CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DU POTENTIEL AQUACOLE DE LA LAGUNE DE MOULAY BOUSSELHAM (MAROC) À L'AIDE DE LA TÉLÉDÉTECTION ET D'UN SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE

Abdeljaouad LAMRINI[1], Hassan ARID[2] et Jaâfar MEZIANI[1]

[1]Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, Formation halieutique, B.P. 6202, Rabat- Instituts, Maroc
Téléphone : 212 37 77 17 58/59/45 ou 212 37 77 07 52 ; télécopieur : 212 37 7758 38 ou 212 37 77 81 35 ;
courriel : a.lamrini@iav.ac.ma ;
[2]Centre royal de télédétection spatiale, Secteur 21, Angle avenue Allal Al Fassi et Sanawbar, Hay Riad, Rabat, Maroc
Téléphone : 212 3771 54 48/98 ; télécopieur : 212 37 71 17 35 ;
courriel : arid@crts.gov.ma

Soumis le 19 décembre 2006 ; révisé le 29 janvier 2007 ; accepté le 3 juin 2007 - © *Revue Télédétection*, 2007, vol. 7, n° 1-2-3-4, p. 111-127

Résumé

L'étude porte sur le potentiel aquacole de la lagune de Moulay Bousselham, au Maroc, notamment au niveau de sa merja Zerga. L'utilisation d'images satellitaires et de données multisources dans un système d'information géographique permet autant de guider la prospection de sites en délimitant les zones potentielles d'aquaculture que d'éviter les tâtonnements et les essais infructueux d'élevage. L'imagerie HRV de SPOT, prise entre 1993 et 1999, a servi à cartographier la bathymétrie en la modélisant avec la radiométrie de chaque pixel de l'image ; elle a permis également d'apprécier l'évolution géomorphologique de la lagune. Quant au système d'information géographique, il a été utilisé pour élaborer des cartes thématiques de quelques paramètres physico-chimiques par interpolation des données in situ colligées en 1997. La superposition de ces cartes complète la délimitation des zones à potentiel aquacole en tenant compte des exigences des espèces envisagées. Les résultats obtenus ont permis de conclure à la faisabilité de la conchyliculture dans des secteurs bien précis de la merja Zerga, notamment au niveau du goulet. Cependant, il est recommandé d'affiner davantage ce résultat par l'intégration d'autres paramètres de sélection tels que la chlorophylle, les matières en suspension et les éléments nutritifs ainsi que l'utilisation des données in situ fournies durant la saison pluviale.

Mots-clés : télédétection, HRV de SPOT, système d'information géographique, données in situ, aquaculture, lagune, Moulay Bousselham, Maroc

Contribution to the study of the aquaculture potential of the lagoon of Moulay Bousselham (Morocco) using remote sensing and a geographical information system

Abstract

The objective of this paper is to study the Lagoon of Moulay Bousselham (Morocco), particularly in the merja Zerga area. The combined use of satellite images and multisource data in the framework of a geographical information system is useful in guiding site selection by delimiting the potential areas for aquaculture and eliminates both guess work as well as unsuccessful aquaculture operations. SPOT imagery, acquired between 1993 and 1999, was used to generate a bathymetric map of the lagoon by modelling the bathymetry using the radiometry of each image pixel; it also permitted the appreciation of the geomorphological evolution of the lagoon. As to the GIS, it was used to create thematic maps of some physical and chemical parameters in occurrence temperature, salinity, pH, surficial sediments using interpolation techniques of in-situ data, which were collected in 1997. The superimposition of these maps completes the delimitation of the potential sites for aquaculture taking into account the requirements of the species under considera-

tion such as oysters and clams. The results obtained showed the feasibility of implementing conchyliculture in specific sections of the Merja Zerga area, more precisely in the narrow areas of the lagoon. These are preliminary results and therefore need to the further refined by integrating other parameters such as chlorophyll, suspended matter and nutritive elements as well as the use of in situ data acquired during the rainy season.

Key words : Remote sensing, SPOT HRV, Geographic information system, in-situ data, aquaculture, lagoon, Moulay Bousselham, Morocco

1. INTRODUCTION

La sélection d'une zone à potentiel aquacole n'est pas une tâche facile à réaliser. En effet, le site doit répondre à un ensemble de critères correspondant aux exigences des espèces envisagées. Ces critères sont, d'une part, nombreux (paramètres physico-chimiques de l'eau, catégories de substrat, courants, productivité primaire, etc.) et, d'autre part, ils varient beaucoup en fonction des espèces et de la saison, ce qui rend difficile le choix du site approprié à chaque espèce. Le tâtonnement et les essais répétés demeurent la procédure la plus couramment utilisée, mais elle peut être coûteuse ou infructueuse.

Aussi, l'utilisation de la télédétection spatiale et des systèmes d'information géographique (SIG) s'avère une avenue judicieuse pour la prise de décision.

L'utilisation de ces outils pour identifier des sites à potentiel aquacole est relativement récente ; elle a démarré au milieu des années 1980 à travers de nombreuses régions : en Inde (Nakay and Sahay, 1983, 1984 et 1985 ; Honne *et al*., 1995), en Chine (Nassir, 1990 ; Bour, 1990), en Russie (Nurridinov, 1998), en Afrique (Kapetsky, 1991, 1994 ; Arid *et al.*, 1995), en Amérique (Kapetsky *et al*., 1987), en Malaisie (Kapetsky, 1989) et au Canada (Grenier *et al*., 1989 ; Habbane et Dubois, 1996 ; Habbane, 1997 ; Habbane *et al*., 1997 ; Dubois et Habbane, 2002).

La possibilité d'extraction de quelques paramètres relatifs au milieu d'étude (bathymétrie, matières en suspension, salinité, etc.) à partir des images satellitaires et de la gestion de tous les critères de sélection dans une base de données grâce aux SIG est aussi relativement récente. Différents travaux ont été réalisés dans ce sens. Pour la température des eaux, on trouve ceux de Girard et Girard (1989), Dumas (1988), Williamson et Willkinson (1980), Servan et Raban (1983). Pour la salinité et les matières en suspension, on peut citer respectivement les études de Cordell et Norte (1988) et de Thomas (1984). Pour la bathymétrie, ce sont les publications de Bonn et Rochon (1992), de Robin (1995) et de Zhang (1998) qui sont les plus démonstratives.

La variabilité dans l'espace et dans le temps des différents paramètres, d'une part, et de leur importance relative pour les activités aquacoles en fonction des différentes techniques, d'autre part, laisse envisager une certaine normalisation de ces paramètres à travers des indices (Dubois *et al*., 2002).

Le présent travail s'inscrit dans ce cadre et le site choisi est celui de la lagune de Moulay Bousselham, connue surtout pour sa forte production des gisements naturels de palourdes (*Ruditapes deccussatus, Chlamys sp.*).

Outre la délimitation des zones à potentiel aquacole dans cette lagune, l'évolution du milieu de ce site sera appréhendée afin de comprendre son fonctionnement, son devenir et l'impact de cette évolution sur l'aquaculture.

À partir des images multidates HRV de SPOT, la numérisation de la lagune et de sa zone de passe sera faite. Avec les données de réalité de terrain, des cartes thématiques seront constituées pour chaque paramètre physico-chimique et seront intégrées dans un SIG.

La superposition des différentes cartes et des données numérisées, ainsi que la prise en considération des paramètres d'élevage, permettent de déduire les zones favorables aux activités aquacoles.

2. PRÉSENTATION DU SITE D'ÉTUDE

Située sur le littoral atlantique marocain entre 34°48'et 34°53' de latitude nord et 6°19' et 6°16' de longitude ouest (figure 1), la lagune de Moulay Bousselham possède une forme elliptique, avec une longueur maximale de 9 km, une largeur maximale de 5 km et une superficie de 35 km^2. Elle est divisée en deux merjas (figure 2) : la merja Kahla de 3 km^2, très peu profonde et dont le fond est couvert d'une vase très sombre, et la merja Zerga de 27 km^2, toujours couverte par le flot à marée haute et qui apparaît de couleur bleue à marée basse en raison de sa profondeur plus importante. Le goulet et la passe occupent le reste de la superficie de la lagune.

Deux tributaires d'eau douce se déversent dans la lagune. Au nord, l'oued Drader, qui draine un bassin versant de 1 150 km^2, aboutit dans la lagune à deux endroits, le premier à l'extrémité du chenal principal alors que le second se termine par un delta dans la partie nord-est de la merja Zerga. Au sud, le canal de Nador, construit en 1953, draine le bassin versant du Mda (cours d'eau intermittent) de 700 km^2 ainsi que la zone de la rive droite du Sebou.

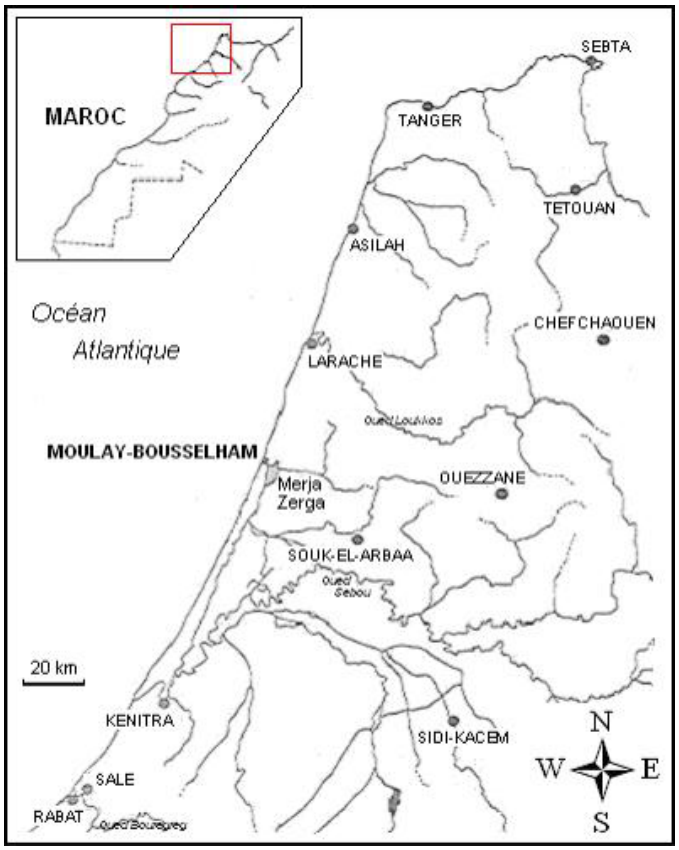


Figure 1 : Localisation de la lagune de Moulay Bousselham. *Location of the lagoon of Moulay Bousselham*

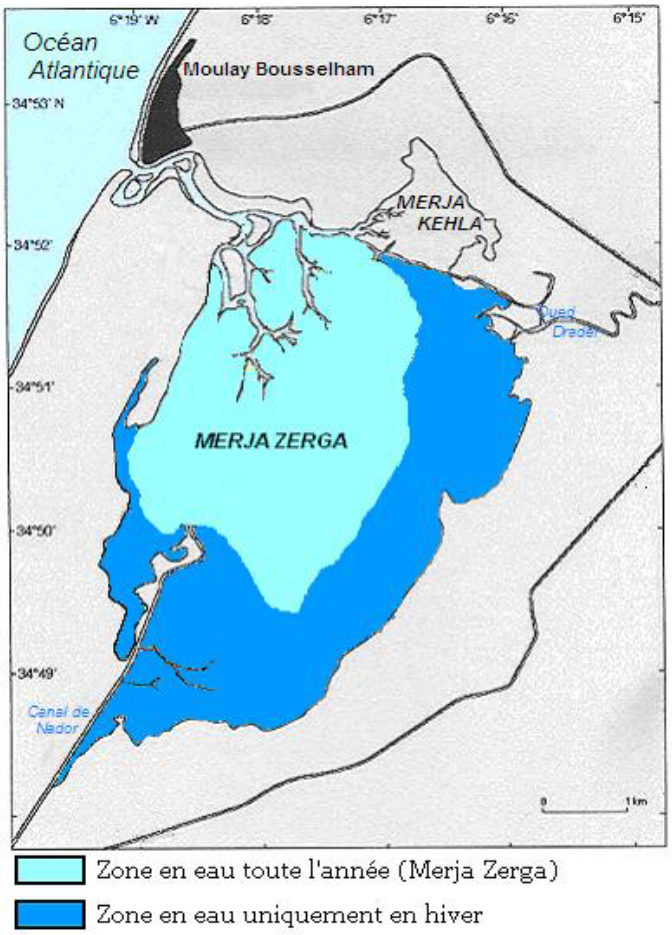


Figure 2 : Configuration de la lagune de Moulay Bousselham. *Configuration of the lagoon of Moulay Bousselham*

L'oued Drader produit de faibles courants contrairement au canal. Ces courants sont essentiellement dus aux échanges océan-lagune et aux vents qui donnent une circulation de l'ouest vers l'est. Leur force est plus importante en surface et elle est plus élevée au flot (1 m/sec) qu'au jusant (0,1 à 0,3 m/sec). En vives-eaux, elle est en moyenne plus importante en été (0,9 m/sec) qu'en hiver (0,75 m/sec) alors qu'en mortes-eaux, elle est pratiquement constante (0,55 m/sec) (Beaubrun, 1976 ; Zarzoso, 1982, 1987).

Le remplissage et la vidange de la lagune se font par un réseau de chenaux permanents (principaux, secondaires et tertiaires) qui permettent la communication entre la lagune et l'océan par le biais d'un étroit goulet (50 m). Ce goulet, qui est le siège de courants très violents, est bordé au nord par un platier rocheux et, au sud, par une flèche littorale qui règle les échanges entre l'océan et la lagune, En effet, cette flèche se prolonge rapidement vers le nord jusqu'à la complète fermeture de la communication qui intervient généralement tous les trois à cinq ans (Gruvel, 1931 ; Beaubrun, 1976 ; Carruesco, 1989). La géomorphologie du goulet et de la partie aval du chenal principal évoluent rapidement, même à court terme (Bazairi, 1999).

De point de vue géographique, la dépression occupée par la lagune est limitée au sud par les collines de Lalla Zohra, à l'est par la cuvette de Lalla Mimouna, au nord et au nord-est par les hauteurs de Khlot et à l'ouest par un alignement de dunes consolidées d'âge Quaternaire.

L'ensemble de la région se trouve sous les hautes pressions de l'anticyclone des Açores avec des influences méditerranéennes et continentales. Deux grandes saisons se distinguent, l'une pluvieuse en hiver et l'autre sèche en été.

En plus de la marée, l'écosystème lagunaire est influencé par des apports d'eaux douces dus aux précipitations dont la moyenne annuelle varie entre 600 et 650 mm (Haida *et al*., 1999).

La température moyenne de l'air dans la région est de 18 °C avec un écart thermique annuel important (26 °C). Alors que la température des eaux de la lagune est conditionnée par celle des eaux marines et continentales et surtout de leur mélange (13 °C à 15 °C en hiver et 27° à 28 °C en été). Cependant, les zones découvertes à marée basse réchauffent les eaux lagunaires (Zarzoso, 1982).

Les marées sont semi-diurnes et le marnage moyen enregistré au niveau de la passe varie de 0,15 à 1,5 m en fonction de la saison et des périodes de vives-eaux ou de mortes-eaux. L'amplitude des marées estivales est plus importante que celle des marées hivernales en raison de l'apport important d'eau douce empêchant l'entrée des eaux marines.

Le bilan hydrologique (Carruesco, 1989) montre que l'eau douce transitant dans la lagune a une salinité de 1 à 2 ‰. En revanche, les variations saisonnières et annuelles conditionnent ce transit et, en conséquence, la salinité.

Durant l'été, ce sont plutôt les eaux marines qui dominent (salinité de 35 g/l) et seules les parties amont éloignées de la passe sont affectées d'une salinité inférieure. Les variations annuelles et même pluriannuelles sont conditionnées par le développement de la flèche littorale qui détermine les dimensions du goulet et donc les flux d'eau transitant dans la lagune.

En ce qui concerne la bathymétrie, les profondeurs diminuent dans le chenal principal de l'aval vers l'amont : 5 m en aval de la confluence du chenal secondaire et 0,9 m du côté de la merja Kahla. Dans ce chenal, une baisse régulière de la bathymétrie est enregistrée : 3,6 m dans sa partie avale contre 0,2 m en amont (Beaubrun, 1976).

Deux catégories de sédiments tapissent la lagune : des vases provenant des apports de l'oued Drader et du canal de Nador dans les zones calmes et des sables d'origine essentiellement marine dans la zone de chenaux principaux et au niveau de la passe. La répartition de ces sédiments est fonction des variations climatiques, hydrologiques et géomorphologiques de la lagune (Bidet, 1977). Ainsi, lors de l'ouverture du goulet, la sédimentation marine l'emporte alors que c'est l'apport en sédiments continentaux qui est le plus important durant les fermetures totales ou partielles (Bidet, 1977 ; Carruesco, 1989). L'accumulation de sédiments sableux d'origines marine et continentale est favorable à la mise en place d'une conchyliculture.

La flore de la lagune est estimée à 50 espèces (Lacoste, 1984). D'après Dakki *et al*. (1998), on peut distinguer cinq formations végétales qui se succèdent, du fond de la lagune aux dunes environnantes : herbiers d'algues et des zostères, formation à *Spartina densiflora*, prairies halophiles à *Salicornia*, prairies halophiles à *Juncus rigidus* et pelouse basse. Au niveau de l'oued Drader, une végétation immergée d'eau douce (*Myriophyllum*, *Potamogeton*) marque le passage entre la lagune et les eaux douces.

La faune est principalement composée d'invertébrés et de poissons. Les invertébrés sont représentés par les pélécypodes avec quelques échinodermes (*Donax sp, Paracentrotus sp*, *Ceratoderma edule*), des lamellibranches (*Venerupis decussata*, *Venerupis aurea*, *Scrobicularia plana*), des espèces strictement lagunaires (*Gammarus locusta*, *Cerebratulus marginatus*), des espèces animales réduites (*Anomia becarii*) et des crustacés détritivores (Lacoste, 1984). Les espèces de poissons sont très diversifiées (Bayed *et al*., 1998a). On a relevé la présence de Mugilidés (*Mugil cephalus*, *Liza ramada*, *Liza aurata*, *Liza saliens* et *Chelon labrosus*), de Moronidés (*Dicentrarchus labrax*, *Dicentrarchus punctatus*), d'Anguillidés (*Anguilla anguilla*), de Soleidés (*Solea vulgaris*, *Solea senegalensis*), de Lophiidés (*Lophius budegassa*) et de Sparidés (*Diplodus puntazzo*).

Ainsi, la lagune de Moulay Bousselham est un écosystème assez complexe dont la productivité chute de plus en plus à cause des convoitises : pression de la pêche artisanale et ramassage intensif et continu des palourdes. L'aménagement de cette lagune, par la mise en place d'activités aquacoles en particulier, s'avère indispensable pour maintenir son équilibre et restaurer sa productivité.

3. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les critères de sélection d'un site aquacole côtier sont multiples (Barnabé, 1989a, b ; Huguenin and Colt, 1989 ; Dubois et Habbane, 2002) : environnement biologique, couverture du sol, catégorie de sédiments, caractéristiques physiques de la côte, lessivage des polluants, facteurs météorologiques, facteurs océanographiques, renouvellement d'eau, infrastructures existantes, accessibilité du site, etc.

Les facteurs physico-chimiques jouent un rôle déterminant en conchyliculture. Ceux pris en considération dans le présent travail en raison de leur pertinence et de leur disponibilité sont la bathymétrie, la température, la salinité, le pH et la catégorie de substrat.

La bathymétrie est un paramètre de grande importance dans la mise en place de la technique conchylicole. Ainsi, les élevages de mollusques peuvent être conçus à plat ou suspendus. Les cultures à plat peuvent être installées directement à même le sol ou surélevées dans des sacs posés sur des tables. Les cultures suspendues sont prévues dans les parcs à eau profonde. Les mollusques (huîtres, moules, coquilles Saint-Jacques) sont cultivés en filières suspendues à des cordes amarrées à des systèmes flottants (longues lignes) ou fixes (tables) et les moules en culture en Bouchot (alignement de pieux en bois).

La température agit sur la productivité primaire, la reproduction et la croissance des espèces. Une hausse de température entraîne un accroissement des besoins énergétiques des organismes. De plus, en fonction de la température moyenne à un site, on détermine les espèces à élever (eaux chaudes : certaines espèces de moules ; eaux tempérées : palourdes, huîtres). En outre, en association avec d'autres paramètres, comme la salinité, la température joue un rôle déterminant dans le déroulement des cycles sexuels.

La salinité joue un rôle sur la reproduction, la nutrition et la croissance. Celle-ci est optimale dans une fourchette restreinte de salinité. Il y a peu d'espèces qui fréquentent à la fois les eaux douces et les eaux salées. Ainsi, le taux et la variation de la salinité permettent de choisir un site aquacole.

Le pH de l'eau lagunaire est légèrement basique. La majorité des espèces tolèrent des valeurs comprises entre 6 et 9, valeurs beaucoup plus importantes que celles enregistrées dans le milieu naturel.

Les sédiments constituent l'habitat des espèces fouisseuses (palourdes, coques, etc.) ou le substrat d'organismes fixés ou à faible mobilité (moules, huîtres, etc.). Les textures comprises entre celles des sables moyens et des silts sont plus favorables aux activités conchylicoles. Les sédiments trop vaseux sont peu recherchés en raison de la remise en suspension des fractions fines par les courants, provoquant ainsi une hausse de la turbidité et de l'instabilité de ces sédiments et ne permettant pas l'aménagement des structures d'élevage.

La qualité du substrat est définie par sa porosité, la quantité de matière organique présente dans les sédiments et les échanges entre les sédiments et l'eau.

Ainsi, avec la complexité et la multitude des critères de sélection, l'évaluation des sites propices à l'aquaculture devient de plus en plus difficile.

Les données utilisées dans ce travail proviennent des images satellitaires et des données physico-chimiques relevées sur l'ensemble de la lagune.

À l'exception de la bathymétrie, susceptible de grandes variations d'une zone à l'autre au sein de la lagune mais n'ayant pas d'influence notable sur la conchyliculture, les autres paramètres disponibles ont été considérés avec un poids égal dans la démarche utilisée.

Par ailleurs, le pH présente un impact négligeable sur la mise en place d'une activité aquacole, son poids est donc très faible par rapport aux autres paramètres.

3.1. Images satellitaires

Sept images HRV de SPOT sont disponibles sur la lagune. Elles ont été prises entre février 1993 et avril 1999 (tableau 1). Les dates et même les heures de prises de vue sont primordiales pour pouvoir connaître les conditions existantes (marées, pluviométrie, etc.) lors de chaque passage du satellite.

Tableau 1 : Dates et heures d'acquisition des images HRV de SPOT. *Dates and time of SPOT HRV image acquisition*

Image	Date	Heure
1	20 février 1993	11 h 18
2	1er juin 1993	11 h 19
3	25 juillet 1994	11 h 14
4	23 mars 1996	11 h 04
5	3 mars 1997	11 h 08
6	8 mars 1998	11 h 21
7	4 avril 1999	11 h 28

Ces images ont subi un ensemble de traitements à l'aide du logiciel ERDAS IMAGINE version 8.3. Ces traitements ont consisté, entre autres, à améliorer le contraste et au filtrage.

L'amélioration du contraste permet de faciliter l'interprétation des images en appliquant une transformation à l'amplitude du signal de chacun des pixels pour que l'ensemble des amplitudes occupe plus efficacement l'échelle de gris disponible. Le filtrage est une technique qui vise l'élimination de tout bruit contenu dans les données. Le principe se base sur les opérateurs qui restituent le signal en un point grâce à l'information que contiennent les pixels voisins (Martel, 1990).

L'appréciation de la qualité de l'image se fait par l'aptitude à la restitution stéréoscopique, la superposition multibande et multidate. Pour ce faire, la méthode adoptée pour la correction géométrique des images est la méthode polynomiale par le choix des points d'appui (Robin, 1995). Une erreur tolérable a été fixée à 0,5, c'est-à-dire un demi-pixel, ce qui fait plus ou moins 10 m pour l'image HRV qui a une résolution spatiale de 20 m (Robin, 1995). Ainsi, toutes les images ont été corrigées géométriquement avec une erreur variant de 0,2 à 0,4.

Le module *Arctools* d'ArcInfo permet de numériser les images satellitaires. Le module a ainsi servi à la création des couvertures représentant la forme générale de la lagune et de ses chenaux. Cette numérisation a été appliquée sur les images prises aux dates les plus éloignées (20 février 1993 et 4 avril 1999), pour pouvoir mettre en relief l'évolution à long terme. D'autres couvertures ont été utilisées pour représenter la forme de la passe et du goulet, car la passe évolue rapidement (Bazairi, 1999).

La superposition des couvertures pour pouvoir déceler les changements éventuels a été faite à l'aide du logiciel Arcview.

Dans le cas de la bathymétrie, les images satellitaires permettent d'observer des variations radiométriques jusqu'à 30 à 40 m de profondeur (Buttard, 1983).

Les valeurs utilisées dans le modèle sont relevées à partir des données des stations relevées en juillet 1997 (Bayed *et al*., 1998b). Il faut signaler à cet effet que l'image utilisée pour la modélisation est celle de mars 1997 (figure 3) puisque c'est la date la plus proche de celle des mesures bathymétriques in situ (juillet 1997).

Le logiciel SPSS a servi à l'établissement des corrélations entre la bathymétrie et les trois bandes de l'image. Ce sont les bandes XS_1 et XS_2 qui présentent la meilleure corrélation avec la profondeur réelle. Le logiciel a permis de calculer par itération les coefficients A, B et C du modèle semi-logarithmique (Arid *et al*., 1995) :

$$Z = A.\ \mathrm{Ln}\ (R_1 - R_{1inf}) + B.\ \mathrm{Ln}\ (R_2 - R_{2inf}) + C$$

où :

Z est la profondeur mesurée ;

1 et 2 sont les indices des bandes XS_1 et XS_2 ;

R est la radiométrie ;

R_{inf} : radiométrie mesurée sur les grands fonds.

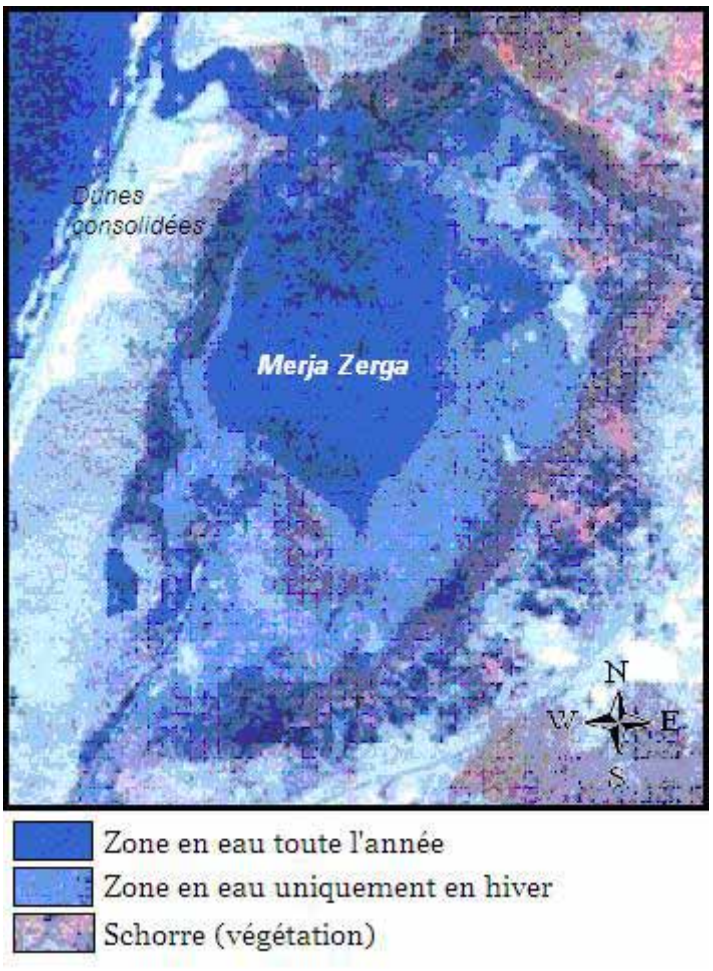


Figure 3 : Représentation de la lagune de Moulay Bousselham sur une image HRV de SPOT (mars 1997). *Representation of the lagoon of Moulay Bousselham on a SPOT HRV image (March 1997)*

3.2. Données physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques nécessaires suivants ont été tirés à partir d'un rapport produit par l'Institut scientifique de Rabat (Bayed *et al*., 1998b) : catégorie de substrat, profondeur de l'eau, température de l'eau de surface, salinité et pH de l'eau en haute et basse mer. Ces paramètres ont été analysés à travers l'ensemble de la lagune sur 86 stations pour le premier paramètre et sur une trentaine de stations pour les autres en juillet 1997.

Pour élaborer les couches thématiques de chaque paramètre, le module *Spatial Analyst* du logiciel Arcview a été utilisé. Il offre la possibilité d'interpoler les paramètres relevés au niveau des stations de prélèvement sur l'ensemble du territoire d'étude.

Les couvertures thématiques de chaque paramètre ont été établies à marée haute et à marée basse car la température, la salinité et le pH changent parfois considérablement en période de flot et l'importance des apports d'eau douce de l'oued Drader et du canal de Nador se fait surtout sentir pendant la période de basse mer.

L'identification des zones à potentiel aquacole consiste à superposer les couvertures (*Overlay*) et à établir des requêtes (*Query*). La superposition permet la juxtaposition des différentes cartes thématiques situées dans la même zone géographique. Elle permet la combinaison d'informations contenues dans chaque polygone, qu'elles soient numériques ou descriptives. Le résultat donne une nouvelle carte contenant toutes les informations des cartes juxtaposées.

L'opération *Query* permet de formuler des requêtes pour identifier une entité dont on connaît la localisation et de donner ses caractéristiques. Elle permet aussi de visualiser la liste des entités ayant des propriétés précises. Celles-ci sont définies dans les requêtes comme la déclaration conditionnelle représentée par trois catégories d'opérateurs : relationnel (<, >, =), arithmétique (+, -, x, /) et booléen (ET, OU, PAS, XOR).

La variabilité dans l'espace et dans le temps des paramètres a permis d'effectuer une analyse de sensibilité de la carte d'indices du potentiel aquacole. La variabilité temporelle des paramètres a été identifiée particulièrement pour la température et la salinité. Des cartes potentiel aquacole–paramètre ont été produites.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1. Évolution de la lagune

Les résultats (figure 4) montrent que la forme générale de la lagune n'a pas subi de grandes variations entre 1993 et 1999 et que la longueur du chenal principal n'a pas tellement évolué, alors que les chenaux secondaires et tertiaires ont subi un changement plus ou moins important.

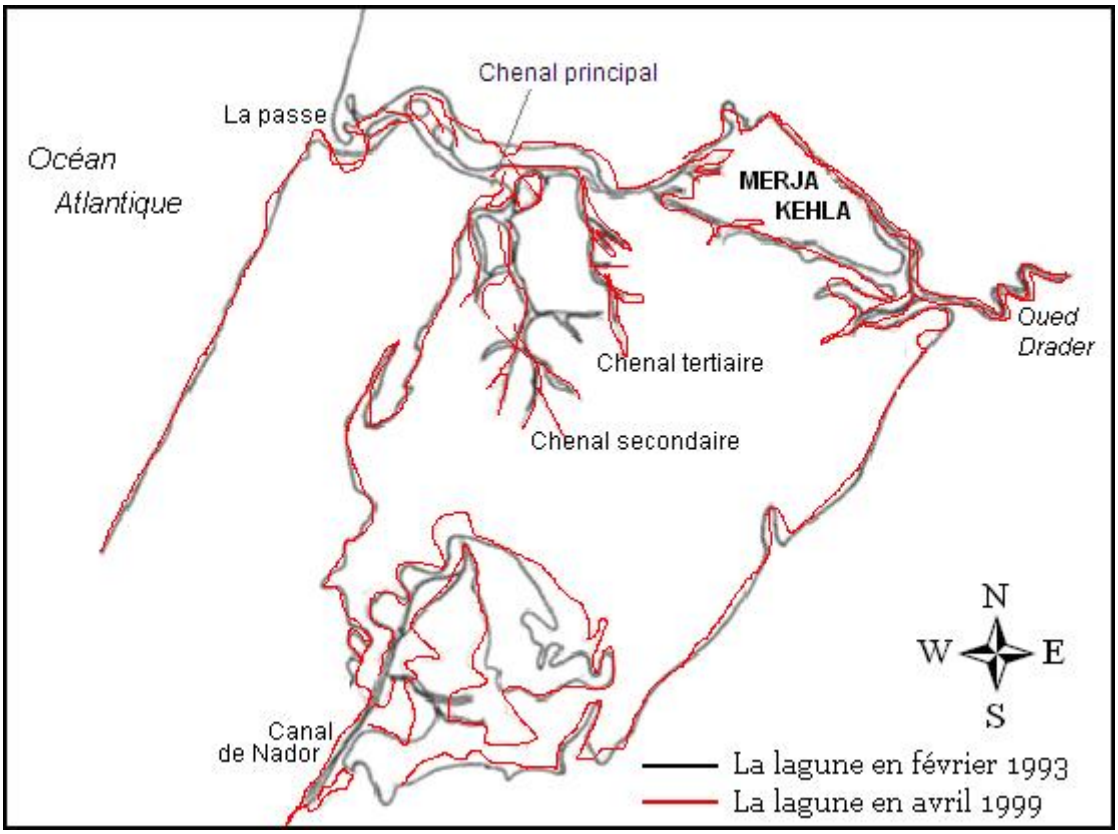


Figure 4 : Évolution générale de la lagune de Moulay Bousselham entre 1993 et 1999. *General evolution of the lagoon of Moulay Bousselham between 1993 and 1999*

Ainsi, la partie terminale du chenal principal s'est éloignée de la passe de 3,8 km en avril 1999 alors que cette distance n'était que de 3,6 km en février 1993, soit une prolongation de 200 m. Le prolongement du deuxième chenal est plus important : la distance séparant son point terminal dans la passe a varié de 2,1 km à 3,7 km, soit une augmentation de 1 600 m. Des affluents supplémentaires se sont creusés, sa partie amont s'est rapprochée davantage du chenal secondaire et de nouvelles ébauches ont marqué aussi les deux autres chenaux. Le delta de l'oued Drader a subi un déplacement plus important estimé à 330 m.

Ces changements peuvent s'expliquer par l'action conjuguée du flot et du jusant, l'importance de l'hydrodynamisme généré par les apports d'eau de l'oued Drader et l'action des courants dans la lagune. Les masses d'eau transportée creusent d'une façon continue les chenaux préexistants.

La partie sud de la lagune s'est envasée. C'est autour du canal de Nador que cet envasement est le plus important, ce qui laisse penser que ce sont les apports de ce canal qui en sont responsables. D'après Carruesco (1989), si ces apports demeurent importants et le niveau marin stable, un comblement total de tout le système lagunaire serait envisageable dans 300 à 400 ans.

La passe et le goulet ont évolué rapidement entre 1993 et 1999 (figure 5). Le changement est même important entre février et juin 1993. L'action hydrodynamique de l'océan (vagues et courants de dérive littorale) ainsi que les courants transportent beaucoup de sable à cet endroit et ce sont eux qui contrôlent la fermeture du goulet, ce qui limite les échanges entre la lagune et l'océan.

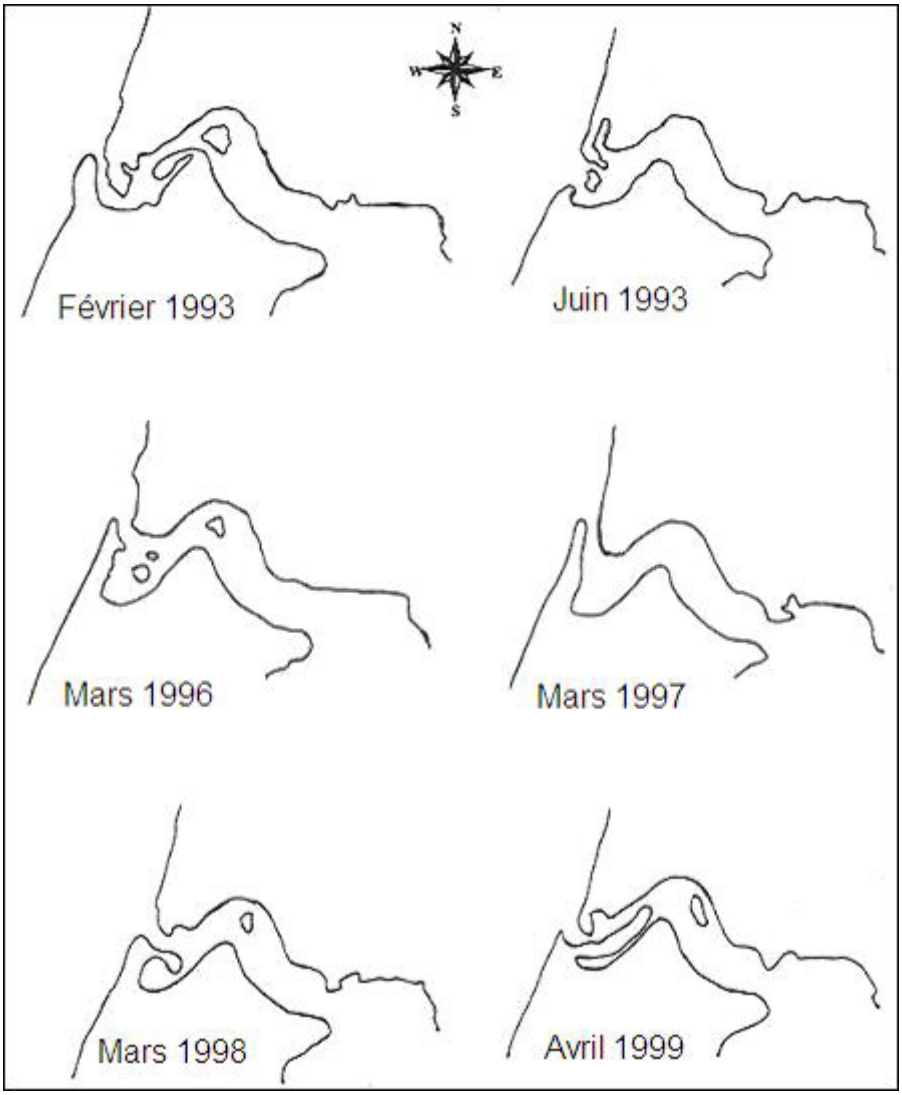


Figure 5 : Évolution multidate (1993-1999) de la passe et du goulet de la lagune de Moulay Bousselham. *Temporal evolution (1993-1999) of the pass and the narrow part of the lagoon of Moulay Bousselham*

Ainsi, le milieu lagunaire de Moulay Bousselham est instable, ce qui peut avoir un impact sur l'implantation de la conchyliculture. En effet, l'ensablement important dans la zone de la passe et l'envasement continu dans la zone du canal de Nador portent un préjudice aux bivalves (organismes filtreurs). Par ailleurs, le développement continu des chenaux, aboutissant en une augmentation de la bathymétrie, pourrait faciliter une telle activité aquacole.

La modélisation de la bathymétrie à travers la régression entre les mesures de réalité de terrain et l'image HRV de mars 1997 a permis d'obtenir l'équation ci-dessous (voir section 3.1) avec un coefficient de corrélation de 0,725 :

$Z = 18{,}545.\ \mathrm{Ln}\ (XS_1 - 20) - 4{,}563.\ \mathrm{Ln}\ (XS_2 - 35) - 65{,}247$

À partir de l'image résultante du modèle bathymétrique, une classification non dirigée a été appliquée à l'image pour bien visualiser les classes de profondeur dans cette image (figure 6). Ce sont les chenaux qui représentent les profondeurs les plus importantes. Ces profondeurs peuvent atteindre 5 m, alors que les autres secteurs de la lagune sont moins profonds (0,1 à 0,5 m). Ces profondeurs ne permettent pas d'envisager une exploitation piscicole surtout en cages flottantes ; par ailleurs, elles ne constituent pas un facteur limitant pour la conchyliculture qui demeure possible même avec une très faible profondeur d'eau.

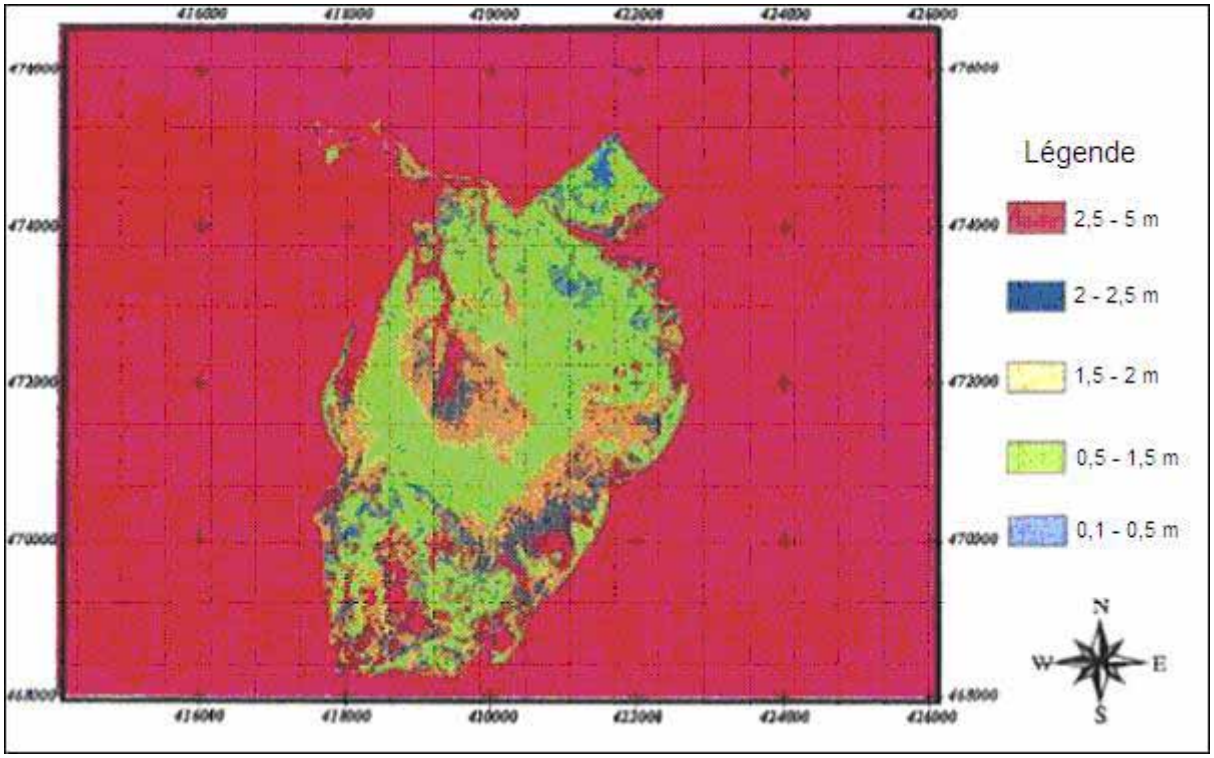


Figure 6 : Carte bathymétrique de la lagune de Moulay Bousselham. *Bathymetric chart of the lagoon of Moulay Bousselham*

4.2. Paramètres physico-chimiques

Dans l'ensemble de la lagune, le pH de l'eau est proche de la neutralité. À marée basse (figure 7a), il n'existe pas de grandes variations ; cependant, la zone de déversements du canal de Nador est légèrement alcaline (7,85). À marée haute (figure 7b), il se produit une forte uniformisation due à l'effet du flot de la marée, mais un gradient ascendant du pH est très marqué au niveau du goulet et les basses valeurs du pH au niveau de la passe s'approchent de la neutralité à mesure qu'on s'en éloigne. Comme c'est le cas pour la bathymétrie, le pH ne constitue pas un facteur limitant pour l'élevage des mollusques. En effet, les différentes valeurs enregistrées se situent dans la gamme de tolérance des espèces (Barnabé, 1989a, b).

À marée haute, la salinité de l'eau varie de 27,93 ‰ à 31,48 ‰ en raison de la forte uniformisation des eaux sous l'effet du flot de la marée (figure 8b). À marée basse (figure. 8a), elle est nettement inférieure à la suite de la dilution des eaux lagunaires par les eaux douces. Mais à ce stade de marée, l'écart est plus marqué puisque les faibles valeurs enregistrées dans l'embouchure de l'oued Drader et du canal de Nador sont de 3,45 ‰ ; par contre les valeurs les plus élevées au niveau du goulet sont de l'ordre de 27 ‰. Ce paramètre constitue un facteur limitant surtout à marée basse où les faibles valeurs pourront porter préjudice aux espèces élevées.

La température de l'eau est supérieure à marée basse (figure 9a) par rapport à celle à marée haute (figure 9b). Ce résultat est dû au réchauffement plus important des eaux à marée basse, surtout durant la période estivale. À marée haute, les eaux marines qui transitent abaissent et uniformisent la température des différents secteurs de la lagune.

Enfin, le substrat du fond des lagunes varie du sable fin à la vase pure (figure 10). Les secteurs sableux sont surtout ceux du goulet et des chenaux principaux alors que les secteurs vaseux se situent dans les zones calmes de la lagune, la vase provenant des apports de l'oued Drader et du canal de Nador. Les secteurs sableux seraient plus propices à la conchyliculture.

Ainsi, considérant l'ensemble des paramètres étudiés, la lagune de Moulay Bousselham est un écosystème de confluence océanique et continentale.

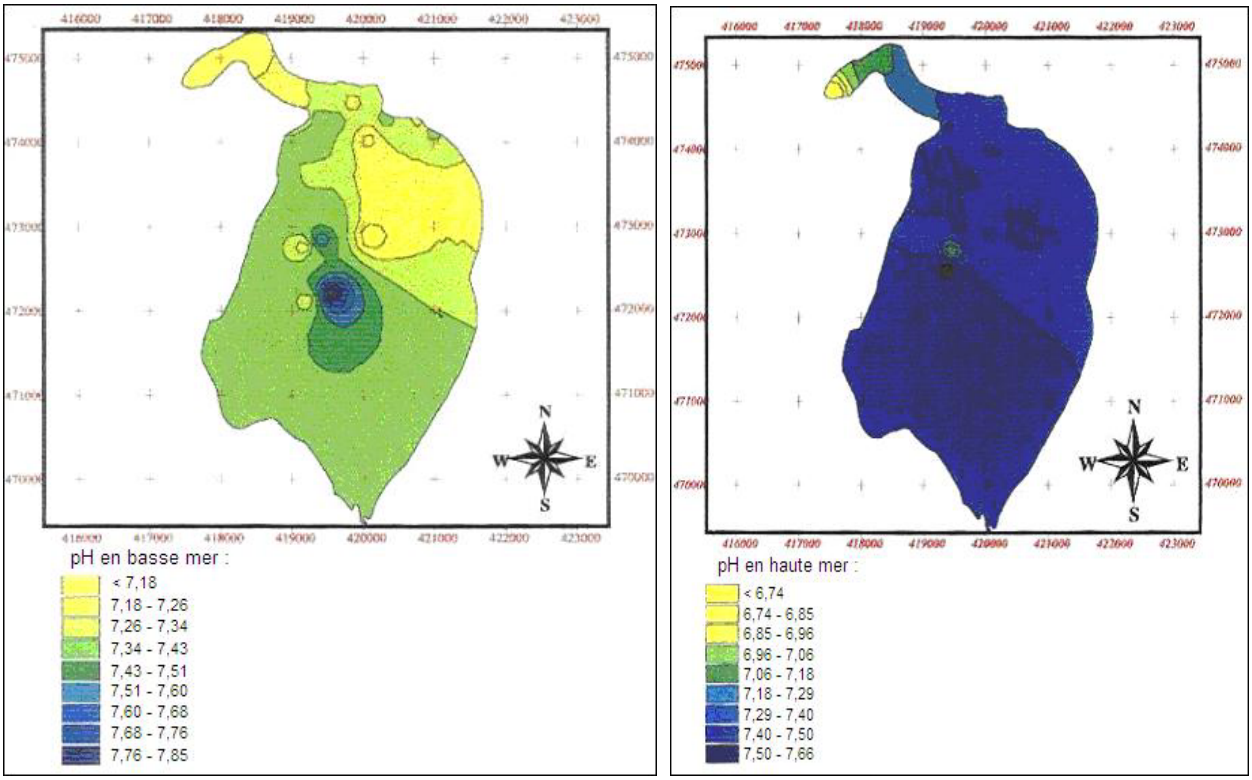


Figure 7 : Répartition du pH dans la Merja Zerga : a) à marée basse ; b) à marée haute. *Distribution of the pH in the Merja Zerga : a) at low tide ; b) at high tide*

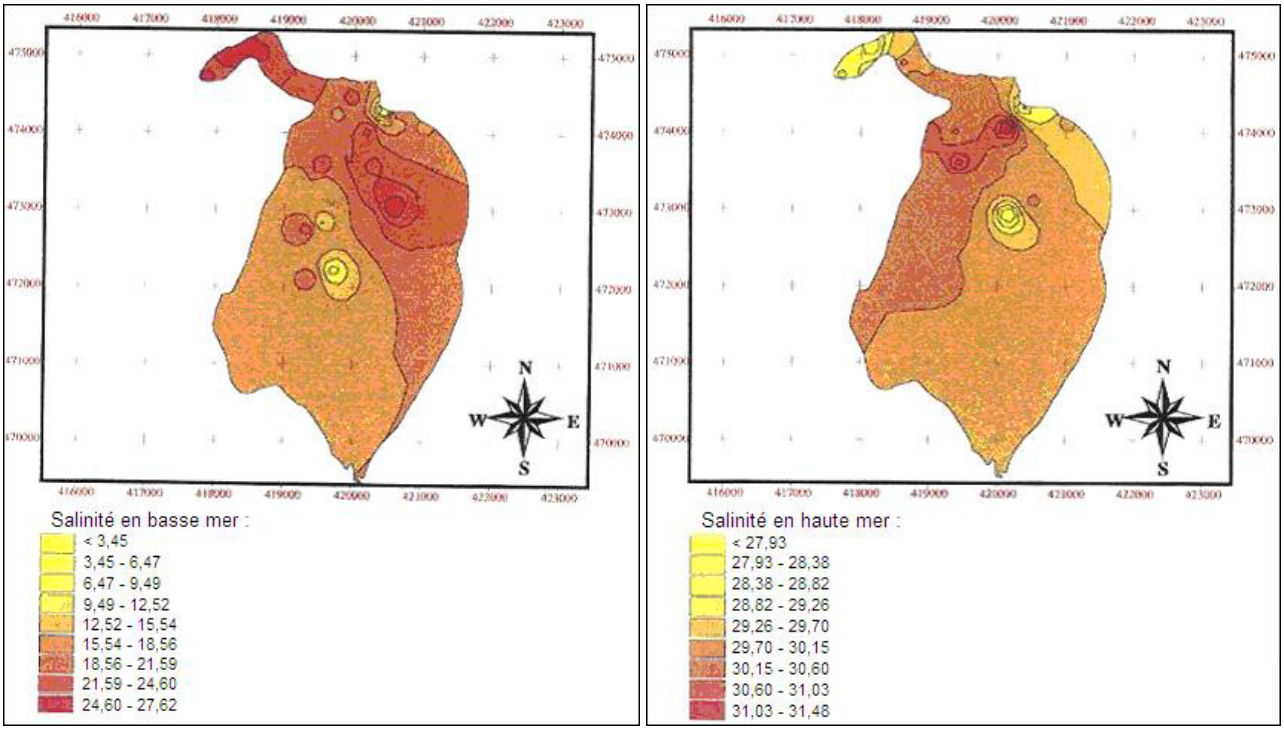


Figure 8 : Répartition de la salinité dans la Merja Zerga : a) à marée basse ; b) à marée haute. *Distribution of salinity in the Merja Zerga : a) at low tide ; b) at high tide*

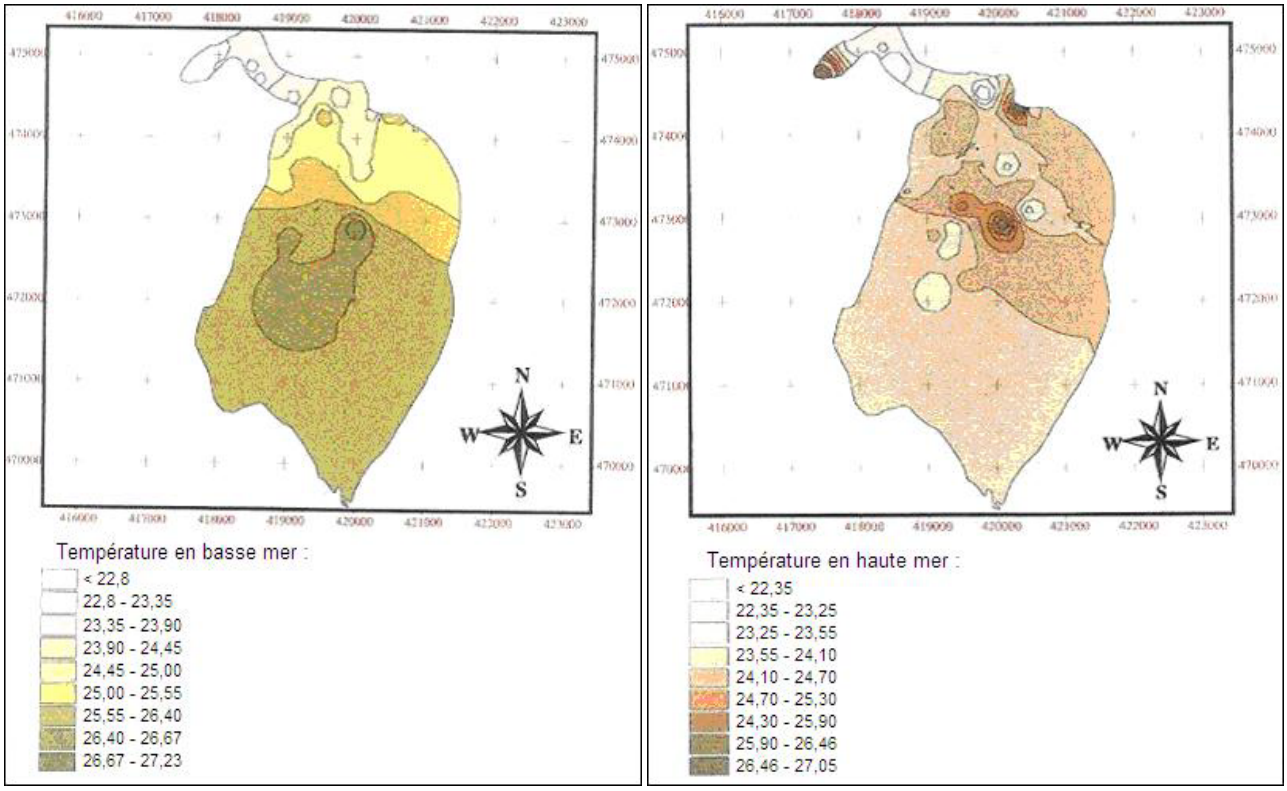


Figure 9 : Répartition de la température dans la Merja Zerga : a) à marée basse ; b) à marée haute. *Distribution of the temperature in the Merja Zerga : a) at low tide ; b) at high tide*

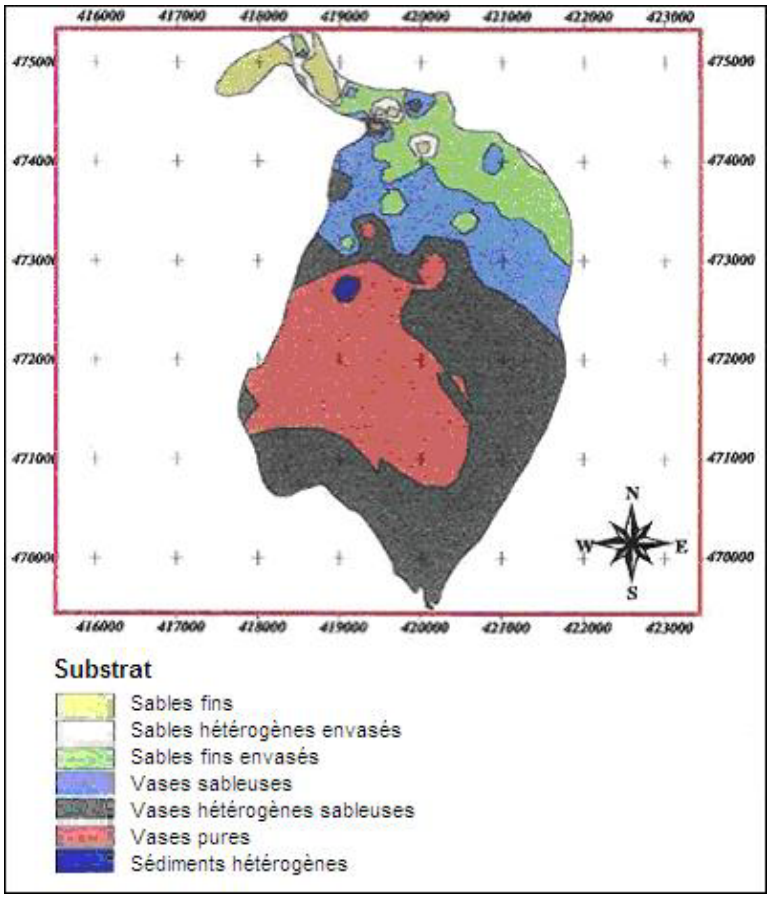


Figure 10 : Répartition des catégories de substrat dans la Merja Zerga. *Distribution of the substrate types in Merja Zerga*

4.3. Zones à potentiel aquacole

Pour trouver les zones à potentiel aquacole, on a effectué une analyse spatiale des cartes thématiques présentées en 4.1 et 4.2. La bathymétrie et le pH n'étant pas des facteurs limitants, les cartes de ces facteurs n'ont pas été considérées.

La première superposition a été faite avec les cartes de la température à haute et basse mer. La fonction *Query* a donné une première zone favorable en fonction de la température quel que soit l'état de la marée (figure 11). Environ 80 % de la superficie de la lagune serait favorable à la conchyliculture en fonction de ce paramètre.

La deuxième superposition a été faite avec les cartes de la salinité à haute et basse mer (figure 12). Il s'agit d'un facteur limitant pour une conchyliculture. Pendant la basse mer, la salinité chute considérablement (3 g/l) surtout près des embouchures de l'oued Drader et du canal de Nador, ce qui peut entraîner des mortalités importantes des bivalves élevées. Un maximum de 20 % de la superficie de la lagune serait favorable à la conchyliculture en fonction de ce paramètre.

La troisième requête a permis de mettre en évidence une zone ayant un substrat sableux favorable à l'installation d'une conchyliculture (figure 13). Environ 40 % de la superficie de la lagune serait favorable à la conchyliculture en fonction de ce paramètre.

Enfin, la dernière superposition a été faite avec toutes les cartes à la fois. Elle a permis de délimiter les zones favorables à un élevage conchylicole (figure 14). Seulement environ 15% de la superficie de la lagune serait favorable à la conchyliculture en tenant compte de l'ensemble des paramètres examinés.

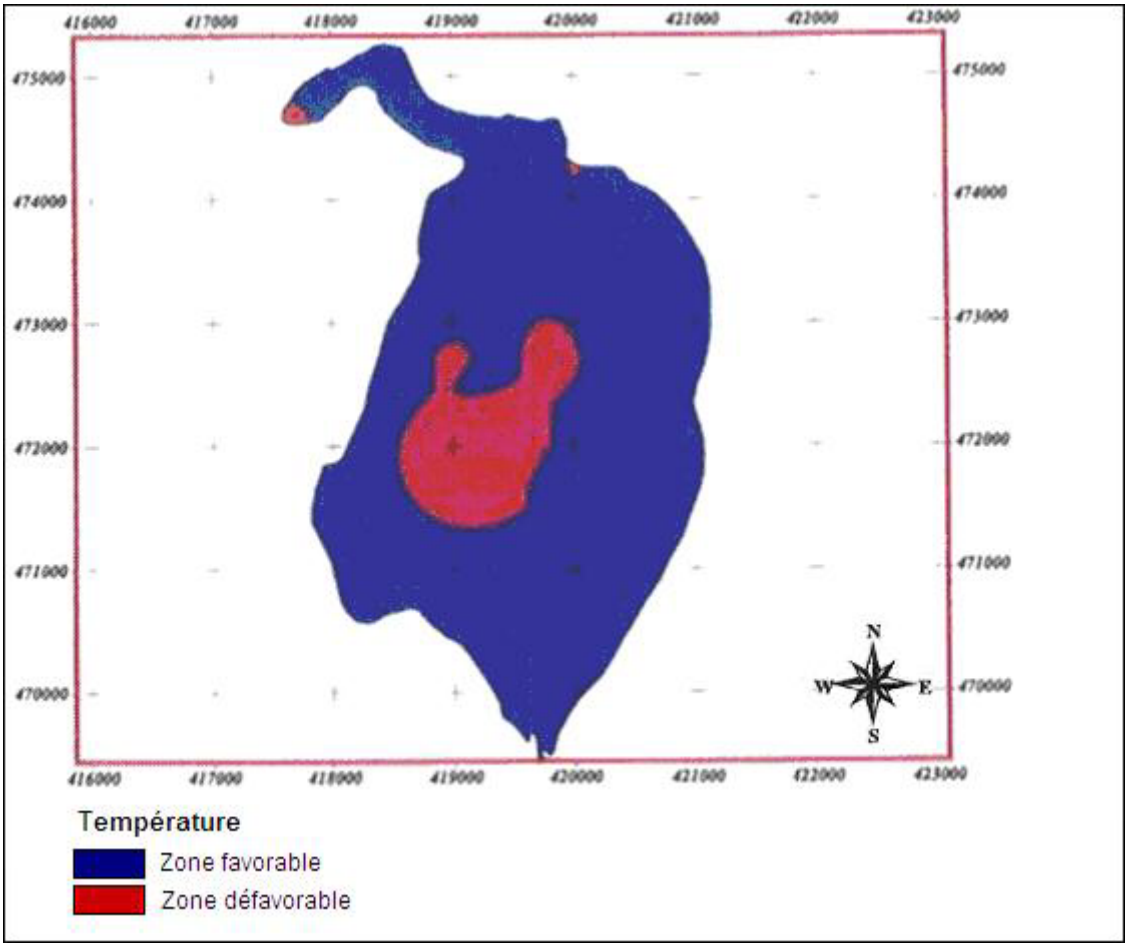


Figure 11 : Zones favorables et défavorables à la conchyliculture selon la température dans la Merja Zerga. *Favourable and unfavourable areas for shellfish farming according to the temperature in the Merja Zerga*

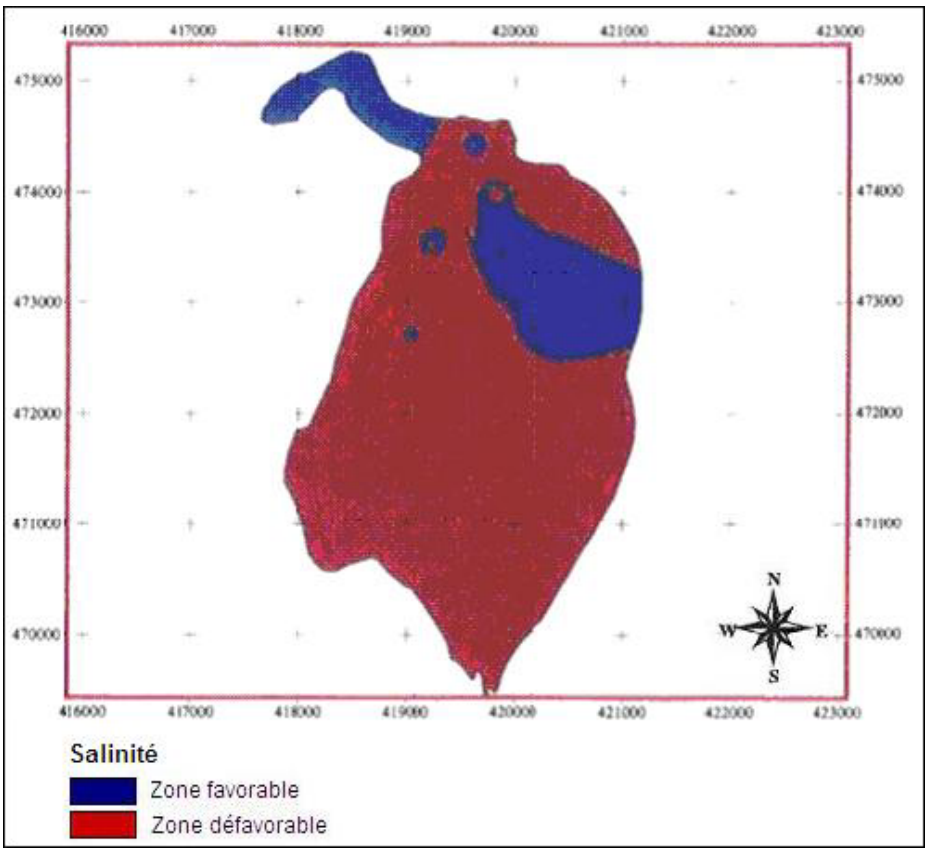


Figure 12 : Zones favorables et défavorables à la conchyliculture selon la salinité dans la Merja Zerga. *Favourable and unfavourable areas for shellfish farming according to the salinity in the Merja Zerga*

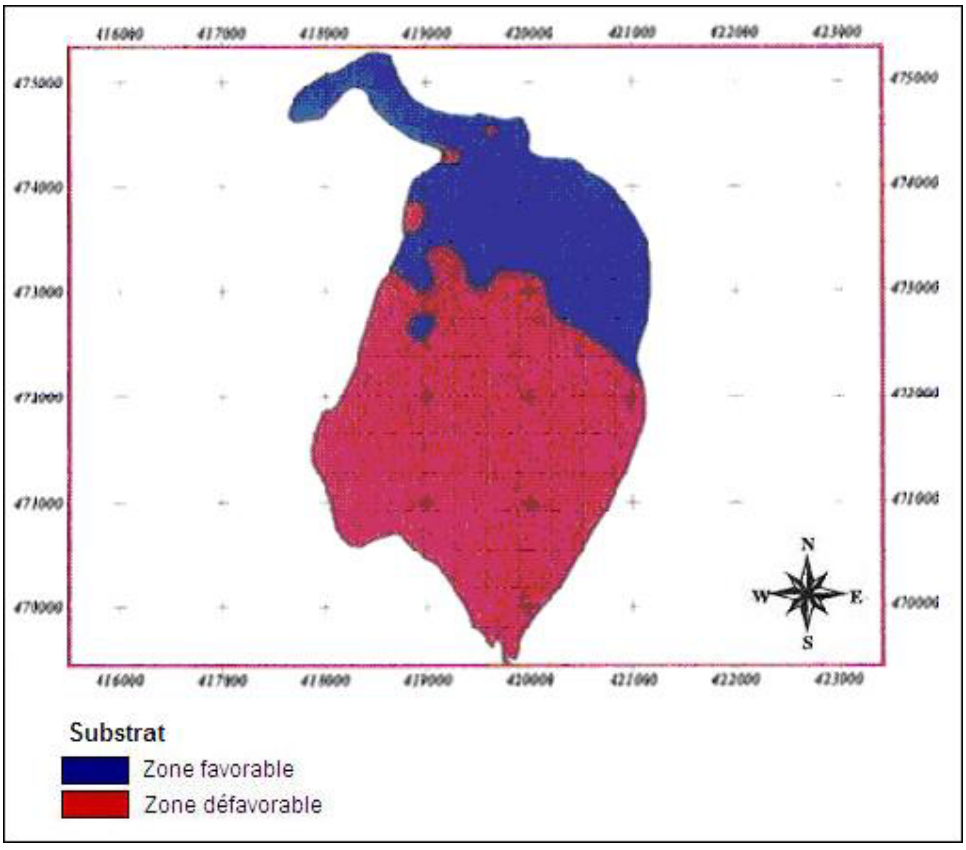


Figure 13 : Zones favorables et défavorables à la conchyliculture en fonction de la catégorie de substrat dans la Merja Zerga. *Favourable and unfavourable areas for shellfish farming according to the substrate type in the Merja Zerga.*

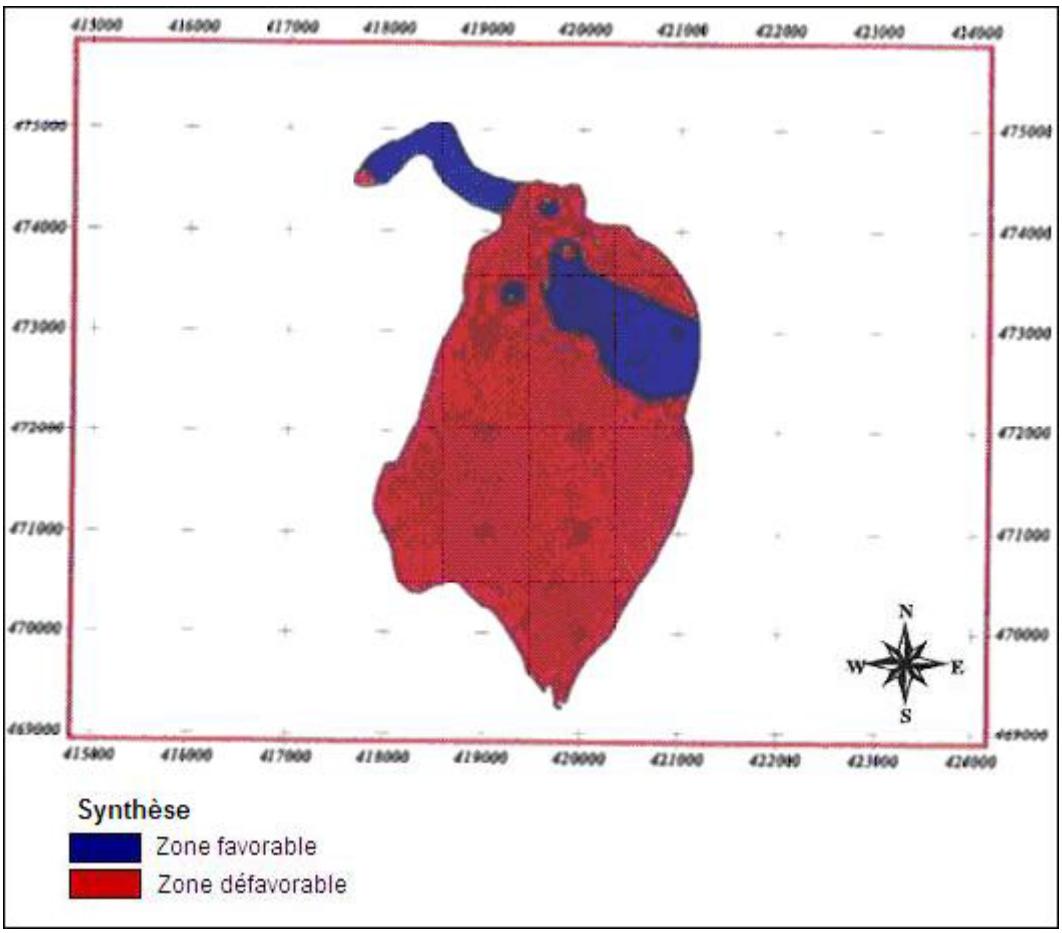


Figure 14 : Zones favorables à la conchyliculture dans la Merja Zerga. *Potential areas for shellfish farming in the Merja Zerga.*

5. CONCLUSION

L'utilisation des images satellitaires et d'un SIG est d'une grande importance pour la sélection des sites propices aux activités aquacoles. Ainsi, ces outils ont permis d'étudier l'évolution de la lagune de Moulay Bousselham, de comprendre l'impact de cette évolution sur d'éventuels sites favorables à la conchyliculture et d'établir les cartes thématiques des différents paramètres physico-chimiques disponibles ainsi que leur superposition, ce qui a permis d'élaborer une carte finale montrant les zones à potentiel conchylicole.

Cependant, plusieurs problèmes persistent encore dans les zones sélectionnées. Aussi, d'autres critères doivent être pris en considération : milieu suffisamment abrité et protégé contre les courants, apports d'eau douce sans atteindre la dessalure, protection contre les prédateurs (*Carcinus maenas*) et concentration faible en macrophytes. La zone du goulet sélectionnée répond parfaitement à ces critères (Gharbi, 1990).

D'autre part, l'étude était basée sur des valeurs de paramètres prélevés en été ; une autre dynamique de la répartition spatiale de ces paramètres peut être envisagée à d'autres périodes (hiver en particulier).

Enfin, l'ensablement de la lagune constitue un handicap majeur pour l'installation conchylicole ; les essais déjà réalisés ont montré que les sables en provenance de l'océan causent de grandes mortalités de bivalves en augmentant lors des grandes marées et intempéries d'une manière brutale la turbidité de la lagune.

Outre les recommandations qui découlent de ces remarques, le résultat ne peut être considéré comme définitif sans tenir compte d'autres paramètres notamment la chlorophylle, les matières en suspension et les éléments nutritifs. De même, un aménagement de la passe est indispensable pour diminuer l'effet de l'ensablement et empêcher sa fermeture.

Remerciements

Ce travail est dédié à Ferdinand Bonn, l'homme qui a consacré presque toute sa vie à faire connaître la télédétection. C'est à travers sa grande expérience et ses écrits que j'ai pu mesurer l'importance de cette science horizontale me permettant de faire des applications sur le monde aquatique.

Ce travail n'aurait pu être réalisé sans le concours du Centre royal de télédétection spatiale qui a mis à notre disposition les images HRV de SPOT. Que les responsables de cette Institution soient vivement remerciés pour leur collaboration indispensable.

Références

Arid, H., Moustatir, A., Lamrini, A. et Orbi, A. (1995) La lagune de Nador : étude et aide à la gestion. Géo-observateur, n° 6, p. 35-48.

Barnabé, G. (1989a) Bases biologiques et écologiques de l'aquaculture. Édition Lavoisier, Paris, 500 p.

Barnabé, G. (1989b) Aquaculture. Édition Lavoisier, Paris, 2 vol., 1293 p.

Bayed, A., Bazairi, H., Benhoussa, A. et Quinba, A. (1998a) La pêche à Merja Zerga. Administration des eaux et forêt et de la conservation des sols/ Programme « Mediterranean Wetlands Initiative » : Conservation et utilisation rationnelle des zones humides méditerranéennes, Rabat, rapport inédit, 70 p.

Bayed, A., Bazairi, H., Benhoussa, A., Dakki, M., Elagbani, M.A., Fekhaoui, M. et Quinba, A. (1998b) Diagnostic écologique de Merja Zerga : Bathymétrie, Hydrologie, Qualité des eaux, Sédiments et Macrofaune benthique. Administration des eaux et forêt et de la conservation des sols/ Programme « Mediterranean Wetlands Initiative » : Conservation et utilisation rationnelle des zones humides méditerranéennes, Rabat, rapport inédit, 75 p.

Bazairi, H. (1999) La faune macro benthique de la lagune de Moulay Bousselham. Thèse de doctorat, Université Mohamed V, Rabat, 199 p.

Beaubrun, P.C. (1976) La lagune de Moulay Bousselham. Étude hydrodynamique et sédimentologique. Bulletin de l'Institut scientifique, Rabat, n° 1, 22 p.

Bidet, J.C. (1977) Un milieu sédimentaire actuel : la lagune de Moulay Bousselham (côte atlantique marocaine). Bulletin de l'Institut de géologie du bassin d'Aquitaine (Bordeaux), n° 22, p. 189-230.

Bonn, F. et Rochon, G. (1992) Précis de la Télédétection, Vol. 1 : Principes et méthodes. Presses de l'Université du Québec/AUPELF, Sainte-Foy, 485 p.

Bour, W. (1990) Coastal and coral reef studies in New Caledonia using Spot images for environment and management monitoring. Economic and Social Commission for Asia and Pacific/United Nations Development Programmes, p. 40-44.

Buttard, P. (1983) GIS. Geographic Information System. An introduction. Mapping Awarences, vol. 2, n° 2, p. 31-34.

Carruesco, C. (1989) La lagune de Moulay Bousselham (Côte atlantique, Maroc), un environnement côtier artificiel. Sciences Géologiques Memorandum, n° 84, p. 145-158.

Cordell, E.V. and Noite, D.A. (1988) Feasibility of using remote sensing to identify the aquaculture potential of coastal waters. Reconnaissance Technologies Inc., Oregon, 16 p.

Dakki, M., Quinba, A. et Elagbani, M.A. (1998) Habitats d'un site RAMSAR côtier. Administration des eaux et forêt et de la conservation des sols/ Programme « Mediterranean Wetlands Initiative », Rabat, rapport inédit, 75 p.

Dubois, J.-M.M. et Habbane, M. (2002) Méthodologie pour un zonage aquicole régional à l'aide de la télédétection dans un SIRS : application dans la baie des Chaleurs, Québec. Le Géographe Canadien, vol. 46, n° 2, p. 172-185.

Dumas, P. (1988) Apport de la télédétection au domaine côtier. Mémoire de DEA, Université de Bordeaux, Bordeaux, 92 p.

Gharbi, N. (1990) Essai d'élevage de la palourde *Ruditapes decussatus (L.)* dans la lagune de Moulay Bousselham. Thèse de doctorat de 3e cycle, Faculté des sciences, Rabat, 146 p.

Girard, M.C. et Girard, C.M. (1989) Télédétection appliquée : zones tempérées et intertropicales. Collection sciences agronomiques, Masson, Paris, 260 p.

Grenier, M., Dubois, J.-M.M., Lavoie, A. et Lambert, É. (1989) Télédétection des sites à

potentiel aquicole dans la baie des Chaleurs : résultats préliminaires. Vol. 4, p. 2459-2462, *in* Comptes rendus du 12e Symposium canadien sur la télédétection et IGARSS 1989, Vancouver, 10-14 juillet 1989, IEEE, 3001 p.

Gruvel, A. (1931) Étude sur les lagunes de la côte occidentale du Maroc. Société d'éditions géographiques maritimes et coloniales, Tome V, Fascicule 6, Paris, 36 p.

Habbane, M. (1997) Télédétection passive et processus décisionnel à référence spatiale : application à l'aquaculture en milieu marin. Thèse de doctorat, Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke, 203 p.

Habbane, M. et Dubois, J.-M.M. (1996) Zonage aquicole en milieu marin par télédétection : évaluation des paramètres et des capteurs. Photo-interprétation, n° 1996-1, p. 63-80.

Habbane, M., El-Sabh, M.I. et Dubois, J.-M.M. (1997) Potentiel aquacole par télédétection passive : application aux eaux côtières de la baie des Chaleurs, est du Canada. International Journal of Remote Sensing, vol. 18, n° 16, p. 3439-3457.

Haida, S., Ait Fora, A., Prolest, J.L., et Snoussi, M. (1999) Hydrologie et fluctuations hydroclimatiques dans le bassin versant du Sebou entre 1940 et 1994. Sécheresse/Sciences et changements planétaires, vol. 10, n° 3, p. 221-226.

Honne, H., Cowda, K. and Ganesha Raj, A. (1995) Multidate satellite data for study of the dynamics of coastal landforms of Uttara Kannada, South India. International Journal of Remote Sensing, vol. 16, n° 14, p. 2539-2553.

Huguenin, J.E. and Colt, J. (1989) Design and operating guide for aquaculture seawater systems. Developments in Aquaculture and Fisheries Science, Elsevier, Amsterdam, 264 p.

Kapetsky, J.M. (1989) Malaysia. A geographical information system for aquaculture development in Johor State. Food Agriculture Organisation, Report prepared for the project Land and Water Use Planning for Aquaculture Development, Rome, 62 p.

Kapetsky, J.M. (1991) Where are the best opportunities for fish farming in Ghana ? The Ghana geographical information system as a decision making tool for fish farming development. Food Agriculture Organization, Technical assistance and investment framework for aquaculture in Ghana, Field Technical Report 5, Rome, 262 p.

Kapetsky, J.M. (1994) A strategic assessment of warm water fish farming potential in Africa. Food Agriculture Organization, Committee for Inland Fisheries of Africa, Technical Paper, Rome, 67 p.

Kapetsky, J.M., Mc Gregor, L. and H. Nanne, E. (1987) A geographical information system and satellite remote sensing to plan of aquaculture development. Food Agriculture Organization – United Nations Environment Programmes/Global Resource Information Database Cooperative Study in Costa Rica, Fisheries Technical Paper n° 287, Rome, 51 p.

Lacoste, M. (1984) Contribution à l'étude écologique de la lagune de Moulay Bousselham (Maroc). Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 207 p.

Martel, C. (1990) Analyse géométrique et physique d'images d'observation de la terre : éléments d'hydrodynamique côtière. Thèse de doctorat. Université Paul Sabatier, Toulouse, 198 p.

Nakay, A.N. and Sahay, B. (1983) Morphological changes in the Mahy estuary. Application of remote sensing to natural resources, Bombay. International Journal of Remote Sensing, vol. 4, p. 152-154.

Nakay, A.N. and Sahay, B. (1984) Coastal geomorphology of the gulf of Khambhat, Baroda. International Journal of Remote Sensing, vol. 5, p. 87-96.

Nakay, A.N. and Sahay, B. (1985) Coastal geomorphology of the gulf of Khambhat (Combay). International Journal of Remote Sensing, vol. 6, pp. 559-567.

Nassir, A. (1990) The application of remotely sensed data to coastal geomorphological studies in Pakistan. Remote Sensing for Marine Studies. Economic and Social Commission for Asia and Pacific / United Nations Development Programmes, Regional Remote Sensing Programme, Beijing, p. 71-76.

Nurridinov, O.S. (1998) Use of remote sensing in the study of the changing of Sary Kamysh Lake. Mapping Science and Remote Sensing, vol. 26, n° 1, p. 74-77.

Robin, M. (1995) La télédétection des satellites aux systèmes d'information géographique. Éditions Nathan, Paris, 318 p.

Rosenfeld, A. (1969) Picture processing computer. Academic Press, New York, 700 p.

Servan, M. and Raban, C. (1993) Detecting water quality parameters in the Norfolk Boards, U.K, using Landsat imagery. International Journal of Remote Sensing, vol. 14, n° 7, p. 1247-1267.

Thomas, Y.-F. (1984) Télédétection des structures turbides en Manche. L'espace géographique : régions, environnement et aménagement, Tome 13, n° 3, p. 273-276 et 291-294.

Williamson, E.J. and Wilkinson, G.A. (1980) Sea surface temperature from Meteosat. P. 710-719, *in* Proceedings of the Second METEOSAT Scientific User Meeting, 26-27 mars 1980, London, European Space Operations Centre/European Space Agency, Darmstadt.

Zarzoso, A. (1982) Hydrodynamique de la lagune de Moulay Bousselham (Merja Zerga –Maroc). Travaux et documents de l'Institut scientifique des pêches maritimes, Casablanca n° 36, 14 p.

Zarzoso, A. (1987) Le plio-quaternaire du haut Gharb dans le contexte rifain. Évolution géodynamique dans le cadre néotectonique du Maroc septentrional. Thèse de doctorat d'état, Université de Nice, Nice, 257 p.

Zhang, X. (1998) Estimation of the emergent vegetation biomass in Lake Honghu by using Landsat imagery. International Journal of Remote Sensing, vol. 19, n° 1, p. 11-22.