

## **Cartographie du risque de dégradation des terres en région semi-aride Cas des Monts de Beni Chougrane dans le Tell occidental algérien**

### **Mapping land degradation in semi-arid region Beni Chougrane Mountains case in the Western Algerian Tell**

SOUIDI Z.\*, HAMIMED A.\* & DONZE F.\*\*

**Abstract :** In northern Algeria, the physical degradation of land by water erosion is one of the most important forms of degradation.

To track the progress of this process, spatial tools such as remote sensing and geographic information systems (GIS) seem to provide accurate maps. These maps can be used to quantify the level of land degradation using ecological indicators that highlight the changes of the environment. These indicators are highly correlated with radiometric surface parameters such as albedo, vegetation index (NDVI) and surface temperature. The objective of this study is to develop a methodology for mapping the level of degradation by combining information acquired by the sensors and the satellite-derived digital terrain model (DTM) variables. The proposed methodology involves a quantitative index of soil degradation (IDS) expressed in terms of two parameters: the evaporation fraction (EF), which discriminates between the water surface conditions and the NDVI which reflects the chlorophyll activity at the surface. The results show that the degraded and/or highly degraded areas cover 29% of the watershed zone as well as 43% of the dense or very dense vegetation area. The rest (28%) being in a critical state.

Keywords : Water erosion, NDVI, Evaporation, GIS, Remote sensing, Algeria

**Résumé :** En Algérie du Nord, le phénomène d'érosion hydrique présente la forme de dégradation physique des sols la plus importante. Pour suivre la progression de ce phénomène, les outils spatiaux, tels que la télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG), semblent être privilégiés, ils permettent d'élaborer des cartes précises sur la progression de la dégradation à partir des indicateurs écologiques qui mettent en évidence les transformations du milieu. Ces indicateurs sont corrélés aux paramètres radiométriques de surface, tels que l'albédo, l'indice de végétation (NDVI) et la température de surface. L'objectif de cette étude est de développer une méthodologie pour la cartographie du risque de dégradation par utilisation combinée de l'information acquise par les capteurs satellitaires et des variables dérivées du modèle numérique de terrain (MNT). La méthodologie présentée consiste à développer un indice quantitatif de dégradation des sols (IDS) en fonction de deux paramètres : la fraction d'évaporation (EF) qui discrimine l'état hydrique de surface et l'indice de végétation qui reflète l'activité chlorophyllienne des surfaces. Il ressort que les zones en état dégradé et très dégradé couvrent 29% de la superficie du bassin versant contre 43% des terres à couvert végétal dense ou très dense. Le reste (28%) étant en état critique.

Mots-clés: Dégradation, NDVI, Evaporation, SIG, Télédétection, Algérie.

### **INTRODUCTION**

La désertification est un processus à l'origine de la dégradation des terres dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches (UNCCD, 1996). La communauté internationale est depuis longtemps consciente que la désertification pose un grave problème économique, social et environnemental à de nombreux pays de toutes les régions du monde et particulièrement en région aride (BOU KHEIR *et al.*, 2001). En Algérie, le phénomène de dégradation des terres affecte et menace d'immenses espaces de notre pays (HEDDADJ, 1997) et l'érosion hydrique présente la forme de dégradation physique des sols la plus importante affectant les reliefs, la production du sol et la stabilité des versants (ROOSE *et al.*, 2000).

\* Université de Mascara, Laboratoire LRBSG, Université de Mascara, souidi.z@gmail.com

\*\*Université Joseph Fourier (UJF), Laboratoire 3S, [Frederic.Donze@hmg.inpg.fr](mailto:Frederic.Donze@hmg.inpg.fr)

Les conséquences les plus remarquables sont : appauvrissement généralisé des sols, baisse de la fertilité et exode rural de la population (BENCHETRIT, 1972).

Le ministère de l'Agriculture et du Développement rural (MADR, 2011) estiment à 50 millions d'hectares les surfaces menacées par la dégradation en Algérie, due à la désertification et l'érosion hydrique, soit plus de 20% de la superficie totale du pays qui dépasse les 238 millions d'hectares. 14 millions d'hectares de zones de montagne dans le Tell occidental sont touchés par l'érosion hydrique, 32 millions d'hectares en zones steppiques sont directement affectés et/ou menacés par la désertification et 4,1 millions d'hectares de forêts soumises aux menaces du changement climatique (MADR, 2011). Ces zones approvisionnent environ 37% de la population nationale (ONS, 2006). Pour ces raisons, une meilleure compréhension des relations entre les perturbations, la dégradation des terres et l'eau (facteur limitant), est particulièrement pertinente dans ces régions.

Plusieurs années de mesures du ruissellement et de l'érosion en Algérie ont contribué à caractériser l'érosion sous son aspect quantitatif (SARI, 1977 ; DEMMAK, 1981 ; ROOSE *et al.*, 1993 et 2000). Cependant ces données ponctuelles s'avèrent insuffisantes pour un suivi rigoureux et instaurer un plan d'aménagement efficace (CHAKROUN, 1993). Actuellement, la dégradation des terres constitue le premier défi auquel l'Algérie est confrontée, à l'instar de tous les pays du Maghreb et du Moyen-Orient, dans le sillage de la dégradation des conditions climatiques. Un besoin pressant d'exploitation d'indicateurs de la dégradation des sols s'est fait ressentir pour ces grandes régions en milieu aride (PUIGDEFABREGAS & MENDIZABAL, 1998 ; WESSELS *et al.*, 2004 ; REYNOLDS *et al.*, 2007).

Plusieurs auteurs (LE HOUEROU, 1996; LUDWIG & TONGWAY, 2000; PARUELO *et al.*, 2000; HOLM *et al.*, 2003; BOER & PUIGDEFABREGAS, 2003, 2005) s'accordent à définir le dysfonctionnement ou la dégradation d'un écosystème comme l'incapacité à la rétention, à l'utilisation et au recyclage des ressources locales, telles que l'eau, l'énergie et les nutriments. En effet, le milieu naturel représente une unité fonctionnelle qui se perpétue de façon autonome au travers du flux de l'énergie et du cycle de la matière entre ses différentes composantes en constante interaction (RAMADE, 1993). La compréhension du rôle et des caractéristiques de la végétation naturelle dans les processus écologiques est primordiale pour le suivi de ces écosystèmes terrestres (ZARCO-TEJADA *et al.*, 2003). Le flux hydrique constitue le principal régulateur du fonctionnement des écosystèmes forestiers. L'eau interceptée peut être redistribuée dans le sous-bois ou le sol ou rejetée dans l'atmosphère sous forme d'évapotranspiration. Cette dernière est associée au flux de chaleur latente, alors que l'énergie perdue est utilisée par le flux de chaleur sensible. L'évapotranspiration ou flux de chaleur latente constitue le lien entre équilibre hydrique et énergétique à l'interface sol-plante-atmosphère.

Le stress hydrique est un des facteurs limitants le plus important pour la photosynthèse et la production primaire (PEÑUELAS *et al.*, 1993), sachant que les végétaux chlorophylliens sont de grands consommateurs d'eau et en fonction de leur localisation géographique, l'évapotranspiration peut représenter environ 70% du retour vers l'atmosphère des précipitations (BRUTSAER, 1982). Par conséquent, elle constitue un des phénomènes majeurs dans le bilan hydrique, surtout au niveau des régions arides et semi-arides, caractéristiques de l'Algérie.

L'évapotranspiration est une fonction clé de l'écosystème qui n'a pas beaucoup été utilisé pour la surveillance de la dégradation des terres. L'évapotranspiration est une composante majeure du bilan hydrologique, car elle exprime les échanges de masse et d'énergie entre le système sol-eau-végétation et l'atmosphère. La partition de l'énergie disponible pour atteindre une surface en chaleur latente (LE) et chaleur sensible (H) dépend surtout de la disponibilité de l'eau, donc les écosystèmes non dégradés devraient dissiper plus d'énergie par LE (ou évapotranspiration) par rapport aux paysages dégradés ou perturbés.

Par conséquent, le suivi du risque de dégradation des sols à l'échelle régionale par des indicateurs du bilan énergétique selon leurs perturbations pourrait se faire sur la base de la partition de l'énergie entre LE et H. Cependant, en Algérie les données directes sur l'état hydrique des milieux naturels sont quasi inexistantes, étant donné le manque de moyens et la difficulté d'accès dans les régions de montagnes qu'occupent la totalité de la couverture forestière. La télédétection se présente comme un outil privilégié pour la réalisation de ce suivi, car elle fournit les informations liées aux transferts de masse et d'énergie et au processus d'évapotranspiration à différentes échelles.

Le suivi de la densité et de l'état hydrique de la végétation à partir des données de télédétection a trouvé d'importantes applications dans le domaine agricole et forestier (GAO, 1996) en particulier pour le suivi des conditions de sécheresse (PEÑUELAS *et al.*, 1993). Des variables telles que la température de surface, l'albédo ou les indices de végétation peuvent constituer des paramètres d'entrée dans les modèles du bilan d'énergie de surface et de l'évapotranspiration (KUSTAS & NORMAN, 1996).

L'estimation de l'évapotranspiration à l'échelle régionale par la télédétection ont été largement développées ces dernières années (HAMIMED *et al.*, 2001). Plusieurs modèles, tel que le modèle SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*) (BASTIAANSEN *et al.*, 1998) ou le modèle S-SEBI (*Simplified Surface Energy Balance Index*) (ROERINK *et al.*, 2000) proposent une méthodologie pour estimer l'évapotranspiration réelle adaptée aux conditions semi-arides méditerranéennes basée sur la résolution de l'équation du bilan d'énergie à l'échelle du pixel.

En effet, depuis quelques années, la télédétection et les SIG se montrent comme des outils performants pouvant servir à la collecte et à la combinaison des données (PUECH, 1993 ; BONN, 1998). Ils se présentent de nos jours comme des outils incontournables dans les systèmes interactifs d'aide à la décision pour des opérations de gestion du risque (ROY & BOUYOUSSOU, 1993 ; WACHAL & HUDAK, 2000 ; SHRIMALIL *et al.*, 2001 ; LEE, 2004 ; BOU KHEIR *et al.*, 2006).

Notre travail se base principalement sur les indicateurs du milieu qui sont très corrélés aux paramètres radiométriques de surface, tels que l'albédo ( $\alpha$ ), l'indice de végétation (NDVI) et la température de surface ( $T_s$ ). L'objectif de cette étude est de développer une approche méthodologique pour la cartographie du risque de dégradation des terres de montagne par utilisation combinée de l'information acquise par le capteur satellitaire ETM+ et des variables dérivées du modèle numérique de terrain (MNT). La méthodologie utilisée consiste à développer un indice qualitatif et quantitatif de dégradation des sols en fonction de deux paramètres : la fraction d'évaporation (EF), qui discrimine l'état hydrique de surface relatif au fonctionnement de l'écosystème, et l'indice de végétation (NDVI) qui reflète l'activité chlorophyllienne des surfaces.

Nous nous baserons sur l'hypothèse que les sites perturbés, où la dégradation des terres peut se produire sous l'effet d'une perturbation soutenue dans le temps, doivent enregistrer une EF et un NDVI minimal en réponse à l'augmentation de sol nu, à la perte de la végétation et de la matière organique dans le sol. Par conséquent, les sites perturbés peuvent être considérés comme des zones à risque de dégradation des terres due à un dysfonctionnement de l'écosystème. Les changements dans la « verdure » de la végétation et les propriétés du sol mentionnés ci-dessus devraient modifier l'équilibre de l'énergie de surface en augmentant le flux de chaleur sensible (H), et en diminuant le rayonnement net ( $R_n$ ) similaire à d'autres situations de dégradation des terres en Afrique du Nord (DOLMAN *et al.*, 1997). L'analyse de EF et NDVI dans notre zone d'étude nous permettra de vérifier cette hypothèse.

## CADRE DE L'ÉTUDE

### La région d'étude

La région du Tell occidental de l'Algérie, formée essentiellement de montagnes récentes, datant du Tertiaire est un milieu méditerranéen fragile. La lithologie est constituée en majorité de roches tendres (schistes, marnes et argiles) alternant avec des roches dures (grès et calcaires), les pentes sont fortes et les paysages sensibles à l'érosion. Les sols issus de ces matériaux sont riches en argiles gonflantes favorables au déclenchement du ruissellement dès que les états de surface le permettent (MONNIER *et al.*, 1986). Cette région est également exposée à un climat d'influence méditerranéenne ; les pluies sont en général peu agressives, mais les averses orageuses de forte intensité ( $> 100$  mm/h) sont fréquentes (1/5 ans), en particulier en automne lorsque le couvert végétal est très limité (ARABI & ROOSE, 1989 ; ARABI, 1991).

En effet, le développement de profondes ravines dans les zones semi-arides du paysage méditerranéen (badlands) a été largement décrit dans la littérature et généralement attribué aux changements environnementaux induits soit par des oscillations climatiques ou par l'activité humaine, qui a provoqué une augmentation du ruissellement et une diminution de la protection du sol par la couverture végétale (VITA-FINZI, 1969). Ces nombreuses circonstances ont favorisé la rupture de l'équilibre naturel. Ainsi, l'érosion s'est développée sous différentes formes : décapage de l'horizon

humifère, formation de rigoles évoluant en ravines sur les versants, localement ravinement généralisé, glissements de terrain, dégradation des berges et divagation des oueds dans les vallées sont les signes d'une dégradation poussée et généralisée des paysages de montagne de cette région.

Selon GHAZI et LAHOUATI (1997), les régions de montagne s'étendent sur 20 millions d'hectares en Algérie, dont 63 % sont situés à plus de 800 m d'altitude. Le quart des terres est situé sur des pentes supérieures à 25 %, peu couvertes par la végétation dégradée. Dans de nombreuses régions, la densité de la population (20 à 60 hab./km<sup>2</sup>) dépassant la densité naturelle acceptable, conduit à une forte pression sur le milieu par la mise en culture des sols sur fortes pentes, la réduction des surfaces pâturables et le développement du surpâturage (6 moutons/ha) sur un matorral dégradé. Les pratiques ancestrales de protection des sols et de gestion des eaux largement répandues autrefois par les Romains dans les pays méditerranéens (PLATEAU, 1976 ; ROOSE *et al.*, 2002) sont actuellement très limitées en Algérie ; elles auraient été effacées par l'expansion des réalisations de DRS (Défense et Restauration du Sol) et de la mécanisation de l'agriculture.

Parallèlement au développement de l'agriculture en montagne, les besoins en eau pour l'alimentation des villes et pour l'irrigation des plaines croissent rapidement, mais les ressources sont limitées. Aujourd'hui, les 48 barrages en exploitation affichent un taux de remplissage inférieur à 30 % de leur réserve (statistiques du Ministère de l'Hydraulique, février 2003). Quand elles sont disponibles, les eaux sont polluées (engrais azotés) et chargées en sédiments à cause de l'érosion. D'après DEMMAK (1982), des concentrations de 200 g/l de sédiments sont fréquemment observées dans les oueds.

### La zone d'étude

La zone d'étude se situe dans la région nord-ouest de l'Algérie (figure 1). Elle fait partie des monts de Béni Chougrane du Tell occidental entre les longitudes 0° 55' E et 0° 15' E et les latitudes 35°25' N et 35° 35' N. Les altitudes varient le plus souvent dans un intervalle de 150 à 600 m avec une pente supérieure à 25% sur la majorité des terres. C'est un écosystème fragilisé très sensible à l'érosion hydrique, il correspond au bassin versant de l'oued Fergoug d'une superficie d'environ 122 km<sup>2</sup>. Il fait partie du grand bassin versant de l'Oranie – Chott Chergui avec le barrage Fergoug en aval.

Deux périodes caractérisent cette région : une saison froide du mois de novembre au mois d'avril, enregistrant des minima de moins de 2 °C et une saison chaude du mois de mai au mois d'octobre avec des maxima de 35 °C. Les maxima thermiques sont accentués par le sirocco, un vent chaud desséchant venant du Sud, qui se manifeste plus particulièrement en été et augmente l'évapotranspiration. Les pluies sont concentrées durant la saison froide. Les précipitations moyennes annuelles sont comprises entre 300 à 500 mm.

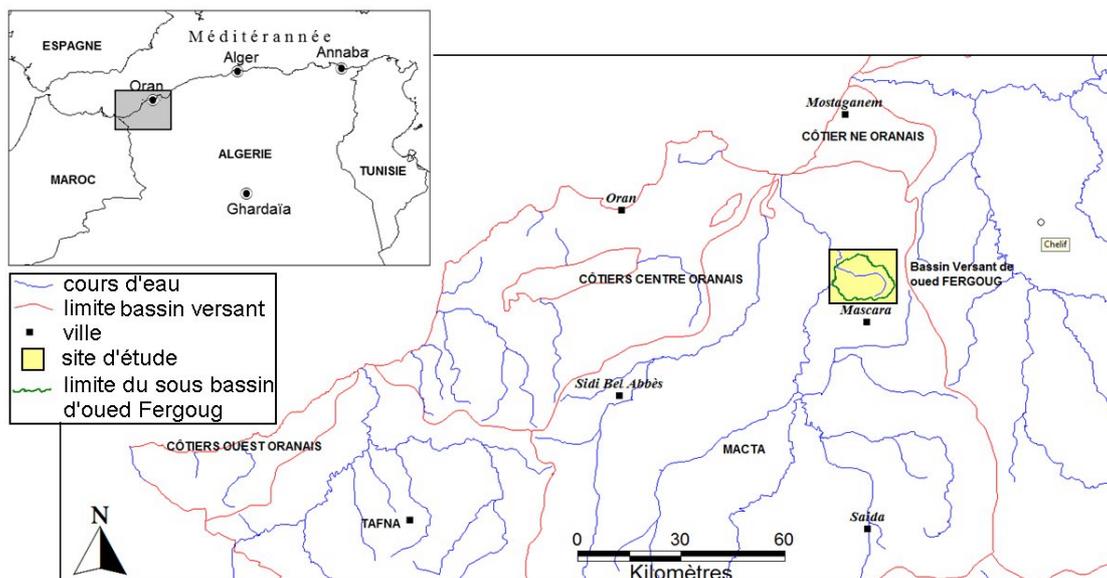


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude.

Le faciès lithologique le plus largement représenté dans cette région est celui des marnes et des marno-calcaires avec prédominance des terrains tendres : marnes et argiles (FIDA, 1991).

L'occupation du sol est assez diversifiée avec cependant une prédominance des parcours et broussaille (végétation claire) et des forêts (végétation dense) sur les hauts piémonts, représentée par la forêt domaniale de Fergoug. La végétation forestière est de type méditerranéen sclérophylle toujours vert, avec trois formations principales : le maquis de thuya en majorité, des peuplements de pin d'Alep lâches et des sujets de chêne vert. La strate arbustive et buissonnante est représentée par le Calycotome, le Diss, le Palmier nain, l'Armoise et l'Alfa (SOUIDI, 2001). Aux bas-piémonts, s'étend le barrage de Fergoug avec des cultures irriguées et la végétation naturelle colonisatrice des lits d'oueds (végétation très dense, ripisylve). Les sols nus sont représentés en grande majorité par des terres de culture en sec et des jachères.

## MATÉRIEL ET MÉTHODE

### Données utilisées

Le jeu de données utilisé dans cette étude est constitué de sept bandes spectrales du capteur ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*) de Landsat-7 acquises le 29 mai 2002 à 10 heures 30 minutes GMT. L'image a été acquise pour la saison printanière pour une production maximale de l'écosystème, l'évapotranspiration est presque entièrement due à une transpiration du couvert végétal. Le capteur ETM+ mesure les luminances spectrales exo-atmosphériques dans les domaines optiques (visible, proche et moyen infrarouge) et thermiques (infrarouge thermique). Les luminances dans le domaine optique sont converties en réflectances après correction des effets atmosphériques par utilisation du modèle SMAC (*Simplified Method for Atmospheric Correction*) (RAHMAN & DEDIEU, 1994). Les effets liés aux reliefs sont corrigés à partir de la formule proposée par DUFFIE et BECKMAN (1991), faisant intervenir des variables dérivées du modèle numérique de terrain (MNT) et des paramètres relatifs à la position du soleil par rapport à un point sur l'image (les angles zénithal et azimutal et l'angle horaire). Les réflectances sont ensuite converties en albédo ( $\tau_0$ ) et indice de végétation (NDVI).

### Estimation des indicateurs de surface

#### *Estimation de l'indice de végétation (NDVI)*

Depuis 1973, l'indice de végétation à différence normalisée (NDVI) est utilisé pour étudier la végétation. Son existence est due à la télédétection, ensemble de techniques employées pour acquérir des informations à distance qui fournit les mesures de réflectance ou rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi par les corps terrestre dans différentes longueurs d'onde (de 0.4  $\mu\text{m}$  à 14  $\mu\text{m}$ ) effectuées par les satellites à défilement. Plus de 90% de l'information spectrale sur un couvert végétal est contenue dans les bandes rouge du visible (R) et proche infrarouge (PIR), d'où leur utilisation pour le calcul des indices de végétation (BARET & GUYOT, 1991). Sa valeur varie de -1 à 1 et n'a pas d'unité. Selon TUCKER *et al.* (1981) cités par HIERNAUX et JUSTICE (1986), la valeur de 0,05 est le seuil indiquant une présence minimale de végétation correspondant à 100 kg de matière sèche par hectare avec une couverture de 1 %. Son utilisation est avantageuse, son calcul est simple et sa normalisation réduit les effets d'arrière plan tout en discriminant le spectre de la végétation (HIERNAUX & JUSTICE, 1986). En effet, selon ces auteurs, l'intensité du rayonnement de la matière verte augmente beaucoup dans le rouge (R) à cause de la chlorophylle qui l'absorbe, tandis qu'elle augmente légèrement dans le proche infra rouge (PIR), à cause de la diffusion des radiations par les parois hydratées des cellules foliaires. Il est donc un bon indicateur de la vigueur de la végétation. L'indice de végétation normalisé a été calculé selon la formule proposée par ROUSE *et al.* (1974) :

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

Ensuite, il a fallu corrélérer les valeurs du NDVI aux types de végétation présents sur le site d'étude.

### ***Estimation de la fraction d'évaporation (EF)***

La méthodologie adoptée pour estimer la fraction d'évaporation se base sur le modèle S-SEBI (Simplified Surface Energy Balance Index) (ROERINK *et al.*, 2000). Le choix s'est porté sur ce modèle qui propose une méthodologie pour estimer l'évapotranspiration réelle adaptée aux conditions semi-arides méditerranéennes (SOUIDI *et al.*, 2009) basée sur la résolution de l'équation du bilan d'énergie à l'échelle du pixel. La vocation de ce concept est d'exploiter la variabilité spatiale en rapport avec les conditions hydriques, afin de cartographier les flux énergétiques de surface, en s'affranchissant au maximum des mesures de terrain. C'est ainsi qu'il a utilisé les propriétés de sites totalement secs ou humides pour estimer certaines variables de l'interface sol-végétation-atmosphère non accessibles par télédétection. L'estimation des flux de surface a consisté en une cartographie de valeurs instantanées obtenues par la résolution du bilan d'énergie.

Les paramètres d'entrées font intervenir le NDVI, la température de surface et l'albédo. Dans des conditions extrêmes, la méthode S-SEBI permet de déterminer la fraction d'évaporation (EF) à partir de la limite sèche et la limite humide pour une valeur donnée de l'albédo (SOUIDI & HAMIMED, 2010).

La fraction d'évaporation (EF) est estimée par l'intermédiaire de l'équation du bilan d'énergie (équation 2), en exprimant le partitionnement de l'énergie disponible ( $R_n - G$ ) (rayonnement net et flux de chaleur dans le sol) entre le flux de chaleur sensible ( $H$ ) et le flux de chaleur latente ( $LE$ ) selon l'approche S-SEBI (BASTIAANSEN *et al.*, 1998) :

$$EF = \frac{LE}{LE + H} = \frac{LE}{R_n - G} \quad (2)$$

### ***Estimation de l'indice de dégradation du sol (IDS)***

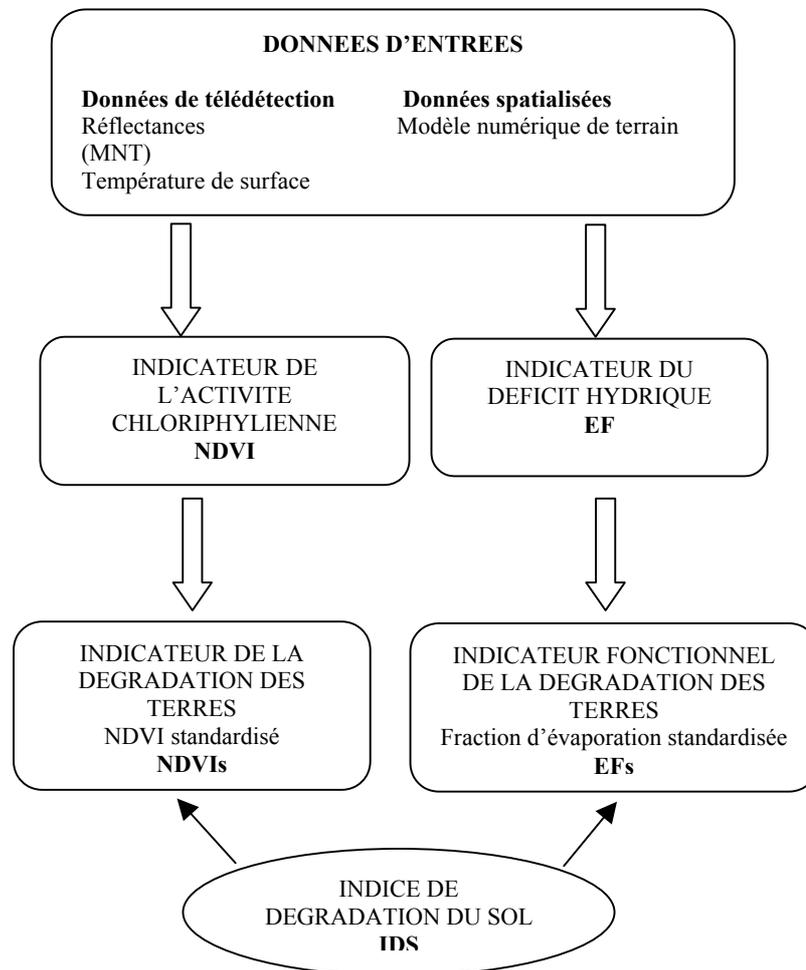
La méthode tient compte de la relation existante entre l'indicateur de l'état hydrique (fonction de l'écosystème terrestre et l'indice différentiel normalisé de végétation (NDVI, de l'anglais *vegetation index*). Cet indice fournit des valeurs estimées de «l'intensité de vert» de la végétation, résultant de l'analyse de données satellitaires. La démarche part du principe que le NDVI est un indicateur de la couverture végétale, dans la mesure où une dégradation de la végétation d'un écosystème, ou une diminution de l'intensité de vert, se traduirait par une diminution de la valeur du NDVI. Par conséquent, s'il est possible d'identifier dans divers écosystèmes terrestre une relation entre le niveau d'un indicateur donné, l'état hydrique, et le NDVI, il est aussi possible de suivre l'évolution du processus de dégradation des sols.

Pour créer des indicateurs comparables dans l'espace approprié pour la région d'étude, EF et NDVI ont été standardisés entre deux valeurs extrêmes de l'état de l'écosystème: extrêmement perturbé et non perturbé. Nous avons fait l'hypothèse qu'il y avait assez de variabilité dans la région d'étude pour y trouver des zones non dégradées et des zones perturbées. Avec cette hypothèse, les extrêmes pour l'état des écosystèmes dans l'image peuvent être trouvés statistiquement avec l'analyse des limites comme le maximum et le minimum de chaque variable pour un temps donné (BOER & PUIGDEFABREGAS, 2005). La fraction d'évaporation EF pour les zones non perturbées doit être à sa limite supérieure, selon les conditions climatiques locales. Le NDVI pour les zones non perturbées doit être aussi à sa limite supérieure, associée à la verdure de la végétation la plus élevée possible dans les conditions climatiques observées. Des valeurs standard ont été estimées pour EF et NDVI entre 0 et 1 selon EF ou NDVI maximale et minimale entraînant une EFS et NDVIS.

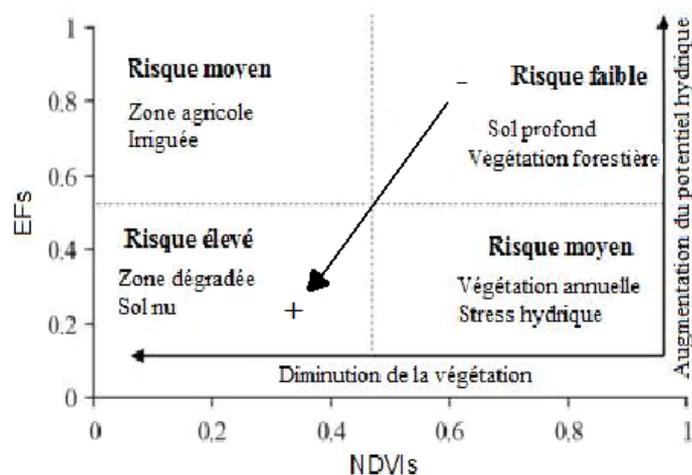
L'estimation de l'indice de dégradation du sol (figure 2) repose donc sur la combinaison de deux informations élémentaires de surface : l'état hydrique de surface, qui est caractérisé par la fraction d'évaporation (EFS standardisée) et l'activité chlorophyllienne de la surface qui est discriminée par l'indice de végétation (NDVIS standardisé).

La méthodologie présentée pour caractériser la dégradation des sols, se base sur la relation attendue entre NDVIS (Normalized Difference Vegetation Index Standardised ou indice différentiel normalisé de végétation) et EFS (Fraction d'évaporation normalisée) compte tenu des perturbations

que subit le milieu (figure 3). Les sites non perturbés (quadrant supérieur droit) correspondent à des valeurs de EFS et NDVIS maximale. Les perturbations doivent produire des changements dans les indicateurs potentiels compte tenu que les sites perturbés sont considérés comme présentant des risques de dégradation des terres.



**Figure 2 :** Organigramme de la méthodologie pour l'estimation de l'indice de dégradation du sol (IDS).



**Figure 3.** Schéma conceptuel de la relation attendue entre NDVIS (indice de végétation normalisé) et EFS (Fraction d'évaporation normalisée) suivant les perturbations du milieu.

Pour illustrer le concept de risque de dégradation des sols, quatre quadrants ont été fixés: risque élevé de dégradation des terres quand le NDVI et EFs ont des valeurs significativement opposées aux sites non perturbés et coïncidant avec le gradient de perturbation (diagonale en gris), risque moyen lorsque les deux indicateurs sont significativement différents, et un faible risque lorsque les deux indicateurs enregistrent des valeurs très faibles.

## RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

### Indice de végétation

L'indice de végétation (NDVI) se révèle être un outil bien adapté pour différencier et hiérarchiser la densité des couverts végétaux (NDVI de 0,3 à 0,8). Il est aussi un bon indicateur pour le suivi régional de la végétation (HADDOUCHE *et al.*, 2011). Le NDVI présente la particularité d'augmenter en présence de végétation dense. La carte d'indice de végétation NDVI ainsi obtenue sur la région d'étude (figure 4) montre que les fortes valeurs du NDVI, au dessus de 0,60 sont attribuées à la végétation dense. Les sols nus ont les faibles valeurs, en dessous de 0,2.

Nous pouvons classer les groupements végétaux de la zone d'étude en trois classes selon la classification de ROOSE (1977) :

- couvert végétal permanent : le couvert forestier (matorral clair arboré : faciès à *Tetraclinis articulata* et *Oleo lentisque* ; matorral dense arboré : faciès à *Tetraclinis articulata* ; matorral clair arboré : faciès à *Tetraclinis articulata* et *Quercus ilex*) les reboisements forestiers, les ripisylves (*Tamarix*), les cultures pérennes irriguées, les plantations viticoles et arboriculture fruitière.
- couvert végétal temporaire : les cultures annuelles (céréales, agriculture extensive et semi-intensive) et les terres labourables.
- couvert végétal incomplet : les pâturages et sols nus.

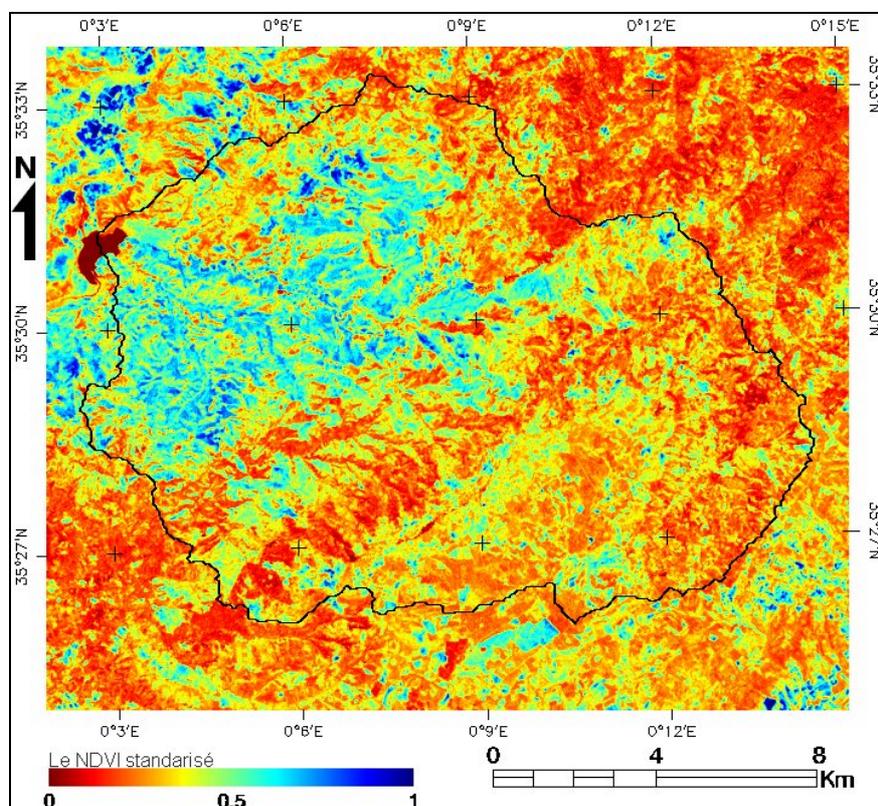


Figure 4. Carte de l'indice de végétation normalisé.

L'occupation actuelle des sols montre une nette prédominance des parcours et des cultures annuelles et une faible extension des espaces boisés (tableau 1). Elle s'est traduite par une diminution de la végétation forestière comparée aux années précédentes et une extension des zones agricoles et du pâturage (BENEDER, 2008).

**Tableau 1.** Superficies et pourcentages des classes d'occupation du sol.

Occupation du sol	Degré de protection	Superficie (ha)	Pourcentage (%)
Sols nus	Non protecteur	1 462,81	11,92
Pâturages	Peu protecteur	4 678,53	38,37
Couvert végétal temporaire	Moyennement protecteur	3 109,16	25,51
Couvert végétal permanent	Fortement protecteur	2 949,50	24,20

### Estimation de la fraction d'évaporation

La modélisation de l'équation du bilan énergétique selon l'approche S-SEBI montre que les paramètres de surface issus du capteur satellitaire, à savoir l'albédo, l'indice de végétation et la température de surface conduisent à déterminer le flux de chaleur latente (LE) avec simplicité et rapidité.

Mais nous pouvons constater que c'est la température de surface qui est le paramètre le plus prépondérant dans l'estimation du flux de chaleur latente. En effet, elle est reliée indirectement au flux de chaleur latente par le biais de la fraction d'évaporation. Les autres paramètres de surface telle que le NDVI et l'albédo n'interviennent que dans un second ordre.

La température de surface varie selon les conditions du milieu avec une valeur moyenne pour les pixels secs supérieures à celle des pixels humides (tableau 2). Les valeurs supérieures correspondent à des pixels dont les sols nus sont dominants, tandis que les faibles valeurs sont associées aux plans d'eau ou à la végétation dense.

Le tableau 2 regroupe les valeurs moyennes des paramètres et des flux de surface selon que l'on se trouve dans des conditions très évaporantes (pixels humides) ou dans des conditions peu évaporantes (pixels secs). Nous pouvons remarquer que la résistance au transfert de chaleur pour les pixels secs reste faible, provoquant ainsi la libération de la chaleur sensible vers l'atmosphère. Ceci peut s'expliquer par les différences élevées entre les températures de surface et de l'air. En revanche, les pixels humides présentent les fortes valeurs de la résistance au transfert de chaleur, car l'énergie disponible à la surface est alors essentiellement utilisée dans l'évapotranspiration. Les résultats obtenus concordent avec les données d'autres travaux (BASTIAANSEN, 2000).

Les résultats présentés au tableau 3 résument la distribution spatiale des flux énergétiques de surface pour la région étudiée. Quand la densité de la végétation augmente nous observons une diminution du flux de chaleur sensible (H) et de chaleur conductif (Go), ce dernier ne représente que 0,16 du rayonnement net pour les surfaces forestières. Nos résultats sont en adéquation avec ceux réalisés dans la forêt méditerranéenne (DESBOIS & VIDAL, 1995).

Nous pouvons aussi remarquer que ce sont les plans d'eau et la végétation dense dans les lits d'oued qui contribuent avec une large proportion de leur énergie dans la fraction d'évaporation (EF = 0,7 à 0,9). Alors que la végétation forestière bien que dense montre une diminution de la fraction d'évaporation (EF = 0,58) à une période plutôt humide de l'année (printemps). Et la végétation claire bien que pérenne est plutôt modérément sèche (EF = 0,4) avec une importante partie de son énergie convertie en flux de chaleur sensible. Ceci peut s'expliquer par une végétation de type méditerranéen avec un couvert très ouvert et très dégradé par le surpâturage qui ne peut maintenir une humidité du sol suffisante malgré des pluies précédentes abondantes (11,4 mm le 25/05/2002) et une nature topographique et pédologique de la région qui favorise le ruissellement plutôt que l'infiltration (argile et marne).

**Tableau 2.** Paramètres et flux de surface instantanés au dessus des pixels secs et humides.

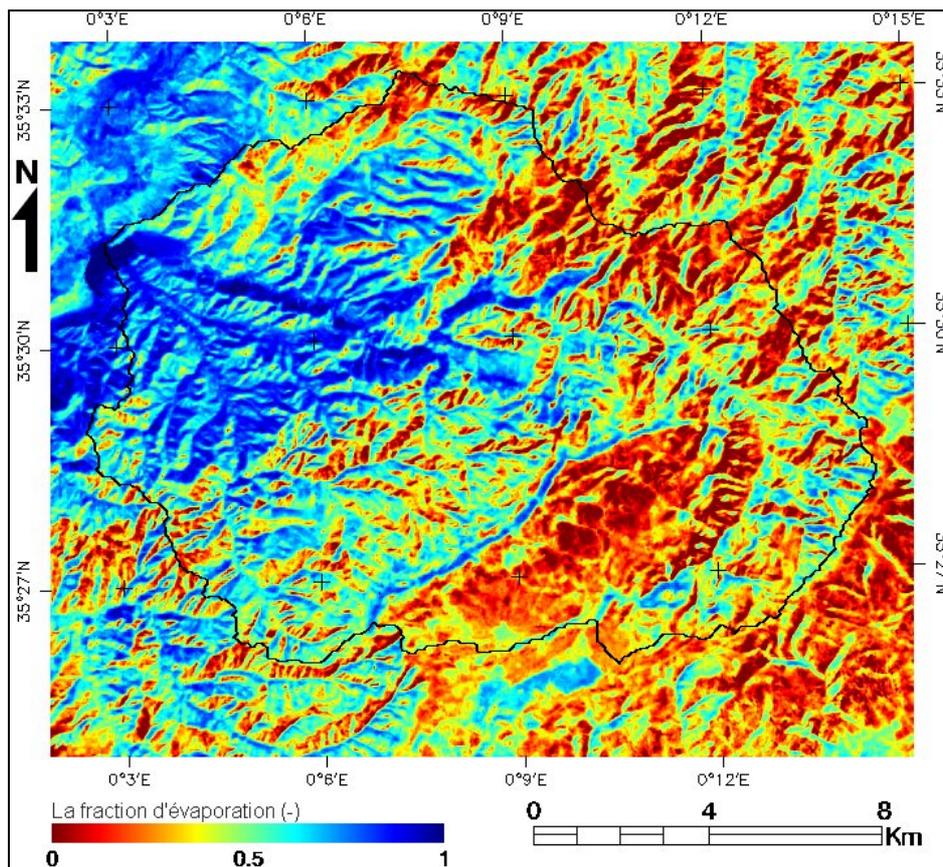
Paramètre	Unité	Modèle S-SEBI	
		Pixels secs	Pixels humides
NDVI	-	0,117	0,484
Albédo ( $T_0$ )	-	0,310	0,120
Emissivité	-	0,926	1,00
Température de surface ( $T_s$ )	K	325,9	300,8
Rayonnement net ( $R_n$ )	$W.m^{-2}$	597,6	713,5
Flux de chaleur dans le sol ( $G_o$ )	$W.m^{-2}$	140,9	57,4
Résistance à l'évaporation ( $r_s$ )	$s.m^{-1}$	729,3	0,0
Flux de chaleur sensible ( $H$ )	$W.m^{-2}$	466,6	0,0
Flux de chaleur latente ( $LE$ )	$W.m^{-2}$	0,0	656,1
Fraction d'évaporation ( $EF$ )	-	0,0	1,0
Différence entre la température de surface et la température de l'air	$^{\circ}C$	22,9	2,1

**Tableau 3.** Variation des valeurs moyennes des flux énergétiques de surface en fonction de l'occupation du sol.

Occupation du sol	$R_n$ ( $W.m^{-2}$ )	$G_o$ ( $W.m^{-2}$ )	$H$ ( $W.m^{-2}$ )	$LE$ ( $W.m^{-2}$ )	$EF$ (-)
Plan d'eau	745,91	64,48	23,17	658,25	0,96
Végétation permanente très dense	650,09	92,78	164,15	393,15	0,71
Végétation permanente dense	636,57	105,41	222,82	308,33	0,58
Végétation temporaire claire	618,56	115,91	279,67	222,97	0,44
Sol nu et urbain	583,18	119,61	296,86	166,69	0,36

La dominance de ces zones moyennement sèches est nettement observée sur la distribution de la fraction d'évapotranspiration dans la zone d'étude (figure 5). Les résultats obtenus montrent bien une faible fraction d'évaporation et une diminution du flux de chaleur latente dans le milieu naturel temporaire plus clair qui représente la majeure partie de la zone d'étude. Ceci a une conséquence directe sur l'humidité du sol et sur l'assèchement de la végétation qui sera plus marqué en période estivale (PROSPERT-LAGET, 1998).

Les résultats montrent clairement, dans cette zone d'étude, une faible fraction d'évaporation et une diminution du flux de chaleur latente dans les milieux forestiers. Cela pourrait avoir un impact direct sur l'humidité du sol et l'assèchement de la végétation, qui sera plus prononcé en été (PROSPERT-LAGET, 1998). La zone d'étude est marquée par une dominance des surfaces modérément sèches ( $0,3 < EF < 0,5$ ) accusant un déficit hydrique.



**Figure 5.** Carte de l'indice de la fraction d'évaporation (EF).

L'approche utilisée permet une bonne différenciation des zones à haut potentiel hydrique et celle souffrant d'un stress hydrique à l'échelle régionale. Mais les valeurs de la fraction d'évaporation ainsi estimées sont à considérer avec précaution et n'ont qu'une valeur relative, car il n'existe pas de méthode de validation à des échelles d'espace aussi larges. Cependant, l'originalité de S-SEBI, quant à la détermination de la température de l'air, a donné des estimations relativement réalistes, ce qui constitue un point très positif pour valider les résultats obtenus (SOUIDI *et al.*, 2009 ; SOUIDI & HAMIMED, 2010).

Ces résultats représentent l'estimation de la fraction d'évaporation instantanée, les simulations se réfèrent à un seul instant pris à 10h30 de l'image Landsat ETM+. À midi, il est un bon indicateur de l'état de l'installation de l'eau. La fraction de l'évapotranspiration (EF) est considérée comme constante durant la journée (KUSTAS *et al.*, 1994 ; CRAGO, 1996).

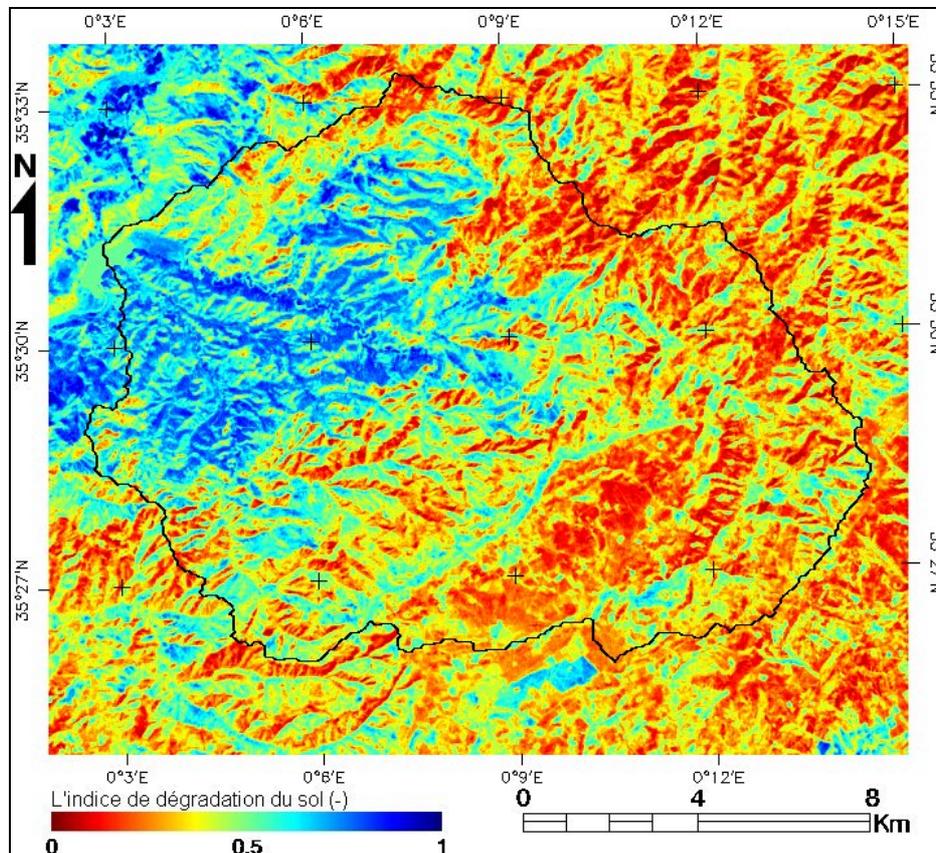
### Estimation de l'indice de la dégradation des sols

La combinaison des deux indicateurs de surface nous a permis de dresser une carte de l'indice de dégradation du sol (figure 6).

La synthèse de l'ensemble des informations dans un SIG, ainsi que leurs confrontations avec les données géomorphologiques et l'occupation du sol, ont permis de classer la sensibilité à l'érosion hydrique (figure 6) selon cinq degrés :

- risque nul avec une végétation très dense (IDS<0,2),
- risque faible avec une végétation dense (0,2≤IDS<0,4),
- risque moyen une végétation en état critique (0,4≤IDS<0,6),
- risque élevé avec une végétation en état dégradé (0,6≤IDS<0,8),
- risque très élevé avec une végétation en état très dégradé (IDS≥0,8),

Les zones en état dégradé et très dégradé couvrent 34 % de la superficie du bassin versant contre 42 % des terres à couvert végétal dense ou très dense. Le reste (24 %) étant en état critique. La végétation s'avère le premier facteur liée à la dégradation des terres. Nos résultats sont en conformité avec d'autres études dans la région (BOUCHETATA & BOUCHETATA, 2006).



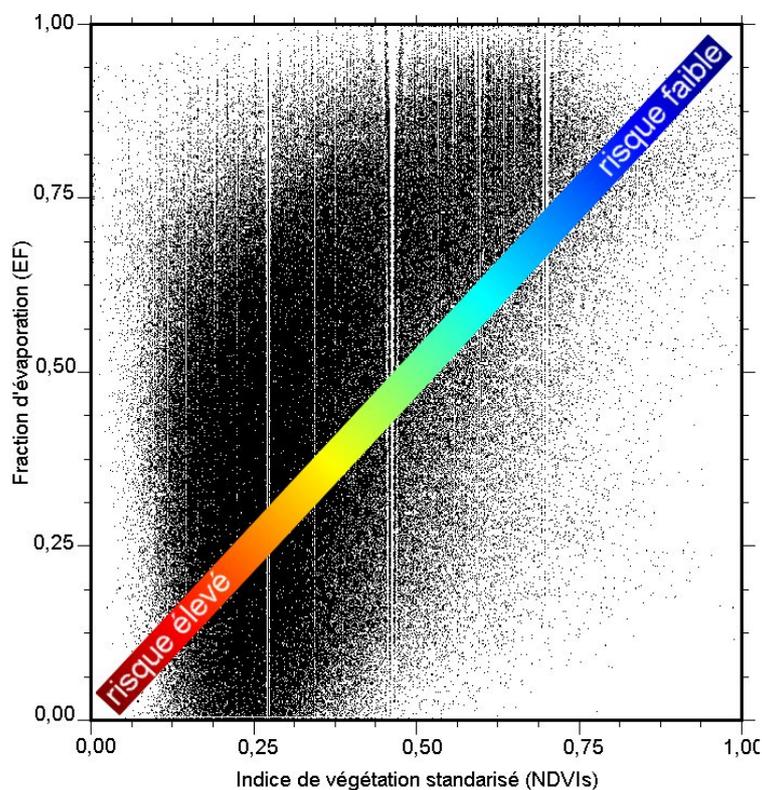
**Figure 6.** Carte de l'indice de dégradation des sols (IDS)

La confrontation des zones à risque de dégradation du sol avec les caractéristiques physiques du milieu montre une réelle concordance des zones à fort risque avec une nature lithologique friable et érodable et des pentes fortes. Alors que les zones à risque plus faible correspondent aux terrains couverts par la végétation (tableau 4).

La figure 7 montre le diagramme de dispersion pour les NDVIS et NEFS pour la zone d'étude permettant d'évaluer la dégradation des terres. En concordance avec l'hypothèse de départ (figure 3), les pixels situés en haut de l'axe des y et à droite de l'axe des x ont des valeurs maximales pour les deux indicateurs qui devraient présenter un risque faible de dégradation des terres (couverture forestière dense et sol profond) ainsi les deux indicateurs détectent des signes de stabilité. A l'opposé, les pixels situés en bas de l'axe des y et à gauche de l'axe des x ont des valeurs minimales pour les deux indicateurs et ils devraient présenter un risque élevé de dégradation des terres (par exemple, l'utilisation des terres induit un changement de la couverture sol qui se situe à la limite de sa capacité ou un incendie qui détruit l'écosystème forestier) les deux indicateurs permettent de détecter des signes de dégradation du sol.

**Tableau 4.** Variation de l'IDS suivant les caractéristiques du milieu physique dans la zone étudiée.

Variation de l'IDS	Caractéristiques du milieu physique		
	Pente (%)	Lithologie	Occupation du sol
$0,6 \leq \text{IDS} < 0,8$	12,5-25 25-50	Marnes et argiles marneuses	Pâturage
$0,6 \leq \text{IDS} < 0,8$	12,5-25 25-50	Marne indurée du Crétacé	Pâturage
$\text{IDS} < 0,2$	12,5-25 25-50	Marne indurée du Crétacé	Matorral dense arboré
$0,2 \leq \text{IDS} < 0,4$	25-50	Marnes et argiles marneuses	Matorral clair arboré
$0,4 \leq \text{IDS} < 0,6$	12,5-25 25-50	Marnes et argiles marneuses	Pâturage
$0,6 \leq \text{IDS} < 0,8$	12,5-25	Marne indurée du Crétacé	Sol nu
$\text{IDS} \geq 0,8$	25-50	Marnes et argiles marneuses	Sol nu
$0,6 \leq \text{IDS} < 0,8$	12,5-25	Marnes et argiles marneuses	Sol nu
$0,4 \leq \text{IDS} < 0,6$	12,5-25 25-50	Marne indurée du Crétacé et alluvions	Pâturage
$0,4 \leq \text{IDS} < 0,6$	12,5-25	Marne indurée du Crétacé	Pâturage



**Figure 7.** Nuage de points de NDVIS (NDVI standardisé) par rapport EFS (Fraction d'évaporation standardisée) pour tous les pixels dans la zone d'étude (la diagonale représente le sens du risque de la dégradation du sol).

Les deux indicateurs, EFS et NDVIS, fournissent des informations complémentaires sur l'état des terres. En général, plus la dégradation de la végétation est importante, plus on assiste à la diminution de NDVIS et de NEFS. On observe (figure 7) un gradient de la dégradation du sol (diagonale) depuis les sites non perturbés (faible risque de dégradation) vers les sites perturbés (risque élevé de dégradation), au cours duquel le NDVIS et NEFS diminuent. En général, les NDVIS et EFS supérieurs à 1 sont associés aux vergers irrigués, les ripisylves et à une couverture forestière dense. NDVIS et EFS en dessous de 0 sont associés à des sites altérés par l'homme sans végétation, tels que les pistes ou les sols nus (surpâturage). Dans de tels sites, on constate un albédo élevé avec une ventilation difficile de la vapeur d'eau. Bien qu'il existe une tendance générale à la diminution de NEFS et de NDVIS, on constate une dispersion considérable (figure 7). Leur relation dépend de nombreux facteurs qui influent sur l'évapotranspiration réelle journalière et le NDVI qui n'a pas été évalué dans ce travail, comme la réserve en eau du sol, les capacités d'utilisation de l'eau par la végétation, la rugosité aérodynamique, et la distribution spatiale de la végétation dans le pixel, entre autres.

Cette étude se limite à une méthodologie qui permettrait d'identifier les sites perturbés qui pourraient présenter un risque de dégradation des terres. Ce travail ne permet pas d'identifier les causes de ces troubles ou de comprendre le dysfonctionnement de ces écosystèmes et si le risque de dégradation est irréversible (désertification), cela nécessiterait des analyses à long terme (PARUELO *et al.*, 2000). Néanmoins, la méthodologie proposée, si elle est incluse dans un système de surveillance à long terme pourrait contribuer à la gestion de la dégradation des terres.

## DISCUSSION ET CONCLUSION.

Les résultats exposés dans ce travail confirment les possibilités offertes par la télédétection pour résoudre l'équation du bilan d'énergie à partir d'une méthode très simplifiée. Nous pouvons donc conclure à partir de ces observations que la fraction d'évaporation et le flux de chaleur latente sont des indicateurs simples et directs pour un suivi des conditions de sécheresse des milieux naturels. Mais les valeurs ainsi estimées ne peuvent pas être considérées comme très précises par rapport aux données ponctuelles. Toutefois, l'application de cette méthode permet de situer les valeurs obtenues dans des intervalles très peu éloignés de la réalité.

L'approche S-SEBI apparaît donc assez indiquée pour une réelle exploitation des données satellitaires pour l'estimation d'un certain nombre de paramètres à l'interface sol-plante-atmosphère, pour apprécier le degré du stress hydrique et bien différencier les zones sèches des zones humides. Ces paramètres ont l'avantage d'être spatialisés et d'offrir une couverture spatio-temporelle satisfaisante.

Cette nouvelle approche pourrait avoir un impact important dans l'avenir pour la gestion des écosystèmes forestiers. Elle constituerait ainsi un outil extrêmement pertinent et prometteur pour la cartographie de la couverture de surface et la caractérisation des écosystèmes terrestres dans les régions où les données terrain sont rares et difficilement accessibles.

L'objectif général de cette étude était d'analyser la dynamique érosive du bassin versant de Fergoug, un écosystème fragilisé caractérisé par un substrat tendre, un climat semi aride, et une couverture végétale variée. Ce site a été utilisé comme zone d'étude pour évaluer de nouvelles techniques de surveillance de l'environnement. L'analyse dans le cadre de cette recherche a utilisé deux variables biophysiques dérivées du satellite Landsat ETM+, à savoir NDVI et EF, qui a été mis en œuvre en trois étapes: (1) l'analyse de chaque variable séparément; (2) l'analyse typologique des deux variables dans l'espace EF- NDVI; et (3) l'estimation de l'indice de dégradation du sol.

Les valeurs de NDVI ont été estimées avec succès pour étudier l'écosystème du point de vue biologique. Alors que la zone de montagne (Béni Chougrane) présente une couverture végétale relativement faible et une topographie très accidentée (zone d'ombre). Dans la mesure où la phénologie joue un rôle important dans l'analyse de la couverture végétale, les dates des images satellites employées pour évaluer ce paramètre biologique doivent être sélectionnées très soigneusement. Il est aussi important de noter qu'en cas de périodes prolongées de présence de nuages, les valeurs de NDVI ont tendance à diminuer, donnant une fausse impression d'état de sécheresse. En matière de traitement des images, il convient de s'appliquer à éliminer les nuages, les

ombres projetées par les nuages, les ombres créées par la topographie (particulièrement dans les zones de montagnes).

Les modèles d'estimation de la fraction d'évaporation peuvent également être améliorés. Au fur et à mesure que les estimations de la fraction d'évaporation dans les écosystèmes terrestres et les zones de montagne s'affineront, la méthode se révélera plus représentative du changement. Il faudrait prêter attention à d'autres aspects tels que les changements climatiques ayant un impact majeur sur la vigueur de la végétation. Par exemple, les années «humides» conduiront à une augmentation du NDVI, tandis que les années «sèches» généreront de très faibles valeurs de l'indicateur de changement. Malgré les limites inhérentes à l'imagerie satellitaire, notamment la résolution des images, et les limites pour l'estimation de la fraction d'évaporation par les modèles du bilan d'énergie, le modèle S-SEBI reste très satisfaisant (SOUIDI *et al.*, 2009). Il existe aussi des limites à l'utilisation du NDVI comme mesure de la dégradation des sols, mais on constate aussi des potentialités.

Les images générées par le capteur Landsat ETM+ conviennent à l'analyse des perturbations résultant de la dégradation, lorsque l'impact a été suffisamment important pour se refléter dans la radiométrie, et donc dans le NDVI. Le NDVI a un comportement anticipé et peut par conséquent être utilisé comme indicateur de la dégradation. La fraction d'évaporation s'avère être un paramètre tout aussi important pour la définition du fonctionnement de l'écosystème le long de l'année car elle est caractérisée par une tendance saisonnière normale : des valeurs minimales durant la saison sèche et des valeurs maximales durant la période des pluies.

L'utilité de la combinaison du NDVI et EF a été démontrée. Parce que les deux variables de surface suivent un phénomène identique, leur union a été prouvée pour augmenter la connaissance sur les dynamiques environnementales (GARCIA *et al.*, 2008). Relier les deux variables, l'une par rapport à l'autre, permet dans le même diagramme de distinguer des conditions de perturbation ou au contraire de haute potentialité écologique. On se retrouve pour l'une dans des conditions similaires à celle d'un processus de désertification, tandis que l'autre est semblable à celle d'un processus de réhabilitation. L'écosystème semi-aride présente une variabilité dans l'espace EF-NDVI le long des deux axes EF et NDVI. Cependant dans notre cas, étant donné que nous n'avons utilisé qu'une seule image, il sera par conséquent principalement sensible aux variations de la couverture végétale plutôt qu'aux variations saisonnières des facteurs climatiques.

L'analyse typologique a été appliquée pour suivre le risque de dégradation du sol. Il ressort que dans l'écosystème naturel deux zones reliées à la dynamique écologique annuelle peuvent être distinguées : la végétation temporaire et la végétation permanente. La principale caractéristique de l'écosystème terrestre est sa variabilité relativement élevée, surtout du point de vue biologique. Finalement, l'estimation de l'indice de dégradation du sol donne une bonne appréciation du risque de dégradation des terres et principalement du risque d'érosion hydrique dans notre zone d'étude (BOUCHETATA & BOUCHETATA, 2006).

La méthode proposée utilise à la fois un indicateur biologique (NDVI) et un indicateur du fonctionnement de l'écosystème (EF) pour estimer le risque de dégradation du sol. Ces paramètres ont été jugés en accord avec ceux obtenus à partir de mesures sur le terrain et d'autres auteurs (BOUCHETATA & BOUCHETATA, 2006). Avec quelques restrictions décrites, cette méthode pourrait être utilisée de manière multi-temporelle et continue pour identifier les zones soumises à un stress hydrique important et une absence de végétation qui pourraient faire l'objet de protection ou de surveillance à long terme afin d'assurer une conservation des sols plus efficace. Cependant, une des limites de la méthode proposée est que la région d'étude doit contenir obligatoirement une zone extrêmement sèche et une zone extrêmement humide pour l'utilisation du modèle tel que S-SEBI. Une autre limitation réside aussi dans la présence probable de nuages dans les images au cours de la période des pluies. Une plus longue série chronologique de données numériques et d'autres investigations notamment sur les modèles de l'estimation de la fraction d'évaporation sont nécessaires pour vérifier la méthode proposée.

## REMERCIEMENTS

Ce travail s'inscrit dans le cadre du programme régional ENVI-Med. Les auteurs tiennent à remercier l'ensemble des organismes de pilotage et de financement.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ARABI, M., 1991. Influence de quatre systèmes de production sur le ruissellement et l'érosion en milieu montagnard méditerranéen Médéa Algérie. Thèse Doctorat, université de Grenoble, 272 p.
- ARABI, M. & ROOSE, E., 1989. Influence de quatre systèmes de production de moyenne montagne méditerranéenne algérienne. *Bull. Réseau Erosion*, 9: 39-51.
- BARET, F. & GUYOT, G., 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, 35: 161-173
- BASTIAANSEN W.G.M., 2000. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 229: 87-100.
- BASTIAANSEN W. G. M., M. MENENTI, R. A. FEDDES & A. A. M.HOLTSLAG, 1998. Remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 213:198-212.
- BENCHETRIT, M., 1972. L'érosion actuelle et ses conséquences sur l'aménagement en Algérie. Paris : PUF, 216 p.
- BENEDER (Bureau d'étude National d'Etudes pour le développement Rural), 2008. Etude d'inventaire forestier national. Rapport sur la caractérisation des formations forestières, wilaya de Mascara, 11p.
- BOER, M.M. & PUIGDEFABREGAS, J., 2003. Predicting potential vegetation index values as a reference for the assessment and monitoring of dryland condition. *International Journal of Remote Sensing*, 24: 1135-1141.
- BOER, M.M. & PUIGDEFABREGAS, J., 2005. Assessment of dryland condition using spatial anomalies of vegetation index values. *International Journal of Remote Sensing*, 26: 4045-4065.
- 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*, 9 (3) : 185-192.
- BOU KHEIR, R., CERDAN, O. & ABDALLAH, C., 2006. Regional soil erosion risk mapping in Lebanon. *Geomorphology*, 82 : 347-359
- BOU KHEIR, R., GIRARD, M.-C., KHAWLIE, M. & ABDALLAH, C., 2001. Érosion hydrique des sols dans les milieux méditerranéens : une revue bibliographique. *Étude et gestion des sols*, 8 (4) : 231-245.
- BOUCHETATA, A. & BOUCHETATA, T., 2006. Propositions d'aménagement du sous-bassin-versant de l'oued Fergoug (Algérie) fragilisé par des épisodes de sécheresse et soumis à l'érosion hydrique. *Sécheresse*, 17 : 415-24.
- BRUTSAERT, W., 1982. Evaporation into the atmosphere, D. Reidel Publishing Company, 299 p.
- 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.
- CRAGO, R.D., 1996. Conservation and variability of the evaporative fraction during the daytime. *Journal of Hydrology*, 180 : 173-194.
- DEMAK, A., 1982. Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale. Thèse de docteur-ingénieur, Paris VI, 323 p.
- DESBOIS, N. & VIDAL, A., 1995 . La télédétection dans la prévision des incendies de forêts. *Ingénieries-EAT*, 1 : 21-29.
- DOLMAN, A. J., GASH, J. H. C., GOUTORBE, J. P., KERR, Y., LEBEL, T., PRINCE, S. D. & STRICKER, J. N. M., 1997. The role of the land surface in Sahelian climate: HAPEX-Sahel results and future research needs. *Journal of Hydrology*, 189: 1067-1079.
- DUFFIE, J.A. & BECKMAN, W.A., 1991. Solar Engineering of Thermal Processes. Edition 2, Wiley - Interscience, New York, 944p.
- FIDA, 1991. Fonds International de Développement Agricole, Projet pilote de développement des monts de Béni-Chougrane. Exploitation et conservation des ressources naturelles. Rapport final, 54 p.
- GAO, B. C., 1996. NDWI-A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 5: 257-266.
- GARCÍA, M., OYONARTE, C., VILLAGARCÍA, L., CONTRERAS, S., DOMINGO, F. & PUIGDEFABREGAS, J., 2008. Monitoring land degradation risk using ASTER data: The non-evaporative fraction as an indicator of ecosystem function. *Remote Sensing of Environment*, 112 : 3720-3736.
- GHAZI, A. & LAHOUATI, R., 1997. Algérie 2010, sols et ressources biologiques. Alger : Institut national des études de stratégie globale (INESG), 39 p.
- GUYOT, G., 1996. Agriculture et statistiques agricoles, in Précis de télédétection: Tome 2, Applications thématiques, edited by F. Bonn (Sainte Foy (Québec)) : Presses de l'université de Québec, 269-316 p.
- HADDOUCHE, I., BENHANIFIA, K. & GACEMI, M., 2011. Analyse spatiale de la régénération forestière post-incendie de la forêt de Fergoug à Mascara, Algérie. *Bois et forêts des tropiques*, 307 : 23-31.

- HAMIMED, A., MEDERBAL, K. & KHALDI, A., 2001. Utilisation des données satellitaires TM de Landsat pour le suivi de l'état hydrique d'un couvet végétal dans les conditions semi-arides en Algérie. *Télédétection*, 2 : 29-38.
- HEDDADJ, D., 1997. La lutte contre l'érosion en Algérie. *Bull Réseau Erosion*, 17 : 168-75.
- HIERNAUX, P. & JUSTICE, C. O., 1986. Suivi du développement végétal au cours de l'été 1984 dans le Sahel malien. *Int. J. Remote Sensing*, 7: 1515-1531.
- HOLM, A., M., CRIDLAND, S., W. & RODERICK, M., L., 2003. The use of time-integrated NOAA NDVI data and rainfall to assess landscape degradation in the arid shrubland of Western Australia. *Remote Sensing of Environment*, 85: 145-158
- KUSTAS, W. P. & NORMAN, J. M., 1996. Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces. *Hydrological Sciences Journal - Journal des Sciences Hydrologiques*, 41: 495-516.
- KUSTAS W.P., PERRY E.M., DORAISWAMY P.C. & MORAN M.S. 1994. Using satellite remote sensing to extrapolate evapotranspiration estimates in time and space over a semiarid rangeland basin. *Remote sensing of environment*, 4: 275-286.
- LE HOUEROU, H. N., 1996. Climate change, drought and desertification. *Journal of Arid Environments*, 34: 133-185.
- 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*, 45: 457-465.
- LUDWIG, J. A. & TONGWAY, D. J., 2000. Viewing rangelands as landscape systems. In O. Arnalds, & S. Archer (Eds.), *Rangeland Desertification*. Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 39-52.
- MADR, 2011. Rapport du Ministère de l'Agriculture et du Développement rural. 85p.
- MILDREXLER, D. J., ZHAO, M. S., HEINSCH, F. A. & RUNNING, S.W., 2007. A new satellite-based methodology for continental-scale disturbance detection. *Ecological Applications*, 17 : 235-250.
- MONNIER, G., BOIFFIN, J. & PAPY, F., 1986. Réflexions sur l'érosion hydrique en conditions climatiques et topographiques modérées : cas des systèmes de grande culture de l'Europe de l'Ouest. *Cah ORSTOM, Sér Pédol.*, 22 : 123-31.
- ONS, 2006. Office National des Statistiques, bilan de 2006.
- PARUELO, J. M., SALA, O. E. & BELTRAN, A. B., 2000. Long-term dynamics of water and carbon in semi-arid ecosystems: a gradient analysis in the Patagonian steppe. *Plant Ecology*, 150: 133-143.
- PEÑUELAS, J., FILELLA, I., BIEL, C., SERRANO, L. & SAVÉ, R., 1993. The reflectance at the 950-970 nm region as an indicator of plant water status", *International Journal of Remote Sensing*, 14: 1887-1905.
- PLATEAU, H., 1976. La défense et la restauration des sols du Maroc. *Rev. Forestière Française (Paris)*, 28 : 231-8.
- PROSPERT-LAGET, V., 1998. A Satellite Index of Risk of Forest Fire Occurrence in Summer in the Mediterranean Area. *The International Journal of Wildland Fire*, 8 (4) : 173-182.
- PUECH, C., 1993. Détermination des états de surface par télédétection pour caractériser les écoulements des petits bassins versants. Thèse de doctorat, Université J.Fourier, 202p.
- PUIGDEFABREGAS, J. & MENDIZABAL, T., 1998. Perspectives on desertification: western Mediterranean. *Journal of Arid Environments*, 39: 209-224.
- RAHMAN, H. & DEDIEU, G., 1994. SMAC: a simplified method for the atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum. *International Journal of Remote Sensing*, 15 : 123-143.
- RAMADE, F., 1993. Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement, Edisciences International, Paris, 822 p.
- REYNOLDS, J.F., SMITH, D.M.S., LAMBIN, E.F., TURNER, B.L., MORTIMORE, M., BATTERBURY, S.P.J., DOWNING, T.E., DOWLATABADI, H., FERNANDEZ, R.J., HERRICK, J.E., HUBER-SANNWALD, E., JIANG, H., LEEMANS, R., LYNAM, T., MAESTRE, F.T., AYARZA, M. & WALKER, B., 2007. Global desertification: building a science for dryland development. *Science* 316: 847-851.
- ROERINK, G.J., SU, B. & MENENTI, M., 2000. S-SEBI A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. *Physics and chemistry of the Earth*, 25: 147-157.
- ROOSE, E., 1977. Érosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest : vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales. *Travaux et Documents*, éditions ORSTOM, n° 78 : 230 p.
- ROOSE, E., ARABI, M., BRAHMIA, K., CHEBANI, R., MAZOUR, M. & MORSLI, B., 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*, 28: 289-308.
- ROOSE, E., CHEBBANI, R. & BOUROUGAA, L., 2000. Ravinement en Algérie : typologie, facteurs de contrôle, quantification et réhabilitation. *Sécheresse*, 11: 317-326.

- ROOSE, E., SABIR, M. & DE NONI, G., 2002. Techniques traditionnelles de GCES en milieu méditerranéen. *Bull. Réseau Erosion*, 21 : 524 p.
- ROUSE, J. W., HAAS, R. H., SCHELL, J. A., DEERING, D. W. & HARLAN, J. C., 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Green wave effect) of natural vegetation», NASA / GSFCT Type III Final Report, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, 371p.
- ROY, B. & BOUYOUSSOU, D., 1993. Méthodes multicritères d'aide à la décision. Economica, Paris, 423 p.
- SARI, D., 1977. L'homme et l'érosion dans l'Ouarsenis (Algérie). Thèse doctorat. Alger : éditions SNED, 621 p.
- SHRIMALIL, S.S., AGGARWALZ, S.P. & 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*, 3: 54-60.
- SOUIDI, Z., 2001. Application de la télédétection et des SIG pour l'aménagement des terres de montagne : cas des monts de Béni-Chougrane (Mascara). Thèse magister en science forestière, Faculté des sciences, Université de Tlemcen, 169 p.
- SOUIDI, Z. & HAMIMED, A., 2010. Evapotranspiration forestière : Estimation de l'évapotranspiration réelle d'un couvert forestier à partir des données de télédétection. Editions Universitaires Européennes, 208 p.
- SOUIDI Z., HAMIMED, A., MEDERBAL, K. & FREDERIC, D., 2009. Mapping latent heat flux in the western forest covered regions of Algeria using remote sensing data and a spatialized model. *Remote Sensing*, 1: 795-817
- TUCKER, C. J., HOLBEN, B. N., ELGIN, JR., J. H. & MCMURTREY, J. E., 1981. Remote sensing of total dry-matter accumulation in winter wheat. *Remote Sensing Environ*, 11: 171-189.
- UNCCD, 1996. United Nations Convention to Combat Desertification in Those Countries Experiencing Serious Drought and/or Desertification, Particularly in Africa. U.N.Doc., A/AC.241/27, 71 p.
- VITA-FINZI C., 1969. The mediterranean valleys : geological changes in historical times. Cambridge : CUP. 143 p.
- WACHAL, D.J. & HUDAK, P.F., 2000. Mapping landslide susceptibility in Travis Country, Texas, USA. *GeoJournal*, (51) : 245-253.
- WESSELS, K. J., PRINCE, S. D., FROST, P.E. & VAN ZYL, D., 2004. Assessing the effects of humaninduced land degradation in the former homelands of northern South Africa with a 1 km AVHRR NDVI time-series. *Remote Sensing of Environment*, 91: 47-67.
- ZARCO-TEJADA, P. J., RUEDA, C. A. & USTIN, S. L., 2003. Water content estimation in vegetation with MODIS reflectance data and model inversion methods", *Remote Sensing of Environment*, 85: 109-124.