

UTILISATION D'IMAGE SATELLITAIRE ET D'UN MODÈLE NUMÉRIQUE D'ALTITUDE POUR LA CARTOGRAPHIE DES ZONES À RISQUE D'INONDATION SUR LE LITTORAL MÉDITERRANÉEN DE SAÏDIA (NORD-EST DU MAROC)

Mounia Mouzouri¹, Zoulikha Irzi², Abdelhak Essaddek³

1 : Université Mohammed Premier, Faculté des Sciences, Département de Biologie, Laboratoire d'Hydrobiologie et d'Écologie Générale, Boulevard Sidi Maafa, BP 524, Oujda – Maroc.
mouzouri_mounia@yahoo.fr

2 : Université Mohammed Premier, Faculté des Sciences, Département de Géologie, Laboratoire des Géosciences Appliquées, Boulevard Sidi Maafa, BP 524, Oujda – Maroc
irzizou@yahoo.fr

3 : Université Mohammed Premier, Faculté des Lettres, Département de Géographie, Oujda – Maroc
essaddek@yahoo.fr

Résumé

Cette étude vise à établir une carte du risque inondation sur la plaine côtière de Saïdia située sur le littoral méditerranéen du Nord Est du Maroc. Cette plaine est limitée au Sud par les plateaux des Ouled Mansour aux formes vigoureuses et incisés par des ravins dont les eaux temporaires se jettent directement dans la plaine. Elle est enserrée entre deux oueds : la Moulouya à l'Ouest et le Kiss à l'Est. Ce littoral est caractérisé par un climat méditerranéen semi-aride à saisons contrastées où les pluies torrentielles engendrent d'importantes inondations accentuées par la faible profondeur de la nappe phréatique. Ce contexte géomorphologique et climatique couplé aux aménagements actuels a aggravé le risque d'inondations. Dans cette étude, la méthodologie adoptée est fondée sur la structuration dans un système d'information géographique (SIG) des données de la télédétection spatiale, des produits dérivés d'un modèle numérique d'altitude (MNA) et des données exogènes (lithologie, niveau piézométrique de la nappe phréatique, etc.). L'approche analytique comporte 1) une phase de traitement numérique d'une image satellitaire GeoEye-1 pour cartographier l'occupation des sols ; 2) une phase d'extraction des attributs topographiques et la morphométrie du terrain, représentés par le modèle numérique d'altitude (MNA) et 3) une phase de structuration de l'information par analyse spatiale dans un SIG. Ces informations ont permis la réalisation de deux cartes : la carte de l'aléa inondation et la carte de vulnérabilité. La carte de l'aléa inondation montre que les zones de fort à très fort aléa, représentent 57% du site. Elles sont caractérisées par de faibles altitudes (0-4 m) et des profondeurs de la nappe variant entre 0 et 4 m. La carte de vulnérabilité fait référence aux différentes classes d'occupation de sol. La superposition de ces deux cartes a permis d'établir la carte du risque inondation. Cette carte thématique montre que les niveaux de risque fort affectent 43% de l'ensemble du territoire étudié, et correspondent aux abords de Oued Moulouya, et en grande partie à une vaste surface occupée par la nouvelle station balnéaire "Mediterranea-Saïdia".

Mots clés : Risque inondation, aléas, vulnérabilité, MNA, image satellitaire, Méditerranée, Maroc.

Abstract

This paper aims to establish a map of the flood risk of the coastal plain of Saïdia located on the Mediterranean coast of north-eastern Morocco. This plain is enclosed between rivers : the Moulouya in the West and the Kiss in the East. It is bordered to the south by the Ouled Mansour Mountains. These are sheared by very steep ravines that empty directly into the plain. The groundwater is very shallow. This background coupled with geomorphic coastal development promotes the current flood risk. In this paper, the methodology is based on the structuring in a geographic information system (GIS), remote sensing data, products derived from a digital elevation model (DEM) and external data (lithology, the groundwater level, etc.). The analytical approach consists of a digital processing of a GeoEye-1 satellite image and aerial photographs to map the surface states, an extraction phase of topographic attributes and geomorphology of the land, represented by the digital elevation model (DEM) and a phase of structuring information for spatial analysis in a GIS. These investigations allowed the construction of two maps : the map of vulnerability to flood and the map of hazards. The vulnerability map shows that very high vulnerability areas represent 57% of the site and correspond to areas of inter-dunes flat formed by deposits of fine clay, and characterized by lowland sector (0-4 m). The hazard map refers to the land cover. The superposition of these two maps helped to establish the map flood risk. This thematic map shows that approximately 43% of the territory considered is located in high to very high flood risk areas, and correspond to the banks of the Moulouya and the kiss rivers and to the marshes of the Moulouya River, and to the sector on which the new Saidia resort is built.

Keywords : Flood risk, hazards, vulnerability, DEM, satellite image, Mediterranean, Morocco.

1. Introduction

Les inondations constituent l'aléa hydrologique naturel le plus répandu dans le monde, faisant le plus de victimes et de dégâts [Barroca, 2006 ; Pottier, 1998]. Au Maroc, ce risque est de plus en plus ressenti depuis les deux dernières décennies, en raison d'une part de l'occupation croissante des zones vulnérables et d'autre part de l'aggravation des phénomènes extrêmes (sécheresse et crues) suite aux modifications climatiques. Les statistiques du Plan national de protection contre les inondations de 2003, montrent que 391 sites sont soumis à des risques d'inondation, dont 25%, soit 98 sites, à des risques très forts. Parmi ces 391 sites, 62 seraient localisés dans le bassin de la Moulouya et la plaine littorale de Saïdia, secteur concerné par la présente étude.

En effet, cette plaine, appartenant au bassin subsident de Triffa (Figure 1), est caractérisée par une topographie très plane de 6 m maximum d'altitude, et dont la surface est très proche de la nappe phréatique (Sadki, 1996; Melloul, 2007). Ce contexte hydrogéologique présente un caractère favorable aux inondations. De plus, sa situation enserrée d'une part entre deux oueds, le Kiss à l'Est et la Moulouya à l'Ouest et d'autre part le plateau des Ouled Mansour au Sud, augmente considérablement les risques de crue brutale et d'inondation. Les aménagements urbains et touristiques non contrôlés et de plus en plus grandissants aggravent ces risques.

La plaine côtière de Saïdia a fait l'objet de nombreux travaux antérieurs ayant porté essentiellement sur l'étude des formations quaternaires, l'évolution morphosédimentaire, la géochimie et l'évolution du trait de côte (Gigout et al., 1957; Zourarah, 1995; Boumeaza, 1998; Zarki, 1999; Irzi, 2002; Bouabdallah et Larue, 2009; Salmon et al., 2010; Mouzouri et Irzi, 2011). Les travaux de Snoussi et al. (2008) ont révélé la vulnérabilité de la plaine côtière liée à la surélévation du niveau de la mer résultant d'un réchauffement climatique global. La présente étude traite de la problématique de l'inondation de la plaine côtière de Saïdia soumise actuellement à un double stress anthropique et naturel (inondation et sécheresse, vagues de tempêtes, subsidence, etc.).

L'objectif de cet article est d'identifier et de cartographier les zones à risque inondation dans la plaine côtière de Saïdia. La méthodologie utilisée est fondée sur le couplage des données de la télédétection satellitaire, d'un Modèle Numérique d'Altitude (MNA) et des données complémentaires (lithologie, niveau piézométrique de la nappe, etc.). L'approche analytique comporte une phase de traitement numérique d'une image satellitaire GeoEye-1 datant de 20/04/2009 pour élaborer la carte d'occupation du sol. Une seconde phase consiste à extraire la morphométrie du terrain à partir de modèle

numérique d'altitude (MNA). Une dernière phase est la structuration de l'information afin de réaliser une analyse spatiale dans un SIG.

2. Situation de la plaine de Saïdia

La plaine côtière méditerranéenne de Saïdia, orientée ESE-WNW constitue le prolongement vers le Nord du bassin de Triffa (Figure 1). Elle s'étend sur 14 km de long et de 2,5 km de large. Cette plaine est limitée à l'Ouest par Oued Moulouya et à l'Est par Oued Kiss ; elle est bordée au Nord par la mer Méditerranée et au Sud par le plateau des Ouled Mansour. Ces falaises mortes (Laaouina, 1990) culminant à 100 m d'altitude sont constituées d'une alternance de dépôts de grès et d'argiles néogènes. La plaine est formée par des dépôts quaternaires d'âge holocène, mis en place depuis la transgression flandrienne (-6000 ans) (Gigout et al., 1957; Laaouina, 1990; Irzi, 2002). Cette plaine côtière très plane, de faible altitude (0 à 6 m) est constituée par un système de cinq cordons dunaires séparés par des dépressions, un cordon de dunes barkanoïdes vives sur le littoral et une plage assez large de type dissipatif (Irzi, 2002). Actuellement le modelé de ces cordons est fortement atténué à cause des aménagements urbains et touristiques grandissants et de l'exploitation massive du sable. Le littoral est dominé par la houle et une marée de type microtidal avec une moyenne de 20 cm (Tesson et Genssous, 1979). La plaine côtière est formée essentiellement de limons vaseux continentaux et de sables récents. Le site d'étude est caractérisé par un climat méditerranéen contrasté, marqué par une sécheresse accentuée. La pluviométrie moyenne annuelle est de 320 mm/an, le régime pluvial se caractérise par la présence d'une période humide pouvant s'étaler sur huit mois (octobre à mai) et d'une période sèche qui correspond à la saison d'été (juin à septembre). Le mois le plus pluvieux est le mois de février avec une moyenne mensuelle de 58 mm, et le mois le plus sec est le mois de juillet avec une moyenne de 1 mm.

Les fleuves bordant la plaine côtière de Saïdia ont un régime hydrologique contrasté, rythmé par les apports pluviométriques de leur bassin versant. L'Oued Moulouya prend sa source dans le Moyen Atlas à 2000 m d'altitude (région d'Arhbal). Son bassin versant est d'une superficie de plus de 57 000 km² et sa longueur est de 520 km environ. C'est le plus important cours d'eau marocain se jetant dans la mer Méditerranée. Son débit moyen est de 13 m³/s et les débits maximums enregistrés au niveau de la station de Melg El Ouidane située en amont des barrages (Latitude : 34°55'0"N ; Longitude : 3°0'0"W ; Elévation : 242m) lors des dernières grandes crues sont représentés dans la figure 2. La crue survenue en mai 1963 a causé des inondations notables dans la plaine de Saïdia et un changement dans la morphologie de l'embouchure (Mouzouri et Irzi, 2011).

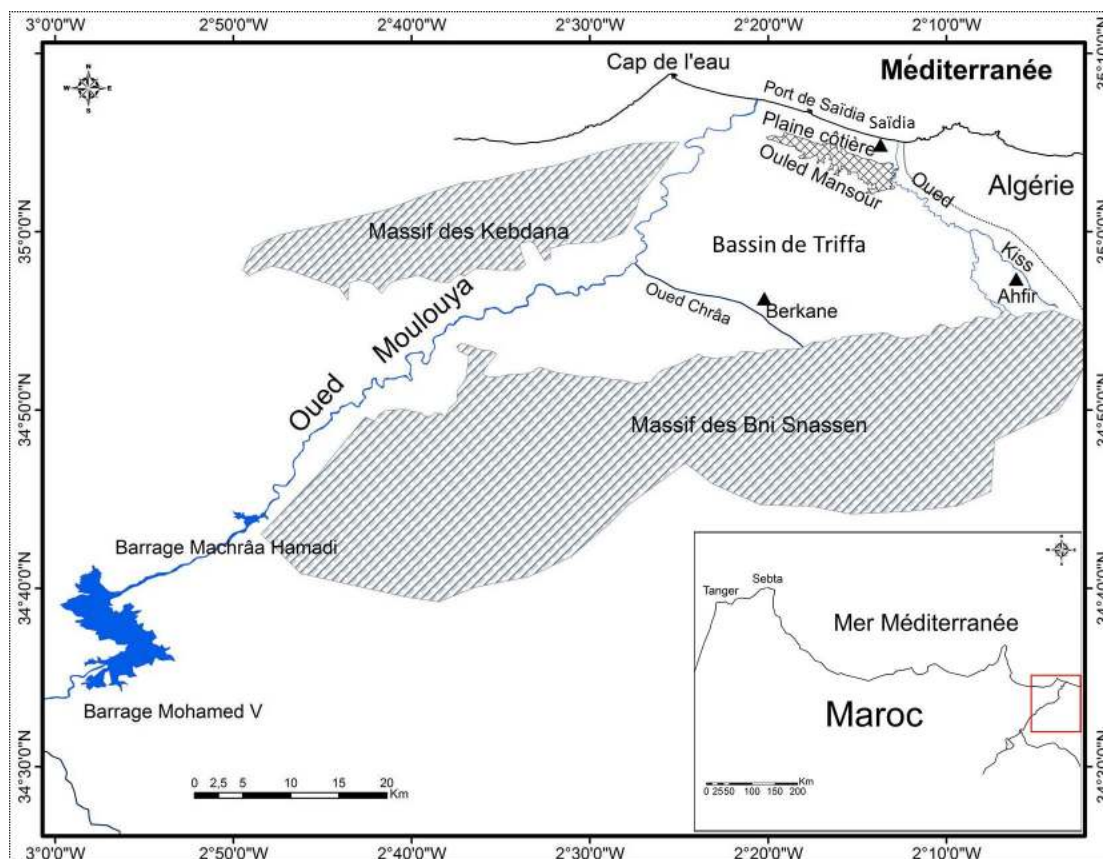


FIGURE 1 : Situation de la plaine côtière de Saïdia (Nord Est du Maroc).

Actuellement les effets des crues de l'Oued Moulouya n'influent que peu la plaine côtière de Saïdia à cause de l'édification des deux barrages dans les gorges des Bni Snassen (Mechraa Hammadi en 1958 et Mohammed V en 1967) qui ont un rôle écréteur.

L'Oued Kiss situé plus à l'Est (Figure 1), draine un bassin versant de 416km² dont 116km² situé en Algérie. Sa longueur est de 26 km avec une pente moyenne de 1% environ. La vallée d'Oued Kiss s'intègre dans le versant septentrional de la partie orientale du massif des Bni Snassen. Il est alimenté en étiage par les sources de la ville d'Ahfir à 12km de l'embouchure et rarement par le drainage de la nappe de Triffa à l'aval d'Ahfir. Son débit n'a jamais fait l'objet de mesures continues en raison de sa localisation frontalière. Cependant, des mesures de la crue du 17 novembre 1986 mentionnent un débit maximum de 120 m³/s enregistré au niveau de la station de Sidi M'barek (Latitude : 35°0'0"N ; Longitude : 2°10'85"W ; Elévation : 180 m) (ABHM). Actuellement, son embouchure est un plan d'eau séparé de la mer par une flèche sableuse développée d'Ouest en Est résultant du transit latéral dominant d'Ouest en Est (Irzi, 2002). Les crues de l'Oued Kiss sont généralement peu fréquentes et ne présentent pas un danger pour la plaine ; néanmoins celles survenues en mai 1963, en mars 2004, en octobre 2008, pendant l'hiver 2009 et en février et mars 2010 ont causé des inondations notables

dans les zones limitrophes de l'embouchure.

Quelques ouvrages de protection contre les risques hydrologiques sont édifîés le long de cette plaine comme le canal de drainage des eaux pluviales longeant le piedmont des Ouled Mansour. Ce canal est construit en 2008, et se compose de deux fossés longitudinaux, pour la collecte des eaux de la partie Est du plateau des Ouled Mansour, un fossé transversal pour l'évacuation des eaux acheminées par ces deux fossés, vers la mer Méditerranée et un fossé longitudinal pour la collecte des eaux de la partie Ouest et les évacuer vers Oued Moulouya.

3. Matériel et méthode

Les problèmes d'inondation de la plaine de Saïdia sont favorisés par son contexte géomorphologique. En effet, les inondations sont engendrées par les écoulements issus des ravins de la bordure escarpée des Ouled Mansour. Les bassins versants de ces falaises présentent de très fortes pentes, et génèrent des débits et volumes provoquant fréquemment des inondations (la moyenne de la charge annuelle est de 20 M m³/an). Les ravins qui découpent ces falaises ne montrent pas d'exutoires francs vers la mer et débouchent dans la plaine côtière de Saïdia avec des débits de l'ordre de 6,84 m³/s (ABHM). Sa situation géomorphologique entre

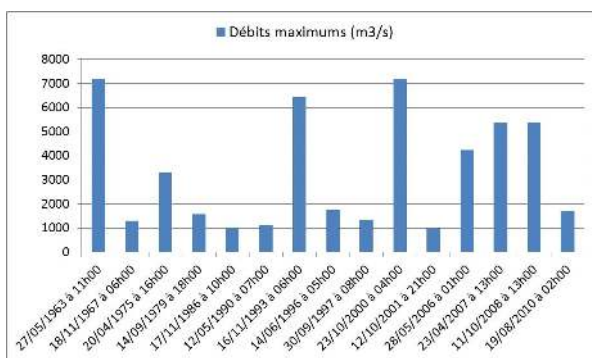


FIGURE 2 : Débits maximums enregistrés lors des dernières grandes crues de Oued Moulouya (Données de l'Agence du Bassin Hydraulique de la Moulouya, ABHM) à la station de Melg El Ouidane.

les Oueds Kiss à l'Est, et la Moulouya à l'Ouest favorise davantage les risques de crues brutales. En outre, la remontée de la nappe phréatique très peu profonde aggrave ces risques.

L'approche méthodologique, sur laquelle est fondée la cartographie des zones à risque d'inondation de la plaine côtière de Saïdia, présente l'avantage d'exploiter en synergie des données multisources. En effet, dans cette étude, la méthodologie adoptée est basée sur la structuration dans un système d'information géographique (SIG), de données interprétées à partir d'image GeoEye-1 du 20/04/2009, de produit dérivé d'un modèle numérique d'altitude (MNA) et des données exogènes (lithologie, niveau piézométrique de la nappe phréatique, etc.). Le traitement des données comporte différentes phases :

1. Traitement numérique de l'image satellitaire et cartographie thématique ;
2. Création d'un MNA et calcul des variables morphométriques ;
3. Intégration des données (carte thématique issue de traitement d'image, carte dérivée de MNA, données exogènes) et analyse spatiale dans un SIG.

L'utilisation conjointe de l'imagerie satellitaire et d'un MNA a permis de définir des descripteurs de vulnérabilité et d'aléa, dont la combinaison donne la carte des zones à risque d'inondation. Pour atteindre cet objectif, nous avons poursuivi les étapes de la méthodologie adoptée et schématisée sur la Figure 3.

3.1. Matériel

Dans cette étude, les données du satellite GeoEye-1 ont été choisies en raison de leur résolution spatiale et leurs qualités radiométriques. GeoEye-1 est le premier satellite d'une nouvelle génération de capteur de plus haute résolution spatiale des satellites commerciaux. Il fait partie d'une série de nouveaux satellites THR, capables de capturer des images panchromatiques de la

surface de la terre avec une résolution spatiale inférieure à 1 m et une résolution temporelle très courte, comme EROS B1, Resurs DK-1, KOMPSAT-2, IRS Cartosat 2, WorldView-1, IKONOS et QuickBird lancés entre 2006 et 2008. Les images de ces types de satellites ont été utilisées pour de nombreuses applications : la caractérisation du milieu urbain (Mesev, 2005), l'étude de la végétation (Kliparchuk et al., 2010), le suivi des catastrophes naturelles (Dennison et al., 2010) et la cartographie du littoral (Aguilar et al., 2011) et de la dynamique hydrologique (Dribault et al., 2012). Grâce à ces satellites commerciaux, la cartographie aérienne conventionnelle à grande échelle a commencé à avoir des concurrents. Croft (2008), Voisin (2012) et Aguilar et al. (2012) qualifient les capacités de GeoEye-1 de prodigieuses pour la génération des cartes d'occupation des sols.

Une scène GeoEye-1 a été acquise pour le littoral méditerranéen de Saïdia le 20 Avril 2009. Elle couvre environ 49 km². La scène comprend quatre bandes spectrales, avec des longueurs d'onde de 450-520 nm (bleu), 520-600 nm (vert), 625-695 nm (rouge) et 760-900 nm (proche infrarouge). Ces quatre bandes multispectrales ont une résolution spatiale d'environ 1,65 m (GeoEye, 2009). GeoEye-1 a également une bande de plus haute résolution panchromatique qui couvre une gamme spectrale de 450 à 900 nm avec une résolution spatiale de 0,5 m. Les images du satellite GeoEye-1 ont été choisies en raison de leur précision de positionnement de 3 m qui dépasse les autres satellites. Le produit livré était corrigé géométriquement par le fournisseur, mais l'inscription spatiale a été encore améliorée avec des points de contrôle prélevés sur le terrain à l'aide d'un GPS.

Une série de composition colorée des canaux multispectraux ont été réalisées en utilisant les systèmes de traitement d'image ER Mapper et PCI. L'égalisation de l'histogramme de fréquence est faite de façon manuelle sur les quatre canaux. La composition colorée 4-3-2 a été choisie, elle associe les bandes : proche infrarouge, rouge et verte du capteur aux couleurs rouge verte et bleue de l'écran. Elle est très efficace pour analyser la végétation et est souvent utilisée pour les applications en géologie.

Une série de documents cartographiques ont été géocodés et insérés dans des bases de données géoréférencées. Il s'agit de :

- Deux cartes topographiques Triffa et Saïdia du Kiss à l'échelle 1/50 000, dressées, dessinées et publiées par la Division de la Cartographie (Direction de la Conservation Foncière et des Travaux Topographiques) respectivement en 1965 et 1956.
- Une carte lithologique à l'échelle de 1/50 000, réalisée à partir de photographies aériennes noir et blanc de 1958, complétée par l'analyse des données des carottages réalisées par l'ABHM et les

investigations de terrain (Irzi, 2002).

- Une carte du niveau piézométrique du secteur d'étude à l'échelle de 1/50 000 (Melloul, 2007).

La nature lithologique, et la profondeur de la nappe ou l'épaisseur de la zone non saturée sont des paramètres fondamentaux de l'aléa inondation dans cette plaine. Le diagnostic de risque d'inondation exige une bonne compréhension du comportement hydrodynamique des sols et, en particulier, la capacité d'infiltration en fonction des types de sols. Selon Sabir et al. (2004), les données d'infiltration pour plusieurs types des sols dans des terrains d'occupations variées montrent que la vitesse d'infiltration peut être grossièrement corrélée avec la texture des sols. Ainsi, le taux d'infiltration est nettement corrélé aux caractéristiques des états de surface et à la teneur en sable de l'horizon superficiel (Garouani et al., 2005). En effet, la lithologie est un facteur important qui affecte le comportement hydrologique du sol et par conséquent l'aléa inondation, l'exposition aux inondations est d'autant plus élevée que le taux d'infiltration ou la perméabilité du sol est faible.

La profondeur de la nappe a aussi un rôle déterminant dans l'aléa inondation de la plaine côtière de Saïdia. La carte des profondeurs du plan d'eau est établie à partir des relevés du niveau statique relatifs aux puits de surface et aux piézomètres implantés dans la région (Melloul, 2007). La zone non saturée est un critère fondamental pour appréhender le temps de saturation de la nappe ainsi que le risque de la remontée de la nappe phréatique très peu profonde dans la plaine. En effet, la nappe est d'autant plus saturée que l'épaisseur de la zone non saturée est faible et que l'aléa inondation est fort.

3.2. Méthodologie

La démarche effectuée comporte différentes phases :

3.2.1. Traitement numérique de l'image satellitaire et cartographie de l'occupation du sol

L'analyse des différents travaux montre que l'occupation des terres est un paramètre entrant dans l'évaluation du risque inondation (Moussa et al., 2009), d'où l'intérêt des données de télédétection comme source d'information (Bui et Goïta, 2007; Puech, 1995). La première étape a consisté en un géoréférencement de l'image GeoEye-1 dans le système de coordonnées géographiques Merchich, en vue de faciliter l'exploitation des données existantes. Après rectification, les cartes topographiques traitées ont servi comme document de référence.

La deuxième étape est l'élaboration de la carte d'occupation du sol qui est effectuée par un traitement combiné qui comprend deux étapes :

Une photo-interprétation à partir de la composition colorée obtenue à partir des canaux PIR / rouge / vert (4-3-2) de l'image GeoEye-1 a été réalisée pour

identifier les différentes classes choisies de l'occupation du sol. Ainsi, douze classes ont été choisies : 1) surfaces urbanisées ; 2) voiries ; 3) cultures ; 4) broussailles ; 5) forêts ; 6) sables ; 7) sols nus ; 8) oueds ; 9) marais ; 10) plans d'eau ; 11) mer chargée ; 12) mer profonde. La différenciation entre les classes peut être effectuée suivant les signatures spectrales. La réflectivité de l'eau claire est globalement décroissante lorsque la longueur d'onde augmente et tend à s'annuler au-delà de la bande spectrale du rouge. Cependant, avec le changement de la turbidité de l'eau, la transmittance et la réflectance de l'eau changent nettement (Lillesand et Kiefer, 1994). En ce qui concerne la végétation, la chlorophylle absorbe l'énergie dans la gamme spectrale visible, avec l'augmentation de la longueur d'onde dans la section du proche infrarouge, la végétation reflète fortement l'énergie et montre une réflectance élevée. C'est pourquoi nous percevons la végétation comme étant rouge sur la composition colorée (4-3-2). La réflectance du sol nu dépend de l'humidité, du contenu organique, de la texture de sa composition et de la rugosité de surface. Généralement le sol nu présente un ton vert qui traduit la signature du minéral. Les surfaces urbanisées sont identifiables, grâce à leur forte réflectance dans le canal vert ce qui se traduit par un ton bleuté sur cette composition colorée. Cette photo-interprétation a été validée par de nombreuses investigations de terrain.

Sur la base de cette photo-interprétation et compte tenu de la connaissance du terrain une classification supervisée par le maximum de vraisemblance a été réalisée. La classification consiste à regrouper dans une même entité ou classe, tous les pixels similaires sur la base d'une ressemblance de propriétés (attributs spectral et spatial), tout en respectant leur position spatiale. C'est une méthode statistique basée sur une mesure de similarité probabiliste (Khedam, 2008). Dans cette approche, l'utilisateur intervient dès le début du processus de classification. A partir d'une connaissance a priori, il procède à une phase d'entraînement pour la localisation et la caractérisation thématique des classes de l'image. Cette caractérisation est effectuée en se servant de certains échantillons de chacune de ces classes. Le nombre de signatures numérisées représente le nombre de classes de la carte thématique finale. Le nombre de pixels de l'échantillon d'une classe doit être suffisant pour calculer les statistiques (>100 pixels/classe). Cette étape nécessite beaucoup de précautions, les signatures numérisées doivent présenter, sur l'image, la couverture la plus homogène possible, afin d'éviter des regroupements incohérents. La classification consiste alors à affecter à chaque pixel de l'image la classe thématique la plus adaptée selon un modèle décisionnel approprié.

La carte thématique obtenue est validée par rapport à la réalité de terrain. Ainsi, le contrôle de la classification

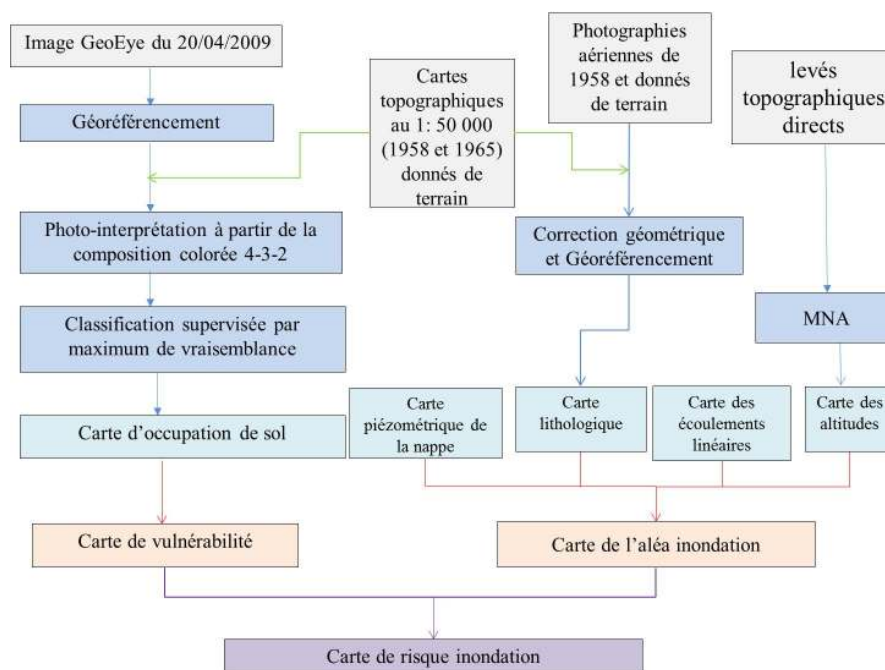


FIGURE 3 : Organigramme des différentes étapes de la méthode.

a été réalisé sur base d'un échantillon de pixels vérifié sur le terrain. Les données de la matrice de confusion croisant les données classées et les relevés sur le terrain ont été satisfaisantes (Tableau 1). L'analyse de cette matrice révèle que la précision globale du traitement est de l'ordre de 90% (nombre de pixels correctement classifiés / nombre total des pixels) et le coefficient Kappa correspond à 0,88. Donc l'approche méthodologique pour la classification de l'image (maximum de vraisemblance) peut être considérée comme globalement acceptable même s'il y a des erreurs d'affectation de certains pixels. Une légère erreur affecte les classes : sols nus (75%), broussailles (57%) et mer chargée (75%). L'analyse de la matrice de confusion montre que cette confusion spectrale a été engendrée par la proximité de la réponse spectrale de deux thèmes : sol nu / broussailles et mer chargée / mer profonde.

3.2.2. Création d'un MNA et calcul des variables morphométriques

Le MNA est une représentation numérique du terrain en terme d'altitude ; il fournit des renseignements sur la forme et la position de la surface topographique [Charleux, 2001]. L'utilisation des MNA en géologie et en géomorphologie permet la cartographie de certains paramètres morphométriques du paysage telles que la pente, l'exposition, la convexité horizontale, les altitudes, etc. (Defontaine, 2000). Les MNA sont habituellement dérivés à partir de trois sources principales : les levés topographiques directs, les photographies aériennes et la numérisation des cartes topographique. Le choix d'une de ces méthodes dépend, principalement, de

l'étendue de la zone considérée et des exigences de précision. Pour la plaine de Saïdia, les faibles altitudes et l'étendue restreinte de la plaine exigent une résolution élevée du MNA. Dans la présente étude, le MNA est dérivé de l'interpolation par la méthode IDW (Inverse Distance Weighted : Distance Inverse pondérée) des points acquis par des levés topographique directs sur terrain. Cette méthode est plus adaptée à l'interpolation des MNA, c'est une technique numérique simple et courante. Elle considère l'altitude d'un point comme une combinaison linéaire des altitudes aux points de mesure qui l'entourent, pondérées par l'inverse de la distance séparant ces derniers de la position où l'interpolation doit avoir lieu. La fiabilité de cette interpolation dépend du nombre et de la position relative des points de mesure pris en compte. Dans le but de réduire le temps de traitement, certains algorithmes n'utilisent que le nombre de ces points dans la procédure de recherche des voisins. Cependant, ce critère n'assure pas une répartition spatiale homogène des points de mesure, en général, cette méthode fournit des résultats fiables dans la plupart des cas (Burrough, 1996).

Les levés topographique sont réalisés à l'aide d'une station totale (Leica GPS System 1200), dont le degré de précision fabricant est de l'ordre de $\pm 0,2$ mm et $0,2$ degré avec une distance maximale de mesure d'environ 1800 m. Les levés ont été effectués en semis de points à maillage régulier avec une mesure tous les 25m. L'ensemble des mesures a été réalisé avec une précision décimétrique, La marge d'erreur en distance et altitude a été estimée à ± 3 cm et $0,0015^\circ$ en direction. À partir de MNA, on procède via le logiciel ArcGIS à la création de la

Classes	Sites de vérifications												Nombre de points classés	Précision réalisateur (%)	Précision utilisateur (%)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
1 Surfaces urbanisées	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	100	100
2 Voiries	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	100	100
3 Cultures	0	0	9	1	0	0	2	0	0	0	0	0	12	100	75
4 Broussailles	0	0	0	8	0	0	2	0	0	0	0	0	10	57,14	66,67
5 Forêts	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	6	100	100
6 Sables	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	6	100	100
7 Sols nus	0	0	0	2	0	0	5	0	0	0	0	0	7	75	75
8 Oueds	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	8	100	100
9 Marais	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	6	100	100
10 Plans d'eau	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	5	100	100
11 Mer chargée	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	6	75	100
12 Mer profonde	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	11	13	100	87,5
Nombre de points choisis	6	5	9	11	6	6	9	8	6	5	8	11	90	90	90

TABLE 1 : Evaluation statistique de la classification de l'image GeoEye-1 du 20/04/2009.

carte des altitudes.

3.2.3. Fusion des informations dans un SIG et réalisation de la carte du risque inondation

Le risque inondation est défini comme la combinaison de l'aléa et de la vulnérabilité (Dauphiné, 2001). L'aléa désigne la probabilité d'occurrence dans une région ou au cours d'une période donnée d'un phénomène pouvant engendrer des dommages [ONUG/DHA, 1992]. Il est défini par une probabilité qui prend en compte l'occurrence et l'intensité du phénomène considéré, la durée de l'événement et l'espace considéré (Dauphiné, 2001). « La vulnérabilité, au sens le plus large, exprime les niveaux de conséquences prévisibles d'un phénomène naturel sur les enjeux » (Dauphiné, 2001). Les enjeux sont les domaines affectés par les risques, c'est-à-dire les hommes, leurs biens et les milieux dans lesquels ils vivent (Vanpeene, 2003).

Dans ce travail, L'analyse spatiale multicritère, réalisée dans un SIG à l'aide du logiciel ArcGis, a permis d'élaborer la carte de l'aléa inondation ainsi que celle de la vulnérabilité. Cette méthode d'analyse permet de combiner plusieurs critères, de différente nature. En conséquence, elle est apte à l'association des caractéristiques de nombreuses couches dans une seule couche. Habituellement, les valeurs numériques sont attribuées à chaque caractéristique, ce qui permet l'association mathématique des couches et l'attribution d'une nouvelle valeur à chaque cellule dans la couche en sortie.

De ce fait, la réalisation de la carte du risque inondation comporte deux étapes :

1. La cartographie de l'aléa inondation, on se basant sur les principaux facteurs suivant : le niveau piézométrique de la nappe, le réseau hydrographique, les altitudes et la lithologie. Ces fac-

teurs sont considérés comme ayant la même importance et, par conséquent, interviennent avec la même pondération lors des croisements dans le SIG.

2. La cartographie de la carte de vulnérabilité qui dans ce secteur fait référence aux différentes classes d'occupation de sol. La combinaison de ces deux cartes a permis d'élaborer la cartographie des zones à risque inondation.

4. Résultats et discussion

4.1. Cartes des facteurs à l'origine des inondations

Le traitement des données relatives aux différents facteurs à l'origine des inondations dans la plaine côtière de Saïdia a conduit à établir les cartes thématiques afférentes : la carte des altitudes (Figure 4), la carte des zones d'influence des cours d'eau (Figure 5), la carte des niveaux piézométrique (Figure 6) et la carte lithologique (Figure 7), dont la combinaison avec une même pondération dans le SIG permet l'élaboration de la carte de l'aléa inondation (Figure 8).

Des classes de faible, moyenne, forte et très forte exposition à l'inondation sont définies pour chaque carte en se référant aux zones d'enneigement de la plaine observées sur le terrain :

- La carte des altitudes : très forte (0-1 m) ; forte (1-4 m) ; modérée (4-6 m) et faible (> 6 m).
- La carte des niveaux piézométrique : très forte (0,08-1 m) ; forte (1-2 m) ; modérée (2-4 m) et faible (> 4 m).
- La carte lithologique : très forte (R1, R2, R3, R4) où le sol est formé par des dépôts d'argile fins qui sont imperméables à l'eau ; forte (R5) le sol de cette dépression est formé par des dépôts argileux fins avec des intercalations de gypse ; la classe modérée représentée par C1, C2, et C3 avec un

sol moyennement perméable constitué par des dépôts sableux légèrement encroûtés et la classe faible correspond à C4 et C5 formés par un dépôt sableux meubles perméable.

Le lit majeur et mineur d'Oued Moulouya et les ravins des Ouled Mansour sont cartographiés sur la carte des zones d'influence des cours d'eau à partir des photographies aériennes et des cartes topographiques. À partir des données de précipitations de la période (1963-2011) la moyenne annuelle des précipitations de la plaine est calculée (321 mm).

5. Carte de l'aléa inondation

La carte de l'aléa inondation a mis en évidence quatre zones dont l'aléa inondation varie de faible à très fort (Figure 8) :

1) les zones de faible aléa inondation, occupent 11% de secteur d'étude. Elles sont caractérisées par de fortes altitudes généralement supérieures à 10 m sauf pour le site à l'Ouest de la plaine qui présente des valeurs comprises entre 6 et 10 m. Cette classe est marquée par des profondeurs de la nappe supérieures à 4 m, et sa lithologie est formée par les différents types du sol de la plaine.

2) les zones d'aléa inondation modéré occupent 32% du secteur étudié. Ces zones sont généralement marquées par des altitudes moyennes (4-6 m), à l'exception de certains sites à l'Est de la plaine qui s'étalent sur des profondeurs comprises entre 6 et 10 m. Les profondeurs de la nappe sont supérieures à 2 m. Ce secteur est constitué de dépôts d'argiles fins et de dépôts sableux légèrement encroûtés, et dans certains endroits par des dépôts sableux meubles. Dans ces deux classes de la carte de l'aléa inondation la lithologie semble avoir un rôle secondaire vu l'importance des altitudes et de la profondeur de la nappe favorisant un écoulement rapide des eaux et l'absence de risque d'affleurement de la nappe phréatiques.

3) les zones de fort aléa inondation couvrent une grande partie du site (42%) de la plaine, et sont caractérisées par de faibles altitudes (1-4 m) et des profondeurs de la nappe variant entre 0 et 4 m. Au niveau de C4, C5 et R5 la profondeur de la nappe est inférieure à 1 m ce qui rend ces zones prédisposées à l'inondation même si le sol est composé de dépôts sableux meubles pour C4 et C5. Les zones de cette classe qui sont situées sur C2 et C3 avec un sol moyennement perméable coïncident avec des profondeurs de la nappe variant entre 1 et 2 m. les zones à forte aléa inondation qui sont situées sur R1 coïncident avec des profondeurs de la nappe qui varient entre 2 et 4 m mais l'imperméabilité du sol qui est composé par des dépôts d'argiles fins augmente l'exposition de ces zones aux inondations. De plus cette zone reçoit la majorité des eaux des petits ravins de Ouled Mansour ce qui

augmente l'aléa inondation dans ce secteur. Les zones de fort aléa inondation sont représentées également aux abords de Oued Moulouya où le sol est formé par des dépôts de vase.

4) les zones de très fort aléa inondation, couvrent 15% de la zone d'étude, et elles sont caractérisées par les plus faibles altitudes du secteur (0-1 m) et par des profondeurs de la nappe inférieures à 2 m. Cette classe correspond aux zones d'influence d'Oued Moulouya et des petits ravins des Ouled Mansour, ainsi qu'aux dépressions inscrites dans la plaine. Une grande partie des zones à très forte exposition à l'inondation sont situées sur la dépression intercordons (R3) qui est formée par des dépôts d'argile fins, et qui reçoit une bonne partie des eaux des petits ravins des Ouled Mansour.

5.1. Carte de vulnérabilité

Dans ce travail, la carte de vulnérabilité fait référence à la carte de l'occupation de sol. En effet, l'état de surface est un facteur important qui affecte le comportement hydrologique du sol. La forêt, par exemple, intercepte une partie de la pluie par sa frondaison et exerce une action limitatrice importante sur le ruissellement superficiel. Elle régularise le débit des cours d'eau et amortit les crues de faible et moyenne amplitude (Saley et al., 2005). A l'inverse, le bétonnage et l'extension de l'habitat entraînent une élimination du couvert végétal et une perte de la protection en surface, par réduction des vitesses d'infiltration, de transmissivité, et de stockabilité (Hingray et al., 2000; Garouani et al., 2005).

Dans ce travail, l'analyse et la classification dirigée de l'image satellitaire GeoEye-1 a permis d'identifier douze classes d'occupation de sol (Figure 9) : 1) surfaces urbanisées ; 2) voiries ; 3) cultures ; 4) broussailles ; 5) forêts ; 6) sables ; 7) sols nus ; 8) oueds ; 9) marais ; 10) plans d'eau ; 11) mer chargée ; 12) mer profonde. L'agglomération urbaine couvrant 662 ha du secteur d'étude, se répartit d'une manière désordonnée, mais généralement elle a une tendance à se développer dans deux directions principales. La plus importante progresse à l'Ouest de la ville en direction de l'embouchure de la Moulouya, où l'on enregistre un phénomène de littoralisation, surtout avec l'implantation de la station balnéaire "Mediterranea-Saïdia" sur la frange littorale. L'autre direction est vers le Sud dans l'arrière-pays de la plaine. Cette urbanisation de la plaine littorale souvent non contrôlée, accentue de plus en plus le risque de ruissellement sur des surfaces dont la majorité sont imperméables. Les zones agricoles occupent 1312 ha de la plaine, elles sont situées dans l'arrière-pays et le long des deux rives de l'Oued Moulouya, et elles sont représentées principalement par la culture céréalière (70%). Les marais avec une superficie de 372 ha occupent une grande partie de la rive droite de la Moulouya. La forêt de genévrier rouge de Tazegarte ne s'étale actuellement que sur une étendue de 245 ha après

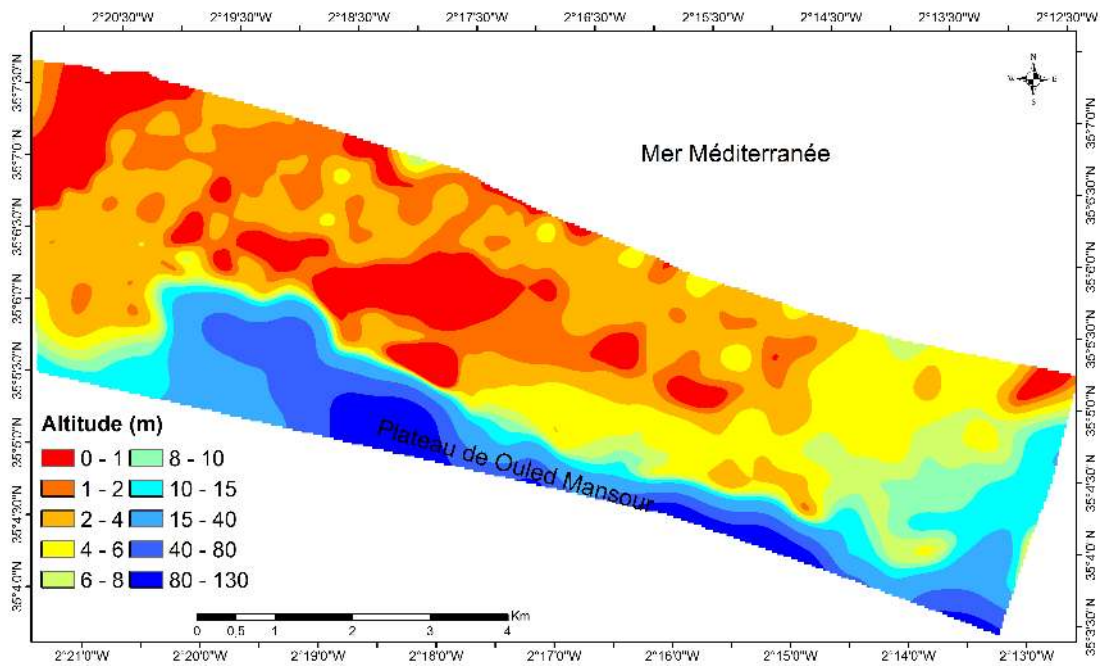


FIGURE 4 : Carte des altitudes de la plaine côtière de Saïdia.

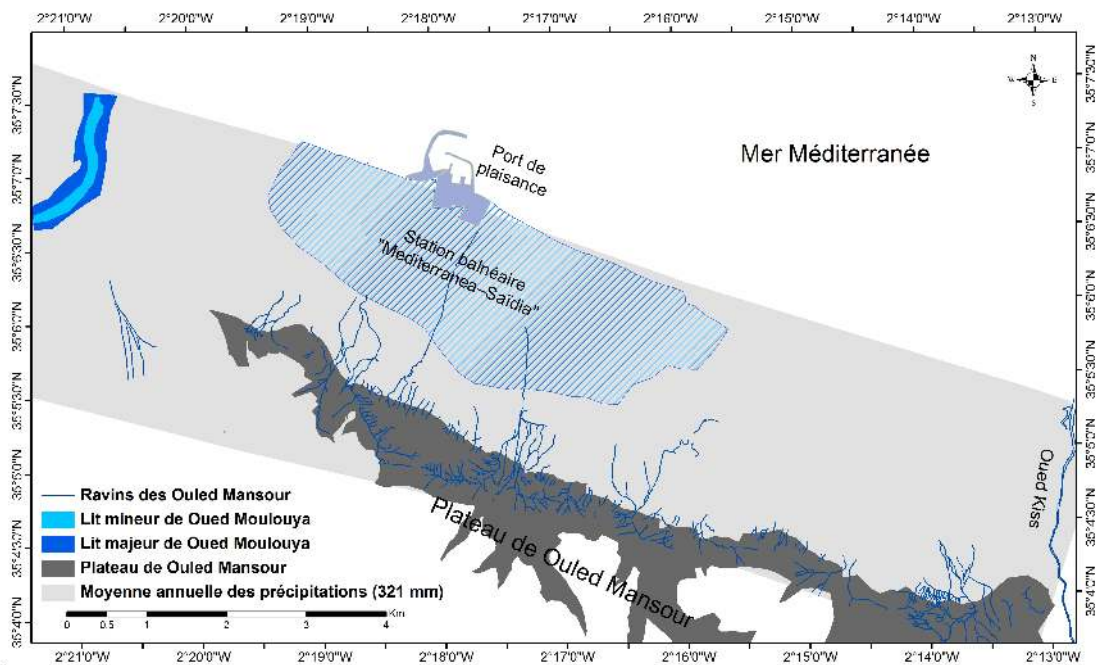


FIGURE 5 : Carte des écoulements linéaires sur la plaine côtière de Saïdia.

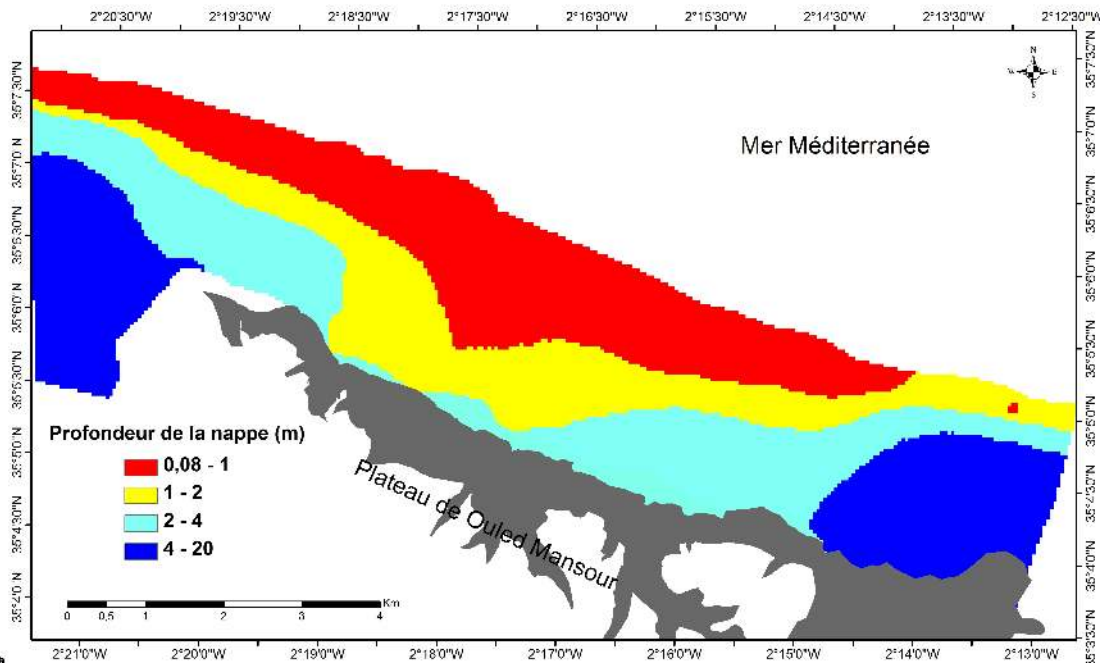


FIGURE 6 : Carte piézométrique de la plaine côtière de Saïdia (Melloul, 2007).

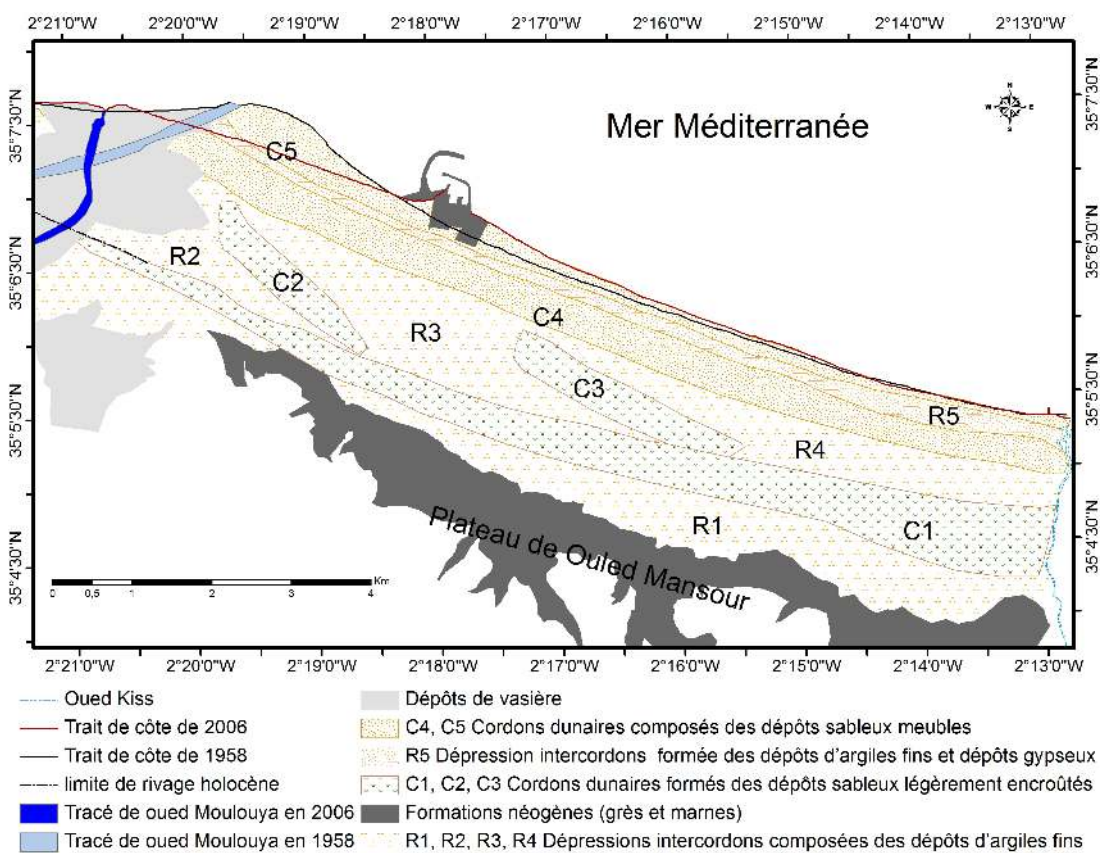


FIGURE 7 : Carte lithologique de la plaine côtière de Saïdia (Irzi, 2002).

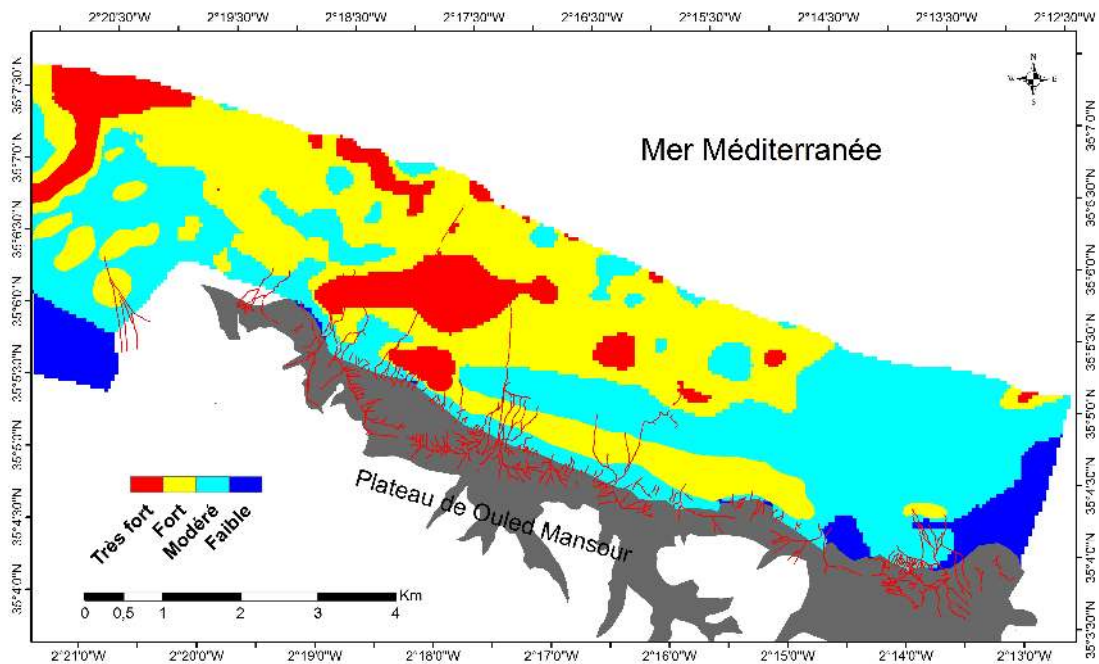


FIGURE 8 : Carte de l'aléa inondation de la plaine côtière de Saïdia.

sa destruction lors de l'aménagement du complexe touristique Méditerranée-Saïdia. Les plans d'eau sont localisés au niveau de l'embouchure de la Moulouya sur des dépôts de vase et également dans certains sites de la nouvelle station balnéaire qui correspond à la dépression interdunaires R3 formée par des argiles fines.

Ces différentes classes d'occupation de sol sont regroupées selon la sensibilité de l'écosystème, ou plus généralement du milieu, à l'aléa inondation. Quatre classes de vulnérabilité sont définies (Figure 10) :

- Vulnérabilité faible regroupant la forêt, les broussailles et les sols nus.
- Vulnérabilité modérée constituée par les marais et les sables.
- Vulnérabilité forte représentée par les zones agricoles.
- Vulnérabilité très forte par les surfaces urbanisées, les voiries et les plans d'eau dont la majorité sont inclus dans des zones touristiques très fréquentées.

5.2. Carte de risque inondation

Le croisement de ces deux cartes relatives à la vulnérabilité et à l'aléa inondation selon le tableau 2, produit la carte de risque inondation (Figure 11).

Cette carte thématique présente quatre classes dont le risque varie de faible à très fort :

1) Les zones de faible risque inondation présente 10% de la plaine de Saïdia et correspondent aux zones

à aléa modéré et de vulnérabilité faible. Elles sont situées sur les dunes littorales qui coïncident avec des quartiers de la ville de Saïdia où il y a des plantations d'Eucalyptus (forêt), des broussailles et des sols nus, et avec quelques sites de la nouvelle station touristique "Méditerranée-Saïdia" occupées principalement par la forêt de genévrier.

2) Les zones à risque inondation modéré couvrent 16% du site d'étude. Elles sont localisées dans des zones de vulnérabilité faible, moyenne, forte, et très forte couvrant des zones à aléa faibles, modéré et fort. Ces zones correspondent à des sites des quartiers de la ville de Saïdia où l'aléa inondation est faible et modéré, et à des parties du complexe touristique situées dans les secteurs à aléa élevé, ayant des altitudes comprises entre 2 et 4 m, et caractérisés par un couvert végétal moyennement dense (juniperaies, broussailles), et également au niveau des marais qui se localisent sur des zones à aléa inondation modéré et élevé, et les cultures qui coïncident avec des zones à aléa modéré.

3) Les zones à risque fort couvrent 31% du territoire et s'étalent principalement sur des zones à forte vulnérabilité qui coïncident avec des zones à aléa fort, et sur des sites à faible vulnérabilité représentés par les sols nus situés sur la dépression au pied de la falaise (ATE). Cette classe correspond en majeure partie aux zones des cultures irriguées situées sur la rive droite de la Moulouya, et aux zones de dépression situées au pied des falaises des Ouled Mansour représentée par les cultures céréalières, et occupées par plusieurs groupements d'habitat de la ville de Saïdia.

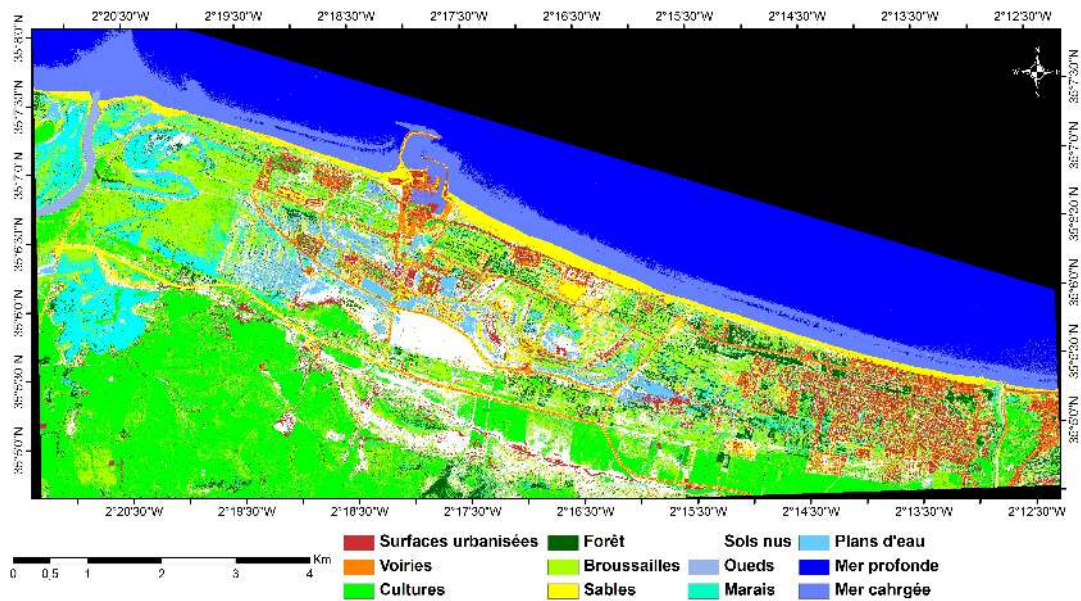


FIGURE 9 : Carte d'occupation de sol de la plaine côtière de Saïdia.

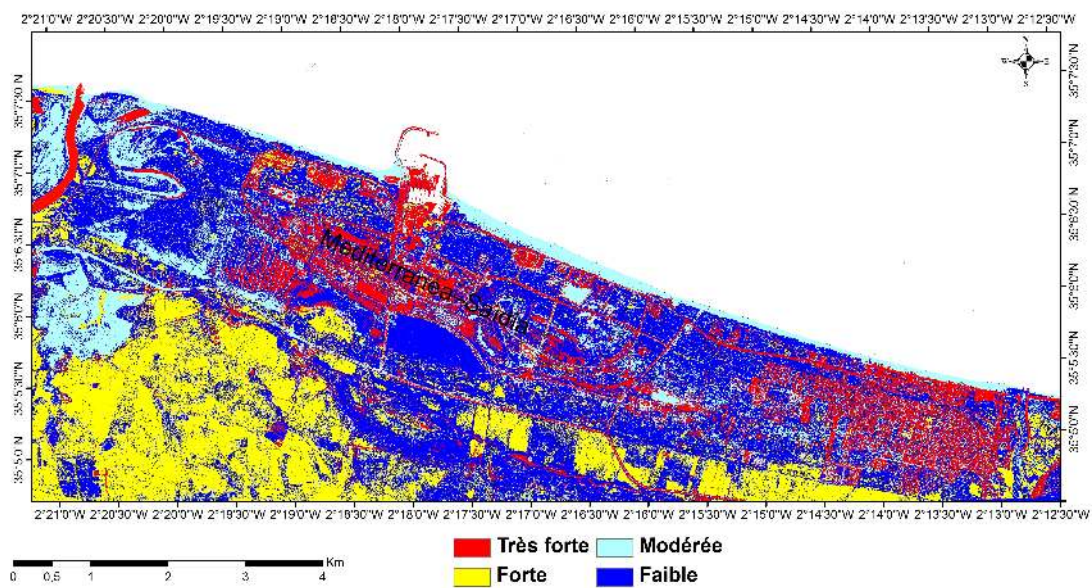


FIGURE 10 : Carte de vulnérabilité de la plaine côtière de Saïdia.

	Aléa Faible	Aléa Modéré	Aléa Fort	Aléa Très Fort
Vulnérabilité Faible	RF	RF	RM	RE
Vulnérabilité Modérée	RF	RM	RM	RE
Vulnérabilité Forte	RM	RM	RE	RTE
Vulnérabilité Très Forte	RM	RTE	RTE	RTE

TABLE 2 : Caractérisation du risque inondation. RF : risque faible ; RM : risque moyenne ; RE : risque élevé ; RTE : risque très élevé.

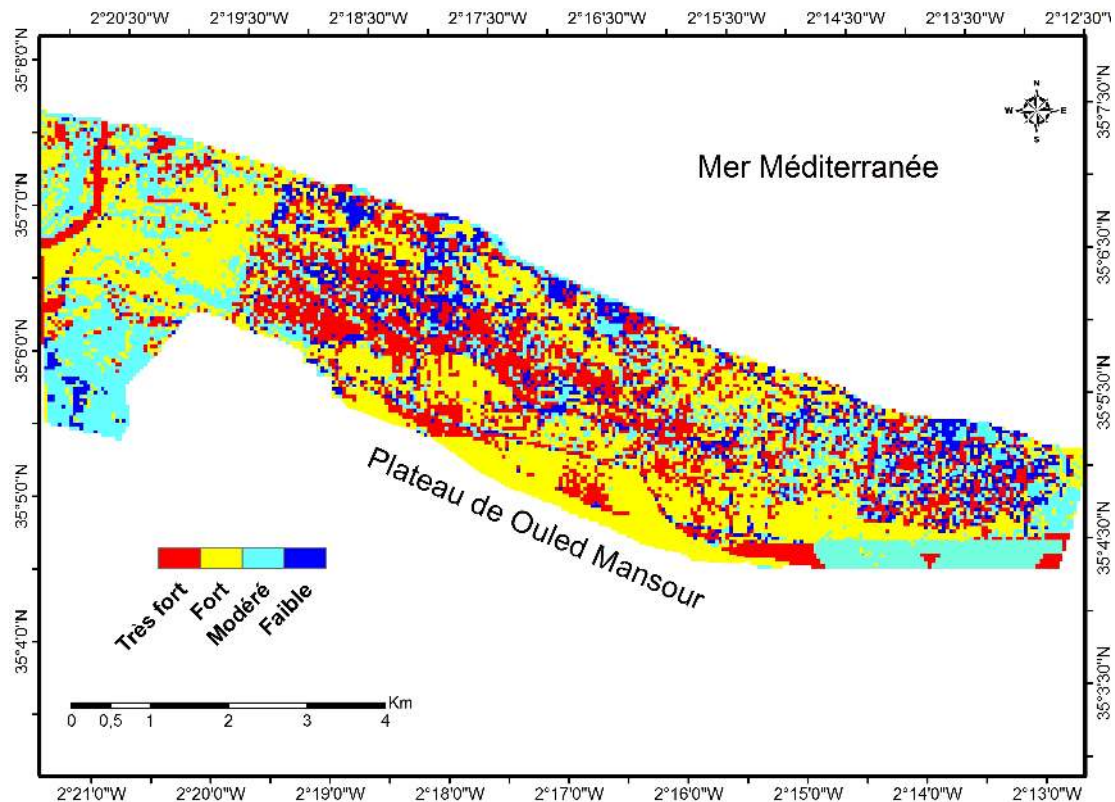


FIGURE 11 : Carte de risque inondation de la plaine côtière de Saïdia.

4) Les zones à très fort risque couvrent 43% de la plaine, et correspondent aux zones de vulnérabilité très élevée qui s'étalent sur des surfaces à aléa modéré, fort et très fort. Ces surfaces se trouvent aux abords d'Oued Moulouya, au niveau de quelques points des quartiers de la ville de Saïdia et en grande partie sur une vaste surface occupée par la nouvelle station balnéaire "Mediterranea-Saïdia", située sur les dépressions interdunaires avec un aléa inondation fort à très fort.

6. Conclusion

Cette étude montre l'importance de l'utilisation conjointe d'une image satellitaire de haute résolution et d'un MNA pour cartographier les zones à risque inondation. En effet, la carte thématique de risque inondation constitue une carte essentielle pour la planification raisonnée des aménagements et des interventions de la plaine côtière de Saïdia. Cette carte montre que 43% de la surface de la plaine est menacée par un très fort risque inondation. Elle englobe une vaste surface occupée par la nouvelle station balnéaire "Mediterranea-Saïdia". Ces secteurs récemment aménagés nécessitent des programmes de défense et de contrôle régulier afin d'assurer la protection et la sécurité de la population, des ouvrages et des infrastructures de la plaine.

Il est certain que les interventions anthropiques dans les

plaines côtières basses très sensibles aux risque d'inondation nécessitent des études de base assez rigoureux afin d'éviter leurs altérations irréversibles. La carte thématique de risque inondation constitue un des outils essentiels d'aide à la décision des acteurs pour assurer une valorisation économique durable et une préservation des ressources naturelles vulnérables de cette plaine littorale contenant la zone humide méditerranéenne de la Moulouya.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier le programme institutionnel P3 de la Coopération Universitaire de Développement belge (CUD) avec l'Université Mohammed Premier (UMP) d'Oujda, pour le financement de l'acquisition de l'image satellite GeoEye-1 du 20/04/2009. Nous n'oublions pas aussi les évaluateurs pour leurs critiques constructives qui ont permis d'améliorer de façon significative cet article. Ce travail a bénéficié également de la contribution du Professeur Hassan TABYAOUI de la Faculté Polydisciplinaire de Taza.

Références

Aguilar M.Á., Aguilar F.J., Fernández A., Fernández I., Saldaña M, García Lorca A.M., Negreiros J.G., Viciano A., González

- E., 2011. Geometric processing of GeoEye-1 satellite imagery for coastal mapping applications. Dans : Proc. IM-ProVe, International conference on Innovative Methods in Product Design, June 15 – 17, 2011, Venise, Italie, pp. 938–946.
- Aguilar M.A., Vicente R., Aguilar F.J., Fernández A., Saldaña M., 2012. Optimizing object-based classification in urban environments using very high resolution GeoEye-1 imagery. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences I-7 :99–104.
- Ancey C., 2005. Une introduction à la Dynamique des Avalanches et des Écoulements Torrentiels. Cours de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, <http://www.toraval.fr/articlePDF/intro-risk.pdf>.
- Barroca B., 2006. Risque et vulnérabilités territoriales, les inondations en milieu urbain. Thèse de doctorat, Université de Marne-La-Vallée, Paris, 317 p.
- Berz G., 2000. Flood disasters : lessons from the past - worries for the future. Dans : Proc. ICE - Water and Maritime Engineering, n°142, pp. 3–8.
- Bouabdallah M., Larue, J-P., 2009. Évolution du littoral de la baie de Saïdia : dynamique naturelle et impacts des aménagements (Maroc oriental), *Physio-Géo* n° 3, pp. 113–130.
- Boumeaza T., 1998. Morphologie et évolution du delta et du littoral de la basse Moulouya, Maroc Nord-Oriental : apport des images aéroportées et satellitaires. *Géo-observateur* n° 8, pp. 65–77.
- Bui D-V., Goïta K., 2007. Utilisation d'images satellitaires pour l'étude du risque d'inondation lié à l'occupation des terres au Nord de Viêt-nam. *Télé-détection* 7(1-2-3-4) : 203–215.
- Burrough P.A., 1986. Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. Oxford science publications. Monographs on soil and resources survey n° 12, 193 p.
- Charleux D., 2001. Qualité des modèles numériques de terrain pour l'hydrologie, application à la caractérisation du régime de crues des bassins versants. Thèse de doctorat de l'Université Marne-la-Vallée, France, 350 p.
- Croft J., 2008. Prodigious Mapping Capabilities, Spatial resolution and Geo-location ability, GeoEye's next-generation Imaging Satellite. *Geoinformatics* 4 :18–23.
- Dauphiné A., 2001. Risques et catastrophes : observer-spatialiser-comprendre-gérer. Armand Colin, Paris, France, 288 p.
- Deffontaines B., 2000. Formes et déformations de la surface terrestre : approche morphométrique et application. Mémoire d'Habilitation à Diriger la Recherche, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France, 65 p.
- Dennison P.E., Brunelle A.R., Carter V.A., 2010. Assessing canopy mortality during a mountain pine beetle outbreak using GeoEye-1 high spatial resolution satellite data. *Remote Sensing of Environment* 114(11) : 2431–2435.
- Dribault Y., Chokmani K., Bernier M., 2012. Monitoring seasonal hydrological dynamics of minerotrophic peatlands using multi-date GeoEye-1 very high resolution imagery and Object-Based Classification. *Remote Sensing* 4(7) : 1887–1912.
- Garouani A-K., Merzouk A-A., Jabrane R., Boussema M-R., 2005. Analyse spatiale de l'érosion en nappe de l'infiltrabilité des sols dans le pré-rif marocain. *Télé-détection* 5(1-2-3) : 69–80.
- GeoEye, Inc., 2009. GeoEye Product Guide. URL : http://www.geoeye.com/CorpSite/assets/docs/brochures/GeoEye_Product_Guide.pdf (Accès le 21 décembre 2011).
- Gigout M., Mourtier F., Raynal R., 1957. Sur le quaternaire récent dans la région de la basse Moulouya, coupe-type du quaternaire récent marocain. CR., somm. séances Soc. Géol. Fr., n° 6, pp. 101-103.
- Hingray B., Bouvier C., Desbordes M., Cappelaere B., 2000. Inondation urbain : un indicateur géométrique caractéristique de comportement hydraulique de bâti. *Science de l'eau* 13(1) :85–100.
- Hostache R., 2006. Analyse d'images satellites d'inondation pour la caractérisation tridimensionnelle de l'aléa et l'aide à la modélisation hydraulique. Thèse de doctorat de l'Ecole Doctorale "Sciences de la Terre et de l'Eau", Montpellier, France, 215 p.
- Irzi Z., 2002. Les environnements du littoral méditerranéen du Maroc compris entre l'oued Kiss et le Cap des Trois Fourches : dynamique sédimentaire et évolution et écologie des Foraminifères benthiques de la lagune de Nador. Thèse de doctorat de l'Université Med 1er, Oujda, Maroc, 291 p.
- Khedam R., 2008. Contribution au développement de méthodologies de fusion /classification contextuelles d'images satellitaires multi-sources. Application à la cartographie thématique du milieu urbain de la ville d'Alger. Thèse de doctorat de l'Université Houari Boumediene, Alger, Algérie, 200 p.
- Kliparchuk K., Collins D., Taylor C., 2010. Evaluation of stereoscopic GeoEye-1 satellite imagery to assess landscape and stand level characteristics. Rapport Technique n° TP-041/2010 du Ministère des Forêts de Colombie Britannique, Canada.
- Laaouina A., 1990. Le Maroc nord oriental : reliefs, modelés et dynamique du calcaire. Pub. Rec. Univ., Oujda, n° 1, 605 p.
- Lillesand, T.M., Kiefer, R. W., 1994. Remote Sensing and Image Interpretation. 3rd ed., John Wiley & Sons, New York, Etats-Unis, 750 p.
- Melloul A., 2007. Etude d'impacts naturels et anthropiques sur l'évolution de la minéralisation de la nappe côtière de Saïdia par le biais d'une approche multidisciplinaire, couplée à un essai de modélisation et une cartographie de la vulnérabilité environnementale. Thèse de doctorat de l'Université Med 1er, Oujda, Maroc, 170 p.
- Mesev V., 2005. Identification and characterisation of urban building patterns using IKONOS imagery and point-based postal data. *Computers, Environment and Urban Systems* 29 :541–557.
- Moussa I-B., Maïga O-F., Abouta J-M-K., Sarr B., Descroix L., Adamou M-M., 2009. Les conséquences géomorphologiques de l'occupation du sol et des changements climatiques dans un bassin-versant rural sahélien. *Sécheresse* 20(1) :145–152.
- Mouzouri M., Irzi Z., 2011. Évolution et morpho-dynamique de la plaine côtière de Saïdia (littoral méditerranéen du Nord-Est du Maroc) durant la période 1958-2006. *Bulletin de l'Institut Scientifique, section Sciences de la Terre*, n°33, pp. 67-78.
- Onana V-P., Rudant J-P., Etouna J., Souleye W., 2005. Dynamique urbaine à l'aide d'image RSO de ERS et HRV de SPOT, et son impact dans les facteurs d'aggravation des risques d'inondation en milieu urbain : cas de la ville de Douala (Cameroun). *Télé-détection* 5(1-2-3) :19–32.
- ONUG/DHA, 1992. Glossaire international multilingue agréé de termes relatifs à la gestion des catastrophes, <http://WWW.unisdr/glossaire.html>, 98 p.
- Pottier N., 1998. L'utilisation des outils juridiques de prévention des risques d'inondation : évaluation des effets sur l'homme et l'occupation des sols dans les plaines alluviales (application à la Saône et à la Marne). Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, 436 p.
- Puech C., 1995. Suivi des inondations en Afrique du Nord à l'aide de la télé-détection satellitaire. Dans : 9ème Conférence régionale Afro-asiatique de la CIID, Alger, Algérie.
- Raclot D., 2003. Méthodologie d'exploitation quantitative des

- photographies aériennes d'inondation de plaine. Thèse de doctorat de l'École Doctorale "Sciences de la Terre et de l'Eau", Montpellier, France, 284 p.
- Sabir M., Barthes B., Rosse E., 2004. Recherche d'indicateurs des risques de ruissellement et d'érosion sur les principaux sols des montagnes méditerranéennes du Rif occidental (Maroc). *Sécheresse* 15(1) :105–110.
- Sadki R., 1996. Evolution spatiale et temporelle de la salinisation dans la nappe côtière de Saïdia. Thèse de l'Université Med 1er, Oujda, Maroc, 80 p.
- Saley M-B., Kouamé F-K., Penven M-J., Biémi J., Kouadio H-B., 2005. Cartographie des zones à risque d'inondation dans la région semi-montagneuse à l'ouest de la Côte d'Ivoire : apports des MNA et de l'imagerie satellitaire. *Téledétection* 5(1-2-3) : 53–67.
- Salmon M., Sbaï A., Boumeaza T., Benata M., Ozer A., 2010. L'érosion des côtes meubles de l'extrême nord-est du Maroc. *BSGLg*, Liège, Belgique, n° 54, pp. 97–106
- Snoussi M., Ouchani T., Niazi, S., 2008. Vulnerability assessment of the impact of sea level rise and flooding on the Moroccan coast : The case of the Mediterranean Eastern zone. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 77(2) :206–213.
- Tesson M., Genssous B., 1979. Les sédiments superficiels du plateau continental du Rif Oriental. *Mines, Géol. Energ.*, n°46, pp. 117–125.
- Vanpeene S., 2003. Evaluation des risques environnementaux pour la gestion durable des espaces : synthèse des concepts de l'écologie du paysage. Dans : Journées de l'association internationale pour l'écologie du paysage, Gap, France, 8-10 octobre 2003, pp. 9–19.
- Voisin A., 2012. Classification supervisée d'images d'observation de la terre à haute résolution par utilisation de méthodes markovienne. Thèse de doctorat de l'Université de Nice – Sophia Antipolis, Nice, France, 174 p.
- Zarki H., 1999. Evolution de la sédimentation fluviale en basse Moulouya (Maroc) au cours de l'Holocène. Thèse de doctorat de l'Université Mohammed Ben Abdellah, Fès, Maroc, 370 p.
- Zourarah B., 1995. La zone littorale de la Moulouya (Maroc Nord-Oriental). Transits sédimentaires, évolution morphologique, géochimie et état de la pollution. Thèse de doctorat, de l'Université Mohammed V, Rabat, Maroc, 197 p.