monts de Loukda.
- Oued Kreloua, draine les monts de Sidi Yahia et de Bou Barha.

Description de la région d'étude :

La figure 4 représente le profil en long de l'oued Mina. A 200 m d'altitude se situe le barrage de Sidi M'Hamed Ben Aouda sur l'oued Mina qui rejoint l'oued Chélif environ 80 Km à l'aval du site du barrage. A quelques kilomètres en amont du barrage de S.M. Ben Aouda, l'oued mina est contrôlé par le barrage de Bakhada (à 600 m) qui draine un bassin de 1300 Km².

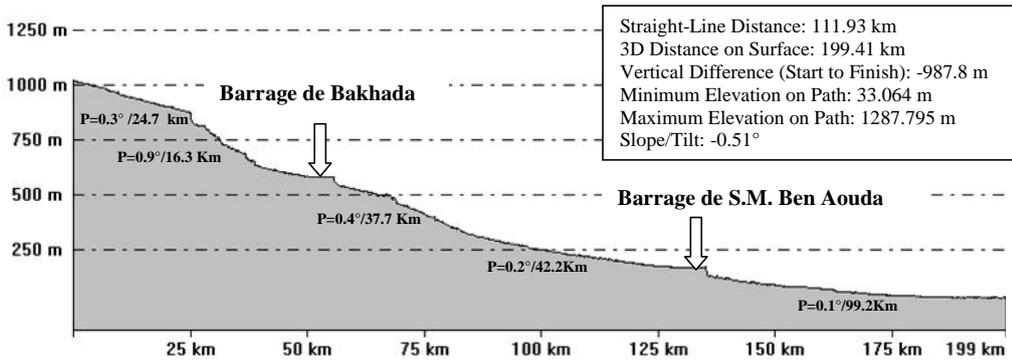


Fig.4 : Profil du cours d'eau principal du bassin versant.

La figure 5 représente la courbe hypsométrique de l'Oued Mina. Elle représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude. La dénivelée maximale des terres, de même que celle des terres à 5% et 50% d'altitude, reflète la présence d'un massif montagneux car elles atteignent plus de 1200 m et 700 m respectivement. De ce fait, La majorité du sud de la région d'étude est caractérisée par un relief relativement doux, comme elle exprime la dénivelée des terres qui atteint 500 m en amont du barrage de Bakhada. En aval du barrage de S.M. Ben Aouda, les terres sont caractérisées par un relief plat qui représente la vallée de l'Oued Mina.

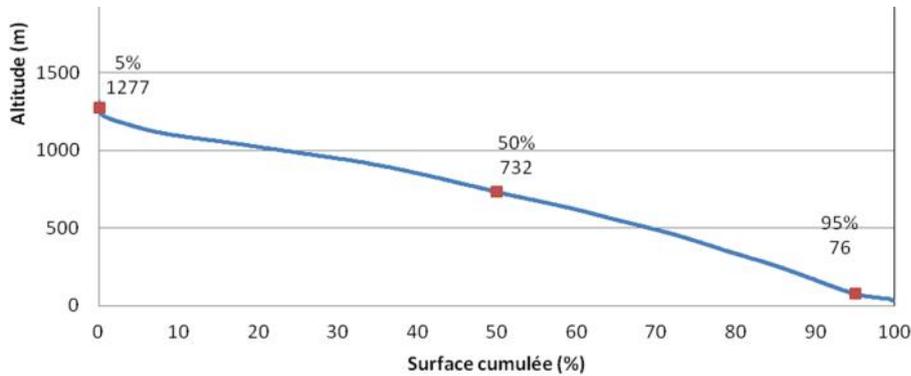


Fig.5 : Courbe hypsométrique de l'Oued Mina.

Description de la région d'étude :

5. Aspect géographique

La zone d'étude s'étale sur deux domaines naturels bien distincts. L'atlas tellien au Nord et les hautes plaines steppiques au Sud. Dans ce contexte, la région d'étude est délimitée sur le plan naturel au nord et nord-est par les monts de l'Ouarsenis et les monts de Dahra. À l'Ouest par les monts de Béni Chograne et de Saida. Au sud, la limite s'ouvrant sur les hautes plaines steppiques (Plateaux de Sersou et plateaux de Saida). Le nord du bassin est dominé par les plaines alluviales d'une altitude inférieure à 200 m quand au sud dominant les plateaux steppiques élevés. Entre les deux domaines s'étalent les paiements et chaînes élevées (figure 6). Ce territoire n'a donc pas de caractère homogène : il se caractérise par une alternance de milieux très contrastés dont les grands ensembles sont au nombre de trois :

-Le milieu montagnard : il est constitué par une série de djebels généralement orientés vers le nord-est, peu accentués et aux dénivellations peu importantes conférant à l'ensemble orographique une allure tabulaire ondulée. Ces domaines ondulés sont incisés par une série d'oueds courants dans des fonds de vallées: il s'agit d'ouest Abd, Haddad et Taht qui débouchent sur les plaines via l'Oued Mina. Au sud de ces plateaux ondulés se trouve une zone de contact avec les hautes plaines steppiques : les plateaux de Saida et de Sersou qui se situent à des altitudes très peu variables d'une moyenne de 1200 m.

-Les plaines : elles se localisent dans la partie nord de la région d'étude à moins de 200 m d'altitude et concernent principalement la wilaya de Relizane. Il s'agit de la plaine du bas Mina et du bas Chélif. Cette région est caractérisée par une agriculture intense (périmètres d'irrigation).

-Le milieu steppique : il est caractérisé par des altitudes élevées (1100 m en moyenne), les plus hautes steppes atteignent 1300 m et les plus basses oscillent entre 1000 et 1100 m, ce qui signifie que les dénivellations sont peu importantes, soit moins de 200 m. Cet espace est caractérisé par l'aridité du climat et la faiblesse des précipitations. Le substrat est à dominance calcaire.

Description de la région d'étude :

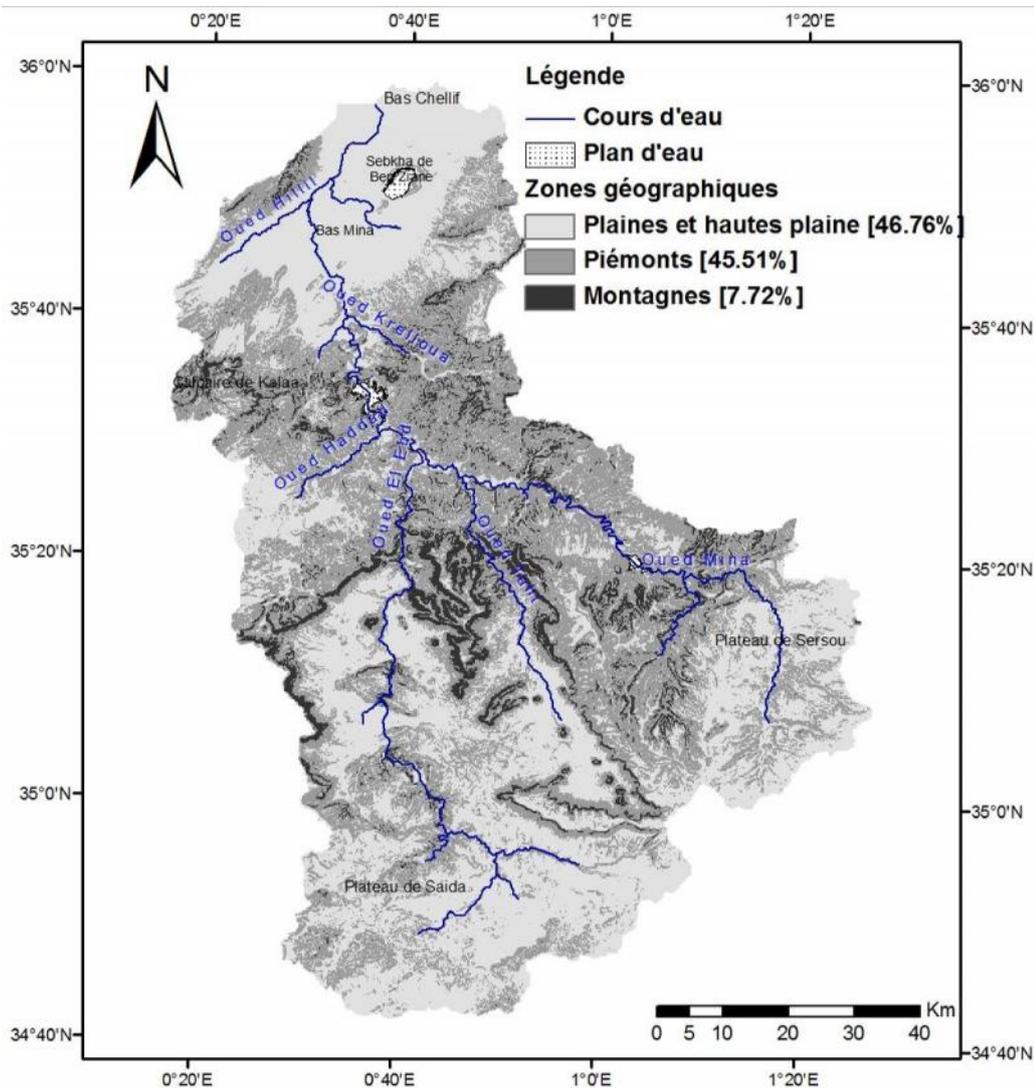


Fig. 6 : Carte des zones géographiques de la région d'étude.

6. Aspects orographiques

- **Le relief** : le relief de la zone d'étude est assez diversifié puisqu'on y distingue des plaines, des plateaux et une zone montagneuse. Ces entités façonnent des milieux naturels découpant l'espace de la zone en unités physio-géographiques.

- **La pente** : la potentialité et les limites d'utilisation du territoire dépendent dans leur majeure partie de la pente puisque celle-ci contribue à la détermination des possibilités d'érosion en relation avec d'autres facteurs de mécanisation des cultures, des modalités d'irrigation, des possibilités de pâturage, de l'installation et le développement de la végétation de reforestation (Lopez, 1976).

La carte des pentes représentée dans la figure 7 est établie sur la base du modèle numérique de terrain, la pente est subdivisée en 4 classes :

Description de la région d'étude :

- Classe 1 : pentes 0-5% caractérise l'ensemble des terrains dont la topographie est généralement plane. Ce sont les fonds de vallées, les plaines et les plateaux. Cette classe témoigne la stabilité des terrains avec un risque d'érosion faible. Elle couvre 48 % de la superficie totale de la région d'étude. A l'exception des zones steppiques au sud, sur ces terrains c'est la céréaliculture qui domine.
- Classe 2 : pentes 5-12% caractérise généralement un relief montueux, qui peut être des plateaux ou bas de collines. Les risques d'érosion sur ces terrains restent faibles mais peut être fort avec la présence des activités agricoles principalement céréaliculture qui domine l'occupation du sol.
- Classe 3 : pentes 12-30% caractérise le plus souvent les zones de piémonts qui sont le prolongement des massifs montagneux. Ce sont généralement des terrains de parcours et des terrains forestiers. Les risques d'érosion sont présents avec apparition des signes dus au ruissellement diffus. Ces terrains occupent 20 % de la superficie totale
- Classe 4 : pentes supérieures à 30%, représente les hauts piémonts et les zones montagneuses, de forte déclivité généralement couverte par la végétation forestière.

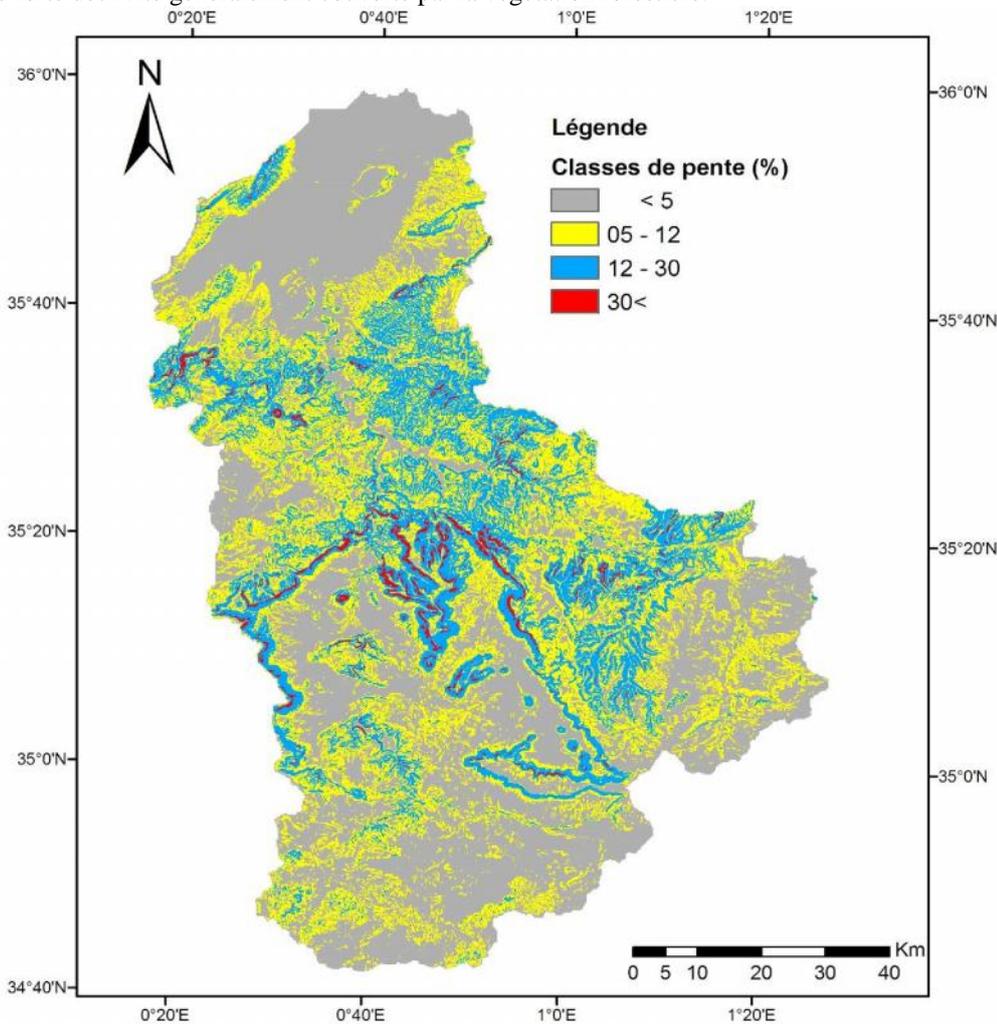


Fig. 7 : Carte des classes des pentes à partie MNT.

Description de la région d'étude :

7. Aspect lithologique et géologique :

La lithologie joue un rôle important sur le ruissellement, l'infiltration, l'érosion et le transport solide. Les matériaux géologiques se distinguent en formations meubles (sables, argiles, marnes) ou en formations consolidées (grés, calcaires, dolomies, ...).

La lithologie du bassin versant de l'Oued Mina a été étudiée par la GTZ dans le cadre d'un projet de collaboration entre l'Allemagne et l'Algérie (GTZ, 1987). En effet, la caractérisation lithologique a été réalisée par l'interprétation des photos aériennes et satellitaires. D'après la GTZ, le transport des sédiments s'explique par la lithologie de la région étudiée. Dans des zones principalement constituées de marnes (en amont du barrage de S.M. Ben Aouda), l'érosion hydrique se manifeste, avec l'absence des obstacles naturels, du fait que la végétation est absente et surtout pendant les averses de l'hiver.

8. Aspect hydrogéologique :

De nombreuses formations géologiques contiennent des eaux souterraines, les plus anciennes sont attribuées au jurassique et les récentes correspondent aux alluvions Quaternaires. Les systèmes aquifères existants dans la région d'étude sont représentés dans la figure N° 8. Le plus grand système se situe au Sud Ouest du bassin sur les monts de Béni Chograne, les monts de Frenda et le plateau de Saida. Ils sont répartis sur une formation calcaire de l'âge jurassique. C'est des nappes Karstique d'une perméabilité moyenne. Les potentialités de ces aquifères est estimé à 8.4 millions de mètre cube par an avec 24 forages recensés entre la région sud et les calcaires de Kalaa. Le deuxième plus grand aquifère se caractérise par une formation sédimentaire alluviale. Il est étalé sur la plaine de la Mina et la plaine de Griss. Ces potentialités annuelles sont estimées à 11 hm³, exploitées par 74 forages avec un volume exploité de 8.36 hm³/an (ABH, 2004). Les alluvions des cours d'eau représentent aussi un aquifère important. En effet, les réseaux hydrographiques du Haddad, de l'Abd et du Tat se sont ajustés au niveau de la Mina, ont fortement incisé des plateaux et des plaines d'accumulation susceptibles d'être bon aquifères.

Description de la région d'étude :

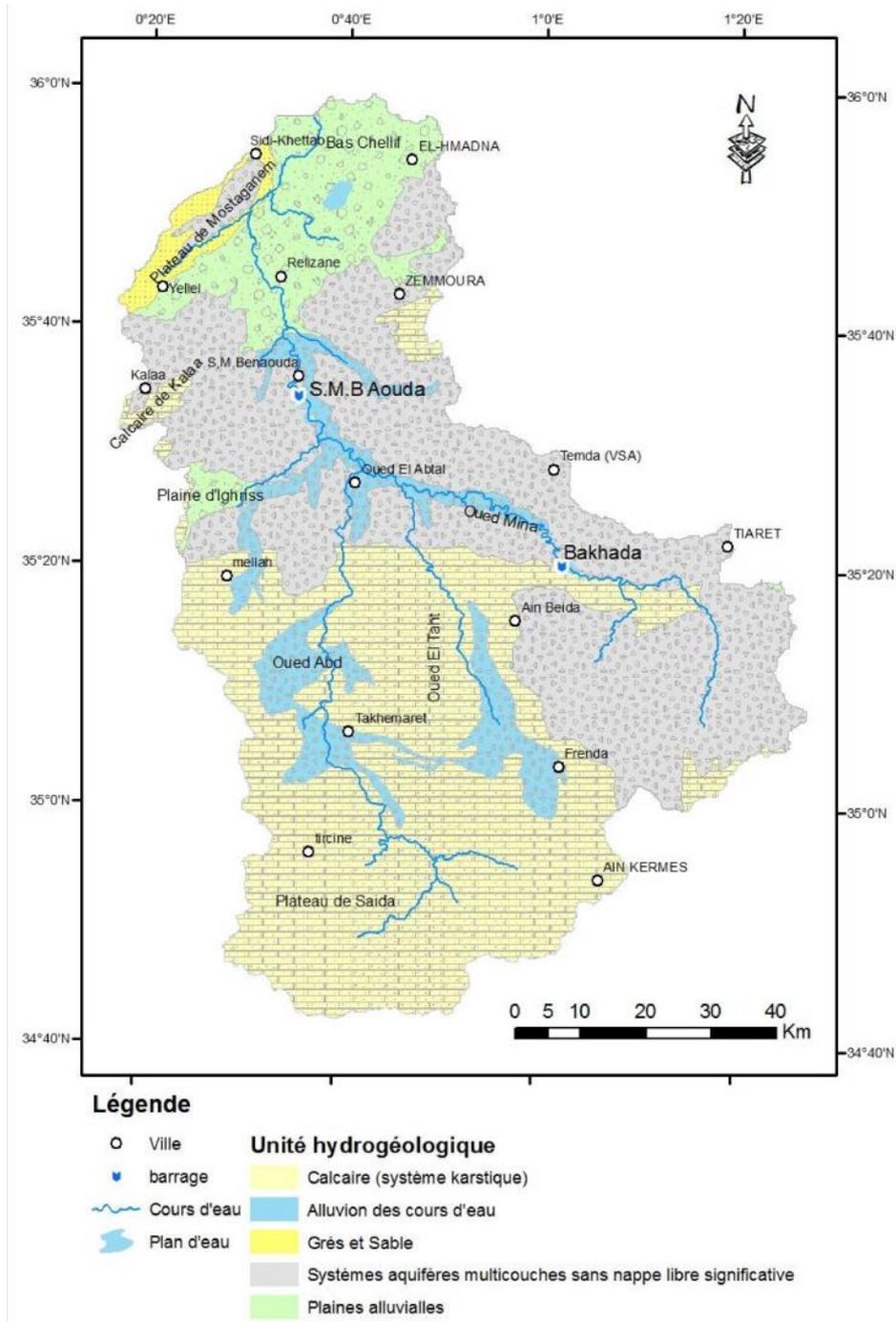


Fig. 8 : Les principales unités hydrogéologiques de la région d'études.

9. Aspect socio-économique

Le bassin versant de l'Oued Mina recouvre une superficie de 8200 Km² répartie sur cinq Wilayas, à savoir, la Wilaya de Tiaret, Mascara, Relizane, Saida et Mostaganem. Cette dernière occupe une petite superficie du bassin qui peut être négligé dans ce présent descriptif car elle est très faiblement représentée de point de vue de la taille de la population (Figure 9).

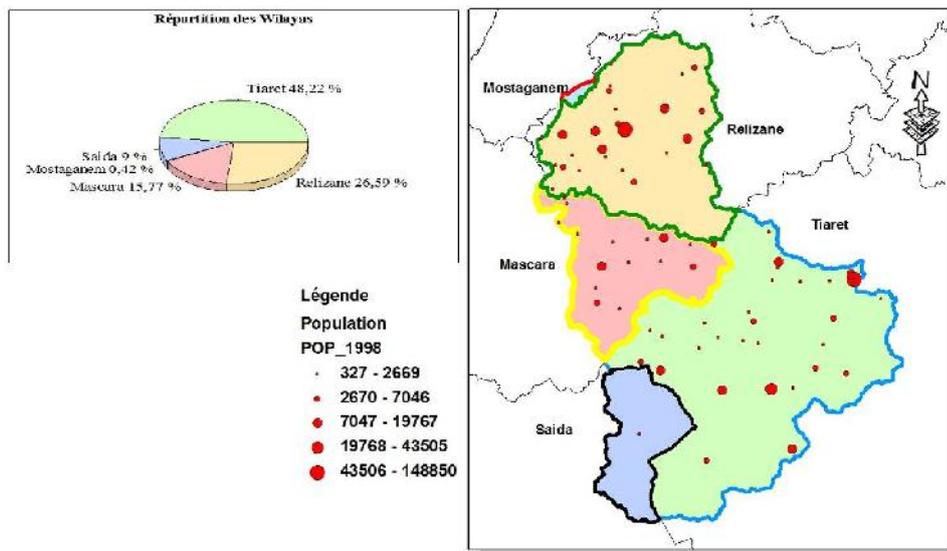


Fig. 9 : Répartition des wilayas dans la région d'étude et les principales agglomérations.

La wilaya de Tiaret occupe 48.22% de la superficie totale de la région d'étude, suivie de la wilaya de Relizane qui occupe 26.59% du secteur. Les wilayas de Mascara et de Saida n'occupent que 15.77 et 9% de la superficie totale du bassin respectivement. La population totale de la région d'étude est estimée en 2002 à 911 523 habitants et environ 1 050 804 habitants en 2012 dont la partie la plus importante réside dans le territoire de la wilaya de Tiaret et Relizane (figure 10).

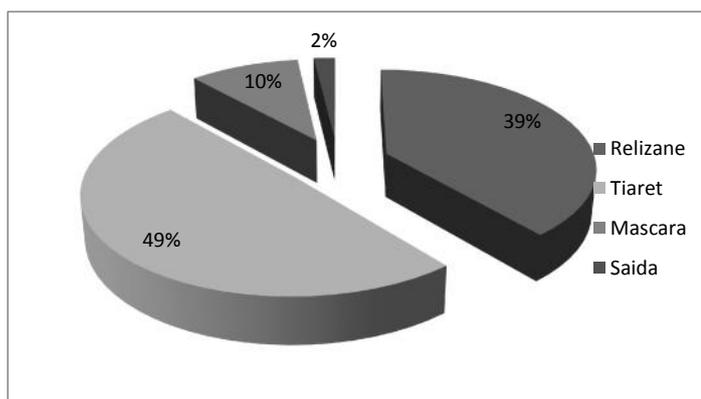


Fig. 10 : Répartition des wilayas selon le nombre d'habitants.

Description de la région d'étude :

D'après la figure N° 11, qui représente l'évolution de l'emploi dans le secteur agricole par wilaya entre 2000 et 2004, on constate que la population occupée par l'agriculture ne dépasse guère les 3000 citoyens entre l'année 2000 et 2002 pour les wilayas de Relizane, Saida et Tiaret sauf la wilaya de Mascara qui enregistre environ 5000 employés dans le secteur agricole en 2000 et ça a diminué jusqu' 1200 agriculteurs en 2002. Après l'année 2002, et avec l'effort considérable fourni par l'état Algérien pour le développement du secteur agricole par la création et l'accompagnement technique et financier des agriculteurs, on remarque l'accroissement en matière de création de l'emploi. Ce dernier a augmenté considérablement dans la wilaya de Relizane dans les périmètres d'irrigation situés dans le bas Mina et le Bas Chélif. En effet, le secteur de l'agriculture a mis en place en 2000 une stratégie opérationnelle agricole élargie, à partir de 2002, au domaine rural à la faveur de nouvelles attributions. Cette stratégie appelée Plan National de Développement Agricole et Rural, a pour mission la réhabilitation des espaces ruraux et la stabilisation des populations rurales par l'amélioration de la sécurité alimentaire des ménages et le soutien au retour des populations ayant fui leurs localités pour des raisons économiques ou sécuritaires.

D'après le responsable de l'exploitation de l'office nationale d'irrigation et de drainage (ONID), les périmètres irrigués de la région a subi durant ces dernières années une utilisation intense et que le nombre des agriculteurs enregistrés dans le programme d'irrigation atteint 2000 pour le périmètre de la Mina.

D'après la direction des services agricoles de la wilaya de Relizane, les terres agricoles sont répartis du point de vue juridique comme suit : les terres privées et la propriété de l'état. Le tableau montre un exemple de la répartition de l'exploitation agricole par nature juridique de la wilaya de Relizane. Dans les monts de la Mina, pendant les 20 dernières années la population a augmenté plus vite dans les agglomérations chefs lieux et secondaires (4,9%) que dans la zone éparses (1,3%). Entre 1977 et 1987, la population a diminué de 1,5% par an dans la commune de Sidi Mohamed Ben Aouda et de 0,3% dans celle d'Oued Es Salem. La forte proportion (plus de 70%) des terroirs fortement dégradés par l'érosion dans ces communes explique en grande partie cette déprise rurale (Taabni M. 1997). Les champs non travaillés sont imperméabilisés par la croûte de battance et deviennent très favorables à la concentration du ruissellement, aux incisions régressives et au développement des ravines. Une enquête de terrain a été effectuée au niveau des champs agricoles d'un certain propriétaire. Ce dernier a témoigné la gravité du phénomène de l'érosion et l'apparition des ravins au niveau de ces terres surtout après 1996 malgré que ces terres soient quasiment planes. En effet, cette région est exposée à une utilisation intense en plus du climat et les problèmes de drainage et de salinité.

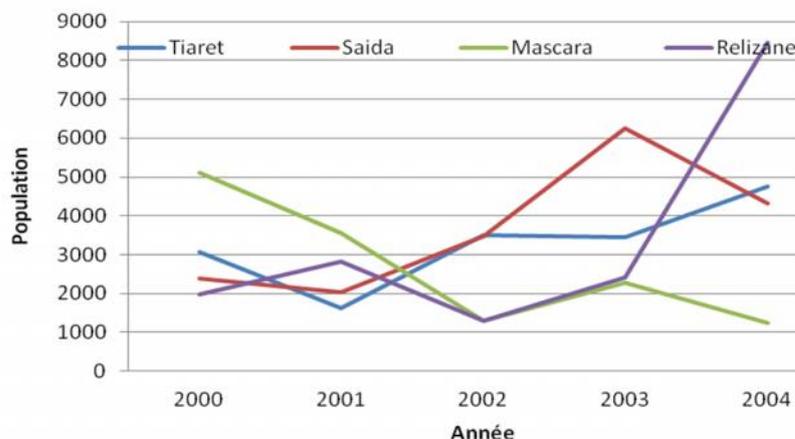


Fig. 11 : Evolution de l'emploi dans le secteur agricole par wilaya entre 2000 et 2004 (ONID).

10. Aspect pédologique

Ressource en sol :

La région d'étude procède une ressource importante des sols qui peuvent être des terres agricoles et présentant une formation lithologique et pédologique idéal pour l'agriculture.

Les surfaces agricoles utiles (SAU) ou les terres susceptibles d'être cultivées sont représentées dans la figure N°12.

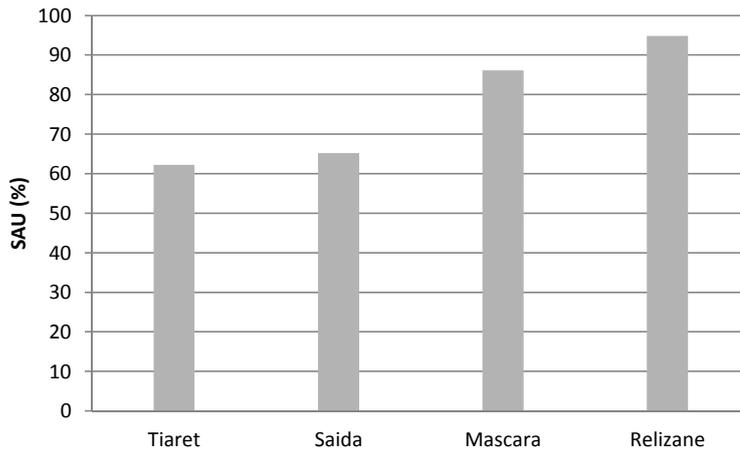


Fig. 12 : Les surfaces agricoles utilisées (SAU) par Wilaya (Source DSA)

Les SAU occupent environ 95% de la superficie de la wilaya de Relizane, suivi par la wilaya de Mascara avec un pourcentage de SAU de 86 %.

Couvert végétal

Le couvert végétal de la région d'étude offre une grande diversité spatiale qui est influencée par le modelé des terres et les écarts climatiques induits par la proximité du Sahara. Les zones agricoles dominent toutefois une grande partie du territoire comme l'indique la Figure. Les zones agricoles occupent des superficies presque aussi importantes, soit environ 22% du territoire. Elle concerne en premier lieu les plaines agricoles de la Mina de la wilaya de Relizane, de Griss de Mascara et plusieurs et quelques communes des plateaux de Saida et de Tiaret. Ce type de couvert est suivi par les steppes qui se concentrent au Sud du bassin et qui totalisent environ 17% du bassin. Le couvert forestier est concentré dans une région de pentes fortes au Nord-est du bassin, de même qu'au Sud-est. Les formations de maquis/garrigue complètent le cortège des strates dominantes car elles totalisent environ 12% du bassin. Ces formations sont particulièrement imbriquées au matorral, quoiqu'un îlot plus uniforme se distingue dans la zone de steppes au Sud-ouest du bassin. Finalement, les sols à nu représentent environ 5% du territoire. Ce pourcentage serait supérieur si l'on y comptabilisait les zones de matorral qui ne comportent qu'une très faible couverture végétale.

PARTIE I : EVALUATION ET CARTOGRAPHIE DE L'EROSION HYDRIQUE.

Méthode d'évaluation de l'érosion utilisée

L'avènement du système d'information géographique (SIG) et la télédétection ont permis à l'équation universelle de perte en sol USLE d'être utilisée d'une manière répartie dans l'espace parce que chaque cellule dans une image raster s'agit de représenter une unité sur le terrain. L'approche utilisée a consisté dans un premier temps à détecter les facteurs déclenchant l'érosion et à les spatialiser en utilisant les images satellitaires Landsat-TM. Ces images sont choisies car leur définition de 30 m de résolution au sol est adaptée à l'échelle de travail (1:750 000). Les données de télédétection multi-temporelles et les SIG sont utilisés pour évaluer et cartographier chaque facteur individuellement. La modélisation prédictive dans un environnement SIG offre une opportunité pour l'évaluation des risques d'érosion. Les données sur l'érosion par rapport à certains indicateurs sont collectées, calibrés et sont entrés dans une base de données SIG, après quoi il est spatialement modélisé pour représenter le risque d'érosion des sols dans n'importe quel élément du paysage choisi.

Des couches individuelles ont été créées pour chaque paramètre de l'USLE et sont ensuite combinées par une procédure de modélisation dans la grille ArcGIS 9.3. Chaque grille de facteur avait une taille de cellule de 30 m, bien que la résolution réelle (de la source de données la plus basse résolution) est d'environ 100 m. Ce ré-échantillonnage a été fait pour intégrer la plus grande précision de la précipitation et interpolations topographiques. Toutes les couches ont été projetées UTM 37N zone en utilisant le WGS 1984. La méthodologie suivante a été utilisée pour générer les grilles de facteurs. La figure 13 montre le cadre général de suivi.

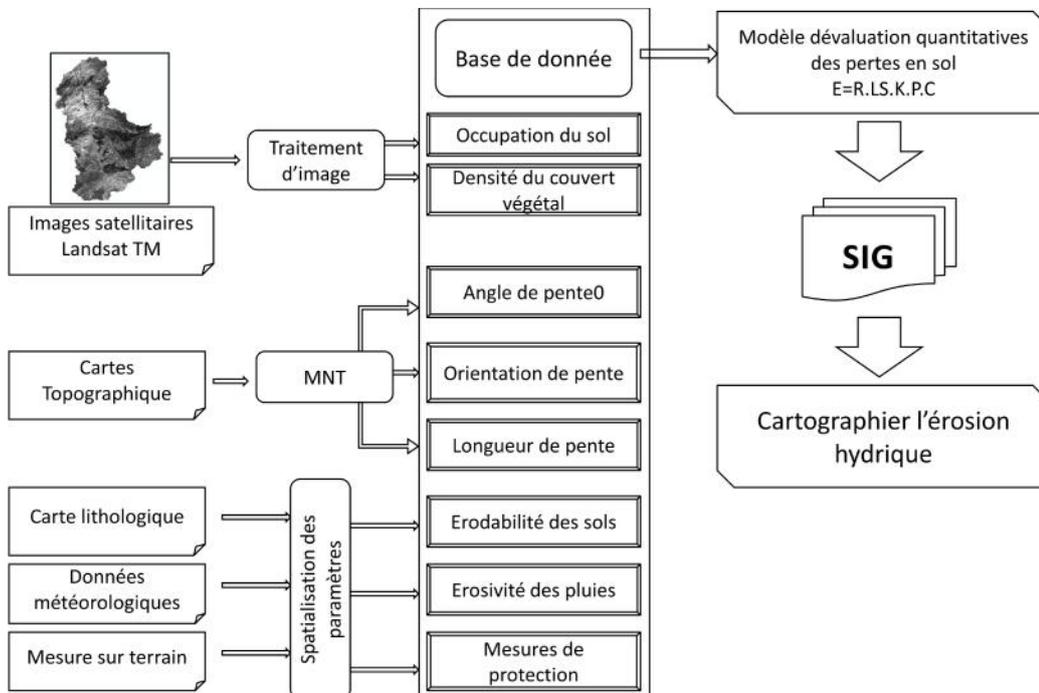


Fig. 13 : Méthodologie adoptée pour l'estimation de l'érosion hydrique.

Fondamentalement, l'USLE a l'avantage de fournir des estimations à long terme de moyenne de perte annuelle de sol à partir de petites zones et est considérée comme un «bon modèle» si le but de la modélisation est d'arriver à des estimations globales de l'érosion des sols. Cependant, le modèle est limité dans le sens où il ne peut pas simuler l'érosion du lit de dépôt, ou en ravin (Foster 1988). L'Equation universelle de pertes en sol (Wischmeier et Smith 1978) s'applique à la quantification des pertes en sol par érosion en nappe et en rigole. C'est une fonction multiplicative des cinq facteurs qui contrôlent l'érosion hydrique: agressivité climatique, érodibilité des sols, inclinaison et longueur de pente, occupation des sols et pratiques antiérosives:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

où A est le taux annuel de perte en sol ($t \text{ ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$); R est le facteur de l'érosivité des pluies, il correspond à la moyenne annuelle des sommes des produits de l'énergie cinétique de la pluie par son intensité en 30 min consécutives, et est exprimé en $\text{MJ mm} (\text{ha h an})^{-1}$; K est l'érodibilité des sols, et dépend de la granulométrie, de la quantité de matière organique, de la perméabilité et de la structure du sol, et est exprimé en $t \text{ ha h} (\text{ha MJ mm})^{-1}$; LS est un facteur sans dimension qui représente l'inclinaison (S en %) et la longueur de pente (L en m); C est un facteur sans dimension qui représente l'effet de la couverture végétale; et P est un facteur sans dimension, rapport qui tient compte des techniques culturales antiérosives telles que le labour en courbes de niveau.

Les unités de la perte de sol annuelle moyenne (A) sont portés par les facteurs R et K. Ces deux facteurs représentent la cause de l'érosion des sols. Le facteur R représente érosivité de la pluie, ou le pouvoir érosif de la pluie sur le sol quel que soit son type. Le facteur K représente l'érodibilité du sol, ou dans la mesure où le type de sol spécifique résiste aux forces érosives.

Les facteurs de l'USLE restants (L, S, C, P) peuvent être considérés comme des facteurs d'ajustement. L'USLE a été formulée par l'examen des données enregistrées à partir de l'érosion des parcelles de terrain de l'unité qui avait une longueur fixe de 72,6 pieds (soit 22,1 mètres) et une pente fixe d'environ 9% (ou 5,14 degrés). Le L, S, C, et les facteurs P ajustent les conditions réelles par rapport aux conditions de parcelles expérimentales sur le terrain. Ces facteurs représentent des rapports, et sont sans dimension.

Résultats et discussions

Facteur d'érosivité des pluies « Facteur R »:

Les valeurs les plus élevées sont localisées dans la partie Sud-est du bassin avec environ 60 MJ.mm/ha.h.an, tandis que les valeurs faibles se localisent dans la partie Sud Ouest.

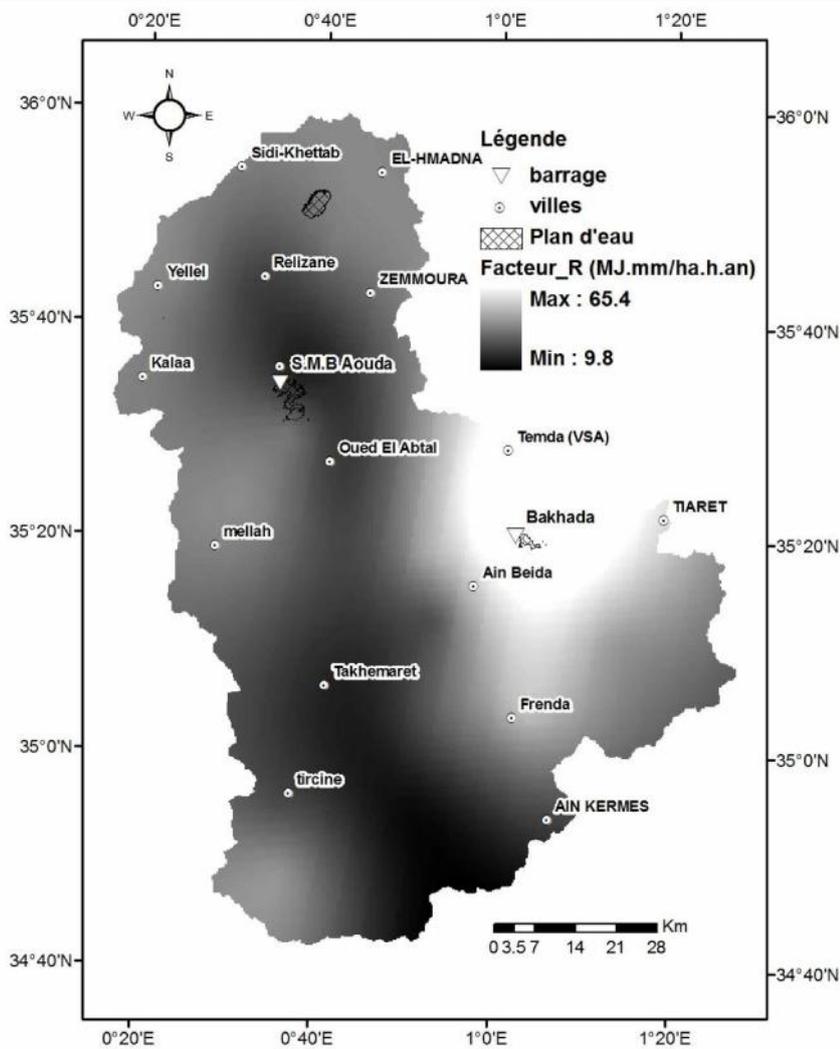


Fig. 14 : Carte du facteur R.

Facteur d'érodibilité du sol « Facteur K »

La figure présente une cartographie du facteur d'érodibilité K pour le bassin versant de l'Oued Mina. La résolution spatiale de cette image matricielle est de 30 m. le regroupement de plusieurs pixels adjacents permet de représenter les unités pédologiques de plus de 1 ha.

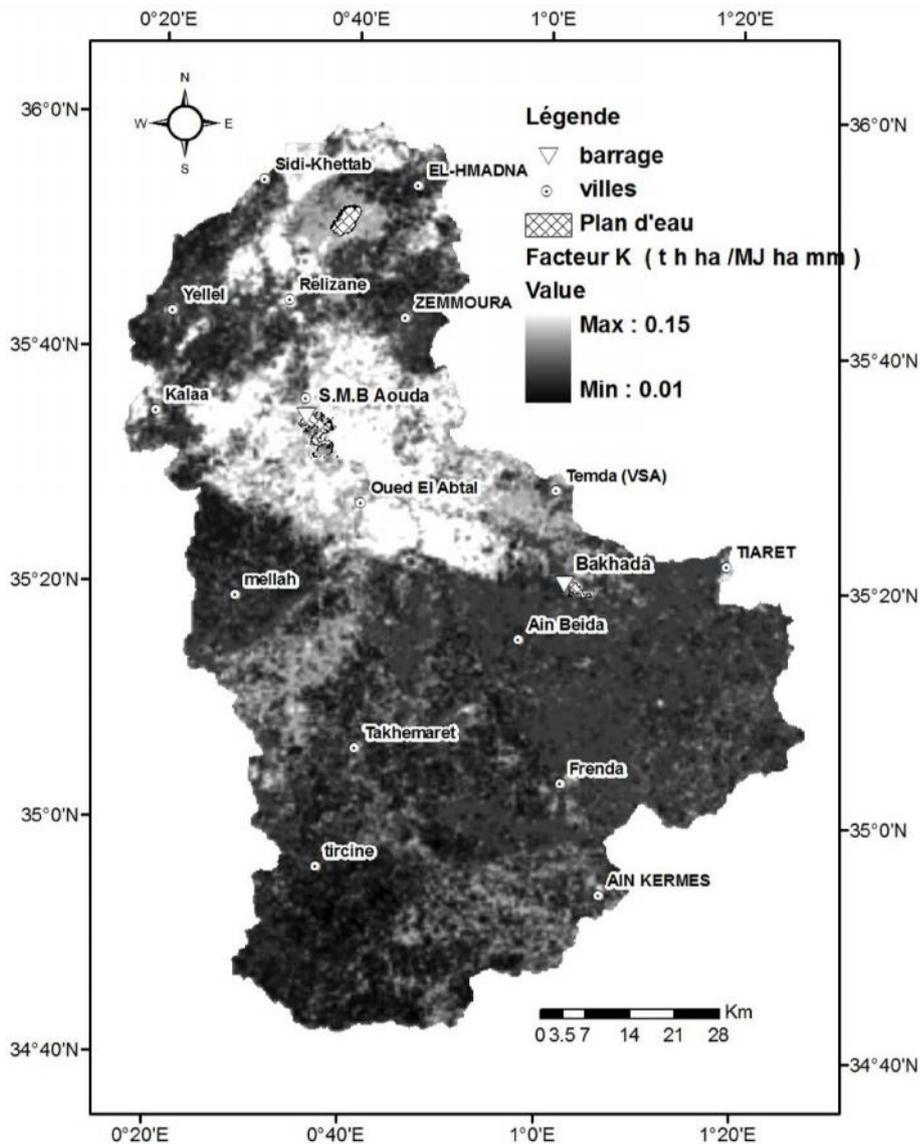


Fig.15 : Carte du facteur K.

Cinq classes d'érodibilité (facteur K) ont été utilisées pour exprimer l'étendue de la variabilité d'érodibilité. L'étendue de chaque classe a été fixée arbitrairement à $0,03 \text{ t h ha MJ}^{-1} \text{ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$. Par conséquent, les valeurs d'érodibilité illustrées sur cette carte doivent être considérées comme des valeurs relatives à l'échelle du bassin versant. La valeur moyenne du facteur d'érodibilité K atteint $0,07 \text{ t h ha MJ}^{-1} \text{ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ sur l'ensemble du bassin versant. Les régions accusant une très faible érodibilité ($K < 0,01 \text{ t h ha MJ}^{-1} \text{ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) sont localisées principalement au Sud du bassin versant, dans les hautes plaines et dans les piedmonts du Nord-ouest. Ces régions sont caractérisées par une lithologie imperméable regroupant les facies Karstiques et sableux. Cette classe d'érodibilité occupe 60% du bassin versant. La représentation spatiale des classes de la

figure 15 fait ressortir une bande de sols, située en amont de la plaine agricole du périmètre d'irrigation de la Mina. Cette lanière, qui s'étend du sud-est au nord-ouest, présente une classe d'érodibilité élevée et occupe environ 20% de la superficie totale du bassin versant.

Facteur d'occupation du sol « Facteur C »

La majeure partie du bassin est caractérisée par des valeurs du facteur C supérieures à 0,8. Ces zones sont des îlots de sols nus ou en jachère. La seconde classe en importance est constituée de valeurs variant de 0,6 à 0,7. Les régions dans lesquelles se situe cette seconde classe sont principalement au Sud et Sud-ouest. En général, ces zones sont associées aux grandes cultures céréalières et fourragères. Les zones représentant les valeurs inférieures à 0,6, sont généralement couvertes de massifs forestiers et de formations de maquis/garrigue ou de matorral.

Les valeurs du facteur protecteur des sols contre l'érosion sont plus faibles durant la période sèche (juin 2009). Durant cette période le sol se trouve exposé aux premières pluies d'automne. La majeure partie du bassin est caractérisée par des valeurs du facteur C supérieures à 0,8. Ces zones sont des îlots de sols nus ou en jachère. La seconde classe en importance est constituée de valeurs variant de 0,6 à 0,7. Les régions dans lesquelles se situe cette seconde classe sont principalement au Sud et Sud-Ouest. En général, ces zones sont associées aux grandes cultures céréalières et fourragères. Les zones représentant les valeurs inférieures à 0,6, sont généralement couvertes de massifs forestiers et de formations de maquis/garrigue ou de matorral.

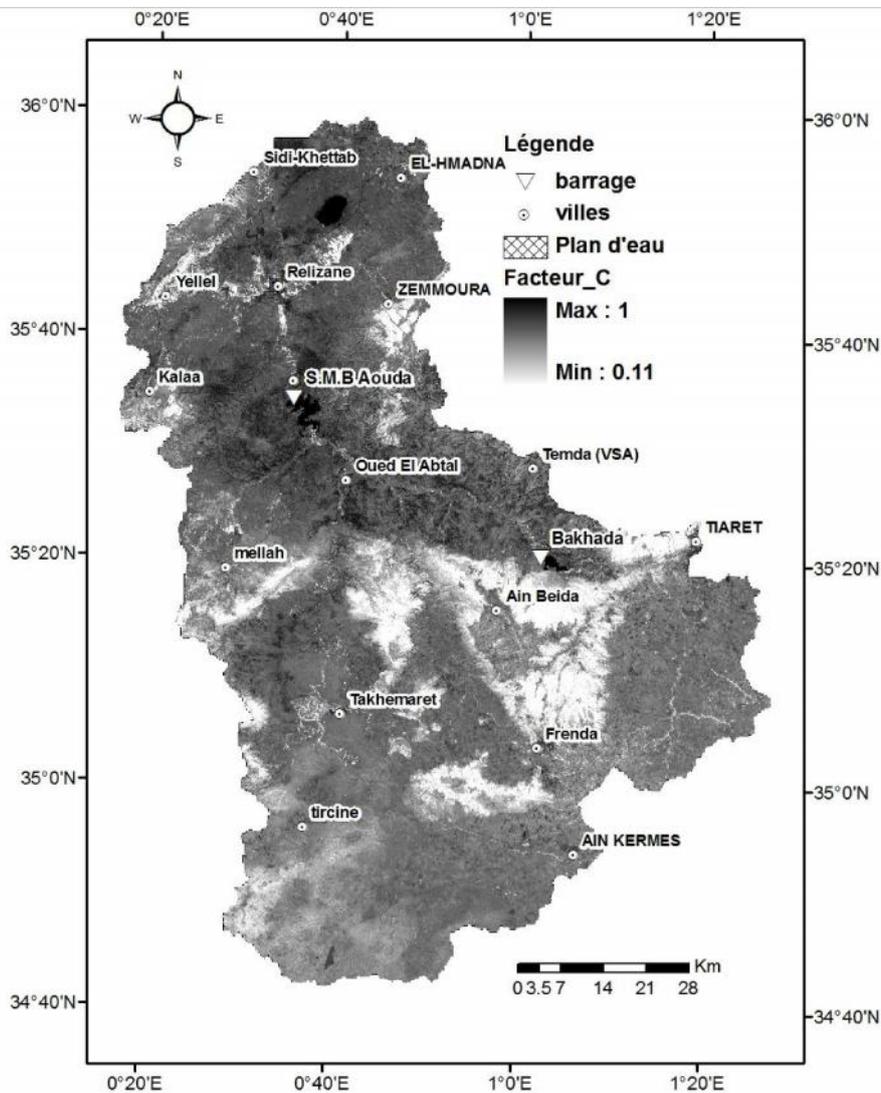


Fig. 16 : Carte du facteur C.

Facteur topographique « Facteur LS »

Une grande partie du bassin de l'Oued Mina est caractérisée par un facteur $LS < 5$ (figure 17). En effet, la quasi-totalité des terres sont des plaines situées dans la partie Nord du bassin. A ces superficies s'ajoute la plaine alluviale de l'Oued Mina. Une dominance de valeurs variant de 5 à 10 est observée dans la région montagneuse située dans la partie septentrionale du bassin. À l'opposé, le fond des vallées est caractérisé par des valeurs faibles. Finalement, le facteur LS dépasse la valeur 20 sur quelques versants abrupts.

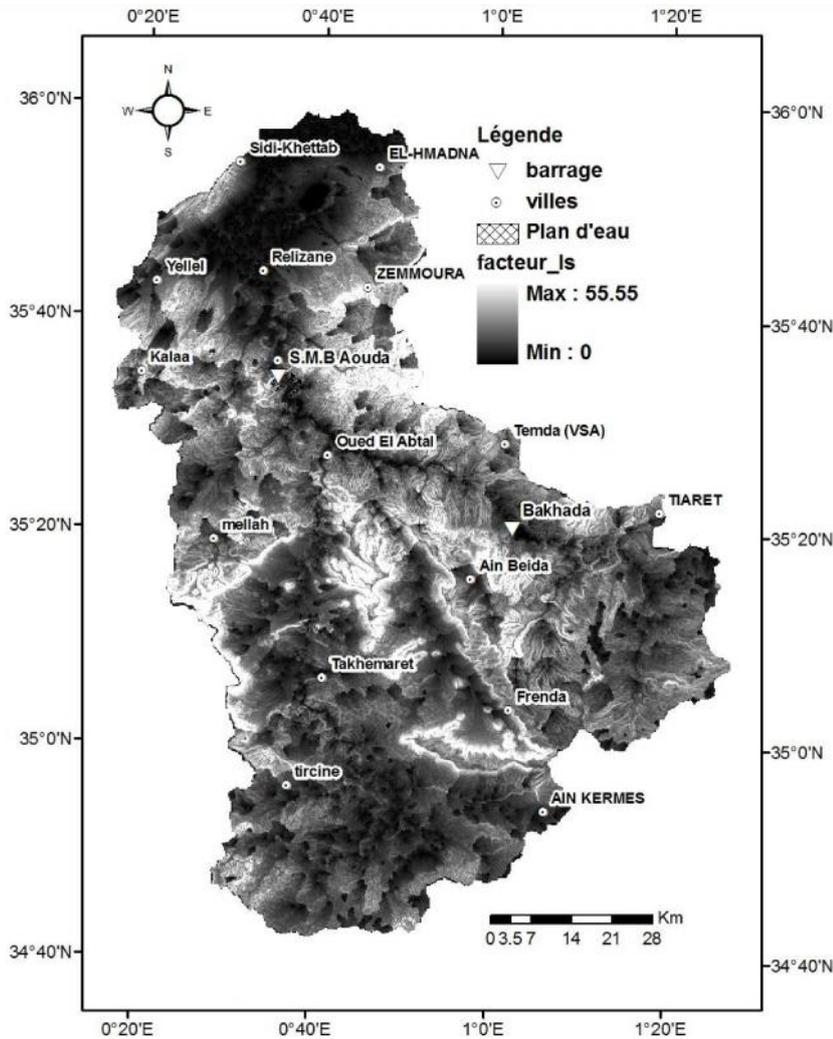


Fig. 17 : Carte du facteur LS.

Pratiques agricoles et conservation du sol « Facteur P »

En raison de l'insuffisance des informations sur les pratiques anti-érosives et sur les caractéristiques des formations superficielles de la région d'étude, on a fixé la valeur du facteur P à 1 sur l'ensemble du bassin versant puisque les pratiques de soutien couvrent des superficies modestes et que ces travaux n'ont pu être observés sur les images satellitaires Landsat-TM.

Risque érosif

La carte du risque érosif est déterminée en multipliant les couches, de 30 m de résolution, représentant les paramètres de l'USLE en format matriciel. La figure 13 n'indique pas seulement la perte du sol de chaque pixel, mais fournit des informations sur les zones critiques de perte en sol.

Les valeurs faibles du risque érosif occupent la partie Nord et la partie Sud-Ouest du bassin. Les terrains dans ces régions sont quasiment plat (pente inférieur à 10%). Alors que les valeurs fortes se localisent dans la région Est (en amont du barrage de Sidi M'Hamed Ben Aouda) et la région Ouest du territoire. Le risque érosif est important dans ces régions à cause de forte inclinaison des terrains mais aussi aux fortes valeurs du facteur R malgré la présence d'une végétation (facteur protecteur).

Le facteur LS pente est le facteur essentiel du risque érosif. Les pentes sont liées à la lithologie et au type de sol (Roose *et al.*, 1993): les roches dures protègent souvent des pentes fortes et des sols résistants tandis que les roches tendres donnent des sols fragiles sur des pentes plus douces ; les pertes en terre peuvent donc être supérieures sur les pentes modérées (Roose *et al.*, 1993). Les sols de montagne, souvent superficiels, sont mélangés à divers fragments de roche qui vont augmenter leur résistance à la battance des gouttes de pluie et au cisaillement du ruissellement (Roose *et al.*, 1993). En région forestière, le sol est couvert en permanence ($C = 0$) et les taux d'érosion hydrique deviennent pratiquement nuls alors qu'en région agricole, les pentes et l'érodibilité sont plutôt faibles, et les taux d'érosion

La carte d'érosion fournit (figure 18) des informations synthétiques et systématiques sur la nature, l'intensité et la répartition spatiale du phénomène, et permet donc d'identifier les zones les plus affectées et les types d'érosion dominants. Plus en détail, la mesure des phénomènes d'érosion dans certains milieux particulièrement intéressants apporte les données quantitatives et qualitatives précises, qui sont indispensables à la gestion intégrée des zones côtières et constituent une base sûre pour la planification et la conception des activités requises de lutte anti-érosive.

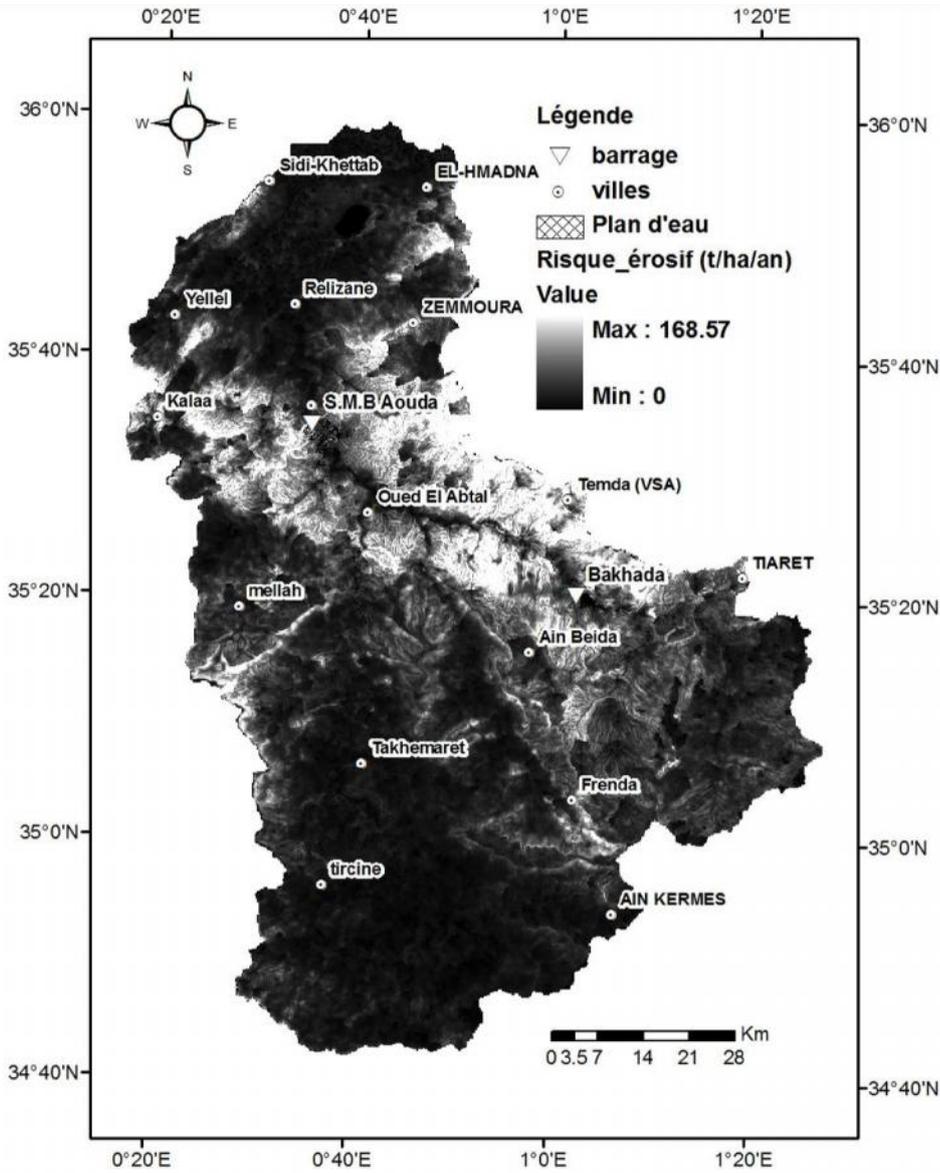


Fig. 18 : Carte de risque érosif.

PARTIE II : ETUDE DE LA DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DU SOL A L'ECHELLE DU BASSIN VERSANT DE L'OUED MINA.

L'objectif de cette partie est d'exposer le traitement des séries temporelles des images satellites, pour extraire les informations relatives aux changements d'occupation et l'utilisation du sol sur le bassin versant de l'Oued Mina, plus précisément sur l'évolution de la couverture végétale. Il comprend d'une part l'estimation de taux de changement à partir de l'application du modèle « Landchange modeler » du logiciel IDRISITM sur les images du capteur Landsat TM prise durant trois périodes différentes (1987, 2002 et 2009). La méthode utilisée permet la détection de changements sur ces variables, en l'occurrence les classifications qui permettent de déterminer et localiser les changements d'occupation et d'utilisation des sols. En effet, l'analyse multi-spectrale et multi-temporelle des données satellitaires peut déboucher sur une cartographie évolutive des paysages, utile à la connaissance des processus d'érosion.

De l'autre part, il comprend d'étude de la variation spatio-temporelle de la végétation à partir des données décennales de NDVI du SPOT-VEGETATION ainsi que l'extraction de profils moyens des valeurs de NDVI, et à expliquer ces variations, notamment en fonction de paramètres climatiques. Elle permet aussi, le calcul de métriques temporelles de variables biophysiques qui servent respectivement à caractériser finement les variations de la végétation.

Utilité des indices de végétation parmi tous les indices de végétation proposés depuis les origines de la télédétection spatiale, l'indice de végétation normalisé (Rouse *et al.*, 1976) est devenue l'outil standard de description du comportement spectral de la couverture végétale (Bartholomé, E., 1993). Cet indice, le plus souvent appelé NDVI selon son abréviation anglaise, est calculé à partir de deux bandes spectrales, le rouge R et l'infrarouge IR selon la formule suivante : $NDVI = (IR - R)/(IR + R)$. Son utilité pour décrire le couvert végétal se base sur le fait que d'une part ce dernier absorbe préférentiellement (mais pas uniquement) l'énergie lumineuse dans les longueurs d'onde du rouge pour la photosynthèse, et réfléchit par contre fortement cette énergie dans le proche infrarouge.

Détection des changements

Dans cette partie, on a tracé les cartes de la couverture du sol pour 3 périodes (1987, 2002 et 2009) et déterminé les gains et les pertes dans chaque classe (eau, végétation et sol nu) en utilisant le module (Land Change Modeler) de « IDRISITM » (figure 14). Les paramètres suivants ont été tirés :

- contribution du changement dans chaque classe en pourcentage de la surface du sol (de chaque catégorie de la couverture du sol) ;
- variation nette de chaque catégorie ;
- persistance de chaque classe: la couverture du sol qui n'a pas changé entre les deux dates respectives.

La méthode utilisée nécessite la mise en place d'une chaîne de prétraitement et de traitement des images utilisées. Ces traitements, sont les mêmes décrits dans le chapitre précédent. La méthode de comparaison des classifications (Lu *et al.*, 2004) a été choisie pour détecter des changements de l'occupation du sol. Le principe de cette méthode est basé sur la classification de deux scènes acquises à des dates différentes. Elle assigne d'abord des classes et détecte ensuite le changement. Cette méthode permet de fournir l'information détaillée du changement et préparer des cartes de changement (Mas, 2000).

Afin de mieux séparer des objets ainsi que diminuer des confusions, l'approche de classification « iso data » de pseudo-bandes (ACP, NDVI) a été appliquée sur trois images, de la période sèche, Landsat (TM 1987, TM 2002 et TM 2009) à l'aide du logiciel IDRISI. L'analyse en composantes principales (ACP) et l'indice de végétation (NDVI) sont mis en œuvre dans le cas présent afin de sélectionner les meilleures bandes spectrales d'une part, et d'augmenter le contraste sol-végétation d'autre part, et cela dans le but de faciliter l'étape de classification.

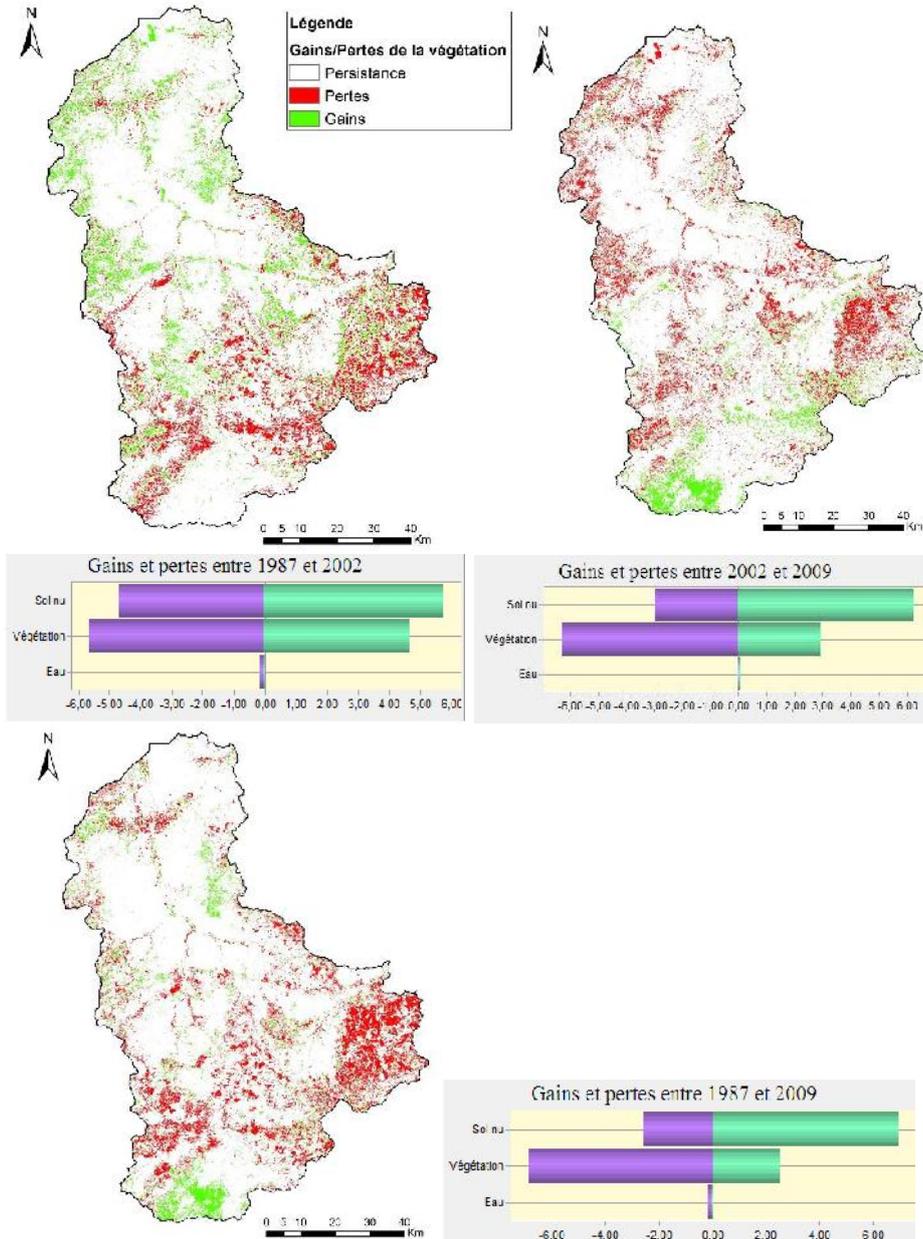


Fig. 19 : Cartes des gains, pertes, et persistance de la végétation, de l'eau et du sol nu entre 1987, 2002 et 2009.

D'après les résultats obtenus, on constate que les deux classes « végétation » et « sol nu » ont subi un grand changement durant la période 1987-2009. La majorité de la zone Sud du bassin a été dégarnie de végétation entre 1987 et 2002 (soit 856 km² de perte). Contrairement au Nord-Ouest, on remarque une amélioration de la superficie végétale dans des zones éparpillées (711 km²). Cette amélioration est probablement due à l'augmentation des activités agricoles dans cette région. Entre 2002 et 2009, les zones où on a enregistré des gains de végétation durant la période 1987-2002, sont devenues des sols nus, sauf l'extrême Sud, où on a enregistré une légère amélioration de la végétation (449 km²).

Tableau 1 : Récapitulatif des résultats du calcul des changements d'occupation du sol entre les trois années : 1987, 2002 et 2009.

	Changement (km ²) entre 1987 et 2002	Changement (km ²) entre 2002 et 2009	Changement (km ²) entre 1987 et 2009
Végétation vers Eau	0,74	1,93	1,16
Sol nu vers Eau	4,54	7,57	6,33
Eau vers Végétation	0,31	0,04	0,217
Sol nu vers Végétation	711	449	386
Eau vers Sol nu	2	2,87	19
Végétation vers Sol nu	856	955	1038

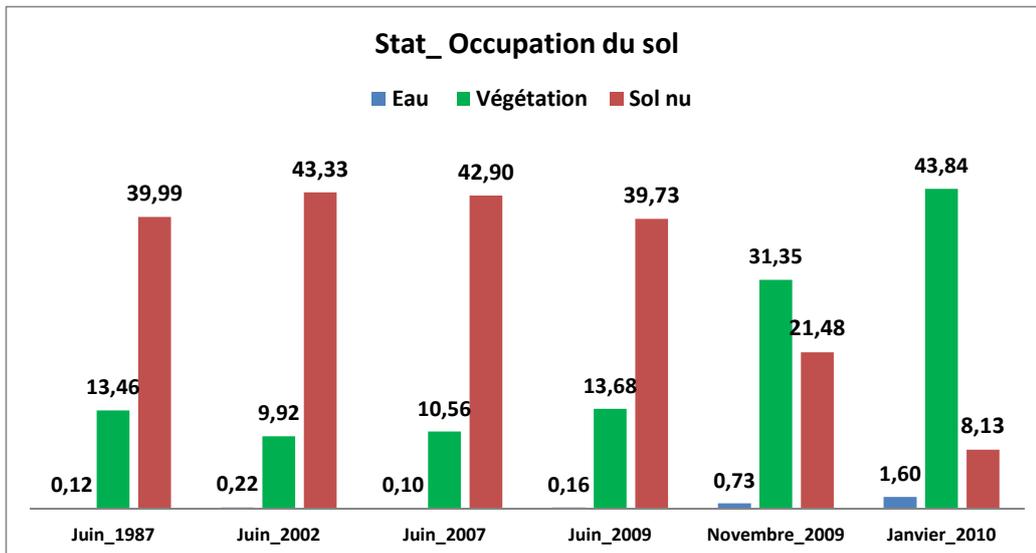


Fig. 20 : statistiques de la classification d'occupation du sol des imagerie Landsat TM prises durant les mois de juin 1987, 2002, 2007, 2009, le mois de novembre 2009 et le mois de janvier 2010.

Le sol nu occupe environ 40 % de la superficie de la région d'étude durant la période sèche. Ce pourcentage diminue (-50%) en automne et atteint environ 8% en hiver. En effet, en début de saison de culture et avec les premières pluies d'automne, la végétation pousse et occupe les zones

nue. En hiver, la santé de la végétation atteint son maximum. Durant cette période, la végétation couvre environ 44% de la superficie du bassin.

Variations saisonnières

Une classification de l'occupation et de l'utilisation du sol a été effectuée pour la période humide de l'année 2010 et pour période sèche de l'année 2009. Ces deux images sont acquises à des dates permettant de distinguer clairement les types d'occupation et d'utilisation hivernaux des sols. Chacune des images a été classée par une méthode de classification basée sur le pixel utilisant la méthode du maximum de vraisemblance afin de distinguer la végétation annuelle, les inter-cultures et les badlands. Par la suite, ces deux classifications ont été croisées afin d'identifier les zones du sol nu et de la végétation en permanence figure:

Tableau 2 : Croisement des classes de sols couverts et de sols nus permettant de déterminer l'occupation et l'utilisation hivernale des sols :

Classe de la période humide	Classe de la période sèche	Type d'occupation du sol
Sol couvert	Sol couvert	Végétation annuelle (prairies, forêts)
Sol couvert	Sol nu	Inter-culture
Sol nu	Sol couvert	Culture hivernale
Sol nu	Sol nu	Sol nu et badlands

D'après la figure 21, on constate que le sol nu hivernal, représenté par les badlands, occupe une superficie importante du bassin versant de l'Oued Mina (40.64%). Ces régions sont dépourvues de toute forme de végétale et par conséquent elles sont exposées directement aux forces d'inertie de la pluie ainsi que les forces d'écoulement. Ces badlands occupent la partie nord du bassin.

Afin de classer les types de végétation par ordre de densité ou d'efficacité décroissante, la classification proposée par J. Tricart (1963-1968) a été retenue. Celle-ci, nous a permis de classer la végétation du bassin versant de l'Oued Mina, dans les catégories suivantes :

- Surfaces protégées en permanence : ce type de surface est défavorable au ruissellement et à l'érosion, il englobe les forêts, prairies naturelles et artificielle permanentes. Cette classe occupe 28% de la superficie totale du bassin. Elle couvre les montagnes de Saida de Tiaret et de Frenda ;
- Surfaces protégées incomplètement : ce type de surface permet aux averses tombant sur les parties nues du sol de provoquer le ruissellement et exercer une érosion hydrique ;
- La couverture végétale n'occupant le sol que saisonnièrement (inter-cultures, résidus, culture maraichères ;
- Surfaces mal protégées ou nues : ces surfaces sont favorables au ruissellement et à l'érosion hydrique : terrain dénudé (badlands et steppe).

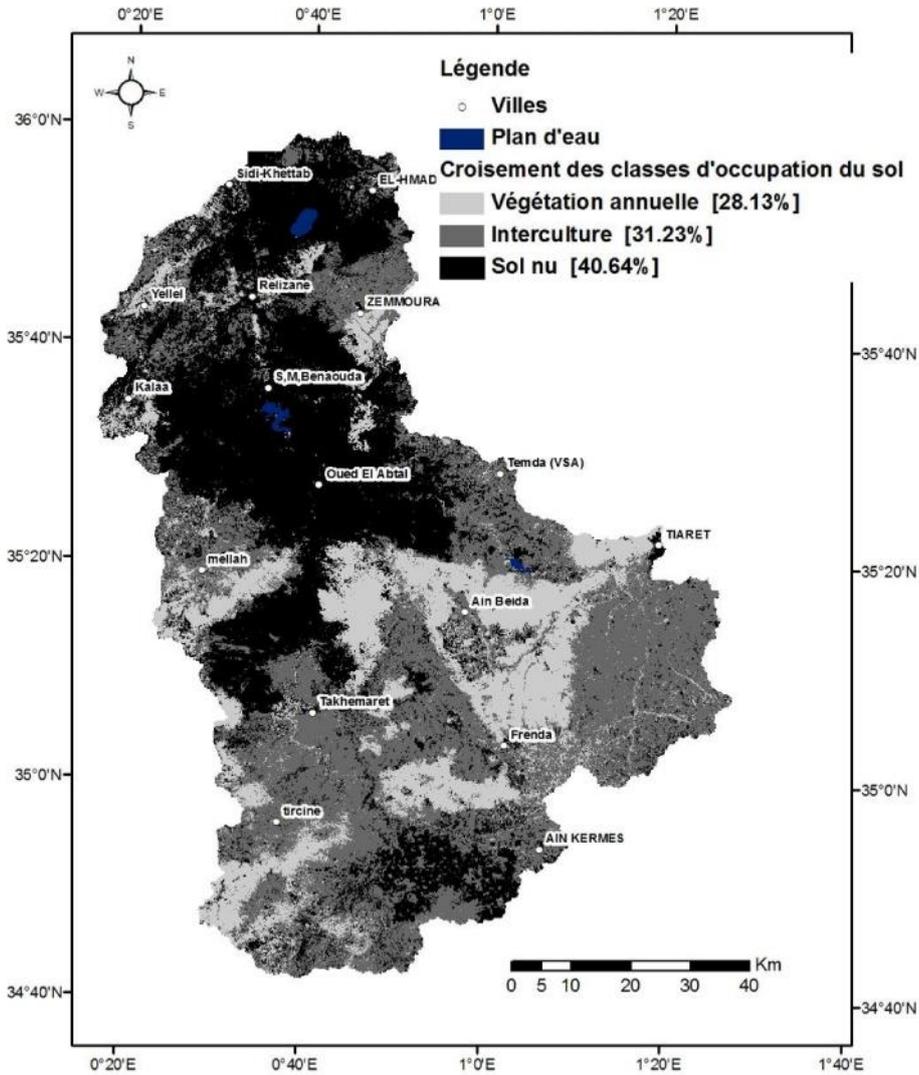


Fig. 21 : Carte de croisement des classes de sols couverts et de sols nus entre la saison hivernale et la saison estivale.

ETUDE DE LA DYNAMIQUE DE LA VEGETATION A L'AIDE DE NDVI DE SPOT-VEG

Les données du NDVI utilisées sont issues du capteur « VEGETATION 1 » à bord du satellite SPOT4 (lancé en Avril 1998) et « VEGETATION 2 » à bord de SPOT5 (depuis Février 2003). Ces capteurs offrent une couverture quotidienne avec une résolution spatiale d'environ 1 km². Les images du NDVI disponibles sont des synthèses décennales depuis 1999 jusqu'à 2010, elles sont générées en sélectionnant des pixels qui ont des valeurs maximales du NDVI dans un délai de 10 jours. Une série temporelle de 432 images décennales couvrant le bassin de l'Oued Mina entre janvier 1999 et Décembre 2010 ont été acquises. Les données du NDVI en combinaison avec les données de précipitations ont permis d'identifier les changements subtils associés à la dégradation des terres.

Prétraitement des séries temporelles du NDVI :

Le NDVI décrit la différence de réponse spectrale de la chlorophylle des végétaux entre le canal rouge et infra-rouge suivant l'équation (1). Les données brutes sont des images en niveau de gris (les valeurs des pixels varient entre 0 et 255). Les valeurs numériques (DN) des pixels sont converties en indice de végétation selon l'équation (2). Lorsque NDVI est supérieur à 0,1, le type de couverture terrestre est identifié comme couvert végétal, qui est également utilisé pour déterminer la saison de croissance de la végétation (Cuomo *et al.*, 2001; Lanfredi *et al.*, 2003).

$$\text{NDVI} = \frac{\text{PIR} - \text{R}}{\text{PIR} + \text{R}} \quad (1)$$

tel que « PIR » est le canal proche infrarouge et « R » est le canal rouge.

$$\text{NDVI} = \text{DN} \times 0.004 - 0.1 \quad (2)$$

Les changements dans le couvert végétal peuvent être déduits du NDVI. Plus la valeur NDVI est élevée plus la végétation est, dense. Selon les lois de croissance des plantes et les caractéristiques de variation du NDVI, le maximum annuel du NDVI reflète le meilleur état de la végétation en un an (Huang *et al.*, , 2008).

L'utilisation des valeurs maximales du NDVI (NDVI_{max}) permet de conserver la valeur la plus élevée du NDVI pour chaque pixel au cours d'une période donnée et de produire des images qui sont spatialement continues et relativement sans nuages, avec une résolution temporelle suffisante pour évaluer la dynamique de la végétation (Holben, 1986).

Le NDVI_{max} est défini comme le NDVI maximal pour un intervalle de temps. Le NDVI_{max} décennal, mensuel et annuel peut être un indicateur fiable des variations qui peuvent affecter l'état du couvert végétal. Il permet aussi de montrer la nature des variations inter-annuelles de la végétation et de déterminer le lien entre ces variations et celles des conditions climatiques et/ou encore celles induites par l'homme.

Résultats et discussion

Le couvert végétal dans bassin versant de l'Oued Mina a changé avec une tendance ondulante dans la période 1998-2006 (Figure 22). Les pics des valeurs maximales du NDVI se sont produits durant les années 2001, 2007 et 2009, tandis que les creux d'onde pourraient être trouvés dans 2000 et 2008. Le NDVI maximal en 2009 est le plus haut (0,8) au cours des derniers 12 ans. La moyenne annuelle des NDVI_{max} a légèrement augmenté de 0,48 en 1999 à 0,56 en 2010, indiquant une tendance à la hausse de la végétation.

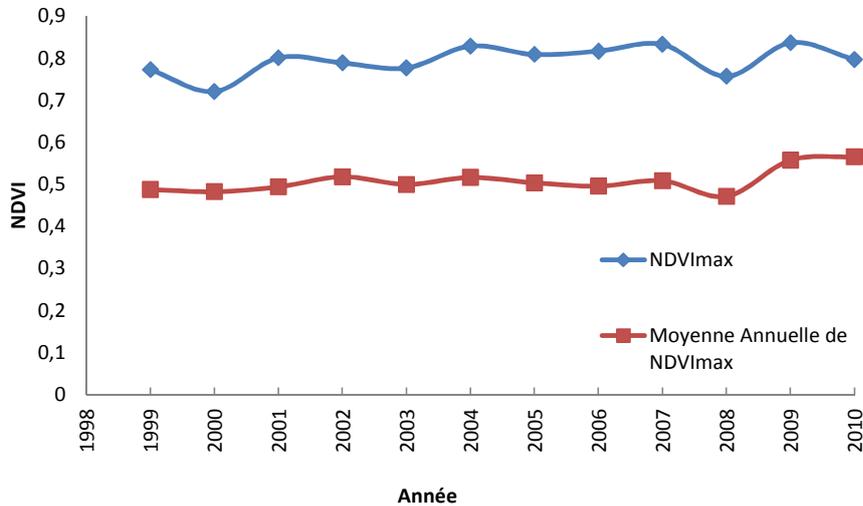


Fig. 22 : Variation annuelle du NDVI_{max} et de la moyenne annuelle du NDVI_{max} au cours de la période 1999-2010.

La figure 23 illustre la différence entre deux NDVI_{max} de deux années voisines. Les différences entre 1999 et 2000, entre 2001 et 2002, entre 2004 et 2005, entre 2007 et 2008 et entre 2009 à 2010 se sont révélées négatives, ce qui montre une dégradation du couvert végétal au cours de ces périodes. Par ailleurs, ceux des périodes 1998 à 1999, 2000 à 2001, 2002 à 2003 et 2004 à 2005 étaient supérieurs à zéro indiquant une augmentation des activités agricoles dans la région. La figure 24 montre la variation des valeurs du NDVI_{max} de l'ensemble du bassin et de la région délimitée comme un grand périmètre d'irrigation (GPI). Les valeurs du NDVI_{max} de la région agricole coïncident avec celles de la totalité du bassin durant la période hivernale (octobre à mars). Les valeurs maximales du NDVI sont essentiellement celles de la végétation des régions agricoles à biomasse élevée où les plantes sont bien arrosées et en bon état indiquant la forte activité agricole dans la région.

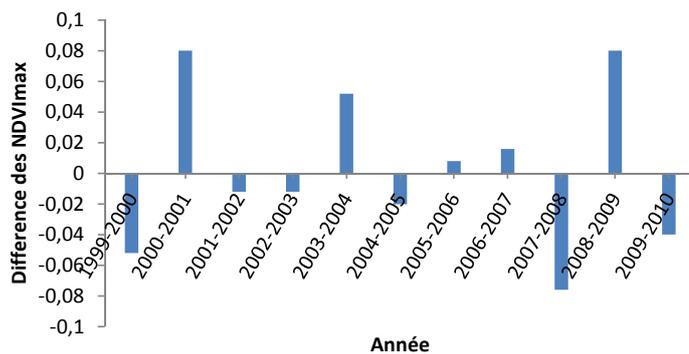


Fig. 23 : Différence de la moyenne du NDVI_{max} entre deux années voisines.

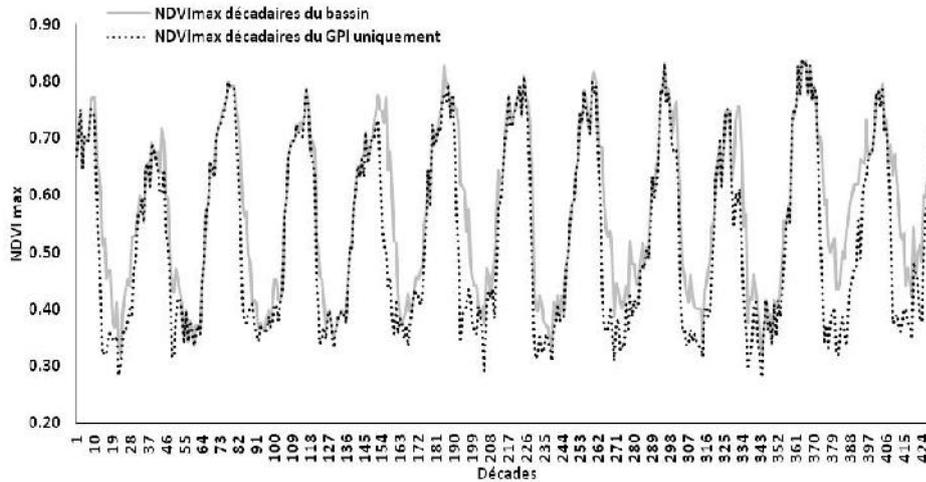


Fig.24 : Variation décadaire du $NDVI_{max}$ du grand périmètre d'irrigation (GPI) et du $NDVI_{max}$ du bassin.

Variation mensuelle

La figure 25 illustre la dynamique du NDVI mensuel maximal au cours de l'année 1999 et 2010. Le maximum du $NDVI_{max}$ correspond au pic de la verdure durant l'hiver, tandis que les valeurs minimales correspondent à la saison estivale (l'été). Les pics du $NDVI_{max}$ durant l'été correspondent probablement aux périodes d'irrigation. Les valeurs maximales du NDVI du printemps, de l'été et de l'automne en 2010 sont supérieures à celle de 1999. Par rapport à 1999, l'activité agricole aurait augmenté dans la région.

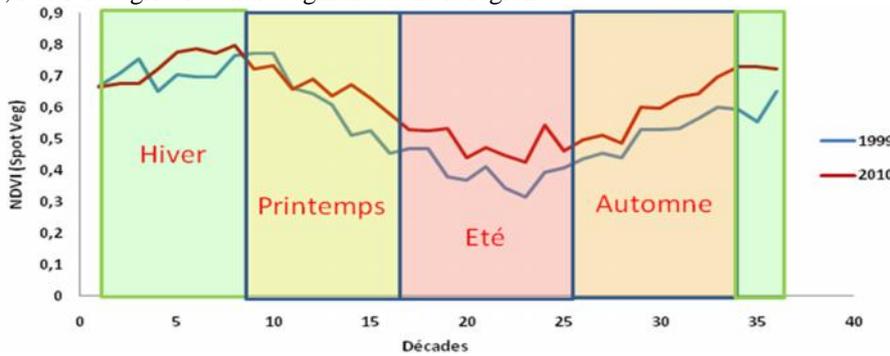


Fig. 25 : Variation mensuelle du $NDVI_{max}$ durant deux années 1999 et 2010

La figure 26 montre la variation du $NDVI_{max}$ mensuel et des précipitations au cours de la période étudiée. Le temps de réponse du développement de la végétation est approximativement de 10 à 20 jours (Justice *et al.*, 1991).

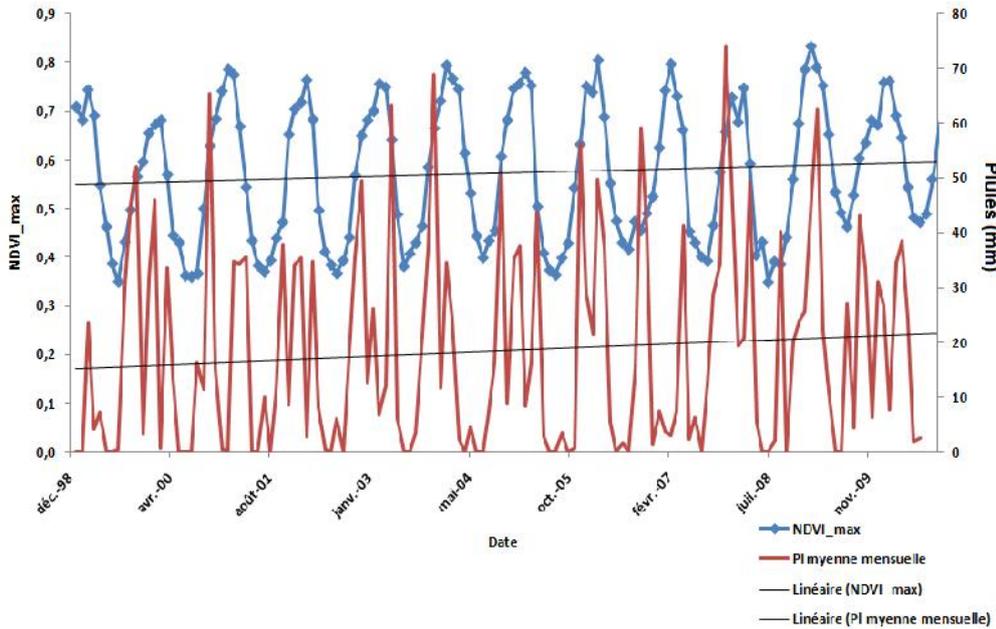


Fig. 26 : Dynamique du NDVI_{max} mensuel et les précipitations mensuelle au cours de la période d'étude (1999-2010).

La pluie dans la région d'étude a oscillé tout au long des dernières décennies. Les moyennes mensuelles maximales des précipitations sont enregistrées durant la période hivernale tandis que les valeurs minimales sont mesurées durant la période estivale. Les pics des précipitations d'automne coïncident avec les valeurs minimales du NDVI où le sol se trouve nu et plus vulnérable à l'érosion hydrique. On voit nettement que les précipitations et le NDVI ont une tendance légère à la hausse suivant deux lignes de même pente.

Tendance annuelle de la végétation

Les tendances au niveau du NDVI_{max} résultent de l'interaction de plusieurs facteurs, à savoir certains artefacts sur les données satellitaires, des variations biophysiques et les influences anthropiques (Omuto *et al.*, 2010). On a utilisé la régression linéaire entre les valeurs maximales annuelles du NDVI et les années pour déterminer la tendance au cours de la période étudiée. Les pentes de la régression linéaire sont illustrées par la figure 27.

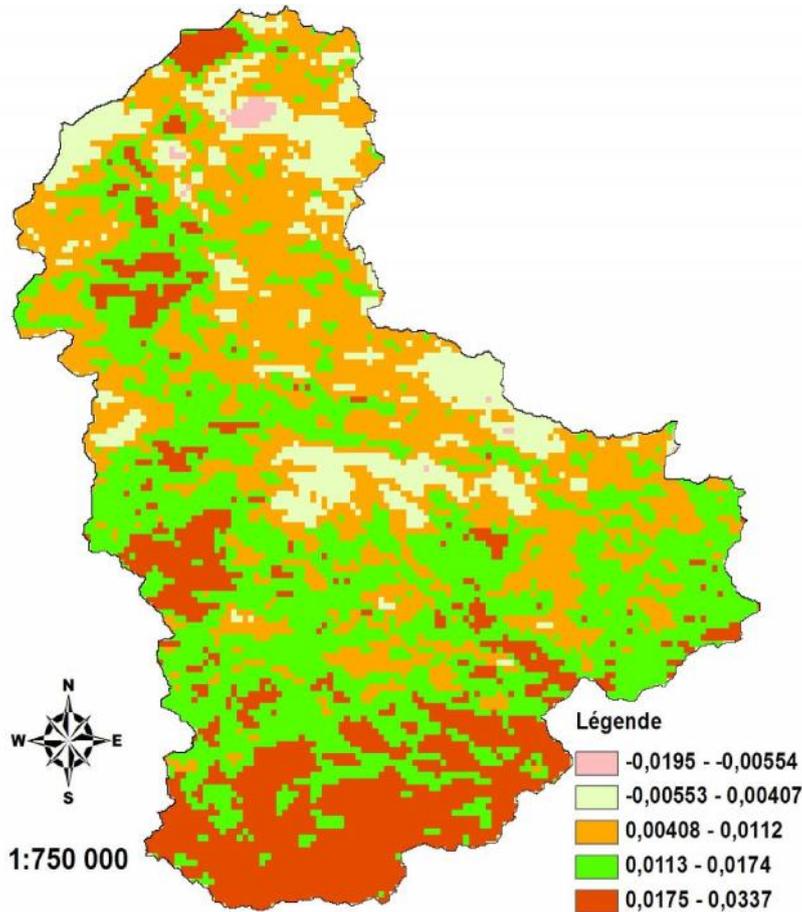


Fig.27 : Tendence du NDVI_{max} dans la région d'étude au cours de la période 1999-2010.

Les pixels qui ont une pente négative (pente<0) ont subi une tendance à la baisse (dégradation de la végétation). Les pixels possédant une pente positive (pente>0) subissent une amélioration. La démarche adoptée devrait permettre d'identifier les zones connaissant une augmentation ou une dégradation de la végétation. Les régions subissant une dégradation sont des forêts touchées par la désertification (pente entre -0.1950 et -0.0055). Or les régions qui ont bonne tendance annuelle à la hausse du NDVI_{max} étaient durant la période 1999 à 2003 dégradées (sol nu) et qui semblent avoir été bien couvertes durant les dernières années (pente entre 0.075 et 0.033). Les zones agricoles représentent une faible tendance à la hausse. L'activité agricole s'est améliorée durant ces dernières années, avec une augmentation des précipitations. Dès lors, les variations de l'indice de végétation ne peuvent s'expliquer que par des variations pluviométriques ou des interventions humaines pouvant soit réduire la couverture végétale (dégradation) soit l'étendre, via la bonification des terres ou l'intensification agricole.

Conclusion

La comparaison entre deux périodes différentes, permet d'apprécier la dynamique de l'occupation des sols et de la végétation, mais elle ne permet pas de dégager un scénario

d'évolution simple des formations végétales. Elle traduit la variation des situations et la diversité d'occupation des terres. Selon les résultats de calcul des changements entre l'année 1987 et l'année 2009, environ 1038 km² des terrains couverts par la végétation sont devenus des terrains nus.

L'analyse de données satellitaires Landsat durant les trois périodes (1987, 2002 et 2009) a permis d'identifier trois principaux types d'occupation du sol (Terrains fortement dégradés «badlands», Végétation et l'eau dans le bassin versant de l'Oued Mina. L'étude diachronique de l'occupation du sol révèle une modification de l'espace naturel avec un accroissement des zones nues (+ 6 %), une extension des sols fortement érodés (badlands et terrains incultes) et une réduction de la végétation (-2 %).

Nous avons utilisé des séries chronologiques de données NDVI SPOT-VEGETATION afin de suivre la dynamique temporelle de la végétation à l'échelle du bassin versant de l'Oued Mina. Au cours de la période 1999-2010, la couverture végétale dans cette région a légèrement augmenté avec une tendance ondulante. La moyenne annuelle maximale du NDVI a augmenté de 0,08 ce qui signifie que la productivité végétale et essentiellement agricole dans la région, a progressivement augmenté. L'augmentation du NDVI_{max} mensuelle en hiver et en automne des grands périmètres d'irrigation a contribué à l'augmentation du NDVI annuelle du bassin. Durant la même période, les précipitations des stations analysées présentent une tendance à l'augmentation.

Les régions forestières ont enregistré une baisse de la productivité végétale reflétée, dans le cadre de cette étude, par le NDVI_{Max}. Or les régions qui ont bonne tendance annuelle à la hausse du NDVI_{max} étaient durant la période 1999 à 2003 dégradées (sol nu) et semblent avoir été bien couvertes durant les dernières années (pente entre 0.075 et 0.033). Les zones agricoles représentent une faible tendance à la hausse, soit les zones connaissant la plus forte concentration de population. L'activité agricole s'est améliorée durant ces dernières années avec une augmentation des précipitations. Cependant, il est intéressant de constater que le pourcentage des points subissant cette augmentation du NDVI_{Max} augmente du nord vers le sud. Les variations de l'indice de végétation ne peuvent s'expliquer que par des variations pluviométriques et/ou des interventions humaines pouvant soit réduire la couverture végétale (dégradation) soit l'étendre, via la bonification des terres ou l'intensification agricole. L'évolution intra-annuelle de la végétation est essentiellement influencée par des facteurs climatiques. Les événements climatiques les plus remarquables sur la période d'étude sont les sécheresses des années 2000 et 2008, caractérisées par un déficit hydrique.

PARTIE III : VALIDATION DES RESULTATS D'EVALUATION DE L'EROSION HYDRIQUE PAR L'UTILISATION DES TECHNIQUES NUCLEAIRES.

Dans cette partie, on a essayé d'estimer et spatialiser l'érosion hydrique par l'utilisation de radio isotope le « Césium 137 ». Elle consiste à étudier la redistribution de l'isotope radioactif césium-137 dans l'environnement qui permet en effet d'évaluer déplacements de sol liés à l'action de l'érosion hydrique et de quantifier et spatialiser les processus érosifs des sols à l'échelle du bassin versant de l'Oued Mina. Le résultat de cette méthode permet de valider celles de la technique utilisée dans la première partie.

Le principe de la technique consiste à comparer la teneur en Césium-137 de sols cultivés par rapport à la teneur en Césium-137 de sites témoins non érodés. Comme la surface étudiée est plus grande, il est jugé préférable de prendre en compte plusieurs sites représentant les retombées initiales pour intégrer la variabilité spatiale de ces dernières. Les sites témoins sélectionnés

doivent être peu soumis aux processus érosifs (topographie quasi plane et végétation dense). Pour ce faire, on a superposé la carte de la densité de la végétation tracée à l'aide de l'indice de végétation normalisé (NDVI), et la carte des classes des pentes. Les sites dont la valeur du NDVI supérieur à 0.25 avec une pente inférieure à 10%, sont considérés comme stables. Des échantillonnages de sols en différents points ont été effectués. Un carottier en métal d'environ 30 cm de long et de 5 cm de diamètre a été utilisé. Chaque carotte a été sectionnée à des intervalles de 1 à 2 cm sur toute sa longueur afin de tracer le profil de la teneur en Césium-137 en fonction de la profondeur.

Le Cs-137 constitue un marqueur intéressant pour des études sur l'érosion des sols pour les raisons suivantes (Ritchie *et al.*, 1990, Walling *et al.*, 1991) :

- cet isotope a été introduit artificiellement dans notre environnement depuis l'avènement de l'ère nucléaire ;
- cette introduction, à la fin des années 1950, coïncide avec le début de l'industrialisation de notre agriculture ;
- le Cs-137 a une demi-vie de 30 ans. Les quantités encore présentes dans les sols sont donc aisément détectables ;
- une fois retombé au sol, le césium est fermement retenu par les particules de sol, n'étant à toute fin pratique ni lessivé, ni prélevé par les cultures. Sa redistribution spatiale dans l'environnement reflète donc les mouvements de sol ;
- Le mode de déplacement de cet isotope dans l'environnement est lié principalement au sol. La comparaison de l'activité du sol en Cs-137 d'un site donné avec celle d'un site reconnu non-érodé peut donc être interprétée en termes d'érosion (réduction de l'activité) ou de déposition (augmentation de l'activité). ;
- les mesures de Cs-137 renseignent non seulement sur l'érosion nette, mais sur l'ensemble des mouvements de sol, leur importance relative et leur distribution spatiale dans le paysage ;
- un seul échantillonnage des sols de la zone étudiée est suffisant pour pouvoir y estimer l'ensemble des mouvements de sol au cours des 30 dernières années.

Echantillonnage du sol et mesure de Cs-137

Pour pouvoir estimer les mouvements de sol à partir des mesures de Cs137, il faut mesurer le stock de césium présent dans les sols, tant pour le site d'étude (zones d'érosion ou de dépôt) que pour les sites de références non érodés. En milieu non perturbé, le Cs-137 est habituellement concentré dans les premiers centimètres du sol et décroît de façon exponentielle avec la profondeur (Grzegorz, 2006, Walling et He, 1999).

Un carottier en métal d'environ 30 cm de long et de 5 cm de diamètre a été utilisé. Chaque carotte a été sectionnée à des intervalles de 1 à 2 cm sur toute sa longueur afin de tracer le profil de la teneur en Césium-137 en fonction de la profondeur.

Les échantillons secs sont broyés à l'aide d'un mortier en porcelaine jusqu'à l'obtention d'une poudre fine et homogène. Les grosses particules sont écartées au moyen d'un tamis de 2 mm d'ouverture de maille.

Chaque échantillon représentant chaque tranche de sol considéré, est séché une semaine à l'air libre, puis placé 24 heures environ dans une étuve à 100 °C, jusqu'à obtenir une masse constante.

Système d'analyses

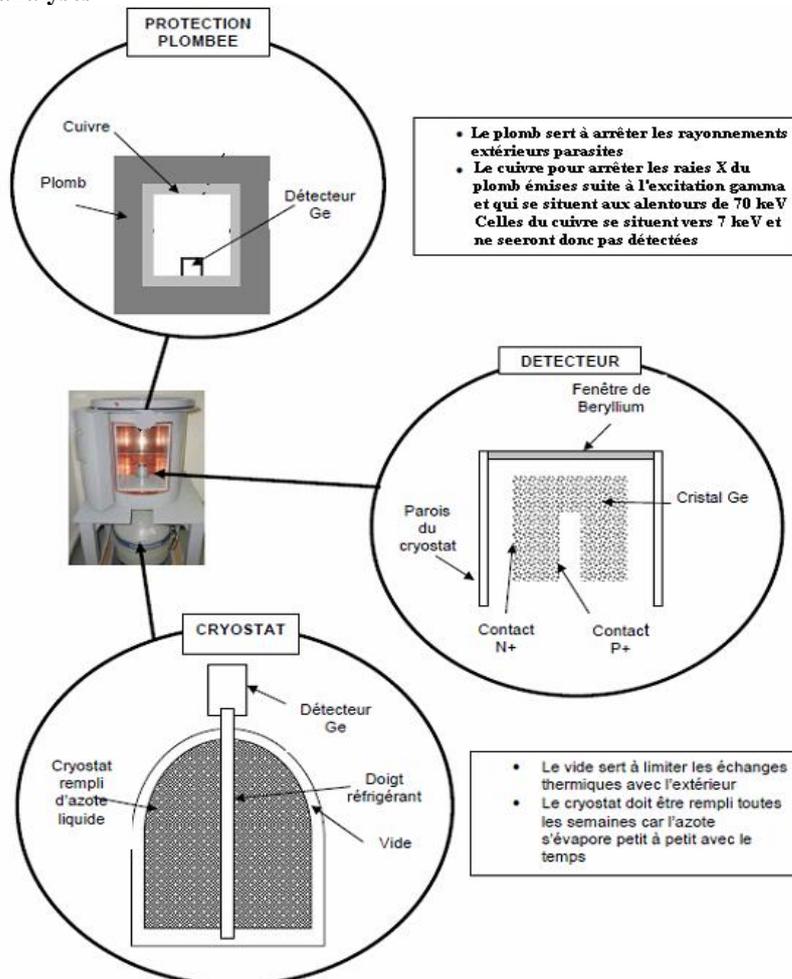


Fig. 28 : Système d'analyse du Césium-137. Le détecteur Gamma hyper pur.

Une chaîne de spectrométrie gamma a été utilisée pour l'analyse le radioélément Cs-137 dans le compartiment du sol. La chaîne d'acquisition est composée d'un détecteur (dont la partie sensible est un cristal de germanium hyper pur), placé au centre d'une enceinte blindée. Le détecteur est relié à un réservoir d'azote liquide qui assure le refroidissement du détecteur d'une part, et par le biais d'un préamplificateur d'amplitude à une électronique de détection, d'autre part.

L'utilisation d'un modèle tenant compte de la retombée initiale du Césium-137 permet de convertir les teneurs en cet élément en termes de perte ou de gain (dépôt) de sols par rapport au site de référence. Le modèle utilisé pour traduire l'activité en césium-137 en termes de mouvements du sol est celui proposé par Kachanoski 1963 (3) :

$$E = M R^{-1} (1 - (T_n/T_0)^{1/n}) \quad (3)$$

Où E : perte de sol en $\text{Kg/m}^2/\text{an}$,
 M : poids de couche de laboure en Kg/m^2 ,
 R : enrichissement relatif en isotope du sol érodé,
 T_n : activité spécifique en Césium-137 de l'échantillon de sol prélevé en Bq/m^2
 T_0 : activité spécifique en Césium-137 du sol d'un site non-érodé en Bq/m^2 ,
 n : nombre d'années écoulées depuis le maximum de retombées (année 1963).

Les zones à activité en césium-137 inférieure à celle des témoins sont considérées comme érodées, et les zones à activité supérieure sont considérées comme des zones d'accumulation.

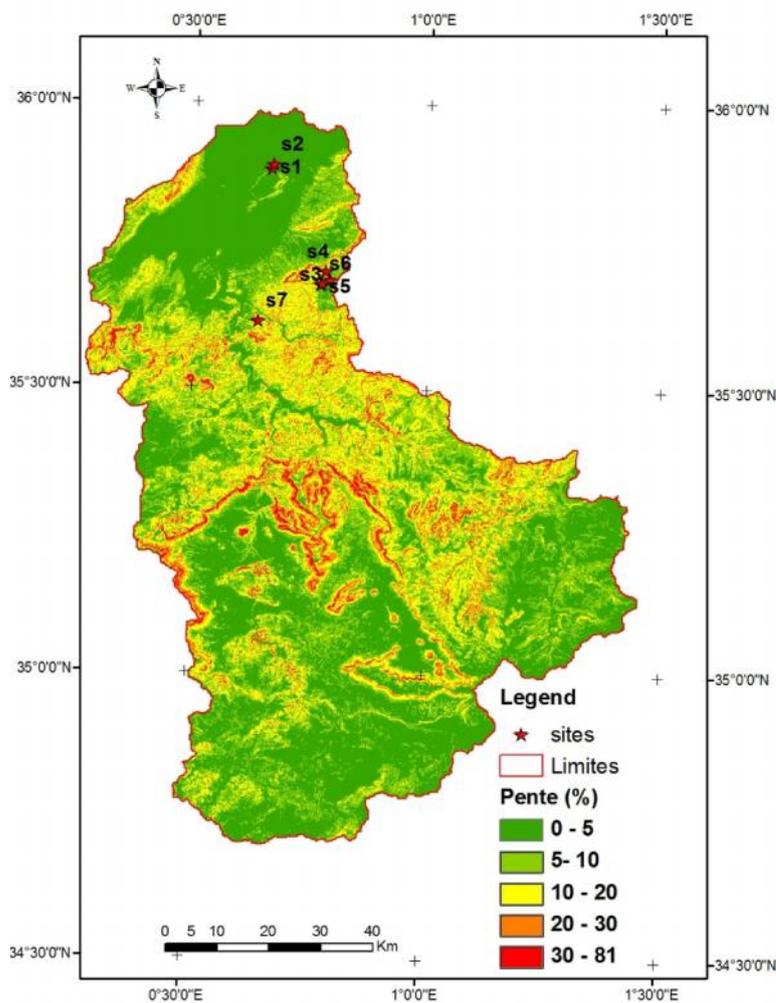


Fig.29 : localisation géographique des points d'échantillonnage.

Dans le tableau 3, on a exposé la première tranche du travail réalisé sur le terrain (échantillonnage) et au laboratoire afin de déterminer la redistribution du radio-élément Cs-137.

Les premières missions d'échantillonnage ont ciblés la région du nord-est du bassin caractérisée par des terrains agricoles de faible pente. Sur sept échantillons prélevés, trois ont pu être analysés par spectrométrie gamma.

Tableau 3 : Caractéristiques des sites d'échantillonnage du sol.

Site	Classes de pente	NDVI_Juin 2009	Végétation	Moyenne du pourcentage de la matière organique
S1	0-5	0	GPI	1,51
S2	0-5	0,016	GPI	1,72
S3 (site de ref.)	0-5	0,18	forte	0,98
S4	5-10	0,123	moyenne	1,86
S5	5-10	0,064	faible	1,55
S6	0-5	0,065	faible	0,77
S7	0-5	0,07	faible	-

GPI : Grands Périmètre d'Irrigation.

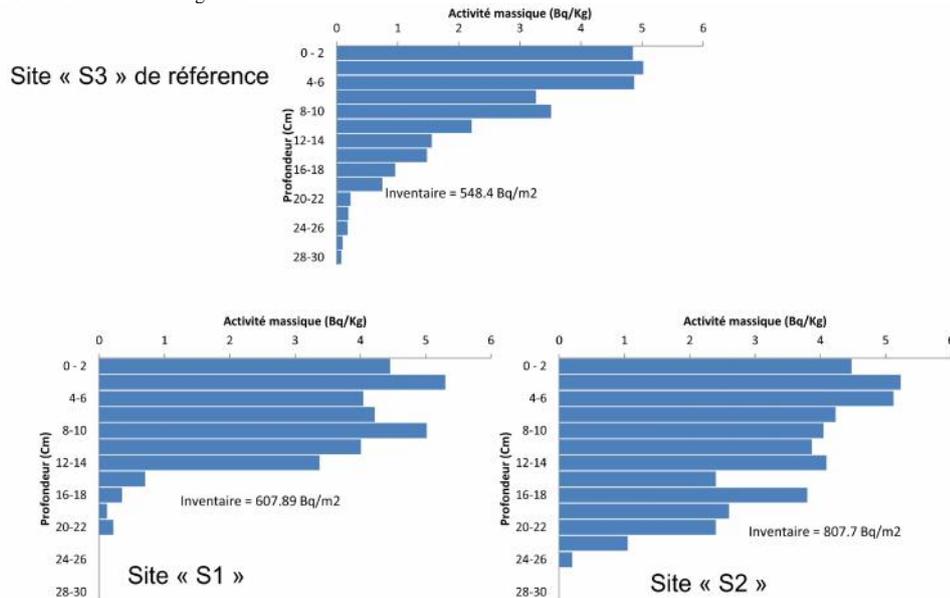


Fig. 29 : Répartition verticale du Cs-137 dans trois profils de sol (site 1, 2 et le site de référence S3).

D'après les profils de l'activité en Cs-137 dans le site 1 et le site 2 (figure 29), considérés comme terrain agricole, on constate que ces régions représentent une accumulation du sol car l'activité de ces derniers en Cs-137 est supérieure au site de référence (S3). En utilisant le modèle de Kachanoski, on a pu estimer le taux d'accumulation qui est de 0.039 kg/m²/an pour le site 1 et de 0.148 kg/m²/an.

CONCLUSION

Dans cette étude, on a fait appel à la télédétection et aux SIG pour évaluer et cartographier l'érosion hydrique en utilisant l'équation universelle des pertes en sol USLE dans le bassin versant de l'Oued Mina. Ce bassin est caractérisé par une grande irrégularité dans les précipitations, une forte pente, une lithologie essentiellement marneuse et une couverture végétale très faible ce qui le rend très vulnérable à l'érosion. L'USLE (équation universelle de perte en sol) est la combinaison de six facteurs spécifiques qui décrivent les caractéristiques du bassin versant. Les données de télédétection multi-temporelles et les SIG sont utilisées pour évaluer et cartographier chaque facteur individuellement. L'intégration des cartes thématiques des facteurs du modèle USLE dans le SIG permet de cerner l'impact de chaque facteur dans les pertes en sol, de classer par importance relative les zones d'érosion, et de quantifier les pertes en sol dans le bassin.

Même si l'équation a été initialement conçue pour prédire l'érosion des sols à l'échelle du champ, son utilisation pour les grandes surfaces dans la plate-forme SIG a produit des résultats satisfaisants. Par la délimitation des sous-bassins hydrographiques comme zones sensibles à l'érosion en fonction du niveau de gravité de la perte des sols, la priorité est donnée pour une planification de la conservation ciblée et rentable. L'utilisation des outils de traitement d'images satellites, des modèles numériques de terrain (MNT), ainsi que des systèmes d'information géographique (SIG) permet de favoriser le développement d'approches de gestion intégrée par, notamment, la mise sur le marché d'images multi-dates ainsi que la possibilité de transposer des modèles d'érosion dans un contexte spatial.

En ce qui concerne l'évolution des facteurs interagissant avec l'érosion au cours du temps, on a déterminé les changements d'états des facteurs variables dans le temps entre deux périodes différentes. L'étude de l'évolution de l'occupation du sol est réalisée de deux façons. Dans la première, on a comparé deux images du même mois de deux années différentes. Dans la deuxième, on a déterminé l'éventuel changement qui peut intervenir entre deux saisons différentes au cours d'une année. Pour ce faire, on a utilisé les scènes prises durant le mois de juin des années 1987, 2002, et 2009. Pour la période humide, on a utilisé les scènes prises en février 1985, novembre 2009 et janvier 2010. Le sol nu occupe environ 40 % de la superficie de la région d'étude durant la période sèche. Ce pourcentage diminue (-50%) en automne et atteint environ 8% en hiver. En effet, au début de saison de culture et avec les premières pluies d'automne, la végétation pousse et occupe les zones nues. En hiver, la santé de la végétation atteint son maximum. Durant cette période, la végétation couvre environ 44% de la superficie du bassin.

Les deux classes « végétation » et « sol nu » ont subi un grand changement durant la période 1987-2009. La majorité de la zone Sud du bassin a été dépourvue de végétation entre 1987 et 2002 (soit 856 km² de perte). Contrairement au Nord-Ouest, on remarque une amélioration de la superficie végétale dans des zones dispersées (711 km²). Cette amélioration est probablement due à l'augmentation des activités agricoles dans cette région. Entre 2002 et 2009, les zones où on a enregistré des gains de la végétation durant la période 1987-2002, ont devenues des sols nus sauf l'extrême Sud, où on a enregistré une légère amélioration de la végétation (449 km²).

D'autres données satellitaires de basse résolution spatiales, mais procédant une importante résolution temporelle (une acquisition par jour). Nous avons utilisé des séries chronologiques de

données NDVI SPOT-VEGETATION afin de suivre la dynamique temporelle de la végétation à l'échelle du bassin versant de l'Oued Mina. Au cours de la période 1999-2010, la couverture végétale dans cette région a légèrement augmenté avec une tendance ondulante. La moyenne annuelle maximale du NDVI a augmenté de 0,08 ce que signifie que la productivité végétale et essentiellement agricole dans la région, a progressivement augmenté. L'augmentation du NDVI_{max} mensuelle en hiver et en automne des grands périmètres d'irrigation a contribué à l'augmentation du NDVI annuelle du bassin. Durant la même période, les précipitations des stations analysées présentent une tendance à l'augmentation.

Les régions forestières ont enregistré une baisse de la productivité végétale reflétée, dans le cadre de cette étude, par le NDVI_{Max}. Or les régions qui ont bonne tendance annuelle à la hausse du NDVI_{max} étaient durant la période 1999 à 2003 dégradées (sol nu) et qui semblent avoir été bien couvertes durant les dernières années (pente entre 0.075 et 0.033). Les zones agricoles représentent une faible tendance à la hausse, soit les zones connaissant la plus forte concentration de population. L'activité agricole s'est améliorée durant ces dernières années avec une augmentation des précipitations. Cependant, il est intéressant de constater que le pourcentage des points subissant cette augmentation du NDVI_{Max} augmente du nord vers le sud. Les variations de l'indice de végétation ne peuvent s'expliquer que par des variations pluviométriques et/ou des interventions humaines pouvant soit réduire la couverture végétale (dégradation) soit l'étendre, via la bonification des terres ou l'intensification agricole. L'évolution intra-annuelle de la végétation est essentiellement influencée par des facteurs climatiques. Les événements climatiques les plus remarquables sur la période d'étude sont les sécheresses des années 2000 et 2008, caractérisées par un déficit hydrique.

La technique isotopique par le césium 137, semble être intéressante pour l'évaluation de la perte en sol et la fraction de sédimentation. Dans cette étude, nous avons tenté d'estimer l'érosion hydrique par le césium-137 sur la totalité du bassin versant et valider les résultats de l'évaluation de l'érosion par la télédétection et les SIG. Vu la grande superficie du bassin, nous avons échantillonné seulement sept points dans la partie nord du bassin. Seuls trois échantillons du sol ont pu être analysés par la spectrométrie Gamma. D'après les profils de l'activité en Cs-137 dans le site 1 et le site 2 (figure 29), considérés comme terrain agricole, on constate que ces régions représentent une accumulation du sol car l'activité de ces derniers en Cs-137 est supérieure au site de référence (S3). En utilisant le modèle de Kachanoski, on a pu estimer le taux d'accumulation qui est de 0.039 kg/m²/an pour le site 1 et de 0.148 kg/m²/an.

Références bibliographiques

- ABH (Agence du Bassin Hydrographique Chélif Zahrez), 2004. *Cadastre Hydraulique du bassin hydrographique Chélif-Aval du barrage de Boughzoul*, Deuxième partie : Bas Chélif et Mina, 52 pages.
- Achite, M., B., Touaibia, et S., Ouillon, 2006. Erosion hydrique en Algérie du Nord : Ampleur, Conséquences & Perspectives. *14th International Soil Conservation Organization Conference. Water Management and Soil Conservation in Semi-Arid Environments*. Marrakech, Morocco, p 14-19.
- Bartholomé, E., 1993. Télédétection et cartographie. Éd. AUPELF-UREF. *Les Presses de l'Université du Québec*. 1993. p. 187-201
- Boukheir, R., C., Abdallah, et M., Khawlie, 2008. Assessing soil erosion in Mediterranean Karst landscapes for Lebanon using remote sensing and GIS; *Engineering Geology Journal*, 16 pages.
- Demmak, A., 1982. Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale. *Thèse de Dr. Ing.*, Université de Pierre et Marie Curie, Paris XI.
- El Garouani A., A., Merzouk et A., Ozer, 2003. Cartographie et évaluation quantitative de l'érosion hydrique au pré-Rif marocain. *Hydrology of die Mediterranean and Semiarid Regions (Proceedings of an international symposium held at Montpellier, April 2003)*. IAHS Publ. no. 278. 2003.
- Fistikoglu O., et N., B., Harmancioglu, 2002. Integration of GIS with USLE in Assessment of Soil Erosion. *Water Resources Management 16: 447-467, 2002*.
- Grzegorz, J. P., 2006. Caesium-137 as a Soil Erosion Tracer: A Review. *Eochronometria Vol. 25, pp 37-46, 2006* – Journal on Methods and Applications of Absolute Chronology
- GTZ, 1996. L'aménagement des zones Marneuses dans les bassins-Versants des Montagnes de l'Atlas Tellien Semi-Aride, *Deutsche Gesellschaft fur Technische Zusammenarbeit (GTZ)*.
- Holben B., 1986. Characteristics of maximum value composite images for temporal AVHRR, *International Journal of Remote Sensing*, 7, pp. 1417-1437
- Huang, F. et P., Wang, 2008. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and
- Justice, C.O., G., Digdale, J.R.G., Townshend, A.S., Narracott and M., Kumar, (1991) Synergism between NOAA-AVHRR and Meteosat data for studying vegetation development. 10 pages.
- Kinnell, P.I.A., 2001. Slope length factor for applying the USLE-M to erosion in grid cells. *Soil and Tillage Research. 58:11-17*.
- Lopez, C., 1976. Guia para l'elaboracion d'estudios del medio fisico. *Cap XII riesgos derivados de los procesos naturales. Ministerio de medio ambiente. Secretaria general tecnica*.pp549-590.
- Lu, D., P., Mausel, E., Brondizio et E., Moran, 2004. Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 25 (12) : 2365-2407.
- Mahe, G., AlKarkouri, J., Benabdefadel, H., Bensafia, D., Brou, T., Chaker, M., Chikhaoui, M., Coupleux, S., Crouzevialle, R., Dieulin, C., Emran, A., Ezzaouini, M., Goussot, E., Hallouz, F., Khomsi, K., Laouina, A., Machouri, N., Maleval, V., Meddi, M., Nging, M., Planchon, O., Remini, B., Saadi, H., Sfa, M., Sinan, M., Snoussi, M., Taibi, S., Toumi, S., Tra Bi, A. (2013). Etude de l'évolution de l'occupation du sol sur deux grands bassins d'Algérie et du Maroc, et relation avec la sédimentation dans les barrages. In: Considering

Mis en forme : Français (France)

Mis en forme : Anglais (États Unis)

hydrological change in reservoir planning and management (Schumann, A. *et al.*, Eds.)
IAHS Publ. 362, 115-123.

- Mas, J.F., 2000. Une revue des méthodes et des techniques de télédétection du changement. *Journal Canadien de Télédétection*, 26 (4) : 349-362.
- Nasir, A., K., Uchida and M., Ashraf, 2006. Estimation of Soil Erosion by Using RUSLE and GIS for Small Mountainous Watersheds in Pakistan. *Pakistan Journal of Water Resources*, Vol.10(1) January-June 2006/11.
- Okoth, P.F., 2003. A hierarchical method for soil erosion assessment and spatial risk modelling, Thesis Wageningen University 232 pages.
- Omuto, C.T., R.R., Vargas, M.S., Alim et P., Paron, 2010. Mixed-effects modelling of time series NDVI-rainfall relationship for detecting human-induced loss of vegetation cover in drylands; *Journal of Arid Environments*; pp. 1552-1563.
- Renschler, C.S., and J., Harbor, 2002. Soil erosion assessment tools from point to regional scales. The role of geomorphologists in land management research and implementation. *Geomorphology*. 47: 189-209.
- Ritchie, J.C. and J.R., Mchenry, 1990. Application of radioactive fallout cesium-137 for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns: a review. *J Environ Qual* 1990; 19: 215-33.
- Roose, J.W., R.H., Haas, D.W., Deering, J.A., Schell, et J.C., Harlan, 1974. "Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation". *Greenbelt, Maryland, NASA/GSFC*, 371 p.
- Roose, E., M., Arabi, K., Brahamia, R., Chebbani, M., Mazour et B., Morsli, 1993. Érosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne algérienne Réduction des risques érosifs et intensification de la production agricole par la GCES : *synthèse des campagnes 1984-1995 sur un réseau de 50 parcelles d'érosion. Cah. Orstom, sér. Pédol.*, vol. XXVIII, no 2, 1993 : 289-308.
- Sadiki, A., S., Bouhlassa, D., Auajjar, A., Faleh, et J.J., Macaire, 2004. Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie de risques d'érosion par l'Equation Universelle des pertes en sol dans le Rif oriental (Maroc) : cas du bassin versant de l'Oued Bousouab. *Bulletin de l'institut scientifique, Rabat, section Science de la terre*, n°26, p. 69-79.
- Shi, Z.H., C.F., Cai, S.W., Ding, Z.X., Li, T.W., Wang, and Z.C., Sun, 2002. Assessment of Erosion Risk with the Rusle and Gis in the Middle and Lower Reaches of Hanjiang River. *12th ISCO Conference Beijing 2002*.
- Shiferaw, A., 2011. Estimating soil loss rates for soil conservation planning in the borena woreda of south wollo highlands, Ethiopia. *Journal of Sustainable Development in Africa* (Volume 13, No.3, 2011) ISSN: 1520-5509.
- Terranova, O., L., Antronico, R., Coscarelli and P., Iaquina, 2009. Soil erosion risk scenarios in the Mediterranean environment using RUSLE and GIS: An application model for Calabria (southern Italy). *Geomorphology journal* 112 (2009) 228-245. www.elsevier.com/locate/geomorph.
- Touaibia B., D., Gomer et A., Kidaoui, 1990. Estimation de l'index d'érosion de Wischmeier dans les micro-bassins expérimentaux de l'Oued Mina en Algérie du nord.
- Touaibia, B., S., Dautrebande, D., Gomer et A., Kidaoui, 1999. Approche quantitative de l'érosion hydrique à différentes échelles spatiales : bassin versant de l'Oued Mina. *J. Sciences Hydrologiques.*, 44, 6. : *IAHS Press. Wallingford.UK* : 973- 986.
- Van der Knijff J.M., R.J.A., Jones et L., Montanarella, 2000. Estimation du risque d'érosion en Italie.
- Vezena, K. et Bonn, F., 2006. Modélisation et analyse de la dynamique spatio-temporelle des relations société – érosion et pollution diffuse en milieu agricole – étude de cas en Vietnam

Mis en forme : Anglais (États Unis)

Mis en forme : Anglais (États Unis)

Mis en forme : Français (France)

Code de champ modifié

Bibliographie

- et au Québec; Interaction Nature-Société, analyse et modèles. *UMR6554 LETG, LaBaule*, 6 pages.
- Wachal, D.J., 2007. Integrating GIS and erosion modeling – A tool for watershed management, ESRI international user conference, *Paper N° UC1038*, 11 pages.
- Walling, D.E. and Q., He, 1999. Improved models for estimating soil erosion rates from cesium-137 measurements. *Journal of Environmental Quality* 28: 611-622.
- Walling, D.E. and T.A., Quine, 1991. Use of Cs-137 measurements to investigate soil erosion on arable fields in the UK: potential applications and limitations. *J Sil Sci* 1991 ; 42 ; 147-65.
- White, W.R., 1986. Problèmes d'érosion, transport solide et sédimentation dans les bassins versants, *Projet 5.3 du programme hydrologique international*, 155 pages.
- Wischmeier, W.H. and D.D., Smith, 1958. Evaluation of factors in the soil-loss equation. *Agricultural Engineer* 39, 458–462.
- Wischmeier, W.H. and D.D., Smith, 1978. Predicting rainfall erosion losses. *A Guide to Conservation Planning, Washington, USDA 537*, 58 pp.

Mis en forme : Anglais (États Unis)