

Cartographie par arbre de décision de la dynamique de l'occupation du sol du bassin versant du Bouregreg, en région semi-aride au centre Nord-Ouest du Maroc

*TRA BI Zamblé Armand¹, EMRAN Anas², BROU Yao Téséphore³, MAHE Gil⁴

(1) *Université Alassane Ouattara, Département de Géographie, 01 BPV 18 Bouaké 01 (Côte d'Ivoire)*

(2) *Université Mohammed V-Agdal, Avenue Ibn Battouta BP 703 Rabat-Agdal (Maroc)*

(3) *Université de la Réunion, (France)*

(4) *Institut de la Recherche pour le Développement (IRD), (France)*

* *Auteur pour correspondance : zambtra@yahoo.fr*

Article reçu le 30 avril 2014 et accepté le 06 octobre 2014

Résumé

La cartographie de l'occupation du sol par télédétection à haute résolution spatiale des espaces semi-arides hétérogènes (reliefs souvent contrastés, activités agricoles réalisées sur de petites surfaces) est un exercice délicat. La complexité est également justifiée par l'effet important des sols sur la radiométrie des objets, principalement de la végétation. Le bassin versant du Bouregreg, situé au centre Nord-Ouest du Maroc est un exemple de ce type d'espace. Les études de l'évolution de l'occupation du sol dans le bassin versant du Bouregreg à partir de la télédétection à haute résolution spatiale n'ont jamais utilisé de méthode de classification d'images par arbre de décision. Les méthodes couramment utilisées, notamment le maximum de vraisemblance, présentent de bons résultats. Mais ces dernières méthodes restent insuffisantes pour cartographier les espaces à végétation éparse en région semi-aride. Les confusions de classes sol-végétation restent non négligeables. Ce constat principal sous-tend l'intérêt d'explorer d'autres méthodes de classification d'image peu utilisées sur cette zone, en l'occurrence la classification par arbre de décision, pour discriminer certains objets. La classification par arbre de décision est une classification qui permet de prendre des décisions en plusieurs étapes pour mettre en relief une classe particulière d'objet, selon le comportement spectral d'une bande ou d'une transformation en néocanaux. Ainsi, en plus de jouer sur les caractéristiques des bandes des images, d'autres images (le Modèle Numérique de Terrain) et indices (l'indice SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index)) sont exploitées dans cette classification. Des images de Landsat de 1985, 2000 et 2010 ont été ainsi exploitées pour mettre en relief la dynamique de changement de l'occupation du sol du bassin du Bouregreg. Il en résulte une meilleure séparabilité des classes de végétation, notamment les types de cultures, le verger et les forêts. Cette classification par arbre de décision a également permis de constater une augmentation de la dénudation des sols (15000 ha de sols nus en 1985, 28000 ha en 2000 et 36000 ha en 2010), une réduction quantitative et qualitative des surfaces forestières (333000 ha de forêt en 1985, 295000 ha en 2000 et 274000 ha en 2010), inversement à une augmentation des superficies céréaliers (58000 ha de blé en 1985, 137000 ha en 2000 et 207000 ha en 2010).

Abstract

Mapping land cover by high spatial resolution remote sensing of heterogeneous semi-arid areas (relief often contrasted; agricultural activities on small surfaces) is delicate exercise. The complexity is also justified by the significant effect of soil on object radiometry, mainly vegetation. Bouregreg watershed, located in central northwest of Morocco is an example of this type of spaces. Commonly used methods, including maximum likelihood, have good results. But these methods are still inadequate to map sparse vegetation in semi-arid region; confusions of soil-vegetation classes remain significant. The main finding underlies the interest to explore image classification methods used on this area slightly, in this case the classification by decision tree to discriminate certain objects. Classification by decision tree is a method that allows making decision in stages to highlight a particular class of object, according to the spectral behavior of a band or a transformation into new images. Thus, in addition to playing on the images band characteristics, other images (the Digital Elevation Model) and indices (SAVI index (Soil Adjusted Vegetation Index)) are used in this classification. Landsat images from 1985, 2000 and 2010 were well used to highlight the dynamics of change in the land use of the Bouregreg watershed. This results in a better separability of vegetation class, including crops, orchards and forests. This classification by decision tree has also found an increase in soil denudation (15,000 ha of bare soil in 1985; 28,000 ha in 2000 and 36,000 ha in 2010). A quantitative and qualitative reduction of forested areas (333,000 ha of forest in 1985; 295,000 ha in 2000 and 274,000 ha in 2010), conversely an increase in cereal area (58,000 ha of wheat in 1985; 137,000 ha in 2000 and 207,000 ha in 2010).

Keywords : *Bouregreg, Morocco, Landsat, Decision tree, Land cover.*

Mots clés : *Bouregreg, Maroc, Landsat, Arbre de décision, occupation sol.*

Introduction

La cartographie de la dynamique de l'occupation du sol, dans les régions semi-arides aux reliefs contrastés comme le Maroc, s'avère délicate à partir d'images de haute résolution spatiale, notamment les images Landsat. La quasi-totalité des études de télédétection de la zone semi-aride marocaine s'appuie, soit sur des méthodes de classification d'images par maximum de vraisemblance, lorsqu'il s'agit d'analyser le changement dans l'occupation du sol (Houssa et al., 1998 ; Hakdaoui et Rahimi, 2006 ; Brou et al., 2013), soit sur des méthodes de classification par divergence ou déconvolution spectrale, soit encore elles se basent sur l'utilisation d'indices dans un espace bidimensionnel pour les études pédologiques ou géologiques (Girouard et al., 2004 ; Chikhaoui et al., 2005, Chikhaoui et al., 2007). Ces choix s'expliquent d'une part par la relative facilité d'utilisation de ces méthodes (maximum de vraisemblance), et d'autre part par le type d'étude (les méthodes de divergence spectrale sont les plus utilisées dans les études de géologie et de pédologie). La mise en relation des résultats de ces classifications avec les facteurs naturels et humains intervenant dans la dynamique de ces milieux (pente, exposition des versants, conditions hydriques des sols, occupation humaine de l'espace etc.) se fait ultérieurement à travers des Systèmes d'Information Géographique (SIG). La difficulté de ces méthodes usuelles de classification dans ces zones semi-arides est que les confusions de classe sont souvent importantes. C'est le cas, par exemple, lorsqu'il s'agit de séparer des espaces à très faible couverture végétale des espaces de sol nu, ou encore lorsque l'exposition des versants crée un contraste d'humidité des formations forestières prêtant souvent à confusion avec les espaces hydromorphes. El Garouani et al. (2008) préfèrent dans ce dernier cas de figure, par exemple, créer deux classes à l'intérieur des forêts, à savoir celles qui sont exposées au Sud et celles qui ne le sont pas, ce qui réduit la confusion (précision globale de classification de 86%).

Un des axes de recherche du 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) dans lequel s'inscrit cette recherche est d'analyser les changements de l'occupation du sol. Aussi, est-il apparu important d'exploiter avec une meilleure précision les images satellitaires en téléchargement libre afin de mieux comprendre la dynamique des transports solides dans le bassin versant du Bouregreg. Dans ce travail, la classification par arbre de décision d'images Landsat a été adoptée pour analyser la dynamique spatio-temporelle de l'occupation du sol dans ce bassin de 1985 à 2010 (ces bornes temporelles sont choisies par rapport à la disponibilité de données climatiques des stations météorologiques de la région, le climat étant un facteur explicatif important des changements d'occupation de sol). Il s'agit plus particulièrement de développer une méthodologie de classification adaptée à ces espaces semi-arides et qui soit en même temps un SIG. Cette méthodologie doit réduire le plus possible les confusions de classe (sol et végétation éparses, vergers-matorrals et forêts, zones humides et végétation sur versant orienté vers le nord), en tirant le maximum d'informations des caractéristiques des bandes des images Landsat et/ou par l'utilisation d'indice (SAVI), l'ensemble étant un SIG.

1. Présentation du bassin versant du Bouregreg

Le bassin versant du Bouregreg est situé dans le centre Nord-ouest du Maroc (*figure 1*). Il est localisé entre les parallèles 32°50 et 34°30 Nord et les méridiens 5° et 7° Ouest. D'une superficie de 9800 km², il est limité au nord et au nord-est par le bassin du Sebou, au sud et au sud-est par celui d'Oum Er-Rbia, à l'ouest et au nord-ouest par les bassins côtiers de Casablanca et l'Océan Atlantique.

Au niveau hydrologique, le bassin du Bouregreg est drainé par trois principales artères : l'oued Bou-Regreg, l'oued Grou et l'oued Koriffa. Le cadre hydrogéologique défavorable du bassin (existence très réduite de nappe souterraine liée à la présence de substrat imperméable d'âge primaire) fait que les ressources en eau de surface sont essentiellement utilisées pour l'alimentation en eau potable et pour la production hydroélectrique. Les surfaces irriguées sont très limitées, concentrées essentiellement dans la partie centrale du bassin sur 8850 hectares. Le bassin du Bouregreg demeure, au plan climatique, un espace privilégié au Maroc. Il se situe dans la partie humide du pays. C'est un bassin semi-aride où la pluviométrie évolue selon deux gradients : un gradient principal nord-sud et un gradient secondaire est-ouest. Les espaces Nord-est plus arrosés reçoivent des quantités de précipitation de plus de 700 mm par an contre moins de 300 mm dans le Sud. Ces précipitations sont souvent agressives sur cet espace dont la topographie est généralement faite de fortes pentes. Au niveau géomorphologique, les altitudes décroissent de plus de 1 500 mètres à 0 mètre d'Est en Ouest dans le bassin du Bouregreg (*Figure 1*). Ce cadre géomorphologique renferme des sols fragiles. Les conditions pédoclimatiques façonnent une végétation majoritairement sclérophylle. L'aval du bassin est marqué par l'existence de forêts dominées par des chênes lièges et quelques îlots de reboisement sur sable plus ou moins profond. Le centre et l'amont du bassin sont colonisés par une végétation claire à dense de chêne vert avec quelques îlots de chêne liège et de matorral.

Au niveau socio-économique, la céréaliculture du blé reste la principale activité agricole du bassin. Les conditions de végétation relativement favorables de ce bassin en font une zone de forte pression pastorale, surtout dans sa partie Est.

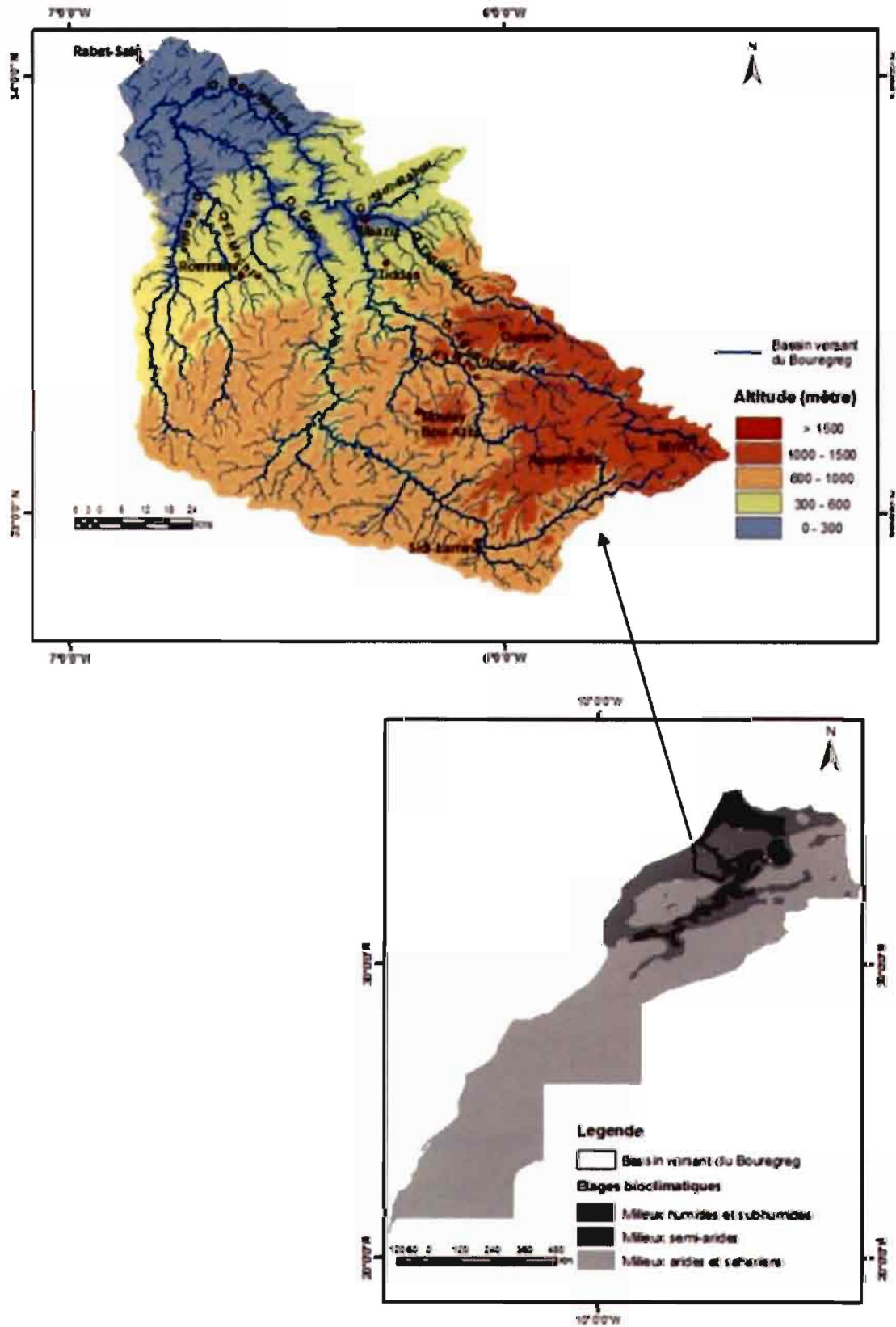


Figure 1 : Localisation du bassin versant du Bouregreg au Maroc

2. Données et méthodes

2.1. Données

Les données de base à classifier sont des images LANDSAT TM/ETM+ (en téléchargement libre) acquises au cours des années 1985, 2000 et 2010. Pour chaque année, une série d'images acquises au printemps et en été est utilisée. A titre d'exemple pour 2010, la base de données-d'images est constituée de :

- une image LANDSAT ETM+ (path/row : 201/37) de printemps (11 mars 2010). C'est l'image à classifier par arbre de décision;
- d'une image LANDSAT ETM+ (path/row : 201/37) d'été (1er juillet 2010) pour discriminer les formations forestières et le verger des autres types de couverture végétale. Cette scène est mosaïquée avec une autre scène du 26 septembre 2010 (LANDSAT TM, path/row : 202/36) qui, elle, couvre la partie aval du bassin versant du Bouregreg. Ce mosaïquage n'a pas été utile en 2000 où la scène d'été couvre l'ensemble du bassin;
- un MNT de haute résolution spatiale (30m x 30m) provenant du satellite Terra ASTER pour intégrer le relief à la classification ;
- une image binaire délimitant les localités du bassin. Cette image a été réalisée par numérisation de l'ACP 4 de l'image de Landsat.
- Une carte de végétation qui sert de référence pour délimiter les formations forestières. Cette carte a été réalisée par photo-interprétation par le Centre d'Etudes et de Recherches Géographiques (CERGEO) de l'Université Mohammed V. Une comparaison de cette carte de végétation avec une image googlemap a aussi permet d'actualiser celle-ci.

2.2. Approche méthodologique

2.2.1. Prétraitement des images

Le prétraitement des images a consisté en une série d'opérations qui a permis de faire des corrections des effets de l'atmosphère et des transformations d'images. Une mission-terrain de collecte d'informations par GPS (Global Positionning System) a permis une reconnaissance des types d'occupation du sol sur le terrain et des prises de vue à l'aide d'un appareil photographique).

Dans un premier temps, les images téléchargées (qui sont déjà orthorectifiées) ont subi la correction des effets atmosphériques afin d'harmoniser les luminances au sol et rendre comparables les images acquises à différentes époques sous des conditions climatiques variées. Ensuite, une reprojexion dans le système local (Maroc zone 1, système Lambert conique conforme, datum Merchich) a été réalisée.

La structure de l'arbre de décision est la même pour toutes les opérations de classification menées. Un traitement d'image a été fait pour les deux autres images (l'image d'été) et le MNT avant de les intégrer dans l'arbre de décision.

Pour l'image LANDSAT du 1er juillet 2010 (image d'été), on procède à la classification par maximum de vraisemblance, avec seulement deux classes, à savoir les formations forestières et le verger d'une part et le reste des classes d'occupation du sol (sols nus, cultures annuelles, eau et agglomérations) d'autre part. La classification par maximum de vraisemblance est basée sur des méthodes probabilistes permettant de calculer pour chaque pixel de

l'image sa probabilité d'être rattaché à telle classe plutôt qu'à telle autre (Girard et Girard, 1999). L'image d'été est choisie car elle lève les confusions de classe de végétation de la période printanière. Elle permet ainsi de séparer facilement la réflectance de cultures céréalières du verger industriel (encadré en noir de la *figure 2*). La séparabilité des formations forestières et des espaces de culture annuelles devient également aisée.

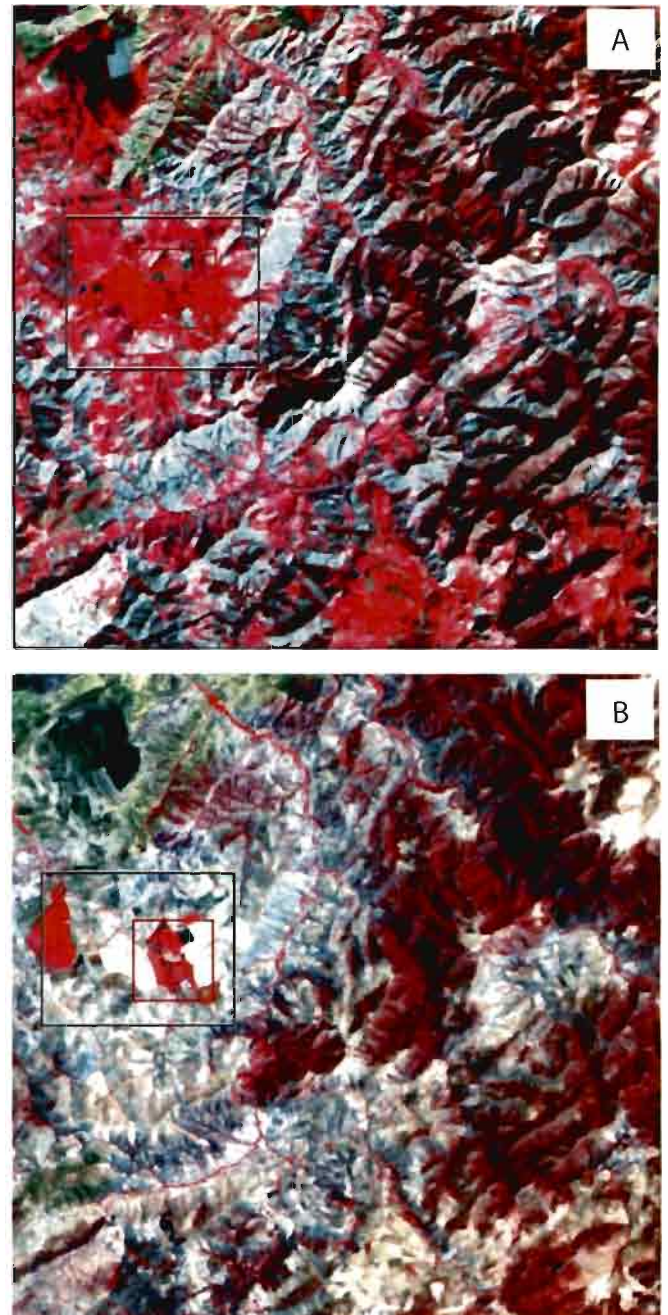


Figure 2: Comparaison de deux scènes d'image dans le bassin versant : scènes du 11 mars (A - printemps) et du 01 juillet 2010 (B - été). Les espace de confusion en encadré noir au printemps sont facilement séparables en été. En encadré rouge, on distingue un verger

Il est ainsi plus aisé d'utiliser cette image d'été pour extraire les espaces forestiers. Afin d'améliorer d'avantage cette classification et séparer le verger et les jachères des formations forestières, l'image raster de la classification est convertie en format vecteur. Sur cette image vecteur, et en comparaison avec une carte de référence (la carte de végétation du CERGEO), sont donc supprimés les vecteurs correspondants au verger et aux jachères ainsi que les cultures pour ne conserver que les formations forestières ou l'opération inverse pour ne conserver que le verger. Cela permet d'obtenir deux fichiers en mode vecteur : l'un correspondant aux forêts et aux matorrals et l'autre correspondant aux vergers et aux jachères. Sur la *figure 3* les polygones de verger et de jachères ressemblant à du bruit sur la figure de droite (des points) sont supprimés. Cette image vectorielle corrigée est reconvertie en image binaire (forêt et non forêt) raster (figure de gauche). Celle-ci sera utilisée dans l'arbre de décision pour discriminer les formations végétales.

Le deuxième fichier image (le MNT ASTER) utilisé comme entrée de l'arbre de décision connaît aussi une correction. En effet, ce Modèle Numérique de Terrain étant construit à partir de balayage radar, certaines zones à l'abri des ondes de ce balayage peuvent être à l'origine de pixels manquants sur l'image. Il est donc important de combler ces vides par interpolation (méthode du plus proche voisin). Après cette correction du modèle numérique de terrain, sont extraites les pentes en degré et sauvegardées sous forme image. Enfin, le dernier fichier à intégrer dans cet arbre est celui délimitant les localités. Sur l'ACP 4 de l'image de Landsat, les structures linéaires (les routes) ainsi que les limites des localités qui sont clairement visibles sont numérisées et une vérification est faite à l'aide de Googlemap.

2.2.2. Construction de l'arbre de décision de la classification de l'image LANDSAT

La classification par arbre de décision est une classification qui permet de prendre des décisions en plusieurs étapes pour mettre en relief une classe particulière d'objet, selon le comportement spectrale d'une bande ou d'une transformation en néocanaux. Dans l'arbre de décision de la classification de l'image LANDSAT du printemps (11 mars 2010), présenté par l'organigramme de la *figure 4*, deux décisions sont communes à toutes les extrémités. Il s'agit, en premier, d'extraire de toutes les classes d'occupation du sol, celles qui sont situées sur des pentes relativement fortes (supérieure à 10°). Ensuite, il est question d'extraire de toutes les classes d'occupation du sol les localités (rurales ou urbaines) ou les agglomérations.

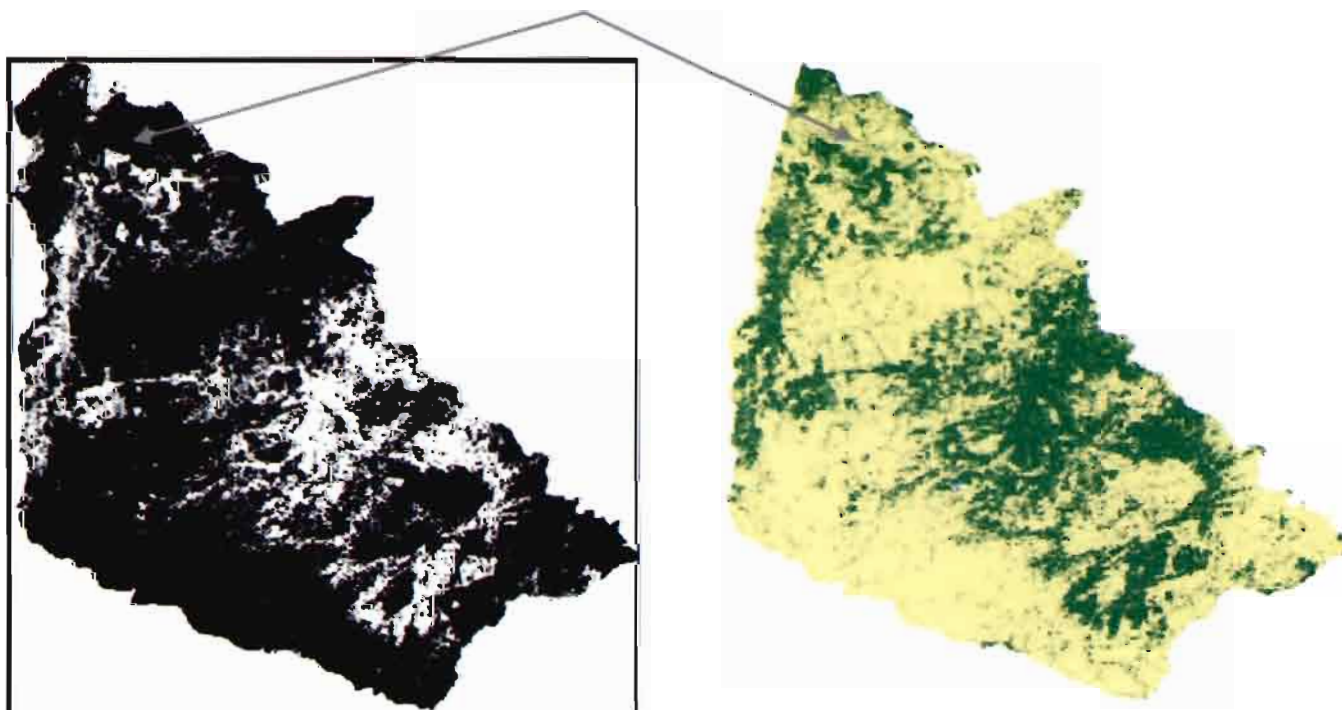


Figure 3 : Délimitation des formations forestières du Bassin : image classifiée binaire avec confusion de classe à droite et image améliorée par suppression des pixels ne représentant pas les forêts à gauche

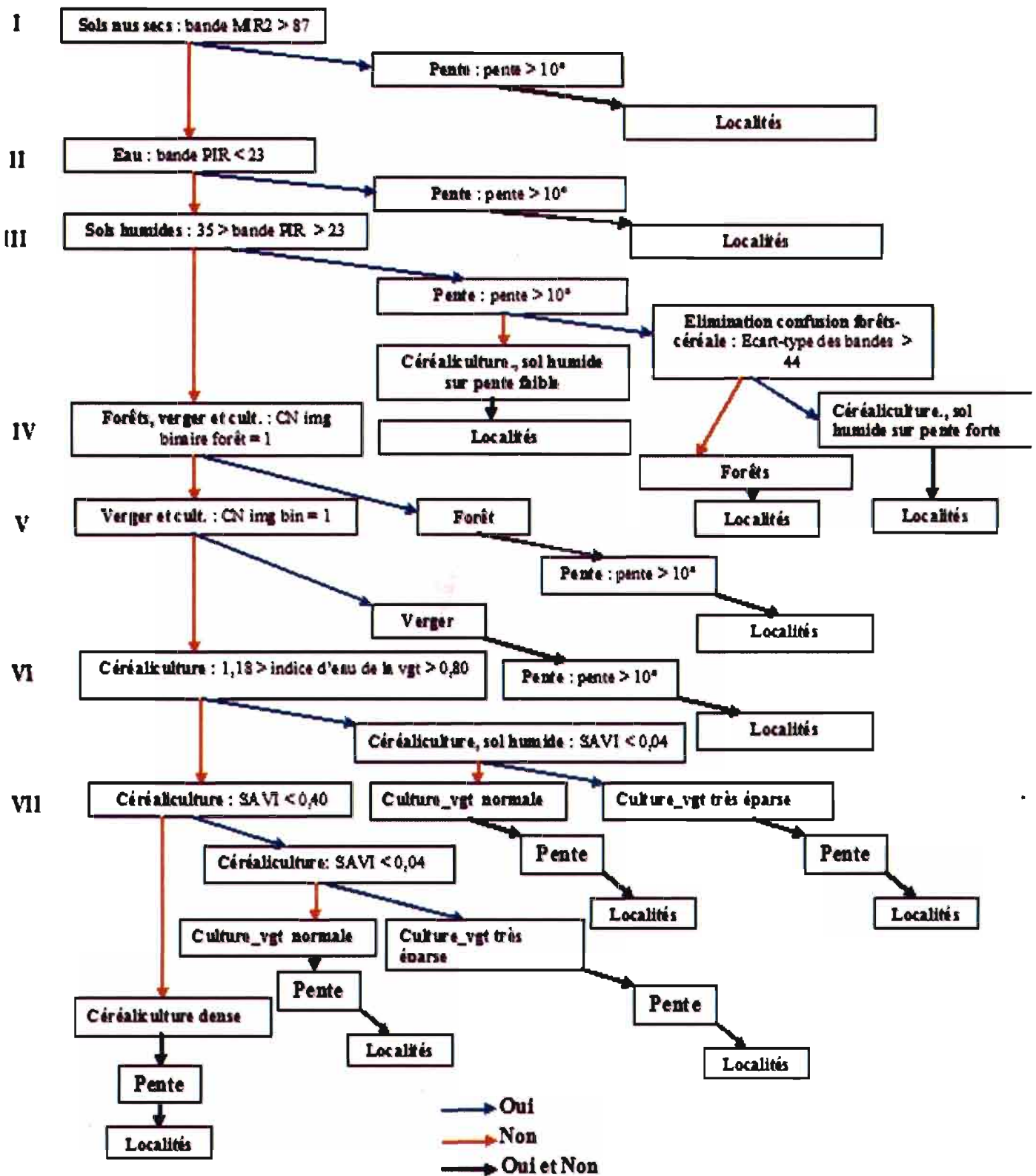


Figure 4 : Arbre de décision de la classification de l'image LANDSAT du 11 mars 2010

Décision I : elle vise à extraire les sols nus secs. Pour cela, la segmentation est effectuée sur la bande du moyen infrarouge 2 (ETM7+) car les sols nus réfléchissent fortement dans ce canal alors que la végétation et l'eau absorbent le rayonnement ; ce qui permet de distinguer les sols nus. Sont alors considéré comme sols nus, les objets dont la réflectance est supérieure à 87 (compte numérique).

Décision II : elle vise à extraire la classe correspondant à l'eau (Oued, barrage, océan) dont les comptes numériques sont très faibles dans l'infrarouge. De ce fait, l'eau apparaît en noir sur l'image infrarouge moyen. Les pixels correspondant à cette classe d'occupation du sol sont inférieurs à 23.

Décision III : elle vise à extraire les zones humides occupées par des cultures. Pour cela la bande du moyen infrarouge (ETM5+) est segmentée pour retenir comme espace humide le segment dont le compte numérique est compris entre 23 et 35. Une sous décision à ce niveau consiste à extraire des classes d'objets correspondant aux zones humides dont la réflectance se confond avec certaines végétations forestières. Ainsi, a-t-il été constaté que sur l'image les pixels de confusion appartiennent aux espaces à relief accidenté. Aussi, est-il possible de les extraire à partir de l'écart-type des pixels sur l'ensemble des 6 bandes de l'image (écart-type inférieur à 44).

Décision IV : elle vise à extraire la classe d'occupation de sol correspondant aux formations forestières. Cette décision est rendu possible en injectant dans l'arbre de décision le fichier image binaire correspondant aux forêts (les forêts étant codé 1).

Décision V : elle vise à extraire la classe correspondant au verger à partir d'une image binaire (verger codé 1).

Décision VI : elle vise à extraire les classes de cultures (céréale majoritairement) marquées par une forte humidité. Pour cela est calculé un indice de la teneur en eau de la végétation équivalent à la somme des bandes du visible divisée par la somme des bandes de l'infrarouge (équation 1).

$$\text{indice de la teneur en eau} = \frac{b1+b2+b3}{b4+b5+b6} \quad (\text{éq. 1})$$

Où : $b1 = \text{ETM}1+$; $b2 = \text{ETM}2+$; $b3 = \text{ETM}3+$; $b4 = \text{ETM}4+$; $b5 = \text{ETM}5+$; $b6 = \text{ETM}7+$

Une sous décision à ce niveau consiste à savoir quelle est dans cette végétation (céréale) à forte humidité celle qui a un très faible recouvrement végétal. Pour le savoir, un autre indice de végétation est calculé, le SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) qui a l'avantage de prendre en compte la réflectance du sol. En effet, dans le bassin versant du Bouregreg et dans les zones semi arides du Maghreb en générale, la réflectance de la couverture végétale est très influencée par celle du sol. C'est pourquoi certains chercheurs proposent l'indice de végétation SAVI (équation 2) qui semble plus adapté (Escadafal et Huete, 1991 ; Lecerf, 2008). La végétation très éparse correspond sur l'image de l'indice SAVI à une végétation dont l'indice est presque nul (0,04).

$$\text{SAVI} = \frac{\text{PIR}-R}{\text{PIR}+R+L} * (1 + L)$$

Où : PIR = proche infrarouge ; R= rouge ; L= une constante dont la valeur est 0,5.

Décision VII : elle a pour objectif l'extraction de différentes

catégories de cultures pluviales (céréaliculture) en fonction de leur densité à travers l'indice de végétation SAVI.

Ainsi, les cultures céréalières denses à très forte réflectance ont un indice supérieur à 0,40. Les cultures à indice "normal" occupe le segment entre 0,40 et 0,04.

Décision VIII : C'est la dernière décision qui permet d'extraire les localités rurales et urbaines au niveau de toutes les classes d'objets déterminées précédemment.

La validation de cette classification s'est faite à travers une autre mission de terrain dans les zones où il était, à priori difficile, de séparer les classes d'occupation du sol. C'est l'exemple des espaces de végétation éparse ou des terrains accidentés sur lesquels de fortes confusions de classes d'objets sont liées à l'humidité des versants nord. Ainsi, ont été réalisés des échantillonnages par GPS afin de servir à l'exécution de la matrice de confusion.

3. Résultats et discussion

3.1. Présentation et analyse des résultats

L'utilisation des images acquises en été dans l'arbre de décision a permis une bonne distinction des espaces forestiers de l'est du bassin du verger, ainsi qu'une distinction du verger des espaces de culture dans le centre du bassin (figures 5, 6 et 7). La classification par arbre de décision a également permis de mieux faire ressortir les différentes classes de culture, notamment céréalières et légumineuses, en mettant l'accent sur la nature topographique des espaces de culture. Cela est d'autant plus important que le développement de l'érosion hydrique des sols est généralement lié à ces pratiques culturales, les espaces de culture avec des sols mieux conservés étant situés dans le centre et l'aval du bassin, tandis que les espaces de culture sur sols fortement érodés sont localisés dans le Sud-Est du bassin versant du Bouregreg. Enfin, cette classification adoptée a permis une bonne séparation du sol nu sec des localités urbaines et rurales. Cette dissociation est mieux visible à l'Ouest (partie aval).

La classification des images de Landsat de printemps 1985, 2000 et 2010 permet de mettre en relief trois dynamiques principales de l'occupation du sol :

- augmentation des espaces agricoles aux sols dénudés ;
- réduction des surfaces forestières ;
- augmentation des superficies céréalières, principalement de blé.

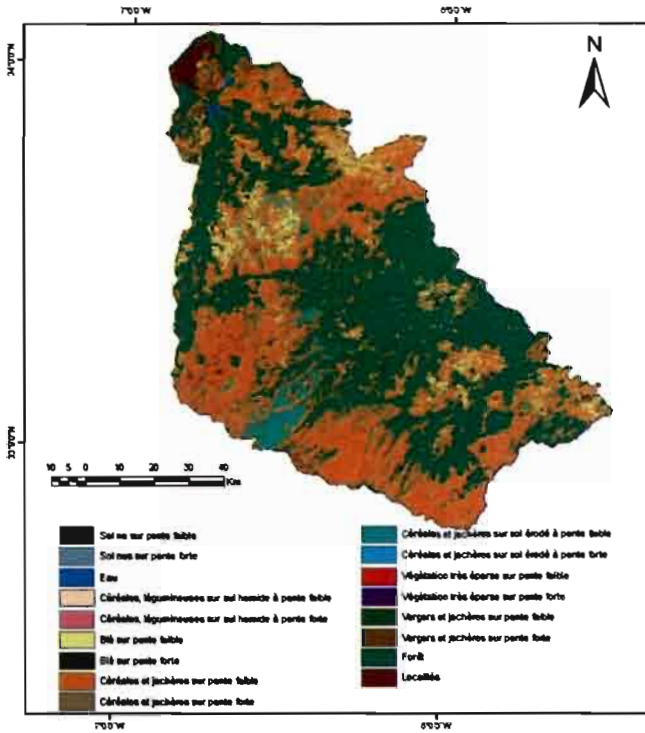


Figure 5: Carte d'occupation du sol du bassin versant du Bouregreg en 1985. La classe de végétation très éparse est presque "inexistante sur cette image

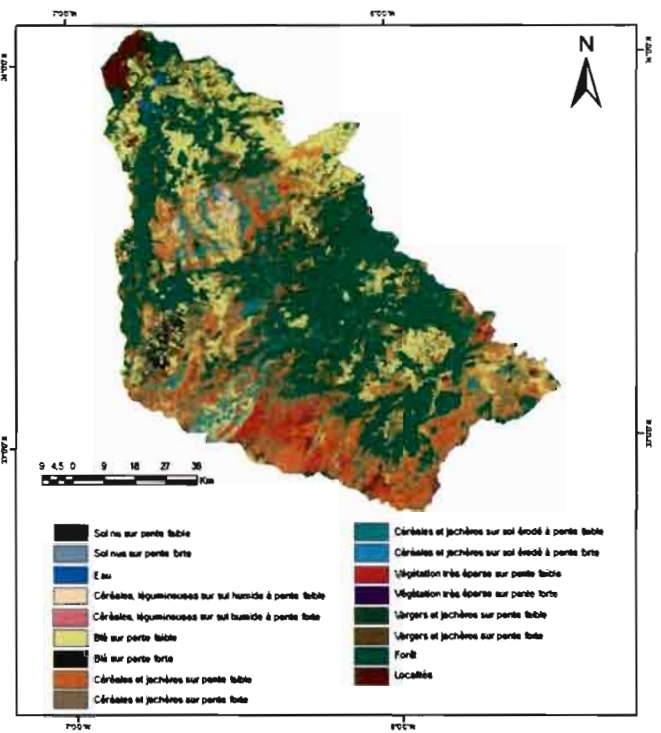


Figure 7 : Carte d'occupation du sol du bassin versant du Bouregreg en 2010. Les changements observés en 2000 se consolident. Le centre du bassin est caractérisé par une proportion importante de sols érodés

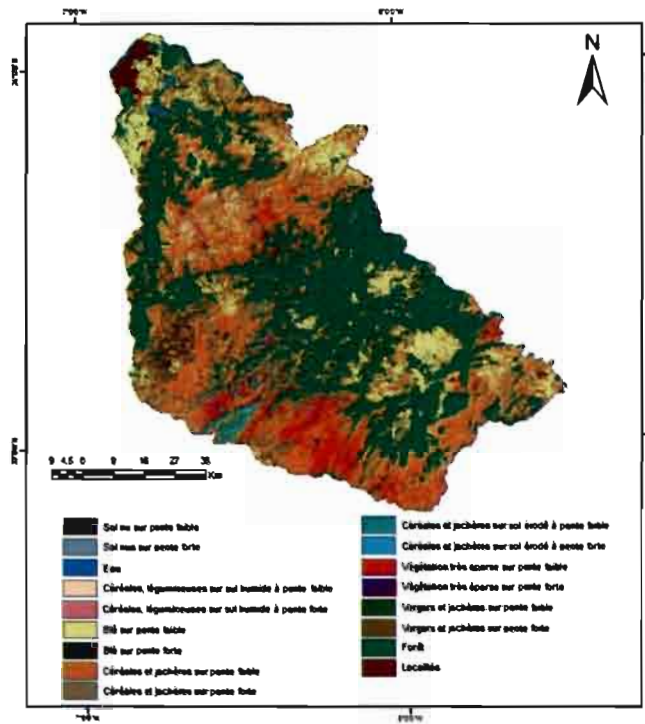


Figure 6: Carte d'occupation du sol du bassin versant du Bouregreg en 2000. Le Sud-Est du bassin est marqué par une dénudation des espaces. Le centre du bassin se caractérise par une transformation du système de culture avec une place importante aux légumineuses

3.1.2. Une réduction qualitative et quantitative des surfaces forestières

Les statistiques de la carte d'occupation du sol (*figures 8, tableau 1*) indiquent qu'en 1985, les formations forestières représentaient 33% (333126 ha) de la superficie du bassin. En 2000, la proportion des forêts était de 30% (295187 ha). En 2010, cette proportion n'est plus que de 27% (274509 ha), soit une réduction totale de 58617 ha. Entre 1985 et 2000, 42% des superficies forestières dégradées ou disparues se situaient sur des pentes inférieures à 10% (pentes faibles). Entre 2000 et 2010, cette proportion d'espace forestier dégradé sur pente faible est réduite à 30%. Au contraire de cette évolution, les superficies forestières dégradées localisées sur de pentes fortes sont en nette progression. Entre 1985 et 2000, elles représentent 58% du total dégradé. La proportion est de 70% des superficies forestières dégradées entre 2000 et 2010.

3.1.3. Une augmentation des superficies céréalières

L'évolution à la baisse des surfaces forestières se traduit par une augmentation de celles de céréales (*figure 8, tableau 1*).

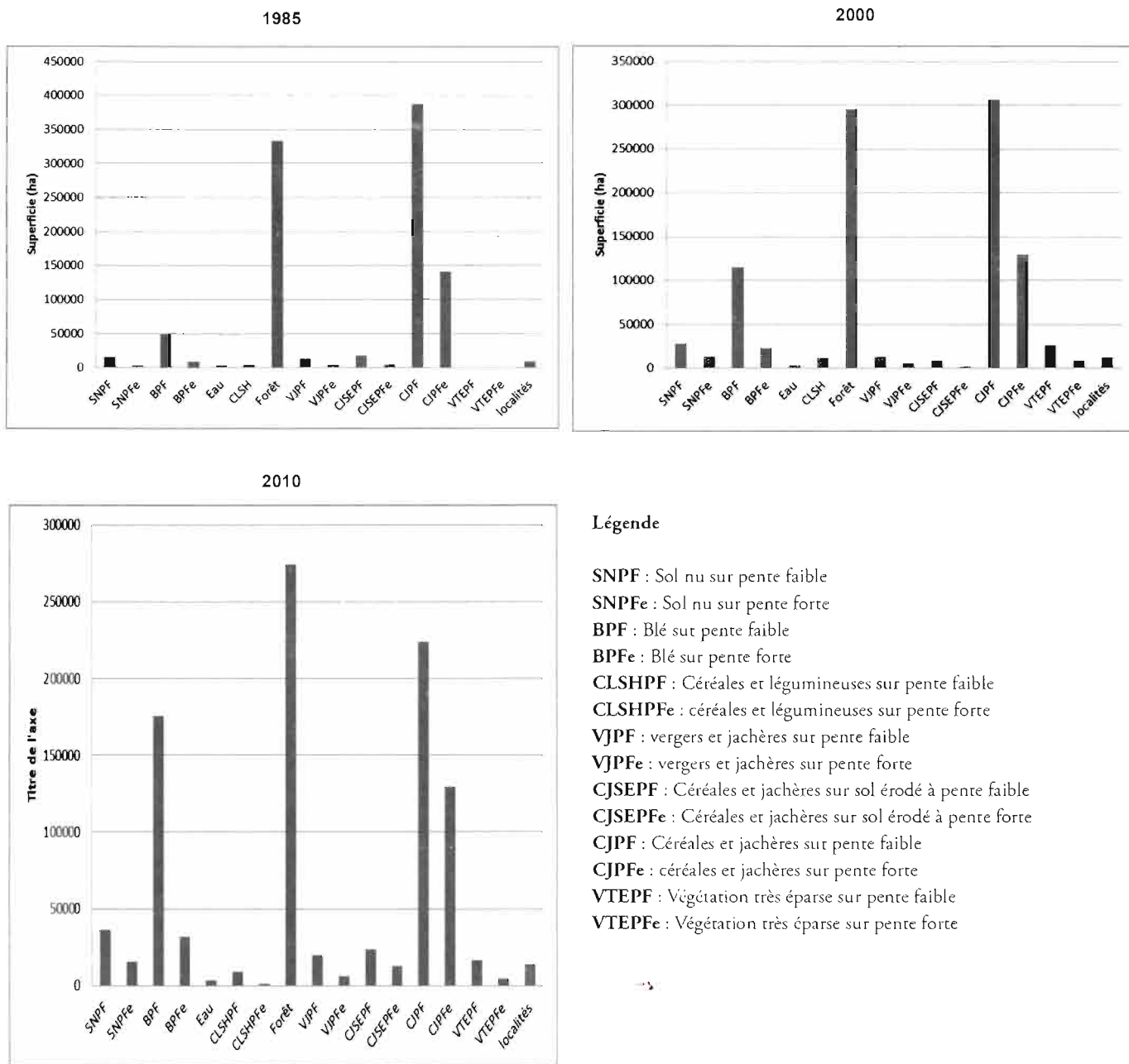


Figure 8 : Graphique de l'évolution des types d'occupation du sol aux dates de 1985, 2000 et 2010

Tableau 1: Récapitulatif de l'évolution des forêts dans le bassin versant du Bouregreg en fonction de la pente du relief

	Superficie des forêts (ha)	% par rapport à la superficie du bassin	Proportion réduite localisée sur pente faible (%)	Proportion réduite localisée sur pente forte (%)
1985	333126	33,45	42,36	57,64
2000	295187	29,58	30,39	69,61
2010	274509	27,49		

Partant de la reconnaissance sur les images de Landsat de 1985, 2000 et 2010 de certaines surfaces occupées essentiellement par du blé, il apparaît qu'en 1985, ce type d'occupation du sol représente 6% (58681 ha) de la superficie du bassin. En 2000, ces cultures de blé occupent 14% (137499 ha) de l'espace. En 2010, la proportion est de 21% (207708 ha). Au niveau topographique, en 1985, c'est 1% de la superficie du bassin occupée par du blé qui se localise sur des pentes fortes. En 2000, le blé sur pente forte occupe 2% de la superficie du bassin. En 2010, la proportion est de 3%. Il apparaît ainsi, qu'en plus de l'augmentation des surfaces occupées par du blé, la tendance à la mise en culture des pentes fortes est de plus en plus élevée. L'analyse topographique de l'occupation du sol par les céréales indique que tout comme la culture du blé, des espaces à forte pente sont de plus en plus conquis pour être cultivés. En 1985, ce sont 155790 (16% du bassin) hectares de surface céréalière qui sont localisés sur des pentes fortes. La proportion est de 18% (179491 ha) en 2000 et de 20% (202226 ha) en 2010.

3.2. Discussion

L'évaluation des zones d'entraînement choisies pour la classification par maximum de vraisemblance de l'image d'été fait apparaître des confusions presque négligeables (tableau 2).

Tableau 2 : Evaluation de la séparabilité des zones d'entraînement

Classes d'occupation de sol	forêt	eau	sol-cultures	total
forêt	99,73	0,05	5,38	1177
eau	0,00	97,75	0,00	347
Sol-culture	0,27	1,41	94,62	1045
total	1118	355	1096	2569

En effet, les formations forestières et le verger se distinguent à 99,73% des autres formes d'occupation du sol. Seul environ 5% des espaces de culture et autres peuvent être confondus à celle de la végétation forestière. La figure 3 présente le résultat de cette classification qui a été améliorée par un filtre majoritaire moyen 3x3. Le coefficient kappa de la classification indique 0,9383 (soit environ 94% de pixels bien classés). Toutefois, la classification par maximum de vraisemblance avec seulement deux classes reste imparfaite.

Au niveau méthodologique, la classification par arbre de décision peut présenter certaines erreurs liées, notamment, à l'intégration de fichiers provenant d'une autre classification. Il s'agit en l'occurrence de la classification par maximum de vraisemblance délimitant les formations forestières. C'est pourquoi, il est important d'apporter des corrections aux fichiers images représentant la couverture forestière. Dans cette méthode de classification, la détermination des seuils des classes d'objet pendant la construction de l'arbres de décision demeure un exercice non aisé. Cela demande une très bonne enquête de terrain. Les travaux sur l'évolution de l'occupation du sol réalisés à partir des classifications par maximum de vraisemblance, sur la zone du Maghreb, bien qu'indiquant souvent de très bons niveaux de classification des images, amènent à se poser certaines questions. Il existe, en effet, une difficulté à séparer la végétation (y compris les cultures) des sols nus, surtout lorsque l'on évolue vers des espaces de plus en plus steppiques. Cette confusion est

doublée d'une difficulté à également séparer les cultures céréalières et légumineuses des jachères herbacées, lorsque sont utilisées les images multispectrales à haute résolution spatiale comme Landsat. En outre, la création de néocanaux à partir de divers indices au cours des classifications par maximum de vraisemblance permet, plutôt, de mettre l'accent sur une classe d'objets donnés. En tout état de cause, les travaux par maximum de vraisemblance sur les espaces semi-arides du Maghreb devraient donner des coefficients kappa moins importants que ceux souvent mentionnés. Ainsi, classification par arbre de décision des images du bassin versant du Bouregreg conduit à des résultats beaucoup plus fiables avec des coefficients kappa supérieurs à 90% (0,91 (1985) ; 0,90 (2000) et 0,93 (2010)).

Au niveau des résultats, l'évolution des surfaces dénudées est une caractéristique importante de la dynamique actuelle du paysage marocain (Laouina, 1995 ; Laouina et al., 2004 et 2010). Il est constaté, au niveau de l'occupation du sol à ces trois dates, que le mois d'avril 1985 présente des terres plus couvertes par la végétation que les mois de mars 2000 et 2010 (pendant qu'il devait en être le contraire). Cette situation ne peut être liée à des facteurs climatiques d'autant plus que ces trois dates présentent presque la même situation pluviométrique. Elle s'explique par les pressions anthropiques sur l'espace, notamment les activités agricoles sur les espaces à pente forte qui provoquent d'importants phénomènes d'érosion et les pressions pastorales (Tra Bi, 2013). La régression des surfaces forestières est liée à une occupation de ses espaces par la céréaliculture, l'élevage (Abaab et al., 1995 ; Bourbouze, 2000 ; Benbrahim et al., 2004) ainsi que l'urbanisation importante de la frange littorale (Berrada, 2005).

Conclusion

La méthode de classification par arbre de décision des images Landsat de 1985, 2000 et 2010 du bassin versant du Bouregreg permet de réduire les confusions de classes d'objet dans la zone semi-aride. Cette méthode a l'avantage de produire un résultat final qui s'appuie sur la facilité de discrimination des objets selon les bandes des images, selon des néocanaux calculés ou selon des indices. En plus, les résultats s'expriment directement sous la forme de système d'information géographique. Dans le cas précis de ce bassin versant, l'étude présente a permis de lever les confusions de classes d'objet liées à l'humidité induit par la topographie. Ainsi, les espaces de forêts sur versants humides qui se localisent dans les zones de haut plateau de l'est ont été aisément discriminés des espaces de culture sur sol humide. La classification de cultures céréalières, de légumineuses et de vergers à été possible grâce à l'intégration successive dans l'arbre de décision de différentes bandes et indices de végétation (SAVI). Quant à la séparation du sol nu des espaces bâtis, elle a été possible par l'utilisation de la bande ACP 4 dans l'arbre de décision. Il ressort au final, concernant la dynamique de l'occupation du sol, que le bassin versant du Bouregreg a connu entre 1985 et 2010 trois principaux changements : une augmentation des espaces dénudés, surtout dans la partie sud-est du bassin versant (dans une proportion de 5 à 6 fois) ; une réduction substantielle des formations forestières (réduction de 6% correspondant à environ 58000 ha), surtout sur les espaces à forte pente ; une augmentation importante des superficies céréalières, principalement de blé.

Références bibliographiques

Abaab A., Bedrani S., Bourbouze A., Chiche, J. 1995 Les politiques agricoles et la dynamique des systèmes agro-pastoraux au Maghreb in " les agricultures maghrébines à l'aube de l'an 2000", Options Médit. n° 14, 139-165.

<http://om.ciheam.org/om/pdf/b14/CI960048.pdf> [consulté le 5 February 2013].

Benbrahim K. F., Ismaili, M., Benbrahim, S. F., & Tribak, A. 2004. Problèmes de dégradation de l'environnement par la désertification et la déforestation: impact du phénomène au Maroc. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 15(4), 307-320.

Berrada A. 2005. Répartition de la population, urbanisation et migration. In, *Population et développement au Maroc : dix après la conférence internationale sur la population et le développement (CIPD,1994)*.

Bourbouze A. 2000. Pastoralisme au Maghreb: la révolution silencieuse. *Fourrages*, 161, 3-21.

Brou Y T., Emram A., Abdellah L., Chaker M., Coupleux S., & Boujrouf, S. 2013. Changement des états de surface, précipitations automnales et vulnérabilité des sols dans le bassin versant du Bouregreg au Maroc. *Revue des sciences de l'eau* 26(2), 81-87.

Chikhaoui M., Bonn F., Bokoye A. I., & Merzouk A. 2005. A spectral index for land degradation mapping using ASTER data: Application to a semi-arid Mediterranean catchment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 7(2), 140-153.

Chikhaoui M., Bonn F., Merzouk A., Lacaze B., & Mejjati A. M. 2007. Cartographie de la dégradation des sols à l'aide des approches du Spectral Angle Mapper et des indices spectraux en utilisant des données ASTER. *Téledétection*, 7(1-2-3-4), 343-357
<http://www.teledetection.net/upload/TELEDETECTION/pdf/20080404180822.pdf> [consulté le 5 Février 2013].

El Garouani A., Chen H., Lewis L., Tribak A., & Abharour M. 2008. cartographie de l'utilisation du sol et de l'érosion nette à partir d'images satellitaires et du sig idrisi au nord-est du maroc. *Téledétection*, 8(3), 193-201
http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/43/42/58/PDF/Vol8No3_193_201.pdf [consulté le 5 Février 2013].

Escadafal R., & Huete A. 1991. Etude des propriétés spectrales des sols arides appliquée à l'amélioration des indices de végétation obtenus par télédétection. *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'univers, Sciences de la Terre*, 312(11), 1385-1391
http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_texte_s_5/b_fdi_31-32/34390.pdf [consulté le 5 Février 2013].

Girard M.C. & Girard C.M. 1999. Traitement des données detéledétection. DUNOD Ed. Paris, pp.529.

Girouard G., Bannari A., El Harti A., & Desrochers A. 2004. Validated spectral angle mapper algorithm for geological mapping: comparative study between QuickBird and Landsat-TM. In *XXth ISPRS Congress, Geo-Imagery Bridging Continents, Istanbul, Turkey* (pp. 12-23).

Hakdaoui M., & Rahimi A. 2006. Apport de la classification combinée supervisée et non supervisée d'une image Landsat ETM+ à la cartographie géologique de la boutonnière de kerdous, anti-atlas, maroc. *Photo interprétation*, 42(2), 46-54.

Houssa R., Merzouk A., Abdellaoui B., & Aberkan M. 1998. Cartographie des états de surface en relation avec le processus de ruissellement des sols: région du nord du Maroc. *Universités francophones. Actualité scientifique*, 319-328.

Laouina A., Coelho C., Ritsema C., Chaker M., Nafaa R., Fenjiro I., & Van Dijk S. 2004. Dynamique de l'eau et gestion des terres dans le contexte du changement global, dans le bassin du Bouregreg (Maroc). *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 15(1), 65-77
<http://ressources.ciheam.org/om/pdf/a57/04001965.pdf> [consulté le 5 Février 2013].

Laouina A., Aderghal M., Al Karkouri J., Chaker M., Machmachi I., Machouri N., & Sfa M. 2010. Utilisation des sols, ruissellement et dégradation des terres: le cas du secteur Sehoul, région atlantique (Maroc). *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 21(4), 309-316
http://www.jle.com/e-docs/00/04/5F/E2/vers_alt/VersionPDF.pdf [consulté le 5 Février 2013].

Lecerf R. 2008. Suivi des changements d'occupation et d'utilisation des sols d'origine anthropique et climatique à l'échelle régionale par télédétection moyenne résolution (application à la Bretagne) thèse de doctorat, Université Rennes 2, P326
<http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/33/70/99/PDF/theseLecerf.pdf> [consulté le 5 Février 2013].

Tra Bi A.Z. 2013 Etude de l'impact des activités anthropiques et de la variabilité climatique sur la végétation et les usages des sols, par utilisation de la télédétection et des statistiques agricoles, sur le bassin versant du Bouregreg (Maroc). Thèse de doctorat de l'Université d'Artois à Arras (France) et de l'Université Houphouët Boigny d'Abidjan (Côte d'Ivoire), P189.

