

# Cartographie de la concentration des sédiments côtiers par imagerie satellitaires et étude des lidars bathymétriques

D. Djellal, B. Lounis, A. Belhadj-Aissa

Laboratoire de Traitement d'Images et Rayonnement (LTIR). Faculté d'Electronique et d'Informatique (FEI).  
Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, BP. 32, El Alia, Bab Ezzouar, 16111,  
Alger, Algérie

**Résumé**— Le développement technologique des systèmes aéro et spatio-portés de mesure des caractéristiques physiques et géométriques des surfaces terrestres ont ouvert divers champs d'applications en relation avec la protection et la gestion de l'environnement. Les milieux marins, de part le monde, ont bénéficié de cette évolution et différents capteurs optiques, radar et laser dédiés à ces milieux ont été réalisés. Ils ont pour objectif, la mesure des paramètres caractérisant la qualité des eaux côtières et la variabilité de leur bathymétrie. Dans ce contexte, nous présentons dans ce travail une approche méthodologique de caractérisation et de cartographie des sédiments par imagerie satellitaire optique et nous étudions la corrélation de ces paramètres, caractérisant la pollution côtière avec les mesures lidar bathymétrique. L'approche méthodologique a été testée sur des images ETM+ acquises sur la côte algéroise. Quant aux données lidar bathymétrique, nous avons développé deux méthodes d'interpolation de ces données que nous avons testées sur des données acquises, en deux dates, sur la cote de Molokai (Hawaii) par le lidar SHOALS (Scanning Hydrographic Operational Airborne Lidar Survey). Nous avons montré l'impact des sédiments sur la variabilité de la bathymétrie côtière.

**Mots clefs :** image satellitaire, milieu côtier, sédiments, capteur lidar, bathymétrie.

**Abstract**— The technological development of airborne and spaceborne systems that measure physical characteristics and land geometry surfaces have opened various fields of application in relation to the protection and management of the environment. Marine environments, throughout the world have benefited from this trend and various optical sensors, radar and laser dedicated to these environments have been developed. Their objective is the measurement of the parameters that characterize coastal waters quality and their variable bathymetry. In this context, we present in this work a methodological approach for characterization and mapping of sediments using optical satellite imagery and we study the correlation of these parameters with Lidar bathymetry measures. The approach was tested on ETM + images acquired on Algiers area. For bathymetric lidar data, we developed two methods for interpolation of these data that we tested them on data acquired by SHOALS (Scanning Hydrographic Operational Airborne Lidar Survey) lidar in two dates on the coast of Molokai (Hawaii). We have shown the impact of sedimentation on the variability of coastal bathymetry.

**Keywords:** satellite image, the coastal environment, sediments, sensor lidar bathymetry.

## I. INTRODUCTION

L'Algérie dispose d'une large façade maritime qui se situe au cœur de la méditerranée et s'étend sur plus de 1200 km. Du point de vue écologique, le littoral algérien est riche et diversifié. Sa façade maritime longue alterne rivages

rocheux, plages sablonneuses et zones humides. Toutefois, il est caractérisé par une forte concentration de la population et des activités. Pour une meilleure gestion de ce processus de littoralisation (concentration des hommes et des activités sur l'espace littoral), le gouvernement algérien a décidé en 1995, dans le cadre du Plan d'Action pour la Méditerranée (PAM), de mettre en œuvre un Plan d'Aménagement Côtier (PAC) pour la zone côtière algéroise [1]. Une des priorités de ce programme est la cartographie et la caractérisation de la qualité de l'eau côtière afin d'en déduire l'effet de cette littoralisation sur l'écosystème marin, sur la bathymétrie et de déterminer ainsi le schéma d'évolution de la ligne côtière. A cet égard, le recourt à l'utilisation des données de télédétection est apparu plus qu'une nécessité du fait qu'elle permet d'assurer un suivi autant spatial que temporel des différents paramètres physiques, chimiques, qualifiant la qualité de l'eau marine.

L'utilisation des données de télédétection passive est possible grâce aux changements des propriétés optiques de la surface marine dus à la présence des matières dissoutes et en suspensions. En conditions normales, la lumière visible pénètre les eaux marines à une profondeur d'une dizaine de mètres. A mesure que la concentration des composants aquatiques augmente, l'eau devient plus trouble, et la pénétration de la lumière du soleil diminue à cause des processus d'absorption et de diffusion. Suivant les caractéristiques spécifiques des matières présentes dans l'eau, c'est-à-dire leur signature spectrale, les processus d'absorption et de diffusion varient avec la longueur d'onde du rayonnement incident. On utilise alors les observations multispectrales pour évaluer la nature et la concentration des composants de l'eau. Il est à signaler que les propriétés optiques des étendues naturelles d'eau subissent les influences des trois principaux composants suivants [2].

- Le phytoplancton - incluant d'autres micro-organismes en suspension libre dans les couches superficielles des zones océaniques observées par les capteurs. Il s'agit de plantes unicellulaires qui forment la base de la chaîne trophique en milieu aquatique et représentent un élément important du cycle du carbone. La concentration du principal pigment phytoplanctonique, à savoir la chlorophylle a, est souvent utilisée comme indice de la biomasse phytoplanctonique.
- La matière en suspension (inorganique) - comprend toute particule inorganique qui n'est pas de la famille du phytoplancton. Dans les zones côtières, les variations observées dans la matière en suspension sont le résultat des débits sortant des rivières.
- Les substances jaunes - sont des substances organiques dissoutes et colorées ainsi que des particules « détritiques »,

comme celles provenant de la dégradation des cellules phytoplanctoniques et d'autres particules organiques.

Tandis que les propriétés optiques des eaux profondes au large des côtes agissent principalement en fonction de la concentration de phytoplancton, celles des eaux côtières et intérieures dépendent de facteurs plus complexes. Elles sont fonction d'un mélange de phytoplancton, de sédiments en suspension et de substances jaunes qui varient indépendamment les uns des autres et sont considérés comme indices de la qualité de l'eau côtière.

Selon les divers rapports du PAC établis sur la baie d'Alger, la pollution marine associée à l'apport de divers polluants est largement contrôlée par le comportement des Matières En Suspension (MES). En effet, lorsque les polluants sont introduits dans l'eau, ils se répartissent entre les divers phases du système aquatique : phases dissoute, particulaire, organique. Selon la grandeur des particules et l'état de la mer, ces matières peuvent se déposer au fond de la mer formant ainsi des dunes sous-marines, comme elles peuvent également migrer lorsqu'elles sont remises en suspension. Ceci constitue un paramètre important non seulement pour l'évaluation de la qualité de l'eau marine mais aussi pour l'étude de la géomorphologie sous marine et la dynamique de trait de côte.

Dans ce contexte, nous nous intéressons dans le présent papier à l'étude et la cartographie des Matières En Suspension « MES » ou en encore sédiments et leur impact sur la bathymétrie de zones côtières. Le papier est organisé comme suit : dans la section suivante nous présentons la méthodologie développée en donnant, tout d'abord, un aperçu général sur la nature des MES, nous détaillerons la méthode de cartographie des MES que nous avons mise en œuvre et implémentée en utilisant des images satellitaires acquises sur la Baie d'Alger [3] et nous donnons quelques résultats obtenus. Nous présentons ensuite le principe des lidars bathymétriques et l'exploitation de leurs données dans l'aménagement des zones côtières. Nous terminerons par une discussion sur la corrélation des données optiques passives et actives (laser) pour une meilleure estimation de la bathymétrie et le suivi des mouvements sédimentaires.

## II. Approche méthodologique

L'approche méthodologique proposée à pour objectif l'exploitation à court et long terme les données acquises par divers capteurs sur le littoral Algérien pour une planification stratifiée dans l'utilisation de cet espace. Dans un premier travail, la démarche est orientée vers l'utilisation des images satellitaires optiques, thermique et même radar [3]. Ensuite l'idée d'étudier les lidars bathymétriques est de montrer l'apport des données de ces capteurs sur le plan densité, précision, description structurale des colonnes d'eau (des profils) dans des projets d'aménagement et de préservation des zones côtières. Néanmoins, leur coût reste élevé.

En effet, quand un rayonnement lumineux arrive à la surface de l'eau une partie de ce rayonnement est réfléchi, dans la direction, entre autres, du capteur et une partie est transmise avec ou sans réfraction selon les indices de réfraction de l'atmosphère et de la surface marine. L'interaction de la partie réfractée est soumise à deux

phénomènes qui sont l'absorption et la diffusion, du rayonnement lumineux, par les différents composants (polluants) des eaux côtières.

En général, en milieux côtiers les propriétés d'absorption et de diffusion de matières en suspension (MES) sont considérées, et, plus souvent les propriétés d'absorption sont négligées [4]. Ainsi, Le coefficient de diffusion est la propriété optique caractéristique des MES. Les variations spectrales de la réflectance sont représentées sur la Figure 1.

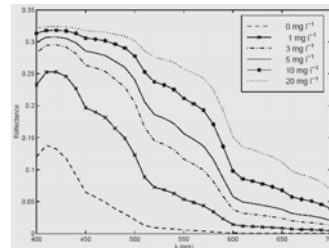


Figure 1 : Variation spectrale de la réflectance de l'eau de mer en fonction des variations des MES.

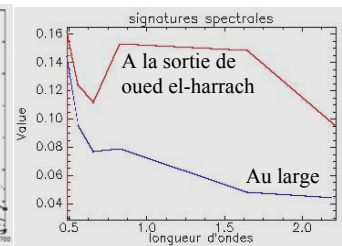


Figure 2 : Exemple de signatures spectrales prises sur la baie d'Alger

Globalement, la réflectance augmente avec la concentration en particules inorganiques. L'augmentation de cette concentration amène une augmentation de l'amplitude de l'ensemble du spectre, mais en dessous de 500 nm les variations d'amplitude s'atténuent lorsque la concentration dépasse quelques mg/l.

Ces constatations ont été vérifiées sur une image satellitaire acquise sur la baie d'Alger. En effet, l'analyse multispectrale des réflectances mesurées dans le spectre du visible nous a permis de constater que la réflectance varie fortement à la sortie de oued el-harrach. La figure 2 montre une comparaison de cette réflectance à celle prise sur une eau seigneur mettant en valeur l'effet de la pollution. En effet, cet oued qui traverse la plaine de la Mitidja puis la zone industrielle, prend l'aspect d'un égout à ciel ouvert et est considéré comme une source importante de drainage des matières en suspension [1]. Ces MES sont transportées à toute l'agglomération algéroise ce qui est illustré par la figure 3.



Figure 3 : Composition colorée de 3 canaux ETM+ (ETM1+ETM2+ETM3)

Cette dernière présente une composition colorée d'une image ETM+ acquise sur la baie d'Alger. La combinaison des premières bandes de cette image permet d'illustrer l'étendu de déplacement de ces matières sur la baie d'Alger. Les réflectances élevées autour de la côte dans les premières bandes de l'image donnent une coloration différente à celle donnée au large. C'est cette information spectrale que nous avons exploitée dans l'approche méthodologique que nous avons développée pour la détermination des variations

spatiales des MES. L'organigramme de la figure 4 schématise la démarche proposée. La première étape dans ce processus est la correction radiométrique des effets atmosphériques. Nous avons, à cet effet, appliqué la méthode de correction basée sur les points noirs (MMPN) développée au niveau de notre laboratoire [5].

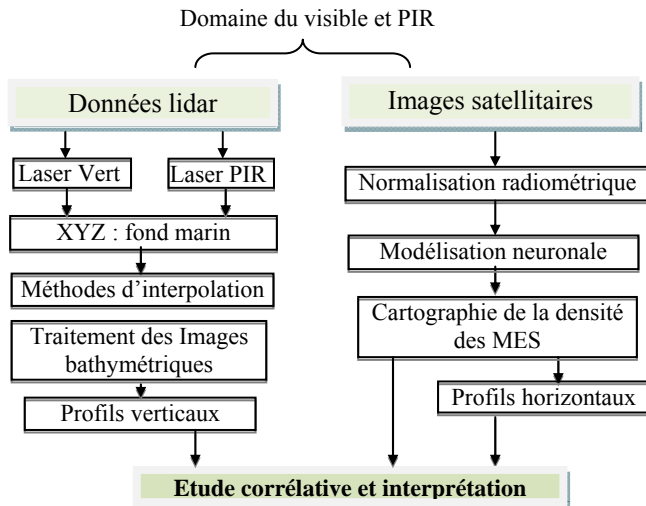


Figure 4 : Processus de cartographie des MES

### II.1. Cartographie des MES

Plusieurs approches d'estimation des paramètres exprimant la qualité de l'eau marine ont été développées. Ces approches peuvent être groupées selon quatre catégories [6]:

- La première, empirique, consiste à établir des relations statistiques entre la réflectance de l'eau et la concentration du paramètre étudié, en ignorant l'équation du transfert radiatif ;
- La seconde, analytique, consiste à résoudre l'équation du transfert radiatif afin d'établir les relations entre la réflectance et les propriétés optiques des substances (dissoutes et en suspension) dans l'eau, qui dépendent, entre autres, de leur concentration;
- La troisième, semi-analytique, consiste à introduire dans l'équation du transfert radiatif en cours de résolution des relations empiriques.
- La quatrième est basée sur le concept heuristique inspiré des phénomènes biologiques tels que les réseaux de neurones et les algorithmes évolutionnaires.

En général, les approches analytiques et semi-analytiques sont bien adaptées pour les eaux océaniques où seules les propriétés optiques de l'eau et du phytoplancton sont connues pour résoudre l'équation du transfert radiatif. Par contre, les propriétés optiques des eaux côtières sont beaucoup plus complexes à définir à cause de la diversité des apports terrestres dissous et en suspension. Dans ce cas, l'utilisation de l'imagerie visible et proche infrarouge nécessite la mise en évidence de relations empiriques ou heuristiques relatives à une zone d'étude spécifique. Dans ce cadre, nous avons développé un modèle neuronal pour la caractérisation de la qualité de l'eau sur la baie d'Alger [4]. Un réseau de type Perceptron MultiCouche « PMC » a été utilisé pour la modélisation de la relation existante entre les réflectances  $R_i$  des images satellitaires ETM+ et les

paramètres étudiés  $P_i$ . Plusieurs tests expérimentaux ont été effectués afin d'en déduire la topologie du réseau à savoir le nombre de couches cachées et le nombre de nœuds de chaque couche. Finalement, un réseau de trois couches en cascade a été retenu. Il est organisé comme suit : la première couche est reliée directement aux entrées  $R_i$ , puis la couche intermédiaire qui, grâce aux 5 nœuds interconnectés, relie l'entrée à la sortie. La dernière couche produit les sorties  $P_i$  du PMC représentant les MES étudiées.

Pour l'apprentissage du PMC nous avons retenu l'algorithme de rétro-propagation du gradient développé par Riedmiller [7]. Il consiste à minimiser de façon globale l'erreur commise sur l'ensemble des exemples d'apprentissage constitués de couples  $(R_i, P_i)$ . Cette optimisation se fait progressivement en présentant chaque exemple en entrée du réseau. A chaque étape, une sortie réelle est calculée selon la fonction suivante :

$$P_i = \tanh\left(\sum_{j=1}^J W_{ij} R_{ji} + b_0\right)$$

Où :

J: nombre du nœud de la couche cachée

b : biais associé au nœud j

$W_{ij}$  : Poids associés au nœud i de la couche j

Le calcul de la sortie se fait de proche en proche, depuis la couche d'entrée jusqu'à la couche de sortie. La sortie prédite est finalement comparée à la sortie désirée pour déduire l'erreur d'estimation commise RMS (Root Mean Squart).

Ainsi, les poids  $W_{ij}$  des connexions sont modifiés en fonction de cette erreur, au cours de la phase de "rétro-propagation", en ne tenant compte que du signe de la dérivée partielle à chaque nœud de la couche considérée.

La phase d'apprentissage est validée par le calcul de l'erreur relative moyenne déduite pour les couples réservés pour le test. Pour notre application, cette erreur obtenue est de 9%.

Après validation, les poids retenus de la phase d'apprentissage sont ensuite utilisés pour la phase de généralisation pour générer les cartes des paramètres étudiés. Dans la figure 5 nous avons représenté la cartographie relative aux MES. La carte montre de fortes teneurs de MES autour de la côte algéroise. Ces teneurs sont détectées et localisées au niveau de Oued El-harrach (région A), du port d'Alger (région B), de Oued el-Hamiz (région C) et de Oued-Reghaia (région D), sites déjà déclarés par PAC comme des zones à haut risque[1].

Toutefois, les MES à proximité des côtes ne se répartissent pas de façon uniforme sur toute la colonne d'eau. Autrement dit, leur concentration varie de façons verticale et horizontale. Cette répartition dépend du mode de transport : les particules peuvent provenir du fond par remise en suspension sous l'effet de turbulences ou elles peuvent provenir des cours d'eau par déplacement horizontal. Ainsi, trois types de panaches turbides peuvent apparaître sur les images satellitaires : des panaches

d'origine fluviale, des panaches provenant de l'érosion du littoral et des panaches provenant du fond par remise en suspension de sédiments [6]. La distribution spatiale des MES déduite à partir des reflectances mesurées par le capteur ETM+ à la surface marine ne permet pas, a priori, de différencier une remise en suspension d'un panache fluvial. Ainsi, l'ajout d'une information sur les teneurs en MES en différentes profondeurs de la colonne est d'un apport important pour le suivi de leurs mouvements aussi bien sur le plan spatial que profondeur. C'est cette information importante qui peut être déduite à partir de l'onde lidar rétrodiffusée par les différents niveaux de concentration des MES jusqu'au fond marin. Sachant que certains capteurs lidars peuvent enregistrer les retours de l'onde complète.

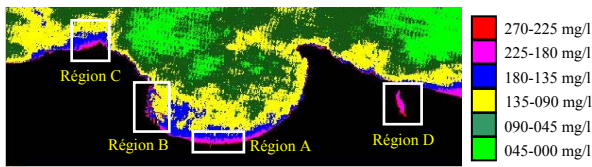


Figure 5 : Cartographie des MES sur la Baie d'Alger

## II.2- Profils spatiaux

L'étude des mouvements sédimentaires est une nouvelle thématique qui concerne les processus de « morphodynamique littorale ». L'objectif est d'analyser et de quantifier l'évolution des corps sédimentaires pour comprendre la nature et les modalités d'action des agents dynamiques internes et externes qui façonnent les domaines littoraux et les milieux de plate-forme. Cette thématique aborde respectivement l'étude de :

- la dynamique des dunes et bancs sableux de plate-forme
- l'évolution des littoraux due à l'érosion marine et l'évolution du trait de côte.

Dans ce cadre, notre contribution s'oriente d'abord vers le suivi de l'évolution des corps sédimentaires pour la caractérisation 2D (spatial) et 3D (profondeur) des objets à un instant donné, puis d'itérer ces mesures afin de caractériser le changement, la déformation ou le mouvement affectant l'objet. Ces étapes sont fondamentales à la compréhension de la dynamique des phénomènes et à la prévision de leur évolution. Ces deux étapes s'appuient prioritairement sur les méthodes d'imagerie multi-sources à savoir les images optiques et les images Bathymétriques.

Au niveau spatial, nous avons tracé plusieurs profils à partir des données 'reflectance' de l'image ETM et l'image MES générée par le PMC. Nous avons choisi le site de Oued El Harrach vu le risque qu'il présente sur la baie d'Alger. Nous avons relevé les constatations suivantes: Sur les trois bandes du visible, figure 6, les coefficients de réflectivité sont plus importants (premier cercle) à l'embouchure de Oued El Harrach qu'au large (cercle 2 et 3) témoignant d'une forte diffusion de la lumière du visible par MES dans ce site de la côte.

Les profils tracés à partir de l'image MES, confirment ce constat, et montrent la variabilité de la concentration de ce paramètre. En effet, la figure 7. a représente la concentration de oued El Harrach sur ~ 200 m, et le profil,

figure 7.b montre une faible concentration qui décroît en s'éloignant de l'embouchure de oued El-Harrach.

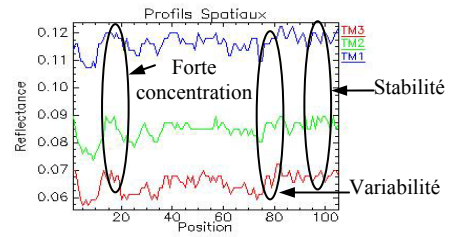


Figure 6 : Profils horizontaux représentant la variabilité des reflectances dans les bandes du visible

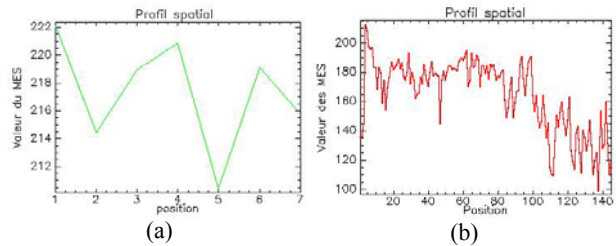


Figure 7 : Profils horizontaux représentant la variabilité des concentrations des MES

## III. BATHYMETRIE LIDAR

Le LIDAR « Light Detection and Ranging » sont des systèmes de télédétection ou de mesure optique basés sur l'analyse des propriétés d'une lumière laser renvoyée par des cibles excitées. Leur fonctionnement est le même que celui des radars. La différence se situe principalement dans le domaine spectral et le type de faisceau utilisé : les systèmes radar fonctionnent dans le domaine des ondes radio, le lidar couvre en particulier le domaine du visible, et également les domaines ultraviolet (UV) et infrarouge (IR), d'autre part, le lidar utilise un faisceau laser, tandis que le radar utilise un faisceau électromagnétique classique. Un lidar se compose d'un système laser chargé d'émettre l'onde lumineuse, d'un télescope qui récoltera l'onde rétrodiffusée par les cibles rencontrées, et d'une chaîne de traitement qui quantifiera le signal reçu. Les premières utilisations du LiDAR étaient la mesure des profondeurs de l'eau. Il permet de mesurer des profondeurs allant de 30 m à 70 m en fonction de la clarté de l'eau et sa turbidité. La profondeur maximale de pénétration pour un système laser est évidemment fonction de cette propriété de l'eau qui est liée au processus de diffusion du rayon Laser par les particules suspendues. Il a été noté que la pénétration de l'eau est généralement égale deux à trois fois la profondeur mesurer par un Secchi [9].

Un système LiDAR bathymétrique aéroporté détermine la profondeur de l'eau en mesurant le temps de parcours de deux impulsions laser de longueurs d'onde différentes: une impulsion en infrarouge, elle est rétrodiffusée par la surface de la mer. La deuxième dans le visible (généralement le faisceau vert à 532 nm) traverse l'interface air-eau puis est réfléchi par le fond. Un récepteur optique embarqué détecte la réflexion des impulsions à la fois sur les fonds marins et à la surface de la mer. La profondeur de l'eau est déterminée par le temps écoulé entre ces deux événements, après prise en compte de la géométrie du système, des distorsions induites par la propagation, de la hauteur des

vagues et des effets de la marée. En effet la réponse de l'onde du vert dépend essentiellement de la matière en suspension dans la colonne de l'eau. Il existe des lidars à onde complète, dans ce type de système les différents retours enregistrés représentent les réponses des cibles qui interceptent l'onde lidar dans la colonne d'eau et ces mesures permettent de déterminer les niveaux de pollution par les sédiments ainsi que leurs densités (atténuation due au phénomène de diffusion). Ces systèmes lidar à retour d'onde complète, en plus de la conservation de toute l'information disponible, permettent le traitement des données, à posteriori, par rapport au traitement temps-réel des systèmes multi-échos [13]. Cela permet donc de mieux contrôler l'extraction des échos et d'améliorer la connaissance de la distribution altimétrique des cibles sur le trajet de l'onde.

Dans le cas de l'onde à retour unique, sa modification peut être interprétée sur deux niveaux : le premier niveau est du à l'interaction rayonnement-matière, lors d'une acquisition. Cette interaction engendre une atténuation de l'onde au cours de son parcours et la puissance rétrodiffusée par le fond peut être non significative dans certaines conditions. Le deuxième niveau est associé aux mesures temporelles de la bathymétrie. Ces mesures peuvent révéler des modifications de cette dernière par : soit l'érosion marine provoquée par les vents marins locaux ou le transport des sédiments. Soit par la sédimentation des matières en suspension en fonction de leurs densités et leurs tailles. Dans ces deux cas de figures, il en résulte des modifications des traits de cotes. C'est dans ce contexte que porte notre intérêt dans l'utilisation des lidars bathymétriques. L'objectif est d'établir une cartographie temporelle des profondeurs de certains sites sur les cotes algériennes, d'identifier les sources de pollution par les sédiments, de prévoir des projets d'aménagement de ces côtes, etc. Pour le faire, des travaux utilisant que les images satellitaires ont été réalisés, au niveau de notre laboratoire et afin de sensibiliser les institutions décideurs sur l'importance de la connaissance précise de la bathymétrie et ses variations temporelles, de la topographie des surfaces immergées et leurs importantes dans la modélisation des écosystèmes aquatiques, la modélisation des hydrosystèmes, etc.... nous nous sommes intéressés à l'exploitation et le traitement des données Lidar. Nous ne disposons pas de données sur les cotes algériennes, nous avons téléchargé des données sur les cotes de l'île de Molokai (Hawaï) acquises par le Lidar SHOALS. La figure 8 représente une image de l'île de Molokai. Les fichiers bathymétriques sont XYZ correspondent à la partie encadrée sur cette image.



Figure 8 : Ile de Molokai (Hawaï)

Nous avons utilisé des données lidar bathymétrique acquises en deux dates 1999 et 2000 sur la même région.

Ces données sont enregistrées en mode ASCII (XYZ) et dans certains cas, elles sont enregistrées en mode LAS. La distribution spatiale de ces données est de façon irrégulière, relative à au déplacement du vecteur (avion) et le système de scanning Laser. Pour leur traitement et leur représentation en 3D sous forme de grille régulière, ces données passent par une étape d'interpolation spatiale. On trouve, dans la littérature, différentes méthodes qui sont développées et adaptées aux données lidar [11]. Pour notre part, nous avons implémenté (en langage IDL) la méthode des inverses de distances et la méthode par triangulation. C'est des méthodes d'interpolation locale, elles conservent, généralement la précision de la résolution spatiale malgré la forte variabilité de la densité des mesures Lidar.

### III.1. Interpolation par pondération inversion à la distance

Elle consiste en la recherche de points, ayant les valeurs  $h(x_i)$ , dans un cercle local de rayon prédéfini, le calcul, pour chaque point à l'intérieur du cercle, la distance le séparant du nœud à remplir de la grille, l'attribution à chaque point un poids égal à l'inverse de la distance le séparant du nœud. La valeur estimée  $\hat{h}(x_j)$  associée à ce nœud est une somme pondérée des valeurs  $h(x_i)$ . L'expression de calcul est la suivante :

$$\hat{h}(x_j)_i = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{h(x_i)}{\|x_i - x_j\|}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\|x_i - x_j\|}}$$

La précision de cette méthode dépend de la densité des mesures et le choix du rayon du cercle de recherche : une forte densité provoque une sur estimation avec temps de calcul important. Alors qu'une faible densité peut ne pas contenir aucun point de mesure, de ce fait, la fonction d'estimation est nulle ce qui engendre des trous dans la grille d'interpolation (absence d'information). Nous proposons dans ce sens une fonction d'estimation uniforme par le choix d'un cercle adaptatif. Cette méthode a été testée sur les fichiers XYZ de Molokai, Le résultat est donné par la figure 9.

### III.1. Interpolation par Triangulation(TIN)

Cette méthode, très utilisée dans l'interpolation des données associées aux modèles d'élévation, de surface ou de terrain, consiste à connecter tous les points de la grille irrégulière en formant des triangles. Les sommets de chaque triangle appartiennent à un cercle circonscrit ne contenant que ces derniers. L'interpolation, dans ce cas la consiste en la superposition d'une grille régulière à la surface des triangles formés. Pour chaque nœud de la grille (cellule) une valeur est calculée sur la base d'une combinaison de variables à savoir :

- les valeurs originales des points (sommets des triangles).
- Pentés des faces TIN individuelles et adjacentes
- Distance aux triangles voisins

Il est à noter qu'à partir des surfaces des triangles on peut dériver les pentes locales et même l'orientation par rapport à un repère prédéfini. Aussi, cette méthode ne laisse aucun trou, toutes les cellules de la grille régulières auront une valeur  $h_i$  quelque soit la densité des mesures. Les inconvénients sont relatifs au temps de calcul, à

l'imprécision des valeurs interpolées à l'intérieur du triangle qui dépend de leurs dimensions. Cette imprécision est accentuée pour les triangles qui sont situés sur les bords du réseau de mesures.

### III.3. Bathymétrie et sédimentation

A partir de deux images bathymétriques de la même région, nous avons essayé d'analyser ces données et d'interpréter les changements de la bathymétrie entre ces deux dates en relation avec les MES et la sédimentation. Les figures 9 et 10 représentent les images bathymétriques de la région acquises en 1999 ( $I_1$ ) et 2000 ( $I_2$ ). Nous remarquons, sur le tracé de l'histogramme bidimensionnel ( $I_1, I_2$ ) que le nuage de points est resserré sur la diagonale principale révélant une corrélation des deux images. Néanmoins, des dispersions sont observées autour de cette diagonale. Nous avons essayé de localiser les variations temporelles de la bathymétrie à partir de ce graphe. Si au niveau d'un site la valeur donnée par  $I_1$  est supérieure à  $I_2$  ce qui explique une sédimentation en ce site qui peut être dû à une forte turbidité et/ou concentration, initialement des MES dans la zone en question, les pixels en vert représentent les sites sédimentés. Inversement les zones en rouge où  $I_2$  est supérieure à  $I_1$ , explique le phénomène d'érosion qui est dû à diverses causes, principalement aux vents marins, figure 12. Pour confirmer ces constats et approfondir notre étude de bathymétrie lidar, nous avons défini des profils spatiaux parallèles et perpendiculaires au trait de la cote de cette région, figure 13. Nous avons remarqué que la variation près de la cote (voir l'échelle des valeurs bathymétrique) est prédominée par l'érosion marine qui se manifeste par une augmentation de la bathymétrie, figure 13.a. Quant aux courbes 13.b et 13.c, nous remarquons qu'au niveau de la cote les valeurs sont pratiquement constantes, mais s'éloignant du trait de la cote, des variations bathymétriques apparaissent entre les deux dates qui sont tantôt érosion et tantôt sédimentations. Ses observations sont accentuées en allant en profondeurs dans cette zone côtière (figure 13.c).

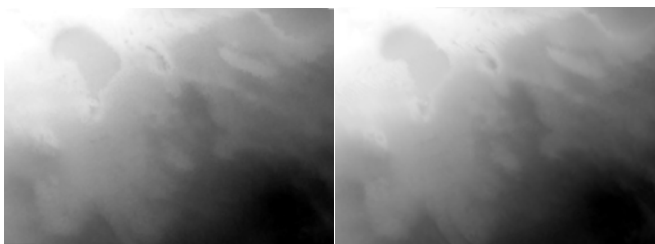


Figure 9: Image bathymétrique Molokai 2000 Figure 10: Image bathymétrique Molokai 1999

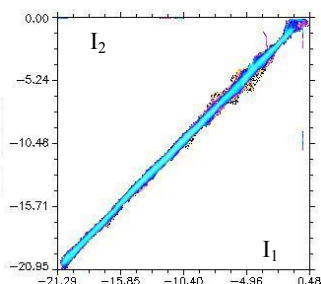


Figure 11: Histogramme bidimensionnel ( $I_1, I_2$ )



Figure 12: Localisation des modifications de la bathymétrie

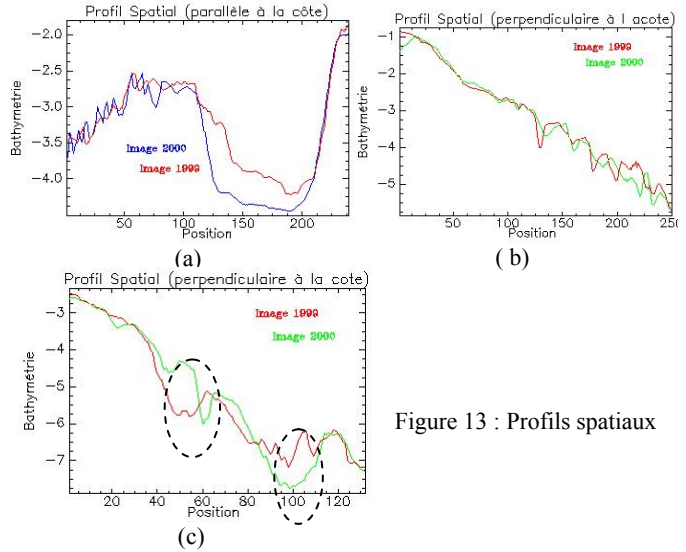


Figure 13: Profils spatiaux

## IV. CONCLUSION

Notre objectif, par cette étude, est de montrer l'importance des données de télédétection, sous ses différentes formes, dans la caractérisation, la gestion et l'aménagement des milieux marins particulièrement côtiers. Dans la première partie de ce travail et qui a fait l'objet d'autres travaux antérieurs, nous avons caractérisé la qualité des eaux dans la baie d'Alger et nous avons étudié, dans ce travail que le paramètre MES qui constitue un des polluants le plus répandu dans cette partie de la cote algéroise. La cartographie de la concentration des MES obtenue peut être améliorée par un bon apprentissage du modèle neuronale ceci est possible par des mesures ponctuelles et stratifiées sur toute la cote. L'autre volet de ce travail a pour objectif, d'une part, le développement de méthodes de traitement et d'exploitation des données lidar, particulièrement la bathymétrie mesurée par ces systèmes en relation avec la présence des matières en suspension (MES) et leur influences sur cette mesure ainsi que l'étude des aspects liés à la technologie Laser et à l'acquisition des données. D'autre part, la sensibilisation de la communauté concernée par l'environnement et la gestion des cotes algériennes qui s'étalent sur 1200 Km en montrant l'importance des capteurs lidars dans la caractérisation des eaux côtières, les mesures des variations de la bathymétrie, le tracé des traits de cotes pour un aménagement éventuel, etc.

## V. REFERENCES

- [1] MAT, "Gestion Intégrée Des Ressources En Eau Et Assainissement Liquide - Diagnostic -", Programme d'Aménagement Côtier (PAC) "Zone côtière algéroise", Programme d'Actions Prioritaires, Centre d'Activités Régionales, Juin 2004.
- [2] F. Lahet, "Caractérisation optique d'eaux côtières méditerranéennes : mesure, modélisation et inversion de réflectances. Application aux observations satellitaires", Thèse de doctorat, Université de Toulon et du Var, 1999, 194p.
- [3] B. Lounis & A. Belhadj aissa, " Pollution signature of water quality using remote sensing data ", 25th EARSel Symposium, Global developments in Environmental Earth observation from Space, 6-11 June 2005, Porto, Portugal, ISBN 90-5966-042-0.
- [4] C.D. Mobley, "Light and water. Radiative transfer in natural waters. Academic Press Inc., San Diego, 1994, 592 p.

- [5] B. Lounis & A. Belhadj aissa, " *Processus de correction relative PCR des images satellitaires Landsat multitudes*", SETIT 2005, 3<sup>RD</sup> International Conference: Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications, March 27-31, 2005 – TUNISIA.
- [6] Jean-Marie Froidefond et David Doxaran, "Télédétection optique appliquée à l'étude des eaux côtières", département de Géologie et Océanographie, Université de Bordeaux. Télédétection, vol. 4, n° 2, p. 579–597.2004.
- [7] M. Riedmiller & H. Braun, "A direct adaptive method for faster backpropagation learning: the Rprop algorithm", H. Ruspini, editor, Proceeding of the IEEE International Conference on Neural Networks (ICNN), San Francisco, 1993, pages 586-591.
- [8] J. M. Froidefond & D. Doxaran, "Télédétection Optique Appliquée À L'étude Des Eaux Côtières", Télédétection, 2004, vol. 4, n° 2, p. 579–597.
- [9] Drapeau, L. (2000), Statistiques et Interpolations dans les SIG, Towards the use of Geographic Information Systems as a Decision Support Tool for the Management of Mediterranean Fisheries, Informations et Etudes – COPEMED.
- [10] Airborne Altimetric LiDAR: Principle, Data Collection, Processing and Applications, [http://home.iitk.ac.in/~blohani/LiDAR\\_Tutorial/Airborne\\_AltimetricLidar\\_Tutorial.htm](http://home.iitk.ac.in/~blohani/LiDAR_Tutorial/Airborne_AltimetricLidar_Tutorial.htm)
- [11] Arnaud, M., Emery, X. (2000) Estimation et interpolation spatiale, méthodes déterministes et méthodes géostatistiques, Hermès Science Publications, Paris.
- [12] JIE Shan and Charles K Topographic laser ranging and scanning : principles and processing crc press 2008
- [13] W. Wagner, A. Ullrich, T. Melzer, C. Briese, K. Kraus. From single-pulse to full-waveform airborne laser scanners: Potential and practical challenges. IAPRS